

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA CUANTIFICAR LA  
PRODUCCIÓN DE AGUA Y SEDIMENTO ACTUAL Y  
FUTURO A PARTIR DE CAMBIOS DE COBERTURA  
FORESTAL, SECTOR PRUSIA, PARQUE NACIONAL  
VOLCÁN IRAZÚ**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL CON EL  
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

**EVELYN DANIELA VALVERDE GAMBOA**

**CARTAGO, COSTA RICA, 2018**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA CUANTIFICAR LA  
PRODUCCIÓN DE AGUA Y SEDIMENTO ACTUAL Y  
FUTURO A PARTIR DE CAMBIOS DE COBERTURA  
FORESTAL, SECTOR PRUSIA, PARQUE NACIONAL  
VOLCÁN IRAZÚ**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL CON EL  
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

**EVELYN DANIELA VALVERDE GAMBOA**

**CARTAGO, COSTA RICA, 2018**



Esta obra está bajo una Licencia de Creative Commons Atribución-  
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

## RESUMEN

Evelyn Daniela Valverde Gamboa\*

Este estudio se realizó en el Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú, Cartago, Costa Rica. La subcuenca analizada posee una extensión de 14,44 km<sup>2</sup> y es parte de la subcuenca del Río Reventado. El objetivo fue evaluar los cambios en la producción de agua y sedimento bajo diferentes escenarios de cambio de cobertura forestal. El modelo hidrológico SWAT fue utilizado para evaluar el comportamiento de la producción de agua y sedimento. Para el cambio de cobertura forestal se consideraron dos escenarios, el primero fue eliminar las plantaciones forestales y dejar el suelo descubierto y el segundo eliminar las plantaciones y dejar que la vegetación se regenere naturalmente. Los resultados indicaron que la producción de agua sufrió un aumento de 1,30% para el primer escenario y un descenso de 0,69% para el segundo escenario. La sedimentación aumentó para el primer escenario 2,80% pero para el segundo escenario disminuyó en 1,95%. Al cambiar la cobertura forestal de un sitio, la dinámica hídrica se modifica generando una afectación en la producción de agua, caudal y sedimento.

**Palabras clave:** Modelo SWAT, producción de agua, producción de sedimento, cambio de cobertura, Sector Prusia.

\* Valverde, D. 2018. Modelación Hidrológica para cuantificar la producción de agua y sedimento actual y futuro a partir de cambios de cobertura forestal, Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. 52 p.

## ABSTRACT

This study was conducted in the Prusia Sector, Irazú Volcano National Park, Cartago, Costa Rica. The sub-basin analyzed has an extension of 14,44 km<sup>2</sup> and is part of the sub-basin of the Reventado River. The objective was to evaluate the changes in the production of water and sediment under different scenarios of forest cover change. The SWAT hydrological model was used to evaluate the behavior of water and sediment production. For the forest cover change, two scenarios were considered, the first was to eliminate the forest plantations and leave the ground uncovered and the second was eliminate forest plantations and let vegetation regenerate naturally. The results indicated that water production suffered an increase of 1,30% for the first scenario and a decrease of 0,69% for the second scenario. The sedimentation increased for the first scenario 2,80% but for the second scenario it decreased by 1,95%. By changing the forest cover of a site the water dynamics are modified generating an impact on the production of water, flow and sediment.

**Keywords:** SWAT model, water yield, sediment yield, Change of coverage, Prusia Sector

## ACREDITACIÓN

### CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por M.Sc. Dorian Carvajal Vanegas, M.BA Alejandro Meza Montoya y M.Sc Andrea Tapia Arenas como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



Dorian Carvajal Vanegas M.Sc

Director de tesis y Coordinador de Trabajos Finales de Graduación



Alejandro Meza Montoya MBA

Profesor lector



Andrea Tapia Arenas M.Sc

Lectora



Evelyn Daniela Valverde Gamboa

Estudiante

## **DEDICATORIA**

A mi familia, por ser mi inspiración, en especial a mis padres que a la distancia siempre supieron ayudarme y apoyarme en todos los momentos.

A mis amigos, gracias por hacer de mi estadía en la Universidad una de las mejores experiencias.

## **AGRADECIMIENTO**

A mi profesor tutor Dorian Carvajal, por brindarme su incondicional ayuda, por su amistad y confianza, eso hizo que lograra disfrutar en todo momento mi trabajo. Gracias por aconsejarme y ser parte de este proceso.

A mis profesores de formación, nada hubiese sido posible sin su ayuda y conocimiento.

A la Escuela de Ingeniería Forestal por permitirme colaborar en el proyecto de investigación en Prusia. Al Parque por abrirme las puertas en mis trabajos de campo y al Ingeniero Forestal Mario Quesada por su colaboración. A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica por la colaboración económica.

A todas las personas que de una u otra manera colaboraron en esta investigación.

# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN .....	i
ABSTRACT .....	ii
ACREDITACIÓN .....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE CUADROS .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	3
2.1 General.....	3
2.2 Específicos .....	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
3.1 Parque Nacional Volcán Irazú .....	4
3.2 Sector Prusia .....	4
3.2.1 Restauración ecológica en el Sector Prusia .....	5
3.3 Ciclo hidrológico.....	5
3.3.1 El agua y su función .....	5
3.3.2 Definición de ciclo hidrológico .....	6
3.4 Recurso hídrico.....	7

3.5 Balance hídrico .....	7
3.5.1 Precipitación .....	7
3.5.2 Escorrentía .....	8
3.5.3 Evapotranspiración .....	8
3.5.4 Infiltración .....	9
3.6 Erosión.....	9
3.7 Sedimento.....	10
3.8 Relación entre cobertura forestal y dinámica hídrica .....	10
3.9 Relación entre cobertura forestal y sedimento.....	10
3.10 Cuenca hidrográfica como sistema y unidad de análisis. ....	11
3.11 Modelos hidrológicos .....	11
3.12 Modelo SWAT.....	12
4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	14
4.1 Área de estudio.....	14
4.2 Línea base de la producción de agua y erosión .....	15
4.2.1 Delimitación de la subcuenca.....	15
4.2.2 Creación de las Unidades Hidrológicas de Respuesta.....	16
4.2.3 Simulación.....	20
4.3 Escenarios de cambio de cobertura.....	21

4.4 Periodo de calentamiento .....	23
4.5 Variables por defecto a modificar.....	23
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	24
5.1 Producción de agua, caudal y sedimento actual.....	24
5.1.1 Distribución temporal .....	25
5.1.2 Distribución espacial.....	26
5.2 Producción de agua, caudal y sedimento futuro, a partir de cambios de cobertura.....	32
6. CONCLUSIONES.....	38
7. RECOMENDACIONES.....	40
8. REFERENCIAS .....	41

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Núm.</b>	<b>Título</b>	<b>Pág.</b>
1	Parámetros fisicoquímicos de suelo requeridos por el modelo SWAT.....	17
2	Pendientes de la subcuenca del Sector Prusia, según FAO. ....	20
3	Cobertura por microcuenca, Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú. .....	27
4	Tipo de suelo y pendiente media por microcuenca, Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú. ....	27
5	Componentes del balance hídrico para diferentes escenarios de cambio de uso del suelo.....	32
6	Producción de agua, caudal y sedimento medio anual para cada escenario de cambio de uso del suelo.....	33
7	Producción de agua promedio anual por microcuenca, para cada escenario de cambio de uso del suelo. ....	35
8	Producción de sedimento medio anual por microcuenca, para cada escenario de cambio de uso del suelo. ....	37

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Núm.</b>	<b>Título</b>	<b>Pág.</b>
1	Esquema del ciclo hidrológico en la tierra .....	6
2	Ubicación de la subcuenca del Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú. .....	14
3	Delimitación de la subcuenca del Sector Prusia con la extensión QSWAT 1,5. Parque Nacional Volcán Prusia.....	16
4	Uso de suelo actual y (b) tipo de suelo para la subcuenca, Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú.....	18
5	Uso de suelo para los dos escenarios de cambio de cobertura en la subcuenca: (a) escenario 1 sin plantaciones forestales, (b) escenario 2 área regenerada. Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú. ....	22
6	Componentes del balance hídrico actual simulados por QSWAT, subcuenca del Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú.....	25
7	Caudal medio mensual y carga de sedimentos mensuales a la salida de la subcuenca del Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú. ....	26
8	Producción de agua media anual y sus componentes en la subcuenca del Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú. ....	30
9	Producción de sedimento para cada microcuenca en toneladas por hectárea por año, para el Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú. ....	31
10	Producción de agua promedio anual para cada escenario: (a) escenario actual, (b) sin cobertura forestal, (c) con área regenerada, para el Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú.....	34

11	Producción de sedimento promedio anual para cada escenario: (a) escenario actual, (b) sin cobertura forestal, (c) con área regenerada, para el Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú.....	36
----	---	----

# 1. INTRODUCCIÓN

La degradación de los ecosistemas puede darse por origen natural o por causas antrópicas (Gómez-Ruíz y Lindig-Cisneros, 2017), indistintamente del origen, este fenómeno implica un deterioro en las condiciones bióticas y abióticas del medio, lo que disminuye su complejidad, biodiversidad, la capacidad de carga del suelo, productividad biológica y económica (Montoya, 2005). Por su parte, la degradación de origen natural es el proceso mediante el cual el ecosistema es perturbado a partir de fenómenos naturales como: erupciones volcánicas, incendios naturales (Amestoy, 2001), tormentas o sequías (Simula y Mansur, 2011). Una forma de restaurar un sitio degradado es mediante la reforestación con especies arbóreas (Hernández y Pastor, 2008), mediante la regeneración natural o el enriquecimiento de bosques (Sabogal, Besacier y McGuire, 2015), entre otros. En 1963 las zonas aledañas al Volcán Irazú sufrieron una degradación de origen natural, dicha incidencia se dio a causa de la erupción de su cráter, lo que generó la pérdida de vegetación autóctona y una desestabilización en los suelos. Este fenómeno afectó principalmente el Sector Prusia que actualmente forma parte del mismo Parque Nacional. A raíz de lo ocurrido, se tomaron medidas en pro de la estabilización y protección del suelo y agua, por lo que en los años 60 se recurrió a la reforestación con especies exóticas y nativas (Varela, 2013).

Hoy día, el Sector Prusia cuenta con plantaciones forestales de especies introducidas como *Cupressus lusitanica* (ciprés), *Pinus* sp. (pino) y *Eucalyptus* sp. (eucalipto) (Bermúdez y Conejo 2008), las cuales en mayor o menor grado, no han permitido el desarrollo de la vegetación nativa debajo de ellas, lo que se une a la degradación de las áreas aledañas que en su mayoría son campos de cultivo (Instituto Tecnológico de Costa Rica 2016). Ante esta situación se pretende realizar una sustitución de las especies exóticas encontradas en el sitio por vegetación natural, sin embargo cuando ocurren cambios de cobertura en un área, la hidrología y el suelo pueden verse afectados.

La cobertura forestal en una cuenca cumple una función muy importante en la regulación del ciclo hidrológico (Acosta y Kucharsky, 2012), estabilización y calidad del suelo (Bueno, Sánchez, Esquivel, Palomo y Velasquez, 2014; López, 2016). Cuando un sitio sufre un cambio de uso de suelo, se esperaría que la dinámica hídrica y la cantidad de sedimento varíe y de alguna manera se vean afectados, ya que en ese proceso de cambio factores como la infiltración, evapotranspiración, escorrentía y erosión son modificados en magnitud (Meng et al. 2018), y por ende pueden alterar la cantidad y calidad del agua, cantidad de nutrientes (Kavian, Mohammadi, Gholami y Rodrigo-Comino, 2018), la producción de sedimento y se den cambios del caudal (Pokhrel, 2018), entre otros. Sin embargo estos efectos y beneficios de la cobertura forestal sobre el recurso hídrico y suelo han sido largamente cuestionados por la comunidad científica (Calder, 2004).

Con todo este panorama, es necesario realizar en el Sector Prusia una serie de evaluaciones técnicas que permitan determinar si es posible una sustitución de las especies exóticas encontradas, por vegetación natural, entonces es necesario conocer la hidrología del área, para así poder determinar lo que podría suceder con la producción de agua y sedimentos una vez que se dé una restauración del sitio (Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2016), todo esto con el fin de mantener los servicios ambientales que el sector brinda.

Una manera de predecir el comportamiento del ciclo hidrológico ante cambios de cobertura es mediante la utilización de modelos hidrológicos (Barrios y Urribarri, 2010; Pacheco, 2012; Bueno et al. 2014; Kavian et al. 2018). Estos modelos permiten simular la dinámica del movimiento y comportamiento del agua superficial, subsuperficial y subterránea dentro de una cuenca hidrográfica (Choque, 2015). Soil and Water Assessment Tool (SWAT), es un modelo físico, semi-distribuido a escala de cuencas utilizado mundialmente, que predice el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la producción de agua, sedimento y movimiento de sustancias químicas, entre otros (Neitsch, Williams, Arnold y Kiniry, 2011; Dile, Daggupati, George, Srinivasan y Arnold, 2016).

## **2. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **2.1 General**

Evaluar los cambios en la producción de agua y sedimento en el Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú, bajo diferentes escenarios de cambio de cobertura forestal.

### **2.2 Específicos**

Cuantificar la producción de agua y sedimento en el Sector Prusia bajo el escenario de cobertura forestal actual.

Determinar la producción de agua y sedimento en el Sector Prusia bajo escenarios de eliminación de las especies exóticas y su posterior regeneración natural.

### 3. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1 Parque Nacional Volcán Irazú

En 1955 se declararon como Parques Nacionales las áreas comprendidas por los cráteres del volcán Turrialba y el Volcán Irazú (Varela, 2013). Este último se encuentra en la provincia de Cartago y comprende un área de 2000 ha aproximadamente. El origen de su nombre se debe a un poblado indígena que existió en las faldas del volcán llamado Iztarú, palabra que para ellos significaba cerro del temblor y trueno, sin embargo a lo largo de los años el nombre se modificó hasta llegar al actual (Bermúdez y Conejo, 2008).

En la parte más alta presenta una vegetación característica del páramo pluvial subalpino, también hay parches de bosque pluvial montano. En cuanto a la fauna, es relativamente baja, esto por su elevación, deforestación y actividad volcánica (Sistema Nacional de Áreas de Conservación, 2013). Este parque comprende dos sectores: Cráteres y Prusia.

