

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

**Pago de Servicios ambientales para la implementación de sistemas agroforestales  
en áreas críticas de las cuencas generadoras de energía eléctrica María Linda y  
Los Esclavos, Guatemala**

Tesis sometida a la consideración de la Escuela de Posgrado, 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:

Magíster Scientiae

Por

**Walter Irene Robledo Hernández**

Turrialba, Costa Rica  
2003



## DEDICATORIA

### **A Dios**

Por ser infinito amor y respaldo en todos los momentos de mi vida, por ser la roca firme donde siempre he podido apoyarme.

### **A mis padres**

Gilberto Adiel Robledo Pérez y Ángela Hernández de Robledo: quienes me han enseñado lo que es mas importante en la vida, el amor y respaldo a la familia.

### **A mi esposa**

Jeanneth Del Cid de Robledo por su amor, paciencia y motivación en cada momento y a mis queridos hijos: Jennifer, Walter y Ronald, con amor y cariño, quienes aceptaron sacrificar tantas horas que les pertenecían y que les fueron sustraídas en la absorbente tarea de culminar mis estudios de Posgrado.

### **A mis hermanos**

Alicia (QEPD) que Dios le permita despertar un momento para compartir conmigo tan importante triunfo.

A Sandra por su apoyo moral y espiritual y estar siempre cerca aun en la distancia, a Chepe por haberme motivado y apoyado para continuar el Posgrado y para Amilcar que este sea un ejemplo digno de imitar para su formación profesional.

### **A mis sobrinas**

Mariajosé, Marialejandra y Mariaceleste: porque siempre preguntaron por sus tíos y primos.

A mis suegros Alfredo Telón y Amalia Del Cid, cuñadas, cuñados y primos: por el apoyo moral y espiritual que me brindaron.

A familiares y hermanos en Cristo: por mantener esa cadena de oración permanente con la finalidad de culminar con éxito mis estudios de Posgrado.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias al valioso apoyo de las siguientes personas y organizaciones, de las cuales quiero agradecer de manera especial.

Al Proyecto Fortalecimiento de la capacidad local para el manejo de cuencas y la reducción de la vulnerabilidad a los desastres naturales FOCUENCAS por la beca otorgada para realizar mis estudios de Posgrado.

Al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE, por la capacitación, albergue y personal idóneo para realizar mis estudios de Posgrado.

A Alan González Figueroa *Ph.D.* Consejero Principal, por su apoyo incondicional en la consecución de la beca, ayuda, motivación, consejos y orientación en mis estudios de Posgrado.

A los miembros del Comité Consejero, Francisco Jiménez, *Dr.Sc.*, Eddy Díaz *M.Sc.*, Sergio Velásquez, *M.Sc.*, y Manuel Gómez, *M.Sc.*, por su valiosa colaboración, apoyo incondicional y amistad

A La familia González Dubón, con aprecio y respeto por todo el apoyo brindado en CATIE, especialmente a mi familia.

A la familia Díaz Visquerra con mucho cariño y respeto por la amistad sincera tanto a mí como a mi familia en general y por haberme brindado siempre el apoyo necesario para la culminación de mis estudios de Posgrado.

A la familia Velásquez Vásquez, con cariño y respeto por la amistad brindada en CATIE especialmente a mi familia cuando más lo necesitábamos, lo que hizo que el tiempo fuera inolvidable.

A la familia López Pérez, con mucho cariño por el apoyo moral brindado en su momento.

A la familia Prins Flores, por el apoyo y amistad en CATIE, especialmente a mi familia

Al Instituto Nacional de Electrificación, Ing. Arturo Acajabón, Dogofredo Polanco, Fredy Ruiz, Hugo Calcia, Moisés López y don Tito Juárez, por su valiosa colaboración en la facilitación de la información.

A los Ingenieros de PROFRUTA, Federico Carrera y Mario Tarot, por su amistad y colaboración para la realización de esta investigación, extensivo para el personal técnico de INAB participante, especialmente a Ebal Sales y Quique Guzmán.

A FUNDAECO, especialmente al Lic. Marco Vinicio Cerezo y a Jorge Aguilar.

A los Bibliotecarios Ing. Rolando Aragón (FAUSAC) y Sra. Patricia Montavan (INFOAGRO).

Y a todas las personas que directa e indirectamente hicieron posible la realización de esta tesis.

## LISTA DE ABREVIATURAS

CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
EGEE	Empresa de Generación de Energía Eléctrica
INAB	Instituto Nacional de Bosques
INDE	Instituto Nacional de Electrificación
INSIVUMEH	Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales
MEM	Ministerio de Energía y Minas
SAFF	Sistemas Agroforestales con Frutales
SAFM	Sistemas Agroforestales con Maderables
PSA	Pago por Servicios Ambientales
PROFRUTA	Proyecto de la Fruticultura y Agroindustria
SIG	Sistema de Información Geográfica

# CONTENIDO

DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
LISTA DE ABREVIATURAS .....	V
CONTENIDO .....	VI
LISTA DE CUADROS .....	VIII
LISTA DE FIGURAS .....	IX
RESUMEN .....	X
SUMMARY .....	XI
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	2
1.3 OBJETIVOS .....	5
1.3.1 <i>General</i> .....	5
1.3.2 <i>Específicos</i> .....	5
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>6</b>
2.1 ANTECEDENTES DE ESTUDIOS Y DESARROLLO INSTITUCIONAL SOBRE INCENTIVOS AMBIENTALES. 6	
2.2 CONCEPTOS TEÓRICOS DE EXTERNALIDADES.....	7
2.3 EL SERVICIO AMBIENTAL HÍDRICO Y SU IMPORTANCIA .....	9
2.4 LOS ECOSISTEMAS BOSCOSOS Y SU IMPORTANCIA EN LA DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO 10	
2.4.1 <i>Importancia del cultivo de café bajo sombra</i> .....	11
2.4.2 <i>Cantidad y calidad de agua</i> .....	12
2.4.3 <i>La erosión y su modelación</i> .....	14
2.4.4 <i>Sedimentación</i> .....	15
2.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SERVICIO AMBIENTAL HÍDRICO.....	16
2.5.1 <i>Valor de la productividad hídrica del bosque (valor de captación)</i> .....	16
2.5.2 <i>Valor del agua como insumo de la producción</i> .....	18
2.5.3 <i>Valor del agua en la generación de energía eléctrica</i> .....	19
2.5.4 <i>Valor económico de los bosques o sistemas agroforestales</i> .....	19
2.5.4.1 <i>Valor de uso</i> .....	20
2.5.4.2 <i>Valor de no uso</i> .....	20
2.6 IMPORTANCIA DE LOS BOSQUES EN HIDROLOGÍA.....	22
2.7 CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y PRODUCTIVIDAD HIDROELÉCTRICA .....	23
2.7.1 <i>Factores distintivos de una cuenca</i> .....	25
2.7.2 <i>Parámetros físicos de la forma de una cuenca</i> .....	25
2.7.3 <i>Hidroelectricidad</i> .....	26
2.8 PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES.....	26
2.8.1 <i>Oferentes de servicios ambientales</i> .....	27
2.8.2 <i>Demandantes de servicios ambientales</i> .....	27
2.8.3 <i>Esquemas de pago por servicios ambientales</i> .....	28
2.8.4 <i>Incentivos y pago de servicios ambientales</i> .....	31
2.8.5 <i>Tipos de servicios ambientales</i> .....	31
2.8.6 <i>Protección de las fuentes productoras de agua para uso urbano, rural e hidroeléctrico</i> .....	32
2.8.7 <i>Importancia de los servicios ambientales como herramienta de manejo de cuencas</i> .....	32
2.8.8 <i>La valoración económica y el pago por servicios ambientales</i> .....	33

<b>3.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>36</b>
3.1	<i>Cuenca del Río María Linda.....</i>	36
3.1.1	<i>Planta hidroeléctrica Aguacapa.....</i>	37
3.2	<i>Cuenca del Río Los Esclavos.....</i>	38
3.2.1	<i>Planta hidroeléctrica Los Esclavos.....</i>	39
<b>4.</b>	<b>METODOLOGÍA DEL ESTUDIO.....</b>	<b>40</b>
4.1	IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS CRÍTICAS QUE AFECTAN LA CALIDAD Y CANTIDAD DE AGUA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	40
4.1.1	<i>Análisis espacial.....</i>	40
4.2	CUANTIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS OCASIONADOS POR LA EROSIÓN GENERADA EN DIFERENTES USOS DE LA TIERRA QUE AFECTAN LA CALIDAD Y CANTIDAD DE AGUA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	43
4.2.1	<i>Estimación de erosión.....</i>	43
4.2.1.1	<i>Factor R.....</i>	43
4.2.1.2	<i>Factor longitud de la pendiente (LS).....</i>	44
4.2.1.3	<i>Factor de erodabilidad del suelo K.....</i>	46
4.2.1.4	<i>Factor cobertura “C”.....</i>	46
4.2.1.5	<i>Factor P.....</i>	46
4.2.2	<i>Estimación y clasificación de la erosión.....</i>	46
4.2.3	<i>Estimación económica de las externalidades negativas para la generación de energía eléctrica. 47</i>	47
4.3	IDENTIFICACIÓN Y PRIORIZACIÓN DE LAS ÁREAS POTENCIALES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES EN LAS CUENCAS MARÍA LINDA Y LOS ESCLAVOS.....	52
4.4	PROPUESTA DE UN MECANISMO DE COMPENSACIÓN PARA EL PAGO DE SERVICIOS AMBIENTALES POR LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS AGROFORESTALES EN ÁREAS CRÍTICAS DE LAS DOS CUENCAS..	54
4.5	FORMULACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y EVALUACIÓN AMBIENTAL EN LAS ÁREAS CRÍTICAS DE LAS CUENCAS MARÍA LINDA Y LOS ESCLAVOS.....	55
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>57</b>
5.1	IDENTIFICACIÓN DE LAS ÁREAS CRÍTICAS QUE AFECTAN LA CALIDAD Y CANTIDAD DE AGUA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	57
5.2	CUANTIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS OCASIONADOS POR LA EROSIÓN GENERADA EN LOS DIFERENTES USOS DE LA TIERRA QUE AFECTAN LA CALIDAD Y CANTIDAD PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	60
5.2.1	ESTIMACIÓN DE COSTOS EVITADOS.....	61
5.2.1.1	<i>Embalse Aguacapa.....</i>	61
5.2.1.2	<i>Embalse Los Esclavos.....</i>	62
5.2.1.3	<i>Contenido de sedimentos que llegan al embalse Los Esclavos.....</i>	64
5.2.1.4	<i>Clases de erosión en los diferentes escenarios en la cuenca Los Esclavos.....</i>	64
5.2.1.5	<i>Clases de erosión en los diferentes escenarios en la cuenca María Linda.....</i>	68
5.3	IDENTIFICACIÓN Y PRIORIZACIÓN DE ÁREAS APTAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES EN LAS CUENCAS MARÍA LINDA Y LOS ESCLAVOS.....	72
5.4	PROPUESTA DE UN MECANISMO DE COMPENSACIÓN PARA EL PAGO DE SERVICIOS AMBIENTALES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS AGROFORESTALES EN ÁREAS CRÍTICAS DE LAS DOS CUENCAS	77
5.5	SISTEMA DE MONITOREO Y EVALUACIÓN AMBIENTAL EN LAS ÁREAS CRÍTICAS PARA LAS CUENCAS MARIA LINDA Y LOS ESCLAVOS.....	81
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>84</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>86</b>
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>87</b>

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.	Definición y ponderación de variables con su respetivo peso .....	42
Cuadro 2.	Clasificación de la pérdida de suelo propuesta por la FAO (1980) .....	46
Cuadro 3.	Situación actual de las áreas por categoría y peso .....	53
Cuadro 4.	Áreas críticas por categoría de priorización en las dos cuencas .....	57
Cuadro 5.	Cantidad de erosión en $t.ha^{-1}.año$ en cada una de las cuencas con diferentes escenarios de uso de la tierra.....	60
Cuadro 6.	Costos de mantenimiento del embalse Aguacapa/ año .....	61
Cuadro 7.	Costos totales anuales por mantenimiento del embalse Los Esclavos.....	63
Cuadro 8.	Incremento y costo total / $t.ha^{-1}.año$ de sedimentos en el Embalse Los Esclavos. ....	64
Cuadro 9.	Clase de erosión por cada escenario en la cuenca Los Esclavos .....	64
Cuadro 10.	Clase de erosión por cada escenario en la cuenca María Linda.....	68
Cuadro 11.	Áreas aptas por cultivo y por categoría en cada una de la cuencas. ....	72
Cuadro 12.	Matriz para el monitoreo ambiental.....	82

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Valor económico total de los SAF .....	20
Figura 2.	Esquema de Pago por Servicios Ambientales (Pérez et al, 2000) .....	29
Figura 3.	Ubicación de la Planta Hidroeléctrica Aguacapa y Los Esclavos .....	39
Figura 2.	Flujograma del procedimiento utilizado para identificación de áreas críticas .....	41
Figura 3.	Proceso desarrollado en Arc View para estimar LS, Engel (1999) .....	45
Figura 4.	Flujograma utilizado para determinar la erosión total escenario actual.....	48
Figura 5.	Flujograma utilizado para determinar la erosión total corregida .....	49
Figura 6.	Flujograma utilizado para determinar la erosión total con el escenario agrícola.....	50
Figura 7.	Flujograma utilizado para determinar la erosión total con el escenario agroforestal.....	51
Figura 8.	Flujograma del procedimiento utilizado para la identificación de las áreas aptas para el establecimiento de los cultivos frutales .....	52
Figura 9.	Flujograma del procedimiento utilizado para la identificación de las áreas priorizadas para el establecimiento de los SAFM.....	53
Figura 10.	Esquema básico de análisis de los indicadores .....	56
Figura 11.	Mapa de ubicación de categorías de priorización cuenca Los Esclavos.	58
Figura 12.	Mapa de ubicación de categorías de priorización cuenca Los Esclavos.	59
Figura 13.	Mapa con la clase de erosión en el escenario Actual cuenca Los Esclavos .....	65
Figura 14.	Mapa con la clase de erosión en el escenario Agrícola cuenca Los Esclavos.....	66
Figura 15.	Mapa con la clase de erosión en el escenario Agroforestal cuenca Los Esclavos.....	67
Figura 16.	Mapa con la clase de erosión en el escenario Actual cuenca María Linda .....	69
Figura 17.	Mapa con la clase de erosión en el escenario Agrícola cuenca María Linda.....	70
Figura 18.	Mapa con la clase de erosión en el escenario Agroforestal cuenca María Linda.....	71
Figura 19.	Mapa con áreas por categoría para el cultivo de Aguacate Hass cuencas María Linda y Los Esclavos .....	73
Figura 20.	Mapa con áreas por categoría para el cultivo de mandarina y Limón persa cuencas Maria Linda y Los Esclavos .....	75
Figura 21.	Mapa con áreas por categoría para las especies maderables en las dos cuencas .....	76
Figura 22.	Esquema del mecanismo de compensación para el pago de los servicios ambientales.....	80

**Robledo Hernández, WI.** 2003. Pago de servicios ambientales para la implementación de sistemas agroforestales en áreas críticas de las cuencas generadoras de energía eléctrica María Linda y Los Esclavos, Guatemala. Tesis M. Sc. Turrialba Costa Rica, CATIE. 93 p.

**Palabras claves:** cuenca, María Linda, Aguacapa, Los Esclavos, áreas críticas, sistemas agroforestales, externalidades, costos, mecanismo de compensación, pago de servicios ambientales, monitoreo ambiental.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó en las cuencas María Linda y Los Esclavos, ubicadas en la vertiente del Océano Pacífico de Guatemala, políticamente se encuentran en los departamentos de Sacatepéquez, Guatemala, Santa Rosa y Escuintla, y Guatemala, Santa Rosa y Jalapa, respectivamente. La Investigación se realizó a demanda del Ministerio de Energía y Minas y el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, ya que dichas instituciones argumentan preocupación por el incremento acelerado del nivel de asolvamiento en las represas Aguacapa y Los Esclavos, el cual se debe al cambio de uso de la tierra de café a cultivos limpios, por la crisis del precio del grano, de tal forma que sirva como sustento y justificación para mejorar dicho mecanismo en el área de estudio y que pueda extenderse a otras que cuenten con las características adecuadas para producción de energía eléctrica.

La ejecución del trabajo se hizo en cinco etapas, siendo la primera de ellas identificar las áreas críticas dentro de las cuencas que afectan la calidad y cantidad de agua para la generación de energía eléctrica a través del uso del Sistema de Información Geográfica. Luego se identificaron las áreas potenciales para el establecimiento de los sistemas agroforestales con frutales y con maderables. Otra fue la cuantificación de la erosión la cual se hizo a través de la modelación de la USLE para tres escenarios con diferentes usos de la tierra, siendo éstos: escenario actual, escenario agrícola y escenario agroforestal.

Se aplicaron de técnicas de valoración económica con el propósito de estimar el valor de las externalidades negativas del uso del suelo para la producción de energía eléctrica, lo cual se realizó a través de costos de mantenimiento y costos evitados

La cuarta etapa fue la de elaborar una propuesta de mecanismo de compensación de los servicios ambientales generados por la implementación de los sistemas agroforestales. Finalmente, se hace una propuesta de un sistemas de monitoreo ambiental para las dos cuencas.

Dentro de los principales resultados se encontró que para el Embalse Los Esclavos el escenario Actual está generando 15810 t.ha<sup>-1</sup>.año de sedimentos, el escenario Agricultura 28175 t.ha<sup>-1</sup>.año y para el escenario Agroforestal genera 2937 t.ha<sup>-1</sup>.año y para la presa de Aguacapa el escenario Actual está generando 38412 t.ha<sup>-1</sup>.año. el escenario Agricultura 106290 t.ha<sup>-1</sup>.año y el escenario Agroforestal genera 11753 t.ha<sup>-1</sup>.año.

Como una de las principales conclusiones se resalta la propuesta de Espinoza et al (1999) referente a que los servicios ambientales, su valoración y pago, deberían formar parte de la legislación, normativa e institucionalidad correspondiente en los países de América Latina y el Caribe (ALC) de forma tal que dichos servicios se promuevan, fomenten y financien en un esfuerzo conjunto del sector publico, privado y la sociedad civil.

**Robledo Hernández, WI. 2003.** Payment of Environmental Services for the implementation of agroforestry systems in the critical areas within María Linda and Los Esclavos hydroelectric energy source watersheds, Guatemala. Thesis M. Sc. Turrialba Costa Rica, CATIE. 93 p.

**Key words:** watershed, María Linda, Aguacapa, Los Esclavos, critical areas, agroforestry systems, externalities, costs, compensation mechanism, payment environmental services, environmental monitoring.

## SUMMARY

This study was conducted in the María Linda and Los Esclavos watersheds, located in the Pacific Coast Area, Guatemala, these watersheds are comprised politically in the departments of Sacatepéquez, Guatemala, Santa Rosa, Escuintla, and Jalapa. The purpose of the study was to provide information to local institutions, in such a way that it may be used as basis and justification to improve the mentioned system in the study area, so that it may be expanded to other watersheds with similar characteristics for hydroelectric generation.

The research work was developed in five phases. The first one consisted in identifying critical areas that affect water quality and quantity for hydroelectric generation purposes, by using a geographic information system GIS. The critical areas are suitable for the establishment of agroforestry systems with fruit tree and woody tree species. Also, the GIS were used to quantify erosion through USLE modeling for three scenarios with different land uses: actual scenario, agriculture scenario and agroforestry scenario.

The second phase included the application of valuation techniques – maintenance costs and avoided costs – in which hydroelectric plants incur for the generation of electric energy. The third phase focused on elaborating an compensation mechanism agroforestry systems, and developing an environmental monitoring system for both watersheds.

For Los Esclavos watershed, the actual scenario is generating 15810 t.ha<sup>-1</sup> of sediments, agricultural scenario 28175 t.ha<sup>-1</sup> and the agroforestry scenario generates 2937 t.ha<sup>-1</sup>. For the Aguacapa dam actual scenario is generating 38412 t.ha<sup>-1</sup> of sediments, agricultural scenario 106290 t.ha<sup>-1</sup> and the agroforestry scenario generates 11753 t.ha<sup>-1</sup>.

The findings presented here coincide with the proposal by Espinoza et al (1999), in wich environmental services, their valuation and payment, should be an essential part of the law and institutionalism in Latin America and the Caribbean countries in such a way that these services be encouraged, fomented and financed in a joint effort of the public and private sector and the civil society.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

La presente investigación y propuesta de Mecanismo de compensación para el pago de servicios ambientales por parte del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) fue demanda del Ministerio de Energía y Minas (MEM), el Instituto Nacional de Electrificación (INDE) y el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA). Dicha demanda surgió por el incremento acelerado del nivel de asolvamiento en las represas María Linda y Los Esclavos, este asolvamiento se debe al cambio de uso de la tierra en el área de café a cultivos limpios que se han dado en los últimos dos años, por la crisis de los precios del grano.

Bajo este contexto, el CATIE presentó una idea de Mecanismo de compensación para los incentivos a los servicios ambientales generados por bs sistemas agroforestales, el cual fue aprobado técnicamente por las instituciones mencionadas anteriormente. Dicha propuesta fue presentada a la Junta Directiva del INDE y Ministros de Agricultura y Energía, quienes solicitaron al CATIE la investigación de base y la formulación del Mecanismo de compensación.

El mecanismo de compensación por la generación de servicios ambientales será comprendido como el instrumento de política del Ministerio de Energía y Minas y del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, que estará apoyado en un marco financiero, jurídico e institucional, que permita pagar a los agricultores de las comunidades beneficiarias, por los servicios de mejoramiento de la calidad y cantidad de agua, a través del uso de la tierra con sistemas agroforestales.

En ese sentido el CATIE a través de un convenio entre las partes interesadas, ha realizado la presente investigación para la identificación de las áreas críticas dentro de las dos cuencas que afectan la calidad y cantidad de agua para la generación de energía eléctrica; identificación de áreas potenciales para el establecimiento de sistemas agroforestales; cuantificación de las externalidades negativas para la generación de energía eléctrica; estimación económica de las externalidades; y por ultimo la propuesta de un sistema de monitoreo y evaluación ambiental para las dos cuencas.

## 1.2 Justificación

El territorio guatemalteco está conformado por un sistema de 38 cuencas hidrográficas. Dichas cuencas representan unidades territoriales formadas por un río principal con sus afluentes, y por un área colectora de las aguas, en las cuales están contenidos los recursos naturales básicos para las múltiples actividades humanas. Estos recursos, mantienen una continua y particular interacción con todas las actividades del desarrollo productivo del hombre. Las aguas superficiales de estas cuencas representan un potencial para la generación de energía renovable, entre otros servicios.

Dentro del sistema nacional de cuencas se encuentran la del Río María Linda y la del Río Los Esclavos, de las cuales se aprovechan las aguas superficiales para la generación de energía eléctrica. El caudal medio anual para la cuenca del Río María Linda es de  $4.25 \text{ m}^3/\text{s}$ , con un potencial<sup>1</sup> instalado en la planta hidroeléctrica de Aguacapa para la generación de 90 MW de energía eléctrica. Para el Río Los Esclavos, el caudal medio anual es de  $11.93 \text{ m}^3/\text{s}$ , con un potencial instalado en la planta hidroeléctrica de 14 MW.

Usualmente los proyectos que aprovechan las aguas superficiales de las cuencas para la generación de energía eléctrica, solo se calculan con base en los costos de las obras de ingeniería y funcionamiento de las plantas hidroeléctricas; sin embargo, ignoran la conservación del área donde se produce el agua que es utilizada. A pesar de la importancia que tienen estas áreas para la regulación hídrica en la generación de energía eléctrica, las mismas no reciben el tratamiento y manejo adecuado para la producción de agua en calidad y cantidad (Gutiérrez, 2001).

Un factor fundamental para la producción de agua de calidad y cantidad, para la generación de energía eléctrica, es el uso del suelo, en las partes altas de las cuencas. Diferentes estudios (Bruijnzeel, 1990; Stadmuller, 1994) han concluido que la cobertura arbórea representa el uso más adecuado para la generación de este servicio ambiental. El sobreuso del suelo en áreas de ladera, representa un factor que incide fuertemente en el incremento de la erosión y deslizamientos de suelo hacia los embalses, lo cual disminuye la calidad del agua para la generación de energía eléctrica. Esta condición incrementa los costos de mantenimiento de las

---

<sup>1</sup> Datos proporcionados por la Empresa de Generación de Energía Eléctrica. Superintendencia de Operación y Mantenimiento de Plantas. Departamento de Programación y Control de la Producción.

plantas hidroeléctricas y disminuyen la vida útil de los equipos y los embalses (Gutiérrez, 2001).

Para la cuenca del Río María Linda, el área de producción y recolección hídrica para la planta hidroeléctrica de Aguacapa es de 32125 ha, la cual posee una cobertura forestal del 9%. El área en sobreuso es de 58%, principalmente para la producción de cultivos limpios.

En la cuenca del Río Los Esclavos, el área de producción y recolección hídrica para la planta hidroeléctrica Los Esclavos es de 104554 ha, la cual posee un 10% de cobertura forestal y más de un 50% de los suelos están en sobreuso. Cabe resaltar que en las dos cuencas, el mayor porcentaje de cobertura vegetal perenne, está constituido por el cultivo de café, el cual representa una cobertura al suelo adecuada a los servicios ambientales, para la generación de energía eléctrica. Sin embargo, actualmente se evidencia altos niveles de sedimentación en los diques y embalses de las dos hidroeléctricas.

En el caso de la planta de Aguacapa, se estima que se extraen anualmente 30000 m<sup>3</sup> de sedimentos en los diques, con un costo de mantenimiento anual de Q. 612600.00 equivalente a \$US 76575.00<sup>2</sup>. En el caso de la planta hidroeléctrica Los Esclavos, los costos de mantenimiento se han incrementado en los últimos años a Q.4020561.45 equivalente a \$US.502570.18, para lo cual se utilizan más de 22 días/año, que significan una paralización de la generación de energía eléctrica. Estas condiciones son propensas a incrementarse por el cambio del uso del suelo, de café bajo sombra a cultivos limpios, como resultado de la crisis actual de los precios del café.

Dichos cambios de uso del suelo, ya se están observando en los pequeños y medianos productores del área de interés. En las áreas debajo de los 1000 msnm, los precios del grano han bajado a Q 25.00/qq en cereza. En las áreas arriba de esta altura, han bajado hasta Q50.00. Cabe indicar que los precios iniciales eran de Q 185 y Q 275.00 respectivamente y que en la actualidad, estos precios ni siquiera alcanzan para sufragar los costos de corte del grano.

---

<sup>2</sup> Tipo de cambio al final del mes de julio/2003 US\$ 1 = Q8.00.

Bajo el contexto descrito, el Ministerio de Energía y Minas –MEM- y Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación –MAGA-, están interesados en disminuir las externalidades negativas que está causando el cambio de uso del suelo, para lo cual el CATIE les propuso la implementación de un Mecanismo de compensación de servicios ambientales, orientados a promover los sistemas agroforestales de valor comercial y competitivos que mejoren las condiciones de calidad y cantidad de agua, para la generación de energía eléctrica en las plantas hidroeléctricas de Aguacapa y Los Esclavos.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 General**

?? Proponer un mecanismo de pago de servicios ambientales para la implementación de sistemas agroforestales en áreas priorizadas de las cuencas María Linda y Los Esclavos.

### **1.3.2 Específicos**

?? Identificar las áreas críticas que afectan la calidad y cantidad de agua para la generación de energía eléctrica.

?? Cuantificar y estimar los costos ocasionados por la erosión generada en los diferentes usos de la tierra que afectan la calidad y cantidad de agua para la generación de energía eléctrica.

?? Identificar las áreas potenciales para la implementación de los sistemas agroforestales en las cuencas María Linda y Los Esclavos

?? Proponer un mecanismo de compensación para el pago de servicios ambientales por la implementación de sistemas agroforestales en áreas priorizadas de las dos cuencas.

?? Formular un sistema de monitoreo y evaluación ambiental en las áreas críticas de las cuencas María Linda y Los Esclavos.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Antecedentes de estudios y desarrollo institucional sobre incentivos ambientales

En la actualidad, en Guatemala, lo más parecido al Pago por Servicios Ambientales (PSA) es el Programa de Incentivos Forestales, que se establece en la Ley forestal No. 101-96. Sin embargo, existen a nivel de propuesta, cuatro iniciativas con probabilidades de concretarse, algunas de ellas inclusive, se encuentran en la etapa de preparación de proyecto:

a) La propuesta oficial del Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP) propone internalizar los beneficios de los bienes y servicios ambientales que genera el Sistema Guatemalteco de Áreas Protegidas (SIGAP), mediante la internalización de los costos de protección y conservación, para lo cual, propone una estrategia de aplicación de instrumentos económicos (incentivos); b) El planteamiento de la Misión Técnica Alemana (GTZ) sobre Pago por Servicios Ambientales propone incorporar las municipalidades como actores principales, responsables de implementar el cobro de bienes y servicios ambientales; c) Sierra Las Minas, propone que Fundación Defensores de la Naturaleza, desarrolle e implemente un sistema de PSA, principalmente referido a la protección del recurso hídrico, y; d) La propuesta del Banco Mundial propone apoyo al Programa de pagos por servicios ambientales (PSA).

