



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**MAESTRIA EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

## **INCIDENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y DE USO DEL SUELO EN LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO NAPO**

Trabajo de investigación previo a la obtención del título de Magíster en Gestión  
Integral de Cuencas Hidrográficas

**DIRECTOR:**

Xavier Zapata Ríos

**AUTOR:**

Yarima Cumandá Recalde Aza

IBARRA - ECUADOR

2018

## **APROBACIÓN DEL TUTOR**

En calidad de tutor del trabajo de Grado, presentado por la Ingeniera Yarima Cumandá Recalde Aza, para optar por el título de Magister en Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas, doy fe de que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Ibarra, a los 21 días del mes de febrero del 2018.



Ing. Xavier Zapata Ríos, PhD

## **APROBACION DEL JURADO**

### **“INCIDENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y DE USO DEL SUELO EN LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO NAPO”**

Por: Yarima Cumandá Recalde Aza

Trabajo de Grado de Maestría aprobado en nombre de la Universidad Técnica del Norte,  
por el siguiente jurado, a los 21 días del mes de febrero de 2018.



Ing. Xavier Zapata Ríos, PhD



Ing. José Guzmán Paz, MSc

## AUTORÍA

Yo, Yarima Cumandá Recalde Aza, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado, ni calificación profesional, que he consultado referencias bibliográficas que se incluyen en este documento y que todos los datos presentados son resultado de mi trabajo.

En la ciudad de Ibarra, a los 21 días del mes de febrero del 2018



---

Yarima Cumandá Recalde Aza

C.C. 100343446-9



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**INSTITUTO DE POSTGRADO**  
**BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**



**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN**  
**A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentado mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

<b>DATOS DE CONTACTO</b>			
CEDULA DE IDENTIDAD:	100343446-9		
APELLIDOS Y NOMBRES	Recalde Aza Yarima Cumandá		
DIRECCION:	Ibarra, Machala 4-23 y Macas		
EMAIL:	yari@hotmail.es		
TELEFONO FIJO:	062602849	TELEFONO MÓVIL	+593969725475

<b>DATOS DE LA OBRA</b>	
TITULO:	"Incidencia del cambio y climático y uso del suelo en la disponibilidad de agua en la cuenca del Río Napo"
AUTOR:	Yarima Cumandá Recalde Aza
FECHA:	21 de febrero del 2018
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	

PROGRAMA	PREGRADO ---- POSGRADO ---X-
TITULO POR EL QUE OPTA:	Magister en Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas
ASESOR/DIRECTOR:	Ing. Xavier Zapata Ríos, PhD

## 2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

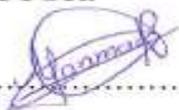
Yo, Yarima Cumandá Recalde Aza, con cédula de ciudadanía Nro. 1003434469-9, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

## 3. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es la titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 21 días del mes de febrero de 2018

**EL AUTOR:**



Yarima Recalde  
C.C. 1003434469

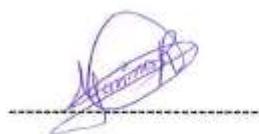
## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

### **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Yo, Yarima Cumandá Recalde Aza con cédula de ciudadanía Nro. 1003434469 manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor del trabajo de grado denominada: **“INCIDENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y DE USO DEL SUELO EN LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO NAPO”** que ha sido desarrollada para optar por el título de Magíster en Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas, en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

En Ibarra a los 21 días del mes de febrero del 2018



Yarima Cumandá Recalde Aza

C.C. 1003434469

## DEDICATORIA

A mi **MADRE**, quien ha sido mi apoyo durante toda esta etapa, mi fortaleza en momentos difíciles y por estar conmigo en cada uno de mis logros. Para usted con mucho amor.

## RECONOCIMIENTO

Debo reconocer infinitamente a mi tutor Ing. Xavier Zapata, PhD por todos los conocimientos impartidos, y por ser la guía en el desarrollo del presente estudio. Sin duda el aporte a la investigación que se ha logrado no hubiera sido posible sin su dirección.

Agradezco también a todos mis profesores de la maestría especialmente al Msc. José Guzmán, Dr. Ali Moncada, Dr. César Zuleta quienes me han compartido conocimientos muy valiosos que me han servido en mi vida profesional.

A Dios por ser la luz de mi vida, y por mantenerme siempre en pie y guiándome para alcanzar mis objetivos.

Gracias infinitas...

*Yarima*

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problema de investigación .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Justificación.....	3
<b>2 MARCO REFERENCIAL.....</b>	<b>4</b>
2.1 Antecedentes .....	4
2.2 Cambios de uso de suelo y cambio climático.....	5
2.3 Modelos hidrológicos .....	7
2.4 Integrated Valuation of Ecosystem Services an Tradeoffs (InVEST).....	8
2.5 Curva de Budyko.....	9
<b>3 MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>11</b>
3.1 Descripción del área de estudio.....	11
3.2 Tipo de investigación .....	11
3.3 Métodos de investigación.....	12
3.4 Procedimiento.....	12
3.4.1 Delimitación del área de estudio.....	12
3.4.2 Recolección de datos.....	12
3.4.3 Preparación de datos para ingreso al modelo.....	14
3.4.4 Cálculo del rendimiento anual de agua.....	18
3.4.5 Calibración y validación del modelo .....	19
3.4.6 Cálculo de evapotranspiración mediante Thornthwaite.....	22
3.4.7 Análisis de la incidencia del cambio climático en el rendimiento hídrico futuro	23
3.4.8 Análisis de la incidencia del cambio de uso de suelo en el rendimiento hídrico futuro .....	25
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>27</b>
4.1 Precipitación media anual .....	28

4.2	Evapotranspiración total anual.....	28
4.3	Cobertura del suelo.....	28
4.4	Agua disponible para las plantas.....	29
4.5	Profundidad de suelo.....	30
4.6	Tabla biofísica.....	30
4.7	Rendimiento anual de agua.....	31
4.8	Calibración y Validación.....	34
4.9	Evapotranspiración mediante Thornthwaite.....	35
4.10	Proyecciones de temperatura y precipitación:.....	36
4.11	Rendimiento de agua bajo escenarios de cambio climático.....	40
4.12	Escenarios de cambios de uso de suelo.....	45
4.12.1	Rendimiento de agua bajo los escenarios de uso de suelo.....	51
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>59</b>
	Conclusiones.....	59
	Recomendaciones.....	61
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>62</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>67</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Datos de ingreso para InVEST .....	13
<b>Tabla 2.</b> Estaciones meteorológicas .....	14
<b>Tabla 3.</b> Cobertura del suelo .....	15
<b>Tabla 4.</b> Fracción de agua disponible para las plantas .....	16
<b>Tabla 5.</b> Profundidad del suelo .....	17
<b>Tabla 6.</b> Estaciones hidrológicas.....	19
<b>Tabla 7.</b> Interpretación Sesgo porcentual BIAS.....	21
<b>Tabla 8.</b> Precipitación media anual .....	28
<b>Tabla 9.</b> Porcentajes de uso de suelo actual .....	29
<b>Tabla 10.</b> Agua disponible para las plantas.....	29
<b>Tabla 11.</b> Profundidad del suelo .....	30
<b>Tabla 12.</b> Atributos biofísicos de los usos de suelo .....	30
<b>Tabla 13.</b> Rendimiento de agua a nivel de cuenca.....	33
<b>Tabla 14.</b> Rendimiento de agua a nivel de subcuencas.....	33
<b>Tabla 15.</b> Caudales observados y simulados por subcuenca.....	35
<b>Tabla 16.</b> Rendimiento medio anual escenarios cambio climático.....	40
<b>Tabla 17.</b> Rendimiento medio de agua bajo escenarios de cambio de uso de suelo .	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Escenarios cambio climático RCP.....	6
Figura 2. Procedimiento Invest. ....	9
Figura 3. Diagrama del modelo de balance hídrico. ....	18
Figura 4. Ubicación de estaciones hidrológicas.....	20
Figura 5. Subcuencas Río Napo.....	27
Figura 6. Rendimiento de agua en la cuenca del Río Napo.	32
Figura 7. Rendimiento medio de agua por subcuencas.....	34
Figura 8. ETP MODIS vs ETP Thornthwaite.....	36
Figura 9. Cambios esperados en la temperatura (°C) .....	37
Figura 10. Cambios esperados en la precipitación total anual.....	39
Figura 11. Rendimiento de agua a nivel de cuenca y subcuencas RCP 4.5.....	41
Figura 12. Rendimiento de agua por subcuenca bajo el escenario RCP 4.5.....	42
Figura 13. Rendimiento de agua a nivel de cuenca y subcuencas RCP 8.5.....	43
Figura 14. Rendimiento de agua por subcuenca bajo el escenario RCP 8.5.....	44
Figura 15. Cambios de uso de suelo (escenario cambio climático).....	47
Figura 16. Porcentajes de cambios de uso de suelo (escenario cambio climático)....	48
Figura 17. Cambios de uso de suelo (escenario exponencial y cambio climático) ..	50
Figura 18. Porcentajes de cambios de uso de suelo (escenario cambio climático)....	51
Figura 19. Rendimiento de agua escenarios cambio de uso de suelo (cambio climático)53	
Figura 20. Rendimiento de agua escenarios cambio de uso de suelo (exponencial y cambio climático).....	54
Figura 21. Clases de rendimiento hídrico (mm) en porcentaje de ocupación según escenarios de uso del suelo (cambio climático).....	56
Figura 22. Clases de rendimiento hídrico (mm) en porcentaje de ocupación según escenarios de uso del suelo (exponencial y cambio climático) .....	57

**UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE**  
**INSTITUTO DE POSTGRADO**  
**PROGRAMA DE MAESTRIA EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS**  
**HIDROGRÁFICAS**  
**“INCIDENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y DE USO DEL SUELO EN LA**  
**DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO NAPO”**

**Autor:** Yarima Cumanda Recalde Aza.

**Tutor:** Ing. Xavier Zapata Ríos, PhD

**Año:** 2018

**RESUMEN**

El río Napo drena las laderas orientales de los Andes en el norte de la región amazónica de Ecuador, y es uno de los principales afluentes del río Amazonas. Dentro de la cuenca, el agua es un recurso fundamental para el ecosistema y para mantener los medios de vida. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue analizar la distribución espacial de la disponibilidad de agua en la cuenca del río Napo bajo escenarios de cambios de clima y uso de la tierra. Los cálculos actuales y futuros de disponibilidad de agua se realizaron utilizando el software Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs (InVEST). InVEST calcula un balance hídrico superficial como la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración efectiva y, en consecuencia, tiene en cuenta las variables climáticas, la cobertura de la tierra y la textura del suelo. Los resultados anuales de rendimiento de agua fueron validados con datos de descarga del río disponibles de 4 estaciones hidrométricas instaladas por el *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología* (INAMHI). El modelo produjo un muy buen ajuste con los datos de descarga de la estación Napo Nuevo Rocafuerte ubicada en la salida principal de la cuenca. La disponibilidad futura de agua se determinó con las proyecciones de precipitación y temperatura para el siglo XXI desarrolladas por el Ministerio del Ambiente, y la evapotranspiración de referencia se calculó en función de la temperatura de la superficie del aire terrestre aplicando el método de Thornthwaite. Utilizando InVEST, se analizaron seis escenarios de cambio climático (para 2020, 2050 y 2070) correspondientes a las proyecciones RCP 4.5 y RCP 8.5 desarrolladas por el IPCC (2014). Además, dos proyecciones de cambio de uso del suelo: "Cambio climático" y "Exponencial más Cambio climático" modelado por Wildlife Conservation Society (2016) se utilizaron en el modelo. Así, se establecieron 6 escenarios para 2020, 2050 y 2100 en cada proyección de cambio de uso del suelo. Los resultados de esta investigación son útiles para evaluar los cambios en el tiempo del rendimiento hídrico dentro de la cuenca, convirtiéndose en una herramienta valiosa para apoyar la toma de decisiones y la planificación territorial.

Palabras Claves: Provisión hídrica, cambio de uso del suelo, InVEST, Río Napo, escenarios climáticos

**UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE**  
**INSTITUTO DE POSTGRADO**  
**PROGRAMA DE MAESTRIA EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS**  
**HIDROGRÁFICAS**  
**“INCIDENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y DE USO DEL SUELO EN LA**  
**DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO NAPO”**

**Autor:** Yarima Cumanda Recalde Aza

**Tutor:** Ing. Xavier Zapata Ríos, PhD

**Año:** 2018

**ABSTRACT**

The Napo River drains the eastern slopes of the Andes in the northern Amazon Region of Ecuador, and is one of the main tributaries of the Amazon River. Within the basin, water is a fundamental resource for the ecosystem and for sustaining livelihoods. Therefore, the objective of this investigation was to analyze the spatial distribution of water availability in the Napo River basin under climate and land use changes. Current and future water availability calculations were performed by the Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs software (InVEST). InVEST calculates a surficial water balance as the difference between precipitation and effective evapotranspiration and consequently takes into account climatic variables, land cover and soil texture. Annual water yield results were validated with available river discharge data from 4 hydrometric stations installed by the *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología* (INAMHI). The model produced a very good fit with discharge data from Napo Nuevo Rocafuerte station located at the main basin outlet. Future water availability was determined with precipitation and temperature Projections for XXI century developed by the Ministerio del Ambiente, and reference evapotranspiration was calculated based on terrestrial air surface temperature applying Thornthwaite's method. Within InVEST, six climate change scenarios were analyzed (for 2020, 2050 and 2070) corresponding to the RCP 4.5 and RCP 8.5 projections developed by the IPCC (2014). Moreover, two land use change projections: "Climate Change" and "Exponential plus Climate Change" modeled by Wildlife Conservation Society (2016) were used in the model. Thus 6 scenarios were established for 2020, 2050 and 2100 and each land use change projection. Results from this investigation are useful to evaluate water yield changes in time within the basin, becoming a valuable tool to support decisions-making and territorial planning.

Keywords: Water yield, land use change, InVEST, Napo river, climate scenarios

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

Desde que la actividad ambiental inició hace varias décadas, los científicos han expuesto el gran impacto de las acciones humanas sobre el equilibrio de los ecosistemas, principalmente en la estabilidad del ciclo del agua (Duarte et al., 2006). Los esfuerzos realizados en lo que se refiere a la conservación de la naturaleza ha permanecido en una escala menor en comparación con la expansión de las actividades humanas (Gudynas, 2011). El cambio climático y de cobertura de la tierra se encuentra entre las mayores presiones ambientales globales resultantes de las actividades antropogénicas, que tienen un gran impacto en la producción y disponibilidad de agua en las cuencas hídricas (Mango et al., 2011). Por tanto, el estudio de estos cambios en el ciclo hidrológico y la creciente escasez de agua se han convertido en un tema importante de investigación para la comunidad científica. Consecuentemente, la respuesta hidrológica de las cuencas hidrográficas al cambio climático y a los cambios de uso de suelo es un tema esencial para la planificación y gestión de recursos hídricos.

### 1.1 Problema de investigación

Los cambios en los ecosistemas debido a causas naturales o modificaciones humanas alteran las funciones de producción ecológica minimizando la cantidad de servicios que se pueden proveer (Tallisa & Polasky, 2009). Estos cambios se encuentran entre las mayores presiones ambientales con un gran impacto sobre el ciclo hidrológico (Feng et al., 2015).

La región amazónica es una zona con abundante agua, pero la deforestación, el cambio en el uso de la tierra y la cobertura vegetal afecta el flujo de agua, la capacidad de infiltración en el suelo, el transporte de sedimentos en la cuenca y descarga media anual (Galárraga y Torres, 2001). Además influye en variaciones en el ciclo del agua y puede incidir en cambios en los patrones de precipitación, evaporación y descarga en la cuenca a escala local, regional y global (Sant'Anna, 2013).

Algo similar podría suceder en el Ecuador y en especial en las cuencas hidrográficas que drenan la parte Amazónica. Por ejemplo, en los últimos años la cuenca del Río Napo, que drena la parte nororiental de la cordillera de los Andes, se ha visto afectada por la industria maderera, explotación del petróleo y la población humana en expansión (Finer y Jenkins, 2012). Según Mainville et al.(2006) la tasa de deforestación en la Amazonía ecuatoriana es de las más altas en América del Sur y más del 85% de las tierras están dedicadas al pastoreo y la agricultura.

La explotación petrolera y el incremento de proyectos hidroeléctricos incrementan los niveles de deforestación debido a la construcción de carreteras en áreas previamente inaccesibles (Webb et al., 2004). Además el incremento de la presión atmosférica de CO<sub>2</sub> provoca cambios en la temperatura atmosférica y en la distribución de la precipitación a nivel espacial que pueden alterar la respuesta hidrológica de la cuenca del Río Napo (Getirana et al, 2010). Además la información hidrológica desarrollada es escasa para que puede ser utilizada por los tomadores de decisiones con lo cual puedan gestionar de mejor manera el recurso.

Sobre la base de lo anteriormente expuesto se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿En qué medida las proyecciones del cambio climático y de uso del suelo podrían influir sobre la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del Río Napo?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Evaluar la incidencia del cambio climático y de uso del suelo en la disponibilidad de agua en la cuenca del Río Napo mediante la utilización del modelo InVEST

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Determinar la disponibilidad del agua en la cuenca del Río Napo.

- Pronosticar la disponibilidad futura del agua en un contexto de cambio climático y uso del suelo
- Analizar como el cambio climático y de uso del suelo podría incidir en la disponibilidad del agua en la cuenca del Rio Napo.

### **1.3 Justificación**

El agua es un recurso fundamental para los ecosistemas y el sustento de comunidades en la parte alta de la Amazonia del Ecuador. Por tanto los efectos de cambios en la cobertura vegetal y cambio climático sobre la disponibilidad de agua han generado un interés y necesidad de investigación en esta región. Esta propuesta de estudios hidrológicos se enfoca en la cuenca del Rio Napo en la Amazonía del Ecuador.

De la misma forma es necesario analizar escenarios alternativos de uso de suelo y cambio climático para obtener información de posibles cambios en la disponibilidad de agua y obtener una buena comprensión de la respuesta hidrológica de la cuenca con base a condiciones futuras. Toda la información obtenida es importante para generar políticas que respondan a las afectaciones del recurso hídrico asociadas con el cambio climático. Además, planificar a largo plazo la cobertura y uso de suelo así como el agua y realizar evaluaciones estratégicas para la implementación de nuevos proyectos como la construcción de represas hidroeléctricas en la zona. Este enfoque de gestión permite a los tomadores de decisiones considerar las múltiples consecuencias vinculadas con sus decisiones (Tallisa y Polasky, 2009).

Este tipo de estudios se enmarcan en las políticas desarrolladas por La Secretaría del Agua (SENAGUA) sobre aspectos tales como oferta hídrica en donde se menciona la necesidad de no alterar el ciclo hidrológico para garantizar la disponibilidad de agua para la sociedad. Esto se puede lograr mediante una gestión del conocimiento sobre la dinámica de las cuencas bajo escenarios de cambio climático y cambio de uso de suelo.

## CAPITULO II

### 2 MARCO REFERENCIAL

#### 2.1 Antecedentes

Según Iglesias, Estrela y Gallart (2005) existen ya algunos estudios a nivel global sobre los impactos hidrológicos del cambio de uso del suelo o el cambio climático a escala de cuencas hidrográficas. Estos estudios en su mayoría se realizaron con modelos hidrológicos que se basan en una serie de datos de uso del suelo extraídos de imágenes satelitales (Feng et al., 2015). Terrado et al. (2014) analizaron la vulnerabilidad de los servicios de los ecosistemas bajo escenarios de cambio climático en los últimos años de sequía y humedad en la Cuenca del Llobregat en España para lo cual utilizaron la herramienta de Evaluación Integrada de Servicios y Compensaciones de los Ecosistemas (InVEST). Esta cuenca presenta peligro en cuanto al abastecimiento de agua ya que se encuentra afectada por condiciones climáticas extremas. El estudio determinó que los servicios hidrológicos prestados por cuencas semiáridas son altamente sensibles a cambios extremos en el clima.

Otras cuencas Mediterráneas también han sido estudiadas, por ejemplo Boithias et al. (2014) determinaron el valor del agua bajo cambios climáticos y antropogénicos en la cuenca del Ebro utilizando InVEST. El análisis se basó en la relación suministro y demanda de agua para valorar el servicio de abastecimiento considerando diferentes escalas espaciales. Se ha evaluado también los servicios ecosistémicos en otros países por ejemplo la cuenca Baiyangdian en China que es una zona altamente poblada y con problemas de escasez de agua y contaminación. Bai et al. (2012) modelaron la influencia de algunos escenarios de uso de suelo (sin expansión urbana, expansión agrícola, expansión forestal, reforestación) en tres servicios ecosistémicos (producción agrícola, producción hidroeléctrica y calidad de agua), lo cual ha proporcionado una línea base para que China se convierta en un estado más sostenible.

La Cuenca Amazónica en América del Sur es una región que provee de cuantiosos bienes y servicios ambientales y además desempeña un papel importante en la regulación del clima a escala global (Finer y Jenkins, 2012). Sin embargo los cambios relacionados a variables climáticas de precipitación y temperatura alteran la respuesta hidrológica de

la cuenca. Hasta la actualidad se han realizado estudios de modelización hidrológica basados en estos datos climáticos a escala de cuenca amazónica pero en pocas ocasiones se ha aplicado a afluentes del río Amazonas como el río Napo (Getirana et al., 2010).

En Ecuador la valoración de los servicios ecosistémicos y especialmente estudios de disponibilidad del agua han sido limitados. Son escasos los estudios publicados en revistas indexadas sobre este tema en el país. Una limitación es probablemente la baja densidad de estaciones hidrometeorológicas y consecuente insuficiente información hidrológica y climatológica así como pocos profesionales especializados en el área de hidrología, manejo de cuencas y de recursos naturales.

## **2.2 Cambios de uso de suelo y cambio climático**

Tanto la variabilidad climática (VC), producto de las fluctuaciones del clima durante períodos de tiempo cortos, como el cambio climático (CC), que se refiere a cambios en períodos de tiempo largos debidos a variabilidad natural o a actividad antrópica ejercen presión sobre los recursos hídricos (Carvajal, 2011). La variabilidad climática, especialmente los cambios en la presencia e intensidad de las precipitaciones, constituye un desafío creciente para el manejo hídrico sostenible (Medina, García y Ruiz, 2012).

Los cambios del clima se deben principalmente al desarrollo socioeconómico, con el incremento de las zonas antrópicas y cambios de uso del suelo (García, Carvajal y Jimenez, 2007). Agualimpia y Castro (2012) señalan que el impacto del calentamiento global en los recursos hídricos es por causa de la variación en el régimen hidrológico. La dinámica hidrológica en una cuenca se puede analizar con la información meteorológica e hidrológica obtenida de las estaciones de monitoreo ubicadas en distintos puntos en la cuenca para analizar su variación en el tiempo.

Los futuros cambios en la cantidad o la estacionalidad de la precipitación son difíciles de simular. Esto se debe generalmente a las incertidumbres de los modelos y su limitada capacidad para simular con precisión el ciclo hidrológico mundial, además de que las dificultades se incrementan cuando se consideran cambios regionales en una zona como

los Andes, donde la precipitación está tan fuertemente modulada por la topografía (Vuille, 2013).

El Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) señala que las actividades antropogénicas han provocado el aumento de los gases de efecto invernadero debido principalmente al crecimiento demográfico y la industria. Los efectos de estos gases tienen una incidencia directa en el sistema climático causando disminución en las temperaturas frías extremas, aumento de las temperaturas cálidas extremas, disminución o incremento en las precipitaciones en diversas zonas a nivel mundial (IPCC, 2014). Si el incremento de los gases de efecto invernadero continua podría generar un aumento de 1° C o más en la temperatura lo que ocasionaría escasez de agua en algunas zonas del planeta (Brown et al., 2015).

Se han definido 4 escenarios de emisión en el Quinto Informe del IPCC los cuales se denominan Trayectorias de Concentración Representativas (RCP). Cada RCP tiene asociada una base de datos de alta resolución espacial de emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero (Figura 1) y de usos de suelo hasta el año 2100. Esta información se basa en una combinación de modelos de diferente complejidad de la química atmosférica y del ciclo del carbono (Camino, Ruggeroni, & Hernández, 2014).

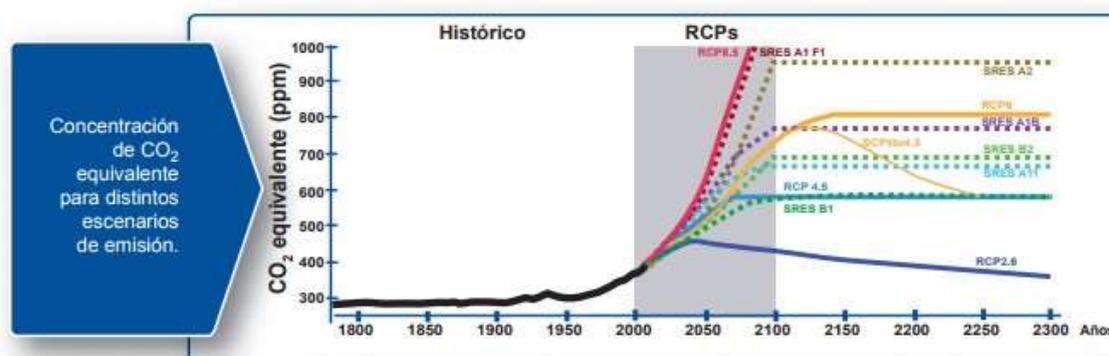


Figura 1. Escenarios cambio climático RCP. Adaptado de Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC.WGI. “Cambio Climático: Bases Físicas”, 2013.

Las emisiones continuas de gases de efecto invernadero, causan un incremento en la temperatura media de la superficie terrestre, ocasionando cambios en el sistema climático.

Estos cambios se presentarán en todas las regiones del planeta y sus efectos se observarán principalmente en el ciclo del agua. Estos cambios solo disminuirán si se reduce de manera significativa las emisiones de CO<sub>2</sub>.

### **2.3 Modelos hidrológicos**

El modelamiento hidrológico constituye una herramienta de planificación principalmente para los tomadores de decisiones en la gestión de los recursos hídricos. Estudios como el cambio de la cobertura vegetal, calidad de aire y calidad de agua permiten simular sus efectos en el futuro mediante la utilización de modelos hidrológicos (Hlásny et al., 2015). Conforme crece la importancia de los servicios de los ecosistemas, es indispensable contar con modelos que puedan proporcionar información sobre la gestión del uso del suelo y la variabilidad climática así como sus efectos en estos servicios.

Las herramientas que cuantifican los servicios ecosistémicos relacionados con el agua, tienen especial importancia ya que proveen información para un correcto manejo del agua en cuanto a provisión y abastecimiento, calidad de agua, regulación de sedimentos, entre otros (Vigerstol y Aukema, 2011). Existen dos tipos de herramientas hidrológicas, las tradicionales y las herramientas de servicios ecosistémicos específicos, las cuales poseen gran cantidad de aplicaciones siendo además gratuitas y de libre acceso (Vigerstol y Aukema, 2011).

