

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO ACADÉMICO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL**

**ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS DE COBERTURA DE LA
CUENCA ALTA Y MEDIA DEL RÍO REVENTAZÓN, COSTA
RICA, PERIODO 2000-2010**

CARLOS ANDRÉS CAMPOS VARGAS

CARTAGO, COSTA RICA

2010



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO ACADÉMICO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL**

**ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS DE COBERTURA DE LA
CUENCA ALTA Y MEDIA DEL RÍO REVENTAZÓN, COSTA
RICA, PERIODO 2000-2010**

CARLOS ANDRÉS CAMPOS VARGAS

**CARTAGO, COSTA RICA
2010**

ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS DE COBERTURA DE LA CUENCA ALTA Y MEDIA DEL RÍO REVENTAZÓN, COSTA RICA, PERIODO 2000-2010

Carlos Andrés Campos Vargas¹

RESUMEN

Mediante imágenes satelitales ASTER se determinó la cobertura de la cuenca alta y media del Río Reventazón para el año 2010. Se encontró un total de 17 clases de cobertura donde la clase bosque figura como la de mayor importancia cubriendo el 50% del territorio. La segunda clase más importante corresponde a potreros con un 18.1%.

Además se analizó el cambio de cobertura durante el periodo 2000 – 2010, mediante una matriz de cambios, donde se comparó la clasificación realizada, con otra hecha por el Instituto Costarricense de Electricidad en el año 2000. Se observaron variaciones en todas las clases, donde se destacan los cambios en las categorías agua, urbano y perennes, ocasionado por fallos en la clasificación del año 2000.

Para determinar la tasa de cambio anual neta se utilizó la fórmula propuesta por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación, mencionada por Dupuy *et al* (2006); donde la clase charral fue la que presentó la mayor tasa de cambio (28.99%).

Los conflictos entre la capacidad de uso y la cobertura, demostraron que un 51% de la zona posee un uso correcto, un 30% sobreuso, y 15% subuso. El sobreuso destaca en las subcuencas Páez-Birrisito, Birris, y Chiz-Maravilla. Se observó como las clases de perennes, forestal, pastos y cultivos anuales, son en los que se presentan los mayores conflictos.

¹ Campos, C. 2010. Análisis de los cambios cobertura de la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, CR. 81 p.

El potencial de erosión hídrica se estimó mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), se observó cómo un 69% del área presentó erosión hídrica ligera, un 14% moderada, un 11% severa y un 6% muy severa.

Establecidos los cambios de cobertura se asumió que el Factor Cobertura Vegetal (C), de la EUPS, es un buen indicador de posibles efectos en la susceptibilidad de erosión hídrica de los suelos. Se encontró que en el periodo estudiado un 11% de la cuenca tuvo cambios positivos en la disminución de la susceptibilidad de la erosión por medio del cambio del factor C.

Por la importancia económica y social que presenta esta cuenca, el conocer los cambios de cobertura y sus consecuencias tiene gran relevancia, ya que evalúa la efectividad del manejo en dicha cuenca.

Palabras claves: capacidad de uso, cobertura, Río Reventazón, teledetección.

ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS DE COBERTURA DE LA CUENCA ALTA Y MEDIA DEL RÍO REVENTAZÓN, COSTA RICA, PERIODO 2000-2010

Carlos Andrés Campos Vargas¹

SUMMARY

Through ASTER satellite images was determined the coverage of the Reventazón river high and middle basins in 2010. It was found a total of 17 cover types where the forest cover type appears as the most important, covering 50% of the territory. The second most important type corresponds to pastures with a 18.1%.

Moreover, the change in coverage during the period 2000–2010 was analyzed by a matrix of changes, which compared the classification made, with another carried out by the Instituto Costarricense de Electricidad in 2000. There were observed variations in all classes, where stands out the changes in water, urban and perennial categories, due to the failure of the classification of 2000.

To determine the net annual exchange rate it was used the formula proposed by the United Nations Organization for Agriculture and Food, quoted by Dupuy et al (2006), where the charral type presented the highest rate of change (28.99 %).

The conflicts between usability and coverage showed that 51% of the area has a proper use, 30% overuse, and 15% Subuse. The overuse stands out in the sub-Birrisito Paez, Birris, and Chiz-Maravilla. It was observed that the classes of

¹ Campos, C. 2010. Análisis de los cambios cobertura de la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, CR. 81 p.

evergreen, forest, pasture and annual crops, are the ones who presents the greatest conflicts.

The potential for water erosion was estimated using Equation Universal Soil Loss (USLE) is watched by 69% of the area showed slight erosion, 14% moderate, 11% severe and 6% drastic.

Established cover changes, it was assumed that the Vegetation Cover Factor (C) of the USLE, is a good indicator of potential effects on water erosion susceptibility of soils. It was found that during the study period 11% of the basin had positive changes in reducing susceptibility to erosion by changing the factor C.

Due to the economic and social importance that this basin presents, knowing the cover changes and its consequences acquires major relevance, because it evaluates the effectiveness in this basin management.

Keywords: land capacity, coverage, Reventazón river, remote sensing

.

Este trabajo ha sido aceptado por el Tribunal Evaluador de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica y aprobado por el mismo como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura.

ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS DE COBERTURA DE LA CUENCA ALTA Y MEDIA DEL RÍO REVENTAZÓN, COSTA RICA, PERIODO 2000-2010

Miembros del Tribunal Evaluador

**Ing. Edgar Ortiz Malavasi, Ph.D.
Director de Tesis**

**Ing. Alejandro Meza M, Msc.
Coordinador de trabajo final de graduación**

**Ing. Julio Calvo, Ph. D.
Escuela de Ingeniería Forestal**

**Ing. Gustavo Calvo, Msc.
Centro de Servicio Gestión Ambiental, ICE**

**Carlos Andrés Campos Vargas
Estudiante**

DEDICATORIA

*A mis padres y familia, quienes marcaron mi
norte en la vida.*

*Podemos perdonar fácilmente a un niño que
teme la oscuridad, la verdadera tragedia es
cuando los hombres temen la luz*

Platón

AGRADECIMIENTOS

A mis padres fuente de toda inspiración en mi vida, a Myriam y Alina por ese apoyo y cariño que me brindan día a día.

A mi tutor Edgar Ortiz, por sus consejos durante este trabajo.

A todos los funcionarios del Centro de Servicio de Gestión Ambiental del Instituto Costarricense de Electricidad, por darme la oportunidad de realizar este trabajo con ustedes y brindarme ese cariño y apoyo tan sincero que hizo amenos todos los días que compartí con ustedes: Gustavo, Max, Derick, Alex, Luz Marina, María Eugenia, Miguel, Carlos, Maikel, Héctor y Manuel al cual le estoy infinitamente en deuda.

A los miembros de la Escuela de Ingeniería Forestal, a Julio Calvo por todo lo que me enseñó como persona y profesional, a Gustavo Torres por esa amistad tan especial.

A mis compañeros de carrera con los cuales disfrute tanto: Meli, Mau, Stephe, Randy, Oxa, Ari, Masi, Jennifer, Roberto. A Oscar, Freddy, Pablo y Abraham, los cuales los llegue a estimar más como hermanos que como compañeros.

A Bernal Coto, por brindarme un segundo hogar, y a esas personas queridas Vanessa, Juan, Vernon.

Un agradecimiento especial al Centro de Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (Cathalac), por suministrar las imágenes satélites que permitieron la realización de este trabajo. Especialmente a África Flores y Betzy Hernández.

ÍNDICE GENERAL

| | Pág. |
|--|-------------|
| RESUMEN | i |
| ABSTRACT | i |
| DEDICATORIA | ii |
| AGRADECIMIENTOS | iii |
| ÍNDICE GENERAL | iv |
| ÍNDICE DE CUADROS | v |
| ÍNDICE DE FIGURAS | vi |
| ÍNDICE DE ANEXOS | vii |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| REVISIÓN DE LITERATURA | 3 |
| Sistemas de información geográfica | 3 |
| Teledetección..... | 3 |
| La radiación electromagnética | 4 |
| Interacción Atmósfera-Energía..... | 6 |
| Factores que afectan el comportamiento espectral teórico | 9 |
| Tipos de sensores remotos | 10 |
| Características de los sensores remotos | 11 |
| Tecnología ASTER | 13 |
| Clases de cobertura de la tierra | 17 |
| Capacidad de Uso de Suelo | 19 |
| Ecuación Universal de Pérdida de Suelo | 20 |

| | |
|--|----|
| MATERIALES Y MÉTODOS | 23 |
| Descripción de la cuenca | 23 |
| Descripción general de la metodología | 24 |
| Obtención y selección de imágenes..... | 25 |
| Verificación de campo..... | 25 |
| Análisis de imágenes | 25 |
| Clasificación supervisada..... | 27 |
| Validación de clasificación | 29 |
| Análisis de cambio de cobertura | 31 |
| Relación entre la Capacidad de Uso y la cobertura para el año 2010 | 33 |
| Estimación de la erosión hídrica de la cuenca para el año 2010 | 33 |
| Efecto del cambio del Factor de cobertura de la EUPS | 34 |
| | |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 35 |
| Adquisición de imágenes satelitales | 35 |
| Cobertura de la cuenca alta y media del Río Reventazón, para el año 2010 | 35 |
| Validación de la clasificación de imágenes ASTER, del año 2010..... | 39 |
| Cambios de cobertura de la cuenca alta y media del Río Reventazón durante el periodo 2000 - 2010 | 44 |
| Tasa de cambio anual, para la cuenca alta y media del Río Reventazón (2000 – 2010)..... | 46 |
| Relación de la cobertura y la capacidad de uso, para la cuenca alta y media del Río Reventazón, 2010..... | 48 |
| Potencial de erosión hídrica, de la cuenca alta y media del Río Reventazón, 2010 | 51 |
| Zonas de cambio de factor de cobertura de la EUPS (2000 – 2010)..... | 53 |
| | |
| CONCLUSIONES | 56 |
| | |
| RECOMENDACIONES | 58 |

BIBLIOGRAFÍA59

ANEXOS66

ÍNDICE DE CUADROS

| Núm. | Título | Pág. |
|-------------|--|-------------|
| 1 | Subsistemas del instrumento ASTER | 15 |
| 2 | Número de hectáreas y porcentajes de la cobertura de la cuenca media y alta del Río Reventazón, Costa Rica, 2010. | 39 |
| 3 | Matriz de error para evaluar la exactitud de los resultados finales de la clasificación supervisada, para la cuenca alta y media del Río Reventazón, 2010. | 41 |
| 4 | Valores de precisión del productor y el usuario para la determinación de la cobertura de la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica, 2010. | 43 |
| 5 | Matriz de cambios de cobertura de la cuenca alta y media del Río Reventazón, periodo 2000-2010. | 45 |
| 6 | Relación de la cobertura actual y la capacidad de uso de la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica, 2010. | 51 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Núm. | Título | Pág. |
|-------------|--|-------------|
| 1 | Componentes de una onda electromagnética. | 5 |
| 2 | Interacción de la atmósfera en las diferentes ventanas espectrales. | 6 |
| 3 | El espectro electromagnético y su división en bandas espectrales. | 8 |
| 4 | Comparación de las bandas espectrales entre ASTER y Landsat 7TM. | 16 |
| 5 | Ubicación de la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica. | 23 |
| 6 | Áreas de clasificación de la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica, mediante imágenes ASTER 2010. | 27 |
| 7 | Cobertura de la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica, 2010. | 37 |
| 8 | Tasa de cambio anual en porcentaje, en la cuenca alta y media del Río Reventazón (2000-2010). | 47 |
| 9 | Zonas de conflicto de capacidad de uso de suelo, cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica. | 50 |
| 10 | Erosión hídrica de la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica, 2010. | 53 |
| 11 | Zonas de cambio de factor de cobertura de la EUPS, en la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica (2000 – 2010). | 55 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| Núm. | Título | Pág. |
|-------------|--|-------------|
| 1 | Formulario de campo para la toma de datos. | 66 |
| 2 | Áreas protegidas dentro de la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica. | 66 |
| 3 | Puntos de verificación de la clasificación de la cobertura en la cuenca alta y media del Río Reventazón, 2010. | 67 |
| 4 | Valores de los factores utilizados para el cálculo de la erosión hídrica en la cuenca alta y media del Río Reventazón, mediante la EUPS. | 68 |

INTRODUCCIÓN

La mayor parte de los cambios que ocurren en los ecosistemas terrestres se deben a, conversión en la cobertura del terreno, degradación de la tierra e intensificación en el uso del suelo (Lambin, 1994).

La cuenca del Río Reventazón, es un claro ejemplo de estos cambios, en donde se han desarrollado diversas actividades que van desde explotaciones agropecuarias hasta la generación de hidroelectricidad. Esta cuenca posee características especiales que la hacen apta para la generación de hidroelectricidad, así desde 1963 el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), inició esta actividad con la construcción del proyecto hidroeléctrico Río Macho. De esa fecha a la actualidad el ICE, ha construido tres proyectos de ese tipo (Río Macho, Cachí y Angostura) y actualmente uno en fase constructiva (Reventazón), con lo que se produce el 25% de la hidroelectricidad del país.

No obstante, la erosión y sedimentación en la cuenca son los mayores problemas, para la generación hidroeléctrica. Solamente al embalse de Angostura llegan al año 2 millones de toneladas de sedimentos, situación que trae consigo efectos negativos para esa actividad.

Como respuesta a esta problemática en el año 2000, se creó la Unidad de Manejo de la Cuenca del Río Reventazón (UMCRE), actualmente llamada, Centro de Servicio de Gestión Ambiental (CSGA). Dentro de los planes de trabajo de esta unidad se encuentra el manejo de cobertura. Por esta razón una manera de evaluar el trabajo de esta unidad, es el analizar la cobertura y factores asociados de la cuenca, desde la fecha de creación de la unidad hasta la actualidad (2000 – 2010); lo cual otorgará un panorama general de lo que ha sido el manejo de la cuenca.

Este trabajo se constituye, en una herramienta complementaria en el manejo y ordenación de la cuenca. Como objetivo general se plantea analizar el cambio de cobertura de la cuenca alta y media del Río Reventazón en el período 2000 – 2010. Para esto fue necesario adquirir imágenes satelitales ASTER de la zona. Clasificar la cobertura del área, para el año 2010. Determinar el error de clasificación para las diferentes coberturas presentes en la cuenca. Analizar el cambio de cobertura en el período 2000- 2010. Identificar las zonas de conflicto de capacidad de uso de suelo versus la cobertura actual. Calcular el potencial de erosión hídrica para el año 2010. Estimar la mejora en el Factor de Cobertura, de acuerdo a la EUPS, como indicador de la reducción del potencial de erosión hídrica, en la cuenca alta y media del Río Reventazón.

REVISIÓN DE LITERATURA

Sistemas de Información Geográfica

Éstos se definen como “el conjunto de procesamientos, equipos y programas de computación utilizados para la recolección, pre-procesamiento, almacenamiento, y análisis de datos geográficamente referenciados” (Ortiz, 2001). En un contexto más amplio estos son asumidos como sistemas automatizados para el manejo de datos geográficos para un propósito especial en donde el principal medio de referencia es un sistema de coordenadas (Pérez, 1997).

La incorporación de otras tecnologías y disciplinas a los Sistemas de Información Geográfica como lo son la teledetección, la gestión de bases de datos y la cartografía (Fallas, 1999), revolucionaron este tipo de sistema convirtiéndolo en herramientas indispensables en la vida diaria.

Teledetección

Se entiende como teledetección cualquier procedimiento o técnica de adquisición de información sin tener contacto directo con el objeto o sistema observado (Pérez & Muñoz, 2006; Sobrino, 2000). En un modo más restringido, y en el ámbito de las ciencias de la Tierra, la teledetección es entendida como una técnica que tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes tomadas desde satélites artificiales.

La teledetección parte del principio de la existencia de una perturbación (energía electromagnética, campos gravitacionales, ondas sísmicas, etc.) que el sistema observado produce en el medio, la cual es registrada por el sistema receptor para posteriormente ser interpretada (Pérez & Muñoz, 2006).

Otras definiciones engloban el concepto como el arte o ciencia para adquirir, procesar y analizar imágenes de objetos sin tener un contacto directo con ellos para poder resolver problemas concretos u obtener información valiosa y confiable. Las fotografías aéreas constituyen uno de los sensores remotos de uso más frecuente, aunque las imágenes satelitales adquieren gran importancia día con día (Fallas, 2003).

La radiación electromagnética

La radiación electromagnética es la fuente de información básica en la teledetección (Pérez & Muñoz, 2006), esta posee propiedades fundamentales y se comporta de forma predecible de acuerdo con los principios de la física del electromagnetismo.

La radiación electromagnética consiste en un campo de energía que varía en magnitud con dirección perpendicular al sentido en que se desplaza la radiación y un campo magnético orientado en un ángulo recto al plano del campo de energía (Figura 1). Ambos campos se trasladan a la velocidad de la luz y varían de modo armónico y sinusoidal (CCRS, 1998; Lillesand & Kiefer, 1994; Arroyo, 2001). De esta manera, existen dos características de la energía electromagnética que son necesarias para entender la percepción remota: la frecuencia y la longitud de onda. La longitud de onda se refiere a la distancia entre dos picos de la onda sinusoidal y se expresa en unidades de distancia (m), y la frecuencia, que es la cantidad de picos de onda pasando por un punto determinado del espacio por unidad de tiempo y se expresa en Hertz (Hz), que es equivalente a ciclos por segundo (CCRS, 1998). Así es posible asociar estas variables de la siguiente manera:

$$C = V \lambda$$

En donde

C = velocidad de la luz (300.000 km/s)

V = frecuencia

λ = longitud de onda

De ahí que se dé la relación indirectamente proporcional entre la frecuencia y la longitud de onda, donde, a mayor longitud de onda, menor la frecuencia y viceversa (CCRS, 1998). La unidad comúnmente empleada para categorizar energía electromagnética por medio de su longitud de onda, es el micrómetro (μm).