Según Field (1995), beneficio es una de esas palabras comunes a las cuales los economistas les han dado un significado técnico. Cuando se limpia el ambiente, se suministran beneficios a las personas y cuando se permite que el entorno se deteriore en calidad, se le quitan beneficios; en efecto, se les ocasiona daños. Es necesario contar con alguna forma de conceptualización y medición de esta noción de beneficios.

Los servicios ambientales, no son un instrumento de financiamiento en el sentido estricto, sino más bien se trata de un sistema que combina los ya existentes con otros nuevos y que conforma un concepto innovador para el sector forestal privado (MINAE, 2000). Los servicios ambientales son aquellos servicios y beneficios que recibimos todos los seres humanos y que se derivan directa o indirectamente de diferentes funciones ecológicas de la naturaleza, principalmente del bosque, cuyos efectos en la calidad de vida son tanto tangibles como intangibles, entre ellos, la madera, el empleo, la captación de carbono, el material genético, los

medicamentos, la biodiversidad, el paisaje y la protección del suelo y el agua (Bermúdez, et al. 2000).

En función a la disposición a pagar por un bien ambiental, por ejemplo, la preservación de la vida silvestre, un parque nacional, mejoras en la calidad del agua o del aire, se relaciona con el excedente del consumidor que el individuo espera recibir de ese bien (Pearce y Turner, 1995). El valor de un bien para alguien es lo que esa persona está dispuesta a pagar para obtener un bien o servicio o determinado activo ambiental, en otras palabras, la disponibilidad para pagar también refleja la capacidad de pago (Azqueta, 1995).

Según Bermúdez, (2000), los oferentes son cada propietario de bosque y tiene el derecho a recibir una compensación por servicios prestados y de esta manera contribuir a un ambiente más sano, al disfrute del paisaje, el aporte de materia para la investigación. También estos dueños de bosque tienen que asumir el compromiso de demostrar y de asegurar la cantidad y la calidad del servicio que prestan a lo largo del tiempo. Y los demandantes; son los ciudadanos que se benefician de los servicios ambientales del bosque, deben tomar conciencia de que es necesario pagar por el disfrute de las bondades que éstos brindan y entender que para perpetuarlos es necesario contribuir con los dueños del recurso. Estos aspectos contribuyen en forma integrada al desarrollo social y cultural del país.

Desde el punto de vista geográfico, los servicios ambientales pueden ser de interés global o local. La regulación hídrica es un servicio ambiental con más interés local o territorial, pero en vista de que la escasez de agua se está sintiendo en varios países, por adición se está convirtiendo en un servicio ambiental de interés global. De ahí la importancia de desarrollar iniciativas que generen mercados locales de servicios ambientales.

## **2.2 Conceptos teóricos de externalidades**

Larson y Pérez (1999) afirman que la externalidad inicia con la idea de la diferencia entre costo social y privado. La principal razón para una divergencia entre estos costos, es que una persona, firma o grupo, impone efectos físicos reales sobre otra persona.

Una externalidad (economía externa) se produce cuando la actividad de una persona (o empresa) repercute sobre el bienestar de otra (o sobre su producción), sin que se pueda cobrar un precio por ello, en uno u otro sentido. Lo esencial en cualquier caso, es que quien genera una externalidad negativa, no tiene que pagar por ello en un sistema de mercado, a pesar del perjuicio que causa; y que quien produce una externalidad positiva no se ve recompensado monetariamente (Azqueta, 1995; Pearce y Turner, 1995). Por lo tanto, las externalidades ambientales son efectos externos que se presentan cuando las acciones de un agente económico (una perturbación ambiental) afectan a las decisiones de otro agente.

Los servicios ambientales en su mayoría son catalogados como bienes públicos, es decir, no puede excluirse a alguien de su uso, ya que no existen mecanismos para fijarle un precio al bien y por lo tanto, no se puede impedir el disfrute del mismo. Los bienes públicos no son rivales, lo que significa que cualquier persona tiene acceso al bien. El agua como servicio ambiental, tiene la particularidad que aunque posee un “valor”, esto no es observable en el mercado, su precio efectivo parece ser “cero”, aunque su precio real es mayor que cero (Pearce, 1985).

Las externalidades positivas y negativas se internalizarán o no en el proceso de mercado según sean los gustos y las preferencias del momento y, en su caso según los costos involucrados, pero de modo alguno, pueden considerarse “fallas de mercado” (Benegas, 2002). Los servicios ambientales que presentan los bosques se clasifican como beneficios ecológicos y la mayoría de ellos, no se comercializan en el mercado. Las razones principales por la que el mercado no reconoce dichos servicios es porque éstos caen dentro de externalidades positivas o bienes públicos, para los cuales el mercado no asigna un precio, o falla en asignarles un precio adecuado (Landell-Mills, et al., 2000).

Según Cai y Smith (1994), las externalidades negativas juegan un papel muy importante en la agricultura debido a varios factores, entre los principales podemos mencionar: la producción intensiva sin un adecuado manejo del suelo y las malas prácticas de tumba y quema, deforestación entre otras, provocando contaminación, así como, costos en la salud por un lado y por el otro, por la ausencia de políticas e incentivos que protejan el ambiente. Es importante que las externalidades negativas sean medidas e internalizadas de manera que reflejen el costo social de la actividad económica por los daños causados a terceros. Steiner y Janke (1995) indican que este proceso puede funcionar mediante el diseño de políticas que establezcan incentivos para que

los productores tomen en cuenta el costo de generar externalidades en sus decisiones de producción.

### **2.3 El servicio ambiental hídrico y su importancia**

El servicio ambiental hídrico se refiere a la capacidad que tienen los ecosistemas boscosos para captar agua y mantener la oferta hídrica a la sociedad (Constanza et al., 1998). El bosque es un ente importante que beneficia a la sociedad a través de un flujo continuo y permanente de agua (Constanza et al., 1998), lo cual requiere no solo de reconocer el servicio ambiental como tal, sino también fijarle un precio y pagarlo.

El agua por sus características físicas y por la abundancia en el planeta, es un componente esencial del clima y de los seres vivos. El agua no solamente es muy importante en los procesos de formación y de transporte de los suelos, sino que desempeña una función vital como solvente para el transporte, desde el suelo, de la mayoría de los elementos químicos necesarios para la vegetación. Las plantas al absorber soluciones nutritivas por medio de las raíces, extraen elementos necesarios para su crecimiento y desarrollo. Por lo tanto, dado que el agua interviene íntimamente en los procesos vitales, puede decirse que la fisonomía de la vegetación y las actividades de los animales, guardan estrecha relación con la distribución climática del agua.

Ante el impacto de la lluvia en el suelo, el bosque cumple una función reguladora, pues presenta un área de cobertura foliar muy elevada (en comparación con cualquier otra cobertura) que evita que las gotas impacten directamente al suelo, lo que a su vez evita la compactación y erosión (laminas y en masa) del suelo por estas, disminuyendo además la velocidad de llegada de agua al suelo, a lo que hay que sumar el colchón que forma la materia orgánica que este aporta. El sistema radicular de las plantas en un bosque crea condiciones favorables en la textura del suelo, que propician la formación de espacios porosos y de agregados, que ayudan a la infiltración. Estos sistemas radiculares son además, una especie de amarre del suelo que hace que no sea tan vulnerable a ser erosionado, ya que disminuye la tasa de escorrentía superficial, la frecuencia de crecidas por lluvias de alta intensidad y corta duración (Barrantes; Vega, 2002).

#### **2.4 Los ecosistemas boscosos y su importancia en la disponibilidad del recurso hídrico**

La disponibilidad de agua es el resultado de la capacidad que tienen los ecosistemas boscosos para captarla. Esta función es considerada un servicio ambiental del cual se beneficia la sociedad, tanto en la utilización productiva como en el consumo natural del recurso. Además, la disponibilidad de agua en los ecosistemas permite el desarrollo o presencia de otros bienes y servicios útiles para la sociedad. En el caso de disminución de tales ecosistemas por causas naturales o provocadas, repercute directamente en la regulación de los recursos hídricos y afecta el desarrollo de las diversas actividades humanas que sustentan: sistemas productivos agropecuarios, piscícolas, industriales, turísticos, *generación hidroeléctrica* y el suministro de agua potable a la población. También repercute sobre todos los ecosistemas relacionados con los recursos hídricos (Rudas, 1995).

Además es de esperar que la remoción de la cobertura vegetal disminuye las posibilidades de infiltración, lo que a la vez produce un incremento en la escorrentía durante los periodos lluviosos y afecta negativamente las posibilidades de almacenamiento de agua (Deeb, 1992; Álvarez, 1995). En términos generales, en los bosques tropicales se da una relación directa entre la cobertura boscosa y los caudales: a mayor cobertura en bosque, mayores caudales. En tal sentido, es conveniente un procesos de conservación, protección y recuperación de cuencas. Por lo tanto, una mayor cobertura boscosa proporciona una mejor regulación de los recursos hídricos y disminuye los sedimentos que atentan con el mantenimiento de las infraestructuras desarrolladas para la producción de algún bien o servicio (CCT-CINTERPEDS, 1995; Calvo, 1990).

En términos generales, el bosque es un ente más eficiente en función de la calidad y cantidad de agua, que cualquier otro ecosistema. En un estudio realizado por CCT-CINTERPEDS (1995) se determinó que bajo cobertura de bosque la escorrentía es menor que bajo cobertura de pasto, justificado por la mayor capacidad de infiltración del bosque. Además, se evaluó la calidad del agua y se determinó que bajo bosque había una calidad relativa de 81.44% y bajo pasto de 31.37%. La presencia de bosques favorece la retención de agua, ya que el sistema radicular permite una mayor y mejor infiltración y disminuye la escorrentía superficial (Ander, 1991).

El impacto de los cambios en el uso-cobertura del suelo sobre el balance hídrico de la cuenca dependerá de la severidad o intensidad con que se modifique la vegetación original, la inclinación, exposición y compactación del suelo mineral y, finalmente, de la proporción de la

cuenca afectada (Fallas, 1996). El aprovechamiento forestal, la deforestación y el fuego pueden modificar drásticamente el balance hidrológico de la cuenca, ya que para bosques tropicales mucha de la precipitación anual es devuelta a la atmósfera como vapor de agua mediante los procesos de evaporación y transpiración.

La conversión de bosque a pasto u otros usos puede reducir drásticamente la capacidad de infiltración del suelo, dado que el volumen de recarga al subsuelo se favorece para aquellas áreas de la cuenca con mayor cobertura boscosa (Heuvelop et al., 1986). Es decir, es un escenario de infiltración bajo tres tipos de cobertura: bosques, pastos y sin cobertura vegetal (suelo “desnudo”), el bosque tiene una eficiencia promedio de 68.92% en la infiltración en la relación con el pasto y el suelo desnudo, los cuales presentan 24.75% y 6.33% de eficiencia, respectivamente.

#### **2.4.1 Importancia del cultivo de café bajo sombra**

En los últimos 20 años, la rentabilidad de muchos cafetales tecnificados, caracterizados por cultivares (variedades de alta productividad y altos requerimientos de insumos externos bajo poca o ninguna sombra), dejó de ser más alta que la rentabilidad de cafetales menos tecnificados. Al mismo tiempo, el conocimiento y la valoración del impacto ambiental de la agricultura tecnificada aumentó significativamente. Aspectos como la contaminación del agua, la erosión de los suelos y la presencia de residuos de pesticidas en el ambiente y en los productos agrícolas, incluyendo café han asumido mayor importancia en la búsqueda de sistemas sostenibles de producción, tal como el sistema agroforestal “café asociado con sombra” o “cafetal arbolado” (Muschler, 2000).

Si bien, desde el punto de vista económico, la producción cafetalera ha disminuido su contribución a la producción nacional, al empleo e ingresos, desde una perspectiva ambiental la superficie cafetalera ha estado jugando un rol decisivo en la provisión de servicios ambientales vitales para el país. Dado que gran parte de las zonas cafetaleras están cambiando su uso actual a cultivos limpios, la ausencia de masas boscosas significativas resalta la importancia de los cafetales, los cuales poseen una diversidad de árboles que proporcionan sombra a las plantas de café, comportándose como sustitutos cercanos de los bosques tropicales (Rosa y Cuellar, 1999).

La escorrentía y la erosión del suelo son menores en plantaciones con sombra que en aquellas sin sombra (Bermúdez, 1980). El contenido de sedimento en el agua de escorrentía en los sistemas agroforestales está dentro de los límites aceptables (Bermúdez, 1980), y otros estudios han demostrado que el sistema agroforestal café-poró, tiene más capacidad de intercepción de agua, debido a su mayor cantidad y densidad de biomasa (Jiménez, 1986).

Esta situación se agrava porque esa crisis de rentabilidad también dificulta la incorporación de prácticas de conservación en los pequeños y medianos productores, lo que tiende a profundizar la degradación de las cuencas. Revertir esta dinámica supone aumentar la cobertura vegetal en el territorio, algo que exige ir más allá de políticas de conservación o reforestación. El reto más bien consiste en avanzar hacia una transformación productiva en el agro, de modo que se logre establecer y mantener estrategias productivas ambientalmente sostenibles que logren simultáneamente aumentar los ingresos de la población rural.

Aquí resalta la necesidad de introducir mecanismos movilizados de recursos financieros, donde el pago por servicios ambientales demandados tanto internamente como globalmente, podría generar un flujo financiero de contrapartida al flujo real de servicios ambientales producidos desde un sector agrícola reconvertido.

#### **2.4.2 Cantidad y calidad de agua**

Es bien conocido que los bosques, por ser la vegetación con más cobertura, biomasa y altura, poseen tasas de evapotranspiración e intercepción de lluvias muy superiores a cualquier otro uso. Por lo tanto, las cuencas forestales producen significativamente menos escorrentía que cuencas con otras coberturas o usos.

Para Mourarille, Porras y Aylward (1996), en estudios realizados muestran que en el transcurso de un año la escorrentía producida por una parcela de pasto sería mayor que la producida por un bosque. La excepción es el caso de los bosques nubosos donde es posible esperar que la captura de precipitación horizontal sea mayor que la diferencia en las tasas de intercepción vertical y de transpiración entre el pasto y el bosque.

Es innegable la importancia que tienen los bosques en la producción de cantidad y calidad de agua, pero sobre todo, a una empresa hidroeléctrica le interesa, hasta cierto grado, proteger laderas contra la erosión en masas, deslizamientos y taludes, debido a que estos fenómenos producen procesos erosivos en los ríos.

Los bosques naturales tropicales no aumentan la producción de agua, al contrario, la producción de agua en cuencas cubiertas por bosque es menor con otro tipo de vegetación bajo el mismo régimen de lluvia. Los bosques naturales tropicales no son ninguna garantía contra inundaciones, especialmente no contra inundaciones provenientes de cuencas extensas. Las cuencas cubiertas por bosques producen aguas de muy buena calidad por la alta capacidad de infiltración de los suelos forestales, las bajas tasas de escorrentía superficial y la falta de erosión acelerada.

Por otra parte, es necesario mencionar dos aspectos adicionales para aclarar el rol de los bosques en la calidad de las aguas: i) La presencia de bosques automáticamente significa la ausencia de usos intensivos (agricultura, potreros, industria (y por ende, de fuentes contaminantes. ii) La cobertura forestal juega un papel predominante en la calidad o contaminación de agua (Brown, 1985). Si las riberas están cubiertas por bosques, generalmente, impiden que sedimentos producidos por procesos erosivos lleguen al río (Brunjnzeel, 1990).

Estas observaciones de gran peso científico, fortalecen las decisiones de protección de las cuencas con la presencia de bosques; y para el caso específico de las cuencas en estudio, donde la captación de aguas es la razón principal de los embalses, el valor de existencia de los bosques se convierte en un componente muy importante. En este sentido, cuando se habla de una simulación en el recurso hídrico (Stadmuller, 1994, Reynolds, 1997:11) se refieren principalmente, a efectos en la calidad, que es producto de un proceso de degradación del recurso.

El concepto de “calidad del agua” generalmente se define de acuerdo a un determinado uso (agua potable, agua para riego, agua para producción hidroeléctrica, etc). El agua que es apta para cierto uso puede que no lo sea necesariamente para otro. Por ejemplo, el agua para riego debe tener baja concentración de sales, el agua para consumo humano debe tener un bajo contenido de organismos infecciosos y el agua para la producción hidroeléctrica debe tener baja carga de sedimentos. La calidad de agua se expresa con base en sus características físicas, químicas y biológicas en asociación con el material mineral y orgánico disuelto o en suspensión.

En el caso de hidroeléctricas, la externalidad hidrológica por cambios en la calidad de agua, es el impacto ambiental que sobresale en la productividad de la empresa debido a la alta sedimentación en los embalses. La sedimentación en un embalse de regulación diaria (embalse que opera con una planta para atender los picos de demanda de electricidad) puede tener graves repercusiones económicas, debido a las restricciones de operación que introduce al sistema del cual forma parte. El problema se agrava si la planta se ve imposibilitada a producir su máxima potencia por la reducción del volumen del embalse, lo que puede dar lugar a la instalación forzada de una planta complementaria de alto costo, generalmente termoeléctrica, para responde a las exigencias de la demanda del sistema, que ya no puede ser satisfecha por la planta hidroeléctrica. (Gutiérrez, 2001).

Por otra parte, la productividad de una planta hidroeléctrica está en función directa de la cantidad de masa de agua disponible en las cuencas, que puede ser captado por los embalses. Lo mas grave es que se producen efectos negativos en la planta de generación hidroeléctrica, debido a que constantemente se acumulan sedimentos en el embalse, reduciendo la capacidad de almacenamiento del mismo.

Aylward (1998) y Kaimowitz (2001) señalan que la erosión de los suelos agropecuarios genera ciertos costos de mantenimiento adicionales y la reducción de la capacidad de almacenamiento de agua en las orillas de un embalse, lo que provoca pérdidas que no son muy significativas para las empresas hidroeléctricas en el mediano plazo. Aunque estas argumentaciones son ciertas, en largo plazo, la capacidad de almacenamiento del embalse y la capacidad de generación hidroeléctrica se vería afectada, sino se presta atención al control de la sedimentación. Es decir, un embalse puede llegar a agotar su vida útil más rápido, dependiendo fundamentalmente de la acumulación acelerada de la sedimentación en el mismo, lo que puede provocar mayores costos ambientales para generar electricidad.

### **2.4.3 La erosión y su modelación**

La USLE (Universal Soil Loss Equation) es un modelo diseñado para predecir la pérdida de suelos de un campo de cultivo y sistema de manejo específico (Wischmeier, y Smith, 1978), la cual ha sido utilizada en muchos países tropicales (Rocha, 1977; Amézquita, 1975; Vahrson, 1991; Mora, 1987; Arana, 1992; Castillo, 1992; Bacchi, et al. 2000) con resultados que

sobreestiman los niveles de erosión cuando se compararon con parcelas de escorrentía (Rocha, 1977; Vahrson, 1991, Palacios, 1993) u otros métodos. Bacchi, et al. 2000) ante ésta diferencia, se han realizado estudios para cada factor de la ecuación e incluso se plantea la RUSLE (Revised, Universal Soil Loss Equation) como una modificación a los factores de la USLE (Renard, et. al. 1996).

Sin embargo, algunos autores consideran que la aplicación tanto de la USLE como la RUSLE en áreas fuera del rango donde fueron calibradas o en el ámbito de cuencas, requiere de un ajuste a los factores, siendo uno de ellos la longitud de la pendiente “LS” (Varhson, 1991, Nearing, 1997; Barrios, 2000), el cual como objeto de estudio ha dado lugar a diferentes formas de estimarlo (Moore, 1986), sin embargo, coincide en que los Sistemas de Información Geográfica puede estimar de mejor manera el factor y acercar mas los resultados a la realidad (Barrios, 2000; Engel, 1999).

#### **2.4.4 Sedimentación**

La sedimentación de un reservorio creado por un dique construido en un curso natural de agua es inevitable. El problema de preocupación es la rapidez de sedimentación y el período de tiempo en el cual transcurre antes de que la utilidad del embalse esté seriamente destruido o inservible. Un dique en un canal de una corriente cambia las características hidráulicas del flujo para las nuevas condiciones, creando problemas adicionales aguas arriba y debajo de la estructura Chow (1964).

La construcción de un dique en un curso de agua cambia las características hidráulicas del flujo y la capacidad de transporte de sedimento resultante, la cual puede crear serios problemas arriba y abajo del reservorio. La deposición en el detal y arriba de las elevaciones de la creta del reservorio pueden causar serias “agregaciones” aguas arriba del reservorio. Un cambio en las características hidráulicas de un flujo con la remoción de la carga de sedimentos de la salida de un reservorio estable a un nuevo juego de condiciones, por lo que las corrientes debajo de un dique se ajustaran eventualmente para lograr el equilibrio.

La erosión laminar y de canales en una cuenca es conocida como erosión total (Chow, 1964). Todos los materiales erosionados en una cuenca no caen en el sistema de corrientes. Partículas separadas en áreas de nivel comparativo, con poco o sin escorrentía superficial, por ejemplo, se

mueven solo distancias cortas y consecuentemente no son transportadas hacia los puntos aguas abajo en una cuenca. El suelo, el cual es erosionado de las tierras con pendientes puede ser alojado en líneas de cercas y áreas con cobertura vegetal o depositado en quebradas bajas en forma de aluvión. Algún material puede ser transportado hacia los sistemas de las corrientes, solo para ser depositado en planicies inundadas como aluviones de barro en los propios canales.

La cantidad total de material erosionado el cual completa el recorrido de la fuente hacia un punto de control de las aguas abajo, como reservorio, es conocido como el *producto del sedimento*. La tasa de transporte de sedimentos total (generalmente expresada en porcentajes de acuerdo al cociente de sedimentación / erosión total).

## **2.5 Evaluación económica del servicio ambiental hídrico**

### **2.5.1 Valor de la productividad hídrica del bosque (valor de captación)**

Para la valoración del agua como servicio ambiental ofrecido por los bosques de las cuencas, con un enfoque de sostenibilidad en términos de calidad, cantidad y perpetuidad, se requiere considerar el valor de la productividad de los bosques en función de captación de agua por todos aquellos procesos que el ecosistema boscoso facilita como son la infiltración, percolación, disminución de erosión por causa del agua (reguladores del volumen de agua superficial), la recarga de acuíferos, el mantenimiento de procesos naturales, el mantenimiento del régimen de lluvias, la conservación de humedad y el mejoramiento de la calidad del agua (Constanza et al, 1998).

Esto anterior se resume, en un valor de captación (valor de uso directo) de agua al propiciar una mejor calidad y regulación del ciclo hidrológico. Además, los ecosistemas boscosos propician otros servicios ambientales (CO<sub>2</sub>, belleza escénica, biodiversidad y otros).

La sostenibilidad de la producción de servicios ambientales dependerá de la conservación de las existencias de activos naturales en términos de cantidad y calidad (Naciones Unidas, 1994). Si se reconoce que existen actividades económicas que compiten contra la conservación del bosque, entonces el enfoque del costo de oportunidad del uso de la tierra, podría utilizarse para el cálculo del Valor Económico Total (VET) de los servicios ambientales que se generan a partir

de la presencia del bosque (Munasinghe et al, 1994). Este enfoque de costo de oportunidad permite valorar económicamente el ecosistema en su conjunto, en función del valor de los flujos anuales de servicios ambientales.

La productividad del bosque en el caso del servicio ambiental hídrico, está determinada por la cantidad de agua captada anualmente, y su valor económico estará asociado con la actividad económica que compite con el bosque. Si se ve la productividad del bosque en términos económicos, entonces el no usar el suelo para otras actividades, se valora por la cantidad de agua captada por los bosques, es decir, el costo de oportunidad de las actividades que compiten con el bosque por el uso del suelo.

A fin de determinar el valor de uso directo del agua (Munasinghe et al, 1994), se debe reconocer el valor anual de los bosques de la cuenca por su producción hídrica. De esta manera, si los bosques son importantes en función del recurso hídrico, la sociedad debe proveer los medios necesarios para recuperarlos, protegerlos y conservarlos. Esto se logra cuando aquellos suelos de vocación forestal se dejen bajo cobertura vegetal, y no se destinen a otras actividades económicas tradicionales. Esto es posible cuando se compensa “paga” a los dueños de la tierra, un monto equivalente a los beneficios que dejan de percibir por no desarrollar la actividad más rentable que compite con el bosque. Es decir, se le paga el costo de oportunidad que le significa al dueño dejar el suelo bajo bosque.

Solo se justifica la transformación del uso del suelo, bajo la concepción de la economía de los recursos naturales, de bosque natural a otros usos, si los ingresos anuales por los otros usos superan los ingresos anuales por servicios ambientales generado por el bosque. En este sentido, una hectárea de bosque se protegerá, cuando el valor de uso por servicios ambientales se equipare con el costo de oportunidad de los demás usos del suelo. Así, la recuperación de suelos con bosques y la conservación de los bosques existentes, se fundamentará, en parte, en su importancia económica por los servicios ambientales que ofrecen.

Por lo anterior, el costo de oportunidad es útil para valorar económicamente el componente de captación hídrica del bosque y de otros servicios ambientales de importancia económica reconocida. Esta valoración obedece a la necesidad de tener un indicador económico de la productividad del bosque que debe ser compensada por la sociedad, para que el dueño de la

tierra considere al bosque como una actividad económica tan rentable como la que se deja de realizar, y se convierta en un productor de servicios ambientales reconocidos y pagados por la sociedad (Castro y Barrantes, 1998).

La presencia de bosque para el mantenimiento continuo y permanente de agua superficial y de infiltración que drenan hacia la parte media y baja, resultan de mayor importancia en la época seca. Principalmente en la época de estiaje de los flujos tienden a disminuir de manera significativa, limitando la disponibilidad de agua para el desarrollo de las distintas actividades. Esta situación justifica aún más la necesidad de tener bosques en función del recurso hídrico y la importancia de valorarlos con la actividad económica que compite y que puede cambiar el uso del suelo.

### **2.5.2 Valor del agua como insumo de la producción**

En el sector de hidroenergía, el agua es el principal insumo que se utiliza para transformar la energía potencial del agua en energía eléctrica. Otros sectores de importancia en la utilización del agua como insumo, son el agropecuario cuando usa riego, el piscícola, el sector industrial cuando utiliza agua en los procesos y el turismo. Esta importancia económica del recurso agua es un indicador que refleja la necesidad de asignar un precio que responda al valor de escasez del recurso.

La valoración económica del agua como insumo de la producción implica la utilización de diferentes técnicas, debido a la variada utilización que se hace de este recurso. Ante esta diversidad de usos para el agua, la valoración económica puede hacerse bajo el enfoque de ahorros con costos (producción hidroeléctrica), cambio en productividad (sistema de riego agrícola) y excedente del consumidor (sector doméstico e industrial). Esa mezcla de enfoques de valoración proporciona un valor económico diferenciado para el agua, cuando ésta es usada como insumo de la producción. Sin embargo, debido a que el agua es un único bien con posibilidades de múltiples usos, quizás lo más adecuado y conveniente sea estimar un valor promedio que refleje las características particulares de cada consumidor.

### **2.5.3 Valor del agua en la generación de energía eléctrica**

La valoración del agua se puede enfocar, al seguir patrones en función del método de costos inducidos y el de costo de oportunidad, siempre que se pueda medir la capacidad que tienen un determinado ecosistema para generar o producir agua en términos económicos (Salgado, 1996). Por esto la importancia del bosque como un ecosistema regulador de agua al considerar una presa hidroeléctrica, y no debe olvidarse que una construcción de este tipo cambia el comportamiento de un ecosistema, especialmente en la cuenca del río que se utiliza. Un incremento en la erosión puede darse, por lo tanto resultará una sedimentación en la cuenca baja como un nuevo reservorio, los nutrientes son arrastrados y se reduce el oxígeno disuelto que afecta a la vida acuática (Dixón, et al. 1994).

Con respecto al enfoque del ahorro en costos, su aplicación permite cuantificar el monto que el país ahorra con hidroelectricidad en comparación con cualquier otra alternativa de generación eléctrica, incluyendo la importación, en el abastecimiento de la demanda nacional de electricidad. Este ahorro corresponde al valor económico que se le puede asignar al agua en el sector hidroeléctrico, cuando es considerada como insumo de la producción. Para aplicar el ahorro en costo debido a la utilización del agua en la generación de electricidad, es necesario contar con los precios de todas las demás opciones que pueda usar un país para la demanda nacional de la electricidad, incluyendo la hidroeléctrica.