Estas herramientas hidrológicas evalúan los impactos de los cambios del uso del suelo y los impactos del cambio climático sobre la disponibilidad de agua. Por ejemplo existen dos herramientas hidrológicas que han sido utilizadas ampliamente: SWAT y VIC (Vigerstol y Aukema, 2011). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un modelo hidrológico que necesita mucha experiencia y conocimientos hidrológicos, además de una gran cantidad de datos de entrada (diarios o semanales) que normalmente no están disponibles y la herramienta Variable Infiltration Capacity (VIC) no es aplicable para cuencas pequeñas y también necesita gran capacidad de cálculo y conocimientos hidrológicos.

En el caso de herramientas para la evaluación de servicios ecosistémicos existe el modelo Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) y Aries (Vigerstol y Aukema, 2011). InVEST es una herramienta de evaluación de servicios ecosistémicos la cual analiza diferentes escenarios de uso de suelo sobre cuencas relativamente grandes. Este modelo ha sido usado en algunas partes del mundo como Hawaii y Colombia (Vigerstol y Aukema, 2011) sin embargo una de las limitaciones es que no considera la variabilidad estacional. InVEST necesita del análisis en SIG para ejecutar los modelos (Bagsta et al., 2013). InVEST ha sido ampliamente aceptada por la comunidad científica ya que sus estimaciones son bastante acertadas. Por su parte Aries requiere un mínimo número de datos de entrada y se recomienda para estudios breves y que no necesitan de experiencia en hidrología.

#### **2.4 Integrated Valuation of Ecosystem Services an Tradeoffs (InVEST)**

InVEST ha sido desarrollado por “The Natural Capital Project” diseñado para cuantificar y mapear el valor de los servicios del ecosistema que se presentan en un escenario actual o futuro (Sharp et al., 2016). Actualmente los servicios que modela InVEST son la regulación del clima, el suministro de agua para la hidroelectricidad o el riego, el control de la erosión, el control de la calidad del agua para el cumplimiento normativo, la recreación y el turismo, el suministro de polinización nativa para cultivos agrícolas comerciales, la producción agrícola, la producción maderera, la producción de productos forestales no madereros, el suministro de valores culturales y los valores no utilizados (Tallisa y Polasky, 2009).

El modelo InVEST utiliza mapas como fuentes de información mientras que los resultados se muestran en términos biofísicos (Figura 2); por ejemplo, toneladas de sedimento retenido o porcentaje de cambio en la retención de sedimentos o términos económicos como el costo de tratamiento del agua afectada por la carga de sedimento. La extensión de los análisis es amplia, desde la escala local, regional y global y la información proporcionada permite crear nuevos escenarios hasta identificar las soluciones adecuadas para la gestión (Sharp et al., 2016).

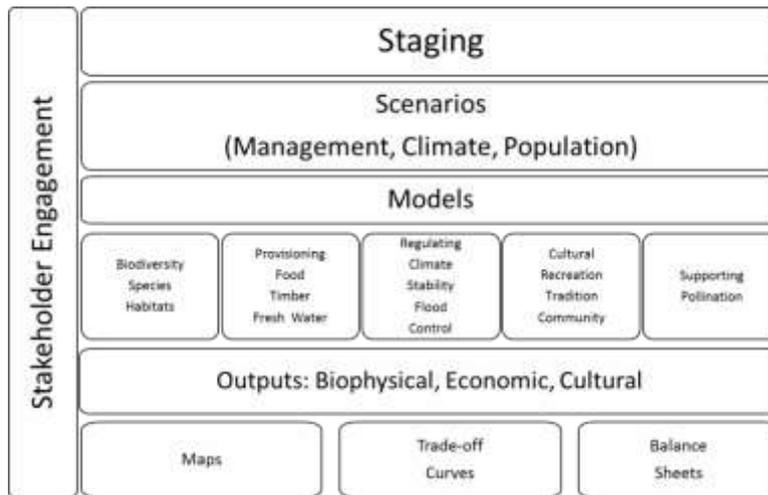


Figura 2. Procedimiento Invest. Adaptado de: “*Mapping and Valuing Ecosystem Services as an Approach for Conservation and Natural-Resource Management.*”, p. 265-283, por Tallisa y Polasky. 2009, Annals of the New York Academy of Science

Cada modelo de servicio ecosistémico utiliza los patrones de uso del suelo y cobertura del suelo (LULC) como insumos para predecir la biodiversidad y la producción de los servicios de los ecosistemas. El cambio climático y el crecimiento de la población humana sin duda cambiarán los patrones LULC y las condiciones climáticas en el futuro. Se pueden construir escenarios para incluir estos factores de cambio además de las prácticas de gestión (Tallisa y Polasky, 2009).

## 2.5 Curva de Budyko

Uno de los retos de la hidrología es predecir el efecto de los cambios del uso del suelo, tales como la forestación, agricultura sobre el fraccionamiento de la precipitación en evapotranspiración y escorrentía (Gaspari et al., 2015). Algunos modelos se han desarrollado para estimar la evapotranspiración anual sin embargo no han considerado los efectos de las características del suelo y de la cuenca. Zhang *et al.*, (2004) desarrollaron un modelo de la distribución de la evapotranspiración del balance de agua  $AET / P$  que es una aproximación de la curva de Budyko. La evapotranspiración es el resultado de complejas interacciones entre la atmósfera, el suelo y la vegetación y se expresa como:

$$\frac{R}{\omega} = \frac{1 + R * \omega}{1 + R * \omega + \frac{1}{\omega}} \quad (1)$$

Donde R es el índice de sequedad adimensional de Budyko, y  $\omega$  es una fracción adimensional de almacenamiento de agua disponible para la planta. El índice de Budyko R muestra los píxeles que son potencialmente áridos cuando los valores de R son mayores a uno:

$$R = \frac{\omega * ETo}{Z} \quad (2)$$

Donde ETo es la evapotranspiración de referencia por píxel y k es el coeficiente de evapotranspiración de la planta por cobertura de suelo. Por su parte  $\omega$  caracteriza las propiedades climáticas del suelo. El contenido de agua disponible para la planta (AWC) es determinado por la textura del suelo, profundidad efectiva y profundidad de la raíz. El factor Z hace referencia a la distribución de la precipitación, así en zonas con lluvias de invierno se espera un valor de aproximadamente diez, y zonas húmedas con lluvias distribuidas durante el año se espera valores de uno.

$$R = \omega * \frac{AWC}{Z} \quad (3)$$

La información del uso consuntivo del agua en las zonas de estudio es vital para complementar el análisis del balance hídrico. InVEST define esta demanda de agua de consumo (WD) para cada clase de uso del suelo (Boithias et al., 2014).

## CAPITULO III

### 3 MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio comprende la cuenca del río Napo en la Amazonía del Ecuador que se extiende desde la cima del volcán Cotopaxi a 5897 metros de altitud hasta el inicio del río en la amazonía peruana a 100 m.s.n.m (Mainville et al., 2006). En Ecuador la cuenca del Napo cubre un área de 59580,98 km<sup>2</sup> de la parte oriental del país (Laraque et al., 2009). Se caracteriza por presentar un clima cálido muy húmedo con temperaturas promedio de 24°C (Laraque et al., 2009) y patrones de precipitación que pueden alcanzar los 5000 a 8000 mm al año (Mainville et al., 2006). No existe una clara distinción entre las estaciones húmeda y seca y los niveles de agua pueden cambiar de un día para otro (Webb et al., 2004).

La vegetación por debajo de los 500 m de altitud se compone de un ecosistema forestal de bosque lluvioso mesotérmico y macrotérmico que corresponde al 82% del área, el resto de superficie está constituido por la cordillera andina (Laraque et al., 2009). Sin embargo en los últimos años ha incrementado los pastos, tierras agrícolas y vegetación secundaria, en la cuenca del río Napo (Suarez et al., 2009) En el Anexo 1, Mapa 1 se puede visualizar la ubicación del área de estudio.

Es una zona con abundantes recursos hídricos por lo que actualmente existe una megarepresa en la Amazonía andina de Ecuador (Coca Codo Sinclair), pero existen planes para construir 17 represas adicionales. La gran mayoría de las represas planificadas (84%) se encuentran por encima de los 500m de altura, la altura promedio donde inician las faldas de los Andes (Finer y Jenkins, 2012).

#### 3.2 Tipo de investigación

La presente investigación se enmarca en el concepto de investigación aplicada, experimental y diacrónica.

### **3.3 Métodos de investigación**

El método aplicado es el sistémico, debido a que se enfoca en modelar el objeto en base al análisis de todos los elementos que conforman el sistema y las relaciones que se producen entre ellos, de esta manera se estudia la dinámica del conjunto.

### **3.4 Procedimiento**

La metodología utilizada para estimar la cantidad media anual de agua producida por la cuenca alta del río Napo se basa en la utilización del modelo InVEST submodelo disponibilidad de agua (Water yield). Se usa esta herramienta de evaluación de servicios ecosistémicos ya que no requiere de un extenso número de datos de entrada diarios o semanales que para la zona de estudio no están disponibles. Además es aplicable para cuencas relativamente grandes y ha sido aceptado ampliamente por la comunidad científica.

#### **3.4.1 Delimitación del área de estudio**

Las subcuencas del Río Napo se delimitaron usando el modelo digital de elevación con resolución de 30 metros obtenido del Instituto Geográfico Militar (IGM) para crear los raster de dirección de flujo y acumulación de flujo; y utilizando la herramienta WATERSHED de ArcGIS se crearon los shapefiles de las subcuencas en las cuales se corrió el modelo InVEST.

#### **3.4.2 Recolección de datos**

Los datos espaciales correspondientes a uso de suelo, datos históricos de clima, datos hidrológicos para la cuenca del Río Napo se recolectaron de distintas fuentes de información y fueron preparados para su ingreso en el modelo InVEST. Los datos de ingreso al modelo y la fuente se muestran en la Tabla 1:

**Tabla 1.***Datos de ingreso para InVEST*

<b>Datos de entrada</b>	<b>Fuente</b>
Precipitación anual	a) Datos del proyecto SO HYBAM b) Ministerio del Ambiente (Consultoría de escenarios de precipitación y temperatura para el Siglo XXI)
Evapotranspiración referencial anual	a) Derivado del Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer MODIS. b) Calculado de evapotranspiración basado en datos de la temperatura de la superficie terrestre
Temperatura de la superficie terrestre	a) Datos de INAMHI (2001 a 2009)
Cobertura presente (año 2014)	a) Ministerio de Agricultura (MAG) b) Ministerio del Ambiente (MAE)
Modelos futuros de cobertura del uso del suelo para los años 2020, 2050 y 2100	a) WCS-Ecuador
Mapa de tipo de suelos	Ministerio de Agricultura, (MAG)
Agua disponible para las plantas	Derivado del mapa de suelos dependiendo de las características físicas del tipo de suelo como textura y porosidad.
Profundidad de las raíces	Derivado de publicaciones, del tipo de suelo y del mapa de cobertura vegetal.
Modelo de elevación digital	Instituto Geográfico Militar (IGM, 2015) con una resolución de 30 metros
Subcuencas	Se definen subcuencas a partir del modelo digital de elevación en formato shapefile
Datos de caudales del Río Napo	Anuarios hidrológicos INAMHI

### 3.4.3 Preparación de datos para ingreso al modelo

Para la preparación de los datos recolectados se utilizó el software ArcGIS con el fin de disponer de imágenes en formato Raster y en formato Shapefile según requiere el modelo InVEST (Sharp *et al.*, 2016).

#### **-Precipitación anual**

Se utilizaron los datos de precipitación del proyecto HYBAM (<http://www.orehybam.org/>) que se ha encargado del estudio de los regímenes hidrológicos, sedimentarios y geoquímicos de los ríos de la cuenca Amazónica del Perú. Se realizó un análisis de tendencia pluvial para el periodo de 1980 a 2009 en 12 estaciones meteorológicas dentro de la Cuenca del Río Napo. Las estaciones estudiadas se presentan en la Tabla 2:

**Tabla 2.**

*Estaciones meteorológicas*

Estación	Coordenada x	Coordenada y	Zona	Observaciones
ORE.4.25	778276.732	9944681.36	17	
ORE.5.24	221807.573	9834043.8	18	
ORE.5.25	221723.268	9944681.36	18	
ORE.6.24	333118.635	9834145.55	18	
ORE.6.25	333068.104	9944715.29	18	
ORE.7.24	444378.557	9834196.39	18	
ORE.7.25	444361.722	9944732.24	18	
ORE.8.23	555587.777	9723659.53	18	Perú
ORE.8.24	555621.443	9834196.39	18	Perú
ORE.9.22	666628.784	9613002.61	18	Perú
ORE.9.23	666780.318	9723574.87	18	
ORE.10.22	777771.026	9612765.65	18	

La precipitación total anual de cada estación se obtuvo del análisis y la sumatoria de las precipitaciones mensuales de cada año. Estos datos fueron interpolados utilizando la herramienta SPLINE de ArcGIS con lo cual se obtuvo el mapa de precipitación total anual (mm) en formato raster para el área de estudio.

### **-Evapotranspiración anual:**

Las imágenes originales se descargaron de MODIS para los años 2000 al 2014 en mm/año. Se obtuvo el mapa de evapotranspiración anual utilizando el RASTER CALCULATOR o álgebra de mapas de ArcGIS en donde se promedió los raster en unidades de mm/año.

### **-Cobertura del suelo**

El mapa de uso de uso y cobertura del suelo se obtuvo del Ministerio de Agricultura para el año 2014 a escala 1:100000. El mapa en formato vectorial se cortó para el área de estudio y se convirtió a formato raster. Las coberturas identificadas para el área de estudio se muestran en la tabla 3:

**Tabla 3.**

*Cobertura del suelo*

<b>Cobertura Nivel II</b>	<b>Características</b>
<b>Bosque nativo</b>	Formación vegetal con dominio de árboles nativos, edades y tamaños.
<b>Vegetación arbustiva</b>	Zonas compuestas por especies leñosas nativas no arbóreas.
<b>Páramo</b>	Vegetación alto andina caracterizada por especies no arbóreas que presentan fragmentos de bosque nativo propios de la zona.
<b>Vegetación herbácea</b>	Zonas compuestas por especies herbáceas nativas con crecimiento espontáneo
<b>Cuerpo agua natural</b>	Área cubierta de agua en movimiento o estática
<b>Área poblada</b>	Asentamiento humano
<b>Infraestructura</b>	Base material de los asentamientos humanos
<b>Área sin cobertura vegetal</b>	Zonas sin vegetación, afloramientos rocosos.
<b>Glaciar</b>	Glaciares
<b>Cultivo anual</b>	Suelo destinado a cultivos agrícolas, con ciclos estacionales
<b>Pastizal</b>	Vegetación herbácea (gramíneas y leguminosas)

<b>Cultivo semipermanente</b>	Cultivos agrícolas con ciclo vegetativo entre uno y tres años
<b>Cultivo permanente</b>	Cultivos agrícolas con ciclo vegetativo mayor a tres años
<b>Otras tierras agrícolas</b>	Tierras en transición
<b>Mosaico agropecuario</b>	Agrupación de especies cultivadas

Nota: Tomado de Ministerio del Ambiente (2012)

#### **-Agua disponible para la planta**

El mapa de agua disponible para las plantas se obtuvo del mapa de tipos de suelos, del cual se derivó los atributos morfo-edafológicos del terreno a escala 1:50000. Para el presente estudio se obtuvo las texturas del suelo conforme a los códigos asignados según la metodología del (MAGAP, 2010). La textura del suelo tiene un gran efecto en la disponibilidad de agua para las plantas por lo que se utilizó la metodología de (USDA, 1998) en donde se asignaron valores entre 0 y 0.2 para establecer el porcentaje de agua disponible en el suelo (Tabla 4). El mapa generado debe estar en formato raster.

**Tabla 4.**

*Fracción de agua disponible para las plantas*

<b>Textura del suelo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Fracción de agua disponible asumido según (USDA,1998)</b>
Nieve	-	0
Afloramientos rocosos	-	0
Moderadamente gruesa	Franco arenoso (fino a grueso), franco limoso	0,13
Fina	Franco arcilloso (>35%), arcilloso, arcilloso Arenoso, arcilloso limoso	0,20
Media	Franco, limoso, franco arcilloso (<35% arcilla), franco arcillo arenoso, franco arcillo limoso	0,15
Gruesa	Arenosa (fina, media, gruesa), arenoso franco	0,05
Arena	-	0
Cuerpos agua	-	0
Poblaciones	-	0

### **-Profundidad del suelo:**

La profundidad del suelo se obtuvo a partir del mapa de suelos utilizando la metodología de MAGAP (2010) en donde se asignan valores de profundidad en centímetros según el código de cada tipo de suelo (Tabla 5). El mapa generado debe estar en formato raster.

**Tabla 5.**

*Profundidad del suelo*

<b>Código</b>	<b>Abreviatura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Profundidad (cm)</b>
<b>1</b>	S	Superficial	0-20
<b>2</b>	Pp	Poco profundo	20-50
<b>3</b>	M	Moderadamente profundo	50-100
<b>4</b>	p	Profundo	>100

Nota: Tomado de: MAGAP (2010)

### **-Tabla biofísica:**

La tabla biofísica se construyó con los atributos de cada clase de uso de suelo/cobertura (LULC) identificado, para lo cual se describió los siguientes parámetros:

- LUCODE: Código asignado para cada uso de suelo o cobertura
- LULC\_veg: Los valores deben ser 1 para los usos correspondientes a vegetación, y 0 para los otros usos de la tierra, incluyendo humedales, urbanos, cuerpos de agua, etc (Sharp, et al., 2016)
- Root\_depth: Los valores de profundidad de la raíz en milímetros debe corresponder a la profundidad a la que se produce el 90% de la biomasa de las raíces
- Kc: Coeficiente de evapotranspiración correspondiente a cada clase de uso de suelo el cual se obtuvo de la FAO.

La tabla biofísica debe estar en formato .csv para ingresarlo al modelo.

### 3.4.4 Cálculo del rendimiento anual de agua

Los datos climáticos y de uso de suelo en formato raster se ingresaron en el software InVEST y se corrió el modelo para determinar el rendimiento anual de agua (Ecuación 5) en la cuenca del Río Napo; el cual se calcula de acuerdo con Boithias *et al.*, (2014):

$$Y = \left(1 - \frac{AET}{P}\right) * P \quad (4)$$

En donde: AET es la evapotranspiración anual dado por el pixel de cada uso de suelo, P es la precipitación anual en ese pixel. El modelo se basa en la Curva de Budyko y en la precipitación media anual como se muestra en la Figura 3.

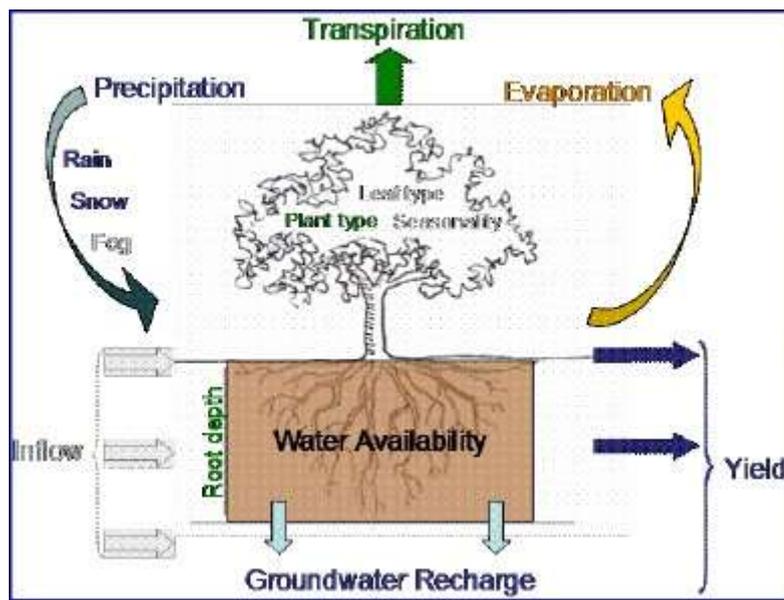


Figura 3. Diagrama del modelo de balance hídrico. Adaptado de “InVEST +VERSION+ User’s Guide”, p. 117, por Sharp, et al. 2016.

Al ejecutar el modelo de rendimiento de agua, se obtienen las siguientes salidas biofísicas:

- precip\_mn (mm): precipitación media por píxel en la cuenca.
- PET\_mn (mm): evapotranspiración media potencial por píxel en la cuenca.
- AET\_mn (mm): evapotranspiración media real por píxel en la cuenca.

- `wyield_mn` (mm): rendimiento medio de agua por píxel en la cuenca.
- `num_pixels`: Número de píxeles por cuenca.
- `wyield_vol` (m3): Volumen de producción de agua en la cuenca.

### 3.4.5 Calibración y validación del modelo

Los parámetros que se modificaron en el proceso de calibración fueron el coeficiente de Zhang y el coeficiente de evapotranspiración de la planta con el fin de ajustar los valores modelados. Se comparó el rendimiento de agua anual observado en 4 estaciones de medición instaladas por el proyecto SO HYBAM en la cuenca del Río Napo con el rendimiento anual simulado obtenido de sumar la producción de agua de las subcuencas aguas arriba de la estación hidrológica. Se contó con datos de caudales diarios para cada estación desde el año 2001 al 2013. Los datos diarios de caudal disponibles en las 4 estaciones de medición se calcularon como caudal específico (mm/año) es decir el volumen del caudal expresado por unidad de superficie al año (mm/año). En la Tabla 6 se presenta la localización de las estaciones de medición.

**Tabla 6.**

*Estaciones hidrológicas*

<b>Estación</b>	<b>Coordenada X</b>	<b>Coordenada Y</b>	<b>Zona</b>
Río Coca at San Sebastián	276641.991	9962076.64	18S
Río Napo at Nuevo Rocafuerte	455895.361	9898652.6	18S
Río Napo at Francisco de Orellana	279540.584	9947432.25	18S
Río Aguarico at Nuevo Loja	298739.36	4865.81448	18N

Las estaciones de medición hidrológica se pueden diferenciar en la Figura 4 en donde se observa que la estación de Río Napo en Nuevo Rocafuerte se encuentra en la salida de la Cuenca en el territorio Ecuatoriano. Para la validación del modelo se sumó el rendimiento de las cuencas aguas arriba (Río Coca, Río Napo en Francisco de Orellana, Río Napo en Nuevo Rocafuerte) de esta estación de medición para compararla con los datos observados

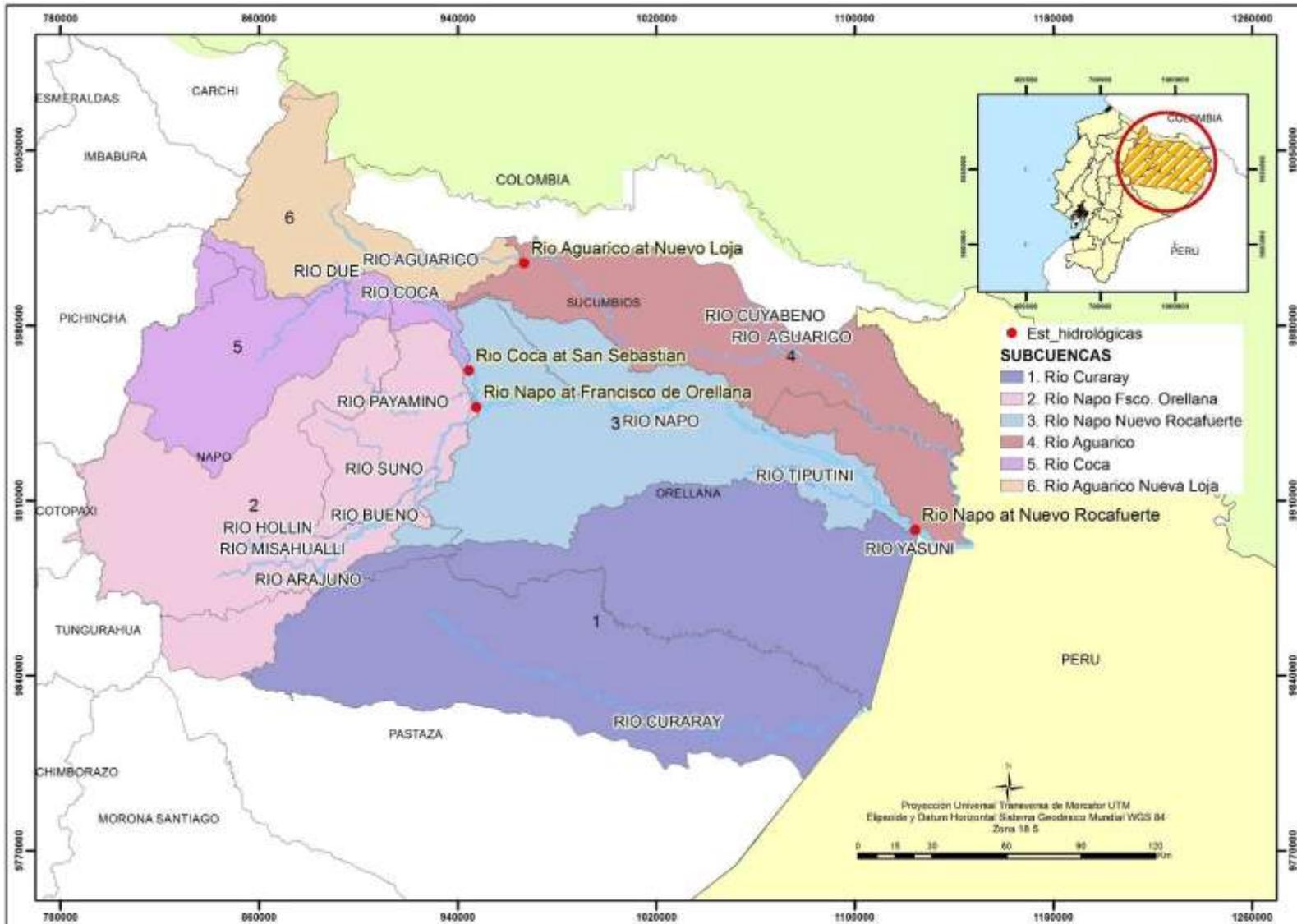


Figura 4. Ubicación de estaciones hidrológicas

Para calcular el rendimiento de agua anual observado en mm/año para cada estación hidrológica se usó la Ecuación 6, con estos resultados se pudo comparar con el rendimiento de agua modelado.

$$\frac{Q_{sm}}{Q_i} = \frac{[\left(\frac{Q_{sm}}{Q_i}\right)^3 * 1000 * 365 * 24 * 3600]}{A_{estacion}^2} \quad (5)$$

Para la validación del modelo se debe cuantificar qué tan adecuadamente el modelo describe los datos observados para los cuales fue aplicado y como es el ajuste. Se utilizó procedimientos estadísticos basados en las magnitudes de los errores. Para el presente estudio se utilizó el cálculo de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para lo cual se empleó Ecuación 7:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sm} - Q_i)^2}{n}} \quad (6)$$

En donde:

$Q_{sm}$ = Caudal simulado

$Q_i$ = Caudal observado

Mientras el resultado se aproxime a 0 quiere decir que existe un ajuste perfecto.

