

UNIVERSIDAD NACIONAL, COSTA RICA  
SEDE REGIONAL CHOROTEGA  
CAMPUS LIBERIA

**“DETERMINACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO DEL SUELO COMO INSUMO  
TÉCNICO BASE PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE LA CUENCA ALTA Y  
MEDIA DEL RÍO ZAPOTE, ALAJUELA, COSTA RICA”**

PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA HIDROLÓGICA

SUSTENTANTE:

KATHERINE JUNNIETH SÁNCHEZ JIMÉNEZ

504220116

LIBERIA, GUANACASTE

FEBRERO, 2021

## **Integrantes Tribunal Examinador**

---

Dr. Rolando Madriz Vargas

Supervisor del proyecto

---

Dr. Christian Golcher Benavides

Lector

---

Dr. José Rodrigo Rojas Morales

Lector

---

M.Sc. Marlene Durán López

Representante de Dirección Académica, Campus Liberia

---

Dr. Fernando Gutiérrez Coto

Representante de Decanatura, Sede Regional Chorotega

## RESUMEN EJECUTIVO

---

### **Determinación del balance hídrico del suelo, como insumo técnico base para la gestión integral de la cuenca alta y media del Río Zapote, Alajuela, Costa Rica.**

Ante la necesidad e interés por parte de algunos actores sociales en la zona de construir una estrategia para el manejo adecuada de los recursos hídricos, se calcula el balance hídrico de suelos en la cuenca alta y media del río Zapote que se encuentra en la zona norte de Costa Rica en América Central, con el fin de generar información técnica base para la elaboración de instrumentos dirigidos a la gestión integral de la cuenca, ya que en la actualidad no existe información hidrológica disponible y actualizada,

Como parte de la determinación del balance hídrico de suelos se utilizaron datos primarios a saber: la precipitación, la temperatura (para el cálculo de evapotranspiración potencial), el uso de la tierra, la capacidad de infiltración del suelo, la retención de humedad, la densidad aparente y la textura. Asimismo, se utilizó información secundaria obtenida de bases de datos públicas, capas vectoriales, entre otros. La metodología utilizada corresponde a la aplicación de Sistemas de Información Geográfica para el cálculo de balances hídricos mediante la ecuación propuesta por Schosinsky (2006), además se identificaron los principales usuarios vinculados al uso del agua, los cuales tendrán un papel determinante en el desarrollo de los instrumentos de gestión.

En el cálculo de balance hídrico de suelos se obtuvo un error relativo de 0.19%. La cuenca presenta una recarga potencial anual de 1423.78 mm, y la zona que presenta mayor potencial de recarga corresponde al sector sureste de la cuenca. Entre los principales actores de la cuenca se destaca la relevancia de empresas que utilizan el agua para la producción de electricidad, así como, instituciones públicas encargadas de la administración del agua para consumo humano.

La fuente que más se utiliza para las extracciones de agua son nacientes, y los puntos de extracción se ubican principalmente en el sector sureste de la zona de estudio. Se concluye que los resultados del balance hídrico proporcionan un conocimiento base de la hidrología de la cuenca, el cual puede favorecer el diseño y aplicación de estrategias de gestión, como la protección de zonas de recarga, ordenamiento territorial, identificación de zonas con potencial hídrico e identificación de zonas vulnerables a la infiltración de sustancias contaminantes.

**Palabras claves: balance hídrico de suelos, Sistemas de Información Geográfica (SIG), Método Schosinsky, Río Zapote, Upala.**

## **AGRADECIMIENTOS**

---

Primeramente, a Dios, que a pesar de ser un año atípico me permitió culminar esta etapa tan importante en mi vida profesional.

A mi familia por cuidarme durante todo este tiempo, por facilitarme los recursos para poder estudiar en una universidad pública.

A Fabian Barrios Salas por apoyarme en los momentos donde quise abandonar todo, por creer en mí y motivarme todos los días a terminar lo que había empezado.

A los ingenieros Esteban Cruz Elizondo y Erick Herra Chacón. También a los trabajadores en general de Coopeguanacaste R.L, por ayudarme a realizar las pruebas de campo y levantamiento de datos, por la paciencia y amabilidad en todo momento.

Al coordinador de carrera Rolando Madriz por brindarme sus consejos y estar dispuesto a escucharme aun en horas extras.

Agradezco a todos mis amigos Ana Victoria Méndez, María Fernanda Baltodano, Mariana Araya, Daniela Rojas y William Gómez, a mis profesores Edwin Rafael, Paula Pérez, Adrián Fernández, Liany Alfaro, Christian Golcher, Germán Matamoros, Erik Orozco y Rodrigo Rojas que estuvieron presentes en esta etapa, por alentarme, por ayudarme cuando se me presentaron dificultades y guiarme a diferentes rutas de soluciones.

# ÍNDICE

---

RESUMEN EJECUTIVO .....	i
Capítulo 1. ....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Identificación del problema.....	3
1.3 Justificación.....	4
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo General.....	6
1.4.2 Objetivos Específicos.....	6
1.5 Alcances y limitaciones.....	7
1.5.1 Alcances.....	7
1.5.2 Limitaciones.....	7
Capítulo 2. ....	8
ANTECEDENTES.....	8
2.1. Descripción de la zona.....	9
2.1.1 Localización geográfica.....	9
2.1.2 Características biofísicas.....	10
2.1.3 Características fisiográficas.....	12
2.1.4 Características socioeconómicas.....	15
2.2 Estudios de referencia.....	16
2.3 Marco teórico.....	17
Capítulo 3. ....	20
ESTUDIOS DE.....	20
PREFACTIBILIDAD.....	20
3.1 Estudio Legal – Ambiental.....	21
3.1.1 Ley de Uso y Conservación de Suelos N° 7779.....	21
3.1.2 Ley Orgánica del Ambiente N° 7554.....	21
3.1.3 Plan Nacional de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos.....	22
3.1.4 Resolución N° 2373-2016-SETENA “Proyectos de muy bajo impacto”.....	22
3.2 Estudio Social.....	23