#### 3.2 Sector Prusia

En 1963 un sector aledaño al Parque Volcán Irazú sufrió una devastadora pérdida de su ecosistema a causa de la erupción del Volcán Irazú (Valera, 2013), la vegetación presente fue eliminada por la actividad volcánica, así que se procedió a restaurar el sitio, sembrando especies exótica y nativas. Esta labor estuvo a cargo de Defensa Civil, que era una División del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2016). En 1997 ese sector conocido como Sector Prusia se adicionó al Parque mediante el Decreto Ejecutivo N° 26945-MINAE. Su cobertura está comprendida por plantaciones de *Cupressus lusitanica* (ciprés), *Pinus* sp. (pino) y *Eucalyptus* sp. (eucalipto), así como de plantaciones de especies nativas tales como el *Quercus* sp. (roble), *Alnus* sp. (jaúl) y *Buddleja* sp. (salvia), el resto del área está ocupada por vegetación natural (Bermúdez y Conejo, 2008).

### 3.2.1 Restauración ecológica en el Sector Prusia

La restauración se define como toda actividad intencional mediante la cual se inicia o se acelera el proceso de recuperación de un ecosistema en situación de degradación (Sabogal, Besacier y McGuire, 2015). Con este proceso se espera que los beneficios puedan verse reflejados en un mejor funcionamiento de los ecosistemas y los servicios que proveen a las sociedades (Gómez-Ruíz y Lindig-Cisneros, 2017).

A pesar de los esfuerzos que se hicieron en los años 60 por recuperar el Sector Prusia, las plantaciones forestales no han permitido el desarrollo de la vegetación nativa debajo de ellas, que unido a la degradación aledaña por los cultivos, hacen que el ecosistema se vea afectado, debido a esto se formuló el proyecto de investigación llamado “Plan Piloto de Rehabilitación Ecológica del Sector Prusia del Parque Nacional Volcán Irazú” el cual pretende determinar la mejor alternativa para sustituir las especies exóticas encontradas en el sector por vegetación natural, con el fin de mantener los servicios ambientales que éste brinda (Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2016).

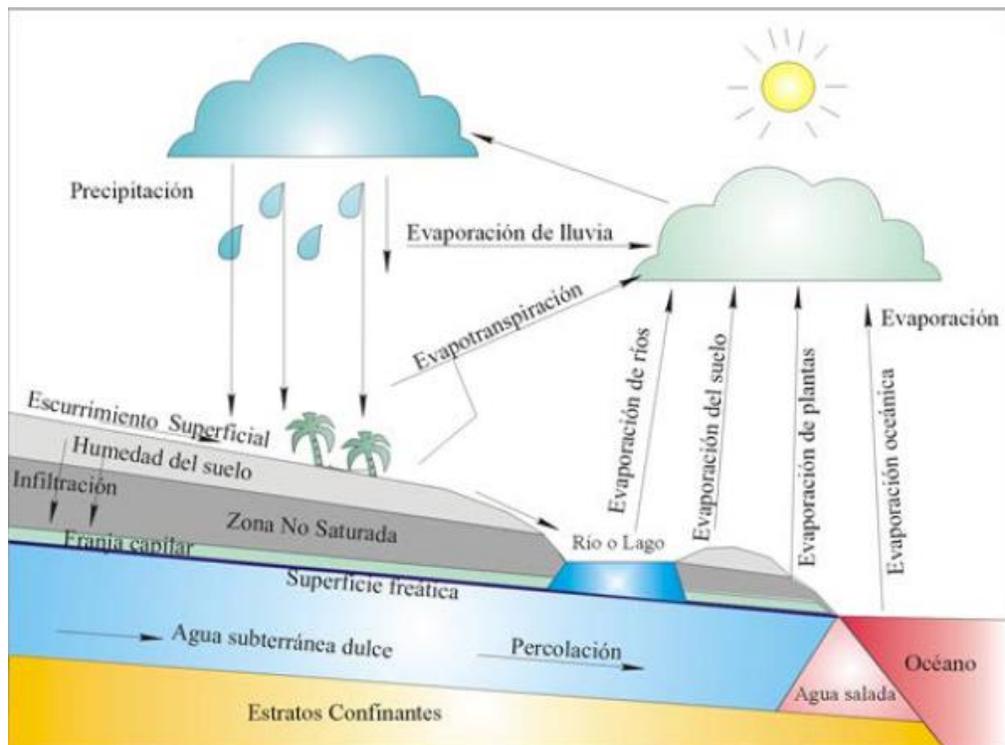
## 3.3 Ciclo hidrológico

### 3.3.1 El agua y su función

El agua es un elemento indispensable para la naturaleza, cada molécula de agua está constituida por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, está también constituida por una serie de minerales tales como, hierro, manganeso, materia orgánica, entre otros (Contreras et al. 2008). Además, es la encargada de la termorregulación, tiene una alta capacidad para disolver una gran cantidad de sustancias, ayuda en el transporte de nutrientes, entre otros (Carbajal y Gonzáles 2012).

### 3.3.2 Definición de ciclo hidrológico

Constituye todos los estados y formas del agua (sólido, líquido y gas), además de ser el proceso mediante el cual se realiza el abastecimiento de agua para las plantas, los animales y el ser humano (Maderey, 2005). El ciclo inicia cuando el agua acumulada en las nubes se condensa ya sea en forma de lluvia o nieve. El agua precipitada puede: evaporarse inmediatamente durante su caída, ser retenida o interceptada por la vegetación o por las superficies de edificios, carreteras, entre otros (Schulz y García, 2015), infiltrarse en el suelo y ser retenida como humedad (Díaz, Esteller, y López-Vera, 2005) o formar parte del flujo superficial o subsuperficial. El agua que se infiltra posteriormente se percola para recargar el agua subterránea y el agua que forma parte del flujo superficial o subsuperficial es escurrida hasta llegar a algún lago o mar, de esta manera el agua regresa a los cuerpos de agua y continúa con la evaporación y demás fases (López, 2016).



**Figura 1.** Esquema del ciclo hidrológico en la tierra

**Fuente:** (Fetter, 1988), citado por Schulz y García (2015).

### **3.4 Recurso hídrico**

El agua es un elemento indispensable para la vida (Mora, 2016). La Organización Meteorológica Mundial (2012) define recursos hídricos como “Recursos disponibles o potencialmente disponibles, en cantidad y calidad suficientes, en un lugar y en un período de tiempo dados, apropiados para satisfacer una demanda identificable”.

A partir de la disponibilidad del recurso hídrico, el ser humano puede hacer uso de los servicios que este brinda, como la extracción y distribución del agua para fines de consumo, para empleo en la agricultura y en la industria, además este recurso *in situ* se utiliza para la generación de energía hidroeléctrica, para el transporte mismo y actividades de pesca (Madroñero, 2006).

### **3.5 Balance hídrico**

Es el balance que existe entre la entrada de agua al medio (precipitación) y la salida de la misma (escorrentía, evapotranspiración, infiltración y cambios en el almacenamiento de agua en el suelo) (Urrutia, 2016; Mongua, 2017). El balance hídrico aparte de cuantificar los recursos disponibles y los flujos de agua puestos en juego en el ciclo hidrológico o en una fase del mismo, son útiles porque permiten establecer relaciones entre las variables hidrológicas (Díaz et al. 2005).

#### **3.5.1 Precipitación**

Se refiere a todas las formas de agua (líquido, sólido) que caen de la atmósfera a la tierra y que está contenida en las nubes (Chung-Hsiung, Xiaofan y Ming-Jen, 2007). El agua precipita cuando se vence la resistencia que oponen las nubes, con el fin de llegar a la superficie (Schulz y García, 2015).

### 3.5.2 Escorrentía

Se entiende por escorrentía al transporte de agua líquida a través de la superficie de la tierra. El exceso de agua en suelos saturados va a fluir hacia los ríos, lagos, pantanos o al océano. El agua subterránea puede interactuar con el flujo superficial si el nivel freático está cerca la superficie (Pagano, y Soroosh, 2002).

Dependiendo del tipo de escorrentía puede haber consecuencias tales como la erosión, ya que la escorrentía superficial muchas veces está asociada a fuertes lluvias. Por otro lado la escorrentía subterránea genera un aumento en el peso del agua del perfil del suelo, reduciendo la cohesión del mismo (Easton y Bock, 2015).

### 3.5.3 Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) es el proceso donde el agua es devuelta en forma de vapor a través de las plantas y de la evaporación de superficies de agua, a la atmósfera (Barquero, 2015). Se considera que es una de las principales pérdidas de agua que se produce en una cuenca, no es un fenómeno distinto a la evaporación y transpiración, más bien se refiere a la sumatoria de los dos procesos, y el término solo es aplicable al área que esté cubierta por vegetación (Schulz y García, 2015). Esta medida es útil tanto en la determinación del estrés hídrico de los cultivos como en la predicción de su rendimiento (Marini, Santamaría, Oricchio, Di Bella y Basualdo, 2017).

#### *Evapotranspiración potencial*

Se define evapotranspiración potencial como la máxima cantidad de agua capaz de ser perdida por una capa continua de vegetación que cubre todo el terreno, cuando la cantidad de agua suministrada al suelo es ilimitada (Segura-Castruita y Ortiz-Solorio, 2017). La evapotranspiración potencial se basa en el supuesto de un desarrollo vegetal óptimo y una capacidad de campo permanente completa (Díaz et al. 2005).

### *Evapotranspiración real*

Según Segura-Castruita y Ortiz-Solorio (2017) la evapotranspiración real se entiende como la cantidad de agua perdida por el complejo suelo-planta en las condiciones meteorológicas, edáficas y biológicas existentes. Se produce en las condiciones naturales de humedad, además cuando la humedad del suelo es elevada, puede llegar a ser igual que la potencial (Schulz y García, 2015).

#### 3.5.4 Infiltración

Es el proceso por el cual el agua penetra la superficie del suelo. La tasa de infiltración dependerá de la saturación del suelo, por lo que en suelos muy saturados, disminuye la tasa de infiltración y viceversa (Kumar, 2014). Las propiedades del suelo como el contenido de humedad, textura, densidad aparente, contenido de materia orgánica, permeabilidad, porosidad y la presencia de capas restrictivas en el suelo (Easton y Bock, 2015) hacen que la tasa de infiltración y la cantidad de agua que infiltra en el suelo varíen.

### **3.6 Erosión**

La erosión del suelo se refiere al desgaste que sufre la capa superior del suelo por las fuerzas físicas naturales del agua y del viento, esta puede acelerarse por la compactación del suelo, poca materia orgánica, pérdida de la estructura, drenaje interno pobre (Pimentel y Burgess, 2013), topografía (Brea y Balocchi, 2010), entre otros. Cuando los suelos tienen baja tasa de infiltración de agua, están sujetos a altas tasas de erosión, ya que va a generar una mayor escorrentía superficial y las partículas del suelo van a ser removidas (Ramírez y Rodríguez, 2015). Hay que tomar en cuenta que la erosión es menor cuando el suelo está cubierto por una capa vegetal ya que, disminuye los aportes superficiales de agua y aumenta los aportes subterráneos, en otras palabras opone una resistencia mecánica y desempeña una acción potente contra la erosión (Gopal, 2015), manteniendo la capa superior unida.

### **3.7 Sedimento**

La cantidad de sedimento entregado por una cuenca por unidad de tiempo se conoce como producción de sedimento (Andreazzini, Degiovanni, Spalletti e Irigoyen 2014). La sedimentación ocurre por la acción de la erosión hídrica, el suelo es desprendido por el golpe directo de las gotas de agua de lluvia y por la fricción del agua de escorrentía. El suelo desprendido es transportado por los flujos superficiales hasta los canales de drenaje, por los cuales es sacado de la cuenca o depositado en el cauce de estos canales (Mongua, 2017). Por otra parte, la producción de sedimento va a depender de varios factores tales como el clima y régimen de lluvias, el tipo y uso de suelo, el estado de la cobertura vegetal, la topografía (Ramírez y Rodríguez, 2015; Choque, 2015), entre otros.

### **3.8 Relación entre cobertura forestal y dinámica hídrica**

La mayoría del agua dulce mundial se proporciona a través de cuencas arboladas, por lo que la cobertura forestal tiene una alta relación con la dinámica hídrica, ya que se encarga de mantener una elevada calidad en el agua, de manera conjunta influye en la cantidad de agua disponible y regula el flujo de las aguas superficiales, además contribuye a la reducción de riegos relacionados como el desprendimiento de tierra, inundaciones y sequías (Blanco, 2017). También regulan la escorrentía, y por ende se reduce la afectación por erosión (Pimentel y Burgess, 2013). Sin embargo hay que tomar en cuenta que para que la vegetación forestal reduzca la erosión, se depende directamente de la altura y densidad de copa de los árboles y del sotobosque (Brea y Balocchi, 2010).

### **3.9 Relación entre cobertura forestal y sedimento**

Los bosques protegen muchos embalses y presas de la acumulación de sedimento (Blanco, 2017), por lo que se ha determinado que la cobertura y uso de suelo con presencia de bosque en áreas de pendientes elevadas reduce la erosión (Choque, 2015), evitando el deslave y la acumulación de sedimentos (Manson, 2004).

Los niveles de erosión y sedimento están en relación directa con el tipo y grado de cobertura vegetal que tiene el suelo (Fallas y Gutiérrez, 1992), si el suelo está descubierto es más probable que el sedimento sea arrastrado hasta las desembocaduras de los ríos y llegar hasta las costas, reduciendo la calidad del agua de los estuarios y del mar (Blanco, 2017).

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

Para poder analizar lo que sucede con los parámetros presentes en el ciclo hidrológico es necesario plasmarlo en un área de estudio, en este caso una cuenca hidrográfica, que se entiende como la unidad geográfica natural y funcional que estudia los procesos climáticos, edafológicos, geológicos y antrópicos sobre la cantidad y calidad del agua (Choque, 2015). También se define como un ecosistema, que según sea el caso, podría verse influida por la presencia del hombre y de sus actividades (Zaldívar, 2017).

