

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



**ANÁLISIS ESPACIAL DEL TIPO DE USO DE LA TIERRA EN LA CUENCA
DEL RIO TURRIALBA, COSTA RICA**

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:

Magister Scientiae

POR

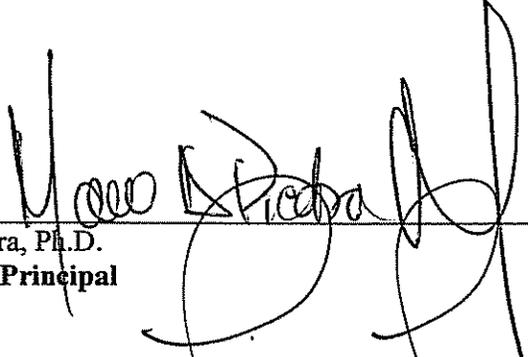
✓
EDITH DEL SOCORRO MENDEZ VILLANUEVA

Turrialba, Costa Rica
2001

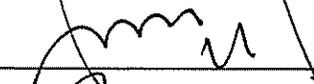
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

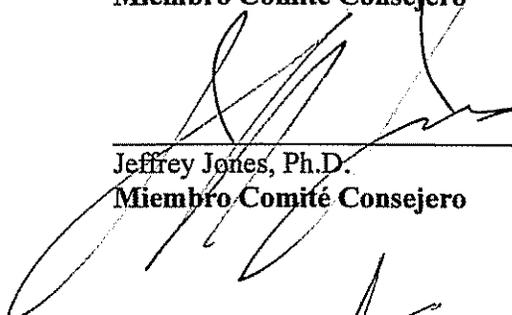
FIRMANTES:



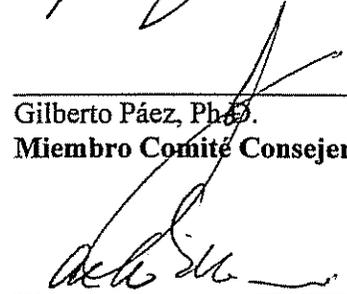
Mario Piedra, Ph.D.
Consejero Principal



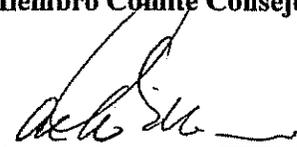
Alan González, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Jeffrey Jones, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Gilberto Páez, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Ali Moslemi, Ph.D.
Director Escuela de Posgrado



Edith Méndez Villanueva
Candidata

DEDICATORIA

A mis Padres Rosa María y Juan Francisco

A mis hermanas Rosa María y María José

A mis sobrinos Milena y Fidel Francisco

AGRADECIMIENTOS

A Dios y la Virgen Santísima por permitirme concluir esta etapa de mi vida.

A mis padres por su apoyo y amor incondicional a pesar de la distancia geográfica en todo momento de mi vida.

A mis hermanas por su amistad y por confiar siempre en mi.

Al Ing. Norman Alfaro por su comprensión y espera.

Al comité asesor que fueron la guía para la realización de este trabajo: Dr. Mario Piedra, Dr. Jeffrey Jones, Dr. Alan González, Dr. Gilberto Páez, gracias por su apoyo profesional y su amistad.

A la Organización de Estados Americanos (OEA) por brindarme el apoyo financiero sin el cual no hubiera sido posible realizar la maestría.

A mi amigo M.Sc. Emilio Mora por sus consejos siempre oportunos y su amistad incondicional en todo momento.

A todos mis compañeros y amigos por compartir el día a día de trabajos, penas y alegrías, por la riqueza cultural que me transmitieron y por la oportunidad de ver en ellos el verdadero significado de la solidaridad, en especial a Isa, Luisa, José Juan, Nadia, Zarifeth, Víctor, Nelson Villatoro, Fredy, Arlen, Karliita del Cid, Luz Angela.

A todos los trabajadores del departamento de SIG-CATIE por sus orientaciones y toda la información brindada, en especial a Sebastián Salazar, Sebastián Wesselman, Sergio Velázquez, Jenny, Alex y Tony.

A todos los profesores del área de Socioeconomía Ambiental y de todas las áreas que contribuyeron a enriquecer nuestros conocimientos y experiencias profesionales.

A todo el personal de la Escuela de Posgrado.

A todas aquellas personas que colaboraron de manera directa o indirecta en la realización de este trabajo.

CONTENIDO

Contenido	Página
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
CONTENIDO.....	iii
LISTA DE CUADROS.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE ANEXOS.....	vii
RESUMEN.....	viii
SUMMARY.....	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Justificación de la investigación.....	2
1.2 Objetivos.....	5
1.2.1 <i>Objetivo general</i>	5
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	5
1.3 Hipótesis.....	5
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
2.1 Unidad de estudio para los recursos naturales	6
2.2 Uso de la tierra como objeto de análisis	7
2.3 Uso de la tierra y la necesidad de manejo	10
2.4 Uso de la Tierra en la cuenca del río Turrialba.....	10
2.5 Perspectiva espacial del uso de la tierra y algunas herramientas de análisis.....	12
2.5.1 La fotografía aérea.....	13
2.5.2 La Imagen de Satélite.....	13
2.5.3 Sistemas de Información Geográfica como base de análisis.....	14
2.6 Bases económicas del análisis.....	15
2.7 Autocorrelación espacial.....	18
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
3.1 Localización del estudio.....	20

3.2. Caracterización de la zona.....	21
3.2.1 Caracterización de los aspectos ambientales.....	21
3.2.1.1. <i>Clima</i>	21
3.2.1.2. <i>Zonas de Vida</i>	22
3.2.1.3 <i>Tipos de suelo</i>	22
3.2.1.4 <i>Profundidad de suelo</i>	23
3.2.1.5 <i>Pendiente</i>	24
3.2.2 Caracterización de los aspectos socioeconómicos.....	24
3.2.2.1. <i>Tamaño de finca</i>	24
3.3. Generación, procesamiento y análisis de la información.....	25
3.3.1. Fuentes de información.....	25
3.3.2. Unidad de información.....	26
3.3.3. Variables en estudio.....	27
3.3.3.1 <i>Variables de respuesta categóricas</i>	27
3.3.3.2 <i>Variables explicativas o independientes</i>	33
3.3.4 Generación de base de datos.....	36
3.3.5. Diseño de los modelos de análisis.....	39
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
4.1 Efectos de los factores sobre los diferentes usos de la tierra.....	42
4.1.1 Efecto sobre el uso de la tierra Pasto.....	42
4.1.2 Efecto sobre el uso de la tierra Bosque.....	44
4.1.3 Efecto sobre el uso de la tierra Café.....	47
4.1.4 Efecto sobre el uso de la tierra Caña.....	48
4.1.5 Efecto sobre el uso de la tierra Urbano.....	50
4.2 Eficiencia en cuanto a precisión de los modelos generados a partir de fotografías aéreas e imágenes de satélite.....	52
5. CONCLUSIONES.....	56
6. RECOMENDACIONES.....	58
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	59
8. ANEXOS.....	66

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
1 Factores considerados por diferentes autores en la dinámica de uso de la tierra.....	9
2 Tamaños de finca en la cuenca del río Reventazón.....	25
3 Fuentes de información de las variables en estudio.....	26
4 Categorías de usos de la tierra agrupados en la fotografía aérea.....	28
5 Categorías de usos de la tierra agrupados en imagen de satélite.....	31
6 Matriz de variables explicativas o independientes.....	36
7 Comparación de las proporciones de uso de la tierra en el universo vrs. la muestra.....	37
8 Efectos de los factores sobre el uso de la tierra Pasto en cada uno de los modelos.....	43
9 Efectos de los factores sobre el uso de la tierra Bosque en cada uno de los modelos.....	45
10 Efectos de los factores sobre el uso de la tierra Café en cada uno de los modelos.....	47
11 Efectos de los factores sobre el uso de la tierra Caña en cada uno de los modelos.....	50
12 Efectos de los factores sobre el uso de la tierra Urbano en cada uno de los modelos.....	51
13 Porcentajes de predicción de los modelos en cada uso de la tierra.....	53
14 Matriz de confusión entre los usos de la tierra representados en la fotografía aérea y la imagen de satélite.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Área de estudio.....	20
2	Representación gráfica de la unidad de información definida para el estudio.....	27
3	Categorías de uso de la tierra agrupados en fotografía aérea.....	29
4	Distribución de los usos de la tierra en la fotografía aérea.....	30
5	Categorías de uso de la tierra agrupados en imagen de satélite.....	32
6	Distribución de los usos de la tierra en la imagen de satélite.....	33
7	Comportamiento de la varianza de los tipos de uso de la tierra en la fotografía aérea.....	38
8	Comportamiento de la varianza de los tipos de uso de la tierra en la imagen de satélite.....	38

LISTA DE ANEXOS

	Página
1 Uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba en base a fotografía aérea.....	67
2 Uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba en base a imagen de satélite.....	68
3 Mapa de categorías de profundidad de suelo en la cuenca del río Turrialba.....	69
4 Mapa de categorías de tipos de suelo en la cuenca del río Turrialba.....	70
5 Mapa de categorías de zonas de vida en la cuenca del río Turrialba.....	71
6 Mapa de categorías de pendientes en la cuenca del río Turrialba.....	72
7 Mapa de categorías de tamaños de fincas en la cuenca del río Turrialba.....	73

Méndez, E. 2001. Análisis espacial del tipo de uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 73p.

Palabras claves: Cuenca, río Turrialba, modelos multinomiales, fotografía aérea, imagen de satélite, uso de la tierra.

RESUMEN

En el presente trabajo se planteo la identificación factores físico naturales y socioeconómicos que influyen el tipo de uso de suelo de la cuenca del río Turrialba realizando un análisis espacial. Con la ayuda del Sistema de Información Geográfica como herramienta para la elaboración de la base de datos, fueron agrupados en seis categorías los diferentes usos de suelo provenientes de dos fuentes de información, fotografías e imagen de satélite. Los usos agrupados fueron: Bosque, pasto, café, caña, urbano y otros. Modelos de regresión logística "*Multinomial Logit*" fueron elaborados usando el software econométrico LIMDEP.

Los resultados demostraron que el uso del suelo en la cuenca del río Turrialba es una combinación de los factores: profundidad de suelo, tipo de suelo, zonas de vida, tamaño de finca y distancia como costo de acceso en la cual fue incluido un coeficiente de fricción a partir del mapa de pendientes.

El procedimiento para la identificación de los factores que influyen el uso del suelo y los modelos econométricos generados fueron realizados de la misma manera con los datos obtenidos de la fotografía aérea y de la imagen de satélite a fin de comparar la eficiencia en cuanto al poder de predicción de cada fuente de información. Los resultados demostraron que la fotografía aérea tiene un 67% de eficiencia en predicción en cambio al imagen de satélite resultó tener un 61%. Sin embargo estos resultados no pueden ser generalizados para todos los casos por la manipulación realizada en el estudio al momento de agrupar los usos en seis categorías, para fines de comparación.

Méndez, E. 2001. Spatial Analysis of Land-Use Types in the Turrialba River Watershed, Costa Rica. Thesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica. 73p

Keywords: Watershed management, Turrialba River, multinomial logit models, aerial picture, satellite images analysis, land use.

SUMMARY

The present work had for objective the identification of natural-physique and socioeconomic factors that influence it, in the type of land use of Turrialba river water sheet through space analysis. With the help of Geographical Information Systems, the uses were contained in six categories: forest, grass, coffee, cane, urban and others. Two sources of information were used: aerial pictures and satellite image. The data were analyzed through logistical regressions of the type "Multinomial Logit", using the LIMDEP econometric software.

The results demonstrated that the land use at the Turrialba river watersheet, depend of a combination of factors, such as: soil depth, soil type, life zones, property size and it distances as access cost, in which a coefficient of friction was included starting from slopes map.

The procedure for the identification of the factors that influence it in the land use as well as the econometric models generated, they were applied in the same way to the two sources of information, to the ends of comparing the efficiency as for the prediction power of each one of the sources. The results demonstrated that the aerial picture has 67% of efficiency in the prediction of the change of the land use, on the other hand the satellite image turned out to have 61%. These results cannot be generalized since for all the cases, they can depend from type of manipulation to which are subjected it the information sources; additional studies should be carried out to validate the obtained results.

1. INTRODUCCIÓN

El deterioro de los recursos naturales y consecuentemente de los bienes y servicios producidos por éstos han conducido a países como Costa Rica al establecimiento de sistemas de planificación y presupuesto para coordinar esfuerzos hacia la disminución de las desigualdades regionales y tratar que el uso de los recursos naturales no alcance límites extremos. Una modalidad para la planificación y manejo de los recursos naturales la aportan las cuencas hidrográficas como unidades biofísicas y socioeconómicas con límites bien definidos (Pérez, 1990).

Sin embargo, Faustino (1987) argumenta que en la mayoría de las cuencas hidrográficas de los países de América Tropical se evidencia la falta de un adecuado manejo de los recursos naturales. Esto es el resultado de una planificación deficiente en el uso de la tierra que ha generado una serie de impactos negativos en el ambiente natural.

El uso apropiado y sostenido de la tierra, en la actualidad es muy necesario, porque la demanda de éste recurso se incrementa en forma incompatible con la oferta. De ahí que la planificación, ordenamiento y manejo del uso de la tierra toman gran importancia en el propósito de manejo de cuencas hidrográficas.

El ordenamiento territorial es el marco de referencia para recomendar usos apropiados de la tierra, considerando para ello las condiciones biofísicas, sociales y económicas, presentes en la cuenca hidrográfica en estudio (Calvo, 1993).

Cambios en el uso de la tierra pueden ser considerados como un proceso dinámico en el que muchos factores influyen a través del tiempo y el espacio. A nivel de cuenca y micro-cuenca es muy importante determinar aquellos factores que moldean dicho proceso si se quiere establecer un manejo sostenible de las mismas.

Varios autores han investigado los cambios de uso del recurso tierra como una función de factores biofísicos y socioeconómicos. Algunos ejemplos de ello son los trabajos reportados por Turner *et. al.* (1996), Baritto (2000), Briassoulis (2000), Veldkamp y

Fresco (1997a y 1997 b), Kaimowitz *et al* (2000); entre una larga lista de publicaciones relacionados al análisis del tipo de uso de la tierra.

1.1 Justificación de la investigación

En Costa Rica, país de relieve escarpado y régimen hidrológico caracterizado por su alta pluviosidad (especialmente en la zona atlántica), y con una población en crecimiento, se acentúan los problemas derivados de la explotación inadecuada de los recursos naturales. Esto motiva a estudiarlos, planificarlos y manejarlos, con el fin de asegurar su desarrollo al menor costo ambiental posible (Ferreiro, 1984).

La determinación del tipo de uso de la tierra y su capacidad es de suma importancia para cualquier país cuya economía depende principalmente de la agricultura, como es el caso de Costa Rica.

Tosi (1985) argumenta que modelos de predicción del uso de la tierra precisos ayudan a planificar acertadamente el desarrollo equilibrado de las actividades productivas basadas en el uso apropiado de la tierra; de acuerdo a su capacidad para lograr el máximo rendimiento, tanto a corto como a largo plazo.

Según Calvo (1993), la cuenca del río Turrialba, es un ejemplo de la falta de una planificación adecuada en el uso de los recursos naturales existentes. Efectos asociados a este uso inapropiado son erosión, baja productividad, sedimentación e inundaciones de áreas urbanas.

En la cuenca de río Turrialba se concentra gran parte de la población del cantón de Turrialba. Es además un área importante del desarrollo económico de las zona, pues es donde actividades como la agricultura (café y caña de azúcar) y la ganadería de leche, tienen superficies extensas y bien concentradas. En Santa Rosa y Aquiares predominan el cultivo del café, en San Juan Norte y Alto La Victoria el cultivo de la caña de azúcar y en Santa Cruz la ganadería de leche (Calvo, 1993).

Dada la importancia económica que representa la cuenca para el país y a los problemas documentados de planificación en el uso de los recursos naturales; es fundamental generar conocimiento del impacto de los factores más importantes que intervienen en la determinación del tipo de uso de la tierra para plantear propuestas de manejo sostenido y evitar el paulatino deterioro de los recursos y el incremento en los niveles de vulnerabilidad.

A fin de lograr una mejor comprensión de los principales factores que determinan el tipo de uso de la tierra en la cuenca, se hace necesario considerar aspectos físico-naturales y socioeconómicos, basados en modelos y fuentes de datos precisos, y hacer de ello una herramienta útil de predicción.

En este sentido, la presente investigación abarca ambos puntos, evaluando como las variables físico-naturales como profundidad de suelo, tipo de suelo, zonas de vida y pendiente; así como los aspectos socioeconómicos como distancias y tamaño de finca afectan la distribución espacial del uso de la tierra.

Se utilizó el Sistema de Información Geográfica (SIG) como herramienta básica para la obtención de datos espaciales de la cuenca. Un aspecto crítico al utilizar SIG como fuente de información para determinar el impacto de dichos factores es que puede estar influenciada por la precisión de las fuentes de información a utilizar.

Investigaciones realizadas por Gertner (2000) demuestran que en estudios de recursos naturales con fuentes de datos SIG, el análisis de imágenes conlleva diferentes fuentes de errores, tales como errores de mapeo, de modelaje, decisión y de medida; siendo el de mayor relevancia el error de mapeo.

