

Universidad Nacional, Costa Rica

Sede Regional Chorotega

Campus Liberia

Proyecto:

**Propuesta de sistema de alerta temprana para la gestión de riesgo ante eventos hidrometeorológicos extremos en dos plantas potabilizadoras en Costa Rica: Piedra Bruja en Jacó y La Paz en San Ramón.**

Como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Hidrológica.

Sustentantes:

Pablo César Benavides Juárez.

Cedula: 504230564

José Armando Busto Zamora.

Cedula: 504240499

Equipo supervisor:

Ing. Rolando Madriz Vargas

Dr. José Pablo Bonilla Valverde

Lic. María José Aguilar Valverde

MSc. Paula Marcela Pérez Briceño

MSc. William Gómez Solís

Liberia, Guanacaste.

Mayo, 2023.

**Jurado examinador**  
**INTEGRANTES DEL JURADO EXAMINADOR:**

A las 16:00 horas del día 17 del mes de febrero del año 2023, el jurado examinador del trabajo final de graduación denominado “Propuesta de sistema de alerta temprana para la gestión de riesgo ante eventos hidrometeorológicos extremos en dos plantas potabilizadoras en Costa Rica: Piedra Bruja en Jacó y La Paz en San Ramón” fue conformado por los siguientes miembros:

---

MSc. Merardo Moscoso Vidal  
Representante de Decanatura, Sede Regional Chorotega

---

Dr. Fernando Gutiérrez Coto  
Representante de Dirección Académica, Campus Liberia

---

MSc. Erick Gerardo Orozco Orozco  
Tutor

---

MSc. William Gómez Solís  
Lector

---

MSc. Paula Marcela Pérez Briceño  
Lectora

## **Agradecimientos**

*Agradecer a todas las personas que formaron parte de este proceso, no únicamente la elaboración de este proyecto, sino a largo de estos seis años de esfuerzo que ya están dando sus frutos. Mención especial para los diferentes personeros del AyA que siempre estuvieron a disposición de ayudarnos.*

*Ing. Pablo César Benavides Juárez*

\*\*\*\*\*

*Agradecemos a la Universidad Nacional de Costa Rica por brindarnos una excelente educación superior pública, a los profesores que nos proporcionaron los conocimientos necesarios para llegar hasta aquí. Al Doctor José Pablo Bonilla Valverde y la Licenciada María José Aguilar Valverde por aceptarnos en el proyecto y a los profesionales que forman parte del equipo supervisor, por ayudarnos y guiarnos durante el proyecto. Y agradecer a nuestros familiares y seres queridos que nos apoyaron y nos aconsejaron durante todo este proceso.*

*Ing. José Armando Busto Zamora*

### **Dedicatoria**

*Este trabajo está dedicado a mi familia y amigos, especialmente a mis pilares, mi madre Judith y Padre Ramiro; los cuales me brindaron todo lo necesario para llegar hasta acá. Así mismo a todos mis compañeros con los cuales trabajé durante todo este tiempo les deseo éxitos en sus futuras vidas profesionales.*

*Ing. Pablo César Benavides Juárez*

\*\*\*\*\*

*Dedico este proyecto a mi madre Jacqueline, por su apoyo incondicional, por el esfuerzo y los sacrificios que realizó para poder brindarme una carrera universitaria para mejorar mi futuro profesional. A mis abuelos Justiniano y Fredesvinda, por su motivación y apoyo que me dieron durante toda mi vida. A mis hermanos que me que me dieron palabras de aliento para seguir adelante. Y a mis familiares, amigos y compañeros que me han brindado su apoyo en el transcurso de mis estudios, les deseo lo mejor en sus vidas.*

*Ing. José Armando Busto Zamora*

## Lista de contenidos

Jurado examinador .....	i
Agradecimientos .....	ii
Dedicatoria .....	iii
Lista de contenidos .....	iv
Lista de cuadros .....	vii
Lista de figuras .....	ix
Abreviaturas .....	xi
Resumen ejecutivo (español e inglés) .....	xii
Capítulo 1. Introducción del proyecto .....	1
1.1 Introducción .....	1
1.2 Planteamiento del problema .....	2
1.3 Justificación .....	3
1.4 Objetivos .....	4
1.4.1 Objetivo general .....	4
1.4.2 Objetivos específicos .....	4
1.5 Alcances .....	4
1.6 Limitaciones .....	5
1.7 Resumen de contenidos .....	5
Capítulo 2. Contexto .....	7
2.1 Descripción de la zona de estudio .....	7
2.1.1 Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas .....	7
2.1.1.1 Antecedentes .....	8
2.1.1.2 Características de la subcuenca .....	9
2.1.1.3 Hidrografía .....	10
2.1.1.4 Aspectos socioeconómicos .....	11
2.1.2 La Paz, San Ramón, Alajuela .....	11
2.1.2.1 Antecedentes .....	13
2.1.2.2 Clima .....	13
2.1.2.3 Hidrografía .....	13
2.1.2.4 Aspectos demográficos .....	14
2.1.2.5 Actividades socioeconómicas .....	14
Capítulo 3. Marco teórico .....	16
3.1 Conceptos clave .....	16
3.1.1 Eventos hidrometeorológicos extremos .....	16

3.1.2	Gestión de riesgo .....	16
3.1.3	Riesgo, amenaza y vulnerabilidad.....	16
3.1.4	Umbrales de precipitación:.....	17
3.1.5	Sistemas de Alerta Temprana .....	18
3.1.6	Modelación hidrológica.....	18
3.1.7	Hidrogramas .....	18
3.1.8	Distribución de probabilidad. ....	19
3.1.9	Caudales máximos.....	19
3.1.10	Hydrognomon.....	21
3.1.11	Hec-HMS .....	21
Capítulo 4.	Estudios de prefactibilidad .....	23
4.1	Estudios de prefactibilidad.....	23
4.1.1	Estudio técnico.....	23
4.1.2	Estudio legal .....	25
4.1.3	Estudio ambiental.....	30
4.1.4	Estudio social.....	30
4.1.5	Estudio económico-financiero .....	32
Capítulo 5.	Metodología.....	35
5.1	Descripción del tipo de investigación.....	35
5.1.1	Variables cualitativas.....	35
5.1.2	Variables cuantitativas .....	35
5.2	Fuentes y técnicas para la recopilación de datos. ....	36
5.3	Fases metodológicas .....	37
5.4	Metodología seleccionada para el proyecto. ....	38
5.4.1	Recolección de datos.....	38
5.4.2	Caracterización de las áreas de estudio.....	39
5.4.3	Análisis estadístico.....	40
5.4.4	Generación de curvas IDF .....	41
5.4.5	Cálculo de caudales máximos con hidrograma unitario.....	42
5.4.6	Determinación de los umbrales de alerta .....	43
5.5	Cronograma y presupuesto.....	44
5.5.1	Diagrama de Grantt.....	44
5.5.2	Presupuesto.....	44
Capítulo 6.	Resultados y discusión .....	45
6.1	Principales resultados .....	45

6.1.1	Componentes y contexto de los SAT en Costa Rica .....	45
6.1.1.1	Componentes de los SAT .....	45
6.1.1.2	Contexto de los SAT en Costa Rica .....	47
6.1.2	Análisis de datos de precipitación y determinación de umbrales de alerta. ....	49
6.1.2.1	Ubicación de las estaciones meteorológicas y depuración de datos. ....	49
6.1.2.2	Días con precipitación máxima horaria (PMH) .....	51
6.1.2.3	Parámetros morfométricos .....	52
6.1.2.4	Hietogramas y curvas de doble masa de días de evento. ....	54
6.1.2.5	Graficas con las distribuciones de Gumbel Hydrognomon y literatura que avale GUMBELL. ....	55
6.1.2.6	Estimación de tormentas de diseño (IDF-PDF). ....	56
6.1.2.7	Curvas IDF y PDF delimitadas a una hora .....	62
6.1.2.8	Umbrales de precipitación para el SAT .....	65
6.1.3	Propuesta de protocolo SAT .....	69
6.2	Discusión de resultados .....	72
6.2.1	Componentes y contexto de los SAT en Costa Rica .....	72
6.2.2	Análisis de datos de precipitación y determinación de umbrales de alerta ....	73
6.2.2.1	Selección de tiempo de concentración (Tc) como tiempo final de la alerta: 73	
6.2.2.2	Selección de días con precipitación máxima horaria (PMH):.....	74
6.2.2.3	Análisis de los PMH seleccionados:.....	75
6.2.2.4	Periodos de retorno obtenidos (T):.....	76
6.2.2.5	Hietogramas y curvas de doble masa de las PMH para análisis de tormentas PMH.....	76
6.2.2.6	Análisis de datos.....	77
6.2.2.7	Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) y Curvas Precipitación-Duración-Frecuencia (PDF). ....	78
6.2.2.8	Periodo de una hora en las curvas IDF-PDF. ....	78
6.2.2.9	Umbrales de Alerta .....	79
6.2.2.10	Días hipotéticos que se hubiera activado la alerta.....	80
6.2.3	Propuesta de protocolo SAT .....	87
6.2.4	Discusión de objetivos.....	93
6.2.5	Discusión de metodología .....	94
Capítulo 7.	Conclusiones y recomendaciones .....	97
7.1	Conclusiones.....	97
7.1.1	Elaboración de los SAT ante eventos hidrometeorológicos extremos: .....	97

7.1.2	Umbrales de alerta.....	97
7.1.3	Propuesta de protocolo SAT .....	98
7.2	Recomendaciones .....	98
7.2.1	Elaboración de los SAT ante eventos hidrometeorológicos extremos: .....	98
7.2.2	Umbrales de alerta.....	99
7.2.3	Propuesta de protocolo SAT .....	100
7.2.4	Completación de datos faltantes .....	100
Capítulo 8.	Referencias .....	101
Capítulo 9.	Anexos .....	107

### **Lista de cuadros**

Cuadro 1.	Parámetros morfométricos de la subcuenca de la Quebrada Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.....	9
Cuadro 2.	Características climáticas de la subregión en la cual se ubica el sitio en estudio correspondiente a La paz, San Ramón, Alajuela. ....	13
Cuadro 3.	Parámetros morfométricos para tramo de la subcuenca del río La Paz, San Ramón, Alajuela. ....	14
Cuadro 4.	Categoría de Umbrales de lluvia.....	17
Cuadro 5.	Distribuciones de probabilidad.....	19
Cuadro 6.	Herramientas tecnológicas requeridas para la elaboración del proyecto.....	23
Cuadro 7.	Componentes computacionales (programas) requeridos para la ejecución del proyecto. 24	
Cuadro 8.	Marco regulatorio asociado a la finalidad del proyecto.....	26
Cuadro 9.	Presupuesto global del proyecto.....	33
Cuadro 10.	Estaciones por utilizar pertenecientes al AyA que se sitúan dentro a las áreas de estudio. ....	39
Cuadro 11.	Métodos para calcular cada uno de los parámetros morfométricos de las áreas en estudio. ....	39
Cuadro 12.....		40
Cuadro 12.	Diagrama de Gantt para las diferentes actividades a desarrollar. ....	44
Cuadro 13.	Consideraciones de cada uno de los componentes de un SAT para una eficiente operación de este. ....	46
Cuadro 14.	Puntos de Diagnóstico de la Red Institucional de Comunicación y Monitoreo de Alerta de la CNE (PDRIC) seleccionados para el Inventario y caracterización de Sistemas de Alerta Temprana para Costa Rica y su grado de priorización. ....	48
Cuadro 15.	Estaciones hidrometeorológicas cercanas al área de estudio.....	49
Cuadro 16.	Estación meteorológica del área de estudio.....	50
Cuadro 17.	Precipitación máxima horaria del registro de año de la estación La Paz I... 51	

Cuadro 18.	Precipitación máxima horaria de los siete años de registro.....	51
Cuadro 19.	Diferentes tiempos de concentración determinados para el área de estudio de La Paz, San Ramón, Alajuela. ....	52
Cuadro 20.	Resultado del tiempo de concentración de la cuenca mediante diferentes formulas	53
Cuadro 21.	Parámetros estadísticos de los diferentes tiempos de concentración promediados.....	54
Cuadro 22.	Periodos de retorno obtenidos para el registro de PMH del periodo 2014-2020 con el método de Weibull, La Paz, San Ramón, Alajuela.....	56
Cuadro 23.	Periodos de retorno calculados a partir de las intensidades máximas en una hora del 2015 al 2021, mediante el método de Weibull, Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.	56
Cuadro 24.	Comportamiento de las tormentas con mayor PMH seleccionadas del periodo 2014-2020 de la estación La Paz I, San Ramón, Alajuela. ....	58
Cuadro 25.	Tormentas de diseño generadas con la distribución de Gumbel a partir tormentas con mayor PMH del periodo 2014-2020 de la estación La Paz I, San Ramón, Alajuela.	58
Cuadro 26.	Comportamiento de las tormentas con mayor PMH seleccionadas del periodo 2014-2020 de la estación Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas. ....	59
Cuadro 27.	Tormentas de diseño generadas con la distribución de Gumbel a partir tormentas con mayor PMH del periodo 2014-2020 de la estación Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.	59
Cuadro 28.	Umbrales de alerta establecidos para la alarma del SAT utilizando la simbología del CNE; para el área de La Paz, San Ramón, Alajuela. ....	67
Cuadro 29.	Cuadro de peligro de las precipitaciones en el intervalo de 30 minutos dependiendo del periodo de retorno, utilizando la simbología del CNE.....	67
Cuadro 30.	Cuadro de peligrosidad de la precipitación acumulada de los 5 a 25 minutos, utilizando la simbología del CNE.....	68
Cuadro 31.	Cuadro de estado final de la alarma a los 30 minutos de precipitación acumulada.	68
Cuadro 32.	Resumen de la propuesta de protocolo SAT para funcionarios del AyA de la Planta Potabilizadora, La Paz y Unidad Cantonal de San Ramón.....	70
Cuadro 33.	Resumen de la propuesta de protocolo SAT para funcionarios del AyA de la Planta Potabilizadora, Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas. ....	71
Cuadro 34.	Días de activación de la alarma y su activación dependiendo de la precipitación y el tiempo acumulado para el sitio de estudio de La Paz, San Ramón, Alajuela.	81
Cuadro 35.	Días de activación de la alarma y su activación dependiendo de la precipitación y el tiempo acumulado. ....	82
Cuadro 36.	Cantidad de alarmas activadas por años y dependiendo de su simbología para las zonas sujeto de estudio.....	86

Cuadro 37. Desglose de gastos de las giras de campo a efectuar dentro de la ejecución del proyecto.	107
Cuadro 38. Falencias detectadas dentro del modo operativo de cada uno de los ocho PDRIC ante inundaciones de Costa Rica.....	108
Cuadro 39. Prueba de Bondad Kolmogorov-Smirnov para los PMH de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.....	109
Cuadro 40. Prueba de bondad X-Cuadrada para los PMH de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.	110
Cuadro 41. Simbología de colores de amenaza según la Comisión Nacional de Emergencias de Costa Rica.....	113

### **Lista de figuras**

Figura 1. Ubicación de Jacó de Puntarenas, Costa Rica.....	7
Figura 2. Alcantarillas pluviales obstruidas por las inundaciones, río Copey, Jacó de Puntarenas. ....	8
Figura 3. Desbordamiento en río Copey, Jacó de Puntarenas. ....	8
Figura 4. Cauces de microcuenca Piedra Bruja. ....	10
Figura 5. Desvío del cauce provocado por las fuertes inundaciones del 2022.....	11
Figura 6. Macrolocalización del área de estudio en La Paz, San Ramón de Alajuela, Costa Rica. ....	12
Figura 7. Microlocalización del área de estudio en La Paz, San Ramón de Alajuela, Costa Rica. ....	12
Figura 8. Viabilidades seleccionadas para el contexto de este proyecto. ....	23
Figura 9. Operador de la planta potabilizadora de La Paz, San Ramón brindando mantenimiento a la toma de agua. ....	31
Figura 10. Casas de habitación a cercanías de la planta potabilizadora expuestas a riesgos ante eventos hidrometeorológicos extremos, Piedra Bruja de Jacó, Puntarenas.	32
Figura 11. Tipos de variables cuantitativas requeridas para la elaboración de los SAT en las zonas sujeto de estudio. ....	36
Figura 12. Procedimiento metodológico por seguir para la elaboración del proyecto... 38	
Figura 13. Componentes de un Sistema de Alerta Temprana ante desastres naturales.	46
Figura 14. Modelo de elevación digital de la subcuenca Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.	53
Figura 15. Hietograma del día 23 de agosto del 2021. ....	54
Figura 16. Curva de doble masa del día 23 de agosto del 2021. ....	55
Figura 17. Distribuciones teóricas que más se ajustan a los PMH analizados, Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.....	55

Figura 18.	Curvas IDF para los diferentes periodos de retorno obtenidos para la zona de la Paz, San Ramón, Alajuela. ....	60
Figura 19.	Curvas PDF para los diferentes periodos de retorno obtenidos para la zona de la Paz, San Ramón, Alajuela. ....	61
Figura 20.	Gráfico de curvas IDF de la estación Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas. ....	62
Figura 21.	Curvas PDF de la estación Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas. ....	62
Figura 22.	Curvas IDF en una hora para los diferentes periodos de retorno obtenidos para la zona de la Paz, San Ramón, Alajuela. ....	63
Figura 23.	Curvas PDF en una hora para los diferentes periodos de retorno obtenidos para la zona de la Paz, San Ramón, Alajuela. ....	63
Figura 24.	Curvas IDF en una hora para los diferentes periodos de retorno obtenidos para la zona de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas. ....	64
Figura 25.	Curvas PDF en una hora para los diferentes periodos de retorno obtenidos para la zona de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas. ....	64
Figura 26.	Curvas PDF para periodos de retorno obtenidos y curva de calibración de los umbrales de alerta delimitadas al tiempo de concentración para la zona de La Paz, San Ramón, Alajuela. ....	65
Figura 27.	Curvas PDF para periodos de retorno obtenidos y curva de calibración de los umbrales de alerta delimitadas al tiempo de concentración para la zona de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.....	66
Figura 28.	Proceso de comunicación/difusión de la alerta del protocolo SAT de La Paz, San Ramón, Alajuela. ....	89
Figura 29.	Rutas de evacuación, Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas. ....	93
Figura 30.	Metodología seguida para la elaboración de resultados del proyecto. ....	96
Figura 31.	Resultado obtenido y codificación del riesgo en el Plan de Gestión de Riesgo para Cuencas para la planta potabilizadora de La Paz, San Ramón.....	107
Figura 32.	Hietograma del día 15 de noviembre del 2015.....	111
Figura 33.	Curva de doble masa del día 15 de noviembre del 2015. ....	111
Figura 34.	Hietograma del día 4 de octubre del 2018. ....	112
Figura 35.	Curva de doble masa del día 4 de octubre del 2018. ....	112

## Abreviaturas

**SAT:** Sistemas de Alerta Temprana.

**AyA:** Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.

**HEC-HMS:** Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System.

**CNE:** Comisión Nacional de Prevención de Riesgo y Atención de Emergencias

**IMN:** Instituto Meteorológico Nacional.

**UNISDR:** Oficina de las Naciones Unidas para Reducción de Riesgo de Desastres

**UNESCO:** Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

**CEPRENAC:** Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres en América Central y República Dominicana.

**SETENA:** Secretaría Técnica de Nacional Ambiental

**EIA:** Evaluación de Impacto Ambiental.

**PMD:** Precipitación máxima diaria.

**PMH:** Precipitación máxima horaria.

**IDF:** Intensidad-duración-frecuencia.

**PDF:** Precipitación-duración-frecuencia.

**CME:** Comité Municipal de Emergencias.

**OEA:** Organización de los Estados Americanos.

**SNIT:** Sistema Nacional de Información Territorial.

### **Resumen ejecutivo (español e inglés)**

El presente estudio comprende dos áreas de estudio, una situada en la localidad de La Paz, San Ramón, Alajuela y la otra en Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas. Más específicamente en las microcuencas delimitadas por las plantas potabilizadoras del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) de cada una de las áreas sujeto de estudio.

La ejecución de este estudio nace como petición de esta institución (AyA), más específicamente del Área Funcional Gestión del Riesgo, la cual, a partir de estaciones meteorológicas instaladas en cada una de las plantas potabilizadoras de las áreas sujeto de estudio, quiere sacar provecho de los datos de precipitación (cada cinco minutos) mediante la elaboración de Sistemas de Alerta Temprana (SAT) ante eventos hidrometeorológicos extremos; y con base en los resultados obtenidos establecer así medidas de mitigación de daños que estos eventos puedan causar.

Para elaborar lo solicitado (SAT ante eventos hidrometeorológicos extremos) se estableció cuatro objetivos específicos los cuales consisten en la recopilación y análisis de bibliografía referente a SAT's; análisis de información hidrometeorológica en las zonas sujeto de estudio, la determinación de umbrales alerta los cuales sugieran diferentes condiciones de alerta para afrontar los eventos hidrometeorológicos extremos; por último el proponer un protocolo SAT ante eventos hidrometeorológicos extremos; esto orientado para cada una de las áreas sujeto de estudio.

Los resultados demostraron que, el alcance del presente estudio no abarca para la creación de los SAT ante eventos hidrometeorológicos extremos en su totalidad, ya que se obtuvo limitantes en cuando a aspectos técnicos de programación y telecomunicaciones (de los cuales el AyA asume cargo a futuro). Sin embargo, se pudo proponer umbrales de alerta y protocolos para cada una de las áreas sujeto de estudio, los cuales entraran a fases de prueba para verificar la precisión de los mismo antes de entrar a operación o bien si requieren de calibración.

Por tanto, a modo de recomendación se debe seguir con el monitoreo constante de los eventos (precipitaciones/tormentas) para así recopilar eventos de mayor magnitud para seguir optimizando los SAT propuestos. Así mismo, elaborar una modelación hidráulica para tener una mejor comprensión de los posibles riesgos, amenazas y daños que puedan ocasionar los ante eventos hidrometeorológicos extremos en las áreas sujeto de estudio.

## Abstract

The following study includes two evaluated areas, one located in La Paz, San Ramón, Alajuela and the other one in Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas. Specifically, in the micro-watersheds delimited by the water treatment plants of the Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), of each studied areas.

The execution of this study has as origin a request from this institution (AyA), particularly, from Área Funcional Gestión del Riesgo, which based on meteorological stations installed in each of the water treatment plants in the areas under study, expects to take advantage of precipitation data (every five minutes), through the development of Early Warning System (SAT) in case of extreme hydrometeorological events; and based on the results obtained define measures to mitigate the damage that these events may cause.

In order to prepare the request (SAT in case of extreme hydrometeorological events), four specific objectives were established, which consist of the compilation and analysis of bibliography related to SAT's; analysis of hydrometeorological information in the areas under study, identificación of alert thresholds which suggest different alert conditions to deal with extreme hydrometeorological events; finally proposing a SAT protocol for extreme hydrometeorological events. This is oriented for each of the areas under study.

The results showed that the scope of this study does not cover the creation of SATs in case of extreme hydrometeorological events, due to limitations in terms of technical aspects of programming and telecommunications (AyA assumes responsibility in the future).

However, it was possible to propose alert thresholds and protocols for each of the areas under study, which will enter test phase to verify their accuracy before entering into operation or if they require calibration.

Therefore, it is highly recommended to continue monitoring of events (precipitation/storms), in order to collect events of greater magnitude, optimizing the proposed SATs. Likewise, develop a hydraulic model to have a better understanding of the possible risks, threats and damages that may be caused by extreme hydrometeorological events in the areas under study.

## Capítulo 1. Introducción del proyecto

### 1.1 Introducción

En lo que concierne al ámbito de desastres ocasionados por eventos naturales, se estima que en los últimos 20 años gran parte de estos desastres en el mundo derivan a raíz de eventos hidrometeorológicos extremos como precipitaciones, tormentas o inundaciones (Durán y Román, 2017, p.440-441). Una de las zonas que mayor impacto presenta referente a estos eventos hidrometeorológicos es América latina y El Caribe, donde en el periodo de 1990-2013 se registró el mayor porcentaje referente a pérdidas de vida humana y de infraestructura a nivel mundial (UNISDR, 2016).

Cabe resaltar que los eventos hidrometeorológicos extremos por sí solos, no sugieren un riesgo o amenaza como tal, ya que estos forman parte de un ciclo evolutivo natural del ambiente. Sin embargo, debido a dos tipos de variables que son las naturales y las antropogénicas, la posibilidad que los eventos hidrometeorológicos extremos se conviertan en desastres aumenta, a razón que estas variables ocasionan que la magnitud del impacto del evento sea mayor en el entorno (Quesada y Calderón, 2018).

Dentro de estas variables que influyen en la magnitud de los desastres causados por eventos naturales, se tiene el factor de la ubicación geográfica. Donde en el ámbito de eventos hidrometeorológicos extremos, la región Centroamericana, se encuentra ampliamente expuesta a este tipo de eventos debido a su ubicación en el cinturón global de huracanes. En lo que respecta a Costa Rica, se tiene que debido a características propias de la región como lo son sus condiciones geográficas, geológicas, geomorfológicas y climáticas, ocasionan que la región posea un grado considerable de vulnerabilidad ante distintos fenómenos atmosféricos como lo son los ciclones tropicales, ondas del este y los frentes fríos (Araya, 2017, p.11; Durán y Román, 2017, p.441).

Otra variable determinante en materia de la magnitud los desastres ocasionados por eventos naturales es el factor antropogénico. Este factor genera alteraciones al ecosistema al establecer asentamientos en planicies de inundación y en cercanías de las rondas de cuerpos de agua superficiales; también se tiene la falta de capacidad técnica para la elaboración de diferentes obras hidráulicas como diques, revestimientos y el almacenamiento de agua para diferentes usos como riego y ganadería, las cuales al no contar con un adecuado estudio hidrológico y mantenimiento, generan una mayor grado de vulnerabilidad física a impactos de eventos hidrometeorológicos extremos puedan ocasionar (Moreno et al., 2014, p.8).