### **3.11 Modelos hidrológicos**

La modelación hidrológica es una metodología basada en la simulación de sistemas físicos a través de modelos fundamentados en funciones matemáticas que permiten simular el caudal con base a datos propios de una cuenca (Bueno et al. 2014; Stehli, Weber y Vestena, 2014). Pueden simular parámetros específicos del proceso hidrológico (Pacheco, 2012), también predicen los impactos ambientales debidos a cambios de uso y manejo de la tierra (Barrios y Urribarri, 2010) y las afectaciones en la calidad y cantidad del agua (López, 2016), reduciendo costos y tiempos (Acosta y Kucharsky, 2012).

Los modelos hidrológicos se han utilizado para simular el impacto de plantaciones de bosque en la producción de agua (Buytaert, Celleri, De Bièvre e Iñiguez, 2006), los efectos del cambio de uso de tierras en la hidrología (Dos Santos, Laurent, Abe y Messner, 2018), impactos del cambio de uso de la tierra en cuanto a caudal y erosión (Pokhrel, 2018), además de modelaciones más específicas del proceso del ciclo

hidrológico como hidrofísica de suelos (Buytaert et al. 2002), escorrentía (Kavian et al. 2018) e infiltración (Harden y Scruggs, 2003), entre otros.

Algunos modelos hidrológicos son WEAP (Centro de Cambio Global, 2009), HEC-HMS (Pacheco, 2012), BQART, WBMsed, Pelletier's, PSIAC, FSM, SSY Index, WATEM-SEDEM, AGNPS, LISEM, PESERA (de Vente et al. 2013) y SWAT (Neitsch et al. 2011; Dile et al. 2016), entre otros.

### **3.12 Modelo SWAT**

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) por sus siglas en inglés, es una herramienta para la evaluación del suelo y del agua en el conjunto de una cuenca hidrográfica (Fernández, 2017). Fue desarrollada por el Dr. Jeff Arnold en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos con la Universidad de Texas en los años noventa (Neitsch et al. 2011; Urrutia, 2016).

Esta herramienta predice el impacto del manejo del terreno en la respuesta del agua, sedimentos y química (Bueno et al. 2014; Gómez, 2016). Modela procesos físicos relacionados con el movimiento del agua, de sedimentos, desarrollo de cosechas, ciclo de nutrientes, entre otros (Castañeda, 2016). Según Urrutia (2016), entre los beneficios del modelo es que se pueden simular cuencas no aforadas, también se puede cuantificar el impacto de prácticas de manejo, clima, vegetación, etc. La simulación se puede realizar sin invertir mucho tiempo y permite el estudio de impactos a largo plazo.

El modelo requiere información específica acerca del clima, suelos, topografía, vegetación, prácticas de planificación en la cuenca, etc (Gómez, 2016). Aquí, el balance hídrico constituye la fuerza impulsora detrás de todo lo que pasa dentro de la cuenca (Tamayo, 2017). El modelo divide la cuenca hidrográfica en subcuencas y cada una de ellas son divididas en unidades de respuesta hidrográfica, que consiste en áreas con propiedades homogéneas de suelo uso/cobertura de suelo y pendiente (Barquero, 2015; López, 2016).

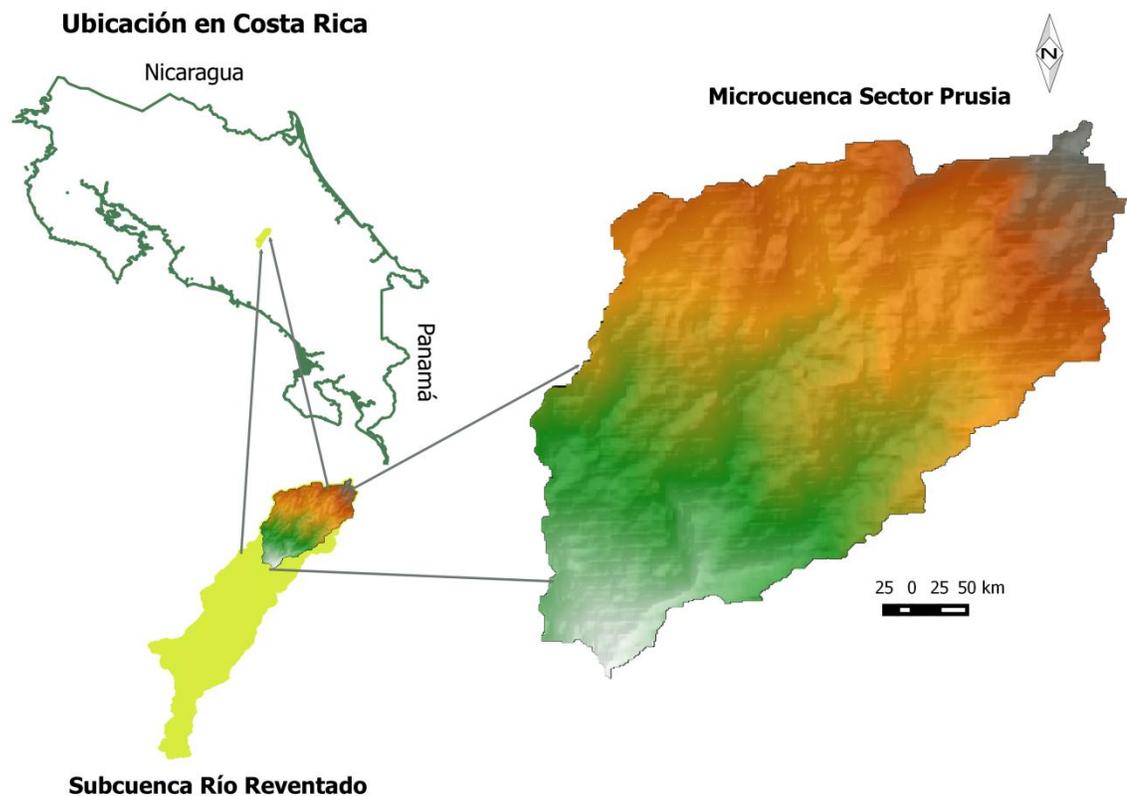
SWAT ha sido usado en aproximadamente 100 países y ha ayudado a comprender el complejo ecosistémico en cuanto a la disponibilidad y calidad del agua, cambio climático y problemas de producción agrícola en todo el mundo (Dile et al. 2016). La extensión de SWAT se puede encontrar en programas tales como ArcGIS (Reyes, 2013), sin embargo por el alto costo del programa ArcGIS y a que se ha dado un uso creciente de los programas de código abierto, para el año 2015 sale QSWAT, la extensión del programa QGIS (Carvajal, 2017), la cual es libre y sin costo.

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Área de estudio

El estudio se realizó en el Sector Prusia ubicado dentro del Parque Nacional Volcán Irazú (PNVI), aproximadamente a 19 km al norte de la ciudad de Cartago, Costa Rica. Se encuentra entre los 9°58'08 latitud Norte, 83°50'21 longitud Oeste (Padilla, 2017). Además del Sector Prusia, se incluyó parte del área de algunas comunidades vecinas como Potrero Cerrado, Llano Grande y San Juan de Chicué.

El área delimitada posee una extensión de 1 444 ha y es parte de la subcuenca del Río Reventado. Los ríos que atraviesan la subcuenca son río Reventado, Retes y Quebrada Pavas.



**Figura 2.** Ubicación de la subcuenca del Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú.

El Sector Prusia presenta una vegetación exótica con plantaciones de ciprés, pino y eucalipto, además de plantaciones nativas de roble, jaúl y salvia. También tiene bosque maduro en diferentes estadios de sucesión (Bermúdez y Conejo, 2008). La precipitación promedio anual es de 1 527,9 mm; la estación lluviosa se prolonga durante todo el año, con excepción de febrero y marzo y su temperatura promedio anual es de 14°C (Varela, 2013). Según Quesada (2007) hay dos zonas de vida, el bosque muy húmedo montano y bosque pluvial montano.

El área de la subcuenca que no corresponde al Sector Prusia está compuesta por potreros, caseríos, agricultura (fresa, papa cebolla, repollo), suelo descubierto, invernaderos, matorral y vegetación natural.

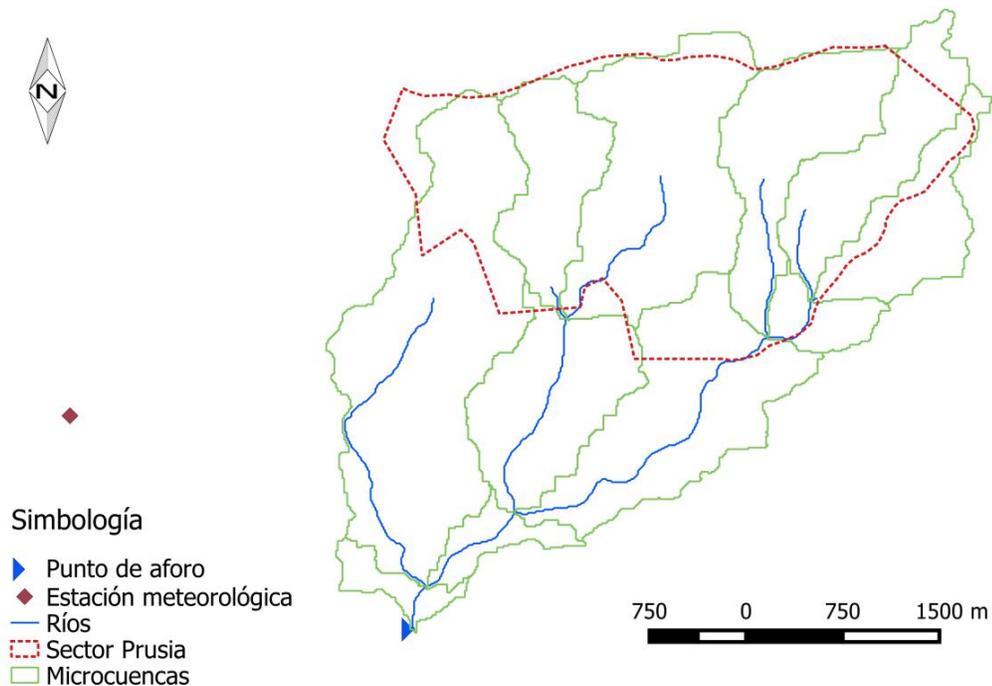
## **4.2 Línea base de la producción de agua y erosión**

En este estudio se utilizó la extensión QSWAT 1.5, versión de SWAT para el programa de sistemas de información geográfica QGIS 2.6.1 (Dile et al. 2016). Este modelo hace la simulación hidrológica en tres pasos:

### **4.2.1 Delimitación de la subcuenca.**

La subcuenca se delimitó con el delineador automático de QSWAT 1,5. Los insumos necesarios para poder delimitar la subcuenca fueron un MED, la red hídrica y un punto de aforo. Como no se contaba con un punto de aforo, se seleccionó como salida de la subcuenca un punto que abarcara todos los cauces que están en el Sector Prusia, esto para comprender la totalidad del sitio de estudio.

El MED que se empleó fue descargado del portal de la Alaska Satellite Facility, el cual es producto de la misión ALOS, la resolución espacial es de 12,5 m y está radiométricamente corregido (ASF, 2018). Como red hídrica se empleó la capa de ríos 1:50 000 que se encuentra en el Atlas Digital de Costa Rica 2014 (Fallas, 2014).



**Figura 3.** Delimitación de la subcuenca del Sector Prusia con la extensión QSWAT 1,5. Parque Nacional Volcán Prusia.

#### 4.2.2 Creación de las Unidades Hidrológicas de Respuesta.

Las Unidades Hidrológicas de Respuesta son áreas que comparten un uso de suelo, tipo de suelo y una misma categoría de pendiente (Dile et al. 2016). Para la creación de estas unidades se utilizaron capas en formato raster de tipos de suelo, uso del suelo y categorías de pendiente.

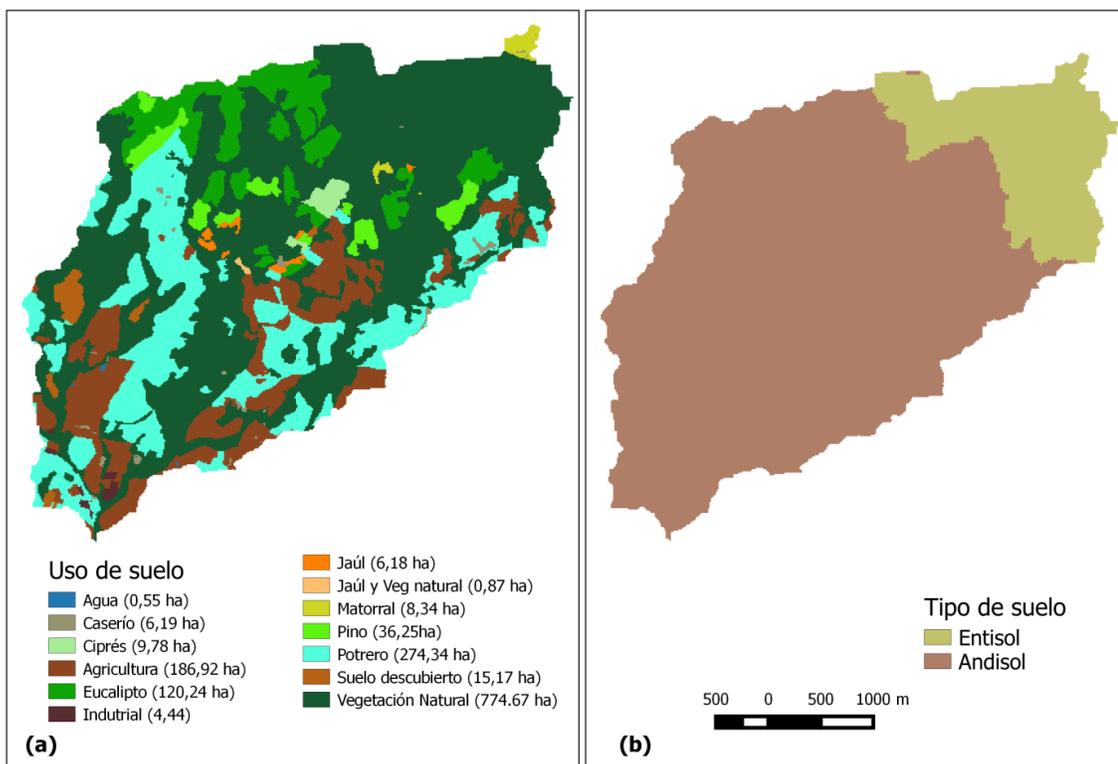
La información de suelos se obtuvo a partir de un mapa de suelos escala 1:200 000 suministrado por el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la UCR. Esta capa se rasterizó a una resolución de 12,5 m porque SWAT requiere que todas las capas raster tengan la misma resolución espacial.