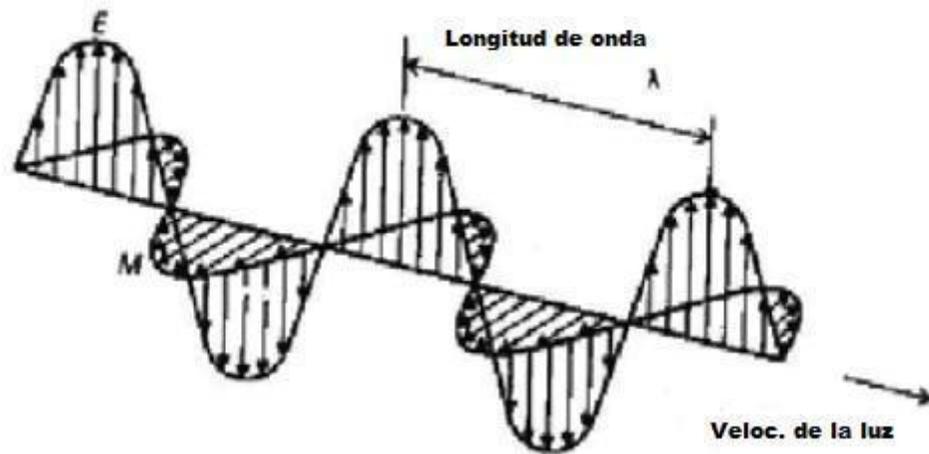


Figura 1.Componentes de una onda electromagnética (Fallas, 2003).

El espectro electromagnético se define como la extensión de dicha energía en función de la longitud de onda. No existe una clara división de dicho espectro y cualquier partición del mismo responde a rangos nominales establecidos. Los nombres asignados a diferentes segmentos del espectro electromagnético han surgido como respuesta a los métodos de detectar las diferentes radiaciones de energía (Lillesand & Kiefer, 1994).

Interacción atmósfera-energía

Todo sensor indistintamente de la plataforma requiere una fuente de energía para funcionar, por lo cual la energía proveniente de un objeto debe viajar una distancia dada para llegar hasta el sensor. El efecto de la atmósfera es una función de la distancia entre la fuente de energía y el sensor, la magnitud de la señal emitida, las condiciones atmosféricas y la longitud de onda utilizada (Figura 2). Los mecanismos que explican la interacción atmósfera-energía y sistema sensor son: dispersión y absorción (Fallas, 2003).

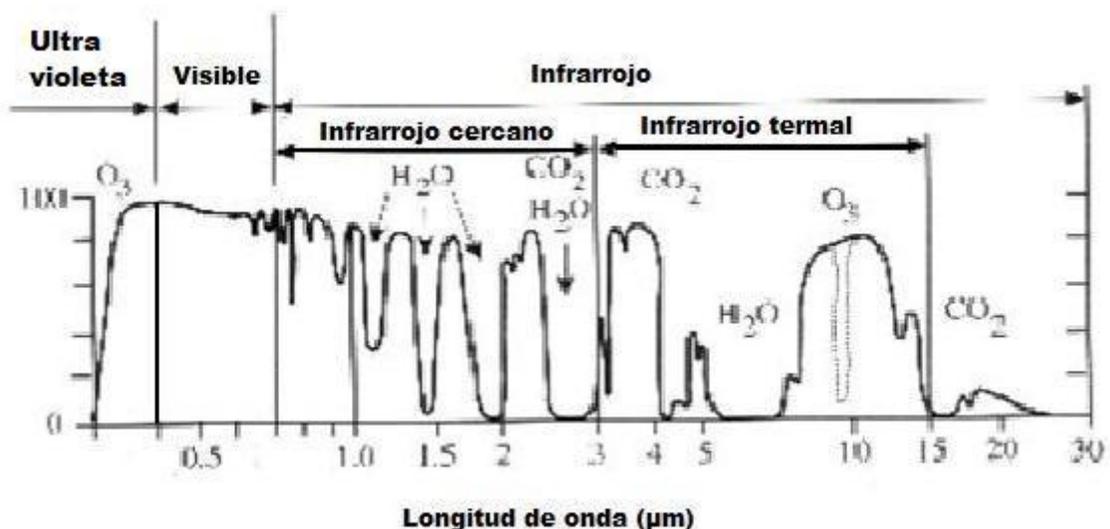


Figura 2. Interacción de la atmósfera en las diferentes ventanas espectrales (Miranda, 2007).

- **Absorción**

La energía electromagnética proveniente del Sol debe viajar a través de la atmósfera para llegar a la superficie terrestre. El vapor de agua, ozono y el dióxido de carbono son tres componentes comunes en la atmósfera que absorben energía en diferentes longitudes de onda. El efecto de este fenómeno es la creación de lo que se conoce como ventanas atmosféricas (Figura 3), las que se clasifican a continuación (Fallas, 2003):

1. **Espectro visible:** El ojo humano puede percibir longitudes de onda entre 0.4 μm y 0.7 μm ; lo cual equivale a los colores primarios azul, verde y rojo; y sus combinaciones. Una foto a color tomada con una cámara de 35 mm o digital es un ejemplo de estas longitudes de onda.
2. **Infrarrojo cercano:** Este segmento del espectro comprende longitudes de onda entre 0.7 y 1.3 μm y puede registrarse con película fotográfica infrarroja. El ojo humano no puede percibir estas longitudes de onda. Esta porción del espectro electromagnético es útil para discriminar diferentes concentraciones de humedad tanto en el suelo como en la vegetación (Ej. bosque caducifolio vs. bosque siempre verde).
3. **Infrarrojo medio:** Comprende longitudes de onda entre 1.3 y 1.8 μm . El ojo humano tampoco puede percibir estas longitudes de onda. Esta banda es producto tanto de la emisión como de la reflectividad de los objetos o cuerpos terrestres. En los sensores multiespectrales existe un traslape entre la banda de infrarrojo medio y cercano o reflejado.
4. **Infrarrojo lejano o térmico:** Incluye longitudes de onda entre 8 y 14 μm . El ojo humano no puede percibir estas longitudes de onda. Esta banda corresponde a la energía emitida por cuerpos y objetos en la superficie terrestre. Los sensores térmicos y multiespectrales pueden registrar estas longitudes de onda.

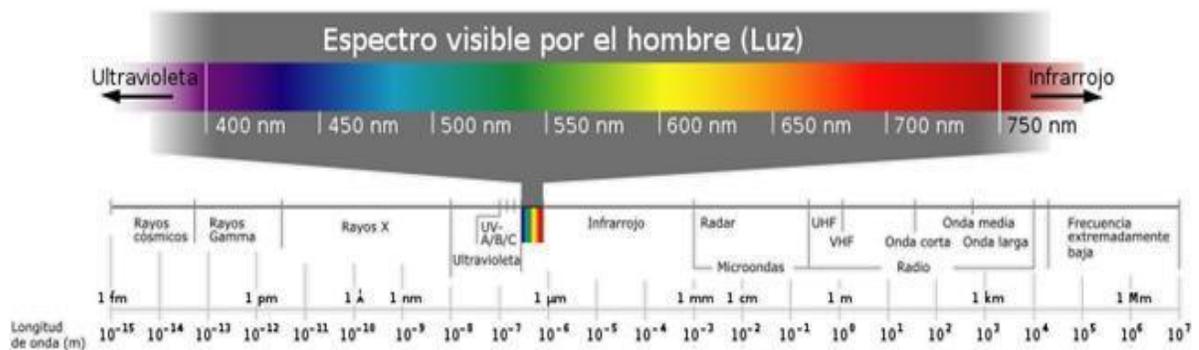


Figura 3: El espectro electromagnético y su división en bandas espectrales.

- **Dispersión atmosférica**

La atmósfera está compuesta por diversas capas, las cuales a su vez, están formadas por varias partículas como lo son moléculas de agua, ozono, partículas de polvo; que dispersan la energía proveniente del emisor (Sol). La dispersión atmosférica es una forma de difusión no predecible de la energía por las partículas atmosféricas; de aquí se tiene que la relación entre el diámetro de las partículas y la longitud de onda de la energía del emisor, desprende los siguientes tipos de dispersión (Fallas, 2003):

- ✓ **Dispersión Rayleigh.** Este tipo de dispersión se presenta cuando la longitud de onda es mayor que el diámetro de las partículas atmosféricas con que interactúa. El efecto *Rayleigh* se evidencia en un día soleado como un cielo azul. De igual manera al atardecer en un día de la estación seca podemos observar el horizonte de color rojo naranja. Al atardecer la luz tiene que recorrer una mayor distancia para llegar hasta nuestros ojos y por lo tanto las longitudes de onda menor son en parte absorbidas y en parte dispersadas y por lo tanto sólo observamos las longitudes de onda mayores (rojo-naranja).

- ✓ **Dispersión Mei.** En este caso el diámetro de las partículas es igual a la longitud de onda. El vapor de agua y las partículas de polvo en la atmósfera son los principales causantes de la dispersión *Mei*. Para la teledetección este tipo de dispersión es menos importante, ya que es menos frecuente comparada con la *Rayleigh*.
- ✓ **Dispersión no selectiva.** Este tipo de dispersión se presenta cuando el diámetro de las partículas es mayor que la longitud de onda. Un ejemplo de dispersión no selectiva es el ocasionado por las gotas de lluvia con diámetros entre 5 μm y 100 μm (ej. bruma, llovizna). Las gotas de lluvia dispersan tanto las ondas en el espectro visible como en el infrarrojo. La capacidad de estas partículas de dispersar por igual energía en las diferentes longitudes de onda explica por qué las nubes y la neblina se observan de color blanco en las fotos aéreas o en las imágenes impresas.

Factores que afectan el comportamiento espectral teórico

Es conocido que los comportamientos teóricos y reales en muchas ocasiones son diferentes, ya que en la realidad es evidente el efecto de factores externos en las variables, entre estos factores se encuentran los siguientes (Fallas, 2003):

1. **Ángulo de iluminación solar.** Este es una función de la época del año y de la hora a la cual se hace la observación.
2. **Pendiente y orientación del terreno.** Este factor afectará la cantidad de energía reflejada por la superficie. Un caso extremo se da cuando la pendiente genera una sombra en la imagen
3. **Dispersión selectiva de diferentes longitudes de onda por parte de la atmósfera.** Comprende el efecto de las partículas que forman la atmósfera como se observó en las diferentes dispersiones.

4. **Variación ambiental de la superficie terrestre.** Incluye aspectos tales como contraste entre superficies y grado de homogeneidad y/o heterogeneidad del área.
5. **Ángulo de observación.** Definido por la órbita del satélite y las características del sensor.

Tipos de Sensores Remotos

Como se ha mencionado el Sol es la fuente de energía, la cual ocasiona una serie de fenómenos e interacciones con las características terrestres, los cuales producen en los sensores remotos, respuestas espectrales particulares lo que los hace identificables. Sin embargo, es importante aclarar que no todos los sensores remotos utilizan al Sol como su fuente energética, lo que hace necesario diferenciar entre sensores activos y pasivos (CCRS, 1998), estos se explican a continuación:

- **Sensores Activos:** Los sensores denominados activos no dependen de una fuente de energía externa para activarse; pues generan su propia energía (Fallas, 2003), estos proyectan la energía hasta sus objetivos, obteniendo así una respuesta espectral ellos. Con respecto a los sensores pasivos presentan una ventaja ya que pueden obtener mediciones sin importar la hora del día o estación del año; asimismo, es posible estudiar la respuesta espectral de objetos con respecto a longitudes de onda de menor energía incidente, e inclusive no se ven afectados por la presencia de nubes (Coronado, 2001).
- **Sensores Pasivos:** son aquellos sensores que sólo pueden ser empleados en detectar energía cuando existe una fuente natural o externa (Sol). En la mayoría de los casos, solamente es posible el funcionamiento de dichos sensores en el día. La actividad en la noche es mínima, y solo podría ser captada la energía emitida por los mismos objetos (Coronado, 2001).

Características de los sensores remotos

Los sensores remotos pueden ser valorados por una serie de características propias lo cual hace que sean adecuadas para una u otra labor, llegando así a la especialización, por eso es de suma importancia considerar estos aspectos a la hora de trabajar con un determinado sensor. Estas características se mencionan a continuación.

- **Resolución espacial**

Está dada por el campo de visión instantánea, definido como la sección angular, medida en radianes, observada en un momento dado. Depende de la apertura del dispositivo óptico del sensor. No obstante al hablar de resolución espacial se suele utilizar la distancia sobre el terreno correspondiente a este ángulo. Esta distancia es el tamaño de la mínima unidad de la imagen de la que tenemos información, es, el tamaño medio del píxel (Sobrino, 2000).

La resolución espacial de un sensor depende de varios factores como lo son la altura orbital, la velocidad de exploración y el número de detectores. Es considerada un factor clave a la hora de caracterizar la potencialidad de un sensor ya que marca el nivel de detalle que ofrece la imagen. Nos dice el tamaño mínimo de los elementos discriminables en la imagen. Cuanto menor es el tamaño del píxel mejor resolución tiene la imagen, es posible discriminar más objetos. No obstante el tamaño del píxel establece el umbral de elementos discriminables, hay otros factores (geometría, contraste de radiación entre objetos próximos, claridad de la atmósfera) que introducen matizaciones. Por ejemplo en una imagen Landsat TM con una resolución espacial de 30 m, es posible discriminar carreteras cuya anchura sea inferior a este umbral ya que se trata de un elemento lineal. De igual modo un edificio con un tamaño inferior a 900 m², pero ubicado en una zona rodeada de cultivos puede aparecer representado en la imagen si el contraste espectral entre la respuesta del edificio y la vegetaciones es suficientemente alto (Sobrino, 2000).

- **Resolución espectral**

La resolución espectral de un sensor expresa su aptitud para separar señales de longitudes de onda diferentes y depende del dispositivo de filtro óptico que separa la radiación incidente en bandas espectrales más o menos amplias. La resolución espectral indica el número y la anchura de bandas espectrales en que un sensor registra la radiación. Por ello cuanto mayor sea el número de bandas y más estrechas sean, tanto mejor es la resolución espectral, mayor la capacidad del sensor para reproducir la respuesta del objeto observado y, en consecuencia, la posibilidad de discriminar unas coberturas de otras. Si las bandas espectrales son muy amplias, supone que se registra un valor promedio de radiación. Por ejemplo una banda visible nos da información acerca del albedo de una superficie pero no permite discriminar la vegetación de otro tipo de coberturas (Sobrino, 2000).

La elección del número de anchura y localización de las bandas espectrales que incluye un sensor, está relacionada con los objetivos de su diseño. Un sensor meteorológico únicamente necesita una banda en el visible puesto que las nubes no presentan diferencias cromáticas. Sin embargo, necesita bandas en el térmico, o en el IR medio para observar la humedad atmosférica. Un sensor de recursos naturales necesita bandas que permitan discriminar la vegetación y el color de las superficies y por lo tanto será mejor cuanto mayor número de bandas y más definidas tenga.

- **Resolución radiométrica**

La resolución radiométrica hace referencia a la sensibilidad de un sensor y expresa su aptitud para diferenciar señales electromagnéticas de energía diferente. Está condicionada por los intervalos de digitalización de la señal. El número máximo de niveles digitales de la imagen suele identificarse con la resolución radiométrica y oscila entre 64, 128, 256, 1024. Este rango de codificación varía con los distintos sensores (Sobrino, 2000).

Lógicamente cuanto mayor sea el número de niveles mejor es la resolución radiométrica y mejor la información. Para un análisis visual no es importante tener muchos niveles de color ya que el ojo humano difícilmente puede percibir más de 64 tonos de gris, pero cuando se opta por el tratamiento informático, la mejora en la resolución puede ser significativa.

- **Resolución temporal**

La resolución temporal alude a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor, esto es, la periodicidad con que adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación) así como del diseño del sensor (ángulo de observación y abertura) (Sobrino, 2000).

Tecnología ASTER (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)

El radiómetro avanzado de emisiones y reflexiones térmicas (ASTER) es un reproductor de imágenes multiespectrales de avanzada que se puso en marcha a bordo de la nave espacial de la NASA conocida como Terra en diciembre de 1999 (Abrams & Hooke, 2000).

ASTER cubre una amplia región espectral con 14 bandas de lo visible al infrarrojo térmico con alta resolución espacial, resolución espectral y radiométrica, además cuenta con una banda adicional retrospectiva en el infrarrojo cercano lo cual proporciona cobertura estéreo.

La tecnología ASTER se incorpora dentro del proyecto Terra que es el primero de una serie de instrumentos múltiples de la NASA que son incorporados al Sistema de Observación de la Tierra (EOS); este consta de un componente científico y un sistema de información de datos (EOSDIS) en apoyo a una serie coordinada de los satélites de inclinación de órbita polar y baja para las observaciones mundiales a

largo plazo de la superficie terrestre, la biosfera, litosfera, la atmósfera y los océanos(Abrams & Hooke, 2000).

Además de ASTER, los demás instrumentos en Terra son el espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS), el radiómetro de espectro multiángulo (MISR), Sistema de energía radiante de las nubes y la tierra (CERES), y medidor de contaminación en la troposfera (MOPITT). Como el único instrumento de alta resolución espacial en Terra, ASTER es el "zoom" para los demás instrumentos.

Terra está en una órbita sincronizada con el sol, 30 minutos por detrás de Landsat ETM +, cruza el ecuador, a las 10:30 am hora solar local (Abrams & Hooke, 2000).

ASTER puede adquirir datos a través de todo el globo con un ciclo de trabajo promedio de 8% por cada órbita, esto se traduce en la adquisición de alrededor de 650 escenas por día, que se procesan a nivel-1A, de los cuales unos 150 son procesados a nivel-1B. Todas las escenas 1A y 1B se transfieren al archivo EOSDIS, de ahí al Centro de Procesos de la tierra (EDC), finalmente pasa al Centro de Archivos Activos (LP-DAAC), para su almacenamiento, distribución y procesamiento de datos de mayor nivel de productos. Todos los productos de datos ASTER se almacenan en una implementación específica de datos jerárquicos formato denominado HDF-EOS.

- **ASTER como instrumento**

ASTER es un esfuerzo cooperativo entre la NASA y el Ministerio japonés de Economía Comercio e Industria (METI), anteriormente conocido como Ministerio de Comercio Internacional e Industria (MITI), con la colaboración de científicos y organizaciones de la industria en ambos países. El instrumento ASTER consta de tres subsistemas instrumento específicos (Tabla 1): el visible e infrarrojo cercano (VNIR) que posee tres bandas con una resolución espacial de 15 m, y un telescopio adicional hacia atrás para estéreo; el infrarrojo de onda corta (SWIR) de 6 bandas

con una resolución espacial de 30 m, y el infrarrojo térmico (TIR) cuenta con 5 bandas con una resolución espacial de 90 m. Cada subsistema opera en una región espectral diferente, con su propio telescopio.