De lo anteriormente mencionado, se puede deducir que la interacción en conjunto de todas estas variables acarreará consigo una serie de impactos en el entorno en diferentes campos como lo son: el social, ambiental, económico, técnico y legal principalmente. Ante estos escenarios surge la necesidad de establecer mecanismo, sistemas, acciones, que traten de mitigar dichos impactos, surgiendo así la gestión de riesgo. El concepto de gestión de riesgo es definido por Lavell (2001, p.9) como “un proceso social complejo a través del cual se pretende lograr una reducción de los niveles de riesgo existentes en la sociedad y fomentar procesos de construcción de nuevas oportunidades de producción y asentamiento en el territorio en condiciones de seguridad y sostenibilidad aceptables”.

En lo que respecta a la materia de gestión de riesgo en Costa Rica, se tiene que a lo largo de los años el país ha desarrollado una gran variedad de mecanismos de respuesta ante desastres de toda índole logrando mitigar su vulnerabilidad mediante el cumplimiento de códigos de construcción, normas ambientales, la planificación del uso de la tierra; además

de logros significativos en lo que refiere a marco institucional y jurídico con la incorporación de la gestión de riesgo de desastre en su programa de desarrollo (Banco Interamericano de Desarrollo, 2006, p.12, citado en Gobierno de Costa Rica, 2010, p.5).

Uno de los tantos mecanismos existentes en el ámbito de la gestión de riesgo ante desastres son los Sistemas de Alerta Temprana (SAT). Los SAT están compuestos por un conjunto de subsistemas, los cuales trabajan en conjunto y de manera integral en la anticipación de amenazas naturales y/o antrópicas que sugieran un riesgo en una determinada región. Lo anterior es posible mediante el constante monitoreo de diferentes señales físicas lo cual deriva en la predicción de una posibilidad manifiesta de la ocurrencia del evento en estudio; permitiendo así la acción rápida de diferentes entes para la prevención y mitigación de pérdidas humanas y materiales (Vargas et al., 2016, p.22).

Costa Rica en el campo de los SAT dio sus primeros pasos posterior a la incidencia del Huracán Joan en 1988; siendo el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), la Comisión Nacional de Prevención de Riesgo y Atención de Emergencias (CNE) y el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), las que establecieron procesos de alerta como sistemas de radiocomunicación para emitir avisos y alertas de fenómenos hidrometeorológicos con las comunidades de Sixaola y el Valle de la Estrella (UNESCO-CEPREDENAC, 2011, p.2).

Ahora, ingresando a lo que refiere el contenido y propósitos del presente trabajo, se tiene que este estudio realiza un análisis hidrológico enfocado en escenarios de precipitación-escurrentía. Esto se llevará a cabo en dos diferentes sectores de Costa Rica que son la región de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas y la comunidad de La Paz, San Ramón, Alajuela. Dicho estudio tiene como finalidad el determinar umbrales de alerta en los cuales el comportamiento del evento (precipitación) sugiera una amenaza que atente contra la integridad de los funcionarios y técnicos de las plantas potabilizadores de las zonas sujeto de estudio.

## **1.2 Planteamiento del problema**

En lo que respecta a materia de eventos hidrometeorológicos extremos en Costa Rica, Renata (2012, p.7-8) menciona que, en Costa Rica, los eventos hidrometeorológicos extremos que producen excedentes en precipitaciones son principalmente los frentes fríos, tormentas locales y/o efectos indirectos ciclónicos; estos eventos desembocan en desastres como lo son las inundaciones, erosiones edáficas y estructurales por fricción del agua que ocurre.

En lo que respecta a las zonas de estudio se tiene en primera instancia que, para La Paz, en San Ramón; la CNE (2019) cataloga a esta región como un punto focal ante amenazas hidrometeorológicas debido a la red fluvial bien definida con la que cuenta el cantón San Ramón con ríos como Barranca, San Pedro, Grande, Balsa y La Paz. Este último, río La Paz, es donde se desarrollará el SAT.

Jacó es uno de los principales distritos del Cantón Garabito, (Saborío y Granados, 2013, p.10), según el CNE este cantón es propicio a inundaciones durante lluvias de gran intensidad, esto se debe a que poseen una gran red fluvial, además que en los últimos años ha aumentado la deforestación debido al crecimiento de la población y el sector agropecuario, se le suma también el incremento de desechos sólidos en los ríos y que la topografía del lugar es susceptible a deslizamiento, propicia que el distrito Jacó sea vulnerable ante eventos hidrometeorológicos extremos (CNE, 2016, p. 1-3.).

Existen registros recientes que las inundaciones son un problema grande en la comunidad de Jacó, según Magdalena López Fonseca en 2021 se informa que el río Copey se

desbordó debido a las fuertes precipitaciones de la zona, provocando afectaciones a 51 familias de la zona (López, 2021, p. 1).

Son tan relevantes los eventos hidrometeorológicos extremos en el país, que del 80% de los desastres en Costa Rica para el periodo comprendido entre 1970-2020 corresponden a eventos hidrometeorológicos, los cuales impactan de manera negativa a factores sociales y económicos principalmente, ya que estos eventos son la segunda causa de decesos de vidas humanas cobrando la vida de aproximadamente 503 personas (Orozco et al., 2022, p.71). Mientras que por el sector económico se reflejado en el sector vivienda; donde la afectación por eventos hidrometeorológicos se traduce en el daño a 3109 edificaciones en el periodo de 1970-2020 (Brenes y Orozco, 2021, citado en Orozco, Brenes y Sura, 2022, p.74).

Por lo que este trabajo tiene como objetivo realizar un análisis hidrológico, el cual permita determinar umbrales alerta para volúmenes de precipitación, los cuales representen una amenaza hidrometeorológica; esto mediante el modelaje hidrológico de registros de precipitación de estaciones cercanas a las zonas de estudio. Lo anterior con la finalidad de salvaguardar la vida humana de los trabajadores de las plantas potabilizadoras, debido a que actualmente dentro de estas instalaciones no se cuenta con un mecanismo de alerta el cual notifique a los operarios de las plantas cuando una posibilidad manifiesta de un evento hidrometeorológico extremo dentro de las áreas sujeto de estudio (Bonilla 2022, per. com; 22 marzo).

### **1.3 Justificación**

Costa Rica dado a su posicionamiento geográfico, su geomorfología, y sus condiciones climáticas es muy vulnerables a los eventos hidrometeorológicos extremos (Duran y Román, 2017), los datos más antiguos registrados de inundaciones por la Comisión Nacional de Prevención de Riesgo y Atención de Emergencias (CNE) datan de 1861 (Vallejos et al., 2012, p.16.). Algunos de los fenómenos hidrometeorológicos que han azotado al país en años más recientes podrían ser el Huracán Eta el cual generó costos de aproximadamente 130 mil millones de colones en infraestructura en infraestructura (CNE, 2021, p.11.) o la Tormenta Tropical Nate, la cual dejó 14 fallecidos y millones de colones en daños estructurales en el país (CNE, 2018, p.8.).

Dado estos panoramas, este estudio tiene como finalidad establecer un Sistema de Alerta Temprana (SAT) para cada caso en estudio, con la finalidad de reducir las posibles pérdidas tanto humanas como materiales ante eventos hidrometeorológicos extremos en cada uno de los sitios de estudio. Por ende, se cuenta con tres razones que favorecen la implementación de dichos sistemas estas son: identificación de umbrales de alerta ante eventos hidrometeorológicos extremos, el aprovechamiento de la información hidrometeorológica recolectada y salvaguardar la vida humana.

Primeramente, se tiene la identificación de umbrales alerta ante eventos hidrometeorológicos extremos. Esta razón es el eje central de operación que posee este SAT, ya que se puede prever posibles eventos hidrometeorológicos extremos que pueden producir potencialmente afectaciones como las inundaciones, aludes torrenciales, entre otros. Además, el SAT es una herramienta que disminuirá el riesgo de los operadores de las plantas potabilizadoras ante posibles heridas y/o pérdida de vida cuando ocurran eventos hidrometeorológicos extremos, debido a que los funcionarios de las plantas tienen como parte de sus funciones el mantenimiento de las tomas de agua, por lo cual ellos se encuentran en mayor grado de vulnerabilidad ante este tipo de eventos.

En segundo lugar, se encuentra el aprovechamiento de los datos recolectados, en la actualidad existe información hidrometeorológica de las zonas de estudio la cual brinda la posibilidad de elaborar SAT ante eventos hidrometeorológicos extremos, y así darle un uso más a las estaciones hidrometeorológicas el cual multiplique los réditos de la inversión económica efectuada en la colocación de estas. Por lo cual, esta información puede ser optimizada en aspectos hidrológicos como hidrogramas, cartografías de la cuenca, modelaciones hidráulicas, entre otros; las cuales van a derivar en una mejor interpretación del comportamiento hidrometeorológico y cuando este representará una amenaza que ponga en riesgo la continuidad del servicio, así como los asentamientos humanos y actividades socioeconómicas dentro de las zonas de estudio.

El SAT podrá ser utilizado para el fortalecimiento y la cooperación entre las instituciones como las municipalidades y el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). Así mismo antes, durante y posterior al desarrollo del evento hidrometeorológico extremo, la coordinación de diferentes organismos estatales es fundamental, ya que de esta coordinación dependerán las vidas humanas y la integridad de diversas infraestructuras. Así mismo, se puede mencionar que, con la elaboración de un SAT, se tendrá como aspecto positivo mejoras en el tráfico de información entre los entes participantes, lo cual a la larga contribuirá en mejoras para el SAT.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo general***

Proponer un sistema de alerta temprana ante eventos hidrometeorológicos extremos para dos plantas potabilizadoras para fortalecer la gestión de riesgo de desastres.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

1. Analizar información técnica disponible para el desarrollo de sistemas de alerta temprana ante eventos hidrometeorológicos extremos.
2. Analizar información hidrometeorológica disponible en las microcuencas sujeto de estudio mediante base de datos, literatura y entrevistas a operadores para la caracterización de eventos hidrometeorológicos extremos en las zonas de estudio.
3. Determinar los umbrales de precipitación para el funcionamiento de los sistemas de alerta temprana de cada una de las zonas de estudio por medio de la caracterización de eventos hidrometeorológicos extremos.
4. Elaborar propuestas de protocolos de sistemas de alerta temprana para las zonas sujeto de estudio de Piedra Bruja, Jacó y La Paz, San Ramón para la mitigación de riesgos socioambientales ante eventos hidrometeorológicos extremos.

## **1.5 Alcances**

- Se recopilará toda la información hidrometeorológica disponibles de las estaciones dentro de las microcuencas de estudio como estaciones cercanas, con la finalidad de poder analizar los periodos registrados donde ocurrieron las crecidas en las plantas potabilizadoras.
- A partir de la información recolectada se reconstruirá los eventos hidrometeorológicos extremos asociados a crecidas en las microcuencas de estudio, mediante modelos de precipitaciones y lograr identificar los umbrales de alerta ante un posible evento.

- Se redactará un protocolo a seguir cuando ocurra un evento de crecida en las plantas potabilizadoras de la institución, para que los operadores y los funcionarios del AyA estén informados sobre el grado de alerta dentro la planta.

#### **1.6 Limitaciones.**

- Actualmente en Costa Rica no existen muchos documentos relacionados a Sistemas de Alerta Temprana para eventos hidrometeorológicos extremos, por lo que la información es escasa en cuanto al ámbito nacional, para ello se deberá recurrir a información internacional.
- Los registros de precipitación con los cuales cuentan las estaciones hidrometeorológicas de las zonas de estudio son de registros inferiores a diez años (nueve años para La Paz, San Ramón y siete para Piedra Bruja, Jacó); por lo que si se desea realizar el modelo para un largo periodo de tiempo se necesitará completar los datos utilizando estaciones externas a la microcuenca.
- Para completar datos faltantes se necesitará contactar con instituciones que posean estaciones cercanas, por lo que probablemente se deba adquirir los datos faltantes.
- Este protocolo solo utilizará datos de las estaciones hidrometeorológicas, sin embargo, se necesita más información para realizar un Sistema de Alerta Temprana, por lo que el protocolo no contemplaría todas las variables posibles para predecir una hipotética crecida.

#### **1.7 Resumen de contenidos**

En lo que respecta a los capítulos en los que se divide este documento, se tiene que son siete capítulos. El capítulo uno lleva el nombre de *Introducción*, en este se abordará de manera de manera general el contexto alrededor de la temática del proyecto, que para el caso es acerca de eventos hidrometeorológicos extremos y Sistemas de Alerta Temprana; así mismo se hace énfasis en la problemática en estudio y los principales objetivos alrededor del proyecto, los cuales serían cuatro metas que se irán cumpliendo acorde avance el proyecto, además se exponen los alcances y limitaciones, finalizando con un resumen de los contenidos del proyecto.

En el capítulo dos llamado *Contexto*, se profundizará en cuanto a las zonas de estudio dejando entrever un panorama más claro de la problemática y el proyecto en estudio; así mismo se respaldará dicho propósito con el abordaje de las actividades socioeconómicas de ocurren cerca de las zonas de estudio y además se profundizará las características morfométricas de las subcuencas en estudio.

En lo que respecta al capítulo tres de *Marco teórico*, se hace especial énfasis en la definición de diferentes conceptos claves, los cuales son de vital importancia su entendimiento, para así lograr una mejor comprensión de todo lo que se va a desarrollar en el proyecto, además se profundizará en distintas metodologías empíricas y teóricas utilizadas para desarrollar el proyecto.

Por otra parte, el capítulo cuatro, corresponde a *Estudios de prefactibilidad* en los cuales se desarrollarán estudios técnicos, legales, sociales y económicos/financieros; en torno al contexto del proyecto en desarrollo, con la finalidad de determinar si la puesta en marcha de este es viable o no.

El capítulo cinco se refiere a lo que es *Metodología*, es decir, todo lo relacionado a técnicas, mecanismos y herramientas a utilizar en el desarrollo del proyecto con la finalidad de analizar y hacerle frente a la problemática en estudio.

El capítulo seis denominado *Resultados y discusión*, se hace muestra de los principales resultados obtenidos derivados de las metodologías aplicadas para el desarrollo del proyecto. Así mismo, se hará síntesis de estos resultados brindando un análisis de los resultados obtenidos en pro de un mejor entendimiento del comportamiento de la problemática en estudio.

Por último, se tiene el capítulo siete referentes a *Conclusiones y recomendaciones*, en este apartado se brindará un pequeño resumen general de los aspectos más relevantes que resultaron del proyecto, como así mismo brindar recomendaciones la cuales van orientadas en generar acciones positivas en torno al abordaje del proyecto.

## Capítulo 2. Contexto

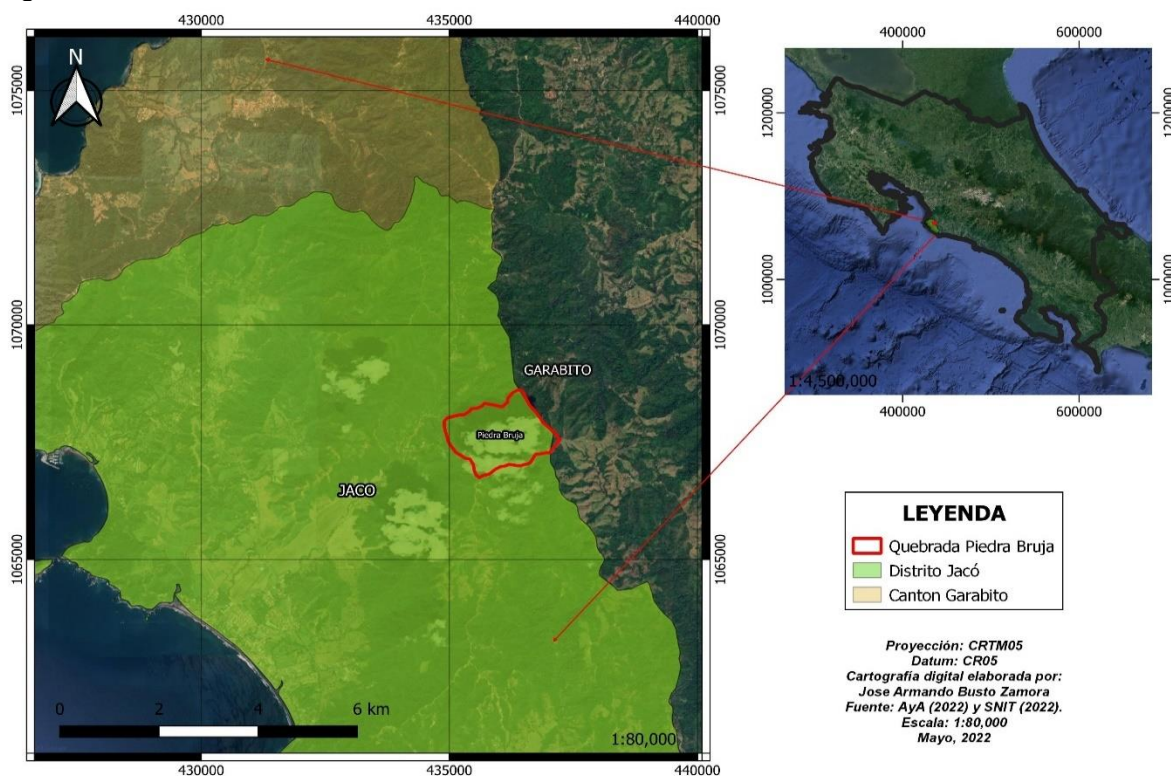
En lo que respecta a este capítulo denominado contexto, se hará muestra de información referente a la descripción de la zona de estudio, la cual corresponde a dos casos de estudio; el primero situado en la provincia Puntarenas, más específicamente al sector conocido como Quebrada Piedra Bruja en Jacó. Mientras que el segundo sitio en estudio corresponde a la comunidad de La Paz en San Ramón de la provincia Alajuela. Así mismo, dentro de este capítulo se mencionará sobre las principales características morfométricas que cuenta cada una de las zonas de estudio, entre otra información para conocer un poco más a cerca de dichas zonas.

### 2.1 Descripción de la zona de estudio

#### 2.1.1 *Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas*

La ciudad de Jacó es una comunidad costera que se encuentra en el distrito Jacó, Garabito, ubicado en la provincia de Puntarenas. Se encuentre entre las coordenadas 430000-435000 FE y 1060000-1065000 FN, utilizando la proyección de CRTM05, esto se puede apreciar en la Figura 1.

Figura 1. *Ubicación de Jacó de Puntarenas, Costa Rica.*



Fuente: Elaboración propia, 2022.

El distrito Jacó posee los poblados de Agujitas, Buenos Aires, Cañablanca, Cerro Fresco, Herradura, Mona, Playa Hermosa, Playa Herradura, Pochotal, Puerto Escondido, Quebrada Amarilla, San Antonio, Turrubaritos, Tusubres. En el Poblado de Jacó se concentra el 68% de la población total del distrito, según la Municipalidad de Garabito en 2016, se contabilizó que en Jacó habitan aproximadamente 15 441 personas y es considerado el distrito número 114 en cuanto a población del país (Municipalidad de Garabito, 2022). El Instituto Meteorológico Nacional, en su atlas meteorológico del 2005 indica que Jacó se encuentra en la región pacífico central, poseen unas precipitaciones medias aproximadas de 3500mm

anuales y unas temperaturas máximas de 31 °C y mínimas de 22.7 °C (Rodríguez, et al., 2005).

#### 2.1.1.1 Antecedentes.

En agosto del 2021 las playas de Jacó fueron fuertemente azotadas por lluvias intensas, lo que ocasionó el desbordamiento del Río Copey. Dicho evento dejó un saldo de 51 familias afectadas; donde el sector de Piedra Bruja (una de las zonas de estudio) fue una de las zonas más afectadas; dentro de los daños ocasionados se encuentra la obstrucción de paso alcantarillados obstruidos por rocas y árboles de gran tamaño arrastrados por la inundación, dichos daños provocados por las inundaciones se pueden apreciar en las Figuras 2 y 3 (Carvajal, 2021).

*Figura 2. Alcantarillas pluviales obstruidas por las inundaciones, río Copey, Jacó de Puntarenas.*



Fuente: Municipalidad de Garabito, 2021.

*Figura 3. Desbordamiento en río Copey, Jacó de Puntarenas.*



Fuente: Municipalidad de Garabito, 2021.

La topografía del terreno hace que la zona sea vulnerable a inundaciones de gran magnitud, los cuales pueden provocar pérdidas humanas, daños en la infraestructura del AyA y las viviendas de la población, por lo tanto, un conocimiento general de la cuenca nos brinda un contexto del porqué pueden presentarse estos fenómenos.

#### 2.1.1.2 Características de la subcuenca.

La microcuenca de la Quebrada Piedra Bruja se localiza en la zona noreste del distrito de Jacó, posee un área aproximada de 2.3 km<sup>2</sup>, y se encuentra casi en su totalidad en el cantón Garabito (AyA, 2018).

La microcuenca de estudio es utilizada por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) como sitio de toma de agua para la planta potabilizadora de Jacó, es única toma de agua superficial del cantón Garabito la cual cuenta con sistema de tratamiento (Mora, 2011). Según la cartografía del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT), la Quebrada de Piedra Bruja desfoga en el Río Copey, que, a su vez, desboca en el mar.

En el siguiente cuadro se podrá observar los parámetros morfométricos calculados mediante el programa de información geográfica, en este caso se utilizó QGIS versión 3.16.

*Cuadro 1. Parámetros morfométricos de la subcuenca de la Quebrada Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.*

Parámetro	Resultado	Unidades
Área	2.48	km <sup>2</sup>
Perímetro	6.67	km
Longitud de tributarios	2.39	km
Índice de compacidad	1.19	---
Longitud del cauce principal	1.63	km
Densidad de drenaje	1.62	km/km <sup>2</sup>
Tiempo de concentración	0.16	horas
	9.41	minutos
Tiempo de retardo	0.09	horas
	5.65	minutos
Elevación mínima	184	ms.n.m
Elevación máxima	808	ms.n.m
Pendiente media de la cuenca	28.29	porcentaje (%)

Fuente: Elaboración propia, 2022.

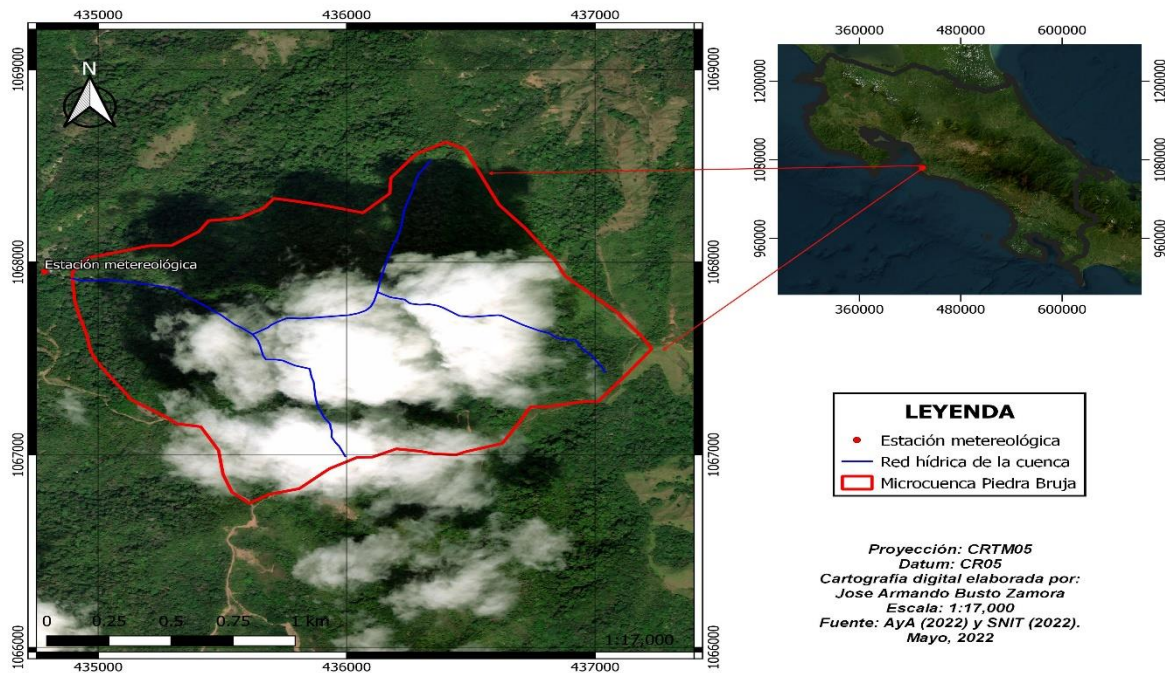
Según la clasificación de cuencas por parte de Villón (2015), las cuencas se pueden catalogar entre grandes o pequeñas, la cuenca se clasifica como pequeña debido a que su

área es menor a 250 km<sup>2</sup>, lo que significa que las características como la intensidad de lluvia, características del suelo y la vegetación toman una mayor relevancia que las del cauce.

### 2.1.1.3 Hidrografía.

La quebrada de Piedra Bruja es una de las subcuencas del Río Copey, uno de los principales ríos que riega el distrito de Jacó, un río que según la cartografía 1:25 mil del sistema de información nacional territorial es de orden 3 según la clasificación de Horton (Vega, 2020), esta misma cartografía nos indica que la Quebrada es de orden 2, en la Figura 4 se puede observar el orden de los ríos de la subcuenca y como conecta con el río Copey. Cabe mencionar que según palabras del Dr. José Bonilla “Debido al gran problema de los deslizamientos que provocan las inundaciones el cauce del río se ha visto afectado, provocando que se ramifiquen cauces de menor tamaño o que algunos se desvíen” (Bonilla 2022, per. com; 25 mayo), debido a estos acontecimientos la orografía de la cuenca es muy inestable, por lo que la red hídrica no es del todo precisa, en la imagen se puede apreciar cómo se divide el río en dos secciones de menor tamaño.

Figura 4. Cauces de microcuenca Piedra Bruja.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Figura 5. Desvío del cauce provocado por las fuertes inundaciones del 2022.



Fuente: Fotografía propia, 2022.

La alteración de la hidrografía en la cuenca de estudio repercute directamente en la población, ya que al ser tan inestable provoca que los desbordamientos del río sean con mayor frecuencia.