Además de la capa de suelos, el modelo necesita información adicional de suelos, por lo que se creó una base de datos (cuadro 1), la información se tabuló con datos fisicoquímicos de los suelos presentes. La información que se requirió se muestra en el siguiente cuadro..

**Cuadro 1.** Parámetros fisicoquímicos de suelo requeridos por el modelo SWAT.

<b>Parámetro SWAT</b>	<b>Descripción</b>
HYDGRP	Grupo hidrológico de suelo
SOL_ZMX	Profundidad máxima del suelo con presencia de raíces
ANION_EXCL	Fracción de porosidad desde donde los aniones son excluidos
SOL_CRK	Potencial o máximo rompimiento del perfil de suelo expresado como fracción del total de volumen de suelo
SOL_Z	Profundidad de cada horizonte desde la superficie
SOL_BD	Densidad aparente de cada horizonte
SOL_AWC	Capacidad de disponibilidad de agua en cada horizonte
SOL_K	Conductividad hidráulica en cada horizonte
SOL_CBN	Contenido de carbono orgánico en cada horizonte
SOL_ALB	Albedo del suelo húmedo en cada horizonte
SOL_EC	Conductividad eléctrica en cada horizonte
USLE_K	Factor de erodabilidad del suelo para cada horizonte
CLAY	Porcentaje de arcilla por horizonte
SILT	Porcentaje de limo por horizonte
SAND	Porcentaje de arena por horizonte
ROCK	Porcentaje de rocas por horizonte
SOL_CAL	Contenido de carbonato de calcio por horizonte
SOL_PH	pH para cada horizonte

Fuente: Carvajal (2017).



**Figura 4.** Uso de suelo actual y (b) tipo de suelo para la subcuenca, Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú.

Se caracterizaron dos tipos de suelo en la subcuenca. Para obtener los parámetros de profundidad, porcentaje de rocas, color del suelo, textura y pH por horizonte, se utilizó información suministrada por el CIA, el Atlas Digital de Costa Rica y Padilla (2017) en su estudio de suelos del Sector Prusia. La información se analizó por tipo de suelo.

La densidad aparente, conductividad hidráulica y disponibilidad de agua fueron determinadas con el programa SPAW Hydrology (Saxton, 2006), a partir de los datos de textura y porcentaje de materia orgánica. Por otro lado el grupo hidrológico de suelo se calculó con el programa NUMCUR (Oasificación, 2018) utilizando datos de textura. El contenido de carbono orgánico se calculó a partir de la materia orgánica, al igual que el albedo del suelo.

Para el caso de albedo se utilizó la siguiente fórmula:

$$Albedo = \frac{0,6}{\exp(0,4) * MO}$$

Asimismo, el factor K de erodabilidad del suelo se estimó con la siguiente ecuación:

$$K_{usle} = \frac{0,0021 * M^{1,14} * (12 - OM) + 3,25 * (C_{soilstr} - 2) + 2,5 * (C_{perm} - 3)}{100}$$

Donde:

$K_{usle}$  = factor de erodabilidad del suelo

$M$  = parámetro del tamaño de las partículas

$OM$  = porcentaje de materia orgánica

$C_{soilstr}$  = código de la estructura de suelo en la clasificación del suelo

$C_{perm}$  = perfil de las clases de permeabilidad.

Los datos de uso de suelo se obtuvieron a partir de la creación de la capa. Para ello se hizo una fotointerpretación del área con ayuda de Google Earth, a una escala 1:5000 en el programa de QGIS 2.6.1. Los usos de suelo fueron reclasificados según la nomenclatura de usos de suelo de SWAT. La digitalización fue verificada en campo a partir de puntos tomados en cada polígono. El mapa se rasterizó a una resolución de 12,5 metros. Por último, para obtener las pendientes de la subcuenca, se ingresaron al modelo las categorías de pendientes utilizando la clasificación de FAO (cuadro 2).

**Cuadro 2.** Pendientes de la subcuenca del Sector Prusia, 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

#### 4.2.3 Simulación

En este último paso se hizo la simulación, donde se ingresaron los datos climáticos diarios del periodo de estudio. Primero se creó la base de datos diaria con las variables de precipitación y temperatura máxima y mínima. Los datos diarios de esas variables se obtuvieron de la estación meteorológica ubicada en Llano Grande. Se utilizaron los registros que constituyen el periodo del 2005 al 2016.

Para la estimación de la producción de agua el modelo SWAT simula el ciclo hidrológico basándose en la ecuación de balance de agua (Neitsch et al. 2011).

$$SW_t = SW_o + \sum_{t=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Donde:

$SW_t$  = contenido final de agua en el suelo (mm)

$SW_o$  = contenido inicial de agua en el suelo diario (mm)

t = tiempo en días

$R_{day}$  = precipitación diaria (mm)

$Q_{surf}$  = escorrentía superficial diaria (mm)

$E_a$  = evapotranspiración diaria (mm)

$W_{seep}$  = cantidad de agua que se infiltra en el suelo diariamente (mm)

$Q_{gw}$  = flujo de retorno diario (mm)

La producción de sedimento fue calculada con la ecuación universal de pérdida de suelos modificada (MUSLE) por sus siglas en inglés (Da Silva, Silva y De Souza, 2016).

$$Y = 11,8 (Q_{sup} + q_{pico} + \text{Área}_{hru})^{0,56} * K * LS * C * P * CFRG$$

Donde:

$Y$  = producción de sedimento después de un evento de lluvia (ton).

$Q_{sup}$  = esorrentía superficial (mm)

$q_{pico}$  = caudal pico ( $m^3 s^{-1}$ )

$\text{Área}_{hru}$  = área de la unidad de respuesta hidrológica (ha)

$K$  = factor de erodabilidad del suelo ( $(0,013 \text{ ton}^{-1} m^2 h) / (m^3 \text{ ton cm})$ )

$LS$  = factor topográfico (adimensional)

$C$  = factor de uso del suelo (adimensional)

$P$  = factor de prácticas de conservación de suelos (adimensional)

$CFRG$  = factor de fragmentación de la tierra (adimensional)

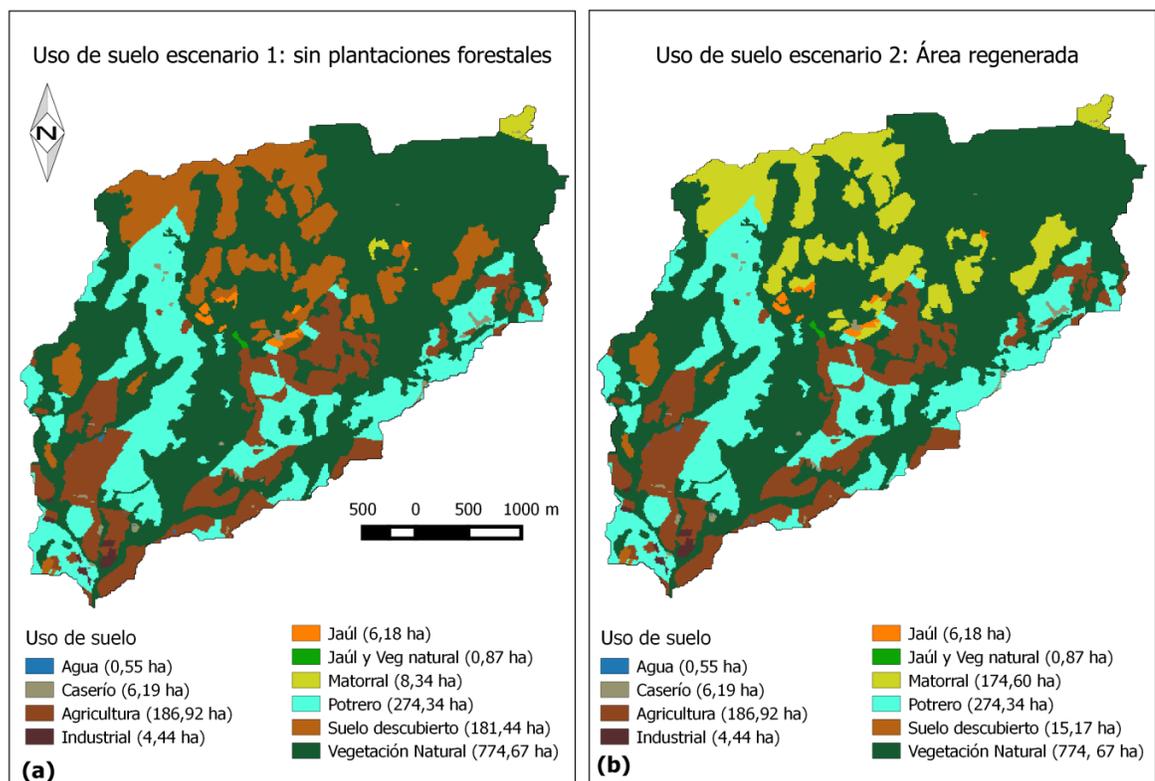
### 4.3 Escenarios de cambio de cobertura

Se simuló la remoción de las plantaciones forestales para evaluar los impactos que estos cambios producirían sobre la producción de agua y sedimento. Se evaluaron los siguientes escenarios:

Escenario 1 aprovechamiento de las plantaciones forestales: En este escenario las plantaciones forestales que se encuentran actualmente en el Sector Prusia serán eliminadas y esa área quedará con el suelo descubierto.

Escenario 2 área regenerada: A partir del escenario anterior se crea un nuevo escenario donde el suelo descubierto se regenerará y será sustituido por un matorral.

En ambos escenarios solo se modificó la capa de uso de suelo, las demás variables se mantuvieron constantes. Para cada escenario se volvió a correr el modelo y se obtuvo una nueva simulación de producción de agua y sedimento.



**Figura 5.** Uso de suelo para los dos escenarios de cambio de cobertura en la subcuenca: (a) escenario 1 sin plantaciones forestales, (b) escenario 2 área regenerada. Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú.

#### **4.4 Periodo de calentamiento**

El modelo SWAT necesita un periodo de calentamiento o equilibrio, donde se utilizan los datos de clima de al menos los primeros 3 años para que el modelo vaya reconociendo y verificando los datos. En este caso la simulación de producción de agua y sedimento se empieza a contabilizar después de esos tres años empleados para el calentamiento. Para este estudio se realizó el calentamiento con el periodo 2005-2007.

#### **4.5 Variables por defecto a modificar**

Para el cálculo de evapotranspiración potencial se utilizó la fórmula de Hargreaves, ya que en este caso solo se disponen de los datos de precipitación y temperatura. Otro parámetro que se modificó fue el de almacenamiento inicial de agua en el suelo (FFCB), que es una fracción del contenido a capacidad de campo y varía entre 0 y 1, donde 0 significa suelos totalmente secos y 1 un suelo anegado. Se empleó un valor de 0,6 (Carvajal, 2017).

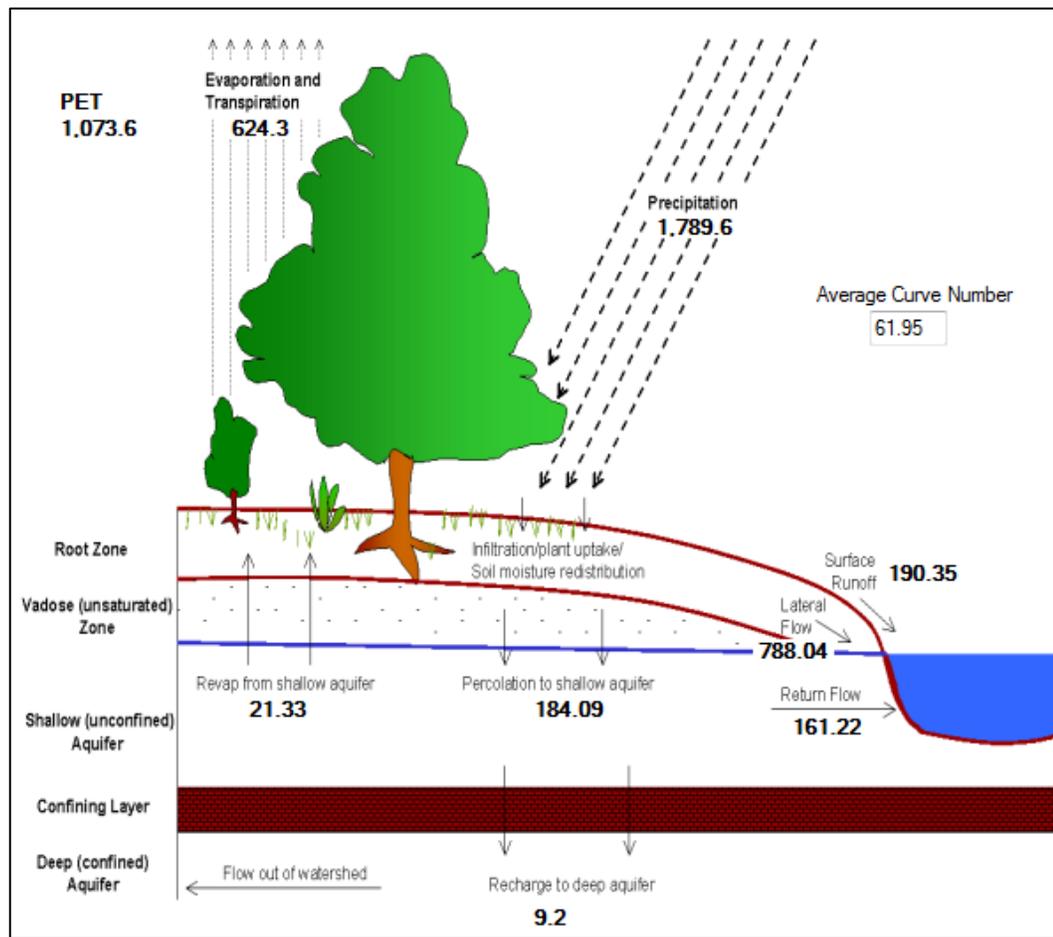
En este estudio no se pudo calibrar el modelo debido a que no se contaba con información de datos observados de caudal y sedimento, sin embargo (Di Luzio, Arnold y Srinivasan, 2005; Urrutia, 2016) señalan que SWAT brinda resultados coherentes en la simulación aún sin calibrar.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Producción de agua, caudal y sedimento actual.

