



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL  
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN**

**PROGRAMA DE POSGRADO**

**Identificación de factores determinantes en la producción de agua y sedimentos en  
la subcuenca del río Birrís, cuenca del río Reventazón, Costa Rica**

**Tesis sometida a consideración de la división de educación y programa de  
Posgrado como requisito para optar por el grado de *Magister Scientiae* en  
Manejo y Gestión Integral de cuencas Hidrográficas**

**Beatriz Choque Guzmán**

**TURRIALBA, COSTA RICA**

**2015**

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y el Programa de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL  
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**FIRMANTES:**



\_\_\_\_\_  
José Ney Ríos, M.Sc.  
**Director de tesis**



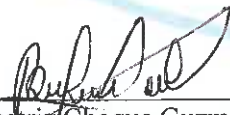
\_\_\_\_\_  
Francisco Jiménez, Dr.Sc.  
**Miembro Comité Consejero**



\_\_\_\_\_  
Laura Benegas, Ph.D.  
**Miembro Comité Consejero**



\_\_\_\_\_  
Francisco Jiménez, Dr. Sc.  
**Decano Programa de Posgrado**



\_\_\_\_\_  
Beatriz Choque Guzmán  
**Candidata**

## **DEDICATORIA**

A mi familia por su apoyo incondicional,  
por sus consejos, comprensión, amor y  
ayuda en los momentos difíciles.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por ser mi guía, por su infinita bondad y amor y haberme permitido lograr mis objetivos.

Al Centro Agronómico Tropical de Investigación y enseñanza (CATIE), al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y al Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) instituciones que me brindaron la oportunidad de realizar mis estudios de maestría por medio del programa de beca "Henry A. Wallace Legacy Scholar".

A mi comité de tesis M.Sc. José Ney Ríos, por su gran apoyo y motivación para la elaboración de esta tesis. A la Ph.D. Laura Benegas y a Ph.D. Francisco Jiménez, por su tiempo y sus valiosos aportes y por todo su apoyo durante el desarrollo en este trabajo.

A todas las personas e instituciones que de una manera u otra contribuyeron a este logro profesional.

## CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE CUADROS.....	VIII
LISTA DE ACRÓNIMOS .....	IX
RESUMEN .....	X
ABSTRACT .....	XI
CAPÍTULO I .....	1
INTRODUCCIÓN Y SÍNTESIS GENERAL DE LA TESIS .....	1
1.1 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	2
1.2 OBJETIVOS, PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN E HIPÓTESIS .....	2
Objetivo general .....	2
Objetivos específicos y preguntas de investigación .....	2
Preguntas de investigación .....	2
Hipótesis .....	3
1.3 MARCO REFERENCIAL .....	3
Cuenca hidrográfica como sistema y unidad de análisis .....	3
Bases conceptuales en el análisis espacial del territorio .....	3
Modelos matemáticos relacionados a un sistema de información geográfico .....	3
Modelos para analizar la dinámica de cambio de cobertura/uso del suelo .....	4
Limitaciones de los modelos hidrológicos .....	5
Variables de importancia en el presente estudio .....	6
a. Producción de agua y sedimento .....	6
a.1. Factores que influyen a la producción de agua y sedimento .....	6
a.1.1. Precipitación .....	7
a.1.2. Uso y cobertura del suelo .....	8
a.1.3. Suelo .....	8
a.1.4. Factores fisiográficos .....	8
Descripción del modelo hidrológico SWAT.....	9
Limitaciones del modelo SWAT .....	10
1.4 PRINCIPALES RESULTADOS .....	10
1.4 PRINCIPALES CONCLUSIONES.....	11
CAPÍTULO II.....	17
ARTÍCULO I.....	17
ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL CAMBIO DE USO/COBERTURA DEL SUELO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO BIRRÍS, CUENCA DEL RÍO REVENTAZÓN, COSTA RICA.....	17
RESUMEN .....	17
2.1 INTRODUCCIÓN .....	17
2.2 METODOLOGÍA.....	18

<b>Descripción del área de estudio</b> .....	18
<b>Procedimiento metodológico</b> .....	20
<b>2.3 RESULTADOS</b> .....	<b>21</b>
<b>Evaluación de los cambios de uso del suelo</b> .....	21
<b>Matriz de transición de uso del suelo</b> .....	21
<b>2.4 DISCUSIÓN</b> .....	<b>23</b>
<b>2.5 CONCLUSIONES</b> .....	<b>25</b>
<b>ARTÍCULO II</b> .....	<b>27</b>
<b>ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE AGUA Y SEDIMENTOS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO BIRRÍS, CUENCA DEL RÍO REVENTAZÓN, COSTA RICA</b> .....	<b>27</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>27</b>
<b>2.1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2 METODOLOGÍA</b> .....	<b>28</b>
<b>Procedimiento metodológico</b> .....	29
<b>Modelo digital de elevación</b> .....	29
<b>Mapa de uso y cobertura del suelo</b> .....	30
<b>Mapa de tipos de suelos</b> .....	31
<b>Información del clima</b> .....	32
<b>Calibración y validación del modelo</b> .....	33
<b>2.3 RESULTADOS</b> .....	<b>34</b>
<b>2.4 DISCUSIÓN</b> .....	<b>38</b>
<b>2.5 CONCLUSIONES</b> .....	<b>40</b>
<b>ANEXO</b> .....	<b>50</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Producción de agua y sedimento según el uso/cobertura, subcuenca Birrís 2011-2014 .....	11
Figura 2. Ubicación de la subcuenca del río Birrís, Costa Rica .....	19
Figura 3. Mapa de pérdida, ganancia y persistencia del uso/cobertura del suelo, subcuenca del río Birrís, 2004/2015.....	23
Figura 4. Climograma de la estación de Pacayas en la subcuenca del río Birrís, Costa Rica.....	29
Figura 5. Mapa de uso/cobertura 2015 de la subcuenca del río Birrís, Costa Rica .....	30
Figura 6. Mapa de tipos de suelos identificados en la subcuenca del río Birrís, Costa Rica.....	32
Figura 7. Distribución espacial a nivel de microcuenca y de unidades de respuesta hidrológica	34
Figura 8. Relación precipitación, producción de agua y producción de sedimento.....	35
Figura 9. Distribución espacial de la producción de agua (WYLD) a nivel de microcuencas.....	36
Figura 10. Distribución espacial de la producción de sedimento (SYLD) a nivel de microcuencas .....	36
Figura 11. Producción de agua y sedimento según el uso/cobertura, subcuenca Birrís 2011-2014 .....	37
Figura 12. Producción de agua y sedimento según el tipo de suelo, subcuenca Birrís 2011-2014 .....	38

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Softwares de mayor uso para el análisis de cambio de cobertura/uso del suelo.....	4
Cuadro 2. Modelos hidrológicos de mayor uso.....	5
Cuadro 3. Cambios del uso/cobertura del suelo, subcuenca del río Birrís, 2004/2015.....	11
Cuadro 4. Cambios del uso/cobertura del suelo, subcuenca del río Birrís, 2004/2015.....	21
Cuadro 5. Matriz de transición de cambio del uso/cobertura del suelo, subcuenca del río Birrís, 2004/2015 (hectáreas).....	22
Cuadro 6. Matriz de probabilidad condicional de permanencia de uso del suelo, subcuenca del río Birrís, 2004/2015 .....	23
Cuadro 7. Pendientes de la subcuenca del río Birrís, según FAO .....	30
Cuadro 8. Clasificación de uso del suelo según la tipología usado por SWAT .....	31
Cuadro 9. Parámetros de las propiedades físicas y químicas de suelo requeridas por SWAT .....	31
Cuadro 10. Distribución de HRU por microcuenca .....	34
Cuadro 11. Producción de agua (WYLD) y de sedimento (SYLD) promedio mensual .....	35



## LISTA DE ACRÓNIMOS

CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
DEM	Modelo de Elevación Digital
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
HRU	Unidad de Respuesta Hidrológica
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
INAB	Instituto Nacional de Bosques
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
JASEC	Junta Administrativa de Servicios Eléctricos de Cartago
LCM	Land Change Modeler
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
ONU	Organización de Naciones Unidas
PREVDA	Programa Regional para la Reducción de la Vulnerabilidad y Degradación Ambiental
REDD	Programa de Reducción de Emisiones de Carbono causada por la Degradación de los Bosques
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SWAT	Soil and Water Assesment Tool
UN WATER	The United Nations Inter-Agency Mechanism on all freshwater Related Issues, Including Sanitation
USDA	Department of Agriculture the United States
UTM	Universal Transverse Mercator

## RESUMEN

El estudio se realizó en una cuenca montañosa tropical de 48 km<sup>2</sup>, ubicada en Costa Rica, en la que predomina suelo clasificado como Andisol, con altas pendientes, altas precipitaciones y un elevado grado de conflicto por el uso del suelo.

El objetivo del estudio fue determinar los cambios en el uso y la cobertura vegetal y los efectos en la estimación de la producción de agua y de sedimento, utilizando sistemas de información geográfica (ENVI e IDRISIS SELVA) y la herramienta para la evaluación del suelo y el agua (SWAT).

Para observar los cambios de uso y cobertura vegetal se analizaron los mapas de uso-cobertura que corresponden a los años 2004 y 2015, que permitió determinar la dinámica territorial (transición y permanencia) de las categorías de área urbana, bosque, ceniza volcánica, charral, cultivos agrícolas y pasto, identificadas en la subcuenca del río Birrís.

A partir del mapa de uso/cobertura actual, información del clima de una estación meteorológica con un registro a nivel diario de 7 años de precipitación y temperatura y el mapa de uso del suelo, se determinó la producción de agua y de sedimento a nivel mensual, así como su distribución espacial en la subcuenca.

El uso de suelo que presentó mayor cambio en el periodo de estudio es el cultivo agrícola a suelos ocupados por pasto. Los usos del suelo que permanecieron son el bosque, el pasto, los cultivos agrícolas, áreas urbanas y el suelo ocupado por cenizas volcánicas.

Los usos de la tierra que aportan mayor cantidad de agua en la subcuenca son el pasto seguido de cultivos agrícolas y bosque, siendo los de menor producción el charral y las cenizas volcánicas.

Los usos del suelo que generan mayor producción de sedimentos son el suelo ocupado por ceniza volcánica y los cultivos agrícolas, mientras que los bosques, charral y áreas urbanas presentan valores muy bajos de producción de sedimentos.

Palabras claves: cambio de cobertura y uso del suelo, modelación hidrológica, análisis multi-temporal, erosión.

## **ABSTRACT**

The study was conducted in a mountainous tropical basin of 48 km<sup>2</sup>, located in Costa Rica, its dominated land is classified as Andisol, with steep slopes, high rainfall and a high degree of land use conflict.

The aim of the study was to determine changes in the use and vegetation cover as well the effects on estimated water production and sediment yield, using geographic information systems (ENVI and IDRISIS SELVA) and the soil and water assessment tool (SWAT).

To observe the changes of use and land cover we analyzed maps of use-coverage corresponding to the years 2004 and 2015, which allows to identify the territorial dynamics (transition and permanence) of the categories of urban area, forest, volcanic ash, charral, agricultural and pasture crops identified in the basin of the Birris River.

Map of effective use / current coverage, weather information from a weather station with a daily record of 7 years of rainfall and temperature, the map of land use, production of water, and sediment yield were determined monthly together with its spatial distribution in the basin.

The land use showing major change for our study period was the agricultural crops specifically occupied by grass. The remaining land uses were forest, grass, urban areas and volcanic ash.

The land uses providing the largest amount of water in the watershed was grass followed by crops and forest, with the lower production given by charral and volcanic ash.

The land uses generating higher production of sediments are lands occupied by volcanic ash and agricultural crops, while forests, charral and urban areas had very low values of sediment yield.

Keywords: change in coverage and land use, hydrological modeling, multi-temporal analysis, erosion.



## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN Y SÍNTESIS GENERAL DE LA TESIS**

La producción hídrica a nivel de cuencas es dinámica y compleja debido a la interacción de factores bióticos, abióticos y socioeconómicos que forman parte de una cuenca (Aguilar y Iza 2009), donde el manejo integrado de los recursos hídricos bajo distintos usos del agua, condiciones cambiantes de uso del suelo y el clima son retos que las sociedades enfrentan o enfrentaran en las siguientes décadas (Simonovic 2002). Bajo este contexto, la cuenca se presenta como la unidad geográfica natural apropiada para visualizar el comportamiento e impacto de la sociedad sobre el uso, conservación de los recursos naturales, la degradación del suelo y el recurso agua (PREVDA 2008), que son influenciados por el desequilibrio hídrico, las fuertes pendientes y el mal uso de las tierras (Ramírez *et al.* 2008).

Entre los procesos hidrológicos que tienen lugar en la subcuenca, la producción de agua y la producción de sedimentos figuran entre los de mayor interés, debido a su relación directa con las actividades productivas y económicas (Silva 2004). La producción de agua se define como el agua de origen superficial y subsuperficial que llega a diversos cauces (Sevilla *et al.* 2009). Algunos la consideran como uno de los procesos más importantes en la evaluación de la sostenibilidad de las cuencas hidrográficas (Silva 2004). La producción de sedimentos se entiende como el total de partículas de rocas o suelos que son acarreados por escurrimiento superficial, que salen de una cuenca y son medidos en una sección transversal de referencia del cauce durante un cierto intervalo de tiempo (Silva 2004). El componente hidrológico representa un enfoque fundamental de la gestión integral de cuencas hidrográficas, teniendo en cuenta las complejas relaciones con el medio ambiente (Wasson 2002).

En las últimas décadas el crecimiento poblacional ha sido muy acelerado causando degradación en las cuencas por el uso inadecuado de los suelos generando cambios en el comportamiento hidrológico y con ello, menores oportunidades económicas y mayores problemas sociales (Ramakrishna 1997).

El agua y la energía son recursos productivos irremplazables por ser esenciales para la vida y el crecimiento económico en procesos de producción (ONU 2014). Según el informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo (UN WATER 2014), el agua y la energía constituyen el núcleo del desarrollo sostenible. Ambas se encuentran estrechamente vinculadas y son altamente interdependientes. La demanda de energía y agua es un problema global que se incrementará significativamente en las próximas décadas (UN WATER 2014).

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) han propuesto diecisiete Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), dos de los cuales están enfocados en los retos de asegurar la disponibilidad y el manejo sostenible del agua y garantizar el acceso a energía asequible, sostenible y moderna para todos (ONU 2015).

## **1.1 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

Se estima que una sexta parte del suelo mundial se ve afectada por la erosión hídrica (Walling y Fang 2003), y se reconoce a las actividades antrópicas como causa del incremento de la erosión y la producción de sedimento a nivel mundial (Alatorre y Beguería 2009). La erosión del suelo por el agua es un problema a nivel mundial y surge la necesidad de comprender su importancia y evolución en diferentes regiones.

En Costa Rica, la generación de energía hidroeléctrica es un factor relevante en el desarrollo del país y genera el 98% de su electricidad a partir de recursos renovables (CEPAL 2006). La subcuenca del río Birrís es considerada como prioritaria por su potencial de producción agropecuario e hidroenergético y es la que aporta mayor cantidad de sedimentos al cauce del río Reventazón (38 t/ha/año), ocasionando problemas a los embalses (ICE 1999).

Ante la problemática de la elevada tasa de sedimentos en la subcuenca del río Birrís y su relevancia en producción hidroenergética existe la necesidad de tener información acerca de los factores que determinan la producción de agua y sedimentos en la subcuenca, lo cual puede ser un valioso aporte para su planificación a mediano y largo plazo, así como una herramienta de ayuda en la toma de decisiones para la priorización de áreas y su gestión.

Mediante la integración de herramientas de información geográfica y uso del modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT), este estudio tiene el propósito de identificar los factores determinantes en la producción de agua y de sedimentos en la subcuenca, así como contribuir a la comprensión en la dinámica de dichos factores en las cuencas hidrográficas.

## **1.2 OBJETIVOS, PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN E HIPÓTESIS**

### **Objetivo general**

Analizar los factores determinantes en la producción de agua y sedimentos en la subcuenca del río Birrís, cuenca del río Reventazón, Costa Rica

### **Objetivos específicos y preguntas de investigación**

1. Analizar cambios en la cobertura y uso de suelo mediante el empleo de mapas temáticos, aplicando el modelo IDRISI Selva.<sup>1</sup>
2. Estimar mediante el modelo SWAT, la producción y distribución espacio-temporal de agua y sedimentos
3. Determinar la importancia relativa de los efectos de la pendiente, cobertura, uso y tipos de suelo sobre la producción de agua y sedimentos en la subcuenca del río Birrís.

### **Preguntas de investigación**

- a. ¿Cómo son los cambios de cobertura y uso del suelo a través del tiempo en la subcuenca del río Birrís?

---

<sup>1</sup> Software de Sistema de Información Geográfico y procesamiento de imágenes para el análisis y presentación de información espacial digital.

- b. ¿Cuál es la producción de agua y sedimento y cómo se distribuye espacial y temporalmente en la subcuenca del río Birrís y cuál es su magnitud de influencia?
- c. ¿Cuáles factores influyen en la determinación de producción de agua y sedimentos en la subcuenca del río Birrís?

### **Hipótesis**

- a. Los patrones de cobertura y uso del suelo en la cuenca del río Birrís han variado significativamente durante el periodo analizado.
- b. La producción de agua en la subcuenca está determinada por la pendiente, uso y tipo de suelo.
- c. La producción de sedimento en la subcuenca está determinada por la pendiente, uso y tipo de suelo.

## **1.3 MARCO REFERENCIAL**

### **Cuenca hidrográfica como sistema y unidad de análisis**

La cuenca hidrográfica como la unidad geográfica natural es la unidad funcional para estudiar procesos climáticos, edafológicos, geológicos y antrópicos sobre la calidad y cantidad del agua disponible (Swisher y Todd-Bockarie 1996), bajo un enfoque espacio temporal que permite reproducir de manera apropiada procesos hidrológicos que tienen lugar dentro la misma (Torres *et al.* 2004;Zubieta 2013).

Una de las herramientas que han tomado relevancia para evaluar impactos y procesos que ocurren en la cuenca hidrográfica son los modelos hidrológicos.

Los modelos de simulación hidrológica brindan información acerca de la dinámica del movimiento y comportamiento del agua superficial, subsuperficial y subterránea dentro de una cuenca hidrográfica. Tales procesos contribuirán a evaluar el estado de la cuenca enfocadas a la planificación y gestión de los recursos hídricos (Kumar 2011).

### **Bases conceptuales en el análisis espacial del territorio**

El análisis espacial es el conjunto de procedimientos de estudio de los datos geográficos en el que se considera sus características espaciales, que conjugan una serie de técnicas que buscan, separar, procesar y clasificar los datos para contribuir a la búsqueda de respuestas de un problema mayor (Bosque Sendra 1992). La mayor parte de la información requerida es del tipo espacial (Geneletti 2008) y en la mayoría de los casos los sensores remotos son usados en estos análisis.

### **Modelos matemáticos relacionados a un sistema de información geográfico**

Un modelo es una representación de un componente o proceso de la realidad. Existen modelos estáticos donde los datos de entrada y salida corresponden a un mismo instante de tiempo, y modelos dinámicos donde la salida corresponde a un tiempo distinto al de la entrada (Maguire *et al.* 2005). En la actualidad los modelos matemáticos espaciales se encuentran interrelacionados a uno o más sistemas de información geográfica, como sistemas de ayuda (Eastman *et al.* 2005).

## Modelos para analizar la dinámica de cambio de cobertura/uso del suelo

Existen numerosos estudios que evalúan modelos matemáticos enfocados en la predicción del cambio de la cobertura y uso del suelo (Mas *et al.* 2014), entre los cuales se encuentran CA\_MARKOV (Eastman 2009b), CLUE-S, DINAMICA EGO (Verburg y Overmars 2009) y Land Chance Modeler (Eastman 2009a). Según Olmedo *et al.* (2010), los modelos más flexibles son CA\_MARKOV y DINAMICA, mientras que LCM Y CLUE presentan una estructura rígida que define un flujo fijo de procedimientos (cuadro 1).

La importancia del análisis de la dinámica de cambio de uso territorial es la utilización sustentable de los recursos naturales, el uso, la ocupación del territorio con base en su aptitud, la reducción de los desequilibrios socioeconómicos y la integración funcional del territorio (Luna 2011). También se enfoca en cuantificar la tasa de deforestación debido a su papel significativo en los ciclos del agua y la degradación de la tierra (Schneider 2008). En ese mismo sentido la expansión urbana ha influido de manera decisiva en los cambios de usos del suelo registrados en las últimas décadas, donde los análisis de los cambios son claves para proponer estrategias del desarrollo territorial (Rocha *et al.* 2009).

Cuadro 1. Softwares de mayor uso para el análisis de cambio de cobertura/uso del suelo

Software	Ejemplo de uso o aplicación
ARCGIS	Cambio en la cobertura y uso del suelo en el Norte de Jalisco, México (Ibarra-Montoya <i>et al.</i> 2011).
CA MARKOV	Comparación de programas de modelación de cambios de cobertura / uso del suelo (Mas <i>et al.</i> 2011).
CLUE-S	Dinámica del uso del suelo y cambio climático en la planeación sistemática para la conservación: un caso estudio en la cuenca Grijalva-Usumacinta (Kolb 2013).
ERDAS (Earth Resource Data Analysis System)	Evaluación de la efectividad de la reserva parque Luro como herramienta de conservación del Caldenal pampeano (González-Roglich <i>et al.</i> 2012).
Land Chance Modeler	Análisis de cambio del uso del suelo en el estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariadas. Una aproximación a los procesos de deforestación (Pineda Jaimes <i>et al.</i> 2009).
DINAMICA EGO (Environment for Geoprocessing Object)	Cambio y efecto de la deforestación sobre la dinámica poblacional de Panthera Onca desde el Catatumbo (norte de Santander) hasta paramillo (Antioquia) en el período 2010-2030 (Cubillos Buitrago 2012).

Estos softwares ayudan a identificar áreas susceptibles de cambiar, predicen el comportamiento futuro y prevén probables consecuencias de las transformaciones proyectadas (Veldkamp y Lambin 2001). En las últimas décadas se han desarrollado modelos matemáticos de



cambio de cobertura y uso del suelo, que estiman la probabilidad de cambio en función de un conjunto de variables explicativas (Mas *et al.* 2011).

### Modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos de mayor relevancia son los modelos distribuidos basados en procesos físicos. En los últimos años los modelos más utilizados son SWAT, VIC, InVEST y ARIES (cuadro 2).

Cuadro 2. Modelos hidrológicos de mayor uso

<b>Software</b>	<b>Ejemplo de uso o aplicación</b>
SWAT (Soil and Water Assessment Tool)	A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong watershed in the three Gorges reservoir area (Shen <i>et al.</i> 2009)
VIC (variable infiltration capacity)	Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia river basin (USA and Canada) (Matheussen <i>et al.</i> 2000).
InVEST (Integrated valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)	Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales (Nelson <i>et al.</i> 2009).

### Limitaciones de los modelos hidrológicos

Si bien el uso principal de los modelos hidrológicos es predecir los procesos físicos de la realidad, terminan siendo solamente una aproximación a esta. Es necesario tener en cuenta que presentan limitaciones en cuanto a su aplicación, entre las que puede mencionar las siguientes (San José 2010):

**No linealidad:** los modelos hidrológicos son representaciones simplificadas de los procesos hidrológicos reales, los cuales en la naturaleza no son lineales.