#### *2.1.1.4 Aspectos socioeconómicos.*

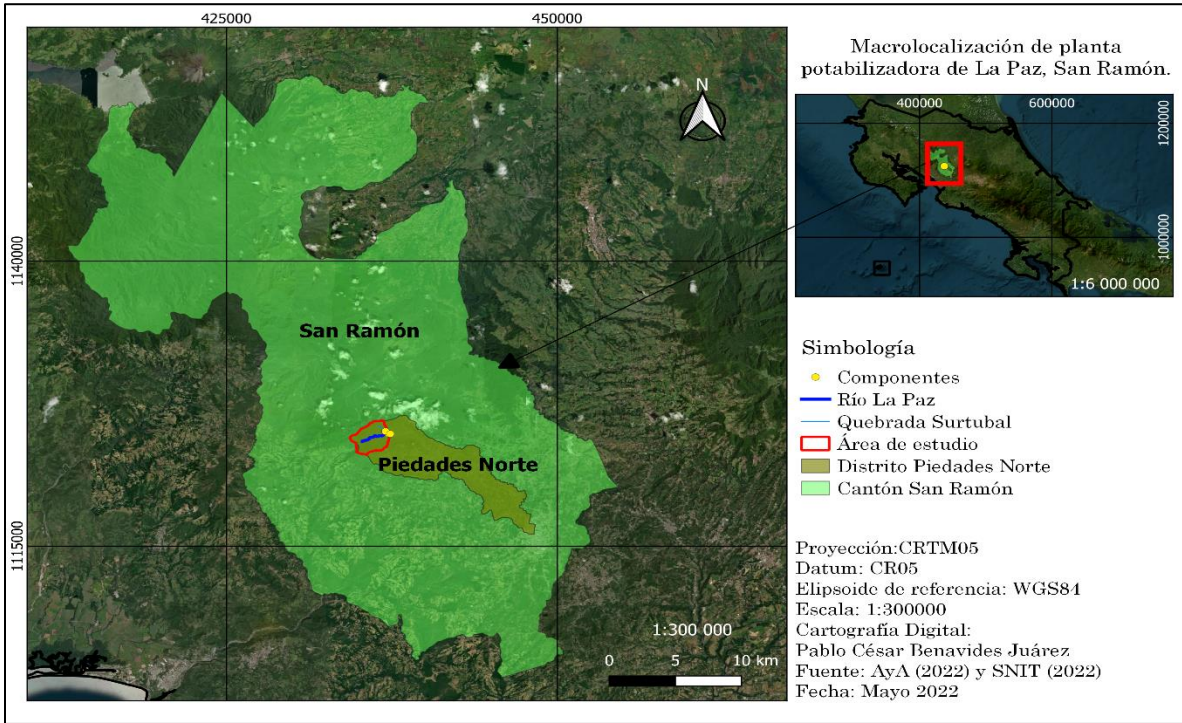
Jacó al poseer una población costera su principal fuente de económica proviene del turismo, el distrito Jacó es conocido principalmente por sus hermosas playas, ideales para la inversión extranjera ya sea por visitas turísticas o inversión para hotelería (Municipalidad de Garabito, 2022). Playa Hermosa es uno de los atractivos más sobresalientes de Jacó, debido a su oleaje se puede practicar el deporte de Surf. Además, que se han realizado competiciones mundiales de surf, lo que les da una gran oportunidad a los habitantes de la zona para poder generar empleos (Mora, 2020).

#### *2.1.2 La Paz, San Ramón, Alajuela.*

Para este caso de estudio, se tiene que la zona donde se llevó a cabo el proyecto se sitúa en el cantón número cuatro de la provincia Alajuela, el cual corresponde a San Ramón; más específicamente en la comunidad de La Paz en el distrito Piedades Norte, el cual limita al norte con el distrito Los Ángeles, al sur con los distritos Piedades Sur y Alfaro, al este con parte del distrito Los Ángeles y la ciudad de San Ramón y al oeste con el distrito Zapotal y parte de Piedades Sur (Municipalidad de San Ramón, 2016).

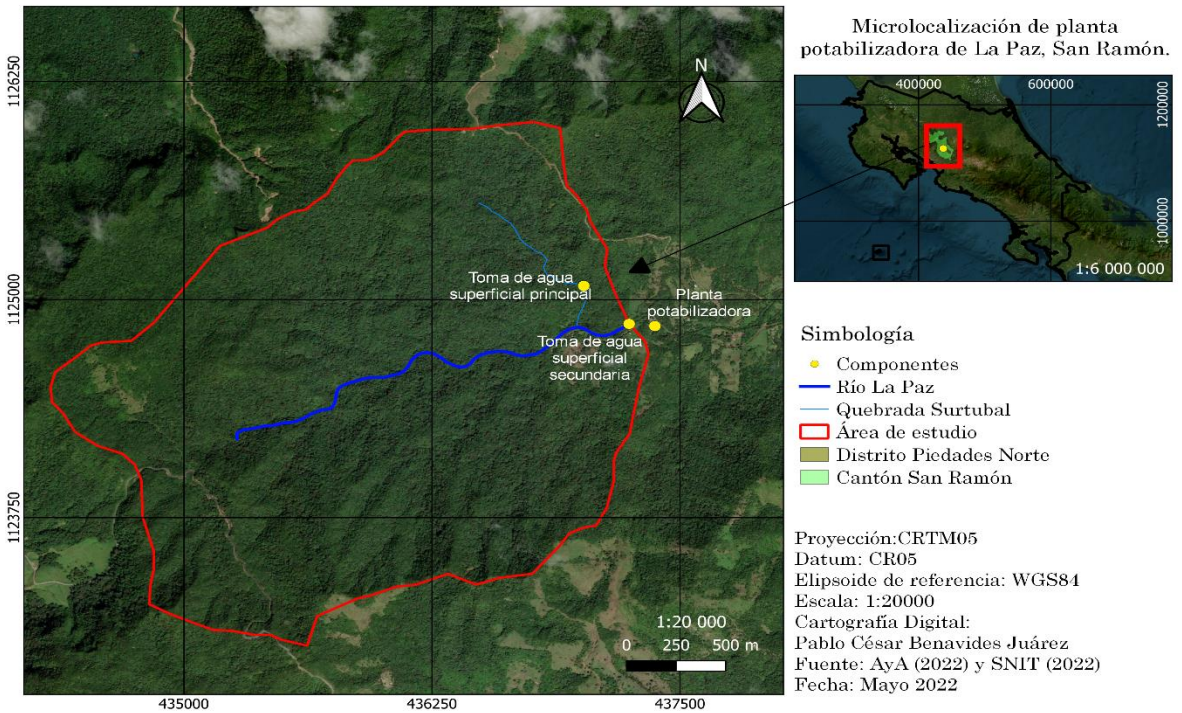
En lo que corresponde al sector específico en estudio, este corresponde a un tramo de la subcuenca del río La Paz, cabe resaltar que este tramo de subcuenca fue delimitado en función de la planta potabilizadora del AyA. La ubicación geográfica en coordenadas corresponde a 434000-437500 metros este y 1122000-1126100 metros norte en la proyección CRTM05 (Ver figuras 6 y 7).

Figura 6. Macrolocalización del área de estudio en La Paz, San Ramón de Alajuela, Costa Rica.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Figura 7. Microlocalización del área de estudio en La Paz, San Ramón de Alajuela, Costa Rica.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

De las anteriores figuras 6 y 7, se logra apreciar el tramo del río del cual se capta el agua para ser tratada para su posterior distribución en la comunidad de la Paz.

#### 2.1.2.1 Antecedentes.

Recapitulando lo mencionado en la sección 1.2 del capítulo 1 (referente a la problemática), se tiene que la problemática a tratar para este caso de estudio corresponde a la falta de un mecanismo que prevé la amenaza de un evento hidrometeorológico extremo como lo puede ser una crecida la cual atente contra la vida humana y la infraestructura dentro del área en estudio (Bonilla 2022, per. com; 22 marzo).

Bajo el anterior escenario, se deduce que el ámbito de este trabajo se orienta en el ámbito de la gestión de riesgo; en este campo (gestión de riesgo) ya se han realizado estudios previos, correspondientes al informe de *Plan de Gestión de Riesgo para Cuencas*. De este informe el resultado que sobresale para el presente sitio sujeto de estudio, el cual es denominado como Sistema Piedades Norte, es la amenaza de inundación seguido de aludes torrenciales y deslizamientos, con una codificación alta (15), media (8) y baja (4) según la codificación del Sistema Específico Valoración del Riesgo Institucional (SEVRI) utilizada en dicho estudio (Anexo 1) (Porras et al., 2021, p.6.).

Bajo los resultados arrojados en este informe (*Plan de Gestión de Riesgo para Cuencas*), el presente proyecto prioriza el determinar umbrales alerta para precipitaciones que presenten un determinado patrón en cuanto a intensidad-duración, los cuales pueden ocasionar eventos hidrometeorológicos extremos como crecidas que atienten contra la vida humana de los operadores de la planta.

#### 2.1.2.2 Clima

En lo que respecta al clima de la zona de estudio, La Paz, San Ramón; debido a su ubicación geográfica y a la regionalización climática efectuada por Villalobos y Solano (2000, p.22-23.) se sitúa en la Región Norte, subregión N1 la cual comprende las faldas orientales de las cordilleras de Guanacaste y de Tilarán; esta región presenta las siguientes características (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Características climáticas de la subregión en la cual se ubica el sitio en estudio correspondiente a La paz, San Ramón, Alajuela.

Variables climáticas					
Lluvia media anual (mm)	T. máxima media anual (°C)	T. mínima media anual (°C)	T. media anual (°C)	Promedio de días con lluvia	Duración del periodo seco (meses)
3100	30	21	25	225	Sin periodo seco

Fuente: Elaborado a partir de Solano y Villalobos (2000, p.22.).

Del cuadro 2, resalta que la caracterización climática estipulada por Villalobos y Solano (2000) para la zona estudio, en la cual deja reflejado que la zona de La Paz de San Ramón, Alajuela presenta un régimen climático predominante para el periodo lluvioso, ya que de los 365 días del año 225 días presentan precipitación, lo anterior un factor clave a considerar para el estudio hidrológico a elaborar.

#### 2.1.2.3 Hidrografía

En lo que respecta a la hidrografía de la zona, tal y como se menciona en la sección 2.1.2 del presente documento, se tiene que el área de estudio corresponde a un tramo de la subcuenca del río La Paz, San Ramón, Alajuela. Dentro de esta zona sujeto de estudio se

tiene la presencia dos cuerpos de agua superficiales los cuales son el río La Paz y un efluente llamado Quebrada Surtubal, la cual que desemboca en el tramo del río La Paz que se encuentra previo a la toma de agua superficial. Cabe mencionar que estos cuerpos de agua son de los cuales el AyA capta agua para suministrar a la población de la zona. En lo que respecta a los parámetros morfométricos del área en estudio se tiene la siguiente información en el cuadro 3.

*Cuadro 3. Parámetros morfométricos para tramo de la subcuenca del río La Paz, San Ramón, Alajuela.*

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidades</b>
Área	5.79	km <sup>2</sup>
Perímetro	9.73	Km
Longitud de drenaje (Río La Paz)	2.34	Km
Longitud de drenaje (Quebrada Surtubal)	1.03	Km
Índice de compacidad	1.13	---
Longitud del cauce principal	2.34	Km
Densidad de drenaje	0.58	km/km <sup>2</sup>
Tiempo de concentración	0.40	Horas
	23.74	Minutos
Tiempo de retardo	0.24	Horas
	14.24	Minutos
Elevación mínima	1241	m.s.n.m
Elevación máxima	1606	m.s.n.m
Pendiente media de la cuenca	25.88	porcentaje (%)

Fuente: Elaboración propia, 2022.

De los parámetros reflejados para el área de estudio de La Paz de San Ramón, Alajuela; se resaltar que el área a estudiar comprende una extensión territorial de aproximadamente 5.79 km<sup>2</sup>.

#### *2.1.2.4 Aspectos demográficos*

Tal y como se mencionó en la sección 2.1.2 el área de estudio se encuentra en el distrito Piedades Norte, en el cantón San Ramón de Alajuela. Este distrito posee una extensión territorial de 47.85 km<sup>2</sup> y una población aproximada de 9039 personas según el Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC) (2017, p.18.). Dentro de los poblados que conforman este distrito se encuentran Piedades Norte, La Paz (zona de estudio), Bajo la Paz, Bajo Zúñiga, La Esperanza, Bolívar, Polideportivo/Calle Ángeles, Las Lomas, La Libertad y el Poró (Municipalidad de San Ramón, 2016).

#### *2.1.2.5 Actividades socioeconómicas*

En lo que respecta a las principales actividades socioeconómicas que se desarrollan en el distrito Piedades Norte, se tiene la ganadería y agricultura donde posee grandes extensiones de fincas para la cría del ganado. Y para la agricultura, destacan dos cultivos la caña de azúcar y el café, siendo el primero (caña de azúcar) el más representativo del cantón San Ramón debido a su alta calidad (Siles, 2020, p.34; Municipalidad de San Ramón, 2016a).

Otra actividad que se da en la zona es el turismo, enfocado al sector ambiental, ya que las actividades relaciones a esta materia para el distrito Piedades Norte son: la observación de

aves y el senderismo, en el cual se aprecia la diversidad de flora y fauna que ofrece el bosque nuboso (Municipalidad de San Ramón, 2016b).

A modo de conclusión del presente capítulo (Contexto), se logró determinar que debido a las características del entorno de los sitios de estudios y de las diferentes actividades desarrolladas en los sitios, ya se han presentado eventos hidrometeorológicos extremos, por lo cual, la ejecución del presente proyecto se presenta como una herramienta útil para la adaptabilidad de las diferentes características del entorno.

### Capítulo 3. Marco teórico.

A continuación, se hará muestra de principales conceptos los cuales son de requerido conocimiento para la obtención de un mejor entendimiento del proyecto a desarrollar, entre estos conceptos se encuentra el eje central de este trabajo que son el concepto de eventos hidrometeorológicos extremos, gestión de riesgo, riesgo, amenaza y vulnerabilidad; así mismo enfatizar en qué es un Sistema de Alerta Temprana y diferentes herramientas e insumos requeridos para la puesta en marcha del presente proyecto.

#### 3.1 Conceptos clave

##### 3.1.1 Eventos hidrometeorológicos extremos

En lo que concierne a la definición de eventos hidrometeorológicos extremos, estos se pueden englobar en tipos, el primero referente a las características físicas la cual se asocia a sistemas meteorológicos responsables de los cambios y frecuencias de eventos climáticos inusuales que están en valores por encima o debajo del registro de variabilidad promedio (sequías y precipitaciones más intensas). El otro tipo se asocia a la magnitud del impacto debido pérdidas económicas y de vidas, un claro de ejemplo de esto son las inundaciones que ocasionan una gran cantidad de impactos socioeconómicos (Marengo et al, 2006; Montero et al, 2016).

##### 3.1.2 Gestión de riesgo

Seguidamente se encuentra lo que es el concepto de gestión de riesgo, este concepto es definido por la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR) (2015) como una serie de mecanismos de coordinación entre distintos sectores y niveles que requiere la participación de instituciones ejecutivas y legislativas del Estado a nivel nacional y local; todos estos orientados en la protección de las personas y sus bienes, salud, medios de vida y bienes de producción considerando aspectos tanto culturales como ambientales en una determinada zona.

Costa Rica lleva tiempo trabajando en el ámbito de la gestión del riesgo a desastres donde resaltan tres congresos nacionales efectuados en los años 1988, 2010 y 2015, de dichos congresos se ha obtenido como resultado avances significativos en el cumplimiento de la Política Nacional de GRD 2016-2030, el Plan Nacional de GRD 2016-2020, y la Estrategia Nacional de Cambio Climático. No obstante, la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención a Emergencias (CNE) destaca que a pesar de todos lo logrado hasta fecha en el área de la gestión del riesgo, hay un factor clave el cual se debe seguir trabajando y es la adaptabilidad a razón de condiciones que posee el país frente a diversas amenazas y al cambio climático (Chavarría et al; 2016, p.153-155). Dado este panorama, la implementación de SAT resulta en una herramienta capaz de trabajar en el ámbito de la gestión del riesgo en búsqueda de esa adaptabilidad a las condiciones que presenta determinada región.

##### 3.1.3 Riesgo, amenaza y vulnerabilidad

Dentro del ámbito de la gestión de riesgo se tiene, además del riesgo, otros dos conceptos fundamentales para llevar a cabo una gestión eficiente, estos conceptos son amenaza y vulnerabilidad. Estos dos conceptos (amenaza y vulnerabilidad) son necesarios para determinar el grado de riesgo. Ahora, se entiende por riesgo a la probabilidad de presentar consecuencias económicas, sociales y/o ambientales en una región determinada; por otra parte, el concepto de amenaza se entiende como la probabilidad que un evento de diferente naturaleza ya sea natural, socio-natural y/o antropogénico al presentar en un espacio determinado pueda producir afectaciones en distintos sectores como ambiental, social, industrial, entre otros. Por último, se tiene el concepto de vulnerabilidad que *grosso modo*

se define como el grado de susceptibilidad a daños ambientales, económicos, sociales, entre otros a los que una comunidad se expone frente a una amenaza (Lavell, 2001).

### 3.1.4 Umbrales de precipitación:

Según el manual de diseño, instalación y operación de sistemas comunitarios de alerta temprana ante inundaciones de la Organización de Estados Americanos (OEA) de 2010, las inundaciones suceden cuando el nivel de las aguas en los cauces de ríos se sobre eleva a su nivel normal, provocando que se desborde el río y ocurran las inundaciones. Se define el termino umbral como una magnitud físicamente peligrosa, de la cual deriva una acción de protección, luego los umbrales pasan a ser niveles de alerta, lo cual permite que las poblaciones de las comunidades en peligro tengan margen suficiente para prepararse ante un posible evento hidrometereológico extremo, los sistemas de alerta temprana ante inundaciones poseen dos tipos de umbrales; Umbral de lluvia y Umbral de nivel del río.

- **Umbrales de lluvia:** Los valores de alerta de lluvia van a depender de la zona donde se realice el estudio, las principales características de estos umbrales son la intensidad de duración de la tormenta y la extensión, dependiendo del país se toman a considerar intervalos de tiempos más cortos que otros, por ejemplo, se pueden tomar datos ocurridos cada media hora, una hora y para lluvias más duraderas datos de 12 horas o 24 horas\*. Los umbrales de lluvia poseen la ventaja del tiempo de que tiempo para predecir un evento de inundación es mayor, ya que los datos al ser monitoreadas por estaciones meteorológicas llegan primero a los centros de control antes de que una hipotética crecida ocurra en la zona de estudio, lo que permite que se pueda analizar los datos obtenidos y tomar la decisión de dar la alerta o no (OEA, 2010, p. 46-48).

**Cuadro 4.** *Categoría de Umbrales de lluvia.*

<b>Tipo de Alerta</b>	<b>Condición de Alerta</b>	<b>Descripción</b>
Aviso	Verde	Se activa cuando existe una expectativa de ocurrencia de un fenómeno y se puede prevenir daños potenciales para la población cercana. Se le avisa a la institución encargada del monitoreo para que se prepare un posible plan de reacción, sin embargo, no se realizan movilizaciones en las zonas de peligro.
Alerta	Amarillo	Se activa cuando la alerta se prevé que el desarrollo de los eventos puede encontrarse en peligro inminente y se establece una situación severa de emergencia.
Alarma	Rojo	Se activa ya cuando el fenómeno impacta la zona de estudio, provocando daños estructurales, ambientales y posibles pérdidas humanas.

Fuente: Elaboración propia a partir de la OEA (2010).

- **Umbrales de nivel de río:** Para poder identificar un umbral de peligro en inundación, se necesita conocer un límite de lluvia o nivel de río, por lo general las comunidades de estudio conoce cuando sucederán estos acontecimientos y cuáles son esos límites. Existe dos formas para establecer los límites de inundación utilizando esta metodología, primero con registro de inundaciones, mediante los niveles del río registrados, se puede establecer un nivel mínimo para el desborde del río y uno máximo; la segunda forma para establecer los límites de inundación es mediante cálculos hidrológicos, los cuales nos permiten establecer caudales de

peligro que se puede presentar en un determinado tiempo, a esto se le conoce como periodo de retorno (OEA, 2010, p. 59-60).

### 3.1.5 Sistemas de Alerta Temprana

Primeramente, se tiene el concepto de Sistema de Alerta Temprana (SAT) el cual tiene su origen en 1960, cuando la Organización de las Naciones Unidas comenzó a tomar medidas para intentar reducir los daños tanto económicos como en vidas humanas ante posibles desastres ocasionados por diversos fenómenos naturales, sin embargo, hasta 1970 fue mediante la resolución 2717 de la ONU que se planteó formalmente la creación de sistema de alerta temprana para prevenir dichos desastres (Domínguez y Lozano, 2014, p.321.).

En cuanto a su funcionamiento, estos sistemas básicamente trabajan en la recopilación de información sobre posibles desastres, de cualquier índole, para poder anticipar y mitigar los posibles impactos que estos desastres acarren consigo; mediante el análisis y divulgación de la información recolectada. Por lo cual se puede resumir en un conjunto de herramientas, mecanismo de control y capacidad para administrar tecnología que poseen ciertos organismos capacitados para difundir la información a las comunidades que se encuentran en riesgo (Carballo y Carazo, 2012, p.15; Domínguez y Lozano, 2014, p.322.).

### 3.1.6 Modelación hidrológica

En lo que respecta a la modelación hidrológica, Cuadros (2020, p.28) menciona que los modelos hidrológicos son una representación simplificada (prototipo) de un sistema real complejo en forma física o matemática. Este sistema es generalmente es representado como cuenca hidrográfica con cada uno de los componentes del ciclo hidrológico.

La modelación hidrológica, es implementada principalmente para el análisis y prevención de eventos hidrometeorológicos extremos como lo pueden ser las avenidas; por lo cual gracias a estos modelos es posible generar la información de cierto grado de confianza para la toma de decisiones previas al desarrollo del evento. Todo se puede lograr debido a que estos modelos trabajan bajo métodos de precipitación-escorrentía lo cual se traduce en la creación de hidrogramas generados por precipitación dentro del área de estudio (Estrada y Pacheco, 2012, p.95).

### 3.1.7 Hidrogramas

Los hidrogramas son gráficos que nos permite observar cómo los niveles de agua con respecto al tiempo. Para poder realizar hidrogramas se deben conocer ciertos términos como Hietograma, Tiempo de Concentración ( $T_c$ ), Tiempo de Retraso ( $T_I$ ), Gasto Pico ( $Q_p$ ), Tiempo Base ( $T_b$ ) y Tiempo Pico ( $T_p$ ) (Seu, 1996, p. 61).

1. Hietograma: Es un gráfico que representa la intensidad de lluvia contra el tiempo.
2. Tiempo de concentración: El tiempo que le lleva una gota de agua desde el punto más alto de una cuenca hasta el final de ella.
3. Tiempo de retraso: El tiempo desde el centro de la duración efectiva en exceso de la tormenta hasta el punto más alto del hidrograma.
4. Gasto pico: El gasto máximo que se observa en el hidrograma de escurrimiento.
5. Tiempo base: El tiempo que abarca desde que comienza hasta que termina el hidrograma de escurrimiento directo.
6. Tiempo pico: Es el tiempo desde que comienza el escurrimiento directo hasta que empieza el gasto al pico.

Según Villón (2015, p. 217-2019) existen cuatro tipos de hidrogramas.

- Hidrograma tipo 1: La intensidad de la lluvia es menor a la capacidad de infiltrar, por lo tanto, la infiltración total es menor a la deficiencia de la humedad en el suelo, esto indica que no habrá escurrimiento directo, tampoco recarga potencia en el acuífero.
- Hidrograma tipo 2: Al igual que el tipo 1, la capacidad de infiltrar es mayor a la intensidad de la lluvia, solo que en este caso la infiltración total es mayor a la humedad del suelo, por lo tanto, hay recarga en los acuíferos.
- Hidrograma tipo 3: En este caso la intensidad de lluvia es mayor a la capacidad de infiltrar, la capacidad de infiltración es menor que la deficiencia de la humedad del suelo, solo se obtiene escurrimiento directo y los acuíferos no son recargados.
- Hidrograma tipo 4: Igual que el tipo 3 la intensidad de lluvia es mayor a la capacidad de infiltrar, no obstante, la infiltración total es mayor que la deficiencia de humedad del suelo, por lo que, si se recarga el acuífero, además que se tendrá escurrimiento directo, este tipo de hidrograma se puede interpretar como una combinación del tipo 2 y 3.

### 3.1.8 Distribución de probabilidad.

Al utilizar datos sistematizados en la modelación hidrológica es necesario analizar la frecuencia de parámetros hidrológicos, para utilizar las funciones de probabilidad, la finalidad de utilizar las funciones es relacionar las magnitud y frecuencia que puede tener un evento hidrometeorológico extremo (Acosta y Sierra, 2013, p.3-4). Las distribuciones de probabilidad son funciones que muestran una representación de probabilidad de ocurrencia en una serie de datos hidrológicos, existe muchos tipos de funciones de distribución, sin embargo, se seleccionaron los utilizados por el software Hydrognomon son los siguientes.

Cuadro 5. *Distribuciones de probabilidad.*

Tipos de distribución de Hydrognomon
➤ Normal
➤ LogNormal
➤ Galton
➤ Exponencial
➤ Gamma
➤ Pearson tipo III
➤ LogPearson tipo III
➤ Gumbel máximo
➤ Valor Extremo tipo 2 (EVII)
➤ Gumbel mínimo
➤ Weibul
➤ Distribución de valor extremo generalizada (GEV)
➤ Pareto

Fuente: Elaboración propia a partir de Kozani y Markonis (2009).

Seguidamente se comprueba si los datos utilizados se ajustan a la función probabilística que se utilizó, para ello se realiza la prueba de bondad de ajuste. Para el actual estudio se utilizará la prueba de Smirnov-Kolmogorov, ya que estamos trabajando con precipitaciones máximas anuales (Acosta y Sierra, 2013, p.3-4).

### 3.1.9 Caudales máximos.

Los caudales máximos son fundamentales para realizar un diseño ya sean hidrológicos como hidráulicos, a partir de estos se puede estimar cuándo ocurrirá un determinado evento

en un tiempo estimado, a esto se le llama periodo de retorno (Villón, 2015, p. 261-262). Existen varias fórmulas para estimar los caudales máximos, sin embargo, las que se utilizan frecuentemente en la literatura científica son las de Creager, Témez, VerniKing, para evaluar crecidas en diferentes periodos de retorno, no obstante, el de mayor uso en la actual es el método racional (Sandoval y Aguilera, 2014, p. 2).