De esta manera se compara la mejor opción alternativa con la de hidroelectricidad y la diferencia proporciona el valor de la mejor opción económica (Castro y Barrantes, 1998). Con los distintos precios para el abastecimiento de la demanda nacional de electricidad, se puede estimar el ahorro que le significa al país, la utilización del agua en la producción de electricidad.

### **2.5.4 Valor económico de los bosques o sistemas agroforestales**

Según Sención (1996), el valor económico total de un bosque está compuesto por los valores que se determinan a través de un mercado y por otra serie de valores asociados con los servicios ambientales que brindan los bosques, es decir, está formado tanto por bienes de uso privado y bienes de uso público. Por otro lado, los bosques son productores de beneficios para la sociedad, ese es uno de los preceptos básicos, el pago por servicios ambientales. Mientras que la

internalización de los costos, consiste en el traslado del costo de mantener un bosque, que está produciendo un servicio para la sociedad, al usuario de dicho beneficio. Sención (1996).

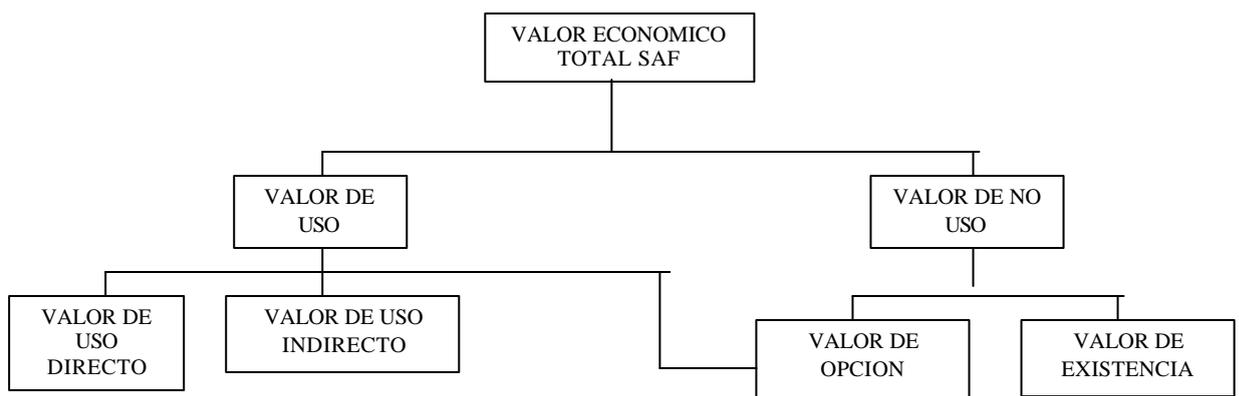
Para Pearce, DW; Turner RK; (1995), un uso distinto de las medidas del valor económico es demostrar la importancia de la política ambiental. Muchos de los beneficios obtenidos de la política ambiental no aparecerán en forma de beneficios económicos inmediatos: los beneficios se deben encontrar mas en la calidad de vida que en cualquier crecimiento de la producción económica de un país.

#### 2.5.4.1 Valor de uso

Según Azqueta (1995), los individuos que utilizan un bien y cualquier cambio que ocurra en este bien, los mismos individuos se ven afectados, los bienes regularmente tienen un mercado identificable. Para los individuos, el valor tiene una relación muy estrecha por el valor de uso y que tanto se disfrute de ese bien.

#### 2.5.4.2 Valor de no uso

Son los bienes que existen, aunque las personas no hagan uso directo de estos. Por otro lado, los principales valores de no uso son el valor de opción, valor de existencia, valor de herencia, entre otros. Los cuales se puede observar en la figura 1.



Fuente: Barbier (1998).

**Figura 1. Valor económico total de los SAF**

Para obtener el VET, en el caso de los ecosistemas naturales, se deberían considerar inicialmente aquellos bienes y servicios económicos que generan bienestar al ser humano (p. Ej, demanda por madera, por áreas agrícolas o por la necesidad de exportar madera para generar ingresos). El valor económico total variará de acuerdo con el grado de degradación o agotamiento en que se encuentre el ecosistema en estudio, y según el tipo de ecosistema, en relación con los bienes y servicios de uso directo o indirecto y el valor de existencia.

El *valor de uso directo*; se refiere a los ingresos por venta de bienes derivados de los servicios que proveen los ecosistemas, tales como madera, producción de bienes alimenticios, para construcción, otros. La mayoría de estos bienes pueden valorarse a precios de mercado. Sin embargo, para los beneficios potenciales del bosque y para los bienes que no tienen precio de mercado, se pueden usar otras técnicas de valoración en la aproximación de precios monetarios para tales bienes y servicios. El *valor de uso indirecto*; se refiere al valor de las funciones ecológicas y servicios de la biodiversidad de los bosques, como el ciclo biogeoquímico, protección de suelos y cuencas, fijación de gases con efecto invernadero, oferta y calidad de agua. La valoración se basa en el uso del costo de reemplazo de los beneficios generados por el servicio ambiental. Se pueden utilizar precios de mercado de bienes sustitutos o gastos potenciales, utilizando el cálculo de los costos necesarios para mitigar el impacto sobre el flujo de servicios de los ecosistemas (Naciones Unidas 1994; Pearce y Turner 1995).

El *valor de opción*; se utiliza en casos de usos potenciales no conocidos. Constituye el valor adicional para asegurar la disponibilidad futura de un servicio del ecosistema. Este concepto se fundamenta en el hecho de que, si bien rara vez existen mercados de opciones sobre servicios ambientales (y satisfacciones que proporcionan las mismas motivaciones individuales que operan en los mercados de opciones de compra de bienes raíces y valores), también existen mercados con respecto a los servicios ambientales (Randall, 1985), y el *valor de existencia*; es el valor que la sociedad le da a un servicio ambiental, que podría no estar relacionado con ningún uso actual o potencial del mismo; sin embargo, se es consciente de que tiene valor y que debe conservarse como un producto del ecosistema, de tal manera que acompañe –en la medida de lo posible- la evolución de la diversidad biológica, para que pueda ser disfrutado por las futuras generaciones (Constanza et al. 1998).

El valor de existencia se puede calcular por el conocimiento de donaciones para la conservación, o bien con el uso de los métodos de valoración contingente, en especial para aquellos casos donde el activo tiene características únicas o significados culturales o religiosos importantes para la sociedad (Pearce y Turner, 1995). Casos claros de valor de existencia serían aquellos asociados a los ingresos y gastos de un país por el servicio de investigación que podría generar ingresos, mediante la venta de libros, videos y otras formas de disseminación de información.

## **2.6 Importancia de los bosques en hidrología**

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, se puede concluir que para un nivel de precipitación dado, la magnitud de las pérdidas es lo que determina la producción de agua en una cuenca. Por lo tanto, interesa analizar cómo el uso de la tierra, afecta la magnitud de las pérdidas y los procesos del ciclo hidrológico. Tomando la cobertura boscosa densa como uso de la tierra, se puede decir que la presencia del nuevo recurso forestal en la corteza terrestre influye en muchos procesos ecológicos y biológicos, de los que el agua es un componente vital (Novelo, 1985).

Para toda utilización del agua en las actividades humanas o naturales, es esencial la calidad. Esto es válido, trátase de agua para uso doméstico, para la irrigación, producción de energía o recreación. Los beneficios serán tanto mayores cuanto más conserve el agua sus condiciones originales, esto es, cuanto menos alterada se encuentre en sus características físicas, químicas, biológicas y su correspondiente régimen hidrológico (Rodríguez, 1996).

El agua es un recurso natural renovable que beneficia al hombre y como ya se ha mencionado, los recursos forestales ayudan a la captación de agua y a la regulación del ciclo hidrológico. El movimiento del agua de las partes montañosas hacia las partes bajas, también es afectada por el presencia de vegetación forestal. Su presencia controlaría que en las superficies bajas se presenten inundaciones; las cuales deterioran las tierras agrícolas y causan disturbios en zonas urbanas (Novelo, 1985; Rodríguez, 1996).

Rodríguez (1996), afirma que la conservación de los bosques, el anejo apropiado de las cuencas y su relación con el aprovechamiento hidráulico tiene un carácter simbiótico ya que se favorecen mutuamente en su sustentabilidad.

Todavía se tiene controversia con respecto a las funciones y beneficios de los bosques, ya que se cree que con todos los procesos internos del bosque y mayor intercepción de agua proveniente de la precipitación, se tiene mayor pérdida de flujo hacia ríos y afluentes. Los bosques intercepan montos considerables de la precipitación bruta, lo que causa que la precipitación neta sea menor que en otras coberturas vegetales; también muestran altas tasas de evapotranspiración. Sin embargo, se debe reconocer que el bosque provee de agua de mayor calidad (tanto química, como física).

Además, el bosque usa mucha de esta agua en producir una amplia cantidad de productos. En general, los suelos forestales en el trópico húmedo, muestran altas tasas de infiltración y son muy eficientes en proteger el suelo contra erosión superficial a pesar del alto potencial erosivo de la lluvia. Con esto se puede ver que el bosque provee de servicios ambientales. Por último, otro uso de la tierra puede no ser sostenible en muchas áreas donde el bosque está presente ahora (Easter et al, 1986; Stadtmüller, 1994).

Por otro lado, en regiones con una estación seca bien marcada, el caudal de las corrientes durante la estación seca, depende prácticamente del flujo base proveniente de los acuíferos. Por lo tanto, es importante mantener tasas de infiltración en la cuenca, que aseguren el aporte a las aguas subterráneas. En este sentido, un buen uso de la tierra, que evita en lo posible la compactación del suelo, contribuirá al sostenimiento del flujo base. Es altamente deseable, mantener buenos niveles de infiltración para sostener el flujo base y regular la distribución temporal del flujo (Gutiérrez, 1988b).

## **2.7 Cuencas hidrográficas y productividad hidroeléctrica**

Un servicio importante de los bosques es la captura y retención del agua de lluvia, que luego es recargada en las cuencas, donde es utilizada por el hombre para muchas actividades, ya sean agrícolas o industriales.

Todos los sistemas o ecosistemas de agua dulce, disponibles para abastecer las diferentes necesidades humanas, están organizados en cuencas hidrográficas. Muchos de los impactos en las cuencas está relacionados con las actividades del hombre, lo que provoca cambios en

procesos hidrológicos, (Easter et al., 1986). Por esto, se considera importante introducir el concepto de cuenca.

Estas son superficies de tierra que drenan el agua de la lluvia hacia un cauce principal (río) que los conduce directa o indirectamente, al mar o a un lago interior. Por lo que, ecológicamente, la cuenca se constituye así, en la unidad natural para monitorear los cambios ambientales y para controlar el uso del agua y de la tierra de manera equilibrada.

Una cuenca puede definirse como el área de alimentación de una red natural de drenaje, cuyas aguas son recogidas por un colector común. Además, de área tiene una tercera dimensión; profundidad, entendiéndose como tal, aquella comprendida entre el dosel de la cobertura vegetal, exteriormente y los estratos geológicos que limitan la cuenca hacia abajo (Faustino, 1988).

Ramakrishna (1997) define una cuenca como un área natural en la que el agua proveniente de la precipitación forma un curso principal de agua. La cuenca hidrográfica es la unidad fisiográfica conformada por el conjunto de los sistemas de cursos de agua definidos por el relieve. Los límites de la cuenca o “divisoria de aguas”, se definen naturalmente y corresponden a las partes más altas del área que encierra un río.

Campos (1987), define la cuenca hidrográfica, como una unidad territorial formada por un río principal con sus afluentes y por un área colectora de las aguas, donde están contenidos los recursos naturales básicos para las múltiples actividades humanas, donde todos estos recursos mantienen continua y particular interacción con el aprovechamiento y desarrollo productivo del hombre. Una cuenca está conformada por componentes físicos, biológicos y antropocéntricos que interactúan entre sí, cuyos recursos naturales son renovables. Los reservorios de agua (lagos, lagunas, ríos) albergan ecosistemas acuáticos que tienen un valor de existencia y que, por lo tanto, deben ser valorados en forma directa no comercial.

### **2.7.1 Factores distintivos de una cuenca**

Algunos aspectos relevantes a tomar en cuenta en una cuenca para su manejo y desarrollo son los siguientes:

La fragilidad que presentan debido a su vulnerabilidad causada por la degradación o por la intensidad de uso; el relativo aislamiento físico lo que causa un difícil acceso; poseen una población y oportunidades marginales; es un complejo de factores y oportunidades con variada escala lo que le da diversidad como fuente para la sostenibilidad; tiene oportunidades especiales que implican condiciones ventajosas para el desarrollo de ciertas actividades; los habitantes del área de una cuenca tienen la capacidad de adaptarse a las nuevas actividades o proyectos (Ramakrishna, 1977).

### **2.7.2 Parámetros físicos de la forma de una cuenca**

Dentro del análisis hidrológico se han propuesto muchas formas numéricas para describir las diferentes características de una cuenca hidrográfica. A continuación, se describirán algunas formas relevantes:

- a) Número de orden de un cauce: Horton (citado por Linsley et al, 1988), sugirió la clasificación de cauces de acuerdo al número de orden de un río, como una medida de la ramificación del cauce principal en una cuenca hidrográfica. Un río de primer orden es un tributario pequeño sin ramificaciones. Un río de segundo orden es uno que posee únicamente ramificaciones de primer orden. Un río de tercer orden, es uno que posee únicamente ramificaciones de primero y segundo orden. El orden de una cuenca hidrográfica, está dado por el número de orden del cauce principal.
  
- b) Densidad de drenaje: definida por la relación entre la longitud de los cauces dentro de la cuenca y el total de drenaje, llamada también longitud de canales por unidad de área. Una densidad alta refleja una cuenca muy bien drenada que debería responder relativamente rápido al flujo de la precipitación; una cuenca con baja densidad de drenaje refleja un área pobremente drenada con respuesta hidrológica muy lenta.

Con el fin disponer de agua de una manera fácil, el hombre se ha concentrado en la zona cercana a los ríos, lo cual causa preocupaciones ya sea por exceso o por deficiencia de agua. Esto ha obligado al hombre últimamente a preocuparse más por el aspecto de calidad del agua (Villegas 1995).

Otro concepto importante para este servicio es el caudal y se define, en una estación de un río, como la elevación del agua medida por encima de un cero arbitrario de referencia. Algunas veces, la referencia utilizada es el nivel medio del mar, pero más a menudo, se toma como referencia un punto ligeramente por debajo del nivel para el cual la descarga es cero.

El uso de la tierra alrededor de las cuencas puede tener diferentes efectos como cambios en la distribución del agua en los afluentes de la cuenca, cambios en la producción de agua o en la recarga de los afluentes, disminución en los flujos y caudales ente otros (Easter et al, 1986).

### **2.7.3 Hidroelectricidad**

Energía hidroeléctrica es la energía producida por una turbina hidráulica, usando el agua que fluye desde una alta o baja elevación. La energía se mide usualmente en múltiplos de vatios-horas. Se pueden definir tres clases de energía (Oreamuno, 1992):

a) *Promedio anual de energía*: es la energía que se puede generar en un año por el proyecto, b) *energía secundaria*: es aquella que existe en exceso de la energía firme y c) *potencial eléctrico*: las plantas hidroeléctricas se dividen generalmente en plantas de carga baja, carga media y carga alta.

Es importante que se resalte la importancia de la cobertura vegetal alrededor de una cuenca, sobre todo, si en ella existen proyectos hidroeléctricos, lo que puede contribuir a disminuir algunos costos con respecto a los embalses.

## **2.8 Pago por servicios ambientales**

El pago por servicios ambientales (PSA), es una innovación social que no emerge espontáneamente, sino que es el resultado de articulaciones diversas que inciden en la sobre

explotación de los recursos naturales, la pérdida de la biodiversidad y de la cobertura forestal. Para la creación de los PSA ha sido necesario el desarrollo histórico de los diferentes incentivos forestales, la introducción de nuevos conceptos de valoración de los servicios ambientales y la creación de una conciencia social ambiental, entre otros aspectos. En este sentido, el desarrollo institucional es básico para el nacimiento, asimilación y éxito de las innovaciones (Camacho et al. 2000).

El PSA se refiere al mecanismo financiero mediante el cual los consumidores (beneficiarios) de servicios ambientales compensan a los propietarios de los recursos que los generan con un pago en efectivo (ya sea en dinero, especies u otra forma) por una cantidad y calidad determinada de servicios brindados, en un determinado periodo de tiempo (Mejías y Segura, 2002). Estos servicios, calificados hasta ahora por la economía como externalidades positivas, se convierten ahora en un servicio más que ingresa a la esfera de la economía y podemos de esta manera empezar a pensar diferentes modalidades de transacción de los interesados en presta o adquirir ese servicio (Camacho et al 2000).

Los PSA pueden darse en diferentes contextos y sus usuarios se pueden clasificar en tres categorías: local, nacional o global, esto determina la dimensión de los pagos: internos, bilaterales, transferencias o donaciones.

### **2.8.1 Oferentes de servicios ambientales**

Se puede decir que los oferentes de servicios ambientales son los propietarios de recursos naturales renovables o no renovables de determinada región o microcuenca. En la práctica esta es una condición que ayuda a los habitantes de las zonas boscosas y áreas productoras de agua, entre otras, a disfrutar de los beneficios económicos que se derivan de la generación de los servicios ambientales (Pérez et al. 2000).

### **2.8.2 Demandantes de servicios ambientales**

Se puede decir que todos los seres humanos son demandantes de estos servicios para su propio bienestar. Pero si lo que buscamos es el pago por estos servicios los demandantes pueden ser diversos (Pérez et al. 2000). En general, son los interesados en el servicio ambiental los que deben pagar por ello, en este sentido, se pueden citar los siguientes ejemplos:

- ?? Una comunidad o municipio que tiene su fuente de agua en el territorio de otra comunidad o municipio
- ?? El estado que quiere proteger sus inversiones en represas de agua, centrales hidroeléctricas o zonas de reserva natural (áreas protegidas)
- ?? Los organismo financieros y de cooperación internacional que estén interesados en la conservación de bosques tropicales o de la biodiversidad
- ?? Las empresas o fundaciones privadas con intereses específicos de protección del medio ambiente en zonas rurales o en sus zonas de trabajo para aminorar efectos

En este contexto, productores y productoras individuales, grupos de productores, comunidades enteras o países que protegen el ambiente serán oferentes de servicios ambientales, mientras que las colectividades a diferentes niveles, como son municipios, estado central, cooperación internacional o también empresas privadas e individuos serán los demandantes de servicios ambientales interesados en estos servicios (Comisión de Servicios Ambientales, 1998).

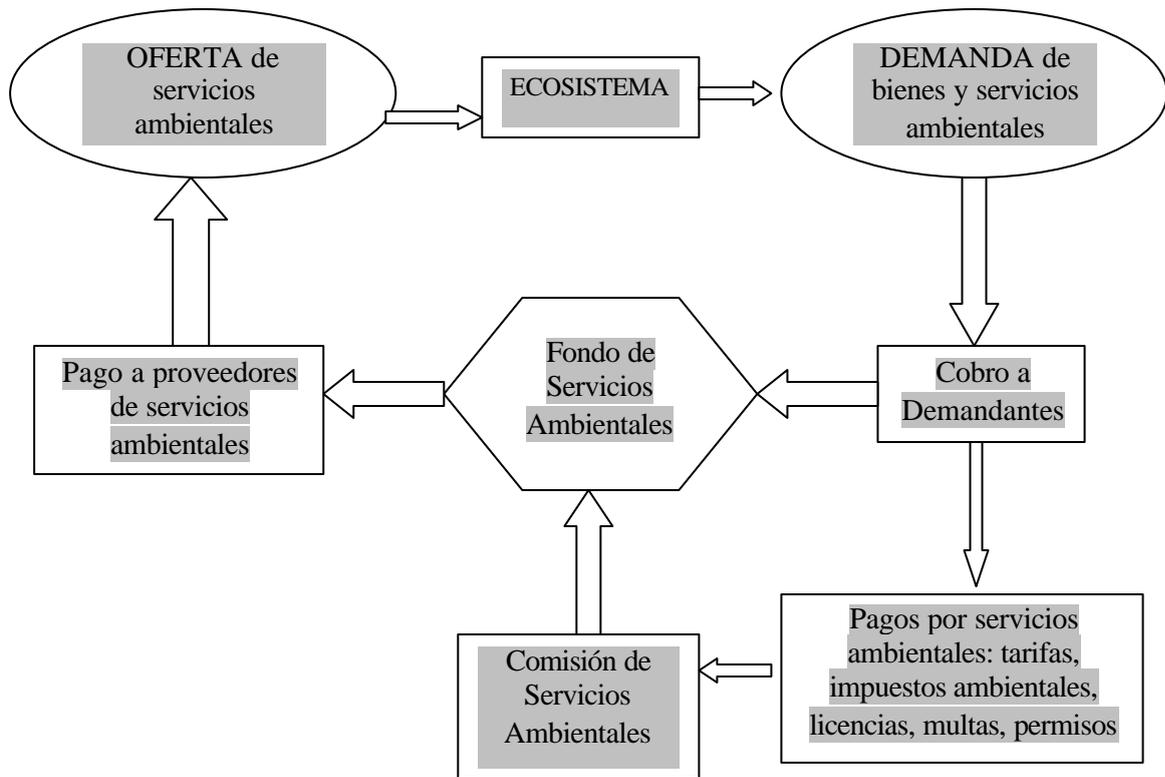
Las primeras iniciativas de pago por servicios ambientales (PSA) se han desarrollado alrededor del manejo y aprovechamiento sostenible de áreas boscosas con el uso de incentivos forestales para evitar la destrucción del recurso por los habitantes locales, tratando así de preservar implícitamente un conjunto de servicios ambientales y beneficiar a las comunidades. Luego, se utilizaron otros mecanismos financieros para que los propietarios “no aprovechasen” sus bosques por plazos mas importantes. Finalmente, con la aprobación del protocolo de Kioto (1997), los recursos boscosos se vuelven canjeables como sumideros de carbono en beneficio de países industrializados. Así, las primeras iniciativas de PSA estaban relacionadas con una transferencia del derecho de manejo hacia otros actores sociales o países (Pérez et al. 2000).

### **2.8.3 Esquemas de pago por servicios ambientales**

Cualquiera que sea el servicio ambiental, es necesario tener un esquema global para la implementación de un mecanismo de pago por servicios ambientales. Existe una amplia gama de posibilidades para el diseño de mecanismo o esquemas de pago por servicios ambientales, desde acuerdos voluntarios entre productores y usuarios que requieren sencillos arreglos institucionales, hasta esquemas de cobertura y relevancia nacional, que suponen readecuaciones a los marcos institucionales y legales, así como, la articulación de políticas, la creación de

nuevas instituciones (o la incorporación de otras ya existentes), con el objetivo de sentar una plataforma institucional para la implementación de mecanismos de pago por servicios ambientales.

En este proceso, los criterios y mecanismo de transparencia y participación son críticos para legitimar el proceso. En la figura 2, se muestra un esquema para PSA que puede ser utilizado como base.



**Figura 2. Esquema de Pago por Servicios Ambientales (Pérez et al, 2000)**

Para que se implemente un esquema de pago por servicios ambientales es muy importante que la iniciativa sea de las comunidades involucradas; que los demandantes sientan la necesidad de mejorar y/o conservar las condiciones ambientales que los rodean (disponibilidad de agua, conservación de suelo y agua, etc.) y que los oferentes estén dispuestos al desarrollo de actividades que garanticen la recuperación y/o la conservación de los recursos naturales de la zona.

Un mecanismo de PSA escoge sobre todo un modelo económico para lograr una gestión ambiental exitosa. Por ello, la implementación de este esquema debe partir de una demanda consensuada y basarse en un marco institucional sólido que permita expresar los compromisos sociales logrados. Solamente una relación contractual formal entre la oferta y la demanda, garantizará un proceso de PSA con el potencial de éxito mínimo requerido (Pérez et al. 2000),

El fondo de servicios ambientales (FSA) es un componente decisivo para la implementación de los PSA, es un ente que puede garantizar que los fondos serán administrados con transparencia. Debe ser manejado de una manera ágil y eficiente y contar con un marco jurídico que garantice el funcionamiento adecuado del FSA; especialmente cuando se trata de entidades de carácter público autónomas (alcaldías, empresas distribuidoras de agua, etc.). Los demandantes determinan quien manejará el FSA. Los mecanismos de captación de fondos son variados, desde impuestos locales, hasta la creación de una política de bienes inmuebles que favorezca a aquellos productores que contribuyen al manejo sostenible de suelos y agua. La creación de un fondo de servicios ambientales es una señal de la voluntad de los demandantes por buscar nuevas relaciones sociales entre actores.

La Comisión de servicios ambientales (COSA) representa a los demandantes de los servicios ambientales y a los que pagarán por ellos; debe estar conformada por los representantes de todos los implicados en el pago por servicios ambientales. La COSA tiene la custodia del fondo de servicios ambientales y velará por la coordinación de actividades para implementar exitosamente los mecanismos de pago por servicios ambientales. Es importante mencionar que los esquemas de pagos de servicios ambientales deben tener algunas características que garanticen mecanismo eficientes de operación, minimizando los costos de transacción<sup>3</sup>, de tal manera que no sea el financiamiento de la institucionalidad la que termine restándole viabilidad al esquema.

---

<sup>3</sup> Los costos de transacción son aquellos derivados de la implementación del esquema de pago por servicios ambientales entre las partes involucradas. Concretamente, estos costos tienen que ser menores que los beneficios que, como resultado de la implementación del esquema, se tienen que cubrir. Los costos de transacción pueden ser entendidos como los costos operativos (Romero, 1997 citado por Herrador y Dimas, 2000).

#### **2.8.4 Incentivos y pago de servicios ambientales**

Los incentivos para proteger el ambiente son mecanismos de política dirigidos a estimular o conducir a los agentes (consumidores y productores) a desarrollar determinadas acciones y comportamientos para alcanzar metas y objetivos ambientales (Mejías y Segura, 2002).

La principal diferencia entre el concepto de PSA y los incentivos tradicionales es que: el PSA es una transacción comercial de un servicio, donde el usuario (consumidor) del servicio debe pagar a quien le brinda tal servicio (productor). Mientras los incentivos, se refieren a transferencias de recursos unidireccionalmente con el propósito de influir en el comportamiento de determinados agentes económicos (Mejías y Segura, 2002).

La semejanza que existe entre estos conceptos es la siguiente: al igual que un incentivo, el servicio ambiental, permitirá estimular a los productores de servicios ambientales a conservar los recursos naturales que producen tales servicios. Sin embargo, en el caso del PSA el estímulo ocurrirá producto de la realización de una transacción comercial, es decir, al reconocerse el pago de un servicio que se brinda gratuitamente. En el caso de los incentivos, el objetivo principal es, el estímulo mismo de determinados agentes económico para influir sobre sus gustos y preferencias hacia la conservación (Mejías y Segura, 2002).

#### **2.8.5 Tipos de servicios ambientales**

Los cuatro servicios ambientales reconocidos por los esquemas de PSA y que se están pagando en la actualidad son (Rosa et al. 1999).

- ?? Protección de las fuentes productoras de agua para uso urbano, rural e hidroeléctrico
- ?? Protección de la biodiversidad de ecosistemas y formas de vida para su utilización sostenible en investigaciones científicas, farmacéuticas, de mejoramiento genético y protección de ecosistemas y formas de vida
- ?? Protección de la belleza escénica natural para fines turísticos y científicos
- ?? Mitigación de gases de efecto invernadero

### **2.8.6 Protección de las fuentes productoras de agua para uso urbano, rural e hidroeléctrico**

La pérdida de cobertura forestal puede producir impactos importantes sobre el ciclo hidrológico sobre el microclima en una determinada unidad geográfica. En este caso, el servicio que brinda el bosque se traduce en mantener los niveles de calidad y cantidad de agua a lo largo del tiempo (Chomitz et al. 1998; Comisión de Servicios Ambientales, 1998). Primero; cuando hablamos de calidad de agua, nos referimos a mantener los niveles de erosión, sedimentación y flujo de nutrientes a niveles naturales en el tiempo. El efecto de la sedimentación es la reducción de la calidad del agua para los diferentes usos, como son consumo doméstico, actividades productivas y generación de energía (Camacho et al. 2000).

Segundo; cantidad de agua implica flujos estacionales constantes, respuesta de flujos máximos y protección contra inundaciones. Cambios significativos en el flujo de agua puede generar, importantes efectos negativos sobre actividades productivas como la agricultura, el turismo y la producción de energía hidroeléctrica. (Camacho et al. 2000).