Cuadro 1. Subsistemas del instrumento ASTER (Abrams & Hooke, 2000).

| Subsistema | Banda | Rango espectral (μm) | Resolución espacial (m) |
|------------|-------|-----------------------------------|-------------------------|
| VNIR | 1 | 0.52-0.60 | 15 |
| | 2 | 0.63-0.69 | |
| | 3N | 0.78-0.86 | |
| | 3B | 0.78-0.86 | |
| SWIR | 4 | 1.60-1.70 | 30 |
| | 5 | 2.145-2.185 | |
| | 6 | 2.185-2.225 | |
| | 7 | 2.235-2.285 | |
| | 8 | 2.295-2.365 | |
| | 9 | 2.360-2.430 | |
| TIR | 10 | 8.125-8.475 | 90 |
| | 11 | 8.475-8.825 | |
| | 12 | 8.925-9.275 | |
| | 13 | 10.25-10.95 | |
| | 14 | 10.95-11.65 | |

Al igual que la tecnología Landsat la cual es un excelente punto de comparación ya que en los últimos fue muy utilizada en la teledetección, ASTER posee los 3 subsistemas como se menciono anteriormente; donde al compararlos se observan algunas diferencias, quizás la más notable es el número de bandas espectrales, y más aun la distribución de estas en las diferentes ventanas (Figura 4).

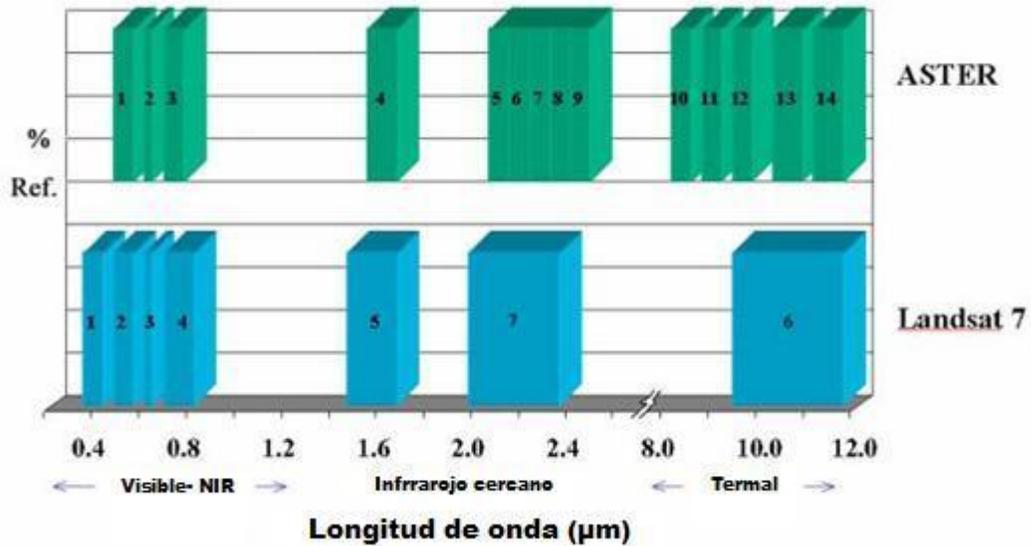


Figura 4. Comparación de las bandas espectrales entre ASTER y Landsat 7TM (Abrams & Hooke, 2000).

La frecuencia de visita a un sitio es indispensable para el monitoreo de los diferentes fenómenos estudiados. En el caso del satélite Terra vuela en una órbita circular, casi polar a una altitud de 705 km, la órbita esta sincronizada con el sol ecuatorial, con cruce en hora local a las 10:30 horas, regresando a la misma órbita cada 16 días. Los parámetros orbitales son los mismos que los de Landsat 7, a excepción de la hora de cruce ecuatorial.

Clases de cobertura de la tierra

De acuerdo al Instituto Meteorológico Nacional (1996), las clases de cobertura para Costa Rica son:

- **Bosque Natural**

Cobertura vegetal conformada por especies con tallo y tronco leñoso; que se encuentran tanto en el bosque tropical lluvioso como el tropical seco. El bosque lluvioso es muy denso, en el que se pueden distinguir tres estratos principales. El dosel o estrato superior, compuesto de unos pocos árboles relativamente grandes y normalmente aislados, con grandes copas. El estrato medio se caracteriza por presentar árboles con copas presionadas unas contra otras. El estrato menor compuesto de árboles y arbustos cuyas copas llenan todo el espacio remanente.

- **Bosque secundario**

Una cobertura vegetal que se ha desarrollado mediante un proceso de regeneración natural, después de haberse eliminado la masa adulta original o gran parte de ella por actividades antrópicas o catástrofes naturales (erupciones volcánicas, deslizamientos, etc.). El rango de crecimiento de las especies varía entre los 2 y los 5 años, con estructuras muy heterogéneas.

- **Charral**

Es el primer estadio de crecimiento de las especies en un proceso de regeneración natural, de aquellas áreas que han sido abandonadas por las actividades agropecuarias; la edad de crecimiento de las especies consta de 0 a 2 años. Está constituido por especies herbáceas y leñosas que no sobrepasan los cinco metros.

- **Cultivos anuales**

Aquellos cultivos que presentan un ciclo vegetativo (germinación, inflorescencia, fructificación y senectud) dura un año o menos y sólo producen una cosecha durante ese período; entre estos citan: el algodón, la papa, las hortalizas y los granos.

- **Cultivos permanentes**

Cultivos cuyo ciclo vegetativo dura más de dos años, y ofrecen durante este período más de dos cosechas; entre éstos: la caña de azúcar (que se corta o se quema, pero el rizoma permanece en el suelo volviendo a regenerar), el café, el banano, la palma africana y los cítricos.

- **Lagunas/Embalse**

Los embalses son cuerpos de agua; artificiales y estáticos, destinados principalmente a la producción de energía; tales como Arenal, Angostura y Cachí en, los cuales son áreas fácilmente cartografiables.

Las lagunas son depósitos de agua naturales; algunas de estas son dinámicas porque están conectadas con un río, como por ejemplo: la laguna de Corcovado y la laguna de Caño Negro. Otras como las lagunas cratéricas son relativamente estáticas.

- **Páramo**

Es una comunidad vegetativa compuesta por líquenes y musgos, así como de algunas especies arbustivas con hojas muy coriáceas; presenta un rango de precipitación anual de 2.300 a 3.500 mm y una temperatura que puede bajar hasta los -2°C (regiones más frías de Costa Rica). Estas comunidades vegetales, se ubican específicamente en las zonas altas y áreas abiertas de la Cordillera de Talamanca.

- **Pasto**

Formaciones vegetales compuestas por gramíneas que se consideran dominantes de hierbas y en ocasiones acompañadas con árboles y arbustos esparcidos; frecuentemente son dedicadas a la ganadería extensiva pero en algunos casos no presentan ningún uso.

- **Urbano**

Es el fraccionamiento y habilitación de un terreno para fines urbanos, mediante la apertura de calles y provisión de servicios, trazados de vías públicas y áreas a reservar para usos u servicios comunales. Presentan un arreglo geométrico.

Capacidad de Uso de Suelo

El término "capacidad de uso del suelo" se refiere al potencial de un suelo como recurso para desarrollar diferentes cultivos y formas de agricultura. Para su determinación se toman en consideración y se relacionan las propiedades de los suelos, las características topográficas del terreno, el clima, los requerimientos del cultivo y uno o varios niveles tecnológicos de referencia.

En Costa Rica, la metodología para determinar esta capacidad fue generada por el Centro Científico Tropical y oficializada mediante el Decreto Ejecutivo N° 23214-MAG-MIRENEM en 1994. Las categorías establecidas por esta metodología corresponden a las siguientes:

- **Clase I:** Se incluyen tierras que no presentan ningún tipo de limitaciones para la producción agrícola, pecuaria o forestal adaptada ecológicamente a la zona, sin deterioro de la capacidad productiva de la tierra.
- **Clase II:** Permiten el desarrollo de casi cualquier actividad agropecuaria o forestal ecológicamente adaptada al lugar, pero con ligeras limitaciones que pueden reducir en algunos casos la elección de cultivos.

- **Clase III:** Permiten el desarrollo de cultivos limpios pero con prácticas muy intensas de manejo y/o conservación.
- **Clase IV:** Esta tierra debe usarse en vegetación permanente y semipermanente debido al grado de limitaciones que presenta para el desarrollo de cultivos limpios y fuertes prácticas de manejo y/o conservación de suelos.
- **Clase V:** Permite el desarrollo de vegetación permanente especialmente la ganadería.
- **Clase VI:** Terrenos utilizables para la producción de cultivos perennes y forestería con prácticas intensivas de manejo y conservación de suelos.
- **Clase VII:** Por su alto riesgo de degradación sólo se permite la obtención en forma controlada de productos derivados de su vegetación natural, como el manejo del bosque.
- **Clase VIII:** Tierras que no reúnen las condiciones mínimas para ninguna actividad agropecuaria o forestal. Tienen utilidad como zonas de preservación de flora y fauna, protección de acuíferos y belleza escénica.

Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

La ecuación básica del modelo USLE (por sus siglas en inglés) o EUPS en español, fue publicada en el número 282 de la revista *Agriculture Handbook* del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos por Wischmeier y Smith en 1965, y desde entonces ha conservado su formulación básica en las revisiones posteriores: USLE (Wischmeier y Smith, 1978 citado por Lianes, 2008) y RUSLE (Renard *et al.*, 1996 citado por Lianes, 2008).

Esta ecuación es el resultado de 6 factores, que estiman la erosión hídrica actual para una situación determinada de clima, suelo, relieve, cultivo y manejo del suelo (Irurtia & Cruzate, sf). La ecuación para la estimación de la pérdida media de suelo es la siguiente (Calvo, 1996):

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

Donde

A, Pérdida de suelo promedio ton/ha/año. Es el producto final de la multiplicación de cada una de las variables independientes.

R, Índice de erosividad o capacidad erosiva de la lluvia, producto de la energía cinética de los aguaceros y la máxima intensidad en 30 minutos (I30).

K, Erodabilidad del suelo. Es la relación de la tasa de pérdida de suelo por unidad de índice de erosividad para un suelo específico en una parcela estándar en barbecho continuo, con una pendiente de 9% y una longitud de 22.1 m.

L, Efecto de la longitud de la pendiente. Indica la relación entre la pérdida de suelo de la longitud de la pendiente en el campo y de una pendiente con una longitud de 22.1 m del mismo tipo de suelo con una pendiente del 9%.

S, Efecto de la gradiente de la pendiente. Es la relación entre la pérdida de suelo desde la gradiente de la pendiente en el campo y la pérdida desde una pendiente de 9% del mismo tipo de suelo con una longitud de 22.1 m.

LS, Usualmente L y S se estiman juntos y se emplean fórmulas para tal efecto. La relación de LS se hace con una parcela de erosión estándar de 22.1 m de longitud y 9% de pendiente, dado que esta es la parcela de que usó para calibrar la ecuación.

C, Factor de cobertura vegetal. El factor C representa la tasa de pérdida de suelo en un área con un cierto cultivo y manejo comparada con otra no cultivada bajo las mismas condiciones de manejo, de precipitación, pendiente y longitud.

P: Factor de conservación de suelos y prácticas culturales. Indica el manejo que se le brinda al terreno.

Los términos RKLS, establecen la influencia de los factores físicos del lugar, poco modificables por el hombre, representan la pérdida de suelo que ocurriría en ese sitio si todo el año el suelo estuviese desnudo, por esa razón en este trabajo a este producto parcial lo denominamos erosión potencial (EP) (Iruetia & Cruzate, sf).

METODOLOGÍA

Descripción de la cuenca

✓ Ubicación

La cuenca alta y media del Río Reventazón se ubica en la vertiente Caribe de Costa Rica (cuenca hidrográfica N° 9, de Costa Rica), y es parte de la gran cuenca Atlántica. (PREVDA, 2008).

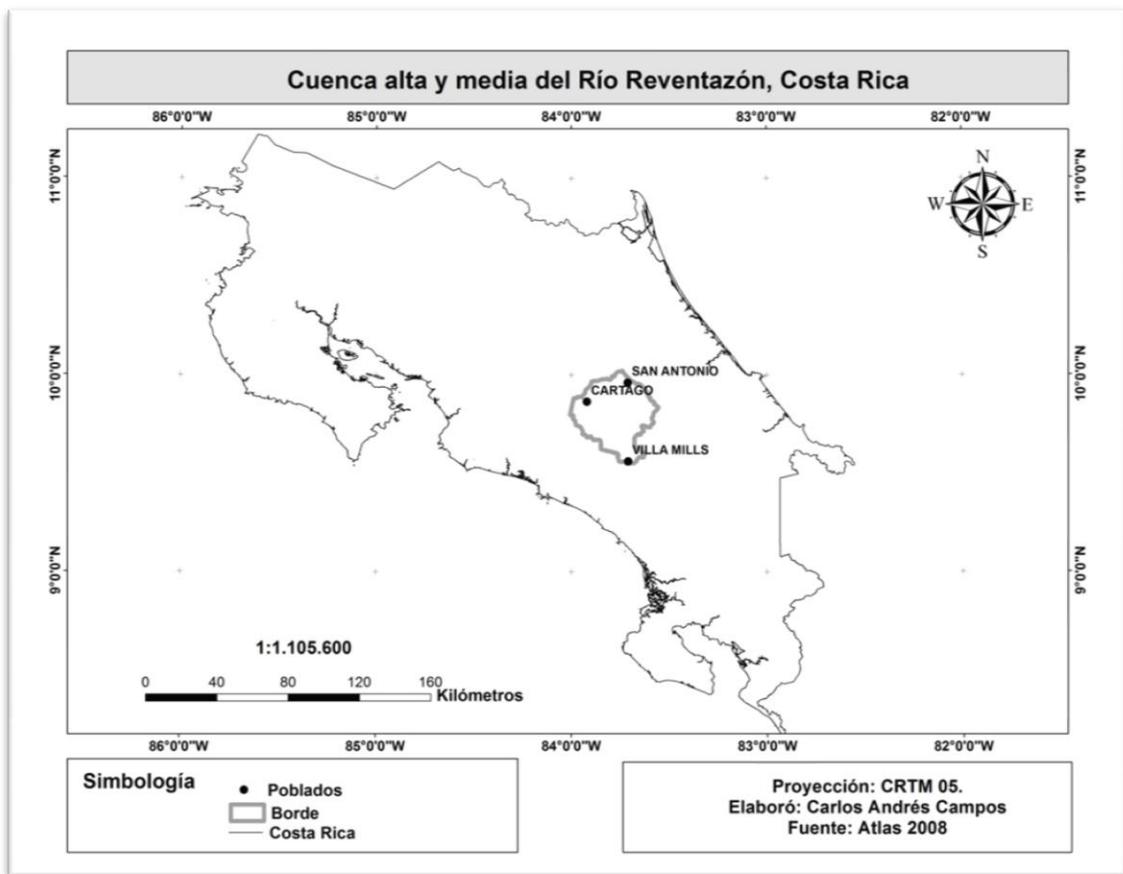


Figura 5. Ubicación de la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica.

La cuenca alta y media del Río Reventazón, se conforma de 11 subcuencas: Agua caliente-Reventado, Atirro, Birris, Chiz-Maravilla, Grande de Orosí, Guayabo, Navarro-Sombrero, Páez-Birrisito, Turrialba, Pejibaye, Tuis

✓ **Precipitación**

Por las características físicas y la ubicación geográfica la precipitación muestra grandes variaciones. La precipitación media sobre la cuenca es de 3500 mm donde el rango varía de los 1400 mm hasta los 8000 mm (PREVDA, 2008). La cuenca del Río Reventazón es considerada como la de más alta precipitación en todo el país, alcanzando algunas estaciones picos de hasta 10 000 mm. de lluvia en años específicos (Arce, 2004). La precipitación se caracteriza porque de noviembre a enero se generan lluvias por la presencia de frentes fríos; además existe una segunda época de lluvias que se intensifica en el mes de julio. Esto se debe a la incursión de los vientos alisios y al desplazamiento de la zona de convergencia intertropical hacia el sur. Ocasionalmente la precipitación máxima mensual es superior a 300 mm llegando a extremos de 800 mm o más (Barboza, 2005). En términos generales la cuenca muestra características de precipitación típicas de la vertiente Caribe de Costa Rica, en la cual no se tiene una época seca claramente definida (PREVDA, 2008).

Descripción general de la metodología

El análisis de la cobertura comprendió diferentes etapas y procedimientos desde verificaciones de campo hasta operaciones de geoprocésamiento. La determinación de la cobertura, fue realizada mediante una clasificación supervisada. A partir de esta clasificación fue posible la realización de los diferentes análisis. A continuación se explican en detalle los procedimientos.

Obtención y elección de las imágenes de satélite

Las imágenes utilizadas corresponden a imágenes ASTER. Fueron suministradas por el Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe² (CATHALAC). El material suministrado por este centro, fueron imágenes georeferenciadas AST14, que contienen una corrección radiométrica y ortogonal. Los códigos de estas imágenes son:

- AST14OTH_00309092009161201_20100208091055_24828
- AST14OTH_00303302008161145_20100208091055_24825
- AST14OTH_00303302008161136_20100208091055_24819
- AST14OTH_00302042008160554_20100208091055_24815
- AST14OTH_00301152010161159_20100208091105_24903
- AST14OTH_00301152010161150_20100208091055_24829

Verificación de campo

La verificación fue posible mediante la realización de giras de campo, donde se localizaron zonas de cobertura homogénea. En cada cobertura homogénea fue tomado un punto de control, para esto se empleó una unidad de GPS, marca Garmin, modelo 60Scx. En este procedimiento se procuró obtener puntos con un error de aproximación menor a 7 metros. En total se tomaron 450 puntos de control en las diferentes coberturas.

Análisis de imágenes

Para poder realizar la clasificación, fue necesario realizar el preprocesamiento, que se detalla a continuación.