3.3 Estudio Tecno-Financiero .....	25
3.3.1 Localización del proyecto.....	25
3.3.2 Selección de la metodología.....	25
3.3.3 Gastos asociados al proyecto.....	26
Capítulo 4. ....	28
DISEÑO .....	28
METODOLÓGICO .....	28
4.1 Determinación del balance hídrico de suelos .....	29
4.1.1 Datos meteorológicos .....	30
4.1.2 Determinación de datos de suelos .....	32
4.1.3 Implementación de Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	33
4.2 Cálculo de la demanda hídrica.....	35
4.3 Análisis de resultados .....	35
Capítulo 5. ....	36
RESULTADOS Y .....	36
DISCUSIÓN.....	36
5.1 Determinación del balance hídrico de suelos .....	37
5.1.1 Datos primarios para la aplicación del SIG.....	37
5.1.2 Aplicación del balance hídrico de suelos .....	47
5.2 Demanda del agua .....	51
Capítulo 6. ....	54
CONCLUSIONES Y .....	54
RECOMENDACIONES .....	54
6.1 Conclusiones.....	55
6.2 Recomendaciones .....	55
Capítulo 7. ....	58
REFERENCIAS .....	58
Capítulo 8. ....	65
ANEXOS.....	65

## LISTA DE TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Resumen de las características fisiográficas de la cuenca en estudio.....	13
<b>Tabla 2.</b> Presupuesto del proyecto.....	27
<b>Tabla 3.</b> Fórmulas utilizadas para la generación del balance hídrico de suelos, ejemplo del mes de enero. ....	34
<b>Tabla 4.</b> Estaciones utilizadas en el balance hídrico de suelos.....	38
<b>Tabla 5.</b> Estaciones utilizadas para el cálculo de evapotranspiración potencial.....	40
<b>Tabla 6.</b> Puntos donde se realizaron las pruebas de infiltración y extracciones de muestras. ....	42
<b>Tabla 7.</b> Áreas de uso de suelo de la zona de estudio.....	46
<b>Tabla 8.</b> Valores promedio del balance hídrico mensual de la cuenca.....	48
<b>Tabla 9.</b> Resumen del balance hídrico de suelos. ....	48
<b>Tabla 10.</b> Demanda del agua en la cuenca alta y media del Río Zapote. ....	52

## LISTA DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.</b> Ubicación geográfica de la zona de estudio.....	9
<b>Figura 2.</b> Especies arbóreas de la zona. (A) higuierón ( <i>Ficus</i> spp), (B) cedro amargo ( <i>Cedrela odorata</i> ), (C) cucaracho ( <i>Billia colonbiana</i> ), (D) hule ( <i>Castilla elástica</i> ).....	11
<b>Figura 3.</b> Fauna que se puede encontrar en la zona de estudio. (A) zorro pelón ( <i>Didelphis marsupialis</i> ), (B) hormiguero ( <i>Tamandua mexicana</i> ), (C) mono carablanca ( <i>Cabus capucinus</i> ), (D) perezoso dos dedos ( <i>Choleopus hoffmanni</i> ).....	11
<b>Figura 4.</b> Curva hipsométrica de la cuenca alta y media del Río Zapote.....	14
<b>Figura 5.</b> Histograma de frecuencias altimétricas de la cuenca en estudio.....	14
<b>Figura 6.</b> Esquema del balance hídrico.....	18
<b>Figura 7.</b> Resumen del diseño metodológico de la investigación.....	29
<b>Figura 8.</b> Diagrama de la prueba de Porchet.....	32
<b>Figura 9.</b> Ubicación geográfica de estaciones y puntos de muestreos utilizados en el estudio.....	37
<b>Figura 10.</b> Polígonos de Thiessen aplicado a las estaciones de precipitación.....	38
<b>Figura 11.</b> Precipitación anual de la zona de estudio.....	39
<b>Figura 12.</b> Regresión lineal de las estaciones con datos de temperatura.....	40
<b>Figura 13.</b> Evapotranspiración anual de la zona de estudio.....	41
<b>Figura 14.</b> Distribución de la capacidad de campo en la cuenca de estudio.....	43
<b>Figura 15.</b> Distribución de los valores de punto de marchitez en la cuenca de estudio.....	43
<b>Figura 16.</b> Distribución del agua disponible para la vegetación en la cuenca de estudio.....	44
<b>Figura 17.</b> Infiltración de la zona de estudio.....	45
<b>Figura 18.</b> Uso de la tierra de la cuenca alta y media del Río Zapote.....	46
<b>Figura 19.</b> Pendientes de cuenca alta y media del Río Zapote.....	47
<b>Figura 20.</b> Recarga potencial de la cuenca alta y media del Río Zapote.....	50
<b>Figura 21.</b> Ubicación geográfica de las concesiones de agua en la zona de estudio.....	53
<b>Figura 22.</b> Análisis de la recarga potencial con respecto a las fuentes concesionadas y el uso de la tierra en la cuenca alta y media del Río Zapote.....	53

## LISTA DE ANEXOS

---

<b>Anexo 1.</b> Ecuaciones empleadas para la determinación de las características fisiográficas de la cuenca. ....	66
<b>Anexo 2.</b> Marco de gobernanza legal-ambiental del proyecto. ....	67
<b>Anexo 3.</b> Ecuaciones utilizadas en el cálculo del balance hídrico de suelos según el método de Gunther Schosinsky 2006. ....	70
<b>Anexo 4.</b> Valores utilizados para los coeficientes. ....	71
<b>Anexo 5.</b> Relación entre la textura y la posibilidad de recarga. ....	71
<b>Anexo 6.</b> Escorrentía media de la zona de estudio. ....	72
<b>Anexo 7.</b> Retención media de la zona de estudio. ....	72
<b>Anexo 8.</b> Evapotranspiración real media de la zona de estudio. ....	73

## LISTA DE ABREVIATURAS

---

CANAPEP	Cámara Nacional de Productores y Exportadores
Coopeguanacaste R. L	Cooperativa de Electrificación Rural de Guanacaste R. L
CRTM05	Costa Rica Transversa Mercator 2005
MED	Modelo de Elevación Digital
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
INDER	Instituto de Desarrollo Rural
INTA	Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica
OGC	Open Geospatial Consortium
P.H Bijagua	Proyecto Hidroeléctrico Bijagua
P.H Canalete	Proyecto Hidroeléctrico Canalete
SENARA	Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento
SETENA	Secretaría Técnica Nacional Ambiental
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SINAC	Sistema Nacional de Áreas de Conservación
SNIT	Sistema Nacional de Información Territorial
TEC	Tecnológico de Costa Rica

Capítulo 1.