La situación crítica de muchas de las cuencas de nuestros países plantea la urgente necesidad de mejorar sustancialmente la función de regulación hidrológica y la importancia que representa la implementación de los servicios ambientales como instrumento para conducir a este proceso de mejoramiento. Este instrumento económico puede ayudar a beneficiar directamente a las poblaciones empobrecidas que están dentro de la cuenca y que en la actualidad, por su propia marginación y prácticas de sobrevivencia, tienden a reducir todavía más la cobertura vegetal permanente que es clave para la regulación de las aguas superficiales en la parte alta de la cuenca (Rosa et al. 1999).

### **2.8.7 Importancia de los servicios ambientales como herramienta de manejo de cuencas**

El grado actual de deterioro de los recursos naturales impone la necesidad de ir más allá de las estrategias tradicionales de protección y conservación. Los pagos por servicios ambientales están surgiendo como una opción para el manejo sostenible de los recursos naturales y la protección de las cuencas hidrográficas. La implementación de esquemas de PSA, puede llegar a constituir un instrumento valioso con potencial de contribuir a impulsar y promover estrategias de desarrollo sostenible en cuencas hidrográficas degradadas y en áreas donde es

necesario conservar los ecosistemas que ahí existen. A la vez se garantiza un flujo sostenible de servicios ambientales fundamentales para el desarrollo nacional.

La idea central de un mecanismo de pago por servicios ambientales es que reconoce el esfuerzo que el productor realiza, tanto en el conjunto de prácticas cuyo objetivo es la producción de bienes agrícolas comercializables, como los servicios ambientales. La venta de estos servicios ambientales constituyen un instrumento financiero que contribuye a que los productores transformen sus patrones de producción degradantes hacia técnicas y sistemas de producción ambientalmente positivos, que además de mejorar la producción agropecuaria, amplían y mejoran la generación de los servicios ambientales dentro de la cuenca hidrográfica (Rosa et al. 1999).

### **2.8.8 La valoración económica y el pago por servicios ambientales**

Es necesario ampliar la provisión del flujo de beneficios económicos y sociales generados por los servicios ambientales. En este marco, la estimación del valor económico de los servicios ambientales adquiere un significado estratégico. Muchas decisiones respecto al desarrollo se basan en consideraciones y criterios económicos. En ese sentido, la estimación del valor económico de los servicios ambientales contribuye a proporcionar criterios económicos para comparar decisiones alternas complementarias que hagan explícitos los beneficios monetarios producidos por dichos servicios (Herrador y Dimas 2000).

La valoración económica se define como “todo intento de asignar valores cuantitativos y cualitativos a los bienes y servicios proporcionados por los recursos ambientales, independientemente de si existen o no precios de mercado que nos ayuden a hacerlo” (Barbier et al. 1998, citado por Camacho et al. 2000). Para poder implementar un PSA es necesario cuantificar, valorar económicamente y calcular los montos a pagar por los servicios ambientales para saber si son o no significativos. En este sentido, la valoración económica puede ayudar a contestar algunas interrogantes relacionados al pago por servicios ambientales, siendo necesario también avanzar en la definición de marcos legales e institucionales en un plano de vinculación y armonización de políticas, como la agropecuaria, ambiental e hídrica, entre otras (Herrador y Dimas, 2000).

La valoración económica contribuye a cuantificar los beneficios sociales derivados de la provisión de servicios ambientales. Sin embargo, es importante considerar que un estudio de valoración económica no arroja automáticamente, el monto a pagar a los productores por los servicios ambientales que producen. Desde el punto de vista económico, el monto de pago por servicios ambientales debe ser, por un lado, lo suficientemente elevado par asegurar que el productor no sufra pérdidas económicas al cambiar sus practicas y por el lado de quienes pagaran, lo suficientemente moderado, que logre representar el beneficio generado por los servicios ambientales (Rudas, 1995).

Esto significa que el monto del pago por servicios ambientales, debe ser definido en un “rango” cuyo mínimo a pagar a los productores, sea el costo de servicios), sea el costo de producir los servicios ambientales y su máximo (a cobrar a los usuarios de los servicios), sea el beneficio generado por los mismos.

Lo anterior es básico; de otra forma el productor no realizará la transformación de sus prácticas ya que los costos que tendría que asumir no serían cubiertos o retribuidos. Lo mismo sucede con los usuarios de los servicios ambientales, ya que lo beneficiarios se sentirían obligados a pagar por un servicio que consideran que es el *Estado* quien debe preocuparse por su protección (Herrador y Dimas, 2000).

La contribución de la valoración económica es reportar el valor monetario de los beneficios derivados de la producción de servicios ambientales, independientemente de si existen precios o no que nos ayuden a calcularlo (Barbier et al. 1998), lo cual contribuye a reflejar las preferencias de los productores y consumidores para los diferentes bienes y servicios, así como, mejorar el reconocimiento de dichos servicios por parte de la población en general (Herrador y Dimas, 2000).

De esta manera se convierten en indicadores monetarios del valor que tiene para un individuo o conjunto de individuos el servicio en cuestión (Romero, 1997). Esto evita la sobre o subestimación del beneficio social proveído por un servicio ambiental en particular.

Valorar económicamente los servicios ambientales significa obtener una medición monetaria de los cambios en el bienestar que una persona o grupo de personas experimenta a causa de una mejora o daño de esos servicios ambientales (Herrador y Dimas, 2000).

El valor económico de un servicio ambiental puede cambiar de un periodo a otro, ya que este valor se ve afectado por las percepciones que las personas tengan de los beneficios de los servicios ambientales. Los beneficios percibidos también varían de un estrato social a otro. Es decir, no existen valores económicos de servicios ambientales absolutos, ya que las percepciones de las personas son dinámicas y cambiantes. El valor económico que las personas le asigna a los servicios ambientales está estrechamente relacionado con el tipo y nivel de información que estas tengan sobre los beneficios directamente atribuibles a tales servicios.

Es importante mencionar que antes de valorar económicamente los servicios ambientales se debe tener información suficiente sobre los distintos procesos ecológicos que sirven de base para la provisión de diferentes servicios ambientales, ya que esto, es parte del valor que el bien tiene para la sociedad y el ecosistema (Barbier et al. 1998).

Para concluir algunas de las ventajas más importantes de la valoración económica es que puede arrojar información sobre la viabilidad económica de la implementación de un esquema de pago por servicios ambientales y también puede servir de instrumento eficaz de facilitación y mejoramiento del uso racional, manejo y gestión de los servicios ambientales (Barbier et al. 1998).

### 3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En la vertiente del Océano Pacífico de Guatemala se encuentran las cuencas de los ríos María Linda y Los Esclavos, en las cuales se ubican las hidroeléctricas de Aguacapa y Los Esclavos, respectivamente. Estas hidroeléctricas han evidenciado los mayores problemas de sedimentación de los embalses y diques.

#### 3.1 Cuenca del Río María Linda

La cuenca del Río María Linda está situada en los departamentos de Sacatepéquez, Guatemala, Santa Rosa y Escuintla; estando limitada al norte por la cuenca del Río Motagua, al Sur por el Océano Pacífico con un litoral de 37 km, de longitud, al Este por la cuenca del Río Los Esclavos, al Sureste por la cuenca del Río Paso Hondo y al Oeste por el Río Achiguate. Dentro de esta se encuentra la parte sur del valle de Guatemala, así como, total y parcialmente varios centros urbanos e industriales de gran importancia, como las ciudades de Guatemala, Villa Nueva, Petapa, Amatitlán y Escuintla.

El Río María Linda, se compone de dos brazos principales que son: el Río Michatoya con una longitud aproximada de 67 km, y el Río Aguacapa con 40.5 km, estos ríos a la vez cuentan con otros afluentes importantes; para el Río Aguacapa: El Sauce, Blanco, Cimarrón, Las Conchas y el Río Plata. El Río Aguacapa al unirse con el Río La Puerta, recibe el nombre de María Linda.

El orden de las corrientes (López, 1972), el número total de las corrientes de todos los órdenes es de 9980 corrientes. La longitud de las corrientes es de 7364 km. La longitud del cauce principal es de 136.5 km. El perímetro de la cuenca es de 276 km. La densidad de drenaje es de 2.65 km/km<sup>2</sup>. La longitud promedio del flujo superficial es de 188 m. La frecuencia de drenaje es de 3.6 corrientes/km<sup>2</sup>. La elevación máxima de la cuenca es de 3760 msnm. La pendiente media es de 179 m/km.

Con base a los factores cuantificados e indicados anteriormente (CONAMCUEN, 1998), puede decirse que en general el subsuelo no es muy resistente y su permeabilidad no es muy alta (alta densidad de drenaje) en este valor influye más que todo la región montañosa de la cuenca que es

más representativa de esta situación, que la parte sur donde el material si es permeable. El relieve general de la cuenca es su pendiente media de 17.97%, que favorece el proceso de erosión de las laderas. La precipitación media en la cuenca es de 1500 mm, la humedad relativa varía entre 75 a 80% y la temperatura promedio es de aproximadamente 20 °C. La evapotranspiración potencial es de 1247 mm.

De acuerdo a la clasificación climática de Guatemala, según el sistema Thorthwaite, la cuenca cuenta con ocho diferentes combinaciones de climas, a saber: a) Cálido, sin estación fría bien definida, húmedo, con invierno seco, b) Cálido, sin estación fría bien definida, muy húmedo, con invierno seco, c) Cálido, sin estación fría bien definida, muy húmedo, sin estación seca bien definida, d) Cálido, sin estación fría bien definida, semiseca, con invierno seco, e) Semicálido, sin estación fría definida, húmedo, con invierno seco, f) Semicálido, con invierno benigno húmedo, con invierno seco, g) Templado, con invierno benigno húmedo, con invierno seco, h) Semicálido, con invierno benigno, semiseco, con invierno seco (FAO, 1993).

Según Holdridge, las zonas de vida existentes en la cuenca son: Tropical Seca, Tropical Húmeda, Sub-tropical Húmeda, Montano Bajo Húmedo y Montano Muy Húmedo.

### **3.1.1 Planta hidroeléctrica Aguacapa**

Dentro de la cuenca del río María Linda, se encuentra la planta hidroeléctrica Aguacapa, ubicada en la zona sur-oriental de la república de Guatemala, entre los departamentos de Santa Rosa y Escuintla, en las coordenadas geográficas; Latitud: 14° 17' 25" y Longitud: 90° 30' 15", siendo el acceso a través de las rutas nacionales CA-1 en el kilómetro 36 y CA-2 en el kilómetro 87.

Utiliza las aguas del río Aguacapa para la generación de electricidad y es a *filo de agua*. Su capacidad nominal es de 90 MW, la cual se obtiene con un caudal de diseño de 22 m<sup>3</sup>/s. La caída bruta es de 554.10 m. Fue puesta en servicio en octubre de 1,981, siendo su generación promedio de 254350 MWH hasta el año 2000. El embalse de regulación tiene un volumen total de 300000 m<sup>3</sup>. Las turbinas son tipo Pelton, de Eje Horizontal. (EGEE, 2003).

### **3.2 Cuenca del Río Los Esclavos**

La cuenca del Río Los Esclavos, se encuentra en la vertiente del Océano Pacífico, de Guatemala, y comprende parte de los departamentos de Guatemala, Jalapa y Santa Rosa, en la cual se ubica la hidroeléctrica Los Esclavos. Esta hidroeléctrica ha evidenciado los mayores problemas de sedimentación en el embalse.

El principal río de la cuenca es el Río Los Esclavos, el cual tiene una longitud de 144.30 km (Alvarado, 1979), desde su nacimiento hasta la desembocadura en el océano pacífico, Sus principales afluentes son: Río Pinula (28.9 km de longitud), río Las Cañas (32.6 km) y el Río San Antonio (34.10 km). Estos son afluentes en la parte superior, ya que en la parte inferior solamente tiene el Río Las Margaritas.

La precipitación varía de 1000 a 2000 mm anuales. De acuerdo a la clasificación climática de Guatemala, según el sistema Thorthwaite, la cuenca cuenta con tres diferentes combinaciones de climas, a saber: a) Cálido, con invierno benigno húmedo, con invierno seco, b) Templado, sin estación fría bien definida, húmedo, con invierno seco, c) Semicálido, sin estación fría bien definida, húmedo, con invierno seco (Alvarado, 1979).

De acuerdo a Holdridge, las zonas de vida existentes en la cuenca son: Bosque húmedo Sub-tropical templado, Bosque húmedo Sub-tropical frío, Bosque húmedo Montano bajo Sub-tropical y bosque muy Húmedo montano bajo Sub-tropical.

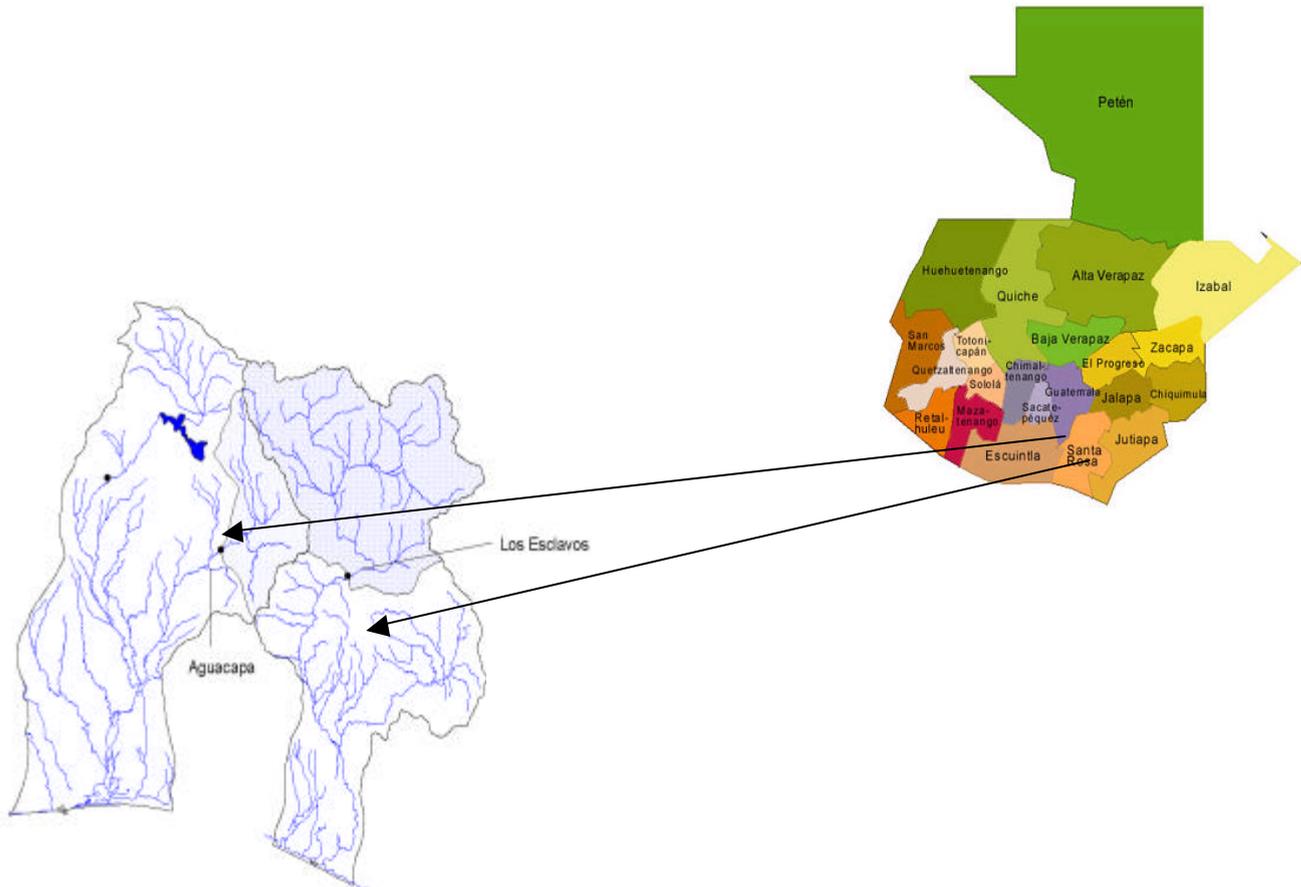
El área de la cuenca Los Esclavos está conformada por una superficie de 104554 ha, que cubren parte de los municipios de Santa Catarina Pinula, San José Pinula, Fraijanes, Cuilapa, Santa María Ixhuateán, Casillas, San Rafael Las Flores, Barberena, Santa Cruz Naranjo, Nueva Santa Rosa y San José Acatempa. La altitud máxima en la cuenca es de 1800 msnm y la mínima cercana a los 700 m.

Las principales actividades productivas de esta cuenca son: la agricultura limpia anual que cubre un 35% del área de interés para la hidroeléctrica, un 19% con cultivo de café, un 3% de pastos y un 10% de otros cultivos agrícolas. Estas áreas constituyen el 67% del total de superficie de la zona de captación hídrica que abastece al embalse de Los Esclavos. Esta población está conformada por pequeños y medianos agricultores propietarios de pequeñas fincas.

### 3.2.1 Planta hidroeléctrica Los Esclavos

Dentro de la cuenca del Río Los Esclavos, se encuentra la planta hidroeléctrica Los Esclavos, que se ubica en el Sureste de la República de Guatemala, en el municipio de Cuilapa, departamento de Santa Rosa, en las coordenadas geográficas; Latitud: 14° 15' 09" y Longitud: 90° 16' 35", siendo el acceso a través de las rutas nacionales CA-1 en el kilómetro 68.

Utiliza las aguas del Río Los Esclavos para la generación de electricidad y es por gravedad. Su capacidad nominal es de 15 MW, la cual se obtiene con un caudal de diseño de 15.36 m<sup>3</sup>/s. Fue construida en 1965. El embalse de regulación tiene un volumen que varía entre 121400 a 250000 m<sup>3</sup>. Las turbinas son tipo Francis de Eje Vertical (EGEE, 2003).



**Figura 3. Ubicación de la Planta Hidroeléctrica Aguacapa y Los Esclavos**

## **4. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO**

La metodología de investigación contempló el desarrollo, sistematización y análisis de las cuencas hidrográficas María Linda y Los Esclavos oferentes del servicio hídrico, para lo cual fue necesarios realizar estudios que le dieron sustento y solidez técnica y científica a dicha investigación. El estudio cuenta de cinco etapas, las cuales comprendieron: la identificación de áreas críticas que afectan la calidad y cantidad de agua para la generación de energía eléctrica; cuantificación y determinación de los costos ocasionados por la erosión generada en diferentes usos del suelo; identificación de áreas potenciales para los sistemas agroforestales; propuesta de un mecanismo de compensación para el pago de los servicios ambientales para la implementación de los sistemas agroforestales; y la propuesta del sistema de monitoreo y seguimiento ambiental en las áreas críticas de las dos cuencas.

### **4.1 Identificación de áreas críticas que afectan la calidad y cantidad de agua para la generación de energía eléctrica**

#### **4.1.1 Análisis espacial**

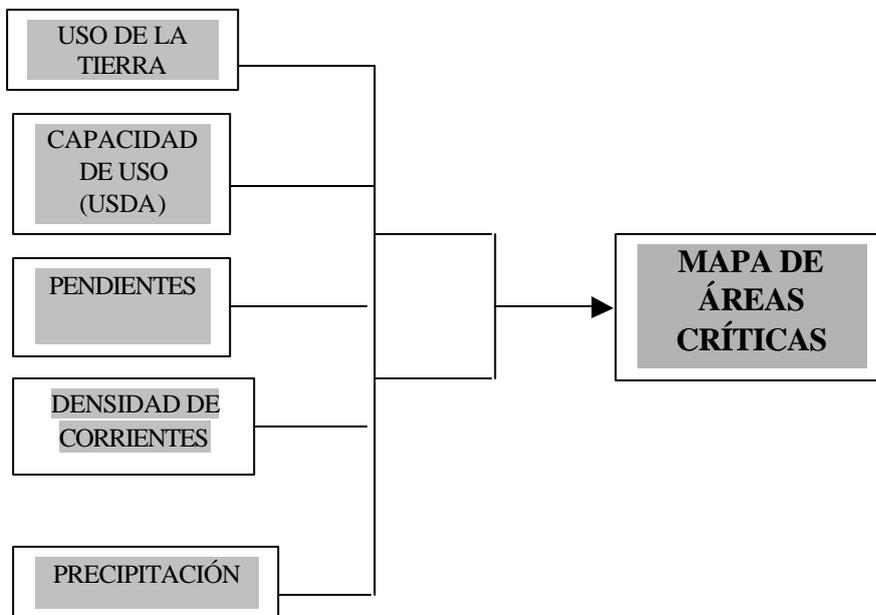
La información básica espacial utilizada proviene de dos fuentes principales: i) cartografía básica y temática del área elaborada por fuentes oficiales y estudios realizados en la zona por otros autores; ii) interpretación propia de una serie de fotografías aéreas y satelitales más recientes. Esta información fue suministrada por el laboratorio de Sistemas de Información Geográfica del (MAGA). En este estudio se identificaron las áreas con diferentes usos de la tierra, mediante el uso del SIG, mapas topográficos e información secundaria sobre las cuencas.

Para realizar los análisis respectivos se utilizó la base cartográfica y temática en formato digital generada por CATIE-ESPREDDE del MAGA, en Guatemala, realizada a escala 1:250000.

Para determinar el marco de trabajo se procedió a delimitar las dos cuencas de interés, obteniéndolas del mapa de cuencas, a nivel nacional, a escala 1:250,000, siendo las cuencas del Río Los Esclavos y la del Río María Linda, respectivamente. Asimismo, se utilizó el uso del suelo de INAB, a escala 1:250000.

El análisis fue realizado desde un inicio en el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica (SIG) del CATIE en Costa Rica, utilizando para el efecto el programa ARC-VIEW 3.3?, con sus extensiones “Spatial Analys”, “3D” e “Hidrologic Modeling”. Posteriormente, se continuó en el Laboratorio de SIG de la Fundación para el Desarrollo y la Conservación (FUNDAECO) de Guatemala.

El proceso se muestra a continuación con el flujograma o cruce de capas de información secuencial utilizado para la identificación de áreas críticas<sup>4</sup> a escala 1:250000, tal como se muestra en la figura 2. Es necesario aclarar que para fines de esta investigación se denominan áreas críticas a aquellas áreas que están siendo subutilizadas o cambiando de uso, es decir, el cambio de áreas con cultivo de café a cultivos limpios.



**Figura 2. Flujograma del procedimiento utilizado para la identificación de áreas críticas**

---

<sup>4</sup> Se definió área crítica para la generación de energía eléctrica como: aquellas áreas que debido a variables tales como uso de la tierra, capacidad de uso, pendientes, densidad de corrientes y precipitación, producen externalidades negativas para la generación de energía eléctrica de las cuencas en estudio.

La definición y ponderación de las variables utilizadas con su respectivo peso se muestran a continuación en el cuadro 1.

**Cuadro 1. Definición y ponderación de variables con su respectivo peso**

<b>FACTOR VARIABLE</b>	<b>PESO</b>
<b>Uso de la tierra</b>	
Urbano y suelo desnudo	1
Cultivos anuales	2
Bosques secundarios y matorrales	3
Pastos y cultivos permanentes	4
Bosque Mixto, coníferas y latifoliadas	5
<b>Capacidad de uso (USDA)</b>	
I y II	1
III y IV	2
V y VI	3
VII	4
VIII	5
<b>Pendiente (%)</b>	
0 – 4	1
4 – 8	2
8 – 16	3
16 – 32	4
Mayor a 32	5
<b>Precipitación (mm)</b>	
800 – 1400	1
1400 – 2000	2
2000 – 2600	3
2600 – 3200	4
3200 - 4000	5
<b>Densidad de corrientes (No.)</b>	
Muy baja	1
Baja	2
Media	3
Alta	4
Muy alta	5

**El Índice de Criticidad** = (Factor Usot\*WUsot) + (FactorCut\*WCut) + (FactorPend\*Wpend) + (FactorPP\*WPP) + (FactorDens.Cor\*Wdens.Cor).

## 4.2 Cuantificación y estimación de los costos ocasionados por la erosión generada en diferentes usos de la tierra que afectan la calidad y cantidad de agua para la generación de energía eléctrica

### 4.2.1 Estimación de erosión

Se estimó la erosión en las dos cuencas con base a los usos de suelo evaluados, utilizando el programa Arc View GIS basado en la RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) (Renard et al, 1996; Engel, 1999) dado por:

$$A = R * K * LS * C * P$$

Donde:

- A: Pérdida de suelo expresada en el sistema métrico internacional  $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$
- R: Erosividad pluvial en  $MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}$
- K: Erosividad del suelo  $(t.ha^{-1}) (MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1})?$
- LS: relación (adimensional) de pérdida de suelo originada por la longitud y gradiente de la pendiente
- C: Relación (adimensional) de pérdida de suelo originada por el manejo y uso de la tierra (índice de cobertura de cultivo)
- P: Relación (adimensional) de pérdida de suelo originada por el uso de prácticas de conservación.

A continuación se describe el proceso para estimar los factores de la ecuación.

#### 4.2.1.1 Factor R

Para la determinación del factor R que midió la energía cinética de la lluvia sobre la superficie del suelo, se utilizó el mapa de erosividad pluvial de Guatemala a escala 1:250000 generado por el Proyecto Asistencia Técnica y Generación de Información CATIE-ESPRED (2001), utilizando Arc View 3.2.

#### 4.2.1.2 Factor longitud de la pendiente (LS)

Este factor fue estimado con la ecuación derivada por Moore (1986) y utilizada por Engel (1999). La figura 3 esquematiza el proceso desarrollado. La ecuación está dada por:

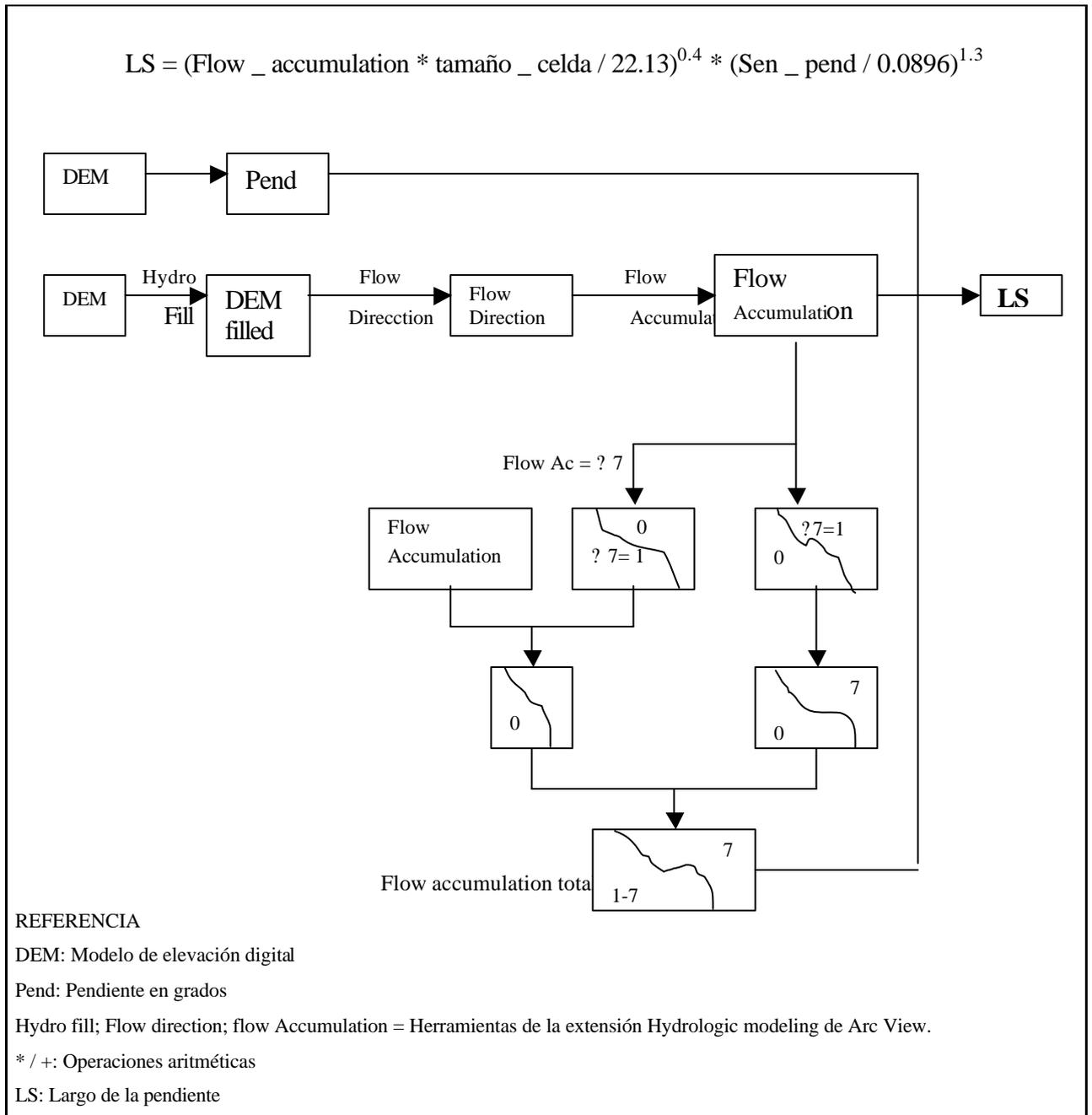
$$LS = (Flow\_accumulation * tamaño\_celda / 22.13)^{0.4} * (Sen\_pend / 0.0896)^{1.3}$$

Donde:

LS: longitud de la pendiente

Flow accumulation: acumulación de flujo

Sen pend: seno de la pendiente en grados



**Figura 3. Proceso desarrollado en Arc View para estimar LS, Engel (1999)**

#### 4.2.1.3 Factor de erodabilidad del suelo K

Los datos para la estimación del factor K se obtuvieron del mapa de suelos de Guatemala a escala 1:250000 generado por el proyecto CATIE-ESPRED (2001) y del monograma de erodabilidad del suelo (Wischmeier y Smith, 1978).