**Escala:** no todos los procesos hidrológicos son visibles en todas las escalas. Cada proceso hidrológico tiene una resolución mínima y máxima.

**Equifinalidad:** los modelos hidrológicos no garantizan una predicción futura correcta, por la razón de que no existe el modelo óptimo.

**Singularidad:** vinculada a la heterogeneidad de la naturaleza ya que no existen patrones continuos.

**Incertidumbre:** es necesario conocer los elementos que contribuyen en mayor medida a los errores y como pueden ser controlados. Centrada principalmente en qué modelo hidrológico seleccionar o qué conjunto de parámetros elegir y como se produce la transmisión de errores desde los datos hasta sus resultados.

## **Variables de importancia en el presente estudio**

La disponibilidad de los recursos hídricos puede ser descrita por la producción de agua definida como la diferencia entre la precipitación recibida y la evapotranspiración en función de varios factores, tales como el clima, la cobertura y uso del suelo (Sun *et al.* 2005). Al respecto, otros autores afirman que la estimación de la producción de agua y el balance de agua en la cuenca hidrográfica son fundamentales para la gestión sostenible de los recursos hídricos (Adeogun *et al.* 2014) y ha sido adoptada como una mejor manera de administrar y evaluar los mismos (Stehr *et al.* 2008).

### **a. Producción de agua y sedimento**

La producción de agua es la cantidad neta de agua que sale de la cuenca y que contribuye al flujo del río durante el paso del tiempo (Peschel 2003). Vinculado al concepto, Griensven *et al.* (2012) definen la producción de agua como la sumatoria de las variables del flujo superficial, flujo lateral y el flujo de las aguas subterráneas poco profundas, menos las pérdidas por transmisión y las pérdidas por abstracción de los almacenamientos.

Las pérdidas por transmisión son pérdidas del caudal de superficie a través de la percolación, desde el lecho de ríos efímeros o intermitentes donde la contribución de agua subterránea ocurre solo en ciertos periodos del año y las pérdidas por abstracción son de lagos y embalses (Abad 2006;Arnold *et al.* 2011).

Existen numerosas investigaciones que afirman que la producción de agua y de sedimentos se encuentra relacionada con factores climáticos. Los resultados obtenidos en una investigación en el este de China demuestra que la variación de la producción de agua es altamente dependiente del uso del suelo, cobertura vegetal, la ubicación geográfica, la temperatura y la precipitación (Nan *et al.* 2013).

Los sedimentos son producto principalmente de la erosión causada por el impacto de las gotas de lluvia, causando la pérdida de la capa superficial del suelo (Van Der Knijff *et al.* 2000). Así mismo es causada por el crecimiento de la población y el sobre uso de la tierra (Nasri *et al.* 2013) que se convierte un problema ambiental global, originando la degradación de la tierra (Spalevic *et al.* 2014).

De acuerdo a Boubacar y Pierre (2007), la erosión anual es el material total desprendido y arrastrado en una cuenca y la producción de sedimentos es la salida total de sedimento durante un determinado periodo de tiempo, al respecto Hovius *et al.* (1998) afirman que la producción de sedimentos es controlada por los factores que controlan la erosión.

De igual manera, Garcia-Chevesich (2009) relaciona los procesos de erosión y sedimentación cuando el agente erosivo es el agua.

#### **a.1. Factores que influyen a la producción de agua y sedimento**

Según (INAB 2003), los factores que influyen en la producción, almacenamiento y recarga en una cuenca son el clima, el suelo, la topografía, la estratigrafía geológica, la cobertura vegetal y

el escurrimiento. En una investigación realizada por Treviño *et al.* (2005), mencionan que la producción de agua se ve influenciada por factores físicos, biológicos y climáticos.

Cuando se trata de evaluar la producción de sedimentos, uno de los aspectos más importantes es el estudio hidrológico, sin embargo también es importante evaluar las actividades antropogénicas. La producción de sedimentos en una cuenca depende de muchos factores, los más importantes son el clima y régimen de lluvias, el uso del suelo, la vegetación, el tipo de suelo y la topografía (Linsley *et al.* 1977).

Según el estudio realizado por Milliman y Syvitski (1992) la producción de sedimentos es controlada en gran medida por la actividad tectónica y el relieve, y las variables climáticas (precipitación, escorrentía y temperatura) son secundarios. Sin embargo, Harrison (2000) afirma que la producción de sedimentos está en función de un conjunto de parámetros físicos combinados.

Por su parte, Daneshvar y Bagherzadeh (2012), afirman que la erosión es una de las formas de degradación de la tierra ocasionada por mal el uso y manejo del suelo, sobre todo en regiones áridas y semiáridas.

Existen numerosos ejemplos de investigaciones de esta naturaleza, a partir de las cuales se determinó que la cobertura y uso del suelo con presencia de bosques en áreas de pendientes elevadas reducen en un 5% la erosión en la cuenca y por consiguiente, la producción de sedimentos (Omani *et al.* 2007). Otros estudios relevantes señalan como primer factor el uso del suelo y segundo factor la pendiente en la producción de sedimentos (Ndomba *et al.* 2008;Ndomba y Van Griensven 2011).

A continuación se analizan los principales factores que contribuyen a la producción de agua y sedimento como son la precipitación, el uso y la cobertura del suelo, el tipo del suelo y los factores fisiográficos.

### **a.1.1.Precipitación**

La fuente principal más importante para la producción de agua ya sea subterránea como superficial, es el régimen y la cantidad de la precipitación (Matus 2007). Este factor está relacionado con las prácticas en actividades agropecuarias, el uso y la cobertura vegetal, con las propiedades físicas del suelo, de la intensidad, duración y frecuencia de la lluvia que intervienen en los procesos de infiltración, almacenamiento y recarga de las aguas subterráneas, generando mayor escorrentía superficial en la cuenca (Matus 2007).

Otros autores Linsley *et al.* (1977);Aranda (1998) mencionan que la cantidad de la precipitación sobre un área depende de la naturaleza y la densidad de la cobertura vegetal, que son los factores que originan el proceso del ciclo hidrológico dentro de un área.

Según Brooks *et al.* (2012), la lluvia actúa de manera directa e indirecta y es el mecanismo más importante para la producción de sedimentos. Al respecto, Garcia-Chevesich (2009) señala que la distribución temporal de la intensidad y duración de la tormenta generan caudales en la cuenca que tienen influencia importante en la etapa final cuando los suelos se encuentran

completamente saturados, llegándose a presentar mayor cantidad de escurrimiento superficial y teniendo como efecto tasas elevadas de generación de sedimentos.

### **a.1.2. Uso y cobertura del suelo**

El uso del suelo ya sea en sistemas productivos de uso agropecuario, industrial, forestal, etc. es un factor importante que contribuye a la producción del agua, que da lugar a contar con un flujo continuo y permanente (Robledo 2003).

Asimismo, Barrantes y Vega (2002) afirman que la presencia o ausencia de cobertura vegetal reduce o incrementa las velocidades de movimiento del agua y disminuye o incrementa la posibilidad de almacenamiento o retención de agua.

Según estudios realizados por Coppin y Richards (2007) existe una relación entre la producción de sedimentos y la cobertura vegetal, a mayor cobertura vegetal menor generación de sedimentos en la cuenca. Además encuentran relacionados con el efecto de protección de la superficie del suelo (Morgan 2005).

### **a.1.3. Suelo**

Según el estudio realizado por Matus (2007), la textura, estructura, contenido de humedad y el grado de compactación de los suelos, son factores que inciden en la capacidad de infiltración, en variaciones del proceso de escorrentía superficial y en la recarga de agua subterránea. Matus (2007) también señala que los suelos con características de textura gruesa, porosidad alta y permeable se caracterizan por ser suelos de alta capacidad de infiltración y que contribuyen a la producción de agua.

Según phi – Lac (2010), los suelos con composición de partículas medianas (0,1 a 1 mm) son suelos que producen mayor cantidad de sedimentos, en comparación con las partículas finas que tienen mayor cohesividad y las partículas gruesas que son más pesadas y tienen mayor resistencia a los procesos erosivos. La presencia de materia orgánica mejora las propiedades del suelo, contribuyendo a la resistencia a la erosión y por ende, a reducir la producción de sedimentos (García-Chevesich 2009).

### **a.1.4. Factores fisiográficos**

Existe una relación entre la capacidad de almacenamiento de agua y el grado de inclinación de la pendiente del suelo que origina mayor cantidad de agua infiltrada de acuerdo a la distribución de pendiente, tipo de suelo y cobertura (Bueso 2009). Vinculado a lo anteriormente mencionado, las áreas de pendiente baja permiten mayor percolación, menor escorrentía y contribuyen a la recarga de acuíferos (Sevilla *et al.* 2009).

Aranda (1998) menciona que la pendiente tiene una compleja relación con la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y el aporte del agua subterránea, debido a que controla el tiempo del flujo sobre la superficie.

En relación a la producción de sedimentos la topografía es un factor muy importante en el potencial de erosión de una cuenca, pues determina la velocidad del escurrimiento superficial (Brooks *et al.* 2012) en función de la inclinación de la pendiente, donde el impacto de la lluvia tendrá mayor influencia (Toy *et al.* 2002).

### **Descripción del modelo hidrológico SWAT**

La herramienta digital para la evaluación del suelo y el agua, Soil and Water Assessment Tools SWAT por sus siglas en inglés, fue desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Es un modelo hidrológico a escala de cuencas, que predice el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la producción de agua y de sedimentos. El modelo, utiliza información sobre topografía, uso del suelo, tipo de suelo y el clima para la modelación hidrológica (Neitsch *et al.* 2005).

Al respecto, diferentes investigadores han analizado la manera en que la información requerida afecta al modelo hidrológico. Di Luzio *et al.* (2005) mencionan que el Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en inglés), es uno de los insumos más importantes al momento de la simulación, a través del cual se define la pendiente y la longitud de los cauces de la subcuenca y de cada Unidad de Respuesta Hidrológica, HRU, que se definen como superficies homogéneas y combinaciones únicas de vegetación, suelo y pendiente (Kumar 2011).

Neitsch *et al.* (2005) afirman que el uso del suelo es uno de los factores más importantes que afectan a la erosión de la superficie, la escorrentía y la evapotranspiración en una cuenca durante la simulación (Neitsch *et al.* 2005). Para Vaes *et al.* (2001), la precipitación es el dato más importante en los modelos hidrológicos, donde es fundamental definir adecuadamente su distribución espacial y temporal para modelar la respuesta hidrológica.

En SWAT el ciclo hidrológico puede ser simulado a nivel diario, mensual o anual, con base en la ecuación de equilibrio del agua (Neitsch *et al.* 2005)

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Donde  $SW_t$  es el contenido final de agua en el suelo medida (mm);  $SW_0$  es el contenido inicial de agua en el suelo para el periodo de un día  $i$  ( $mm_{H_2O}$ );  $t$  es el tiempo en días;  $R_{day}$  es la cantidad de precipitación en un día  $i$  ( $mm_{H_2O}$ );  $Q_{surf}$  es la cantidad de escorrentía en un día  $i$  ( $mm_{H_2O}$ );  $E_a$  es la cantidad de evapotranspiración en un día  $i$  ( $mm_{H_2O}$ );  $W_{seep}$  es la cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en un día  $i$  ( $mm_{H_2O}$ );  $Q_{gw}$  es la cantidad de flujo de retorno en un día  $i$  ( $mm_{H_2O}$ ).

La producción de agua es estimada a nivel de cuenca, subcuencas y HRUs con base a la siguiente fórmula:

$$WYLD = SURQ + LATQ + GWQ - TLOSS - Pond\ abstractions$$

Donde WYLD es el rendimiento de agua, SURQ es la cantidad de escorrentía superficial que llega al cauce, LATQ es el flujo lateral, GWQ contribución del agua subterránea al caudal (flujo

base), TLOSS es el agua que se pierde por recarga al acuífero y abstracciones de estanque (pond abstractions) es el almacenamiento (Arnold *et al.* 2012a).

La producción de sedimentos se estima a nivel de HRU y subcuencas, mediante la ecuación modificada de pérdida universal de suelo (MUSLE) (Williams 1975).

$$Sed = 11.8 (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG$$

Donde Sed es la producción de sedimentos en un día dado (ton.m),  $Q_{surf}$ : es el volumen de superficies de escorrentías (mm agua/ha),  $q_{peak}$ : es la escorrentía máxima (m<sup>3</sup>/s),  $area_{hru}$ : es el área del HRU (ha),  $K_{USLE}$ : es el factor de erodabilidad del suelo,  $C_{USLE}$ : es el factor de cobertura y gestión de USLE,  $P_{USLE}$ : es el factor de la práctica de apoyo de USLE,  $LS_{USLE}$ : es el factor topográfico, CFRG: es el factor de fragmento macro.

Arnold *et al.* (1998) recomiendan el cálculo de la evapotranspiración potencial de acuerdo al método de Hargreaves o de Priestley Taylor, cuando no se dispone de datos de radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa, que ofrecen resultados más acordes a la realidad, en la mayoría de los casos.

En la modelación hidrológica con SWAT es necesario realizar la simulación con un periodo de calentamiento para estabilizar las condiciones básicas de flujo durante la simulación y llevar los procesos hidrológicos a una condición de equilibrio (Arnold *et al.* 2012b).

### **Limitaciones del modelo SWAT**

Este modelo hidrológico permite estimar la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas a diferentes escalas. Debe considerarse las limitaciones que presenta momento de su aplicación, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

Es fundamental contar con información de estaciones de aforo de caudales y mediciones de sedimentos que proporcionen series de datos en cantidad suficiente para su correcta calibración y validación.

Es necesario introducir gran cantidad de parámetros que son sensibles en el proceso de simulación que influyen en la estimación de la producción de agua y sedimentos, por lo que el proceso de calibración es compleja.

Muchos parámetros adoptados por el modelo hidrológico tienen una base empírica, no siempre obtenidos bajo las condiciones de aplicación del mismo, por lo que es necesario valorar su aplicabilidad a cada caso y utilizar información del área de estudio existente, si están disponibles.

### **1.4 PRINCIPALES RESULTADOS**

Se identificaron las principales coberturas y usos del suelo que cambiaron en el periodo en estudio, tal y como se indica en el cuadro 3.

Cuadro 3. Cambios del uso/cobertura del suelo, subcuenca del río Berrís, 2004/2015

Uso del suelo	2004		2015		Tasa de cambio promedio anual
	ha	%	ha	%	%
Área urbana	106	2	126	3	18
Bosque	1366	28	1237	26	-10
Cenizas	6	0.1	6	0.1	0.0
Charral	46	1	33	1	-33
Cultivo agrícola	1580	33	1300	27	-19
Pasto	1697	35	2098	44	21

La producción de agua y sedimento en la subcuenca del río Berrís fue de 1639 mm/año y 35 t/ha/año. La magnitud de estas variables según el uso del suelo se presentan en la figura 1. Además, la mayor producción de agua se da en la parte media de la cuenca, lo mismo que la mayor producción de sedimentos.

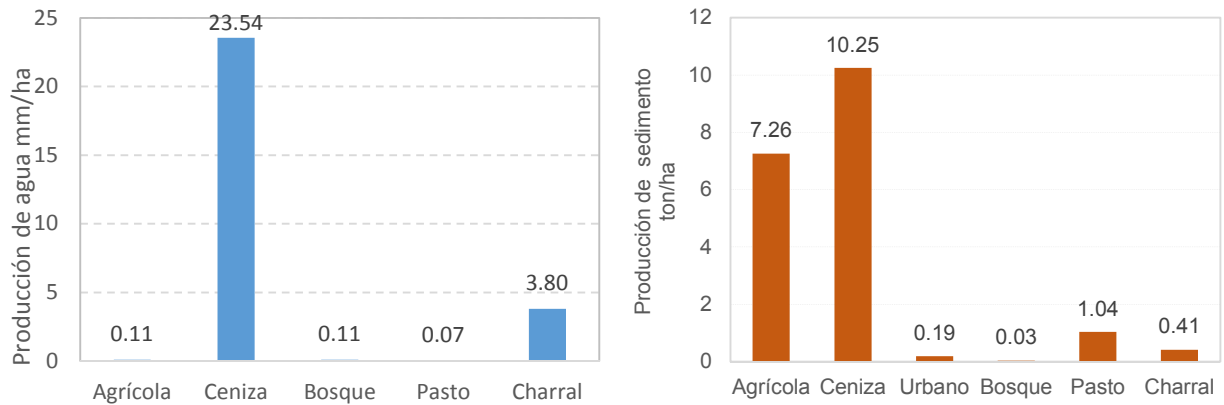


Figura 1. Producción de agua y sedimento según el uso/cobertura, subcuenca Berrís 2011-2014

### 1.4 PRINCIPALES CONCLUSIONES

La subcuenca del río Berrís se encuentra condicionada por la actividad agropecuaria que representa el sustento económico de la región. La tendencia de cambio en el uso del suelo indica un crecimiento hacia el uso de pasto y el área urbana.

Las precipitaciones elevadas, el uso del suelo, el tipo de suelo y las pendientes elevadas son factores determinantes en la producción y distribución espacial de la producción de agua y de sedimentos.

Los usos del suelo de áreas agrícolas, pasto y bosque combinados con estos factores son que aportan más a la producción de agua y los usos de cultivo agrícola, pastos y áreas ocupadas por ceniza volcánica son los que contribuyen más a la producción de sedimentos.

## 1.5 LITERATURA CITADA

- Agenda de Desarrollo Post-2015 de la Organización de las Naciones Unidas (2015, 2015. Objetivos de Desarrollo Sostenible. 78 p.
- Abad, NG. 2006. Modelación hidrológica de las cuencas El Chuveje y Arroyo Real como herramienta en la implementación de pago por servicios ecológicos en la reserva de la Biosfera Sierra Gorda, Querétaro, México. Mag. Sc. México, Instituto tecnológico y de estudios superiores de Monterrey 288 p.
- Adeogun, AG; Sule, BF; Salami, AW; Daramola, MO. 2014. Validation of SWAT Model for Prediction of Water Yield and Water Balance: Case Study of Upstream Catchment of Jebba Dam in Nigeria. *International Journal of Mathematical, Computational, Physical and Quantum Engineering* 82:264-270.
- Aguilar, GR; Iza, AO. 2009. Gobernanza de aguas compartidas: aspectos jurídicos e institucionales. Druckerei Gerhards GmbH Bonn, Germany ed. IUCN. 240 p.
- Alatorre, L; Beguería, S. 2009. Los modelos de erosión: una revisión. *Cuaternario y geomorfología* 231-2:29-48.
- Aranda, DFC. 1998. Procesos del ciclo hidrológico. Editorial Universitaria Potosina ed. San Luis Potosí, Mexico, UASLP. 30 p.
- Arnold, J; Moriasi, D; Gassman, P; Abbaspour, K; White, M; Srinivasan, R; Santhi, C; Harmel, R; Van Griensven, A; Van Liew, M. 2012a. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 554:1491-1508.
- Arnold, JG; Srinivasan, R; Muttiah, RS; Williams, JR. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development1. *Journal of the American Water Resources Association American Water Resources Association* 341:73-89.
- Arnold, JG; Kiniry, JR; Srinivasan, R; Williams, JR; Haney, EB; Neitsch, SL. 2012b. Soil, Water Assessment Tool. Texas, Texas Water Resources Institute. 650 p. (Input/Output Documentation).
- Arnold, JK, J; ; Srinivasan, R; Williams, J; Haney, E; Neitsch, SL. 2011. Soil and Water Assessment Tool input/output file documentation, version 2009. Temple, TX, 643 p. (US Department of Agriculture-Agricultural Research Service, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX and Blackland Research and Extension Centre, Texas AgriLife Research, Temple, TX Texas Water Resources Institute Technical Report).
- Barrantes, G; Vega, M. 2002. Evaluación del servicio ambiental hídrico y su aplicación al ajuste de tarifas, en la cuenca del río Tempisque. Documento preparado para ASOTEMPISQUE. 102 p.
- Bosque Sendra, J. 1992. Sistemas de Información Geográfica. Rialp. Madrid ed.
- Boubacar, K; Pierre, J. 2007. Specific degradation of watersheds. *International Journal of Sediment Research* 222:114-119.
- Brooks, KN; Ffolliott, PF; Magner, JA. 2012. Hydrology and the Management of Watersheds. John Wiley & Sons. 517 p.
- Bueso, ML. 2009. Identificación y caracterización de las zonas con mayor potencial de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos Tcacó y Shusho, municipio de Chiquimula. Chiquimula, Guatemala, CONCYT, SENACYT, FONACYT, Universidad de San Carlos de Guatemala. 149 p.
- CEPAL(Comisión Económica para América Latina y el Caribe, ). 2006. Istmo Centroamericano: Estadísticas del subsector eléctrico. Informe preliminar del segmento de la producción de electricidad. 37 p.
- Coppin, NJ; Richards, IG. 2007. Use of vegetation in civil engineering. London, Butterworths London. 237 p.



- Cubillos Buitrago, ÁA. 2012. Cambio y efecto de la deforestación sobre la dinámica poblacional de panthera onca desde el Catatumbo (norte de Santander) hasta paramillo (Antioquia) en el período 2010-2030.
- Daneshvar, MRM; Bagherzadeh, A. 2012. Evaluation of sediment yield in PSIAC and MPSIAC models by using GIS at Toroq Watershed, Northeast of Iran. *Frontiers of Earth Science* 61:83-94.
- Di Luzio, M; Arnold, JG; Srinivasan, R. 2005. Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations. *Hydrological Processes* 193:629-650.
- Eastman, J; Van Fossen, M; Solarzano, L. 2005. Transition potential modeling for land cover change. *GIS, spatial analysis and modeling*:357-386.
- Eastman, R. 2009a. The Land Change Modeler for Ecological Sustainability. IDRISI Focus Paper, Clark Labs:2.
- \_\_\_\_\_. 2009b. Idrisi Taiga, Guide to GIS and Image Processing, manual version 16.02. Clark University. 342 p.
- Garcia-Chevesich, PA. 2009. Erosion Processes and Control. Ph. D. Arizona, Estados Unidos, The University Of Arizona. 513 p.
- Geneletti, D. 2008. Incorporating biodiversity assets in spatial planning: Methodological proposal and development of a planning support system. *Landscape and urban planning* 843:252-265.
- González-Roglich, M; Villarreal, D; Castro, MG. 2012. Evaluación de la efectividad de la Reserva Parque Luro como herramienta de conservación del Caldenal pampeano: cambios en la cobertura vegetal a nivel de paisaje entre 1960 y 2004. *Ecología austral* 221:11-21.
- Griensven, Av; Ndomba, P; Yalaw, S; Kilonzo, F. 2012. Critical review of the application of SWAT in the upper Nile Basin countries. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 93:3761-3788.
- Harrison, C. 2000. What factors control mechanical erosion rates? *International Journal of Earth Sciences* 884:752-763.
- Hovius, N; Stark, CP; Tutton, MA; Abbott, LD. 1998. Landslide-driven drainage network evolution in a pre-steady-state mountain belt: Finisterre Mountains, Papua New Guinea. *Geology* 2612:1071-1074.
- Ibarra-Montoya, JL; Román, R; Gutiérrez, K; Gaxiola, J; Arias, V; Bautista, M. 2011. Cambio en la cobertura y uso de suelo en el norte de Jalisco, México: Un análisis del futuro, en un contexto de cambio climático. *Revista Ambiente & Agua-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*: v 62:111-128.
- ICE. 1999. Plan de Manejo Integral de la Cuenca del Río Reventazón. Costa Rica, 381 p. (Documento No. 4 Informe Final).
- INAB(Instituto Nacional de Bosques, ). 2003. Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural. Manual Técnico. Guatemala, Instituto Nacional de Bosques. 106 p.
- Kolb, M. 2013. Dinámica del uso del suelo y cambio climático en la planeación sistemática para la conservación: un caso de estudio en la cuenca Grijalva-Usumacinta. Thesis Ph.D. D.F. Mexico, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II-Universidad Nacional Autónoma de México. 278 p.
- Kumar, M. 2011. Evaluating Hydrologic Response of an Agricultural Watershed for Watershed Analysis. *Water* 3:604-617.
- Linsley, J; Kohler, M; Paulus, J. 1977. Hidrología para Ingenieros. Cali, Colombia, McGraw-Hill Latinoamericana. 398 p.
- Luna, VG. 2011. Analisis multitemporal de la dinamica en el cambio de uso del suelo rural-urbano en la region de Atlixco, Puebla. Doctor en Ciencias. Puebla, Mexico, Colegio de Postgraduados. 270 p.