² www.cathalac.org

- **Creación de imágenes falso color**

Para crear las imágenes falso color, se utilizaron las bandas 1, 2, 3N, 4 y 5; considerando que las primeras tres, poseen una resolución espacial de 15 metros y las últimas dos, de 30 metros. Fue necesario pasar estas últimas a una resolución de 15 metros. Esto fue posible mediante la operación *Data Export Data* disponible en ArcMap 9.3.

Al contar con todas las bandas en una misma resolución espacial se procedió a crear la imagen falso color, mediante la herramienta *Composite bands* disponible en el ArcToolbox de Arc Gis 9.3.

- **Pretratamiento de las imágenes**

El área de estudio fue dividida para su respectiva clasificación en dos grandes regiones:

- El área con una altura sobre el nivel de mar superior a los 1700 metros.
- El área con una altura sobre el nivel del mar inferior a los 1700 metros.

La división se realizó previendo el efecto que podrían estar ocasionando las nubes en el comportamiento espectral de las diferentes coberturas. El procedimiento utilizó la capa de relieve (CATIE, s,f), para separar las áreas.

Una vez que la cuenca fue dividida en estas dos grandes secciones, se procedió a segregar las áreas de clasificación de acuerdo a la cobertura de las imágenes, ya que para cubrir el territorio bajo estudio, fue necesario utilizar varias imágenes (Figura 6).

Al contarse con los polígonos de las áreas y las imágenes falso color se procedió a recortarlas, para así poder realizar la clasificación separada por áreas. Para cortar

las imágenes se usó la herramienta *Extract by Mask* disponible en ArcToolbox de Arc Gis 9.3.

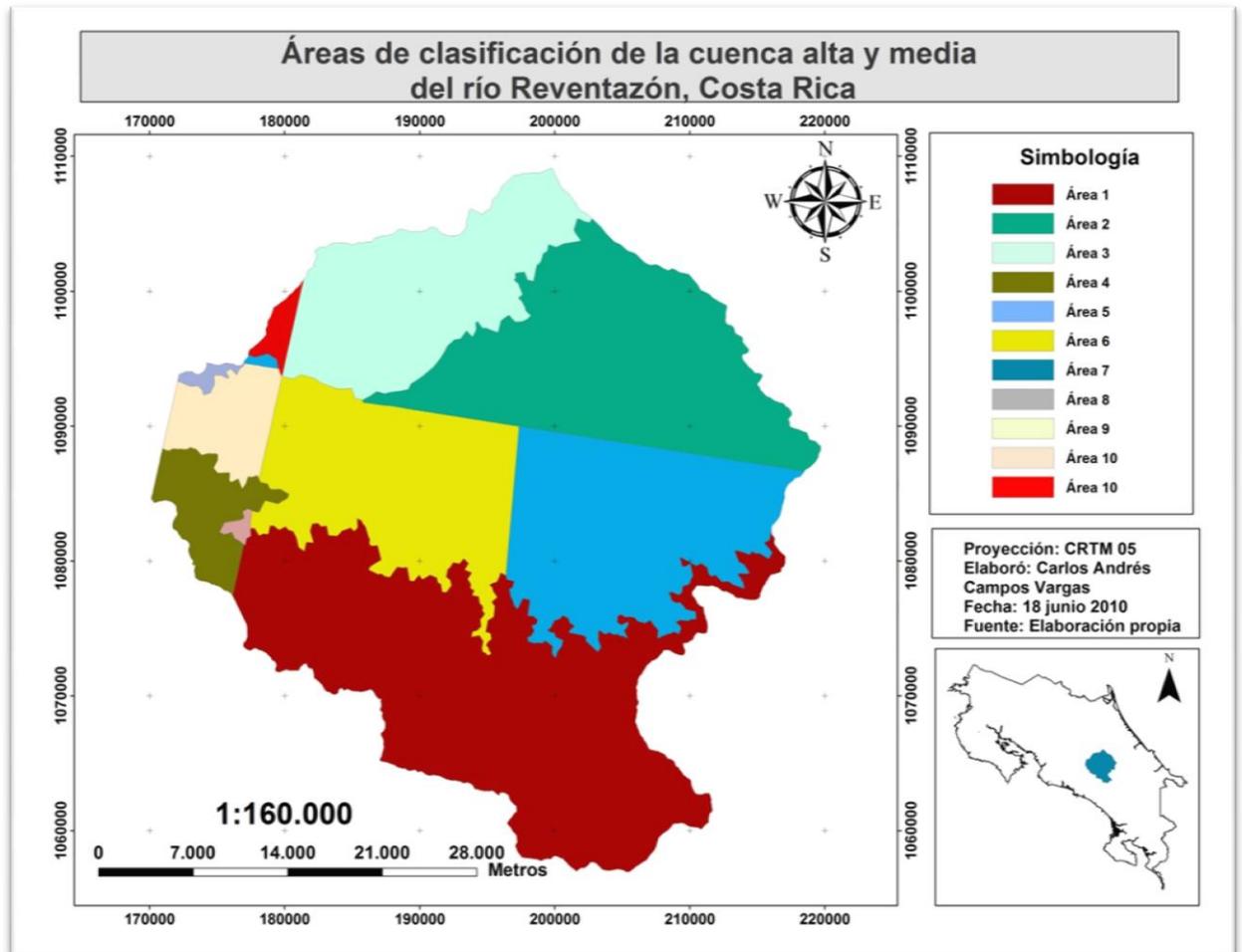


Figura 6. Áreas de clasificación de la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica, mediante imágenes ASTER 2010.

Clasificación supervisada

Para la clasificación se siguió la metodología utilizada por Soto (2005), la cual establece que primero se debe obtener el mayor número de coberturas posibles para luego agruparlas por la similitud entre ellas.

El proceso de clasificación se realizó en el software Erdas Imagine 8.4, mediante el establecimiento de áreas de entrenamiento o AOI, donde mediante un algoritmo matemático de similitud, el programa agrupa los píxeles similares en la imagen, a los de las áreas entrenamiento. Las áreas de entrenamiento fueron establecidas dentro de lo posible en zonas con una cobertura homogénea, para evitar confusiones entre clases de cobertura.

Una vez creadas las AOI, éstas se constituyeron en las firmas espectrales de las diferentes coberturas, por lo cual fueron verificadas, para validar que presentaran una tendencia similar entre firmas de una misma cobertura.

Comprobadas las firmas, se procedió a realizar la clasificación. Para esto se utilizó el algoritmo *Maximum Likelihood*, el cual establece la máxima similitud entre píxeles en una imagen.

De esta clasificación se obtuvo un total de 17 clases de cobertura, las cuales se mencionan a continuación:

- Agua/Río
- Áreas urbanas
- Bosque
- Bosque secundario
- Café
- Café arbolado
- Caña
- Charral
- Cultivos agrícolas
- Embalse/Laguna
- Lirios
- No datos
- Nubes
- Páramo
- Perennes
- Potrero
- Terreno desnudo

Validación de la clasificación

Para realizar la validación se utilizaron 200 puntos de control, los cuales fueron seleccionados al azar del total de puntos de la verificación de campo (por tal motivo, no todas las coberturas fueron cubiertas por estos puntos, algunas, sólo contaron con un punto de control).

Seleccionados los puntos, se realizó un *intersec*, entre la capa de puntos de control (cobertura real) y la capa de cobertura (cobertura clasificada), mediante la extensión Hawth's Tool's para ArcMap 9.3. Una vez que se obtuvo la intersección entre lo real y lo clasificado se creó una matriz de error, también llamada matriz de confusión. La matriz de error se conforma de filas y columnas, en donde se ubican los valores que expresan el número de píxeles de referencia asignados a una categoría particular, en relación con la verdadera categoría verificada con la información auxiliar (Speranza y Zerda, s.f.).

Para indicar la veracidad de la clasificación, fue necesario calcular la exactitud total; para esto se calculó la exactitud del productor y del usuario, las cuales se indican a continuación:

- **Exactitud del productor:** Es la división entre número de píxeles correctamente clasificados en cada categoría y el número de píxeles de referencia utilizados para dicha categoría. Indica la probabilidad de que un píxel de referencia sea clasificado correctamente. Su función es medir el error por omisión, el cual se produce cuando un píxel en el terreno posee una cobertura determinada y en el mapa no se le asigna dicha clase (Jensen, 1996).

$$PP(\%) = \frac{X_{ii}}{X_{+i}} \times 100$$

Donde:

PP (%), es la precisión del productor en porcentaje.

X_{+i} , son los totales marginales de la columna i.

X_{ii} : es el valor de la diagonal de dicha columna.

- **Exactitud del usuario.** Se calcula dividiendo el número de píxeles correctamente clasificados en cada categoría por el número total de píxeles que fueron clasificados en dicha categoría. Muestra la probabilidad de que un píxel clasificado en el mapa verdaderamente represente esa categoría en la realidad (Story & Congalton, 1986).

$$PU(\%) = \frac{X_{ii}}{X_{i+}} \times 100$$

Donde:

PU (%), es la precisión del usuario en porcentaje.

X_{i+} , son totales marginales de la fila i.

X_{ii} , es la diagonal de dicha fila.

La probabilidad de que los resultados de la matriz de error proveniente de la clasificación fueran producto del azar, se calculó mediante el estadístico Kappa (Kath), el cual mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad, y el que podría ser producto simplemente del azar.

$$K_{\text{hat}} = \frac{N \times \sum_1^r X_{ii} + \sum_1^r (X_{ii} \times X_{+i})}{N^2 - \sum (X_{i+} \times X_{+i})}$$

Donde:

r es el número de filas en la matriz

X_{ii} es la suma de observaciones en la fila i, y columna i (los valores en la diagonal mayor).

X_{i+} , es el total de observaciones en la fila i (el total en la fila i a la derecha de la matriz).

X_{+i} es el total de observaciones en la columna i (total en la columna i debajo de la matriz).

N es número total de observaciones o puntos de control usados en la validación.

El estadístico de Kappa, expresa cuanto más precisa es la clasificación con lo que habría de esperarse por el azar. El rango de valores va de 0 a 1. Un valor de 1 significa que la clasificación es totalmente independiente del azar (condición ideal) y 0 que los datos tienen una distribución completamente aleatoria (Puig, 1996).

La determinación del Kappa se realizó con el software Minitab 15, mediante una prueba de tabulación cruzada y Chi cuadrada.

Análisis de cambio de cobertura

Se analizó el cambio de la cobertura en el periodo 2000 – 2010, para esto se comparó la clasificación hecha en el año 2010, con una clasificación realizada en el año 2000, por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). La clasificación del año 2000 fue realizada por medio de imágenes satelitales Landsat TM. Los detalles de la generación de la capa de cobertura del año 2000, son desconocidos, en cuanto a programa utilizado, áreas de entrenamiento, etc. Ya que solo fue suministrada la capa de cobertura del año 2000.

Una vez que se tuvieron las capas de cobertura de los diferentes años, se procedió a realizar un *intersect*, en Arc Gis 9.3. Esta operación genera una capa donde en una columna aparece la cobertura del año 2000, y en la otra la cobertura de año 2010, divididas según la interacción de las áreas, en los diferentes años.

A partir de la capa de cambios generada, se realizó una tabla dinámica en Excel, creando una matriz de cambios, para así lograr observar los cambios en cuanto a hectáreas de las diferentes coberturas, en el periodo evaluado.

El análisis de la matriz de cambios, se da mediante la comparación de filas y columnas. La primera columna corresponde al año 2000 y la primera fila al año 2010. Así los valores que se encuentren en una misma columna pero en diferente fila son valores que se suman a la cobertura de esa columna. Por el contrario valores en una misma fila, pero diferente columna es área perdida por la cobertura del año 2000 al 2010.

Al generarse la matriz de cambios, fue posible calcular la tasa de cambio anual. Para esto se utilizó la fórmula propuesta por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (1996), citada por Dupuy *et al* (2006):

$$r = \left\{ \left[1 - \frac{\sum P - \sum G}{A_1} \right]^{1/n} - 1 \right\} \times 100$$

Donde:

r, tasa porcentual de cambio anual

n, número de años entre ambas fechas.

P, sumatoria de las áreas de la categoría analizada que cambiaron a diferente categoría.

G, sumatoria de otras coberturas que cambiaron a la categoría analizada.

A₁, Área de la categoría analizada al comienzo del período.

Relación entre la Capacidad de Uso y la Cobertura para el año 2010.

Para establecer la relación entre la Capacidad de Uso y la Cobertura actual, se utilizó la información disponible en la capa de Capacidad de Uso (CCT, sf). Así por medio de una operación de *intersect*, entre la capa de Capacidad de Uso y la de Cobertura del año 2010, se estableció esa relación.

El producto de esa intersección, correspondió a una capa donde en la primera columna apareció la capacidad, en la segunda columna la cobertura 2010, y en la tercer columna el número de de hectáreas de cada interacción. A partir de esto se creó en Excel una tabla dinámica, para visualizar así las interacciones.

Estimación de la erosión hídrica en la cuenca para el año 2010

Para determinar la erosión en la cuenca se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.

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

Para el caso del Factor de erosividad (R), no pudo ser posible la recopilación de todos los datos en una sola fuente por lo tanto se tuvo que recabar información de autores como, Vahrson (1990), Calvo (1996), y Calvo, *et al* (2009), para este último caso, lo que se utilizó fue la aproximación del Factor R mediante la siguiente fórmula:

$$R = 1998,26 - 1,558 (\text{Elev}) + 15,56 (\text{Ene}) + 11,53 (\text{May})$$

Donde la variable dependiente es el factor de erosividad de lluvia en MJ mm (m² h)⁻¹. Las variables independientes son: Elev = elevación en metros, Ene (Enero), May (Mayo), = lluvia mensual en mm para cada uno de estos meses.

Sin embargo, los valores disponibles de R, tuvieron que ser corregidos mediante la propuesta de Vahrson (1990), que establece una multiplicación del factor por 0.1702. Esto con el fin de transformar las unidades a lo establecido por el SI (Sistema Internacional de Unidades).

El Factor de cobertura, utilizado fue el reportado por Lianes (2008), quien realizó el cálculo del Factor de Cobertura para la subcuenca del río Birrís, la cual pertenece a la cuenca del Río Reventazón. Para la cobertura de terreno desnudo, se utilizó el valor reportado por INETER (2005).

Para los factores K y LS, se utilizó los valores reportados por Calvo (1996), para Costa Rica.

Efecto del cambio del Factor cobertura de la EUPS

Como se mencionó anteriormente el Factor de cobertura vegetal (C), representa el potencial de pérdida de suelo, en función de las diferentes coberturas para condiciones ambientales similares. Por tal motivo puede ser un indicador de los cambios en el potencial de erosión, ya que éste influye directamente en dicho potencial de erosión.

Bajo este supuesto, se comparó la cobertura en el año 2000 versus la cobertura en el año 2010, para así estimar el impacto que los cambios de cobertura ocasionan en la cuenca. Así se dice que pasar de una cobertura donde el suelo está expuesto a una donde el suelo está cubierto por algún tipo de vegetación, trae consigo un cambio positivo en la disminución de la erosión.

El proceso de estimación, tomó como base la capa de cambios de cobertura del periodo 2000 – 2010. A partir de ésta se asignaron las categorías: positivo, negativo, estable, y no aplica según el caso. La asignación de estas categorías se basó en los valores reportados por Lianes (2008), para el Factor de cobertura.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Adquisición de imágenes satelitales

En términos generales, las imágenes suministradas por Cathalac, resultaron de una excelente calidad, solamente la imagen AST14OTH_00303302008161145_20100208091055_24825, tuvo inconvenientes en los resultados de clasificación. Esto se debió a la presencia de una nube de baja densidad en gran parte de la imagen, lo que ocasionó alteraciones en el comportamiento espectral de las coberturas presentes.

Otro aspecto importante de mencionar, es que una parte de la cuenca no pudo ser clasificada, ya que no fue posible adquirir imágenes de esa zona. Dicha área está comprendida entre las coordenadas 84°00` Oeste y 84°25` Oeste.

Cobertura de la cuenca alta y media del Río Reventazón, para el año 2010

Luego de realizar la clasificación se obtuvieron 17 clases de cobertura (Figura 7), como se puede observar una de las clases corresponde a "No datos". Esta categoría, cubre áreas donde no fue posible clasificar la cobertura, debido a la sombra de las nubes.

La cobertura forestal, fue dividida en cuatro categorías: bosque, bosque secundario, charral y páramo. La categoría de bosque abarca coberturas como bosque primario y sucesiones avanzadas de bosque secundario, que por su edad, estructura y área foliar no son diferenciables del bosque primario. Por su parte el bosque secundario, engloba estadios sucesionales de bosque secundario, menos avanzados, que si pudieron ser diferenciados. La tercera categoría forestal, correspondió a la clase charral, que es el primer estadio sucesional del bosque secundario. Finalmente se incluyó el páramo, el cual se localiza en la parte alta de Cerro Bella Vista (Cerro de la Muerte) y en el Volcán Irazú.

Las áreas clasificadas como potrero abarcan, potreros limpios (solo pastos), potreros arbolados (con árboles dispersos) y potreros con cercas vivas. Estas clases se agruparon, ya que al ser evaluadas presentaron una baja separabilidad.

La clase ornamentales, corresponde a cultivos como helechos, los cuales son cultivados mediante la utilización de “sarán”, lo que la hace fácilmente diferenciable. Esta clase fue llamada de esta manera ya que la clasificación realizada en el año 2000, agrupó estos cultivos dentro de ornamentales.

Los cultivos perennes se refieren principalmente a plantaciones de macadamia o cítricos. En la clasificación del año 2000, esta clase agrupó áreas que correspondían a cultivos de caña y café, los cuales por razones desconocidas no fueron agrupadas en sus clases respectivas, ya que estas clases si fueron identificadas en esa clasificación.

Los cultivos agrícolas, se refieren a cultivos anuales, ejemplo de ello son los cultivos hortícolas, en la región norte de Cartago.

La clasificación de ríos, solo se realizó en los casos que fue posible detectarlos, en muchos casos los bordes de los ríos están cubiertos de árboles por lo cual, se interfiere la visión de la imagen ya que se registra cobertura forestal y no agua.

La clase embalse, se compone de lagunas, así como embalses artificiales, de éstos son fácilmente visibles los embalses de Cachí y Angostura, localizados en la cuenca media. Una particularidad de la clasificación se presenta en el embalse del proyecto hidroeléctrico Cachí, ya que una parte considerable de éste, está cubierto por lirios, los cuales para este trabajo si fueron diferenciables y constituyen una categoría.