#### 4.2.1.4 Factor cobertura “C”

Se asignaron los factores de cobertura a los mapas de uso del suelo de Guatemala a escala 1:2500000 generados por el proyecto (CATIE-ESPRED, 2001). El factor de cobertura se basa en valores generados por distintos autores (Wischmeier, y Smith, 1978), Cruz (2002), Hernández (2001), Castro (1992, citado por Kuntschik, 1996), Arana (1992), Varhson (1991). Los valores oscilan entre 0 y 1. El principio de selección de los valores respondió al objetivo del análisis: simular un cambio de uso del suelo, de cobertura forestal hacia agrícola y sistemas agroforestales. Los valores utilizados en este estudio son: Agricultura = 0.4, bosque mixto = 0.003, café = 0.07, cítricos = 0.02.

#### 4.2.1.5 Factor P

Se consideró el valor de 1 para todas las categorías de uso, debido a que no se recopiló información espacial de prácticas de conservación. Dicho valor representa la relación existente entre las pérdidas de suelo bajo una determinada práctica de conservación y las pérdidas de suelo que ocurren en el mismo sitio sin prácticas de conservación (Arana, 1992).

### 4.2.2 Estimación y clasificación de la erosión

Los valores de pérdida del suelo se obtuvieron del producto de mapas en formato “raster” usando el programa Arc View 3.2, posteriormente éstos se clasificaron en cinco grandes categorías basados en la clasificación propuesta por la FAO (1980), cuyos rangos se presentan en el cuadro 2.

**Cuadro 2. Clasificación de la pérdida de suelo propuesta por la FAO (1980)**

Clase	Rango ( $\text{tha}^{-1}$ )
Muy ligera	0 a 4.9
Ligera	5 a 9.9
Moderada	10 a 49
Severa	50 a 200
Muy severa	? de 200

### **4.2.3 Estimación económica de las externalidades negativas para la generación de energía eléctrica.**

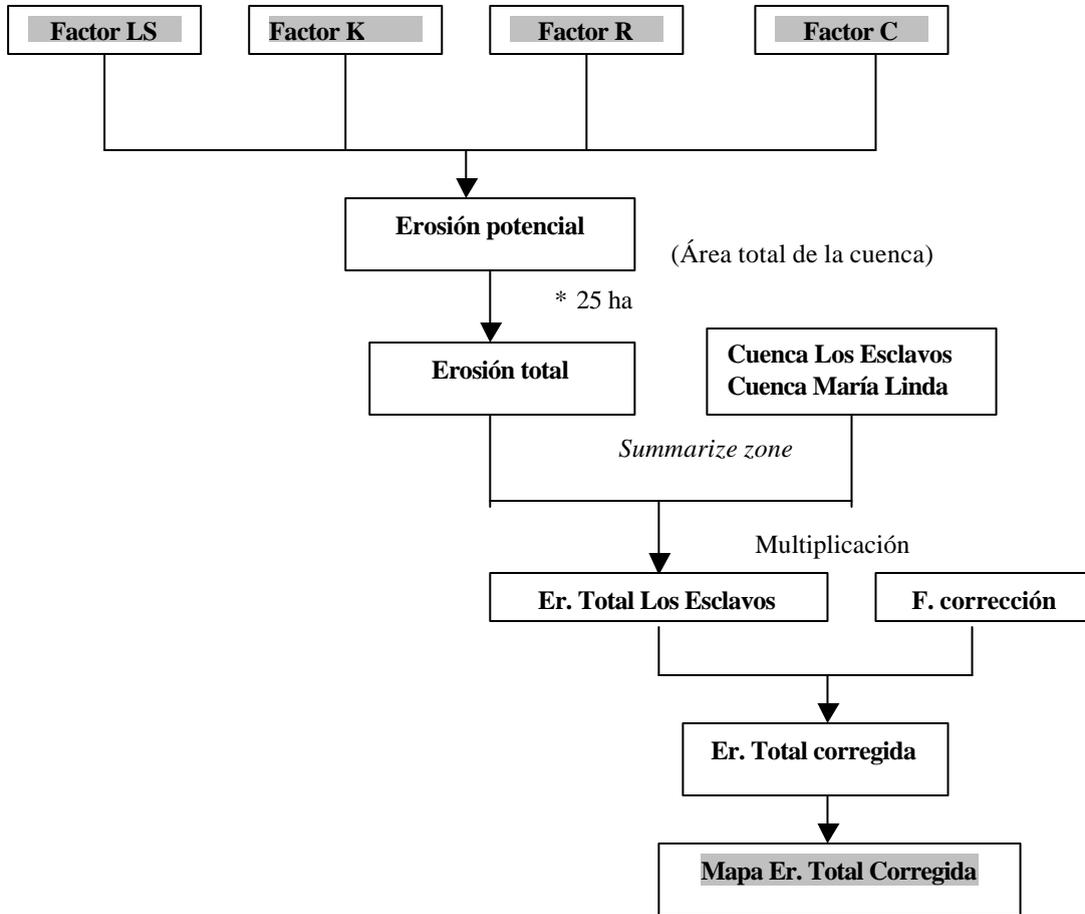
Uno de los beneficios directos básicos esperados de la implementación de los sistemas agroforestales con frutales y sistemas agroforestales con especies forestales es la reducción de sedimentos transportados por los cauces de agua a los embalses, y en este caso, para los embalses de Aguacapa y Los Esclavos.

Esto repercutirá en reducir el número de veces del dragado de los embalses con el beneficio de tener menor pérdida en la generación de energía eléctrica, lo que también conlleva a un menor impacto negativo de los desembalses sobre la biodiversidad aguas abajo.

La técnica de valoración empleada en este caso, se denomina “Costos Evitados”, la cual responde a la relación dosis respuesta (causa-efecto).

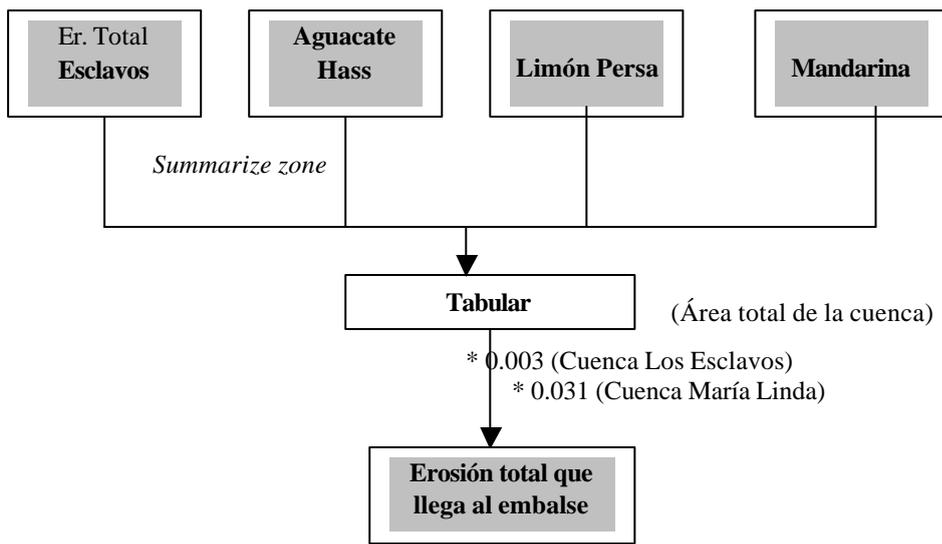
En este caso, la dosis es la implementación de los sistemas agroforestales y la respuesta es la reducción en la sedimentación de los embalses. Según los cálculos hechos en esta investigación, como consecuencia de las acciones desarrolladas por la implementación de los sistemas agroforestales se reducirá la erosión y sedimentación en las cuencas María Linda y Los Esclavos.

A continuación en la figura 4, se muestra el flujograma utilizado para la determinación de la erosión total en las cuencas que estaría llegando al embalse con el escenario actual de uso de la tierra.



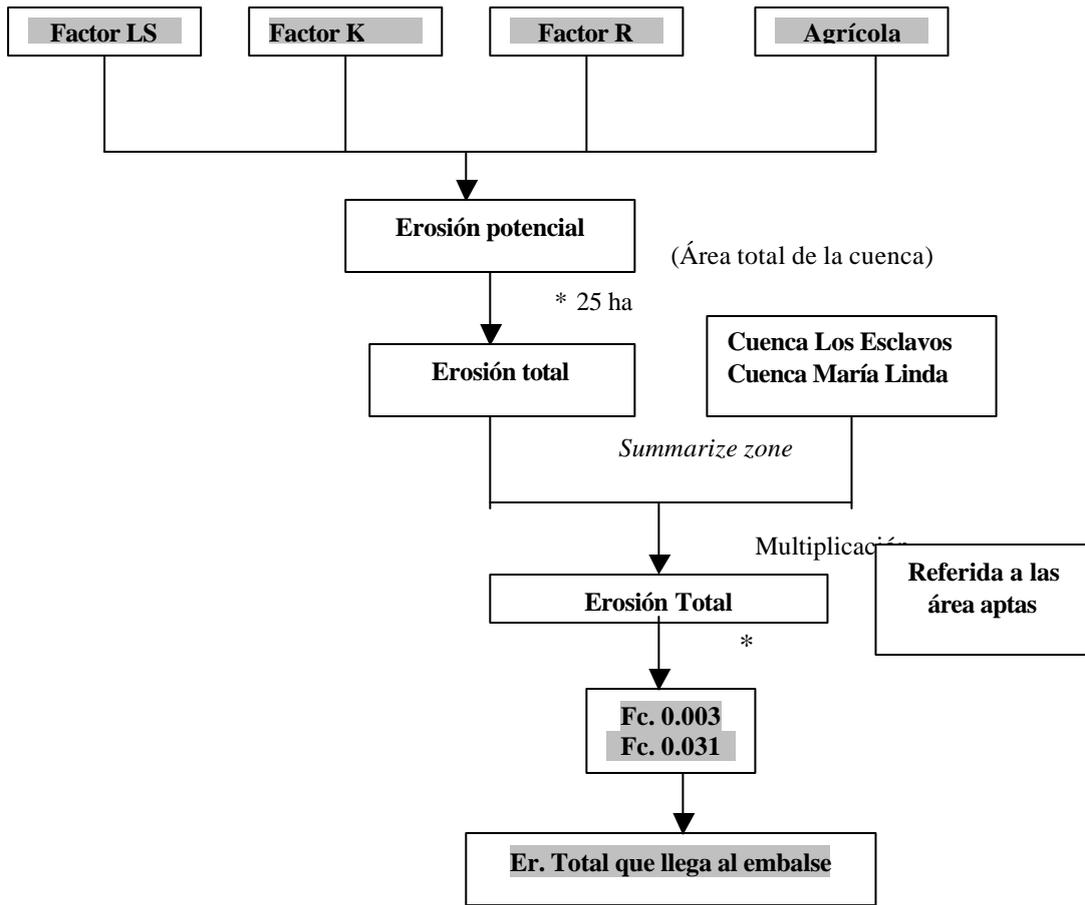
**Figura 4.** Flujograma utilizado para determinar la erosión total escenario actual

A continuación en la figura 5, se muestra el flujograma utilizado para la determinación de la erosión total en las cuencas ya corregida que estaría llegando al embalse con todos los cultivos propuestos.



**Figura 5. Flujograma utilizado para determinar la erosión total corregida**

En la figura 6, se muestra el flujograma utilizado para la determinación de la erosión total en las cuencas ya corregida que estaría llegando al embalse con el escenario Agrícola.



**Figura 6. Flujograma utilizado para determinar la erosión total con el escenario agrícola**

A continuación en la figura 7, se muestra el flujograma utilizado para la determinación de la erosión total en las cuencas ya corregida que estaría llegando al embalse con el escenario Agroforestal.

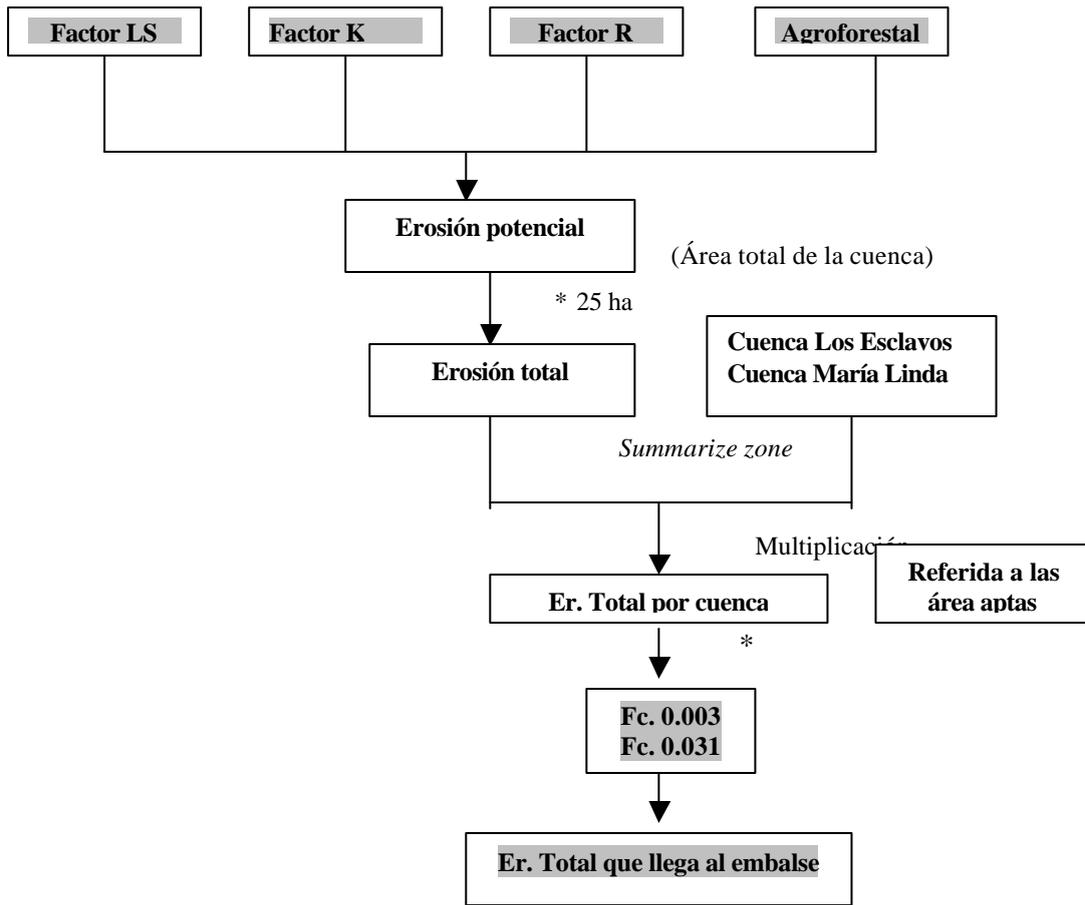
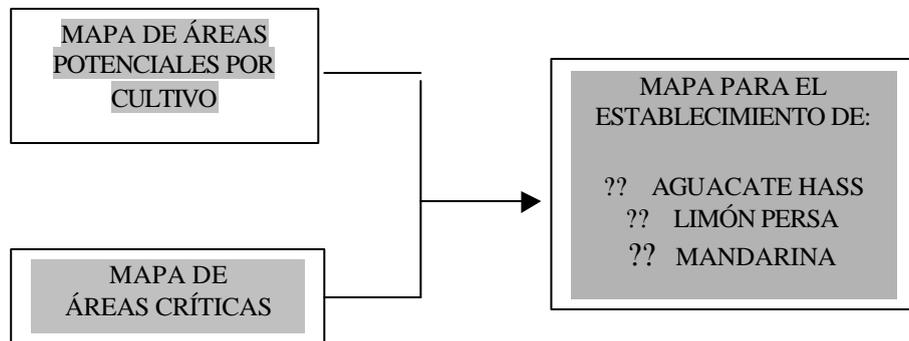


Figura 7. Flujograma utilizado para determinar la erosión total con el escenario agroforestal

### 4.3 Identificación y priorización de las áreas potenciales para la implementación de los sistemas agroforestales en las cuencas María Linda y Los Esclavos

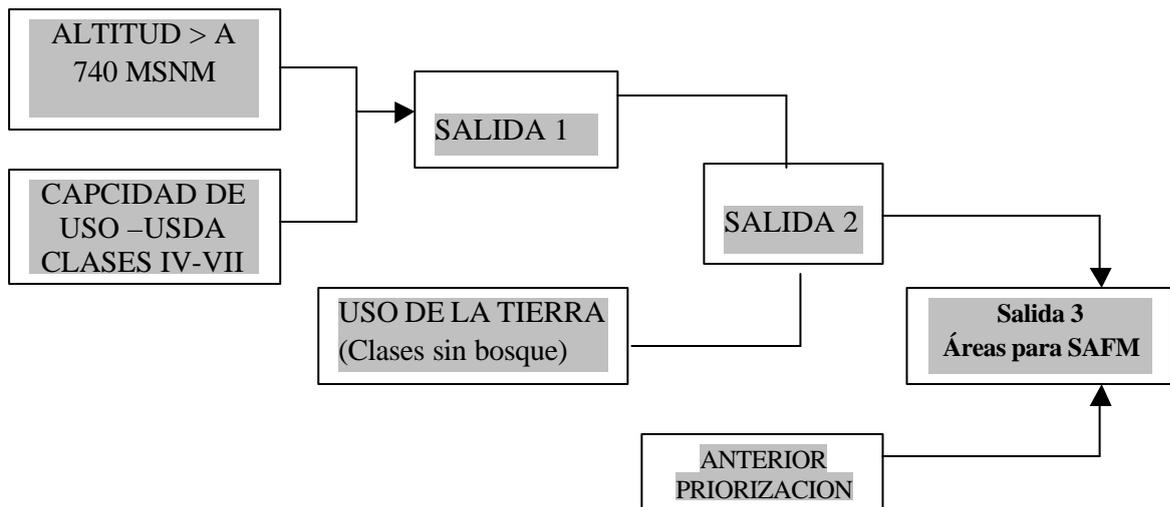
Por medio de la opción de “Unión de dos temas”, del Análisis Espacial”, se unieron las capas de “Áreas Potenciales” de los cultivos a establecer de Aguacate Hass, Limón Persa y Mandarina, mismas que fueron identificadas en el Laboratorio de SIG del MAGA, con el Mapa de Áreas Críticas, dando como resultado el Mapa de áreas aptas para el establecimiento de los cultivos, tal como se muestra en la figura 8.

Las variables utilizadas (MAGA, 2002) para identificar las áreas potenciales para los cultivos fueron: Rango de elevación (msnm), rangos climáticos, edáficos y pendiente (%). Otro aspecto fundamental a considerar es que se excluyeron las áreas protegidas y la cobertura forestal del país dentro del análisis espacial realizado.



**Figura 8.** Flujograma del procedimiento utilizado para la identificación de las áreas aptas para el establecimiento de los cultivos frutales

Para la identificación de las áreas priorizadas para las especies maderables, se consideró una altitud a partir de 740 msnm, por ser la altura a la que están ubicados los embalses de Aguacapa y Los Esclavos, posteriormente, se cruzaron las otras capas temáticas, tal como se aprecia en la figura 9.



**Figura 9. Flujograma del procedimiento utilizado para la identificación de las áreas priorizadas para el establecimiento de los SAFM**

Seguidamente se realizó la priorización de las áreas dependiendo de la situación actual y de la criticidad de las mismas. El peso fue otorgado con pesos desde 1 a un valor máximo de 5, las categorías van desde no prioritaria hasta muy alta prioridad, tal como se observa en el cuadro 3.

**Cuadro 3. Situación actual de las áreas por categoría y peso**

CATEGORÍA	PESO
No prioritaria	1
Poco prioritaria	2
Prioritaria	3
Alta prioridad	4
Muy alta prioridad	5

Se consideran áreas con categoría de muy alta prioridad aquellas que se encuentran sin cobertura vegetal, sobre utilizadas, con capacidad de uso clase VII, con precipitaciones arriba de los 3200 con pendiente mayor a 32 % y con una muy alta densidad de corrientes, factores que fueron tomados en cuenta para la priorización respectiva y a las cuales se les asignó el peso mayor de 5. Se consideró que las áreas a intervenir serán desde prioritaria hasta muy alta prioridad.

#### **4.4 Propuesta de un mecanismo de compensación para el pago de servicios ambientales por la implementación de sistemas agroforestales en áreas críticas de las dos cuencas**

El mecanismo de compensación para el pago de los servicios ambientales está orientado a definir el marco legal, institucional y financiero para operar dicho mecanismo.

El Marco financiero definió los montos y formas de pago por servicios ambientales.

El Marco institucional definió los arreglos, mecanismo de coordinación e instancia de decisión para operar el mecanismo de compensación.

El Marco jurídico definió los compromisos y obligaciones de las instituciones y del beneficiario del pago del servicio ambiental.

Esta propuesta fue definida conjuntamente con las autoridades del Ministerio de Energía y Minas, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, el Instituto Nacional de Electrificación, Instituto Nacional de Bosques y el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

También fue consensado con los técnicos del Proyecto de la Fruticultura y Agroindustria (PROFRUTA/MAGA) responsables de los sistemas agroforestales con frutales y con los técnicos del Instituto Nacional de Bosques (INAB) responsables de los sistemas agroforestales con especies maderables.

#### **4.5 Formulación de un sistema de monitoreo y evaluación ambiental en las áreas críticas de las cuencas María Linda y Los Esclavos**

Para la elaboración del sistema de monitoreo ambiental se utilizaron los indicadores ambientales bajo el esquema Presión-Estado-Respuesta, con el fin de medir los niveles de sedimentación que estarán llegando a los embalses, los cuales se pretende reducir con la implementación de los sistemas agroforestales, en las áreas priorizadas para el efecto.

Se elaboró una matriz con las probables actividades antrópicas y naturales que están generando sedimentos, tales como altas pendientes, cambio del uso del suelo, sobreuso, cultivos sin practicas de conservación de suelo y agua, entre otros.

Para el efecto se debe establecer las categorías y los mecanismos a verificar del avance en la reducción de los sedimentos a través de criterios e indicadores, entendiéndose por criterio una “categoría de condiciones, procesos o aspectos, mediante los cuales se puede evaluar un sistema o elemento determinado sea este natural, social o la interacción de ambos”. El indicador por su parte “permite describir objetivamente características de esos sistemas o elementos y a observación periódica muestra tendencias”.

#### **?? Criterios para la selección de indicadores ambientales**

La OECD (1994) como entidad pionera en la construcción de un sistema de monitoreo ambiental, define qué los criterios para la selección de indicadores deben cumplir con las siguientes características:

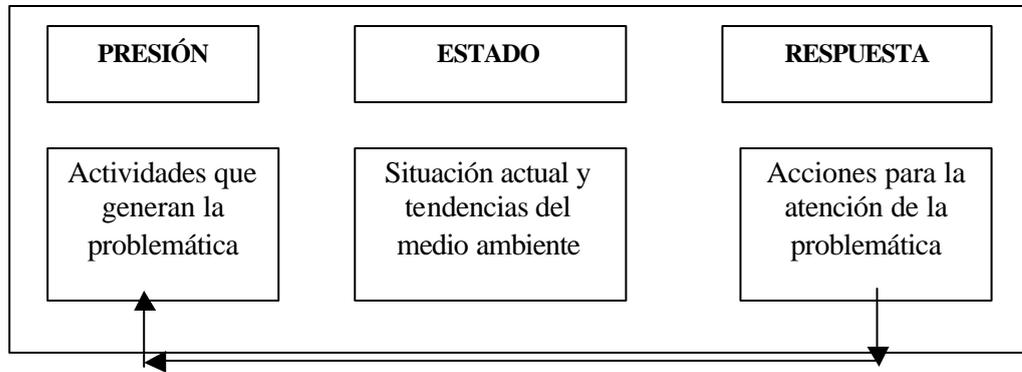
- a) Deben proporcionar una visión de las condiciones ambientales, presiones ambientales y respuesta de la sociedad.
- b) Sencillo y fácil de interpretar y capaz de mostrar las tendencias a través del tiempo.
- c) Responder a cambio en el ambiente y las actividades humanas
- d) Aplicable a escala nacional o regional, según sea el caso
- e) Debe existir un valor con el cual se pueda ser comparado
- f) Técnicamente debe estar teórica y científicamente bien fundamentado

- g) Debe basarse en consensos internacionales
- h) Debe ser posible relacionarlos con el modelo económico vigente

Los datos necesarios para evaluar los indicadores deber caracterizarse por estar disponibles con una razonable relación costo / beneficio, calidad confiable y documentada y actualizados a intervalos regulares (OECD, 1994).

### ?? Esquema de análisis de los indicadores ambientales

Dado el proceso de evaluación, facilidad de comprensión y aceptación por entidades relacionadas con el tema, el diseño de indicadores ambientales se ha desarrollado bajo el esquema de “Presión – Estado – Respuesta”. Dicha metodología fue desarrollada por la agencia del medio ambiente de Canadá y la OECD. El esquema está basado en una lógica de causalidad que presupone relaciones de acción y respuesta entre factores como la economía y el medio ambiente. En la figura 10 se esquematiza la relación entre los tres grupos de indicadores.



**Figura 10. Esquema básico de análisis de los indicadores**

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Identificación de las áreas críticas que afectan la calidad y cantidad de agua para la generación de energía eléctrica.

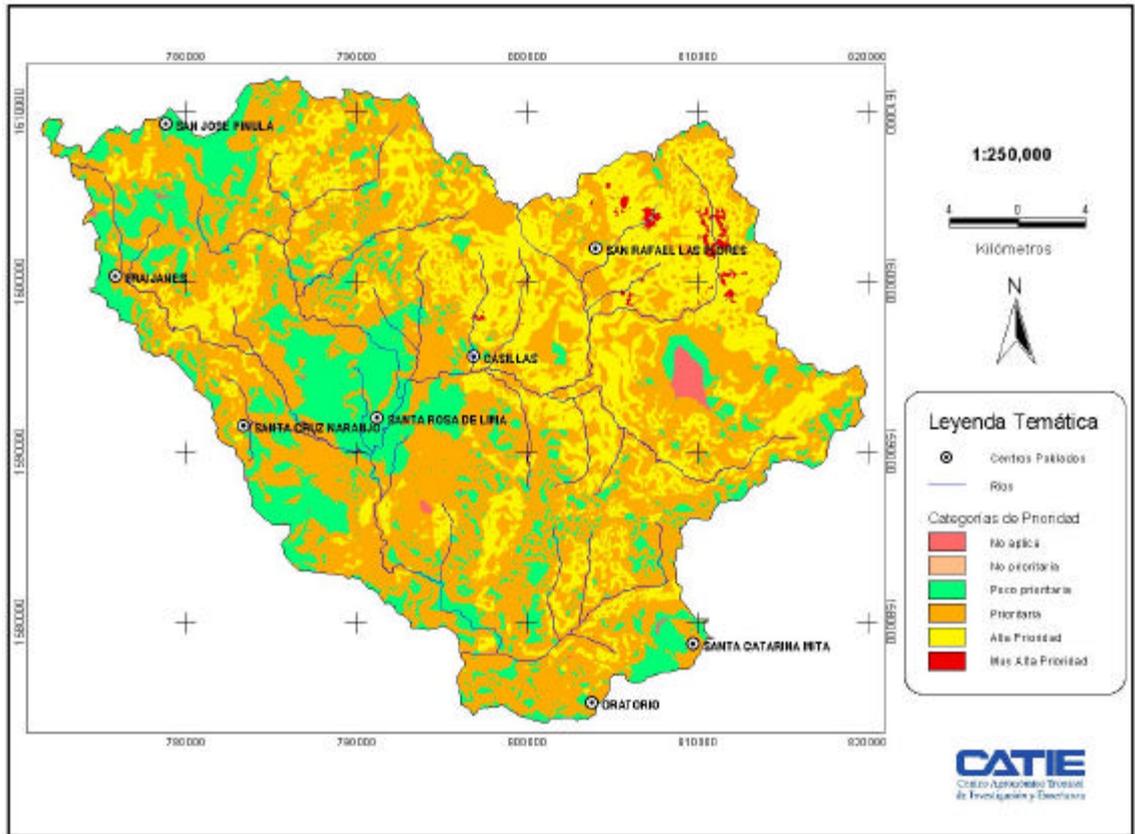
La áreas críticas identificadas de acuerdo al análisis espacial realizado utilizando el Sistema de Información geográfica (SIG) se muestran en el cuadro 4, las cuales son áreas que están sin cobertura vegetal, altas pendientes, áreas sobreutilizadas y con altas precipitaciones.