- Maguire, DJ; Batty, M; Goodchild, MF. 2005. GIS, spatial analysis, and modeling. Esri Press. 480 p.
- Mas, J-F; Kolb, M; Paegelow, M; Olmedo, MC; Houet, T. 2014. Modelling Land use/cover changes: a comparison of conceptual approaches and softwares. *Environmental Modelling and Software* 51:94-111.
- Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR (XV, 2011. Comparación de programas de modelación de cambios de cobertura / uso del suelo. Curitiba, PR, Brasil, 8 p.
- Matheussen, B; Kirschbaum, RL; Goodman, IA; O'Donnell, GM; Lettenmaier, DP. 2000. Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia River Basin (USA and Canada). *Hydrological Processes* 145:867-885.
- Matus, O. 2007. Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica: aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua. Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 247 p.
- Milliman, JD; Syvitski, JP. 1992. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *The Journal of Geology* 100:525-544.
- Morgan, RPC. 2005. *Soil Erosion & Conservation*. Blackwell Publishing. 299 p.
- Nan, L; Ge, S; Xiaoming, F; Bojie, F. 2013. Water yield responses to climate change and variability across the North-South Transect of Eastern China (NSTEC). *Journal of Hydrology* 481:96-105.
- Nasri, M; Feiznia, S; Jafari, M; Ahmadi, H. 2013. Application of Gully and Rill Erosion Indicators for Estimating Soil Loss Using GIS Techniques (Case Study: Menderjan Watershed, Iran). *Desert (2008-0875)* 17:119-128.
- Ndomba, PM; Mtalo, FW; Killingtveit, Å. 2008. A guided SWAT model application on sediment yield modeling in Pangani River basin: Lessons learnt. *Journal of Urban and Environmental Engineering* 22:53-62.
- Ndomba, PM; van Griensven, A. 2011. Suitability of SWAT model in sediment yields modeling in the Eastern Africa. *Advances in Data, Methods, Models and Their Applications in Geoscience, InTech, China*:261-284.
- Neitsch, SL; Arnold, JG; Kiniry, JR; Williams, JR. 2005. *Soil And Wather Assesment Tool Theoretical Documentation*. Temple, Texas, USA, 476 p. (Grassland, Soil and Water Research Laboratory o Agricultural Research Service).
- Nelson, E; Mendoza, G; Regetz, J; Polasky, S; Tallis, H; Cameron, D; Chan, KM; Daily, GC; Goldstein, J; Kareiva, PM. 2009. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment* 71:4-11.
- Olmedo, MC; Melgarejo, EM; Paegelow, M. 2010. Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio. *Tecnologías de la informacion geografica. La informacion geografica al servicio de los ciudadanos*:658-678.
- 2nd International Conference on Managing Rivers in the 21st Century: Solutions Towards Sustainable River Basins. Riverside Kuching, Sarawak, Malaysia (2007. Modelling of a River Basin Using SWAT Model and GIS. 6-8 p.
- ONU(Organizaciones de Naciones Unidas, ). 2014. Nota informativa: agua y energía. Conferencia de las Naciones Unidas. Río de Janeiro, Brasil, ONU. 8 p. (El mundo que queremos).
- Peschel, JM. 2003. Evaluating the Influence of Soil Data Set Resolution within the Outputs of a Distributed Parameter Hydrologic Model. Texas, Sustainable Costal Margins Group At Texas A&M University. 29 p. (Land Cover and Land Use Change).
- Pineda Jaimes, NB; Bosque Sendra, J; Gómez Delgado, M; Plata Rocha, W. 2009. Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información

- geográfica y técnicas de regresión multivariantes: Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones geográficas* 69:33-52.
- Programa de Reducción de la Vulnerabilidad y Degradación Ambiental. 2008. Plan de Cuenca del Río Reventazón-Parismina. Costa Rica, 334 p.
- Ramakrishna, B. 1997. Estrategias de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: conceptos y experiencias. San Jose, Costa Rica, IICA. 338 p. (Investigación y educación en desarrollo sostenible).
- Ramírez, L; Alvarado, A; Pujol, R; MacHugh, A; Brenes, LG. 2008. Indicadores para estimar la sostenibilidad agrícola de la cuenca media del río Reventado, Cartago, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 322:73-92.
- Robledo, WI. 2003. Pago de Servicios ambientales para la implementación de sistemas agroforestales en áreas críticas de las cuencas generadoras de energía eléctrica María Linda y Los Esclavos, Guatemala. *Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE.* 104 p.
- Rocha, WP; Delgado, MG; Sendra, JB. 2009. Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la Comunidad de Madrid (1990-2000). *Scripta Nova: revista electrónica de geografía y ciencias sociales* 13:293.
- Schneider, LC. 2008. Plant invasions in an agricultural Frontier: linking satellite, ecological and household survey data. 26 p. (Land change science in the tropics: changing agricultural landscapes. Springer Science).
- Sevilla, VA; Comerma, JA; Silva, O. 2009. Caracterización de la cuenca del río Canoabo en el estado Carabobo, Venezuela. i. análisis climático y de producción de agua *Agronomía Trop* 591:33-44.
- Shen, Z; Gong, Y; Li, Y; Hong, Q; Xu, L; Liu, R. 2009. A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area. *Agricultural water management* 9610:1435-1442.
- Silva, O. 2004. El modelo SWAT en una cuenca pequeña de altas pendientes: simulación de la producción de agua. *Agronomía Tropical* 543:275-291.
- Simonovic, SP. 2002. World water dynamics: global modeling of water resources. *Journal of Environmental Management* 663:249-267.
- Spalevic, V; Radanovic, D; Behzadfar, M; Djekovic, V; Andjelkovic, A; Milosevic, N. 2014. Calculation of the sediment yield of the Trebacka Rijeka, Polimlje, Montenegro. *Agriculture and Forestry* 601:259-272.
- Stehr, A; Debels, P; Romero, F; Alcayaga, H. 2008. Hydrological modelling with SWAT under conditions of limited data availability: evaluation of results from a Chilean case study. *Hydrological sciences journal* 533:588-601.
- Sun, G; McNulty, SG; Lu, J; Amatya, DM; Liang, Y; Kolka, R. 2005. Regional annual water yield from forest lands and its response to potential deforestation across the southeastern United States. *Journal of Hydrology* 3081:258-268.
- Torres, E; Reynoso, D; Oropeza, JL; Mejía, E. 2004. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México. *Redalyc* 224:9.
- Toy, TJ; Foster, GR; Renard, KG. 2002. Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control. New York, John Wiley & Sons. 338 p.
- Treviño, E; Aguirre, OA; Salinas, W; Xanat, N; Verastegui, J. 2005. Evaluación de la producción de agua usando modelos de análisis geográfico. *Revista internacional de Ciencias de la Tierra.*(<http://www.mappinginteractivo.com>). Artículo 1058:13-17.
- UN WATER. 2014. Agua y energía. Perusa, Italia, 12 p. (Resumen ejecutivo). Consultado 15 oct., 2014. Disponible en <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002269/226962S.pdf>
- Vaes, G; Willems, P; Berlamont, J. 2001. Rainfall input requirements for hydrological calculations. *Urban Water* 31:107-112.

- Van der Knijff, J; Jones, R; Montanarella, L. 2000. Soil erosion risk assessment in Europe. European Soil Bureau, European Commission. 38 p.
- Veldkamp, A; Lambin, EF. 2001. Predicting landuse change. Agriculture, Ecosystems and Environment 85: 1-6
- Verburg, PH; Overmars, KP. 2009. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. Landscape ecology 249:1167-1181.
- Walling, D; Fang, D. 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. Global and Planetary Change 391:111-126.
- Wasson, R. 2002. Modelling erosion, sediment transport and sediment yield. *In* W Summer; DE Walling. eds., UNESCO. p. 263.
- Williams, JR. 1975. Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. USDA ARS-S-40:244-252.
- Zubieta, R. 2013. Modelado hidrológico distribuido de la cuenca Amazonica Peruana utilizando precipiación obtenida por satélite. Mag. Sc. en Recursos Naturales. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 110 p.

## **CAPÍTULO II**

### **ARTÍCULO I**

#### **ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL CAMBIO DE USO/COBERTURA DEL SUELO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO BIRRÍS, CUENCA DEL RÍO REVENTAZÓN, COSTA RICA**

##### **RESUMEN**

El análisis multitemporal permite evaluar los cambios ocurridos por acciones humanas que tienen repercusión sobre el medio ambiente y los recursos naturales. El propósito de este trabajo fue analizar y evaluar los cambios de cobertura y uso del suelo sucedidos en la subcuenca del río Birrís en el periodo comprendido entre los años 2004 al 2015, a fin de determinar la influencia de la dinámica de cambio de uso del suelo de acuerdo a las actividades socioeconómicas que se realizan dentro de la subcuenca. Asimismo, se calcularon las transiciones, intercambios y permanencias de las categorías de uso/cobertura dentro de la subcuenca. Los resultados muestran que los cambios de uso del suelo están predominados por la transformación de zonas de cultivo agrícola a zonas de pasto, seguidas por espacios dedicados a cultivos agrícolas y zonas de bosques.

**PALABRAS CLAVE:** Cambio de uso del suelo, cobertura vegetal, matriz de transición.

##### **2.1 INTRODUCCIÓN**

En las últimas décadas el cambio de uso del suelo se ha constituido como uno de los factores plenamente implicados en el cambio global, alterando procesos y ciclos (Pineda Jaimes et al. 2009), donde la cobertura vegetal y los usos del suelo determinan el funcionamiento de los ecosistemas que afectan directamente a su biodiversidad, que contribuyen a los cambios climáticos locales, regionales y globales, que son fuente principal de la degradación de los suelos (Mendoza 2010), que ocasionan cambios en el microclima y afectan el funcionamiento de las cuencas hidrográficas (Ibarra-Montoya *et al.* 2011) . Debido a que los cambios en el uso de la tierra son cada vez más rápidos, es necesario comprender las fuerzas que impulsan esos cambios y sus efectos sobre procesos del medio ambiente global (Veldkamp y Lambin 2001; Claessens *et al.* 2009). Se atribuye a las relaciones del hombre y el medio, el cambio de cobertura y uso del suelo (Chen y Yang 2008).

El crecimiento exponencial que ha experimentado la población a nivel mundial en las últimas décadas, la demanda de los recursos naturales para satisfacer las necesidades de supervivencia de esa población y las formas y mecanismos de apropiación de los recursos han tenido implicaciones estructurales y funcionales sobre los ecosistemas (Rosete Vergés et al. 2008; Mas et al. 2009).

Estudios enfocados en el uso histórico del suelo en la subcuenca del río Birrís desde la década de 1950 hasta la actualidad, indican que en la década de 1950 el uso de la tierra estaba caracterizado por la presencia de grandes fincas e importantes remanentes de bosque natural en las cuencas media y alta, así como en, las riberas fluviales. A partir de la década de 1960 se dio

un proceso de la compra de grandes fincas, resultando en la segregación en parcelas pequeñas y a la deforestación de grandes áreas. Este proceso se extendió de manera más intensiva a partir de los años ochenta en la parte baja de la subcuenca (Marchamalo 2004).

Se han realizado estudios sobre los cambios de cobertura y uso del suelo, debido a la importancia que representa sobre el impacto de alteración del suelo (Foley et al. 2005). Asimismo, proporcionan información del comportamiento y las tendencias de los procesos de degradación, en los que intervienen factores ecológicos y socioeconómicos (Guerra y Ochoa 2006).

Este estudio describe el análisis de los cambios de uso y cobertura del suelo en la subcuenca del río Birrís, que se encuentran relacionados por las actividades socioeconómicas del lugar, la cual pretende responder a la pregunta de investigación ¿Cómo son los cambios de cobertura y uso del suelo a través del tiempo en la cuenca del río Birrís?

Los resultados obtenidos pueden contribuir a identificar áreas prioritarias que ayuden en la formulación de planes de acción para el mejor manejo de los recursos naturales, así como conocer el impacto de las actividades socioeconómicas, cambios en la vegetación, usos del suelo, así como la distribución en el tiempo de incremento o disminución de las tierras dedicadas a actividades antrópicas.

## **2.2 METODOLOGÍA**

### **Descripción del área de estudio**

La subcuenca del río Birrís se encuentra localizada al noreste de la ciudad de Cartago, Costa Rica y forma parte del sistema fluvial del río Reventazón (Gutiérrez 2001). Está situada entre las coordenadas UTM (523765, 1093209) y (515308, 1103258), tiene una superficie de 4800 hectáreas y una variación altitudinal entre los 1245 y 3432 msnm (Vargas 2010) (figura 2). Sus aguas son aprovechadas por la empresa hidroeléctrica JASEC (Junta Administrativa del Servicio Eléctrico de Cartago), la cual genera y suministra energía eléctrica a la provincia de Cartago (Marchamalo 2004).

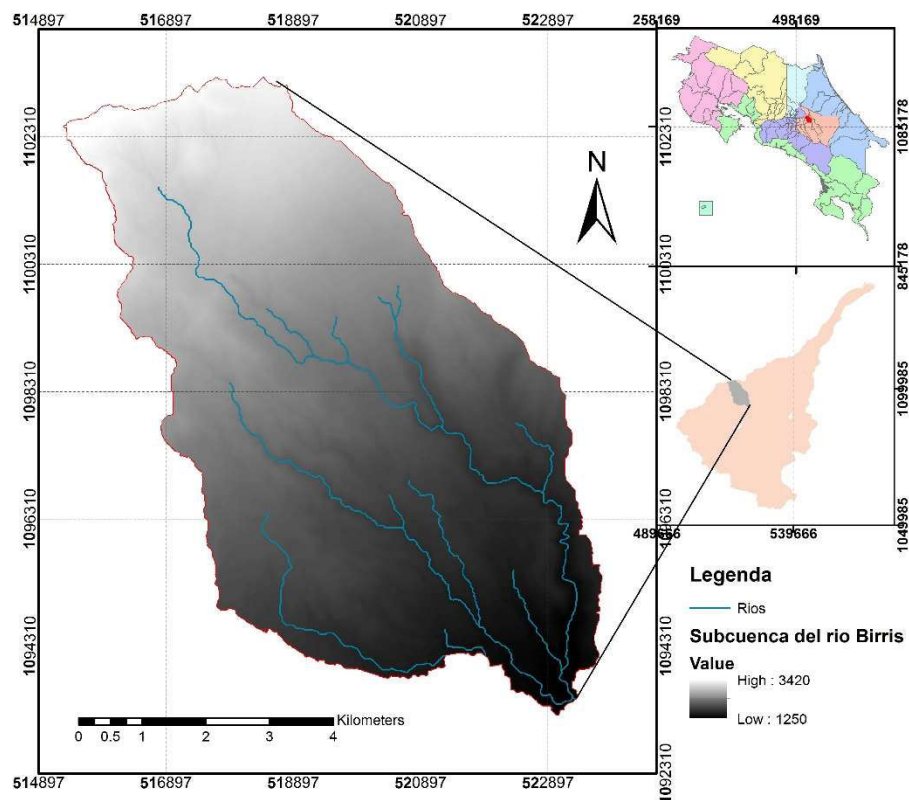


Figura 2. Ubicación de la subcuenca del río Birris, Costa Rica

El clima de la subcuenca del río Birris es influenciado por las condiciones climáticas de la vertiente atlántica, incluyendo los vientos alisios del norte por medio del efecto Föhn. La precipitación media anual es de 2325 mm y la temperatura promedio de 16.7 °C, que desciende hasta 7.2 °C, en la parte más alta de la subcuenca (Marchamalo 2004).

Los suelos de la subcuenca son de origen volcánico, clasificados como Andisoles. Son suelos oscuros y profundos de textura granular, con alto contenido de materia orgánica (Cortés 1993). Según Marchamalo (2004), los tipos predominantes de vegetación son: bosque 28%, pasto 35% y cultivo 33%.

Los distritos que forman parte de la subcuenca de río Birris son Pacayas, Cervantes, parte de Capellades del cantón Alvarado, Santa Rosa y Cipreses del cantón Oreamuno (Lianes et al. 2009). Según (INEC 2001), en la subcuenca habitan 7745 personas, la densidad poblacional es de 161 hab/km<sup>2</sup>, siendo el distrito de Pacayas el de mayor concentración de población con 2270 habitantes.

Las actividades agropecuarias son las predominantes en la subcuenca del río Birris, con la presencia de grandes fincas distribuidas en la parte alta, media y baja. Actualmente los principales cultivos agrícolas de la zona son: papa, repollo, coliflor, brócoli, cebolla, zanahoria, chayote, remolacha, chile y tomate, y especies frutales (ciruela en la parte alta y aguacate en la parte baja de la subcuenca) (Prevda 2010).

## **Procedimiento metodológico**

Para determinar las tendencias en los cambios de cobertura y uso del suelo que ocurren en la subcuenca del río Birrís, se aplicó el software IDRISI SELVA, que mediante el procesamiento de imágenes satelitales permite determinar la transición del uso/cobertura del suelo. El procedimiento que se siguió se describe a continuación.

### **❖ Elaboración del mapa del uso/cobertura del suelo**

Para la elaboración del mapa de uso y cobertura del suelo del año 2015 se utilizó el mapa de uso/cobertura del suelo del año 2004, que fue analizado por medio de fotos aéreas a color de la serie TERRA (Marchamalo 2004). El mismo que fue clasificado en seis grupos principales (área urbana, bosques, cenizas volcánicas, cultivos agrícolas, charral y pasto).

Con base en la leyenda del mapa de uso/cobertura del año 2004 y una imagen satelital RapidEye ortorectificada nivel 3A (corregida radiométricamente y geométricamente), referenciada a una proyección cartográfica WGS84 UTM Zona 17N, con un tamaño de pixel de 5x5 metros de resolución del año 2011, se realizó la clasificación de los usos del suelo existentes al año 2015.

Se realizó el análisis de procesamiento e interpretación de la imagen satelital RapidEye mediante la clasificación supervisada<sup>2</sup>, utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) ENVI y ArcGis. Estas herramientas, permiten, mediante el procesamiento digital de imágenes de satélite, identificar, monitorear y cuantificar a escala regional los procesos de cambio de la cobertura vegetal (Coppin et al. 2004). Se identificaron las principales coberturas y uso del suelo, según la leyenda establecida en el mapa de usos y cobertura del 2004. Posteriormente se realizó la verificación o validación en campo de 184 puntos de control distribuidos aleatoriamente sobre superficie de la subcuenca del río Birrís, que fueron generados mediante la herramienta Random point de Arc Toolbox.

### **Elaboración de la matriz de transición de área**

Se analizó el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo utilizando el software IDRISI Selva a partir de los mapas del 2004 y del 2015, comparándose la clasificación de las seis categorías de cobertura y uso del suelo, identificadas por Marchamalo en el año 2004. Previamente se realizó una reclasificación de la leyenda de los mapas originales de uso del suelo y cobertura. Se realizó el proceso de sobreposición llamado cruce de tablas o "crosstab" y se generó la matriz de transición que muestra, numéricamente, los cambios ocurridos en el periodo de análisis (2004 a 2015). Para facilitar este análisis, la matriz de cambio o transición se representó mediante gráficas de ganancias y pérdidas netas por categoría de uso, derivadas de Land Chance Modeler que permitió identificar las principales transiciones de los usos de suelo en cada área (Eastman 2009a).

---

<sup>2</sup> Técnica de clasificación que usa valores de pixeles de identidad conocida dentro de regiones de interés (ROIs) que se considerará para el proceso de clasificación.



La tasa de cambio de las coberturas existentes en la subcuenca fueron calculadas utilizando la siguiente fórmula (Puyravaud 2003), la cual representa la tasa de cambio promedio anual entre las superficies existentes en los dos periodos analizados.

$$Tc = \ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right) \cdot \frac{100}{(t_2 - t_1)}$$

Donde Tc es la tasa de cambio por año en porcentaje; A<sub>1</sub> es el uso del suelo en el tiempo 1; A<sub>2</sub> es el uso del suelo en el tiempo 2; t<sub>1</sub> es el año de evaluación inicial y t<sub>2</sub> es el año de evaluación final.

La matriz de probabilidad condicional fue calculada según metodología de Logsdon *et al.* (1996).

## 2.3 RESULTADOS

### Evaluación de los cambios de uso del suelo

El cambio de cobertura vegetal y uso del suelo se presentan en el cuadro 4. Las clases predominantes de ocupación territorial en la subcuenca, en el 2004, fueron las áreas de pastos, seguidas por las categorías de cultivo agrícola y bosque. En el año 2015 se mantiene el mismo orden de predominancia de categoría de uso, pero con tendencias diferentes, ya que el área de pastos aumentó, mientras que las de cultivo agrícola y bosque se redujo. Las tasas de cambio promedio anual en las diferentes categorías de uso siguieron esa misma tendencia.

Los principales cambios de uso correspondieron a las categorías de pasto y área urbana que incrementaron en superficie, con relación a la que tenían en el 2004, mientras que las zonas de cultivo agrícola, bosque y charral tuvieron una disminución. La categoría de cenizas es la que permaneció sin cambio alguno durante el periodo analizado.

Cuadro 4. Cambios del uso/cobertura del suelo, subcuenca del río Birrís, 2004/2015

Uso del suelo	2004		2015		Tasa de cambio promedio anual
	ha	%	ha	%	%
Área urbana	106	2	126	3	18
Bosque	1366	28	1237	26	-10
Cenizas	6	0.1	6	0.1	0.0
Charral	46	1	33	1	-33
Cultivo agrícola	1580	33	1300	27	-19
Pasto	1697	35	2098	44	21

### Matriz de transición de uso del suelo

Las relaciones de cambio o matriz de transición se muestran en el cuadro 5, que expresa las relaciones de cambio existente entre los diferentes usos de la tierra durante el periodo de análisis, donde las filas representan las áreas en transición de pérdidas y las columnas las áreas en

transición de ganancias que permite identificar patrones dominantes en el análisis de cambio, como la superficie que persistió (diagonal).