Las imágenes de satélite y las fotografías aéreas son instrumentos ampliamente usados en los aspectos relacionados con el estudio espacial del medio pues proporcionan datos de gran interés sobre las formas del relieve, la disposición de la red hidrográfica, la distribución de la población y las actividades humanas (agricultura, trazado de las vías de comunicación, etc.) (Bocco, 1998).

Por tal razón en el presente trabajo abordó el efecto de diversos factores en el uso espacial de la tierra en la cuenca del río Turrialba haciendo uso de dos fuentes de datos: Imágenes de satélite y Fotografías aéreas, para determinar con cual de ellos se genera el mayor nivel de precisión de los modelos econométricos desarrollados para el análisis de los datos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar una herramienta metodológica para explicar la distribución espacial del uso de la tierra en función de variables socioeconómicas y físico naturales para la toma de decisiones sobre el manejo racional y sostenible de los recursos naturales a nivel de cuenca.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Identificar los factores físico naturales y socioeconómicos que influyen en el tipo de uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba.
2. Diseñar modelos de análisis e interpretación que expliquen la distribución espacial del tipo de uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba.
3. Determinar las diferencias de precisión de los modelos comparando dos fuentes de información: fotografías aéreas e imágenes de satélite.

1.3 Hipótesis

- Existe un efecto diferencial en el grado de influencia que los factores socioeconómicos y físico naturales tienen en la distribución del tipo de uso de la tierra.
- El modelo generado con fotografías aéreas es más preciso en cuanto a predicción que el generado con imágenes de satélite.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Unidad de estudio para los recursos naturales

La gestión y el manejo de cuencas, se ha sugerido como la opción apropiada para lograr la sostenibilidad de los recursos naturales (Faustino, 1997). Una cuenca es una unidad económica y social para el desarrollo comunal y para fines de planificación y ordenamiento de los recursos naturales (Gregersen *et. al.*, 1988).

La cuenca la conforman componentes biofísicos (agua, suelo), biológicos (flora y fauna) y antropocéntricos (socioeconómicos, culturales, institucionales), que están todos interrelacionados y en equilibrio entre si, de tal manera que al afectarse uno de ellos, se produce un desbalance que pone en peligro todo el sistema (Ramakrishna, 1997).

Remeineras (1975), define una cuenca hidrográfica como la totalidad de la superficie topográfica drenada por un colector principal de agua y sus afluentes, aguas arriba de un punto definido por la sección transversal del lecho en el punto de desagüe. Las cuencas hidrográficas se separan unas de otras por líneas de compartimiento de agua, según las líneas de cresta que bordean la cuenca.

En zonas de altas montañas y cordilleras, por su geografía especial, existe un valor estratégico de las cuencas para el desarrollo de actividades humanas, por ser vías naturales de comunicación e integración comunal. La relación de los habitantes es independiente de su agrupación político administrativa, por la dependencia común a un sistema hídrico, caminos y vías de acceso (Dourojeanni, 1994 citado por Saézn, 1995).

En términos formales, la cuenca, microcuenca o subcuenca son las unidades de planificación y análisis en los que se debe tener en cuenta que los procesos de intervención humana tiene repercusiones y que las condiciones de uso de la tierra no solo tiene que ver con el manejo. De ahí que el manejo de una cuenca comienza por la rehabilitación a nivel de campo incorporando la educación ambiental a todos los niveles para facilitar las actividades de manejo sostenible (Ramakrishna, 1997).

2.2 Uso de la tierra como objeto de análisis

Una primera cuestión a tenerse en cuenta es la diferencia entre cobertura de la tierra y uso de la tierra. En forma pragmática, cobertura describe los objetos que se distribuyen sobre un territorio determinado. Uso se refiere a la actividad socioeconómica que se desarrolla (o desarrolló) en una cobertura (Bocco, 1998).

Asimismo, conviene diferenciar entre cobertura vegetal y otro tipo de coberturas. La cobertura vegetal se acerca más a un objeto natural, en tanto que otras coberturas (por ejemplo, urbana) resultan de la intervención antrópica. En algunos casos, las fronteras entre una y otra pueden ser difusas, tal como en el caso de los pastizales naturales e inducidos. Aquí pueden usarse los conceptos de cobertura vegetal inducida, como un resultado de la antropización de la cobertura vegetal. Esto no equivale, al menos no necesariamente, a degradación de la cobertura (Bocco, 1998).

El tipo de uso de la tierra implica la descripción del paisaje donde se desarrolla este evento a una escala y en un espacio determinado (escenario). Desde la perspectiva de la Ecología Humana se ha intentado conectar las relaciones de la sociedad (actores) con la naturaleza (escenario). La evaluación de la transformación de los escenarios implica la revisión de las causas socioeconómicas que la impulsan (Toledo, 1998).

Para evaluar la relación entre la sociedad y la naturaleza en el proceso de deforestación Kaimowitz *et. al.* (2000), utilizó factores como: costos de transporte (mediante proxies tal como distancias a caminos, ríos, mercados), condiciones ecológicas (topografía, tipo de suelo, precipitación) y tamaño de finca o categorías de zonificación (parques nacionales, concesiones forestales, territorios de indígenas).

Por otra parte, Wear *et. al.* (1996), al intentar evaluar diferentes escenarios de manejo de ecosistemas en la cuenca sur Apalache, utilizando modelos espaciales para simular el cambio en el paisaje, estimaron que la introducción de cambios en los factores sociales, tanto en tierras públicas como privadas, implican ocurrencia de un paisaje más boscoso y más estable.

Estos y otros ejemplos resumidos en el Cuadro 1 permiten ilustrar como los factores del entorno social y económico relacionados con aspectos eminentemente antropocéntricos, constituyen elementos determinantes en cuanto a la dinámica de la utilización del espacio terrestre.

Cuadro 1. Factores considerados por diferentes autores en la dinámica del uso de la tierra.

Autor	Área de estudio	Modelo usado	Factores	Variable de respuesta
Bockstael (1996)	Cuenca del Río Patuxent, Washington, D.C. USA.	Precios Hedónicos	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño del lote • Distancia a autopistas, poblados y aeropuerto • Fragmentación del paisaje 	<ul style="list-style-type: none"> • Estimación del valor de la tierra en usos alternativos • Probabilidad condicional que una parcela sea transformada
Berry <i>et al</i> (1996)	Cuenca de Little Tennessee River, y la Península Olympic.	Multinomial Logit LUCAS (Land Use Change Analysis System)	<ul style="list-style-type: none"> • Costo de Transporte • Características del propietario • Densidad de población • Pendiente • Elevación • Vegetación de cobertura 	<ul style="list-style-type: none"> • Probabilidades de transición
Kaimowitz <i>et al</i> (2000)	Santa Cruz, Bolivia	Modelos de regresión	<ul style="list-style-type: none"> • Costo de transporte mediante proxis como: distancias a mercados, caminos y ríos. • Topografía • Tipo de suelo • Precipitación • Fragmentos de bosque • Tamaño de finca 	<ul style="list-style-type: none"> • Estimación del área deforestada.
Mertens and Lambim (1997)	Sur de Cameroon	Análisis de regresión	<ul style="list-style-type: none"> • Número de parcelas en producción de café y cacao • Nivel educativo • Origen de los inmigrantes • Creación de nuevas parcelas • Producción de alimentos • Parcelas en producción forestal 	<ul style="list-style-type: none"> • Estimación del área deforestada.
Nelson y Hellerstein (1997)	Centro de México	Multinomial Logit	<ul style="list-style-type: none"> • Costo de acceso • Distancia euclidiana • Elevación • Pendiente • Tipo de suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio en el Uso de la tierra
Veldkamp y Fresco (1997b)	Costa Rica	Modelo de regresión lineal múltiple	<ul style="list-style-type: none"> • Población rural • Población urbana • Fuerza laboral agrícola • Altitud • Relieve • Suelos • Variabilidad climática 	<ul style="list-style-type: none"> • Cambios en el uso de la tierra • Interrelaciones entre cobertura del suelo y factores potenciales

2.3 Uso de la tierra y la necesidad de manejo

El manejo del uso de la tierra es una actividad que debe ser considerada para establecer un manejo integral de los recursos naturales de las cuencas hidrográficas. Por lo tanto la finalidad del manejo en el uso de la tierra es determinar, establecer y mantener una combinación de usos apropiados de la tierra hasta su potencial sostenible en el contexto físico, biológico, socioeconómico y político (Richters, 1988).

La necesidad del manejo de uso de la tierra se justifica según Richters (1995) por dos razones básicas:

1. La apremiante escasez del recurso tierra per cápita
2. Los efectos negativos del uso de la tierra más allá de su potencial sostenible fuera de su propio ambiente en tiempo y espacio.

El manejo del uso de la tierra es un acercamiento dinámico hacia la solución y prevención de la problemática ambiental que se presenta en un país o una región determinada, coordinando las diferentes actividades de planificación (Faustino, 1988).

Por otro lado Ramakrishna (1997), argumenta que el objetivo primordial del manejo del uso de la tierra a nivel de cuenca es alcanzar un uso verdaderamente sostenible de los recursos naturales, en especial el agua, el bosque y el suelo, considerando al hombre y la comunidad como el agente protector o destructor.

2.4 Uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba

A fin de compilar un mapa de uso de la tierra de una región determinada, es imprescindible que se establezca una sistema de clasificación que permita la generalización de los resultados y las comparaciones con trabajos previamente realizados.

Para clasificar el uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba se utilizó el sistema desarrollado por la UNESCO (1973). Según USGS (1997), el uso de este sistema de clasificación presenta ventajas importantes entre las que se destacan:

- Es producto de la investigación de un grupo internacional de expertos, por lo que posee una cobertura mundial
- Tiene significación ecológica
- Es un sistema jerárquico que ha sido diseñado para realizar clasificaciones y mapas a múltiples escalas
- Por su estructura es un sistema abierto, y pueden añadirse unidades de clasificación cuando sea necesario

Calvo (1993) realizó un estudio en la cuenca del río Turrialba para determinar la dinámica de uso de la tierra durante los años 1978 a 1988. Identificó los usos, urbano, agrícola, pasto, charral y bosque; y encontró que el uso predominante fue pastos con un 39.87% seguido por el uso agrícola con un porcentaje de 29.25%.

Asimismo el estudio demostró que los cambios que se dieron en los diez años se centraron sobre los usos de tierra agrícola y pastos, perjudicando a las áreas de charrales y bosques, afectando tierras de condiciones muy diversas en topografía, profundidad de suelo y clima.

Por otro lado García (1990) afirma que en la cuenca alta del río Turrialba la tendencia es al cultivo de pastos en sustitución de áreas de bosque. En la cuenca media y baja hay mucha variación predominando los cultivos de café y caña.

El presente estudio baso su análisis en la clasificación de uso de la tierra realizada por Neeff (2000) con base en fotografías aéreas y a la clasificación hecha por Pedroni (2000) utilizando imágenes de satélite, ambas proporcionadas por el departamento de SIG-CATIE.

Neeff (2000) describe 17 usos de la tierra para la cuenca, entre los que se encuentran: pasto puro, pasto sombra, bosque, plantaciones forestales, café puro, café sombra,

caña, urbano, hortalizas, carreteras, cauce, parque nacional y sabana, suelo pasto, suelo caña, suelo café y suelo hortalizas.

Análogamente Pedroni (2000) clasificó el uso de la tierras en la cuenca en 21 categorías, entre ellas: potreros, Bht primario, Bht intervenido, Bht secundario Fas1, Bht secundario Fas2, Bht secundario Fas3, reforestación, B. montano primario, B montano sec. Inicial, B montano sec. avanzado, sucesión prim. montana, café, caña, urbano, agricultura, suelo agrícola, piña, sarán, árboles frutales, suelos descubiertos y agua.

2.5 Perspectiva espacial del uso de la tierra y algunas herramientas de análisis

El análisis espacial del tipo de uso de la tierra es estático, pero poderoso en el modelamiento de situaciones donde la distribución de objetos de estudio es relevante en la explicación y predicción de su ocurrencia. Esto es básico en temas relacionados con los recursos naturales y su aprovechamiento /degradación en forma (no) sustentable (Bocco, 1998).

El enfoque fundamental para abordar lo espacial es el análisis geográfico y su lenguaje, la cartografía. En la actualidad, estos conceptos se ven complementados por los sistemas automatizados de información geográfica. La generación principal de datos se basa en buena medida en los sistemas de percepción remota: interpretación de fotografías aéreas, imágenes de video o de satélite en el contexto de un Sistema de Información Geográfica (Bocco, 1998).

Lo espacial supone el manejo de entidades geográficas (puntos, líneas o polígonos) organizados en un sistema de coordenadas conocido y su utilización en la formulación de modelos espaciales (mapas, en general automatizados) y el análisis espacial: vecindad, proximidad, adyacencia, sobreposición, generalización y clasificación, etc. (Bocco, 1998).

En términos prácticos, los sistemas disponibles en percepción remota son: fotografías aéreas, fotografías digitales, imágenes de video convencional, imágenes de satélite

(reflectivas, radar, fotografías satelitales, nuevos sensores hiperespectrales). Cada uno de ellos tiene aplicaciones en función de la escala, el tipo de tratamiento (visual o digital) y la resolución en el tiempo. Los más utilizados son las fotos y las imágenes de satélite. La otra fuente principal de datos es la cartográfica.

2.5.1 La fotografía aérea

La fotografía aérea es una imagen tomada desde el aire por un sensor remoto (la cámara) tipo pasivo, o sea, que no depende de generadores artificiales de energía siendo el sol su única fuente de energía. La imagen es formada con base en la reflexión de las ondas de luz del sol en la superficie de los objetos que se toman. La fotointerpretación es el acto de examinar las imágenes fotográficas con el propósito de identificar objetos y juzgar su significado (Veiman, 1988).

Según Malleux (1971), la fotointerpretación se ha definido como la técnica que trata del análisis e interpretación de la información proporcionada por la fotografía en una forma sistemática, lógica y objetiva. La identificación de los objetos debe estar basada en su forma, tamaño, tono, localización y asociación; una buena parte de información puede obtenerse mediante la visión tridimensional y el uso del estereoscopio.

La fotointerpretación es una herramienta técnica importante para la planificación y el manejo de cuencas, pues facilita reconocer grandes áreas sin tener que recorrerlas en el terreno y levantar mapas de diferentes aspectos, como el patrón de drenaje y el uso de la tierra entre otros, a muy bajo costo comparado con los métodos tradicionales de topografía (Saborío, 1988).

2.5.2 La imagen de satélite

A través del espectro visible e invisible, todos los objetos tienen características especiales o firmas espectrales; considerando que cada peculiaridad del terreno emite o refleja energía electromagnética en longitud de onda característica, la cual puede ser convertida en un valor digital (Saborío, 1988).

El análisis de la información obtenida por los sensores y su debida interpretación requieren del conocimiento de parámetros básicos para determinar los patrones que deberán servir de base para reconocer una característica dada.

Por medio de los satélites, una gran cantidad de información ha sido recolectada y posteriormente procesada en forma útil como asistencia a planificadores y científicos de numerosas disciplinas.

Dentro de la aplicación que tienen los sensores remotos, una gran importancia es con respecto al análisis del uso actual de la tierra. Las diferentes firmas espectrales permiten clasificar a cada categoría independientemente (agrícola, silvícola, suelo, hidrología, urbanismo e infraestructura) y analizar la dinámica del uso de la tierra (Saborío, 1988).

2.5.3 Sistemas de información geográfica como base de análisis

Se puede hacer uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para describir, medir y analizar datos acerca del cambio de cobertura y uso en función de variables dependientes y así llevar a cabo análisis geográfico y transformar datos en información (Bocco, 1998).

El objetivo de estos sistemas es el tener una ubicación espacial del problema de estudio, un sistema de recolección de datos, información organizada, actualizada e instantánea, representación gráfica del problema y permitir modelos complejos. Estos sistemas tienen diferentes funciones, desde capturar datos, cargar y almacenar datos de mapas referenciados geográficamente, para posterior uso de los mismos, analizar y modelar (manipular, sobreponer, medir, calcular y recuperar) los datos espaciales hasta obtener resultados, despliegue de nuevos mapas o resultados en forma tabular (Saborío, 1989).

El estudio realizado por Veldkamp y Fresco (1997a), demuestra la dependencia de la escala espacial cuando se trabaja en SIG, para la reconstrucción del tipo de uso de la tierra. Esta investigación desarrolló un modelo de regresión múltiple a partir de factores biofísicos y humanos que intervienen en la deforestación en Costa Rica.

Los datos pueden ser analizados mediante el uso de modelos matemáticos, sin embargo el tipo de uso de la tierra es una función compleja que depende del comportamiento de muchas variables. En general los modelos no consideran el intercambio desigual entre productor, consumidor y el ambiente socioeconómico (Masera, 1998).

Uno de los paradigmas mas importantes a desarrollar es una ecuación que represente un modelo más cercano a la realidad, apoyado en un marco conceptual que refleje la dimensión humana en el cambio de uso de la tierra.

Hasta el momento no existe un marco conceptual que analice los vínculos o formas en los que interaccionan los seres humanos. No existen bases de datos confiables a diferentes niveles. Faltan series de tiempo que ayuden a comparar la evolución en el uso de los recursos y faltan estudios detallados a nivel local. La modelación del tipo de uso de la tierra debe involucrar variables dependientes de la escala (Masera, 1998).