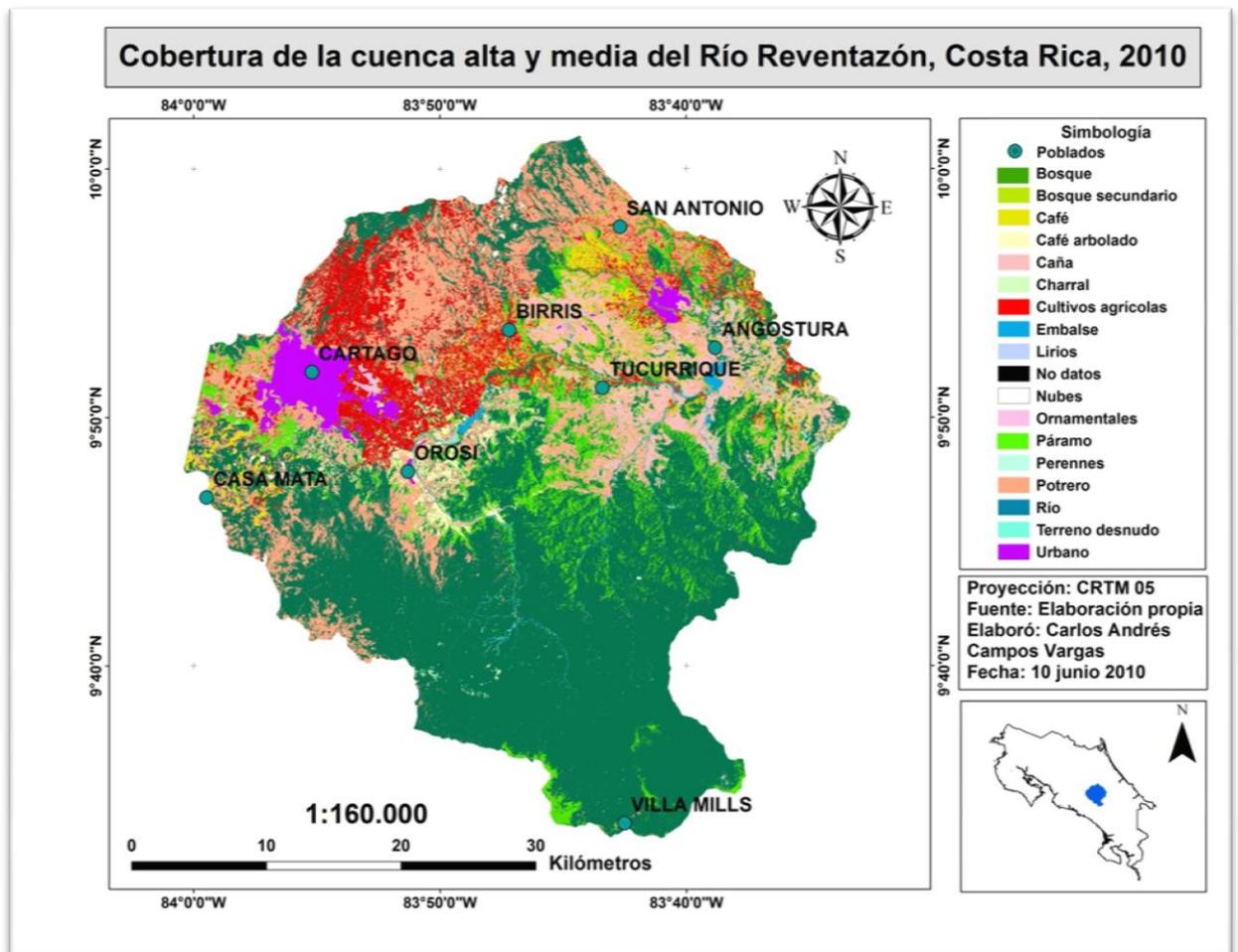


Figura 7. Cobertura de la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica, 2010.

Luego de comentar las coberturas presentes y de qué están compuestas, se discutirá acerca del porcentaje de cobertura de cada una (cuadro 2), para así tener una idea del paisaje presente en la cuenca alta y media del Río Reventazón.

Es notable, el dominio de la categoría bosque, éste representa el 50 % (75 762 ha) del área total de la cuenca alta y media. Ahora bien, como se mencionó anteriormente la cobertura forestal, no está exclusivamente representada por la clase bosque. Por lo tanto, la cobertura forestal se compone de la suma de las áreas de bosque (75 762 ha), bosque secundario (11 180 ha), charral (405 ha) y páramo (835

ha), lo que representan cerca del 59% de la cobertura total. Este resultado es similar al reportado por Calvo, *et al* (2009), que menciona que la cobertura forestal de la provincia de Cartago es del 65%. Esta dominancia de la categoría bosque se explica por la presencia de grandes áreas protegidas en la cuenca. Específicamente en esta cuenca, un total 61 000 hectáreas se encuentran dentro de alguna categoría de protección, comprendidas en varias áreas protegidas como: el Parque Nacional Tapantí, la Reserva Biológica La Marta, El Corredor Biológico Cordillera Volcánica Central y otros (anexo 2).

La segunda categoría de mayor importancia, corresponde a los potreros. Estos abarcan el 18,1 % (27 490 ha) del territorio. La mayoría se localizan en la parte noreste de la cuenca y un porcentaje importante son destinados a ganadería lechera y afines.

Otra de las coberturas con gran relevancia, son los cultivos agrícolas que cubren el 8,5 % (12 861 ha). Estos se agrupan en su mayoría en la región norte de la cuenca, específicamente al norte de la ciudad de Cartago. En su mayoría se componen de cultivos hortícolas.

Los cultivos de café representan en su totalidad el 5,4 % (8 066 ha). No obstante, para este trabajo fueron subdivididos en dos categorías: café (3,4 %) y café arbolado (2,0%). La clase café representa los cultivos limpios de café, es decir café sin sombra, mientras que el café arbolado corresponde a café con sombra. La sombra en los cafetales se asocia con especies forestales como: Poró, Eucaliptos (varias especies), Casuarina, Cachá y Laurel, entre otras.

La caña ocupa el 5,3 % (7 994 ha) del área bajo estudio. Estos cultivos se concentran en dos regiones, cerca de Juan Viñas y en los alrededores de Turrialba. Son fácilmente identificables debido a los enormes bloques de cultivo, sin embargo cuando son aprovechados, pueden ser confundidos con terreno desnudo, ya que una

práctica común es el quemar el remanente del cultivo, ocasionando confusiones en la teledetección.

Cuadro 2. Número de hectáreas y porcentajes de la cobertura de la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica, 2010.

| Cobertura | Hectáreas | % | Cobertura | Hectáreas | % |
|--------------------|------------------|----------|-------------------|------------------|------------|
| Áreas urbanas | 3 950 | 2,6 | Lirios | 43 | 0,0 |
| Bosque | 75 762 | 50,0 | No datos | 399 | 0,3 |
| Bosque secundario | 11 180 | 7,4 | Nubes | 367 | 0,2 |
| Café | 5 101 | 3,4 | Ornamentales | 282 | 0,2 |
| Café arbolado | 2 965 | 2,0 | Páramo | 835 | 0,6 |
| Caña | 7 994 | 5,3 | Perennes | 221 | 0,1 |
| Charral | 405 | 0,3 | Potrero | 27 490 | 18,1 |
| Cultivos agrícolas | 12 861 | 8,5 | Río | 720 | 0,5 |
| Embalse | 314 | 0,2 | Terreno desnudo | 749 | 0,5 |
| | | | Área total | 151 637 | 100 |

Validación de la clasificación de imágenes ASTER, del año 2010

Refiriéndose a la validación de este trabajo, como se mencionó con anterioridad, se recurrió a la metodología tradicional. Esta consistió en la creación de una matriz de error, el cálculo de la exactitud, y estimación del Kappa. Estos resultados se detallan a continuación.

- **Matriz de error**

Se observan confusiones entre lo real y lo clasificado (cuadro 3). Las coberturas en las que presentó esta confusión corresponden a: bosque, bosque secundario, café, café arbolado y potrero.

Analizando en detalle, la interacción entre lo real y lo clasificado. Se tiene que la clase bosque, en una ocasión fue clasificada como bosque secundario. Para el bosque secundario, este fue mal categorizado en tres ocasiones, en una ocasión se

confundió con café arbolado, y en las otras dos con bosque. El café por su parte, una vez fue clasificado como café arbolado. El café arbolado presentó confusiones con café, con bosque secundario y potrero (una ocasión en cada categoría).

El hecho, que se dieran estas confusiones, no corresponde a un caso aislado. En la amazonia peruana, utilizando sólo la información espectral se observó, que los bosques definidos presentaban una superposición espectral significativa. Para ese estudio solo pudieron separarse los bosques que presentaron diferencias estructurales marcadas (Hill & Floddy, 1994).

Existen diversos factores que ocasionan esas confusiones. Gallo (1999), menciona que la poca separabilidad entre los tipos de bosque se debe, a la similitud de los rasgos espectrales de los bosques. Estos rasgos espectrales dependen, de la estructura de bosque, en particular de la altura, continuidad del dosel, y la densidad de árboles (Hill & Floddy, 1994).

No obstante, la clasificación de tipos de bosque puede realizarse con una buena precisión, utilizando imágenes satelitales combinadas con datos auxiliares (Gallo, 1999). Tomando en cuenta esto, para la clasificación realizada en la cuenca alta y media del Río Reventazón, se trabajó con imágenes ortorectificadas, así como datos de campo sobre la cobertura presente (puntos de control).

Otra de las coberturas que presentó confusiones, se refiere al café arbolado. Esta se confundió con bosque secundario y café. Probablemente estas confusiones sean ocasionadas más por las características de las imágenes ASTER, que por la clasificación; ya que Lu, *et al* (s.f), reportó en un estudio comparativo de tres sensores (Spot, Landsat y ASTER), que las imágenes ASTER mostraron confusiones entre bosques secundarios y cultivos agroforestales. Sin embargo, una manera de disminuir esas confusiones, constituye el uso de bandas SWIR, las cuales corrigen un poco ese error, pero no lo desaparece Lu, *et al* (s.f), por eso este estudio utilizó las bandas 4 y 5 como parte de la combinación de bandas.

Cuadro 3. Matriz de error para evaluar la exactitud de los resultados finales de la clasificación supervisada, para la cuenca alta y media del Río Reventazón, 2010.

| Clasificación | Uso verdadero | | | | | | | | | | | | Total | |
|---------------|---------------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|------------|
| | B | BS | C | Ca | Cñ | Ch | Cag | E | L | Pr | Po | Td | | U |
| Bosque | 29 | 2 | | | | | | | | | | | | 31 |
| B. Secundario | 1 | 17 | | 1 | | | | | | | 2 | | | 21 |
| Café | | | 8 | 1 | 1 | | | | | | | | | 10 |
| C. arbolado | | | 1 | 1 | 13 | | | | | | | | | 15 |
| Caña | | | | | 18 | | | | | | | | | 18 |
| Charral | | | | | | 2 | | | | | | | | 2 |
| Cul. Agric. | | | | | | | 25 | | | | | | | 25 |
| Embalse | | | | | | | | 3 | | | | | | 3 |
| Lirios | | | | | | | | | 1 | | | | | 1 |
| Perennes | | | | | | | | | | 1 | | | | 1 |
| Potrero | | | | 1 | | | | | | | 63 | | | 64 |
| Terreno desn. | | | | | | | | | | | | 2 | | 2 |
| Urbano | | | | | | | | | | | | | 7 | 7 |
| Total | 30 | 20 | 9 | 16 | 19 | 2 | 25 | 3 | 1 | 1 | 65 | 2 | 7 | 200 |

Donde:

| | | |
|------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| B: Bosque | Cñ: Caña | L: Lirios |
| BS: Bosque secundario | Ch: Charral | Po: Potrero |
| C: Café | Cag: Cultivos agrícolas | Td: Terreno desnudo |
| Ca: Café arbolado | E: Embalse | U: Urbano |

Exactitud de la clasificación de imágenes ASTER, del año 2010

Los resultados de precisión muestran una precisión total del 91% (cuadro 4), lo cual supera el valor mínimo de exactitud de acuerdo a López, *et al* (2002).

Diferentes estudios muestran resultados similares. Leclerc (1996) encontró, para Costa Rica, a partir de una clasificación realizada con Landsat TM, una precisión del 77%. Gallo (1999), para la identificación de bosques primarios en la Zona Norte de

Costa Rica reportó un 89% de exactitud global. Calvo, *et al* (1999) en el estudio de cobertura forestal de Costa Rica reportó una precisión global del 88%. Por su parte Sánchez, *et al* (2001), en un estudio de la deforestación en Costa Rica utilizando imágenes Landsat 5 TM, reportó un 89% de exactitud.

Otros estudios como el de Coronado (2001), el cual identificó bosques secundarios en la región Huetar Norte, obtuvo valores entre el 82 y el 90%, ya que este trabajó con tres zonas de estudio (Zona 1, 82%; Zona 2, 90%; Zona 3, 90%). Méndez (2001), en un análisis del tipo de uso de la tierra en la cuenca del Río Turrialba, reportó un 67%. Milla (2008) para un estudio de cambio de uso de la tierra en las Áreas de Conservación Osa y Tempisque obtuvo un 92,5% de exactitud.

Como se pudo observar este estudio presentó un valor de exactitud total, superior o igual a muchos de los estudios realizados en Costa Rica, lo que indica que el método utilizado para la clasificación es efectivo y confiable, en cuanto a los estadísticos de precisión.

Otro indicador complementario, de la veracidad de la clasificación corresponde al índice de Kappa, para este trabajo se obtuvo un Kappa de 0,909505. Como se observa es un valor cercano a 1, lo que indica que la clasificación no está influenciada por el azar.

El resultado de Kappa, es comparable con los valores de Puig (1996), en la identificación de fases de desarrollo de bosques secundarios húmedos tropicales de tierras bajas en Costa Rica, que reporta un valor de Kappa 0,8099. Por su parte, Gallo (1999) para la identificación de tipos de bosques primarios en la Zona Norte, reporta un índice de Kappa de 0,8481. Asimismo Milla (2008), para la determinación del cambio de coberturas para las Áreas de Conservación Osa y Tempisque obtuvo un índice de Kappa de 0,96.

Cuadro 4. Valores de precisión del productor y el usuario para la determinación de la cobertura de la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica, 2010.

| Exactitud de productor (%) | | | Exactitud del usuario (%) | | | | |
|----------------------------|-----|------------|---------------------------|-------------|-----|------------|-----|
| B: | 97 | E: | 100 | B: | 94 | E: | 100 |
| BS: | 85 | L: | 100 | BS: | 81 | L: | 100 |
| C: | 89 | Pr: | 100 | C: | 80 | Pr: | 100 |
| Ca: | 81 | Po: | 97 | Ca: | 87 | Po: | 98 |
| Cñ: | 95 | Td: | 100 | Cñ: | 100 | Td: | 100 |
| Ch: | 100 | U: | 100 | Ch: | 100 | U: | 100 |
| Cag: | 100 | | | Cag: | 100 | | |
| Exactitud total 91% | | | | | | | |
| Kappa 0.909505 | | | | | | | |

Veracidad del método utilizado

Es claro el hecho que para realizar la verificación de la clasificación, los puntos de validación deben ser seleccionados y separados al azar del total de puntos de control (como se hizo en este trabajo), no obstante, luego de obtener los resultados, surgió la pregunta sobre que tan veraz es esa validación. Esta interrogante surgió ya que varias coberturas sólo contaron con un punto de control y otras ni siquiera con un solo punto. Que tan válido es que coberturas con gran representatividad en la cuenca hubiesen sido evaluadas con unos pocos puntos, o se diera el caso de no ser evaluadas.

Por esta razón, es necesario sugerir que en futuros trabajos de esta naturaleza, sea considerado lo anteriormente dicho. Para corregir esto, pueden utilizarse varios métodos, sin embargo, se limitará a mencionar una posible solución. Ésta consiste en realizar un preclasificación, podría recurrirse a una clasificación no supervisada, con la cual se distinguirían las clases generales y un porcentaje de cobertura aproximado. Una vez obtenidas las posibles coberturas, realizar una estratificación del área de estudio, por categoría y así asignar la importancia de cada una, para así establecer un número mínimo de puntos de control. El procedimiento sugerido es

similar a un muestreo estratificado, donde el número de muestras de los estratos están en función del tamaño del estrato.

No obstante, si no es posible realizar una clasificación no supervisada, podría utilizarse una clasificación anterior del área de estudio, como punto base de partida; asumiendo que los cambios de cobertura no han sido drásticos.

Cambios de cobertura de la cuenca alta y media del Río Reventazón durante el periodo 2000 – 2010.

Para realizar la comparación de las coberturas (cuadro 5), fue necesario simplificar las clases determinadas en el 2010, para que concordaran con las del 2000, por lo tanto el análisis se hizo de acuerdo a las clases establecidas en el año 2000.

Es notable el cambio en la categoría agua sin embargo, se debe explicar que en la clasificación realizada en el año 2000, en esta clase únicamente se contempló el embalse de Cachí. Mientras en que la determinación de la cobertura del año 2010 fue posible determinar aparte de este embalse, los embalses de Angostura y de Río Macho, así como ciertas lagunas en la región. Inclusive se detectó un río considerable en el área del Parque Nacional Tapantí.

Otra cobertura que presenta incongruencias corresponde al área urbana, ya que se observa una disminución. Esto es debido a que la clasificación anterior, incluyó un gran porcentaje de terrenos como urbanos, los cuales no pertenecían a esta categoría. Por lo tanto en la clasificación del año 2010, estas áreas fueron reclasificadas como, pastos y cultivos agrícolas. Esto es fácilmente apreciable en la ciudad de Cartago y sus alrededores. Numéricamente en el año 2000 las áreas urbanas ocupaban 6 483 ha, mientras que en el año 2010 solamente 3 942 ha.

Es notable el cambio en las áreas clasificadas como perennes. En la clasificación realizada en el año 2000, una considerable cantidad de área de cultivos como caña, bosque y en su mayoría como potreros fueron agrupados dentro de esta categoría.