**Cuadro 4. Áreas críticas por categoría de priorización en las dos cuencas**

CUENCA	Priorización	Hectáreas
Los Esclavos	No prioritaria	14.44
	Poco prioritaria	17628.28
	Prioritaria	54481.32
	Alta prioridad	26100.72
	Muy alta prioridad	515.80
Total		<b>98740.56</b>
María Linda	No prioritaria	69.12
	Poco prioritaria	14282.88
	Prioritaria	18205.56
	Alta prioridad	1192.48
	Muy alta prioridad	---
Total		<b>33750.04</b>

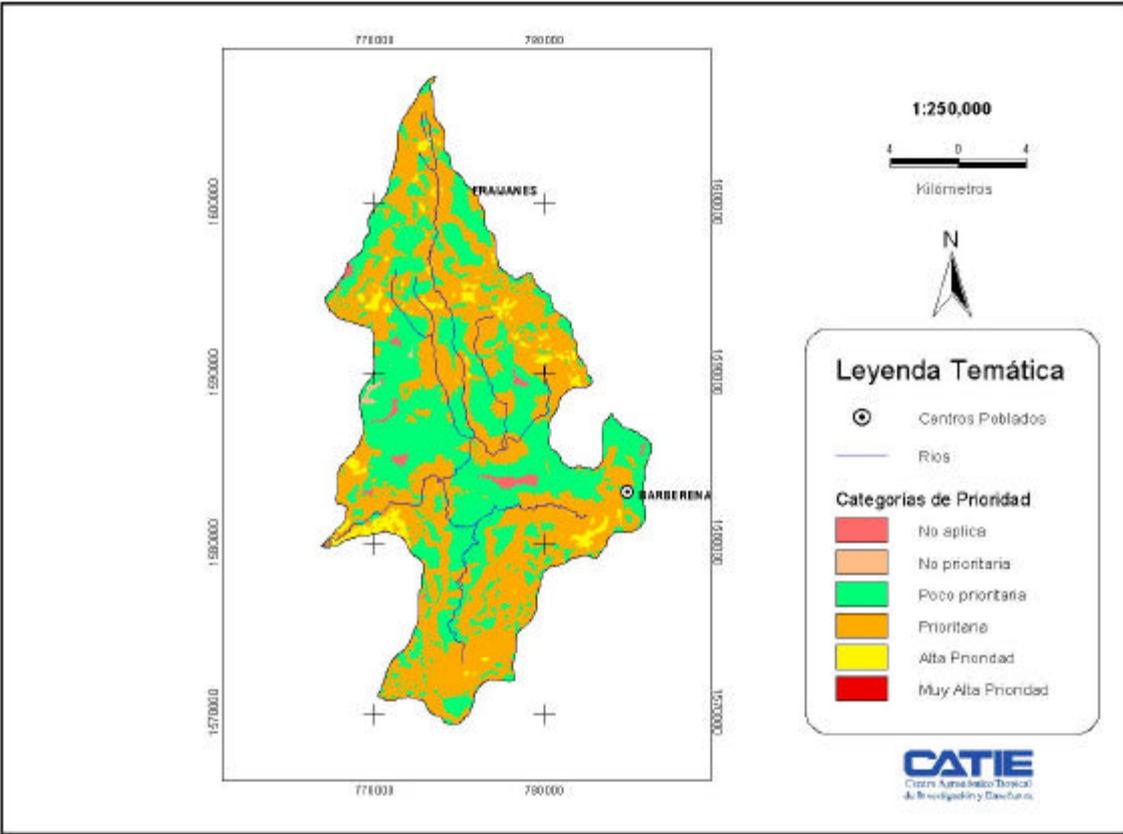
En el cuadro 4 se aprecia que para la cuenca Los Esclavos el 55% de las áreas críticas pertenecen a la categoría de prioritaria y la que menor cantidad de áreas tiene es la categoría de Muy alta prioridad con un 0,5 %. También se puede observar que para la cuenca Los Esclavos la categoría de Alta prioridad tiene 54481.32 ha, seguida de la Alta prioridad con 26100.72 ha.

En la figura 11 se muestra el mapa con las categorías de priorización en la cuenca Los Esclavos.



**Figura 11. Mapa de ubicación de categorías de priorización cuenca Los Esclavos**

Para la cuenca María Linda la categoría de Prioritaria tiene un 54% equivalente a 18205.56 ha, seguida de la categoría Alta prioridad con un 3.5 % equivalente a 1192.48 ha. En la figura 12 se muestran el mapa con la ubicación de categorías de priorización en la cuenca María Linda.



**Figura 12. Mapa de ubicación de categorías de priorización cuenca María Linda**

## 5.2 Cuantificación y estimación de los costos ocasionados por la erosión generada en los diferentes usos de la tierra que afectan la calidad y cantidad para la generación de energía eléctrica

Como se puede apreciar en el cuadro 5, para la Presa Aguacapa del Río María Linda con el escenario Actual (cobertura que existe actualmente) dentro de las áreas críticas de acuerdo a USLE, el movimiento de suelo es de 1239098 t.ha<sup>-1</sup>.año, del cual se calcula que estaría llegando al embalse 38412 t.ha<sup>-1</sup>.año.

**Cuadro 5. Cantidad de erosión en t.ha<sup>-1</sup>.año en cada una de las cuencas con diferentes escenarios de uso de la tierra.**

CUENCA	Escenario Agricultura		Escenario SAF		Escenario Actual	
	Total (t.ha <sup>-1</sup> .año)	Embalse (t.ha <sup>-1</sup> .año)	Total (t.ha <sup>-1</sup> .año)	Embalse (t.ha <sup>-1</sup> .año)	Total (t.ha <sup>-1</sup> .año)	Embalse (t.ha <sup>-1</sup> .año)
María Linda*	3428735	106290	379133	11753	1239098	38412
Los Esclavos**	9391807	28175	979190	2937	5270100	15810

Con el escenario Agricultura si todas las áreas críticas se convirtieran en agrícolas, se estaría moviendo una cantidad de suelo equivalente a 3428735 t.ha<sup>-1</sup>.año, de las cuales se espera que llegaría al embalse 106290 t.ha<sup>-1</sup>.año, que equivale a un incremento de 36% de sedimentos que estaría llegando al embalse.

Para el escenario Agroforestal si todas las áreas críticas se convirtieran en los sistemas agroforestales propuestos, se movería una cantidad de suelo equivalente a 379133 t.ha<sup>-1</sup>.año, del cual se calcula que llegaría al embalse 11753 t.ha<sup>-1</sup>.año, lo que equivale a una reducción de sedimentos del 31 % de sedimentos que dejaría de llegar al embalse.

Así mismo se muestra en el cuadro 5, que para el embalse Los Esclavos, con el escenario Actual (cobertura que existe actualmente) dentro de las áreas críticas de acuerdo a USLE, el movimiento de suelo es de 5270100 t.ha<sup>-1</sup>.año del cual se calcula que estaría llegando al embalse 15810 t.ha<sup>-1</sup>.año.

Con el escenario Agricultura si todas las áreas críticas se convirtieran en agrícolas, se estaría moviendo una cantidad de suelo equivalente a 9391807 t.ha<sup>-1</sup>, de las cuales se espera que llegaría al embalse 28175 t.ha<sup>-1</sup>, que equivale a un incremento de 56% de sedimentos que llegaría al embalse.

Para el escenario Agroforestal si todas las áreas críticas se convirtieran a los sistemas agroforestales propuestos, se movería una cantidad de suelo equivalente a 979190 t.ha<sup>-1</sup>.año, del cual se calcula que llegaría al embalse 2937 t.ha<sup>-1</sup>.año, lo que equivale a una reducción de sedimentos del 19 % de sedimentos que dejaría de llegar al embalse.

## 5.2.1 Estimación de costos evitados

### 5.2.1.1 Embalse Aguacapa

Los costos de los principales trabajos de mantenimiento que se ejecutan cada año en la Presa de Derivación y el Embalse de Regulación Diaria de la planta hidroeléctrica Aguacapa, para obtener una operación confiable y continua de la planta, se muestra en el cuadro 6.

**Cuadro 6. Costos de mantenimiento del embalse Aguacapa/ año**

<b>RUBRO</b>	<b>COSTO (Q)</b>	<b>COSTO (\$)</b>
3 limpiezas del embalse de Regulación al año	47100.00	5887.50
Dragado de aprox. 30000 m <sup>3</sup> de sedimentos en Presa de Derivación	490500.00	61312.50
Dragado de aprox. 4500 m <sup>3</sup> de sedimentos en salida del desfogue	75000.00	9375.00
<b>TOTALES</b>	<b>612600.00</b>	<b>76575.00</b>

**Fuente:** Costos suministrados por la Planta Hidroeléctrica Aguacapa –EGEE, 2003. Tipo de cambio 1 US\$ = Q.8,00

Desde hace varios años se hacen tres limpiezas al año al Embalse, el objetivo de estas limpiezas es extraer todo el sedimento que ha llegado hasta el embalse, para que el mismo no llegue a las turbinas ya que las deteriora. Este sedimento llega hasta el embalse debido a que los desarenadores no se dan abasto por la gran cantidad de sedimento que trae el río en las crecidas de invierno. Estas limpiezas del embalse se realizan por lo general, en los meses de mayo, agosto y noviembre de cada año. Para la realización de dichas limpiezas se utiliza una motoniveladora 120 G marca Caterpillar y un cargador frontal 930 marca Caterpillar, estas máquinas se utilizan en promedio de 20 horas (10 horas el sábado y 10 horas el domingo).

El costo aproximado de una motoniveladora arrendada es de Q.415 por hora (incluye combustible y operador) y el de un cargador frontal arrendado (incluye combustible y operador) es de Q.370 por hora, por lo que el costo total del arrendamiento de la maquinaria es de Q.15700 por cada limpieza del embalse. Además de las limpiezas del embalse, se realiza un desarenado del dique, el cual se realiza anualmente, de este desarenado se extrae un promedio de 30000 m<sup>3</sup> de material sedimentado con un costo aproximado de Q.490500. El material sedimentado en el dique se extrae por medio de una excavadora, la cual deposita en camiones de volteo que trasladan el material a un botadero ubicado a 2 km., del dique. Este dragado del dique, contribuye a que los desarenadores no se llenen tan rápido, por lo que reduce en gran parte, el sedimento que llega al Embalse.

Otro de los trabajos programados anualmente es la extracción del material sedimentado en el área bajo el puente que va de Casa de Máquinas, hacia la subestación, este material se extrae por medio de una excavadora y camiones de volteo, el material es extraído para evitar que el río socave la cimentación de las bases del puente o dañe la estructura de las mismas. El material extraído es utilizado para el balasto de los caminos de acceso y la realización de algunas obras de concreto programadas. Se extraen aproximadamente 4500 m<sup>3</sup> de material a un costo estimado de Q.75000.

#### **5.2.1.2 Embalse Los Esclavos**

Con la información proporcionada por la EGEE se realizó una estimación de costos evitados en el embalse Los Esclavos, por presentar una información mas completa de los costos incurridos. Los trabajos de mantenimiento y desarenado en el Embalse Los Esclavos al inicio de la operación de la planta, se efectuaban en un promedio de cada cinco años, en condiciones normales, pero en la actualidad estos trabajos se están ejecutando cada cuatro años y se ha detectado que los elementos de máquinas salen muy deteriorados, lo cual da indicios de que con el tiempo habrá que reducir el periodo de mantenimiento.

Estas situaciones obedecen presumiblemente a los grandes movimientos de tierra en toda la cuenca y el arrastre de materiales hacia la Presa Reguladora, lo que hace imposible el desarenado total del material. Los costos totales anuales por mantenimiento del embalse Los Esclavos se muestran en el cuadro 7.

**Cuadro7. Costos totales anuales por mantenimiento del embalse Los Esclavos**

<b>RUBRO</b>	<b>COSTO TOTAL ANUAL (Q)</b>	<b>COSTO TOTAL ANUAL (US\$)</b>
Desarenado del embalse aprox. 40000 m <sup>3</sup> de sedimentos	400000.00	50000.00
Mantenimiento de las Compuertas	100000.00	12500.00
Mantenimiento de una Válvula tipo Mariposa	325925.00	40740.63
Mantenimiento de las turbinas:		
Rodete tipo Francis	643355.72	80419.46
Paletas directrices	132650.24	16581.28
Anillos intersticiales guía y revestimiento	342282.81	42785.35
Platos superiores e inferiores de las turbinas	373190.25	46648.78
Anillos y espejos deslizantes	25290.76	3163.34
Pérdida de venta de energía	1677866.67	209733.00
<b>TOTAL</b>	<b>4020561.45</b>	<b>502570.18</b>

**Fuente:** Costos suministrados por el Departamento de Programación y Control de Producción (EGEE, 2003).

La tubería de presión aún está en condiciones aceptables para la operación de la planta, pero de continuar estas condiciones de asolvamiento de los ríos que alimentan el Río Los Esclavos, sí podría reducir considerablemente su vida útil, lo que representaría un costo muy elevado la sustitución de la misma. La tubería de descarga del desarenador No.2, si tiene algunos daños considerables, la cual, deberá sustituirse en un mediano plazo, por un costo aproximado de Q2000000 (EGEE,2003).

El precio del Kw/hr a la venta es de 0.065 de dólar. La producción de energía es de 4.4 millones de Kw/hr (noviembre/ mes / 30 días) y el tiempo que paran las máquinas para desarenar es de 22 días. Teóricamente en 22 días que paralizan las máquinas para desarenar pierden 3.22 millones de Kw/hr, que traducido en dólares equivale a US\$.209733 a lo que es en Q.1677866.67

El costo total/ t.ha<sup>-1</sup> se determinó a través de la relación “**costo total /cantidad de sedimentos**” que llegan actualmente al embalse de acuerdo a lo reportado por EGEE.

Es decir:

$$\$502570.18 / 52000 \text{ t.ha}^{-1} = \$9.66/ \text{ t.ha}^{-1}.$$

### 5.2.1.3 Contenido de sedimentos que llegan al embalse Los Esclavos

En el cuadro 8, se muestra la diferencia entre el escenario Actual y el escenario Agroforestal, así como el incremento y costo total / t.ha<sup>-1</sup>.año.

**Cuadro 8. Incremento y costo total / t.ha<sup>-1</sup>.año de sedimentos en el Embalse Los Esclavos.**

<b>Embalse</b>	<b>Diferencia Escenarios Actual vrs. Agroforestal (t.ha<sup>-1</sup>.año)</b>		<b>Incremento (t.ha<sup>-1</sup>.año)</b>	<b>Costo total (t.ha<sup>-1</sup>.año) (US\$)</b>
Los Esclavos	15810	2937	12873	124353.18
<b>TOTAL</b>				<b>124353.18</b>

Como se aprecia en el cuadro 8, con el escenario Actual se incrementan en 12873 t.ha<sup>-1</sup>.año de sedimentos que llegan al embalse aumentando por ende en US\$ 124353.18 el costo total de mantenimiento del embalse. Por lo que la implementación del escenario Agroforestal reduciría esta cantidad de sedimentos y bajaría los costos de mantenimiento.

### 5.2.1.4 Clases de erosión en los diferentes escenarios en la cuenca Los Esclavos

Tal como se aprecia en el cuadro 9, para el escenario Actual la clase de erosión Muy severa es la que mas extensión ocupa con 22375.00 ha, seguida de clase Muy ligera y en menor cantidad la clase Ligera con 75.00 ha. En la figura 13 se muestra el mapa con la clase de erosión en el escenario Actual para la cuenca Los Esclavos.

**Cuadro 9. Clase de erosión por cada escenario en la cuenca Los Esclavos**

<b>Clase de Erosión</b>	<b>Escenario Actual (ha)</b>	<b>Escenario Agrícola (ha)</b>	<b>Escenario Agroforestal (ha)</b>
Muy Ligera	10125.00	10200.00	3575.00
Ligera	75.00	25.00	50.00
Moderada	275.00	125.00	950.00
Severa	650.00	400.00	1600.00
Muy Severa	22375.00	920.00	5450.00

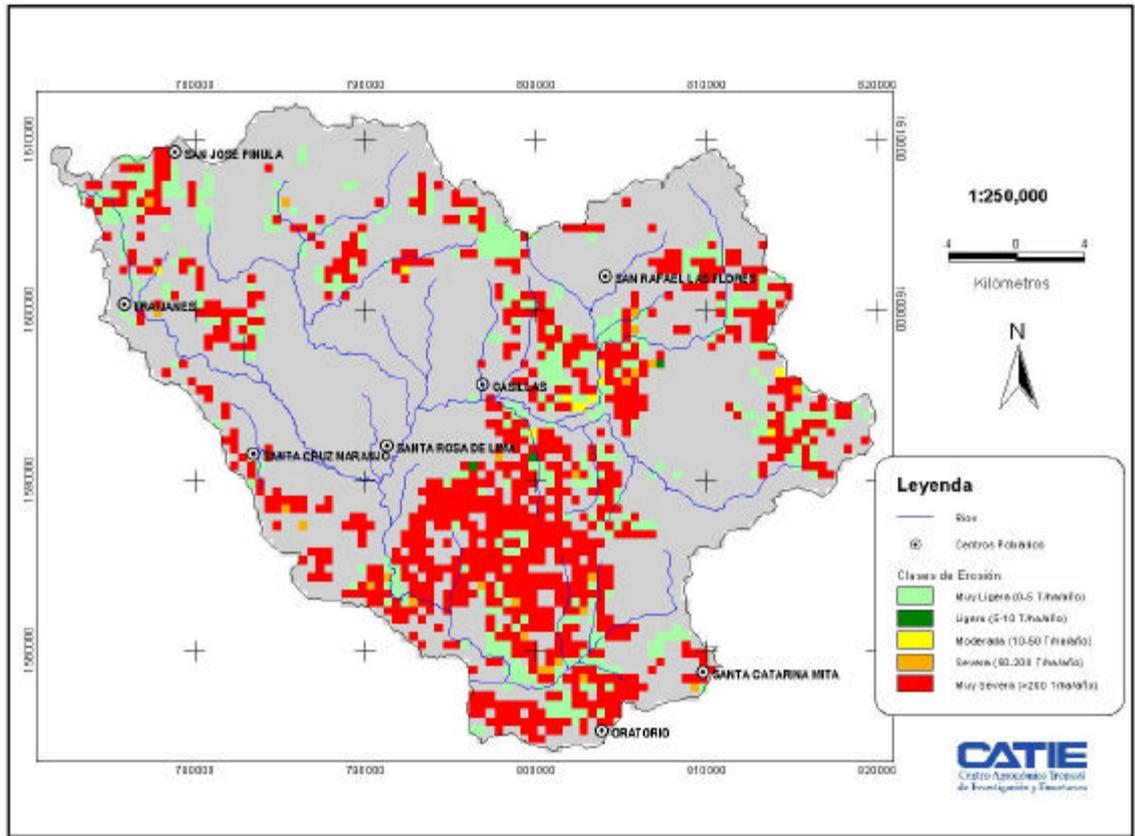


Figura 13. Mapa con la clase de erosión en el escenario Actual cuenca Los Esclavos

Para el escenario Agrícola la clase de erosión que predomina es la Muy ligera con 10200.00 ha, con 920.00 ha para la clase Muy severa y la que menos cantidad presenta es la clase Ligera con 25.00 ha. En la figura 14 se muestra la clase de erosión en el escenario Agrícola para la cuenca Los Esclavos.

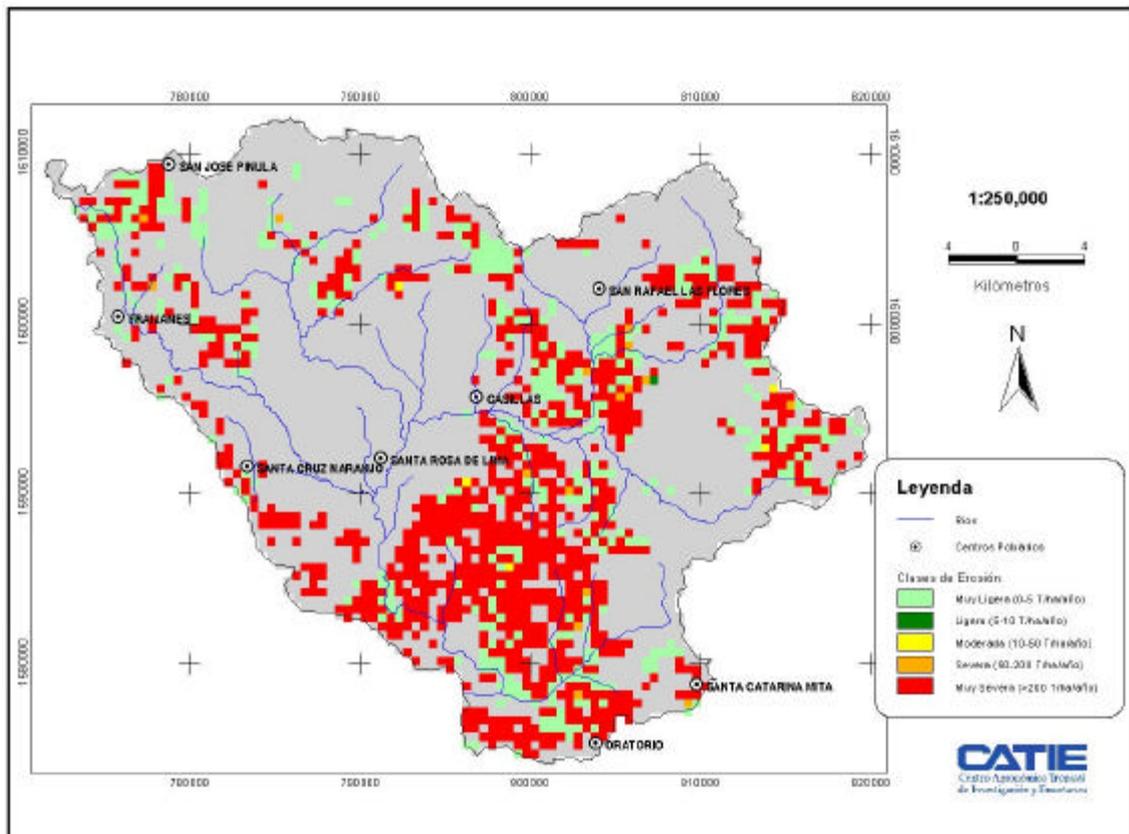
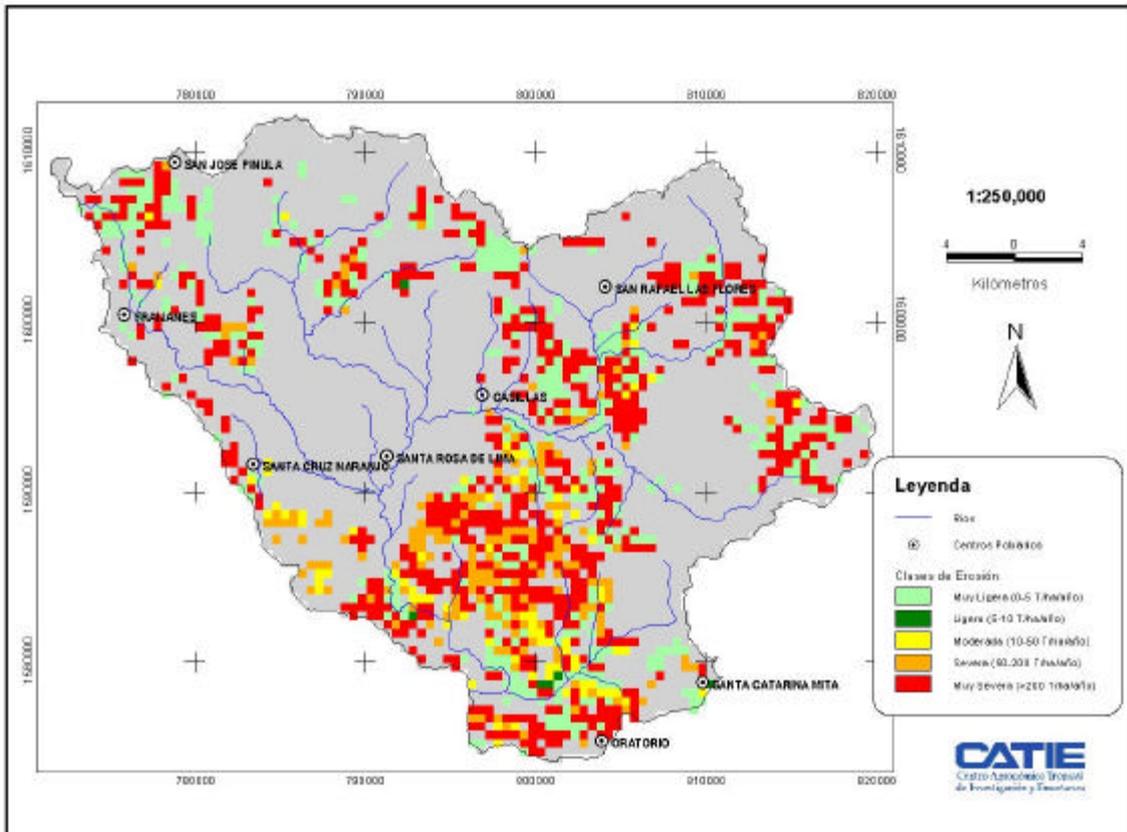


Figura 14. Mapa con la clase de erosión en el escenario Agrícola cuenca Los Esclavos

En el escenario Agroforestal la clase de erosión predominante es la Muy severa con 5450.00 ha, para la clase Muy ligera 3575.00 ha, seguida de la clase Severa con 1600.00 ha y con clase moderada una cantidad de 950.00 ha. En la figura 15 se muestra el mapa con la clase de erosión en el escenario Agroforestal para la cuenca Los Esclavos.



**Figura 15.** Mapa con la clase de erosión en el escenario Agroforestal cuenca Los Esclavos

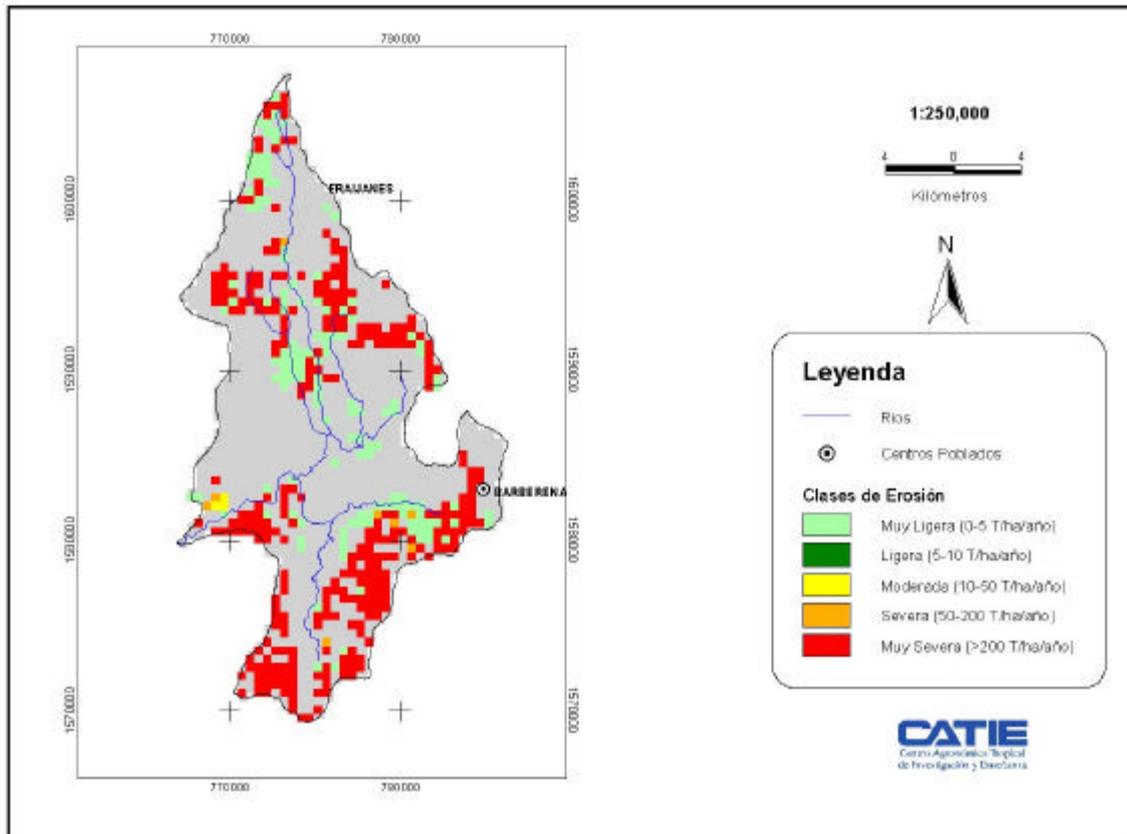
### 5.2.1.5 Clases de erosión en los diferentes escenarios en la cuenca María Linda

Con respecto a la clase de erosión en el escenario Actual en la cuenca María Linda, en el cuadro 10 se aprecia que la clase dominante es la Muy severa con 7725.00 ha, seguida de la clase Muy Ligera con 3450.00 ha, con 200.00 ha para la clase Severa y 75 ha para la clase moderada.