2.6 Bases económicas del análisis espacial del uso de la tierra

Nelson y Hellerstein (1997); Chomits y Gray (1995) ellos asumen al igual que Bosckstael (1996) que la escogencia de un uso en particular es hecha comparando el valor presente neto de la ganancia con todos los posibles tipos de usos. Por consiguiente si asumimos que el uso de la tierra esta dado como un producto de mercado, el valor presente neto del retorno del uso de la tierra en el tiempo T , esta definido por:

$$R_{hLT} = \int_{t=0}^{\infty} (P_{hLT+t} Q_{hLT+t} - C_{hLT+t} X_{kLT+t}) e^{-i \cdot t} dt \quad (1)$$

Donde:

R_{hLT} : es la renta presente neta

P: es el precio del producto

Q: es la cantidad de producto

C: es un vector de costos de los insumos

X: es un vector de insumos bajo un operador control

i: tasa de descuento

h: tipo de uso

L: Localidad

T: tiempo

Ellos asumen que Q es una función de producción Cobb-Douglas con un índice multiplicador de factores específicos (G_L) que afectan la producción:

$$Q_h = G_L \prod_j X_j^{\alpha_{hj}} \quad (2)$$

Con las siguientes restricciones caracterizando la tecnología de producción:

$0 < \alpha_{hj} < 1 \Rightarrow$ factores inelásticos de producción

$0 < \sum_j \alpha_{hj} < 1 \Rightarrow$ escala de retornos decrecientes

Entonces $G_L = \prod_{r=1}^R G_R^{\eta_r}$ es una combinación de factores geofísicos que incluyen

tipo de suelo, elevación, pendiente, precipitación, profundidad de suelo, entre otros.

En la mayoría de los casos cuando los datos provienen de sensores remotos, solamente información espacial hay disponible. Sin embargo, cambios en el tipo de uso a través del espacio representan una realidad observable. Para llevar a cabo un análisis econométrico en estas circunstancias (limitada información de series de tiempo), se asumen precios constantes al mercado central (Chomits and Gray, 1995 y Nelson and Hellerstein, 1997). Para ajustar los precios Chomits and Gray (1995) construyeron

proxis de P y C (como en Ecuación 1) basados en el costo de acceso a partir de las ideas clásicas de von Thunen y Ricardo en la función de determinar la renta a partir de la localización. Estos proxis son:

$$\begin{aligned} P_{hL} &= \exp(\gamma_{0h} + \gamma_{1hL} D_{hL}) \\ C_{hL} &= \exp(\delta_{0h} + \delta_{1hL} D_{hL}) \end{aligned} \quad (3)$$

Donde:

D: es una medida del costo de acceso a la parcela h en el tipo de uso L .

El uso de la función exponencial es por conveniencia econométrica. Hay dos hipótesis implícitas en los proxis:

$\gamma_{1hL} < 0 \Rightarrow$ el precio del producto disminuirá a medida el costo de acceso se incremente

$\delta_{1hL} > 0 \Rightarrow$ el costo de los insumos aumentará el precio de mercado de los productos.

Combinando 1,2 y 3 y tomando como ventaja que los factores no dependen del tiempo, Nelson y Hellerstein (1997) llegaron a la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \ln(R_{\eta LT}) &= \eta_{0h} + \sum_i \eta_{1i} D_i + \eta_{2h} \ln G_h + \eta_{3h} \ln i_L + \mu_{hL} \quad (4) \\ &= v_h N_L + \mu_{hL} \quad (5) \end{aligned}$$

ambas ecuaciones contienen un componente sistemático ($v_h N_L$) y un componente aleatorio (μ_{hL}). Si asumimos que μ tiene una distribución Weibull, la ecuación 5 puede ser expresada como un *Multinomial Logit*:

$$Pr ob_{hL} = \frac{e^{v_L \beta_h}}{\sum_j e^{v_L \beta_j}} \quad (6)$$

Donde, VL contiene 3 grupos de variables:

G: variables geográficas específicas del sitio

C: variable costo de acceso

S: efecto espacial de las variables geográficas

En la literatura Kitamura *et. al.* (1997) y Morita *et. al.* (1997); citado por Briassoulis (2000) usaron el modelo *Multinomial Logit* para evaluar la probabilidad de opción de un tipo de uso de la tierra particular en cada uno de las parcelas en las que el área del estudio se subdivide.

Por otro lado Turner *et. al.* (1996) utilizando modelos *Multinomial Logit* para analizar el cambio de cobertura como una función de características de los propietarios de la tierra en dos regiones de los Estados Unidos, encontraron diferencias importantes en las transiciones ocurridas a través del tiempo, entre propietarios, y entre las dos regiones de estudio.

Asimismo, Bockstael (1996); Veldkamp (1997b); Stoorvogel (1995) citados por Baritto (2000), considerando factores sociales tales como distancia a centros urbanos, aeropuertos o vías de acceso, densidad de población, fuerza laboral agrícola; y factores biofísicos como altitud, relieve, suelos, pendiente y clima; estimaron probabilidades de uso de la tierra con un enfoque eminentemente económico de la probabilidad de transición de uso de la tierra en el tiempo.

Es importante destacar que estos estudios tienen en común la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG), mediante sensores remotos (imágenes de satélite y fotografías aéreas) para caracterizar espacialmente el paisaje.

2.7 Autocorrelación espacial

La importancia de los problemas acusados por la autocorrelación espacial y sus efectos en la validez de los métodos estadísticos convencionales no es nueva sino que podemos remontarla a la década de los cincuenta con los trabajos de Moran(1948) y

Geary (1954), donde se presentan los primeros índices formales para medir la autocorrelación o dependencia espacial.

Los datos espaciales agregados se caracterizan por la dependencia (autocorrelación espacial) y por la heterogeneidad (estructura espacial). Estos efectos espaciales son muy importantes en el análisis econométrico aplicado, ya que pueden invalidar algunos resultados metodológicos convencionales (Gómez, 1999).

La autocorrelación espacial surge debido a la relación existente entre lo que ocurre en unos lugares y en otros. Como expresó Tobler (1979) en la primera ley de la geografía: *" Todo tiene relación con todo, pero las cosas cercanas están mas relacionadas que las lejanas"*.

En este sentido la autocorrelación viene determinada por una noción de localización relativa, en la que se enfatiza el efecto de la distancia. La autocorrelación espacial puede ser originada por dos fuentes: las particulares características de los datos espaciales, y la organización espacial de los fenómenos a estudiar (Gómez, 1999).

Por lo que se refiere a la utilización de datos espaciales nos encontramos con que la mayoría de ellos, no son datos controlados, es decir, no son datos experimentales, no podemos repetir un número de veces el mismo experimento para observar algún tipo de relación o característica, por lo que los errores de medida son importantes (Gómez, 1999).

Aun no se cuenta con soluciones satisfactorias para resolver el problema de la autocorrelación en modelos probabilísticos (Boots and Kanaroglou, 1988). Sin embargo existen determinados estadísticos dentro de la econometría espacial para detectar la dependencia en los datos espaciales. Los mas conocidos son la **I** de Moran, y la **C** de Geary; son estadísticos básicamente descriptivos, para cualquier conjunto de datos que estén ordenados en una secuencia (Gómez, 1999).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del estudio

El estudio se llevó a cabo en la cuenca del río Turrialba que se ubica entre las coordenadas $9^{\circ} 53' 20''$ a $10^{\circ} 00' 00''$ Latitud Norte y $83^{\circ} 40' 00''$ a $83^{\circ} 50' 00''$ Longitud Oeste, insertándose en la región geográfica denominada vertiente atlántica.

La altitud de esta cuenca varía entre 580 y 3,300 metros sobre el nivel del mar con una superficie de 7,451.10 ha (Calvo, 1993).

La ubicación administrativa de la cuenca corresponde a la provincia de Cartago y comprende los cantones de Jiménez, Turrialba y Alvarado.

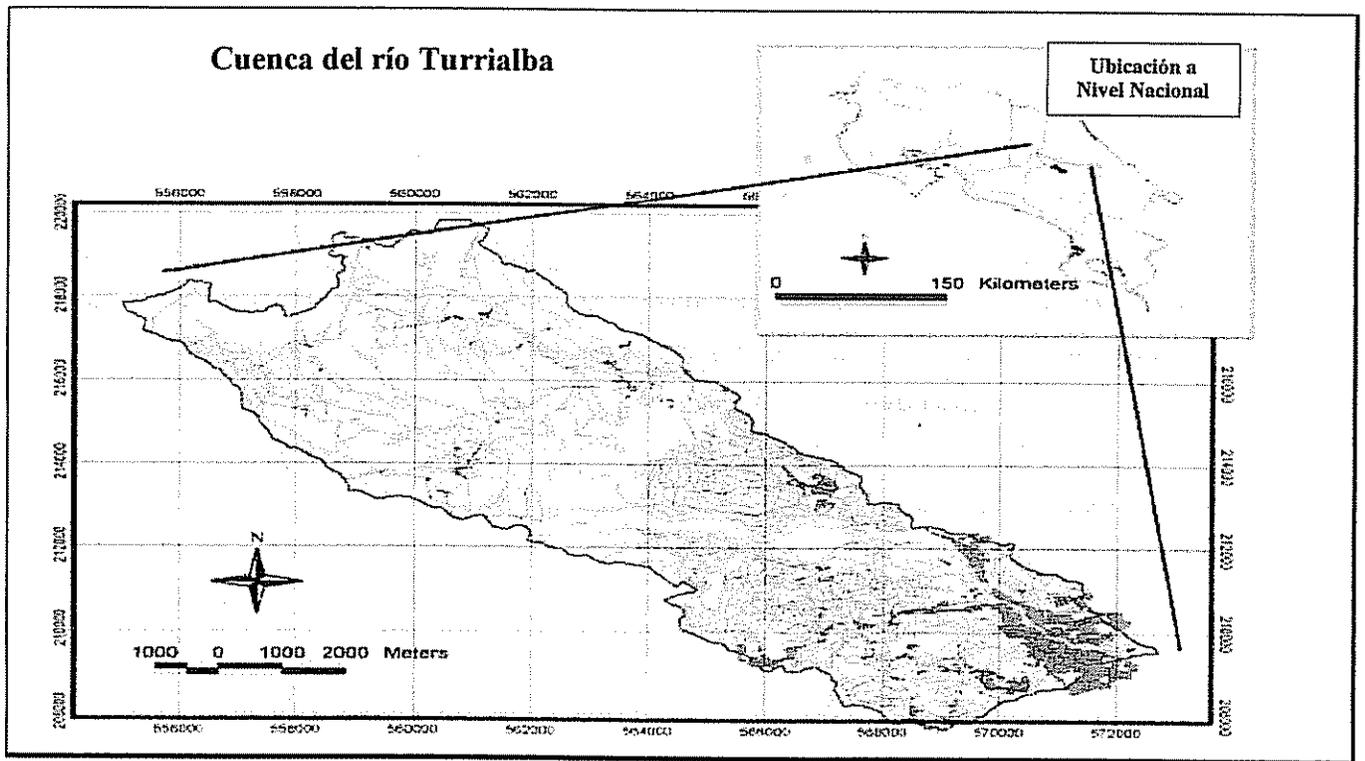


Figura 1: Área de estudio

3.2. Caracterización de la zona

3.2.1 Caracterización de los aspectos ambientales

3.2.1.1. Clima

Costa Rica presenta la particularidad de estar encerrada entre dos océanos. Su condición istmica favorece la influencia marina de ambos océanos. La orografía montañosa sumada a la condición interoceánica, se combinan para configurar el clima (ICE, 2000).

La larga y alta barrera montañosa que atraviesa el país en su interior de noroeste a suroeste presenta condiciones de una cadena montañosa que actúa como barrera, impidiendo la libre circulación de masas de aire provenientes del noroeste y suroeste. Esta estribación montañosa divide al país en dos macro zonas climáticas, pacífico y atlántico (ICE, 2000).

El área de estudio se localiza en la vertiente atlántica, bajo la influencia del mar Caribe. El clima es heterogéneo, debido a que esta en función de variables microclimáticas.

En la cuenca del río Turrialba, hay un sistema climatológico que propicia lluvias torrenciales y se caracteriza por tres fenómenos principales: el efecto de Fohen, estacionamiento y circulaciones locales. Estos afectan los vientos cargados de humedad que penetran desde el caribe por el valle del río Reventazón.

El promedio de precipitación anual, para toda la cuenca es de 2,289.5 mm. En los meses de enero a abril cae menos precipitación que en el resto del año, considerándose los meses secos. El período entre mayo a diciembre, es donde se concentra la mayor precipitación, en este período cae el 83% de la precipitación media anual de la cuenca (Instituto Meteorológico Nacional, 1988).

El régimen de temperatura presenta dos estaciones marcadas, una más cálida entre mayo y noviembre; la otra más fría entre diciembre y abril, con temperatura media anual de 21.7 °C de acuerdo con la estación CATIE.

3.2.1.2. Zonas de Vida

La zona de vida es un conjunto de ámbitos específicos de los factores climáticos principales, constituido por la biotemperatura, precipitación y la humedad; los cuales caracterizan una condición ambiental particular para un área geográfica determinada (Holdridge, 2000).

En la cuenca se determinaron cinco zonas de vida según información suministrada por el Ministerio de Agricultura entre las cuales se identifican:

Bosque húmedo tropical transpremontano (bht-TP): Esta es la zona de vida mas alterada de Costa Rica, pues aquí ya no quedan áreas significativas de bosque primario. El bosque es semideciduo estacional de altura mediana y de dos estratos.

Bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB): Debido a su alta humedad, presenta limitaciones moderadas para el desarrollo de las actividades del uso de la tierra, especialmente para la producción de cultivos agrícolas; sin embargo, es bastante apropiada para el desarrollo de la ganadería de leche.

Bosque muy húmedo pluvial (bmh-P): Esta zona de vida es caracterizada por ser una transición entre montano a muy húmedo. Se caracteriza por ser siempre verde de altura que varia entre baja a intermedia y con dos estratos.

Bosque pluvial montano (bp-M): El clima es muy poco atractivo para el asentamiento humano, debido principalmente al frío húmedo imperante. Para las actividades agropecuarias o forestales este bioclima también es limitante.

3.2.1.3 Tipos de suelo

Basados en información suministrada por el Ministerio de Agricultura y Ganadería en la cuenca se registran tres tipos de suelos. Suelos Entisoles, Inceptisoles y Ultisoles.

Los suelos Entisoles son de escaso desarrollo morfogénico, no presentan ningún horizonte diagnóstico claramente definido. Están constituidos principalmente por suelos localizados en un relieve muy escarpado, donde la roca madre aflora a muy poca profundidad (Atlas agropecuario, 1994).

Los suelos Inceptisoles son de desarrollo reciente que tienen un horizonte úmbrico u ócrico. Son profundos, bien drenados, permeables, de textura media a moderadamente pesada, su fertilidad es alta a moderadamente baja (Atlas agropecuario, 1994).

Los suelos Ultisoles son profundos, arcillosos, moderadamente ácidos, de colores rojizos, muy susceptibles a la erosión si se trabaja con cultivos limpios (Atlas agropecuario, 1994).

3.2.1.4 Profundidad de suelo

La profundidad de suelo se define como la profundidad efectiva al grosor de las capas de suelo y subsuelo en las cuales las raíces pueden penetrar sin dificultad, en busca de agua, nutrimentos y sostén (Cubero, 2001).

Su límite inferior está definido por capas u horizontes compactos que impiden el desarrollo de las raíces, como arcillas muy densas y compactas, horizontes cementados, estratos rocosos o pedregosos y nivel friático (Cubero, 2001).

Según datos suministrados por el departamento de SIG-CATIE, en la cuenca se encuentran tres profundidades que oscilan entre: profundo (mayor de 90 cm), medio profundo (40 – 90 cm) y delgado (20 –40 cm).

Los suelos considerados como profundos representan el 57% de la superficie total de la cuenca, ubicada principalmente en la parte alta, el 22% del área total se encuentra bajo la clase medio profundo principalmente ubicados en la parte media y en pequeñas áreas de la parte baja. El restante 21% lo ocupan los suelos delgados ubicados en la parte alta y media de la cuenca.

3.2.1.5 Pendiente

La pendiente de un terreno se expresa como el grado de declive. O sea, una relación entre las distancias vertical y horizontal de dos puntos, en términos porcentuales (Cubero, 2001).

Para establecer las pendientes en la cuenca se utilizó la información suministrada por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). El cual reporta cinco categorías de pendientes que van de 0-60%.

La cuenca presenta fuertes pendientes que generan relieves accidentados a muy quebrados, principalmente por ser una zona influenciada por la cercanía de los volcanes Irazú y Turrialba, de los cuales se originaron procesos geomorfológicos que resultaron en condiciones topográficas muy difíciles. Esta característica es observada en el 62 % de la cuenca que presenta pendientes de 15-30% y un 23% de la cuenca con pendientes de 30-60%. Lo cual nos indica que solo un porcentaje muy reducido de la cuenca son tierras de pendientes planas que se localizan en las partes media y baja de la cuenca.

3.2.2 Caracterización de los aspectos socioeconómicos

3.2.2.1. Tamaño de finca

De acuerdo con Mora y Fernández (1987) citado por ICE (1999); los cambios en la distribución de la tierra en el sector rural de Costa Rica, registrados en el período de 1963-1984 son debido principalmente a la expansión capitalista vivida por el agro, a las políticas estatales y a la iniciativa de terratenientes de fraccionar o vender sus tierras ya sea para abandonar la actividad agropecuaria o para reducir el área en la cual se realizan sus actividades productivas.