Cuadro 5. Matriz de transición de cambio del uso/cobertura del suelo, subcuenca del río Birrís, 2004/2015 (hectáreas)

<b>Cobertura</b>	<b>Área urbana</b>	<b>Bosque</b>	<b>Cenizas</b>	<b>Charral</b>	<b>C. agrícola</b>	<b>Pasto</b>	<b>Total 2004</b>	<b>Pérdida</b>
<b>Área urbana</b>	73	3	0.0	0.0	11	18	106	32
<b>Bosque</b>	4	987	0.0	0.1	123	253	1366	379
<b>Cenizas</b>	0.0	0.0	6	0.0	0.00	0.0	6	0.0
<b>Charral</b>	0.1	5	0.0	33	5.08	3	46	13
<b>C. agrícola</b>	29	90	0.0	0.0	814	646	1580	766
<b>Pasto</b>	20	151	0.0	0.1	347	1178	1697	519
<b>Total 2015</b>	126	1237	6	33	1300	2098	4800	
<b>Ganancia</b>	53	250	0.0	0.2	486	920		

Se observa que en el área de estudio ocurrieron 18 transiciones o cambios en el uso del suelo, distribuidas entre categorías de ganancia, pérdida e intercambios. Durante el periodo en estudio las coberturas que experimentaron los mayores cambios corresponden a áreas de cultivo agrícola a pasto, pasto a cultivo agrícola, bosque a pasto, pasto a bosque y bosque a cultivo agrícola. En menor porcentaje hay una dinámica de transición de cultivo agrícola para convertirse en bosque y área urbana disminuyendo su superficie, pérdida de pasto a área urbana, área urbana a pasto y cultivo agrícola. La cobertura de bosque registró una pérdida de superficie a área urbana y charral. En el caso de la cobertura de charral cedió superficie a nuevas áreas ocupadas por urbanización, bosque, cultivo agrícola y pasto. Las categorías que registraron mayores pérdidas respecto del año 2004 fueron los cultivos agrícolas, pasto y bosque.

La probabilidad de persistencia y la dinámica de cambio entre diferentes usos del suelo se presentan en el cuadro 6. La categoría de cultivo agrícola presentó la menor probabilidad de permanecer como tal, mostrando una clara tendencia a ser transformado en áreas de pasto, y en menor medida, a convertirse en bosque y área urbana. Asimismo, el pasto mantiene la misma dinámica de transformación, solo que a diferencia del anterior, en menor probabilidad de cambio de superficie, para convertirse en cultivo agrícola, bosque y área urbana. Las categorías de ceniza, bosque, charral, área urbana y pasto fueron los que mantuvieron la mayor probabilidad de persistencia.

Cuadro 6. Matriz de probabilidad condicional de permanencia de uso del suelo, subcuenca del río Birrís, 2004/2015

Cobertura	Área urbana	Bosque	Cenizas	Charral	C. agrícola	Pasto
Área urbana	0.69	0.03	0	0	0.11	0.17
Bosque	0	0.72	0	0	0.9	0.18
Cenizas	0	0	1	0	0	0
Charral	0	0.11	0	0.71	0.11	0.6
C. agrícola	0.02	0.06	0	0	0.52	0.41
Pasto	0.01	0.09	0	0	0.20	0.69

La mayor dinámica de cambio del territorio que pasa de una forma de manejo a otra ocurre en la parte media y baja de la subcuenca, con mayor tendencia de cambio de cultivo agrícola a pasto (figura 3).

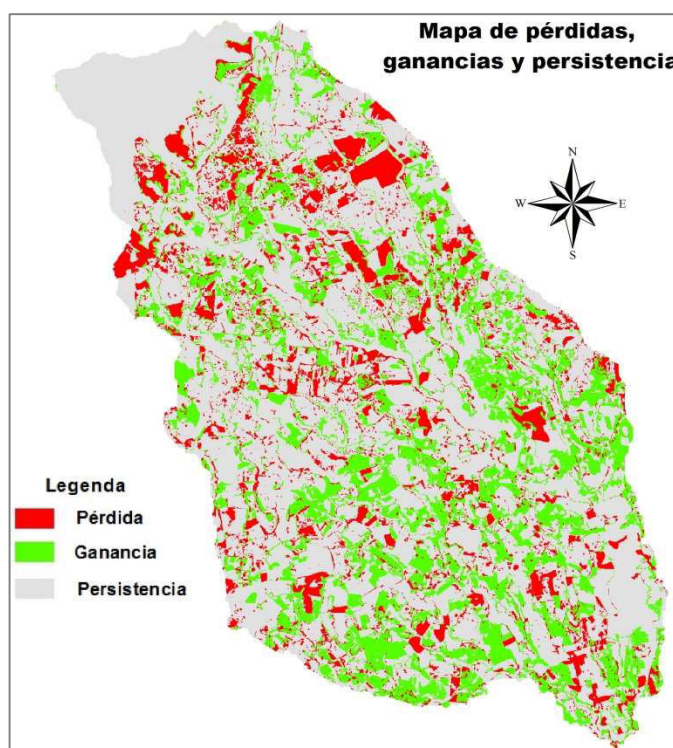


Figura 3. Mapa de pérdida, ganancia y persistencia del uso/cobertura del suelo, subcuenca del río Birrís, 2004/2015

## 2.4 DISCUSIÓN

El contexto histórico y socioeconómico de la subcuenca del río Birrís permite conocer la dinámica de transición de uso y cobertura del suelo (Vallecillo 2009). Kaimowitz (2001) menciona que durante los últimos 40 años, el área de pasturas en Centroamérica se ha ido incrementando de 3.5 a 9.5 millones de ha, que lleva a la pérdida y fragmentación de bosque. Este mismo autor

indica que la rentabilidad del sistema de producción ganadera puede disminuir la presión sobre los bosques.

De acuerdo a la entrevista que se realizó a la encargada de la unidad de Agencia y Extensión del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), los cambios de cobertura vegetal se han intensificado, durante los últimos años, en toda la superficie de la subcuenca.

Los resultados de este análisis de cambio de uso del suelo muestran una dinámica de transición entre los diferentes usos, donde la categoría que predominó fue pasto (1.7 veces mayor al área de bosque y 1.6 que la de cultivo), incrementando su superficie en los últimos años, para destinarla al pastoreo y a fincas ganaderas con fines de producción de leche, principalmente.

Campos (2010) indica que la categoría pastos es la segunda en importancia en la cuenca del río Reventazón y se localiza principalmente en la parte noreste de la misma, donde también está ubicada la subcuenca del río Birrís.

Según un estudio del Preveda (2010), el 87% del uso de suelo de la subcuenca del río Birrís tiene uso agropecuario y en el presente estudio representa en 71%, sin embargo, el 79% de la subcuenca no es apta para los usos agropecuarios (Marchamalo 2004).

De acuerdo a (ICE 1999), el 35% del área de la subcuenca se encuentra bajo pasto; estos resultados son similares a los obtenidos en el presente estudio.

El cultivo agrícola es la segunda categoría de mayor importancia, distribuyéndose en la parte alta, media y baja de la subcuenca. Los resultados muestran tendencias de pérdida y transición entre el 2004 y 2015, donde su distribución espacial del cultivo agrícola en la subcuenca se redujo. El (ICE 1999) obtuvo el 26% de superficie ocupada por cultivos agrícolas, porcentaje similar a la encontrada en este estudio. En el año 2004, el 79% del área de la cuenca no era apta para cultivo agrícola y pastos (Marchamalo 2004).

La tercera categoría de mayor porcentaje en la superficie de la subcuenca está representada por bosque, distribuida en la parte alta y media de la subcuenca, debido a la presencia del Parque Nacional Volcán Irazú y Reserva Forestal de la Cordillera Volcánica Central. En el estudio de Marchamalo (2004) se indica que existe un alto grado de deforestación. Dichos procesos podrían darse por la ampliación de la frontera agrícola (Nájera-González *et al.* 2010).

En las transiciones de cambio de cobertura o uso es relevante analizar el cambio de área urbana a bosque, a cultivo agrícola y a pasto. Esto podría explicarse a factores vinculados al proceso de clasificación del mapa del 2004. Esta situación se ha verificado con información existente del área urbana correspondiente al año 2008, suministrada por la Municipalidad de Alvarado.

De modo similar el área urbana tiene un comportamiento de incremento a la categoría de pasto, que la caracteriza como una de las principales causas de cambio de cobertura y uso de suelo después de las tierras agrícolas. Según (INEC 2001), la presencia de 1651 viviendas en el año 2001, y de acuerdo a información del Catastro del Cantón de Alvarado (2002) para dicho año se encuentran inscritas 2881 propiedades, que evidencia que el área urbana se encuentra en

continuo crecimiento estructural. Comparando los resultados obtenidos con los de (Prevda 2010) el área urbana es el 2.0% (103 ha) de la superficie que está ocupada por zonas urbanizadas. Cabe mencionar que según la tendencia histórica de crecimiento urbano, éste sufrió un fuerte ascenso entre los años 1997 y 2001, sin embargo a partir de ese periodo se observa una desaceleración del crecimiento que se acusa más entre los años 2002 y 2005. Cabe mencionar que actualmente se van generando nuevas manchas urbanas dispersas por toda la superficie de la subcuenca que han ido ocupando espacios que hasta entonces habían estado principalmente dedicados a cultivos agrícolas y pastos (agropecuarios).

La categoría charral abarca el 0.70 % de la superficie de la subcuenca, esta disminución es justificada por la dinámica de bosques, por el proceso de cambios en la vegetación a través de la alteración progresiva en la estructura y la composición (Wijdeven et al. 1994).

## **2.5 CONCLUSIONES**

Las categorías de usos del suelo ocupados por áreas urbanas, pasto y cultivos agrícolas se encuentran en continuo crecimiento, siendo las categorías que se encuentran en constante dinámica de transición el pasto y el cultivo agrícola, que se encuentran relacionadas al sector agropecuario que es la principal actividad económica de la subcuenca.

## **2.6 LITERATURA CITADA**

- Campos, CA. 2010. Análisis de los cambios de cobertura de la cuenca alta y media del río Reventazón, Costa Rica, periodo 2000-2010. Lic. en Ingeniería Ambiental. Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal. 83 p.
- Chen, LY; Yang, HC. 2008. Scenario simulation and forecast of land use/cover in northern China. *Chinese Science Bulletin* 539:1401-1412.
- Claessens, I; Schoorl, JM; Verburg, PH; Geraedts, L; Veldkamp, A. 2009. Modelling interactions and feedback mechanisms between land use change and landscape processes. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 129 157 – 170.
- Coppin, P; Jonckheere, I; Nackaerts, K; Muys, B; Lambin, E. 2004. Review Article Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International journal of remote sensing* 259:1565-1596.
- Cortés, VM. 1993. Desgaste vertical de los suelos hortícolas en el flanco occidental del volcán Irazú. *Ciencias Sociales* 62:83-91.
- Eastman, R. 2009a. The Land Change Modeler for Ecological Sustainability. IDRISI Focus Paper, Clark Labs:2.
- Foley, JA; DeFries, R; Asner, GP; Barford, C; Bonan, G; Carpenter, SR; Chapin, FS; Coe, MT; Daily, GC; Gibbs, HK. 2005. Global consequences of land use. *science* 3095734:570-574.
- Guerra, V; Ochoa, S. 2006. Evaluación espacio-temporal de la vegetación y uso del suelo en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco (1990-2000). *Investigaciones geográficas* 59:7-25.
- Gutiérrez, OD. 2001. Estimación de costos de restauración de bosques y ajuste ambiental de tarifa eléctrica: estudio de caso de la empresa hidroeléctrica Jasec en Costa Rica. *Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE*. 100 p.
- Ibarra-Montoya, JL; Román, R; Gutiérrez, K; Gaxiola, J; Arias, V; Bautista, M. 2011. Cambio en la cobertura y uso de suelo en el norte de Jalisco, México: Un análisis del futuro, en un contexto de cambio climático. *Revista Ambiente & Agua-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*: v 62:111-128.

- ICE. 1999. Plan de Manejo Integral de la Cuenca del Río Reventazón. Costa Rica, 381 p. (Documento No. 4 Informe Final).
- INEC(Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, ). 2001. IX Censo nacional de población y V de vivienda del 2000: Resultados generales. San José, Costa Rica, Instituto Nacional de Estadística y de Censos. 80 p.
- Kaimowitz, D. 2001. Will livestock intensification help save Latin America's Tropical Forest? . Trads. C Angelsen; D Kaimowitz. Wallingford, UK, CABI, 1-20 p. (Agricultural Technologies and Tropical Deforestation).
- Lianes, E; Marchamalo, M; Roldán, M. 2009. Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 332:217-235.
- Logsdon, MG; Bell, EJ; Westerlund, FV. 1996. Probability mapping of land use change: A GIS interface for visualizing transition probabilities. *Computers, environment and urban systems* 206:389-398.
- Marchamalo, M. 2004. Ordenación del territorio para la producción de servicios ambientales hídricos. Aplicación a la cuenca del río Birrís (Costa Rica). Tesis Dr. Madrid, España, Universidad Politécnica de Madrid. 385 p.
- Mas, J-F; Velázquez, A; Couturier, S. 2009. La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental Ciencia y política pública* 11:23-39.
- Mendoza, M. 2010. Atlas fisicogeográfico de la cuenca del Tepalcatepec. Instituto Nacional de Ecología.
- Nájera-González, O; Bojórquez-Serrano, J; Cifuentes-Lemus, J; Marceleño-Flores, S. 2010. Cambio de cobertura y uso del suelo en la cuenca del río Mololoa, Nayarit. *Revista Bio Ciencias* 11:19-29.
- Pineda Jaimes, NB; Bosque Sendra, J; Gómez Delgado, M; Plata Rocha, W. 2009. Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes: Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones geográficas* 69:33-52.
- PREVDA. 2010. Caracterización del cantón de Alvaro, Cartago, Costa Rica. Costa Rica, 74 p. (Planificación y Gestión Territorial de los Riesgos, del agua y del medio ambiente).
- Puyravaud, JP. 2003. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management* 177:593-596.
- Rosete Vergés, FA; Damián, P; Luis, J; Bocco, G. 2008. Cambio de uso del suelo y vegetación en la península de Baja California, México. *Investigaciones geográficas* 67:39-58.
- Vallecillo, S. 2009. Los cambios en el paisaje y su efecto sobre la distribución de las especies: modelización y aplicación a la conservación de las aves de hábitats abiertos en paisajes mediterráneos. Tesis Doctoral. España, Universidad de Lleida. 61 p.
- Vargas, F. 2010. Estimación de pérdida de carbono en el suelo por erosión hídrica laminar bajo diferentes escenarios de producción hortícola y ganadera en la subcuenca del río Birrís, Costa Rica. Mag. MSc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 186 p.
- Veldkamp, A; Lambin, EF. 2001. Predicting landuse change. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85: 1-6
- Wijdeven, S; Kuzee, M; de Haan, T. 1994. Secondary Forests and Succession: Analysis of Structure and Species Composition of Abandoned Pastures in the Monteverde Cloud Forest Reserve, Costa Rica. LU.

## ARTÍCULO II

### ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE AGUA Y SEDIMENTOS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO BIRRÍS, CUENCA DEL RÍO REVENTAZÓN, COSTA RICA

#### RESUMEN

Los modelos hidrológicos son herramientas importantes que están siendo utilizadas en la planificación y gestión de los recursos hídricos. En este estudio se utiliza el modelo SWAT como una herramienta de análisis para la estimación de la producción de agua y sedimento espacio temporal en la subcuenca del río Birrís y para determinar y comprender las relaciones entre los factores de cobertura y uso del suelo, el clima y las características topográficas sobre la producción de agua y sedimentos, en las condiciones actuales de la subcuenca.

**Palabras clave:** modelación hidrológica, producción de agua, producción de sedimentos, evaluación del suelo y el agua, cobertura de uso del suelo, tipo del suelo.

#### 2.1 INTRODUCCIÓN

En Costa Rica, la generación de energía hidroeléctrica es un factor relevante en el desarrollo del país y genera el 98% de su electricidad a partir de recursos renovables (CEPAL 2006). La subcuenca del río Birrís es considerada como prioritaria por su potencial de producción agropecuario e hidroenergético y es la que aporta mayor cantidad de sedimentos al cauce del río Reventazón (38 t/ha/año), ocasionando problemas a los embalses (ICE 1999).

Ante la problemática de la elevada tasa de sedimentos en la subcuenca del río Birrís y su relevancia en producción hidroenergética existe la necesidad de tener información acerca de los factores que determinan la producción de agua y sedimentos en la subcuenca, lo cual puede ser un valioso aporte para su planificación a mediano y largo plazo, así como una herramienta de ayuda en la toma de decisiones para la priorización de áreas y su gestión.

De los muchos recursos en situación de riesgo en la subcuenca del río Birrís, el suelo y el agua son los más críticos, debido a las características de relieve y al uso intensivo del suelo que ha llevado a procesos de erosión y deterioro, principalmente relacionados al sector agropecuario, que es la principal actividad económica de la misma (Vignola *et al.* 2013).

La subcuenca del río Birrís presenta un alto conflicto de uso de la tierra (Marchamalo 2004) y, tiene la tasa de erosión más altas de las subcuencas que conforman la cuenca del río Reventazón, generando el 16% de los sedimentos de la misma (ICE 1999).

Actualmente, estudios relacionados con la producción de agua y de sedimentos han adquirido mayor importancia, debido a la necesidad de implementar estrategias para mejorar la conservación del recurso hídrico y recurso suelo (Chang 2006). Asimismo, permite dar una visión de los problemas en la disponibilidad, los cuales deben ser considerados para una apropiada planificación del mismo (Barrios y Urribarri 2010).

Por ello es necesario entender los procesos que causan la erosión a nivel de cuenca, que contribuyen a la identificación de las zonas propensas a la erosión, las cuales permitan proponer mejores prácticas de manejo con la finalidad de reducir la producción de sedimentos (Adeogun *et al.* 2015; Thawait y Chauhan 2015). La importancia de realizar un análisis hidrológico radica en sustentar técnicamente la planificación y gestión de los recursos hídricos (Arai *et al.* 2012).

La presente investigación tuvo por objetivo estimar la producción de agua y de sedimento en la subcuenca del río Birrís, según el uso y cobertura actual, para responder a la pregunta de investigación ¿Cuál es la producción de agua y sedimento y cómo se distribuye espacial y temporalmente en la subcuenca del río Birrís?. Con esta finalidad se utilizó el modelo hidrológico SWAT, que estima la producción de sedimento y agua en cuencas de superficies extensas y pequeñas, integrando variables del clima, suelo, vegetación y topografía (Ayana *et al.* 2012).

Los resultados obtenidos ayudan a identificar el comportamiento espacial y temporal de la producción de agua y sedimentos y determinar la importancia relativa de los efectos de la pendiente, cobertura, uso y tipos de suelo en la subcuenca del río Birrís.

## **2.2 METODOLOGÍA**

### **Descripción del área de estudio**

La subcuenca del río Birrís se encuentra localizada al noreste de la ciudad de Cartago, Costa Rica, forma parte del sistema fluvial del río Reventazón (Gutiérrez 2001). Está situada entre las coordenadas UTM (523765, 1093209) y (515308, 1103258), tiene una superficie de 4800 hectáreas y una variación altitudinal entre los 1245 y 3432 msnm (Vargas 2010). Sus aguas son aprovechadas por la empresa hidroeléctrica JASEC (Junta Administrativa del Servicio Eléctrico de Cartago), la cual genera y suministra energía eléctrica a la provincia de Cartago (Marchamalo 2004).

El clima de la subcuenca del río Birrís es influenciado por las condiciones climáticas de la vertiente atlántica, incluyendo los vientos alisios del norte por medio del efecto de Föhn. La precipitación media anual es de 2325 mm y la temperatura promedio de 16.7 °C, que desciende hasta los 7.2 °C, en la parte más alta de la subcuenca (Marchamalo 2004). Presenta tres meses de menor pluviosidad entre febrero a abril con precipitaciones promedio mensual entre 50 y 100 mm y una época lluviosa entre mayo y enero (ICE 1999) (figura 4).



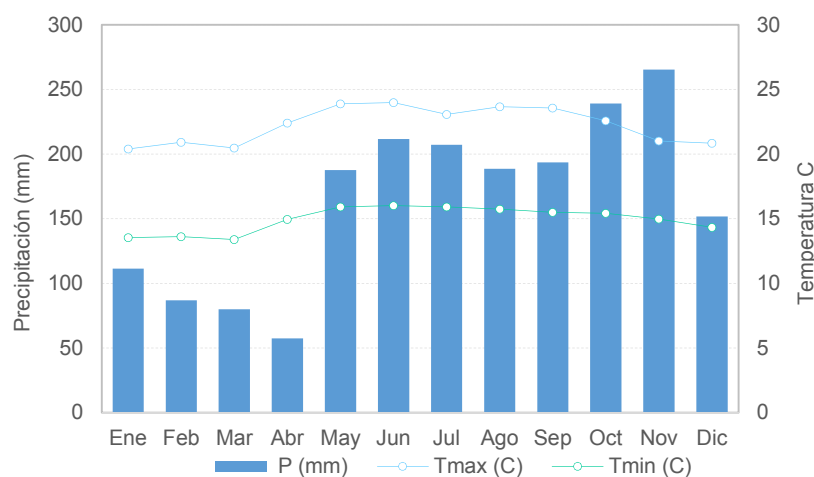


Figura 4. Climograma de la estación de Pacayas en la subcuenca del río Birrís, Costa Rica

Los suelos de la subcuenca son de origen volcánico, clasificados como Andisoles. Son suelos oscuros y profundos de textura granular, con alto contenido de materia orgánica (Cortés 1993). La subcuenca presenta suelos con pendientes fuertemente onduladas (ICE 1999). En la mayor parte del área predominan las actividades agropecuarias, con la presencia de grandes fincas distribuidas en la parte alta, media y baja. Actualmente los principales cultivos agrícolas son la papa, repollo, coliflor, brócoli, cebolla, zanahoria, chayote, remolacha, chile y tomate, así como las especies frutales (ciruela en la parte alta y aguacate en la parte baja de la subcuenca) (Prevda 2010).

Otros tipos de cobertura del suelo en la subcuenca del río Birrís son: pasto 44%, cultivo 27% y bosque 26%.

Los distritos que forman parte de la subcuenca de río Birrís son Pacayas, Cervantes, parte de Capellades del cantón Alvarado, Santa Rosa y Cipreses del cantón Oreamuno (Lianes et al. 2009). Según (INEC 2001), en la subcuenca habitan 7745 personas, la densidad poblacional es de 161 hab/km<sup>2</sup>, siendo el distrito de Pacayas el de mayor concentración de población con 2270 habitantes.

### Procedimiento metodológico

En este estudio se utilizó el modelo hidrológico SWAT, que requiere como información de entrada el modelo de elevación digital (DEM), el mapa de uso y cobertura del suelo, el mapa de tipos de suelo e información del clima con la finalidad de estimar la producción de agua y de sedimentos.

### Modelo digital de elevación

Con base a las curvas de nivel digitalizadas cada 5 m, procedente del Atlas de Costa Rica 2014, se elaboró el modelo de elevación digital (DEM), al que se aplicó previamente un proceso de corrección para quitar las imperfecciones en la superficie del terreno. A partir de este DEM se delimitó la subcuenca mediante la herramienta de delineación automática de SWAT. La clasificación de la pendiente fue según (FAO 2009) (cuadro 7).