Se calculó además el Sesgo porcentual (BIAS) que indica la tendencia de los datos simulados de ser mayores o menores a los datos observados. Se expresa como:

$$BIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sm} - Q_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i} \right] * 100 \quad (7)$$

La Tabla 7 indica la interpretación de los valores del modelo (Moriasi, et al., 2007)

**Tabla 7.**

*Interpretación Sesgo porcentual BIAS*

<b>PBIAS</b>	<b>Interpretación modelo</b>
<b>PBIAS &lt; ±10</b>	Muy bueno
<b>±10 ≤ PBIAS &lt; ±15</b>	Bueno

$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$

Satisfactorio

$\text{PBIAS} \geq \pm 25$

No satisfactorio

Nota: Adaptado de *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*, por Moriasi, et al, 2007, Transactions of the ASABE

### 3.4.6 Cálculo de evapotranspiración mediante Thornthwaite

Se utilizó los registros de temperatura de 6 estaciones meteorológicas ubicadas dentro del área de estudio para los años 2001 al 2009. Con esta información para poder distribuir la temperatura del aire a nivel espacial se utilizó la relación entre elevación y temperatura del aire (Lapse rate). Las ecuaciones de los modelos de regresión lineal generados se ingresaron en el Raster Calculator de ArcGIS para obtener los raster de temperatura mensual para toda la cuenca usando un Modelo digital de elevación con una resolución de 30 metros. Finalmente se aplicó la fórmula Thornthwaite (1948) para cálculo de la evapotranspiración, la cual utiliza datos de temperatura media mensual de la superficie terrestre, con una corrección en función de la duración astronómica del día y el número de días del mes. La fórmula se expresa como:

$$ETP = 16 * (10 * \frac{tm}{l})^a \quad (8)$$

En donde:

ETP = evapotranspiración mensual sin ajustar en mm (mm/mes).

tm = temperatura media mensual en °C.

l = índice de calor mensual el cual se calcula como:

$$l = \left(\frac{tm}{5}\right)^{1.514}$$

a = parámetro calculado en función de "l" de acuerdo a la expresión:

$$a = 0.000000675 * l^3 - 0.0000771 * l^2 + 0.01792 * l + 0.49239$$

Y para el cálculo de la ETP de un mes determinado se corrigió la ETP sin ajustar, mediante un coeficiente que tome en cuenta el número de días del mes y horas de luz de cada día, en función de la latitud.

$$E_{\text{pot}} = L * E_{\text{pot}}$$

En donde:

L: Factor de corrección del número de días del mes y horas de sol de cada día.

Los raster de evapotranspiración obtenido por año y por subcuenca de estudio se compararon con los raster obtenidos con MODIS y se calculó el coeficiente de determinación con el fin de determinar el ajuste entre ambos métodos de estimación de la ETP. Finalmente se obtuvo un raster de evapotranspiración anual obtenido por el método de Thornthwaite y se corrió nuevamente el modelo; se comparó los resultados de rendimiento de agua por subcuenca con los obtenidos utilizando MODIS. Este proceso se realizó con el fin de utilizar los datos de ETP en función de los datos disponibles de temperatura para los modelos futuros.

### **3.4.7 Análisis de la incidencia del cambio climático en el rendimiento hídrico futuro**

Los impactos del cambio climático en la hidrología varían entre las regiones y deben ser investigados con escenarios regionales de cambio climático, en este caso la cuenca del Río Napo. Se usaron las proyecciones climáticas futuras de precipitación y temperatura para el siglo 21 desarrollados por el Ministerio del Ambiente. Estos escenarios de cambio climático han sido generados por procesos de reducción de escala dinámica a partir de 4 modelos globales de circulación, los cuales fueron seleccionados ya que representan de mejor manera el clima en las zonas tropicales. La reducción de escala dinámica ha generado series de datos diarias de las variables de temperatura y precipitación para los 4 modelos. Para el presente estudio se utilizó las series del ensamble multimodelo con dos escenarios de emisión: RCP4.5 Y RCP 8.5 (IPCC, 2014) denominados escenario intermedio y pesimista respectivamente en los años 2020, 2050 y 2070. Estos escenarios son una imagen alternativa de cómo podría presentarse el futuro bajo distintas condiciones socioeconómicas, biofísicas y tecnológicas

Cada RCP (Caminos Representativos de Concentración) contiene diferentes suposiciones biofísicas y socioeconómicas así como tendencias en las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los escenarios seleccionados muestran las siguientes características:

**RCP4.5:** En este escenario, la población mundial alcanza nueve mil millones en 2065 y se reduce a 8,7 mil millones en 2100. Las emisiones de GEI llegan a su máximo alrededor del año 2040, luego comienzan a bajar hasta el año 2080, cuando se estabilizan (CIIFEN, 2014).

**RCP8.5:** Existe un alto crecimiento poblacional por lo que las emisiones y las concentraciones son altas. Se presenta una importante demanda energética y por ende emisiones de gases de efecto invernadero. En este escenario no se toman en cuenta políticas de cambio climático (CIIFEN, 2014)

Las series proyectadas de precipitación mensual en formato NetCDF se cargaron en el Software ArcGIS 10.3 utilizando la herramienta Make NetCDF Raster Layer y se sumaron para obtener el raster de precipitación anual para cada año seleccionado, y los raster de evapotranspiración futuros se obtuvieron a partir de las series de temperatura con el método de Thornthwaite indicado anteriormente.

Los escenarios de cambio climático que se utilizaron para la presente investigación son los siguientes:

- 1.- Escenario RCP45: precipitación 2020, ETP 2020, Uso de suelo 2014
- 2.- Escenario RCP45: precipitación 2050, ETP 2050, Uso de suelo 2014
- 3.- Escenario RCP45: precipitación 2070, ETP 2070, Uso de suelo 2014
- 4.- Escenario RCP85: precipitación 2020, ETP 2020, Uso de suelo 2014
- 5.- Escenario RCP85: precipitación 2050, ETP 2050, Uso de suelo 2014
- 6.- Escenario RCP85: precipitación 2070, ETP 2070, Uso de suelo 2014

Se corrió el modelo InVEST para los 6 escenarios de cambio climático para obtener el rendimiento anual de agua futuro. Los impactos hidrológicos del cambio climático se analizaron comparando los resultados de la simulación en diferentes escenarios.

### 3.4.8 Análisis de la incidencia del cambio de uso de suelo en el rendimiento hídrico futuro

Se utilizaron los escenarios futuros de cambio de cobertura de suelo para un área de 4479.30 km<sup>2</sup> que abarca las provincias de Napo, Tungurahua, Pastaza, Cotopaxi y el Parque Nacional Llanganates dentro de la cuenca del Río Napo para los años 2020, 2050 y 2100 los cuales han sido desarrollados por (Wildlife Conservation Society, 2017). Los escenarios de cambios de uso de suelo han sido elaborados en base a las tasas de deforestación, crecimiento poblacional y las proyecciones de precipitación y temperatura modeladas por el IPCC (escenarios RCP). No se dispone de escenarios de cambio de cobertura de suelo para toda la cuenca por lo que los modelos futuros se corrieron en InVEST para la zona antes descrita. Esta organización ha desarrollado 4 escenarios de cambios de uso de suelo futuros de los cuales se ha seleccionado 2 escenarios para el presente estudio.

Se seleccionó el escenario de uso de suelo correspondiente a “*cambio climático*” el cual analiza los efectos en el patrón de cultivos por el aumento de la precipitación y temperatura para combinarlo con el escenario de proyecciones de temperatura y precipitación RCP4.5 (intermedio). Mientras que el escenario de uso de suelo “*exponencial y cambio climático*” el cual describe un potencial cambio poblacional, expansión de la frontera agrícola, introducción de especies invasoras y monocultivos se combinó con el escenario climático RCP8.5 (pesimista). Se plantearon 6 escenarios futuros que combinan los cambios en el uso de suelo y las proyecciones de las variables climáticas de precipitación y evapotranspiración como se muestra en a continuación:

1. Uso suelo 2020 llanganates (*cambio climático*), escenario RCP4.5 Precipitación 2020, ETP 2020
- 2.- Uso suelo 2050 llanganates (*cambio climático*), escenario RCP45 precipitación 2050, ETP 2050
3. Uso suelo 2100 llanganates (*cambio climático*), escenario RCP45 precipitación 2070, ETP 2070
- 4.-Uso suelo 2020 llanganates (*escenario exponencial y cambio climático*), escenario RCP85 precipitación 2020, ETP 2020

5.- Uso suelo 2050 llanganates (*escenario exponencial y cambio climático*), escenario RCP85 precipitación 2050, ETP 2050

6.-Uso suelo 2100 llanganates (*escenario exponencial y cambio climático*), escenario RCP85 precipitación 2070, ETP 2070

Los datos correspondientes a cada escenario planteado se ingresaron en InVEST con el fin de determinar el rendimiento de agua futuro. Se evaluó la sensibilidad del rendimiento hídrico a los cambios de uso del suelo con el fin de identificar las actividades que ejercen más incidencia en la producción de agua en la cuenca

## CAPÍTULO IV

### 4 RESULTADOS

Las subcuencas obtenidas (Figura 5) corresponden a la división por Unidades hidrográficas Nivel 5 según la metodología de Pfafstetter (SENAGUA, 2009) a escala 1:250000 con los siguientes códigos:

- 49784 = Subcuenca 1 (Río Curaray)
- 49789= Subcuenca 2 (Río Napo Francisco de Orellana)
- 49787=Subcuenca 3 (Río Napo Nuevo Rocafuerte)
- 49786= Subcuenca 6 y 4 (Río Aguarico en Nueva Loja y Rio Aguarico)
- 49788= Subcuenca 5 (Río Coca)

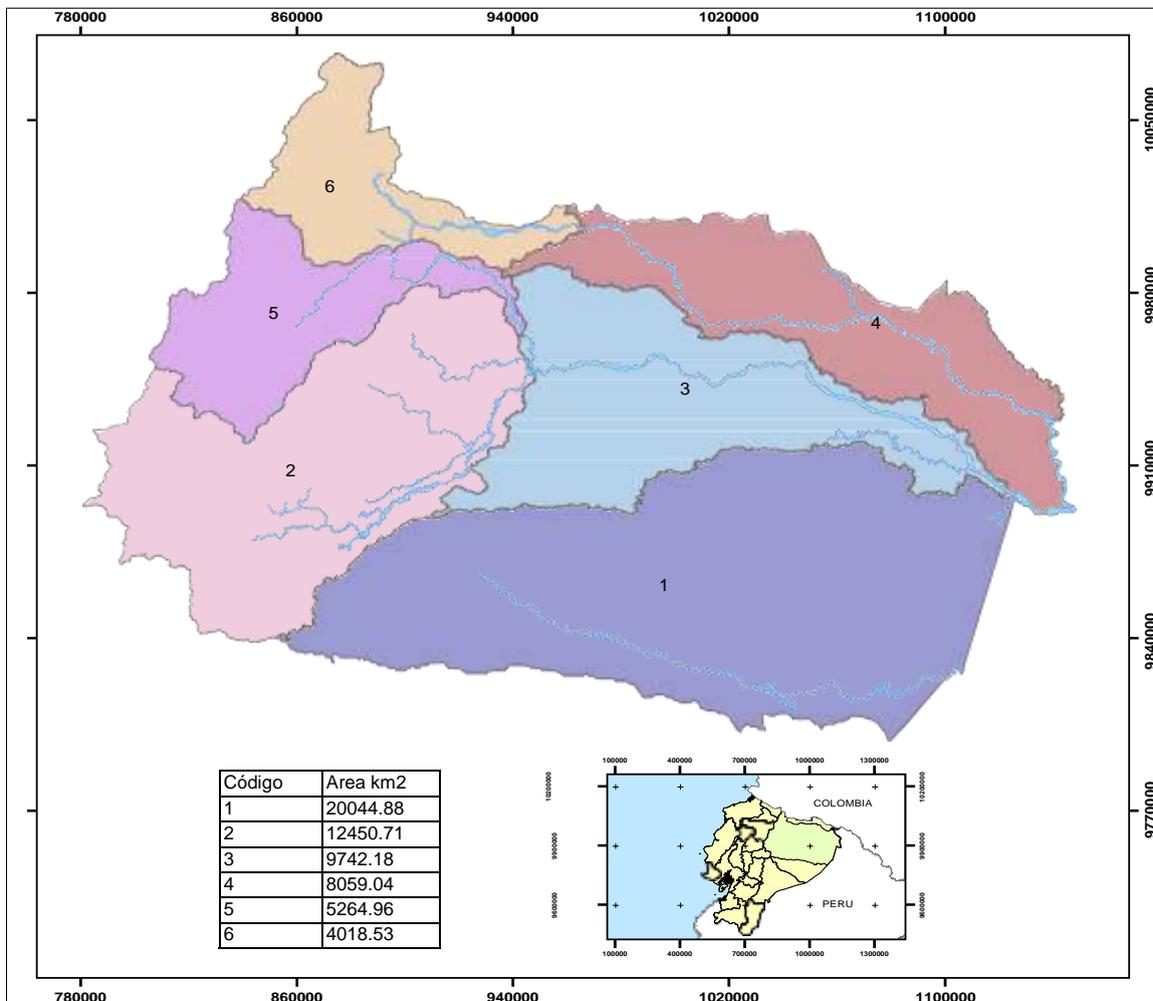


Figura 5. Subcuencas Río Napo

#### 4.1 Precipitación media anual

De acuerdo con los datos de las estaciones meteorológicas, se estima que para el área de estudio la precipitación total anual se encuentra en el rango de 1982.81 mm a 4018.1 mm (Anexo 1, Mapa 2); en la Tabla 8, se presentan la precipitación total anual para cada estación meteorológica considerada en el estudio.

**Tabla 8.**

*Precipitación media anual*

Estación	Precipitación media anual (mm)
ORE.4.25	1694.07
ORE.5.24	3645.65
ORE.5.25	3938.53
ORE.6.24	2833.01
ORE.6.25	3261.51
ORE.7.24	2736.23
ORE.7.25	2767.76
ORE.8.23	2836.92
ORE.8.24	3346.38
ORE.9.22	2818.29
ORE.9.23	2795.30
ORE.10.22	3115.55

#### 4.2 Evapotranspiración total anual

La evapotranspiración total anual para el área de estudio se encuentra en el rango de 118.48 mm a 2031 mm (Anexo 1, Mapa 3). Se presenta mayor evapotranspiración en el centro y este de la cuenca, mientras que en la zona oeste en los páramos la evapotranspiración disminuye.

#### 4.3 Cobertura del suelo

La cuenca del Río Napo en un mayor porcentaje presenta Bosque nativo (82.49%), y en la parte occidental páramos (3.99%) y pastizales (7.69%) (Tabla 9). Ver Anexo 1, Mapa 4.

**Tabla 9.***Porcentajes de uso de suelo actual*

<b>Uso de suelo</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Bosque Nativo	82.49
Vegetación arbustiva	0.11
Páramo	3.99
Vegetación herbácea	0.09
Cuerpo agua natural	1.43
Área poblada	0.18
Infraestructura	0.03
Área sin cobertura vegetal	0.12
Glaciar	0.05
Cultivo anual	0.14
Pastizal	7.69
Cultivo semi-permanente	0.17
Cultivo permanente	1.71
Otras tierras agrícolas	0.05
Mosaico agropecuario	1.75

#### 4.4 Agua disponible para las plantas

En la Tabla 10 se observa los porcentajes de cada textura de suelo y la fracción de agua disponible. Mientras la textura es más fina el agua se retiene y se encuentra disponible para las plantas, esta textura se encuentra en un 61.75 % en la cuenca. (Anexo 1, Mapa 5)

**Tabla 10.***Agua disponible para las plantas*

<b>Textura</b>	<b>Porcentaje (%)</b>	<b>AWC</b>
Nieve	0.099	0
Afloramientos rocosos	2.130	0
Moderadamente gruesa	6.223	0.13
Fina	61.752	0.20
Media	28.372	0.15
Gruesa	0.040	0.05
Arena	0.067	0
Cuerpos de agua	1.272	0
Poblaciones	0.045	0

#### 4.5 Profundidad de suelo

En la Cuenca del Río Napo se presentan suelos superficiales hasta profundos. En mayor porcentaje se encuentran suelos moderadamente profundos con un 53%. En la tabla 11 se observa las distintas profundidades del suelo y su porcentaje de ocupación en la Cuenca. (Ver Anexo 1, Mapa 6)

**Tabla 11.**

*Profundidad del suelo*

Descripción	Profundidad (mm)	Porcentaje (%)
Nieve	0	0.10
Afloramiento rocoso	0	2.12
Profundo	1000	14.79
Moderadamente profundo	750	53.08
Poco profundo	350	26.54
Superficial	100	2.01
Bancos de arena	0	0.07
Cuerpos de agua	0	1.26
Poblaciones	0	0.04

#### 4.6 Tabla biofísica

La tabla biofísica construida en donde se presentan los atributos de cada uso de suelo en la Cuenca del Río Napo se muestra en la Tabla 12.

**Tabla 12.**

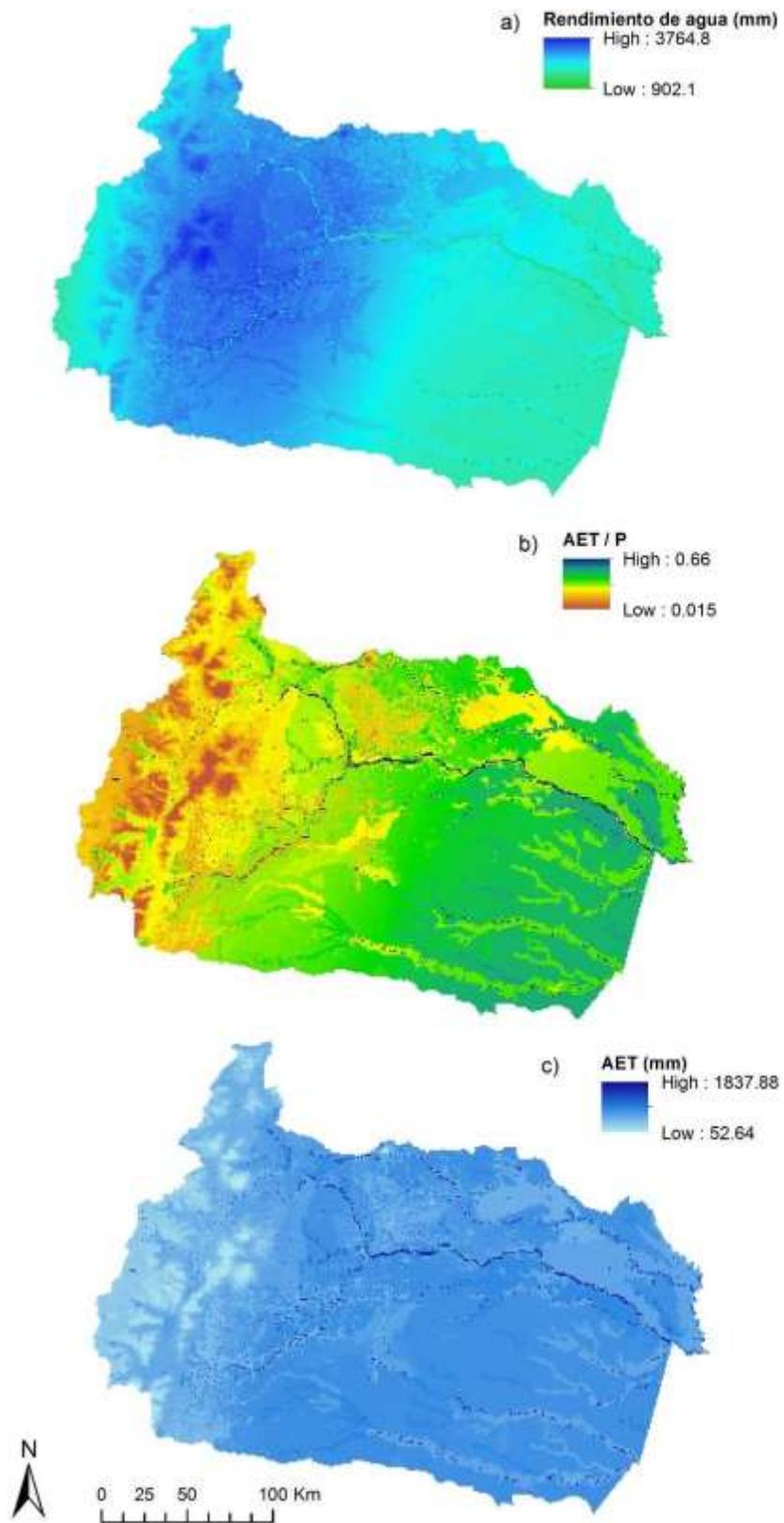
*Atributos biofísicos de los usos de suelo*

ID	Cobertura	Lucode	LULC_veg	Profundidad de la raíz (mm)	Kc
1	Bosque nativo	1	1	4133	1
2	Vegetación arbustiva	2	1	2667	0.71
3	Páramo	3	1	338	0.58
4	Vegetación herbácea	4	1	1934	0.7
5	Cuerpo agua natural	5	0	0	1.2
6	Área poblada	6	0	0	0.3
7	Infraestructura	7	0	0	0.3
8	Área sin cobertura vegetal	8	1	0	0.5

9	Glaciar	9	0	0	0.3
10	Cultivo anual	10	1	975	0.65
11	Pastizal	11	1	100	0.85
12	Cultivo semipermanente	12	1	1406	0.93
13	Cultivo permanente	13	1	1436	0.93
14	Otras tierras agrícolas	14	1	1305	1.1
15	Mosaico agropecuario	15	1	1611	1.08

#### 4.7 Rendimiento anual de agua

InVEST muestra un rendimiento anual de agua entre 902.1 y 3764.8 mm. La mayor producción de agua se presenta en la parte central-occidental de la cuenca que se explica por la alta precipitación media anual que se registra en la zona (3500 a 4010 mm). La fracción media de precipitación que realmente evapotranspira se encuentra en el rango de 0.015 en la parte occidental de la cuenca aumentando en la parte oriental hasta 0.66, esto quiere decir que en esta zona existe un mejor balance entre la evapotranspiración y la precipitación (Figura 6). Poveda (2011) señala que la relación que existe entre las tasas de evapotranspiración y de precipitación en la Amazonía es de aproximadamente el 50%. Al Oriente de la cuenca en los bosques andinos la evapotranspiración es menor en relación a la precipitación debido a bajas temperaturas por la altitud (Doornbos, 2015).



**Figura 6.** Rendimiento de agua en la cuenca del Río Napo. a) Rendimiento de agua estimado por pixel, b) Fracción de precipitación que realmente evapotranspira, c) Evapotranspiración actual estimada por pixel

La producción o rendimiento de agua anual por celda simulada con el modelo InVEST a nivel de cuenca se muestra en la Tabla 13:

**Tabla 13.**

*Rendimiento de agua a nivel de cuenca*

<b>Factor biofísico</b>	<b>Descripción</b>
Precipitación media por pixel	3238.40 mm
PET media por pixel	1257.03 mm
AET media por pixel	683.32 mm
Rendimiento medio de agua por pixel	2527.39 mm
Número de pixeles en la cuenca	59574
Volumen de producción de agua en la cuenca	150566849847.57 m <sup>3</sup>

Los rendimientos obtenidos por subcuenca se muestran en la tabla 14:

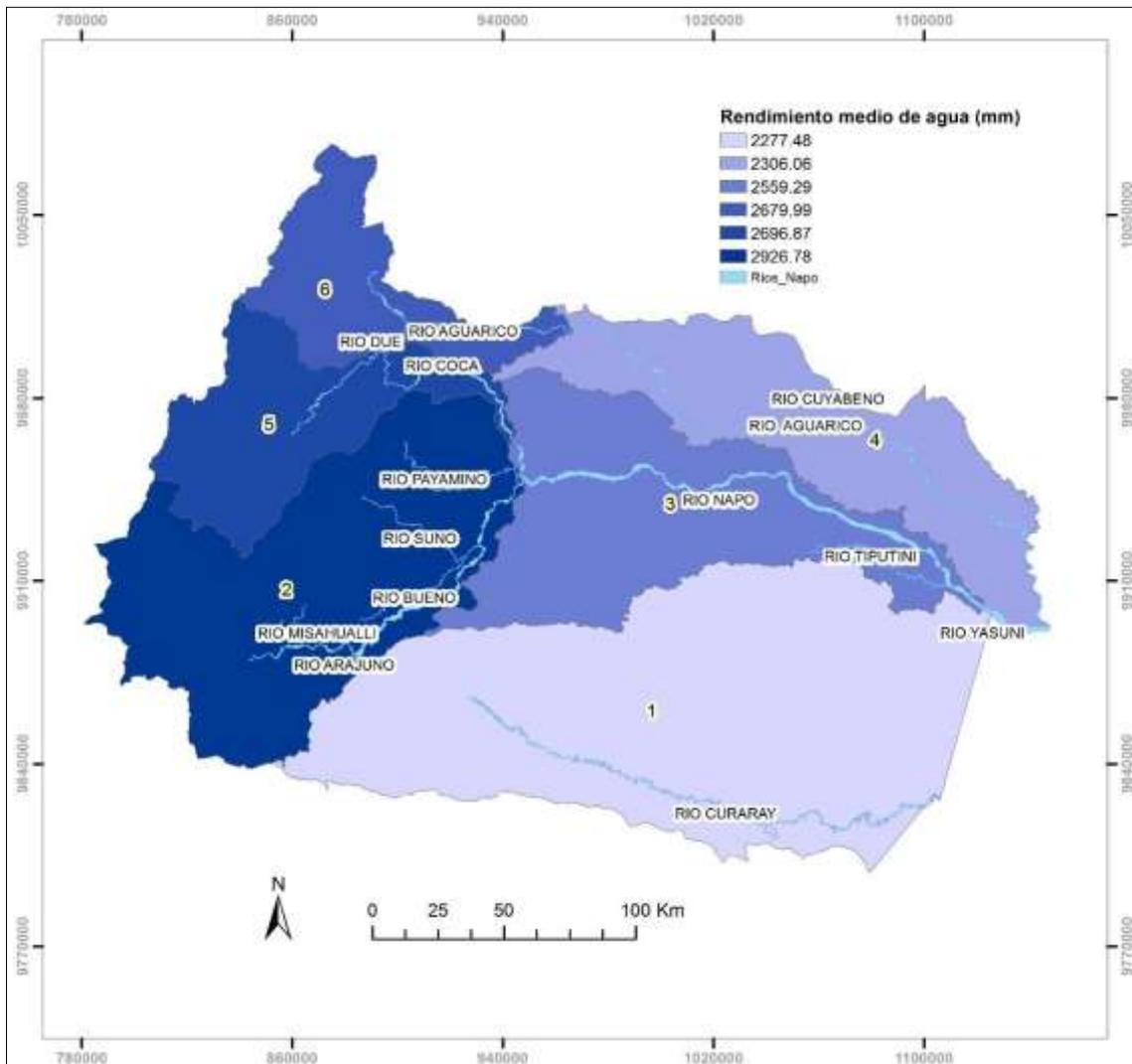
**Tabla 14.**

*Rendimiento de agua a nivel de subcuencas*

<b>Subcuenca_id</b>	<b>Subcuenca</b>	<b>Precipitación (mm)</b>	<b>ETP media (mm)</b>	<b>AET media (mm)</b>	<b>Rendimiento de agua medio (mm)</b>	<b>Rendimiento de agua (m3)</b>
<b>1.00</b>	Río Curaray	3072.56	1434.19	786.99	2277.48	45615717069.44
<b>2.00</b>	Río Napo (Francisco de Orellana)	3503.84	1057.08	574.92	2926.78	36435467490.03
<b>3.00</b>	Río Napo Nuevo Rocafuerte	3330.78	1403.15	768.71	2559.29	24953121569.47
<b>4.00</b>	Río Aguarico	3061.07	1384.90	705.75	2306.06	18584569888.06
<b>5.00</b>	Río Coca	3291.46	816.89	465.00	2696.87	14199016251.08
<b>6.00</b>	Río Aguarico (Nueva Loja)	3305.41	961.72	538.41	2680.00	10778957579.50

InVEST mostró que las subcuencas que más aportan agua son, en orden descendente: Río Napo Francisco de Orellana, Río Coca, Río Aguarico en Nueva Loja, Río Napo Nuevo Rocafuerte, Río Aguarico y Río Curaray (Figura 7). Lozano (2011) señala que es más probable que las subcuencas más grandes aporten más agua, sin embargo en la Cuenca del Río Napo el rendimiento de agua está definido por la precipitación y la evapotranspiración principalmente. Por lo tanto, se observa una mayor producción de

agua en las subcuencas ubicadas al occidente respondiendo al patrón de mayor precipitación y menor evapotranspiración en esa región de la cuenca.