Según el estudio realizado por el ICE (1999) a nivel de la cuenca hidrográfica del río Reventazón se encuentran seis categorías de tamaño de finca descritas en el Cuadro

2. Sin embargo a lo largo de la cuenca del río Turrialba el 54% del área esta cubierta por fincas de mas de 100 ha, 44% de fincas entre 5-20 ha y un 2% de áreas protegidas.

Cuadro 2. Tamaños de Finca en la Cuenca del río Reventazón

Categoría	Tamaño de finca (ha)
1	< 5
2	5-20
3	20-50
4	50-100
5	> 100
6	Áreas protegidas

Fuente: ICE, 1999

La forma de tenencia predominante es la propiedad privada, las cuales son atendidas directamente por sus propietarios y los administradores de ellas (ICE, 1999).

3.3. Generación, procesamiento y análisis de la información

3.3.1. Fuentes de información

La información básica utilizada proviene de tres fuentes secundarias principales, en las que destacan: El departamento de Sistemas de Información Geográfica de CATIE (SIG-CATIE), Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). En el Cuadro 3 se detalla la fuente para cada base de datos.

Cuadro 3. Fuentes de información de las variables en estudio

Variable	Descripción	Fuente
Y1	Uso de la Tierra	SIG-CATIE, 2000 (Fotografía Aérea)
Y2	Uso de la Tierra	SIG-CATIE, 2000 (Imagen de Satélite)
X1	Profundidad de suelo	SIG-CATIE
X2	Tipo de Suelo	MAG
X3	Zonas de Vida	MAG
X4	Distancia Euclidiana a carreteras	SIG-CATIE
X5	Distancia como costo a las carreteras	SIG-CATIE
X6	Tamaño de finca	ICE
X7	Pendiente	MAG

Además de las fuentes ya mencionadas en cada una de las variables, se recolectó información bibliográfica así como aquellos estudios realizados en la cuenca por otros autores, para obtener la caracterización de la zona.

3.3.2. Unidad de información

La unidad básica de información utilizada posee una connotación espacial o geográfica y representará a una parcela o unidad de tierra de 30 x 30 m (0.06 ha) arbitrariamente definida la cual esta en función de una serie de factores que determinan el tipo de uso de la tierra (ver Figura 2).

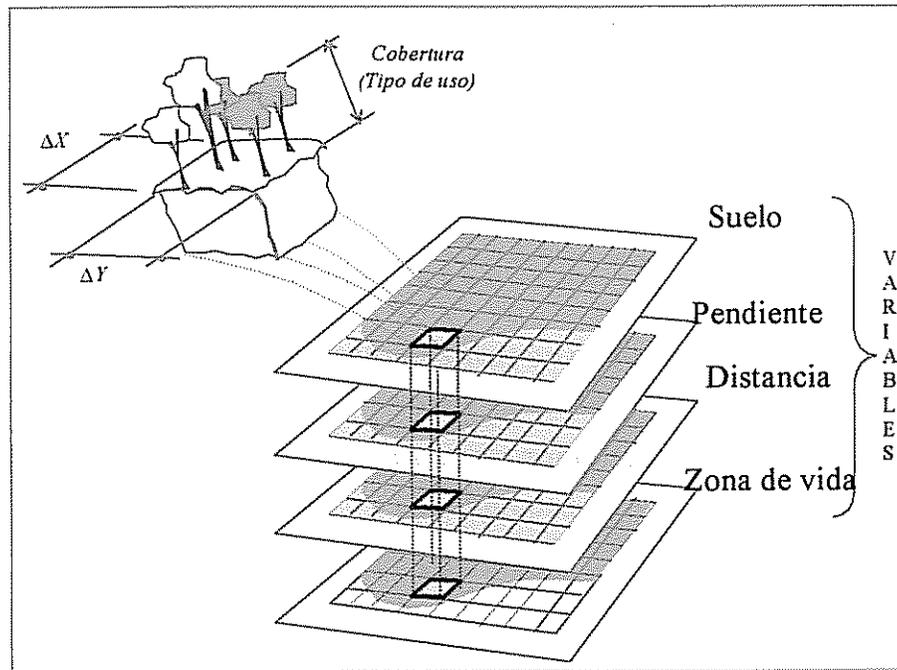


Figura 2. Representación gráfica de la unidad de información definida para el estudio. ΔX y ΔY corresponden al distanciamiento de 30x30 metros especificado.

Para fines de análisis posteriores cada unidad básica (celda) representa a una entidad de muestreo con características físico naturales propias (uso de la tierra, pendiente, tipo de suelo, zonas de vida, etc.), las cuales forman un universo de $N= 115, 904$ celdas, equivalentes a 7,451 ha que comprende la cuenca.

3.3.3. Variables en estudio

3.3.3.1 Variables de respuesta categóricas

Para alcanzar los objetivos propuestos en esta investigación, la variable de respuesta ($Y =$ Uso de la tierra), fue tomada de dos fuentes principales: Fotografía Aérea con una resolución de 2 m, e Imagen de Satélite con una resolución de 28.5 m; las cuales fueron proporcionadas por el departamento SIG-CATIE. De esta forma en el análisis de los resultados se logra comparar el nivel de precisión y el poder de predicción de cada fuente.

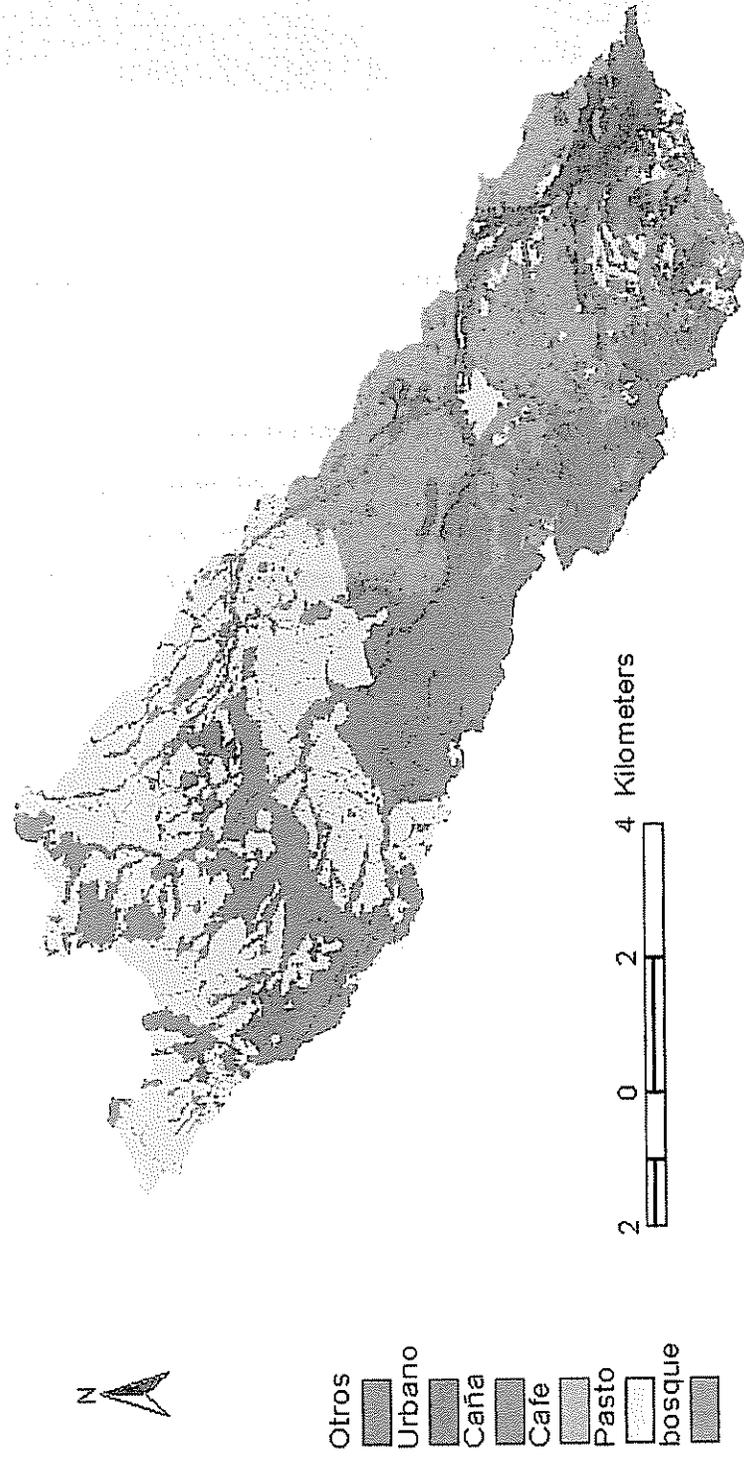
La descripción y número de categorías de uso de la tierra en cada fuente resultó ser desigual, por lo que se procedió a agruparlas de acuerdo a su afinidad según criterio del autor y de esta manera obtener categorías iguales de usos en las dos fuentes que posteriormente facilitan la comparación de resultados.

La Fotografía Aérea contaba inicialmente con 17 categorías de uso (Anexo 1), las cuales se redujeron a seis categorías descritas en el Cuadro 4, Figura 3 y 4.

Cuadro 4. Categorías de usos de suelo agrupados en la Fotografía Aérea

Y	Categoría de Uso	Usos Agrupados	% en el universo
1	Pasto	Pasto puro Pasto sombra Suelo pasto	33
2	Bosque	Bosque Plantaciones Forestales	27
3	Café	Café puro Café sombra Suelo café	20
4	Caña	Caña Suelo caña	7
5	Urbano	Urbano	5
6	Otros	Hortalizas Carreteras Cauce Parque Nacional Sabana Suelo hortalizas	8

Figura 3. Usos de la tierra agrupados en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica. Con base en fotografía aérea.



CATIE
Tesis: Análisis espacial del tipo de uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica.
Autor: Edith Méndez Villanueva

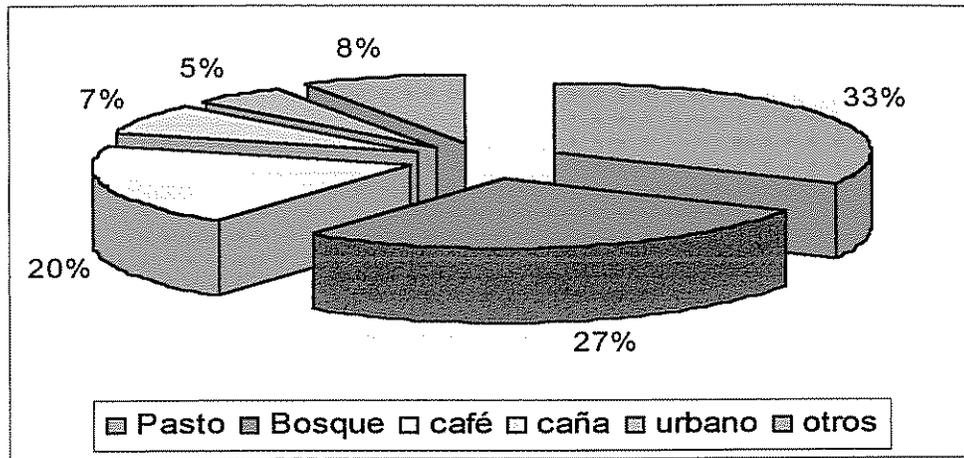


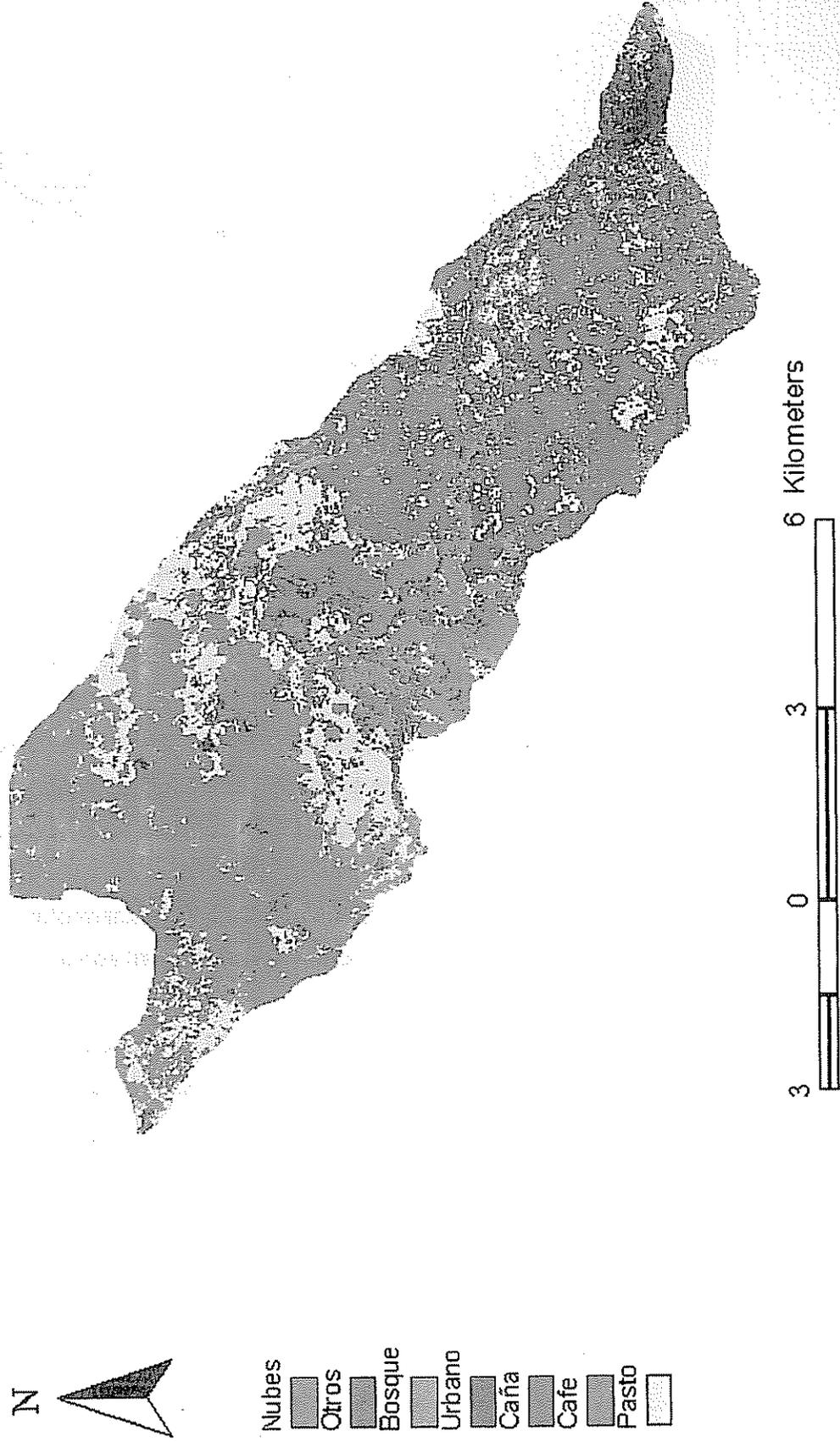
Figura 4. Distribución de los usos de la tierra en Fotografía Aérea

La Imagen de Satélite fue agrupada igualmente en las mismas seis categorías de usos, partiendo de un total de 21 categorías de uso (Anexo 2). Las nubes y sombras fueron eliminadas para efectos de muestreo las cuales cubren el 28% del área de la cuenca. En el Cuadro 5 y Figura 5 y 6 se describen los usos agrupados.

Cuadro 5. Categorías de usos de la tierra agrupados en imagen de satélite

Y	Categoría de Uso	Usos Agrupados	% en el universo
1	Pasto	Potreros	26
2	Bosque	Bht primario Bht intervenido Bht secundario Fas1 Bht secundario Fas2 Bht secundario Fas3 Reforestación B montano primario B montano sec. Inicial B montano sec. avanzado Sucesión prim. Montana	19
3	Café	Café	38
4	Caña	Caña	10
5	Urbano	Urbano	3
6	Otros	Agricultura Suelo agrícola Piña Sarán Árboles frutales Suelos descubiertos Agua	4

Figura 5. Usos de la tierra agrupados en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica. Con base en imagen de satélite.



CATIE
Tesis: Análisis espacial del tipo de uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica.
Autor: Edith Méndez Villanueva

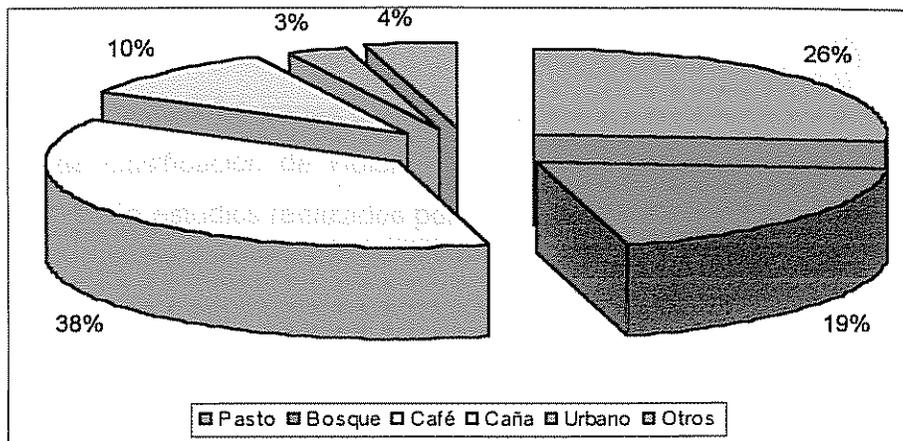


Figura 6. Distribución de los usos de la tierra en la Imagen de Satélite

3.3.3.2 Variables explicativas o independientes

Para explicar la probabilidad del tipo de uso de la tierra en la cuenca, se tomaron en cuenta una serie de factores incidentes entre los que se destacan atributos o características físico-naturales de la unidad de tierra bajo estudio y factores de tipo socio-económico.