Cuadro 7. Pendientes de la subcuenca del río Berrís, según FAO

Pendiente %	Descripción
0-3%	Fase plana
3-15%	Fase suavemente ondulada
15-30%	Fase moderadamente ondulada
30-60%	Fase fuertemente ondulada
>60%	Fase escarpada

Fuente: FAO (2009)

### Mapa de uso y cobertura del suelo

El mapa de uso/cobertura del año 2015 se elaboró con base a una imagen satelital RapidEye ortorectificada nivel 3A (corregida radiométricamente y geométricamente) referenciada a una proyección cartográfica WGS84 UTM Zona 17N, con un tamaño de pixel de cinco metros por cinco metros de resolución que corresponde al año 2011, se realizó la clasificación de los usos del suelo existentes al año actual.

Se realizó el análisis de procesamiento e interpretación de la imagen satelital RapidEye mediante la clasificación supervisada, utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como ENVI y ArcGis. El mismo presenta seis categorías de cobertura y usos de suelo (área urbana, bosques, cenizas, cultivos agrícolas, charral y pasto) que fue clasificado según el manual de United States Department of Agriculture (USDA 2003) (figura 5). El mapa de uso y cobertura fue reclasificado según la codificación de las clases de cultivo de la base de datos SWAT, considerando comportamientos hidrológicos similares (Arnold *et al.* 2012b) (cuadro 8).

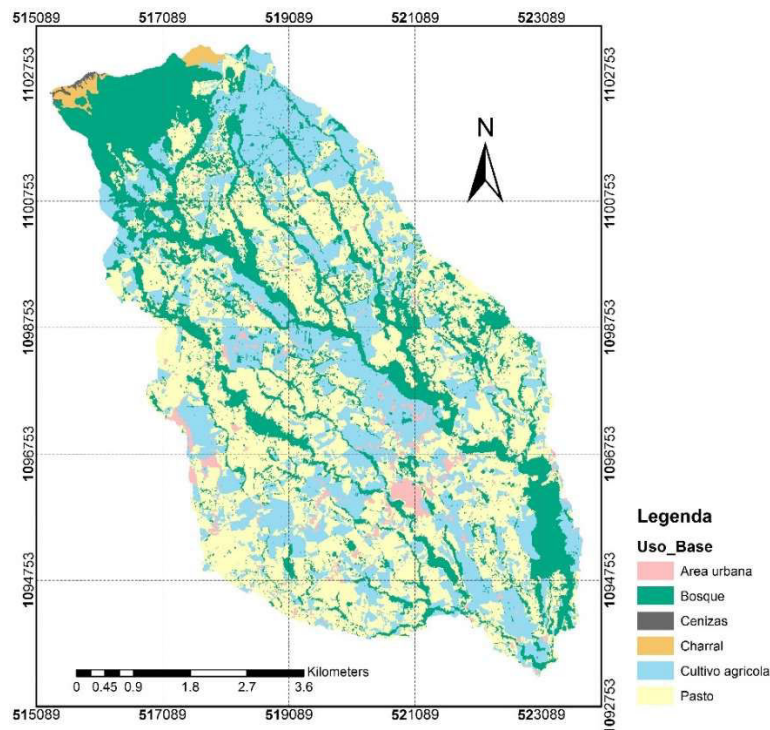


Figura 5. Mapa de uso/cobertura 2015 de la subcuenca del río Berrís, Costa Rica

Cuadro 8. Clasificación de uso del suelo según la tipología usado por SWAT

Tipología de uso	Definición en SWAT	Código en SWAT
Área urbana	Residential Low Density	URLD
Bosques	Forest mixed	FRST
Ceniza	Barren	BARR
Cultivos agrícolas	Agricultural Land Generic	AGRL
Charral	Range brush	RNGB
Pastos	Pasture	PAST

### Mapa de tipos de suelos

Este mapa fue elaborado con base en información del atlas de Costa Rica 2014 (figura 6) e información de las características físicas del suelo recopilada por Marchamalo (2004). Las propiedades hidrológicas de conductividad, densidad y retención de agua se estimaron utilizando SPAW<sup>3</sup> Hydrology de USDA, con base en la textura del suelo y la materia orgánica (Dong 2013).

Se determinó el parámetro del grupo hidrológico de los tipos de suelos existentes en la subcuenca (figura 6), a partir de la textura del suelo, utilizando el programa NumCur con base a la clasificación USDA (Hospital *et al.* 2006), resultando que los suelos de la subcuenca se encuentran dentro del grupo hidrológico B. Los parámetros de profundidad máxima del perfil de suelo con presencia de raíces y profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo del horizonte se obtuvieron del estudio de suelos realizado por Marchamalo (2004). El parámetro de albedo del suelo se estimó en función de la materia orgánica y el factor k de erodabilidad del suelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, utilizando la fórmula propuesta por (Baumer 1990).

La base de datos inicial del modelo SWAT requiere de las características de propiedades texturales y fisicoquímicas del suelo que se indican en el cuadro 9.

Cuadro 9. Parámetros de las propiedades físicas y químicas de suelo requeridas por SWAT

Nro.	Definición SWAT	Descripción
1	HYDGRP	Grupo hidrológico del suelo (A,B,C,D)
2	SOL_ZMX	Prof. máxima del perfil de suelo con presencia de raíces
3	SOL_Z	Prof. desde la superficie del suelo hasta el fondo del horizonte (mm)
4	SOL_BD	Densidad real
5	SOL_AWC	Capacidad de disponibilidad de agua del horizonte del suelo
6	SOL_K	Conductividad hidráulica saturada
7	SOL_CBN	Contenido de carbón orgánico
8	CLAY	Contenido de arcilla
9	SILT	Contenido de limo
10	SAND	Contenido de arena
11	ROCK	Contenidos de fragmentos de roca
12	SOL_ALB	Albedo del suelo húmedo
13	USLE_K	Factor USLE de erodabilidad del suelo
14	SOL_EC	Conductividad eléctrica

<sup>3</sup> Software desarrollado por el Dr. Keith E. Saxton del USDA – ARS en cooperación con el Department of Biological Systems Engineering, Washington State University. <http://hrsl.arsusda.gov/SPAW/newregistration.html>

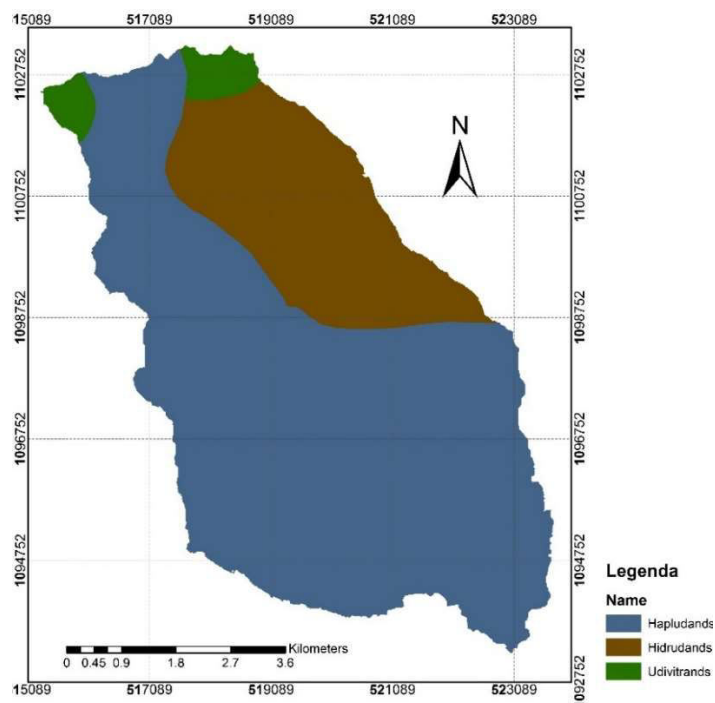


Figura 6. Mapa de tipos de suelos identificados en la subcuenca del río Birrís, Costa Rica

### Información del clima

La información climática necesaria se obtuvo de los registros del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). La serie diaria de variables climáticas de datos (precipitación, temperatura mínima y máxima) de una estación meteorológica (Pacayas) que se encuentra en la subcuenca, cubren un periodo 7 años (enero 2008 a diciembre 2014).

Un análisis de calidad y comportamiento temporal de los registros climáticos se realizó mediante climogramas. En cuanto al cálculo de los estadísticos del modelo que son: promedio mensual de la temperatura máxima y mínima diaria ( $^{\circ}\text{C}$ ), desviación estándar mensual de la temperatura máxima y mínima diaria ( $^{\circ}\text{C}$ ), promedio mensual de la precipitación diaria ( $\text{mm}_{\text{H}_2\text{O}}$ ), desviación estándar mensual de la precipitación diaria ( $\text{mm}_{\text{H}_2\text{O}/\text{día}}$ ), coeficiente de asimetría mensual de la precipitación diaria, probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día seco, probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día húmedo, promedio mensual del número de días de lluvia, máxima lluvia de media hora por mes ( $\text{mm}_{\text{H}_2\text{O}}$ ), promedio mensual de la radiación solar diaria ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$ ), promedio mensual del punto de rocío ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$ ), promedio mensual de la velocidad de viento diaria ( $\text{m}/\text{s}$ ). Para lo cual se empleó el simulador EXCEL MACRO (WGNmaker4.xlsm), que fue descargado de la plataforma SWAT<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> [www.swat.tamu.edu](http://www.swat.tamu.edu)

Con la información del mapa de uso del suelo, el mapa de tipos de suelo y la clasificación de la pendiente se definieron las microcuencas y las unidades de respuesta hidrológica (HRU)<sup>5</sup>, resultando en 339 HRU individuales dentro las 10 microcuencas.

Fue realizado un ajuste en la configuración previa a la modelación. El cálculo de la evapotranspiración potencial se realizó mediante el método de Priestley-Taylor, se adoptó el factor de contenido de humedad del suelo de 0.81 de Lianes (2008) y los factores de coberturas (bosque 0.03, charral 0.012, pasto 0.013, cultivo agrícola 0.65, área urbana 0.015 y ceniza 0.9) según Marchamalo (2004). Se consideró dos años de periodo de calentamiento para estabilizar las condiciones básicas de flujo durante la simulación y llevar los procesos hidrológicos a una condición de equilibrio.

La primera simulación base se realizó utilizando valores de parámetros por defecto para luego realizar ajustes de los parámetros más sensibles en la producción de agua y sedimento. Se ajustó los valores del número de curva para las seis clases de uso y cobertura del suelo que son sensibles a la producción de agua. Los valores de CN2 para el uso/cobertura de área urbana, bosque, cenizas volcánicas, charral, cultivo y pasto resultantes fueron 85, 65, 86, 67, 81 y 67, respectivamente. En cuanto al coeficiente de rugosidad de las coberturas y rugosidad que corresponde al cauce principal y tributarios también se ajustaron, pero no mostraron influencia en el flujo ni en la producción de sedimento (Engman 1986).

Respecto a los parámetros sensibles en la producción de sedimento, se ajustó el factor de cobertura para las clases de cobertura/uso según Marchamalo (2004). Bandas de elevación fueron incorporadas dentro del modelo.

Los resultados de producción de agua y sedimento se definieron a nivel mensual por microcuenca y unidades de respuesta hidrológica.

### **Calibración y validación del modelo**

Los resultados del modelo son extremadamente sensibles a la calidad de la información del DEM, suelos y uso/cobertura. Los autores White y Chaubey (2005) recomiendan utilizar los coeficientes de evaluación  $R^2$  y NSE (coeficiente de determinación y eficiencia de Nash Suttcliffe)<sup>6</sup> para evaluar la eficiencia del modelo en cuanto a la estimación de producción de sedimentos y producción de agua.

Por falta de información de aforos de caudales y de sedimentos no se realizó la calibración y validación del modelo. Al respecto Di Luzio *et al.* (2005), señalan que el modelo SWAT presenta resultados coherentes en la estimación de la escorrentía y la producción de sedimentos, aun sin calibración.

---

<sup>5</sup> Se define como la combinación única de suelos, cobertura y pendiente

<sup>6</sup> El coeficiente de determinación y la eficiencia de Nash Suttcliffe se utilizan para evaluar la capacidad predictiva de los modelos hidrológicos e indican que tan bueno es el ajuste de los valores medidos con respecto a los simulados.

## 2.3 RESULTADOS

Se estimó la producción de agua y sedimento distribuidos espacialmente en 10 microcuencas, compuestas a la vez por 339 HRU (cuadro 10) que son resultado de la combinación de cobertura, suelo y pendiente (figura 7). El mayor número de HRU se ubican en la microcuenca 2 y la microcuenca con mayor área fue la 10 (13 km<sup>2</sup>, 28% del total de la cuenca)<sup>7</sup>

Cuadro 10. Distribución de HRU por microcuenca

Microcuenca	No. de HRU	Microcuenca	No. de HRU
1	37	6	20
2	58	7	20
3	19	8	40
4	54	9	15
5	56	10	20

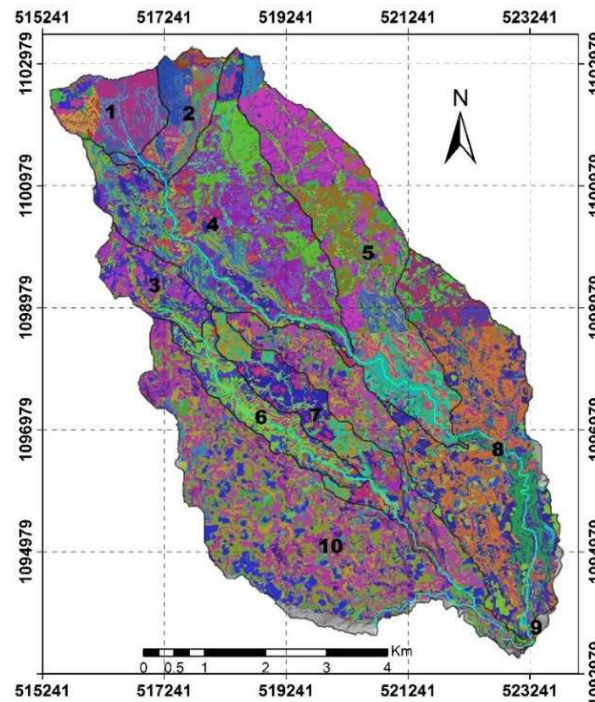


Figura 7. Distribución espacial a nivel de microcuenca y de unidades de respuesta hidrológica

### Producción de agua y de sedimento

Distribución temporal: la producción de agua promedio anual estimada en la subcuenca es fue de 1639 mm que representa el 87% de la precipitación total, siendo los meses entre mayo y enero los de mayor producción de agua, mientras que los meses de febrero a abril son los que aportan menor cantidad de producción de agua a la subcuenca. De igual manera se estimó la producción de sedimento promedio anual en 35 ton/ha/año. La mayor parte de la producción de

<sup>7</sup> Detalle de HRU se visualizan en la sección de anexos.

sedimentos se produce durante los meses de mayor flujo, que sigue la misma tendencia de la producción de agua. Entre los meses de mayo a diciembre se genera la mayor cantidad de sedimentos que representa el período de mayor pluviosidad (estación húmeda) a excepción del mes de enero y durante los meses de febrero a abril que son los meses de menor pluviosidad (estación seca) durante los cuales la producción de sedimento disminuye (cuadro 11).

Cuadro 11. Producción de agua (WYLD) y de sedimento (SYLD) promedio mensual

Mes	Precipitación P (mm)	Prod. agua WYLD (mm)	Prod. sedimento SYLD (ton/ha)
Ene	94	104	2
Feb	62	67	2
Mar	78	72	2
Abr	64	48	1
May	191	140	4
Jun	203	168	4
Jul	181	159	3
Ago	174	152	2
Sep	217	185	4
Oct	211	189	4
Nov	208	193	4
Dic	169	162	3
Prom.	1852	1639	35

La figura 8 presenta la dinámica y magnitud de la producción de agua y de sedimentos promedio mensuales. Existe una correlación de 0.97 entre la relación de producción de agua y precipitación, donde se observa que en los meses de mayor pluviosidad la producción de agua es mayor y en los meses de menor pluviosidad la producción de agua disminuye. Se procedió de igual manera con los resultados de producción de sedimentos que presenta 0.87 de correlación entre las dos variables relacionadas, y tiene un comportamiento similar al de la producción de agua.

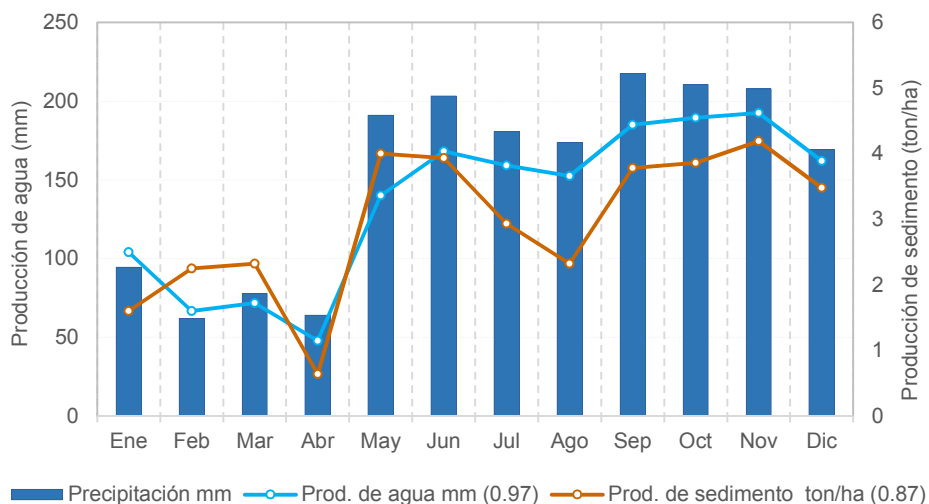


Figura 8. Relación precipitación, producción de agua y producción de sedimento

Distribución espacial: la mayor producción de agua distribuida espacialmente se presenta en las microcuencas de la parte media que son suelos ocupados por cobertura de bosque, pasto, cultivos agrícolas y área urbana, en combinación del tipo del suelo correspondientes a la clase de Hapludands y Hidrudands. Le sigue, en magnitud las microcuencas de la parte baja con presencia de uso del suelo por pasto, cultivo agrícola, bosque y área urbana, y representada por los suelos Hidrudands y Hapludands. Finalmente la menor producción de agua corresponde a las microcuencas de la parte alta de la cuenca donde el uso del suelo está ocupado por cenizas volcánicas, bosque, pasto y cultivos agrícolas, con suelos del tipo Hapludands, Hidrudands y Udivitrands (figura 9).

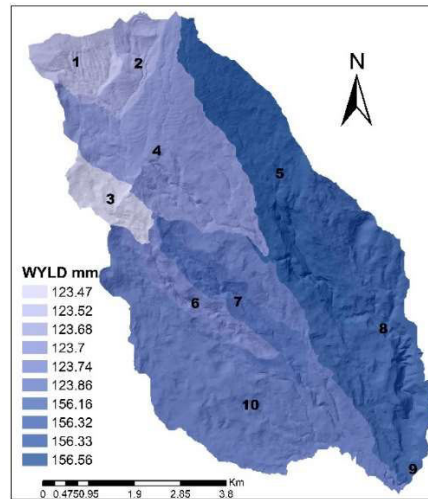


Figura 9. Distribución espacial de la producción de agua (WYLD) a nivel de microcuencas

En cuanto a la distribución espacial de producción de sedimento, se registró mayor cantidad de aporte en microcuencas de la parte media, seguida por microcuencas de la parte baja y las microcuencas que se encuentran en la parte alta son las que genera menor cantidad sedimento (figura 10).

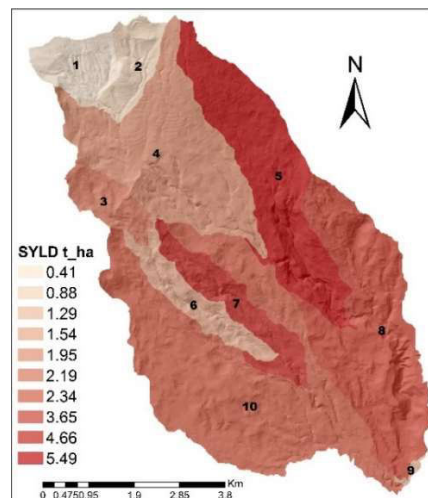


Figura 10. Distribución espacial de la producción de sedimento (SYLD) a nivel de microcuencas



Según el uso/cobertura del suelo en la subcuenca Birrís y considerando la producción de agua a nivel de hectárea, las cenizas volcánicas (23.54 mm/ha) producen 214 veces más que áreas con bosque (0.11 mm/ha) y uso agrícola (0.11 mm/ha), y 300 veces más que pasturas (0.10 mm/ha). Los charrales (3.80 mm/ha) producen 35 veces más agua que los bosques y uso agrícola, y estos últimos, 1.6 veces más que las pasturas. Sin embargo, si se considera el área total de los usos/coberturas en la subcuenca, las coberturas que aportan mayor cantidad de agua son el cultivo agrícola (138 mm/1309 ha), el pasto (137 mm/2103 ha), el bosque (136 mm/1249 ha) y las coberturas de charral (125 mm/33 ha), mientras que el uso ceniza volcánica (125 mm/ 5 ha) es el que produce menos agua.

En cuanto a la producción de sedimento, el suelo ocupado por bosque genera la menor cantidad de sedimento (0.03 ton/ha), la cual es 342 veces menos que el uso ceniza volcánica (10.25 ton/ha), 242 veces menor que el cultivo agrícola (7.26 ton/ha), 35 veces menos que las pasturas (1.04 ton/ha), 14 veces menos que el charral (0.41 ton/ha) y 6 veces menor que el área urbana (0.19 ton/ha). A nivel de toda la subcuenca, el uso agrícola produce la mayor cantidad de sedimentos (9503 ton/1309 ha), seguido de las pasturas (2187 ton/2103 ha), cenizas volcánicas (51 ton/5 ha), bosque (37 ton/1249 ha), área urbana (24 ton/125 ha) y charral (14 ton/33 ha). La figura 11 ilustra la producción de agua y sedimentos en la subcuenca del río Birrís.

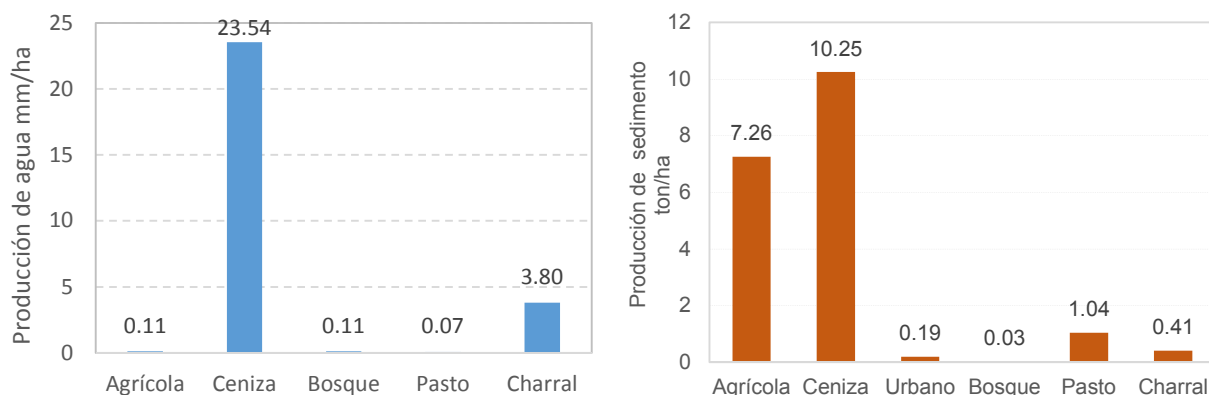


Figura 11. Producción de agua y sedimento según el uso/cobertura, subcuenca Birrís 2011-2014

El suelo clasificado como Udivitrands (suelos de textura moderadamente gruesas a gruesas, poco fértiles) es el que genera mayor producción de agua en la subcuenca, seguido por el tipo de suelo Hidrudands (suelos de textura media a moderadamente gruesa, permeables, moderadamente fértiles, suelos con presencia de arcillas de secado irreversible, alto riesgo de erosión). El suelo tipo Hapludands (suelos profundos, ricos en materia orgánica, permeables, bien estructurados y drenados, moderadamente fértiles) es el que produce menor cantidad de agua. Con respecto a la producción de sedimentos el tipo de suelo Hapludands genera mayor cantidad de sedimentos seguido en menor proporción de los suelos tipo Hidrudands y Udivitrands (figura 12).