**Figura 7.** Rendimiento medio de agua por subcuencas

#### 4.8 Calibración y Validación

Con el fin de utilizar los datos disponibles de caudales medidos por las estaciones instaladas por el proyecto SO-HYBAM en la salida de 4 subcuencas, se ha calculado el caudal en mm/año en las subcuencas aguas arriba de cada estación. Para el cálculo del caudal observado (mm/año) en la estación de Napo en Nuevo Rocafuerte ubicada en la salida de la Cuenca en el Ecuador se ha sumado el área en m<sup>2</sup> de las subcuencas aportantes aguas arriba con código de identificación 2,3,5 que corresponde a Río Napo (Francisco de Orellana), Río Napo (Nuevo Rocafuerte) y Río Coca respectivamente. Las subcuencas

con código 1 y 4 que corresponde a Río Curaray, Río Aguarico no se utilizaron en la validación del modelo ya que no existe una estación de medición hidrológica. En la tabla 15 se muestra los resultados obtenidos:

**Tabla 15.**

*Caudales observados y simulados por subcuenca*

<b>Estación</b>	<b>Q(mm/año) observado</b>	<b>Q(mm/año) simulado</b>	<b>Raíz Error cuadrático medio</b>	<b>Bias</b>
Río aguarico nueva Loja	4049.64	2680.00	1369.64	33.82
Río Coca San Sebastián	2180.62	2696.87	516.25	-23.67
Río Napo San Francisco	2891.80	2926.78	34.98	-1.21
Río Napo Nuevo Rocafuerte	2524.46	2527.39	2.94	-0.12

El modelo InVEST presentó predicciones desfavorables para la subcuenca del Río Aguarico en Nueva Loja, posiblemente por una sobrestimación en los valores de evapotranspiración potencial, y subestimación en la precipitación. Además esta cuenca del río Aguarico puede tener errores en las mediciones de caudales como puede existir trasvases de agua de zonas aledañas a la cuenca por lo que la determinación del área de aportación mediante la topografía no se apega a la realidad. Sin embargo el modelo se ajusta de manera “Muy buena” con respecto al periodo de referencia en la subcuenca Napo (Nuevo Rocafuerte), por lo tanto es confiable para las simulaciones de cambio climático.

#### **4.9 Evapotranspiración mediante Thornthwaite**

Se calculó un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.72 (Figura 8) entre la evapotranspiración mediante MODIS y Thornthwaite lo que explica una correlación positiva considerable. Thornthwaite subestima la evapotranspiración en la región amazónica, por lo que no fue necesario aplicar un factor de ajuste para la Evapotranspiración calculada por Thornthwaite. De esta forma, se comprueba que se puede utilizar los datos de temperatura proyectados para la estimación de la

evapotranspiración calculados por Thornthwaite en las simulaciones futuras de disponibilidad de agua bajo escenarios de cambio del clima.

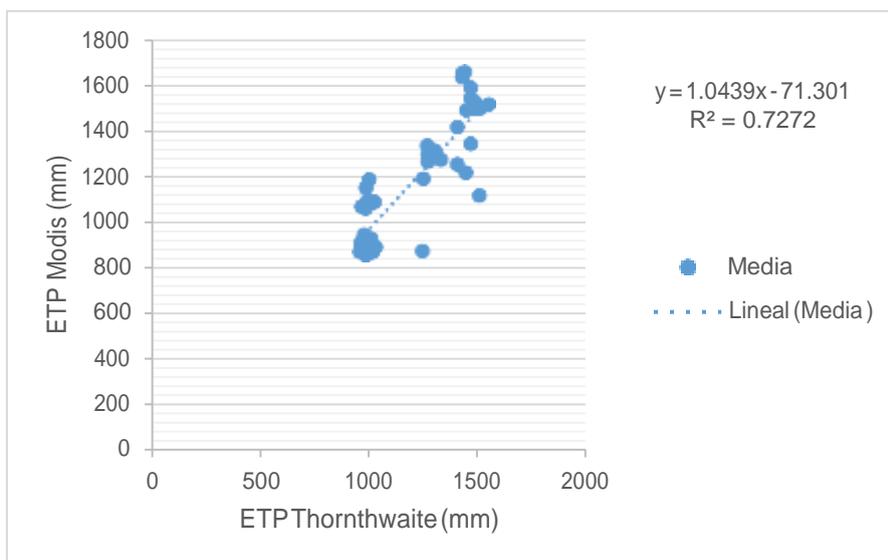
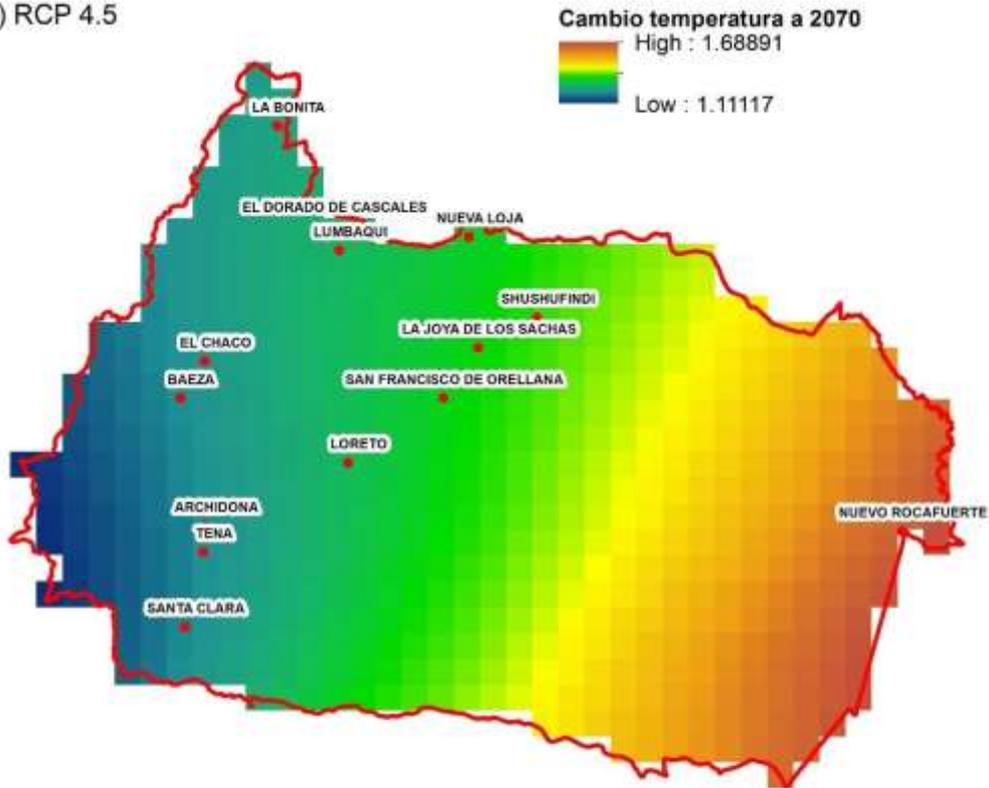


Figura 8. ETP MODIS vs ETP Thornthwaite

#### 4.10 Proyecciones de temperatura y precipitación:

El comportamiento de la temperatura y de la precipitación en la Amazonía Ecuatoriana tiene una tendencia hacia el aumento, presentándose cambios significativos en el periodo 2021 a 2050. Armenta et al., (2016) indican que para el periodo 2041-2070, los incrementos más altos de temperatura se darían en la Amazonía y en la Costa, con anomalías superiores a  $1^{\circ}\text{C}$ , e incrementos superiores a  $2^{\circ}\text{C}$  bajo el escenario RCP 8.5 en el suroccidente del país. Los cambios de las temperaturas máximas y mínimas en la Cuenca del Río Napo hasta el año 2070 en el escenario RCP 4.5 (optimista) se encuentra entre  $1.11^{\circ}\text{C}$  y  $1.69^{\circ}\text{C}$  y para el escenario RCP 8.5 (pesimista) el cambio se presenta entre  $2.45^{\circ}\text{C}$  a  $3.26^{\circ}\text{C}$  como se aprecia en la Figura 9. El aumento de la temperatura en los dos escenarios se evidencia en mayor medida al este de la cuenca y en menor medida en la parte oeste.

a) RCP 4.5



b) RCP 8.5

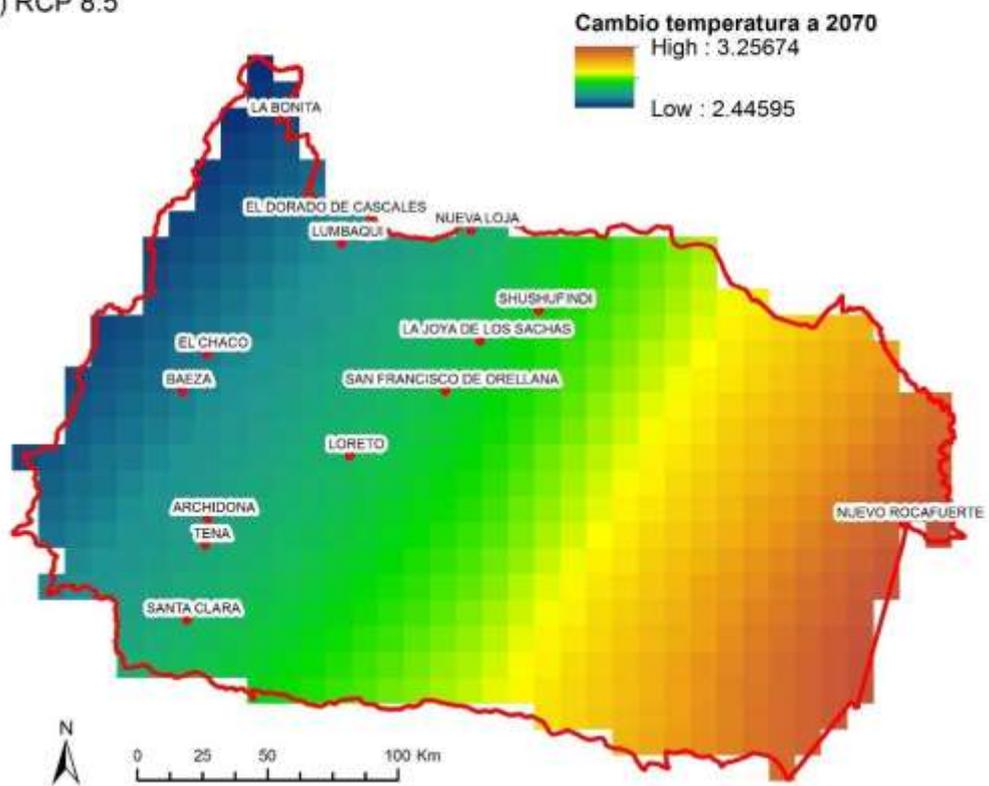
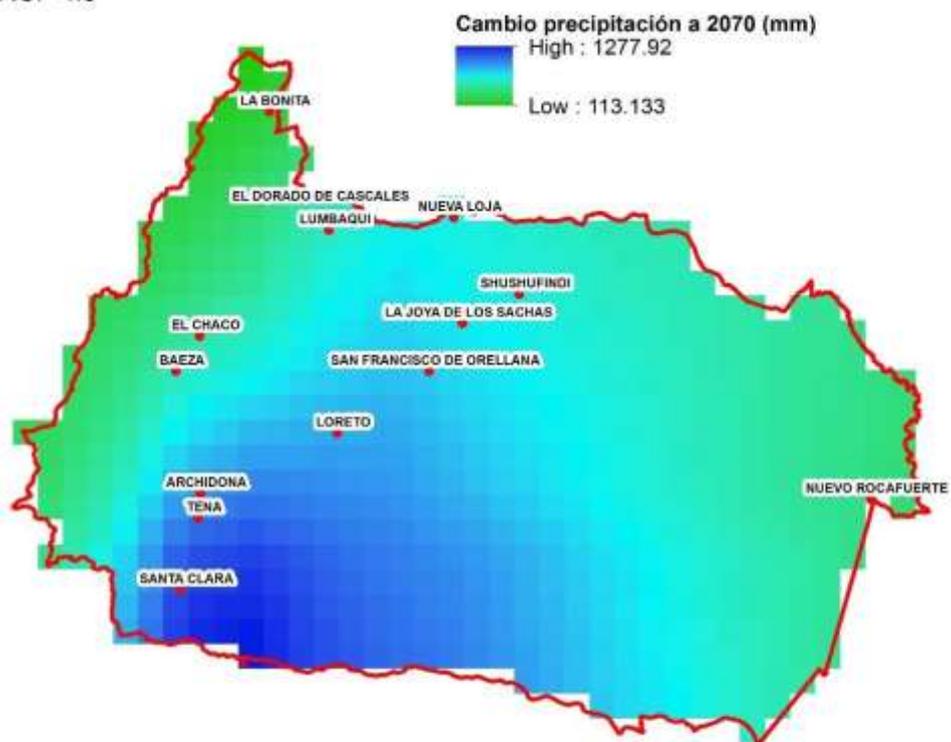


Figura 9. Cambios esperados en la temperatura (°C)

En cuanto a las proyecciones de precipitación Armenta, Villa, & Jácome (2016) señalan que a mitad de siglo, el norte de la Costa y de la Amazonía presentarían los mayores incrementos, del orden de 9-15%, siendo los más altos bajo el escenario “pesimista” (RCP 8.5), En la Cuenca del Río Napo las proyecciones de precipitación hasta el año 2070 muestran un incremento de 113 mm hasta 1277.92 mm en la zona baja para el escenario RCP 4.5 mientras que para el escenario RCP 8.5 el incremento de la precipitación es de 117.61 mm a 1465.99 mm en la zona baja (Localidades Tena, Archidona, San José, El Triunfo) (Figura 10). Los extremos de la cuenca tanto en el este en la zona de los páramos (Reserva Cayambe Coca) como en la zona fronteriza con el Perú (Sur de la Reserva Cuyabeno, Este de Yasuní) se presentan menores incrementos en la precipitación total anual.

a) RCP 4.5



b) RCP 8.5

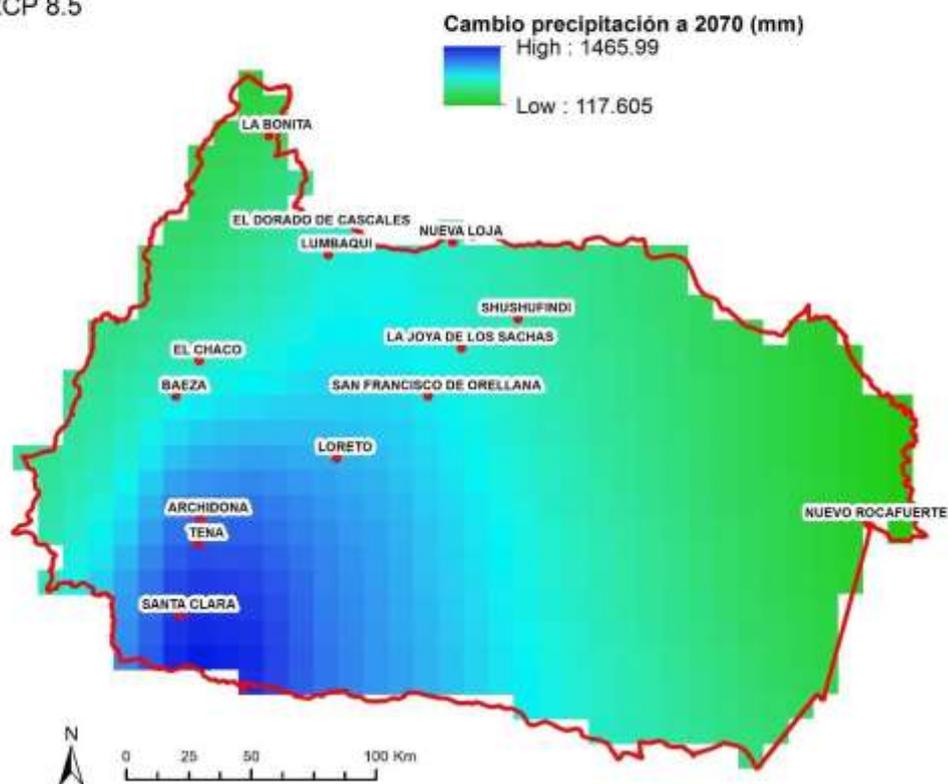


Figura 10. Cambios esperados en la precipitación total anual

#### 4.11 Rendimiento de agua bajo escenarios de cambio climático

Los resultados a nivel de cuenca hidrográfica en el escenario RCP 4.5 (intermedio) muestran un incremento considerable en la precipitación media por pixel para el año 2070. Para los años 2020 y 2050 la precipitación tiende a disminuir y la evapotranspiración aumenta por lo que el rendimiento medio anual es menor en comparación con el rendimiento actual (2527.39 mm). Para el escenario RCP 8.5 (pesimista) la precipitación y la evapotranspiración aumenta en los años 2020, 2050 y 2070 por lo que el rendimiento de agua es mayor (Tabla 16).

**Tabla 16.**

*Rendimiento medio anual escenarios cambio climático*

<b>Nro</b>	<b>Escenario</b>	<b>Precipitación media anual (mm)</b>	<b>Evapotranspiración media anual (mm)</b>	<b>Rendimiento medio anual (mm)</b>
<b>1</b>	RCP45_2020	3216.03	1519.25	2419.62
<b>2</b>	RCP45_2050	3173.71	1743.83	2307.84
<b>3</b>	RCP45_2070	3740.76	1778.74	2842.54
<b>4</b>	RCP85_2020	3328.85	1506.74	2532.69
<b>5</b>	RCP85_2050	3512.82	1818.63	2610.29
<b>6</b>	RCP85_2070	3737.1	2222.72	2713.64

En la Figura 11 se observa la distribución del rendimiento anual para el escenario RCP 4.5 (intermedio) en donde se distingue una mayor producción de agua en la zona con los patrones de precipitación más altos. Según el mapa base elaborado (Anexo 1, Mapa 1) en la zona con mayor producción de agua no se presentan áreas protegidas en donde la cobertura boscosa es mayor, por lo que las pérdidas por evapotranspiración no son altas. La zona de páramos también presenta un bajo rendimiento de agua debido a que estos ecosistemas no son productores sino almacenadores de agua (Vásconez & Hofstede, 2006).

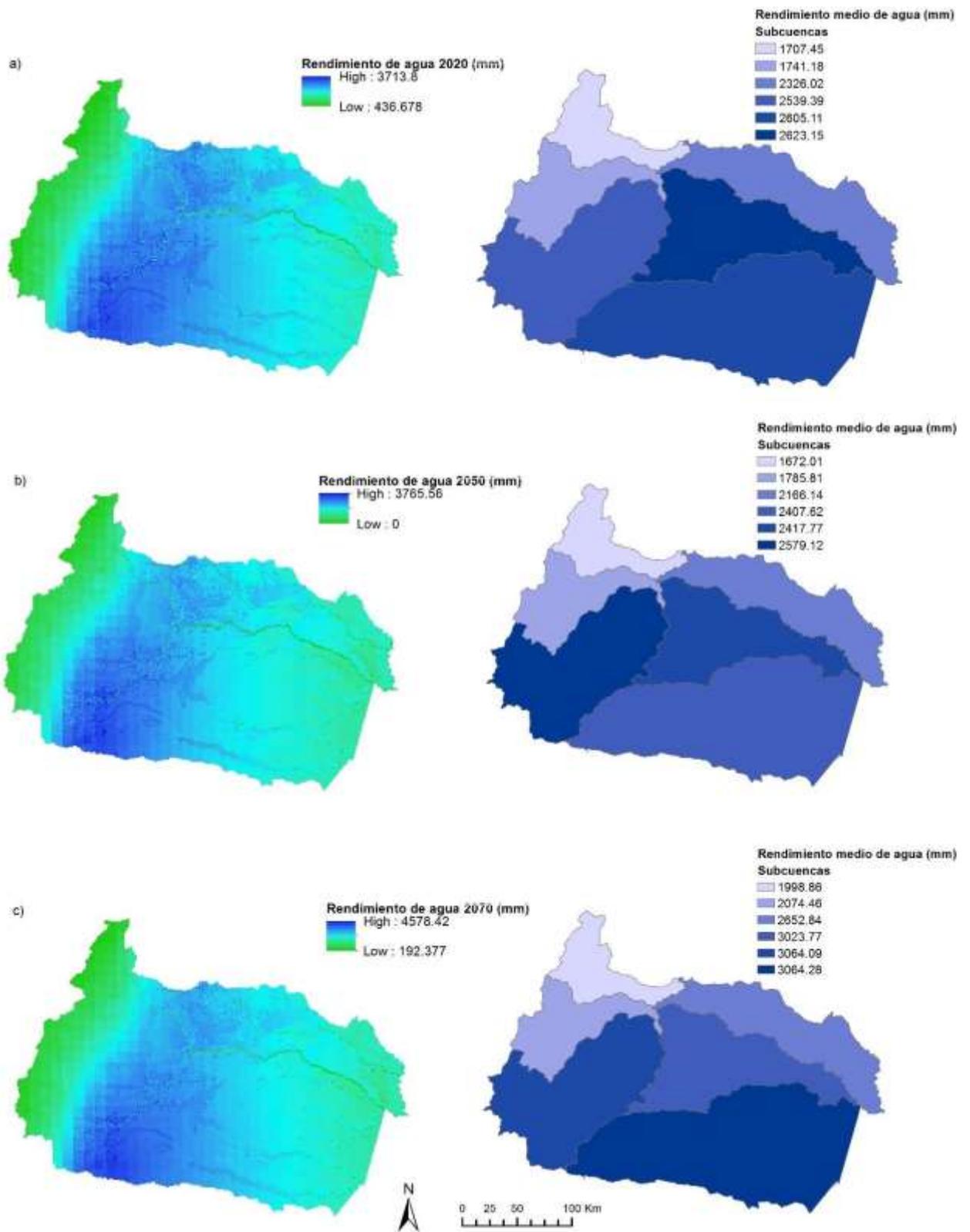


Figura 11. Rendimiento de agua a nivel de cuenca y subcuencas RCP 4.5

A nivel de subcuencas el rendimiento de agua no se distribuye de manera homogénea en los años de estudio, esto depende de la precipitación total y ETP total en cada año (Anexo 1, Mapas 2 y 3). En la Figura 12 se observa el rendimiento de agua por subcuenca bajo el escenario RCP 4.5 en donde las subcuencas con código 1, 2, 3, 4 (Río Curaray, Río Napo Francisco de Orellana, Río Napo Nuevo Rocafuerte y Río Aguarico respectivamente) presentan un incremento en la producción de agua hasta el 2070, mientras que el rendimiento de agua en las subcuencas 5 y 6 (Río Coca y Río Aguarico en Nueva Loja) disminuye hasta el año 2070. La subcuenca 1, 2 y 3 (Río Curaray, Río napo Fco de Orellana y Río Napo Nuevo Rocafuerte) es la que más aporta al rendimiento de agua de la Cuenca en territorio Ecuatoriano.

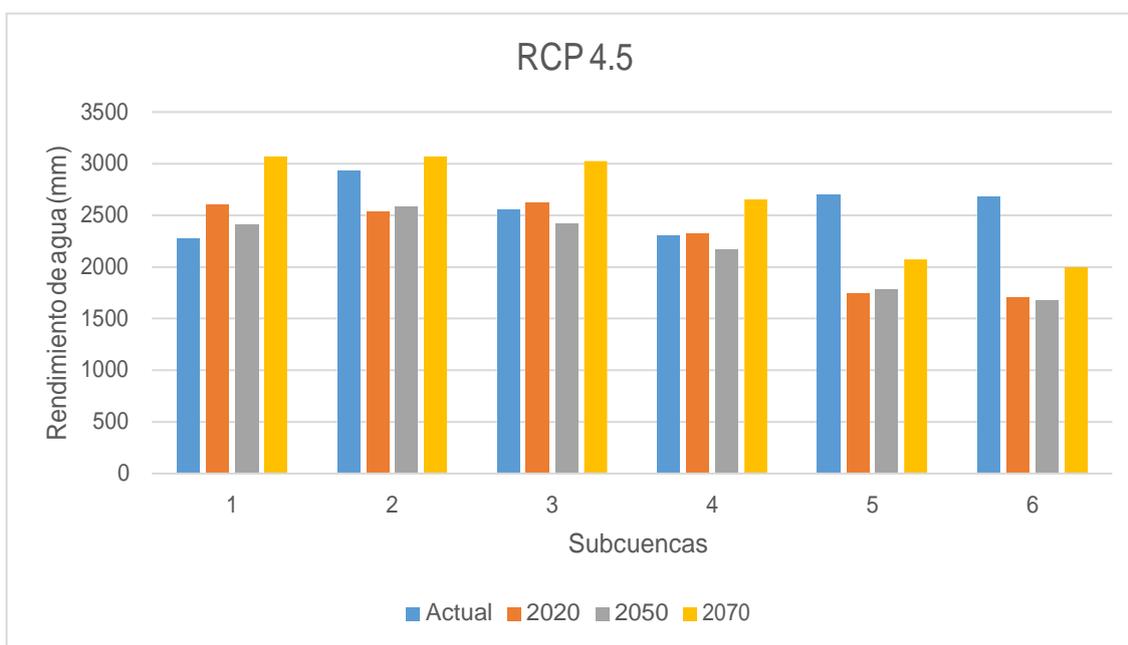


Figura 12. Rendimiento de agua por subcuenca bajo el escenario RCP 4.5

La distribución del rendimiento anual para el escenario RCP 8.5 (pesimista) se muestra en la Figura 13 en donde al igual que el escenario RCP 4.5 existe una mayor producción en la zona con los patrones de precipitación más altos y rendimientos más bajos al oeste de la cuenca. Tal como lo señala (Duarte, et al., 2006) la relación entre las variables climáticas y la hidrología es muy fuerte, siendo los cambios de la precipitación y temperatura influyentes en los recursos hídricos.