Las variables consideradas en esta investigación fueron: Profundidad de suelo, Tipo de suelo, Zonas de vida, Pendiente, Distancia euclidiana a la carretera, Distancia como un costo de acceso a las carreteras y Tamaño de finca.

Basados en información suministrada por el departamento de SIG-CATIE, en la cuenca fueron determinados tres niveles de profundidad de suelo (Anexo 3) que van desde:

1. Suelos profundos (> 90 cm)
2. Suelos medio profundos (40-90 cm)
3. Suelos delgados (20-40 cm)

Los tipos de suelo que se predominan en la cuenca según el Ministerio de Agricultura son: (Anexo 4)

1. Suelos Entisoles
2. Suelos Inceptisoles
3. Suelos Ultisoles

La caracterización de las zonas de vida presentes en la zona esta hecha siguiendo el esquema de clasificación de Holdrige (2000), predominando cuatro zonas de vida (Anexo 5), según estudios realizados por el MAG:

1. Bosque húmedo tropical Trans premontano
2. Bosque muy húmedo montano bajo
3. Bosque muy húmedo pluvial
4. Bosque pluvial montano

La cuenca presenta fuertes pendientes, como resultado de investigaciones realizadas por el MAG se clasificaron cinco niveles de pendientes (Anexo 6):

1. Pendientes de 0-3%
2. Pendientes de 3-8%
3. Pendientes de 8-15%
4. Pendientes de 15-30%
5. Pendientes de 30-60%

Muchos estudios han demostrado la alta correlación que existe entre la probabilidad de un uso determinado de la tierra y la distancia física y en el tiempo de viaje, que existe a las vías de acceso y a los poblados mas cercanos (Chomitz and Gray, 1996; Deininger and Minten, 1996; Liu *et. al.*, 1993; Ludeke *et. al.*, 1990; Mamingi *et. al.*, 1996; Mertens and Lambin, 1997; Sader and Joyce, 1998; Rosero-Bixby and Palloni, 1996).

Siguiendo los estudios anteriormente mencionados, fueron incluidas en este estudio las variables distancia como costo de acceso y distancia euclidiana a la carretera mas cercana.

La variable Distancia euclidiana a las carreteras, fue generada a partir del mapa de carreteras de la cuenca proporcionado por el departamento de SIG-CATIE. Con la ayuda del software ArcView la capa de carreteras fue transformada a formato "Grid", se activó la extensión "Spatial Analyst" que permitió hacer un "Find Distance". Con este

procedimiento se creó una nueva capa que contiene en cada celda, la información de la distancia lineal en metros a la carretera más próxima.

Tomando en cuenta las características de la zona con fuertes pendientes se generó una variable que representara la distancia a carreteras como un costo de acceso. El procedimiento fue igualmente realizado bajo el programa ArcView (Nelson *et. al.*, 1999).

Siguiendo a Nelson y Hellerstein (1997) se creó un coeficiente de fricción a partir de la raíz cuadrada de la pendiente con base en el Modelo de Elevación Digital (MED) de la cuenca, suministrado por SIG-CATIE. Este procedimiento permitió crear una capa donde cada celda contiene la información de distancia a la carretera más próxima incluyendo el coeficiente de fricción como un costo de acceso.

Finalmente se incluyó como variable explicativa el tamaño de finca, la cual se refiere a la distribución del tamaño de fincas presentes en la cuenca. La información fue extraída de un estudio de Diagnóstico realizado por el ICE (1999) en la cuenca de río Reventazón para el proyecto Angostura.

El estudio realizado por el ICE, arrojó seis categorías de tamaños de fincas, sin embargo, al extraer el área correspondiente a la cuenca del río Turrialba, como sub-cuenca del río Reventazón, se encontró solamente tres tamaños de fincas predominantes (Anexo 7):

1. Fincas de 5-20 ha
2. Fincas de más de 100 ha
3. Áreas protegidas

Cuadro 6. Matriz de variables explicativas o independientes

Profundidad De suelo	Tipo de suelo	Zonas de vida	Tamaño de finca	Pendiente	Distancia euclidiana	Distancia Costo de acceso
Profundos (>90 cm)	Entisoles	Bht. Tp	5-20 ha	0-3%	Medida en metros desde el punto muestral a la carretera mas próxima	Medida en metros desde el punto muestral a la carretera mas próxima. Incluye un coeficiente de fricción en base a la pendiente.
Medio prof. (40-90 cm)	Inceptisoles	Bmh Mb	> 100 ha	3-8%		
Delgados (20-40 cm)	Ultisoles	Bmh P	Áreas protegidas	8-15%		
		Bpm		15-30%		
				30-60%		

3.3.4 Generación de base de datos

Utilizando el software ArcView toda la información temática fue convertida a formato "raster" para definir así una cuadrícula (Grid) con celdas espaciadas a una distancia de 30x30 metros con georeferenciación común, de tal manera que para cada celda, su localización se mantenga constante en cada cobertura temática. Dicha información temática fue obtenida de cada fuente previamente ortocorregida.

Las capas de cada información temática (variables), se sobrepuso de tal manera que cada celda (Grid), representa una unidad de muestreo que reúne toda la información (ver Figura 2).

Siguiendo a Baritto (2000), una muestra aleatoria simple inicial $n = 3,000$ puntos fue seleccionada por medio de computadora. Utilizando la herramienta "Theme y Sample" incluido en el software ArcView fueron generados los puntos.

A fin de constatar la representatividad del muestreo, las proporciones de usos de la tierra en el universo fueron comparados con las proporciones en la muestra final (ver Cuadro 7).

Cuadro 7. Comparación de las proporciones de uso de la tierra en el universo vrs. la muestra.

Usos	Imagen de Satélite		Fotografía Aérea	
	% en el Universo	% en la muestra	% en el Universo	% en la muestra
Pasto	26	30	33	33
Bosque	19	24	27	30
Café	38	32	20	18
Caña	10	8	7	6
Urbano	3	1	5	4
Otros	4	5	8	9
Total	100	100	100	100

La representatividad del muestreo fue verificada además, examinando la varianza muestral de los principales tipos de uso de la tierra proveniente de la Fotografía Aérea y la Imagen de Satélite, interpretados con relación al tamaño de la muestra.

Dado que solo hay dos sucesos posibles asociados a un individuo ($Y = \{0,1\}$), la probabilidad de ocurrencia del evento ($y=1$) en la muestra, y la probabilidad de no ocurrencia ($Y=0$); entonces tenemos una población Binomial. Esta distribución se usa como una aproximación de variables discretas; por lo tanto la varianza puede ser estimada a partir de la siguiente fórmula (Steel y Torrie, 1985):

$$\sigma^2 = p(1-p)/n$$

Donde:

σ^2 : Varianza

p : Probabilidad de ocurrencia del evento ($y=1$)

$1 - p$: Probabilidad de no ocurrencia($Y=0$)

n : Número total de observaciones de la muestra

Como puede observarse en las Figuras 7 y 8 la varianza estimada tiende a caer incluso antes de $n = 2,000$ puntos en cada uno de los usos, lo cual indica una relativa homogeneidad de la varianza con el incremento de tamaño de muestra.

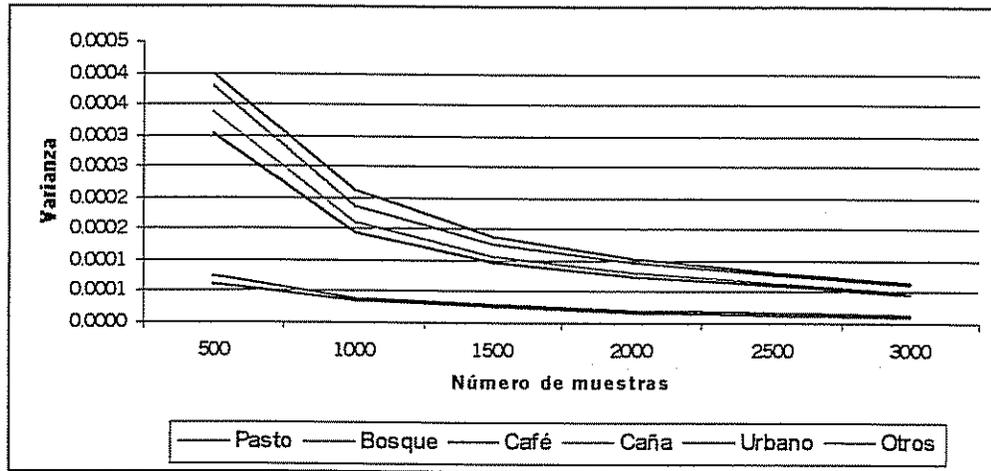


Figura 7. Comportamiento de la varianza de los tipos de uso de la tierra en fotografía aérea

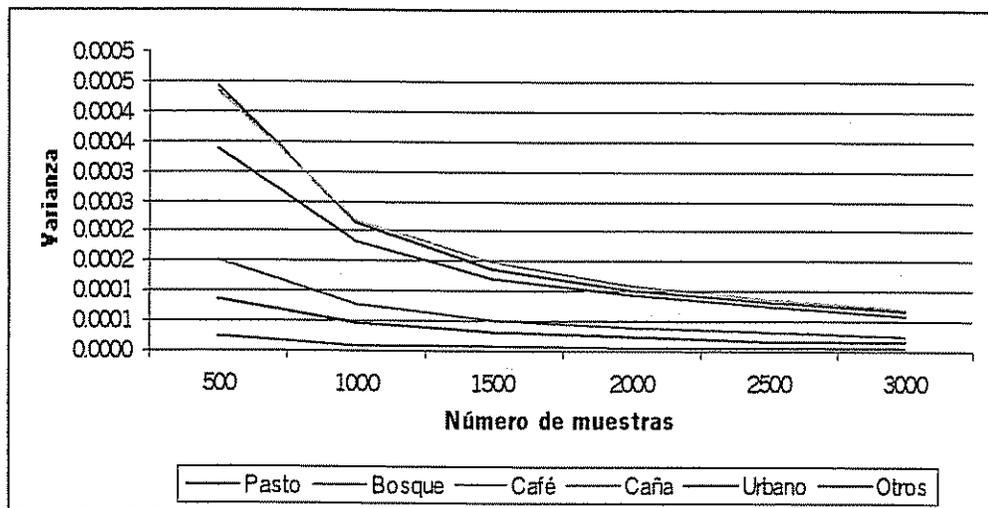


Figura 8. Comportamiento de la varianza de los tipos de uso de la tierra en imagen de satélite

De acuerdo a este comportamiento de la varianza en relación al tamaño muestral, es posible inferir que el tamaño de muestra $n = 2,000$ es adecuadamente representativo

asumiendo que el incremento del tamaño de la muestra no proporcionará mayor eficiencia, sino por el contrario podría acarrear problemas de autocorrelación espacial.

Por consiguiente el otro criterio utilizado para decidir el tamaño de la muestra fue la minimización de la auto correlación espacial, que se presenta en este tipo de estudios espaciales al incrementar "n" (Bockstael,1996; Gómez, 1999; Boots and Kanaroglou, 1992; Nelson and Hellerstein, 1997).

Con base en la información extraída de la Fotografía aérea e Imagen de satélite se unieron los puntos muestrales a cada uno de los temas (variables) con la ayuda del software ArcView a través de los comandos "Análisis " y "Sumarize zones". De esta manera se formó entonces una base de datos numéricos para el procesamiento y elaboración de los modelos de análisis.

3.3.5. Diseño de los modelos de análisis

De acuerdo a los objetivos del estudio cuatro modelos probabilísticos de análisis fueron elaborados. La probabilidad del tipo de uso de la tierra en cada fuente de información: Fotografía Aérea e imagen de Satélite, y en cada una de ellas se estudio por separado el efecto de las variables distancia a la carretera mas próxima como proxies del costo de acceso, siguiendo a Nelson y Hellerstein (1997).

La clasificación de usos de la tierra en cada una de las unidades de muestreo solo define el estado del ecosistema en términos estáticos, es decir define la investigación como espacial. Y esta definida como una variable discreta que representa las distintas alternativas de uso definidas en los Cuadros 4 y 5.

Se debe tomar en cuenta que las categorías de uso se consideran nominales, es decir, no existe ningún ordenamiento o jerarquía específica en los valores que toma Y, debido a que esta clasificación representa opciones de uso mutuamente excluyentes.

La probabilidad del tipo de uso de la tierra se definió como una función de las variables o factores que conforman la matriz de incidencia.

Debido a que el modelo es para logits generalizados, con $k = \{1,2,3,\dots,K\}$ categorías es necesario construir $k-1$ logits entre las alternativas comprendidas en la variable Y para la normalización de los datos. En este caso se tomó el uso "otros" como referencia en todas la expresiones, por lo que se genera el siguiente conjunto de parámetros estimados:

$$L_{(1|6)} = \ln \left[\frac{P_{(Y=1)}}{P_{(Y=6)}} \right] = \hat{\beta}_{01} + \hat{\beta}_{11} x_1 + \dots + \hat{\beta}_{71} x_7 \quad (7)$$

.

.

.

$$L_{(5|6)} = \ln \left[\frac{P_{(Y=5)}}{P_{(Y=6)}} \right] = \hat{\beta}_{01} + \hat{\beta}_{11} x_1 + \dots + \hat{\beta}_{71} x_7 \quad (8)$$

Donde:

$P (Y=1,\dots,Y=6)$: Probabilidad de ocurrencia del conjunto de usos ($Y= 1$ al 6)

$\hat{\beta}$: Vectores de parámetros estimados

X_1, X_2, \dots, X_7 : Conjunto de variables o factores de la matriz de incidencia

Finalmente dado que la variable explicativa Distancia como costo de acceso a la carretera mas próxima, fue generada a partir del Modelo de Elevación Digital, tomando la raíz cuadrada de la pendiente, se estimó entonces la probabilidad de ocurrencia de los diferentes usos desagregándola en dos variables: Distancia euclidiana a la carretera mas próxima y Pendiente. Esto nos permite conocer y comparar el efecto de cada una en la probabilidad de uso.

De esta manera los modelos generados a partir de cada fuente de información, $Y(\text{foto})$ y $Y(\text{imagen})$ estuvieron en función de:

$$\text{Modelo 1: } Y (\text{foto}) = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_6, X_7)$$

$$\text{Modelo 2: } Y (\text{foto}) = f(X_1, X_2, X_3, X_5, X_6)$$

$$\text{Modelo 3: } Y (\text{imagen}) = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_6, X_7)$$

$$\text{Modelo 4: } Y (\text{imagen}) = f(X_1, X_2, X_3, X_5, X_6)$$

Donde:

X₁: Profundidad de suelo (centímetros)

X₂: Tipo de suelo (categorías)

X₃: Zonas de vida (categorías)

X₄: Distancia euclidiana a la carretera mas próxima (metros)

X₅: Distancia como costo de acceso a la carretera mas próxima (metros)

X₆: Tamaño de finca (hectáreas)

X₇: Pendiente (porcentaje)

Los modelos econométricos empleados para analizar la influencia de los factores considerados en el uso de la tierra en la cuenca, fueron estimados mediante el software econométrico LIMDEP (Greene, 1998).

A fin de medir la eficiencia de los modelos generados a partir de la fotografía aérea versus los modelos generados con imágenes de satélite, se comparó la significancia de los factores en cada uno de los usos.

Además, con la ayuda del software econométrico LIMDEP se calculó el poder de predicción medido en porcentaje de cada uno de los modelos generados con las dos fuentes de información. A partir de las probabilidades medias y el cuadro de doble entrada.

Se generó una matriz de confusión con la ayuda del programa IDRISI que permite sobreponer el mapa de usos de la imagen sobre el mapa de usos de la foto y de esta manera medir la correspondencia de los usos de la tierra representados en cada fuente de información.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los efectos de cada uno de los factores sobre los diferentes usos de la tierra estudiados en la cuenca.

En todos los casos las variables explicativas son las mismas, sin embargo, se estudió el efecto de la pendiente incluyéndola en la distancia como costo de acceso a la carretera, y además separándola de la distancia euclidiana a la carretera de forma independiente.

Por tal razón los modelos generados a partir de fotografías aéreas fueron nombrados como "modelo 1" y "modelo 2". Donde el modelo 1, concierne al efecto separado de la pendiente y la distancia euclidiana, y el modelo 2, corresponde al estudio de la distancia como costo de acceso, donde la pendiente esta incluida.

Por otro lado, los modelos generados a partir de la Imagen de Satélite fueron nombrados como "modelo 3" y "modelo 4". De igual manera, el modelo 3, corresponde al efecto separado de la pendiente y la distancia euclidiana, y el modelo 4, al estudio de la distancia como costo de acceso.

4.1 Efectos de los factores sobre los diferentes usos de la tierra

4.1.1 Efecto sobre el uso de la tierra pasto

En el Cuadro 8 se presentan los resultados obtenidos del efecto de cada uno de los factores sobre el uso de la tierra pasto.

Este tipo de uso ocupa la mayor área después del café en la imagen de satélite representando el 26% del área total, sin embargo en la fotografía aérea el uso de la tierra pasto representa el área de mayor proporción con un 33% del total.