**Cuadro 10. Clase de erosión por cada escenario en la cuenca María Linda**

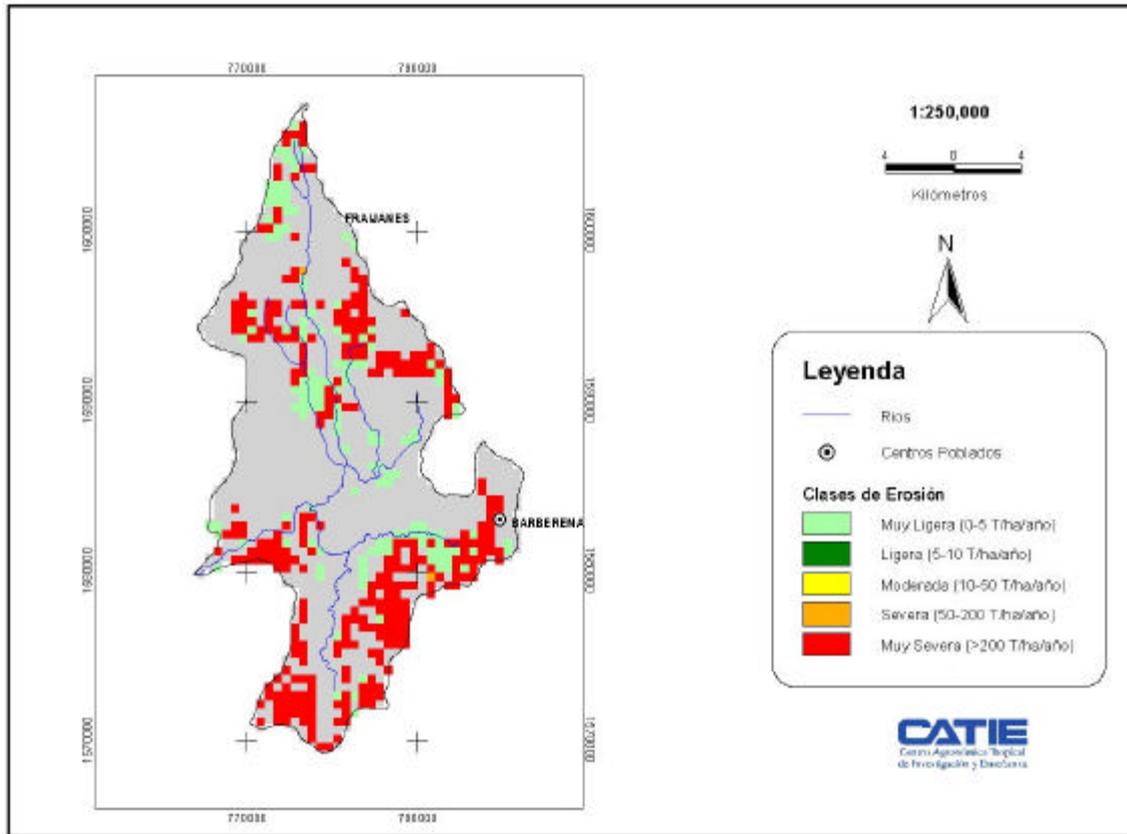
Clase de Erosión	Escenario Actual (ha)	Escenario Agrícola (ha)	Escenario Agroforestal (ha)
Muy Ligera	3450.00	3525.00	10550.00
Ligera	---	---	150.00
Moderada	75.00	---	2000.00
Severa	200.00	50.00	4750.00
Muy Severa	7725.00	8050.00	16300.00

En la figura 16 se muestra el mapa con la clase de erosión en el escenario Actual para la cuenca María Linda.



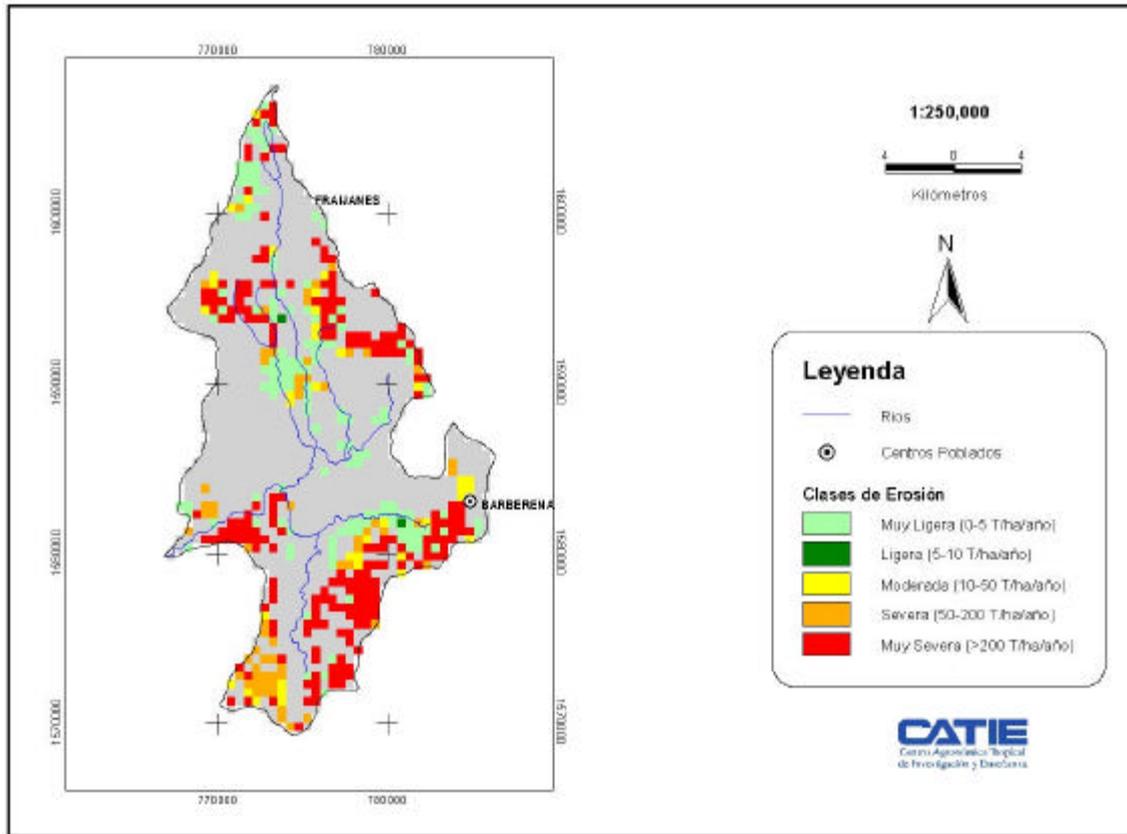
**Figura 16. Mapa con la clase de erosión en el escenario Actual cuenca María Linda**

Para el escenario Agrícola la clase de erosión predominante es la Muy severa con 8050.00 ha, seguida de la clase Muy ligera con 3525.00 ha, y la clase Severa con 50.00 ha. En la figura 17 se muestra el mapa con la clase de erosión en el escenario Agrícola para la cuenca María Linda.



**Figura 17. Mapa con la clase de erosión en el escenario Agrícola cuenca María Linda.**

En el escenario Agroforestal la clase de erosión predominante es la Muy severa con 16300 ha, seguida de la clase Muy ligera con 10550.00 ha, la severa con 4750.00 ha y la moderada con 2000.00 ha. En la figura 18 se muestra el mapa con la clase de erosión en el escenario Agroforestal para la cuenca María Linda.



**Figura 18. Mapa con la clase de erosión en el escenario Agroforestal cuenca María Linda**

La ecuación de la USLE y los resultados obtenidos muestran la parte de la cuenca donde existe mayor movimiento de suelo, por lo que es un indicador para hacer comparaciones en cada una de las cuencas para un manejo y planificación más a detalle.

### 5.3 Identificación y priorización de áreas aptas para la implementación de los sistemas agroforestales en las cuencas María Linda y Los Esclavos

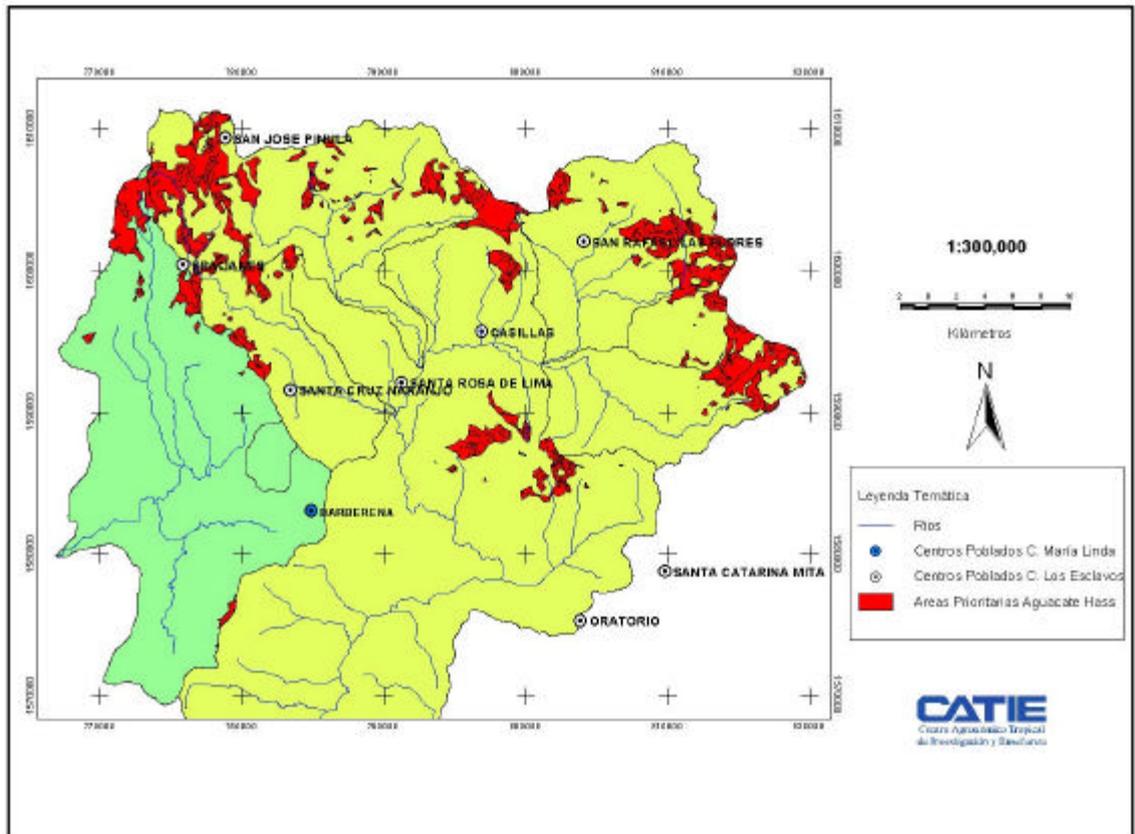
Como se puede observar en el cuadro 11, las áreas aptas para el cultivo del aguacate Var. Hass se encuentran en mayor cantidad en la cuenca del Río Los Esclavos en un 91 % y un 9 % en la cuenca del Río María Linda. Esto se debe a que dicha cuenca es mas grande y que además posee las mejores condiciones agroecológicas para el desarrollo de este cultivo. Así mismo, las categorías de prioritaria reflejan mayor cantidad de áreas aptas para el cultivo en las dos cuencas.

**Cuadro 11. Áreas aptas por cultivo y por categoría en cada una de la cuencas.**

CUENCA	Áreas aptas para cultivo Aguacate Hass por categoría (ha)		Áreas aptas para cultivo Limón Persa por categoría (ha)		Áreas aptas para cultivo Mandarina por categoría (ha)		Áreas aptas para especies Forestales por categoría (ha)	
	Categoría	Área (ha)	Categoría	Área (ha)	Categoría	Área (ha)	Categoría	Área (ha)
Los Esclavos	Prioritaria	6681.90	Prioritaria	12350.11	Prioritaria	2964.76	Prioritaria	16539.69
	Alta prioridad	4546.94	Alta prioridad	6272.80	Alta prioridad	536.53	Alta prioridad	3305.92
	Muy alta prioridad	146.81	Muy alta prioridad	30.35	Muy alta prioridad	6.20	Muy alta prioridad	0.04
Sub-total		11375.65		18653.26		3507.49		19845.65
María Linda	Prioritaria	1011.69	Prioritaria	6173.90	Prioritaria	3101.74	Prioritaria	10183.16
	Alta prioridad	76.67	Alta prioridad	578.59	Alta prioridad	262.52	Alta prioridad	913.29
	Muy alta prioridad	---	Muy alta prioridad	---	Muy alta prioridad	---	Muy alta prioridad	---
Sub-total		1088.36		6752.49		3364.26		11096.45
<b>TOTAL</b>		12464.01		25405.75		6871.75		30942.10

Para la cuenca del Río Los Esclavos la mayor cantidad de áreas aptas para el cultivo de aguacate Hass se encuentran en la categoría de prioritaria con 6681.9 ha, seguida de la categoría de Alta prioridad con 4546.94 ha y con 146.81 ha la categoría de Muy alta prioridad.

En la cuenca del Río María Linda las áreas aptas para el cultivo de aguacate Hass únicamente se encuentran en las categorías de Prioritaria con 1011.69 ha y 76.67 ha para la categoría de Alta prioridad. En la figura 19 se muestra el mapa con las áreas por categoría para el cultivo de aguacate Hass en las cuencas María Linda y Los Esclavos.



**Figura 19. Mapa con áreas por categoría para el cultivo de Aguacate Hass cuencas María Linda y Los Esclavos**

Las áreas aptas para el cultivo de Limón Persa se encuentran en mayor cantidad en la cuenca del Río Los Esclavos con 18653.26 ha equivalente a un 73 % del área total de las dos cuencas y con 6742.59 ha para la cuenca del Río María Linda.

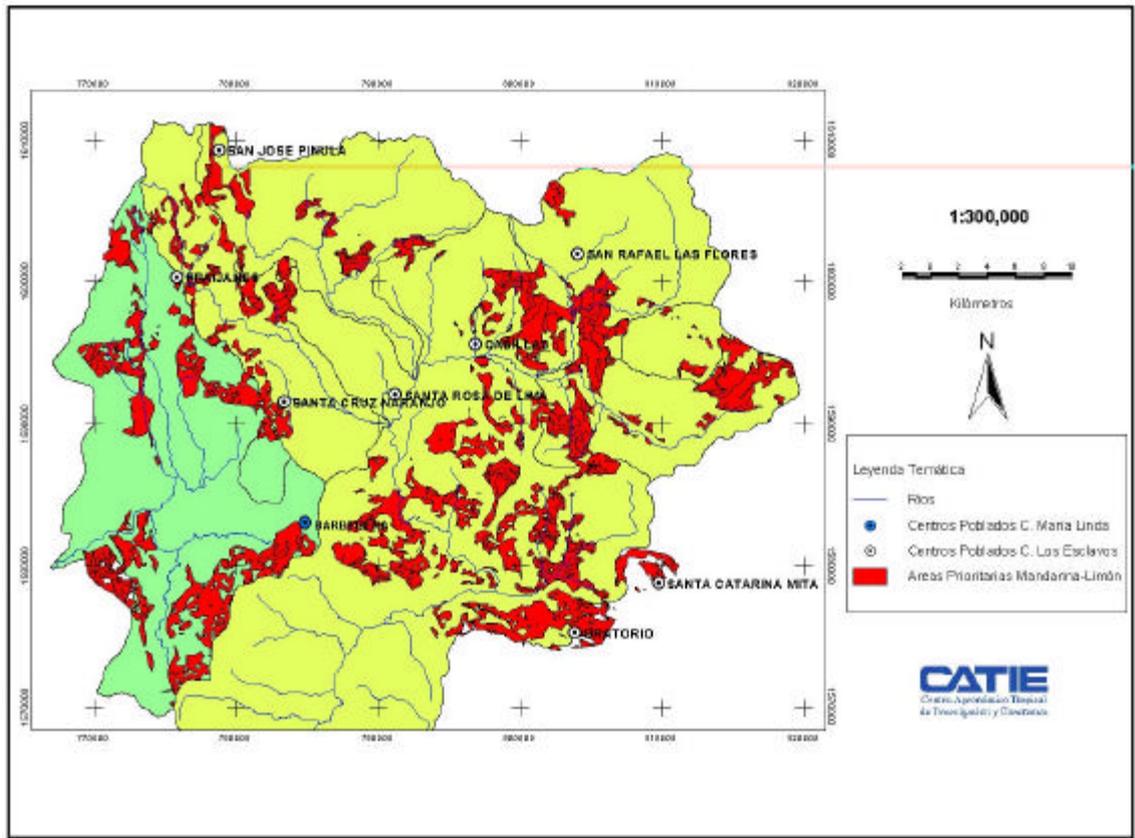
También se puede apreciar que en la cuenca del Río Los Esclavos la mayor cantidad de áreas aptas para el cultivo se encuentran en la categoría de Prioritaria con 12350.11 ha, le sigue la categoría de Alta prioridad con 6272.80 ha, y en menor cantidad la categoría de Muy alta prioridad con 30.35 ha.

Para la cuenca del Río María Linda únicamente se encuentran las categorías de Prioritaria con 6173.90 y 578.59 ha en la categoría de Alta prioridad.

Con respecto al cultivo de Mandarina, la cantidad de áreas aptas para el cultivo son similares en las dos cuencas, con un 51 % en la cuenca Los Esclavos y con un 49 % para la cuenca del Río María Linda, esto es debido a las características agroecológicas que prevalecen en cada una para la producción de dicho cultivo.

Las categorías que mas prevalecen en la cuenca Los Esclavos van de Prioritaria con un total de 2964.76 ha seguida de la categoría Alta prioridad con 536.53 ha y en menor cantidad con 6.20 ha la categoría de Muy alta prioridad. Para la cuenca del Río María Linda las áreas aptas para el cultivo se localizan en la categoría de Prioritaria con 3101.74 ha y Alta prioridad con 262.52 ha.

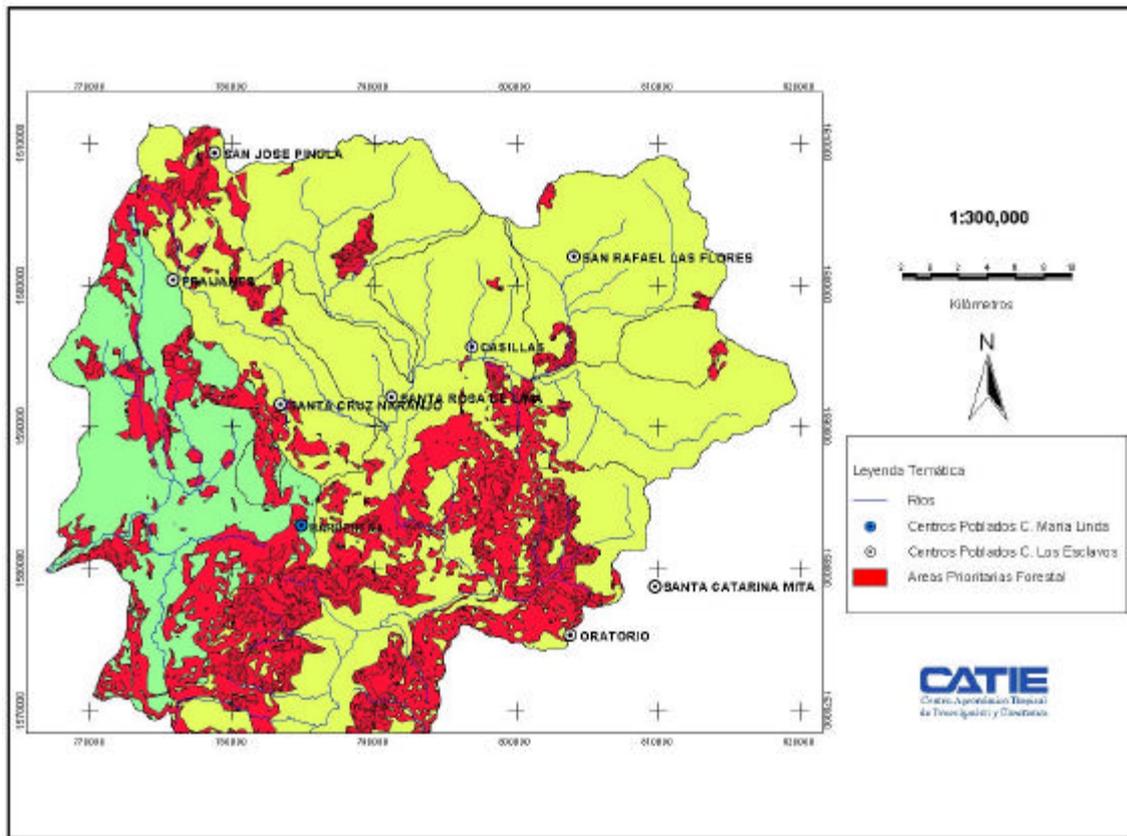
En la figura 20 se muestra el mapa con las áreas por categoría para el cultivo de Mandarina y Limón persa para las dos cuencas.



**Figura 20.** Mapa con áreas por categoría para el cultivo de mandarina y Limón persa cuencas Maria Linda y Los Esclavos

Con relación a las especies Forestales, la mayor cantidad de áreas aptas se encuentran en la cuenca del Río Los Esclavos con 19845.65 ha equivalente a un 64 % y con 11096.45 ha equivalente a un 36 % para la cuenca del Río María Linda.

También se puede apreciar que la mayor cantidad de áreas aptas se encuentran en la categoría de Prioridad con 16539.69 ha para la cuenca del Río Los Esclavos y 10183.16 ha para la cuenca del Río María Linda, seguidas de la categoría Alta prioridad con 3305.92 ha y 913.29 ha respectivamente. En la figura 21 se muestra el mapa con las áreas por categoría para especies maderables en las dos cuencas.



**Figura 21. Mapa con áreas por categoría para las especies maderables en las dos cuencas**

#### **5.4 Propuesta de un Mecanismo de compensación para el pago de servicios ambientales para la implementación de sistemas agroforestales en áreas críticas de las dos cuencas**

El mecanismo de compensación de los sistemas agroforestales, consta de varias etapas, constituidas por diferentes actividades, coordinadas por las instituciones participantes: MEM, MAGA, INDE, INAB y CATIE.

Las principales actividades a desarrollar son las siguientes:

##### **1. Solicitud de ingreso al proyecto de pago por servicios ambientales**

Para el efecto, deberá hacerse una solicitud por parte de los beneficiarios potenciales identificados, los cuales deberán presentar la siguiente documentación:

Formato de solicitud con datos generales del beneficiario, datos del terreno y lugar o dirección para recibir notificaciones.

Certificación del Registro de la propiedad o Certificación municipal u otro documento que ampare la propiedad del terreno.

El principal responsable de la solicitud, será el beneficiario, el cual para ser seleccionado, deberá cumplir con los criterios de elegibilidad establecidos.

Con estos documentos MAGA e INAB, envían un listado de beneficiarios seleccionados al CATIE, indicándole que han cumplido con los criterios de elegibilidad, para que proceda a elaborar los contratos respectivos.

##### **2. Verificación de los criterios de elegibilidad para ingresar al proyecto**

CATIE en coordinación con MAGA e INAB, se constituye en el campo para verificar si el beneficiario ha cumplido con los criterios de elegibilidad, para poder ingresar el programa.

### **3. Contratos**

CATIE es el responsable de elaborar los contratos con base a los lineamientos de criterios de elegibilidad y de cumplimiento estipulados, éste debe ser autenticado por un abogado y será firmando cada una de las partes (CATIE y Beneficiario). En el contrato debe quedar claro las obligaciones y derechos del beneficiario y CATIE.

Después de elaborar el contrato para ambos sistemas agroforestales con frutales y maderables, este será endosable al Comité Técnico del Fideicomiso, quien emitirá un informe de aprobación al INDE.

### **4. Establecimiento de las Plantaciones**

El establecimiento de las Plantaciones deberá realizarse apegado a las recomendaciones hechas tanto por UTAFRU e INAB y de acuerdo a lo estipulado en los paquetes tecnológicos para cada cultivo, así como, los arreglos forestales recomendados, desde la plantación hasta el mantenimiento.

### **5. Informe técnico**

El MAGA e INAB, deberá emitir un informe técnico sobre el estado de las plantaciones de los sistemas agroforestales, así como, cada una de las actividades realizadas según cronograma del plan de trabajo desarrollado para el cultivo, con cada uno de los agricultores, en la fecha que sea requerido por la institución certificadora (CATIE), para la evaluación de los criterios e indicadores establecidos en el contrato. Este informe debe dar a conocer el cumplimiento de las recomendaciones técnicas hechas al agricultor para el buen desarrollo de las plantaciones, ya que el responsable directo de los sistemas agroforestales será el propio beneficiario.

### **6. Verificación y certificación**

El CATIE será el responsable directo de la verificación y certificación de los criterios de cumplimiento, la cual, se hará tomando en consideración el informe técnico enviado por INAB y MAGA, constituyéndose en el campo y verificando si se cumplió con los criterios de elegibilidad y los criterios e indicadores de cumplimiento, así como, la documentación legal respectiva, estipulada en los contratos, para proceder a la certificación y pago del incentivo ambiental, a través de la suscripción del Acta de Certificación, la cual es enviada a la Secretaría del Comité Técnico del Fideicomiso.

## **7. Análisis y aprobación**

Para desarrollar esta actividad se conformará un Comité Técnico del Fideicomiso (Comité conformado por representantes del MEM, MAGA, INAB e INDE) quien analizará y dará el visto bueno al Acta de Certificación emitida por CATIE, para la aprobación del pago, con base a lo descrito en la certificación del acta, solicitando el pago correspondiente a través de una Resolución.

## **8. Pago del incentivo**

Con base a la resolución emitida por el Comité Técnico del Fideicomiso, se procede a elaborar un documento de pago para el beneficiario, el cual podrá hacerlo efectivo en la entidad bancaria seleccionada por la institución depositaria de los fondos. La responsabilidad del pago estará a cargo del CATIE, quien informará al INDE sobre el monto total pagado a los beneficiarios.

En la figura 22 se presenta el esquema del mecanismo financiero para el pago de los incentivos ambientales.