# INTRODUCCIÓN

---

Este capítulo contiene la información base para el desarrollo de la investigación, expone al lector la problemática, justificación, objetivos del proyecto, alcances y limitaciones

## 1.1 Introducción

La República de Costa Rica es reconocida internacionalmente por su gran riqueza ambiental, en consecuencia, se ha encargado de crear un amplio marco legal en materia ambiental, que abarca desde la Constitución Política (artículo 50), hasta leyes de gran importancia tales como la Ley Orgánica del Ambiente, Ley Forestal, Ley de Conservación de Vida Silvestre, entre otras (CANAPEP, 2010). Asimismo, para la administración del recurso hídrico Costa Rica ha realizado grandes esfuerzos, los cuales se originan hace más de 100 años, con la implementación de legislación específica para el tema hídrico, un ejemplo de ello es la Ley de Aguas N° XI la cual vino en respuesta a las necesidades del país en ese momento (Astorga, 2016).

Sin embargo, a pesar de haber avanzado en el pasado, hoy el país se enfrenta a grandes desafíos, como lo son el cambio climático, el crecimiento exponencial de la población, la corrupción, la falta de claridad de competencias entre las instituciones del Estado y el sector privado (MINAET, 2009). Uno de los principales recursos que es atacado por las problemáticas anteriormente citadas es el agua, el cual constituye uno de los recursos fundamentales para el desarrollo de los seres vivos. Por esta razón se han implementado estrategias para la protección de dicho recurso, como los son metas a nivel mundial (Objetivo n°6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible), políticas nacionales (Política Hídrica Nacional, Política Nacional de Áreas de protección, Plan Nacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos), programas para zonas específicas (Programa Integral de Abastecimiento de Agua para Guanacaste - Piaag), entre otras estrategias.

La “Gestión Integral de Cuenca” es un tema que ha tomado lugar en las estrategias, procurando la conservación de los recursos naturales en el territorio, en función a sus características hidrológicas. El principal propósito de este concepto es “promover el uso y la gestión apropiada de los recursos naturales, buscando un equilibrio entre crecimiento económico, equidad, sostenibilidad integral y el mejoramiento de la calidad de vida de la población” (Jiménez y Benegas, 2019). Cabe mencionar que a nivel mundial este tema se ha desarrollado de formas diferentes, y sin importar la metodología utilizada es un proceso extenso y requiere la dirección de un equipo multidisciplinario (Carrie, 2004; Achouri, 2007).

Las bases de este principio de gestión se fundamentan en el conocimiento del ciclo hidrológico, el cual corresponde a un sistema dinámico y complejo. La implementación de acciones efectivas depende tanto del conocimiento técnico, como de la construcción social (Jiménez y Benegas, 2019). Como parte de la construcción del saber es indispensable la realización de estudios, estos requieren de recursos económicos y humanos, asimismo de seguimiento.

Este proyecto tiene como meta contribuir en la construcción del conocimiento hidrológico de la cuenca alta y media del Río Zapote, como base para la implementación de instrumentos dirigidos a la planificación del territorio, en función a las características hidrológicas de la zona. Este documento está dividido en ocho capítulos los cuales se titulan: Introducción, antecedentes, estudios de prefactibilidad, diseño metodológico, resultados y discusión, conclusiones y recomendaciones, referencias y anexos; dichos capítulos tejen a lo largo del documento el fundamento científico del proyecto.

## **1.2 Identificación del problema**

En la cuenca alta y media del Río Zapote, ubicada al oeste de la provincia de Alajuela, el desarrollo económico se encuentra fundamentado especialmente en el recurso hídrico. Las principales actividades que aportan al sector socioeconómico son el turismo rural comunitario, la ganadería lechera y la agricultura (frijol, arroz, café, piña, hortalizas, entre otros) (Corrales, 2013). Asimismo, en la zona se encuentran dos centrales hidroeléctricas: P.H Canalete y P.H Bijagua, las cuales tienen una capacidad instalada de 17.8 MW cada una y son administradas por la empresa Coopeguanacaste R.L (Coopeguanacaste, 2013). En la actualidad el caudal concesionado para fuerza hidráulica es de 25497.48 L/s, representa un uso no consuntivo (Dirección de Agua, 2021).

El desarrollo socioeconómico en la zona continúa siendo una de las mayores apuestas para el futuro, sin embargo, actualmente existe una serie de problemas debido a los impactos del desarrollo de las actividades humanas, como lo es el desarrollo urbano con una planificación ausente (construcción de viviendas en las cercanías de los ríos), pérdida material y humana por desastres naturales, contaminación de desechos sólidos en los cauces, deforestación, mala gestión de las aguas residuales, alteraciones en el ecosistema por la

construcción de proyectos de alto impacto, erosión de los suelos, mala comunicación entre los actores de la zona, entre otros (CNE, sf).

El escenario expuesto anteriormente, genera incertidumbre en el desarrollo progresivo de la zona, ya que la cuenca hidrográfica carece de planificación para una gestión sostenible de los sistemas socio-ecológicos (interacción de variables sociales y ambientales a una escala física en concreto (Ostrom, 2009)). Y las implicaciones de un desarrollo desmedido y descontrolado atentan con consecuencias catastróficas, como el deterioro irremediable de los recursos naturales afectando directamente las actividades productivas de la zona y el aumento de la vulnerabilidad de la población ante eventos naturales; la sumatoria de estas implicaciones guían a un mismo punto, la pérdida de calidad de vida de la población (Martínez y Villalejo, 2018).

Después de realizar una búsqueda bibliográfica se encontró que la zona no cuenta con información hidrológica actualizada, además la escasa información existente no está disponible para la sociedad. Por lo tanto, no existe información base para poder realizar una planificación del territorio que se ajuste a las características y necesidades de la zona en estudio.

Por otra parte, la construcción de planes con enfoque de manejo de cuencas hidrográficas conlleva una serie de implicaciones, principalmente: tiempo, recurso económico y recurso humano (Jiménez y Benegas, 2019).

A partir de los hechos que se presentan en torno a la planificación para un manejo de cuencas en la zona alta y media del Río Zapote, Bijagua, es que se evalúa la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el cálculo de balances hídricos, con el objetivo de generar información base para la eventual creación de un plan de manejo de cuencas.