Para la simulación del escenario actual, el modelo QSWAT subdividió espacialmente la subcuenca en 11 microcuencas y 349 HRU's. En la figura 6 se observan los componentes del balance hídrico donde, la precipitación media de la subcuenca para el periodo de estudio es de 1 789,6 mm y la evapotranspiración real es de 624,3 mm. Por otro lado la escorrentía superficial (190,35 mm) representa el 11% de la precipitación ocurrida, el flujo lateral (788,04 mm) representa el 44% siendo el componente que más aporta a la producción de agua, esto podría suceder debido a que la subcuenca presenta una pendiente promedio de 32% y según FAO (2009) se clasifican como fuertemente onduladas, esto hace que el agua escurra con mayor facilidad. A pesar de que los suelos en su mayoría son de origen andisol, suelos permeables, porosos y con alta capacidad de retención de humedad (McDaniel, Lowe, Arnalds y Ping, 2012), en este caso es la pendiente la que ocasiona una mayor escorrentía. Así mismo la percolación (184,09 mm) y el flujo de retorno (161,22 mm) representan el 10% y 9% de la precipitación (figura 6).

La producción de agua está representada por la escorrentía superficial, flujo lateral y por el flujo de retorno. El valor de producción de agua promedio anual estimada para la subcuenca fue de 1 139,61 mm, lo cual representa el 63,7% de la precipitación total. Según Carvallo (2006) y Gopal (2015), para que un escenario se considere apto o conveniente, se debe generar la mayor cantidad de agua con menor proporción de escurrimiento superficial y mayor producción de flujo base, con el fin de que la erosión del suelo sea mínima. En este caso la escorrentía superficial y lateral son las que más aportan en la producción de agua y el flujo de retorno aporta menos cantidad, situación que podría tener efectos negativos sobre la erosión del suelo (Easton y Bock, 2015).

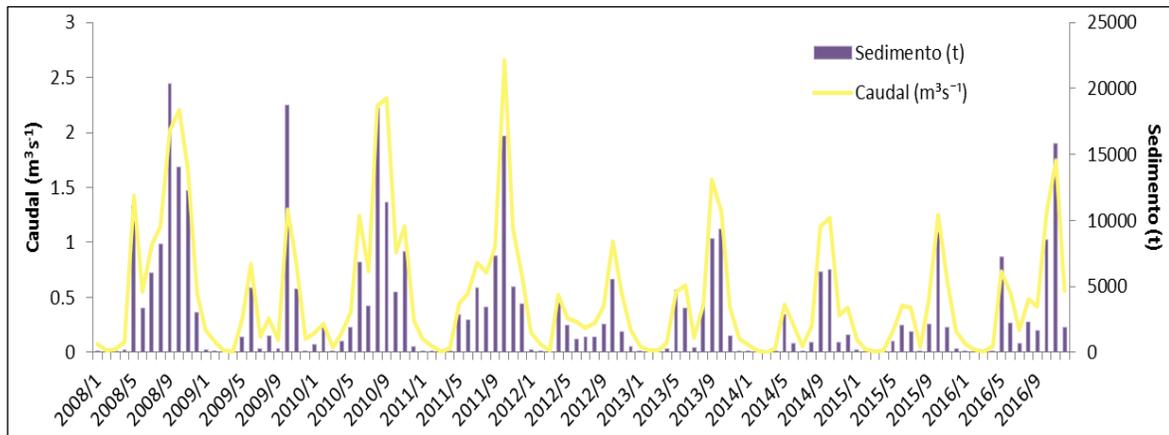


**Figura 6.** Componentes del balance hídrico actual simulados por QSWAT, subcuenca del Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú.

### 5.1.1 Distribución temporal

Se estimó el caudal medio anual en el punto de aforo ubicado a las afueras de Sector Prusia, el cual fue de  $(6,28 \text{ m}^3\text{s}^{-1})$ . En cuanto a la producción de sedimento, se obtuvo un valor promedio anual de  $(38\ 000 \text{ t})$ . Los valores más altos de producción de caudal y sedimento se observan en los meses de septiembre a noviembre, mientras que los valores más bajos se observan en los meses de enero a abril, el mes con mayor producción de caudal y sedimento para todos los años de estudio es octubre y su pico máximo de producción fue en el año 2011, seguido del año 2010 y 2008 (Figura 7).

Se observa que ambas variables siguen una misma tendencia, esto debido a que el caudal es el medio por donde son transportados los sedimentos (Carvajal, 2017). Por ello, entre mayor sea el caudal mayor va a ser el transporte de sedimentos y viceversa. Un estudio realizado por Choque (2015) demostró que la producción de caudal y sedimento está directamente relacionada con la precipitación, ya que los meses con precipitaciones altas son los meses con mayor producción de estas variables.



**Figura 7.** Caudal medio mensual y carga de sedimentos mensuales a la salida de la subcuenca del Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú.

### 5.1.2 Distribución espacial

En el cuadro 3 se observa el uso de suelo por microcuenca. Para el caso de la microcuenca 1 el área que la compone está cubierta mayormente por vegetación natural, potrero, cultivo y en este caso es donde se concentra la mayor cantidad de plantaciones forestales (45% con respecto al total de las plantaciones). Las microcuencas 2 y 3 ubicadas en la parte alta, están compuestas en mayor proporción por vegetación natural, plantaciones forestales (15% con respecto al total de las plantaciones) y matorral. La subcuenca 4 tiene un área cubierta por vegetación natural, y es la segunda microcuenca con mayor cantidad de plantaciones forestales (22% con respecto al total de las plantaciones). En el cuadro 4 se observa que las microcuencas 1, 2, 3 y 6 presentan una combinación de los dos tipos de suelo,

además que las pendientes más altas se encuentran en las microcuencas 1, 2 y 3 y las más bajas en las 5, 7 y 11.

**Cuadro 3.** Cobertura por microcuenca, Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú.

Microcuenca	Área (Ha)	Cobertura (ha)										
		Agua	Caserío	Plantaciones	Cultivo	Invernadero	Jaúl	Jaúl y Veg	Matorral	Potrero	Suelo desc	Veg Natural
1	229,33	0,00	0,70	74,44	6,2	0,00	3,30	0,87	0,00	5,36	0,69	137,65
2	137,43	0,00	0,05	8,81	4,22	0,00	0,00	0,00	1,75	0,00	0,00	122,6
3	115,07	0,00	0,17	16,88	0,00	0,00	0,40	0,00	6,57	0,00	0,00	91,07
4	97,10	0,00	0,25	37,23	0,52	0,00	2,48	0,00	0,00	8,69	0,00	47,95
5	345,06	0,37	1,45	24,39	61,76	2,34	0,00	0,00	0,00	107,18	12,91	134,65
6	93,82	0,00	1,36	3,56	12,42	0,00	0,00	0,00	0,00	22,31	0,00	54,17
7	35,69	0,00	0,08	0,00	1,89	0,00	0,00	0,00	0,00	12,11	0,00	21,61
8	195,38	0,05	1,45	0,93	65,17	0,00	0,00	0,00	0,00	58,48	0,00	69,29
9	138,34	0,03	0,16	0,00	16,76	0,00	0,00	0,00	0,00	42,12	0,00	79,26
10	31,61	0,12	0,53	0,00	10,81	1,16	0,00	0,00	0,00	6,41	0,00	12,58
11	25,09	0,00	0,03	0,00	7,03	0,91	0,00	0,00	0,00	11,58	1,50	4,05

**Cuadro 4.** Tipo de suelo y pendiente media por microcuenca, Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú.

Microcuenca	Área (ha)	Tipo de suelo (ha)		Pendiente media
		ENT	AND	
1	229,33	26,48	202,85	35,70
2	137,43	70,76	66,67	44,50
3	115,07	74,79	40,28	36,80
4	97,10	0,00	97,10	34,50
5	345,06	0,00	345,06	28,40
6	93,82	70,92	22,91	33,60
7	35,69	0,00	35,69	28,60
8	195,38	0,00	195,38	29,40
9	138,34	0,00	138,34	32,70
10	31,61	0,00	31,61	29,30
11	25,09	0,00	25,09	21,80

La mayor producción de agua ocurre en las microcuencas 2, 3 y 6, donde casi toda el área está cubierta por vegetación arbórea. Se puede observar que en estas microcuencas la escorrentía superficial disminuye su aporte (Figura 8), Carvallo (2006) encontró que las áreas cubiertas por vegetación arbórea tienden a disminuir el escurrimiento superficial, lo que provoca una baja erosión del suelo. El flujo lateral para este caso aporta los valores más altos de agua, esto podría deberse a que en esta área las pendientes son muy fuertes y además acompañado de suelos entisoles, los cuales tienen una profundidad efectiva muy baja porque presentan niveles freáticos superficiales y saturación permanente de agua en algunas ocasiones (Elizondo, 2015), hacen que el agua escurra por la capa subsuperficial del suelo en mayor proporción. A pesar de que la cobertura principal es bosque la capacidad de infiltración y retención de agua va a disminuir producto de los suelos saturados (Kumar, 2014).

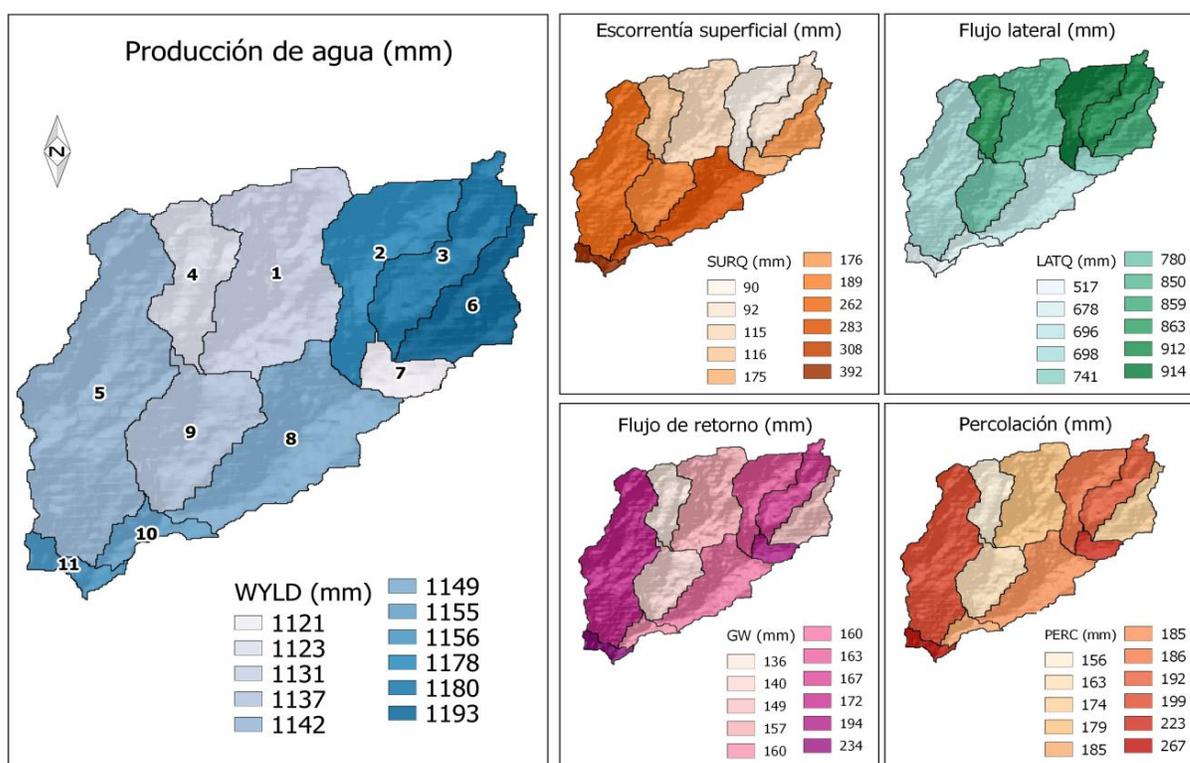
En las microcuencas 10 y 11 la producción de agua es menor, producto de la disminución del flujo lateral. Choque (2015) encontró que el área con agricultura y pastos presentó la menor producción de agua. En este caso la escorrentía superficial aporta sus máximos valores, lo que puede deberse a la cobertura que existe, ya que los suelos con cultivos y potrero tienden a aumentar la escorrentía superficial, esto porque la capacidad de retención de agua de esa vegetación es muy poca (Hernández, 2015; Urrutia, 2016). De manera contraria sucede con el flujo lateral, ya que disminuye su aporte de agua siendo sus valores los mínimos. Una explicación a esto es que, en áreas con pendientes moderadamente onduladas, la infiltración y la humedad del suelo son mayores, la escorrentía disminuye y hay un mayor aporte de agua subterránea, ya que controla el flujo sobre la pendiente (Campos, 1998; Sevilla, Comerga y Silva, 2009). Además los suelos de origen andisol son suelos gruesos, con una buena capacidad de drenaje y una alta retención de humedad (McDaniel et al. 2012), lo que acompañado a pendientes moderadas hace que exista un aumento en el aporte de agua por parte del flujo base y una disminución por parte del flujo lateral. Para el caso de las microcuencas 5 y 8 sucede un comportamiento muy

similar a las microcuencas anteriores, sin embargo lo que las difiere en cantidad de agua disponible es que en esta área hay mayor proporción de cobertura boscosa, por lo que la pérdida por evapotranspiración y retención de agua en el suelo puede ser mayor (Carvallo, 2006; Choque, 2015).