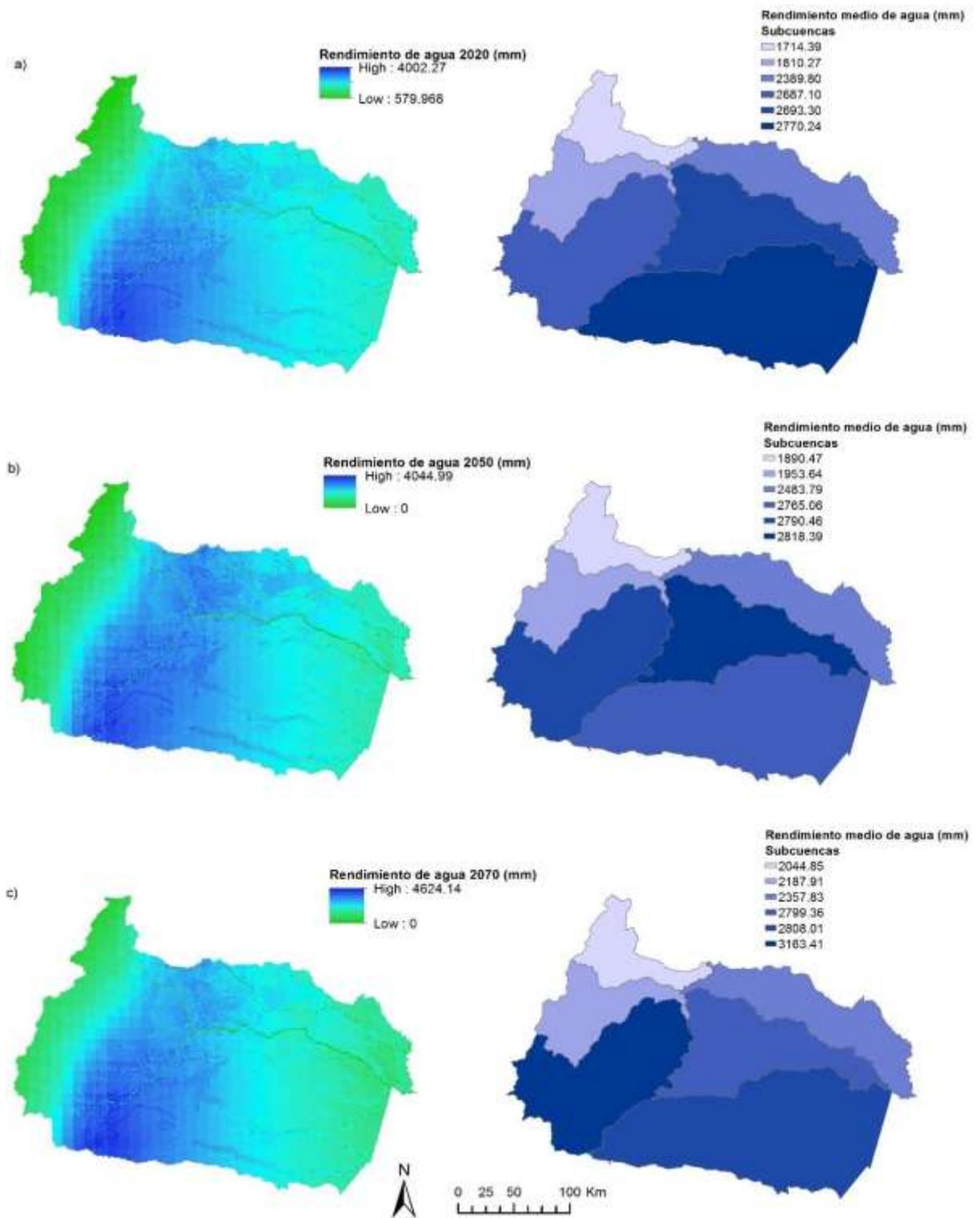


Figura 13. Rendimiento de agua a nivel de cuenca y subcuencas RCP 8.5

En el escenario RCP 8.5 la subcuenca 1 (Río Curaray) aporta a la cuenca del Río Napo en mayor cantidad para el año 2020, la subcuenca 3 (Río Napo Nuevo Rocafuerte) aporta más agua a la cuenca hasta el año 2050, mientras que para el año 2070 la subcuenca 2 (Río Napo San Francisco) es la que tiene mayor rendimiento. Al igual que el escenario RCP 4.5 las subcuencas cuyo rendimiento de agua disminuye hasta el 2070 son Río Coca y Río Aguarico en Nueva Loja. Los histogramas por subcuenca se encuentran en el Anexo 3.

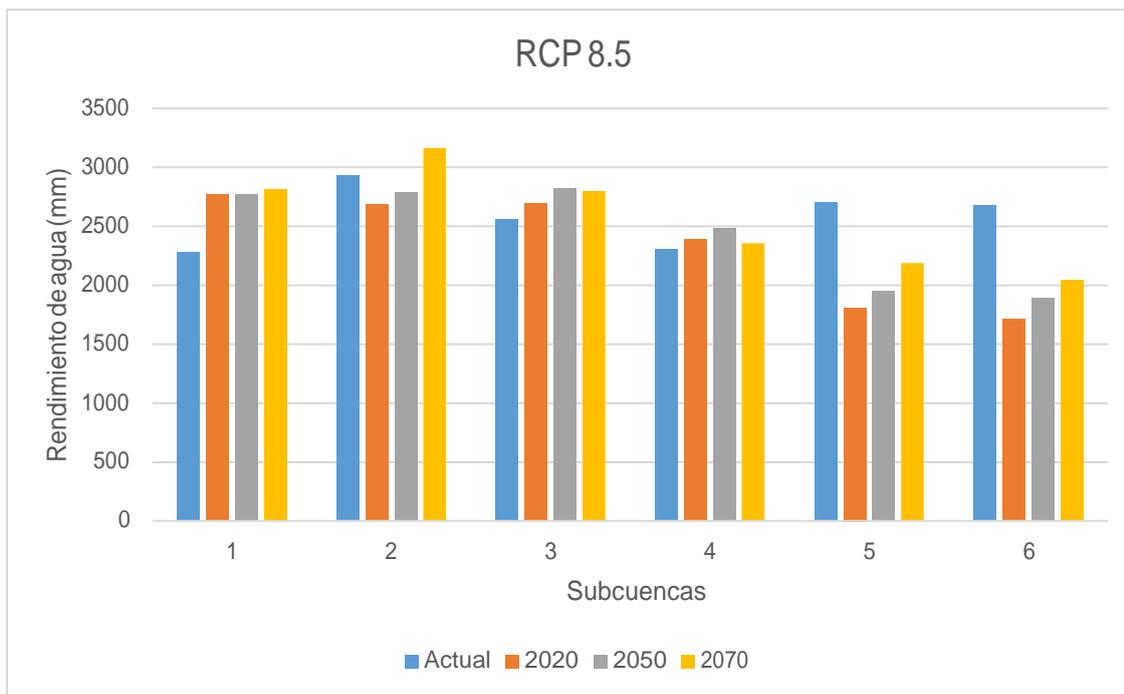


Figura 14. Rendimiento de agua por subcuenca bajo el escenario RCP 8.5

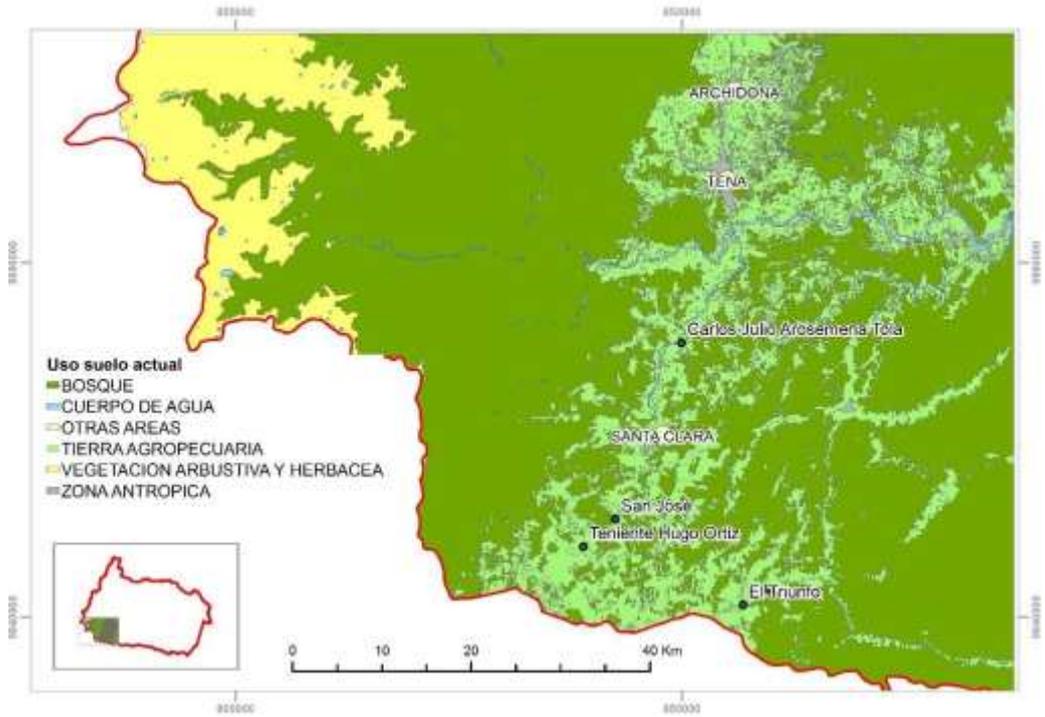
El efecto del cambio climático en los caudales, y rendimiento hídrico varía según la región y los escenarios, (García, Carvajal, & Jiménez, 2007) señalan que las precipitaciones podrían aumentar en diversas regiones lo cual incrementaría la escorrentía y la recarga de aguas subterráneas.

Hernández, Suárez, & Naranjo (2010) en su estudio relacionado a la vulnerabilidad y adaptación del cambio climático en la Cordillera Real Oriental (Colombia, Ecuador y Perú), señalan una tendencia evidente al aumento de la precipitación en la cuenca del alto Napo para los años 2030 y 2050 que se relaciona con el aumento de los caudales.

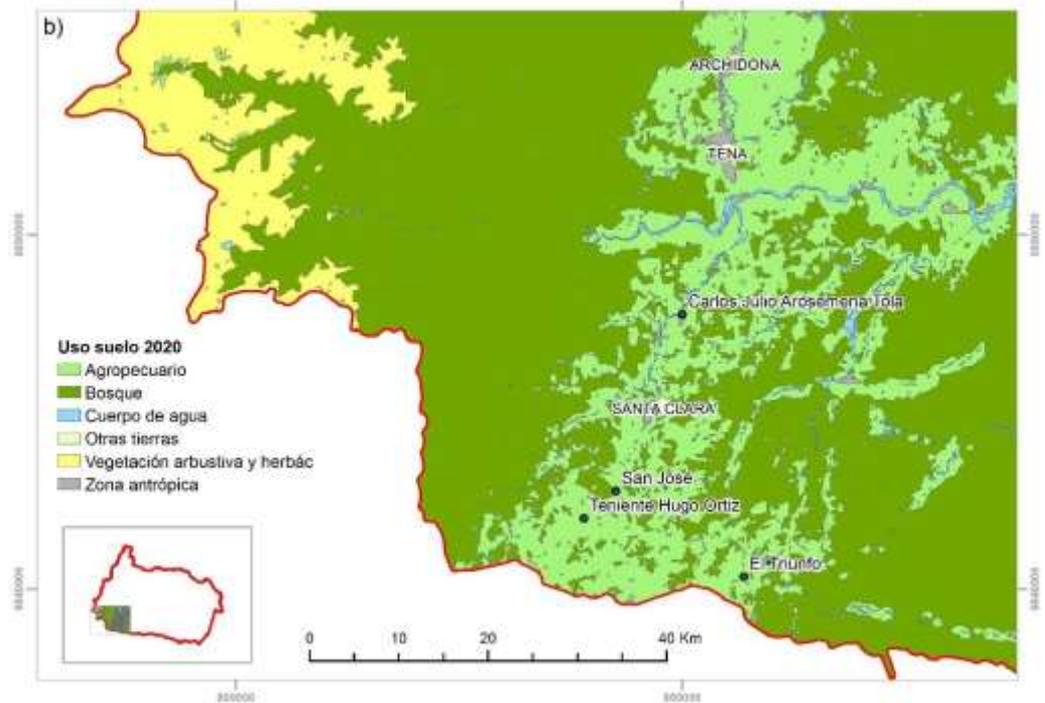
#### **4.12 Escenarios de cambios de uso de suelo**

Los escenarios de cambio de uso del suelo han sido desarrollados para identificar las zonas más vulnerables de cambio en la zona alta de la cuenca del Río Napo. Para el escenario de cambio de uso de suelo en relación al cambio climático, se evidencia la disminución de la cobertura boscosa en los años 2020, 2050 y 2100 por el avance de las zonas agrícolas con cultivos propios como pastos cultivados, cacao, maíz, plátano, plantaciones forestales, frutales, café, yuca, naranjilla, papa y el incremento de las zonas antrópicas (Figura 15). Además el aumento en las lluvias hasta el año 2070 ocasiona que las áreas degradadas (otras áreas) se incremente debido a la erosión del suelo (Wildlife Conservation Society, 2017).

a)



b)



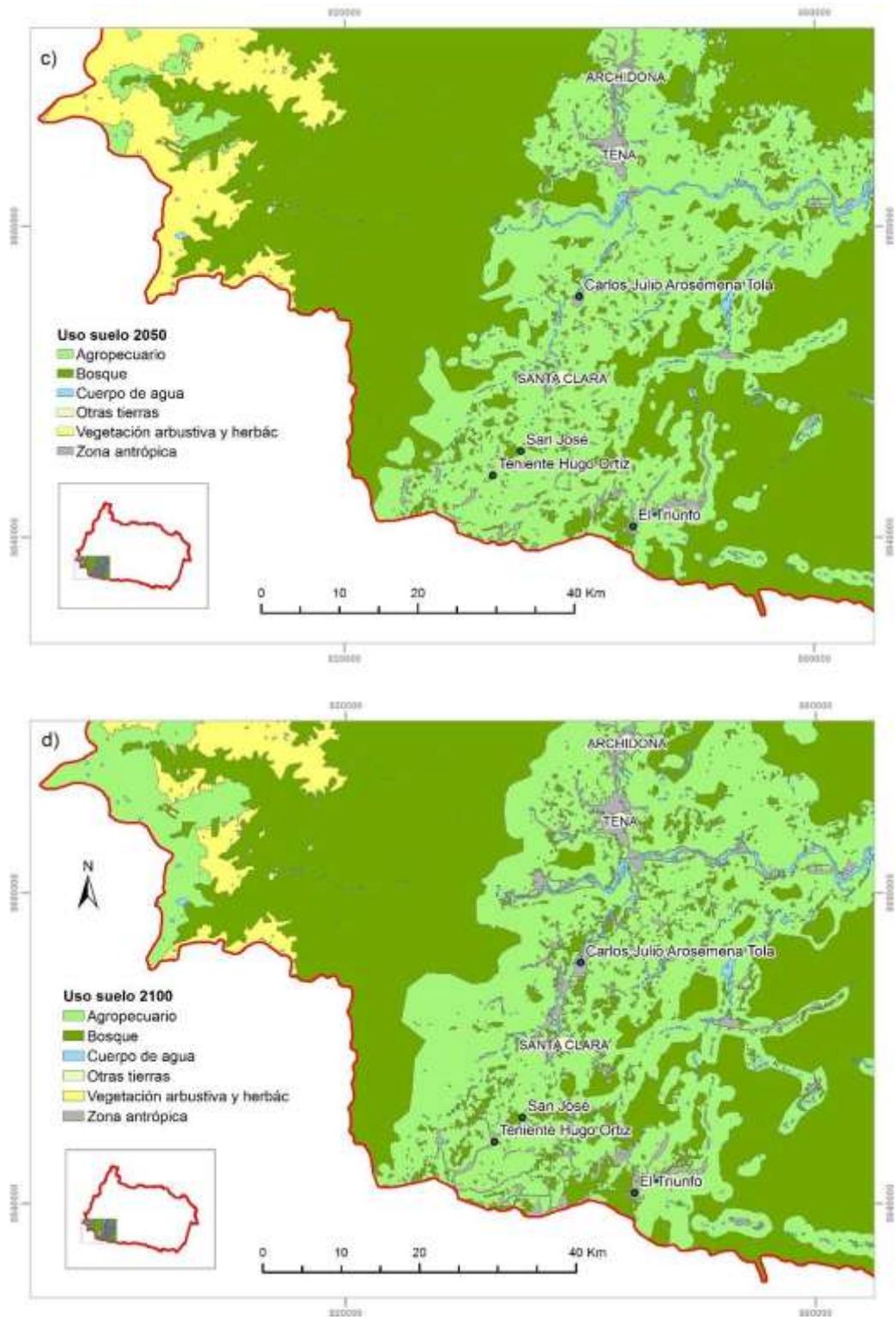


Figura 15. Cambios de uso de suelo (escenario cambio climático)

En la Figura 16 se observa los porcentajes de incremento o disminución de las coberturas para los años 2020, 2050 y 2100. Se distingue que en mayor medida existe un incremento acelerado de las zonas antrópicas en relación al actual en un 415% hasta el año 2100. Las zonas agropecuarias se incrementarán en un 100% disminuyendo la cobertura de bosque en un 29.77% y de las zonas con vegetación arbustiva y herbácea en un 48%.

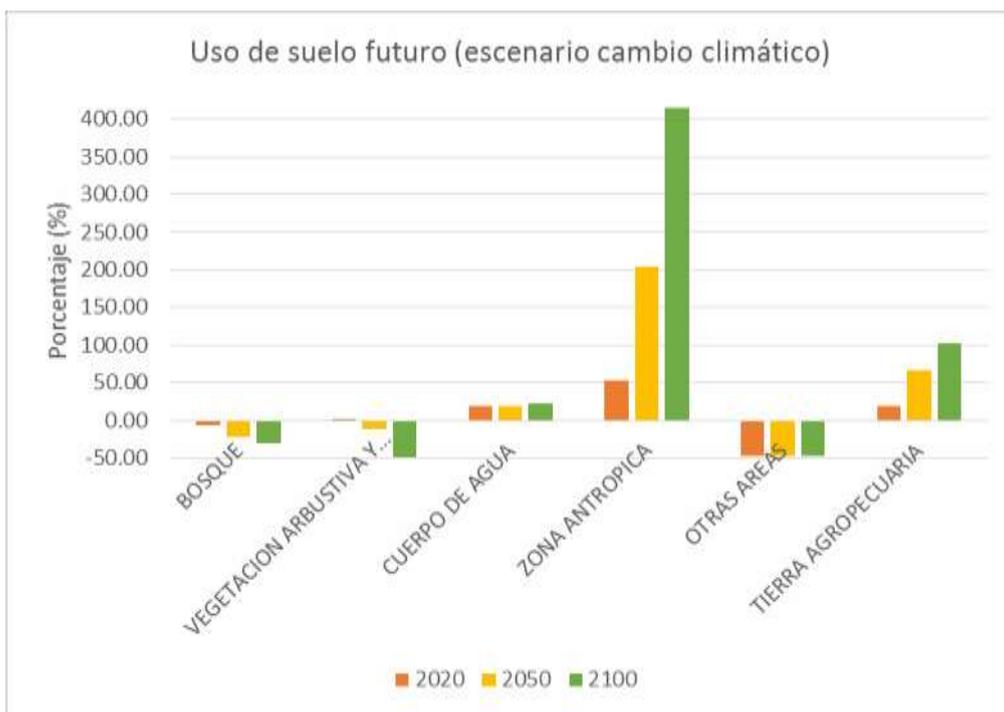
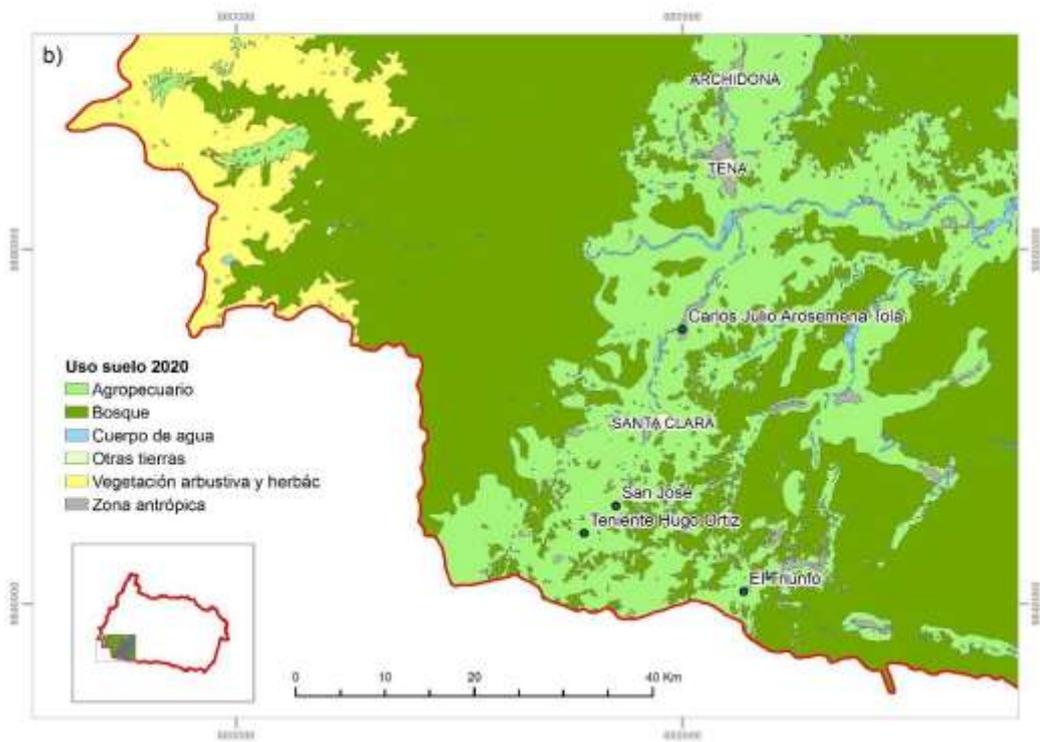
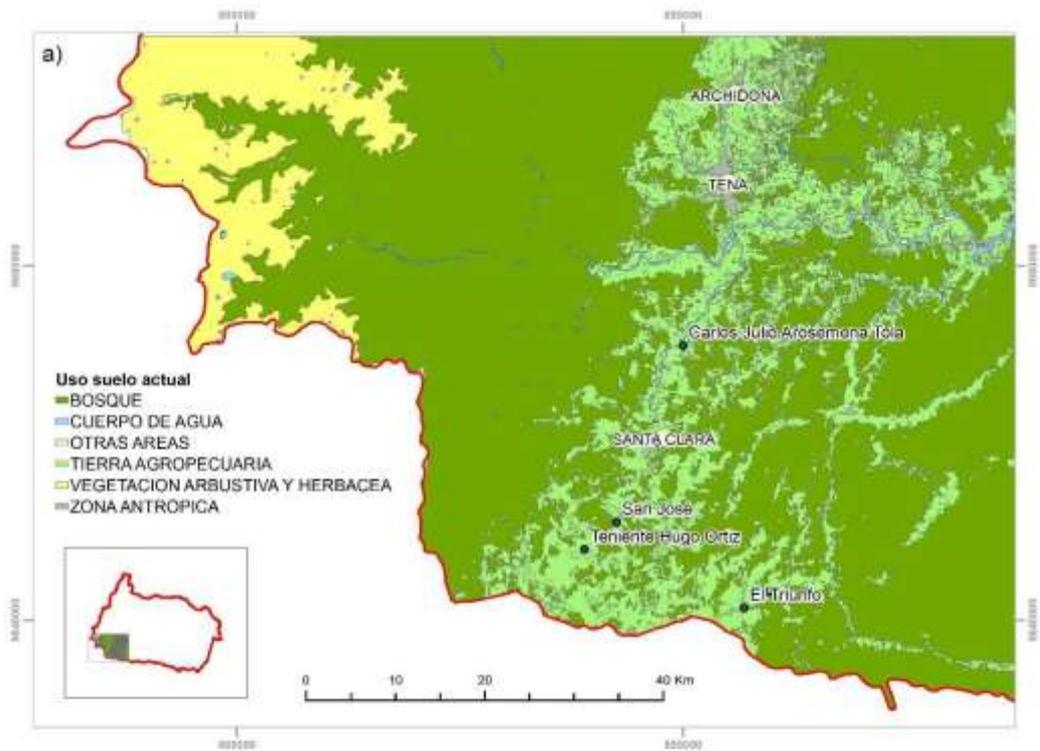


Figura 16. Porcentajes de cambios de uso de suelo (escenario cambio climático)

Para el escenario de cambio de uso de suelo (exponencial y cambio climático) se evidencia cambios extremos en la cobertura (Figura 17). Los cultivos extensivos beneficiados por el cambio climático como la palma africana ganarían espacio en los bosques (Parque Nacional Llanganates) y en las zonas de vegetación arbustiva y herbácea que se ubican en la parte nor-oeste de la zona de estudio que limita con las provincias de Cotopaxi y Tungurahua. Las zonas antrópicas también se incrementaría por el crecimiento poblacional invadiendo espacio en las tierras agropecuarias en las localidades de Tena, El Triunfo, Teniente Hugo Ortiz (Wildlife Conservation Society, 2017).