Cuadro 8. Efectos de los factores sobre el uso de la tierra pasto en cada uno de los modelos

Factores	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Intercepto · β_0	-2.651 (0.000) **	-1.964 (0.000) **	0.529 (0.068) N.S.	0.288 (0.963) N.S.
Profundidad de suelo · β_1	0.211 (0.085) N.S.	0.193 (0.115) N.S.	0.471 (0.002) **	0.513 (0.001) **
Tipo de suelo · β_2	-0.108 (0.389) N.S.	-0.832 (0.502) N.S.	-0.833 (0.610) N.S.	-0.115 (0.476) N.S.
Zona de vida · β_3	1.400 (0.000) **	1.457 (0.000) **	0.911 (0.000) **	0.906 (0.000) **
Dist. Euclidiana · β_4	0.255 (0.001) **	—	-0.313 (0.000) **	—
Tamaño de finca · β_5	0.135 (0.026) **	0.349 (0.000) **	0.384 (0.638) N.S.	0.367 (0.651) N.S.
Pendiente · β_6	0.177 (0.044) **	—	0.249 (0.983) N.S.	—
Dist. como costo · β_7	—	0.482 (0.018) **	—	-0.698 (0.000) **

() Nivel de significancia; ** Significativo ($P < 0.05$); N.S. No significativo ($P > 0.05$)

Modelo 1: Incluye pendiente y distancia euclidiana (fotografía aérea), Modelo 2: Incluye distancia como costo de acceso (fotografía aérea), Modelo 3: Incluye pendiente y distancia euclidiana (Imagen de satélite), Modelo 4: Incluye distancia como costo de acceso (Imagen de satélite)

La profundidad de suelo resultó ser altamente significativa ($P < 0.05$), solamente cuando fue analizada con datos provenientes de la imagen de satélite. El signo de los coeficientes resultó ser positivo lo que indica que la probabilidad que ocurra el uso de la tierra pasto, aumenta a medida que el suelo es menos profundo.

Es posible inferir que dada la importancia de este tipo de uso en la cuenca, las exigencias de profundidad de suelo disminuyen por la necesidad de ampliar las áreas de pasto para el desarrollo de la ganadería de leche principalmente, que representa una de las principales actividades económicas en la zona.

Se encontró que las zonas de vida presenta efectos altamente significativos sobre este uso de la tierra, tanto en la fotografía aérea como con la imagen de satélite. Este resultado indica, el efecto de la humedad, temperatura y precipitación, factores que determinan una zona de vida y en base a estos resultados influyen significativamente en la presencia de pasto en la zona.

El efecto de las distancias euclidiana y como costo de acceso a la carretera mas próxima, resultaron tener efectos significativos sobre el uso pasto. La pendiente resultó no ser significativa. De manera que a medida que aumentan las distancias, disminuye la probabilidad de ocurrencia de dicho uso. Al realizar recorridos de campo sobre la cuenca es posible corroborar este hecho, dado que la mayoría de los pastizales están ubicados a orillas de las carreteras.

Es importante destacar que este resultado se presentó solamente cuando se analizaron las distancias con la imagen de satélite, pues los resultados obtenidos con la fotografía aérea demuestran efectos significativos pero con dirección contraria. Es decir que a medida aumenta la distancia, aumenta la probabilidad de uso pasto. En este sentido se puede inferir que el resultado se deba al diferente grado de eficiencia en la predicción de los modelos generados con fotos e imágenes.

Por otro lado el efecto de la tamaño de finca sobre la probabilidad de este uso, fue capturada solamente por los modelos generados a partir de fotografías aéreas, donde resultaron tener efecto significativo de manera que a medida que aumenta el tamaño de la finca las probabilidades de encontrar pasto aumentan de igual manera.

4.1.2 Efecto sobre el uso de la tierra bosque

El uso de la tierra bosque en la fotografía aérea ocupa un área de 27% de la cuenca ocupando el segundo lugar en cobertura y en la imagen de satélite el 19%, ocupando así la tercera posición.

En el Cuadro 9 se presentan los resultados obtenidos del efecto de cada uno de los factores sobre este uso de la tierra.

Cuadro 9. Efectos de los factores sobre el uso de la tierra bosque en cada uno de los modelos

Factores	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Intercepto ^ β_0	-5.868 (0.000) **	-4.360 (0.000) **	-1.945 (0.015) **	-1.390 (0.030) **
Profundidad de suelo ^ β_1	0.736 (0.000) **	0.630 (0.000) **	0.597 (0.000) **	0.614 (0.000) **
Tipo de suelo ^ β_2	0.383 (0.002) **	0.447 (0.000) **	0.555 (0.740) N.S.	0.234 (0.888) N.S.
Zona de vida ^ β_3	1.208 (0.000) **	1.266 (0.000) **	0.971 (0.000) **	0.962 (0.000) **
Dist. euclidiana ^ β_4	0.491 (0.000) **	—	-0.818 (0.166) N.S.	—
Tamaño de finca ^ β_5	0.179 (0.004) **	0.164 (0.009) **	0.115 (0.165) N.S.	0.115 (0.163) N.S.
Pendiente ^ β_6	0.384 (0.000) **	—	0.119 (0.340) N.S.	—
Dist. como costo ^ β_7	—	0.119 (0.000) **	—	-0.210 (0.124) N.S.

() Nivel de significancia; ** Significativo ($P < 0.05$); N.S. No significativo ($P > 0.05$)

Modelo 1: Incluye pendiente y distancia euclidiana (fotografía aérea), Modelo 2: Incluye distancia como costo de acceso (fotografía aérea), Modelo 3: Incluye pendiente y distancia euclidiana (Imagen de satélite), Modelo 4: Incluye distancia como costo de acceso (Imagen de satélite)

La profundidad de suelo y las zonas de vida reflejaron efectos altamente significativos sobre la probabilidad de uso de la tierra bosque.

Por otro lado la clasificación de las zonas de vida de Holdrige (2000), con base en humedad, temperatura y precipitación, proporciona como resultado los diferentes tipos de bosques que pueden ocurrir en un área.

En cambio el factor tipo de suelo, reflejó ser estadísticamente significativo solamente en los modelos generados con fotografías aéreas.

De igual manera las distancias euclidianas y distancia como costo de acceso, resultaron ser significativas solamente en los modelos provenientes de la fotografía aérea. Este resultado puede deberse a que cuando los usos fueron agregados para fines de análisis, la fotografía incluye a las plantaciones forestales dentro del uso general, bosque. En cambio, en la imagen de satélite, las plantaciones no fueron identificadas como tales.

Esto conduce a pensar que para el establecimiento de plantaciones forestales incluidas en la fotografías, es de gran importancia la accesibilidad a los caminos para fines de aprovechamiento.

Sin embargo el signo de los coeficientes indican que a mayor distancia de la carretera, la probabilidad de ocurrencia del uso de la tierra bosque aumenta. Este resultado puede estar relacionado al hecho que en la cuenca los bosques se ubican en los cañones de los ríos Coliblanco, Playas, Turrialba, Jesús María o riachuelos de menor caudal o en áreas muy escarpadas (Calvo, 1993), coincidiendo con los resultados de Kaimowitz *et. al.*, 2000.

Al mismo tiempo, si se relaciona este resultado con el obtenido al analizar el uso de la tierra pasto, se encontró que a menor distancia de la carretera la probabilidad que el uso sea bosque disminuye y la probabilidad de encontrar áreas de pasto aumenta, lo que parece tener conexión.

En este estudio el tamaño de finca resultó tener efectos altamente significativos en el uso de la tierra bosque, de manera que a mayor tamaño de fincas la probabilidad de ocurrencia de este uso se incrementa.

4.1.3 Efecto sobre el uso de la tierra café

Con base en la imagen de satélite este uso cubre el mayor porcentaje, representado el 38% del área total, en cambio en la fotografía aérea representa el 20% del área.

Los factores analizados en este estudio y que influyen en el uso de la tierra café se encuentran representados en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Efectos de los factores sobre el uso de la tierra café en cada uno de los modelos

Factores	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Intercepto - β_0	-1.320 (0.021) **	-1.196 (0.020) **	0.182 (0.817) N.S.	0.433 (0.493) N.S.
Profundidad de suelo - β_1	0.246 (0.043) **	0.278 (0.036) **	0.486 (0.001) **	0.532 (0.000) **
Tipo de suelo - β_2	0.273 (0.025) **	0.275 (0.020) **	0.147 (0.354) N.S.	0.116 (0.459) N.S.
Zona de vida - β_3	-0.202 (0.303) N.S.	-0.139 (0.474) N.S.	-0.547 (0.783) N.S.	-0.428 (0.829) N.S.
Dist. euclidiana - β_4	-0.304 (0.006) **	—	-0.578 (0.000) **	—
Tamaño de finca - β_5	0.264 (0.000) **	0.258 (0.000) **	0.233 (0.004) **	0.234 (0.004) **
Pendiente - β_6	0.468 (0.621) N.S.	—	0.928 (0.453) N.S.	—
Dist. como costo - β_7	—	-0.119 (0.000) **	—	-0.125 (0.000) **

() Nivel de significancia; ** Significativo ($P < 0.05$); N.S. No significativo ($P > 0.05$)

Modelo 1: Incluye pendiente y distancia euclidiana (fotografía aérea), Modelo 2: Incluye distancia como costo de acceso (fotografía aérea), Modelo 3: Incluye pendiente y distancia euclidiana (Imagen de satélite), Modelo 4: Incluye distancia como costo de acceso (Imagen de satélite)

Como puede observarse en el Cuadro 10 la profundidad de suelo es altamente significativa en la probabilidad de ocurrencia del uso de la tierra café aún obteniendo la información de fotografías o imágenes de satélite. Sin embargo el tipo de suelo resulto ser significativo solamente cuando el análisis fue hecho a partir de la fotografía aérea.

La distancia euclidiana y la distancia como costo a la carretera mas próxima resultaron ser altamente significativas en la probabilidad de ocurrencia del cultivo del café, a pesar que la pendiente no presentó efecto significativo cuando no fue implícita en la distancia. El signo negativo de los coeficientes permite deducir que a menor distancia a la carretera la probabilidad de ocurrencia del cultivo de café aumenta.

Este resultado puede ligarse a la necesidad de fácil acceso para completar la cadena productiva y de comercialización tan demandante que presenta este cultivo para su rentabilidad.

Otro factor que reflejo efecto significativo y con una relación directa fue la tamaño de finca, analizada con ambas fuentes de información. Se encontró que a mayor sea el tamaño de la finca, la probabilidad que el suelo sea usado para el cultivo del café va en aumento.

Este resultado coincide con el obtenido por Calvo (1993), donde se encontró que en la parte media de la cuenca se encuentran áreas muy extensas de este cultivo como es el caso de las fincas Aquiares y Santa Rosa y en el pueblo de La Esmeralda.

4.1.4 Efecto sobre el uso de la tierra caña

Estudios realizados en la cuenca por Caivo (1993) y García (1990), indican que el cultivo de la caña de azúcar es una de las actividades productivas más importantes para los finqueros de la zona en el uso de la tierra agrícola. En este estudio éste uso de la tierra representa el 7% del área total en la fotografía aérea y el 10% en la imagen de satélite.

Tal como se muestra en el Cuadro 11 el factor profundidad de suelo es altamente significativo analizado con base en la imagen de satélite.

El tipo de suelo y las zonas de vida mostraron diferencias significativas solamente analizadas con la fotografía aérea. Este resultado puede deberse a la diferencia en precisión que presentan los modelos generados con diferentes fuentes de información.

Por otro lado es importante destacar que el efecto de las distancias no es significativo para el análisis hecho a partir de fotografías aéreas, sin embargo analizadas a partir de datos provenientes de la imagen de satélite, fueron altamente significativas, indicando a la vez que a menor distancia a la carretera mas próxima, la probabilidad que ocurra el cultivo de la caña se incrementa, coincidiendo este resultado con lo observado a lo largo de la cuenca, en donde la mayoría de las áreas de caña se encuentran a orillas de las carreteras.

Cuadro 11. Efectos de los factores sobre el uso de la tierra caña en cada uno de los modelos

Factores	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Intercepto ^ β_0	-2.737 (0.000) **	-1.705 (0.000) **	0.152 (0.868) N.S.	-0.187 (0.804) N.S.
Profundidad de suelo ^ β_1	-0.240 (0.200) N.S.	-0.198 (0.296) N.S.	0.698 (0.000) **	0.750 (0.000) **
Tipo de suelo ^ β_2	0.680 (0.000) **	0.725 (0.000) **	-0.429 (0.816) N.S.	-0.723 (0.694) N.S.
Zona de vida ^ β_3	-0.858 (0.000) **	-0.581 (0.001) **	-0.341 (0.168) N.S.	-0.331 (0.183) N.S.
Dist. euclidiana ^ β_4	-0.246 (0.155) N.S.	—	-0.339 (0.000) **	—
Tamaño de finca ^ β_5	0.641 (0.465) N.S.	0.656 (0.455) N.S.	0.161 (0.089) N.S.	0.158 (0.094) N.S.
Pendiente ^ β_6	0.365 (0.047) **	—	-0.679 (0.626) N.S.	—
Dist. como costo ^ β_7	—	-0.166 (0.606) N.S.	—	-0.789 (0.000) **

() Nivel de significancia; ** Significativo ($P < 0.05$); N.S. No significativo ($P > 0.05$)

Modelo 1: Incluye pendiente y distancia euclidiana (fotografía aérea), Modelo 2: Incluye distancia como costo de acceso (fotografía aérea), Modelo 3: Incluye pendiente y distancia euclidiana (imagen de satélite), Modelo 4: Incluye distancia como costo de acceso (imagen de satélite)

4.1.5 Efecto sobre el uso de la tierra urbano

El uso urbano se refiere a tierras destinadas a viviendas y diversa infraestructura urbana, identificándose así la ciudad de Turrialba localizada en la parte baja de la misma. El uso urbano en la cuenca representa el 5% del área en la fotografía aérea y 3% en la imagen de satélite.

En el Cuadro 12 se muestran los factores que intervienen en la probabilidad de ocurrencia del uso urbano.

Cuadro 12. Efectos de los factores sobre el uso de la tierra urbano en cada uno de los modelos

Factores	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Intercepto - β_0	-3.223 (0.000) **	-2.818 (0.000) **	-3.08 (0.000) **	-1.874 (0.000) **
Profundidad de suelo - β_1	-0.445 (0.036) **	-0.416 (0.053) N.S.	-0.271 (0.341) N.S.	-0.410 (0.888) N.S.
Tipo de suelo - β_2	0.699 (0.000) **	0.638 (0.000) **	0.334 (0.189) N.S.	0.243 (0.327) N.S.
Zona de vida - β_3	-0.426 (0.058) **	-0.419 (0.039) **	-0.364 (0.186) N.S.	-0.308 (0.204) N.S.
Dist. euclidiana - β_4	0.550 (0.000) **	—	0.272 (0.007) **	—
Tamaño de finca - β_5	0.245 (0.027) **	0.205 (0.058) N.S.	0.183 (0.270) N.S.	0.116 (0.463) N.S.
Pendiente - β_6	-0.709 (0.670) N.S.	—	0.124 (0.622) N.S.	—
Dist. como costo - β_7	—	0.611 (0.074) N.S.	—	0.179 (0.946) N.S.

() Nivel de significancia; ** Significativo ($P < 0.05$); N.S. No significativo ($P > 0.05$)

Modelo 1: Incluye pendiente y distancia euclidiana (fotografía aérea), Modelo 2: Incluye distancia como costo de acceso (fotografía aérea), Modelo 3: Incluye pendiente y distancia euclidiana (Imagen de satélite), Modelo 4: Incluye distancia como costo de acceso (Imagen de satélite)

Los resultados obtenidos a partir de la fotografía aérea demuestran que la profundidad de suelo es significativa cuando es evaluada la distancia independiente de la pendiente. Además el tipo de suelo y las zonas de vida resultan ser significativas cuando son estudiadas a partir de la fotografía aérea. No ocurriendo igual con la imagen de satélite.

Contrario a los resultados presentados algunos estudios, como el de Baritto (2000), han encontrado que la dinámica del uso de la tierra urbano no parece estar regulada por restricciones físicas del medio, ni factores normativos, o al menos la relación

existente es muy débil, de manera que cualquier área puede ser ocupada como urbana independiente de las características de la zona.

En la cuenca del río Turrialba es probable entonces que las restricciones físicas del medio no impidieran la probabilidad de ocurrencia del área urbana, aun mas si se toma en cuenta que la ciudad es atravesada por el río Colorado, asimismo el estudio realizado por García (1990) hace indicar que el crecimiento del uso urbano es hacia las áreas vecinas al río.

Por otro lado, la distancia euclidiana, sin tomar en cuenta la pendiente es altamente significativa en la probabilidad de ocurrencia del uso urbano. Este efecto era de esperarse debido a que la infraestructura vial como principal vía de comunicación, parte del área urbana al resto de la cuenca.

4.2 Eficiencia en cuanto a precisión de los modelos generados a partir de fotografías aéreas e imágenes de satélite

Con la ayuda del software econométrico LIMDEP se calculó la eficiencia en cuanto a predicción de cada uno de los modelos generados con las dos fuentes de información.

Resultó que los modelos generados a partir de datos obtenidos de la imagen de satélite presentaron un 61% de eficiencia en el poder de predicción. En cambio los modelos generados a partir de la fotografía aérea, presentaron un 67% de eficiencia. El uso mejor predicho fue otros con un 84% en las fotografías aéreas y 87% en la imagen de satélite. (Cuadro 13).