La ecuación de Creager se expresa con la siguiente ecuación:

$$Q = 1.30 \times C_c \times \left(\frac{A}{2.59}\right)^{0.936 \times A^{-0.048}}$$

[Ecuación 1].

Donde:

$Q =$  Caudal máximo en  $m^3/s$

$C_c =$  coeficiente mundial

$A =$  Área de la cuenca en  $Km^2$

Creager estableció un coeficiente mundial  $C_c$  el cual posee un valor de 200 (Zucarelli y Hammerly, 2013, p. 188).

La ecuación de Teméz se expresa con la siguiente ecuación:

$$Q = 0.03 \times F_s \times P_{24} \times A^{0.75} \times \log(T)$$

[Ecuación 2].

Donde:

$Q =$  Caudal máximo en  $m^3/s$

$F_s =$  Factor de reducción por simultaneidad de lluvia

$P_{24} =$  Precipitación máxima diaria en  $mm$

$A =$  Área de la cuenca en  $Km^2$

$T =$  Período de retorno en años

La ecuación modificada de Verni-King se expresa con la siguiente ecuación:

$$Q = C(T) \times 0.00618 \times P_{24}^{1.24} \times A^{0.88}$$

[Ecuación 3].

Donde:

$Q =$  Caudal máximo en  $m^3/s$

$C(T) =$  Coeficiente de escorrentía que depende de la zona y el período de retorno

$P_{24} =$  Precipitación máxima diaria en  $mm$

$A =$  Área de la cuenca en  $Km^2$

$T =$  Período de retorno en años

La ecuación para determinar el caudal máximo utilizando el método racional es la siguiente:

$$Q = K \times C \times I \times A$$

[Ecuación 4].

Donde:

$Q = \text{Caudal máximo en } m^3/s$

$A = \text{Área de la cuenca en } Km^2$

$I = \text{Intensidad de la tormenta en } mm/h$

$K = \text{Constante que depende de la intensidad}$

La utilización de estas fórmulas para estimar caudales máximos son un aporte útil en casos donde no se poseen datos de caudales registrados, sin embargo, no se puede aplicar a cualquier tipo de cuenca, las ecuaciones Témez y Verni-King y el método racional son adaptadas para cuencas pequeñas menos a 45 km<sup>2</sup> (Sandoval y Aguilera, 2014, p. 9).

#### 3.1.10 Hydrognomon.

El programa Hydrognomon es un sistema de procesamiento de series de tiempos, la cual se ejecuta en entornos de Microsoft Windows 2000 o superiores, fue desarrollada en NTU con el objetivo de satisfacer las necesidades de investigación, este sistema realiza procesos sencillos para obtener datos en hidrología (Kozani y Markonis, 2009, p. 4-5):

- ✓ Conversión de series de tiempo en un intervalo de tiempo fijo.
- ✓ Exportación de series de tiempo más largo tiempo de paso.
- ✓ Controles de consistencia típicos como atípicos y puntualidad.
- ✓ Regresión lineal entre las series de tiempo, regresión múltiple, correlación orgánica y autocorrelación.
- ✓ Balance de agua: precipitaciones gruesas – modelo de escorrentía.
- ✓ Cumplimiento de valores perdidos utilizando regresión lineal se puede importar términos aleatorios mantener las características estadísticas.
- ✓ Curvas de nivel: Capacidad para el uso de métodos estadísticos y curvas de expansión mediante ecuaciones hidráulicas.
- ✓ Exportación de series de tiempo y nivel de series de tiempo en los embalses superficiales y volumen de la serie de tiempo de nivel y lagos.
- ✓ Cálculo de evaporación y evapotranspiración potencial con los métodos analíticos o semi-empíricos.
- ✓ Ampliación de la evaporación de muestras.
- ✓ Búsqueda de características estadísticas de las series de tiempo de muestreo, ajuste de parámetros estadísticos, pronóstico estadísticos, análisis estadísticos y búsqueda de intervalos de confianza.
- ✓ Análisis de series temporales de precipitación excepcional – curvas de lluvia dibujo con metodologías consistentes.

#### 3.1.11 Hec-HMS

Según el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (US Army Corps of Engineers, 2021), el motor con el que se basa el programa HEC-HMS con lleva más de 30 años de experiencia con simulaciones hidrológicas, los algoritmos del programa con el pasar de los años se ha modernizado con cada versión que sale. El software permite realizar diferentes tipos de simulaciones hidrológicas, mediante datos meteorológicos, de

cuenca y especificaciones de control, el programa detalla los resultados con gráficos, tablas de resumen, tablas de series de tiempo y son representados en el mapa de la cuenca.

El programa permite obtener hidrogramas de una cuenca en estudio facilitando obtener los datos físicos que puede tener la cuenca, con estos datos se puede estimar los hidrogramas de salida como caudales máximos y tiempos pico en el caso de eventos extremos de tormenta, además realiza los cálculos de pérdidas por infiltración, el flujo base y la conversión de escorrentía directa mediante los métodos de cálculo de hidrogramas de diseño (Duque, Patiño y López, 2019, p. 2-3).

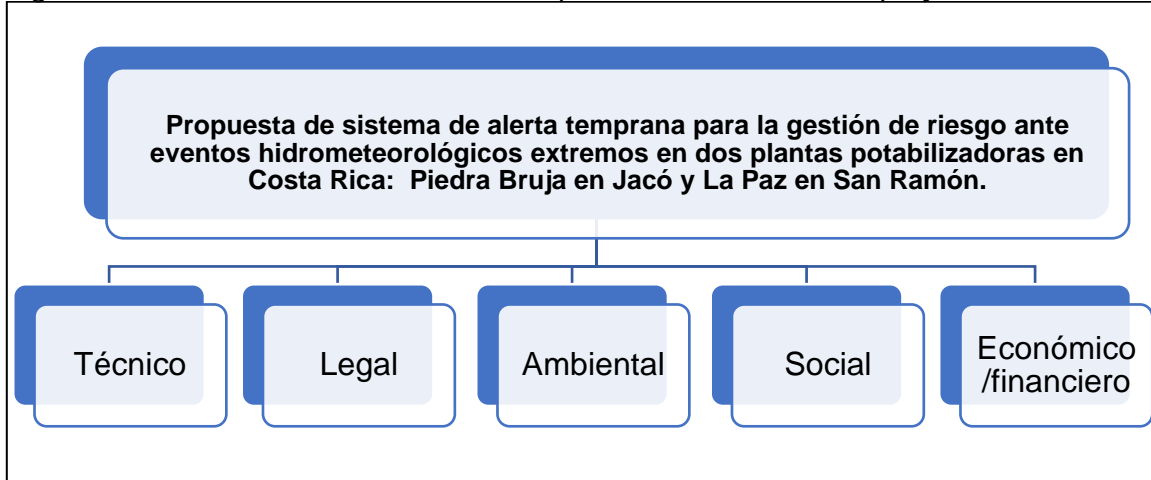
El HEC-HMS es uno de los tantos programas que existen para el modelaje hidrológico. Este es un programa desarrollado por la armada de los Estados Unidos, el cual permite realizar simulaciones de lluvia-escorrentía, utilizando distintos modelos conceptuales de la cuenca en estudio (Sacachipana, 2019). Este programa tiene la función de establecer los hidrogramas de una tormenta, con estos se podrá obtener la precipitación efectiva para un caudal cuando ocurra una tormenta (Villón, 2015).

En conclusión, en el presente capítulo de marco teórico se profundizó en conceptos clave para entender el desarrollo de nuestro proyecto, se mostró la importancia de la gestión del riesgo para realizar un Sistema de Alerta Temprana, además se mostrarnos los componentes técnicos de mayor relevancia para la construcción de umbrales de precipitaciones en los sistemas de monitoreo.

## Capítulo 4. Estudios de prefactibilidad

En cuanto al contenido de este capítulo, se tiene que hará muestra de cinco tipos de estudios orientados en diferentes ámbitos como el técnico, legal, ambiental, social y económico/financiero. Todo esto con la finalidad de realizar un diagnóstico en torno a estos ámbitos y la naturaleza del proyecto y verificar la viabilidad de este. Estudios se elaboraron con base en las metodologías expuestas por el autor Sapag et al. (2014).” (Ver figura 8).

Figura 8. Viabilidades seleccionadas para el contexto de este proyecto.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tal y como se aprecia en la figura 8, se tiene que los tipos de estudios de prefactibilidad seleccionados para el presente proyecto corresponden al técnico, legal, ambiental, social y económico/financiero. Estos fueron seleccionados debido a que son los más representativos a la naturaleza del presente proyecto.

### 4.1 Estudios de prefactibilidad

#### 4.1.1 Estudio técnico

En lo que respecta a este apartado Sapag et al. (2014) menciona que este tipo de estudio tiene como principal eje de acción la cuantificación los de los montos de inversión y costes de operación. Por lo cual, se deduce que como parte de este estudio se debe efectuar un inventario correspondiente en cuanto a las tecnologías que ocupa el proyecto como así mismos materiales, herramientas, operadores y otros aspectos de vital relevancia para el correcto funcionamiento del proyecto.

A continuación, se hace muestra de las tecnologías requeridas para poder elaborar el presente proyecto (Cuadro 6).

Cuadro 6. Herramientas tecnológicas requeridas para la elaboración del proyecto.

Equipo necesario	Cantidad	Costo Unitario	Costo total
Computadora	2	₡ 497,990.00	₡ 995,980.00
GPS Garmin	2	₡ 138,067.74	₡ 276,135.48
<b>Total</b>			<b>₡ 1, 272, 115.48</b>

Fuente: Elaboración propia, 2022.

En cuanto a herramientas, se tiene que para el presente proyecto las principales herramientas requeridas serán de índole computacional/tecnológico más específicamente

programas Sistema de Información Geográfica (SIG) y programas para el procesamiento y análisis de datos; en el cuadro 7 se hace alusión de dichas herramientas.

*Cuadro 7. Componentes computacionales (programas) requeridos para la ejecución del proyecto.*

<b>Programa</b>	<b>Breve descripción</b>
QGIS 3.16.4	QGIS es un programa SIG de acceso libre, en el cual se puede manejar formatos ráster y vectoriales (base de datos) para la creación de mapas, modelos, aplicaciones y consultas de datos geoespaciales (QGIS, 2022).
Excel 2016	Es un programa integrado en el sistema operativo de Windows; este programa trabaja con hojas de cálculo las cuales permiten un trabajar los datos introducidos bajo diferentes representaciones como lo son la elaboración de gráficos principalmente (Excel, 2007).
Hidroesta 2	Programa que facilita el cálculo y análisis de la información hidrometeorológica, ya que esta, por lo general, suele estar conformada de amplios registros de datos que comprenden series de largos lapsos de tiempo (Villón, 2012).
Hydronogmon 4	Herramienta de procesamiento de datos hidrológicos de código libre. Esta permite la aplicación estadística mediante funciones de distribución y métodos de ajuste (Kozanis et al., 2010).
Hec-Hms 4.9	Programa de modelado hidrológico, elaborado para la simulación de procesos hidrológicos complejos presentes en cuencas hidrográficas dendríticas (Hydrologic Engineering Center, s. f.).

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Cabe resaltar que de los programas reflejados en el cuadro 7, en su mayoría todos son gratuitos a excepción de Excel 2016 e Hidroesta 2; sin embargo, se hace uso de las licencias de estudiante para su implementación.

Por otra parte, se tiene que, para el desarrollo del proyecto en cuestión, lo que concierne a materiales necesarios resaltan los datos climáticos, más específicamente los registros de precipitaciones máximas diarias o bien a mediciones en intervalos de cinco minutos de precipitación. Cabe resaltar, que estos datos se encuentran a total disposición para la ejecución del proyecto, ya que para cada caso de estudio el AyA (La Paz, San Ramón y Piedra Bruja, Jacó) se cuenta con estaciones automáticas encargadas de la toma y registro de estos datos. Además de los datos de climáticos de precipitación se va a requerir el uso de los siguientes materiales:

- Modelos de elevación digital.

En lo que concierne a los modelos de elevación digital, se tiene que estos consisten en una presentación gráfica y matemática de información relacionada principalmente a la altitud de un sitio y/o área de interés sobre el nivel del mar (m.s.n, m). Por lo cual, la inclusión de estos modelos de elevación digital en el presente proyecto permite una mejor apreciación en cuanto a la topografía de las zonas de estudio (Peñafiel, 2021).

- Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT).

Este consiste en un portal web el cual posee datos geográficos oficiales para Costa Rica creada en el año 2013, esta es compuesta por una serie de políticas, organizaciones,

estándares y tecnologías que de manera conjunta trabajan para producir, compartir y utilizar la información geográfica referente a planificación y el ordenamiento territorial (Orozco y Cedeño, 2018). De dicho portal se extrae información requerida para la elaboración del presente proyecto como lo son principalmente formatos de representación vectorial (Shapefile) los cuales contienen información de elementos geográficos como lo son uso de suelos, zonas de vida, precipitaciones, entre otros.

- Curvas de nivel.

Las curvas de nivel son un componente de gran valor para el reconocimiento del terreno, son consideradas la fuente de elevación más abordable ya que son globalmente disponibles (Casado et al, 2012), el principal medio para descargar curvas de nivel en Costa Rica son los servicios OGC que ofrece el Sistema Nacional de Información Territorial, el cual cuenta con curvas desde 2 metros a una escala de 1:1000, hasta curvas de escala 1: 200,000 (SNIT, 2022).

Por ende, partiendo que dentro del contexto del proyecto todos los insumos de índole técnico requeridos para la ejecución y puesta en operación del presente proyecto se encuentra a disposición, se llega a la conclusión de que el presente proyecto cuenta con viabilidad técnica.

De los anteriores insumos técnicos mostrados, se llega a la conclusión de que el presente proyecto cuenta con viabilidad técnica. Esto se determinó a razón que todos estos materiales se encuentran a disposición para los autores de este proyecto.

#### 4.1.2 Estudio legal

Como parte integral de la puesta en marcha del presente proyecto, se debe contemplar el cuerpo normativo que va a regir sobre las acciones de este, por lo cual se realizó una revisión y recopilación de diferentes marcos legales del ordenamiento jurídico de Costa Rica asociados al ámbito de los Sistemas de Alerta Temprana y la gestión del riesgo ante eventos hidrometeorológicos extremos. Lo anterior se realizó con el propósito de verificar que el presente proyecto sea viable en términos legales. A continuación, en el cuadro 8 se ve reflejado los diferentes artículos encontrados en relación con este proyecto.

Cuadro 8. Marco regulatorio asociado a la finalidad del proyecto.

Marco legal	Transcripción de los artículos de la ley
Constitución Política	<p><b>Art 50:</b> Este habla acerca del derecho que tiene todo ser humano a un ambiente sano y ecológicamente equilibrado. Este artículo se asocia al objetivo general del proyecto de determinar umbrales alerta en los cuales la amenaza (evento hidrometeorológico) se convierta en un riesgo, desempeñándose como un mecanismo de adaptabilidad a las condiciones del entorno.</p>
Ley Orgánica del ambiente N°7574	<p><b>Art 2: <u>Inciso c)</u>:</b> "El Estado velará por la utilización racional de los elementos ambientales, con el fin de proteger y mejorar la calidad de vida de los habitantes del territorio nacional. Asimismo, está obligado a propiciar un desarrollo económico y ambientalmente sostenible, entendido como el desarrollo que satisface las necesidades humanas básicas, sin comprometer las opciones de las generaciones futuras". Esto, de igual manera que el Art.50 de la Constitución Política de Costa Rica, se asocia con la naturaleza del proyecto bajo el mismo objetivo general procurar un entorno equilibrado socio-ambientalmente.</p>
Ley Nacional de Emergencias y prevención del riesgo N°8488	<p><b>Art 5: Política de gestión de riesgo):</b> "La política de gestión del riesgo constituye un eje transversal de la labor del Estado Costarricense; articula los instrumentos, los programas y los recursos públicos en acciones ordinarias y extraordinarias, institucionales y sectoriales, orientadas a evitar la ocurrencia de los desastres y la atención de las emergencias en todas sus fases. Toda política de desarrollo del país debe incorporar tanto los elementos necesarios para un diagnóstico adecuado del riesgo y de la susceptibilidad al impacto de los desastres, así como los ejes de gestión que permitan su control".</p> <p><b>Art 14: Competencias ordinarias de prevención de la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias <u>Inciso c)</u>:</b> "Articular y coordinar la política nacional referente a la prevención de los riesgos y a los preparativos para atender las situaciones de emergencia. Asimismo, deberá promover, organizar, dirigir y coordinar, según corresponda, las asignaciones requeridas para la articular el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo y de sus componentes e instrumentos. Esta gestión la realizará en consulta permanente con los órganos y entes integrados al proceso."</p>

Marco Legal	Transcripción de los artículos de la ley
Política de agua potable de Costa Rica, 2017-2030	<p><b>Cap. II:</b> Situación actual del recurso hídrico en Costa Rica <u>Inciso 2.6):</u> <i>Gestión del riesgo y su impacto en el sistema de servicio de agua potable.</i> Este apartado habla de las condiciones climáticas de Costa Rica y como estas generan de manera periódica eventos meteorológicos que inciden en el régimen de precipitación como ciclones tropicales, fenómenos de baja presión en el mar Caribe, la Zona de Convergencia Intertropical, frentes fríos y los períodos de El Niño y La Niña. Y de cómo estos derivan en desastres como inundaciones, deslizamientos y sequías que sugieren una amenaza al servicio de suministro de agua potable para la población costarricense.</p>
Marco de Acción Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres, 2015-2030	<p><b>Prioridad 4:</b> Aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz y “reconstruir mejor” en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción.</p> <p><u>Punto 33. Inciso b):</u>  “Desarrollar, mantener y fortalecer sistemas de alerta temprana y de predicción de amenazas múltiples que sean multisectoriales y estén centrados en las personas, mecanismos de comunicación de emergencias y riesgos de desastres, tecnologías sociales y sistemas de telecomunicaciones para la supervisión de amenazas, e invertir en ellos; desarrollar esos sistemas mediante un proceso participativo; adaptarlos a las necesidades de los usuarios, teniendo en cuenta las particularidades sociales y culturales, en especial de género; promover el uso de equipo e instalaciones de alerta temprana sencillos y de bajo costo; y ampliar los canales de difusión de información de alerta temprana sobre desastres naturales”.</p>
Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS)	<p><b>ODS 3:</b> Salud y bienestar:</p> <p><u>Meta 3.13:</u>  “Reforzar la capacidad de todos los países, en particular los países en desarrollo, en materia de alerta temprana, reducción de riesgos y gestión de los riesgos para la salud nacional y mundial”.</p>

Marco Legal	Transcripción de los artículos de la ley
Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS)	<p><b>ODS 6:</b> Agua limpia y saneamiento:  <u>Meta 6.4:</u>  “De aquí a 2030, aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua”.</p>
	<p><b>ODS 11:</b> Ciudades y comunidades sostenibles:  <u>Meta 11.8:</u>  “Apoyar los vínculos económicos, sociales y ambientales positivos entre las zonas urbanas, periurbanas y rurales fortaleciendo la planificación del desarrollo nacional y regional”.  <u>Meta 11.9:</u>  “De aquí a 2020, aumentar considerablemente el número de ciudades y asentamientos humanos que adoptan e implementan políticas y planes integrados para promover la inclusión, el uso eficiente de los recursos, la mitigación del cambio climático y la adaptación a él y la resiliencia ante los desastres, y desarrollar y poner en práctica, en consonancia con el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, la gestión integral de los riesgos de desastre a todos los niveles”.</p>
	<p><b>ODS 13:</b> Acción por el clima:  <u>Meta 13.1:</u>  “Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países”.  <u>Meta 13.3:</u>  “Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana”.</p>

Marco Legal	Transcripción de los artículos de la ley
Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS)	<p><b>ODS 15:</b> Vida de ecosistemas terrestres:  <u>Meta 15.3:</u>  “Para 2030, luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con una degradación neutra del suelo”.</p>
Política Centroamericana de Gestión Integral de Riesgo de Desastres	<p><u>Propósito:</u>  “Esta política tiene como objetivo principal el dar a conocer y actuar sobre la necesidad que se presenta en la región Centroamericana en materia referente a compromisos regionales orientados a reducir y prevenir el riesgo de desastres considerando un desarrollo integral y seguro”.</p>

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Expuestos los diferentes contextos legales en torno a la temática del proyecto es estudio (cuadro 8), se llega a la conclusión que no existe ningún tipo de restricción que no permita la ejecución de dicho proyecto; al contrario, tal y como se aprecia en el cuadro 8 se recopiló un conjunto de artículos, políticas, objetivos, metas, entre otros los cuales incentivan y la incorporación de este tipo de sistemas de alerta temprana para mejorar en el ámbito de la gestión del riesgo. Dado esto se llega a la conclusión que el presente proyecto cuenta con viabilidad legal para la puesta en marcha de los Sistemas de Alerta Temprana ante eventos hidrometeorológicos extremos en las plantas potabilizadoras Piedra Bruja en Jacó, Puntarenas; y La Paz en San Ramón, Alajuela; Costa Rica.

#### 4.1.3 Estudio ambiental

El estudio ambiental según Sapag et al. (2014) consiste en un abordaje y análisis sobre las diferentes etapas del proyecto que son el antes, durante (operación) y final del proyecto (fuera de operación), y de los diferentes impactos, alteraciones y consecuencias que este vaya a generar en el entorno.

Para determinar grado de afectación ambiental en Costa Rica existe el “*Reglamento General Sobre Los Procedimientos de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) No 31849-MINAE-S-MOPTMAG-MEIC.*” Dentro de este reglamento se brinda diferentes metodologías y normativas las cuales permiten cuantificar el grado de afectación que traerá consigo el proyecto a llevar a cabo.

Ahora en lo que respecta al presente proyecto, se tiene que, en cuanto al desarrollo y funcionamiento de los SAT, se clasifica como un proyecto de bajo impacto ambiental basado en la definición estipulada en el artículo 3 inciso 4 de *Reglamento General Sobre Los Procedimientos de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) No 31849-MINAE-S-MOPTMAG-MEIC.*”:

Se refiere a las actividades humanas que, por su naturaleza no provocan alteración negativa del ambiente y que no representan una desmejora de la calidad ambiental del entorno en general o de alguno de sus componentes, ni afectación a la salud de la población, debido a que las emisiones atmosféricas, vertidos de aguas residuales, manejo de residuos ordinarios y especiales y ruido se ajustan a las disposiciones establecidas en la regulación vigente. Además, no se utilizan productos peligrosos y no generan residuos de este tipo (SETENA, 2017).

Por lo cual, se llega a la deducción que el presente proyecto al no provocar una alteración negativa al ambiente, al contrario, se torna en una herramienta de mejora socioambiental ya que permite un mejor entendimiento del entorno asociado a las localidades de los casos en estudio presente. Se llega a la conclusión que el proyecto cuenta con factibilidad ambiental para su puesta en marcha.

#### 4.1.4 Estudio social

En lo que respecta al componente social dentro del marco de este proyecto, se tiene definido dos aspectos los cuales respaldan la puesta en marcha de los SAT para los casos de estudio.

El primer y principal aspecto que respalda la ejecución del presente proyecto dentro del contexto social es el resguardar la integridad de los operadores de las plantas potabilizadoras. Esto se dice a razón que los operadores de estas plantas potabilizadoras de los presentes casos de estudio, como parte de sus funciones, deben desplazarse todos los días a monitorear y brindar el mantenimiento requerido tanto a la planta como a la toma de agua situada en los cuerpos de agua (ver figura 9).

Lo anterior sugiere un alto grado de vulnerabilidad para los operadores, ya que al tener que realizar esta tarea todos los días, no los exenta de visitar las plantas los días lluviosos. El operador de la planta de La Paz, San Ramón; Carlos Manuel Arias Arias, indicó en la gira de campo efectuada por parte de los autores del estudio el 25 de mayo del 2022, que cuando la intensidad de la lluvia incrementa, él tiene la obligación de ir a “sacar de operación” la planta cerrando llaves de paso y válvulas del sistema para que la crecida no vaya a ocasionar daños en el sistema de la planta potabilizadora (Arias, 2022, per. com; 25 mayo).

*Figura 9. Operador de la planta potabilizadora de La Paz, San Ramón brindando mantenimiento a la toma de agua.*



Fuente: Fotografía propia, 2022.

El segundo aspecto detectado en la gira efectuada el 25 de mayo del 2022, se encuentra ligado a la prestación del servicio de agua potable en las zonas sujeto de estudio. Este aspecto afecta a la sociedad debido a que al momento de presentarse eventos hidrometeorológicos extremos, estos acarrear consigo sedimentos, rocas, árboles y demás elementos que ocasionan la obstrucción de las tomas de agua situados en el cauce de los ríos (figura 9). Este panorama significaría una pausa, que, según la magnitud del evento, pueda ocasionar una interrupción en el suministro de agua por periodos prolongados. Es por esta razón que el implementar Sistemas de Alerta Temprana ante eventos hidrometeorológicos extremos, brindaría un tiempo de respuesta el cual permita almacenar agua en los tanques de almacenamiento para así abastecer a las comunidades de las zonas de estudio en lo que se remueven los residuos que obstruyen la toma y entra nuevamente en operación.

Bajo estos argumentos, en esta misma gira efectuada el 25 de mayo del 2022, se les consultó primeramente a los operadores de ambas plantas (La Paz, San Ramón y Piedra Bruja, Jacó) a cerca de su perspectiva y opinión sobre el proyecto a elaborar; resultando en un visto bueno dado los panoramas a lo que ellos se exponen y a vivencias tenidas en ambas localidades.

Por otra parte, se tuvo un acercamiento con el ingeniero Bernald Sancho, quien trabaja en el AyA y forma parte de la Municipalidad de Jacó. Este manifestó su interés en el presente proyecto dado a eventos pasados en la zona de estudio, a los cuales se le ha buscado soluciones y mecanismo que alerten a tanto a los operadores de las plantas (que son los más expuestos al riesgo) y los asentamientos cercanos a la planta (Ver figura 10) cuando la amenaza se materializa.

Figura 10. Casas de habitación a cercanías de la planta potabilizadora expuestas a riesgos ante eventos hidrometeorológicos extremos, Piedra Bruja de Jacó, Puntarenas.