Por lo tanto, si se habla de la extensión de los perennes en el año 2000, éstos ocupaban 3021 hectáreas, mientras que en el año 2010, solamente abarcan 221 hectáreas.

En el año 2000, la clase charral ocupaba 5 969 ha; en la actualidad esta cubre únicamente 405 ha. Ese cambio es explicable por medio de la dinámica de bosques, la cual menciona que con el paso de los años las sucesiones de bosque secundario, serán regeneradas hasta llegar a un estado similar al bosque primario.

Otro cambio considerable corresponde al paso de áreas de potrero a bosque, donde 8 360 hectáreas regresaron a bosque, esto se comentará más adelante, en el porcentaje de cambio anual de coberturas.

Cuadro 5. Matriz de cambios de cobertura de la cuenca alta y media del Río Reventazón, periodo 2000-2010.

| Cobertura | 2010 | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|------------|--------------|------------|-------------|--------------|------------|---------------|
| | 2000 | A | Au | B | C | Cñ | Ch | Ca | O | Ot | P | Pr |
| A | 186 | 5 | 68 | 31 | 12 | 0 | 16 | 0 | 1 | 19 | 2 | 340 |
| Au | 37 | 2773 | 412 | 96 | 105 | 0 | 1134 | 41 | 24 | 1858 | 1 | 6483 |
| B | 304 | 121 | 69943 | 1576 | 1720 | 347 | 1307 | 0 | 656 | 5966 | 78 | 82019 |
| C | 66 | 231 | 1424 | 2244 | 990 | 0 | 1242 | 12 | 57 | 1722 | 23 | 8011 |
| Cñ | 77 | 54 | 678 | 617 | 2055 | 0 | 284 | 0 | 72 | 660 | 13 | 4511 |
| Ch | 83 | 21 | 4319 | 208 | 287 | 48 | 346 | 7 | 56 | 586 | 9 | 5969 |
| Ca | 49 | 117 | 1489 | 595 | 628 | 0 | 3452 | 21 | 158 | 3465 | 24 | 9998 |
| O | 0 | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 | 35 | 26 | 0 | 24 | 0 | 91 |
| Ot | 85 | 6 | 159 | 31 | 73 | 4 | 70 | 0 | 16 | 87 | 4 | 535 |
| P | 140 | 519 | 8360 | 2282 | 1577 | 6 | 4826 | 172 | 422 | 11917 | 58 | 30279 |
| Pr | 48 | 93 | 706 | 365 | 534 | 0 | 115 | 0 | 51 | 1100 | 10 | 3021 |
| Total | 1075 | 3942 | 87560 | 8047 | 7982 | 405 | 12827 | 281 | 1513 | 27403 | 221 | 151256 |

Donde

| | | | | | |
|------------|---------------|------------|------------------|------------|----------|
| A: | Agua | Cñ: | Caña | Ot: | Otros |
| Au: | Áreas urbanas | Ch: | Charral | P: | Pasto |
| B: | Bosque | Ca: | Cultivos anuales | Pr: | Perennes |
| C: | Café | O: | Ornamentales | | |

Tasa de cambio anual, para la cuenca alta y media del Río Reventazón (2000 – 2010)

Analizando la tasa de cambio anual (figura 8), es posible observar como el bosque natural presenta un leve aumento. Las causas posibles pueden explicarse por lo mencionado por Calvo (2009), donde un 44% la cobertura forestal nacional se encuentra bajo protección en diferentes unidades de conservación. Sumado a esto, la pérdida de potreros puede ser el factor clave en el aumento de bosque, ya que estos al ser abandonados se regeneran como bosque.

Calvo (2009) reporta los porcentajes de cobertura forestal para Costa Rica, por provincias, desde 1960 hasta el 2005. Así para Cartago fue un 64.3% en 2000 y 65.0% en 2005; la estabilidad de estos valores concuerdan con los presentados en esta investigación, dado que cabe recordar que el área de estudio está inmersa en la provincia de Cartago.

La recuperación de la cobertura de forestal, es resultado de una serie de factores, los cuales al unirse y presentarse las condiciones favorables para su desarrollo han desembocado en la regeneración de la cobertura forestal. Factores como la caída del precio internacional de la carne, el advenimiento del turismo como la actividad económica más importante del país, transición de una sociedad rural a una sociedad urbana, la intensificación de algunas actividades agropecuarias, el impulso de programas forestales y de conservación de recursos naturales son algunos de los factores (Calvo, 2009).

La pérdida de potreros no es un hecho aislado en esta cuenca o estudio, se ha reportado cómo en Costa Rica desde la década de los 90's, el abandono de potreros se ha intensificado (Kaimowitz, 1995). Entre 1984 y 1989, el área de bosque secundario en el país creció de 229 189 ha a 388 341 ha, y para el año 1995 se calculaba en 425 000 ha, donde se podría decirse, que el aumento se debe al abandono de potreros para ganado (Kaimowitz, 1995).

No obstante, la pérdida de potreros fue más evidente a partir de 1996, con la implementación del Programa de Pago de Servicios Ambientales, donde muchas áreas de potreros se dejaron en recuperación (Rodríguez y Sáenz, 2002). Tapia (2007), muestra en un estudio realizado en cuatro diferentes tipos de fincas en la Zona Huetar Norte, que las fincas sometidas al Programa de PSA, presentaron una pérdida en las áreas dedicadas a potrero, para el periodo 1992-2005. Brenes, (2009) reporta en un análisis multitemporal de cambio de uso de suelo y dinámica del paisaje en el Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca, que entre el año 2001 y el año 2008, el potrero perdió el doble de área de la que ganó.

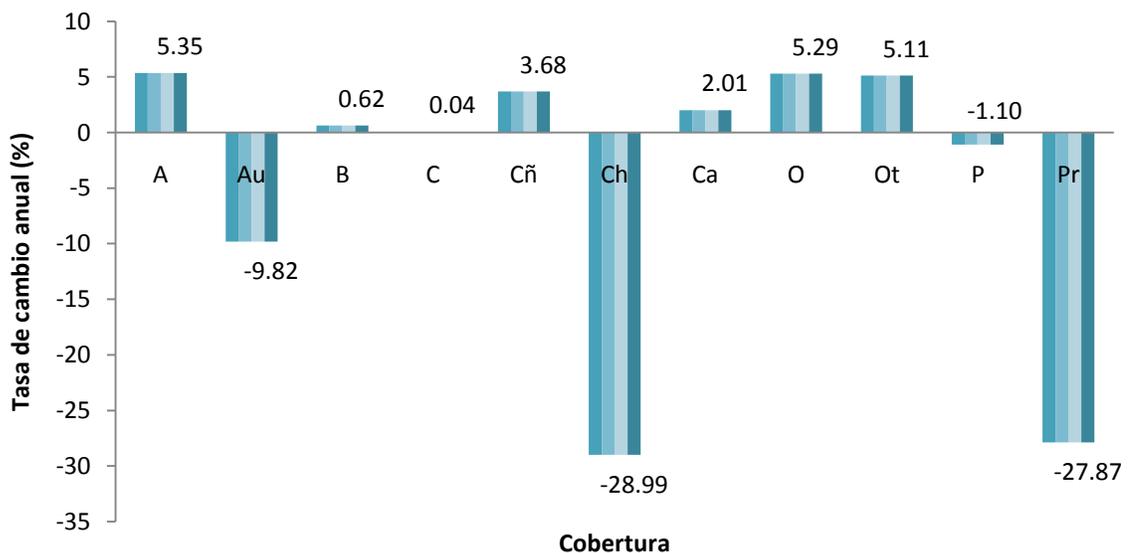


Figura 8. Tasa de cambio anual en porcentaje, en la cuenca alta y media del Río Reventazón (2000-2010).

Relación de la cobertura y la capacidad de uso, para la cuenca alta y media del Río Reventazón, 2010.

Los conflictos entre la cobertura actual y la capacidad de uso, generó cuatro categorías (figura 9), las cuales corresponden a uso correcto, subuso, sobreuso y no aplica. Esta última incluye coberturas como áreas urbanas, embalse/laguna, río, las cuales por sus características no pueden compararse con la capacidad de uso.

El principio en el que se basaron estas categorías consistió, en que las categorías de capacidad de uso de la tierra I, II, III y IV se consideran aptas para un uso agropecuario. La categoría de capacidad de uso V es apta para el establecimiento de potreros. La categoría VI, para cultivos permanentes. Las categorías VII, VIII y A.P. (Áreas Protegidas) se consideran aptas solamente para bosque natural (González, 2009).

Los conflictos entre la capacidad de uso y la cobertura, demostraron que un 51% (77 112 ha) de la cuenca posee un uso correcto, un 30% sobreuso (45 208 ha), y un 15% subuso (22 650 ha); es alarmante el porcentaje de área que es ocupada por la categoría sobreuso, ya que el desgaste del recurso suelo es significativo.

Se observa como la parte norte de la cuenca es la que presenta mayores problemas en cuanto a la capacidad y la cobertura. Entre las subcuencas en las que se presentan estos problemas se encuentran Agua Caliente-Reventado (parte noreste de ésta), Páez-Birrisito, Birris, Chiz-Maravilla, y Guayabo.

Contrario al caso anterior, la región sur de la cuenca, en su mayoría no presenta conflictos entre la capacidad y la cobertura, destacando las subcuencas del Río Grande de Orosí y Pejiballe. La ausencia de conflictos en esta zona es de gran relevancia, ya que parte de esta región pertenece a la cuenca alta del Río Reventazón, en la cual se presentan pendientes considerables y terrenos escarpados.

Dentro de las tierras sometidas a un sistema de producción y que no presentan conflictos, encontramos las utilizadas en cultivos perennes y semiperennes, como por ejemplo la caña en las cercanías de Turrialba y Pejiballe, así como otros cultivos como pastos cerca del Volcán Turrialba.

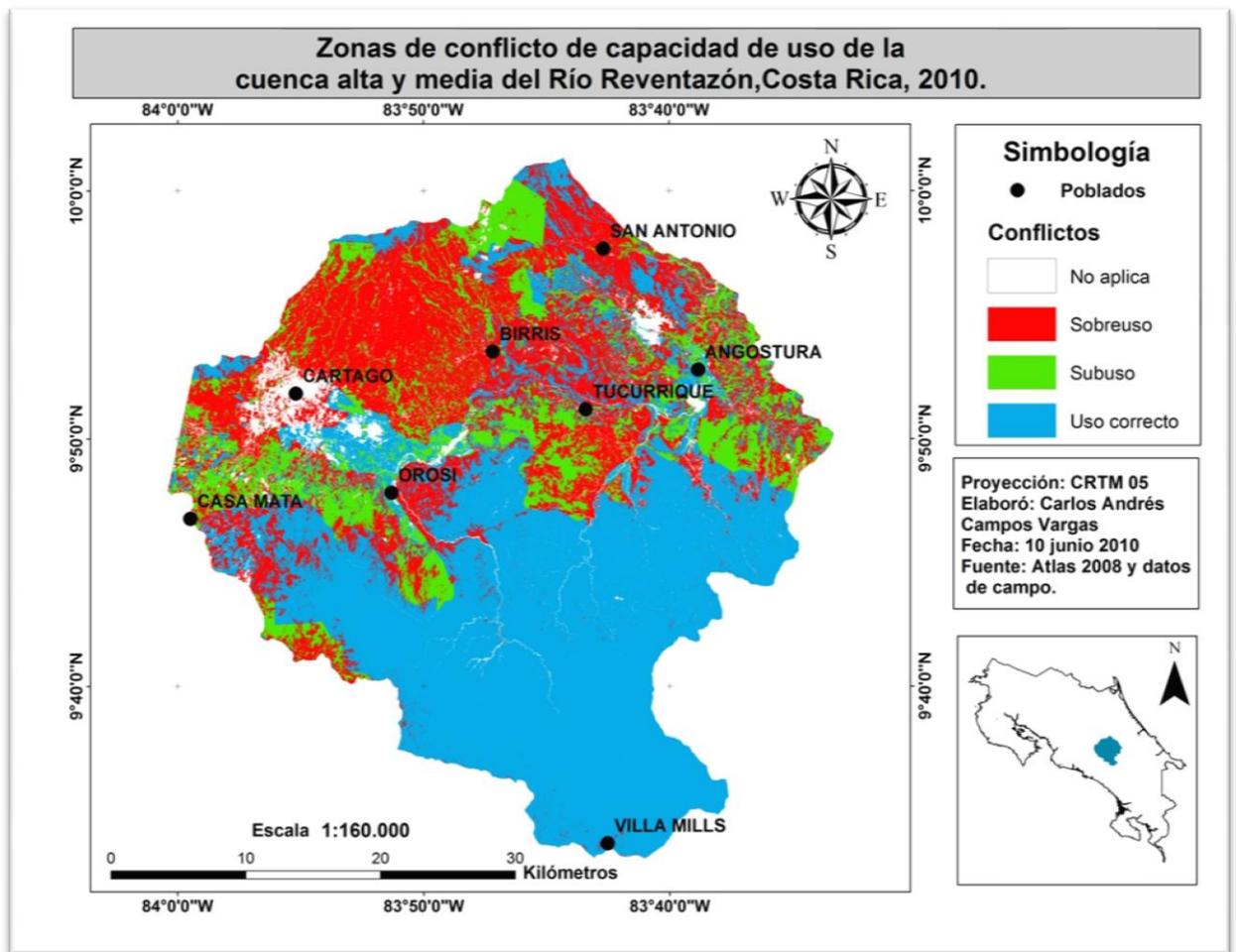


Figura 9. Zonas de conflicto de capacidad de uso de suelo, cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica.

En términos numéricos la relación entre la cobertura y la capacidad de uso, se analizó mediante el número de hectáreas en cada relación (cuadro 6).

Se pudo observar como 5 837 hectáreas de cultivos anuales, se desarrollan en terrenos donde la capacidad de uso de suelo es agropecuaria con limitaciones fuertes, lo que corresponde a un 45% del total de cultivos anuales. Otro 30% de los cultivos anuales (3 830 ha), se dan en una capacidad de uso de Cultivos perennes.

El análisis de la cobertura forestal, mostró que un 59% (51 819 ha) de las áreas de bosque, se encuentran en zonas con capacidad de uso de área protegida. Por otro lado, un 19% (16 434 ha) son aptas para el manejo de bosque. Sin embargo, 14 882 ha (17% del área forestal), pueden ser usadas para cultivos perennes, mientras que en la actualidad están cubiertas de bosque, ocasionando un subuso de los terrenos.

Un 21% (5 778 ha), de la clase pastos se encuentra en la categoría agropecuario con limitaciones fuertes. Este porcentaje es preocupante ya que por las características de la cobertura y capacidad en la que se desarrolla, el potencial de erosión hídrica de los suelos, puede incrementarse. Otro 47% (12 840 ha), se desarrolla en capacidad de cultivos permanentes.

Los cultivos perennes ocupan unas 4 652 hectáreas (56%) en terrenos con capacidad de cultivos permanentes, por lo cual, se ubican en la categoría adecuada. Sin embargo, un 23 % que es equivalente a 1 872 hectáreas poseen un conflicto con la categoría de manejo de bosque ya que se encuentra en esta capacidad, ocasionando un sobreuso.

Un 66% (5 445 ha) de los cultivos semiperennes, se localizan en tierras con capacidad de cultivos permanentes; por lo tanto, se asume que existe un desgaste en estas tierras, el cual puede no ser significativo pero se da.

La clase de terreno desnudo por no conocerse su posterior utilización, no es comentado, sin embargo, la mayor parte de este (401 ha) está en capacidad de cultivos permanentes.

La categoría de cobertura “otros” agrupa diferentes coberturas, que por su naturaleza no encajan dentro de los cultivos descritos por la metodología de capacidad de uso de suelo. Dentro de éstas se encuentran: zonas urbanas, embalses/lagunas, lirios, río.

Cuadro 6. Relación de la cobertura actual y la capacidad de uso de la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica, 2010.

| Capacidad de Uso de Suelo | Cobertura | | | | | | | Total |
|--|------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-----------------|---------------|
| | Cultivos anuales | Forestal | Otros | Pastos | Perennes | Semiperennes | Terreno desnudo | |
| Agropecuario limitaciones fuertes | 5837 | 4005 | 444 | 5778 | 687 | 134 | 47 | 16932 |
| Agropecuario limitaciones leves | 802 | 830 | 1043 | 1301 | 702 | 1396 | 67 | 6140 |
| Agropecuario limitaciones moderadas | 1047 | 56 | 449 | 55 | 96 | 83 | 0 | 1786 |
| Área protegida | 479 | 51819 | 381 | 4370 | 264 | 110 | 55 | 57479 |
| Cultivos perennes | 3830 | 14892 | 3116 | 12840 | 4652 | 5445 | 401 | 45176 |
| Manejo de bosque | 844 | 16434 | 349 | 3098 | 1872 | 1096 | 178 | 23870 |
| Total general | 12838 | 88036 | 5783 | 27442 | 8273 | 8263 | 748 | 151382 |

Potencial de erosión hídrica de la cuenca alta y media del Río Reventazón, 2010

La cuenca del Río Reventazón es considerada como la de más alta precipitación registrada en todo el país, alcanzando en algunas estaciones picos de hasta 10 000 mm. de lluvia en años específicos, lo que aumenta la susceptibilidad de erosión hídrica. Uno de los aspectos más relevantes de la cuenca del Río Reventazón es su voluminosa descarga hídrica y su comportamiento torrencial. Lo primero ha sido aprovechado para la producción de energía hidroeléctrica a muy bajo costo, mientras que lo segundo plantea problemas de sedimentación en los embalses, así como amenazas para las poblaciones que viven sus cercanías (Arce, 2004).

Tomando como punto de partida lo mencionado anteriormente, se evaluó el potencial de erosión hídrica para la cuenca alta y media del Río Reventazón (figura 10). Numéricamente un 69% (103 226 ha) de la cuenca alta y media presenta erosión hídrica ligera, un 14% moderada (21 414 ha), 11% severa (16 730 ha) y un 6% muy severa (9 248 ha).

Se observa cómo la región sur compuesta por la subcuencas, Grande de Orosí, Pejiballe y Atirro, muestra una erosión hídrica leve. Posiblemente el factor de mayor influencia en la poca erosión se deba a la cobertura vegetal, pues esta región está cubierta mayoritariamente de bosques y afines.

