

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la  
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para  
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE CAUCES DE LA CUENCA DEL RÍO TEMPISQUE  
INVOLUCRADOS EN EL PROYECTO ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA LA  
CUENCA MEDIA DEL RÍO TEMPISQUE Y COMUNIDADES COSTERAS (PAACUME)

GIANCARLOS BARQUERO PIZARRO

CARTAGO, 2019

ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE CAUCES DE LA CUENCA DEL RÍO TEMPISQUE  
INVOLUCRADOS EN EL PROYECTO ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA LA  
CUENCA MEDIA DEL RÍO TEMPISQUE Y COMUNIDADES COSTERAS (PAACUME)

GIANCARLOS BARQUERO PIZARRO

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la  
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para  
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

---

Dra. Isabel Guzmán Arias

Asesor

---

Msc. Marvin Villalobos Araya

Director Escuela  
Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2019

## **DEDICATORIA**

A mi madre, Hilda Pizarro Gómez; mi padre, Modesto Barquero Campos; mi hermano, Adrián Barquero Pizarro y mi hermana, Graciela Barquero Pizarro por el apoyo absoluto en todos mis años de

## **AGRADECIMIENTO**

En primera instancia a Dios por la fuerza, salud y perseverancia para superar cada una de las metas en mi vida.

A mis padres, quienes dieron todo con lo que contaban para ayudarme, mi hermana Graciela quién fue parte fundamental en el apoyo económico y motivacional, al igual que todos mis hermanos quienes siempre estuvieron pendientes de mi estado emocional y académico a lo largo de mi proceso universitario.

A los profesores y personal administrativo de la Escuela de Ingeniería Agrícola del Tecnológico de Costa Rica, quienes me brindaron asesoramiento e instruyeron para lograr superar cada uno de los obstáculos a los que me enfrenté.

Igualmente, un gran agradecimiento a la Vicerrectoría de Vida Estudiantil y Servicios Académicos del Tecnológico de Costa Rica, por el apoyo económico en cada una de las peticiones que realicé.

Además, agradezco rotundamente al Programa de Residencias de la universidad, por la aprobación de mi estancia en las instalaciones durante mis últimos 3 años de carrera.

Finalmente, doy las gracias a mi amigo Rachid Abarca Solís quién me ayudó a realizar los trámites de post-admisión a la institución, de igual forma, agradezco a cada uno de mis amigos de la carrera de Ingeniería Agrícola, especialmente a Mauro Rodríguez, Adrián Garita y Alexander Chanto por el apoyo y compañía durante este proceso.

# Índice de contenidos

Resumen.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. OBJETIVOS .....	13
2.1 Objetivo general.....	14
2.2 Objetivos específicos .....	14
3. REVISIÓN DE LITERATURA .....	15
2.1 Hietogramas y parámetros morfométricos de las subcuencas en estudio .....	16
2.1.1 Medición de la precipitación .....	16
2.1.2 Completación de información de datos faltantes .....	16
2.1.3 Precipitación promedio de una cuenca .....	17
2.1.4 Modelación hidrológica .....	17
2.2.1 Número de curva.....	18
2.3 Hidrogramas.....	20
2.4 Impacto ambiental, social y económico de un proyecto.....	21
4. METODOLOGÍA .....	23
3.1 Zona de Estudio.....	24
3.2 Recursos y herramientas utilizadas.....	26
3.3 Estudio Hidrológico.....	28
3.3.1 Análisis de cauces .....	28
3.3.2 Modelo de elevación digital (MED) .....	28
3.3.3 Red de drenaje y microcuencas .....	29
3.3.4 Análisis de datos de precipitación de las estaciones meteorológicas .....	29
3.3.5 Generación de Hietogramas .....	30
3.3.6 Cálculo del caudal mediante el método de número de curva .....	30
3.3.7 Construcción de los hidrogramas.....	32
3.3.7.1 Recopilación de parámetros morfométricos de la subcuenca .....	32
3.3.7.2 Base geográfica para la simulación (Basin Model Manager) .....	33
3.3.7.3 Hietogramas (Time_Series. Data Manager) .....	33
3.3.7.4 Modelo meteorológico (Meteorologic Model Manager) .....	33
3.3.7.5 Salida de resultados (Control Specifications Manager) .....	33

3.3.7.6 Simulación .....	34
3.4 Análisis cualitativo del impacto social del proyecto en el desarrollo del proyecto PAACUME ...	34
3.5 Análisis cualitativo del impacto ambiental del proyecto en el desarrollo del proyecto PAACUME .....	34
3.6 Análisis cualitativo del impacto económico del proyecto en el desarrollo del proyecto PAACUME .....	35
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	36
4.1 Descripción de los cauces en estudio .....	37
4.2 Análisis de datos de precipitación de las estaciones meteorológicas.....	39
4.2.1 Porcentaje de influencia de las estaciones meteorológicas en la subcuenca.....	39
4.2.2 Completación de los datos meteorológicos.....	41
4.3 Calculo del número de curva .....	48
4.3.1 Determinar los grupos de suelo que existen en la subcuenca .....	48
4.3.2 Determinar el uso de suelo de cada subcuenca.....	49
4.3.3 Determinar el número de curva .....	51
4.4 Hidrogramas de crecida en HEC-HMS .....	53
4.4.1 Tiempo de concentración .....	53
4.4.2 Modelación hidrológica de la subcuenca Liberia. ....	54
4.4.3 Modelación hidrológica de la subcuenca Salto. ....	55
4.4.4 Modelación hidrológica de la subcuenca Zopilota. ....	55
4.4.5 Modelación hidrológica de la subcuenca Cabuyo. ....	56
4.4.6 Modelación hidrológica de la subcuenca Sardinal y subcuenca Palmas. ....	57
4.4.7 Modelación hidrológica de la subcuenca Cañas y subcuenca Diriá. ....	59
4.5 Análisis cualitativo del impacto social del proyecto en el desarrollo del proyecto PAACUME. ..	60
4.6 Análisis cualitativo del impacto ambiental del proyecto en el desarrollo del proyecto PAACUME. ....	61
4.7 Análisis cualitativo del impacto económico del proyecto en el desarrollo del proyecto PAACUME. ....	62
6. CONCLUSIONES.....	64
7. RECOMENDACIONES .....	66
8. BIBLIOGRAFÍA.....	68
9. ANEXOS.....	72

## Índice de figuras

Figura 1 Mapa de la cuenca del río Tempisque. ....	24
Figura 2 Mapa de las subcuencas en estudio. ....	25
Figura 3 Mapa de las subcuncas en estudio. ....	37
Figura 4. Mapa de los poligonos de Thiessen sobre las subcuencas. ....	40
Figura 5 Registros de lluvia diaria máxima de cada año. ....	42
Figura 6 Distribución de ajuste para cada estación. ....	44
Figura 7 Hietograma de las estaciones 74067 y 74051 respectivamente. ....	46
Figura 8 Hietograma de las estaciones 74053 y 74008 respectivamente. ....	47
Figura 9 Mapa de uso de suelo en cada una de las subcuencas. ....	49
Figura 10 Uso de suelo en cada subcuenca. ....	50
Figura 11 Número de curva en cada subcuenca. ....	51
Figura 12 Hidrograma de la subcuenca Liberia. ....	54
Figura 13 Hidrograma de la subcuenca Salto. ....	55
Figura 14 Hidrograma de la subcuenca Zopilota. ....	56
Figura 15 Hidrograma de la subcuenca Cabuyo. ....	57
Figura 16 Hidrograma de la subcuenca Sardinal. ....	58
Figura 17 Hidrograma de la subcuenca Palmas. ....	58
Figura 18 Hidrograma de la subcuenca Cañas. ....	59
Figura 19 Hidrograma de la subcuenca Dirιά. ....	60

## Índice de cuadros

Cuadro 1. Combinación de bandas multiespectrales. Fuente: Watson (s.f.). ....	19
Cuadro 2. Área y longitud de los cauces de cada subcuenca. ....	38
Cuadro 3. Estaciones meteorológicas utilizadas. ....	39
Cuadro 4. Porcentaje de influencia de las estaciones meteorológicas en las subcuencas. ....	41
Cuadro 5. Tiempo de retorno enlazado a la precipitación diaria máxima de cada estación. ....	45
Cuadro 6. Grupo hidrológico de las subcuencas en estudio. ....	48
Cuadro 7. Numero de curva promedio para cada subcuenca. ....	52
Cuadro 8. Tiempo de retardo para cada una de las subcuencas en estudio. ....	53
<a href="#">Anexo1</a> Cuadro 9. Lluvias diarias máximas de cada año. ....	73
<a href="#">Anexo1</a> Cuadro 10. Registro diario del día 04 de octubre del 2017. ....	74
<a href="#">Anexo2</a> Cuadro 11. Uso de suelo en cada subcuenca. ....	75

## Resumen

Este proyecto se llevó a cabo con el fin de determinar los hidrogramas de crecida de los cauces de la cuenca del río Tempisque involucrados en el proyecto PAACUME, insumo importante para el diseño de obras hidráulicas futuras. Para determinar los hidrogramas se utilizó el software Sistema de Modelación Hidrológica (HEC-HMS), el cual facilitó la interpretación de los datos de precipitación registrados en las ocho subcuencas en estudio, analizando el evento tropical de mayor importancia ocurrido el 04 de octubre del 2017, el cual generó un caudal máximo de 2057,2 m<sup>3</sup>/s para la subcuenca de mayor área (442,06 km<sup>2</sup>) y un caudal máximo de 134,5 m<sup>3</sup>/s para la subcuenca de menor tamaño (45,1 km<sup>2</sup>).

**Palabras clave:** Hidrogramas, hietogramas, HEC-HMS, número de curva, Subcuencas.

## Abstract

This project was carried out in order to determine the flood hydrographs of the channels of the Tempisque river basin involved in the Paacume project, an important input for the design of future hydraulic works. To determine the hydrographs, the Hydrological Modeling System (HEC-HMS) software was found, which facilitates the interpretation of the data of the records registered in the eight sub-basins under study, analyzing the most important tropical event that occurred on October 4, 2017, which generated a maximum flow of 2057,2 m<sup>3</sup> / s for the sub-basin of the largest area (442,06 km<sup>2</sup>) and a maximum flow of 134,5 m<sup>3</sup> / s for the sub-basin of the smallest size (45,1 km<sup>2</sup>).

**Keywords:** Hydrograms, hietograms, HEC-HMS, curve number, Sub-basins.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La disminución en los registros de precipitación para la provincia de Guanacaste generó gran preocupación para el Gobierno de Costa Rica especialmente en el año 2015, basándose en el registro de 78 años del Instituto Meteorológico Nacional el mayor déficit de precipitación en el país fue en dicho año (Solano, 2015). Por lo general, las lluvias en esta provincia son muy escasas en varios meses del año, limitando de este modo el agua para consumo humano, el desarrollo de la agricultura y la ganadería, así como también, atraso en una gran serie de actividades de gran importancia en la zona (Arguedas, 2016).

El cambio climático en la provincia de Guanacaste genera deficiencias importantes de agua, debido a esta problemática el gobierno de la República de Costa Rica creó el Programa Integral de Abastecimiento de Agua para Guanacaste (PIAAG), el cual se encargaría de hacer que se aproveche el recurso hídrico de modo óptimo en las distintas actividades que se dan en la zona (Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), s.f.).

Para mitigar en gran medida los faltantes de agua en Guanacaste, el PIAAG crea el Proyecto Abastecimiento de Agua para la Cuenca Media del río Tempisque y Comunidades Costeras (PAACUME), el cual buscará ayudar el sector turístico de los cantones Nicoya, Carrillo y Santa Cruz, así como también, generar energía hidroeléctrica y aumentar el suministro de agua potable y agua para fines agrícolas (Villalobos, 2017).

PAACUME consta de un canal de distribución, un embalse y una red de distribución que permiten el traslado de agua de la presa Miguel Pablo Dengo a los cantones beneficiados de Guanacaste, por medio de estas obras se pretende garantizar el aumento del suministro de agua en la zona.

El Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), es la institución a cargo de PAACUME, por lo que las obras hidráulicas que harán posible el buen funcionamiento del proyecto dependen de ella. Para el diseño de las obras hidráulicas es vital contar con un análisis hidrológico que ayude a simular el comportamiento de una tormenta tropical, de este modo obtener los parámetros necesarios para el diseño adecuado de cada una de las obras (Porras & Serrano, 2013).

En este proyecto se buscó determinar los hietogramas y parámetros morfométricos de cada una de las subcuencas en estudio (Liberia, Zopilota, Salto, Cabuyo, Palmas, Sardinal, Cañas y Dirιά), así como también, calcular los hidrogramas para cada una de las subcuencas, de este modo, estimar el caudal máximo con el cual se deben diseñar las obras hidráulicas para ser capaces de soportar una tormenta tropical significativa. Asimismo, valorar cualitativamente los beneficios sociales y económicos que se obtendrán a la hora de poner en marcha el proyecto PAACUME, en comparación a los impactos que se generarán al ambiente a lo largo del mismo.

## **2. OBJETIVOS**

## 2.1 Objetivo general

Construir los hidrogramas de crecida en los puntos de intersección de algunos cauces con el canal Oeste y el río Tempisque en el proyecto PAACUME.

## 2.2 Objetivos específicos

- Determinar los hidrogramas y parámetros morfométricos de las subcuencas en estudio
- Calcular el aporte hidrológico de los cauces que intersecan el canal del proyecto Paacume mediante la elaboración de hidrogramas.
- Valorar cualitativamente el impacto ambiental, social y económica del proyecto en el marco del proyecto PAACUME

### **3. REVISIÓN DE LITERATURA**

## **2.1 Hietogramas y parámetros morfométricos de las subcuencas en estudio**

### **2.1.1 Medición de la precipitación**

La precipitación es un variable hidrometeorológica que se puede cuantificar de varias maneras por medio de instrumentos que miden el nivel de agua llovida en milímetros (Segerer & Villodas, 2006), los más utilizados son los siguientes:

- a. Pluviómetros y pluviógrafos: estos aparatos solo registran la precipitación en un punto específico, por lo que entre mayor cantidad se encuentren en las áreas a estudiar se estimaran mejor la influencia de las tormentas. También, dependiendo de la forma que registran los datos la precisión de un instrumento a otro puede variar.
- b. Radar meteorológico: aparato más moderno que utiliza la estimación de pluviómetros en conjunto con el radar, ambas fuentes deben estar calibradas y ajustadas para determinar más eficientemente los hidrogramas de salida.

### **2.1.2 Completación de información de datos faltantes**

Cuando se obtienen los datos de precipitación de las estaciones, suele suceder que algún registro no se realizó, quedando un faltante importante en los registros para realizar un análisis de precipitación, según menciona Luna y Lavado (2015), existen varios métodos para estimar el valor faltante, los cuales se mencionan a continuación:

- a. Método de regresión lineal
- b. Método por razones de distancias
- c. Método por promedios vecinales
- d. Método por razones promedio
- e. Método por correlación con estaciones vecinas
- f. Método por regresiones múltiples
- g. Método del vector regional

### **2.1.3 Precipitación promedio de una cuenca**

Existen tres métodos para estimar la influencia de las estaciones en las cuencas, con los cuales se puede estimar el valor de precipitación media, estos son método de promedio aritmético, polígono de Thiessen e Isoyetas. Según menciona Germano; Augusto y Moni (2017), los polígonos de Thiessen es un método eficiente para estimar el porcentaje de influencia de las estaciones con respecto al área donde están ubicadas, crea una distribución más real del comportamiento de la lluvia en la zona, adaptando los datos de lluvia registrados por las estaciones a un valor promedio de lluvia en la cuenca.

### **2.1.4 Modelación hidrológica**

En hidrología existen varios métodos que ayudan a verificar que los datos obtenidos a través de los años en una estación meteorológica se ajusten entre sí, con el fin de determinar el valor de precipitación máximo diario en un momento dado en años (Periodo de retorno), o también, estas distribuciones ayudan a determinar por medio de una precipitación máxima diaria el periodo en años que se puede volver a obtener dicho valor (Villon, 2004).

El programa HidroEsta contiene el método de ajuste datos aplicando las diferentes distribuciones, se debe seleccionar la que mejor se ajuste (Villon, 2016), estas pueden ser:

- a- Normal
- b- LogNormal de 2 parámetros
- c- LogNormal de 3 parámetros
- d- Gamma 2 parámetros
- e- Gama de 3 parámetros
- f- LogPearson tipo III
- g- Gumbel
- h- LogGumbel

Según detalla Sánchez (s.f.) en su informe, el modo para calcular el periodo de retorno con ayuda de un método de distribución es sumamente sencillo, solo que más laborioso, en este se da el enfoque únicamente al método de Gumbel, sin embargo, la forma de aplicación cumple el mismo principio para todos. Es sumamente importante en algunos análisis generar el periodo de retorno real según los datos recopilados y no basarse en valores comunes, adaptándose a probabilidades alejadas de la realidad.

Al utilizar la distribución que mejor se ajuste a los datos se obtiene de manera directa los hietogramas según los periodos de retorno dado o encontrado, para posteriormente ser utilizados en HEC-HMS (Villón, 2013).