Fuente: Fotografía propia, 2022.

Tal y como se aprecia en la figura 10, se localizan casas de habitación cercanas a la planta potabilizadora de Piedra Bruja, Jacó. Estos poseen un alto grado de exposición ante los eventos hidrometeorológicos extremos dado su cercanía al cauce del río Copey.

El grado de exposición de que poseen casas reflejadas en la figura 10, fue determinado bajo lo expuesto por el operador de la planta Randall Sanz en la gira realizada del 25 de mayo del 2022. Donde comenta que los días 23 y 24 de agosto del 2021 que los personeros que laboraban en la planta estos días ayudaron a estas personas a evacuar a raíz que el desborde del río ya estaba en ingresando en estas casas de habitación (Sanz 2022, per.com; 25 mayo).

#### 4.1.5 Estudio económico-financiero

En lo que respecta a este apartado Sapag et al. (2014) y Ruíz (2017) coinciden que es una de las partes fundamentales en lo que consiste a estudios previos a la puesta en marcha determinado proyecto. Debido a que en esta etapa se procede a ordenar y sistematizar la información de índole monetario, derivada principalmente de lo estipulado en la parte técnica, ya que de aquí surgen los principales insumos para la ejecución y operación del proyecto en estudio y así determinar la rentabilidad de este.

A continuación, se hace muestra de los costes requeridos a invertir para la ejecución, operación y mantenimiento de este proyecto.

Cuadro 9. Presupuesto global del proyecto.

Costes directos					
Rubro	Precio Unitario	Cantidad	Unidad	Precio total	Observaciones
Datos climáticos	₡-	4	Diarios	₡-	Estos son propiedad del AyA, por lo cual no es un coste
Equipo	₡1 272 115.48	1	---	₡1 272 115.48	Este se puede apreciar con mayor detalle en el cuadro 6
<b>Subtotal</b>					<b>₡1 272 115.48</b>
Costes indirectos					
Rubro	Precio Unitario	Cantidad	Unidad	Precio total	Observaciones
Giras de campo	₡347 550.00	1	---	₡347 550.00	Este se puede apreciar con mayor detalle en el Anexo 2
Servicios profesionales	₡580 708.20	4	Mensuales	₡4 645 665.60	Honorarios de ingenieros (se contempla dos ingenieros que trabajan cuatro meses cada uno)
Servicio de Internet (con Telecable)	₡6 208.00	4	Mensuales	₡49 664.00	Se contempla cuatro meses de trabajo para dos ingenieros
Servicio de Electricidad (Coopetegua nacste)	₡22.92	160	kWh	₡7 334.40	Se contempla cuatro meses de trabajo para dos ingenieros trabajando 8 horas 5 días a la semana
<b>Subtotal</b>					<b>₡5 050 214.00</b>
Otros					
Rubro	Precio Unitario	Cantidad	Unidad	Precio total	Observaciones
Imprevistos	10%	1	Del total de C.D+C.I	₡632 232.95	Se contempla 5% para cada uno de los dos ingenieros

Otros					
Rubro	Precio Unitario	Cantidad	Unidad	Precio total	Observaciones
IVA	13%	1	Global	₪821 902.83	Contempla el coste para cada uno de los dos proyectos
				<b>Subtotal</b>	<b>₪1 454 135.78</b>
				<b>Total</b>	<b>₪7 776 465.26</b>

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Posterior a la exposición del panorama referente al estudio financiero, se tiene que, como principales resultados del estudio económico, la ejecución de este proyecto corresponde a una inversión de bien social principalmente. Lo anterior se dice debido a que los resultados del producto servirán para resguardar la vida de los operadores de las plantas potabilizadoras y así mismo elaborar mecanismos de respuestas para garantizar la regularidad en el servicio de agua potable en las comunidades sujeto de estudio ante amenazas de índole hidrometeorológico. Sin embargo, cabe resaltar que también se presentan costes ahorrados; estos se reflejan al momento en el que el SAT comience a operar ante una amenaza hidrometeorológica, ya que alertará a los funcionarios de la planta sobre posibles crecidas en el río, lo cual deriva en un mayor ingreso de sedimentos a la planta potabilizadora los cuales puedan dañar su operación; por ende, el actuar de manera anticipada significara un ahorro en cuanto a gastos para la reparación de la planta potabilizadora.

Por ende, a partir de los costes reflejados en el estudio de viabilidad económico-financiera y que estos al ser asumidos en su totalidad por la institución asociada (AyA) y los sustentantes; además de presentar beneficios sociales y administrativos, se llega a la conclusión que el proyecto cuenta con factibilidad financiera.

Para finalizar, se tiene que partiendo de que cada uno de los estudios evaluados para el presente proyecto se obtuvo como resultado que todos cuentan con viabilidad, por ende, se puede decir que se cuenta con aprobación para la ejecución del presente proyecto.

## Capítulo 5. Metodología

A continuación, se tiene la introducción al capítulo cinco llamados “*metodología*” el cual hace especial énfasis en lo que consiste a los aspectos metodológicos requeridos para el presente proyecto. Entre los aspectos a desarrollar se tiene el tipo de investigación, las herramientas a utilizar como así mismo los métodos.

### 5.1 Descripción del tipo de investigación

En lo que respecta al tipo de investigación, se tiene que debido a la naturaleza del presente proyecto el tipo de investigación a realizar es del tipo aplicada. Se determinó que es aplicada ya que calza con la definición dada por Rivero (2008, p.20) donde establece que la investigación aplicada consiste en el estudio y aplicación de la investigación a problemas concretos, en circunstancias y características concretas; con la finalidad de confrontarlos elaborando mecanismos y soluciones ante la problemática. Lo anterior se asocia al proyecto ya que a partir de los eventos hidrometeorológicos extremos se busca determinar bajo que características estos se convierten en un riesgo para las zonas sujeto de estudio.

Así mismo, se puede mencionar que también es de índole experimental, ya que se busca determinar umbrales de alerta en los cuales la precipitación sugiera una amenaza de crecida en los ríos situados en las zonas sujeto de estudio; y para ello es requerido la modelación hidrológica para analizar los diferentes comportamientos de los caudales en función de diferentes eventos de precipitación.

Por otra parte, se tiene que la presente investigación conlleva un enfoque de tipo mixto, ya que se requiere el uso de variables cuantitativas y cualitativas.

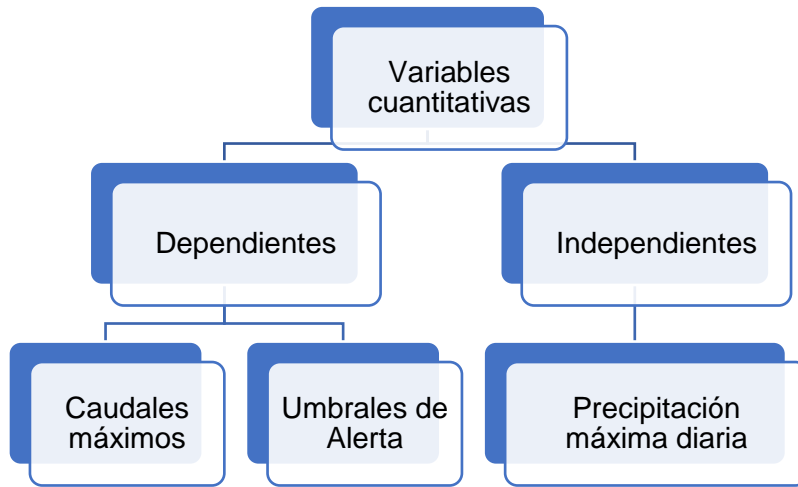
#### 5.1.1 Variables cualitativas

En lo que respecta a las variables cualitativas, se tiene que estas consisten en la representación categórica de un determinado fenómeno (Sánchez y Murillo, 2021). Así mismo, Monge (2011) destaca que este tipo de variable es asociada al factor social, ya que brinda al investigador una idea del fenómeno en estudio a partir de la percepción los sujetos que conviven o han experimentado el fenómeno en estudio. A partir de las definiciones anteriores, se deduce que el presente proyecto contempla este tipo de variables en el aspecto social, el cual fue desarrollado a mayor profundidad en el Capítulo 2 de contexto y la sección 4.1.4 del estudio social; sin embargo, de manera breve se puede mencionar que este tipo de variables serán adquiridas a partir de las entrevistas realizadas a los operadores de las plantas potabilizadoras de las zonas sujeto de estudio.

#### 5.1.2 Variables cuantitativas

Las variables cuantitativas son aquellas que pueden medirse de manera numérica (Rivero, 2008). Bajo la anterior definición se tiene que en lo que respecta al presente proyecto, este tipo de variables están representadas en el insumo principal para poder efectuar este proyecto, dicho insumo son los datos de precipitación cada cinco minutos. Además de otros factores de vital importancia como lo son las características morfométricas relacionadas a cada una de las microcuencas en estudio. Dentro de este tipo de variables, Cauas (2015) menciona que estas variables cuantitativas pueden clasificarse según su causalidad en dependiente e independientes; donde para el caso del presente proyecto se tienen las reflejadas en la figura 11.

Figura 11. Tipos de variables cuantitativas requeridas para la elaboración de los SAT en las zonas sujeto de estudio.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

## 5.2 Fuentes y técnicas para la recopilación de datos.

Para el estudio se optó una revisión de documentos los cuales nos permitan evaluar el riesgo antes posibles inundaciones en las cuencas de estudio e información sobre como alertar los funcionarios de las plantas potabilizadoras y a la población cercana, para ello es necesario la obtención de datos meteorológicos, software que nos permiten modelar los acontecimientos y equipos necesarios para delimitar las áreas de estudio.

### Etapas del proyecto.

La primera etapa del proyecto inicia con la recopilación de datos de precipitaciones de las estaciones meteorológicas ubicadas en las cuencas de estudio, estos datos son suministrados por el ente encargado del proyecto el cual es el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, la información de precipitaciones de las estaciones automáticas son medidas en intervalos de tiempo de cada 5 minutos al día, durante 7 años para la estación de la Piedra Bruja en Jacó y de 9 años para la estación de La Paz en San Ramón.

En la segunda etapa, se delimita las cuencas de estudio, para este paso el AyA nos brindó la delimitación de las zonas de estudio en formato shape para ser utilizada en los softwares pertinentes (QGIS principalmente), además se hizo reconocimiento presencial el día 25 mayo del 2022, se tomaron las ubicaciones de las tomas de agua, estaciones meteorológicas y ubicación de las plantas potabilizadoras

En la tercera etapa, se caracteriza la topografía del terreno, las características morfométricas son las que nos proporcionan los datos físicos de las cuencas hidrográficas, son parte fundamental en el estudio del ciclo hidrológico ya que este factor sumado a los datos meteorológicos da forma a la hidrografía de las cuencas (Senisterra et al., 2014).

En la cuarta etapa se calcularán los periodos de retorno a partir de los datos proporcionados por las estaciones meteorológicas, se utilizará programas de manejo de información hidrológica como lo son Hydrognomon o Excel, para determinar cuál es la distribución de mejor ajuste del estudio, luego se crearán las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) por medio de Excel con precipitaciones máximas de 24 horas.

Para la quinta etapa se calculará el hietograma de la tormenta para obtener los valores de precipitación máxima en un determinado periodo de tiempo mediante el método de bloque alterno.

En la sexta etapa se realizará la modelación en el programa HEC -HMS para obtener los hidrogramas del estudio, los hidrogramas nos permitirán medir los caudales máximos de las cuencas en estudio, además se compararán estos resultados con que se podría conseguir con los métodos racional, C de Creager y Témez.

Por último, con los datos obtenidos de precipitaciones y caudales máximos se podrán realizar los umbrales de precipitación y caudales en las cuencas de estudio.

### **5.3 Fases metodológicas**

En lo que respecta al desarrollo del presente proyecto, se tiene que este constará de seis de fases, las cuales se mencionarán en esta sección.

La primera fase consiste en la recolección de información referentes a las zonas sujeto de estudio; para ello se contempla reuniones virtuales con el ingeniero José Pablo Bonilla Valverde y la Lic. María José Aguilar Valverde. Para una mejor contextualización del proyecto a elaborar y de las zonas sujeto de estudio correspondientes a Piedra Bruja de Jacó, Puntarenas y La Paz de San Ramón, Alajuela.

Seguidamente, se realiza la fase dos la cual consiste en una recopilación bibliográfica referente a los Sistemas de Alerta Temprana; con el objetivo de lograr una mejor comprensión acerca de este tipo de herramientas y el estado de la cuestión referente a estos sistemas en Costa Rica.

A continuación, se procede a incursionar en la fase tres, en la cual se inicia la parte técnica del proyecto, la cual tiene como etapa inicial la delimitación de las áreas de estudio (ver Capítulo 2, secciones 2.1.1 y 2.1.2); además de la determinación de parámetros morfométricos para cada uno de los tramos de las microcuencas en estudio (ver cuadro 1 y 3). Así mismo, se tiene la identificación de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de las áreas de estudio para la obtención del insumo principal correspondiente a los registros de precipitación.

En la fase cuatro, se parte de la obtención de los registros de precipitación para su posterior análisis estadísticos correspondientes a la naturaleza del proyecto. Esto haciendo uso de diferentes softwares especializados en el ámbito de la hidrología estadística como lo son Hidroesta 2 e Hydrognomon 4. Además de otros como los mencionados en el cuadro 7 de la sección 4.4.1 del capítulo 4 correspondiente a los estudios de prefactibilidad.

Seguidamente, se tiene la fase cinco, esta consiste en el análisis hidrológico más específicamente a la modelación hidrológica. Para lograr esto se hace del software HEC-HMS en el cual se ingresan los datos ya tratados y analizados de los registros de precipitación obtenidos, esto con la finalidad de tener un mejor entendimiento de los comportamientos de las precipitaciones registradas en las zonas de estudio.

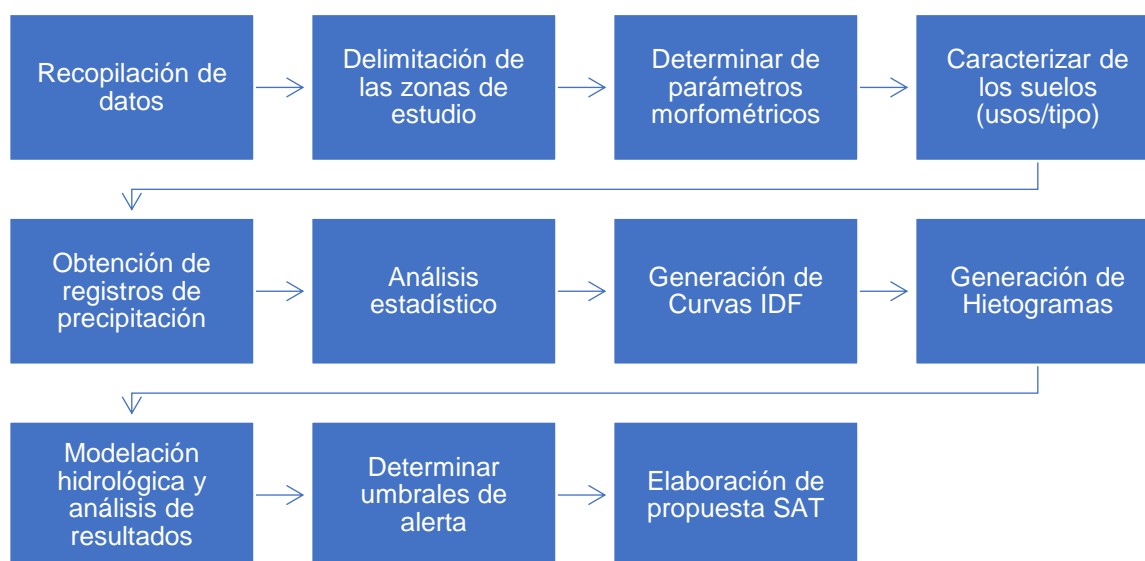
Por último, se tiene la fase seis en la cual se desarrolla el análisis de los eventos hidrometeorológicos a fondo, partiendo de los resultados obtenidos del software HEC-HMS. En esta fase lo que se espera es determinar los umbrales de alerta en los cuales ya la precipitación se torna en una posibilidad manifiesta de riesgo asociado a eventos hidrometeorológicos extremos como las crecidas/avenidas en los cuerpos de agua en los que se sitúan las tomas de agua de cada una de las zonas sujeto de estudio.

#### 5.4 Metodología seleccionada para el proyecto.

En lo que respecta a los métodos seleccionados para la elaboración del presente proyecto, se tiene que a gran escala este consiste en un estudio hidrológico; ya que el objetivo principal es el identificar umbrales alerta en los cuales la intensidad y duración de un evento de precipitación se torne en una amenaza manifiesta de un evento hidrometeorológico extremo como lo son las crecidas/avenidas en los cuerpos de agua en estudio.

Dado el objetivo principal del proyecto, se optó en desarrollar un modelo de precipitación-escorrentía, ya que este consiste en desarrollar simulaciones digitales por medio de programas especializados en hidrología, que utiliza procesos matemáticos para realizar estimaciones de caudales que se generan a partir de modelos en función de procesos físicos característicos que presentan las zonas de estudio, que por lo general son cuencas (Carvajal y Roldán, 2007). A partir de la anterior descripción se hace muestra del proceso metodológico a seguir para la elaboración del presente proyecto (ver figura 12).

Figura 12. Procedimiento metodológico por seguir para la elaboración del proyecto.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

A continuación, a partir del proceso metodológico reflejado en la figura 12, se procederá a detallar las etapas reflejadas en la presente figura 12:

##### 5.4.1 Recolección de datos

Primeramente, tal y como se mostró en la sección 5.2, la recolección de datos consta de dos principales requerimientos. El primero es referente a las zonas de estudio donde se requiere recopilar información referente a las zonas sujeto de estudio, para obtener una mejor perspectiva de los entornos en los cuales se desarrollarán los SAT ante eventos hidrometeorológicos extremos. Para esto se realizarán reuniones virtuales y giras de campo en conjunto con personeros del AyA.

El segundo requerimiento, consiste en primera instancia en la identificación de las estaciones meteorológicas dentro de las áreas sujetas de estudio, las cuales cuenten con registro de medición de precipitación en periodos de cada cinco minutos. Cabe resaltar que con esta información ya se cuenta, debido a que el AyA cuenta con estaciones dentro de las zonas de estudio.

**Cuadro 10. Estaciones por utilizar pertenecientes al AyA que se sitúan dentro a las áreas de estudio.**

Nombre de estación	Código	Coordenadas		Tipo de estación	Propiedad
		Metros Este (X)	Metros Norte (Y)		
La Paz	220103	438961.63	1124840.41	Meteorológica	AyA
La Paz II	220107	437370.98	1124860.60	Meteorológica	AyA
Río Barranca en la Paz	220303	447240.13	1118811.96	Hidrológica	AyA
Piedra Bruja	250103	434614.33	1068076.37	Meteorológica	AyA

Nota. Las coordenadas están en proyección CRTM05.

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Cabe destacar que, para la selección de las estaciones a utilizar se realizará un breve procedimiento con el software QGIS con la herramienta de “*Polígonos de Voronoi*” que es el equivalente a los polígonos de Thiessen, esto se realiza con la finalidad de determinar el área de influencia de las estaciones dentro y fuera del área en estudio (Villón, 2015).

#### 5.4.2 Caracterización de las áreas de estudio

Primeramente, se tiene que destacar que dado la naturaleza del proyecto a desarrollar las áreas en estudio corresponde tramos de cuencas hidrológicas (ver Capítulo 2 de contexto) por lo cual se requiere del uso de software especializados en Sistemas de Información Geográfica tal y es el caso de QGIS. Sin embargo, se debe resaltar que a partir de las reuniones efectuadas la Lic. María José Aguilar Valverde, quien es geógrafa y se desempeña en el AyA; facilitó la información vectorial correspondientes a las áreas de estudio las cuales se ven reflejadas en el capítulo 2 en las secciones 2.1.1 y 2.1.2 del presente documento.

Aclarado esto, se procedió a la determinación de los parámetros morfométricos para cada una de las áreas sujeto de estudio; dichos parámetros se encuentran reflejados en los cuadros 1 y 3. Para la obtención de estos se implementaron los siguientes métodos:

**Cuadro 11. Métodos para calcular cada uno de los parámetros morfométricos de las áreas en estudio.**

Parámetro	Método para obtenerlo
Área de la cuenca	Se estima a partir de las capas proporcionadas por el AyA, el programa QGIS 3.16 que calcula el área mediante comandos en SQL.
Perímetro de la cuenca	Se estima a partir de las capas proporcionadas por el AyA y el programa QGIS 3.17
Longitud del cauce	Se estima a partir de las capas de la Red Hídrica del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT).
Índice de compacidad (Gravelius, 1914; Horton, 1932; Jardí, 1985).	El índice de compacidad se determina mediante la siguiente fórmula establecida por Gravelius: $K = 0.28 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \text{ [Ecuación 5.]}$ P = Perímetro de la cuenca. A = Área de la cuenca.

Parámetro	Método para obtenerlo
Tiempo de retardo (Natural Resources Conservation Service, 2010)	El tiempo de retardo se estima a partir del tiempo de concentración mediante la siguiente fórmula: $t_r = 0.6 \times t_c$ [Ecuación 8.]
Densidad de drenaje (Villón, 2015)	Se estima a partir de la siguiente ecuación: $D_d = \frac{L}{A}$ [Ecuación 9.] $L$ = Longitud total de las corrientes en la cuenca en Km. $A$ = Área total de la cuenca Km <sup>2</sup> .
Pendiente media de la cuenca	Se calcula a partir de modelo de pendientes generado por el programa QGIS 3.16 y el modelo de elevación digital de la cuenca.
Altitud máxima	Se calcula a partir de las curvas de nivel generadas por el modelo de elevación digital y el programa QGIS 3.16.
Altitud mínima	Se calcula a partir de las curvas de nivel generadas por el modelo de elevación digital y el programa QGIS 3.16.
Altitud media	Se calcula mediante el promedio de altitudes de las curvas de nivel generadas por el modelo de elevación digital y el programa QGIS 3.16.
Número de Curva (CN)	Se obtiene a partir de las tablas del Soil Conservation Service (1972).

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Cuadro 12. Métodos para obtener los tiempos de concentración de las cuencas.

Tiempo de concentración	Método para obtenerlo.
(Kirpich, 1940)	Se estima a partir de la ecuación de Kirpich: $t_c = 0.0195 \times \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$ [Ecuación 6.] $L$ = Longitud del curso del agua más largo en metros. $H$ = Diferencia de nivel entre la altitud máxima y mínima en metros.
(Témez, 1991)	Se estima a partir de las ecuaciones de Témez: $t_c = 0.3 \times \left(\frac{L}{S^{0.25}}\right)^{0.76}$ [Ecuación 7.] $L$ = Longitud del curso del agua más largo en metros. $S$ = Pendiente media de la cuenca (m/m).

Fuente: Elaboración propia, 2022.

A partir de los datos morfométricos podemos calibrar los modelos hidrológicos correspondientes, se puede estimar parámetros como los caudales máximos, los periodos de retorno, estos datos nos permitirán a su vez obtener los umbrales de precipitación deseados.

#### 5.4.3 Análisis estadístico

Para saber si la información obtenida es confiable se realizan análisis estadísticos, los cuales nos permiten saber errores sistemáticos que se cometieron, ya sea por causas naturales o antrópicas, una vez identificados estos errores se procede a eliminarlos y lograr una obtener datos claros y concisos. Los análisis estadísticos nos permiten comprobar mediante la prueba de hipótesis si los valores medios de las muestras son estadísticamente

iguales o diferentes con probabilidades del 95%, para ello se calcula la media y la desviación estándar de las muestras (Villón, 2006).

Una utilidad que posee gran valor para la hidrología del análisis estadístico es la completación de datos faltante, se da muchas veces que los datos en una estación no se encuentran completos (huecos en los datos), por lo que se recurre a datos de estaciones cercanas para completar estos datos, mediante ecuaciones se pueden completar los datos faltantes (Villón, 2006), a continuación, se dirán el orden de las técnicas para obtener estas ecuaciones:

1. Regresión lineal.
2. Regresión lineal simple
3. Regresión con variables independientes.
4. Regresiones polinomiales.

#### 5.4.4 Generación de curvas IDF

Las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF), son la base climatológica para poder estimar caudales de diseño en diferentes obras hidráulicas, por medio de estas curvas se logra estimar las precipitaciones máximas que ocurren en una zona de estudio cuando ocurre un evento hidrometeorológico extremo, además permite medir la intensidad media de una lluvia en diferentes eventos de precipitación y para periodos de retornos en concreto (Cadavid, 2007, p. 3).

Las curvas IDF se obtienen a partir de la información que nos brinda las estaciones pluviográficas, de los datos adquiridos se construyen las curvas de frecuencia mediante registros de eventos extremos que hayan ocurrido en la zona, si no se tuviera información por medio de estaciones se puede optar por ajustar las curvas por métodos sintéticos obtenidos a partir de información regional (Cadavid, 2007, p. 3).

Comúnmente para calcular la intensidad promedio se calcula con la siguiente formula:

$$i = \frac{P}{T_d}$$

[Ecuación 10.]

Donde:

$P$  = Profundidad de la lluvia (mm).

$T_d$  = Duración (horas o minutos).

La frecuencia del evento va a depender del periodo de retorno en años, los cuales son el intervalo de tiempo promedio cuando las precipitaciones son iguales o mayores a la magnitud de diseño, las curvas IDF puede ser analizadas mediante el análisis de frecuencia y la distribución más utilizada para valores extremos son las de Tipo I o Gumbel (Chow, Maidment y Mays, 1994, p. 465-466).

#### Método de bloque alterno.

El método de bloque alterno es una manera simple de construir hietogramas mediante la utilización de curvas IDF, este hietograma nos permite conocer la profundidad de precipitación en mm que ocurre en un intervalo de tiempo sucesivo entre una duración total, seguidamente se selecciona el periodo de retorno de diseño y la profundidad se podrá obtener multiplicando la intensidad por la duración, se toman las diferencias entre los valores sucesivos de la altura de la lluvia, luego se encuentra la cantidad de precipitación

que se debe añadir por cada unidad de tiempo adicional, los incrementos se reordenan de forma secuencial de modo que la intensidad máxima suceda en el centro de la duración requerida, el resto de bloques o secuencias se ordenan de forma descendente alternativamente si se encuentra a la izquierda o derecha del bloque de mayor precipitación-duración (Chow, Maidment y Mays, 1994, p. 477-479).