### **1.3 Justificación**

La gestión del recurso hídrico con enfoque de cuenca hidrográfica es la visión de los gestores en la actualidad, este proceso requiere de diferentes insumos para la elaboración de un plan que se adecue a la zona de interés. Sin embargo, el concepto de la gestión integral del recurso hídrico es amplio y existen a nivel mundial diferentes formas para definirlo y

desarrollarlo, además se conoce que, sin importar la metodología utilizada, es un procedimiento amplio (Achouri, 2007). Según Carrie (2004) se requiere de la participación de un equipo multidisciplinario que dirija el proceso. Además, durante las fases (organización del equipo gestor, caracterización y diagnóstico, identificación de problemas, seguimiento y evaluación, sistematización de experiencias y comunicación (Jiménez y Benegas, 2019)) del proceso precisan contar con recurso humano, recurso económico y tiempo (Corrales, 2013).

En muchos escenarios estas fases (antes mencionadas) son parte de las mayores limitantes que conduce a problemas concurrentes en la ciencia de la hidrología, la "ausencia de datos" (Pizarro et al., 2009). Por lo que antes de construir un plan de gestión de cuencas sólido, es importante dedicar tiempo en la obtención de información de la cuenca, la cual servirá como fundamento para el producto final, un Programa de manejo integral de cuencas.

Por otra parte, si no se toma acción en la actualidad esto puede implicar un riesgo en el deterioro paulatino y constante de los recursos naturales.. De forma sinérgica lo expuesto anteriormente perjudica la calidad de vida de los habitantes en el territorio, lo cual va en contra de los lineamientos del país, ya que en la Constitución Política se menciona que "Toda persona tiene derecho a un ambiente sano y ecológicamente equilibrado", en la sección 3.1 se desarrolla con mayor amplitud los aspectos legales del proyecto.

Es importante recalcar que la zona en estudio ha pasado por diferentes procesos en los cuales se ha visto modificada. Un ejemplo de ello son las construcciones de infraestructuras en el cauce para el aprovechamiento de hidroelectricidad, como se mencionó en apartados anteriores, en la cuenca del Río Zapote se encuentran dos centrales de mediano tamaño administradas por Coopeguanacaste R. L. Desde la apertura de la primera central en el año 2008, Coopeguanacaste R.L ha desarrollado prácticas y estudios de mitigación como parte de lo requerido por la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA). Sin embargo, es necesario darles continuidad a los esfuerzos realizados, y efectuar un trabajo en conjunto con la sociedad, esto con el fin de fortalecer la gobernanza de la zona y apostar a la gestión integral de las cuencas.

Finalmente, la generación de conocimiento hidrológico estimula el fortalecimiento de procesos de gestión, refuerza la relación de los sistemas socio-ecológicos, se mejora la calidad de vida de las personas, además garantiza un desarrollo sostenible de los recursos

naturales ante proyecciones que aseguran un aumento en nuevas actividades socioeconómicas en la zona, principalmente el turismo. Asimismo, se asegura la optimización y prevalencia de las actividades que se desarrollan actualmente en la cuenca.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Determinar el balance hídrico del suelo, como insumo técnico base para la gestión integral de la cuenca alta y media del Río Zapote, Alajuela, Costa Rica.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Calcular la disponibilidad de agua en las principales fases del ciclo hidrológico mediante la ecuación de balance hídrico de suelos propuesto por Schosinsky con la aplicación de Sistemas de Información Geográfica, para cuantificar el recurso hídrico en la cuenca alta y media del Río Zapote.
- Generar cartografía por medio de los softwares ArcGIS 10.7 y QGis 3.10.3, para mostrar la distribución espacial del agua en las principales fases del ciclo hidrológico en la cuenca alta y media del Río Zapote.
- Identificar la demanda del agua vinculado a los principales actores sociales en la cuenca alta y media del Río Zapote mediante información obtenida de base de datos de instituciones competentes para determinar relación con recurso hídrico.

## **1.5 Alcances y limitaciones**

### **1.5.1 Alcances**

Se generó información hidrológica primaria a nivel de cuenca alta y media.

Se desarrolló el balance hídrico de suelos aplicado a Sistemas de Información Geográfica para la cuenca alta y media del Río Zapote, con una resolución espacial de ocho metros y una resolución temporal mensual.

Se identificaron las zonas con alto potencial de recarga.

Se digitalizó la capa de uso de la tierra en la cuenca alta y media del Río Zapote a una escala de 1:4500, por medio de fotointerpretación de ortofotos.

Se generó cartografía de las principales fases del ciclo hidrológico en la cuenca alta y media del Río Zapote.

### **1.5.2 Limitaciones**

La cuenca no posee información espacial disponible para el público, las curvas de nivel tienen vacíos de información, lo que se traduce en una calidad baja de datos.

Las imágenes satelitales de la zona presentan altos porcentajes de nubosidad imposibilitando la aplicación de metodologías de teledetección.

La cantidad de puntos de muestreos para el cálculo de infiltración del suelo y determinación de características del suelo se encuentran limitada a los recursos económicos principalmente, y a la dificultad de acceso de ciertos sectores de la cuenca.

La emergencia mundial por el virus SARC-CoV-19 obligó a que se modificara la logística de visitas a campo, limitando la obtención de datos.

## Capítulo 2.

# ANTECEDENTES

---

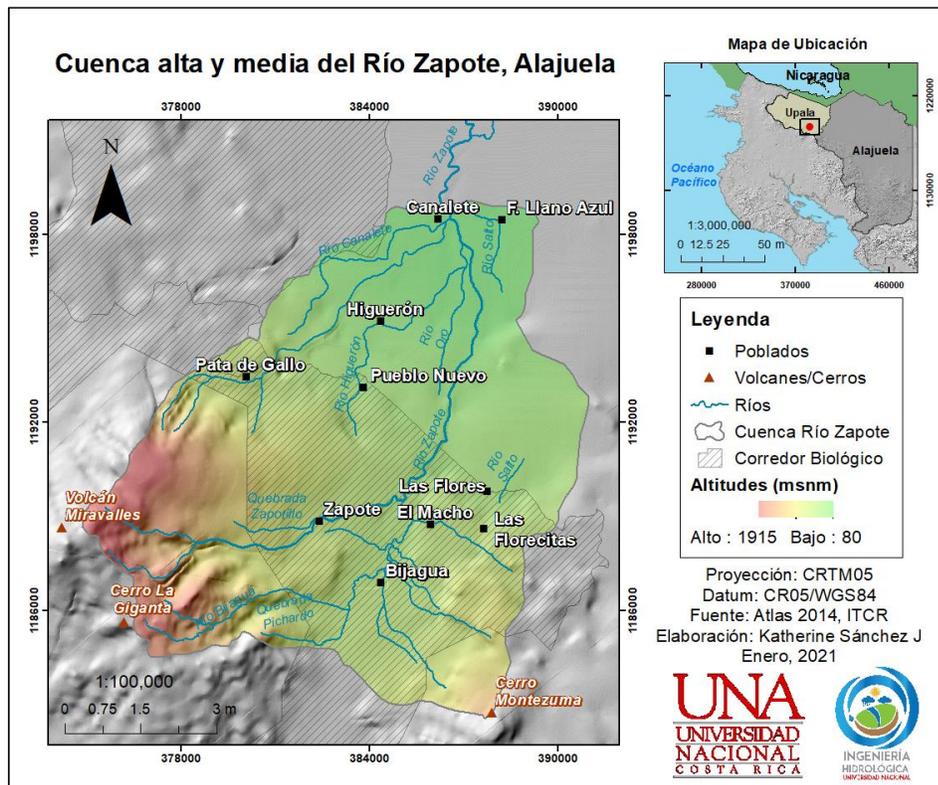
Este capítulo proporciona la base teórica del proyecto, contempla una sección de descripción de la zona en la cual se exponen las características más relevantes de la zona de estudio, también se describe una sección sobre estudios previos haciendo referencia a los estudios ya existentes que abordan la misma temática. Y por último se citan una serie de conceptos que serán necesarios para comprender la investigación.