## **2.2 Aporte de caudales máximos**

### **2.2.1 Número de curva**

El número de curva es un modelo empírico desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos de América que determina un umbral de escorrentía, por medio de sistemas de información geográfica se ha logrado determinar dicho parámetro, en los cuales se realizan trabajos independientes en cada uno de los insumos, pero que al final la unión de ellos va a generar el valor requerido (Ferrer; Rodríguez & Estrela, 1995), los insumos son:

- a- Mapa de uso de suelo: con la ayuda de las funciones de las bandas multiespectrales y sus combinaciones se puede lograr clasificar el uso de suelo por medio del software QGIS y su complemento clasificación semiautomática (SAP) según menciona Watson (s.f.) en su informe de “Aplicaciones de SIG en la Ingeniería Agrícola”, en este proceso deben realizarse mejoras de corrección atmosférica y trabajo de mejoramiento de bandas multiespectrales. Cuando se combinan las bandas se puede determinar el uso de suelo de la siguiente manera (ver Cuadro 1):

Cuadro 1. Combinación de bandas multiespectrales. Fuente: Watson (s.f.).

Combinación	Producto
8,4,3	Infrarrojo
11,8A,2	Usos agrícolas
8A,11,2	Vegetación vigorosa
12,11,4	Zonas Urbanas
4,3,2	Color natural
8A,11,2	Vegetación
$(8-4)/(8+4)$	NDVI
$(3-8)/(3+8)$	NDWI
$(3-11)/(3+11)$	NDSI

- b- Mapa de pendiente: siguiendo con el método de Ferrer; Rodríguez & Estrela (1995), para determinar las pendientes de una cuenca, estas se dividen en dos grupos, mayores o iguales a tres, y todas aquellas menores a tres.
- c- Mapa de grupo hidrológico: este mapa posee la información del tipo de suelo que se encuentra en la cuenca, por lo general en un área tan extensa existen varios tipos, necesitando de gran cantidad de análisis para determinarlos, siendo un método de suma importancia, ya que está basado en los estudios de suelo que han realizado otros investigadores reduciendo de este modo la inversión de tiempo. Los grupos hidrológicos (A, B, C, D) se clasifican de la siguiente manera:
- A: Entisoles, constituidos por aluviones
  - B: Inceptisoles, suelos de débil desarrollo
  - C: Ultisoles, suelo enriquecido en arcilla
  - D: Vertisoles, suelos ricos en arcilla

De forma general lo que los autores mencionan (Ferrer; Rodríguez & Estrela, 1995), que a la hora de agrupar los pasos anteriores se le asigna un valor numérico a cada clasificación, generando la multiplicación de estos un numero al cual le corresponde un valor de numero de curva.

## 2.3 Hidrogramas

Para entender mejor las bases de creación de un hidrograma es importante conocer los parámetros a los que se ajusta, el resultado que este mostrará se adapta de cierto modo a la ecuación de balance hídrico, la cual establece que el caudal producido en un cauce es igual a la precipitación media de la subcuenca o área de influencia del cauce, la evapotranspiración media y algunas variaciones de almacenamiento en la cuenca (Lafragua, 2008).

El cálculo de hidrogramas requiere de una serie de parámetros que se vuelven tediosos al momento de realizar los procedimientos. Según menciona Villon (2013) en su publicación “Ejemplos HEC-HMS” y Bateman (2007), los procedimientos con este programa se facilitan en gran medida gracias a sus componentes, los cuales son:

- a. Dirección de archivo: la dirección de archivo facilita el guardado de datos que se le introducen al programa en cada una de las labores que se realizan, creando carpetas para cada uno de los proyectos y las partes de los proyectos, Facilita visualizar en su interfaz una gran lista de archivos con diferentes extensiones.
  
- b. Modelo de la cuenca (Basin Model Manager): en este apartado se incluyen los esquemas (subcuenca y red de drenaje) que ayuden tener una idea del trabajo que va a realizar el programa. Asignar los componentes de estudio:
  - Subcuenca: representa la cuenca física, se colocan tantas como se tengan en la cuenca.
  - Cauce: se usa para trasladar agua de un punto a otro.
  - Unión: une los cauces de dos subcuencas.
  - Derivación: se utiliza para captar cierta cantidad de agua de un cauce y conducirla a otro lugar, puede ser a un canal de desagüe, laguna, entre otros.
  - Fuente: introduce agua a una cuenca proveniente de otra.
  - Sumidero: representa la salida del agua, ya sea hacia el mar o hacia otra cuenca.

- c. Modelo meteorológico (Meteorologic Model Manager): en este apartado es donde se asocian los datos pluviométricos con la cuenca, si son varias estaciones se le debe asignar la ubicación de cada uno para que el programa realice el estimado de influencia.
- d. Especificaciones de control (Control Specifications Manager): en este componente se asigna el tiempo de simulación, según los conceptos hidrológicos se sabe que cuando cesa la lluvia en la parte alta de una cuenca, el caudal que pasa por el punto más bajo se estabilizará hasta tiempo después de haber finalizado la lluvia, por eso en este apartado se debe de asignar un tiempo superior al de la tormenta considerando dicha aclaración.

Un factor importante que se debe de analizar para la obtención de hidrogramas es el tiempo de retardo, el cual se considera para garantizar una excelente resolución de hidrograma resultante, siendo necesario contar con información morfométrica de la cuenca para obtener dicho valor.

#### **2.4 Impacto ambiental, social y económico de un proyecto**

El análisis ambiental considera desde el inicio de las etapas de valoración de un proyecto, identificando cuales son los aspectos más relevantes desde el punto de vista ambiental, estudia muy bien la zona donde se realizará el proyecto para cuantificar los daños al ambiente y de este modo caracterizarlos según el tiempo que perduren, según menciona Quesada en la Guía para la Evaluación de Impacto Ambiental (s.f.), la idea de un análisis adecuado funciona como metodología de trabajo para las personas o empresas a cargo de proyectos tanto en el ambiente físico, biótico y humano.

El desarrollo de un proyecto produce no solo cambios ambientales, sino que también socioeconómico, el espacio donde se realiza un proyecto puede generar controversia entre las personas cercanas al entorno del proyecto, por lo cual es de suma importancia dar a conocer a los propietarios y residentes de la zona a que se verán expuestos y de este modo obtener opiniones constructivas. Es de suma importancia que se estudie muy bien las leyes que rigen en el país para evitar problemas legales los cuales producen atrasos antes de iniciar el proyecto, durante la factibilidad y durante la ejecución (Quesada, s.f.)

Según menciona Astorga (2018) para el periódico La nación, el proyecto PAACUME necesitará inundar 113 hectáreas de bosque tropical seco de la reserva Biológica Lomas de Barbudal con el fin de crear un embalse capaz de hacer posible el suministro de agua a los cantones de Guanacaste beneficiados.

Según menciona Villalobos (2017) en la página web La Voz de Guanacaste, al proyecto PAACUME se le otorgo un presupuesto de 500 millones de dólares para la construcción de un sistema de conducción de agua desde el embalse Arenal, hasta los cantones de Carrillo, Santa Cruz y Nicoya, generando gran beneficio al brindar:

- Al riego agropecuario 16.5 metros cúbicos por segundo
- Al riego en zonas turísticas 1.5 metros cúbicos por segundo
- Al consumo humano 2 metros cúbicos por segundo
- A la generación anual hidroeléctrica 36 gigavatios

En el proyecto los agricultores pagan únicamente 60 mil colones al año, esto depende del cultivo, si cultiva arroz el cual requiere de un alto suministro de agua entonces este deberá pagar más dinero, sin embargo, se plantea que el cobro se realice por volumen de agua, de tal modo que los agricultores apliquen métodos eficientes de aprovechamiento de agua (Villalobos, 2017).

Guanacaste es la provincia de Costa Rica con más deficiencia de agua, lo que ha producido un gran estancamiento en sector agropecuario y turístico, lo que impide el crecimiento local por los grandes faltantes de agua, con el funcionamiento adecuado del proyecto PAACUME se garantiza un gran avance para el sector socioeconómico de esta provincia (Villalobos, 2017).

## **4. METODOLOGÍA**

Las ocho subcuencas del río Tempisque se estudiaron de forma individual, sin embargo, en cada una de ellas se aplicó la metodología que se detalla a continuación:

### 3.1 Zona de Estudio

El proyecto se ubica en la provincia de Guanacaste, específicamente en la cuenca del río Tempisque, la cual se puede observar en la Figura 1. Esta cuenca posee un área de alrededor de 5455 km<sup>2</sup> y una longitud aproximada del cauce principal de 140 km; según el patrón de afluentes y evacuación de aguas la convierte en una cuenca dendrítica y exorreica respectivamente, siendo la segunda cuenca más grande de Costa Rica.

Las condiciones de lluvia que se presentan en esta zona son pocas, lo cual provoca un calor constante a partir de noviembre a abril, mientras que la estación lluviosa se da de mayo a noviembre, alcanzando temperaturas de entre los 22 y 35 grados Celsius.

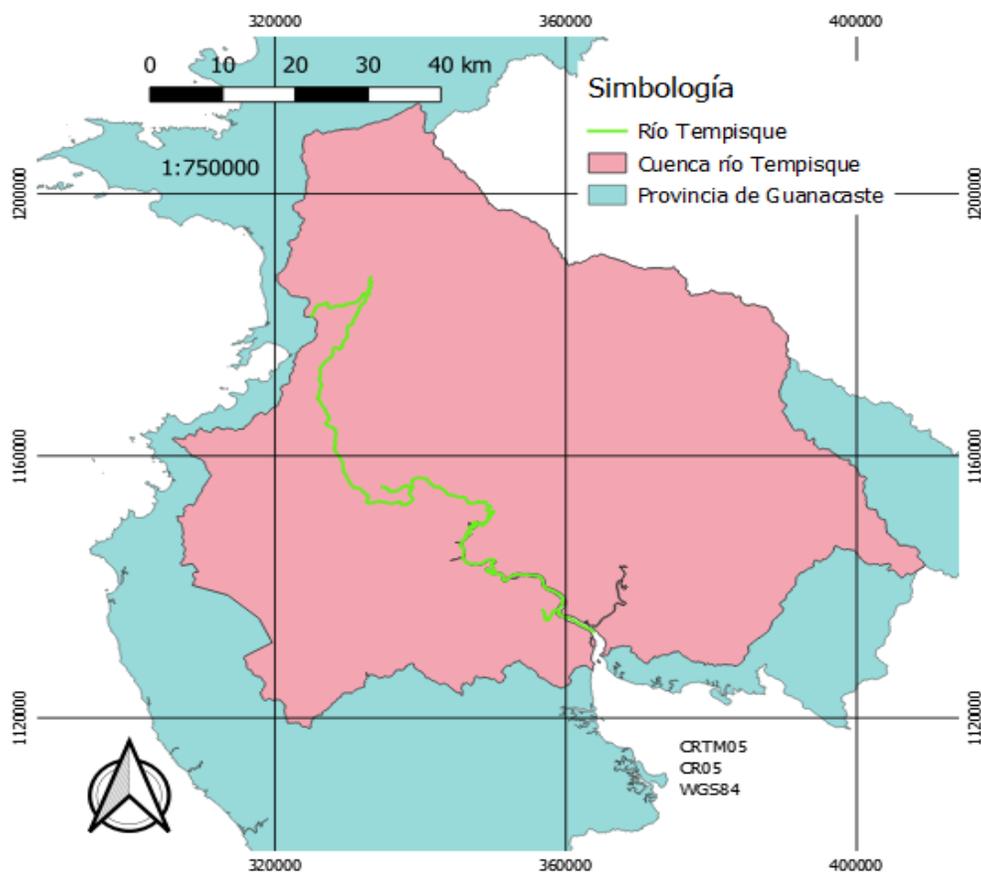


Figura 1 Mapa de la cuenca del río Tempisque.

En la Figura 2 se observa la distribución del río Tempisque y el canal de riego construido por Senara (canal Oeste), así como también, las ocho subcuencas en estudio: Liberia, Zopilota, Salto, Cabuyo, Palmas, Sardinal, Cañas y Diríá, siendo las primeras cuatro intersecadas por el canal Oeste, y las otras cuatro desembocando al río Tempisque por medio de la subcuenca palmas.

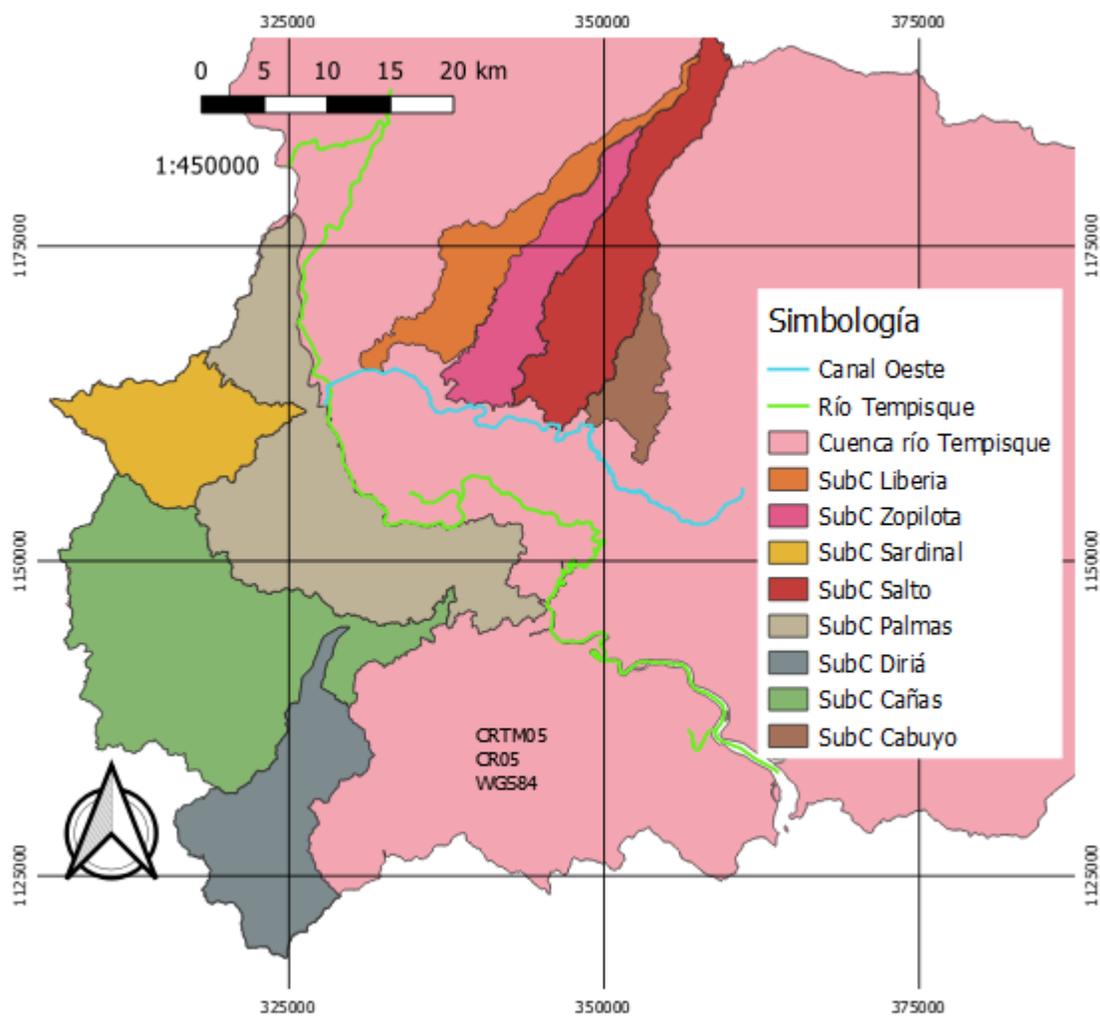


Figura 2 Mapa de las subcuencas en estudio.

### 3.2 Recursos y herramientas utilizadas

En este proyecto se trabajó con recursos digitales y herramientas de procesamiento que ofrecen ciertas instituciones o profesionales enfocados en el área de estudios hidrológicos, estos fueron:

➤ **Herramientas de procesamiento:**

a. Quantum GIS (QGIS) 3.2.2.

QGIS es un software libre utilizado por personas con conocimiento en sistemas de información geográfica (SIG), el cual gracias a sus múltiples herramientas de procesamiento de datos y complementos que se ajustan al desarrollo de actividades en la misma interfaz, facilitando las amplias labores que se llevan a cabo en los trabajos de procesamiento de datos SIG (QGIS Development Team, 2019).

b. HidroEsta 3.0.

Este software fue desarrollado para realizar cálculos hidrológicos y estadísticos aplicados a la hidrología, es una herramienta que facilita y simplifica los cálculos tediosos, y el trabajo con una gran cantidad de datos que se manejan en los estudios con fines hidrológicos tales como el cálculo de (Villón, 2016):

- a. Parámetros estadísticos: con momentos lineales y momentos tradicionales
- b. Cálculos de regresión lineal, no lineal, simple y múltiple y polinomial
- c. Corroborar que una serie de datos se ajuste a una serie de distribución, si el ajuste es correcto, permite el cálculo de parámetros de diseño, tanto con el periodo de retorno dado o con un grado de ocurrencia
- d. Generar intensidad máxima y curvas IDF a partir de datos de precipitaciones máximas diarias

c. HEC-HMS 3.5.