#### 5.4.5 Cálculo de caudales máximos con hidrograma unitario

Según Sherman en 1932, un hidrograma unitario es la función de respuesta de pulso unitario para un sistema hidrológico lineal, se define como el hidrograma de escorrentía directa, debido a que mide el exceso de precipitaciones que se genera uniformemente en toda el área de drenaje, esto se da a una tasa constante a lo largo de un tiempo unitario (Sherman, 1932).

Para construir un hidrograma Unitario se necesitan los datos de precipitación y escorrentía, a partir de estos datos se construye un hidrograma de la tormenta analizada, para ello se siguen los siguientes pasos (Villón, 2015):

1. Obtener el volumen de escurrimiento directo a partir del hidrograma de la tormenta, esto se logra transformando el escurrimiento directo en volumen y acumularlo.
2. Cálculo de precipitación en exceso, dividiendo el volumen de escurrimiento directo entre el área de la cuenca.
3. Cálculo de las ordenadas del hidrograma unitario, para ello se divide las ordenadas del escurrimiento directo entre la altura de la precipitación en exceso
4. Cálculo de duración en exceso, se obtiene con el hidrograma de la tormenta y el índice de infiltración media.

La distribución de datos es una parte fundamental al momento de usar datos de precipitaciones, por lo cual hay que escoger la que mejor se ajuste al modelo hidrológico que se va a implementar (Acosta y Sierra, 2013, p.3-4), para ello se utilizará el programa Hydrognomon el cual calcula que tipo de distribución se ajusta mejor al modelo.

#### Número de curva

Este procedimiento resulta en una parte fundamental dentro del desarrollo para la obtención de los hidrogramas por medio del método mencionado anteriormente de hidrograma unitario por medio del software HEC-HMS. Este método de "Número de Curva" fue elaborado por el Soil Conservation Services de los Estados Unidos, con la finalidad de estimar la escorrentía generada por una tormenta en una zona previamente delimitada como lo puede ser una cuenca hidrográfica (Alba, 2020). Para la obtención del número de curva hay que tener presente que el método implica ciertos componentes a considerar como lo son el tipo de textura de suelo y la cobertura del suelo, a continuación, se detallará como se determinará cada uno de estos componentes para las áreas sujeto de estudio.

##### ➤ Tipo de suelo

Para lo que concierne a este componente, la literatura asociada a la determinación del método del número curva lo denomina grupo hidrológico; este componente/parámetro consiste meramente en un tipo de clasificación del suelo según su textura como del tipo A, B, C y D. De esta clasificación lo importante a considerar es que los suelos A son más permeables que los de tipo D y que dicha clasificación va asociada a los tipos de textura de suelo y sus respectivas características (Villón, 2015). Para la obtención de esta información se hará uso del software QGIS y de resultados derivados de Bogantes et al. (2002) denominado

*“Zonificación geotécnica general de Costa Rica considerando elementos edáficos y climático”.*

En este trabajo efectuado por Bogantes et al. (2002). Se obtiene los archivos vectoriales con información de los tipos de suelo para el territorio nacional; por lo cual se realizará un recorte de esta capa en superposición de las áreas en estudio para obtener los tipos de grupos hidrológicos presentes y así poder obtener el resultado ponderado según la extensión y el tipo de suelo.

➤ Uso de suelo

Para la obtención de este parámetro, se hará uso de imágenes satelitales en conjunto con el software QGIS y de su complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP). Esto se realizará con la finalidad de realizar una clasificación supervisada dentro de las áreas de estudio para identificar y categorizar los diferentes usos/coberturas de suelo presentes dentro de las áreas delimitadas (Figuras 4 y 7).

Cabe destacar que la metodología expuesta por Villón (2015) a cerca del método de número de curva, destaca tres categorías según la Condición de Humedad Antecedente (CHA) en los suelos de la zona de estudio. Que para el caso de este proyecto se hará uso de la categoría CHA II.

5.4.6 Determinación de los umbrales de alerta

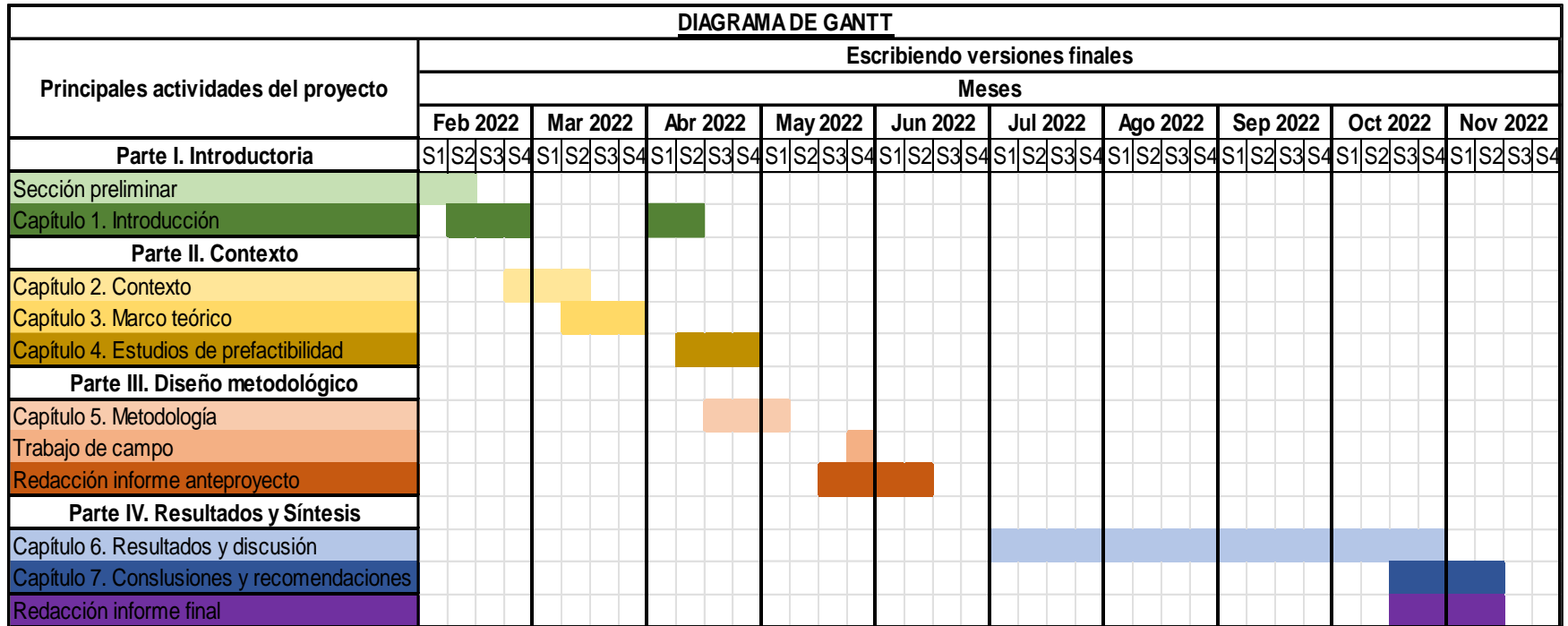
Para la determinación de los umbrales de alerta, se tiene que estos se seleccionaran en función de los tiempos de concentración obtenidos para cada una de áreas sujeto de estudio. Para ello se seleccionarán los eventos de precipitación que presenten una intensidad en un rango de duración aproximado al tiempo concentración. Y con base en esto estimar los diferentes tiempos de respuestas con los que cuenta el SAT para operar en los tres niveles de alerta (detallados en la sección 3.1.4) en función del comportamiento hidrometeorológico que presente el evento en estudio (Orozco 2022, per. com; 23 junio).

## 5.5 Cronograma y presupuesto

### 5.5.1 Diagrama de Gantt

A continuación, en el cuadro 12 se hará muestra del cronograma de actividades planteadas para el desarrollo del presente proyecto.

Cuadro 12. *Diagrama de Gantt para las diferentes actividades a desarrollar.*



Fuente: Elaboración propia, 2022.

### 5.5.2 Presupuesto

En lo que respecta al presupuesto, se tiene que este ya fue estimado, el valor corresponde a ₡ 7 776 465.26 aproximadamente. Dicho monto se encuentra detallado a mayor profundidad en la sección 4.1.5 de estudio económico-financiero del Capítulo 4.

## **Capítulo 6. Resultados y discusión**

En lo que respecta al presente capítulo llamado “*Resultados y discusión*”, se tiene que en este se hará muestra de los principales hallazgos obtenidos a partir de los objetivos planteados (sección 1.4 y 1.4.1) en función de los diferentes métodos y técnicas mencionadas en el capítulo cinco. Además, se darán discusiones concisas acerca de los principales resultados obtenidos y la relevancia de estos dentro del contexto del presente proyecto/estudio.

### **6.1 Principales resultados**

#### **6.1.1 Componentes y contexto de los SAT en Costa Rica**

Recapitulando, el objetivo general del presente proyecto es el de “proponer un sistema de alerta temprana ante eventos hidrometeorológicos extremos para dos plantas potabilizadoras para fortalecer la gestión de riesgo de desastres”. Por lo tanto, resulta de vital importancia conocer el contexto de los SAT tanto en su modo elaboración y operación como así mismo el desarrollo de estas herramientas en Costa Rica.

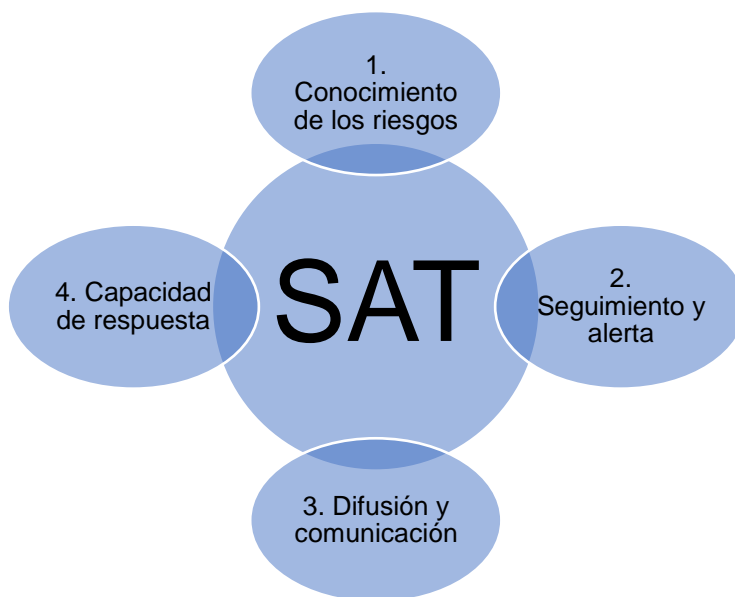
##### ***6.1.1.1 Componentes de los SAT***

Dentro del desarrollo de este proyecto, fue necesario la búsqueda de información por medio de diferentes fuentes a cerca de los Sistemas de Alerta Temprana (SAT), obteniendo como resultado diferentes definiciones de los SAT. A pesar de encontrar diferentes definiciones, se determinó que los SAT son implementados en la gestión de riesgo de no únicamente desastres ocasionados por fenómenos naturales, sino que también forma parte dentro de la gestión administrativa de empresas, el ámbito de salud, finanzas, entre muchas otras donde se pueda pronosticar una amenaza a una población determinada (Vargas et al, 2016).

Sin embargo, una definición más acorde a lo requerido para este proyecto (SAT ante eventos hidrometeorológicos extremos) es la brindada por Sánchez et al. (2018), que mencionan que estas son herramientas capaces de recopilar información sobre posibles amenazas para analizar, comprender y prever la posibilidad de un evento y así poder emitir alertas a las comunidades cercanas logrando así mitigar el impacto que el evento pueda ocasionar.

Otro aspecto importante que tener presente para la elaboración de un SAT es las partes o componentes que forman parte de este, diversos autores coinciden en que la estructura base de los SAT está compuesta por cuatro principales componentes interrelacionados los cuales son: conocimiento de los riesgos, seguimiento y alerta, difusión y comunicación y capacidad de respuesta (III ECW, 2006; Dávila,2016; Vargas et al, 2016; Jiménez, 2019).

Figura 13. Componentes de un Sistema de Alerta Temprana ante desastres naturales.



Fuente: Elaboración propia a partir de Vargas (2016).

En lo que respecta a los componentes reflejados en la figura 13 correspondientes a: conocimiento de los riesgos, seguimiento y alerta, difusión y comunicación y capacidad de respuesta; se deduce que para cada uno de estos componentes se debe tener una muy clara su comprensión de su significado para que la operación de SAT sea de la manera más eficiente posible.

Cuadro 13. Consideraciones de cada uno de los componentes de un SAT para una eficiente operación de este.

Componente	Consideraciones
Conocimiento de los riesgos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se debe tener presente que el riesgo parte de la combinación de los peligros/amenazas y vulnerabilidad en determinada región.</li> <li>- La recolección sistemática y análisis de datos considerando la dinámica de los peligros/amenazas y vulnerabilidades.</li> <li>- Alteraciones antropogénicas y naturales como la urbanización, cambios en el uso de suelo, degradación ambiental y el cambio climático.</li> </ul>
Seguimiento y alerta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Son la parte central del SAT.</li> <li>- Requiere de una base sólida científica para predecir y pronosticar la posibilidad manifiesta de la amenaza en determinada región.</li> <li>- Contar con un sistema operativo 24 horas al día.</li> <li>- Monitoreo continuo de parámetros de riesgo para generar alertas oportunas.</li> <li>- Coordinar los servicios de alerta de los peligros/amenazas detectadas con las redes compartidas de instituciones para mejorar la comunicación y procedimientos de evacuación.</li> </ul>

Componente	Consideraciones
Difusión y comunicación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Las alertas deben llegar a las personas vulnerables a la amenaza.</li> <li>- Difundir información clara y concisa para el mejor entendimiento de la alerta.</li> <li>- Conocer de antemano canales de comunicación a diferentes niveles geográficos (comunal, regional y nacional).</li> <li>- Establecer una autoridad encargada de emitir las alertas.</li> <li>- Establecer canales de comunicación múltiples para que la alerta tenga mayor alcance y respaldos en caso de fallos.</li> </ul>
Capacidad de respuesta	<p>Que la comunidad:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Entiendan los riesgos dentro del área determinada.</li> <li>- Acaten el servicio de alerta cuando sea emitida.</li> <li>- Conozcan el protocolo a seguir frente la amenaza.</li> </ul> <p>Se requiere:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Programas de educación y preparación frente a los desastres.</li> <li>- Compenetración de las autoridades para preparar a las comunidades.</li> <li>- Planes de manejo de desastres puestos a prueba con simulacros.</li> <li>- Ubicar y divulgar a la comunidad sobre los protocolos a seguir y los escapes seguros</li> <li>- Informar sobre manera de evitar daños y pérdidas de propiedades.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia a partir III EWC, 2006.

#### 6.1.1.2 Contexto de los SAT en Costa Rica

Como parte importante de este proyecto, resalta el conocer acerca del contexto de los Sistema de Alerta Temprana ante eventos naturales extremos y más específicamente aquellos relacionados con eventos hidrometeorológicos extremos como inundaciones, ya que así se tendrá una guía sobre los lineamientos a considerar para el desarrollo del presente trabajo. Para ello se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica de la cual se encontró el documento llamado “Inventario y caracterización de los sistemas de alerta temprana Costa Rica”. Dicho documento brinda un panorama (hasta el año 2012) sobre este tipo de herramientas para la gestión del riesgo ante diversos tipos de amenazas/desastres derivados de eventos naturales a lo largo del territorio nacional tales como inundaciones, deslizamientos y actividad volcánica (UNESCO-CEPREDENAC, 2011).

Dentro de los hallazgos obtenidos, cabe resaltar que UNESCO-CEPREDENAC (2011) aclara en el *Inventario y caracterización de Sistemas de Alerta Temprana para Costa Rica* lo siguiente:

Para el desarrollo del inventario SAT, solicitado para el presente proyecto, se parte de lo señalado el 26- 05-2010 por la Presidencia de la CNE donde indica textualmente en la nota PRE-OF-0490-2010 (Anexo 3 Nota PRE-OF-0490-2010) dirigida al Lic. Iván Morales lo siguiente: “Es necesario recalcar la necesidad de que el manejo de esta temática se haga en estricto apego conceptual a lo definido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM); en caso contrario, Costa Rica no tiene interés en el desarrollo de consultorías o proyectos que pretendan denominar SAT a sistemas que no abordan todos sus componentes. En eventual beneficio

directo regional en este sentido se reflejará en el nivel local, municipal, nacional y regional, fortaleciendo las comunidades donde están instalados en este momento sistemas elementales de vigilancia de cuencas, y los municipios a los que éstas pertenezcan.”

Por consiguiente, queda claro que Costa Rica no cuenta con sistemas SAT, y el inventario SAT a ser realizado por el proyecto se va a transformar en el inventario de algunos puntos de la Red Institucional de Comunicaciones (RIC) y que llamaremos Puntos de Diagnóstico de la Red Institucional de Comunicación y Monitoreo de Alerta de la CNE (PDRIC) (p.2).

No obstante, dicho documento menciona que Costa Rica no cuenta con SAT como tal, en lugar de eso posee una Red Institucional de Comunicaciones ubicado en diferentes partes del país las cuales, en ciertos puntos o sectores, se cuenta con sistemas de buen potencial para reforzarlas y así a futuro transformarles en SAT.

A continuación, en el cuadro 14 se hace muestra de los 18 Puntos de Diagnóstico de la Red Institucional de Comunicación y Monitoreo de Alerta de la CNE (PDRIC) en Costa Rica para su futura consideración a Sistema de Alerta Temprana.

*Cuadro 14. Puntos de Diagnóstico de la Red Institucional de Comunicación y Monitoreo de Alerta de la CNE (PDRIC) seleccionados para el Inventario y caracterización de Sistemas de Alerta Temprana para Costa Rica y su grado de priorización.*

<b>RIC</b>	<b>Nombre</b>	<b>Amenaza</b>
1	Cañas – Lajas	Inundación
2	Sarapiquí – Sucio	Inundación
3	Corredores - Caño Seco	Inundación
4	Parrita Pirris	Inundación
5	Sixaola – Telire	Inundación
6	Barranca	Inundación
7	Matina – Chirripó	Inundación
8	Reventazón – Parismina	Inundación
9	Potrerrillos	Deslizamiento
10	Tablazo	Deslizamiento
11	Burío	Deslizamiento
12	Juco	Deslizamiento
13	Chitaría	Deslizamiento
14	Tapezco	Deslizamiento
15	Volcán Poás	Actividad Volcánica
16	Volcán Irazú	Actividad Volcánica
17	Volcán Arenal	Actividad Volcánica
18	Volcán Turrialba	Actividad Volcánica
<b>Clasificación</b>		<b>Prioridad</b>
RIC	Funcionando	1
RIC	Por reforzar	2
RIC	Por estructurar	3

Fuente: UNESCO-CEPREDENAC (2011).

Del cuadro 14 se puede apreciar como en el país de Costa Rica se cuenta con ocho sistemas similares al Sistema de Alerta Temprana (SAT) que se está desarrollando este proyecto, el cual va orientado en la gestión de riesgos ante eventos hidrometeorológicos extremos; estos ocho sistemas son los de Cañas-Lajas, Sarapiquí-Sucio, Corredores-Caño,

Parrita-Pirris, Sixaola-Telire, Barranca, Matina-Chirripó y Reventazón-Parismina, los cuales tienen como objetivo el monitoreo de amenazas ante inundaciones.

No obstante, el hallazgo obtenido y reflejado en el cuadro 14 hace muestra que de estos ocho sistemas únicamente tres se encuentran funcionando, dos requieren reforzar y los tres restantes deben ser reestructurados. Esto nos brinda un panorama, donde resalta la carencia de diferentes medios como el económico y técnico, principalmente, ya que este tipo de sistemas requieren un constante mantenimiento y calibración en cuanto a los equipos y tecnologías encargados de la recolección y monitoreo de la amenaza (inundación), y de la actualización de los análisis de los datos recolectados por estos equipos de la amenaza en estudio.

Así mismo, del presente hallazgo obtenido referente al contexto de los SAT en Costa Rica, se destacan otros aspectos los cuales ocasionan que estos ocho PDRIC no sean calificados como SAT, dichos aspectos son:

- Dificultades en el acceso de información entre los entes encargados de los PDRIC (ICE, CNE).
- Actualización de análisis hidrometeorológicos.
- Falta de mapas de riesgos.
- Falta de estudios técnicos en general.
- Falta de claridad en cuanto a modo de operación.
- Falta de instrumentación/equipo para la comunicación (alerta).

Los puntos mencionados anteriormente, son sólo algunas de las falencias mencionadas por UNESCO-CEPRENAC (2011) (para más detalle ver anexo 3). Sin embargo, se logró determinar que la falencia en común para los ocho PDRIC ante inundaciones son la falta de actualización de los análisis hidrometeorológicos extremos y la carencia de mapas de riesgo.

#### 6.1.2 Análisis de datos de precipitación y determinación de umbrales de alerta.

##### 6.1.2.1 Ubicación de las estaciones meteorológicas y depuración de datos.

##### La Paz, San Ramón, Alajuela

Para lo que concierne a la zona de estudio de La Paz, se logró determinar que para la zona de estudio se cuenta con estaciones cercanas al área de estudio; entre las que destacan las estaciones pertenecientes al Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). A continuación, se hace muestra de estas estaciones:

*Cuadro 15. Estaciones hidrometeorológicas cercanas al área de estudio.*

Nombre	Código	Coordenadas CRTM05		Tipo de estación	Registro de datos
		Este (X):	Norte (Y):		
La Paz I	220103	438961.63	1124840.41	Meteorológica	25-07-2013 a 05-04-2021
La Paz II	220107	437370.98	1124860.60	Meteorológica	11-03-2020 a 18-03-2022
Río Barranca	220303	447240.13	1118811.96	Hidrológica	17-04-2015 a 18-03-2022

Nota: Estas estaciones recopilan datos de precipitación cada cinco minutos.

Fuente: AyA (2022).

De las estaciones anteriores (cuadro 15) se escogió la estación La Paz I para hacer el análisis estadístico debido a que es la que cuenta con un mayor registro de datos (nueve años).

Dentro del registro de datos disponibles de la estación La Paz I, se tiene que son un total de 809.568 datos de precipitación cada cinco minutos para un periodo de nueve años comprendidos del 2013 al 2021. Dentro del análisis de estos se detectaron 22 datos los cuales no registran medición, por lo cual fueron asumidos como valores de 0.00 mm de precipitación.

Cabe destacar que a cercanías del área de estudio se encuentran dos estaciones meteorológicas que son la estación La Balsa perteneciente al Instituto Meteorológico Nacional (IMN) en las coordenadas latitud 10°10'28" N y longitud 84°29'49" O. La otra estación es la Reserva Biológica Manuel Alberto Brenes (ReBAMB) y es propiedad de esta reserva (ReBAMB) en convenio con el Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), la cual se ubica en las coordenadas latitud 10°13'12.0" N y longitud 84°35'13.3" O. Cabe aclarar que estas estaciones no serán implementadas en el presente proyecto, debido a que el interés principal del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) en que los SAT a implementar operen con las estaciones que poseen en las plantas potabilizadoras de las zonas sujeto de estudio. No obstante, se tiene previsto por medio del Comité Municipal de Emergencias (CME) de las zonas de estudio involucrar otras entidades (públicas y privadas), que forman parte de este Comité, en los SAT a elaborar abriendo así la posibilidad de integrar la información de estas estaciones.

Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.

En el siguiente cuadro se puede observar información general de la estación meteorológica que suministró los datos para la elaboración del estudio en la Quebrada Piedra Bruja en Jacó, esta estación pertenece al Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados y posee 7 años de registro.

Cuadro 16. Estación meteorológica del área de estudio.

Nombre	Código	Coordenadas CRTM05		Tipo de estación	Registro de datos
		Este (X):	Norte (Y):		
Piedra Bruja	250103	434783.88	1067951.03	Meteorológica	29-05-2015 a 16-02-2022

Fuente: AyA (2022).

**Nota:** Los datos de la estación durante el mes de agosto del 2017 no fueron registrado, por lo que se tomaran estos datos con un valor de 0.

### 6.1.2.2 Días con precipitación máxima horaria (PMH)

Se procedió a seleccionar el rango de años a evaluar del registro disponible, y de estos se extrajo el día del año que presentó la precipitación máxima horaria (PMH).

#### La Paz, San Ramón, Alajuela

Del registro de años de la estación La Paz I, se extrajo los siguientes datos referente a PMH.

Cuadro 17. Precipitación máxima horaria del registro de año de la estación La Paz I.

PMH (mm/hr)	FECHA
84.60	11/10/2013
<b>38.00</b>	<b>11/9/2014</b>
<b>62.90</b>	<b>22/8/2015</b>
<b>49.70</b>	<b>26/9/2016</b>
<b>37.60</b>	<b>5/9/2017</b>
<b>59.20</b>	<b>24/5/2018</b>
<b>34.90</b>	<b>13/7/2019</b>
<b>48.70</b>	<b>20/7/2020</b>
7.70	2/2/2021

Fuente: Elaboración propia (2022).

Del cuadro 17 cabe resaltar que, si bien se dispone de nueve años disponibles, se optó hacer uso de únicamente siete años (las filas resaltadas en color verde en el cuadro 17) los cuales abarcan el periodo comprendido del año 2014 al año 2020, esto debido a que estos los años la estación La Paz I logró registro de mediciones cada cinco minutos completos a lo largo de este periodo.

#### Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.

En el cuadro 18 se presentan los días con mayor precipitación en una hora para los 7 años de registro, obtenidos de la depuración de datos de la estación Piedra Bruja.

Cuadro 18. Precipitación máxima horaria de los siete años de registro

Fecha	PMH (mm/hr)
15/11/2015	108.7
6/6/2016	47.9
9/6/2017	49
31/7/2018	55.1
21/4/2019	51.5
23/6/2020	66.8
<b>23/8/2021</b>	<b>108.5</b>

Fuente: Elaboración propia (2022).