## 2.1. Descripción de la zona

### 2.1.1 Localización geográfica

La cuenca alta del Río Zapote se encuentra en las hojas cartográficas denominadas Miravalles y Upala, producidas a una escala 1:50,000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN), entre las coordenadas CRTM05 390874.07 E - 1199180.59 N y 374060.83 E - 1182987.84 N.

Esta cuenca binacional posee un área aproximada de 167.16 km<sup>2</sup>. Su cauce principal (Río Zapote) nace en las faldas del Volcán Miravalles y desemboca en el Lago de Nicaragua. El Río Zapote se localiza en la provincia de Alajuela y recorre al distrito de Bijagua perteneciente al cantón de Upala. Se ubicaban aproximadamente diez poblados: Bijagua, Las Flores, Zapote, Pueblo Nuevo, Pata de Gallo, Higuerón, Canaleta y Finca Llano Azul (TEC, 2014).



**Figura 1.** Ubicación geográfica de la zona de estudio.

Fuente: Propia, 2020.

### **2.1.2 Características biofísicas**

La zona en estudio se encuentra influenciada por el régimen de precipitación del Caribe, el cual se caracteriza por presentar lluvias todo el año (Solano y Villalobos, 2000), posee un periodo relativamente seco en los meses de febrero, marzo y abril (Villalobos et al., 2013). Según datos proporcionados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de la estación Upala para el periodo de 1998 a 2019, la precipitación anual acumulada de la zona ronda los 2432.3 mm, siendo junio el mes más lluvioso con 343.2 mm y marzo el mes más seco con 38.9 mm. La temperatura media de la zona es de 26.6 °C, presentando en promedio temperaturas máximas de 31.2 °C y mínimas de 22.1 °C. En el capítulo cinco de resultados y discusiones se detallarán las características climática en la zona necesarias para el cálculo de balances hídricos.

La zona que se encuentra en la depresión entre los macizos del Volcán Miravalles y el Cerro Montezuma, es afectada por los temporales producidos indirectamente de los huracanes que afectan la vertiente del Pacífico (Biodesa S.A, 2010).

La elevación máxima en la parte alta de la cuenca del Río Zapote ronda los 1915 m.s.n.m y la mínima, ronda los 80 m.s.n.m en el punto de desfogue del área de estudio (ver figura 1). De acuerdo con el mapa de zonas de vida de Costa Rica según el sistema de clasificación de Holdridge, se localizan cuatro zonas de vida: en las zonas con mayor altura se encuentra el bosque pluvial premontano (bp-P), consecutivamente se encuentra el bosque muy húmedo premontano (bmh-P), bosque muy húmedo tropical transición a premontano (bmh-T12) y el bosque muy húmedo tropical (bmh-T).

La cuenca alta del Río Zapote se encuentra administrada por el área de conservación Arenal Tempisque (ACA-T) y por el área de Arenal Huetar Norte (ACA-HN). Además, se incluye secciones de tres corredores biológicos, los cuales son: el Tenorio-Miravalles de mayor importancia en la zona y una parte menor de Ruta Los Malekus-Medio Queso y Miravalles-Rincón de la Vieja.

En la figura 2 se muestran algunas de las especies arbóreas y de animales (figura 3) que se encuentran en la zona de estudio.



**Figura 2.** Especies arbóreas de la zona. (A) higuierón (*Ficus spp.*), (B) cedro amargo (*Cedrela odorata*), (C) cucaracho (*Billia colonbiana*), (D) hule (*Castilla elástica*).

Fuente: MINAE, 2001; Ilustraciones obtenidas de Google.



**Figura 3.** Fauna que se puede encontrar en la zona de estudio. (A) zorro pelón (*Didelphis marsupialis*), (B) hormiguero (*Tamandua mexicana*), (C) mono carablanca (*Cebus capucinus*), (D) perezoso dos dedos (*Choleopus hoffmanni*).

Fuente: MINAE, 2001; Ilustraciones obtenidas de Google.

Según la cartografía obtenida por las capas del Atlas del Instituto Tecnológico de Costa Rica del año 2014, los suelos ubicados en la zona de estudio corresponden a andisoles, derivados de material volcánico, ultisoles, los más viejos y meteorizados de Costa Rica, e inceptisoles, producidos por los procesos que sufren los sedimentos aluviales y coluviales (Henríquez et al., 2014).

Por otro lado, según el Estudio hidrogeológico realizado en el año 2010 para la construcción del proyecto hidroeléctrico Bijagua (Biodesa S.A, 2010), se determinó que la geología que predomina está construida por formaciones volcánicas con orígenes variados. Entre estas se encuentran coladas de lava, mantos de ceniza, depósitos de flujos piroclásticos y rellenos de avalanchas volcánicas. En los ríos Zapote y Bijagua se encuentran formaciones recientes de espesores reducidos, en los cauces se localizan depósitos de aluviones y coluvio en las laderas.