Este programa fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hec-Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (US Army Corps), con el cual se pueden realizar simulaciones del comportamiento de una

cuenca a la hora de efectuarse una tormenta, analizar cuanta cantidad de agua se infiltra y cuanta escurre, representando las cuencas como un sistema interconectado de componentes hidráulicos e hidrológicos (Cuerpo de Ingenieros del ejército de EE. UU., s.f.).

➤ **Recursos digitales:**

d. AtlasCR2014.

AtlasCR2014 es una base de datos que contiene información muy útil de todo el territorio de Costa Rica, para profesionales con conocimiento en sistemas de información geográfica (Ortiz, 2015).

e. ALOS PALSAR.

ALOS fue el satélite avanzado de observación de la tierra (“Advanced Land Observing Satellite”), desarrollado para ayudar en las áreas de mapeo, precisión cartográfica; este satélite fue lanzado al espacio en el periodo del 2006 al 2011, con las cualidades de captar imágenes tridimensionales de la superficie de la tierra, obtener imágenes durante el día y la noche sin efecto de la nubosidad, obteniendo de este modo los modelos de elevación digital (JAXA, s.f.).

f. Mapa digital FAO/UNESCO.

La inexistencia de un mapa mundial de suelos llevó a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y grandes colaboraciones de científicos alrededor del mundo a crear el primer mapa, facilitando de este modo la clasificación de suelos de zonas en estudio de una manera digital, dado a que este mapa cuenta con los grupos y sub grupos de suelo, así como también el porcentaje de partículas (limo, arena y arcilla), entre otros parámetros importantes de que ayudan a determinar el tipo de suelo. Esta información es meramente gratuita y a disposición de todas las personas (FAO, s.f.).

g. Sentinel-2.

La misión “Copernicus Sentinel-2” tiene como objetivo monitorear la variabilidad en las condiciones de la superficie terrestre, generando imágenes multiespectrales de alta resolución y amplia franja, que ayudan en el estudio de la vegetación, el suelo y la cubierta de agua, así como la observación de vías navegables y zonas costeras con el monitoreo de (Sentinel Online, s.f.):

- Territorio
- Agroambiental
- Agua
- Bosques y vegetación
- Cultivos

### **3.3 Estudio Hidrológico**

#### **3.3.1 Análisis de cauces**

Con la capa de ríos obtenida de “AtlasCR2014” y visualizada en el software “QGIS”, se localizaron todos los afluentes que van a dar al río en estudio, de este modo se obtuvo una idea de cuán grande sería el área para delimitar según la extensión del río y sus afluentes. La línea de conducción de los ríos en ciertos tramos estaba discontinua por lo que se tuvo que editar la capa, y con la ayuda del complemento del mapa satelital crear los trazos que hacían falta.

#### **3.3.2 Modelo de elevación digital (MED)**

Al tener listo el río con sus afluentes se obtuvo un aproximado de la ubicación geográfica del área en estudio, antes de hacer la descarga del modelo de elevación digital se corroboró que el río estuviera comprendido en el área del modelo a descargar.

Una vez descargado el modelo de elevación, se procedió a eliminar las depresiones que este presentaba, para el cual fue necesario utilizar la herramienta “r.fill.dir” que posee el software QGIS, de este modo a la hora de asignar un tamaño de celda de 12,5 se pudo obtener el MED

corregido con la dirección de flujo que se genera debido a las pendientes predominantes en el área de estudio.

### **3.3.3 Red de drenaje y microcuencas**

Contando con el MED corregido, se procedió a obtener la red de drenaje de todo el modelo de elevación y las micro cuencas que se es tribuyen a cada red de drenaje, estos se obtuvieron utilizando la herramienta “r.watershed” del software QGIS, para la cual fue necesario asignar una cantidad de pixeles de 10000 para obtener las red y las micro cuencas, como se contaba con la ubicación del río en estudio, solo se aseguró que tanto la red generada en este apartado como la generada en el apartado “3.3.1.1” tuvieran cierta coincidencia.

Una vez obtenida la red de drenaje perteneciente al río en estudio, se delimito la cuenca seleccionando todas aquellas microcuencas que estuvieran comprendidas en el curso del río y sus afluentes, conformando dicha selección la subcuenca en estudio.

### **3.3.4 Análisis de datos de precipitación de las estaciones meteorológicas**

#### **3.3.4.1 Determinación del porcentaje de influencia de las estaciones meteorológicas en la subcuenca**

Una vez delimitada la subcuenca en estudio, se precedió a cargar en el software QGIS la capa de estaciones meteorológicas ubicada en “AtlasCR2014”, de este modo se seleccionaron las estaciones que tuvieran relevancia con la subcuenca, es decir, todas aquellas estaciones que estuvieran dentro o cerca del perímetro de la subcuenca, esto se realizó gracias a la herramienta “polígonos Voronoi” del software QGIS, la cual estimó el porcentaje de influencia en unidad de área que cubre cada una de las estaciones en la subcuenca.

#### **3.3.4.2 Análisis de consistencia de datos**

Una vez obtenido los datos de precipitación en cada una de las estaciones que tienen cierta influencia en la subcuenca, se procedió a realizar la completación de datos faltantes debido a que no vienen todos los registros completos. Los métodos utilizados fueron el de la razón de valores normales utilizando una sola estación, dos estaciones vecinas y la relación de registro de datos de la misma estación.

De igual forma se buscó que existiera una correlación entre los datos de las estaciones utilizando el software HidroEsta, este programa adapta los datos al modelo de regresión más adecuado según los valores de la variable independiente (X) y la variable dependiente (Y). De igual forma, se calculó el modelo de distribución de probabilidad de ajuste de datos con el cual se determinó el grado de ocurrencia en años de la tormenta más significativa, y de este modo adaptar todas las estaciones a un mismo periodo de retorno.

### **3.3.5 Generación de Hietogramas**

Una vez que se obtuvieron los datos corregidos, se procedió a realizar los hietogramas correspondientes a la tormenta más significativa “NATE el 04 de octubre del 2017”, graficando las precipitaciones versus el tiempo en horas en el software HidroEsta.

### **3.3.6 Cálculo del caudal mediante el método de número de curva**

#### **3.3.6.1 Tipos de suelo que existen en la subcuenca**

Con ayuda del mapa de suelo de la FAO y UNESCO, se procedió a realizar el recorte del área de la subcuenca con el software QGIS, facilitando de este modo la determinación de los suelos que están comprendidos dentro del área en estudio, posteriormente se clasificó el suelo según el porcentaje predominante de arena, limo y arcilla con ayuda del rectángulo de textura de la FAO.

#### **3.3.6.2 Grupos hidrológicos en cada subcuenca**

Según la clasificación del tipo de suelo, se procedió a realizar la clasificación del grupo hidrológico para cada una de las subáreas de la subcuenca, estos se clasificaron con las letras “A, B, C, D”, se utilizó el método del número primo para darle valores únicos a las letras, los cuales fueron “5, 7, 11, 13” correspondientemente.

#### **3.3.6.3 Pendientes existentes en la subcuenca**

Con ayuda del modelo de elevación digital corregido en el apartado “3.3.1.2.1” y recortado con la subcuenca, se procedió a obtener las pendientes representativas, asignándole número

primero “2” a las pendientes mayores que “3” y valor primo de “3” a las pendientes menores o igual a “3”.

#### **3.3.6.4 Descarga y procesamiento de imagen satelital de las subcuencas en estudio**

Con la ubicación de la subcuenca en estudio se procedió a descargar la imagen, verificando que esta imagen abarcara toda el área en estudio, se buscó la imagen más reciente, cuyo efecto de nubosidad a la hora de la toma no presentara grandes porcentajes de distorsión, por lo que se eligió una imagen de enero del año 2018, la cual presentaba bajo porcentaje de nubosidad según la vista previa de la imagen.

Una vez descargada la imagen, se utilizó el software QGIS para realizar la “clasificación supervisada” con el complemento “SCP”, facilitando a realizar ciertos procesos como lo fue la corrección atmosférica creando una duplica de las bandas actuales, pero en este caso con información corregida.

Debido a que la imagen descargada y corregida, contiene una extensión en unidad de área superior a la subcuenca, se utilizó la herramienta “recorte múltiple” para que la dimensión de la imagen fuera igual al área en estudio y de esta forma acelerar el proceso de clasificación al crear un ráster virtual de bandas.

#### **3.3.6.5 Clasificación de uso de suelo según la combinación de las bandas espectrales**

Al tener listo el ráster virtual de bandas, se procedió a realizar la clasificación de uso de suelo según la combinación de las bandas, facilitando de este modo la ubicación de las zonas deseadas, asignando valores de número primo "17, 19, 23, 29, 31" a los usos de suelo "Pastos y cultivos, bosques, suelo con poca cobertura, zonas urbanas y agua" respectivamente, para mayor precisión a la hora de la clasificación se realizaron varios polígonos de una misma clase, utilizando el juego de bandas que más refleje el uso de suelo a clasificar.

### **3.3.6.6 Relación entre los grupos hidrológicos, pendientes y usos de suelo dentro de la subcuenca**

Una vez clasificados los tres ráster “Grupo hidrológico, pendiente y uso de suelo”, se procedió a obtener el número de curva para cada una de las subáreas de la subcuenca con la ayuda de la herramienta “calculadora ráster” asignando la expresión de coincidencia entre los tres ráster según la clasificación anterior, cada segmento de la subcuenca conto con tres datos (números primos) los cuales se multiplicaron entre sí para obtener un único valor, el cual se relaciona a un numero de curva ya establecido.

Los valores de curva obtenidos en cada subárea se deben adaptar en forma general para toda la subcuenca, por lo que se procedió a obtener un único valor para toda la zona en estudio, utilizando la sumatoria del área de cada segmento con su respectivo número de curva y dividiéndolo con el área total de la subcuenca, obteniendo de este modo el número de curva representativo para dicha zona de estudio.

### **3.3.7 Construcción de los hidrogramas**

#### **3.3.7.1 Recopilación de parámetros morfométricos de la subcuenca**

Con la zona de estudio delimitada y la distribución del cauce principal, se realizó el cálculo del área de la subcuenca en kilómetros cuadrados, la distancia en kilómetros cuadrados del río principal y la diferencia de alturas en metros entre el punto más alto y el punto más bajo de la subcuenca.

Contando con los parámetros anteriores se procedió a calcular el tiempo de concentración (Ecuación 1), para posteriormente realizar el cálculo correspondiente al tiempo de retardo (Ecuación 2).

$$T_c = 0,0195 \left( \frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0,385} \dots\dots \text{Ecuación 1} \qquad Tr = 0,6Tc \dots\dots \text{Ecuación 2}$$

Donde:

Tc: tiempo de concentración (min)

L: longitud del cauce principal (km)

$\Delta H$ : diferencia de alturas entre el punto más alto de la subcuenca y el punto más bajo (m).

Tr: tiempo de retardo (min)

### **3.3.7.2 Base geográfica para la simulación (Basin Model Manager)**

En este apartado del software HEC-HMS se ingresó la subcuenca y la red de drenaje, esto ayudó a tener una idea clara de cómo el programa va a realizar la interpretación de la simulación, también, se asignó el sitio de análisis con sus especificaciones, tales como; el valor del área de la subcuenca, el método de número de curva con su valor, el método de transformación del diagrama unitario, no se le asignó flujo base y el tiempo de retardo.

### **3.3.7.3 Hietogramas (Time\_Series. Data Manager)**

En este apartado se agrega el hietograma basado en el día con mayor lluvia según los datos de precipitación registrados por la estación en la subcuenca, registrando la fecha del evento en estudio (04 de octubre del 2017), asignando intervalos de 1 hora para una durabilidad del evento de 24 horas; al igual que la hora de inicio y hora de finalización. El programa generó automáticamente un cuadro con las indicaciones antes mencionadas, se agregaron los datos del hietograma y se corroboró que la gráfica generada fuera la correcta.

### **3.3.7.4 Modelo meteorológico (Meteorologic Model Manager)**

En este apartado se seleccionó como método de precipitación el hietograma que representaba a la subcuenca estudiada, se seleccionó el hietograma característico de la subcuenca, en el caso de existir varios, se proporcionó el valor porcentual de influencia de cada uno de ellos, estableciendo el remplazo faltante por defecto.

### **3.3.7.5 Salida de resultados (Control Specifications Manager)**

La presentación estética del hidrograma se generó en este apartado de la simulación, según las necesidades o preferencias, en este caso se asignó el intervalo de salida en minutos u horas

para determinar el comportamiento de la tormenta estudiada y analizar en qué momento generó el caudal máximo, se le asignó a la simulación un tiempo mayor al del evento con el fin de determinar la baja del caudal.

#### **3.3.7.6 Simulación**

En este apartado se crearon las simulaciones necesarias según las variaciones que se contemplan en los tres apartados anteriores. A la hora de ejecutar la simulación se generaron dos pestañas, en la primera se observaron los datos generales: área de cuenca, caudal máximo y fecha de la tormenta, y en la segunda pestaña se obtuvo el hidrograma con los datos que se utilizaron para graficarlo, a como también, se muestra el gráfico de escorrentía e infiltración con su respectiva tabla de datos.

### **3.4 Análisis cualitativo del impacto social del proyecto en el desarrollo del proyecto PAACUME**

Se realizó un análisis de los beneficios sociales que se obtendrán en Guanacaste, destacando el desarrollo que este proyecto impulsará, con el fin de contar con un estimado de cuantas serán las personas beneficiadas de PAACUME y a cuantos sectores se les estaría brindando mejor desarrollo.

Se analizaron las problemáticas sociales por las que está pasando la provincia de Guanacaste actualmente, para comparar los beneficios potenciales del proyecto para los habitantes de las zonas involucradas. Analizando los beneficios que tendrá Costa Rica en el marco del comercio nacional a la hora de activar Guanacaste, por lo cual, se realizó el análisis que determine cuales sectores comerciales se verán más beneficiados, y como las personas pueden tomar provecho de tal crecimiento.

### **3.5 Análisis cualitativo del impacto ambiental del proyecto en el desarrollo del proyecto PAACUME**

Se analizó el impacto ambiental sobre espacios bajo influencia del canal y la red de distribución, estimando como mayores consecuencias el paso del canal o red de distribución por

bosques o humedales, en comparación a las zonas de cultivo o zonas un poco desérticas, donde la vegetación es escasa o nula.

Se realizó una investigación para determinar de cual afluente se va a captar el agua que se utilizara para la generación hidroeléctrica, agua potable y agricultura, en la que se verificó las consecuencias que podría tener el afluente donde se capta dicho caudal, corroborando si es una zona con gran riqueza hídrica o no. También, se analizaron los distintos usos que se le darán al agua con el fin de verificar que no sea contaminada en algún proceso durante el traslado a cada usuario.

### **3.6 Análisis cualitativo del impacto económico del proyecto en el desarrollo del proyecto PAACUME**

En este proyecto se buscó determinar la importancia de los hidrogramas a la hora de generar los diseños de las obras hidráulicas, lo cual repercute en un impacto económico positivo ya que permite un dimensionamiento de obras basado en el análisis científico de los registros climatológicos de la zona.

Además, se realizó un análisis de la inversión que se hizo para desarrollar PAACUME y de retorno según los mecanismos previstos para ello, así como también, se investigó en el sistema que utilizarían para realizar la entrega de agua.

Se buscó realizar una comparación entre los servicios comerciales que se generan en Guanacaste actualmente y los servicios que se podrían generar, enfocándose en los ingresos de las personas que se verían beneficiadas directamente de PAACUME y de las personas cuyo ingreso económico tiene alguna conexión con este.

## **5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### 4.1 Descripción de los cauces en estudio

En la Figura 3 se observan las subcuencas que se analizaron en este proyecto, estas intervienen directamente con el tramo del canal del proyecto PAACUME, las subcuencas Zopilota, Salto, Cabuyo y Liberia fueron recortadas según el punto donde intersecan con el canal; mientras a las otras subcuencas no se les hizo recorte debido a que tienen interacción directa con el río Tempisque.