Según entrevistas realizadas al personal que trabaja en el mantenimiento de la planta potabilizadora de Piedra Bruja en Jacó, el día 23 de agosto del 2021 ocurrió una inundación, por lo que este día es señalado como el evento crítico y aparece resaltado con el color rojo en el cuadro 18.

### 6.1.2.3 Parámetros morfométricos

En lo que respecta a los parámetros morfométricos para cada tramo de las subcuencas en estudio (La Paz, San Ramón, Alajuela y Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas), se tiene que estos ya fueron determinados en el capítulo II, secciones 2.1.1 y 2.1.2 del presente documento.

#### La Paz, San Ramón, Alajuela.

En lo que respecta a los parámetros morfométricos de esta zona de estudio, estos se pueden apreciar de manera detallada en el cuadro 3 del presente documento. No obstante, en este apartado se hace especial alusión al parámetro morfométrico correspondiente al tiempo de concentración, el cual fue obtenido por medio de la ecuación de Kirpich (ecuación 6) con un resultado de aproximadamente 23.74 minutos.

En lo que respecta a los parámetros morfométricos de esta zona de estudio, estos se pueden apreciar de manera detallada en el cuadro 3 del presente documento. No obstante, en este apartado se hace especial alusión a un solo parámetro morfométrico el cual es el tiempo de concentración (Tc). Para la obtención de este, se hizo uso de cuatro diferentes métodos los cuales se pueden apreciar en el cuadro 19.

*Cuadro 19. Diferentes tiempos de concentración determinados para el área de estudio de La Paz, San Ramón, Alajuela.*

<b>Métodos de Tc</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidades</b>
<b>Tiempo de concentración Kirpich</b>	<b>0.40</b>	<b>Horas</b>
	<b>23.74</b>	<b>Minutos</b>
Tiempo de concentración SCS	1.37	Horas
	82.14	Minutos
Tiempo de concentración Ven Te Chow	0.71	Horas
	42.40	Minutos
Tiempo de concentración Témez	1.00	Horas
	60.02	Minutos
Promedio	0.87	Horas
	52.07	Minutos

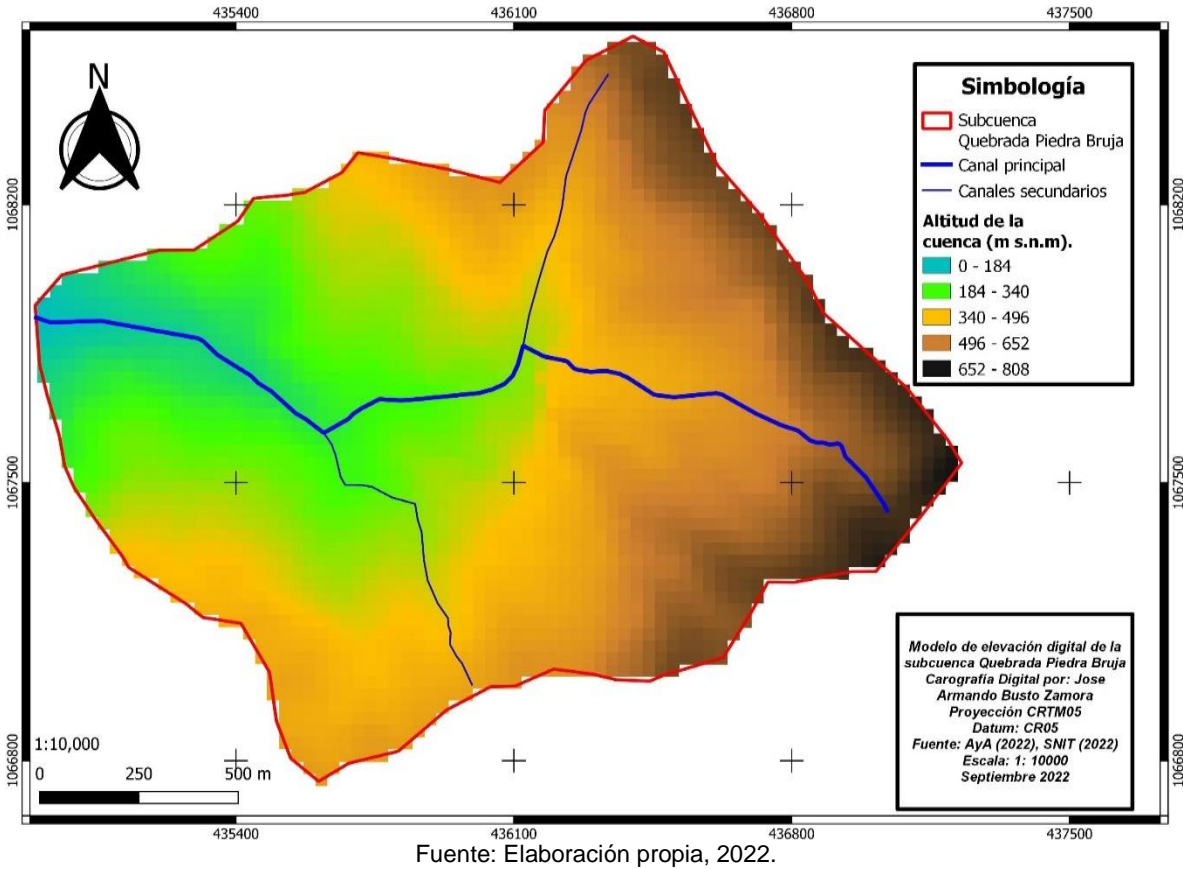
Fuente: Elaboración propia, 2022.

Del cuadro 19, se puede observar que los cuatro métodos implementados brindan una demarcada diferencia en cuanto a los resultados obtenidos que van desde 23.74 minutos hasta los 82.14 minutos. Sin embargo, para la selección del tiempo de concentración con el cual se procedió a trabajar, fue el del método de Kirpich que corresponde a 23.74 minutos; se seleccionó este debido a que este método resulta muy conservador para cuencas de áreas pequeñas (Porrás, 2021).

#### Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.

Mediante el programa QGIS 3.16, se obtuvieron los parámetros morfométricos de la subcuenca, área de la cuenca fue suministrada por el AyA y los cauces fueron delimitados por las capas obtenidas del Sistema Nacional de Información Territorial.

Figura 14. Modelo de elevación digital de la subcuenca Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.



Los siguientes cuadros muestra los resultados de las diferentes metodologías para el cálculo de tiempo de concentración, tomando en cuenta las cuatro diferentes fórmulas, se promediaron estas tres metodologías para obtener un tiempo de concentración más aceptable.

Cuadro 20. Resultado del tiempo de concentración de la cuenca mediante diferentes formulas

Parámetro	Resultado	Unidades
Tiempo de concentración Kirpich	13.63	minutos
	0.227	horas
Tiempo de concentración SCS	34.14	minutos
	0.569	horas
Tiempo de concentración Témez	46.25	minutos
	0.771	horas
Tiempo de concentración Chow	26.34	minutos
	0.439	horas

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Cuadro 21. *Parámetros estadísticos de los diferentes tiempos de concentración promediados.*

Parámetro	Tc (minutos)
Tiempo de concentración Kirpich	13.63
Tiempo de concentración SCS	34.14
Tiempo de concentración Témez	46.25
Tiempo de concentración Chow	26.34
<b>Promedio</b>	30.09
<b>Media</b>	30.24
<b>Desviación Estándar</b>	13.69
<b>Coefficiente de variación</b>	0.455

Fuente: Elaboración propia, 2022.

#### 6.1.2.4 Hietogramas y curvas de doble masa de días de evento.

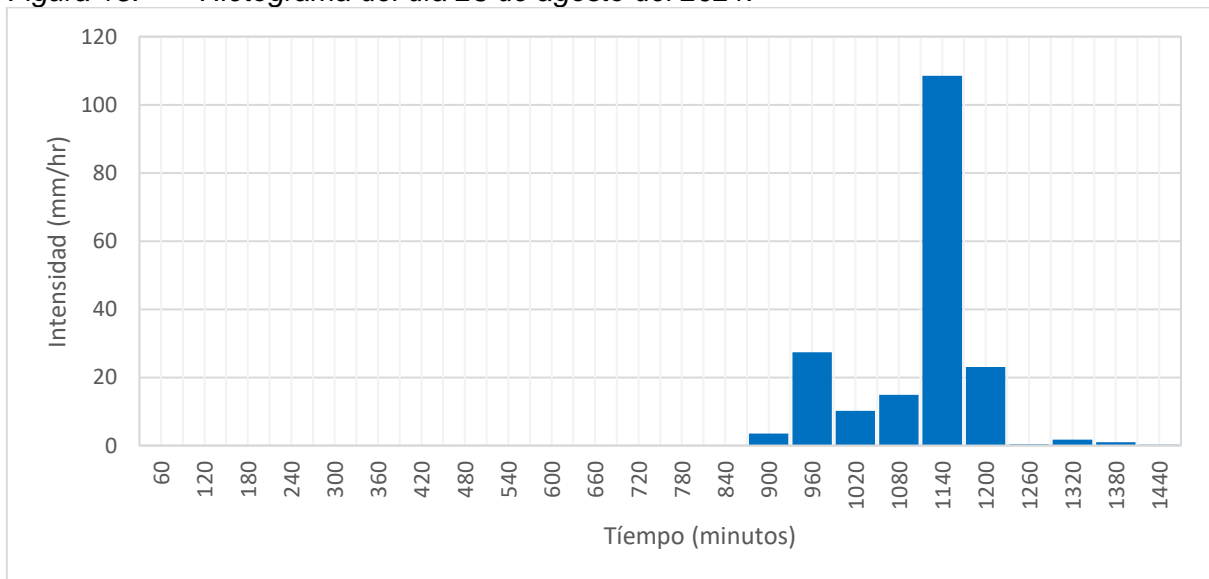
##### La Paz, San Ramón, Alajuela

En lo que respecta a la zona de La Paz, San Ramón, Alajuela; se tiene que a diferencia de la otra zona sujeto de estudio (Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas), el registro de datos disponibles de la zona comprendido en el periodo del año 2013 al 2021, no se ha presentado un evento de grandes magnitudes. Esto fue corroborado en la gira de campo efectuada el 25 de mayo del 2022, donde se le consultó al operador de la planta potabilizadora de la zona, Carlos Manuel Arias Arias, si tenía conocimiento de eventos hidrometeorológicos donde el río se haya salido de un cauce, donde él respondió que no, no se había presentado eventos a magnitudes que generaran graves afectaciones.

##### Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.

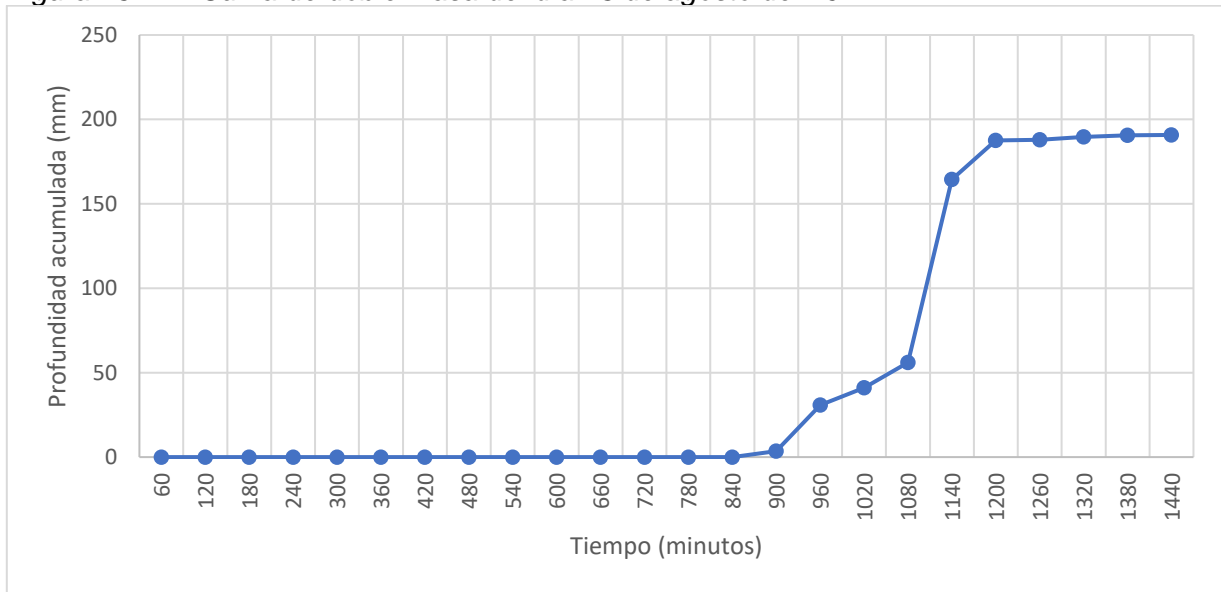
Las figuras 15 Y 16 muestran el comportamiento del evento que se tiene conocimiento, obtenido mediante entrevistas de los operadores de la planta y el ingeniero supervisor Bernald Sancho.

Figura 15. *Hietograma del día 23 de agosto del 2021.*



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Figura 16. Curva de doble masa del día 23 de agosto del 2021.

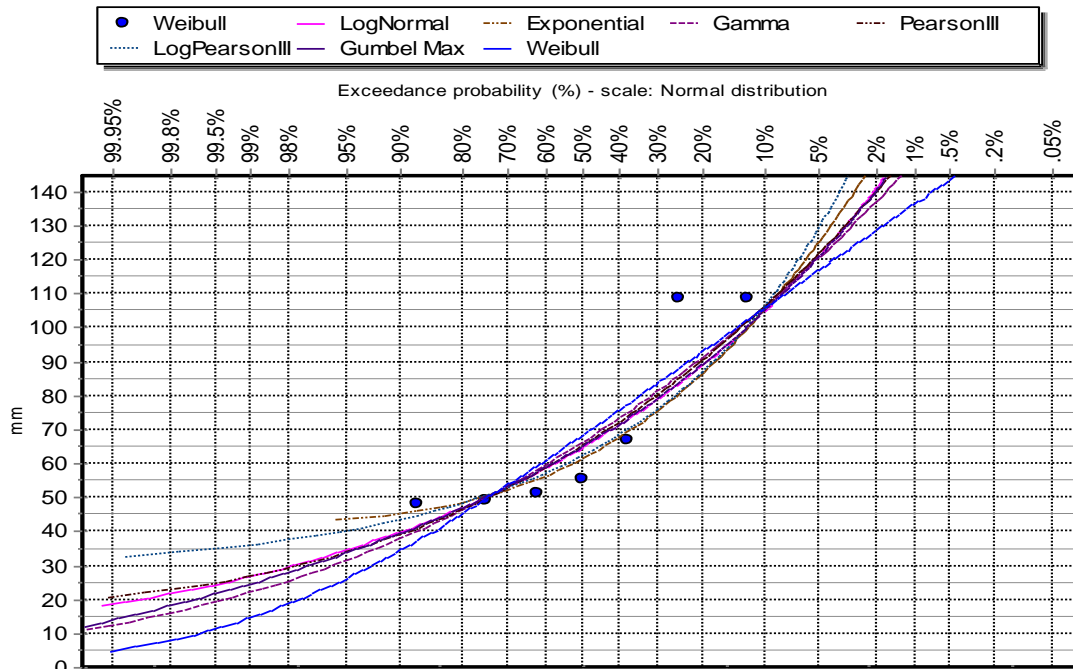


Fuente: Elaboración propia, 2022.

6.1.2.5 Graficas con las distribuciones de Gumbel Hydrognomon y literatura que avale GUMBELL.

La figura 17 muestra un gráfico donde se puede observar los tipos de distribuciones que más se ajustan al modelo PMH analizado de la estación.

Figura 17. Distribuciones teóricas que más se ajustan a los PMH analizados, Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Las pruebas de bondad Kolmogorov-Smirnov y Chi-Cuadrada, que verifican si estas distribuciones son las que más se ajustan a los datos PMH se encuentra en Anexo 1 y 2, los cuales aparecen señalados en color amarillo y el parámetro que nos indica cual se ajusta más se ajusta en Kolmogorov-Smirnov es el delta máximo y en el caso de Chi-Cuadrado es el parámetro de Pearson.

#### 6.1.2.6 Estimación de tormentas de diseño (IDF-PDF).

Como parte fundamental del desarrollo del presente proyecto, se estableció que era de vital importancia estimar el comportamiento de las precipitaciones en las zonas sujeto de estudio; en otras palabras, se requirió de la elaboración de tormentas de diseño sobre las cuales se procede a estimar los diferentes umbrales con los cuales van a operar cada una de las alarmas de las zonas de estudio.

Para lograr lo anteriormente descrito, se parte de los datos de precipitación existentes y disponibles para cada una de las estaciones seleccionadas en cada área de estudio, de las cuales se extrajo el día con la mayor PMH de cada uno de los años seleccionados y por medio del método de Weibull y la distribución de Gumbel se determinó diferentes periodos de retorno con su respectiva tormenta. A continuación, se hará muestra de los resultados obtenidos mediante la implementación de dichos métodos.

**Cuadro 22.** *Periodos de retorno obtenidos para el registro de PMH del periodo 2014-2020 con el método de Weibull, La Paz, San Ramón, Alajuela.*

N° de orden (m)	Fechas	PMH registrado	Tr (años)	Probabilidad de ocurrencia	Probabilidad de no ocurrencia
1	24/5/2018	125.3	8	12.5%	87.5%
2	20/7/2020	121.7	4	25.0%	75.0%
3	22/8/2015	89.4	2.67	37.5%	62.5%
4	11/9/2014	68.4	2	50.0%	50.0%
5	26/9/2016	62.5	1.6	62.5%	37.5%
6	13/7/2019	61.7	1.33	75.0%	25.0%
7	5/9/2017	43.4	1.14	87.5%	12.5%

Nota. Tr: Periodo de retorno

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Del cuadro 22 se tuvo como principales resultados que, del registro de años seleccionados para la zona de La Paz, San Ramón, Alajuela; el día con Precipitación Máxima Horaria (PMH) de mayor magnitud, registrado el día 24/05/2018, cuenta con un periodo de retorno de ocho años y con una probabilidad que este evento vuelva a registrarse de 12.5%.

**Cuadro 23.** *Periodos de retorno calculados a partir de las intensidades máximas en una hora del 2015 al 2021, mediante el método de Weibull, Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.*

N° de orden (m)	Tr (años)	Fechas	Probabilidad de ocurrencia	Probabilidad de no ocurrencia	I max (mm/hr)
1	8	23/8/2021	12.5%	87.5%	110.90
2	4	15/11/2015	25.0%	75.0%	108.70
3	2.67	6/6/2016	37.5%	62.5%	81.70
4	2	23/6/2020	50.0%	50.0%	71.70

N° de orden (m)	Tr (años)	Fechas	Probabilidad de ocurrencia	Probabilidad de no ocurrencia	I max (mm/hr)
5	1.6	31/7/2018	62.5%	37.5%	58.20
6	1.33	21/4/2019	75.0%	25.0%	55.50
7	1.14	9/6/2017	87.5%	12.5%	53.80

Nota. Tr: Periodo de retorno  
Fuente: Elaboración propia, 2022.

Del cuadro 23 se tuvo como principales resultados que, del registro de años seleccionados para la zona de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas; el día con Precipitación Máxima Horaria (PMH) de mayor magnitud, registrado el día 23/08/2021, cuenta con un periodo de retorno de ocho años y con una probabilidad que este evento vuelva a registrarse de 12.5%.

**Cuadro 24. Comportamiento de las tormentas con mayor PMH seleccionadas del periodo 2014-2020 de la estación La Paz I, San Ramón, Alajuela.**

Fechas	Periodo de duración (min)																																							
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600	660	720	780	840	900	960	1020	1080	1140	1200	1260	1320	1380	1440					
24/5/2018	8.5	15.7	24.2	31.3	36.3	40.6	45.2	49.3	53.6	57.1	58.9	60.6	90.4	96.8	101.9	104.6	113.5	119.9	122.6	124.6	125.1	125.1	125.1	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2	125.2		
20/7/2020	9.1	16.7	24.5	31.8	34.8	42.6	48.8	53.8	57.6	60.6	63.6	64.9	87.105	110.9	111.1	111.2	111.3	111.5	111.6	111.6	112.1	112.7	113.8	114.9	117.7	118.7	119.3	121.6	121.7	121.7	121.7	121.7	121.7	121.7	121.7	121.7	121.7	121.7	121.7	
22/8/2015	8.7	17.4	25.2	31.9	37.5	43.9	49.3	52.8	56.1	60.8	66.1	70.9	80.8	83.5	86.1	86.9	87.3	87.5	88.1	88.9	88.9	89	89	89	89	89.1	89.2	89.2	89.3	89.3	89.3	89.4	89.4	89.4	89.4	89.4	89.4	89.4	89.4	89.4
11/9/2014	6.8	12.9	18.3	23.6	28.1	32.6	35.6	39.3	42.8	46.2	49.5	51.2	55.6	60.3	64.9	66.4	66.9	67.1	67.4	67.6	67.8	68.1	68.3	68.3	68.3	68.3	68.3	68.3	68.3	68.3	68.4	68.4	68.4	68.4	68.4	68.4	68.4	68.4	68.4	68.4
26/9/2016	8.6	16.16	22.4	29.3	36.3	38.6	41.5	43.43	44.9	47.5	47.6	50.6	58.8	61.7	62.1	62.1	62.1	62.1	62.2	62.2	62.2	62.2	62.2	62.2	62.4	62.4	62.4	62.4	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	
13/7/2019	7.6	12.8	18.1	21.8	24.9	29.2	31.5	33.5	36	37.5	38.5	43.45	48.4	51.9	53.5	53.8	53.9	54.1	54.1	54.3	55.1	56.1	56.8	57.7	59.2	60.7	61.1	61.4	61.5	61.7	61.7	61.7	61.7	61.7	61.7	61.7	61.7	61.7	61.7	
5/9/2017	5.9	11.8	17.1	22.5	28.1	30.9	33.2	35.2	36.2	36.8	37.2	37.7	39.6	41.1	43	43.3	43.3	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4	43.4
<b>PROM</b>	<b>7.9</b>	<b>14.8</b>	<b>21.4</b>	<b>27.3</b>	<b>32.4</b>	<b>36.5</b>	<b>40.4</b>	<b>43.6</b>	<b>46.2</b>	<b>48.9</b>	<b>51.4</b>	<b>53.4</b>	<b>65.2</b>	<b>70.6</b>	<b>73.9</b>	<b>75.2</b>	<b>76.8</b>	<b>77.9</b>	<b>78.4</b>	<b>78.9</b>	<b>79.0</b>	<b>79.2</b>	<b>79.4</b>	<b>79.7</b>	<b>80.0</b>	<b>80.5</b>	<b>80.9</b>	<b>81.2</b>	<b>81.6</b>	<b>81.7</b>	<b>81.7</b>	<b>81.8</b>	<b>81.8</b>	<b>81.8</b>	<b>81.8</b>	<b>81.8</b>	<b>81.8</b>	<b>81.8</b>		

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Los datos reflejados en el cuadro 24, hacen muestra del comportamiento que tuvieron cada uno de los siete días con mayor Precipitación Máxima Horaria (PMH) (cuadro 17) a lo largo del día. La extracción de esta información fue de gran importancia, debido a que a partir de estos registros se generaron las tormentas de diseño para los periodos de retorno obtenidos de la zona de La Paz, San Ramón, Alajuela (cuadro 22).

**Cuadro 25. Tormentas de diseño generadas con la distribución de Gumbel a partir tormentas con mayor PMH del periodo 2014-2020 de la estación La Paz I, San Ramón, Alajuela.**

Tr (años)	Precipitación (mm)																																							
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600	660	720	780	840	900	960	1020	1080	1140	1200	1260	1320	1380	1440					
8.00	9.2	17.2	25.3	32.3	38.0	43.8	49.2	53.3	57.0	60.8	64.7	67.6	88.6	98.4	103.3	104.4	107.8	110.5	111.8	112.9	113.2	113.4	113.6	114.0	114.4	115.5	115.9	116.1	117.0	117.0	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	117.1	
4.00	8.5	15.9	23.2	29.6	35.0	39.5	44.1	48.5	51.2	54.4	57.6	60.7	76.6	87.6	88.8	91.3	93.1	94.0	94.7	94.9	95.1	95.3	95.7	96.0	96.8	97.2	97.5	98.1	98.1	98.2	98.2	98.2	98.2	98.2	98.2	98.2	98.2	98.2	98.2	98.2
2.67	8.0	15.1	21.9	27.9	33.1	37.4	41.5	44.8	47.5	50.3	53.1	55.2	68.7	77.5	78.8	80.6	81.9	82.6	83.1	83.2	83.4	83.6	84.0	84.3	84.9	85.2	85.5	86.0	86.1	86.1	86.1	86.1	86.1	86.1	86.1	86.1	86.1	86.1	86.1	86.1
2.00	7.7	14.4	20.8	26.5	31.5	35.9	42.1	44.4	47.4	49.5	51.6	53.8	66.6	69.6	70.9	72.2	73.1	73.5	73.9	74.0	74.2	74.4	74.7	74.9	75.4	75.8	76.1	76.4	76.5	76.5	76.6	76.6	76.6	76.6	76.6	76.6	76.6	76.6	76.6	76.6
1.60	7.4	13.8	19.9	25.3	30.7	33.0	37.3	39.4	42.4	46.4	47.3	56.9	62.5	63.8	64.7	65.2	65.4	65.7	65.7	65.7	65.9	66.1	66.4	66.6	67.0	67.3	67.7	67.9	68.0	68.0	68.0	68.0	68.0	68.0	68.0	68.0	68.0	68.0	68.0	68.0
1.33	7.1	13.2	19.0	24.8	28.3	31.3	34.8	37.4	39.4	41.4	43.5	53.1	55.4	56.8	57.3	57.3	57.4	57.5	57.5	57.5	57.6	57.9	58.1	58.3	58.6	58.9	59.3	59.4	59.4	59.5	59.5	59.5	59.5	59.5	59.5	59.5	59.5	59.5	59.5	59.5
1.14	6.7	12.5	17.9	22.7	27.2	29.3	32.3	34.6	36.4	37.9	39.4	40.5	43.9	45.2	47.1	48.5	48.5	48.1	48.0	47.9	47.9	48.0	48.2	48.4	48.6	48.7	49.1	49.4	49.4	49.5	49.5	49.5	49.5	49.5	49.5	49.5	49.5	49.5	49.5	49.5

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Del cuadro 25 se puede apreciar, las tormentas de diseño obtenidas por medio de la distribución de Gumbel. Estos resultados indican de manera probabilística como se desarrollaría cada uno de estos eventos de llegar manifestarse según la probabilidad de ocurrencia y periodo de retorno obtenido (cuadro 22). Cabe resaltar que de estas tormentas de diseño se generó las curvas IDF para la zona de La Paz, San Ramón, Alajuela (Figura 18).