Las microcuencas 1 y 9 tienen menor producción de agua, producto de la disminución de la escorrentía superficial, lateral y flujo de retorno. En la microcuenca 1 es donde se encuentra la mayor área de plantaciones forestales, por lo que dicha cobertura podría estar influyendo en los componentes de producción de agua. Según FAO (1987) las plantaciones de eucalipto requieren valores elevados de agua y nutrientes, sin embargo Villegas (2004) menciona que los árboles de eucalipto lo que hacen es intervenir en la cantidad de agua que se infiltra y la que se va por escorrentía. En este caso la disminución en la producción de agua podría deberse a un aumento de los requerimientos de agua de las plantaciones de eucalipto. Padilla (2017) en su estudio edafológico realizado en el Sector Prusia encontró que al hacer análisis de hidrofobicidad (repelencia de agua en el suelo), el área de eucalipto presentó los valores más altos, en comparación con las plantaciones de pino y ciprés, lo que podría relacionarse a un aumento en la escorrentía superficial, sin embargo en este caso es uno de los componentes que menor aporta a la producción de agua.

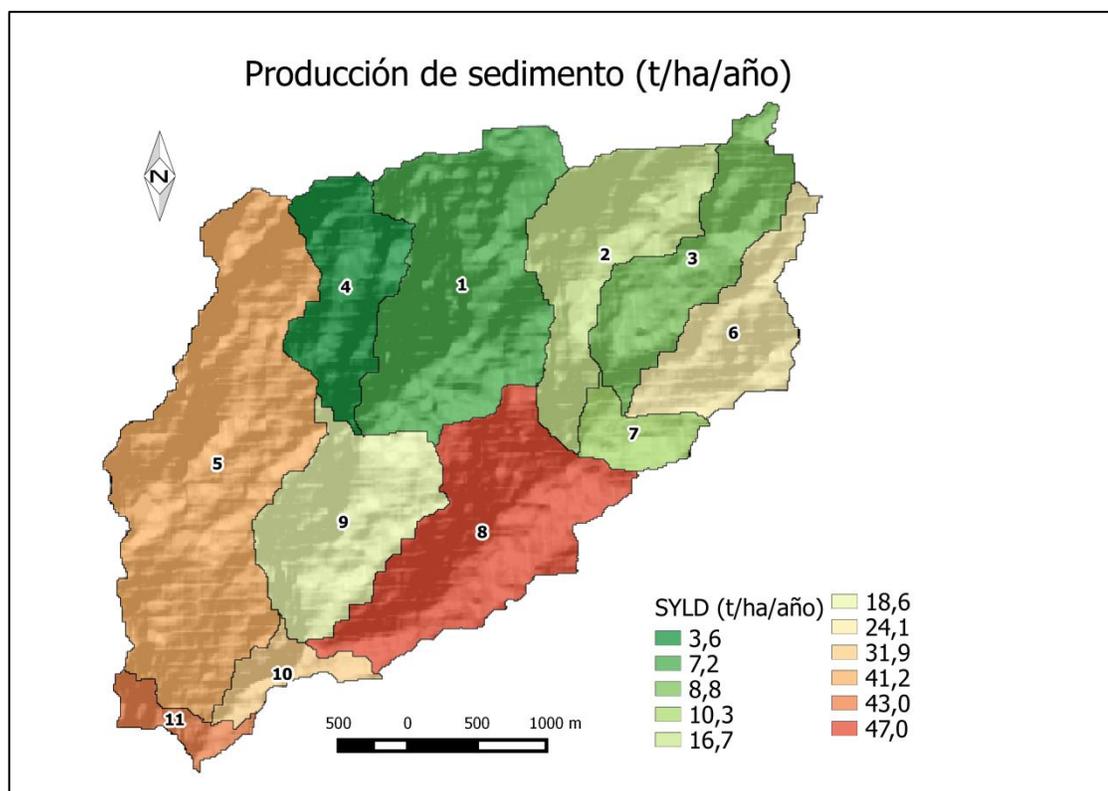
Por último las microcuencas 4 y 7 son las que poseen menos producción de agua. Para la microcuenca 4 donde existe un valor significativo de plantaciones forestales, los componentes de escorrentía superficial y flujo de retorno disminuyen notoriamente, situación similar a la ocurrida en la microcuenca 1. La pendiente media para la microcuenca 7 es muy baja y aunado a una proporción alta de vegetación natural, hacen que la infiltración sea alta y la escorrentía superficial y flujo lateral baja.

En la figura 8 también se observa que el flujo de retorno y la percolación presentan una distribución espacial muy similar a lo largo de toda la subcuenca ya que, el flujo de retorno deriva de la percolación (Carvajal, 2017). Por otro lado, según (Carvalho, 2006) los cambios en aumento y disminución de los componentes involucrados en la producción de agua son ocasionados por el tipo de suelo, la cobertura y la pendiente. Además, para cada microcuenca el flujo lateral es el que genera el mayor aporte de agua.



**Figura 8.** Producción de agua media anual y sus componentes en la subcuenca del Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú.

Por otro lado, se estimó la producción de sedimento promedio por hectárea para la subcuenca. Se registró mayor cantidad de aporte de sedimento en microcuencas de la parte baja, asimismo la menor cantidad se produce en la parte alta de la subcuenca (figura 9). Se observa que en las microcuencas donde existe mayor cantidad de suelo cubierto por pastos, suelo descubierto y agricultura son las que presentan mayor cantidad de sedimento y las microcuencas que presentan en su mayoría vegetación natural y plantaciones forestales son las que producen menos cantidad de sedimento. Ramírez y Rodríguez (2015), en su estudio de estimación de sedimento a partir de cambios de cobertura se valoró que las subcuencas con mayor aporte de sedimento son aquellas constituidas principalmente por cobertura agrícola y tierras descubiertas. Por otra parte Carvallo (2006) encontró que las áreas cubiertas por bosque presentan los valores más bajos de producción de sedimento.



**Figura 9.** Producción de sedimento para cada microcuenca en toneladas por hectárea por año, para el Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú.

## 5.2 Producción de agua, caudal y sedimento futuro, a partir de cambios de cobertura.

En el cuadro 5 se presentan los valores de evapotranspiración, escorrentía, flujo de retorno e infiltración para los escenarios de cambio de cobertura, además de los valores estimados para el uso de suelo actual. De igual manera que el escenario actual, el flujo lateral es el que más agua aporta. Se puede observar que, cuando se eliminan las plantaciones forestales (escenario 1), hay un aumento en la escorrentía superficial de un 40,14%, a su vez, se muestra un decrecimiento en los componentes de evapotranspiración real, flujo lateral, flujo de retorno e infiltración de un 2,95%, 6,35% 4,76% y 4,41% respectivamente. Urrutia (2016) evidencia que cuando existen procesos de deforestación en un área, los valores de escorrentía superficial sufren un aumento y los valores de evapotranspiración, flujo lateral e infiltración tienden a disminuir, situación similar a la obtenida en este estudio. Bueno et al (2014) señalan que el impacto negativo de los cambios de uso de suelo se manifiestan con una mayor pérdida de suelo, un aumento en la escorrentía y por lo tanto un aumento en las inundaciones.

**Cuadro 5.** Componentes del balance hídrico para diferentes escenarios de cambio de uso del suelo.

Componentes (mm)	Escenarios de uso de suelo			Cambio (%) Escenario 1	Cambio (%) Escenario 2
	Sin plantaciones forestales		Área regenerada		
	Actual				
Evapotranspiración real	624,30	605,90	614,70	-2,95	1,45
Escorrentía superficial	190,35	266,75	195,15	40,14	-26,84
flujo lateral	788,04	738,01	787,58	-6,35	6,72
Flujo de retorno	161,22	153,55	165,36	-4,76	7,69
Infiltración	184,09	175,98	189,07	-4,41	7,44

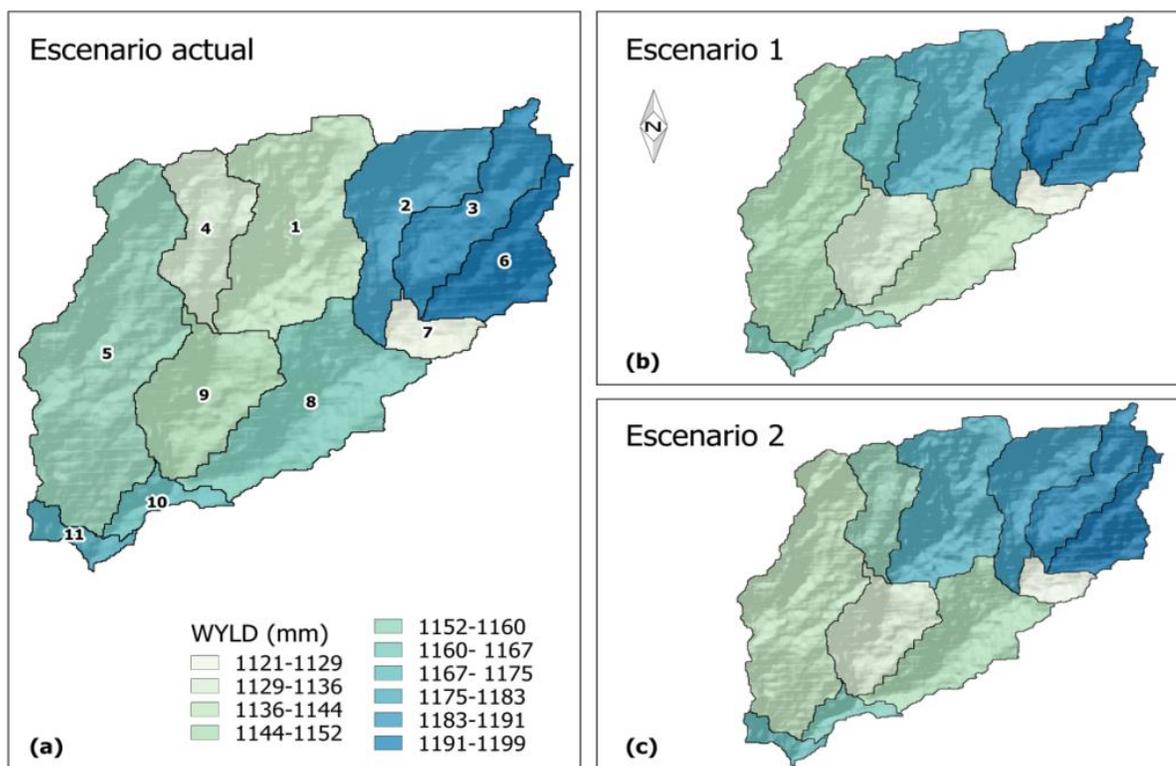
En el escenario 2, la escorrentía superficial decrece un 26,84%, siendo esta variable la que mayor cambio presenta. Por otra parte, la evapotranspiración real, flujo lateral, flujo de retorno e infiltración aumentan. Yu et al. (2018) encontraron que al sustituir pastos por bosque la escorrentía superficial disminuye, debido a que hay una mayor retención de humedad, además también encontraron que los valores de evapotranspiración real y flujo lateral aumentan. En este caso el cambio de cobertura es de suelo descubierto a matorral, sin embargo los suelos descubiertos tiene un comportamiento similar a los pastos, ya que ambos tienen una baja capacidad de retención de humedad (Hernández, 2015). No obstante, para que exista un aumento o disminución en los componentes del balance hídrico ante cambios de cobertura es necesario evaluar la calidad y tipo de vegetación (Bueno et al. 2014).

La producción de agua (cuadro 6), mostró un aumento de 1,57% para el escenario 1 con respecto al escenario actual, pero el escenario 2 tuvo un descenso de 0,86% con respecto al escenario 1. Este aumento se debe al aporte de la escorrentía superficial producto de la eliminación de las plantaciones forestales. En el caso del caudal, este muestra un aumento de 1,59% cuando se eliminan las plantaciones forestales pero un descenso cuando esas áreas empiezan a regenerar. La producción de sedimento es similar, un aumento del 214% para el primer escenario con respecto al actual y un descenso en el segundo escenario de 65% con respecto al escenario 1, esto porque los suelos descubiertos aportan mayor porcentaje de sedimento a la subcuenca (Ramírez y Rodríguez, 2015). López (2016), encontró que cuando se hace una sustitución de vegetación arbórea por pastizales la producción de agua y caudal medio anual aumenta.

**Cuadro 6.** Producción de agua, caudal y sedimento medio anual para cada escenario de cambio de uso del suelo.

Variables de la subcuenca	Escenarios de uso de suelo			Cambio % escenario 1	Cambio % escenario 2
	Actual	Escenario 1	Escenario 2		
Producción de agua (mm)	1 140	1 158	1 148	1,57	-0,86
Producción de caudal (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	6,28	6,38	6,33	1,59	-0,78
Producción de sedimento (t)	38 000	119 547	40 703	214	-65

A nivel de microcuenca el cambio en la producción de agua se da en las microcuencas afectadas por el cambio de cobertura, siendo la 1 y 4 las de mayor variación en la producción de agua (Figura 10b y 10c), esto debido a que hay una mayor área cubierta por plantaciones forestales. Para el escenario 1 la producción de agua en esas microcuencas aumenta en un 6% y 5% respectivamente, este aumento podría deberse a que las pérdidas por evapotranspiración y retención de agua en el suelo disminuyen, lo que provoca un mayor aporte de agua por escorrentía (López, 2016). Para el caso donde el área eliminada empieza a regenerar (escenario 2) la producción de agua para las microcuencas 1 y 4 disminuyen en 2% y 3% (cuadro 7).