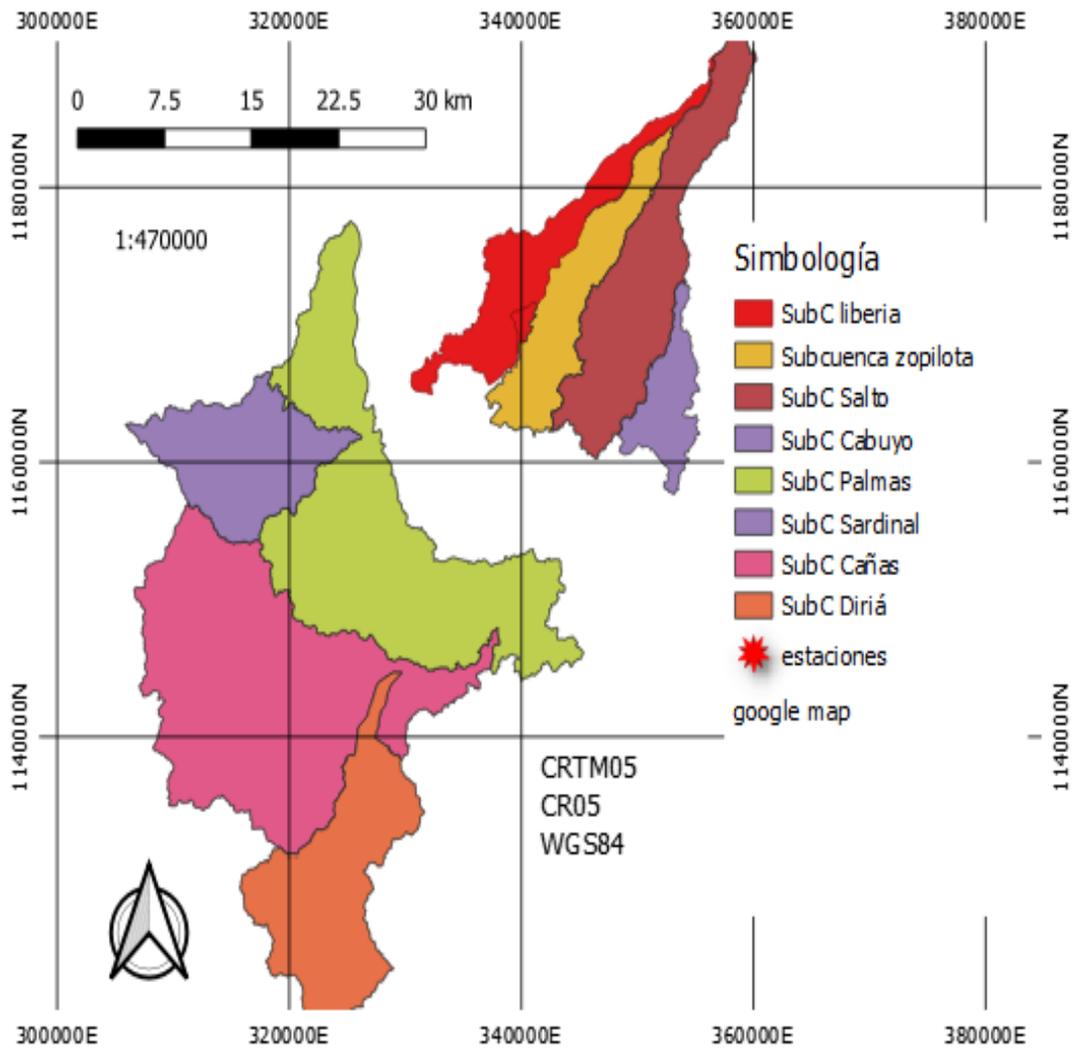


Figura 3 Mapa de las subcuencas en estudio.

Como se observa, cada una de las subcuencas posee dimensión, forma y tamaño distinto, estos se pueden observar en el Cuadro 2, donde se destaca la subcuenca Palmas con mayor área y la subcuenca Liberia con el cauce de mayor extensión. A pesar de que algunas cuencas tienen mayor área que otras la dimensión del cauce varia, es decir, la forma que tiene la subcuenca ayuda en gran medida a la gran extensión del cauce, por lo que en el Cuadro 2 se observa que la subcuenca Liberia posee un cauce con mayor extensión aun teniendo un área menor.

Cuadro 2. Área y longitud de los cauces de cada subcuenca.

<b>Subcuenca</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Longitud del cauce (Km)</b>
Liberia	88,5	40,01
Zopilota	95,1	26,02
Sardinal	121	23,10
Salto	153	36,08
Palmas	321,31	32,78
Diría	166	31,10
Cañas	363	31,68
Cabuyo	45,1	14,01

Las subcuencas cuentan con una gran serie de ríos, sin embargo, para cada una de las subcuencas solo se tomó el rio con mayor recorrido cuya extensión abarcara desde el punto de aforo hasta la parte alta de la Subcuenca.

## 4.2 Análisis de datos de precipitación de las estaciones meteorológicas

### 4.2.1 Porcentaje de influencia de las estaciones meteorológicas en la subcuenca

Se realizó la solicitud de ocho estaciones meteorológicas, sin embargo, solo se logró obtener datos completos de cuatro estaciones, el Instituto Meteorológico Costarricense brindó datos de 6 estaciones, cuatro de ellas se aprecian en el Cuadro 3, las otras estaciones presentaban gran discontinuidad en los datos y pocos años de registro por lo que se decidió no tomar en cuenta.

Cuadro 3. Estaciones meteorológicas utilizadas.

<b>Estación</b>		<b>Coordenadas geográficas</b>		<b>Dato</b>
<b>Numero</b>	<b>Nombre</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	
74008	Pelón de la Bajura	10° 29' 08"	85° 24' 42"	Diario
74051	Aeropuerto Liberia	10° 35' 20,40"	85° 33' 07,70"	Horario
74053	Santa Cruz	10° 17' 07"	85° 35' 30"	Horario
74067	Miel, La guinea	10° 25' 9,8"	85° 28' 24,37"	Horario

Las estaciones del Cuadro 3, también presentaban un gran faltante de datos, sin embargo, fue posible por medio de regresiones y con ayuda de estaciones cercanas poder completar dichos valores, cabe destacar que las cuatro estaciones si presentaban el registro completo de la tormenta tropical Nate, la cual se presentó en el año 2017.

En la Figura 4, se muestran las estaciones antes mencionadas (Cuadro 3), con el área de influencia que posee cada una de ellas según el polígono de Thiessen que se generó en la interacción de las cuatro estaciones. En esta figura se aprecia la cantidad de estaciones con influencia en la subcuenca, es de ahí la importancia de los polígonos de Thiessen, gracias a que de este modo se puede dar una interpretación visual de cual estación o estaciones recaen sobre la zona en estudio, para posteriormente determinar el área de cada una.

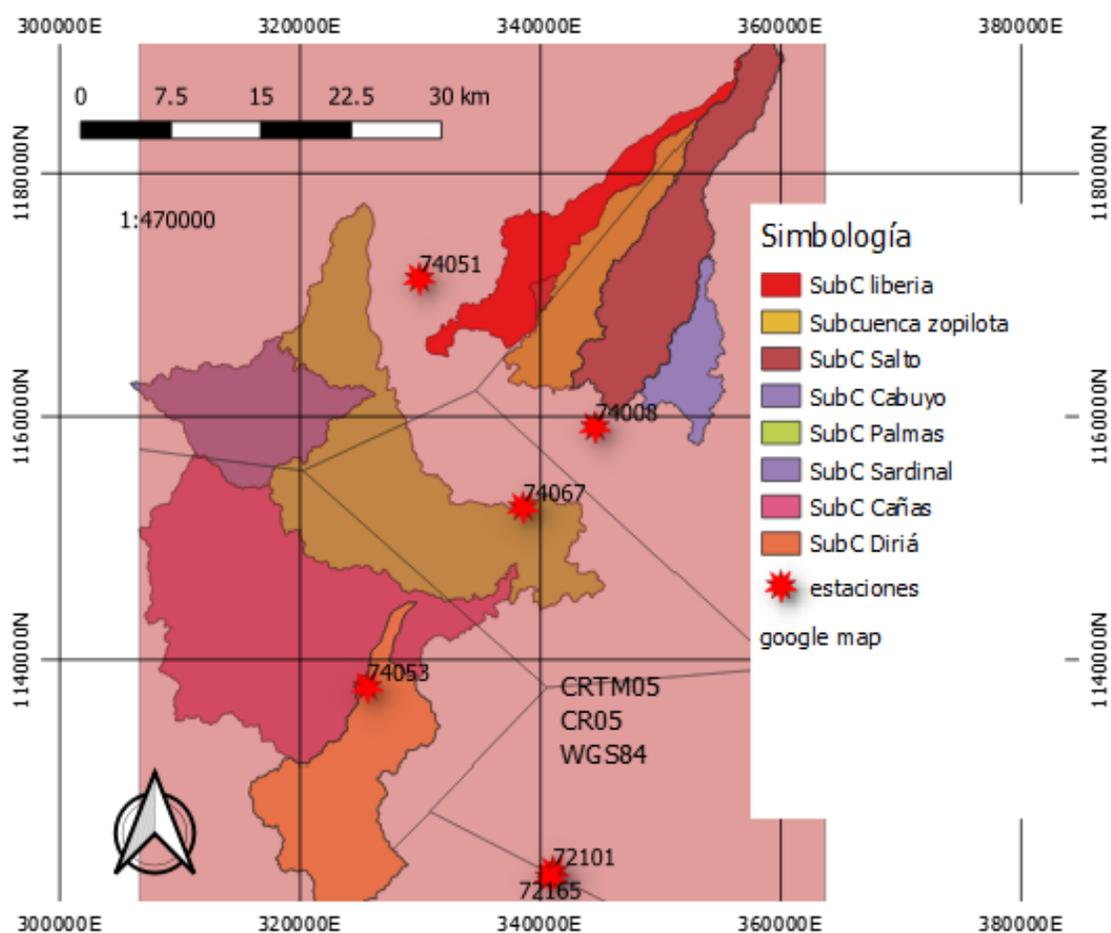


Figura 4. Mapa de los polígonos de Thiessen sobre las subcuencas.

En el Cuadro 4, se aprecian las ocho subcuencas que se analizaron con el respectivo porcentaje de influencia de cada una de las estaciones, algunas subcuencas se analizaron con una sola estación, mientras que otras se analizaron con varias estaciones, entre más estaciones se analicen por cada subcuenca el resultado será más eficiente, y entre más cerca se encuentre

la estación a la subcuenca los datos reflejaran un comportamiento más real de la precipitación en el área analizada.

Cuadro 4. Porcentaje de influencia de las estaciones meteorologicas en las subcuencas

Subcuenca	% de influencia de cada estación			
	74008	74051	74053	74067
Liberia		100%		
Zopilota	75%	25%		
Sardinal		93%	7%	
Salto	100%			
Palmas		30%	17%	53%
Diría			100%	
Cañas			98%	2%
Cabuyo	100%			

Se aprecia como la subcuenca Palmas cuenta con tres estaciones, mientras que otras cuentan con solo una, la adquisición de datos meteorológicos es sumamente limitada, esto conlleva a que se deba realizar los análisis de las subcuencas en algunas ocasiones con tan solo una estación.

#### 4.2.2 Completación de los datos meteorológicos

Para analizar las tormentas se buscaron los días con mayor precipitación de cada año, en la Figura 5 se aprecian los datos recopilados para cada una de las cuatro estaciones en un lapso de registro de 10 años (ver anexo1, Cuadro 9).

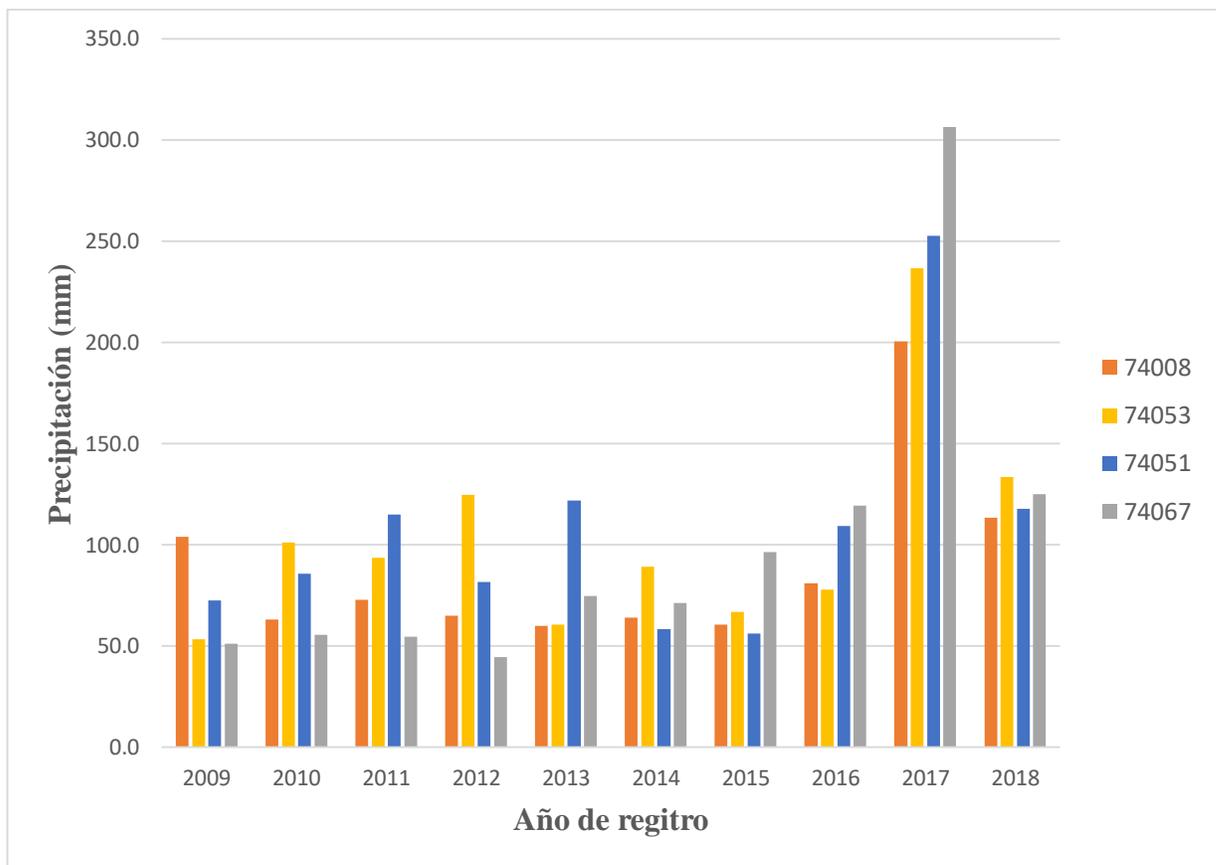


Figura 5 Registros de lluvia diaria máxima de cada año.

Se tomaron en cuenta los valores de precipitación máximos diarios para cada año, entre estaciones se puede ver que existen algunos días en común durante el año con registro de alta precipitación, pero existe un único día que se mantiene con una elevada precipitación, este es el día “04 de octubre del 2017”, en promedio para este día la precipitación ronda en las cuatro estaciones alrededor de 250 mm, mientras que para los otros días ninguna estación supera los 150 mm.

Para verificar el comportamiento de los registros que se almacenaron en cada una de las estaciones para encontrar algún parámetro de ocurrencia entre el evento máximo presentado y los otros eventos máximos de los otros años, se efectuó el análisis ajuste a distribuciones de probabilidad para cada una de ellas, dando como resultado los valores del Cuadro 6.

Cuadro 5. Distribución de probabilidad que mejor se ajusta a cada estación meteorológica.

<b>Estación</b>	<b>Distribución de probabilidad</b>
74008	Log normal 3 parámetros
74053	Gamma 3 parámetros
74067	Log Gumbel
74051	Log Gumbel

De las ocho distribuciones actuales que más se utilizan en los análisis hidrológicos, todas se adaptaban a los datos de cada una de las estaciones, sin embargo, las que mejor se adaptaron a las estaciones fueron las del Cuadro 6, las cuales por medio de la Figura 4 se constató que si existe una correlación entre el método y el ajuste de los datos. Como se observa para cada una de las estaciones cuyos datos forman gráficamente la línea azul, existe una gran similitud con la línea verde o línea teórica generada, esta línea se adapta a una ecuación que ayuda a predecir el comportamiento para una precipitación deseada, también, indica el grado de ocurrencia de un evento.