## MECANISMO FINANCIERO

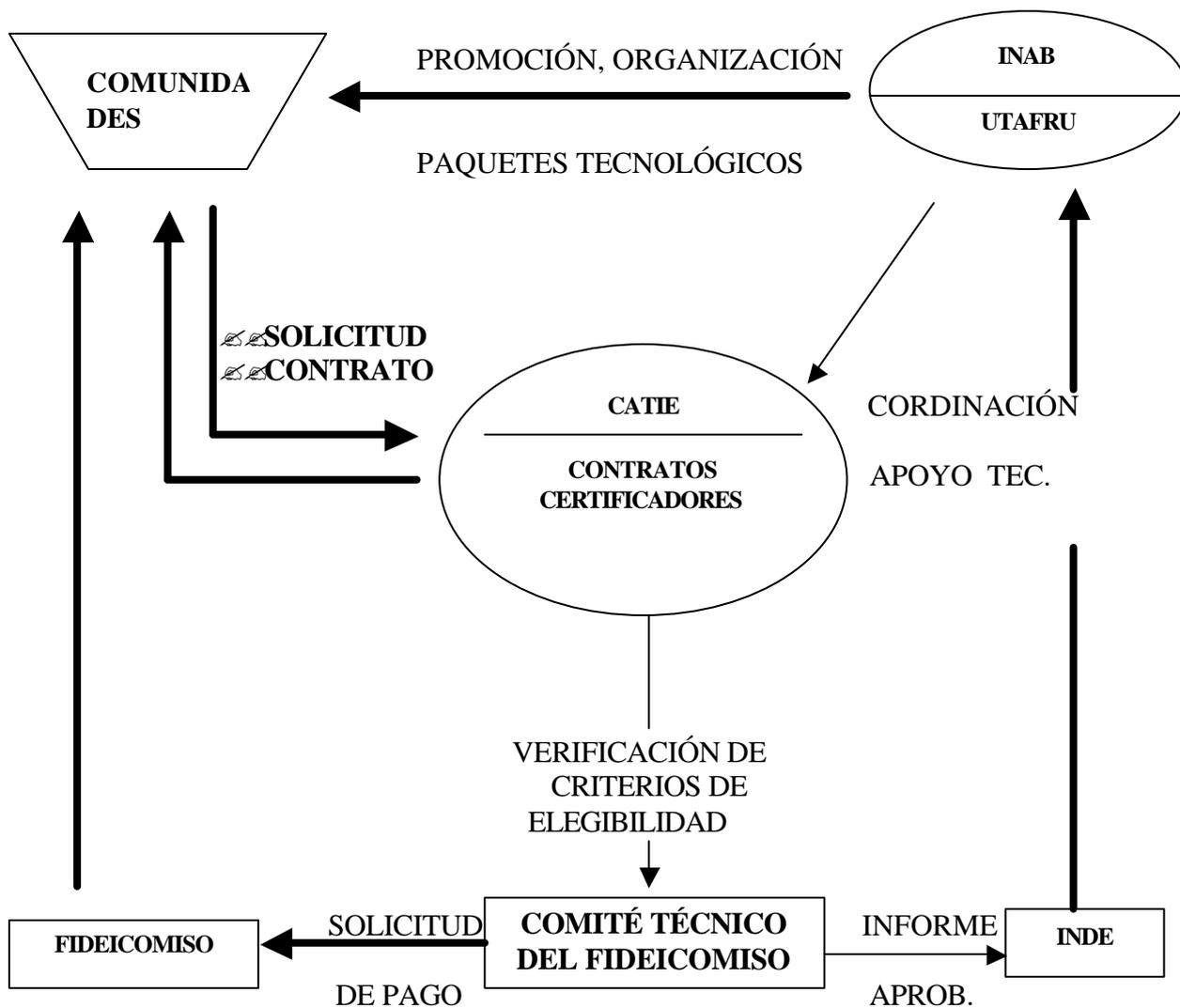


Figura 22. Esquema del mecanismo de compensación para el pago de los servicios ambientales.

## **5.5 Sistema de monitoreo y evaluación ambiental en las áreas críticas para las cuencas María Linda y Los Esclavos**

Luego de haber identificado las probables actividades antrópicas y naturales que están generando sedimentos tales como, altas pendientes, cambio de uso del suelo, sobreuso, subuso, cultivos sin prácticas de conservación de suelo y agua, así como, caminos y deslizamientos, entre otros, se muestra en el cuadro 12, la matriz de monitoreo ambiental elaborada para las cuencas María Linda y Los Esclavos.

Para poder monitorear la calidad y cantidad de agua se deben establecer puntos de muestreo georeferenciados que serán las mismas áreas con los distintos sistemas agroforestales a establecer. La metodología a utilizar para la medición de sedimentos es la que actualmente utiliza la Sección de Hidrología del Instituto Nacional de Electrificación, la cual consiste en realizar aforos de tipo “vadeo y aéreo”, tomado muestras a distintas profundidades en un recipiente de volumen conocido; posteriormente el líquido es filtrado por papel filtro y el papel con sedimento se quema en una mufla para luego ser pesado.

La sumatoria de cada una de las muestras de la cantidad de gramos sólidos en el papel, será la cantidad total de sedimentos en suspensión que va en un caudal determinado, ya que se conoce la velocidad y el área de las secciones del río, donde se colectaron las muestras.

**Cuadro 12. Matriz para el monitoreo ambiental**

COMPONENTE	INDICADOR	VARIABLES A UTILIZAR	TIPO DE INFORMACION REQUERIDA	LINEA BASE
<b>Presión</b>	?? Cambio de uso de la tierra (ha)	?? Fotografías aéreas recientes, imágenes Landsat.	?? MAGA, INAB, MEM, IGN	?? Bosque 19% ?? Categorías de uso
		?? Mapa de cobertura vegetal (escala 1:20,000).		
	?? Infiltración	?? Parcelas permanentes de muestreo.	?? Cultivos limpios y permanentes.	?? Categorías de uso
	?? Organización comunitaria	?? Número de grupos organizados	?? MAGA, INAB, MEM	?? No existen
<b>Estado</b>	?? Niveles de sedimentos	?? Método EUPS. Variables: Pendiente, cobertura vegetal y practicas de cultivos	?? Mapas de capacidad de uso de la tierra, de pendientes, de cobertura de MAGA e INAB.	?? 30,000 m <sup>3</sup> de sedimentos (Embalse Aguacapa)
	?? Prácticas inadecuadas de cultivos	?? Modelación hidrológica. (Modelo Lujten), con diferentes usos de la tierra y diferentes cultivos. Variables: DEM, uso de la tierra, pendiente, red hídrica, conductividad eléctrica, datos climáticos y usos del agua.		?? 40,000 m <sup>3</sup> de sedimentos (Embalse Los Esclavos)
	?? Pérdida de la cantidad y calidad de agua	?? Aforos. Tipo: Vado y Aéreos (en invierno realizar aforos cada 15 días, en verano cada mes). ?? Categorías de uso ?? Clases de capacidad de uso ?? Intensidad de uso	?? Caudales ?? Mapas de capacidad de uso de la tierra y de capacidad de uso	?? Sobre uso: 58% (Cuenca río María linda) ?? Sobre uso: 54% (Cuenca río Los Esclavos)
		?? Análisis físico y químico del agua.	?? Contenido de DBO ?? INDE	?? 4.25 m <sup>3</sup> /s (Cuenca río María Linda) ?? 11.93 m <sup>3</sup> /s (Cuenca río Los Esclavos) ?? Categorías de uso
<b>Respuesta</b>	?? Desarenado de embalses	?? Costos de mantenimiento	?? Inversión del INDE	?? Q.490,000.00/año (Embalse)

	Pérdida en la generación de energía eléctrica	Tiempo que paran para el desarenado y pérdida de equipo (vida útil turbinas)	?? Presupuesto anual	Aguacapa). ?? Q.500,000.00/año (Embalse Los Esclavos)
	Establecimiento del cultivo de Aguacate Hass en 600 ha	Mapa de capacidad de uso del suelo	Informes anuales del número de plantas establecidas MAGA-UTAFRU Informes Anuales del % de erosión INDE.	No existen plantaciones
	Establecimiento del cultivo de Mandarina Danci en 300 ha.	Mapa de capacidad de uso del suelo	Informes anuales del número de plantas establecidas MAGA-UTAFRU Informes Anuales del % de erosión INDE.	No existen plantaciones
	Establecimiento del cultivo de Limón Persa en 260 ha.	Mapa de capacidad de uso del suelo	Informes anuales del número de plantas establecidas MAGA-UTAFRU Informes Anuales del % de erosión INDE.	No existen plantaciones
	Establecimiento de especies maderables en 1000 ha	Mapa de capacidad de uso del suelo	Informes anuales del número de plantas establecidas MAGA-UTAFRU Informes Anuales del % de erosión INDE.	No existen plantaciones

## 6. CONCLUSIONES

La identificación de las áreas críticas en las dos cuencas, demuestra fielmente la degradación de las mismas a lo que deberá priorizarse para el establecimiento de los sistemas agroforestales de acuerdo a la designación o categoría de priorización desde Prioritaria, Alta prioridad y Muy alta prioridad, tanto para los sistemas agroforestales con frutales como para los sistemas agroforestales con maderables, para efectos de estudio.

Con la implementación de los sistemas agroforestales se protegerán los bosques y se dará un uso adecuado al suelo con base a su capacidad, así como se evitará el sobreuso del suelo, el cual está incrementando los niveles de erosión.

El Mecanismo de compensación será comprendido como el instrumento de política del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación y del Ministerio de Energía y Minas, el cual estará apoyado en el marco financiero, jurídico e institucional, por lo que se hace necesario la disponibilidad del dinero a través de un fideicomiso para el pago de los servicios ambientales que demuestre la transparencia hacia los pequeños y medianos agricultores.

El pago de servicios ambientales incentivará e integrará a los pequeños y medianos agricultores para la implementación de los sistemas agroforestales, obteniendo así, un incremento de la cobertura boscosa de las dos cuencas y reduciendo el nivel de erosión que llega a los embalses, así como la generación de divisas para los agricultores.

Para la cuenca del Río María Linda, el escenario con sistemas agroforestales es el que menos sedimentos aporta al embalse 11753 t.ha<sup>-1</sup>.año; con relación al escenario actual que equivale a 38412 t.ha<sup>-1</sup>, siendo mayor en el escenario agricultura con 379133 t.ha<sup>-1</sup>.año.

Para el caso de la cuenca del Río Los Esclavos, el escenario actual aporta 15810 t.ha<sup>-1</sup>, siendo menor la cantidad de sedimentos para el escenario con sistemas agroforestales equivalente a 2937 t.ha<sup>-1</sup>, siendo mayor el aporte en el escenario agricultura con 28175 t.ha<sup>-1</sup>.año.

La implementación de los sistemas agroforestales tiene un costo evitado de US\$ 124353.18 para el caso del mantenimiento del embalse Los Esclavos.

Considerando que la ecuación de la USLE es para simular movimientos de erosión en toda la cuenca sobreestima las cantidades reales de erosión, por lo que las altas cantidades de erosión reportadas sirven para comparar en que lugares se está dando mayor desprendimiento o movimiento de suelo es decir es un indicador del movimiento interno del suelo de un lugar a otro dentro de la cuenca. Esto no significa que esa cantidad de sedimentos esté llegando al embalse.

El sistema de monitoreo y evaluación ambiental será la herramienta para seguir de cerca la reducción de los niveles de erosión conforme se vayan incrementando las áreas críticas con los sistemas agroforestales con frutales o con maderables.

## **7. RECOMENDACIONES**

Considerando las áreas críticas identificadas en los diferentes sistemas agroforestales a establecer para cada cultivo y las especies forestales, los mismos se deben establecer de acuerdo a las categorías o designaciones obtenidas.

El establecimiento de los sistemas agroforestales contribuirá a disminuir los niveles de sedimentación en los embalses, produciendo una mejor calidad y cantidad de agua para la producción de energía eléctrica y lo que es más, se mantendrá la vida útil de los equipos.

Con la implementación de los sistemas agroforestales se recuperarán los bosques y las zonas vulnerables a erosión, como también se recuperaran áreas degradadas y evitar que continúe el avance de la frontera agrícola. Por lo se hace necesario el pago de los servicios ambientales a sistemas productivos sostenibles, ya que combinan producción y conservación a la vez.

Cumplir con los marcos establecidos para el pago de los servicios ambientales, obtener los fondos provenientes del INDE a través de un Fideicomiso y verificar los criterios de elegibilidad de los beneficiarios, criterios e indicadores de cumplimiento, serán la pauta para acceder al PSA.

Dar seguimiento a la matriz de monitoreo ambiental propuesta, será vital para la recuperación de áreas aptas para los cultivos identificados, incremento en la cobertura vegetal y mejorará la calidad y cantidad de agua en los embalses.

Considerado que los resultados del presente estudio son una aproximación a la situación real de las cuencas, es necesario evaluar otros tipos de uso a nivel de cuenca, así como realizar estudios a mayor detalle en las áreas críticas priorizadas.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Alvarado, F. 1979.** Recomendaciones para el uso, manejo y conservación de la cuenca superior del río Los Esclavos. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala. Tesis. Ing. Agr. 58 p.
- Álvarez, D. 1995.** Impacto hidrológico de la reforestación en las regiones tropicales. ISA, Dirección de ecología y de recursos naturales. Medellín, Colombia.
- Amézquita, C; Forsythe; W. 1975.** Aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo en Turrialba, Costa Rica. S.I., s.e., 30 p. (mimeografiado) presentado en: Congreso Latinoamericano de la ciencia y del suelo (5, 1979; Medellín, CO).
- Ander, E. 1991.** El desafío ecológico. Editorial Universidad Estatal a Distancia UNED. San José Costa Rica.
- Arana, L. 1992.** Análisis espacial para evaluar la erosión hídrica en la subcuenca del río Pensativo, Guatemala. Tesis M. Sc. Turrialba, C.R. CATIE. 116 p.
- Aylward, BA. 1998.** Economic valuation of the downs ream hydrological effects of land use change: Large hydroelectric reservoirs. Tesis de doctorado. La escuela Fletcher school de leyes y diplomacia.
- Azqueta, OD. 1995.** Valoración económica de la calidad ambiental. Mc Graw-Hill. Madrid. 299 p.
- Bacchi, O; Reichard, K; Spavorek, G; Raneiri S; 2000.** Soil erosion evaluation in a small watershed in Brazil trough <sup>137</sup> Cs fallout redistribution analysis and conventional models. Acta geológica hispánica 358(3-4): 251-259.
- Barbier, E. 1998.** The economics of environment and development. Cheltenham, UK. Northampton, MA. USA. 540 p.
- Barrantes, G; Vega, M. 2002.** El servicio ambiental hídrico. Aspectos biofísicos y económicos. Instituto de Políticas para la sostenibilidad. Costa Rica. 63 p.
- Barrantes, G; Vega, M. 2002.** Evaluación del servicio ambiental hídrico y su aplicación al ajuste de tarifas, en la cuenca del río Tempisque. Documento preparado para ASOTEMPISQUE. 102 p.
- Barrios R, A. 2000.** Distribución espacial del factor LS (RUSLE) usando procedimientos SIG compatibles con IDRISI: aplicación de una microcuenca andina. Revista forestal Venezuela 44 (1): 57-64.
- Benegas – Lynch, A. 2002.** Bienes públicos, externalidades y los free riders: el argumento reconsiderado (en línea). Acta académica –UACA. Disponible en: <http://www.uaca.ac.cr/acta/2002nov/abenegas.htm>

- Bermúdez, RF; Garita, CD; Rodríguez CJ. 2000.** El bosque como proceso fundamental de los servicios ambientales. Universidad Nacional, Costa Rica. 102 p.
- Bermúdez, M. 1980.** Erosión hídrica y escorrentía superficial en el sistema de café-poró y laurel, en Turrialba, Costa Rica. Tesis M. Sc. Turrialba Costa Rica. CATIE, 74 p.
- Brown, G.W. 1985.** Forestry and water quality. 2. ed. Corvallis, Or., EE UU., Oregon State University Book Store. 143 p.
- Bruijnzeel, L. 1990.** Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review. París, Francia, UNESCO. 224p.
- Cai, L; smith, B. 1994.** Sustainable in agriculture general review. Agriculture, ecosystems and environment. 49:199-307 p.
- Calvo, J. 1990.** Water resource Development in Costa Rica 1970-2000. Hydrological Science Journal 35,2,4/1990
- Camacho, MA; Segura, O; Reyes , V; Aguilar, A. 2000.** Pago por servicios ambientales en Costa Rica. Informe preparado en el marco del proyecto PRISMA-Fundación Ford.
- Campos, D. 1987.** Hidrología superficial aplicada Vol. 1, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México. 50 p.
- Castillo, AV. 1992.** Estimación de la erosión del suelo a nivel de cuenca utilizando análisis espacial y percepción remota en El Salvador. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 70 p.
- Castro y Barrantes. 1998.** El presupuesto de aguas en Costa Rica: cuantificación física de la oferta y la demanda. San José, Costa Rica.
- CATIE/ESPRED. 2001.** Proyecto asistencia técnica y generación de información. Base de datos espacial digital de Guatemala. Especificaciones técnicas. Guatemala, GT. 119 p.
- CCT/CINTERPEDS, 1995.** Valoración económico ecológico del agua: Primera aproximación para la interiorización de costos. Centro Científico Tropical (CCT)/Centro Internacional en Política Económica para Centroamérica y el Caribe (CINTERPEDS) San José, Costa Rica.
- Chirinos, R; Tabora, F. 2002.** Pago de servicios ambientales en cuencas hidrográficas: Conceptos generales y experiencias en América. Curso Manejo Integrado de cuencas hidrográficas en el siglo XXI. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 42 p.
- Chomitz, K; Brenes, E; Constantino, L. 1998.** Financiación de Servicios Ambientales: Experiencia en Costa Rica y sus Implicaciones. Notas Económicas. Banco Mundial. 25 p.
- Chow, V. T. 1964.** Handbook of applied hydrology; a compendium of water-resources technology. Volúmen VI. New York. Mc Graw Hill. 1418 p.

- Comisión de Servicios Ambientales, 1998.** Foro Nacional de Concertación. San José, Costa Rica. Informe final. 38 p.
- CONAMCUEN, 1998.** Diagnóstico de la cuenca del río María Linda. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Guatemala. C. A. 33 p.
- Constanza, R; Ralph d' Arge, Rudolf de Groot, Stephen F. 1998.** The value of the worlds ecosystem services and natural capital. En *Ecological Economics*, Vol. 25. No. 1.
- Cruz B, J. 2002.** Evaluación del cambio de uso de la tierra en sistemas de producción agropecuaria en la cuenca del Río Barranca, Costa Rica. Tesis M. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 147 p.
- Debb, A. 1992.** Estimación de cambios en la respuesta hidrológica. Deeb Sossa S. En C. Ingenieros Consultores, DNP-PAFC-BID. Colombia.
- Dixon, JA; Scura, LF; Carpenter RA; Sherman, PB. 1994.** Análisis económicos de impactos ambientales. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 249 P.
- Easter, K; Dixon, J; Hufschmidt, M. 1986.** Watershed resources management. Westview Press / Boulder and London. 236 p.
- EGEE, 2003.** Empresa Generadora de Energía Eléctrica. Superintendencia de operación y mantenimiento de plantas. Departamento de programación y control de producción. 15 p.
- Engel, B. 1999.** Estimating soil erosion using RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) using Arc View. Purdue University. 10 p.
- Espinoza, N; Gatica, J; Smyle, J. 1999.** El pago de servicios ambientales y el desarrollo sostenible en el medio rural. San José CR. IICA. 58 p.
- Fallas, J. 1996.** Cuantificación de la intercepción en un Bosque Nuboso, Monte de los Olivos, Cuenca del Río Chiquito, Guanacaste, CR. CREED, Costa Rica,,: Notas técnicas. San José, CR.
- FAO, 1993.** Evaluación, control y administración del recurso hídrico, en la cuenca del río María Linda. Proyecto de Legislación y Control de Aguas FAO-MAGA. Guatemala.
- Faustino, J. 1988.** Modelos de procesos erosivos. Proyecto Regional de Manejo de Cuencas. CATIE. AID/ROCAP. 47 p.
- Field, BC. 1995.** Economía ambiental: Una introducción. Santa Fe de Bogotá. Colombia, McGraw-Hill. 587 p
- Gutiérrez, O. 2001.** Estimación de costos de restauración de bosques y ajuste ambiental de tarifa eléctrica: Estudio de caso de la empresa hidroeléctrica JASEC en Costa Rica. Tesis M. Sc. Turrialba, Costa Rica: CATIE, 75 p.

- Gutiérrez, C. 1988b.** Planificación de los recursos hídricos en el manejo de cuencas. *In* Memoria del curso corto “Fundamentos del manejo de cuencas”. Olancho, Honduras. CATIE, Proyecto regional de Manejo de Cuencas. p 75-93.
- Hernández V, O. 2001.** Valoración económica del recurso hídrico, subcuenca Jones, Sierra de las Minas, Guatemala. Tesis M. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 130 p.
- Herrador, D; Dimas, L. 2000.** Aportes y limitaciones de la valoración económica en la implementación de esquemas de pago por servicios ambientales.
- Heuvelop, J. et al, 1986.** Agroclimatología tropical. 1era. Ed. Editorial UNED. San José Costa Rica.
- Holdridge, L.R. 1982.** Ecología basada en zonas de vida. San José, C. R. IICA. 216 p.
- Jiménez, F. 1986.** Balance hídrico con énfasis en percolación de dos sistemas agroforestales: Café-Poró y Café-Laurel, en Turrialba, Costa Rica. Tesis M. Sc. Turrialba Costa Rica. CATIE, 104 p.
- Kaimowitz, D. 2001.** Cuatro medio verdades: la relación bosques y aguas en Centroamérica. *Revista Forestal Centroamericana*. 33:6-10.
- Kuntschik, G. 1996.** Aplicacao da equacao universal de perdas de solo na microbacia do Ribero das Araras, a través de técnicas de sensoramiento remoto e geoprocessamento. (en línea). Sao Jose dos Campos, BR. Instituto de pesquisas Espaciais. Consultado 26 de nov. 2003. Disponible en <http://members.tripod.com/GerardoKuntschik/indexx-5.html>
- Landel-Mills, N; Bishop, J. Porras I. 2000.** Markets for forest environmental services: silver bullet or fool’s gold? Markets for forest environment services and the poor (first draft). International Institute for environment and de development (IIED). A component of the IIED project: Instruments for sustainable private sector forestry. United Kingdom.
- Larson, B; Pérez, JM. 1999.** Sustainability and agricultural externalities in Central America at the intensive margin: A critical review and synthesis of the literature. Harvard Institute for International Development. Us, Harvard University. 49 p.
- Ley Forestal, 1996.** Decreto Legislativo Número 101-96. Organismo Legislativo. Congreso de la República de Guatemala.
- Linsley, RK; Kohler, MA; Paulhos, JL. 1988.** Hidrología para Ingenieros. México, Mc Graw-hill. p 45-79.
- López, C, F. 1972.** Estudio hidrológico básico de la cuenca del Río María Linda. Tesis Ing. Civil. Facultad de Ingeniería. Guatemala. 82 p.
- MAGA/AGEXPRONT/PROFRUTA, 2002.** Identificación de áreas aptas para el desarrollo de 30 cultivos promisorios a nivel nacional. Laboratorio SIG-MAGA.

- Mejías, R; Segura, O. 2002.** El pago por servicios ambientales en Centro América. Estudio preparado para el World Resources Institute (WRI) por el Centro Internacional de Política Económica para el Desarrollo Sostenible (CINPE). Heredia, C. R. 90 p.
- MINAE, 2000.** Ministerio de Ambiente y Energía CR. El desarrollo del sistema de pago de servicios ambientales en Costa Rica. San José, CR. 64 p.
- Mourraile, C; Porras, I. y Aylward, B. 1996.** La protección de cuencas hidrográficas: Una bibliografía anotada de Hidrología, Valorización económica en incentivos económicos. CREED, Costa Rica. Notas técnicas 2. San José: CCT/CIMPE7IIED.
- Moore, ID; Burch; GJ. 1986.** Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. Soil Science Society of America Journal 50:1294-1298.
- Mora, C. 1987.** Evaluación de la pérdida de suelo mediante la ecuación universal (EUPS); aplicación para definir acciones de manejo en la cuenca del Río Pejibaye, vertiente atlántica, Costa Rica. Tesis M. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 104 p.
- Munasinghe, M; y J. Mcneely. 1994.** Protected area economics and policy: linking conservation and sustainable development. Distributed for the World conservation Union. USA.
- Muschler, R. 2000.** Árboles en cafetales. Colección Módulos de enseñanza agroforestal. Módulo No. 5. Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ. Turrialba, Costa Rica.
- Naciones Unidas. 1994.** Contabilidad ambiental y económica integrada. Versión preliminar. Departamento de información económica y social y análisis de políticas. División de estadística. Estudios de métodos. Manual de contabilidad nacional. Serie F, No. 61. Nueva York.
- Nearing, MA. 1997.** A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss. Soil science Society of American Journal. 61:917-919.
- Novelo, G. 1985.** Beneficios derivados del recurso forestal. In I Foro Internacional de la Juventud Forestal. FAO. Actas. p 19-28
- OECD, 1994.** Development indicators. A working set of indicator of development progress at. En línea. Disponible en : [www.oecd.org/dac/indicator/](http://www.oecd.org/dac/indicator/)
- Oreamuno, R; Jaubert, M. 1992.** Informe hidrológico, proyecto hidroeléctrico Don Pedro, río San Fernando. Energía Global de Costa Rica. C.L.C. Ingenieros Asociados y Cía. Ltda..
- Palacios A; Alfaro, S. 1993.** El modelo USLE en Costa Rica. In. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, CL). Erosión de suelos en América Latina (en línea). Santiago de Chile. Consultado 23 oct. 2003. disponible en <http://www.fao.org/docrep/t2351s/t2351S00.htm>

- PAN, 1998.** Programa de Acción Nacional de lucha contra la diversificación. Diseño y determinación de indicadores para la evaluación y monitoreo de la desertificación en Argentina, América Latina y el Caribe. Taller sobre indicadores. Argentina. 18 p.
- Pearce, DW; Turner, RK. 1995.** Economía de los recursos naturales y medio ambiente. Madrid. Celeste Ediciones. 448 p.
- Pearce, DW. 1985.** Economía ambiental. México., MX. 259 p.
- Pérez, C; Barzev, R; Herlant, P. 2000.** Los servicios ambientales: Elementos para la concepción de pagos por servicios ambientales. No. 259. ST. 1/2000.
- Ramakrishna, B. 1997.** Estrategia de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: Conceptos y experiencias. San José, CR. IICA. 319 p.
- Randall, A. 1985.** Economía de los recursos naturales y política ambiental. Editorial Limusa, S.A. de C., México, DF.
- Renard, K; Foster, G; Weesies, G; McCool D; Yoder, D. 1996.** Predicting soil by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). United States Department of Agriculture. 384 p. (Agriculture Handbook No. 703).
- Reynolds, 1997.** Evaluación de los recursos hídricos en Costa Rica: Disponibilidad y utilización. Documento preparado para el Proyecto de Cuentas ambientales, coordinado por el Centro Internacional de Políticas Económicas de la Universidad Nacional y el Centro Científico Tropical. Heredia. Costa Rica.
- Rocha, J. 1977.** Erosión de suelos de pendientes cultivadas con maíz y frijol con diferentes grados de cobertura viva dentro de una plantación forestal. Tesis M. Sc. Turrialba, CR. UCR-CATIE. 182 p.
- Rodríguez, A. 1996.** La utilización de los recursos hídricos de Costa Rica. *In* Utilización y manejo sostenible de los recursos hídricos. Jenny Vargas Ed. Editorial Fundación UNA. Heredia, Costa Rica. 256 p.
- Romero, C. 1997.** Economía de los recursos ambientales y naturales 2 ed. Madrid. Alianza Editorial. 241 p.
- Rosa, H; Herrador, D; Gonzáles, ME. 1999.** Valoración y pago por servicios ambientales: Las experiencias de Costa Rica y El Salvador. Boletín PRISMA (Programa Salvadoreño de Investigación Sobre Desarrollo y Medio Ambiente). No. 35. San Salvador, El Salvador. 19 p.
- Rosa, H; Herrador, D; Gonzáles, ME, Cuellar, N. 1999.** El agro salvadoreño y su potencial como productor de servicios ambientales. Boletín PRISMA (Programa Salvadoreño de Investigación sobre Desarrollo y Medio Ambiente). No. 33. San Salvador, El Salvador. 15 p.

- Rudas, G. 1995.** Uso del agua e incentivos económicos para la conservación de cuencas hidrográficas. Bogotá, Colombia.
- Senci3n; J; 1996.** Valoraci3n econ3mica de un ecosistema bosque subtropical: Estudio de caso San Miguel La Palotada, Pet3n, Guatemala. Tesis M. Sc- CATIE. Turrialba, Costa Rica. 132 p
- Stadtmuller, T. 1994.** Impacto hidrol3gico del manejo forestal de bosques naturales tropicales; medidas para mitigarlo. "Una revisi3n bibliogr3fica". Serie t3cnica, Informe t3cnico 246. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 662 p.
- Steiner, R; McLaughlin, L; Faeth, P; and Janke, R. 1995.** Incorporating externality cost into productivity measures: A case study agriculture. Economic, environmental and statistical consideration. Chichester, 209-230 p.
- Vahrson, W. 1991.** El potencial erosivo de la lluvia en Costa Rica. Agronomía costarricense 14 (1): 15-24.
- Villegas, 1995.** Evaluaci3n de la calidad de agua en la cuenca del R3o Reventado, Cartago, Costa Rica, bajo el enfoque de indicadores de sostenibilidad. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 146 p.
- Wischmeier, W; Smith, D. 1978.** Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington DC, United States Department of agriculture. 58 p. (Agriculture Handbook no. 537).