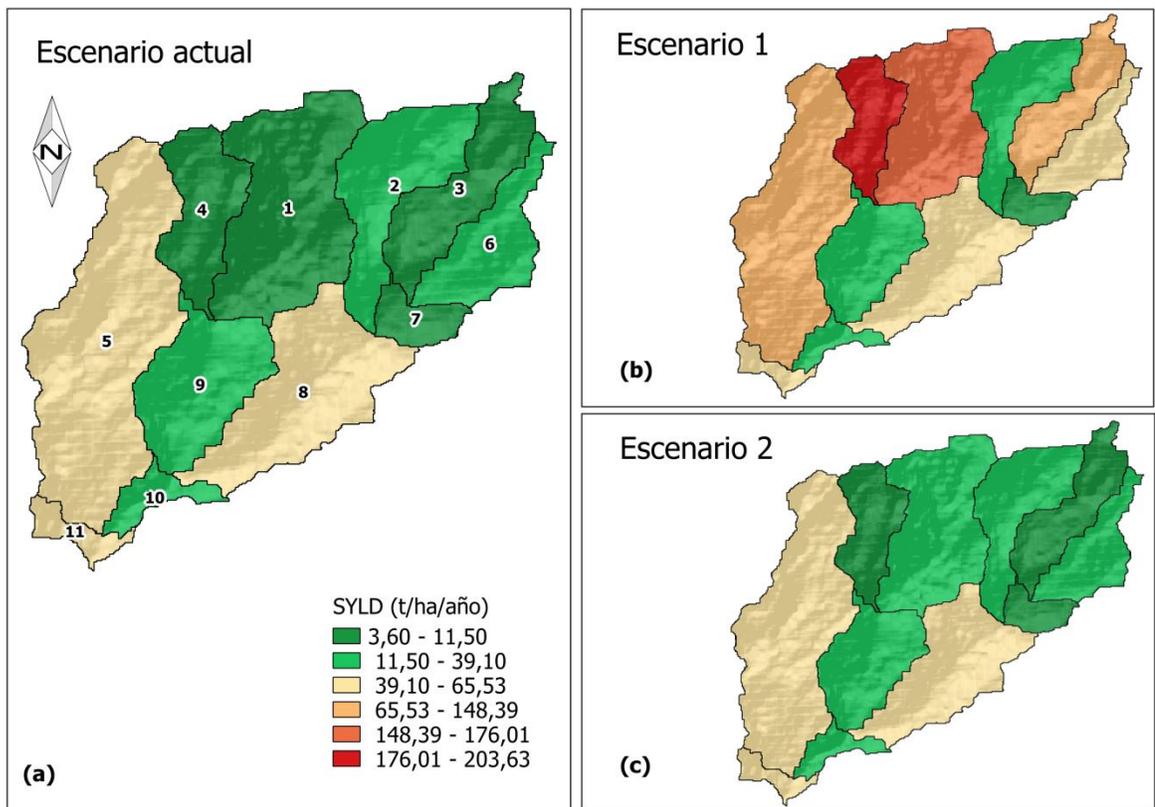


**Figura 10.** Producción de agua promedio anual para cada escenario: (a) escenario actual, (b) sin cobertura forestal, (c) con área regenerada, para el Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú.

**Cuadro 7.** Producción de agua promedio anual por microcuenca, para cada escenario de cambio de uso del suelo.

Microcuencas	Escenarios de uso de suelo (mm)			Cambio % escenario 1	Cambio % escenario 2
	Escenario actual	Escenario 1	Escenario 2		
1	1131	1186	1159	4,86	-2,28
2	1178	1188	1183	0,85	-0,42
3	1180	1199	1187	1,61	-1,00
4	1123	1186	1153	5,61	-2,78
5	1142	1153	1147	0,96	-0,52
6	1193	1197	1194	0,34	-0,25
7	1121	1121	1121	0,00	0,00
8	1148	1149	1149	0,09	0,00
9	1137	1137	1137	0,00	0,00
10	1155	1155	1155	0,00	0,00
11	1156	1156	1156	0,00	0,00

Existe un cambio en la producción de sedimento por microcuenca a partir de los cambios de cobertura. Para el escenario 1 (figura 11b) la mayor producción de sedimento ocurre en las microcuencas 1 y 4 y en el escenario 2 (figura 11c) la menor concentración de sedimento se da en esas microcuencas. Mongua (2017), encontró que en áreas descubiertas o degradadas la cantidad de sedimento producido es mucho mayor en comparación con áreas cubiertas por vegetación. Esto evidencia que la cobertura vegetal cumple un papel importante en la regulación de la erosión del suelo, y por ende en la regulación de la producción de sedimento (Gopal, 2015).



**Figura 11.** Producción de sedimento promedio anual para cada escenario: (a) escenario actual, (b) sin cobertura forestal, (c) con área regenerada, para el Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú.

También se observa que en aquellas microcuencas donde el principal uso de suelo es potrero y agricultura (microcuencas 5, 8 y 11) hay una mayor producción de sedimento con respecto a aquellas cubiertas en su mayoría por vegetación natural. Pokhrel (2018) indica que las áreas agrícolas tienden a acelerar la erosión, lo que conduce al incremento de sedimentos. Por otra parte Choque (2015) encontró que las áreas con cultivo y potrero producen mayor cantidad de sedimento comparadas con áreas de vegetación arbórea, ya que éstas últimas protegen más al suelo de los procesos erosivos (Carvallo, 2006).

**Cuadro 8.** Producción de sedimento medio anual por microcuencia, para cada escenario de cambio de uso del suelo.

Microcuencas	Escenarios de uso de suelo (mm)			Cambio % escenario 1	Cambio % escenario 2
	Escenario actual	Escenario 1	Escenario 2		
1	7,25	161,57	12,23	2128,55	-92,43
2	16,72	36,39	17,33	117,64	-52,38
3	8,81	66,34	10,27	653,01	-84,52
4	3,60	203,63	10,20	5556,39	-94,99
5	41,17	85,78	42,44	108,36	-50,52
6	24,12	39,70	24,40	64,59	-38,54
7	10,29	10,29	10,29	0,00	0,00
8	46,94	48,19	46,98	2,66	-2,51
9	18,15	18,15	18,15	0,00	0,00
10	31,87	31,87	31,87	0,00	0,00
11	42,98	42,98	42,98	0,00	0,00

Si se comparan los escenarios (cuadro 8), existe un aumento de sedimento en las microcuencas 1 y 4 para el primer escenario con respecto al actual de 2128% y 5556%, esto indica una alta acumulación de sedimento en dichas microcuencas producto de un suelo descubierto (Mongua, 2017), sin embargo cuando el suelo descubierto regenera (escenario 2) hay una disminución de un 92% y 95% con respecto al escenario 1.

## 6. CONCLUSIONES

Se logró llevar a cabo la simulación de la subcuenca del Sector Prusia para el periodo 2005-2016, tanto para el escenario actual como para los escenarios de cambio de cobertura.

La producción de agua media anual bajo el escenario de uso actual fue de 1 140 mm que corresponde al 63% de la precipitación. El componente que más aporta en la producción de agua es el flujo lateral con 788,04 mm.

La mayor producción de agua se obtuvo de la parte alta de la subcuenca donde el uso de suelo está constituido mayormente por vegetación natural y plantaciones forestales y donde las pendientes se consideran fuertemente onduladas.

El caudal medio anual de la subcuenca bajo el escenario de uso actual es de  $6,28 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  donde el valor máximo ( $2,66 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) se obtuvo en el mes de octubre y un caudal mínimo ( $0,02 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) en marzo.

La carga de sedimentos media anual a la salida de la subcuenca fue de 38 060 t, el valor mínimo (1 t) de sedimento se dio en marzo y el valor máximo (20 336 t) ocurrió en septiembre.

La menor producción de sedimento por hectárea para el escenario actual se obtuvo de la parte alta de la subcuenca, donde la cobertura está ocupada mayormente por vegetación natural y plantaciones forestales. Y la mayor producción se obtuvo en áreas ocupadas por cultivo y potrero.

La producción de agua futura aumenta para el escenario 1 en 1,57% con respecto al actual, y el escenario 2 disminuye en 0,86% con respecto al escenario 1. El componente de la producción de agua que más cambia en ambos escenarios es la escorrentía superficial.

El caudal medio anual y sedimento medio anual futuro sufren un aumento en el escenario 1 con respecto al escenario actual y una disminución en el escenario 2 con respecto al escenario 1.

A futuro, después de que la regeneración natural esté más desarrollada, se esperaría que las condiciones del sitio sean parecidas o mejores a las condiciones actuales en cuanto a la producción de agua y sedimento.

## 7. RECOMENDACIONES

Se recomienda invertir en trampas de sedimento y estaciones de aforo para tener valores reales y poder calibrar futuros modelos.

Se recomienda instalar una estación meteorológica en el Sector Prusia para tener una mejor representación de los datos climáticos e incluir en la modelación registros de entrada de humedad, velocidad del viento y radiación solar.

Para investigaciones posteriores, se recomienda realizar estudios fisicoquímicos del suelo de manera más detallada, tomando en cuenta los requerimientos del modelo.

Los datos que se muestran pueden ser utilizados para identificar las zonas más sensibles en la producción de agua y sedimento y tomar medidas específicas de mitigación ante estos cambios.

Los datos obtenidos para los diferentes escenarios de cambio de cobertura contribuyen a un mejor entendimiento del comportamiento de la producción de agua y sedimento y ayudan a tomar decisiones en pro del mejoramiento de los servicios ecosistémicos.

En áreas donde la producción de sedimento es alta se recomienda establecer sistemas de barreras con vegetación para intervenir y disminuir el transporte de los sedimentos.

## 8. REFERENCIAS

- Acosta, A., Kucharsky, O. (2012). *Estudio edafológico y de cobertura para la modelación hidrológica con el modelo SWAT de la microcuenca Santa Inés, Honduras*. (tesis de licenciatura). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras, p 1 y 2.
- Amestoy, J. (2001). Aspectos de la degradación del medio ambiente: su influencia en el clima. *Papeles de Geografía*, (34), 17-49. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/407/40703402.pdf>.
- Andreazzini, M., Degiovanni, S., Spalletti, P., y Irigoyen, M. (2014). Producción de sedimentos en una cuenca de Sierras Pampeanas, Córdoba, Argentina: Estimación para distintos escenarios. *Aqua-LAC*, 6(1), 38-49. Recuperado de [http://www.unesco.org/Numero\\_6\\_vol\\_1/AqualacVol6N1-Produccion\\_de\\_sedimentos\\_en\\_una\\_cuenca.pdf](http://www.unesco.org/Numero_6_vol_1/AqualacVol6N1-Produccion_de_sedimentos_en_una_cuenca.pdf).
- ASF (2018). *ALOS PALSAR Global Radar Imagery, 2006-2011*. Recuperado de <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/>.
- Barquero, A. (2015). *Modelación hidrológica en las cuencas San Jerónimo-Piedras, Río Blanco y Tenorio usando SWAT*. (tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería Agrícola, p 2, 14 y 23.
- Barrios, A., Urribarri, L. (2010). Aplicación del modelo SWAT en los Andes venezolanos: Cuenca alta del río Chama *Revista Geográfica Venezolana*, 51(1), pp. 11-29. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=347730384002>.
- Blanco, J. (2017). Bosques, suelo y agua: explorando sus interacciones. *Ecosistemas*, 26(2), 1-9. Doi.: 10.7818/ECOS.2017.26-2.01.

- Bermúdez, F. y Conejo, R. (2008). *Plan General de Manejo del Parque Nacional*, p. 33 Recuperado de <http://www.sinac.go.cr/ES/ac/accvc/pnvi/Paginas/default.aspx>.
- Brea, J., Balocchi, F. (2010). *Procesos de erosión - sedimentación en cauces y cuencas*, p. 9 y 11. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002163/216338s.pdf>.
- Bueno, P., Sánchez, I., Esquivel, E., Palomo, M., y Velasquez, M. (2014). Impacto del cambio en la vegetación sobre el escurrimiento utilizando el modelo SWAT. *AGROFAZ*, 14(2), pp 111-115. Recuperado de [http://www.agrofaz.mx/wp-content/uploads/articulos/2014142IV\\_10.pdf](http://www.agrofaz.mx/wp-content/uploads/articulos/2014142IV_10.pdf).
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., e Iñegues, V. (2006). The impact of pine plantations on water yield: a case study from the Ecuadorian Andes. *3rd Internacional Symposium on Integrated Water Management, Bochum, Germany*.
- Buytaert, W., Deckers, J., Dercon, G., De Bièvre, B., Poesen, J., y Govers, G. (2002). Impact of land use changes on the hydrological properties of volcanic ash soils in South Ecuador. *Soil Use Manage*, 18, 94-100. [doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00226.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00226.x).
- Calder, I. R. (2004). Forests and water- Closing the gap between public and science perceptions. *Water Science & Technology*, 49(7), 39-53.
- Campos, D. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. Recuperado de: [https://books.google.co.cr/books?id=tkUYqd0Aac8C&pg=SA1-PA2&dq=hidrologia&hl=es-419&sa=X&ei=MEuzU6uSCenIsATG9oGoDQ&redir\\_esc=y#v=onepage&q=hidrologia&f=false](https://books.google.co.cr/books?id=tkUYqd0Aac8C&pg=SA1-PA2&dq=hidrologia&hl=es-419&sa=X&ei=MEuzU6uSCenIsATG9oGoDQ&redir_esc=y#v=onepage&q=hidrologia&f=false).

- Carbajal, A., & Gonzáles, M. (2012). Propiedades y funciones biológicas del agua. En Vaquero y Toxqui (eds), *Agua para la salud, pasado presente y futuro* (pp. 33-45). Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.
- Carimentrand, J., Lugo, L., Lozada, J. (2002). Efectos inducidos en los suelos, por las plantaciones de eucalipto en el Estado Portuguesa, Venezuela. *Revista Forestal Latinoamericana*, 17(31), pp. 101-120. Recuperado de [http://www.ula.ve/ciencias-forestalesambientales/indefor/wpcontent/uploads/sites/9/2017/01/2002\\_ImpactoEucalipto.pdf](http://www.ula.ve/ciencias-forestalesambientales/indefor/wpcontent/uploads/sites/9/2017/01/2002_ImpactoEucalipto.pdf).
- Carvajal, D. (2017). *Dinámica hídrica bajo condiciones climáticas cambiantes en la subcuenca del río Tempisquito, cuenca del Tempisque, Guanacaste, Costa Rica* (tesis de maestría). Centro Agronómico Tropical De Investigación Y Enseñanza, Turrialba, p. 2, 4, 5,7 y 43.
- Carvalho, E. (2006). *Evaluación del efecto de los cambios de cobertura sobre la producción de agua y sedimentos en la microcuenca quebrada La Virgen, Los Teques, Edo. Miranda*. (Tesis de bachillerato). Universidad Central de Venezuela. p. 81, 86, 87 y 88.
- Castañeda, Y. (2016). *Modelación del Efecto del Cambio de Uso del Suelo en la Cuenca del Rio Coello, Bajo Escenario de Cambio Climático, A Través De La Aplicación Del Modelo Hidrológico SWAT (Soil And Water Assessment Tool)* (tesis de licenciatura en Ingeniería Forestal). Universidad Distrital Francisco Jose De Caldas, Bogotá D.C. p. 21.
- Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute (2009). *Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP*. p. 5.