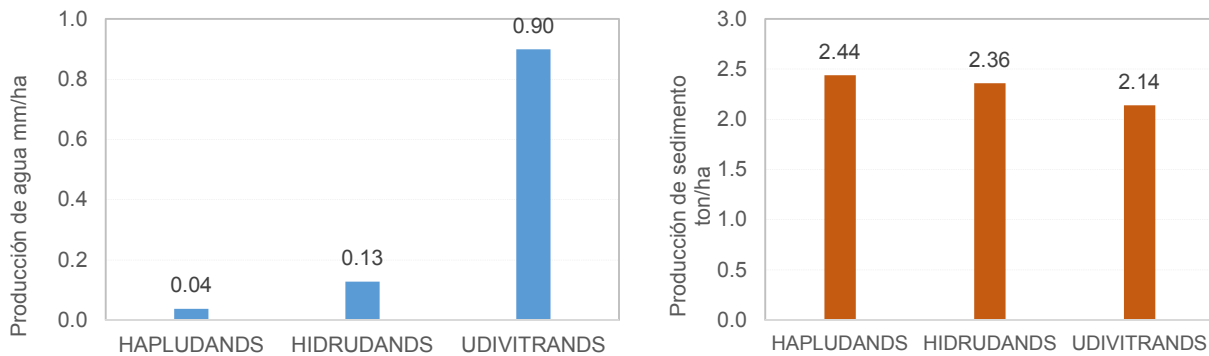


Figura 12. Producción de agua y sedimento según el tipo de suelo, subcuenca Birrís 2011-2014

## 2.4 DISCUSIÓN

### Producción de agua

La producción de agua (WYLD) estimada representa 1639 mm promedio anual para la subcuenca en condiciones actuales del tipo de suelo, uso/cobertura, características topográficas y climáticas, considerando un periodo de análisis de 8 años (2008-2014) de una estación pluviométrica ubicada en la parte media de la subcuenca. De acuerdo a los resultados se observó la variación espacio temporal en las 10 microcuencas generadas, donde los factores mencionados anteriormente tienen influencia en los procesos hidrológicos, siendo las categorías de cenizas volcánicas y charral las que producen mayor cantidad de agua por unidad de hectárea seguidas en menor proporción de las categorías de bosque, cultivos agrícolas y pasto.

Marchamalo (2004) estimó la oferta de agua disponible de acuerdo al uso del suelo en la subcuenca del río Birrís, obteniendo como resultado 1387 mm en promedio anual. Estos datos fueron estimados utilizando la estación meteorológica Pacayas que presenta una precipitación anual de 2325 mm/año, en un registro pluviométrico de 49 años y la cual presenta meses de mayor pluviosidad, que la estación utilizada en el presente estudio. La oferta disponible de agua estimada por Marchamalo (2004) con relación a la producción de agua estimada en el presente estudio tiene un coeficiente de determinación de 0.85, que sugiere un ajuste estadístico similar.

La variación de los resultados obtenidos también puede explicarse por los porcentajes de uso/cobertura del suelo entre los estudios comparados donde existe una diferencia en cuanto a la cobertura de pasto, el uso del suelo ocupado por cultivos agrícolas y el área urbana, factor que se considera en la estimación de la producción de agua en ambos estudios.

La producción de agua representa el 87% de la precipitación total de la subcuenca, que es un valor elevado. Una posible explicación podría ser las condiciones o características físicas, morfológicas e hidrológicas del suelo que aumentan la capacidad de infiltración y reducen la escorrentía. Sin embargo, se encuentra relacionada también con la cobertura vegetal. Las condiciones texturales y estructurales que componen los suelos de la subcuenca la clasifican dentro del grupo Andisoles, que son suelos muy permeables, porosos, con excelente drenaje y alta retención de humedad (Bertsch *et al.* 1993).

Los resultados obtenidos en las 10 microcuencas que equivalen a un área de 48 km<sup>2</sup> muestran que los cambios de cobertura y el tipo de suelo en cada microcuenca tienen influencia en la producción de agua, siendo los usos de suelo de ceniza volcánica y charral que generan mayor cantidad de producción de agua en la subcuenca, posiblemente debido a su alta capacidad de infiltración de agua en el suelo.

Las coberturas con menor producción de agua son el pasto, el cultivo agrícola y el bosque. Wang *et al.* (2011) mencionan que la producción de agua estimada en coberturas forestales se ve influenciada por la escala de las cuencas, determinando que en cuencas pequeñas y medianas no existe correlación significativa en cuanto a la relación cobertura forestal y producción de agua, pero sí en cuencas grandes. Por su parte Zhang *et al.* (2006) reportan que la producción de agua disminuye con el incremento de la cobertura forestal.

En cuanto a la estimación de la producción de agua y sedimentos, los valores estimados resultan muy elevados, que puede ser en parte atribuido a que no se realizó los procesos de calibración y validación del modelo por falta de información de registros de caudales. Otras limitaciones que se tuvieron y que podrían afectar los resultados fueron la falta de mayor número de estaciones meteorológicas y con registros de diferentes parámetros, de manera que se logre tener una mejor estimación de la distribución espacial y temporal de la lluvia en la subcuenca y del cálculo de la evapotranspiración. Finalmente se debe mencionar que los mapas de suelo existentes son bastantes generales y no representan toda la variabilidad espacial de su comportamiento hidrodinámico.

### **Producción de sedimentos**

En el presente estudio se estimó una producción de sedimentos (SYLD), promedio anual en la subcuenca del río Birrís de 35 ton/ha/año. El suelo ocupado por cenizas volcánicas (volcán Irazú) es el que produce mayor cantidad de sedimentos seguido por cultivo agrícola, áreas urbanas y por pasto. Los suelos ocupados por bosque y charral son los que aportan en menor proporción a la producción de sedimento. La estimación de la cantidad de sedimento generado puede ser explicada por el tipo de suelo, ya que son suelos de origen volcánico (Andisoles), susceptibles a la erosión hídrica, más aun si presenta características de pendientes elevadas y uso intensivo (Bertsch *et al.* 1993). Asimismo se atribuye a la cobertura/uso del suelo, por el sobreuso y predominancia de altas pendientes (pendientes superiores al 15% y en algunos sectores mayores al 60%). La actividad antrópica y altas precipitaciones (1852 mm/año) son factores que también influyen en el proceso de producción de sedimentos (Catie 2003).

Para la zona de estudio, Marchamalo (2004) estimó una producción de sedimentos de 42 ton/ha/año, siendo los suelos destinados a cultivos agrícolas los que aportan mayor cantidad de sedimentos. Indica también que los picos de precipitación incrementan notablemente la erosión en zonas de cultivos agrícolas. Por su parte Gómez (2002) estimó el aporte de sedimento de la subcuenca del río Birrís a la cuenca del río Reventazón en 61 ton/ha/año. Asimismo según el estudio plan de manejo integral de la cuenca de río Reventazón (ICE 1999) se reporta una tasa media de erosión de 50 ton/ha/año, que atribuyen a las fuertes pendientes que producen erosión en masa, al uso del suelo destinado a cultivos agrícolas y sobre uso del suelo.

Wang *et al.* (2010) determinaron que los suelos ocupados por pasto generan mayor producción de sedimentos que la cobertura de charral. Molina *et al.* (2012) indican que la producción de sedimentos en cuencas de montañas degradadas depende de los cambios de cobertura forestal a la conversión de tierras agrícolas o pasto.

Las mayores tasas de erosión se presentaron en épocas lluviosas de mayo a enero, siendo el mes de octubre el que aporta mayor producción de sedimentos. Cabe mencionar que también representa el mes con mayor registro de precipitación mensual. De acuerdo al estudio realizado por Giménez *et al.* (2012) la mayor parte de sedimentos se generan de acuerdo al régimen de lluvia, dando lugar a la escorrentía que se encuentra condicionada por el contenido de humedad del suelo antes del evento y al estado de la cobertura en el suelo. La producción de sedimentos, según Seeger *et al.* (2004), se encuentra relacionada por las condiciones del suelo, mencionando como factor principal a la humedad del suelo en cuencas pequeñas.

## **2.5 CONCLUSIONES**

La subcuenca del río Birrís presenta una producción de agua elevada, estimada en 1639 mm, lo mismo que una alta tasa de producción de sedimentos con 35 ton/ha, promedio anual para el periodo 2008 – 2015. Los usos del suelo ocupados por ceniza volcánica y el charral son los que producen mayor cantidad de agua, mientras que usos del suelo ceniza volcánica y cultivos agrícolas son los que sufren mayor erosión.

La subcuenca es susceptible a la erosión hídrica por la combinación de factores del tipo de suelo, el uso y cobertura del suelo y la pendiente. Las mayores tasas de erosión se dan en la parte media y baja de la cuenca, donde predominan las altas pendientes, precipitación elevada y el uso intensivo del suelo destinado en mayor porcentaje a las actividades agropecuarias.

El uso del suelo, el tipo de suelo, las pendientes elevadas y las altas precipitaciones son factores determinantes en la producción y distribución espacial de la producción de agua y de sedimentos.

## **2.6 LITERATURA CITADA**

- Adeogun, AG; Sule, BF; Salami, AW. 2015. Simulation of sediment yield at the upstream watershed of Jebba Lake in Nigeria using swat model. *Malaysian Journal of Civil Engineering* 271:25-40.
- Arai, FK; Pereira, SB; Gonçalves, GG. 2012. Characterization of water availability in a hydrographic basin. *Engenharia Agrícola* 323:591-601.
- Arnold, JG; Kiniry, JR; Srinivasan, R; Williams, JR; Haney, EB; Neitsch, SL. 2012b. *Soil, Water Assessment Tool*. Texas, Texas Water Resources Institute. 650 p. (Input/Output Documentation).
- Ayana, AB; Edossa, DC; Kositsakulchai, E. 2012. Simulation of sediment yield using SWAT model in Fincha Watershed, Ethiopia. *Kasetsart J. Nat. Sci* 46:283-297.
- Barrios, AG; Urribarri, LA. 2010. Aplicación del modelo SWAT en los Andes venezolanos: Cuenca alta del río Chama. *Revista geográfica venezolana* 511:11-29.
- Baumer, OW. 1990. Prediction of soil hydraulic parameters. WEPP Data Files for Indiana. SCS National Soil Survey Laboratory, Lincoln, NE.

- IX Congreso Nacional Agropecuario y de Recursos Naturales (1993. Características de los principales ordenes de suelos presentes en Costa Rica. San Jose, Costa Rica, 19 p.
- CATIE. 2003. Caracterización y diagnóstico de las subcuencas tributarias del sistema hidroeléctrico Birrís. Costa Rica, 136 p.
- CEPAL(Comisión Económica para América Latina y el Caribe, ). 2006. Istmo Centroamericano: Estadísticas del subsector eléctrico. Informe preliminar del segmento de la producción de electricidad. 37 p.
- Chang, M. 2006. Forest hydrology: an introduction to water and forests. Taylor & Francis Group ed. Boca Raton, Florida, CRC press. 443 p.
- Cortés, VM. 1993. Desgaste vertical de los suelos hortícolas en el flanco occidental del volcán Irazú. Ciencias Sociales 62:83-91.
- Di Luzio, M; Arnold, JG; Srinivasan, R. 2005. Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations. Hydrological Processes 193:629-650.
- SWAT 2013 (2013. Moulding SWAT model for Chinese Qingjiang river for rainfall-runoff simulations. Fracia, Soil, Water Assessment Tool. 43 p.
- Engman, ET. 1986. Roughness coefficients for routing surface runoff. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 1121:39-53.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, I. 2009. Guía para la descripción de suelos. Trad. R Vargas. 4 ed. Roma, Italia, 111 p.
- Giménez, R; Casali, J; Grande, I; Díez, J; Campo, MA; Álvarez-Mozos, J; Goñi, M. 2012. Factors controlling sediment export in a small agricultural watershed in Navarre (Spain). Agricultural water management 110:1-8.
- Gómez, F. 2002. Evaluación de la erosión potencial y producción de sedimentOS en tres cuencas de Costa Rica tesis Lic. Ing. Civ. San Jose Costa Rica, UCR. 191 p.
- Gutiérrez, OD. 2001. Estimación de costos de restauración de bosques y ajuste ambiental de tarifa eléctrica: estudio de caso de la empresa hidroeléctrica Jasec en Costa Rica. Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 100 p.
- ICE. 1999. Plan de Manejo Integral de la Cuenca del Río Reventazón. Costa Rica, 381 p. (Documento No. 4 Informe Final).
- INEC(Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, ). 2001. IX Censo nacional de población y V de vivienda del 2000: Resultados generales. San José, Costa Rica, Instituto Nacional de Estadística y de Censos. 80 p.
- Lianes, E. 2008. Estudio del factor vegetación "factor C" de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Revisada "RUSLE" en la cuenca del río Birrís (Costa Rica). Ing. Técnico Forestal. Madrid, España, Universidad Politécnica de Madrid. 192 p.
- Lianes, E; Marchamalo, M; Roldán, M. 2009. Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís, Costa Rica. Agronomía Costarricense 332:217-235.
- Marchamalo, M. 2004. Ordenación del territorio para la producción de servicios ambientales hídricos. Aplicación a la cuenca del río Birrís (Costa Rica). Tesis Dr. Madrid, España, Univesidad Politecnica de Madrid. 385 p.
- Molina, A; Vanacker, V; Balthazar, V; Mora, D; Govers, G. 2012. Complex land cover change, water and sediment yield in a degraded Andean environment. Journal of Hydrology 472:25-35.
- PREVDA. 2010. Caracterización del cantón de Alvaro, Cartago, Costa Rica. Costa Rica, 74 p. (Planificación y Gestión Territorial de los Riesgos, del agua y del medio ambiente).
- Seeger, M; Errea, M-P; Begueria, S; Arnáez, J; Martí, C; Garcia-Ruiz, J. 2004. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees. Journal of Hydrology 2883:299-311.

- Thawait, A; Chauhan, M. 2015. Sediment Yield Modelling of Mohgaon Watershed of Narmada River Basin using SWAT Model. *International journal of Engineering and Technical Research* 3:238-241.
- United States Department of Agriculture. 2003. *Keys to Soil Taxonomy*. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service. 332 p. (By Soil Survey Staff).
- Vargas, F. 2010. Estimación de pérdida de carbono en el suelo por erosión hídrica laminar bajo diferentes escenarios de producción hortícola y ganadera en la subcuenca del río BIRRÍS, Costa Rica. Mag. MSc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 186 p.
- Vignola, R; McDaniels, TL; Scholz, RW. 2013. Governance structures for ecosystem-based adaptation: Using policy-network analysis to identify key organizations for bridging information across scales and policy areas. *Environmental Science & Policy* 31:71-84.
- Wang, S; Fu, B-J; He, C-S; Sun, G; Gao, G-Y. 2011. A comparative analysis of forest cover and catchment water yield relationships in northern China. *Forest Ecology and Management* 2627:1189-1198.
- Wang, X; Shang, S; Yang, W; Clary, CR; Yang, D. 2010. Simulation of land use–soil interactive effects on water and sediment yields at watershed scale. *Ecological Engineering* 363:328-344.
- White, KL; Chaubey, I. 2005. Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable swat model1. *JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION* 415:1077-1089.
- Zhang, X; Yu, X; Wu, S; Wei, T; Zhang, X. 2006. Effect of forest vegetation on runoff and sediment production in sloping lands of Loess area. *Frontiers of Forestry in China* 13:336-342.

- Agenda de Desarrollo Post-2015 de la Organización de las Naciones Unidas (2015, 2015. Objetivos de Desarrollo Sostenible. 78 p.
- Abad, NG. 2006. Modelación hidrológica de las cuencas El Chuveje y Arroyo Real como herramienta en la implementación de pago por servicios ecológicos en la reserva de la Biosfera Sierra Gorda, Querétaro, México. Mag. Sc. México, Instituto tecnológico y de estudios superiores de Monterrey 288 p.
- Adeogun, AG; Sule, BF; Salami, AW; Daramola, MO. 2014. Validation of SWAT Model for Prediction of Water Yield and Water Balance: Case Study of Upstream Catchment of Jebba Dam in Nigeria. *International Journal of Mathematical, Computational, Physical and Quantum Engineering* 82:264-270.
- Adeogun, AG; Sule, BF; Salami, AW. 2015. Simulation of sediment yield at the upstream watershed of Jebba Lake in Nigeria using swat model. *Malaysian Journal of Civil Engineering* 271:25-40.
- Aguilar, GR; Iza, AO. 2009. Gobernanza de aguas compartidas: aspectos jurídicos e institucionales. Druckerei Gerhards GmbH Bonn, Germany ed. IUCN. 240 p.
- Alatorre, L; Beguería, S. 2009. Los modelos de erosión: una revisión. *Cuaternario y geomorfología* 231-2:29-48.
- Arai, FK; Pereira, SB; Gonçalves, GG. 2012. Characterization of water availability in a hydrographic basin. *Engenharia Agrícola* 323:591-601.
- Aranda, DFC. 1998. Procesos del ciclo hidrológico. Editorial Universitaria Potosina ed. San Luis Potosi, Mexico, UASLP. 30 p.
- Arnold, J; Moriasi, D; Gassman, P; Abbaspour, K; White, M; Srinivasan, R; Santhi, C; Harmel, R; Van Griensven, A; Van Liew, M. 2012a. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 554:1491-1508.
- Arnold, JG; Srinivasan, R; Mutiah, RS; Williams, JR. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development1. *Journal of the American Water Resources Association American Water Resources Association* 341:73-89.
- Arnold, JG; Kiniry, JR; Srinivasan, R; Williams, JR; Haney, EB; Neitsch, SL. 2012b. Soil, Water Assessment Tool. Texas, Texas Water Resources Institute. 650 p. (Input/Output Documentation).
- Arnold, JK, J; ; Srinivasan, R; Williams, J; Haney, E; Neitsch, SL. 2011. Soil and Water Assessment Tool input/output file documentation, version 2009. Temple, TX, 643 p. (US Department of Agriculture-Agricultural Research Service, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX and Blackland Research and Extension Centre, Texas AgriLife Research, Temple, TX Texas Water Resources Institute Technical Report).
- Ayana, AB; Edossa, DC; Kositsakulchai, E. 2012. Simulation of sediment yield using SWAT model in Fincha Watershed, Ethiopia. *Kasetsart J. Nat. Sci* 46:283-297.
- Barrantes, G; Vega, M. 2002. Evaluación del servicio ambiental hídrico y su aplicación al ajuste de tarifas, en la cuenca del río Tempisque. Documento preparado para ASOTEMPISQUE. 102 p.
- Barrios, AG; Urribarri, LA. 2010. Aplicación del modelo SWAT en los Andes venezolanos: Cuenca alta del río Chama. *Revista geográfica venezolana* 511:11-29.
- Baumer, OW. 1990. Prediction of soil hydraulic parameters. WEPP Data Files for Indiana. SCS National Soil Survey Laboratory, Lincoln, NE.
- IX Congreso Nacional Agropecuario y de Recursos Naturales (1993. Características de los principales ordenes de suelos presentes en Costa Rica. San Jose, Costa Rica, 19 p.
- Bosque Sendra, J. 1992. Sistemas de Información Geográfica. Rialp. Madrid ed.
- Boubacar, K; Pierre, J. 2007. Specific degradation of watersheds. *International Journal of Sediment Research* 222:114-119.

- Brooks, KN; Ffolliott, PF; Magner, JA. 2012. Hydrology and the Management of Watersheds. John Wiley & Sons. 517 p.
- Bueso, ML. 2009. Identificación y caracterización de las zonas con mayor potencial de recarga hídrica en las subcuencas de los ríos Tcacó y Shusho, municipio de Chiquimula. Chiquimula, Guatemala, CONCYT, SENACYT, FONACYT, Universidad de San Carlos de Guatemala. 149 p.
- Campos, CA. 2010. Análisis de los cambios de cobertura de la cuenca alta y media del río Reventazón, Costa Rica, periodo 2000-2010. Lic. en Ingeniería Ambiental. Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal. 83 p.
- CATIE. 2003. Caracterización y diagnóstico de las subcuencas tributarias del sistema hidroeléctrico Birris. Costa Rica, 136 p.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, ). 2006. Istmo Centroamericano: Estadísticas del subsector eléctrico. Informe preliminar del segmento de la producción de electricidad. 37 p.
- Chang, M. 2006. Forest hydrology: an introduction to water and forests. Taylor & Francis Group ed. Boca Raton, Florida, CRC press. 443 p.
- Chen, LY; Yang, HC. 2008. Scenario simulation and forecast of land use/cover in northern China. Chinese Science Bulletin 539:1401-1412.
- Claessens, I; Schoorl, JM; Verburg, PH; Geraedts, L; Veldkamp, A. 2009. Modelling interactions and feedback mechanisms between land use change and landscape processes. Agriculture, Ecosystems and Environment 129 157 – 170.
- Coppin, NJ; Richards, IG. 2007. Use of vegetation in civil engineering. London, Butterworths London. 237 p.
- Coppin, P; Jonckheere, I; Nackaerts, K; Muys, B; Lambin, E. 2004. Review Article Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. International journal of remote sensing 259:1565-1596.
- Cortés, VM. 1993. Desgaste vertical de los suelos hortícolas en el flanco occidental del volcán Irazú. Ciencias Sociales 62:83-91.
- Cubillos Buitrago, AA. 2012. Cambio y efecto de la deforestación sobre la dinámica poblacional de panthera onca desde el Catatumbo (norte de Santander) hasta paramillo (Antioquia) en el período 2010-2030.
- Daneshvar, MRM; Bagherzadeh, A. 2012. Evaluation of sediment yield in PSIAC and MPSIAC models by using GIS at Toroq Watershed, Northeast of Iran. Frontiers of Earth Science 61:83-94.
- Di Luzio, M; Arnold, JG; Srinivasan, R. 2005. Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations. Hydrological Processes 193:629-650.
- SWAT 2013 (2013. Moulding SWAT model for Chinese Qingjiang river for rainfall-runoff simulations. Fracia, Soil, Water Assessment Tool. 43 p.
- Eastman, J; Van Fossen, M; Solarzano, L. 2005. Transition potential modeling for land cover change. GIS, spatial analysis and modeling:357-386.
- Eastman, R. 2009a. The Land Change Modeler for Ecological Sustainability. IDRISI Focus Paper, Clark Labs:2.
- \_\_\_\_\_. 2009b. Idrisi Taiga, Guide to GIS and Image Processing, manual version 16.02. Clark University. 342 p.
- Engman, ET. 1986. Roughness coefficients for routing surface runoff. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 1121:39-53.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, I. 2009. Guía para la descripción de suelos. Trad. R Vargas. 4 ed. Roma, Italia, 111 p.
- Foley, JA; DeFries, R; Asner, GP; Barford, C; Bonan, G; Carpenter, SR; Chapin, FS; Coe, MT; Daily, GC; Gibbs, HK. 2005. Global consequences of land use. science 3095734:570-574.