### **2.1.3 Características fisiográficas**

Se determinó las coordenadas del punto de desfogue del río principal, área, perímetro, largo, ancho, longitud del cauce principal, cota máxima, cota mínima, cota media y centroide de la cuenca. Sin embargo, para calcular estos valores primero fue necesario hacer la delimitación de la zona por medio de las capas de los ríos y curvas de nivel del Atlas del Tecnológico de Costa Rica, este proceso y el cálculo de los parámetros anteriormente citados se realizó por medio del software ArcGIS 10.7. Posteriormente esta información fue utilizada para el cálculo de índices que permiten la caracterización hidrológica de la zona de estudio.

El Río Zapote posee una orientación de sur-norte y su longitud total hasta la desembocadura en el Lago de Nicaragua es de 47.55 km, sin embargo, esta investigación contempla 18.98 km del cauce perteneciente a la sección alta y media de la cuenca.

Por otra parte, el Río Zapote posee un orden de drenaje de tres según la metodología de Strahler, tiene un sistema de tributarios integrado por varias quebradas de régimen intermitente y cinco ríos (Río Bijagua, Río Salto, Río Canalete, Río Higuierón y Río Oro) que se ubican la parte alta de la cuenca (TEC, 2014).

En la siguiente tabla se encuentra un resumen de los parámetros fisiográficos de la cuenca alta del Río Zapote.

**Tabla 1.** Resumen de las características fisiográficas de la cuenca en estudio.

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Punto de desfogue</b>	x (m)	386428.88
	y (m)	1198855.86
<b>Área</b>	Km <sup>2</sup>	167.16
<b>Perímetro</b>	Km	56.45
<b>Largo</b>	Km	18.70
<b>Ancho</b>	Km	22.41
<b>Longitud de cauce principal</b>	Km	18.98
<b>Índice de forma de la cuenca</b>	Adimensional	0.46
<b>Índice de circularidad de la cuenca</b>	Adimensional	0.66
<b>Coefficiente de compacidad de Gravelius</b>	Adimensional	1.23
<b>Proporción de elongación</b>	Adimensional	0.77
<b>Cota máxima</b>	msnm	1915
<b>Cota mínima</b>	msnm	80
<b>Cota media</b>	msnm	564.31
<b>Centroide x</b>	msnm	383740
<b>Centroide y</b>	m	1190620
<b>Tiempo de concentración</b>	h	1.30
<b>Tiempo de retención</b>	h	0.78
<b>Pendiente media</b>	m/m	0.16

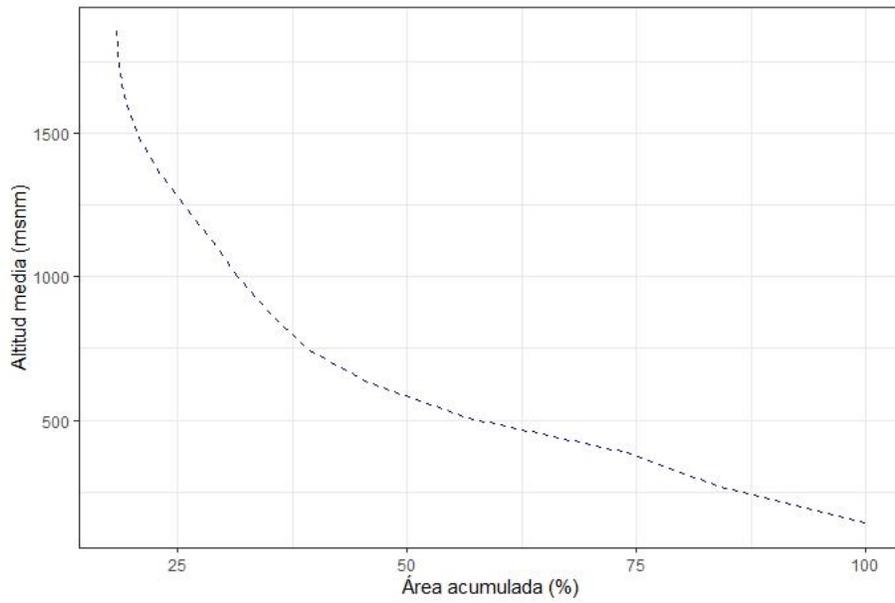
*Las fórmulas utilizadas se encuentran en el anexo 1.*

Fuente: Propia, 2020.

A partir de los resultados obtenidos se puede determinar que la cuenca en estudio es propensa a tener tormentas intensas a lo largo de todo el territorio (Villón, 2004). Asimismo, posee una forma circular predominante ya que su índice de circularidad se encuentra cercano a uno (De Matauco, 2004), sin embargo, según el factor de Gravelius también se determina que posee una tendencia a ser alargada ya que dicho coeficiente es mayor a uno (Villón, 2004). Por otro lado, se encontró que la cuenca es muy plana y posee porciones accidentadas ya que su factor de elongación se encuentra entre 0.5 y 0.8.

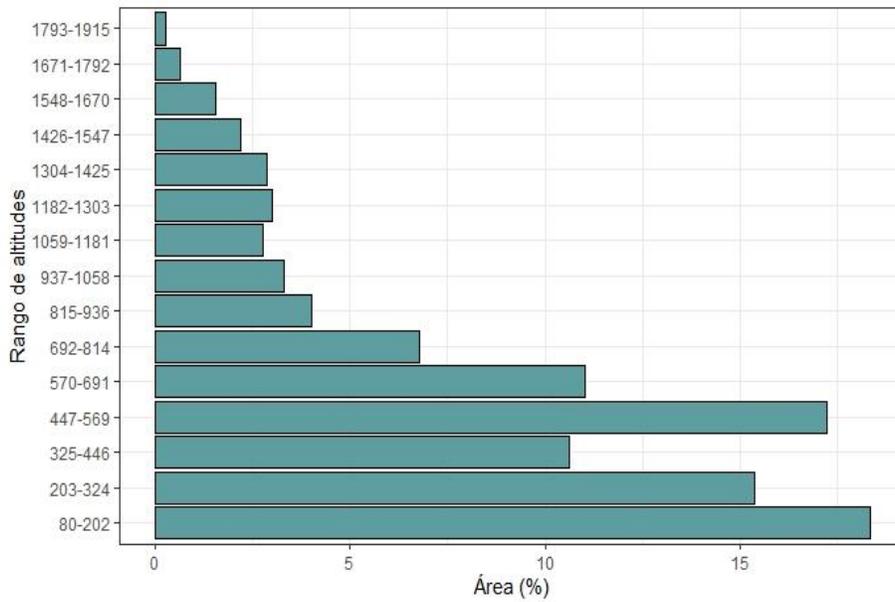
A partir del cálculo de la curva hipsométrica con la implementación de SIG, se determina que la cuenca es de tipo sedimentaria y se asocia a una fase de vejez (Guerra y González, 2002). Además, según el histograma de frecuencias se determina que las altitudes que se encuentran en mayor proporción en la zona rondan entre los 80 y 202 msnm.