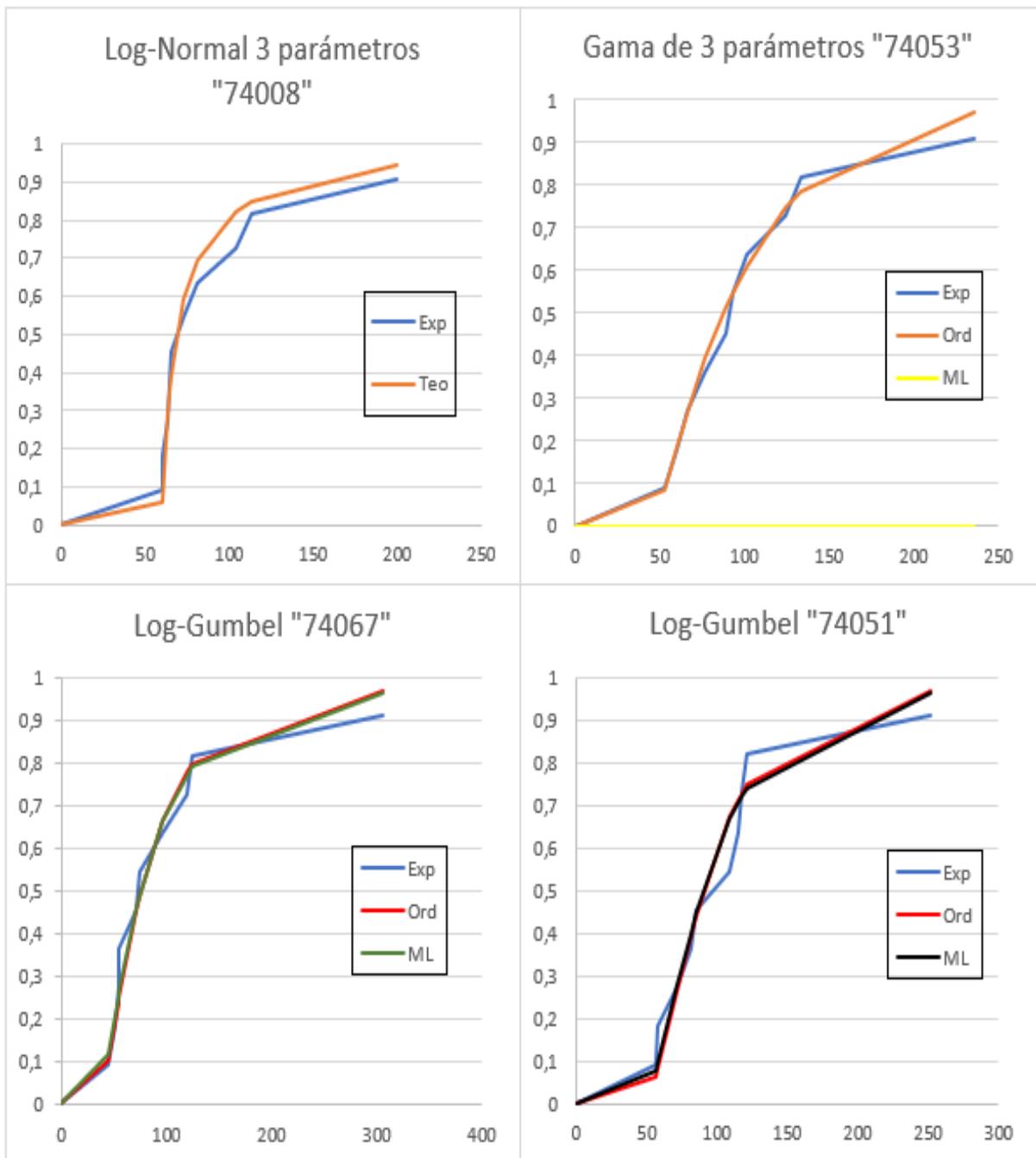


Figura 6 Distribución de ajuste para cada estación.

En el Cuadro 7, se aprecia la máxima precipitación detectada por cada una de las estaciones y el valor de ocurrencia de un evento de igual magnitud, siendo la estación "74008" la que

presento una menor lectura de precipitación en comparación con las otras estaciones, lo que a su vez se refleja con una menor cantidad de años para que se vuelva a presentar un evento igual.

Cuadro 5. Tiempo de retorno enlazado a la precipitación diaria máxima de cada estación.

<b>Estación</b>	<b>Precipitación máxima (mm)</b>	<b>Tiempo retorno (año)</b>
74053	236,7	33,2
74067	306,4	32,1
74051	252,6	29,5
74008	200,6	18

Existe una variación entre precipitaciones registradas en cada una de las estaciones, esto generó de igual forma una variación entre los valores de tiempo de retorno para cada estación. Como los tiempos de retorno fueron diferentes, para realizar los análisis en cada una de las subcuencas se garantizó que, si una subcuenca presentaba interacción con dos o más estaciones, todas debían adaptarse al tiempo de retorno mayor, variando de este modo las precipitaciones horarias registradas.

En el Figura 7 y 8 se aprecian las precipitaciones registradas cada hora el día que ocurrió el evento máximo (04 de octubre del 2017) para cada estación, cada uno de estos valores se adaptó al tiempo de retorno mayor según la interacción entre estaciones que tenían influencia en cada subcuenca, si la subcuenca solo tenía influencia de una estación los datos no se ajustaban, por lo contrario, se ajustaron al mayor tiempo de retorno cuando dos estaciones o más tenían influencia.

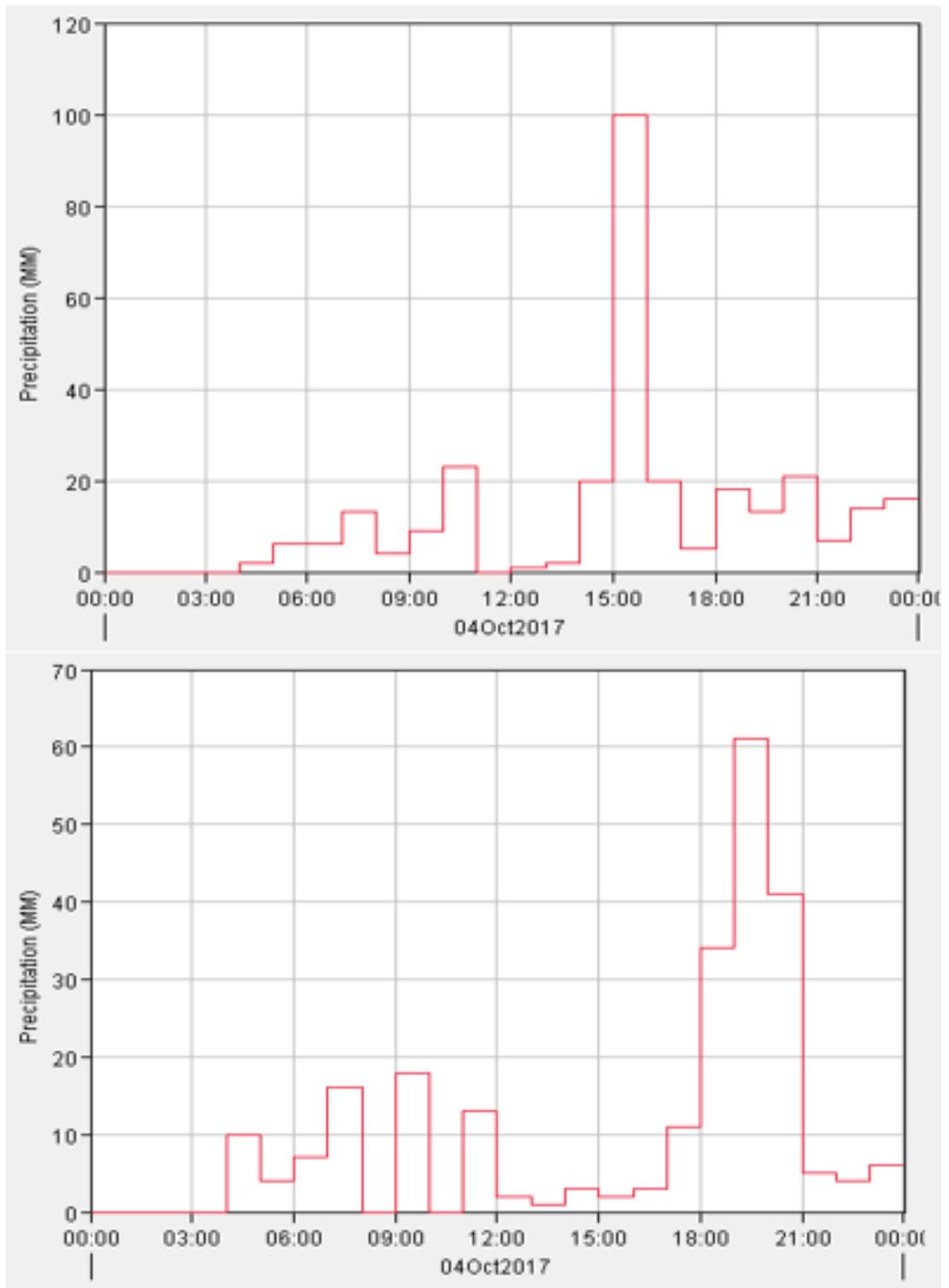


Figura 7 Hietograma de las estaciones 74067 y 74051 respectivamente.

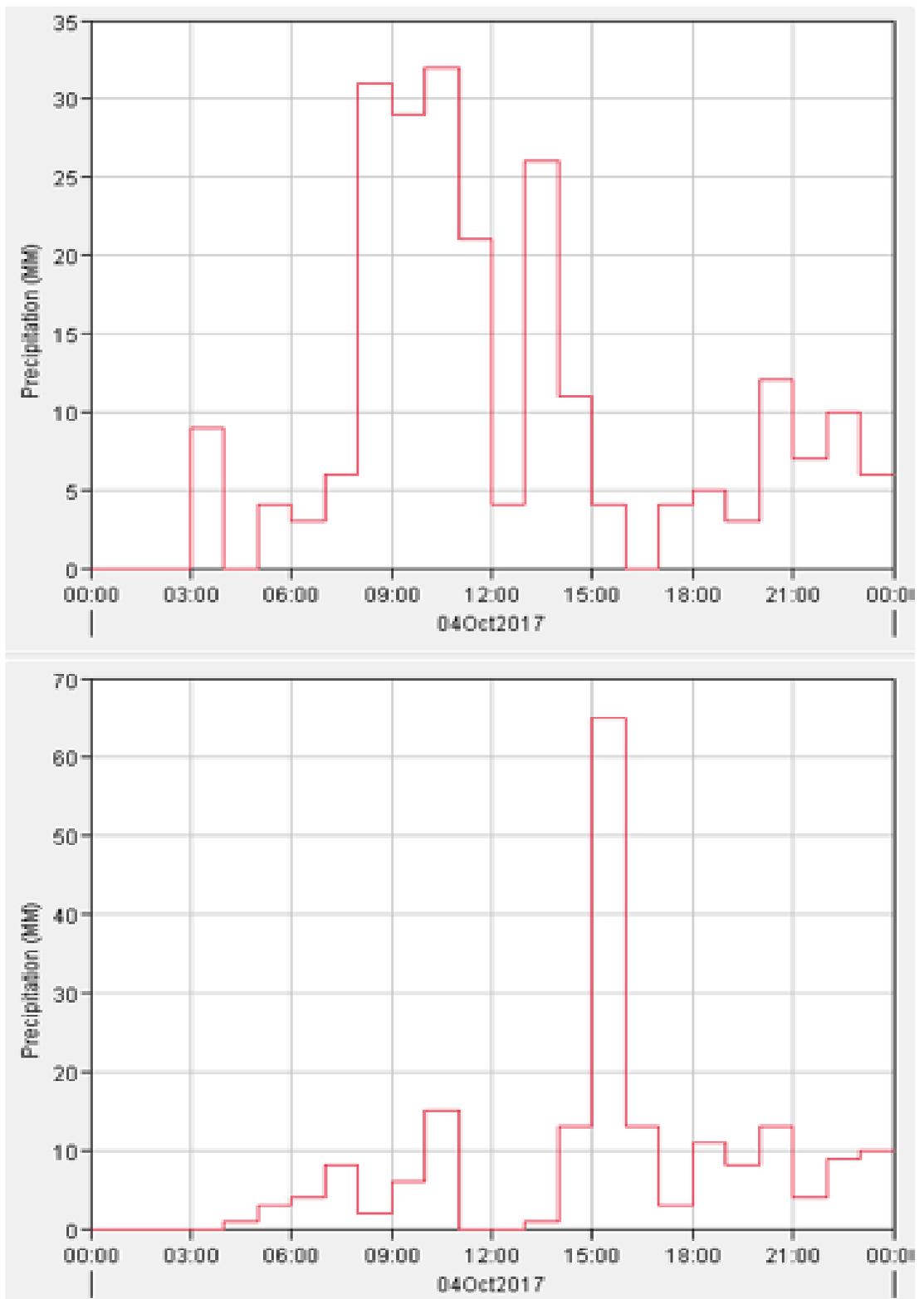


Figura 8 Hietograma de las estaciones 74053 y 74008 respectivamente.

Por medio de los datos tabulados (Cuadro 10) de los hietogramas utilizados para cada una de las estaciones, trabajándose el mismo lapso cada uno de los eventos de las estaciones (24 horas), se garantizó un mayor conocimiento de cómo se comportó la lluvia el día del evento en todas las subcuencas.

### 4.3 Calculo del número de curva

#### 4.3.1 Determinar los grupos de suelo que existen en la subcuenca

Por medio de los registros almacenados por la FAO y UNESCO, se determinó el tipo de grupo hidrológico que predomina en cada una de las subcuencas, como se observa en el Cuadro 9, algunas subcuencas solo poseen un solo grupo hidrológico, esto se debe a que en todo el territorio que estas encierran las condiciones del suelo son similares.

Cuadro 6. Grupo hidrológico de las subcuencas en estudio.

Subcuenca	Grupo hidrológico
Cabuyo	B y C
Cañas	C
Diriá	C
Liberia	B y C
Palmas	C
Salto	B y C
Sardinal	C
Zopilota	B y C

Los grupos hidrológicos que predominan en la provincia de Guanacaste son especialmente de tipo B y C, los cuales se evidencian en las características del suelo debido a su infiltración la cual no es super rápida, ni tampoco super lenta. En el cuadro se refleja la presencia de un grupo

hidrológico de clase B que se relaciona con uno de clase C, estos se presentan en las subcuencas más altas donde por lo general los suelos poseen mayor grado de infiltración.

### 4.3.2 Determinar el uso de suelo de cada subcuenca

Con el aporte de imágenes satelitales con una amplia resolución fue posible determinar el uso de suelo que se le da a cada subcuenca, con cierto acercamiento de las imágenes para marcar la mayor cantidad de polígonos con cobertura semejante, fue posible determinar los diferentes usos de suelo, los cuales se pueden observar en la Figura 6.

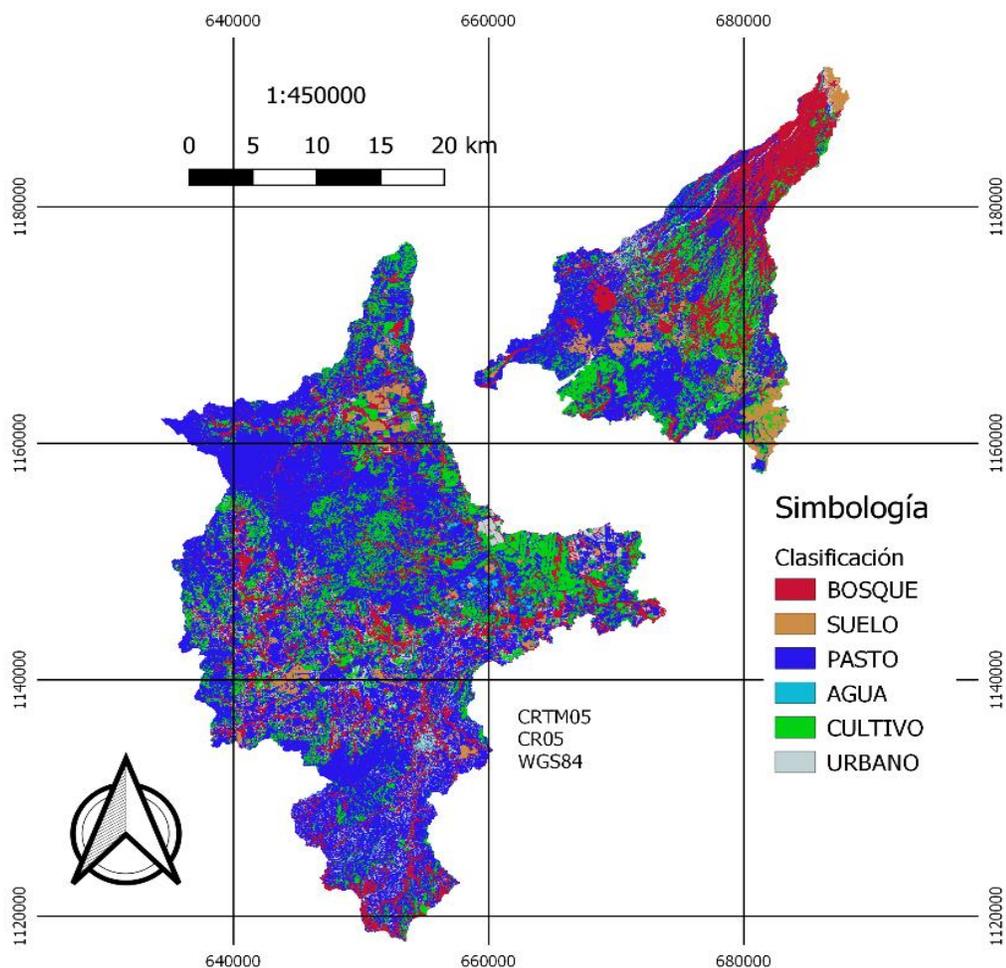


Figura 9 Mapa de uso de suelo en cada una de las subcuencas.

En el mapa no se observa con claridad cuál es el porcentaje de uso de suelo para cada una de las subcuencas, sin embargo, en la Figura 10 se detalla con claridad la cantidad de área para cada uno de los usos (ver anexo2, Cuadro 11).