Caso opuesto es la región norte, donde los problemas de erosión son evidentes, aquí se presentan casos de erosión moderada y severa. Las subcuencas Páez-Birrisito, Birris y Agua Caliente-Reventado, muestran tasas considerables de erosión hídrica severa. Lianes (2008), menciona que el factor determinante en ese territorio es la pendiente, ya que, el grado de la pendiente y su longitud, influye de forma directamente proporcional en la velocidad y en el volumen de agua de escorrentía, así como en su poder erosivo (Cubero, 1996).

La erosión moderada se encuentra en las subcuencas Atirro, Tuis y Agua Caliente-Reventado. Para las dos primeras el factor determinante corresponde a factor de erosividad de lluvia, mientras que para el último caso, la influencia de la pendiente también es significativa.

El hecho que se den problemas de erosión, ya ha sido analizado con anterioridad, por ejemplo Arce (2004), menciona que dadas las características climáticas, geotectónicas, litológicas, y geomorfológicas presentes en la cuenca se puede esperar una cuenca con fuertes problemas de erosión de suelos.

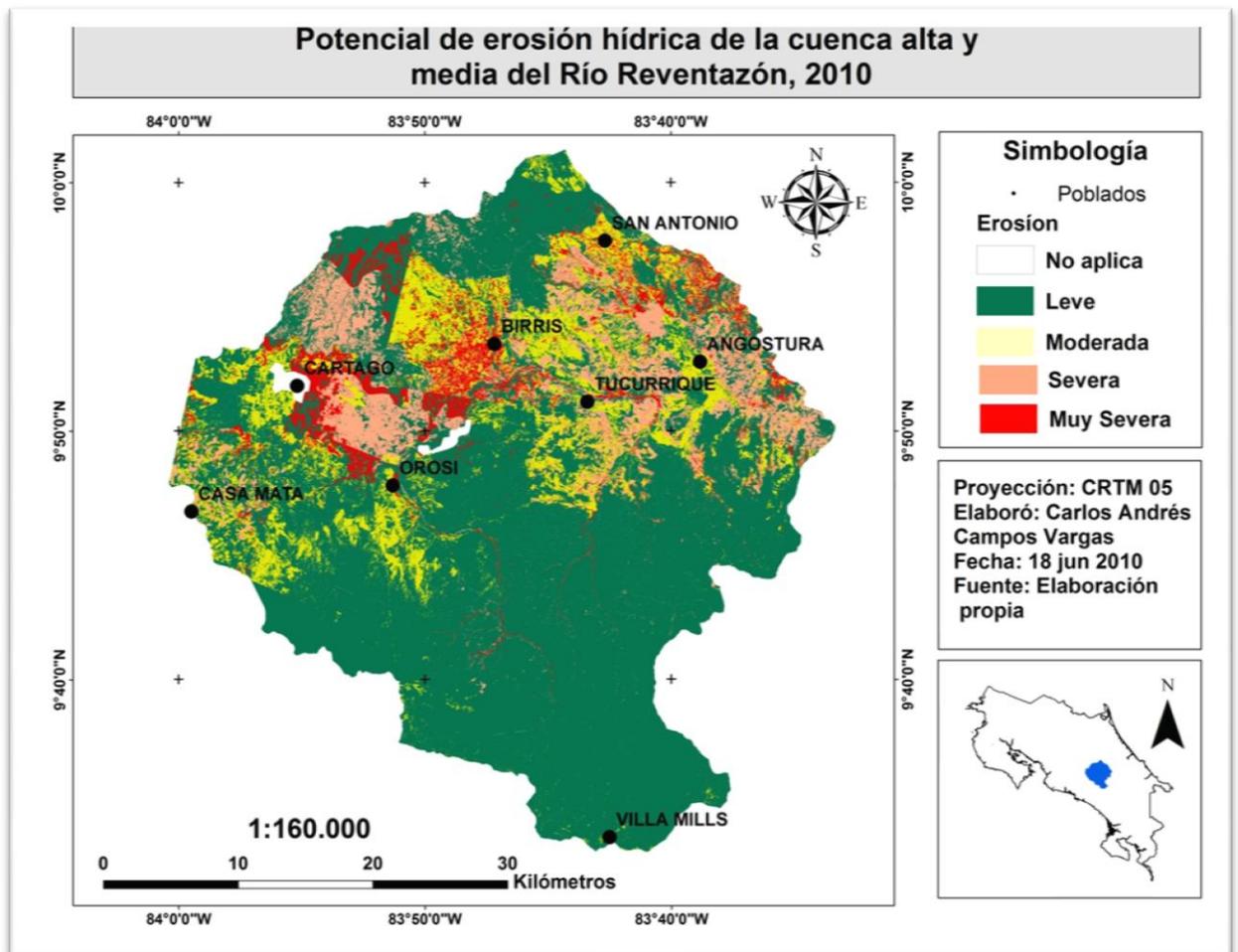


Figura 10. Erosión hídrica de la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica, 2010.

Zonas de cambio de factor de cobertura de la EUPS (2000 – 2010)

La cuenca del Río Reventazón es la única cuenca del país que cuenta con una ley específica, esta corresponde, a la ley de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Alta del Río Reventazón (Ley 8023). Gracias a esta ley, se da un trabajo conjunto entre diferentes instituciones como, el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) , el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

EL Instituto Costarricense de Electricidad, ha sido una institución pionera en la ejecución e implementación del manejo de cuencas en Costa Rica, ejemplo de ello es la creación de la Unidad de Manejo de Cuencas del Río Reventazón (UMCRE), en el año 2000. Esta unidad hoy llamada Centro de Servicio de Gestión Ambiental (CSGA), se creó con el fin de combatir la alta erosión y sedimentación que se daba en la cuenca alta y media.

Luego de 10 años de trabajo por parte de esta unidad, este estudio estimó el cambio del factor de cobertura vegetal (figura 11), de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), para el periodo 2000 (creación de la unidad) al 2010 (actualidad).

Se observa cómo la región sur de la cuenca, no presentó cambios en el factor de cobertura. La estabilidad de la cobertura forestal, es ocasionada por el sistema de áreas protegidas con que cuenta nuestro país, ya que en esa zona se localizan áreas protegidas como, el Parque Nacional Tapantí - Macizo de la Muerte, la Reserva Biológica la Marta, la Reserva Forestal Los Santos entre otras.

La mayoría de cambios positivos, en la cuenca se dieron en la región noreste de la cuenca, principalmente en la subcuencas del Río Chiz-Maravilla y el Río Turrialba. Este resultado es acorde con la realidad del manejo de la cuenca, ya que en esta región se desarrollan diversos programas en pro del manejo de la cuenca, destacando uno en particular, llamado "Mi finca participa en el plan de manejo de la cuenca del Río Reventazón". Dicho programa es financiado y ejecutado por el Instituto Costarricense de Electricidad. Las áreas primordiales del programa corresponden a ganadería semiestabulada y reforestación. No obstante es necesario aclarar, que los cambios en el terreno son resultado de una compleja interacción entre el ser humano y el medio biofísico (Verburg *et al*, 1999).

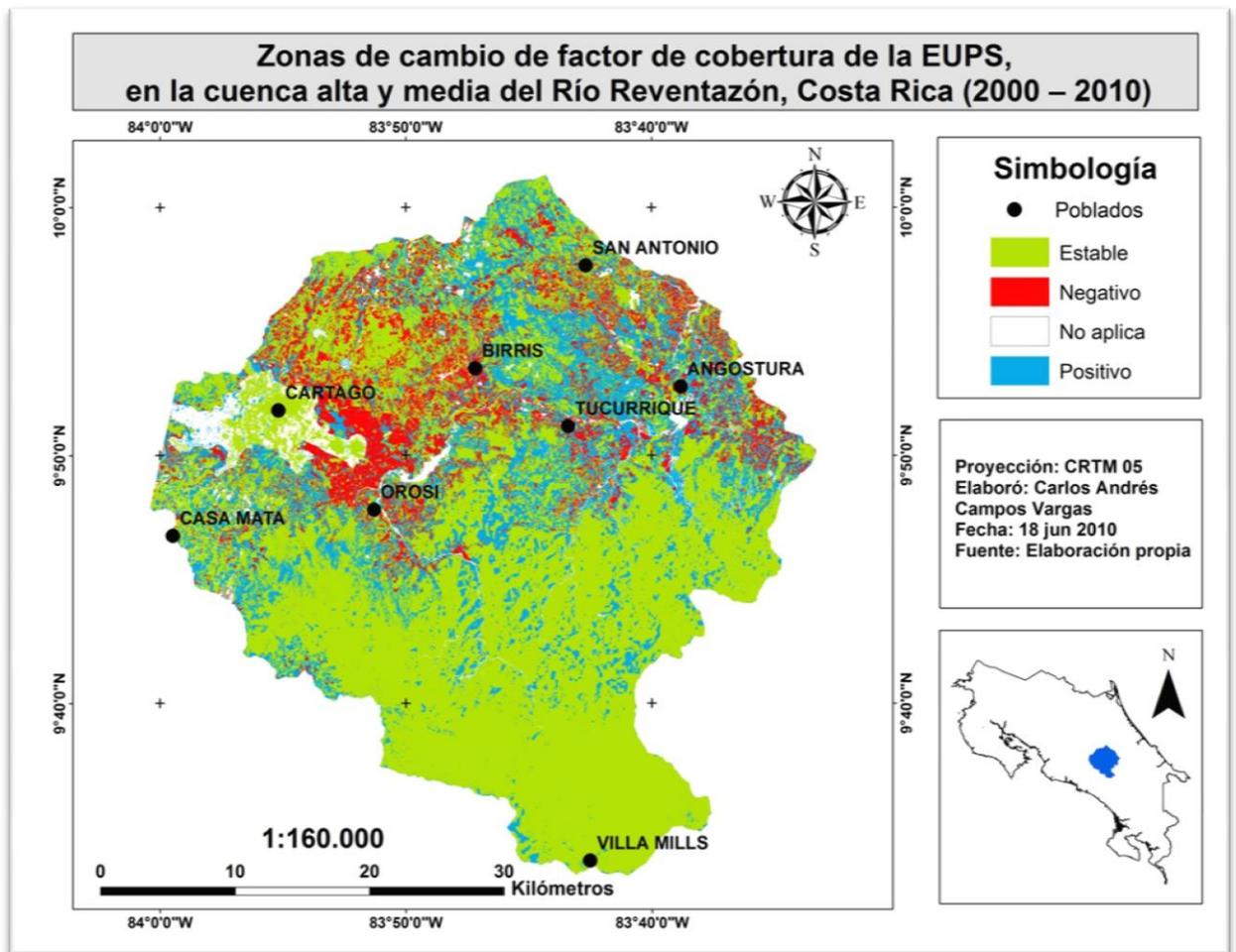


Figura 11. Zonas de cambio de factor de cobertura de la EUPS, en la cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica (2000 – 2010).

En términos generales, un 61% (92 848 ha) del territorio de la cuenca se mantuvo estable, con respecto al factor de cobertura vegetal. Por lo tanto no es de esperar modificaciones en el potencial de erosión hídrica, del año 2000 a la actualidad.

Por otro lado, un 23% (34 113 ha) de la cuenca alta y media, presentó un cambio positivo del factor de cobertura. Sin embargo, un 12% (18 116 ha) sufrió cambios negativos. Por lo tanto en términos netos la cuenca alta y media del Río Reventazón para el periodo 2000 al 2010, tuvo cambios positivos del factor de cobertura en un 11% (15 996 ha).

CONCLUSIONES

- El adquirir imágenes satelitales de calidad, es de vital importancia para realizar trabajos de teledetección. Considerando ese principio, las imágenes ASTER suministradas por Cathalac cumplieron a cabalidad los requisitos de calidad. Así este centro se constituye en una excelente fuente para adquirir imágenes de este tipo.
- Se logró realizar la clasificación con resultados satisfactorios. En total se identificaron 17 clases de cobertura. La cobertura forestal es la que ocupó la mayor cantidad de área con un 59% del total. No obstante la cobertura forestal se simplificó en cuatro categorías: bosque, bosque secundario, charral y páramo. Solamente la categoría bosque cubre el 50% del área bajo estudio. Del total de categorías, el potrero representó la segunda cobertura más importante con 18,1%.
- La validación de la clasificación arrojó resultados satisfactorios. La precisión total fue del 91%, superando el valor mínimo sugerido. Asimismo, el estadístico de Kappa obtenido correspondió a 0.909505, siendo éste un valor bastante cercano a 1, lo cual refleja que la clasificación realizada es verídica.
- Luego de analizar el cambio de cobertura en la cuenca alta y media del Río Reventazón, para el periodo 2000-2010, se encontró que las coberturas de áreas urbanas, charral, potrero y perennes presentaron una disminución de su territorio. Para el caso de áreas urbanas la causa de la disminución, fue varios errores en la clasificación del año 2000. Por otro lado, coberturas como: agua, bosque, café, caña, cultivos anuales y ornamentales presentaron un aumento en su territorio. Las coberturas con la mayores tasas de cambio anual fueron charral y perennes.

- Los conflictos entre la capacidad de uso y la cobertura, en su mayoría, se presentaron en la región norte de la cuenca. El sobreuso destaca en las subcuencas Páez-Birrisito, Birris, y Chiz-Maravilla. Además, se observó como las clases de perennes, forestal, pastos y cultivos anuales, son en los que se dan los mayores problemas.
- Al determinar el potencial de erosión hídrica se observó como las subcuencas Páez-Birrisito, Birris y Agua Caliente-Reventado, muestran tasas considerables de erosión hídrica severa, en estas subcuencas el factor determinante corresponde a la pendiente del terreno. Por otro lado la región sur mostró tasas de erosión hídrica leves.
- En un periodo de 10 años, la cuenca alta y media del Río Reventazón, ha tenido cambios significativos en el factor de cobertura vegetal de la EUPS. Se estimó que tras ese periodo la cobertura a cambiado en términos netos un 11 % (15 996 ha), a favor de la disminución del potencial de erosión hídrica.

RECOMENDACIONES

- En virtud de que la tecnología Landsat salió de servicio, se recomienda para futuros trabajos en teledetección, utilizar la tecnología ASTER, ya que con esto se asegura que los resultados obtenidos en futuras clasificaciones sean comparables con este trabajo.
- Para poder realizar una clasificación óptima, es necesario que el área bajo estudio sea cubierta por el menor número de imágenes, ya que las áreas de empate de las escenas presentan problemas a la hora de clasificarlas. Además pocas imágenes facilitan el proceso de clasificación.
- Los puntos de control tomados en campo deben de tomarse en coberturas con un área mínima de cinco hectáreas, ya que un área menor a esto, incrementa el riesgo de presentar problemas de identificación en las imágenes. Lo cual llevará a tener que descartar los puntos de control con esa problemática.
- Es necesario contar con el mayor número de puntos de control, para así poder realizar separaciones entre los diferentes tipos de coberturas.
- Aunado a la recomendación anterior, es necesario cambiar el método de realizar la matriz de error, ya que seleccionar los puntos de verificación tomando como base sólo el azar no es recomendable, porque se puede cometer el error de evaluar las clases con muy pocos puntos de control e inclusive no evaluar algunas. Por eso se recomienda fijar un número mínimo de puntos de control por cobertura, según el tamaño del estrato.
- Dado el trabajo realizado por la COMCURE en la cuenca, es imprescindible georeferenciar las áreas preparadas por la maquinaria de esta institución, para así poder medir el factor P en la ecuación universal de pérdida de suelo. Con lo cual se obtendría una visión más realista del potencial de erosión hídrica en la cuenca.

BIBLIOGRAFÍA

- Abrams, M; Hook, S. 2000. ASTER user handbook. Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology. US. 135 p.
- Arce, R. 2004. Resumen Diagnóstico Cuenca Reventazón. Consultoría para Proyecto Redes Comunitarias para la Gestión del Riesgo (En línea). San José, CR. Consultado 17 nov. 2009. Disponible en <http://www.cne.go.crCEDO-Riesgodocs26552655.pdf>
- Arroyo, P. 2001. Introducción a los Sensores Remotos y la Interpretación de Imágenes. Heredia, CR. 29 p.
- Barboza, S. 2005. Determinación del potencial de negocio de tres frutales en la cuenca del Reventazón (Zona Norte de Cartago). Proyecto de Investigación. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, CR. 30 p.
- Brenes, C. 2009. Análisis Multitemporal de Cambio de Uso de Suelo y Dinámica del Paisaje en el Corredor Biológico Volcánica Central Talamanca, Costa Rica. Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 125 p
- Calvo, J. 1996. Principios de Hidrología Forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, CR. 45 p.
- Calvo, JC; Watson, V; Bolaños, R; Quesada, C; Sánchez, A; González, P; Ramírez, M. 1999. Estudio de cobertura forestal de Costa Rica empleando imágenes Landsat 1986/87 y 1996/97 (en línea). XI Congreso Nacional Agronómico 1999. Consultado 5 jun. 2010. Disponible en http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_XI/a50-6907-III_461.pdf

- Calvo, J. 2009. Decimoquinto Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Bosque, cobertura y recursos forestales 2008 (Informe final). Estado de la Nación. San José, CR. 26 p.
- Calvo, J; McLennan, BJ; Sánchez, A; Garvin, T. 2009. Putting conservation policies in context: The social dynamics of forest regrowth in Guanacaste, Costa Rica. *Forest Ecology and Management*. (En prensa).
- Calvo, J; Jiménez, C; Jiménez, V. 2009. Ecuación para estimar el factor de erosividad de lluvia de la EUPS, en Costa Rica. XVIII Congreso Latinoamericano de La Ciencia del Suelo. San José, CR. 1 p.
- CATIE (Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza, CR). Sf. Relieve de Costa Rica. Disponible en el Atlas digital de Costa Rica 2008. Escuela de Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 1 CD.
- CCRS (Canada Centre for Remote Sensing, CA). 1998. Fundamentals of Remote Sensing Tutorial. Canadian Center of Remote Sensing. (en línea). Consultado 9 may. 2010. Disponible en: <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/eduref/tutorial/tutore.html>
- CCT (Centro Científico Tropical, CR). Sf. Capacidad de uso de la tierra 2004. Disponible en el Atlas digital de Costa Rica 2008. Escuela de Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 1 CD.
- Coronado, L. 2001. Comprobación de técnicas de procesamiento de imágenes del sensor remoto ETM+ de Landsat 7, en la identificación de Bosques Secundarios en la Región Huetar Norte de Costa Rica. Tesis Bachiller Ingeniería Forestal. Cartago, C.R, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 98 p.
- Cubero, D. 1996. Manual de manejo y conservación de suelos y aguas. Editorial de la Universidad Estatal a Distancia, San José, CR. 278 p.