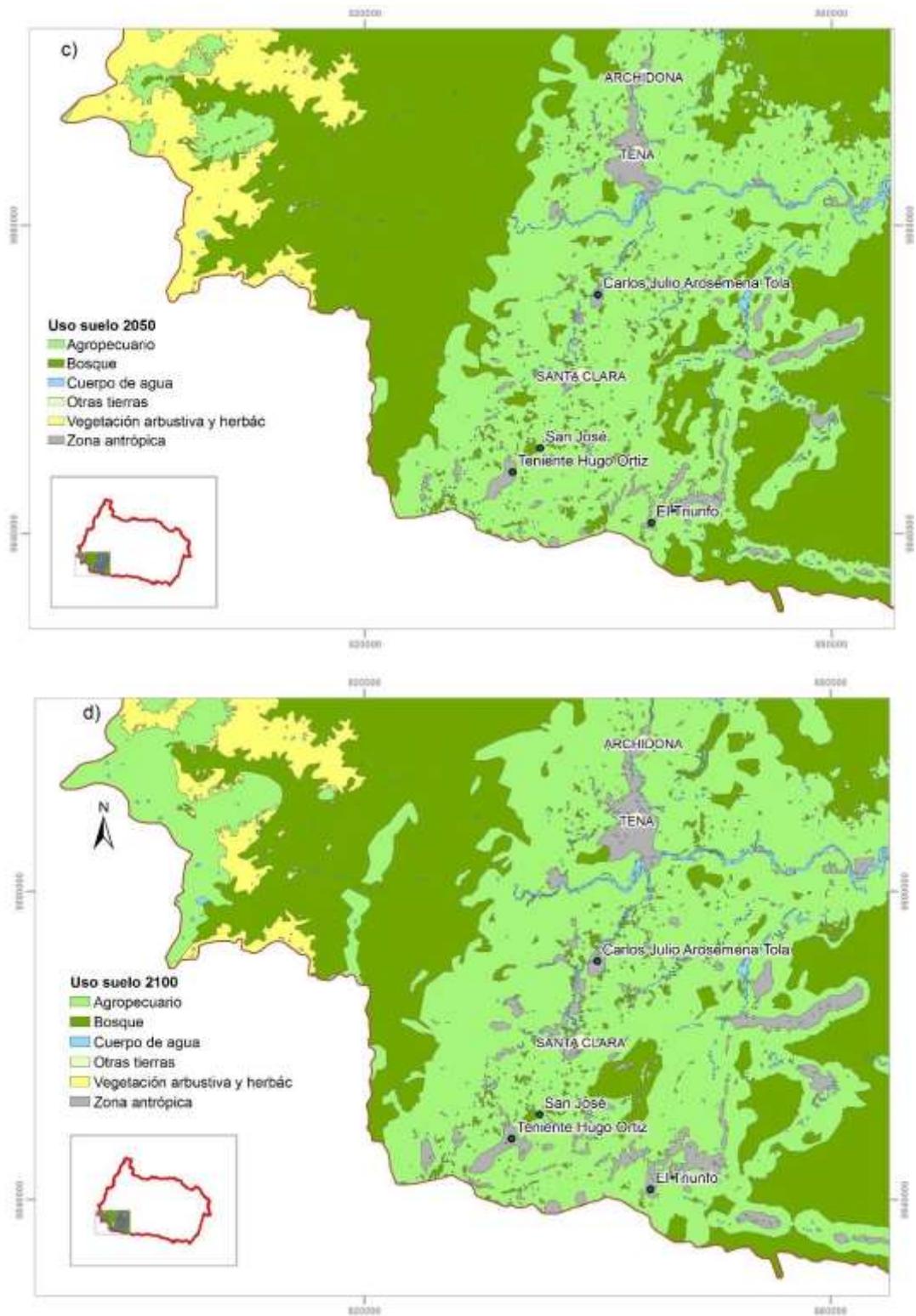


Figura 17. Cambios de uso de suelo (escenario exponencial y cambio climático)

Como se observa en la Figura 18 el crecimiento poblacional aumentaría de tal manera que las zonas antrópicas presentarían un incremento del 859% en relación al actual. Las zonas agropecuarias de igual forma crecerían en un 147.8% hasta el año 2100 disminuyendo las coberturas boscosas en un 47%.

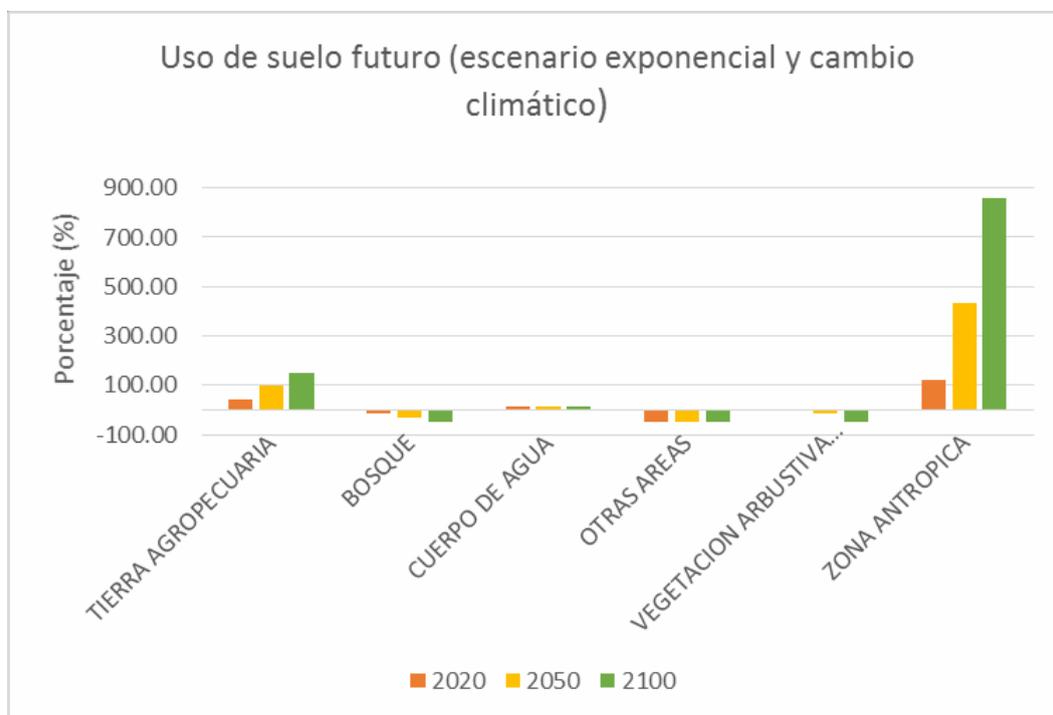


Figura 18. Porcentajes de cambios de uso de suelo (escenario cambio climático)

#### 4.12.1 Rendimiento de agua bajo los escenarios de uso de suelo

El modelo InVEST muestra un incremento en el rendimiento de agua hacia el año 2100 en los escenarios de cambio de uso de suelo. En la Tabla 17 se muestra el Rendimiento medio de agua para los seis escenarios propuestos, en donde se observa mayor producción en los escenarios de cambio de uso de suelo (exponencial y cambio climático).

**Tabla 17.***Rendimiento medio de agua bajo escenarios de cambio de uso de suelo*

<b>Nro</b>	<b>Escenario uso de suelo</b>	<b>Rendimiento medio de agua (mm)</b>
1	Uso suelo 2020 llanganates, escenario RCP4.5 Precipitación 2020, ETP 2020	2530.029
2	Uso suelo 2050 llanganates, escenario RCP45 precipitación 2050, ETP 2050	2635.74
3	Uso suelo 2100 llanganates, escenario RCP45 precipitación 2070, ETP 2070	3157.83
4	Uso suelo 2020 llanganates ( <b>escenario exponencial y cambio climático</b> ), escenario RCP85 precipitación 2020, ETP 2020	2737.04
5	Uso suelo 2050 llanganates ( <b>escenario exponencial y cambio climático</b> ), escenario RCP85 precipitación 2050, ETP 2050	2790.3
6	Uso suelo 2100 llanganates ( <b>escenario exponencial y cambio climático</b> ), escenario RCP85 precipitación 2070, etp 2070	3286.89

En la zona sur-este del área de estudio las lluvias se incrementarán hasta el año 2070 como ya se explicó en las proyecciones de precipitación para el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5. Este aumento de la precipitación en zonas agropecuarias incrementa la producción de agua en esta zona como se puede observar en las Figuras 19 y 20.

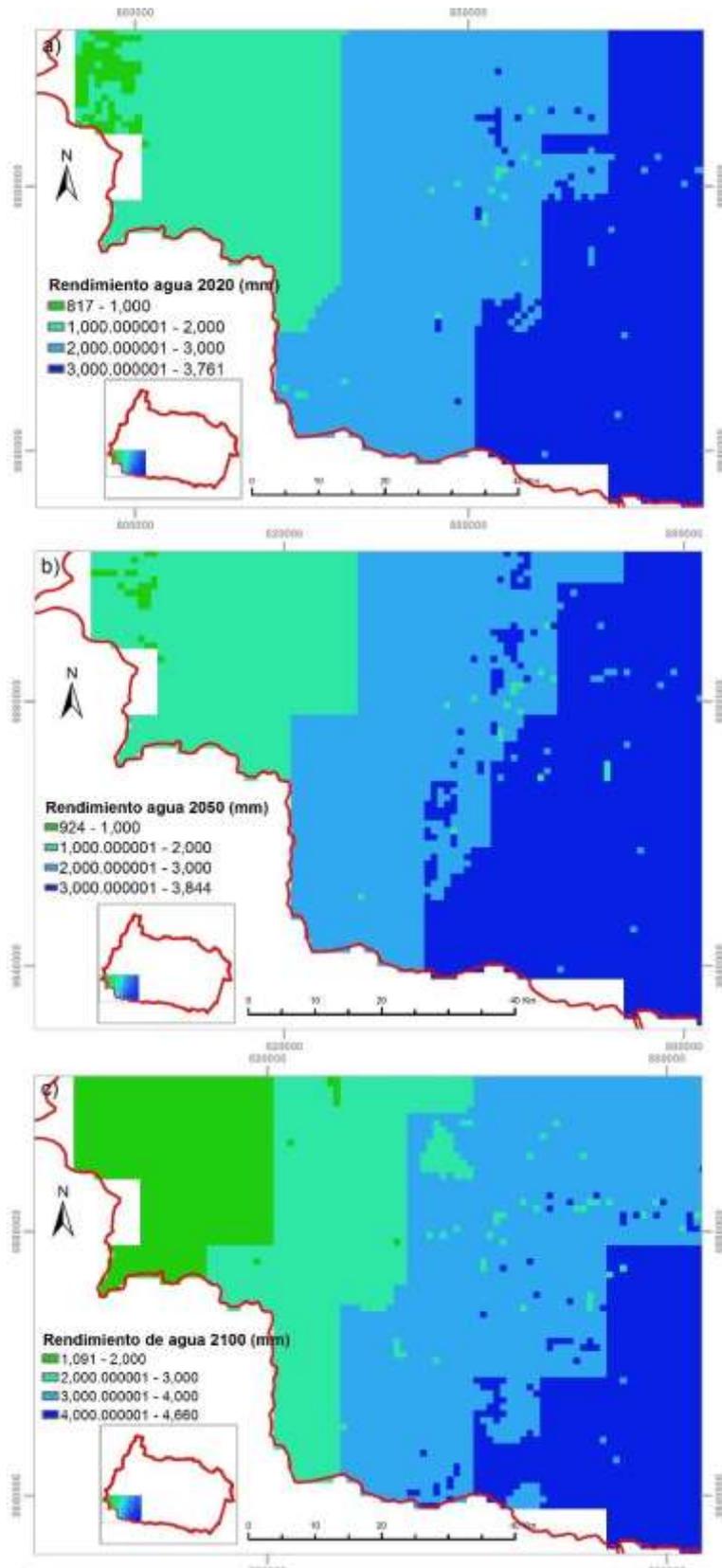


Figura 19. Rendimiento de agua escenarios cambio de uso de suelo (cambio climático)

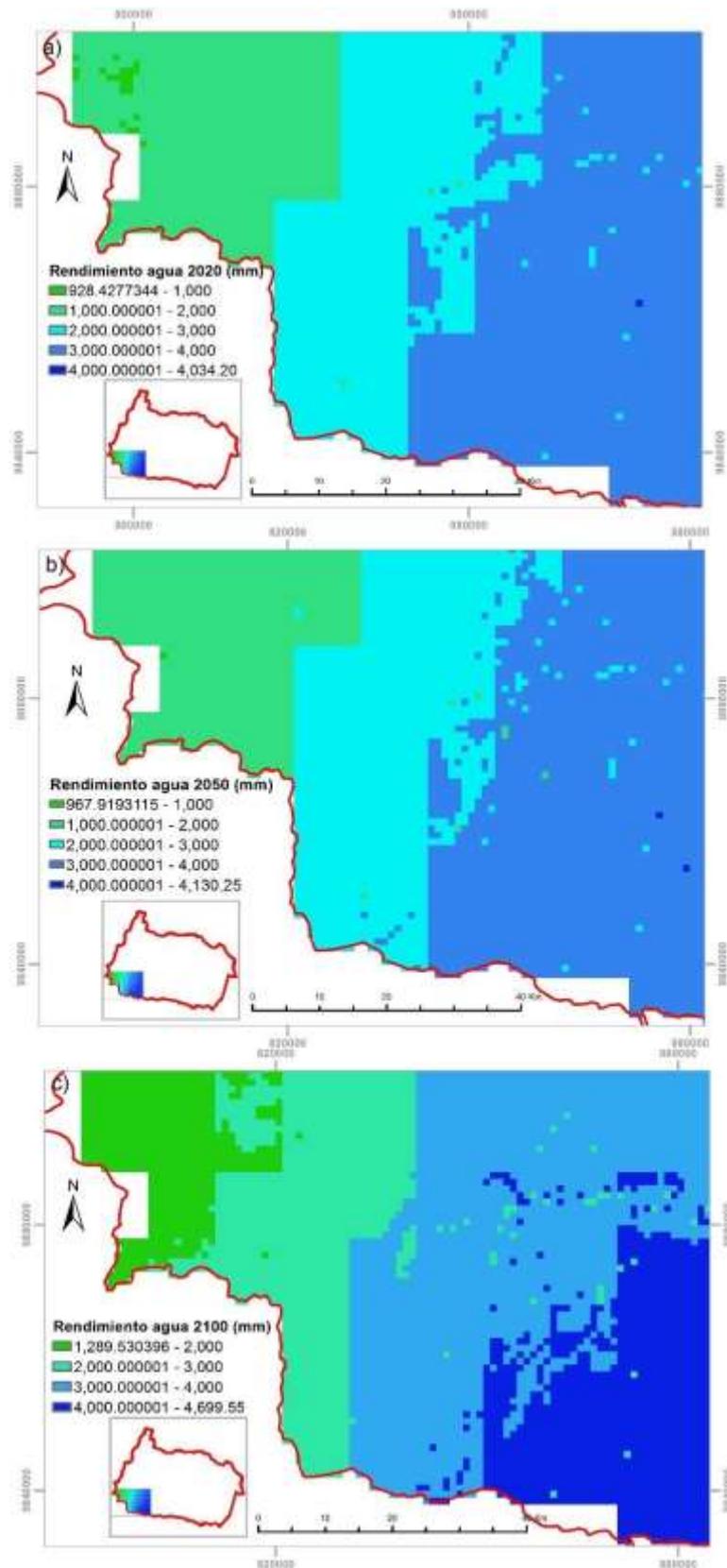
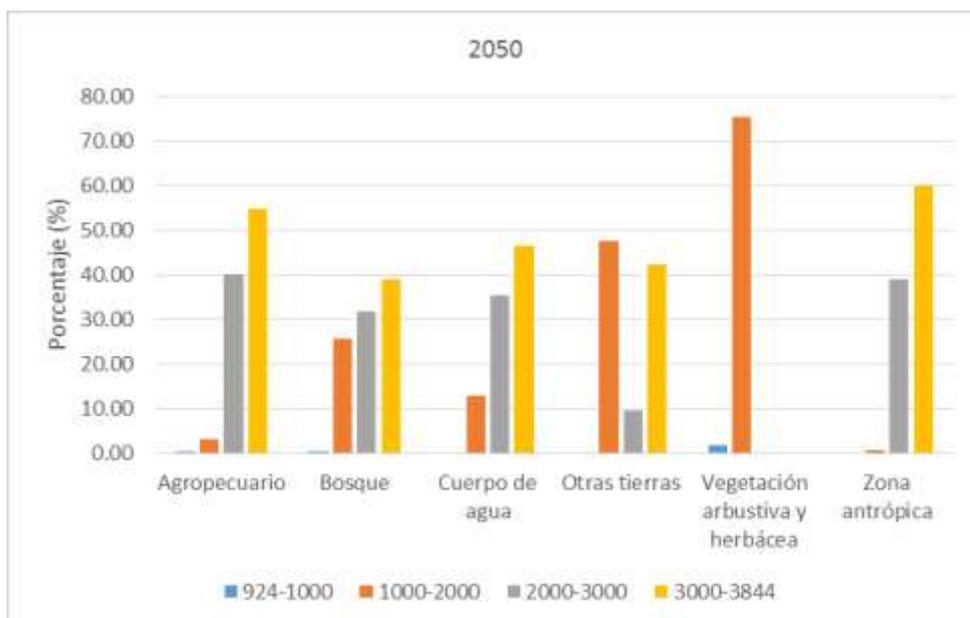
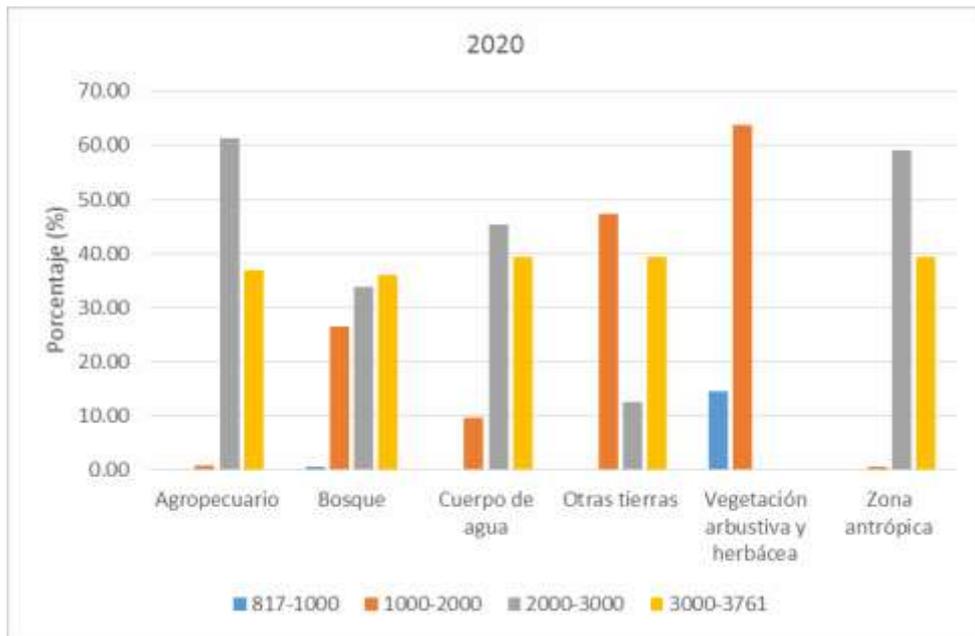


Figura 20. Rendimiento de agua escenarios cambio de uso de suelo (exponencial y cambio climático)

Para los escenarios temporales (cambio climático) se evidencia una mayor incidencia de las zonas agrícolas (61.24%) y antrópicas (59%) en el rango de 2000 a 3000 y en el rango de 3000 a 4000 en los años 2020 y 2050. El porcentaje de bosque en el rangos de rendimiento de agua mayores a 4000 mm para el año 2010 es de 26% y las zonas antrópicas de 21.15%. Cabe mencionar que para este año las lluvias se incrementarían hasta en 1277 mm anuales en la zona baja de la cuenca en el lado este de los Llanganates, esto explica alto rendimiento de agua para el 2100 (Figura 21)



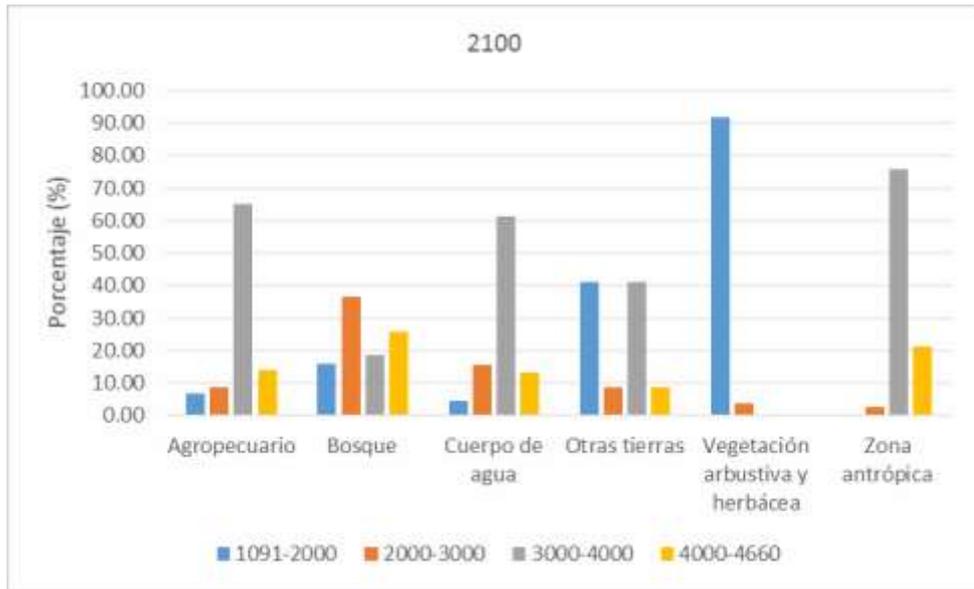


Figura 21. Clases de rendimiento hídrico (mm) en porcentaje de ocupación según escenarios de uso del suelo (cambio climático)

La Figura 22 indica en cada escenario temporal (exponencial y cambio climático), el porcentaje de ocupación de cada uso de suelo y su incidencia en la provisión hídrica. Se observa el predominio de las tierras agropecuarias (59%) y las zonas antrópicas (68%) en el rango 3000 a 4000 mm en el año 2020, incrementando su porcentaje en el año 2050, llegando a 64.65% de las tierras agropecuarias y a un 74.16% de las zonas antrópicas. Para el año 2100 las zonas agrícolas y antrópicas presentan un predominio en el rango de 3000 a 4000 mm, y para valores mayores a 4000 mm predominan las zonas antrópicas. Los bosques presentan un porcentaje de incidencia menor en el rango de 3000 a 4000 mm con relación a las tierras agropecuarias y zonas antrópicas en los tres escenarios. Las zonas con vegetación arbustiva y herbácea predominan en el rango de 1000 a 2000 mm.

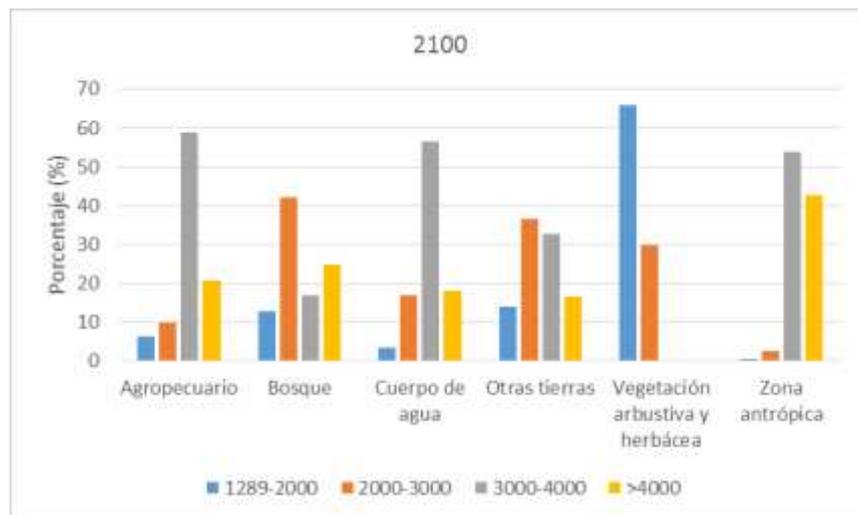
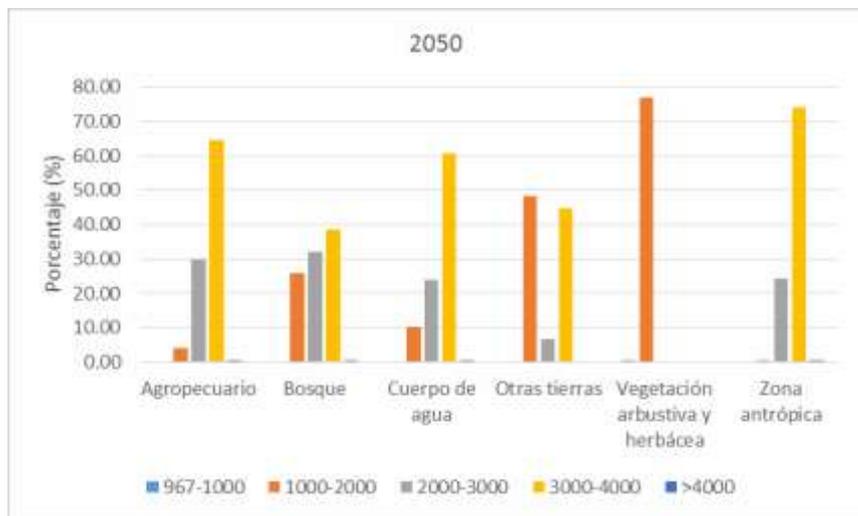
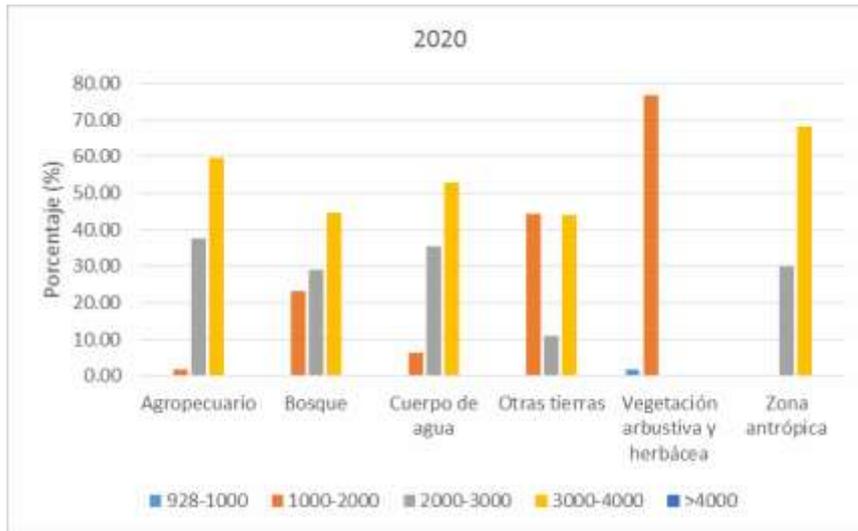


Figura 22. Clases de rendimiento hídrico (mm) en porcentaje de ocupación según escenarios de uso del suelo (exponencial y cambio climático)

Las zonas con cobertura boscosa se presentan con mayor incidencia en rangos de menor rendimiento de agua debido a que su función no es principalmente la producción sino de regulación del ciclo hidrológico. Doornbos (2015) señala que debido a los suelos ricos en materia orgánica de los bosques andinos estos regulan los caudales almacenando el agua en periodos de lluvia y soltándola en las épocas secas hacia los cauces de agua. La disminución de la cobertura vegetal natural y el incremento de la urbanización reduce la superficie de evapotranspiración, mejoran la erosión del suelo lo que ocasiona pérdidas de agua por escorrentía expresada en términos de lámina de agua en mm y una mayor exportación en un periodo anual. Esto implica un mayor rendimiento hídrico y menor capacidad de regulación hídrica en la cuenca (Tobón, 2009). Mena (2010) señala que la deforestación de los bosques húmedos tropicales en el Norte en la Amazonía influye en la evapotranspiración y tiene incidencia directa en las características del suelo, generando una escorrentía alta.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

La cuenca del Río Napo presenta una precipitación media anual que oscila entre 1982.81 mm a 4018.1 mm y una evapotranspiración media anual de 118.48 mm a 2031 mm. La cobertura de suelo que predomina es Bosque nativo con un 82.49% de ocupación, la textura del suelo es principalmente fina (61.752%) y se presentan suelos moderadamente profundos en su mayoría (750 mm).