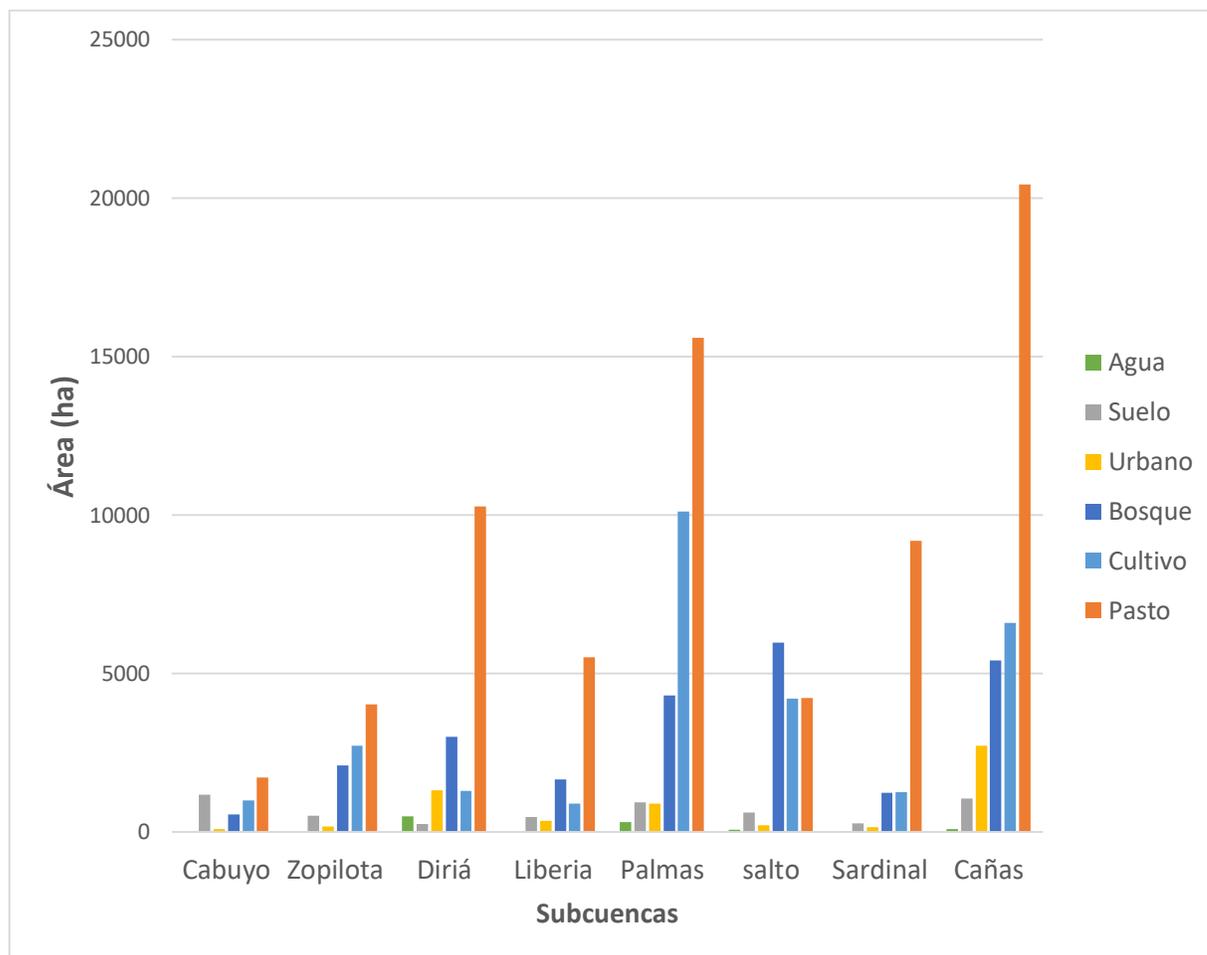


Figura 10 Uso de suelo en cada subcuencas.

En algunos casos no fue posible determinar un porcentaje de agua en algunas subcuencas, debido a que existen árboles que obstaculizan la visibilidad de los ríos, de igual forma la calidad de imagen a la hora de realizar un acercamiento muy amplio disminuye considerablemente evitando una selección adecuada de cobertura. Para cada uno de los usos de suelo se garantizó previamente que la selección automática generada por el programa utilizado (QGIS-Complemento SCP) fuera similar, por lo que se decidió realizar una amplia escogencia de

polígonos para cada cobertura con el fin de obtener una gran similitud con los usos que verdaderamente se están dando en cada subcuenca.

#### 4.3.3 Determinar el número de curva

Por medio de los tres parámetros grupo hidrológico, pendientes de la subcuenca y uso de suelo, fue posible determinar el número de curva promedio para cada una de las zonas en estudio. En la Figura 11 se pueden observar dichos valores.

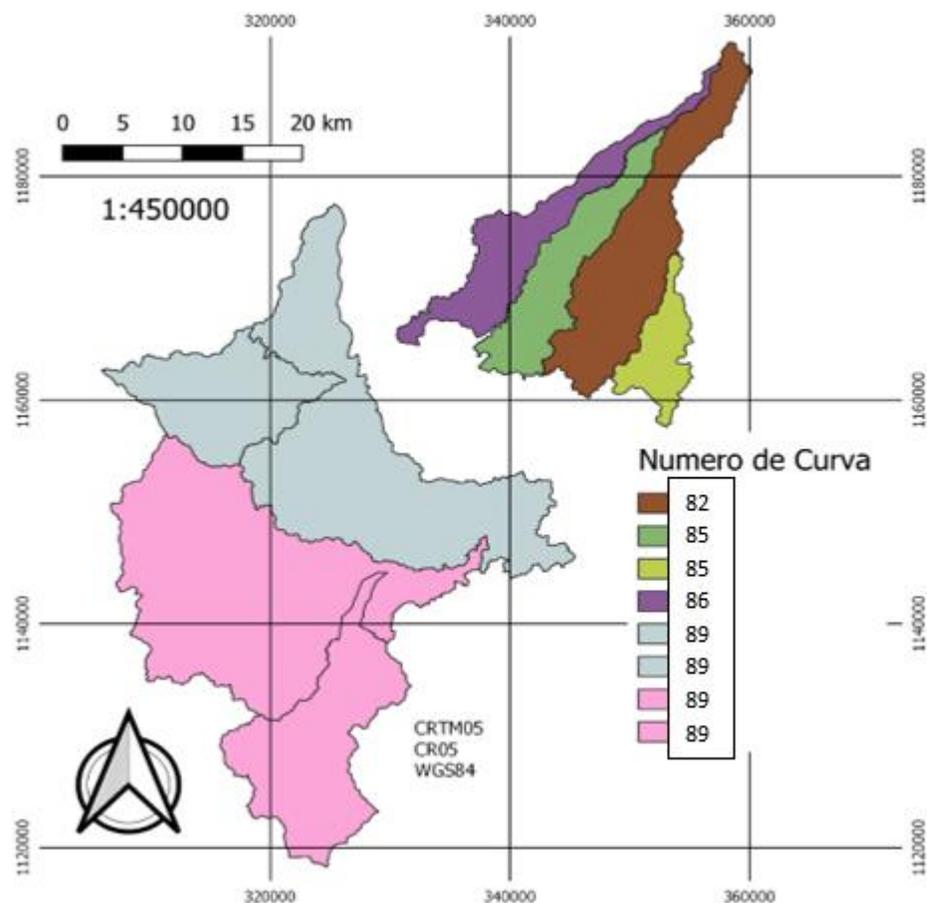


Figura 11 Número de curva en cada subcuenca.

En el Cuadro 11, se aprecia el área de cada una de las subcuencas con el respectivo número de curva promedio para cada una de ellas, cabe destacar que cada subcuenca generó alrededor

de 30 números de curva diferentes, sin embargo, al hacer el promedio solo se obtiene un único valor representativo para toda la subcuenca para una humedad antecedente III.

Cuadro 7. Numero de curva promedio para cada subcuenca.

<b>Subcuenca</b>	<b>Área (km2)</b>	<b>Número de curva</b>
Liberia	88,54	86
Zopilota	95,10	85
Sardinal	120,75	89
Salto	152,83	82
Palmas	442,06	89
Diría	166,24	89
Cañas	363,13	89
Cabuyo	45,10	85

El valor de numero de curva es muy similar en algunas subcuencas, esto se debe en gran parte a la cercanía que existe entre cada una, el clima que predomina en la zona hace que en todo el territorio de la provincia de Guanacaste la utilidad que se le da al suelo sea muy similar debido a la semejanza en cultivos. Según los valores de numero de curva de cada subcuenca, se garantiza que a la hora de presentarse una lluvia el escurrimiento será abundante y debido a las condiciones el suelo no podrá infiltrar con facilidad las lluvias.

## 4.4 Hidrogramas de crecida en HEC-HMS

### 4.4.1 Tiempo de concentración

Según las condiciones físicas de cada una de las subcuencas se pudieron determinar cada uno de los parámetros morfométricos indispensables para la interpretación que tendrá la lluvia en cada subcuenca, en este apartado se analizó la diferencia de altura que existe entre la parte más alta de la subcuenca y la parte más baja ( $\Delta H$ ), así como, el tiempo que tarda ( $T_c$ ) en llegar una gota desde la parte alta de la subcuenca a la parte baja, en el Cuadro 12 se especifica con claridad el lapso en minutos.

Cuadro 8. Tiempo de retardo para cada una de las subcuencas en estudio.

Subcuenca	$\Delta H$ (m)	$T_c$ (min)	$T_r$ (min)
Liberia	764	313	188
Zopilota	290	276	166
Sardinal	197	278	167
Salto	790	274	164
Palmas	180	434	260
Diría	380	305	183
Cañas	190	408	245
Cabuyo	110	196	118

Se analizó el cauce con mayor extensión en cada una de las subcuencas, a como también, la diferencia de alturas que este posee, haciendo la comparación del punto de aforo a la parte alta del cauce. Algunos tiempos difieren en gran medida de otros, esto debido a que existen causas con grandes extensiones lineales y con poca diferencia de altura ( $\Delta H$ ) que provocan una distribución lenta del agua, por lo que se consideran ríos con aguas poco turbulentas y con gran riesgo a desbordamiento, cuyo tiempo de retardo ( $T_r$ ) es elevado.

#### 4.4.2 Modelación hidrológica de la subcuenca Liberia.

Con los datos de precipitación registrados en la estación “74051”, fue posible determinar el comportamiento hidrológico en la subcuenca Liberia, contando con el registro meteorológico únicamente de una estación. En la Figura 12 se aprecia el comportamiento del agua en el evento ocurrido el 04 de octubre del 2017.

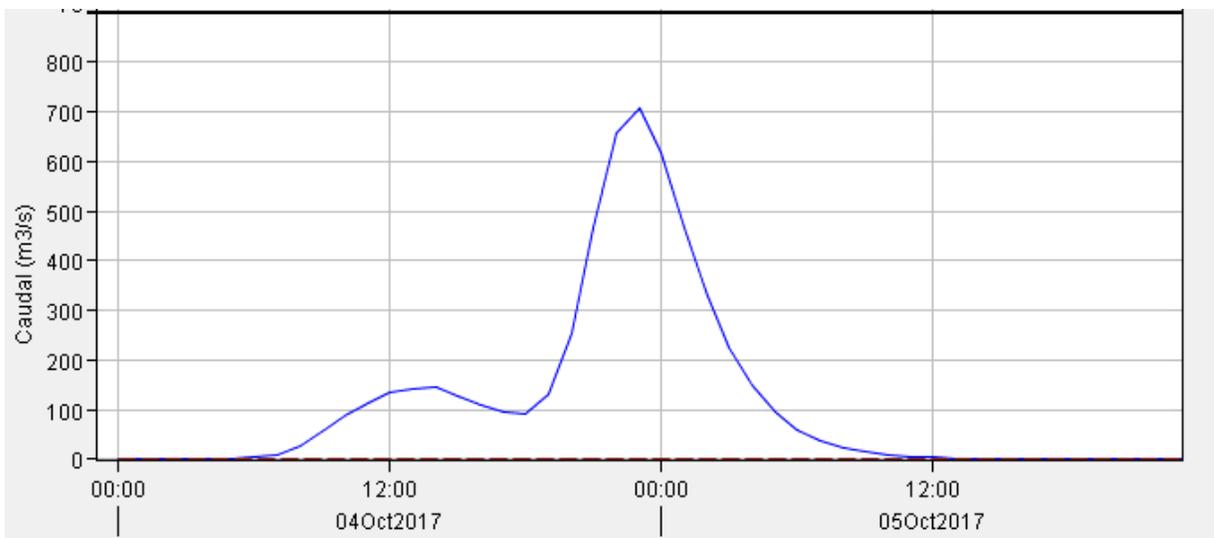


Figura 12 Hidrograma de la subcuenca Liberia.

Como se observó, el pico más alto o mayor caudal se presentó a las 23 horas con un valor de 709,2 m³/s, este caudal reflejó la cantidad de agua que pasó por la línea de intersección del canal Oeste y la subcuenca Liberia, este evento se ajusta a una probabilidad de ocurrencia de

29,5 años, valor aceptable para construir o modificar una obra hidráulica si se pretende mantener en buen estado ante tormentas con menor magnitud.

#### 4.4.3 Modelación hidrológica de la subcuenca Salto.

La subcuenca salto cuenta únicamente con el registro de la estación “74008”, con la cual fue posible determinar el hidrograma de crecida para el evento ocurrido el 04 de octubre del 2017, en la Figura 6 se aprecia gráficamente el desenlace de la tormenta.

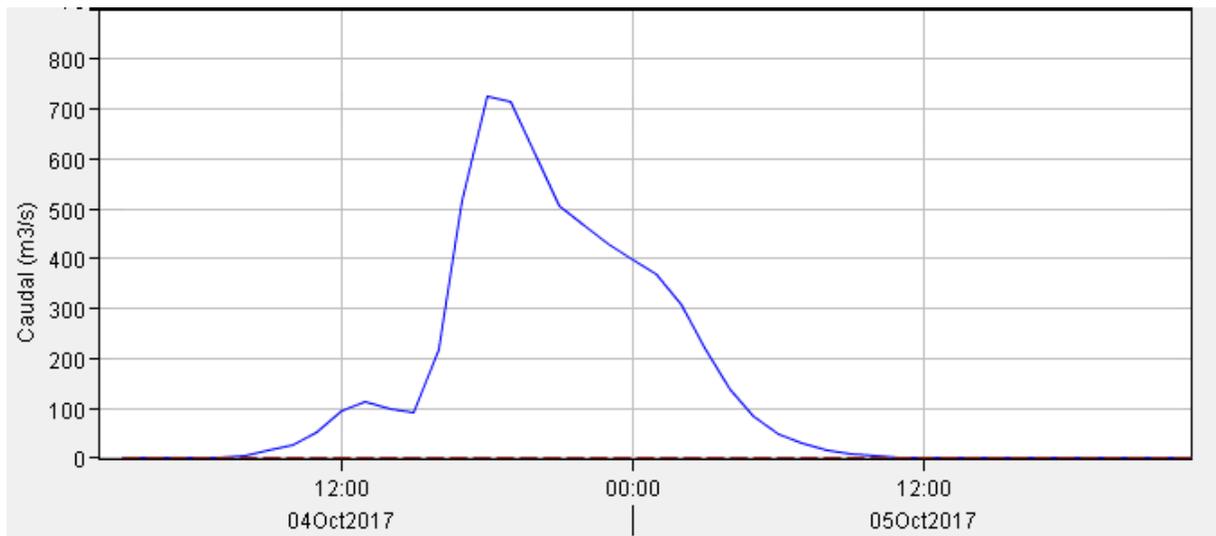


Figura 13 Hidrograma de la subcuenca Salto.

En el gráfico de la Figura 6 se puede visualizar que el evento generó un caudal máximo de 724,0 m<sup>3</sup>/s, solo que en este caso el tiempo que debe pasar para que se vuelva a presentar un evento similar es de 18 años, entre menor cantidad de años posea el tiempo de retorno menor será el caudal generado en una misma subcuenca.

#### 4.4.4 Modelación hidrológica de la subcuenca Zopilota.

La subcuenca Zopilota tenía influencia de dos estaciones meteorológicas “74008 y 74051”, por lo que fue necesario adaptar las estaciones a un único periodo de retorno, como las obras que se pretenden construir son hidráulicas y de gran importancia se decidió trabajar con el periodo mayor, en este caso de 29,5 años, corrigiendo únicamente los datos de precipitación horaria del día del evento registrado en la estación “74008”.

Para obtener el gráfico de la Figura 7, se tuvo que calcular el porcentaje de influencia de cada una de las estaciones sobre la subcuenca, siendo 75% la estación “74008” y 25% la estación “74051” basándose en mayor magnitud los resultados del hidrograma en los registros de la primera estación.