- Choque, B. (2015). *Identificación de los factores determinantes en la producción de agua y sedimentos en la subcuenca del río Birrís, cuenca del río Reventazón, Costa Rica* (tesis de maestría). Centro Agronómico Tropical De Investigación Y Enseñanza, Turrialba, p 3, 6,8 y 35.
- Chung-Hsiung, S., Xiaofan, L., Ming-Jen, Y. (2007). On the Definition of Precipitation Efficiency. *The Atmospheric Sciences*, 64, 4506-4513. doi: 10.1175/2007JAS2332.1.
- Contreras, K., Contreras, J., Corti, M., De Sousa, J., Durán, M., Escalante, M. (2008). *El agua, un recurso para preservar*, p. 9. Recuperado de <http://www.eventos.ula.ve/ciudadostenible/documentos/pdf/agua.pdf>.
- Da Silva, V., Silva., De Souza, E. (2016). Influence of Land Use Change on Sediment Yield: A Case Study of the Sub-middle of the São Francisco River Basin. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering* 36(6):1005-1015. Doi:<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n6p1005-1015/2016>.
- De Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Govers, G., Vanmaercke, M., Van Rompaey, A., Arabkhedri, M., Boix-Fayos, C. (2013). Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: where do we stand?. *Earth-Science Reviews* 127: 16-29. [doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.014](http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.014).
- Díaz, C., Esteller, M., López-Vera, F. (2005). *Recursos hídricos. Conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica*, p 1-7, 1-8 y 1-12. Recuperado de <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/rh01/rh01.pdf>.
- Dile, YT., Daggupati, P., George, C., Srinivasan, R., Arnold, J. (2016). Introducing a new open source GIS user interface for the SWAT model. *Environmental Modelling & Software*, 85, 129-138. [doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.08.004](http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.08.004).

- Di Luzio, M; Arnold, JG; Srinivasan, R. 2005. Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations. *Hydrological Processes* 19(3):629-650. <https://doi.org/10.1002/hyp.5612>.
- Dos Santos, V., Laurent, F., Abe, C., y Messner, F. (2018). Hydrologic Response to Land Use Change in a Large Basin in Eastern Amazon. *Water*, (10)429. doi:10.3390/w10040429.
- Easton, Z., y Bock, E. (2015). Hydrology Basics and the Hydrologic Cycle, p. 4, 6, 7.
- Elizondo, M. (2015). Suelos de Costa Rica Orden Entisol. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1822.PDF>.
- Fallas, J. y Gutiérrez, M. (1992). Manejo de cuencas ante desastres naturales: cuenca alta del Río Reventado, Cartago. *Revista Geográfica de América Central*, 25-26(1), 341-353. Recuperado de <http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/2927>.
- Fallas, J. (2014). Ríos 1:50000. In Ortíz, E (ed.). Atlas Digital 2014. Cartago, Costa Rica, ITCR.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2009). Guía para la descripción de suelos (en línea). Trad. Vargas, R. Cuarta ed. Roma, Italia. 111 p. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). (1987). Efectos ecológicos de los eucaliptos (en línea). Ed Poore, M y Fries, C. Roma, Italia 106 p. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/016/ap415s/ap415s00.pdf>.
- Fernández, R. (2017). Utilización del programa “SWAT” para la estimación de la emisión de sedimentos en cuencas. *TRIM*, 12, 21-32, p, 15.

- Gómez, A. (2016). *Herramientas de Modelación y Monitoreo para la Hidrología de Alta Montaña Colombiana-Cuenca de la Quebrada Calostros – PNN Chingaza* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C, p. 47.
- Gómez-Ruiz, P. y Lindig-Cisneros, R. (2017). La restauración ecológica clásica y los retos de la actualidad: La migración asistida como estrategia de adaptación al cambio climático. *Revista de ciencias ambientales*, 2(51), 31-51. Recuperado de <http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/ambientales/article/view/9478>.
- Gopal, L. (2015). *Evaluación del Impacto de Cambios de Cobertura Vegetal en la Producción de Agua de la Cuenca del Río Güey* (tesis de bachillerato). Universidad Central de Venezuela, Maracay, p. 15.
- Harden, C., y Scruggs, D. (2003). Infiltration on mountain slopes: a comparison of three environments. *Geomorphology*, 55(1-4), 5-24. doi:10.1016/S0169-555X(03)00129-6.
- Hernández, A., y Pastor, J. (2008). *La restauración ecológica de ecosistemas degradados: Marcos conceptuales y metodologías para la acción*. En Millán, R y Lobo, C. (Ed). Contaminación de suelos. Tecnologías para su recuperación. (pp 61-82), Madrid, España: CIEMAT.
- Hernández, D. (2015). *Estimación de los parámetros morfométricos y las unidades de respuesta hidrológica de la Cuenca Del Río Ráquira Departamento de Boyacá a través del programa Swat* (tesis de grado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, p. 46.
- Instituto Tecnológico de Costa Rica. (2016). Proyecto de investigación: Plan Piloto de Rehabilitación Ecológica del Sector Prusia del Parque Nacional Volcán Irazú. Costa Rica, parr. 3, 4, 5.

- Kavian, A., Mohammadi, M., Gholami, L., y Comino, R. (2018). Assessment of the Spatiotemporal Effects of Land Use Changes on Runoff and Nitrate Loads in the Talar River. *Water*, (10)445. doi:10.3390/w10040445.
- Kumar, B. (2014). *Determination of infiltration rate of soils using single and double ring infiltrometer and study on drought of karimnagar district of andhra pradesh* (Doctoral dissertation). Department Of Civil Engineering National Institute Of Technology, Rourkela, p. 6 y 8.
- Leyes y Decretos (1997). Asamblea Legislativa Decreto No 26945-MINAE. Ampliación Parque Nacional Volcán Irazú. Costa Rica.
- López, C. (2016). *Evaluación hidrológica de la cuenca del río Coca en función del cambio de uso del suelo por medio del modelo SWAT*. (tesis de licenciatura). Escuela Politécnica Nacional, Quito, p 8 Y 14, 16.
- Maderey, L. (2005). *Principios de Hidrogeografía Estudio del Ciclo Hidrológico*, p. 11. Recuperado de [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=0S3XDWsDzSAC&oi=fnd&pg=PA7&dq=ciclo+hidrol%C3%B3gico+&ots=2R5Ekqn-SE&sig=x4Ouy7yDjbo1z0K7ie\\_YglqeK5M#v=onepage&q=ciclo%20hidrol%C3%B3gico&f=true](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=0S3XDWsDzSAC&oi=fnd&pg=PA7&dq=ciclo+hidrol%C3%B3gico+&ots=2R5Ekqn-SE&sig=x4Ouy7yDjbo1z0K7ie_YglqeK5M#v=onepage&q=ciclo%20hidrol%C3%B3gico&f=true).
- Madroñero, S. (2006). *Manejo del recurso hídrico y estrategias para su gestión integral en la microcuenca Mijitayo, Pasto Colombia*. (tesis de maestría). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, p. 13.
- Manson, R. (2004). Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Redalyc*, 1(10), 3-20. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61710101>.

- Marini, F., Santamaría, M., Oricchio, P., Di Bella, C.M., Basualdo, A. (2017). Estimation of real evapotranspiration (ETR) and potential evapotranspiration (ETP) in the southwest of the Buenos Aires Province (Argentina) using MODIS images. *Revista de Teledetección*, 48, 29-41. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.6743>.
- Martínez, A. (2011). Oasificacion.com: Una Página Web Sobre Hidrología Forestal. *Cuad. Soc. Esp. Cienc*, 32, 71-76.
- McDaniel, P.A., Lowe, D.J., Arnalds, O., y Ping, C. (2012). *Andisols*. In: Huangg, P.M., Li, Y., Sumner, M.E (Eds) "Handbook of Soil Sciences. 2da edition. Vol. 1: Properties and Processes". CRC Press (Taylor & Francis), Boca Raton, FL, pp. 3 29-48.
- Meng, F., Liu, T., Wang, H., Luo, M., Duan, Y., y Bao, A. (2018). An Alternative Approach to Overcome the Limitation of HRUs in Analyzing Hydrological Processes Based on Land Use/Cover Change. *Water*. 10(434). doi:10.3390/w10040434.
- Mongua, L. (2017). *Análisis Multitemporal del Cambio en la Cobertura y Usos del Suelo para Evaluar el Impacto de la Minería y su Influencia en la Producción de Sedimentos por Medio de la Herramienta ArcSwat en la Cuenca del Río San Juan*. (tesis de grado). Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito", Bogotá, p. 18 y 20.
- Montoya, F. (2005). Degradación y rehabilitación de ecosistemas terrestres: estado de la cuestión. *Revista Biocenosis*, 19(2), 24-30. Recuperado de <http://201.196.149.98/revistas/index.php/biocenosis/article/view/1323/1398>.
- Mora, J. (2016). La importancia de los recursos hídricos en los usos del suelo en la Península Ibérica. *JURISMAT*, 9, 103-118.

- Neitsch, S.L., Williams, J.R., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009*. Texas, United States of America, Texas Water Resources Institute. 618 p.
- Oasificación (2018). *Tablas del número de curva*. Recuperado de <http://www.oasification.com/tablasden.htm>.
- Organización meteorológica mundial (2012). *International Glossary Of Hydrology*, p. 337. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002218/221862M.pdf>.
- Pacheco, R. (2012). *Modelación Hidrológica con HEC-HMS en cuencas* (tesis de maestría). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría CUJAE, La Habana, p. 7 y 8.
- Padilla, A. (2017). *Caracterización de suelo del Sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú, con mira en la rehabilitación ecológica* (tesis de licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, p. 3.
- Pagano, T., y Soroosh, S. (2002). Hydrologic Cycle. En M. MacCracken y S. Perry (Eds). *Encyclopedia of Global Environmental Change* (pp.450-464). Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, p. 3.
- Pimentel, D., y Burgess, M. (2013). Soil Erosion Threatens Food Production. *Agriculture*, 3, 443-463; doi:10.3390/agriculture3030443.
- Pokhrel, B. (2018). Impact of Land Use Change on Flow and Sediment Yields in the Khokana Outlet of the Bagmati River, Kathmandu, Nepal. *Hydrology*, (5)22; doi:10.3390/hydrology5020022.
- Quesada, R. (2007). *IX Congreso Nacional de Ciencias, exploraciones fuera y dentro del aula: Los Bosques de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica, p.12.

- Ramírez, M., y Rodríguez, D. (2015). Simulación y modelación de la producción de sedimentos en dos escenarios dominantes de ocupación de suelo en la cuenca hidrográfica del río Coello. *Revista NOVA*, (1)1, 48-65. Recuperado de <http://revistas.sena.edu.co/index.php/rnova/article/view/188/221>.
- Reyes, O. (2013). Utilización de modelos hidrológicos para la determinación de cuencas en ecosistemas de páramo. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 4(2), 56-65. Recuperado de [http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs\\_viceinves/index.php/RA/article/view/432/432](http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RA/article/view/432/432).
- Sabogal, C., Besacier, C., y McGuire, D. (2015). Restauración de bosques y paisajes: conceptos, enfoques y desafíos que plantea su ejecución. *Unasyva*, 66(245), 3-10. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i5212s.pdf>.
- Saxton, KE., Rawls, WJ. (2006). Soil water characteristics estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal* 70: 1569–1578.
- Schulz, C., Y García, R. (2015). *Balance hídrico y recarga de acuíferos*, p. 5, 9 y 10. Recuperado de [http://aih-cl.org/cursos/Balance\\_y\\_Recarga\\_de%20Acuiferos\\_Version\\_Final.pdf](http://aih-cl.org/cursos/Balance_y_Recarga_de%20Acuiferos_Version_Final.pdf).
- Segura-Castruita, M., y Ortiz-Solorio, C. (2017). Modelación de la evapotranspiración potencial mensual a partir de temperaturas máximas-mínimas y altitud. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(3), 93-110. doi: 10.24850/j-tyca-2017-03-06.

- Sevilla, V., Comerga, J., Silva, O. (2009). Caracterización de la cuenca del río Canoabo en el estado Carabobo, Venezuela. I. Análisis climático y de producción de agua. *Agronomía Tropical*, 59(1), 33-44. Recuperado de [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0002-192X2009000100004](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2009000100004).
- Simula, M., y Mansur, E. (2011). Un desafío mundial que reclama una respuesta local. *Unasyva*, 62(238), 3-7. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/015/i2560s/i2560s.pdf>.
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación. (2013). *Parque Nacional Volcán Irazú*, parr 2, 7 y 9. Recuperado de <https://areasyparques.com/areasprotegidas/parque-nacional-volcan-irazu/>.
- Stehli, P., Weber, J., & Vestena, L. (2014). *Revisión del estado del arte y estrategias en la modelación hidrológica distribuida en cuencas urbanas*, parr 1. Recuperado de <https://www.ina.gob.ar/legacy/ifrh-2014/Eje3/3.38.pdf>.
- Tamayo, G. (2017). *Evaluación de los caudales líquidos y de producción de sedimentos estimados con el modelo Soil Water Assessment Tool (SWAT) y su relación con los caudales líquidos y sólidos observados* (tesis de maestría). Escuela Politécnica Nacional, Quito, p. 7.
- Urrutia, M. (2016). *Aplicación del modelo SWAT para la simulación del ciclo hidrológico de la Cuenca Alta del Río San Juan bajo la influencia de la actividad minera* (tesis de maestría). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C, p. 20, 22, 33,34, 74 y 75.
- Varela, A. (2013). Generalidades del Parque Nacional Volcán Irazú. *Revista Geológica de América Central*, 48, 189-195. Recuperado de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/view/12243>.

- Villegas, J. C. (2004). Análisis del conocimiento en la relación agua-suelo-vegetación para el Departamento de Antioquía. *Revista EIA* (1), 73-79.
- Yu, D., Xie, P., Dong, X., Su, B., Hu, X., Wang, K., y Xu, S. (2018). The development of land use planning scenarios based on land suitability and its influences on eco-hydrological responses in the upstream of the Huaihe River basin. *Ecological Modelling*, 373, 53-67. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.01.010>.
- Zaldívar, J. (2017). *La cuenca hidrográfica como propuesta de unidad de análisis y gestión sustentable de territorio*. (tesis de maestría). Universidad de Chile, Santiago, p. 9.