Se presentó un rendimiento de agua actual mayor en las subcuencas ubicadas al occidente del área de estudio, siendo la subcuenca Río Napo en Francisco de Orellana la que aporta en mayor cantidad con 2926.78 mm medio anual, esto responde a un patrón de precipitación mayor y evapotranspiración menor en esa zona (3500 a 4010 mm).

El cálculo de la evapotranspiración utilizando la metodología de Thornthwaite con base a la temperatura de la superficie terrestre mostró una correlación ( $R^2$ ) de 0.72 con respecto a la evapotranspiración obtenida por MODIS, por lo que ésta metodología fue usada para los cálculos de evapotranspiración para los años 2020, 2050 y 2070.

Las proyecciones de temperatura para la Cuenca del Río Napo indican un aumento de hasta 1.69° en el escenario RCCP 4.5 y de 3.26 °C en el escenario RCP 8.5 hasta el año 2070 en la parte este de la cuenca. En cuanto a la precipitación se esperan incrementos de hasta 1277.92 mm anuales en el escenario RCP 4.5 y de hasta 1465.99 mm anuales en el escenario RCP 8.5.

Las simulaciones futuras de rendimiento hídrico a nivel de Cuenca bajo escenarios de cambio climático muestran una producción anual mayor en los escenarios pesimistas (RCP 8.5) para los años 2020, 2050 y 2070 debido al incremento de la precipitación media anual. A nivel de subcuencas el rendimiento hídrico no se presenta de manera uniforme en los 3 años estudiados, sin embargo las cuencas con código 1, 2, 3, 4 (Río Curaray, Río Napo Francisco de Orellana, Río Napo Nuevo Rocafuerte y Río Aguarico respectivamente) son las que presentan un incremento en la producción de agua hasta el

2070, mientras que el rendimiento de agua en las subcuencas 5 y 6 (Río Coca y Río Aguarico en Nueva Loja) disminuye hasta el año 2070 en los dos escenarios de emisión RCP 4.5 y 8.5.

Los escenarios de cambios de uso de suelo desarrollados por Wildlife Conservation Society (2016) muestran que para la zona de estudio en los Llangantes, se presenta disminución de la cobertura boscosa en un 29.77% en el escenario “cambio climático” mientras que en el escenario “exponencial y cambio climático” se reduce en un 47% esto debido a la expansión de las zonas agropecuarias y las áreas antrópicas hasta el año 2100.

Los aumentos previstos en la intensidad de las lluvias, junto con la disminución de la cobertura vegetal natural, incremento de las zonas agrícolas y antrópicas, podrían mejorar la erosión del suelo y la consecuente pérdida de agua por escurrimiento. De esta forma las zonas agrícolas y urbanas presentaron los mayores porcentajes de ocupación en los rangos más altos de rendimiento hídrico (>3000 mm), no así las zonas boscosas que tienen una menor incidencia en el rendimiento hídrico (2000 mm) debido a la alta evapotranspiración de estas zonas.

Se concluye que el modelo InVEST se adaptó de manera muy buena para el cálculo del rendimiento hídrico anual con base a las variables climáticas, profundidad del suelo, agua disponible para las plantas, usos del suelo y sus características biofísicas por lo que fue útil para utilizarlo en las simulaciones futuras. Además el modelo se mostró muy sensible a las variables climáticas y a los cambios de uso de suelo por lo que es recomendable para estudios similares en otras cuencas del país.

## **Recomendaciones**

El estudio realizado se basa en un modelo anual, sin embargo sería interesante trabajar en términos de estacionalidad en las cuencas, así como también evaluar la intensidad y frecuencia de eventos climáticos extremos como inundaciones y sequías. Además se recomienda realizar estudios futuros incluyendo el análisis de la calidad y los usos del agua.

Es necesario mejorar la red de estaciones meteorológicas e hidrológicas que maneja INAMHI en las Cuencas del país con el fin de poder contar con información climática de calidad para que pueda ser usada en estudios de cambio climático no solo a nivel regional sino local. Es importante contar con esta información para poder usarla en modelos hidrológicos con el fin de obtener resultados más cercanos a la realidad.

El cambio climático está ocasionando un impacto importante en el ciclo hidrológico, ecosistemas y en la sociedad, por lo que es necesario realizar investigaciones relacionadas a los efectos de la variabilidad climática y los cambios de uso del suelo con el fin de generar información científica que se encuentre disponible para los tomadores de decisiones en cuanto a la gestión del territorio.

Los servicios de provisión de agua implican decisiones relacionadas con la gestión del suelo para lo cual es imprescindible conocer la dinámica del paisaje y los parámetros hidrológicos asociados. La información generada es importante para que los Gobiernos seccionales ubicados dentro de la cuenca del Río Napo planifiquen a corto y largo plazo las actividades productivas, proyectos de reforestación, crecimiento de zonas antrópicas y sus límites mediante un adecuado ordenamiento territorial para así garantizar la disponibilidad de agua en el tiempo y mitigar los efectos del cambio climático y de uso del suelo en el rendimiento hídrico de la Cuenca. Como medida de mitigación se recomienda conservar las zonas de bosque nativo y evitar su tala ya que se ha demostrado en la presente investigación que su principal función no es la de producción de agua sino de regulación del ciclo hidrológico importante para mantener la dinámica de la cuenca. Si el bosque nativo disminuye la erosión del suelo aumenta generando un escurrimiento de agua, lo cual compromete la disponibilidad de agua para el consumo, además del peligro de que sucedan eventos extremos como inundaciones

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agualimpia, & Castro. (2012). Aprovechamiento responsable del recurso hídrico fluvial. *Ingeniería Hidráulica y ambiental*. *Ingeniería Hidráulica y ambiental*, XXXIII, 18-32.
- Armenta, G., Villa, J., & Jácome, P. (2016). *proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático*.
- Bagstad, K. J., Semmens, D., Waage, S., & Winthrop, R. (2013). A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation. *Ecosystem Services*, 27-39.
- Bai, Y., Zheng, H., Ouyang, Z., Zhuang, C., Jiang, & Bo. (2012). Modeling hydrological ecosystem services and tradeoffs: a case study in Baiyangdian watershed, China. *Environmental Earth Sciences*, 709-718.
- Boithias, L., Acuña, V., Vergoñós, L., Ziv, G., Marcé, R., & Sabater, S. (2014). Assessment of the water supply: demand ratios in a Mediterranean basin under different global change scenarios and mitigation alternatives. *Science of the Total Environment*, 567-577.
- Brown Manrique, O., Gallardo Ballat, Y., Correa Santana, A., & Barrios García, S. (2015). El cambio climático y sus evidencias en las precipitaciones. *Ingeniería hidráulica y Ambiental*, 36(1), 88-101.
- Cabrera, J. (2012). Calibración de modelos hidrológicos. *Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú*.
- Camino, E., Ruggeroni, J., & Hernández, F. (2014). *Quinto informe de evaluación del IPCC: Bases físicas. Tiempo y Clima*.
- Carvajal, Y. (2011). Efectos de la variabilidad climática y el cambio climático en los recursos hídricos de Colombia. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 33-61.
- CIIFEN. (2014). *Metodología para la Estimación de Vulnerabilidad en Ecuador, Perú y Bolivia, Proyecto Información de cambio climático y biodiversidad para el fomento de políticas públicas de conservación y adaptación en la región de los Andes Tropicales*.

- Doornbos, B. (2015). *El valor de los bosques andinos en asegurar agua y suelo en un contexto de creciente riesgo climático: (re) conocemos lo imperdible?* Consorcio HELVETAS Swiss Intercooperation – CONDESAN. Obtenido de [http://bibliotecavirtual.minam.gob.pe/biam/bitstream/handle/minam/2109/AO003-Doornbos2015\\_Valorbosquesandinos.pdf?sequence=1](http://bibliotecavirtual.minam.gob.pe/biam/bitstream/handle/minam/2109/AO003-Doornbos2015_Valorbosquesandinos.pdf?sequence=1)
- Droogers, P., & Allen, R. (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and drainage systems*, 16(1), 33-45.
- Duarte, C. M., Benito, G., Dachs, J., Montes, C., Pardo Buendía, M., & Valladares, F. (2006). Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra. CSIC. Consejo superior de investigaciones científicas.
- Feng, W., Jinyan, Z., Hongbo, S., Haiming, Y., & Enjun, M. (2015). Scenario-Based Impact Assessment of Land Use/Cover and Climate Changes on Watershed Hydrology in Heihe River Basin of Northwest China. *Advances in Meteorology*.
- Figuerola, E., & Reyes, P. (2009). *Pago por servicios ambientales en Áreas Protegidas en América Latina. Fortalecimiento del manejo sostenible de los recursos naturales en las Áreas Protegidas de América Latina*. Italia: D-FAO.
- Finer, M., & Jenkins, C. (2012). Proliferación de las represas hidroeléctricas en la Amazonía andina y sus implicaciones para la conectividad Andes-Amazonía. *Plos One*, 7(4).
- Galárraga, R., & Torres, M. (2001). Water Quality in the Napo River Basin (Ecuadorian Andean Amazonia): The Andean Amazon Rivers Analysis and Management project (AARAM). *Mountain Research and Development*, 295-296.
- García, M. L., Carbajal, & Jiménez, H. (2007). La gestión integrad de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático. *Ingeniería y competitividad*.
- García, M., Carvajal, Y., & Jiménez, H. (2007). La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático. *Ing. y Comp*, VIII(2), 17-24.
- Getirana, A. C., Collischonn, W., Guyot, J., Seyler, F., & Mansur, W. (2010). Hydrological modelling and water balance of the Negro River basin: evaluation based on in situ and spatial altimetry data. *Hydrological processes*, 24(22), 3219-3236.

- Getirana, A., Bonnet, M., Rotunno, O., Collischonn, W., Guyot, J., Seyler, F., & Mansur, W. (2010). Hydrological modelling and water balance of the Negro River basin: evaluation based on in situ and spatial altimetry data. *Hydrol. Process*, 3219–3236.
- Gudynas, E. (2011). Debates sobre el desarrollo y sus alternativas en América Latina: Una breve guía heterodoxa. *Más allá del desarrollo*, 21-54.
- Gutmann, E. (2013). High Resolution Simulations of Climate Change in the Colorado Headwaters: Water Balance. *Part of NCAR Water System Program Funded by NSF*.
- Hernández, O. L., Suárez, C. F., & Naranjo, L. (2010). Vulnerabilidad al cambio climático en la Cordillera Real Oriental (Colombia, Ecuador y Perú). *Cambio climático en un paisaje vivo*.
- Hlásny, T., Kočický, D., Mareta, M., Sitková, Z., Barka, I., Konôpka, M., & Hlavatá, H. (2015). Effect of deforestation on watershed water balance: Hydrological modelling-based approach/Vplyv odlesnenia na vodnú bilanciu povodia: Prístup na báze hydrologického modelovania. *Forestry Journal*, 89-100.
- Iglesias, A., Estrela, T., & Gallart, F. (2005). Impactos sobre los recursos hídricos. *Evaluación Preliminar de los Impactos en España for Efecto del Cambio Climático*, 303-353.
- IPCC. (2014). *Cambio Climático 2014: Informe de síntesis*. Ginebra, Suiza: Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Laraque, A., Bernal, C., Bourrel, L., Darrozes, J., Christophoul, F., Armijos, E., & Guyot, J. (2009). Sediment budget of the Napo river, Amazon basin, Ecuador and Peru. *Hydrological Processes*, 3509-3524.
- Lozano, J. (2011). Impacto del cambio de coberturas en el rendimiento hídrico y la retención y producción de sedimentos en 5 subcuencas de la cuenca baja del Río Paute: análisis de escenarios utilizando el modelo InVEST. *The nature Conservancy*.
- MAGAP. (2010). Generación de información georeferenciada para el desarrollo sustentable del sector agropecuario.
- Mainville, N., Webb, J., Lucotte, M., Davidson, R., Betancourt, O., Cueva, E., & Mergler, D. (2006). Decrease of soil fertility and release of mercury following deforestation

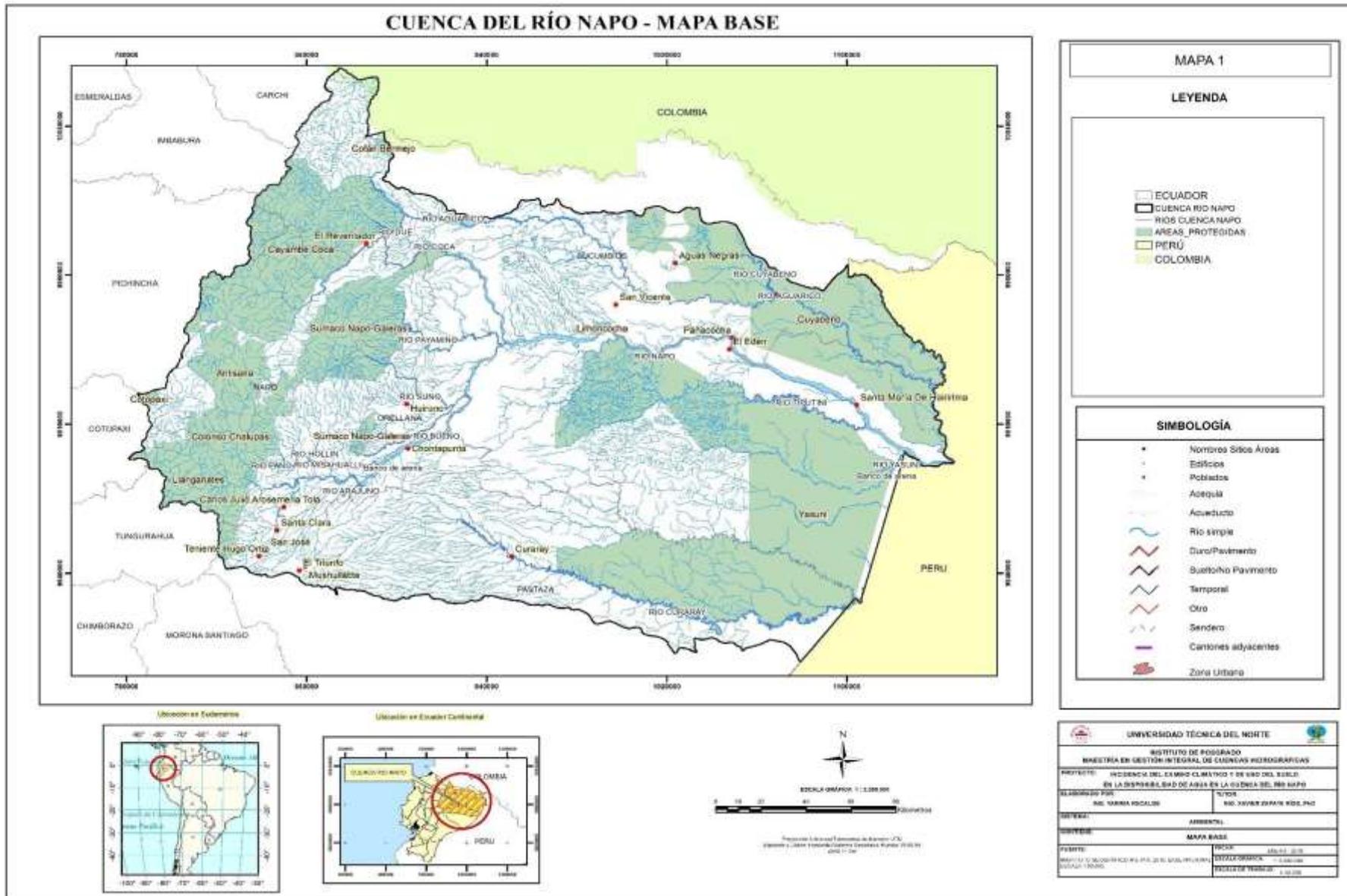
- in the Andean Amazon, Napo River Valley, Ecuador. *Science of the Total Environment*, 368(1), 88-98.
- Mango, L., Melesse, A., McClain, M., Gann, D., & Setegn, S. (2011). Land use and climate change impacts on the hydrology of the upper Mara River Basin, Kenya: results of a modeling study to support better resource management. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2245-2258.
- Medina, H., García, J., & Ruiz, M. (2012). Modelación del efecto de la variabilidad de las precipitaciones en los términos del balance hídrico de un suelo Ferralítico Rojo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 36-41.
- Mena, C. F. (2010). Deforestación en el Norte de la Amazonia Ecuatoriana: del patrón al proceso. *Polemika*, 5(1).
- Molnar, P. (2011). Notes of Watershed Modelling. *Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.*
- Moriassi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Poveda, G. (2011). El papel de la amazonía en el clima global y continental : impactos del cambio climático y la deforestación. En U. N. Colombia, *Amazonia colombiana : imaginarios y realidades* (págs. 145-156).
- Russo, R. O. (2009). *Los sumideros de carbono y los biocombustibles: Su papel en el cambio climático*. Argentina: El Cid Eitor/apuntes.
- Sant'Anna, F. (2013). Transboundary water resources governance: the Multi-Scalar analysis of the Amazon basin. *University of São Paulo*.
- SENAGUA. (2009). *Delimitación y codificación de unidades Hidrográficas del Ecuador (Metodología Pfafstetter)*.
- Sharp, R., Tallis, H., Ricketts, T., Guerry, A., Wood, S., Chaplin-Kramer, R., . . . Verutes. (2016). *InVEST +VERSION+ User's Guide*.
- Suarez, E. M., Utreras Bucheli, V., Zapata- Ríos, G., Toral, E., & Vargas Olalla, J. (2009). Oil industry, wild meat trade and roads: indirect effects of oil extraction activities in a protected area in north- eastern Ecuador. *Animal Conservation*, 364-373.

- Szwed, M. K., Pinskiwar, I., Radziejewski, M., Graczyk, D., Kedziora, A., & Kundzewicz, Z. (2010). Climate change and its effect on agriculture, water resources and human health sectors in Poland. *Nat. Hazards Earth Syst*, 1725-1737.
- Tallisa, H., & Polasky, S. (2009). Mapping and Valuing Ecosystem Services as an Approach for Conservation and Natural-Resource Management. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1162, 265-283.
- Terrado, M., Acuña, V., Ennaanay, D., Tallis, H., & Sabatera, S. (2014). Impact of climate extremes on hydrological ecosystem services in a heavily humanized Mediterranean basin. *Ecological Indicators*, 199-209.
- Tobón, C. (2009). *Los bosques andinos y el agua Serie investigación y sistematización #4*. Quito.
- USDA. (1998). *Available Water Capacity: Natural Resources Conservation Service*. Obtenido de <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/site/soils/home/>
- Vásconez, P. M., & Hofstede, R. (2006). Los páramos ecuatorianos. Botánica económica de los Andes Centrales. *Botánica Económica de los Andes Centrales. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz*.
- Vigerstol, K. L., & Aukema, J. (2011). A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. *Journal of environmental management*, 92(10), 2403-2409.
- Vuille, M. (2013). *El cambio climático y los Recursos Hídricos en los Andes Tropicales*. Inter-American Development Bank. Obtenido de [www.iadb.org](http://www.iadb.org)
- Webb, J., Mainville, N., Mergler, D., Lucotte, M., Betancourt, O., Davidson, R., & Quizhpe, E. (2004). Mercury in fish-eating communities of the Andean Amazon, Napo river valley, Ecuador. *EcoHealth*, 1(2).
- Wildlife Conservation Society. (2017). *Escenarios futuros de cambio de cobertura de suelo en la Cuenca alta del Río Napo: 2020, 2050 y 2100*.
- Zhang, L., Hickel, K., Dawes, W., Chiew, F., Western, A., & Briggs, P. (2004). A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water resources research*.