Cuadro 13. Porcentajes de predicción de los modelos en cada uso de la tierra

Uso	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Otros	84	83	87	87
Pasto	66	67	52	53
Bosque	51	50	33	29
Café	68	70	76	74
Caña	0	0	0	0
Urbano	0	0	0	0
Total	67	67	61	60

Este resultado nos conduce a aceptar la hipótesis planteada en esta investigación, que los modelos generados con fotografías aéreas son más precisos que los generados con imágenes de satélite. Sin embargo, es importante hacer varias consideraciones alrededor de este resultado.

En primer lugar se debe tomar en cuenta que las clasificaciones de uso de la tierra en la cuenca, no eran homogéneas. En la imagen de satélite se reflejaron 21 categorías de uso y en la fotografía aérea solamente 17 categorías (ver Cuadros 4 y 5).

En segundo lugar, debido al diferente número de categorías de uso y para poder hacer las comparaciones de los diferentes modelos en cuanto a los factores que influyen en cada uso, fue necesario agrupar los usos en seis categoría comunes y homogéneas en la foto y la imagen. Esta agrupación se realizó a criterio del autor. Por lo tanto es probable que esta agrupación influyera en el resultado obtenido.

Finalmente, en la imagen de satélite el 28% del total del área de la cuenca no fue tomada en cuenta en el muestreo realizado debido a que representaban nubes y sombras (Figura 5).

Coincidiendo con los resultados Richters (1995) reconoce la ventaja del uso de fotografías aéreas, afirmando que permite realizar muestreos con una buena garantía

de ser objetivos, además se puede conocer la ubicación de los objetos específicos y diseñar un programa eficiente de estudio de campo.

Sin embargo el mismo autor sugiere que el éxito de trabajos realizados con fotografías aéreas depende del marco de referencia del intérprete.

Por otro lado Saborío (1988), muestra que la información generada por las bandas electromagnéticas en la toma de imágenes de satélite, permite hacer una separación de firmas espectrales de los parámetros involucrados en el uso de la tierra. Las diferentes firmas, permiten entonces clasificar cada categoría de uso. Esto puede explicar entonces que en este estudio la imagen de satélite de la cuenca del río Turrialba, presentara mayor nivel de detalle en cuanto al número de categorías descritas.

A partir de la matriz de confusión generada en el programa IDRISI (Cuadro 14), se puede comparar cuanto de cada uso de la tierra en la fotografía aérea coincide con el mismo uso a partir de la imagen de satélite.

Cuadro 14. Matriz de confusión entre los usos de tierra representados en la fotografía aérea y la imagen de satélite (%)

Foto/Imagen	Nubes	Pasto	Bosque	Café	Caña	Urbano	Otros
Nubes	98	48	42	17	6	28	27
Pasto	2	26	12	12	16	8	17
Bosque	0	11	20	8	2	3	11
Café	0	10	17	57	35	21	30
Caña	0	4	6	4	39	8	8
Urbano	0	0	0	0	0	22	2
Otros	0	1	3	2	2	10	5
Total	100	100	100	100	100	100	100

En este análisis resultó que menos del 57% del área de cada uso de tierra fue consistente en ambas fuentes de información, el uso de tierra café fue el que presentó el mayor porcentaje con un 57%, cabe destacar que en este caso lo que en la foto fue

diferenciado y agrupado como café en la imagen esta distribuido en pasto y bosque principalmente, en un 12 y 8% respectivamente. Es importante resaltar que en la fotografía se agrupo el café con sombra dentro de esta categoría, lo que pudo haber sido interpretado y agrupado en la imagen como bosque y este puede ser una posible causa de esta diferencia en porcentajes.

El 39% del uso de la tierra caña fue capturado de igual manera en la fotografía aérea como en la imagen de satélite. El uso con el que fue mas confundido fue con café y pasto.

De igual manera solamente el 26% del uso de suelo pasto resulto coincidir al comparar la fotografía aérea y la imagen de satélite, distribuyéndose los usos que en la foto representaban pasto; en bosque y café en la imagen de satélite.

5. CONCLUSIONES

- ♦ El uso de modelos multinomiales en el análisis e interpretación de la distribución espacial del tipo de uso de la tierra, permite hacer inferencias altamente significativas de los factores físico naturales y socioeconómicos que influyen en dicha distribución.
- ♦ El uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba estudiado desde el punto de vista espacial, se puede definir como el resultado de la combinación de los factores físico naturales y socioeconómicos examinados como: profundidad de suelo, tipo de suelo, zona de vida, distancia euclidiana a la carretera mas próxima, tamaño de finca, pendiente y distancia como costo de acceso a la carretera mas próxima; que mostraron tener efecto significativo en mas de uno de los usos de la tierra agrupados en el estudio, tanto con datos originados de la fotografía aérea como de la imagen de satélite.
- ♦ La distancia a la carretera más próxima analizada como un costo donde se incluye la pendiente y de manera desagregada como distancia euclidiana, no marcaron diferencias en cuanto su efecto sobre los diferentes usos de la tierra analizados en la cuenca. La distancia euclidiana a la carretera mas próxima presento efecto sobre todos los usos aun cuando la pendiente no fue significativa, excepto en el uso de la tierra bosque donde la pendiente incluida en la distancia como costo y por separado presento efecto significativo. Al mismo tiempo, la distancia como costo donde esta incluida la pendiente, resultó no ser significativa solamente en el uso de la tierra urbano.
- ♦ Se acepta la hipótesis que el uso de la fotografía aérea demuestra ser mas eficiente en cuanto a predicción en comparación al uso de la imagen de satélite. Sin embargo la diferencia en porcentaje es pequeña, además se deben tener en consideración la manipulación de la información en cuanto a agrupación para fines de análisis, por lo que este resultado no puede generalizarse.

- ♦ La matriz de confusión realizada para comparar los usos representados en la fotografía aérea y la imagen de satélite mostró porcentajes muy bajos en cuanto a consistencia se refiere, lo que nos permite concluir que no se puede hacer una clara comparación entre los resultados de los factores que afectan cada uso de la tierra en cada fuente de información.

6. RECOMENDACIONES

- ♦ El criterio de agrupación de usos para fines de análisis debe ser mas rigurosa a fin de que los resultados permitan hacer inferencias con mayor exactitud, en cuanto a comparaciones de fuentes de información.
- ♦ Se podrían diseñar mayor número de modelos multinomiales con diferentes juegos de agrupaciones de usos, ya sean mas desagregados o mas compactos, en base a su importancia económica, o al área que ocupan en la cuenca. De esta manera se podrían hacer mas comparaciones del nivel de eficiencia en predicción de las fotografías aéreas e imagen de satélite.
- ♦ Para identificar de manera mas precisa el efecto de la pendiente en el costo de acceso, medido como distancia a la carretera mas próxima; se podría seguir la misma metodología de trabajo en una cuenca de mayor área y con pendientes igualmente marcadas. Inclusive si la cuenca presenta varios centros urbanos, podría ser incluida esta distancia como otra variable.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agresti, A. 1990. Categorical data analysis. Jhon Wiley & sons, Inc. Neww York. 558 p.
- Atlas Agropecuario de Costa Rica. 1994. Universidad Estatal a Distancia. Costa Rica. Pp 80-90.
- Baritto, F. 2000. Dinámica de factores asociados al Uso de la Tierra e implicaciones sobre el colapso ambiental de 1999 en la Costa Norte de Venezuela. Tesis de Mag. Sc. Turrialba, C.R. CATIE. 104 p.
- Briassoulis, H. 2000. Analysis of Land Use Change: Theoretical and modeling Approaches. (En línea). DERN. Departament of Geography Univesity of the Aegean Lesvos, Greece. (Consultado enero de 2001). Disponible en : <http://www.rri.wvu.edu/Webbook/Briassouliis/contents.htm>
- Bockstael, N. 1996. Modeling Economics and Ecology: The importance of a spatial perspective. American journal of agricultural Economics. 78:1168-1180.
- Bocco, G. 1998. Instrumentos para la medición del uso de cobertura. Tercer Seminario del Cambio de Uso de la Tierra. (En línea). DERN. Departamento de Ecología y Recursos Naturales de México. (Consultado enero de 2001). Disponible en : <http://www.oikos.unam.mx/cus/index.html>
- Boots, B.N., and P.S Kanaroglou. 1988. Incorporating the effects of spatial structure in discrete choice models of migration. 28: 495-507
- Calvo, C. 1993. Dinámica, uso apropiado y sostenible de la tierra, en la cuenca del río Turrialba. Tesis de Mag. Sc. Turrialba, C.R. CATIE. 186 p.
- CEFIRE. 2001. La utilización de los mapas y de la fotografías aéreas . (En línea). (Consultado enero de 2001). Disponible en : <http://www.cult.gva.es/CEFIRE/12400640/mapas.htm>

- Cubero, D. 2001. Clave de bolsillo para determinar la capacidad de uso de las tierras. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Costa Rica. 19p.
- Debertin, D. 1986. Agricultural Production Economics. Macmillan Publishing Company. USA. 366 p.
- Deininger, K and Minten, B.. 1997. Determinants of forest cover and the Economics of protection:an application to México. World Bank, Washington D.C.
- Faustino, J. 1988. Conservación y manejo en la planificación del uso de la tierra. In. Memoria de la Conferencia Usos Sostenidos de Tierras en Laderas (1987, Quito, Ecuador). p. 69-75.
- . 1987. Variables de terminantes en la identificación de Áreas Críticas en tierras de laderas. In. Memoria de la conferencia Usos sostenidos de tierras en laderas. Quito, Ecuador. 41p.
- . 1997. Agua: Recurso estratégico en el futuro de América Central. Revista Forestal Centroamericana, no. 18: 6-12.
- Ferreiro, O.E. 1984. Metodologías para la planificación del manejo de cuencas hidrográficas y su aplicación a la cuenca del río Tuis, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R. CATIE. 489 p.
- García, J. 1990. El análisis de cuencas hidrográficas aplicado al problema de inundaciones: el caso de la ciudad de Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R. CATIE. 191 p.
- Gertner, G. 2000. Uncertainty assessment of natural resource systems with error budgets. Conferencia impartida en CATIE, Turrialba C.R. Mayo del 2000.

- Gregersen, H.M., Brooks, K.N.; Dixon, J.A.; Hamilton, L.S. 1988. Pautas para la evaluación económica de proyectos de ordenación de cuencas. Roma, Italia, FAO. 148 p. (Serie FAO Conservación N°16).
- Geary, R. 1954. The contiguity ratio and statistical mapping. *The incorporated statistician* 5, p 115-145.
- Greene, W. H. 1998. LIMDEP. Versión 7.0. User's Manual. Revised Edition. Econometric software, Inc. New York.
- Gómez, M. 1999. Econometría especial: Algunos aspectos generales. Universidad Complutense. Página web: <http://www.ucm.es/BUCEM/cee/doc/9901/9901.htm>
- Chomitz, Kenneth M. and David A. Gray. 1995. Roads, Land use, and deforestation, a spatial model applied to Belize. *World Bank Economic Review*, Vol. 10 (3): 487-512.
- Holdridge, L. 2000. Ecología Basada en zonas de vida. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, C.R. 216 p. (Colección Libros y Materiales Educativos/IICA, No. 83).
- Instituto Meteorológico Nacional. 1988. Centro de las series de precipitaciones medidas en costa Rica. San José. C.R.361 p.
- Instituto Costarricense de Electricidad. ICE. 1999. Plan de manejo integral de la cuenca del río Reventazón. Informe diagnóstico. Costa Rica. Pp 56-63.
- Kaimowitz, D.; Méndez, P.; Puntodewo, A.; Vanclay, J. 2000. Spatial Regression Analysis of Deforestation in Santa Cruz, Bolivia. (En línea). CIFOR. (Consultado en enero de 2001). Disponible en <http://www.cgiar.org/cifor>
- Malleux, O. 1971. Estratificación forestal con uso de fotografías aéreas. Lima, Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. 82 p.

- Masera, O. 1998. Causas socioeconómicas de los procesos del cambio de uso del suelo. Tercer Seminario del Cambio de Uso del Tierra. (En línea). DERN. Departamento de Ecología y Recursos Naturales de México. (Consultado enero de 2001). Disponible en : <http://www.oikos.unam.mx/cus/index.html>
- Morán, P. 1948. The interpretation of statistical maps. *Journal of Regional Science* 35 no. 4,p 641-658.
- Mamingi, N, Chomitz, K.M,Gray,D.A, and Lambin, E.F. 1996. Spatial patterns of deforestation in Cameroon and Zaire. Working paper 8. Reserch projet on social and enviromental consequences of growth-oriented policies. Policy Research Departament, World Bank, Washongton D.C.
- Mertens, Benoit and Eric F. Lambin. 1997. Spatial modeling of deforestation in Southern Cameroon. *Applied Geography*. Vol. 17, No. 2:1-19.
- Nicholson, W. 1997. Teoría microeconómica. Principios básicos y aplicaciones. Sexta edición. McGraw – Hill. España. 599p
- Neeff, T. 2000. El uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba: Relato Final. Facultad Técnica Forestal y de Manejo ambiental (FTFMA)/ Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, C.R. 37 p.
- Nelson, G and Hellerstein. 1997. Do Roads cause deforestation? Using satellite images in econometric analysis of land use. *American Journal of Agricultural Economics*. 79:80-88
- Nelson, G; Harris, V; Stone S. 1999. Spatial econometric analysis and project evaluation: Modeling land use change in the Darién. Washington, D.C. 19 p.
- Liu, Dawning S,Louis R.Iverson and Sandra Brown. 1993. Rates and patterns of deforestation in the Philippines: Applications of geographic information system analysis: *Forest Ecology and Management* 57:1-16.

- Ludeke, Aaron Kim, Robert C. Maggio and Leslie M. Reid. 1990. An analysis of anthropogenic deforestation using logistic regressions and GIS. *Journal of Environmental Management* 31, 1990:247-59.
- Pérez, A. 1990. Manejo institucionalizado hacia la sostenibilidad del uso de la tierra en cuencas hidrográficas pequeñas: La cuenca del río Tuís, Turrialba, Costa Rica. Tesis de Mag. Sc. Turrialba, C.R. CATIE. 173p.
- Pedroni, L. 2000. Clasificación. Tesis de Doctorado. Turrialba, Costa Rica. CATIE.
- Ramakrishna, B. 1997. Estrategias de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: conceptos y experiencias. San José, C.R. GTZ/IICA. 319 p. (Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible).
- Remeineras, G. 1975. Tratado de hidrología aplicada. Editores técnicos asociados S.A. Segunda Edición, Barcelona.
- Richters, E. 1988. El desarrollo y Evaluación de alternativas de uso de la tierra. In. Curso Corto de Planificación del Uso de la Tierra en el Manejo de Cuencas. Turrialba, C.R. CATIE. P. 1-21.
- . 1995. Manejo del uso de la tierra en América Central: Hacia el aprovechamiento sostenible del recurso tierra. Editorial IICA. San José, C.R. 445 p. (Colección Investigación y Desarrollo /IICA, no. 28).
- Rosero-Bixby, Luis and Alberto Palloni. 1996. Population and deforestation in Costa Rica, Paper presented at the annual meeting of the population association of America, New Orleans.
- Saéñz, F. 1995. Identificación de áreas críticas para el manejo de un sector de la cuenca del río Pacuare, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R. CATIE. 145p.

- Saborio, J. 1988. Datos sobre sensores remotos en los estudios de uso y evaluación de la tierra. Turrialba, C.R. CATIE. 22 p.
- 1989. Procesamiento de imágenes con el sistema ERDAS. Turrialba, C.R. CATIE. 41 P.
- Sanderson, S; Pritchard, L.Jr. 1993. The human dynamic of land use and cover change in comparative perspective. University of Florida. Página web: <http://www.cdf.ufl.edu/cpo6933/readings/sndrprit.html>.
- Sader, S.A. and A.T. Joyce. 1988. Deforestation Rates and Trends in Costa Rica. *Biotropica* 20:11-9.
- Stoorvogel, J.J. 1995. Geographical information systems as a tool to explore land characteristics and land use with reference to Costa Rica. Ph. D. thesis. University of Wageningen.
- Stokes, M. E; Davis, C.S; Koch, G.G. 1995. Categorical data analysis using the SAS System. SAS Institute, Inc. NC, USA.
- Steel, R. G. D; Torrie, J. H. 1985. Bioestadística: Principios y Procedimientos. Segunda Edición. McGRAW-HILL. México, D.F. 622 p.
- Tobler, 1979. Cellular Geography. In. S. Gale and G. Olson (Eds.) *Philosophy in Geography*. Pp 389-386. Dordrecht: D. Reidel.
- Toledo, V. 1998. Cambio del uso del suelo, una aproximación desde la ecología humana. Tercer Seminario del Cambio de Uso del Tierra. (En línea). DERN. Departamento de Ecología y Recursos Naturales de México. (Consultado enero de 2001). Disponible en : <http://www.oikos.unam.mx/cus/index.html>
- Tosi, J. A. 1985. Sistema para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica. San José, C. R. Centro Científico Tropical. 106 p.

Turner, D.; Wear, D.; Flamm, R. 1996. Land Ownership and Land-cover change in the Southern Appalachian Highlands and the Olympic Peninsula. *Ecological Applications*. 6(4). 1996. 1150-1172.

UNESCO (United Nations Educational Scientific Cultural Organization). 1973. *International Classification and Mapping of Vegetation*. Paris, Francia.