- García-Chevesich, PA. 2009. Erosion Processes and Control. Ph. D. Arizona, Estados Unidos, The University Of Arizona. 513 p.
- Geneletti, D. 2008. Incorporating biodiversity assets in spatial planning: Methodological proposal and development of a planning support system. *Landscape and urban planning* 843:252-265.
- Giménez, R; Casali, J; Grande, I; Díez, J; Campo, MA; Álvarez-Mozos, J; Goñi, M. 2012. Factors controlling sediment export in a small agricultural watershed in Navarre (Spain). *Agricultural water management* 110:1-8.
- Gómez, F. 2002. Evaluación de la erosión potencial y producción de sedimentOS en tres cuencas de Costa Rica tesis Lic. Ing. Civ. San Jose Costa Rica, UCR. 191 p.
- González-Roglich, M; Villarreal, D; Castro, MG. 2012. Evaluación de la efectividad de la Reserva Parque Luro como herramienta de conservación del Caldenal pampeano: cambios en la cobertura vegetal a nivel de paisaje entre 1960 y 2004. *Ecología austral* 221:11-21.
- Griensven, Av; Ndomba, P; Yalaw, S; Kilonzo, F. 2012. Critical review of the application of SWAT in the upper Nile Basin countries. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 93:3761-3788.
- Guerra, V; Ochoa, S. 2006. Evaluación espacio-temporal de la vegetación y uso del suelo en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco (1990-2000). *Investigaciones geográficas* 59:7-25.
- Gutiérrez, OD. 2001. Estimación de costos de restauración de bosques y ajuste ambiental de tarifa eléctrica: estudio de caso de la empresa hidroeléctrica Jasec en Costa Rica. *Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE*. 100 p.
- Harrison, C. 2000. What factors control mechanical erosion rates? *International Journal of Earth Sciences* 884:752-763.
- Hovius, N; Stark, CP; Tutton, MA; Abbott, LD. 1998. Landslide-driven drainage network evolution in a pre-steady-state mountain belt: Finisterre Mountains, Papua New Guinea. *Geology* 2612:1071-1074.
- Ibarra-Montoya, JL; Román, R; Gutiérrez, K; Gaxiola, J; Arias, V; Bautista, M. 2011. Cambio en la cobertura y uso de suelo en el norte de Jalisco, México: Un análisis del futuro, en un contexto de cambio climático. *Revista Ambiente & Agua-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*: v 62:111-128.
- ICE. 1999. Plan de Manejo Integral de la Cuenca del Río Reventazón. Costa Rica, 381 p. (Documento No. 4 Informe Final).
- INAB(Instituto Nacional de Bosques, ). 2003. Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural. Manual Técnico. Guatemala, Instituto Nacional de Bosques. 106 p.
- INEC(Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, ). 2001. IX Censo nacional de población y V de vivienda del 2000: Resultados generales. San José, Costa Rica, Instituto Nacional de Estadística y de Censos. 80 p.
- Kaimowitz, D. 2001. Will livestock intensification help save Latin America's Tropical Forest? . *Trads. C Angelsen; D Kaimowitz. Wallingford, UK, CABI*, 1-20 p. (Agricultural Technologies and Tropical Deforestation).
- Kolb, M. 2013. Dinámica del uso del suelo y cambio climático en la planeación sistemática para la conservación: un caso de estudio en la cuenca Grijalva-Usumacinta. Thesis Ph.D. D.F. Mexico, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II-Universidad Nacional Autónoma de México. 278 p.
- Kumar, M. 2011. Evaluating Hydrologic Response of an Agricultural Watershed for Watershed Analysis. *Water* 3:604-617.

- Lianes, E. 2008. Estudio del factor vegetación "factor C" de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Revisada "RUSLE" en la cuenca del río Birrís (Costa Rica). Ing. Técnico Forestal. Madrid, España, Universidad Politécnica de Madrid. 192 p.
- Lianes, E; Marchamalo, M; Roldán, M. 2009. Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 332:217-235.
- Linsley, J; Kohler, M; Paulus, J. 1977. Hidrología para Ingenieros. Cali, Colombia, McGraw-Hill Latinoamericana. 398 p.
- Logsdon, MG; Bell, EJ; Westerlund, FV. 1996. Probability mapping of land use change: A GIS interface for visualizing transition probabilities. *Computers, environment and urban systems* 206:389-398.
- Luna, VG. 2011. Analisis multitemporal de la dinamica en el cambio de uso del suelo rural-urbano en la region de Atlixco, Puebla. Doctor en Ciencias. Puebla, Mexico, Colegio de Postgraduados. 270 p.
- Maguire, DJ; Batty, M; Goodchild, MF. 2005. GIS, spatial analysis, and modeling. Esri Press. 480 p.
- Marchamalo, M. 2004. Ordenación del territorio para la producción de servicios ambientales hídricos. Aplicación a la cuenca del río Birrís (Costa Rica). Tesis Dr. Madrid, España, Univesidad Politecnica de Madrid. 385 p.
- Mas, J-F; Velázquez, A; Couturier, S. 2009. La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental Ciencia y política pública* 11:23-39.
- Mas, J-F; Kolb, M; Paegelow, M; Olmedo, MC; Houet, T. 2014. Modelling Land use/cover changes: a comparison of conceptual approaches and softwares. *Environmental Modelling and Software* 51:94-111.
- Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR (XV, 2011. Comparación de programas de modelación de cambios de cobertura / uso del suelo. Curitiba, PR, Brasil, 8 p.
- Matheussen, B; Kirschbaum, RL; Goodman, IA; O'Donnell, GM; Lettenmaier, DP. 2000. Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia River Basin (USA and Canada). *Hydrological Processes* 145:867-885.
- Matus, O. 2007. Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica: aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua. Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 247 p.
- Mendoza, M. 2010. Atlas fisicogeográfico de la cuenca del Tepalcatepec. Instituto Nacional de Ecología.
- Milliman, JD; Syvitski, JP. 1992. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *The Journal of Geology* 100:525-544.
- Molina, A; Vanacker, V; Balthazar, V; Mora, D; Govers, G. 2012. Complex land cover change, water and sediment yield in a degraded Andean environment. *Journal of Hydrology* 472:25-35.
- Morgan, RPC. 2005. Soil Erosion & Conservation. Blackwell Publishing. 299 p.
- Nájera-González, O; Bojórquez-Serrano, J; Cifuentes-Lemus, J; Marceleño-Flores, S. 2010. Cambio de cobertura y uso del suelo en la cuenca del río Mololoa, Nayarit. *Revista Bio Ciencias* 11:19-29.
- Nan, L; Ge, S; Xiaoming, F; Bojie, F. 2013. Water yield responses to climate change and variability across the North-South Transect of Eastern China (NSTEC). *Journal of Hydrology* 481:96-105.

- Nasri, M; Feiznia, S; Jafari, M; Ahmadi, H. 2013. Application of Gully and Rill Erosion Indicators for Estimating Soil Loss Using GIS Techniques (Case Study: Menderjan Watershed, Iran). *Desert* (2008-0875) 17:119-128.
- Ndomba, PM; Mtaló, FW; Killingtveit, Å. 2008. A guided SWAT model application on sediment yield modeling in Pangani River basin: Lessons learnt. *Journal of Urban and Environmental Engineering* 22:53-62.
- Ndomba, PM; van Griensven, A. 2011. Suitability of SWAT model in sediment yields modeling in the Eastern Africa. *Advances in Data, Methods, Models and Their Applications in Geoscience, InTech, China*:261-284.
- Neitsch, SL; Arnold, JG; Kiniry, JR; Williams, JR. 2005. Soil And Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Temple, Texas, USA, 476 p. (Grassland, Soil and Water Research Laboratory o Agricultural Research Service).
- Nelson, E; Mendoza, G; Regetz, J; Polasky, S; Tallis, H; Cameron, D; Chan, KM; Daily, GC; Goldstein, J; Kareiva, PM. 2009. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment* 71:4-11.
- Olmedo, MC; Melgarejo, EM; Paegelow, M. 2010. Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio. *Tecnologías de la información geográfica. La información geográfica al servicio de los ciudadanos*:658-678.
- 2nd International Conference on Managing Rivers in the 21st Century: Solutions Towards Sustainable River Basins. Riverside Kuching, Sarawak, Malaysia (2007. Modelling of a River Basin Using SWAT Model and GIS. 6-8 p.
- ONU(Organizaciones de Naciones Unidas, ). 2014. Nota informativa: agua y energía. Conferencia de las Naciones Unidas. Río de Janeiro, Brasil, ONU. 8 p. (El mundo que queremos).
- Peschel, JM. 2003. Evaluating the Influence of Soil Data Set Resolution within the Outputs of a Distributed Parameter Hydrologic Model. Texas, Sustainable Coastal Margins Group At Texas A&M University. 29 p. (Land Cover and Land Use Change).
- Pineda Jaimes, NB; Bosque Sendra, J; Gómez Delgado, M; Plata Rocha, W. 2009. Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes: Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones geográficas* 69:33-52.
- PREVDA. 2010. Caracterización del cantón de Alvarado, Cartago, Costa Rica. Costa Rica, 74 p. (Planificación y Gestión Territorial de los Riesgos, del agua y del medio ambiente).
- Programa de Reducción de la Vulnerabilidad y Degradación Ambiental. 2008. Plan de Cuenca del Río Reventazón-Parismina. Costa Rica, 334 p.
- Puyravaud, JP. 2003. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management* 177:593-596.
- Ramakrishna, B. 1997. Estrategias de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: conceptos y experiencias. San Jose, Costa Rica, IICA. 338 p. (Investigación y educación en desarrollo sostenible).
- Ramírez, L; Alvarado, A; Pujol, R; MacHugh, A; Brenes, LG. 2008. Indicadores para estimar la sostenibilidad agrícola de la cuenca media del río Reventado, Cartago, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 322:73-92.
- Robledo, WI. 2003. Pago de Servicios ambientales para la implementación de sistemas agroforestales en áreas críticas de las cuencas generadoras de energía eléctrica María Linda y Los Esclavos, Guatemala. *Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE*. 104 p.
- Rocha, WP; Delgado, MG; Sendra, JB. 2009. Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la Comunidad de Madrid (1990-2000). *Scripta Nova: revista electrónica de geografía y ciencias sociales* 13:293.

- Rosete Vergés, FA; Damián, P; Luis, J; Bocco, G. 2008. Cambio de uso del suelo y vegetación en la península de Baja California, México. *Investigaciones geográficas* 67:39-58.
- Schneider, LC. 2008. Plant invasions in an agricultural Frontier: linking satellite, ecological and household survey data. 26 p. (Land change science in the tropics: changing agricultural landscapes. Springer Science).
- Seeger, M; Errea, M-P; Begueria, S; Arnáez, J; Martí, C; Garcia-Ruiz, J. 2004. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees. *Journal of Hydrology* 288:299-311.
- Sevilla, VA; Comerma, JA; Silva, O. 2009. Caracterización de la cuenca del río Canoabo en el estado Carabobo, Venezuela. i. análisis climático y de producción de agua *Agronomía Trop* 59:33-44.
- Shen, Z; Gong, Y; Li, Y; Hong, Q; Xu, L; Liu, R. 2009. A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area. *Agricultural water management* 96:1435-1442.
- Silva, O. 2004. El modelo SWAT en una cuenca pequeña de altas pendientes: simulación de la producción de agua. *Agronomía Tropical* 54:275-291.
- Simonovic, SP. 2002. World water dynamics: global modeling of water resources. *Journal of Environmental Management* 66:249-267.
- Spalevic, V; Radanovic, D; Behzadfar, M; Djekovic, V; Andjelkovic, A; Milosevic, N. 2014. Calculation of the sediment yield of the Trebacka Rijeka, Polimlje, Montenegro. *Agriculture and Forestry* 60:259-272.
- Stehr, A; Debels, P; Romero, F; Alcayaga, H. 2008. Hydrological modelling with SWAT under conditions of limited data availability: evaluation of results from a Chilean case study. *Hydrological sciences journal* 53:588-601.
- Sun, G; McNulty, SG; Lu, J; Amatya, DM; Liang, Y; Kolka, R. 2005. Regional annual water yield from forest lands and its response to potential deforestation across the southeastern United States. *Journal of Hydrology* 308:258-268.
- Thawait, A; Chauhan, M. 2015. Sediment Yield Modelling of Mohgaon Watershed of Narmada River Basin using SWAT Model. *International journal of Engineering and Technical Research* 3:238-241.
- Torres, E; Reynoso, D; Oropeza, JL; Mejía, E. 2004. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México. *Redalyc* 224:9.
- Toy, TJ; Foster, GR; Renard, KG. 2002. Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control. New York, John Wiley & Sons. 338 p.
- Treviño, E; Aguirre, OA; Salinas, W; Xanat, N; Verastegui, J. 2005. Evaluación de la producción de agua usando modelos de análisis geográfico. *Revista internacional de Ciencias de la Tierra*. (<http://www.mappinginteractivo.com>). Artículo 1058:13-17.
- UN WATER. 2014. Agua y energía. Perusa, Italia, 12 p. (Resumen ejecutivo). Consultado 15 oct., 2014. Disponible en <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002269/226962S.pdf>
- United States Department of Agriculture. 2003. Keys to Soil Taxonomy. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service. 332 p. (By Soil Survey Staff).
- Vaes, G; Willems, P; Berlamont, J. 2001. Rainfall input requirements for hydrological calculations. *Urban Water* 31:107-112.
- Vallecillo, S. 2009. Los cambios en el paisaje y su efecto sobre la distribución de las especies: modelización y aplicación a la conservación de las aves de hábitats abiertos en paisajes mediterráneos. Tesis Doctoral. España, Universidad de Lleida. 61 p.
- Van der Knijff, J; Jones, R; Montanarella, L. 2000. Soil erosion risk assessment in Europe. European Soil Bureau, European Commission. 38 p.

- Vargas, F. 2010. Estimación de pérdida de carbono en el suelo por erosión hídrica laminar bajo diferentes escenarios de producción hortícola y ganadera en la subcuenca del río Birrís, Costa Rica. Mag. MSc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 186 p.
- Veldkamp, A; Lambin, EF. 2001. Predicting landuse change. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85: 1–6
- Verburg, PH; Overmars, KP. 2009. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landscape ecology* 249:1167-1181.
- Vignola, R; McDaniels, TL; Scholz, RW. 2013. Governance structures for ecosystem-based adaptation: Using policy-network analysis to identify key organizations for bridging information across scales and policy areas. *Environmental Science & Policy* 31:71-84.
- Walling, D; Fang, D. 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change* 391:111-126.
- Wang, S; Fu, B-J; He, C-S; Sun, G; Gao, G-Y. 2011. A comparative analysis of forest cover and catchment water yield relationships in northern China. *Forest Ecology and Management* 2627:1189-1198.
- Wang, X; Shang, S; Yang, W; Clary, CR; Yang, D. 2010. Simulation of land use–soil interactive effects on water and sediment yields at watershed scale. *Ecological Engineering* 363:328-344.
- Wasson, R. 2002. Modelling erosion, sediment transport and sediment yield. *In* W Summer; DE Walling. eds., UNESCO. p. 263.
- White, KL; Chaubey, I. 2005. Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable swat model. *JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION* 415:1077-1089.
- Wijdeven, S; Kuzee, M; de Haan, T. 1994. Secondary Forests and Succession: Analysis of Structure and Species Composition of Abandoned Pastures in the Monteverde Cloud Forest Reserve, Costa Rica. LU.
- Williams, JR. 1975. Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. *USDA ARS-S-40:244-252.*
- Zhang, X; Yu, X; Wu, S; Wei, T; Zhang, X. 2006. Effect of forest vegetation on runoff and sediment production in sloping lands of Loess area. *Frontiers of Forestry in China* 13:336-342.
- Zubieta, R. 2013. Modelado hidrológico distribuido de la cuenca Amazonica Peruana utilizando precipiación obtenida por satelite. Mag. Sc. en Recursos Naturales. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 110 p.

## ANEXO

Estimación de la producción de agua y sedimentos en la subcuenca del río Birrís, a nivel de Unidades de Respuesta Hidrológica. Información estimada sin los procesos de calibración y validación por la razón de no contar con información de datos medidos.

HRU	SUB	AREA (km2)	Producción de agua (mm)	Producción de sedimentos (t/ha)	Combinación (uso del suelo, tipo del suelo y pendiente)
1	1	0.278	123.118	0.018	1_FRST_HAPLUDANDS_60-9999
2	1	0.186	122.470	0.005	1_FRST_HAPLUDANDS_15-30
3	1	0.754	122.770	0.010	1_FRST_HAPLUDANDS_30-60
4	1	0.042	122.266	0.002	1_FRST_HAPLUDANDS_3-15
5	1	0.030	122.229	0.000	1_FRST_HAPLUDANDS_0-3
6	1	0.185	125.020	0.055	1_FRST_UDIVITRANDS_30-60
7	1	0.005	123.997	0.000	1_FRST_UDIVITRANDS_0-3
8	1	0.020	123.991	0.014	1_FRST_UDIVITRANDS_3-15
9	1	0.074	125.455	0.099	1_FRST_UDIVITRANDS_60-9999
10	1	0.088	124.333	0.024	1_FRST_UDIVITRANDS_15-30
11	1	0.002	123.751	10.367	1_BARR_HAPLUDANDS_15-30
12	1	0.001	123.583	4.995	1_BARR_HAPLUDANDS_3-15
13	1	0.001	123.508	0.160	1_BARR_HAPLUDANDS_0-3
14	1	0.002	123.828	15.041	1_BARR_HAPLUDANDS_30-60
15	1	0.004	125.509	0.195	1_BARR_UDIVITRANDS_0-3
16	1	0.022	125.757	14.409	1_BARR_UDIVITRANDS_15-30
17	1	0.014	125.534	7.602	1_BARR_UDIVITRANDS_3-15
18	1	0.000	126.641	20.634	1_BARR_UDIVITRANDS_60-9999
19	1	0.008	126.177	18.819	1_BARR_UDIVITRANDS_30-60
20	1	0.004	123.465	0.088	1_RNGB_HAPLUDANDS_15-30
21	1	0.000	123.176	0.000	1_RNGB_HAPLUDANDS_0-3
22	1	0.000	123.129	0.031	1_RNGB_HAPLUDANDS_3-15
23	1	0.006	123.526	0.140	1_RNGB_HAPLUDANDS_30-60
24	1	0.005	125.138	0.009	1_RNGB_UDIVITRANDS_0-3
25	1	0.002	126.558	1.358	1_RNGB_UDIVITRANDS_60-9999
26	1	0.037	125.212	0.255	1_RNGB_UDIVITRANDS_3-15
27	1	0.027	126.085	0.896	1_RNGB_UDIVITRANDS_30-60
28	1	0.109	125.498	0.509	1_RNGB_UDIVITRANDS_15-30
29	1	0.001	123.868	4.331	1_AGRL_HAPLUDANDS_30-60
30	1	0.000	123.499	0.115	1_AGRL_HAPLUDANDS_0-3
31	1	0.001	123.555	1.148	1_AGRL_HAPLUDANDS_3-15
32	1	0.003	123.635	2.350	1_AGRL_HAPLUDANDS_15-30
33	1	0.000	123.699	0.680	1_PAST_HAPLUDANDS_60-9999
34	1	0.006	123.393	0.486	1_PAST_HAPLUDANDS_30-60
35	1	0.002	122.968	0.147	1_PAST_HAPLUDANDS_3-15
36	1	0.002	122.914	0.003	1_PAST_HAPLUDANDS_0-3
37	1	0.008	123.128	0.271	1_PAST_HAPLUDANDS_15-30
38	2	0.000	123.174	0.001	2_URLD_HAPLUDANDS_15-30
39	2	0.000	123.151	0.000	2_URLD_HAPLUDANDS_0-3
40	2	0.000	123.152	0.000	2_URLD_HAPLUDANDS_3-15
41	2	0.134	123.163	0.017	2_FRST_HAPLUDANDS_60-9999
42	2	0.026	122.267	0.000	2_FRST_HAPLUDANDS_0-3
43	2	0.114	122.508	0.005	2_FRST_HAPLUDANDS_15-30
44	2	0.346	122.792	0.009	2_FRST_HAPLUDANDS_30-60
45	2	0.023	122.306	0.002	2_FRST_HAPLUDANDS_3-15
46	2	0.017	122.640	0.000	2_FRST_HIDRUDANDS_0-3
47	2	0.040	123.973	0.028	2_FRST_HIDRUDANDS_60-9999
48	2	0.014	122.652	0.003	2_FRST_HIDRUDANDS_3-15
49	2	0.061	122.865	0.008	2_FRST_HIDRUDANDS_15-30
50	2	0.075	123.272	0.014	2_FRST_HIDRUDANDS_30-60
51	2	0.009	124.018	0.011	2_FRST_UDIVITRANDS_3-15