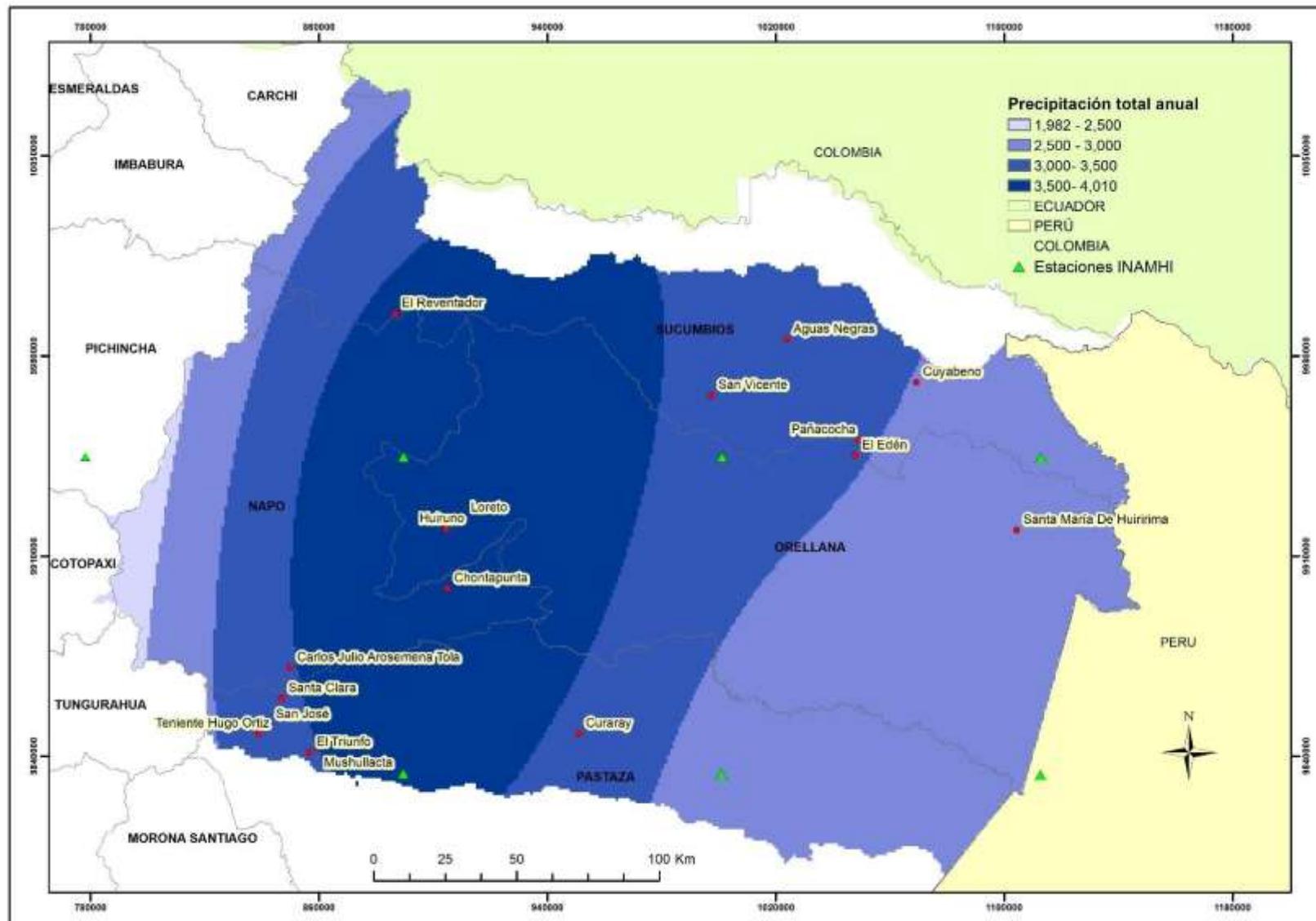
## **ANEXOS**

### **ANEXO 1: MAPAS**

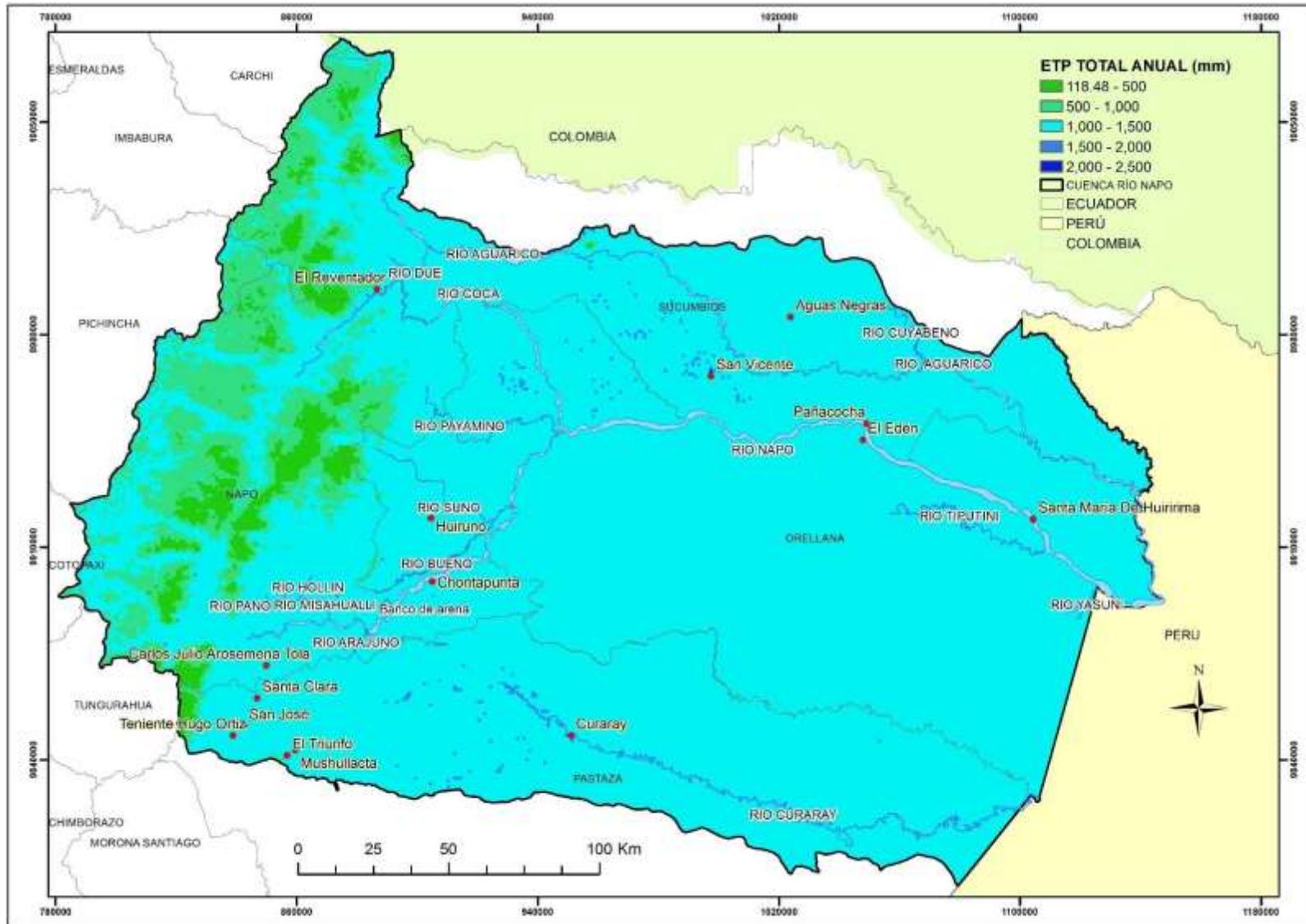
# MAPA 1: MAPA BASE



MAPA 2: PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL

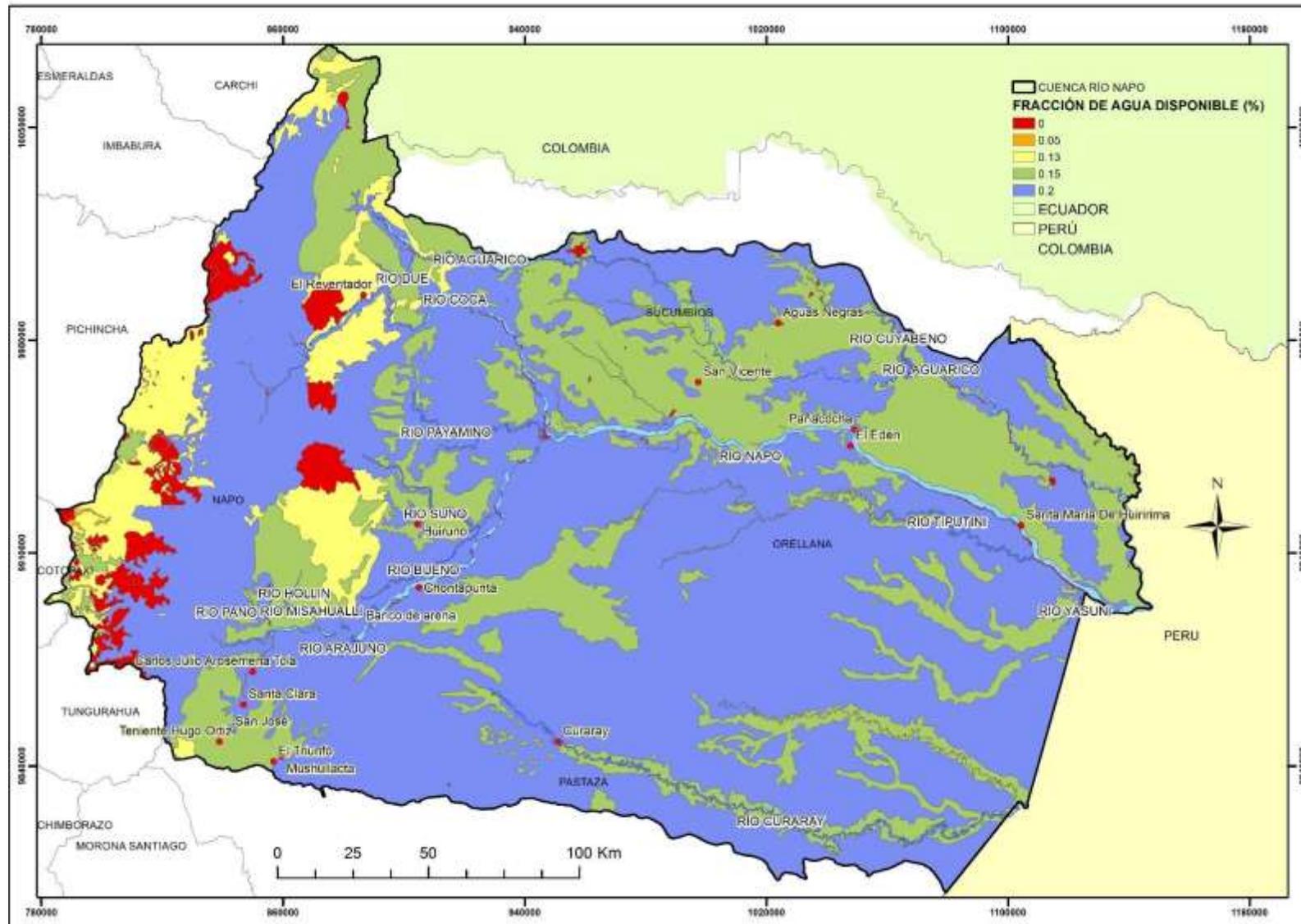


MAPA 3: EVAPOTRANSPIRACIÓN TOTAL ANUAL

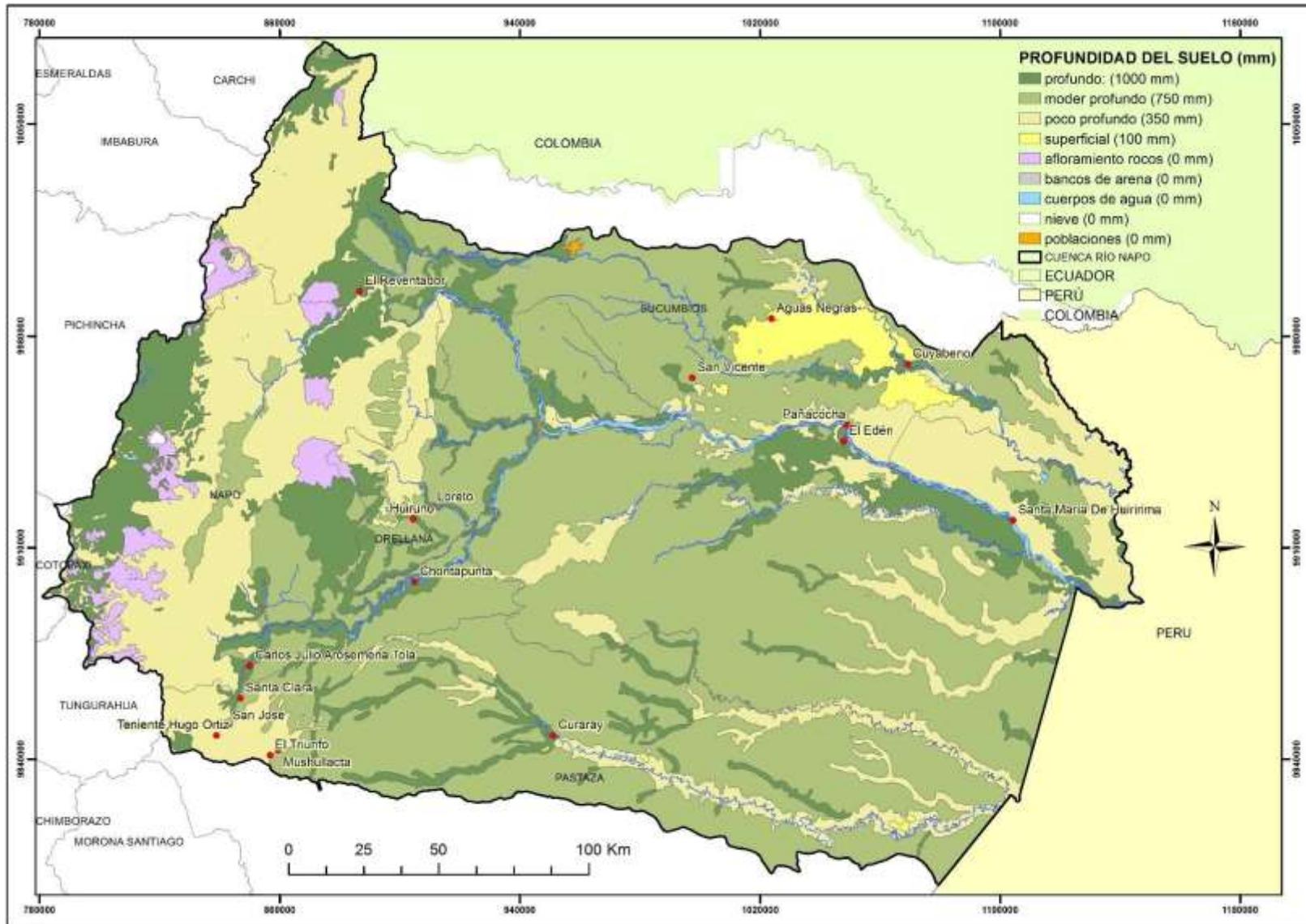




MAPA 5: AGUA DISPONIBLE PARA LAS PLANTAS



**MAPA 6: PROFUNDIDAD DEL SUELO**



## ANEXO 2

### RESULTADOS DE LOS 12 MODELOS CORRIDOS EN InVEST

- **CAMBIO CLIMÁTICO**

RCP45_2020					
subws_id	precip_mn	PET_mn	AET_mn	wyield_mn	wyield_vol
1	3541.16899	1809.74661	926.177493	2605.11128	5.2178E+10
2	3136.48371	1128.34172	600.063115	2539.39403	3.1613E+10
3	3538.24616	1775.57314	912.78362	2623.15183	2.5576E+10
4	3233.05253	1832.2415	853.394659	2326.01749	1.8745E+10
5	2238.95592	769.302519	437.36381	1741.17656	9167294608
6	2305.10529	1015.76773	549.483931	1707.4547	6867382822

RCP45_2050					
subws_id	precip_mn	PET_mn	AET_mn	wyield_mn	wyield_vol
1	3428.11237	2095.4557	1010.59819	2407.62224	4.8222E+10
2	3225.41912	1256.73258	648.197324	2579.12419	3.2108E+10
3	3421.67578	2059.85411	1001.61538	2417.77433	2.3573E+10
4	3155.19509	2146.76956	936.868273	2166.14413	1.7457E+10
5	2312.80912	831.365487	462.861568	1785.81327	9402306890
6	2308.18712	1121.45284	587.378126	1672.00851	6724818211

RCP45_2070					
subws_id	precip_mn	PET_mn	AET_mn	wyield_mn	wyield_vol
1	4126.42072	2148.48578	1050.02775	3064.27708	6.1374E+10
2	3723.03829	1263.47072	661.90342	3064.09433	3.8145E+10
3	4065.70223	2100.86936	1038.98443	3023.76752	2.9482E+10
4	3694.05707	2204.17398	980.241259	2652.84374	2.1379E+10
5	2614.44762	836.534589	469.676603	2074.45517	1.0922E+10
6	2653.17895	1132.3209	599.658066	1998.85853	8039409014

RCP85_2020					
subws_id	precip_mn	PET_mn	AET_mn	wyield_mn	wyield_vol
1	3703.6752	1786.50451	922.936039	2770.241	5.5485E+10
2	3288.87506	1131.75746	604.300887	2687.10484	3.3452E+10
3	3604.60083	1758.95514	908.843149	2693.30237	2.626E+10
4	3294.16259	1807.15572	849.097477	2389.80394	1.9259E+10
5	2312.74396	772.713537	439.575062	1810.26712	9531056398
6	2315.00068	1021.66607	551.806045	1714.39995	6895316616

<b>RCP85_2050</b>					
<b>subws_id</b>	<b>precip_mn</b>	<b>PET_mn</b>	<b>AET_mn</b>	<b>wyield_mn</b>	<b>wyield_vol</b>
1	3829.33712	2191.1034	1053.57846	2765.05776	5.5381E+10
2	3453.1902	1290.81448	665.756221	2790.46355	3.4738E+10
3	3870.81146	2156.54173	1049.82821	2818.39293	2.7479E+10
4	3529.62095	2262.01957	987.58466	2483.79625	2.0017E+10
5	2495.46176	850.482124	473.458621	1953.64181	1.0286E+10
6	2549.69686	1157.19082	606.073715	1890.46978	7603469448

<b>RCP85_2070</b>					
<b>subws_id</b>	<b>precip_mn</b>	<b>PET_mn</b>	<b>AET_mn</b>	<b>wyield_mn</b>	<b>wyield_vol</b>
1	4031.29056	2746.53696	1211.00404	2808.01468	5.6242E+10
2	3909.8301	1497.82355	748.084489	3163.41329	3.9381E+10
3	4002.50197	2654.20096	1199.38667	2799.3639	2.7294E+10
4	3529.83815	2817.40934	1114.0591	2357.83239	1.9002E+10
5	2776.90447	938.095736	511.377205	2187.91345	1.1519E+10
6	2764.42031	1301.93511	661.147552	2044.84651	8224372661

- **CAMBIOS DE USO DEL SUELO**

<b>RCP45_2020</b>					
<b>subws_id</b>	<b>precip_mn</b>	<b>PET_mn</b>	<b>AET_mn</b>	<b>wyield_mn</b>	<b>wyield_vol</b>
1	3453.16902	1767.81931	905.490352	2548.42482	5.1042E+10
2	3079.27606	1116.97989	607.174568	2481.79686	3.0896E+10
3	3540.111	1774.14427	912.36474	2625.43272	2.5598E+10
4	3097.97211	1755.99912	816.403082	2239.11623	1.8045E+10
5	2181.77804	758.685576	431.694106	1695.89947	8928910707
6	2165.67176	958.77333	520.040068	1604.34098	6452659426

<b>RCP45_2050</b>					
<b>subws_id</b>	<b>precip_mn</b>	<b>PET_mn</b>	<b>AET_mn</b>	<b>wyield_mn</b>	<b>wyield_vol</b>
1	3343.74613	2045.9395	987.818389	2356.4399	4.7197E+10
2	3167.38707	1236.01329	653.075067	2523.52197	3.1415E+10
3	3425.00255	2058.34584	1001.31401	2421.38276	2.3608E+10
4	3023.81571	2057.33046	896.310785	2086.22313	1.6813E+10
5	2253.75374	819.497413	456.702339	1739.47349	9158327948
6	2169.02807	1057.71416	555.706735	1571.56293	6320826094

RCP45_2100					
subws_id	precip_mn	PET_mn	AET_mn	wyield_mn	wyield_vol
1	4021.68334	2096.97182	1025.92703	2996.29269	6.0013E+10
2	3652.52696	1238.43915	664.103872	2999.56845	3.7342E+10
3	4068.18577	2098.96244	1038.47624	3026.74766	2.9511E+10
4	3540.81806	2111.69897	937.656722	2554.82612	2.0589E+10
5	2546.9314	824.593264	463.367775	2020.52563	1.0638E+10
6	2492.42636	1067.88834	567.176956	1878.32008	7554603358

RCP85_2020					
subws_id	precip_mn	PET_mn	AET_mn	wyield_mn	wyield_vol
1	3608.91812	1745.22572	902.268073	2707.29156	5.4224E+10
2	3216.86968	1120.47844	610.790388	2615.80337	3.2564E+10
3	3598.62954	1757.94209	908.336373	2687.84038	2.6206E+10
4	3152.80942	1732.34562	812.298938	2297.00812	1.8512E+10
5	2240.96719	762.097068	433.719414	1751.10522	9219569004
6	2170.85823	964.324363	522.15422	1607.12843	6463870565

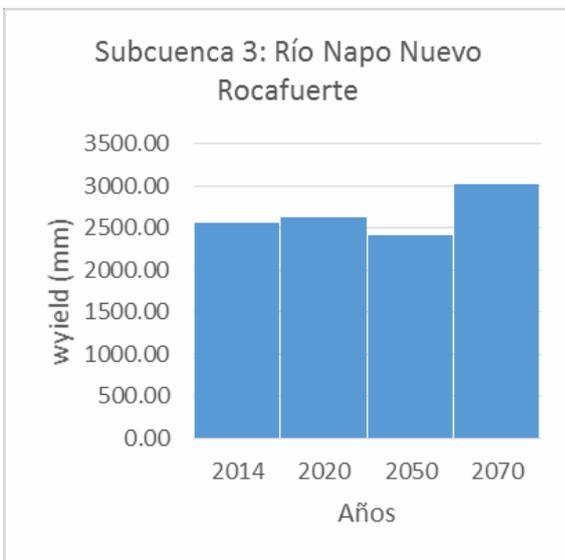
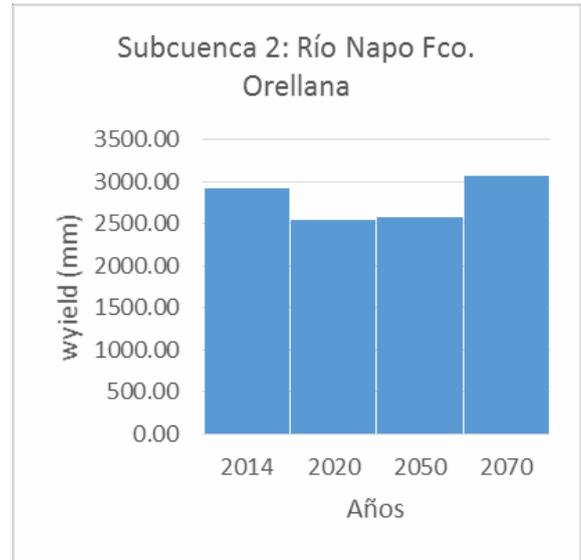
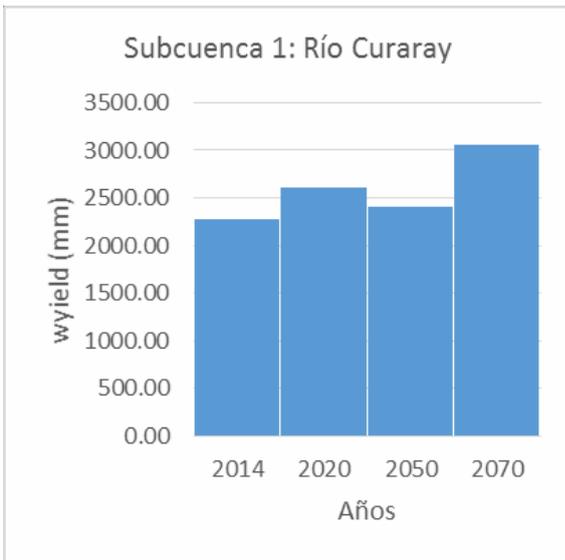
RCP85_2050					
subws_id	precip_mn	PET_mn	AET_mn	wyield_mn	wyield_vol
1	3734.24682	2139.2327	1029.76846	2705.27968	5.4184E+10
2	3382.22379	1269.28461	669.939278	2722.8574	3.3897E+10
3	3871.46941	2154.94527	1049.38461	2819.5172	2.749E+10
4	3382.70225	2167.42224	944.720157	2391.80839	1.9276E+10
5	2421.11469	838.269511	466.942816	1893.1044	9967194647
6	2391.50011	1091.16696	573.143905	1772.99668	7130992628

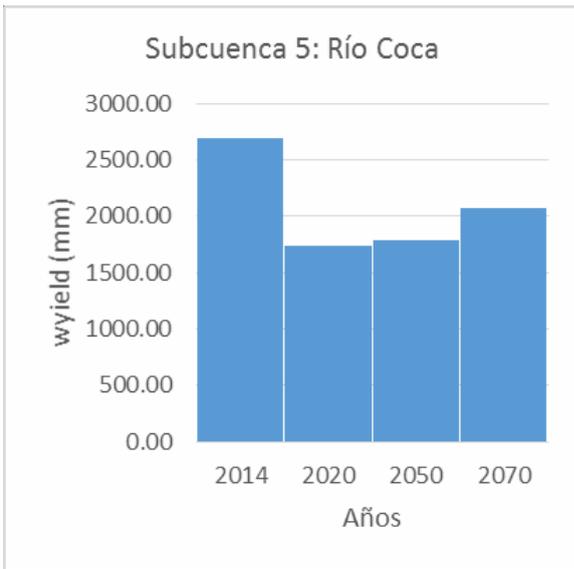
RCP85_2100					
subws_id	precip_mn	PET_mn	AET_mn	wyield_mn	wyield_vol
1	3927.83503	2679.67851	1183.11618	2744.93323	5.4978E+10
2	3825.69834	1464.5702	749.342837	3087.18391	3.8432E+10
3	4001.04778	2650.46399	1198.51073	2798.81902	2.7288E+10
4	3384.43183	2697.70816	1066.33874	2271.95341	1.831E+10
5	2692.08353	923.816442	503.958076	2118.76552	1.1155E+10
6	2593.25802	1226.55725	624.884326	1918.64262	7716780613

### ANEXO 3

#### HISTOGRAMAS DE PRODUCCIÓN DE AGUA POR SUBCUENCA

- Escenario RCP 4.5

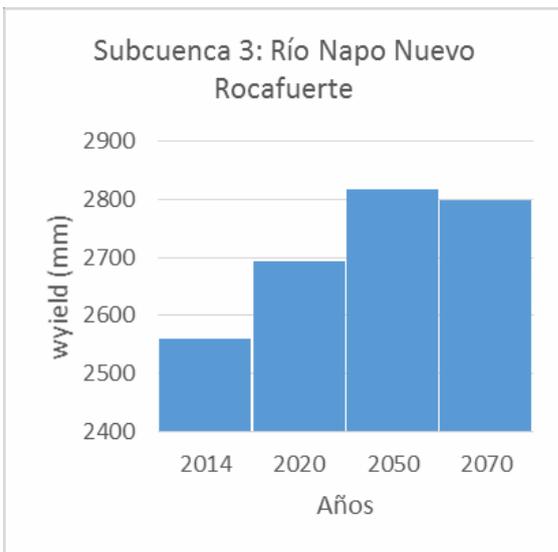
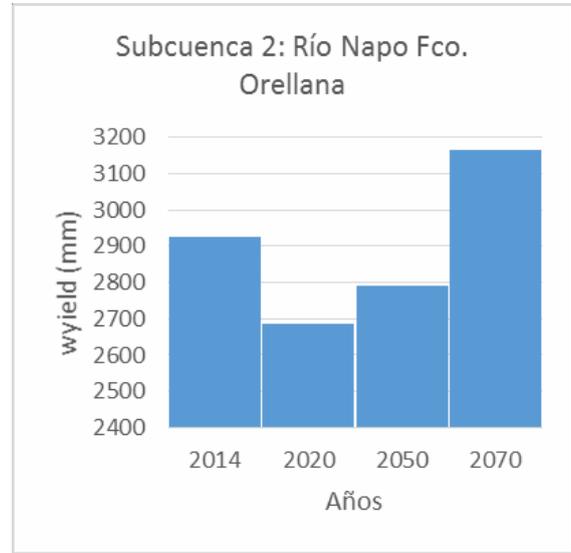
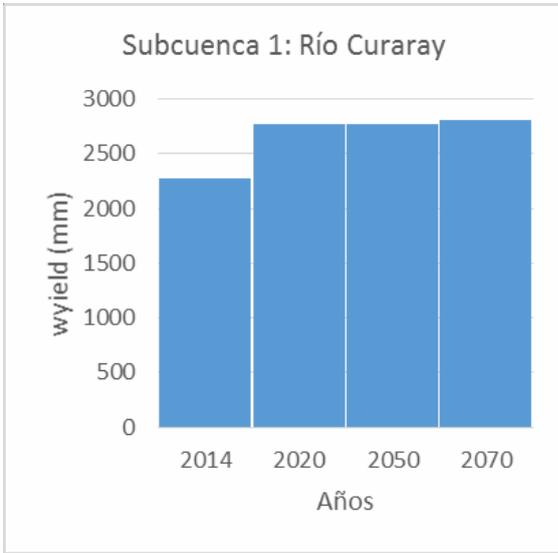


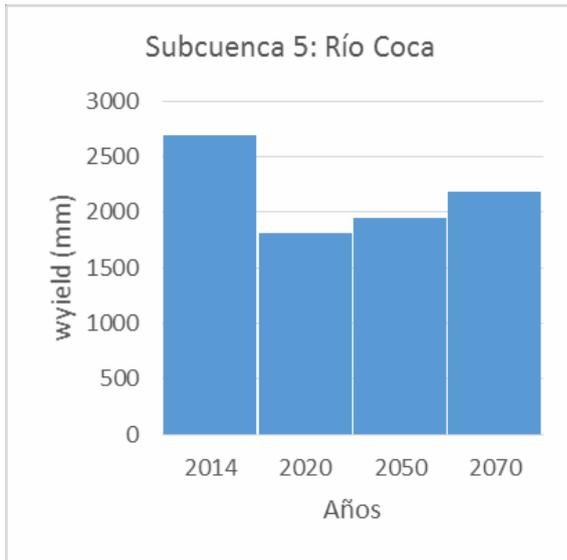


### Producción de agua ( mm) por subcuenca

subws_id	Wyield 2014	Wyield 2020	Wyield 2050	Wyield 2070
1	2277.48	2605.11	2407.62	3064.28
2	2926.78	2539.39	2579.12	3064.09
3	2559.29	2623.15	2417.77	3023.77
4	2306.06	2326.02	2166.14	2652.84
5	2696.87	1741.18	1785.81	2074.46
6	2680.00	1707.45	1672.01	1998.86

- Escenario RCP 8.5





**Producción de agua (mm) por subcuenca**

subws_id	Wyield 2014	Wyield 2020	Wyield 2050	Wyield 2070
1	2277.48	2770.24	2765.06	2808.01
2	2926.78	2687.10	2790.46	3163.41
3	2559.29	2693.30	2818.39	2799.36
4	2306.06	2389.80	2483.80	2357.83
5	2696.87	1810.27	1953.64	2187.91
6	2680.00	1714.40	1890.47	2044.85