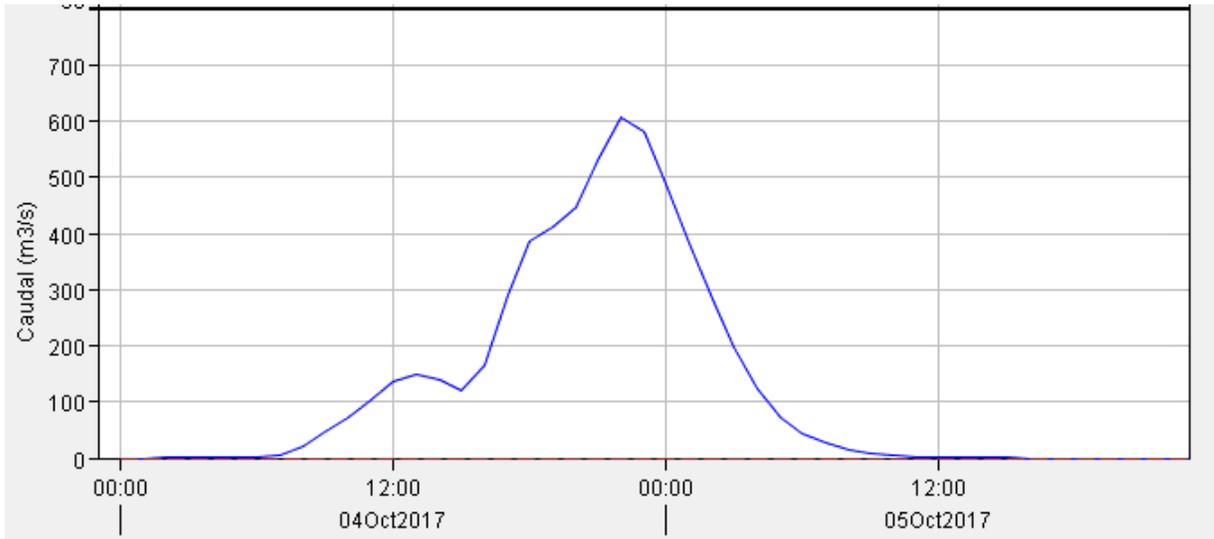


Figura 14 Hidrograma de la subcuenca Zopilota.

El caudal máximo registrado en el hidrograma de la Figura 7 fue de 606,7 metros cúbicos por segundo, registrado a las 22 horas del 04 de octubre, a pesar de que en esta subcuenca se utilizó el registro de dos estaciones el caudal es muy similar al de la subcuenca Salto, debido a que están muy cerca y poseen un área semejante.

#### **4.4.5 Modelación hidrológica de la subcuenca Cabuyo.**

Para el análisis de esta subcuenca se utilizó únicamente el registro de la estación “74008”, el área que posee es relativamente pequeña en comparación con las otras, en la Figura 15 se detalla el hidrograma según el desenlace del evento del 04 de octubre del 2017.

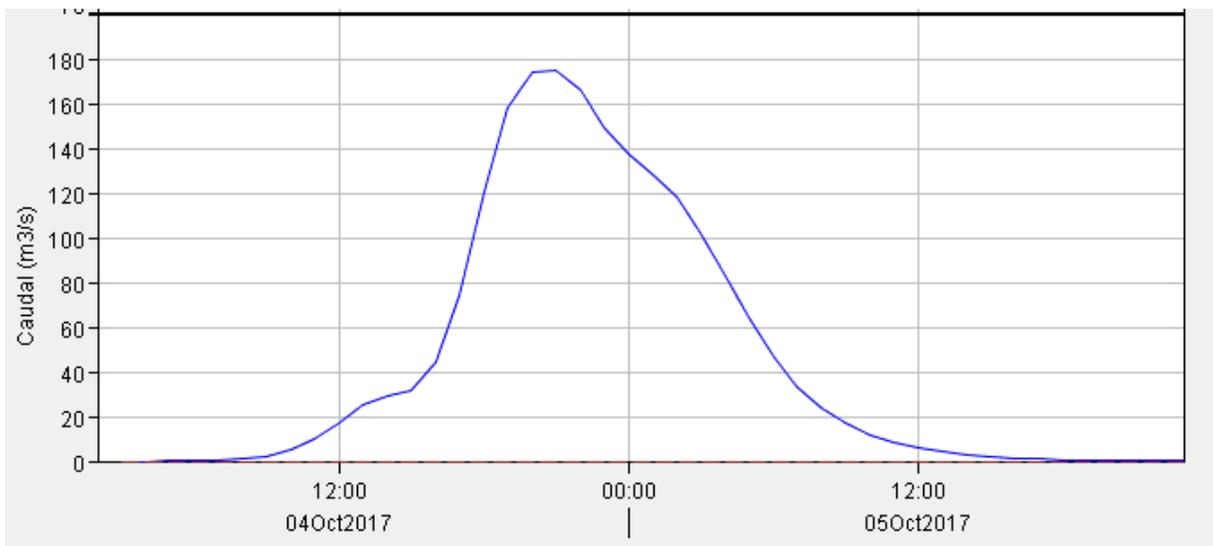


Figura 15 Hidrograma de la subcuenca Cabuyo.

A como se observa en la figura anterior la escorrentía que se generó en ese evento fue de 174,4 m<sup>3</sup>/s, un caudal pequeño al realizar una comparación directa con los caudales de las otras subcuencas, sin embargo, al hacer la comparación en porcentaje de área este es muy similar a las otras subcuencas vecinas.

#### 4.4.6 Modelación hidrológica de la subcuenca Sardinal y subcuenca Palmas.

La subcuenca Sardinal se conecta directamente con el río Palmas, en este caso se trabajó el río Sardinal por aparte del Palmas, en la Figura 16 se aprecia el hidrograma de crecida para subcuenca Sardinal.

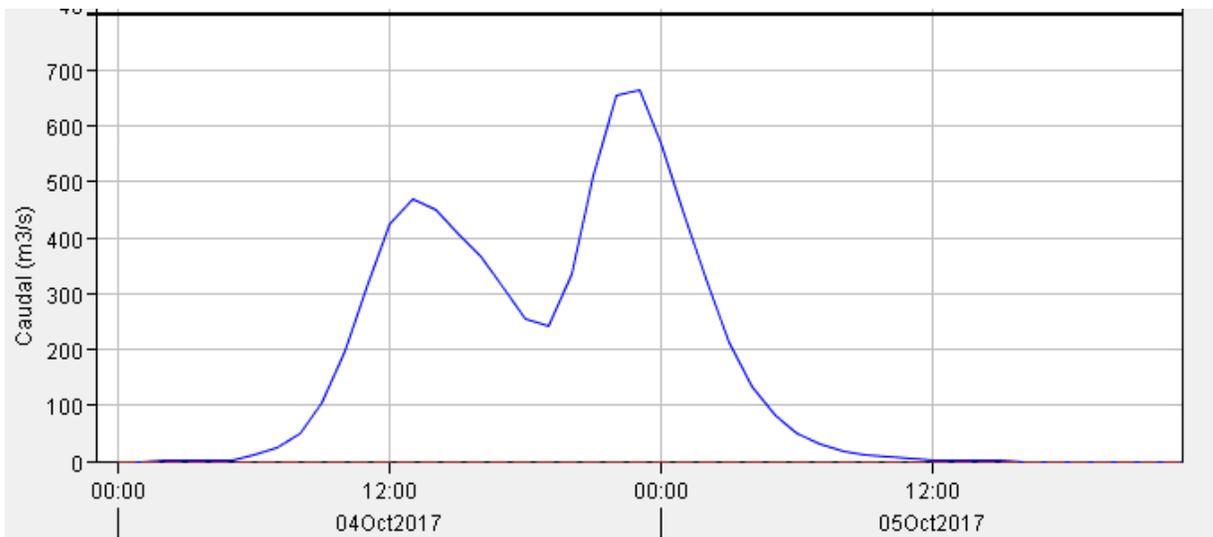


Figura 16 Hidrograma de la subcuenca Sardinal.

Como se puede apreciar en la Figura 9, el caudal máximo que se generó en la parte baja del río Sardinal fue de 663,3 m<sup>3</sup>/s, siendo un caudal esperado según las dimensiones del evento ocurrido. En la Figura 10 se parecía el hidrograma de la subcuenca Palmas en conjunto a la del río Sardinal, para este caso se realizó la simulación de ambas subcuencas.

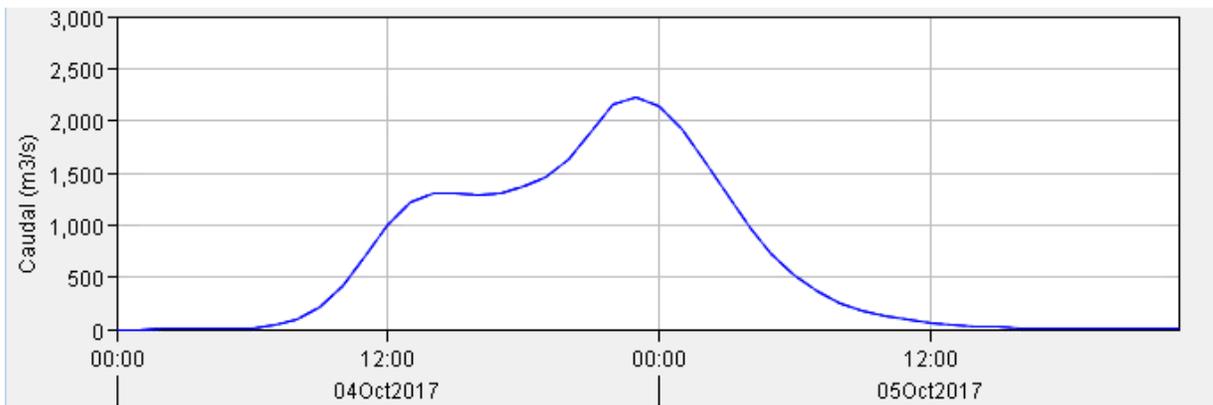


Figura 17 Hidrograma de la subcuenca Palmas

En la subcuenca Palmas el caudal que alcanzó el evento fue de 2231,9 m<sup>3</sup>/s, según la extensión del área de ambas subcuencas y las condiciones que se presentan en la zona, es un caudal muy elevado, el cual a simple vista provocó un gran desastre en la zona, cabe destacar

que esta subcuenca posee poco desnivel, y al ser un caudal tan elevado la concentración de agua en la parte baja de la subcuenca provocará grandes inundaciones en la zona.

#### 4.4.7 Modelación hidrológica de la subcuenca Cañas y subcuenca Diríá.

Estas subcuencas se encuentran a la par, para la generación del hidrograma de crecida se analizaron por separado debido a que ambos ríos (Diríá y Cañas) se unen muy cerca del río Tempisque, por lo que el aporte de agua en un evento tropical es más factible manejar por separado cada una de las subcuencas. Como se observa en la Figura 18, el caudal que se generó para el evento de estudio presentado el 04 de octubre del 2017 fue de 1527,0 m<sup>3</sup>/s.

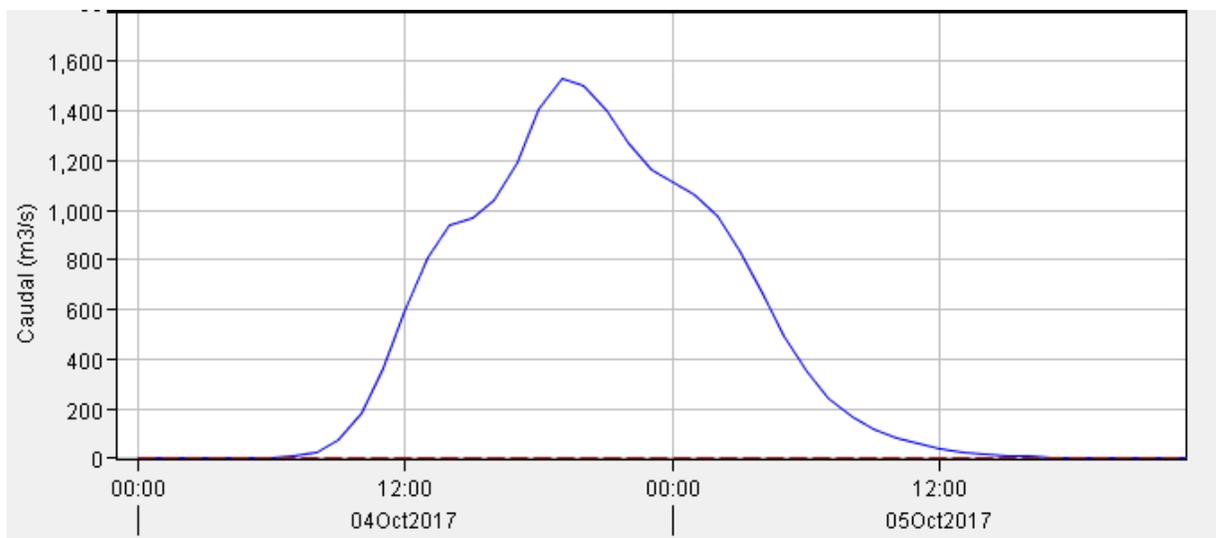


Figura 18 Hidrograma de la subcuenca Cañas.

Como se pudo observar, el caudal máximo fue alcanzado alrededor de las 19 horas de presentarse el evento, teniendo un desenlace creciente y luego decreciente, es decir, no presentó ninguna alza una vez que alcanzó el punto más alto, como si sucedió en el hidrograma de la subcuenca Diríá, donde después de alcanzar el caudal máximo de 872,3 m<sup>3</sup>/s, descendió a 290 m<sup>3</sup>/s y luego se elevó a 360 m<sup>3</sup>/s como se observa en la Figura 19.

Como se observa en ambas Figuras (18 y 19), el comportamiento de la lluvia en las subcuencas no fue similar, gráficamente se aprecia la irregularidad en el hidrograma de la Figura 19, en el cual se aprecia un desarrollo máximo de la tormenta en horas del día (2pm) mientras

que en Cañas se da en horas de la noche (7pm), este suceso evidencia que el comportamiento máximo de la lluvia varía en gran medida de una subcuenca a otra aun siendo vecinas, de ahí la importancia de contar con varias estaciones meteorológicas a la hora de realizar una simulación hidrológica.

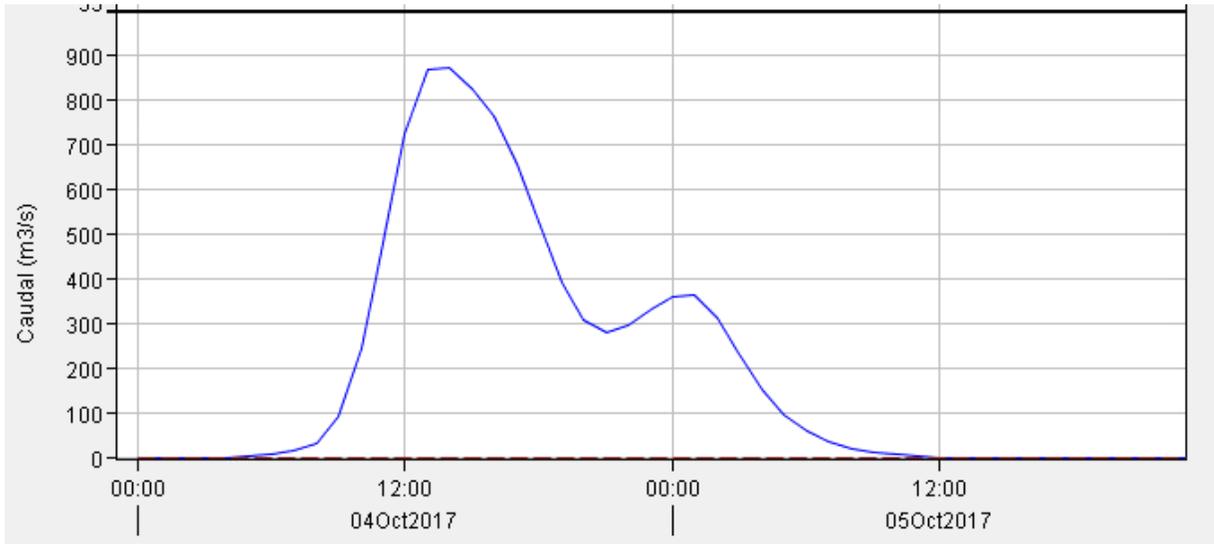


Figura 19 Hidrograma de la subcuenca Diríá.

#### **4.5 Análisis cualitativo del impacto social del proyecto en el desarrollo del proyecto PAACUME.**

El aporte social de PAACUME es de gran importancia para la provincia de Guanacaste, se verán beneficiados varios sectores que actualmente han quedado estancados en avances o mejoras que reactiven las actividades que se desarrollan en la zona. Con la ejecución exitosa del proyecto PAACUME se dará un impacto social positivo en todas sus áreas, será un gran incentivador para el sector agrícola, generando fuente de empleo al aumentar la producción de diversos productos, tanto en las grandes fincas, como en el surgimiento de pequeños productores que se han visto limitados al desarrollo de cultivos por el gran faltante de agua, también, se busca la participación y desarrollo de la población en el mercado nacional ofreciendo productos no tradicionales de la zona de Guanacaste en mercados municipales, poniendo a disposición de

los consumidores Guanacastecos productos tales como frutas y hortalizas cultivadas en la zona por agricultores enlazados al proyecto PAACUME.

Con los hidrogramas se podrán establecer las obras hidráulicas de PAACUME que estarán ubicadas en las subcuencas en estudio, la construcción de estos hidrogramas ayudará a evitar que las obras posean medidas arbitrarias, y que al momento de presentarse una tormenta tropical no sean capaces de soportar cierto caudal, colapsando y a su vez impidiendo que se brinde el suministro de forma regular a los usuarios.