Asimismo, se calcularon los valores para la curva hipsométrica y el histograma de frecuencias, este procedimiento se realizó por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y se graficaron en con el lenguaje de programación R.



**Figura 4.** Curva hipsométrica de la cuenca alta y media del Río Zapote.

Fuente: Propia, 2020.



**Figura 5.** Histograma de frecuencias altimétricas de la cuenca en estudio.

Fuente: Propia, 2020.

#### **2.1.4 Características socioeconómicas**

El origen de la población en el cantón de Upala, territorio donde se ubica la zona de estudio de esta investigación, inició por la llegada de inmigrantes provenientes de Nicaragua, estas personas realizaban actividades en el área de la agricultura, ganadería, pesca, caza y artesanía (Solórzano, 2018). Y hasta el día de hoy existe un flujo de migrantes el cual se intensifica durante los periodos de cosecha. Según el último censo realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica (INEC) en el año 2011, se determinó que el cantón de Upala contaba con 43,953 habitantes, el 79% ubicados en zonas rurales y el 21% en zonas urbanas (Inder, 2014).

Algunos de los usos del suelo actuales están destinados a pequeñas zonas urbanas, pastizales, agricultura de consumo local (predominando el arroz, frijol, plátano, tiquizque, yuca, ñame, palmito, naranja, piña, café y hortalizas), bosque primario, bosque secundario, ganadería lechera y de doble propósito (Inder, 2014; Biodesa S.A, 2010; Delgado y Córdoba, 2012).

En los últimos años la actividad turística en la zona ha tomado mayor dinamismo, por lo que parte de los pobladores comenzaron a ofrecer servicios turísticos principalmente de hospedaje, este descubrimiento sobre el potencial turístico de la zona ha provocado el interés de inversionistas nacionales y extranjeros en establecer sus empresas (Corrales, 2013). Existen grupos en la zona que se han encargado de impulsar el turismo rural comunitario con un enfoque de desarrollo sostenible, los atractivos que se destacan en la zona son: el Albergue Ecoturístico Heliconias y el Río Celeste por su catarata y aguas de color celeste (MINAET y SINAC, 2009; Biodesa S.A, 2010).

En la cuenca alta del Río Zapote se localizan dos minis centrales hidroeléctricas administradas por Coopeguanacaste R.L. La minicentral hidroeléctrica Canalete se ubica en el Río Canalete (tributario del Río Zapote) la cual inició su operación en el año 2008 y posee una capacidad instalada de 17.5 MW, esta represa cubre la demanda eléctrica de aproximadamente treinta mil hogares y cuenta con un sistema de tomas que conduce el agua hasta un embalse de cinco hectáreas (Coopeguanacaste, 2013). Posteriormente a mediados del año 2016 inició la operación de P.H Bijagua la cual posee dos tomas (Río Zapote y Río

Bijagua) esta obra corresponde a la segunda etapa de la central de Canalete, esta posee una capacidad de 17.6 MW, con la que abastece a veintiún mil hogares (Coopeguanacaste, 2013).

## **2.2 Estudios de referencia**

Los estudios que se encuentran disponibles se han realizado en territorios que corresponden a diferentes delimitaciones. Las mayormente utilizadas son las delimitaciones políticas, por lo que estos documentos fueron utilizados como respaldo para describir la zona, no obstante, el enfoque principal difiere al de este proyecto. Cabe resaltar que existen esfuerzos realizados por diferentes instituciones, entre ellas la Universidad Nacional de Costa Rica que ha generados insumos necesarios en la elaboración de Planes de Ordenamiento Territorial, sin embargo, estos mecanismos no se han gestado.

Entre los estudios que fueron de relevancia para este proyecto se citan los siguientes:

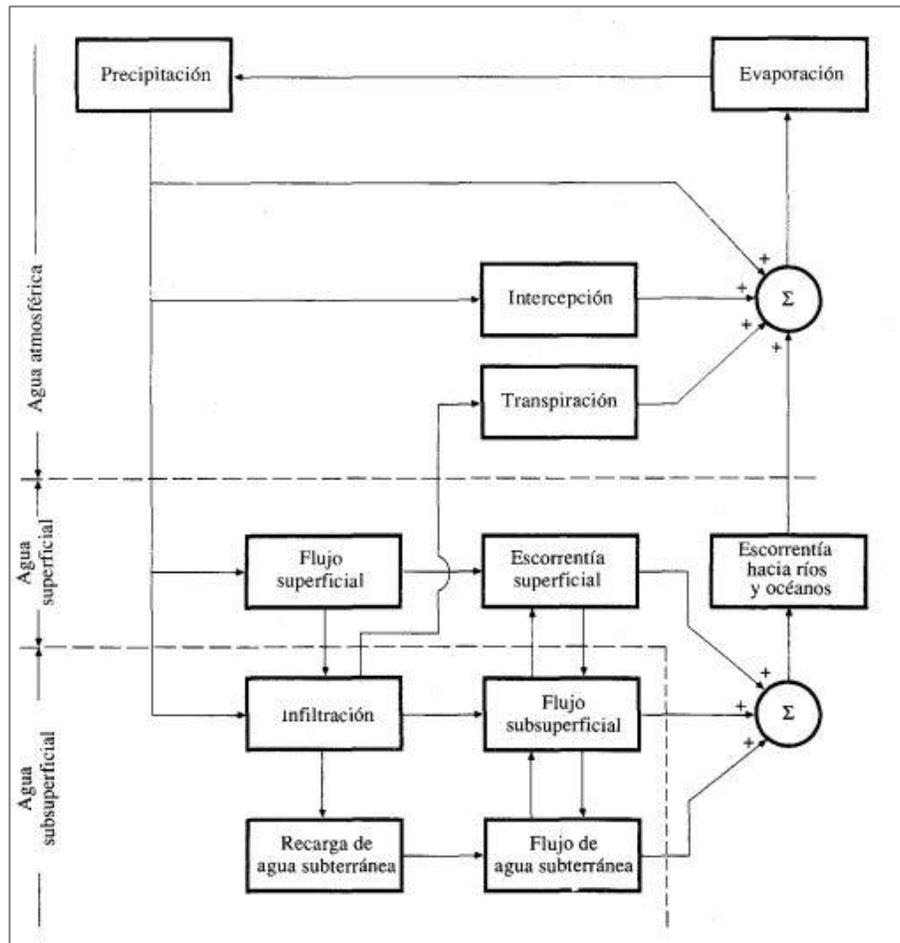
- Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos, (Schosinsky, 2006). El cual contempla en detalle las fórmulas empleadas para el cálculo del balance hídrico de suelos.
- Tesis “Recarga y extracción hídrica de los acuífero Colima y Barva, Valle Central, Costa Rica”, (Ramírez, 2014). Este estudio fue fundamental en la determinación de los coeficientes con respecto a la vegetación, la pendiente y longitud de raíces.
- Selección, disposición y acomodo de datos sobre un modelo hidrológico de infiltración y recarga como parte del balance hídrico de suelos; empleando Sistemas de Información Geográfica (Model Builder – ArcGIS 10.2), (Rafael, 2016). Dicho documento fue guía para el cálculo de las variables en la calculadora ráster del software ArcGIS 10.7.
- Análisis hidrológico y determinación de la recarga potencial en la cuenca del Río Machuca, Pacífico Central de Costa Rica, (Bonilla, 2014). Este documento proporciono información teórica relevante de los balances hídricos, la cual permitió una mejor comprensión del proceso.