- Dupuy, JM; González, JA; Iriarte, S; Espadas, C; Tun Dzul, F; Dorantes, A. 2007. Cambios de cobertura y uso del suelo (1979-2000) en dos comunidades rurales en el noroeste de Quintana Roo. (en línea). Investigaciones Geográficas. Universidad Nacional de Autónoma de México. Distrito Federal, México. (62):104-124. Consultado 5 jun. 2010. Disponible en:<http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/boletin/bol62/b62Art06.pdf>
- Fallas, J. 1999. Que es un sistema de información geográfico. Escuela de Ciencias Ambientales (EDECA); Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre para Mesoamérica y el Caribe (PRMVS). Universidad Nacional (UNA). Heredia, CR. 40 p.
- Fallas, J. 2003. Teledetección espacial. (en línea). Escuela de Ciencias Ambientales (EDECA); Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre para Mesoamérica y el Caribe (PRMVS). (en línea). Universidad Nacional (UNA). Heredia, CR. Consultado el 18/10/09. Disponible en:http://www.icomvis.una.ac.cr/telesig/pdf/teledetección_p1.pdf
- Gallo, M. 1999. Identificación de tipos de bosques primarios en la Zona Norte de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 100 p.
- González, I. 2009. Evaluación del Cambio de Cobertura en el Área de Conservación Arenal –Tempisque en los periodos 1992-1997-2005 utilizando Imágenes de Satélite y Fotografías Aéreas. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, CR. 70p.
- Hill, R; Floddy, G. 1994. Separability of tropical rain forest types in the Tambopata-Candamo Reserved Zone, Peru. *International Journal of Remote Sensing* 15 (13) 2687-2693.
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional, CR); PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente); MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, CR); IGN (Instituto

Geográfico Nacional, CR); DGF (Dirección General Forestal, CR), 1996: Atlas del Cambio de Cobertura de la Tierra en Costa Rica 1979-1992. San José, CR. 7 p.

INETER (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, NI). 2005. Erosión hídrica. Mapas de amenazas. Recomendaciones técnicas para su elaboración. Metodologías para el análisis y manejo de los riesgos naturales (MET-ALARN). Managua, NI. 52 p.

Irurtia, C; Cruzate, G. sf. Aplicación de la Ecuación Universal de Predicción de Pérdida de Suelo, en la Provincia de Buenos Aires. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Buenos Aires, AR. 14 p.

Jensen, JR. 1996. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. 2nd. Ed., New Jersey, Prentice Hall Series in Geographic Information Science. 316 p.

Kaimowitz, D. 1995. Patrones de Uso de la Tierra y el Manejo de los Recursos Naturales en Centroamérica. In Desarrollo Agrícola, Sostenibilidad de los Recursos Naturales y Reducción de la Pobreza en América Latina: el Papel de las Regiones de Laderas. (1995, Tegucigalpa, Honduras). 1997. Memoria. Eds. O. Neidecker-González; S.J. Scherr. Tegucigalpa, Hon. Deutsche Stiftung für internationale Entwicklung (DSE). Tegucigalpa, HN. p 105-124.

Lambin, E. 1994. Modelling deforestation Processes. A Review. Tropical Ecosystem Environment Observations by Satellites (TREES). TREES Series: Research Report No. 1. Publicado por la Comisión Europea. Luxemburgo. 113 p.

Leclerc, G. 1996. Tropical forest assessment in Central Costa Rica using Landsat Thematic Mapper imagery Tropical Ecosystem Environment Observations by Satellites Contract N° EN9406951V.

Lianes, E. 2008. Estudio del factor vegetación “C” de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada “RUSLE”, en la cuenca del río Birrís, Costa Rica. TF Ingeniero Técnico Forestal. Universidad Politécnica de Madrid-CATIE. Turrialba, CR. 191 p.

- Lillesand, T; Kiefer, R. 1994. Remote sensing and image interpretation. John Wiley and Sons, US. Cuarta edición. 724 p.
- López, E; Mendoza, M; Acosta, A. 2002. Cambio de cobertura vegetal y uso de la tierra, el caso de la cuenca endorreica del lago de Cuitzeo, Michoacán. (En línea). Gaceta Ecológica. Julio-Setiembre N. 64. 19-34 p. Consultado 21 abr. 2010. Disponible en <http://redalyc.uaemex.mx/redalycpdf539539064>.
- Lu, D; Batistella, M; Miranda, E. s.f. A comparative study of Terra ASTER, Landsat TM, and SPOT HRG data for land cover classification in the brazilian amazon. Indiana University-Brazilian Agricultural Research Corporation. 6 p.
- MAG-MIRENEM (Ministerio de Agricultura y Ganadería – Ministerio de Ambiente Energía y Minas, CR). 1994. Metodología: Determinación Capacidad Uso Tierras Costa Rica. Decreto Ejecutivo N° 23214-MAG-MIRENEM. San José, CR. 30 p
- Méndez, E. 2001. Análisis espacial del tipo de uso de la tierra en la cuenca del río Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 84 p.
- Milla, V. 2008. Utilización de sensores remotos para determinar cambio de uso de la tierra en Costa Rica: caso del Área de Conservación Osa (1992-2005) y del Área de Conservación Tempisque. Tesis Bachiller Ingeniería Forestal. Cartago, CR, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 82 p.
- Miranda, M. 2007. Geomática aplicada a recursos naturales. Corrección radiométrica y atmosférica. Universidad Católica de Chile. Departamento de Ciencias Forestales, CL. 13 p.
- Ortiz, E. 2001. Sistemas de Información Geográfica. In: Informe de Proyecto: Aplicación de los sistemas de información geográfica al manejo de recursos naturales (ASIGMARN). Vicerrectoría de Investigación y Extensión, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, CR. p. 34-37.

- Pérez, U. 1997. Principios de los sistemas de información geográfica y su aplicación dentro de la planificación y manejo ambiental de las cuencas hidrográficas. Universidad de Tolima. Ibagué, CO. 130 p.
- Pérez, C; Muñoz, L. 2006. Teledetección: Nociones y Aplicaciones. Universidad de Salamanca. Salamanca, ES. 356 p.
- PREVDA. 2008. Plan de Cuenca del Río Reventazón-Parismina. Hacia una propuesta sostenida de desarrollo. Programa de Reducción de la Vulnerabilidad y Degradación Ambiental. San José, CR. 184 p.
- Puig, C. 1996. Identificación de fases de desarrollo de bosques secundarios húmedos tropicales de tierras bajas en Costa Rica, mediante análisis digital de imágenes de sensores remotos. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 130 p.
- Rodríguez, JM; Sáenz, A. 2002. Pago por servicios ambientales en Costa Rica. Revista Forestal Centroamericana. no. 37: 68-71
- Sánchez, G; Harris, R; Skole, D. 2001. Deforestation in Costa Rica: A Quantitative Analysis Using Remote Sensing Imagery. Biotropica 33(3): 378- 384.
- Sobrino, J. 2000. Teledetección. Universidad de Valencia. Valencia, ES. 449 p.
- Soto, C. 2005. Mapificación y caracterización de bosques secundarios en la subregión de Sarapiquí. Tesis Bachiller Ingeniería Forestal. Cartago, CR, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 65 p
- Speranza, FC; Zerda, HR. s.f. Clasificación digital de coberturas vegetales a partir de datos satelitales multiespectrales. (en línea). Consultado el 5 jun. 2010. Disponible en: http://www.inta.gov.ar/manfredi/info/boletines/areasuelos/cober_veg_satel_multi.pdf
- Stroy, M; Congalton, RG. 1986. Accuracy assessment: a user's perspective. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 52, pp. 397-399.

- Tapia, A. 2007. Evaluación de los cambios en el uso del suelo en fincas sometidas al Programa de Pago por Servicios Ambientales (PSA) en las regiones Huetar Norte, Huetar Atlántica y Central de Costa Rica. Tesis Bachiller Ingeniería Forestal. Cartago, CR, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 101 p.
- Vahrson, W. 1990. El potencial erosivo de la lluvia en Costa Rica. *Agronomía costarricense* 14 (1). 15-24 p.
- Verburg, PH; Kok, J; Veldkamp, K; Bouma, A; Koming, J. 1999. A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use. *Ecological Modelling* 116: 45-61.

ANEXOS

Anexo 1: Formulario de campo para la toma de datos.

Formulario de campo

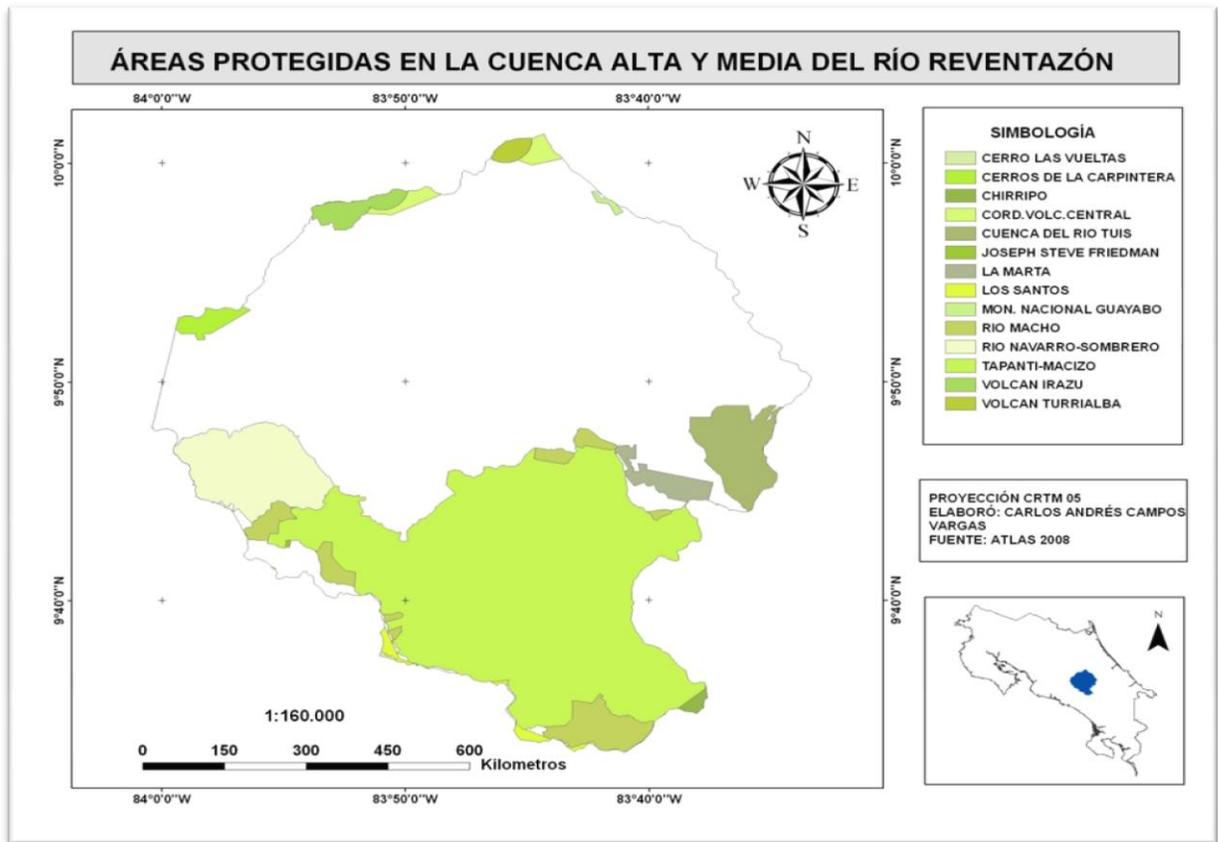
Fecha: _____ Placa de vehículo: _____

Zona a visitar: _____ Chofer: _____

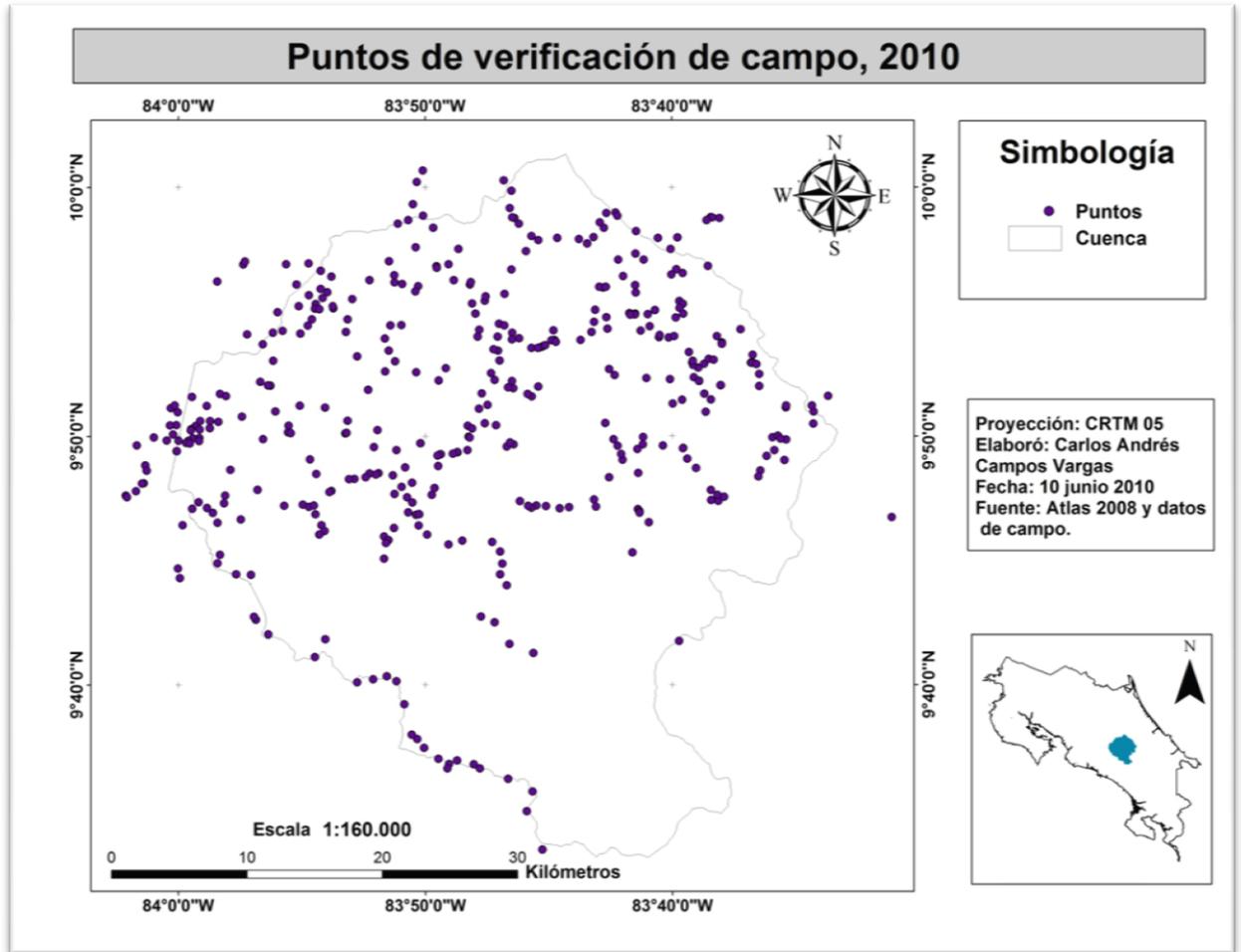
Hora de salida: _____ Hora de llegada: _____

| # Pto | Cobertura | Comentario |
|-------|-----------|------------|
| | | |
| | | |

Anexo 2. Áreas protegidas en la cuenca alta y media del Río Reventazón.



Anexo 3. Puntos de verificación de la clasificación de la cobertura en la cuenca alta y media del Río Reventazón, 2010.



Anexo 4. Valores para estimar la erosión hídrica mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos.

Valores del Factor de Erodabilidad (K) de la EUPS, cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica, 2010.

| Grupo de suelos | Factor K |
|-----------------|----------|
| Hydrandept | 0.11 |
| Tropohumult | 0.23 |
| Humitropept | 0.17 |
| Dystrandept | 0.16 |

Valores del Factor de Cobertura (C) de la EUPS, cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica, 2010.

| Cobertura | Factor C |
|-------------------|-----------------|
| Bosque | 0,003 |
| Potrero | 0,016 |
| Árboles frutales | 0,003 |
| Cultivos anuales | 0,39 |
| Cultivos perennes | 0,086 |
| Terreno desnudo | 1 |
| Bosque degradado | 0,037 |

Valores de los Factores, Efecto de la longitud de la pendiente (L), y Efecto de la gradiente de la pendiente (S), cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica, 2010.

| Clase | Pendiente (%) | Largo (m) | Factor LS |
|------------------------|----------------------|------------------|------------------|
| Plano | 0-3 | 300 | 0.35 |
| Suavemente ondulado | 3-15 | 150-300 | 2.11 |
| Moderadamente ondulado | 15-30 | 100-150 | 5.62 |
| Fuertemente escarpado | 30-60 | 40-100 | 11.79 |
| Escarpado | +60 | -40 | 15 |

Valores del Factor de Erosividad de la lluvia (R) de la EUPS, cuenca alta y media del Río Reventazón, Costa Rica, 2010.

| Estación | R | Estación | R |
|--------------------|----------|-----------------|----------|
| Cachí Plantel | 45.5285 | Navarro | 91.6187 |
| Capellades | 35.9462 | Pacayas | 35.9309 |
| Cartago | 35.2314 | Paraíso | 20.6283 |
| Cerro de la Muerte | 22.3473 | S.P Tapantí | 93.2185 |
| El Llano | 45.2562 | San Antonio | 46.771 |
| El Sauce | 50.5834 | Sanatorio Durán | 27.249 |
| Finca Gavilanes | 25.2236 | Tres de Junio | 27.249 |
| La Suiza | 50.7026 | | |