USGS (United States Geological Survey). 1997. The USGS – NPS Vegetation Mapping Program. In: *Página Web*; <http://biology.usgs.gov/npsveg/classication;consultada> en diciembre del 2000.

Veldkamp, A.; Fresco, L. 1997 a . Exploring land use scenarios, and alternative approach based on actual land use. *Agricultural Systems*. 55(1): 1-17.

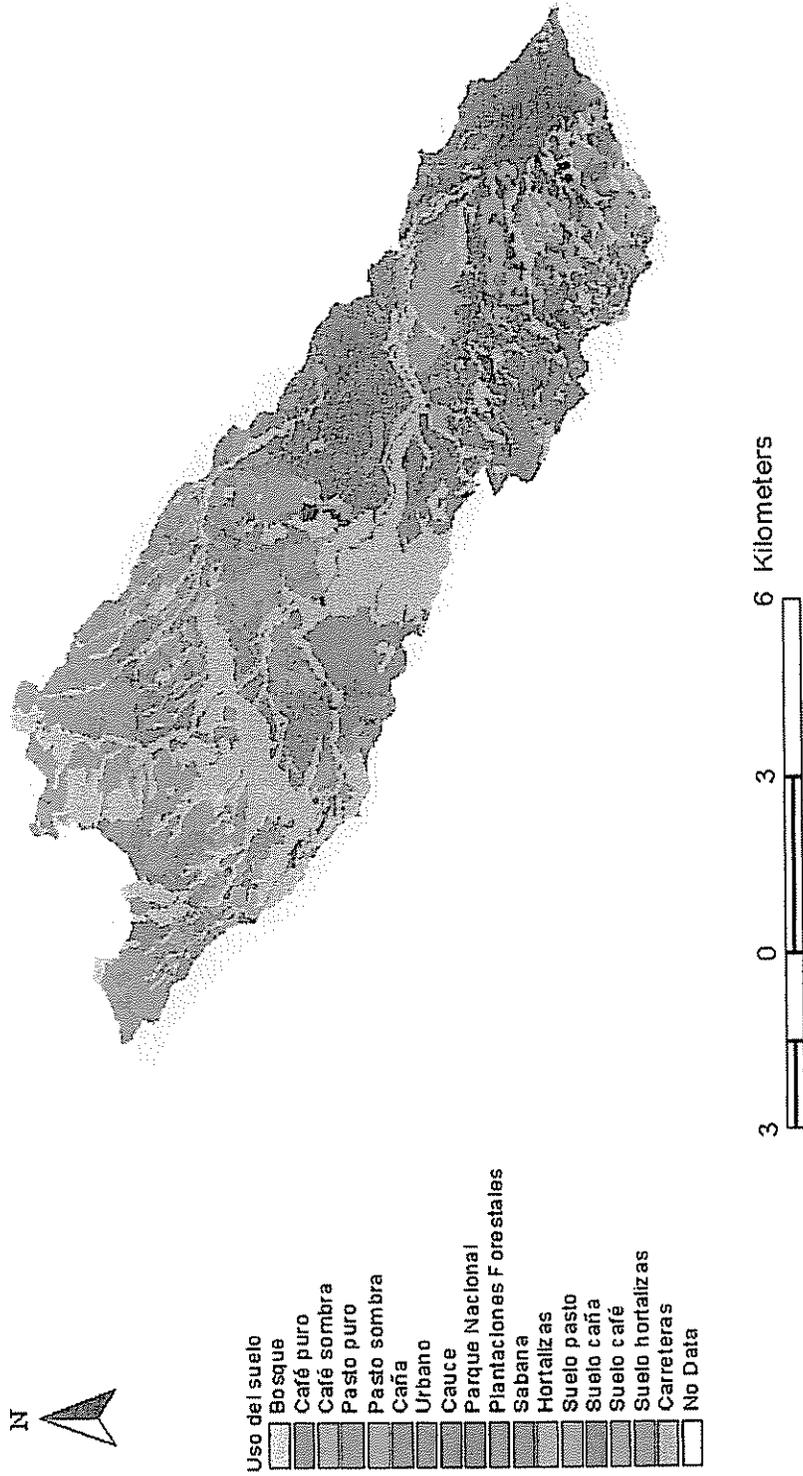
----- . Reconstructing Land Use drivers and their spatial scale dependence for Costa Rica. *Agricultural Systems*. 55(1):19-43.

Veiman, Q. 1988. *Sensoreo Remoto: Aspectos básicos de fotografía aérea, fotogrametría, fotointerpretación*. In. *Curso corto procesamiento de imágenes y sistemas de información geográfica*. Turrialba, C.R. CATIE. P. 1-54.

Wear, D. N.; Turner, M. G.; Flamm, R.O. 1996. Ecosystem management with multiple owners: Indscape dynamics in Southern Appalacchian Watershed. *Ecological Applications*. 6(4): 1173- 1188.

8. ANEXOS

Anexo 1. Usos de la tierra en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica. Con base en fotografía aérea.



CATIE
Tesis: Análisis espacial del tipo de uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica.
Autor: Edith Méndez Villanueva

Anexo 2. Usos de la tierra en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica. Con base en imagen de satélite.



CATIE
 Tesis: Análisis espacial del tipo de uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica.
 Autor: Edith Méndez Villanueva

Anexo 3. Mapa de categorías de profundidad de suelo en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica



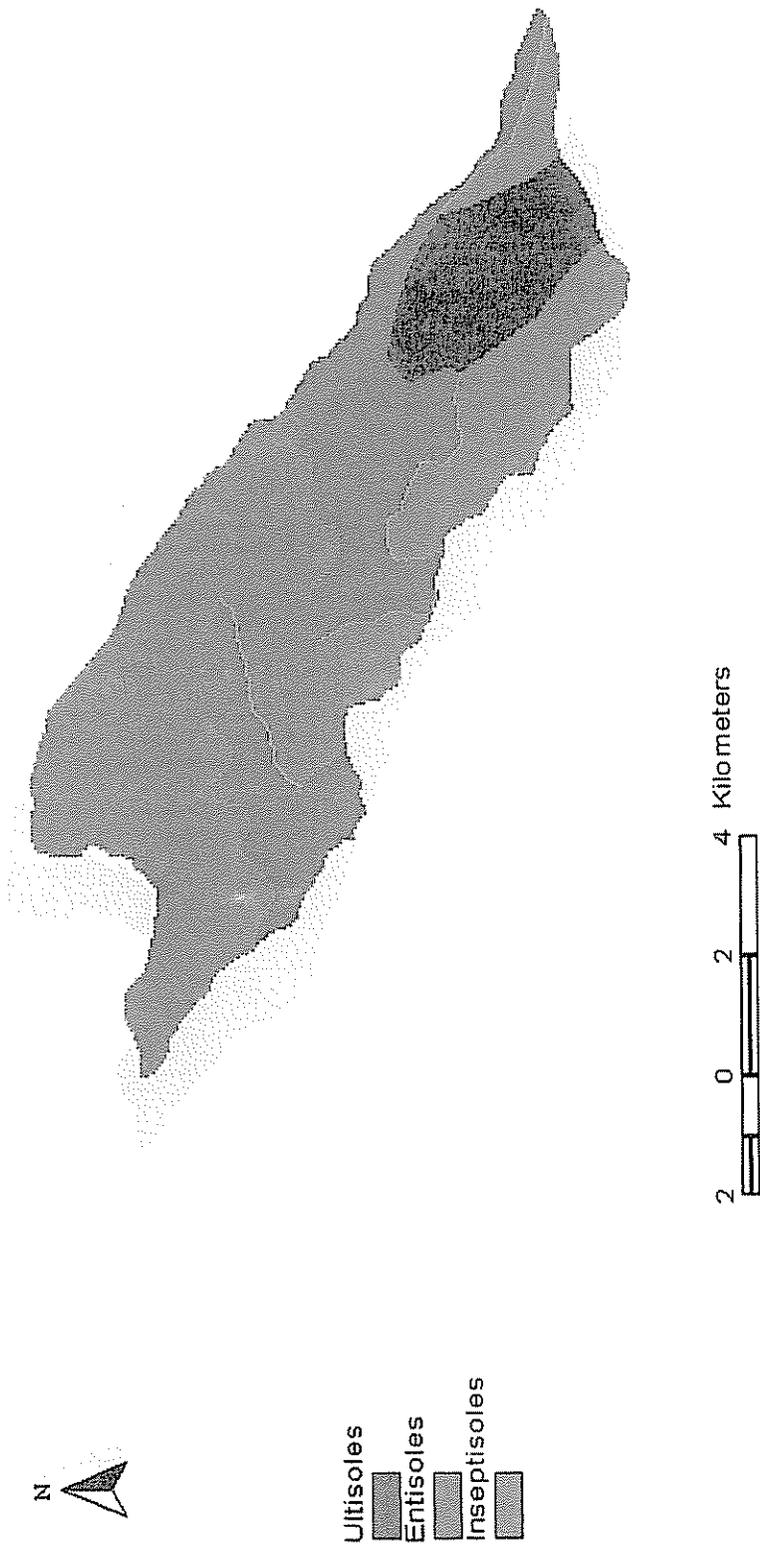
Profundidad

	Profundos
	Medio profundos
	Delgados



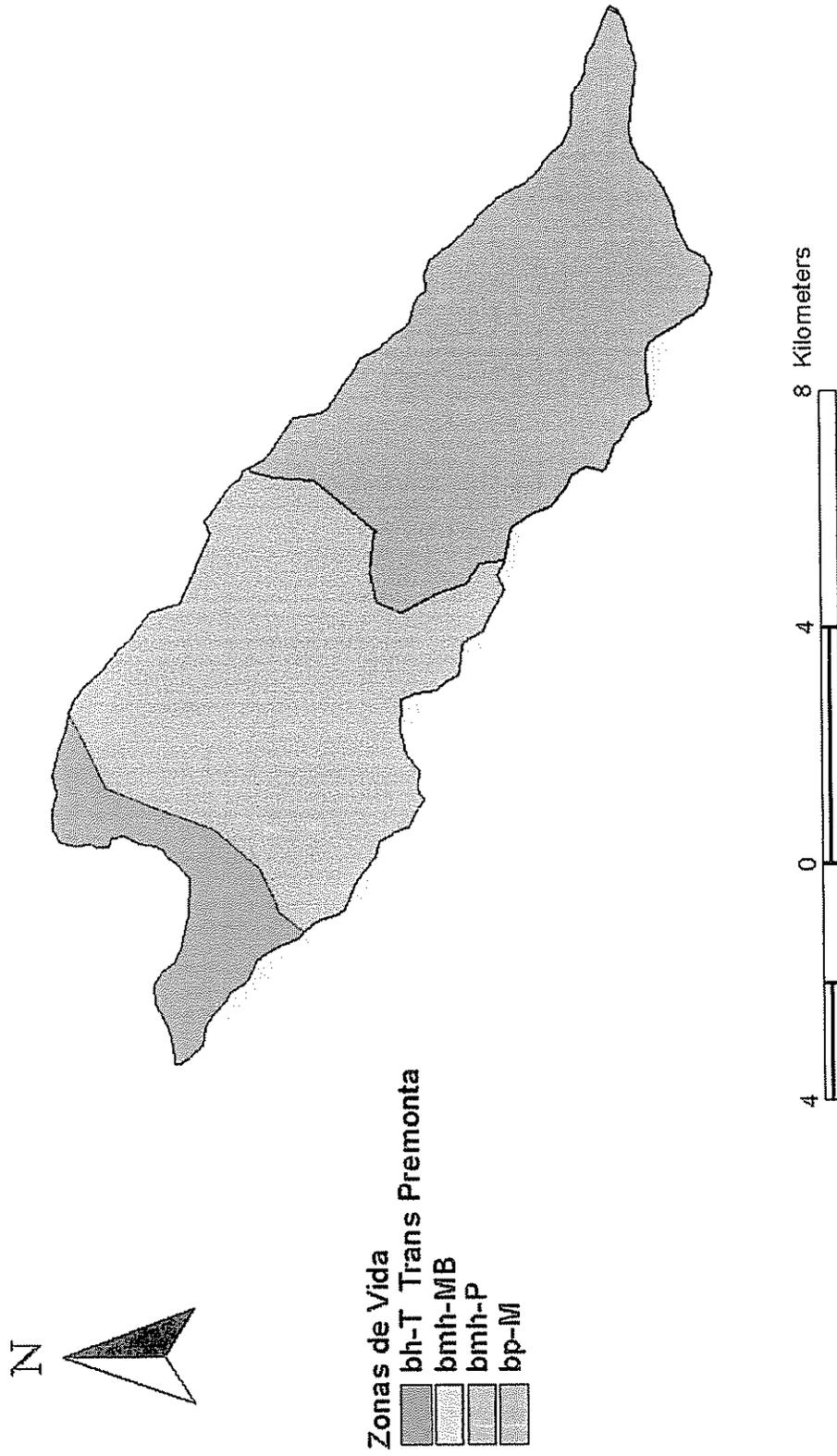
CATIE
Tesis: Análisis espacial del tipo de uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica.
Autor: Edith Méndez Villanueva

Anexo 4. Mapa de categorías de tipos de suelo en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica.



CATIE
Tesis: Análisis espacial del tipo de uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica.
Autor: Edith Méndez Villanueva

Anexo 5. Mapa de categorías de zonas de vida en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica.



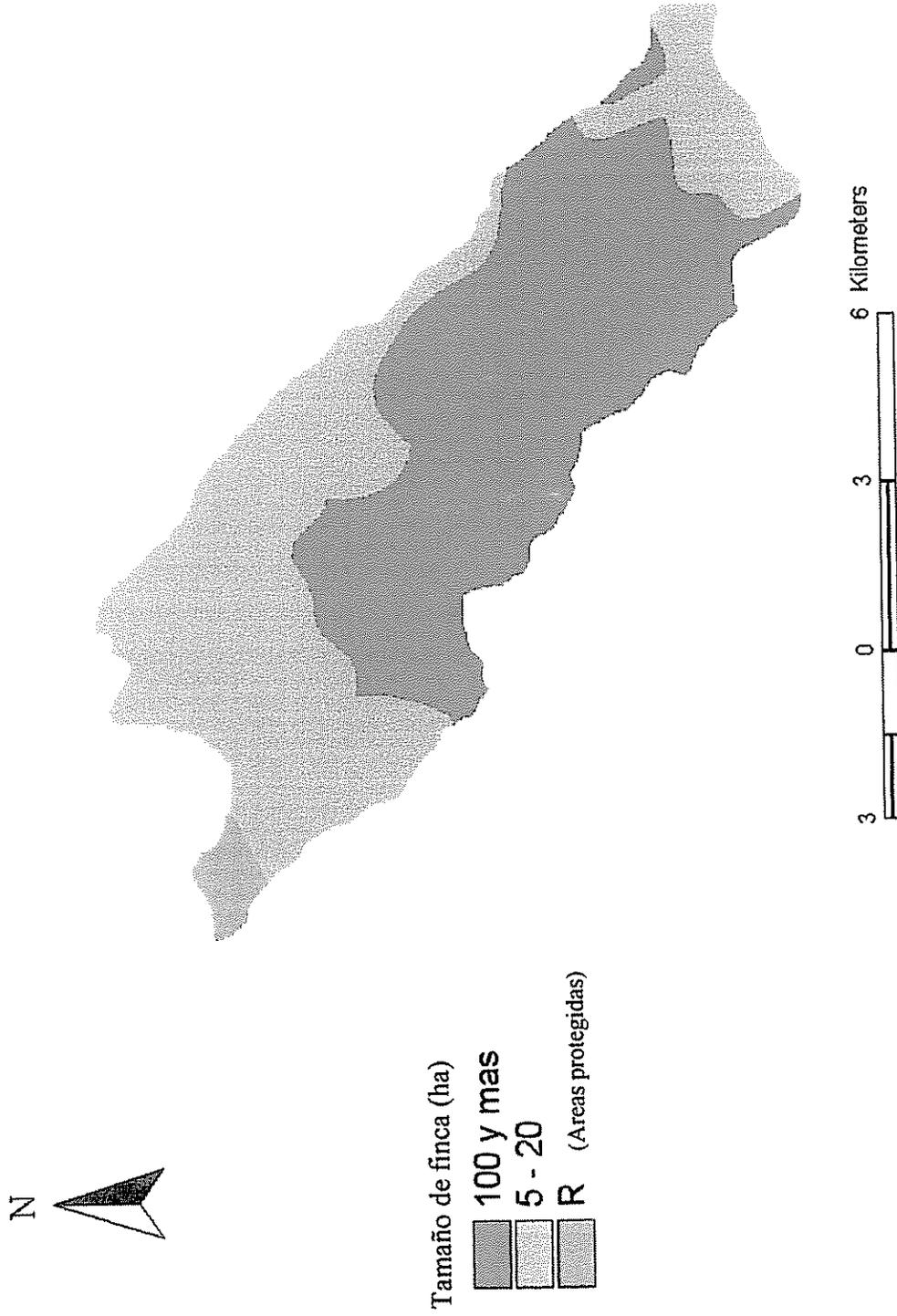
CATIE
Tesis: Análisis espacial del tipo de uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica.
Autor: Edith Méndez Villanueva

Anexo 6. Mapa de categorías de pendientes en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica.



CATIE
Tesis: Análisis espacial del tipo de uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica.
Autor: Edith Méndez Villanueva

Anexo 7. Mapa de categorías de tamaños de fincas en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica.



CATIE
Tesis: Análisis espacial del tipo de uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica.
Autor: Edith Méndez Villanueva