El suministro de agua se entregará los doce meses del año a los usuarios, aun en época de sequía, esto ayudará a que los productores vean sus fincas adaptadas al cambio climático, al aumentar el suministro de agua se puede cultivar diversos productos todo el año, debido a lo anterior, es de suma importancia que PAACUME se construya de manera óptima, operando según el plan de manejo del proyecto (Padra, 2018).

#### **4.6 Análisis cualitativo del impacto ambiental del proyecto en el desarrollo del proyecto PAACUME.**

El mayor daño al ambiente será producido por la creación del embalse del río Piedras, el cual afectará negativamente el ecosistema en el área a inundar, siendo muchas especies y poblaciones obligadas a trasladarse a otros sectores, muchas se perderán en el proceso debido a la adaptación al nuevo hábitat ya que no será el mismo al que estaban acostumbradas (El Mundo CR, 2018)

Exceptuando lo antes mencionada, el trayecto de PAACUME en el margen izquierdo del río Tempisque no tendrá un daño considerable al ambiente, debido a que solo se le harán modificaciones al canal que se encuentra actualmente (canal Oeste), modificaciones que requieren remover poco suelo y vegetación, en algunos casos solo se cambiará el material del canal (concreto) y se darán nuevas alturas (según los hidrogramas y análisis hidráulicos) con respecto al nivel de mar para garantizar el traslado de un caudal mayor. El caudal se tomará de la represa del Arenal (alimentada por la cuenca del río San Carlos), cambiando el uso de agua subterránea por agua superficial, permitiendo a los acuíferos costeros descansar y recuperarse, promoviendo la sostenibilidad de los ecosistemas en el área del proyecto (Padra, 2018)

Actualmente existe una apelación en contra del desarrollo del proyecto debido a las 113 hectáreas que se deben inundar de la reserva biológica Lomas de Barbudal para concretar el establecimiento del embalse del río Piedras que almacenará el agua a conducir, de ser aceptada dicha apelación y negarse la construcción del embalse el proyecto no se podría llevar a cabo debido a que es el único lugar factible para almacenar el agua (Astorga, 2018). La reserva biológica Barbudal posee varias asociaciones boscosas, teniendo el bosque tropical seco mayores dimensiones, siendo una parte de esta la que se verá afectada al momento de crearse el embalse; la inundación que provocara el embalse traerá un impacto negativo al ambiente, el cual a la hora de compararse con los beneficios que ocasionara el embalse, parece no tener gran importancia.

Con la creación de PAACUME, los sectores de Guanacaste beneficiados cambiarán su paisaje, existirá mayor uso de suelo para fines agrícolas que zonas con uso de suelo para pastos y vegetaciones escasas o nulas, las cuales predominan actualmente en cada una de las subcuencas.

#### **4.7 Análisis cualitativo del impacto económico del proyecto en el desarrollo del proyecto PAACUME.**

La provincia de Guanacaste cuenta con una gran variedad de playas que aumentan el turismo en las zonas costeras, sin embargo, fuera de estas zonas el turismo ha decaído, con este proyecto se buscará otorgar agua a los pequeños centros turísticos que han sufrido un empobrecimiento notable debido al faltante de flora que engalana el paisaje y sirve como atractivo para los turistas. El beneficio será notable, no solo en ámbitos de agricultura y turismo, sino que también, en el abastecimiento de agua potable evitando una disminución del suministro en épocas secas, a continuación, se aprecian algunos de los aportes relevantes que se lograrán al ejecutarse y mantenerse de forma óptima PAACUME (Gobierno de Costa Rica, 2018).

- a. Ganancias millonarias al otorgar servicio de electricidad a un aproximado de 10000 viviendas
- b. Se generarán grandes ingresos económicos al ofrecer agua potable a medio millón de personas en una proyección de 50 años

- c. Aumentará la ganancia económica para los empleados y empleadores por medio de los nuevos trabajos que se generen o impulsen.
- d. El crecimiento del turismo provoca mayores ingresos económicos para la provincia en general

Con un análisis hidrológico de la zona se garantiza que todas las obras que se construyan van a presentar un adecuado funcionamiento bajo la presencia de algunas tormentas tropicales, y evitar de este modo daños directos en las construcciones. Al analizar el desenlace de la tormenta más significativa según registros de estaciones meteorológicas (Tormenta Nate), la cual, menciona el reporte de la Universidad de Costa Rica (2017), “provocó grandes pérdidas de infraestructura en el país”; la creación de un proyecto como lo es PAACUME requiere de gran inversión económica por lo que se debe evitar a toda costa que eventualidades tropicales como la antes mencionada dañen las obras que se encuentran a lo largo del proyecto.

## **6. CONCLUSIONES**

Por medio de los registros meteorológicos fue posible determinar el comportamiento del evento con más lluvia en los últimos diez años, logrando de este modo, crear los hietogramas que reflejan el comportamiento de dicho evento en cada una de las estaciones estudiadas, facilitando comprender de forma gráfica los cambios de volumen llovido en cada registro.

Se lograron estimar los valores de caudal que pasa por los puntos de aforo o intersección con el canal de PAACUME, al desarrollarse la transformación de precipitación a escorrentía, contemplando perdidas por infiltración según método de número de curva desarrollado, lo cual facilitó de modo similar la interpretación del comportamiento de la tormenta NATE (04 octubre 2017) por medio de los hidrogramas.

Muy pocas personas se verán afectadas por el proyecto PAACUME, puede decirse que beneficiará a todos los hogares, empresas, locales, centros turísticos y terrenos que estén cerca de su distribución, provocando uno de los impactos sociales más importantes para la zona de Guanacaste. Con este proyecto se garantiza que todas las obras a partir de este tengan énfasis en mantener el adecuado funcionamiento del canal y de las zonas cercanas.

De no llevarse a cabo el proyecto PAACUME debido al problema ambiental que lo mantiene actualmente en pausa, no se utilizarían todos los análisis realizados (este proyecto sería uno de ellos) reflejándose como pérdidas económicas irrecuperables. Con este proyecto se insta a desarrollar las obras de infraestructura de la forma más eficiente, disminuyendo los gastos económicos innecesarios por causa de las obras sobre dimensionadas e innecesarias.

El proyecto PAACUME provocará destrucción de la flora y fauna de la reserva bilógica, pero a su vez, la flora alrededor del embalse aumentará en gran medida, pasando de una vegetación escasa y de tendencia seca, a una vegetación verde y densa, lo cual compensará en gran medida el daño causado. Cabe destacar que el buen funcionamiento del proyecto PAACUME aprovechará al máximo el suministro de agua durante su traslado (generación eléctrica), lo cual le da mayor importancia al proyecto, ya que no existe un único uso durante su traslado, sino que también, las personas utilizarán este suministro y dejarán de lado la captación de agua subterránea de las zonas beneficiadas, provocando un gran impacto ambiental positivo en las zonas afectadas.

## **7. RECOMENDACIONES**

Debido a que Senara es una institución que realiza trabajos hidrológicos constantemente, debería establecer una relación más cercana con el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) para obtener datos de las estaciones meteorológicas que esta institución posee, y de este modo contar con más registros que afinen aún más los resultados.

Antes de establecer cualquier tipo de obra hidráulica por medio del resultado de los hidrogramas, se recomienda realizar una modelación hidráulica que refleje el comportamiento del agua en el punto donde se desea implementar la obra, de este modo se contaría no solo con el dato del caudal generado, sino que también, con el comportamiento del agua en la zona.

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

- Arguedas, D. (28 de Julio de 2016). *La sequía del 2015 trastornó a Guanacaste*. Obtenido de Ojo al Clima: <https://ojoalclima.com/la-sequia-del-2015-trastorno-a-guanacaste-una-experta-en-agua-explica-como-comprenderla/>
- Astorga, L. (29 de Julio de 2018). *Paacume: más que un proyecto para llevar agua a Guanacaste*. Obtenido de La Nación : <https://www.nacion.com/ciencia/medio-ambiente/paacume-mas-que-un-proyecto-para-llevar-agua-a/DVAGQYAJ4ZEGPPYVHSICT3DWPI/story/>
- Bateman, A. (2007). *Hidrología básica y aplicada*. Obtenido de GITS: <https://www.upct.es/~minaees/hidrologia.pdf>
- Cuerpo de Ingenieros del ejército de los EE.UU. (s.f.). *Centro de ingeniería hidrológica HEC-HMS*. Obtenido de USACE: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/features.aspx>
- El Mundo CR. (21 de Junio de 2018). *Fecon denuncia que embalse del río Piedras no cuenta con sustento técnico ni evaluación ambiental*. Obtenido de El Mundo CR: <https://www.elmundo.cr/costa-rica/fecon-denuncia-que-embalse-del-rio-piedras-no-cuenta-con-sustento-tecnico-ni-evaluacion-ambiental/>
- Gobierno de Costa Rica. (24 de Julio de 2018). *SENARA presenta diseños de obras de proyecto Paacume*. Obtenido de La Presidencia de la República de Costa Rica: <https://presidencia.go.cr/comunicados/2018/07/senara-presenta-disenos-de-obras-de-proyecto-paacume/>
- Japan Aerospace Exploration Agency. (s.f.). *ALOS PALSAR*. Obtenido de JAXA: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/palsar.htm>
- Jiménez, E. (3 de Abril de 2018). *Análisis y delimitación de cuencas hidrográficas usando el software QGIS-GRASS*. Obtenido de irriApps: <http://www.irriapps.com/delimitacion-de-cuencas/>
- Lafragua, J. (2008). *Elaboración de balances hídricos por cuencas hidrográficas y propuestas de modernización de las redes de medición en Costa Rica*. San José: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Luna, E., & Lavado, W. (2015). Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la cuenca Jetepeque, Perú. *Revista Tecnológica ESPOL*, 42-52.
- Marciano, A., Barbosa, A., & Silva, A. (2018). Cálculo de precipitação média utilizando método de Thiessen e as linhas de cumeada. *Revista Ambiente y Água*, 1-9.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Ganadería. (s.f.). *Mapa mundial FAO/UNESCO*. Obtenido de FAO: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/mapa-mundial-de-suelos-de-faounesco/es/>

- Ortiz, E. (1 de Agosto de 2015). *Atlas Costa Rica 2014*. Obtenido de Investiga TEC: [https://revistas.tec.ac.cr/index.php/investiga\\_tec/article/view/2330/2119](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/investiga_tec/article/view/2330/2119)
- Padra, E. (24 de Julio de 2018). *Paacume: el proyecto que permitirá llevar agua a Guanacaste*. Obtenido de ELPERIODICO: <https://elperiodicocr.com/paacume-el-proyecto-que-permitira-llevar-agua-a-guanacaste/>
- Porras, P., & Serrano, A. (2013). *Estudio Hidrológico-Hidráulico para el Diseño del Puente sobre la Quebrada Padre José*. Obtenido de IMNSA: [http://www.mag.go.cr/acerca\\_del\\_mag/programas/sixaola-proy-CP-02-2014-IH-Final-REV1.pdf](http://www.mag.go.cr/acerca_del_mag/programas/sixaola-proy-CP-02-2014-IH-Final-REV1.pdf)
- Presidencia de la República de Costa Rica. (12 de Octubre de 2017). *Tormenta Tropical Nate entre los mayores desastres de Costa Rica*. Obtenido de Universidad de Costa Rica: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2017/10/12/tormenta-tropical-nate-entre-los-mayores-desastres-de-costarica.html>
- QGIS Development Team . (15 de Agosto de 2019). *Sistema de Información Geográfica*. Obtenido de Guía de usuario QGIS: <https://docs.qgis.org/3.4/pdf/es/QGIS-3.4-UserGuide-es.pdf>
- Quesada, G. (13 de Abril de 2016). *Guía para la Evaluación de Impacto Ambiental*. Obtenido de Universidad Estatal a Distancia : <https://www.uned.ac.cr/sindicato/notas/913-guia-para-la-evaluacion-de-impacto-ambiental>
- Segeer, C., & Villodas, R. (2006). *Hidrología I*. Obtenido de Conosur: <https://http://www.conosur-rih.net/ADVF/documentos/hidro1.pdf>
- Sentinel. (s.f.). *Guía de usuario Sentinel-2*. Obtenido de ESA: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/overview>
- Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA). (s.f.). *Proyecto Abastecimiento de Agua para la cuenca media del Río Tempisque y Comunidades Costeras (Paacume)*. Obtenido de Senara: <http://www.senara.or.cr/proyectos/paacume/Paacume.aspx>
- Solano, H. (1 de junio de 2015). *Sequía en Guanacaste es la más fuerte de los últimos 78 años*. Obtenido de La nación: <https://www.nacion.com/sucesos/sequia-en-guanacaste-es-la-mas-fuerte-de-los-ultimos-78-anos/7QY5UI66MFBNFGK2JN424DYU6U/story/>
- Suarez, A. (7 de Diciembre de 2018). *Gestión de proyectos*. Obtenido de Comparasoftware: <https://blog.comparasoftware.com/recursos-de-un-proyecto/>
- Villalobos, W. (17 de Julio de 2017). *Nuevo proyecto de Senara promete más agua para agricultura pero deja buen uso en manos de productores*. Obtenido de La voz de Guanacaste: <https://vozdeguanacaste.com/nuevo-proyecto-de-senara-promete-mas-agua-para-agricultura-pero-deja-buen-uso-en-manos-de-productores/>
- Villón, M. (2004). *Hidrología*. Cartago: Tecnológico de Costa Rica.

Villón, M. (2013). *Ejemplos HEC-HMS*. Cartago: Centro de Desarrollo de Materiales Bibliográficos .

Villón, M. (Febrero de 2016). *HidroEsta*. Obtenido de Tecnología en Marcha:  
<https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v29s1/0379-3982-tem-29-s1-95.pdf>

## **9. ANEXOS**

**Anexo 1.** Datos meteorológicos registrados en las estaciones estudiadas.

Cuadro 9. Lluvias diarias máximas de cada año.

Año	Día/Mes	74051	Día/Mes	74008	Día/Mes	74067	Día/Mes	74053
2009	12-sep	72,5	18-may	104,0	2-nov	51,3	30-oct	53,4
2010	27-abr	85,7	15-ago	63,0	24-may	55,7	24-may	101,1
2011	16-oct	115,0	29-may	73,0	29-may	54,6	17-oct	93,7
2012	28-sep	81,6	17-may	65,0	17-may	44,6	18-oct	124,7
2013	5-jun	121,8	4-jun	60,0	30-sep	74,8	2-oct	60,7
2014	27-ago	58,4	20-sep	64,0	14-oct	71,2	13-oct	89,1
2015	21-sep	56,2	17-nov	60,6	12-sep	96,6	21-sep	66,9
2016	24-nov	109,4	24-nov	81,0	1-nov	119,4	4-dic	77,8
2017	4-oct	252,6	4-oct	200,6	4-oct	306,4	4-oct	236,7
2018	16-oct	117,8	26-may	113,5	27-may	125,0	5-oct	133,4

Cuadro 10. Registro diario del día 04 de octubre del 2017.

Hora	Estación			
	74053	74067	74051	74008
1	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,2	0,0
3	0,3	0,0	0,4	0,0
4	9,0	0,0	0,8	0,0
5	0,2	2,6	10,6	1,7
6	4,5	6,0	4,0	3,9
7	3,8	6,4	7,8	4,2
8	6,3	13,4	16,4	8,8
9	31,5	4,0	0,2	2,6
10	29,9	9,8	18,2	6,4
11	32,0	23,8	0,0	15,6
12	21,6	0,0	13,8	0,0
13	4,1	1,4	2,6	0,9
14	26,0	2,2	1,8	1,4
15	11,3	20,0	3,8	13,1
16	4,2	100,2	2,4	65,6
17	0,7	20,6	3,8	13,5
18	4,5	5,6	11,6	3,7
19	5,4	18,2	34,8	11,9
20	3,8	13,2	61,4	8,6
21	12,7	21,2	41,8	13,9
22	7,7	7,0	5,0	4,6
23	10,7	14,6	4,8	9,6
24	6,5	16,2	6,4	10,6

**Anexo 2.** Tipos de uso de suelo en cada una de las subcuencas.

Cuadro 11. Uso de suelo en cada subcuenca.

<b>Subcuenca</b>	<b>Bosque (ha)</b>	<b>Pasto (ha)</b>	<b>Suelo (ha)</b>	<b>Urbano (ha)</b>	<b>Cultivo (ha)</b>	<b>Agua (ha)</b>
Cabuyo	546,80	1711,28	1170,06	91,39	990,68	---
Zopilota	2093,50	4022,64	517,42	158,26	2718,19	---
Diriá	2998,64	10273,81	246,44	1308,58	1298,63	494,57
Liberia	1651,96	5503,33	463,09	346,29	887,26	---
Palmas	4303,37	15583,66	936,56	897,22	10106,47	309,80
salto	5960,05	4220,41	598,76	216,54	4208,79	73,43
Sardinal	1237,46	9180,14	261,25	140,56	1241,33	13,84
Cañas	5413,93	20422,77	1043,38	2726,51	6602,13	93,87