## 2.3 Marco teórico

En los capítulos anteriores se ha conversado sobre la “gestión integral de cuencas” sin embargo, es importante conocer algunos conceptos fundamentales que ayudarán a entender con mayor amplitud el desarrollo del proyecto. En muchas ocasiones se escucha sobre la palabra “cuenca”, pero ¿qué es una cuenca?, la **cuenca hidrográfica** es una forma de delimitar una zona con respecto a la unidad hidrológica superficial, es decir si esta fuese impermeable todo lo que escurriría por ella drenaría a un mismo punto, en este caso a ese punto se le llama cauce o río. (Bateman, 2007). Por otro lado, cuando se habla de “cuenca hidrológica” se hace referencia no solo a los cuerpos superficiales sino también a los subterráneos.

Una cuenca hidrográfica está integrada por sistemas biofísicos, socioeconómicos y político-administrativos, estos componentes interactúan entre sí formando un sistema natural y complejo (Rodríguez, 2006). Las cuencas se pueden dividir de múltiples formas, por ejemplo, una cuenca se puede partir en tres secciones, la parte alta donde se encuentra las zonas de mayor altitud, la parte media la cual posee las altitudes promedio de la zona y parte baja que comprende las altitudes menores del territorio. Otra forma de dividir el territorio es en cuencas, subcuencas y microcuenca, esta división esta fundamenta al tamaño de la red hidrológica.

Uno de los temas más importantes en las cuencas es el **ciclo hidrológico**, según Chow (2005), el ciclo hidrológico no tiene principio ni fin, y sus procesos ocurren de forma continua. El agua se evapora desde los océanos y desde la superficie terrestre para volverse parte de la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se condensa y precipita puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo subsuperficial y descargar en los ríos como esorrentía superficial. La mayor parte del agua interceptada regresa a la atmósfera mediante la evaporación. Mientras que el agua que se infiltra puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea (Chow, 2005).



**Figura 6.** Esquema del balance hídrico.

Fuente: Chow, 2005.

Por otro lado, el **balance hídrico** está basado en la ley de conservación de la masa, en el que la cuenca corresponde al sistema donde las entradas deben ser iguales a la salida. El objetivo de un balance hídrico es evaluar los aportes y descargas de un sistema hidrológico en un periodo determinado (Bateman, 2007). Cuando se habla específicamente sobre balance hídrico de suelos además de analizar las fases del ciclo hidrológico superficial se considera con mayor detalle cómo influye el suelo en el proceso, las fases a estudiar son la precipitación, evapotranspiración, escorrentía, infiltración, retención y recarga. Asimismo, algunas de las características principales del suelo en este estudio son la densidad aparente, punto de marchitez, capacidad de campo, entre otras.

El cálculo del balance hídrico se realiza por medio de procesos matemáticos, sin embargo, en la actualidad también se pueden implementar los **Sistemas de Información Geográfica (SIG)** con el fin de facilitar el entendimiento a nivel espacial. La ciencia que estudia esto se le conoce como geoestadística. Los SIG Se definen como un sistema computarizado de manejo de bases de datos para la captura, el almacenamiento, la reobtención, el análisis, despliegue de datos espaciales, es decir datos geo-referenciados. En una base de datos se pueden hacer consultas y obtener la respuesta de forma inmediata y es compartida y usada por múltiples usuarios para diferentes propósitos (Solano, 1993).

Entendiendo los conceptos anteriores es oportuno continuar con el tema de **“gestión integral de cuencas”**, este tema es especial por el significado de las cuencas como unidad territorial para la planificación del agua y los recursos naturales. Por otro lado, el bienestar del sistema se ve amenazado por factores como el crecimiento poblacional acelerado, los modelos de desarrollo, ambición económica, la ausencia o el incumplimiento de políticas y normativas, los intereses sociales, la falta de conocimiento, de empoderamiento y de capacidad de gestión, estos factores amenazan con degradar los recursos naturales y la modificación de servicios ecosistémicos (Martínez y Villalejo, 2018).

El propósito del manejo de cuencas es “promover el uso y la gestión apropiada de los recursos naturales, buscando un equilibrio entre crecimiento económico, equidad, sostenibilidad integral y el mejoramiento de la calidad de vida de la población” (Jiménez y Benegas, 2019).

Las bases para un manejo y gestión de cuencas se sustentan en el ciclo hidrológico, por lo que es de suma importancia conocer el comportamiento del sistema hidrológico de la cuenca. Además, es importante tomar en cuenta que las cuencas son sistemas complejos los cuales están formados a su vez por subsistemas e interactúan entre sí, según Jiménez y Benegas (2019) los factores que se encuentran involucrados son el social, económico, político, institucional, cultura, legal, tecnológico productivo, físico y biológico

Los conceptos anteriormente presentados es la base teórica necesaria para entender los términos a utilizar en el desarrollo de la investigación. Por otra parte, el capítulo a continuación presenta los estudios de prefactibilidad los cuales tienen como objetivo evaluar la viabilidad del proyecto en cinco áreas: legal, ambiental, social, financiera y técnica.