52	2	0.004	124.023	0.000	2_FRST_UDIVITRANDS_0-3
53	2	0.013	125.477	0.077	2_FRST_UDIVITRANDS_60-9999
54	2	0.038	125.023	0.044	2_FRST_UDIVITRANDS_30-60
55	2	0.038	124.370	0.023	2_FRST_UDIVITRANDS_15-30
56	2	0.006	123.932	0.385	2_RNGB_HAPLUDANDS_60-9999
57	2	0.004	123.201	0.001	2_RNGB_HAPLUDANDS_0-3
58	2	0.026	123.627	0.224	2_RNGB_HAPLUDANDS_30-60
59	2	0.012	123.343	0.114	2_RNGB_HAPLUDANDS_15-30
60	2	0.001	123.165	0.038	2_RNGB_HAPLUDANDS_3-15
61	2	0.020	125.545	0.475	2_RNGB_UDIVITRANDS_15-30
62	2	0.015	126.600	2.151	2_RNGB_UDIVITRANDS_60-9999
63	2	0.051	126.168	1.063	2_RNGB_UDIVITRANDS_30-60
64	2	0.001	125.218	0.140	2_RNGB_UDIVITRANDS_3-15
65	2	0.003	125.156	0.004	2_RNGB_UDIVITRANDS_0-3
66	2	0.003	123.471	0.027	2_AGR_L_HAPLUDANDS_0-3
67	2	0.002	123.562	1.610	2_AGR_L_HAPLUDANDS_3-15
68	2	0.003	124.221	12.057	2_AGR_L_HAPLUDANDS_60-9999
69	2	0.042	123.904	6.633	2_AGR_L_HAPLUDANDS_30-60
70	2	0.063	123.689	4.297	2_AGR_L_HAPLUDANDS_15-30
71	2	0.000	124.770	6.988	2_AGR_L_HIDRUDANDS_60-9999
72	2	0.002	124.397	4.482	2_AGR_L_HIDRUDANDS_30-60
73	2	0.018	123.981	1.844	2_AGR_L_HIDRUDANDS_3-15
74	2	0.035	124.033	3.411	2_AGR_L_HIDRUDANDS_15-30
75	2	0.001	123.876	0.062	2_AGR_L_HIDRUDANDS_0-3
76	2	0.001	126.101	8.137	2_AGR_L_UDIVITRANDS_60-9999
77	2	0.051	125.223	3.353	2_AGR_L_UDIVITRANDS_15-30
78	2	0.019	124.991	2.583	2_AGR_L_UDIVITRANDS_3-15
79	2	0.010	125.011	0.043	2_AGR_L_UDIVITRANDS_0-3
80	2	0.019	125.778	6.300	2_AGR_L_UDIVITRANDS_30-60
81	2	0.023	123.768	1.355	2_PAST_HAPLUDANDS_60-9999
82	2	0.142	123.487	0.845	2_PAST_HAPLUDANDS_30-60
83	2	0.049	123.186	0.424	2_PAST_HAPLUDANDS_15-30
84	2	0.003	123.006	0.170	2_PAST_HAPLUDANDS_3-15
85	2	0.001	122.959	0.004	2_PAST_HAPLUDANDS_0-3
86	2	0.042	124.203	0.928	2_PAST_HIDRUDANDS_30-60
87	2	0.008	124.605	1.426	2_PAST_HIDRUDANDS_60-9999
88	2	0.042	123.765	0.457	2_PAST_HIDRUDANDS_15-30
89	2	0.010	123.629	0.206	2_PAST_HIDRUDANDS_3-15
90	2	0.001	123.593	0.006	2_PAST_HIDRUDANDS_0-3
91	2	0.002	126.506	1.620	2_PAST_UDIVITRANDS_60-9999
92	2	0.002	125.018	0.004	2_PAST_UDIVITRANDS_0-3
93	2	0.043	125.452	0.582	2_PAST_UDIVITRANDS_15-30
94	2	0.014	125.190	0.284	2_PAST_UDIVITRANDS_3-15
95	2	0.036	126.103	1.246	2_PAST_UDIVITRANDS_30-60
96	3	0.004	123.362	0.013	3_URLD_HAPLUDANDS_15-30
97	3	0.002	123.325	0.000	3_URLD_HAPLUDANDS_0-3
98	3	0.000	123.327	0.004	3_URLD_HAPLUDANDS_3-15
99	3	0.001	123.539	0.017	3_URLD_HAPLUDANDS_30-60
100	3	0.083	123.301	0.015	3_FRST_HAPLUDANDS_60-9999
101	3	0.018	122.444	0.000	3_FRST_HAPLUDANDS_0-3
102	3	0.014	122.483	0.002	3_FRST_HAPLUDANDS_3-15
103	3	0.251	122.967	0.009	3_FRST_HAPLUDANDS_30-60
104	3	0.085	122.689	0.005	3_FRST_HAPLUDANDS_15-30
105	3	0.022	124.374	15.491	3_AGR_L_HAPLUDANDS_60-9999
106	3	0.221	124.081	9.186	3_AGR_L_HAPLUDANDS_30-60
107	3	0.016	123.645	0.040	3_AGR_L_HAPLUDANDS_0-3
108	3	0.016	123.723	2.178	3_AGR_L_HAPLUDANDS_3-15
109	3	0.108	123.851	4.816	3_AGR_L_HAPLUDANDS_15-30
110	3	0.433	123.612	0.891	3_PAST_HAPLUDANDS_30-60
111	3	0.047	123.911	1.453	3_PAST_HAPLUDANDS_60-9999
112	3	0.020	123.171	0.209	3_PAST_HAPLUDANDS_3-15

113	3	0.024	123.114	0.004	3_PAST_HAPLUDANDS_0-3
114	3	0.248	123.346	0.494	3_PAST_HAPLUDANDS_15-30
115	4	0.019	123.372	0.017	4_URLD_HAPLUDANDS_15-30
116	4	0.002	123.344	0.006	4_URLD_HAPLUDANDS_3-15
117	4	0.001	123.333	0.000	4_URLD_HAPLUDANDS_0-3
118	4	0.000	123.892	0.012	4_URLD_HAPLUDANDS_60-9999
119	4	0.003	123.545	0.022	4_URLD_HAPLUDANDS_30-60
120	4	0.006	123.617	0.014	4_URLD_HIDRUDANDS_3-15
121	4	0.000	123.609	0.000	4_URLD_HIDRUDANDS_0-3
122	4	0.029	123.668	0.020	4_URLD_HIDRUDANDS_15-30
123	4	0.003	123.956	0.022	4_URLD_HIDRUDANDS_30-60
124	4	0.000	124.608	0.005	4_URLD_UDIVITRANDS_3-15
125	4	0.001	124.747	0.016	4_URLD_UDIVITRANDS_15-30
126	4	0.122	122.451	0.000	4_FRST_HAPLUDANDS_0-3
127	4	0.136	122.493	0.003	4_FRST_HAPLUDANDS_3-15
128	4	0.426	122.685	0.005	4_FRST_HAPLUDANDS_15-30
129	4	0.680	122.990	0.010	4_FRST_HAPLUDANDS_30-60
130	4	0.439	123.384	0.022	4_FRST_HAPLUDANDS_60-9999
131	4	0.397	123.410	0.016	4_FRST_HIDRUDANDS_30-60
132	4	0.418	123.040	0.010	4_FRST_HIDRUDANDS_15-30
133	4	0.087	122.833	0.005	4_FRST_HIDRUDANDS_3-15
134	4	0.043	122.845	0.000	4_FRST_HIDRUDANDS_0-3
135	4	0.086	124.023	0.028	4_FRST_HIDRUDANDS_60-9999
136	4	0.018	124.171	0.012	4_FRST_UDIVITRANDS_3-15
137	4	0.003	124.179	0.000	4_FRST_UDIVITRANDS_0-3
138	4	0.060	124.513	0.023	4_FRST_UDIVITRANDS_15-30
139	4	0.007	125.605	0.099	4_FRST_UDIVITRANDS_60-9999
140	4	0.020	125.078	0.035	4_FRST_UDIVITRANDS_30-60
141	4	0.045	123.641	0.038	4_AGRL_HAPLUDANDS_0-3
142	4	0.104	123.731	3.251	4_AGRL_HAPLUDANDS_3-15
143	4	0.418	123.855	5.051	4_AGRL_HAPLUDANDS_15-30
144	4	0.044	124.382	16.855	4_AGRL_HAPLUDANDS_60-9999
145	4	0.346	124.086	9.334	4_AGRL_HAPLUDANDS_30-60
146	4	0.769	124.241	5.479	4_AGRL_HIDRUDANDS_15-30
147	4	0.007	124.983	13.010	4_AGRL_HIDRUDANDS_60-9999
148	4	0.015	124.017	0.054	4_AGRL_HIDRUDANDS_0-3
149	4	0.060	124.141	1.904	4_AGRL_HIDRUDANDS_3-15
150	4	0.320	124.541	8.062	4_AGRL_HIDRUDANDS_30-60
151	4	0.031	125.140	2.708	4_AGRL_UDIVITRANDS_3-15
152	4	0.006	125.820	4.329	4_AGRL_UDIVITRANDS_30-60
153	4	0.005	125.161	0.052	4_AGRL_UDIVITRANDS_0-3
154	4	0.081	125.358	3.466	4_AGRL_UDIVITRANDS_15-30
155	4	0.039	123.122	0.004	4_PAST_HAPLUDANDS_0-3
156	4	0.470	123.638	0.957	4_PAST_HAPLUDANDS_30-60
157	4	0.462	123.344	0.476	4_PAST_HAPLUDANDS_15-30
158	4	0.094	123.181	0.257	4_PAST_HAPLUDANDS_3-15
159	4	0.127	123.959	1.788	4_PAST_HAPLUDANDS_60-9999
160	4	0.017	123.742	0.005	4_PAST_HIDRUDANDS_0-3
161	4	0.018	124.757	1.611	4_PAST_HIDRUDANDS_60-9999
162	4	0.740	124.269	1.058	4_PAST_HIDRUDANDS_30-60
163	4	1.134	123.929	0.698	4_PAST_HIDRUDANDS_15-30
164	4	0.141	123.786	0.263	4_PAST_HIDRUDANDS_3-15
165	4	0.008	125.307	0.247	4_PAST_UDIVITRANDS_3-15
166	4	0.047	125.555	0.521	4_PAST_UDIVITRANDS_15-30
167	4	0.001	126.062	0.654	4_PAST_UDIVITRANDS_30-60
168	4	0.001	125.163	0.007	4_PAST_UDIVITRANDS_0-3
169	5	0.011	155.412	0.247	5_URLD_HAPLUDANDS_3-15
170	5	0.000	156.056	0.902	5_URLD_HAPLUDANDS_60-9999
171	5	0.035	155.502	0.315	5_URLD_HAPLUDANDS_15-30
172	5	0.011	155.719	0.512	5_URLD_HAPLUDANDS_30-60
173	5	0.005	155.399	0.006	5_URLD_HAPLUDANDS_0-3



174	5	0.005	156.303	0.418	5_URLD_HIDRUDANDS_30-60
175	5	0.041	155.957	0.358	5_URLD_HIDRUDANDS_15-30
176	5	0.002	155.915	0.006	5_URLD_HIDRUDANDS_0-3
177	5	0.008	155.928	0.137	5_URLD_HIDRUDANDS_3-15
178	5	0.000	157.358	0.006	5_URLD_UDIVITRANDS_0-3
179	5	0.001	157.451	0.148	5_URLD_UDIVITRANDS_3-15
180	5	0.000	157.591	0.246	5_URLD_UDIVITRANDS_15-30
181	5	0.026	154.899	0.000	5_FRST_HAPLUDANDS_0-3
182	5	0.320	155.900	0.164	5_FRST_HAPLUDANDS_60-9999
183	5	0.054	155.083	0.026	5_FRST_HAPLUDANDS_15-30
184	5	0.016	154.869	0.011	5_FRST_HAPLUDANDS_3-15
185	5	0.211	155.437	0.063	5_FRST_HAPLUDANDS_30-60
186	5	0.032	155.426	0.000	5_FRST_HIDRUDANDS_0-3
187	5	0.054	155.389	0.020	5_FRST_HIDRUDANDS_3-15
188	5	0.385	156.135	0.082	5_FRST_HIDRUDANDS_30-60
189	5	0.255	156.925	0.186	5_FRST_HIDRUDANDS_60-9999
190	5	0.291	155.622	0.045	5_FRST_HIDRUDANDS_15-30
191	5	0.000	158.770	0.056	5_FRST_UDIVITRANDS_60-9999
192	5	0.001	157.156	0.000	5_FRST_UDIVITRANDS_0-3
193	5	0.004	157.185	0.030	5_FRST_UDIVITRANDS_3-15
194	5	0.006	158.214	0.073	5_FRST_UDIVITRANDS_30-60
195	5	0.011	157.575	0.044	5_FRST_UDIVITRANDS_15-30
196	5	0.094	156.192	5.226	5_AGR_L_HAPLUDANDS_3-15
197	5	0.265	156.302	8.089	5_AGR_L_HAPLUDANDS_15-30
198	5	0.159	156.527	14.773	5_AGR_L_HAPLUDANDS_30-60
199	5	0.029	156.136	0.079	5_AGR_L_HAPLUDANDS_0-3
200	5	0.022	156.855	29.662	5_AGR_L_HAPLUDANDS_60-9999
201	5	0.024	156.587	0.101	5_AGR_L_HIDRUDANDS_0-3
202	5	1.281	156.832	10.747	5_AGR_L_HIDRUDANDS_15-30
203	5	0.782	157.133	16.103	5_AGR_L_HIDRUDANDS_30-60
204	5	0.025	157.662	25.718	5_AGR_L_HIDRUDANDS_60-9999
205	5	0.080	156.727	3.484	5_AGR_L_HIDRUDANDS_3-15
206	5	0.000	159.341	13.383	5_AGR_L_UDIVITRANDS_60-9999
207	5	0.016	158.079	2.949	5_AGR_L_UDIVITRANDS_3-15
208	5	0.002	157.956	0.120	5_AGR_L_UDIVITRANDS_0-3
209	5	0.120	158.242	7.654	5_AGR_L_UDIVITRANDS_15-30
210	5	0.026	158.817	10.488	5_AGR_L_UDIVITRANDS_30-60
211	5	0.185	155.843	1.192	5_PAST_HAPLUDANDS_15-30
212	5	0.024	155.652	0.630	5_PAST_HAPLUDANDS_3-15
213	5	0.032	155.626	0.008	5_PAST_HAPLUDANDS_0-3
214	5	0.157	156.522	4.978	5_PAST_HAPLUDANDS_60-9999
215	5	0.365	156.171	2.574	5_PAST_HAPLUDANDS_30-60
216	5	0.659	156.977	2.459	5_PAST_HIDRUDANDS_30-60
217	5	0.992	156.579	1.521	5_PAST_HIDRUDANDS_15-30
218	5	0.109	156.415	0.541	5_PAST_HIDRUDANDS_3-15
219	5	0.020	156.375	0.014	5_PAST_HIDRUDANDS_0-3
220	5	0.090	157.597	4.856	5_PAST_HIDRUDANDS_60-9999
221	5	0.000	158.097	0.021	5_PAST_UDIVITRANDS_0-3
222	5	0.006	159.146	1.426	5_PAST_UDIVITRANDS_30-60
223	5	0.013	158.600	1.052	5_PAST_UDIVITRANDS_15-30
224	5	0.001	158.190	0.392	5_PAST_UDIVITRANDS_3-15
225	6	0.018	123.640	0.018	6_URLD_HAPLUDANDS_15-30
226	6	0.002	123.604	0.009	6_URLD_HAPLUDANDS_3-15
227	6	0.003	123.602	0.000	6_URLD_HAPLUDANDS_0-3
228	6	0.000	124.097	0.038	6_URLD_HAPLUDANDS_60-9999
229	6	0.010	123.841	0.030	6_URLD_HAPLUDANDS_30-60
230	6	0.076	122.960	0.004	6_FRST_HAPLUDANDS_15-30
231	6	0.194	123.267	0.009	6_FRST_HAPLUDANDS_30-60
232	6	0.019	122.767	0.002	6_FRST_HAPLUDANDS_3-15
233	6	0.239	123.634	0.021	6_FRST_HAPLUDANDS_60-9999
234	6	0.033	122.731	0.000	6_FRST_HAPLUDANDS_0-3

235	6	0.118	124.358	8.961	6_AGRL_HAPLUDANDS_30-60
236	6	0.102	124.102	4.178	6_AGRL_HAPLUDANDS_15-30
237	6	0.014	123.932	0.040	6_AGRL_HAPLUDANDS_0-3
238	6	0.028	124.658	17.687	6_AGRL_HAPLUDANDS_60-9999
239	6	0.011	123.983	1.998	6_AGRL_HAPLUDANDS_3-15
240	6	0.176	124.201	1.877	6_PAST_HAPLUDANDS_60-9999
241	6	0.550	123.886	0.980	6_PAST_HAPLUDANDS_30-60
242	6	0.360	123.602	0.496	6_PAST_HAPLUDANDS_15-30
243	6	0.030	123.382	0.004	6_PAST_HAPLUDANDS_0-3
244	6	0.030	123.433	0.213	6_PAST_HAPLUDANDS_3-15
245	7	0.037	155.885	0.580	7_URLD_HAPLUDANDS_30-60
246	7	0.109	155.679	0.363	7_URLD_HAPLUDANDS_15-30
247	7	0.003	156.277	1.310	7_URLD_HAPLUDANDS_60-9999
248	7	0.093	155.584	0.283	7_URLD_HAPLUDANDS_3-15
249	7	0.013	155.578	0.010	7_URLD_HAPLUDANDS_0-3
250	7	0.143	155.570	0.056	7_FRST_HAPLUDANDS_30-60
251	7	0.074	155.256	0.026	7_FRST_HAPLUDANDS_15-30
252	7	0.028	155.072	0.000	7_FRST_HAPLUDANDS_0-3
253	7	0.026	155.046	0.013	7_FRST_HAPLUDANDS_3-15
254	7	0.079	155.974	0.111	7_FRST_HAPLUDANDS_60-9999
255	7	0.363	156.469	8.825	7_AGRL_HAPLUDANDS_15-30
256	7	0.037	156.232	0.095	7_AGRL_HAPLUDANDS_0-3
257	7	0.031	156.971	28.893	7_AGRL_HAPLUDANDS_60-9999
258	7	0.301	156.685	15.854	7_AGRL_HAPLUDANDS_30-60
259	7	0.084	156.356	5.218	7_AGRL_HAPLUDANDS_3-15
260	7	0.564	156.296	2.509	7_PAST_HAPLUDANDS_30-60
261	7	0.371	156.003	1.266	7_PAST_HAPLUDANDS_15-30
262	7	0.074	155.814	0.729	7_PAST_HAPLUDANDS_3-15
263	7	0.130	156.661	4.785	7_PAST_HAPLUDANDS_60-9999
264	7	0.047	155.796	0.011	7_PAST_HAPLUDANDS_0-3
265	8	0.027	155.712	0.008	8_URLD_HAPLUDANDS_0-3
266	8	0.062	155.719	0.254	8_URLD_HAPLUDANDS_3-15
267	8	0.023	156.014	0.542	8_URLD_HAPLUDANDS_30-60
268	8	0.002	156.455	1.424	8_URLD_HAPLUDANDS_60-9999
269	8	0.076	155.812	0.338	8_URLD_HAPLUDANDS_15-30
270	8	0.001	156.208	0.112	8_URLD_HIDRUDANDS_3-15
271	8	0.001	156.210	0.006	8_URLD_HIDRUDANDS_0-3
272	8	0.010	156.246	0.311	8_URLD_HIDRUDANDS_15-30
273	8	0.000	157.173	0.634	8_URLD_HIDRUDANDS_60-9999
274	8	0.000	156.751	0.413	8_URLD_HIDRUDANDS_30-60
275	8	0.713	155.723	0.071	8_FRST_HAPLUDANDS_30-60
276	8	0.227	155.395	0.031	8_FRST_HAPLUDANDS_15-30
277	8	0.868	156.174	0.178	8_FRST_HAPLUDANDS_60-9999
278	8	0.100	155.182	0.015	8_FRST_HAPLUDANDS_3-15
279	8	0.135	155.198	0.000	8_FRST_HAPLUDANDS_0-3
280	8	0.014	155.682	0.016	8_FRST_HIDRUDANDS_3-15
281	8	0.010	155.715	0.000	8_FRST_HIDRUDANDS_0-3
282	8	0.104	157.118	0.156	8_FRST_HIDRUDANDS_60-9999
283	8	0.173	156.447	0.079	8_FRST_HIDRUDANDS_30-60
284	8	0.062	155.905	0.037	8_FRST_HIDRUDANDS_15-30
285	8	0.098	157.110	34.876	8_AGRL_HAPLUDANDS_60-9999
286	8	0.186	156.347	0.098	8_AGRL_HAPLUDANDS_0-3
287	8	0.701	156.593	9.148	8_AGRL_HAPLUDANDS_15-30
288	8	0.539	156.817	17.908	8_AGRL_HAPLUDANDS_30-60
289	8	0.359	156.484	6.272	8_AGRL_HAPLUDANDS_3-15
290	8	0.045	157.419	12.613	8_AGRL_HIDRUDANDS_30-60
291	8	0.003	157.911	20.463	8_AGRL_HIDRUDANDS_60-9999
292	8	0.003	156.862	0.079	8_AGRL_HIDRUDANDS_0-3
293	8	0.003	156.989	2.678	8_AGRL_HIDRUDANDS_3-15
294	8	0.034	157.090	6.660	8_AGRL_HIDRUDANDS_15-30
295	8	0.371	156.786	5.512	8_PAST_HAPLUDANDS_60-9999

296	8	1.165	156.127	1.389	8_PAST_HAPLUDANDS_15-30
297	8	0.440	155.941	0.885	8_PAST_HAPLUDANDS_3-15
298	8	0.252	155.920	0.013	8_PAST_HAPLUDANDS_0-3
299	8	1.419	156.420	2.833	8_PAST_HAPLUDANDS_30-60
300	8	0.256	156.846	1.358	8_PAST_HIDRUDANDS_15-30
301	8	0.083	157.789	4.585	8_PAST_HIDRUDANDS_60-9999
302	8	0.390	157.264	2.580	8_PAST_HIDRUDANDS_30-60
303	8	0.016	156.641	0.015	8_PAST_HIDRUDANDS_0-3
304	8	0.030	156.624	0.630	8_PAST_HIDRUDANDS_3-15
305	9	0.004	155.512	0.015	9_FRST_HAPLUDANDS_15-30
306	9	0.003	155.374	0.012	9_FRST_HAPLUDANDS_3-15
307	9	0.002	155.385	0.000	9_FRST_HAPLUDANDS_0-3
308	9	0.001	156.318	0.073	9_FRST_HAPLUDANDS_60-9999
309	9	0.003	155.840	0.028	9_FRST_HAPLUDANDS_30-60
310	9	0.006	156.976	9.900	9_AGR_L_HAPLUDANDS_30-60
311	9	0.001	157.284	19.276	9_AGR_L_HAPLUDANDS_60-9999
312	9	0.001	156.572	0.116	9_AGR_L_HAPLUDANDS_0-3
313	9	0.009	156.773	5.959	9_AGR_L_HAPLUDANDS_15-30
314	9	0.001	156.648	2.344	9_AGR_L_HAPLUDANDS_3-15
315	9	0.005	156.284	0.617	9_PAST_HAPLUDANDS_15-30
316	9	0.001	156.932	2.747	9_PAST_HAPLUDANDS_60-9999
317	9	0.003	156.587	1.360	9_PAST_HAPLUDANDS_30-60
318	9	0.005	156.085	0.007	9_PAST_HAPLUDANDS_0-3
319	9	0.003	156.112	0.460	9_PAST_HAPLUDANDS_3-15
320	10	0.165	123.724	0.017	10_URLD_HAPLUDANDS_3-15
321	10	0.085	123.723	0.001	10_URLD_HAPLUDANDS_0-3
322	10	0.261	123.760	0.022	10_URLD_HAPLUDANDS_15-30
323	10	0.003	124.211	0.059	10_URLD_HAPLUDANDS_60-9999
324	10	0.061	123.956	0.035	10_URLD_HAPLUDANDS_30-60
325	10	0.428	123.080	0.005	10_FRST_HAPLUDANDS_15-30
326	10	0.157	122.874	0.000	10_FRST_HAPLUDANDS_0-3
327	10	0.206	122.894	0.003	10_FRST_HAPLUDANDS_3-15
328	10	0.483	123.352	0.009	10_FRST_HAPLUDANDS_30-60
329	10	0.208	123.745	0.019	10_FRST_HAPLUDANDS_60-9999
330	10	1.958	124.212	5.764	10_AGR_L_HAPLUDANDS_15-30
331	10	0.261	124.068	0.056	10_AGR_L_HAPLUDANDS_0-3
332	10	0.089	124.731	18.915	10_AGR_L_HAPLUDANDS_60-9999
333	10	1.019	124.432	10.318	10_AGR_L_HAPLUDANDS_30-60
334	10	0.848	124.093	3.832	10_AGR_L_HAPLUDANDS_3-15
335	10	2.152	123.967	1.073	10_PAST_HAPLUDANDS_30-60
336	10	0.313	124.278	1.927	10_PAST_HAPLUDANDS_60-9999
337	10	2.914	123.707	0.563	10_PAST_HAPLUDANDS_15-30
338	10	1.281	123.554	0.380	10_PAST_HAPLUDANDS_3-15
339	10	0.438	123.498	0.005	10_PAST_HAPLUDANDS_0-3