**Cuadro 26. Comportamiento de las tormentas con mayor PMH seleccionadas del periodo 2014-2020 de la estación Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.**

Año	Periodo de duración (min)																																					
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600	660	720	780	840	900	960	1020	1080	1140	1200	1260	1320	1380	1440			
15/11/2015	12.1	22.2	31.3	39.9	48.4	57.1	66.8	78.7	86.5	94.8	101.5	108.7	122.2	135.2	136.1	136.2	136.7	150.1	163.4	164.3	164.4	164.9	164.9	164.9	164.9	164.9	164.9	164.9	164.9	164.9	164.9	164.9	164.9	164.9	164.9	164.9		
6/6/2016	11.2	20.1	26.9	34.7	41.4	49.4	56.6	61.9	67.8	73.2	76.1	81.7	94.2	94.9	96.9	97.1	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	
9/6/2017	7.8	14.3	18.7	23.5	25.1	30.6	36.4	41.8	46.2	48.4	51.3	53.8	66.6	69.5	71.8	73.9	75.9	76.7	76.7	76.8	77.2	78.6	78.9	78.9	78.9	78.9	78.9	78.9	78.9	78.9	78.9	78.9	78.9	78.9	78.9	78.9	79	
31/7/2018	11.9	22.6	30.1	35.7	40.7	43.4	48.3	51.4	53.8	56.7	57.7	58.2	94.2	94.9	96.9	97.1	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2	97.2
21/4/2019	6.3	12.5	18.4	23.3	29.2	33.6	38.5	43.5	47.3	51.5	54.1	55.5	58	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	58.2	
23/6/2020	8.1	16.2	22.8	28.7	33.7	40.3	46.2	52.5	56.8	60.8	65.9	71.7	95.9	103	103.6	103.7	103.7	103.7	103.7	103.7	103.7	103.7	103.7	103.7	103.7	105.4	106	106.4	106.4	106.5	106.5	106.5	106.5	106.5	106.5	106.5	106.5	
23/8/2021	13.8	27.2	38.6	48.3	58.8	68.2	75.8	83.3	90.3	97.2	103.9	110.9	131.6	146.5	161	184.1	187.6	187.9	189.6	190.6	190.8	190.8	190.8	190.8	190.8	190.8	190.8	190.8	190.8	190.8	190.8	190.8	190.8	190.8	190.8	190.8	190.8	

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Los datos reflejados en el cuadro 26, hacen muestra del comportamiento que tuvieron cada uno de los siete días con mayor Precipitación Máxima Horaria (PMH) (cuadro 18) a lo largo del día. La extracción de esta información fue de gran importancia, debido a que a partir de estos registros se generaron las tormentas de diseño para los periodos de retorno obtenidos de la zona de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas (cuadro 23).

**Cuadro 27. Tormentas de diseño generadas con la distribución de Gumbel a partir tormentas con mayor PMH del periodo 2014-2020 de la estación Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.**

Tr (años)	Precipitación (mm)																																					
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600	660	720	780	840	900	960	1020	1080	1140	1200	1260	1320	1380	1440			
8	13.27	25.06	34.69	43.77	52.63	61.02	68.88	77.15	84.36	91.48	97.51	104.49	124.44	136.15	143.14	153.99	155.87	159.90	165.05	165.81	165.94	166.12	166.12	166.12	166.12	166.31	166.37	166.42	166.42	166.43	166.43	166.43	166.43	166.43	166.43	166.43		
4	11.61	21.97	30.37	38.23	45.74	52.95	60.18	67.36	73.52	79.43	84.37	89.92	108.52	117.00	121.96	128.97	130.32	133.31	136.85	137.36	137.47	137.70	137.72	137.72	137.72	137.94	138.02	138.07	138.07	138.08	138.08	138.08	138.08	138.08	138.08	138.08	138.09	
2.67	10.55	19.99	27.60	34.70	41.34	47.80	54.62	61.10	66.58	71.73	75.97	80.59	98.33	104.75	108.41	112.97	113.99	116.30	118.82	119.16	119.27	119.53	119.56	119.56	119.56	119.80	119.88	119.94	119.94	119.95	119.95	119.95	119.95	119.95	119.95	119.95	119.97	
2	9.72	18.42	25.41	31.90	37.85	43.71	50.21	56.09	61.65	65.69	69.73	73.21	90.27	95.06	97.68	100.30	101.06	102.84	104.55	104.76	104.86	105.14	105.19	105.19	105.19	105.44	105.53	105.59	105.59	105.60	105.60	105.60	105.60	105.60	105.60	105.62	105.62	
1.6	8.97	17.02	23.46	29.39	34.74	40.07	46.28	51.71	56.19	60.63	63.38	66.62	83.07	86.40	88.10	88.98	89.51	90.82	91.79	91.89	91.98	92.29	92.35	92.35	92.35	92.61	92.71	92.77	92.77	92.78	92.78	92.78	92.78	92.78	92.78	92.78	92.80	
1.33	8.22	15.63	21.51	26.90	31.63	36.43	42.30	47.30	51.76	54.76	57.46	60.05	75.89	77.76	78.51	77.91	77.99	78.83	79.08	79.08	79.18	79.18	79.18	79.18	79.58	79.58	79.93	79.93	79.93	79.93	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.3
1.14	7.35	14.00	19.23	23.98	27.99	32.17	37.42	42.58	45.48	48.50	52.35	67.48	67.65	67.35	64.46	64.59	64.70	64.73	64.73	64.18	64.04	64.11	64.47	64.55	64.55	64.55	64.84	64.84	64.94	65.04	65.04	65.03	65.03	65.03	65.03	65.03	65.03	65.05

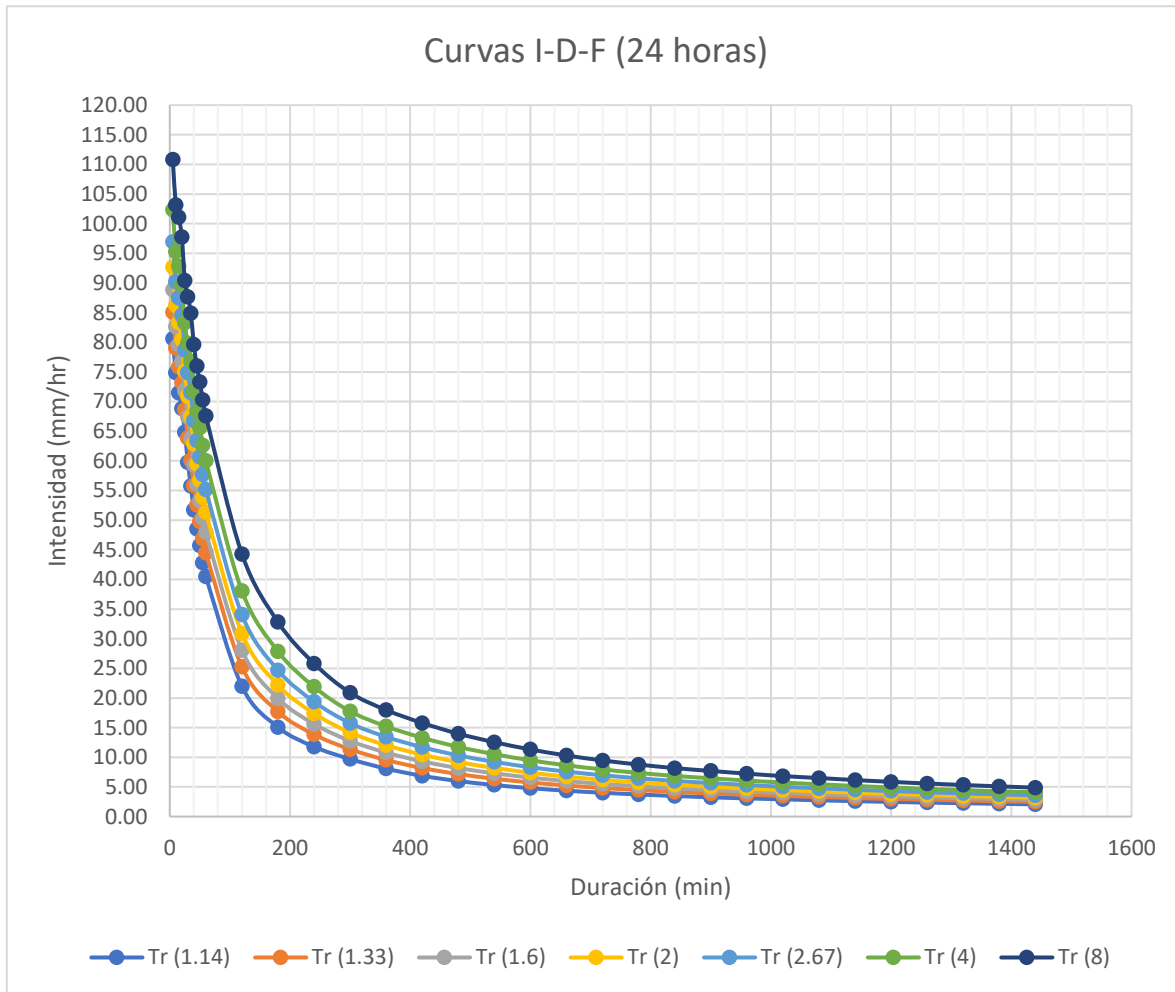
Fuente: Elaboración propia, 2022.

Del cuadro 27 se puede apreciar, las tormentas de diseño obtenidas por medio de la distribución de Gumbel. Estos resultados indican de manera probabilística como se desarrollaría cada uno de estos eventos de llegar manifestarse según la probabilidad de ocurrencia y periodo de retorno obtenido (cuadro 23). Cabe resaltar que de estas tormentas de diseño se generó las curvas IDF para la zona de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas (Figura 20)

La Paz, San Ramón, Alajuela

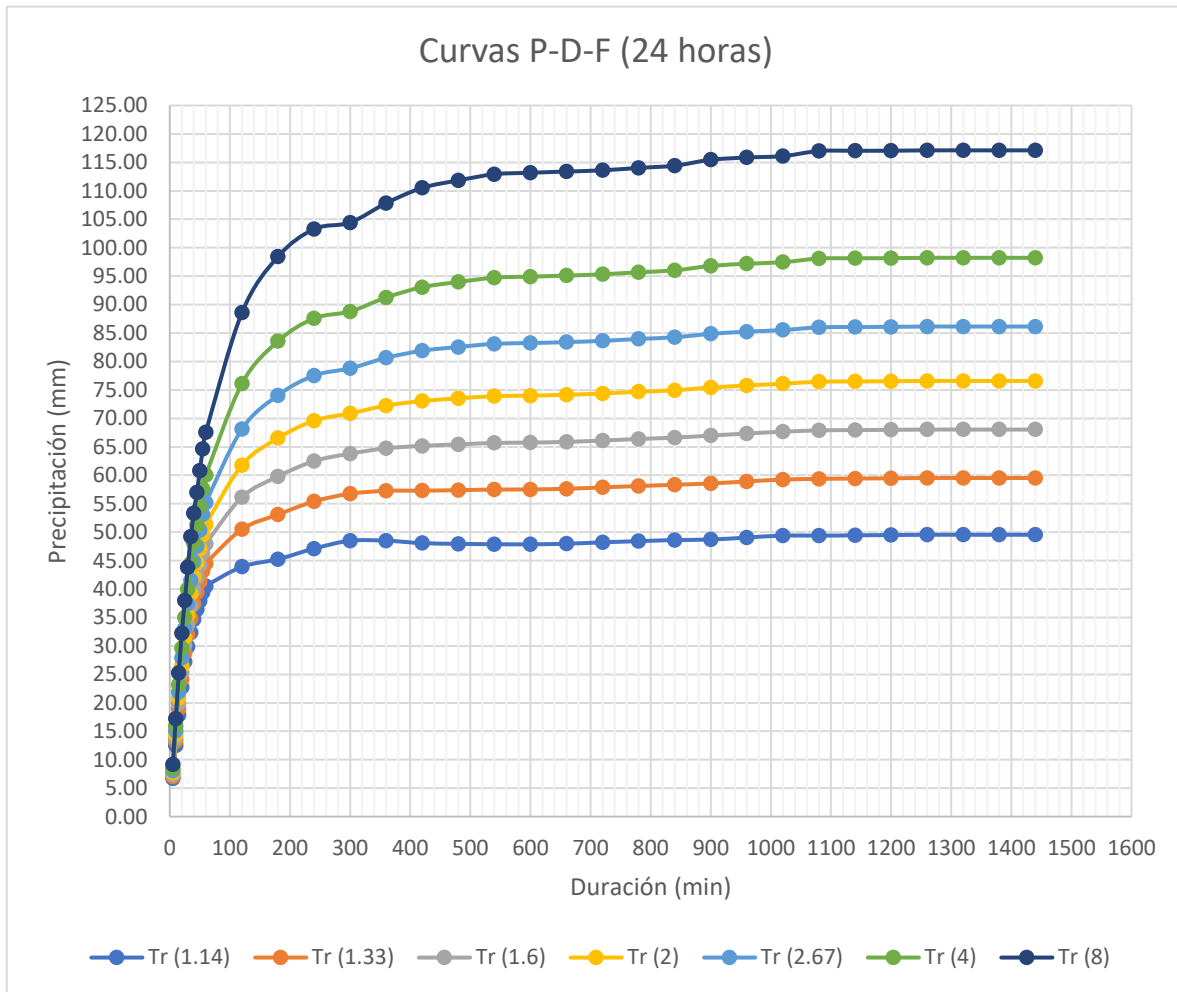
El resultado obtenido en el cuadro 25, hace muestra de las tormentas diseño con las cuales se calibró los umbrales de alerta del SAT correspondiente a la zona de estudio de La Paz, San Ramón, Alajuela. Sin embargo, para una mejor visualización de los resultados obtenidos se procedió a elaborar las curvas Intensidad Duración y Frecuencia (IDF) y Precipitación Duración y Frecuencia (PDF) (Figura 18 y 19 respectivamente).

Figura 18. Curvas IDF para los diferentes periodos de retorno obtenidos para la zona de la Paz, San Ramón, Alajuela.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Figura 19. Curvas PDF para los diferentes periodos de retorno obtenidos para la zona de la Paz, San Ramón, Alajuela.



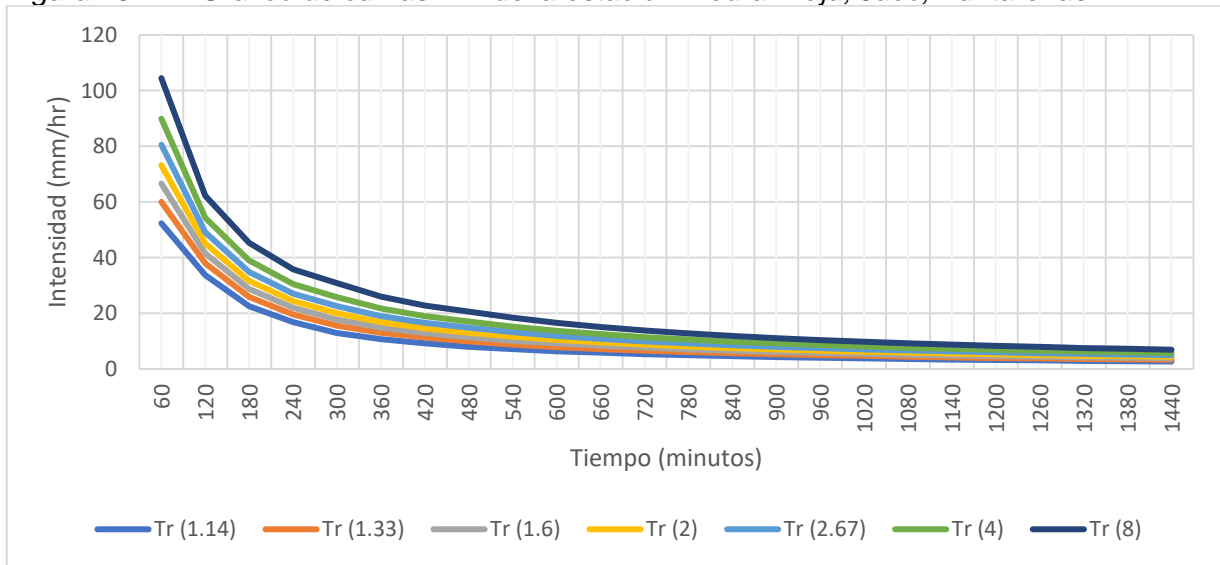
Fuente: Elaboración propia, 2022.

Como se puede apreciar tanto en la figura 18 como en la figura 19, los gráficos elaborados reflejan el comportamiento de las tormentas para cada periodo de retorno obtenido. Sin embargo, debido a que los rangos que se necesitan para la determinar los umbrales de alerta van asociados al tiempo de concentración, se requiere interpretar estas tormentas en rangos de minutos.

Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.

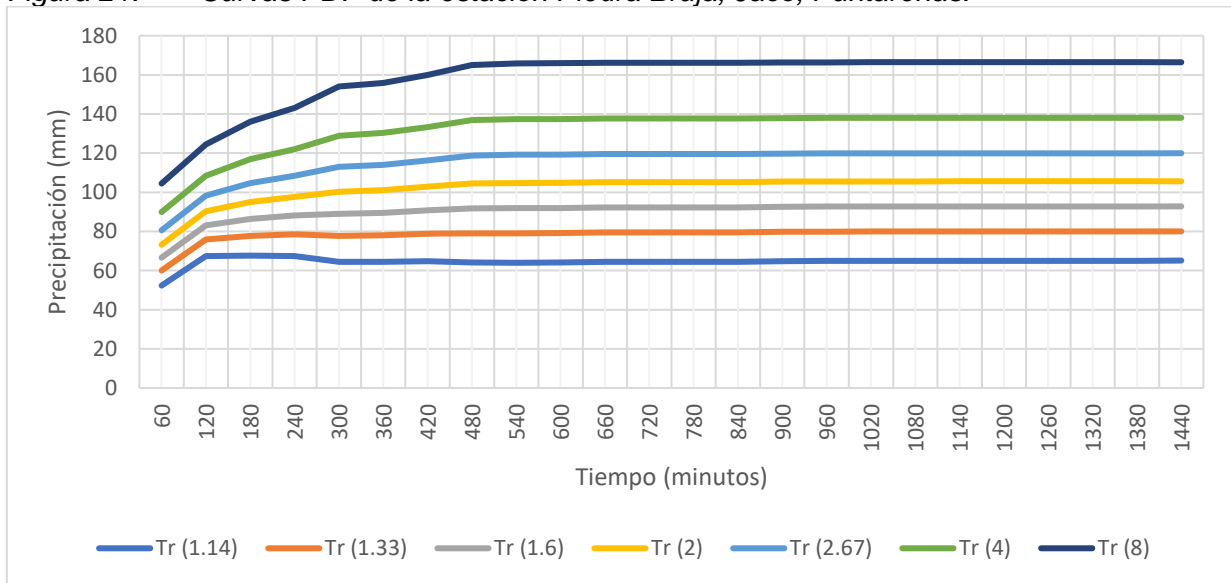
Los resultados que se puede observar en el cuadro 27 se pueden visualizar mejor en la figura 20, a partir de este resultado también se puede obtener las curvas IDF, midiendo la precipitación entre el tiempo, este resultado se puede observar en la figura 21.

Figura 20. Gráfico de curvas IDF de la estación Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Figura 21. Curvas PDF de la estación Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

#### 6.1.2.7 Curvas IDF y PDF delimitadas a una hora

Dado que para la determinación de los umbrales de alerta se usará como tiempo máximo de respuesta el tiempo de concentración, obtenido para cada una de las zonas de estudio, se requiere una mejor visualización de los comportamientos de las tormentas de cada uno de los años retorno determinados. Por ende, se procedió a graficar el comportamiento de cada una de estas tormentas (curvas IDF y PDF) en el rango de 60 minutos (1 hora).

Figura 22. Curvas IDF en una hora para los diferentes periodos de retorno obtenidos para la zona de la Paz, San Ramón, Alajuela.

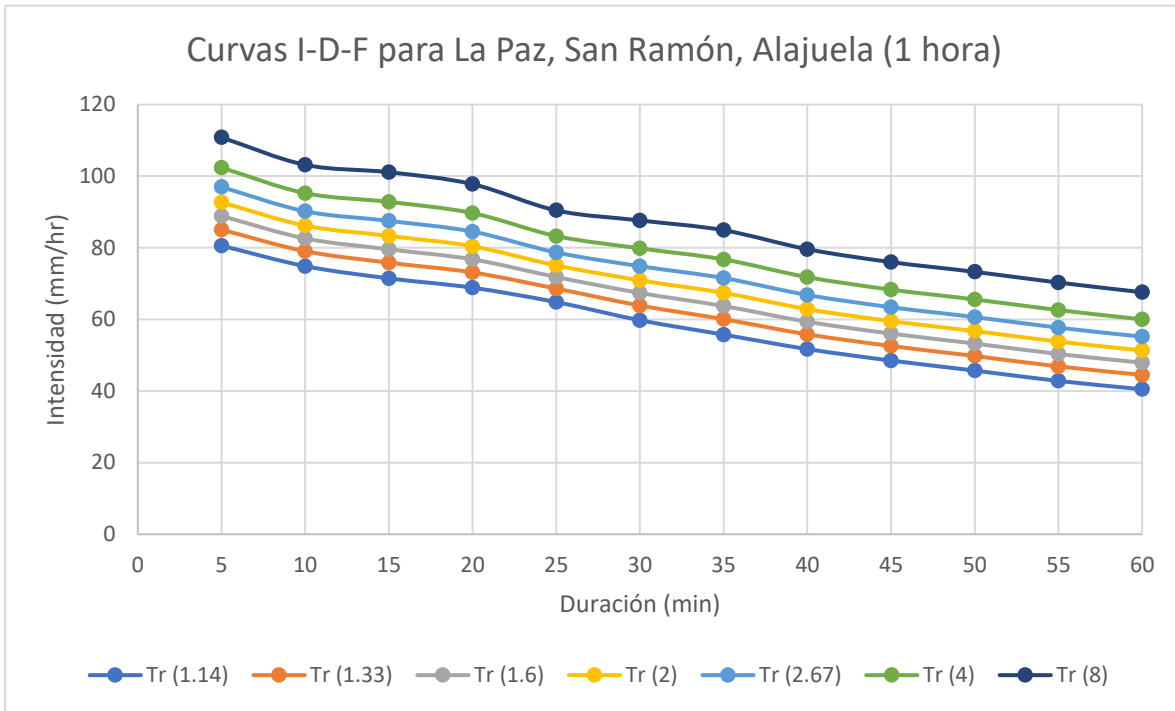


Figura 23. Curvas PDF en una hora para los diferentes periodos de retorno obtenidos para la zona de la Paz, San Ramón, Alajuela.

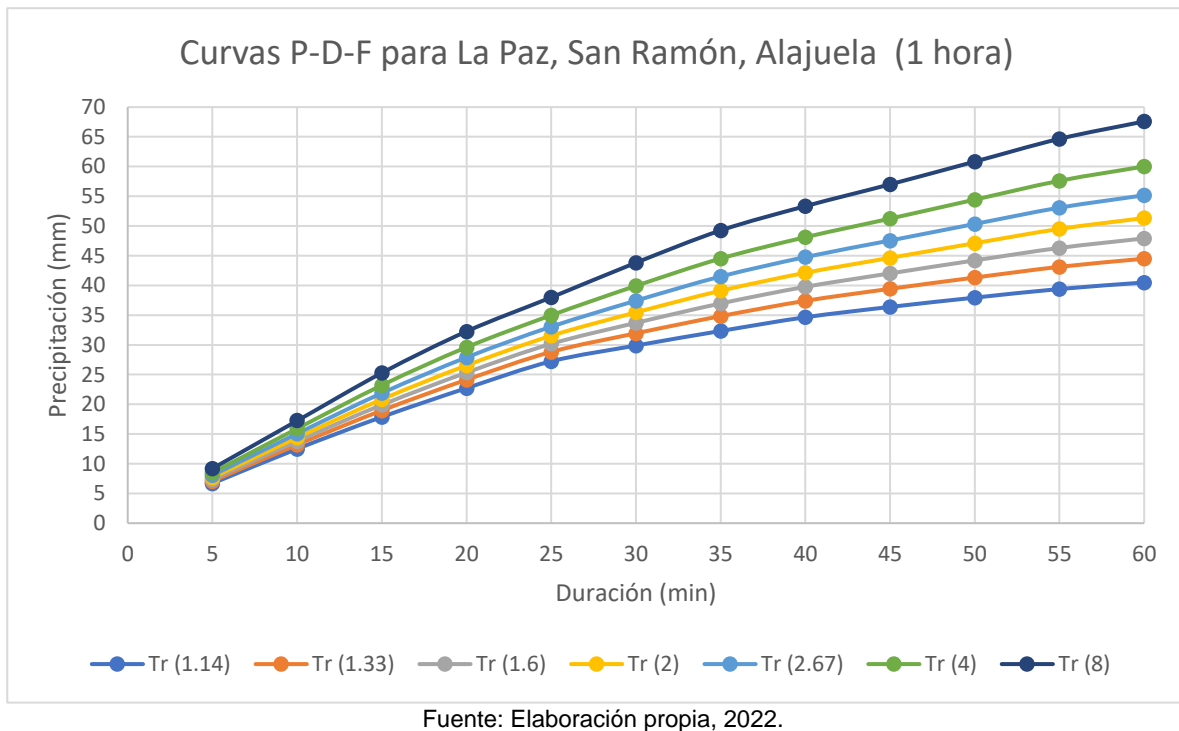
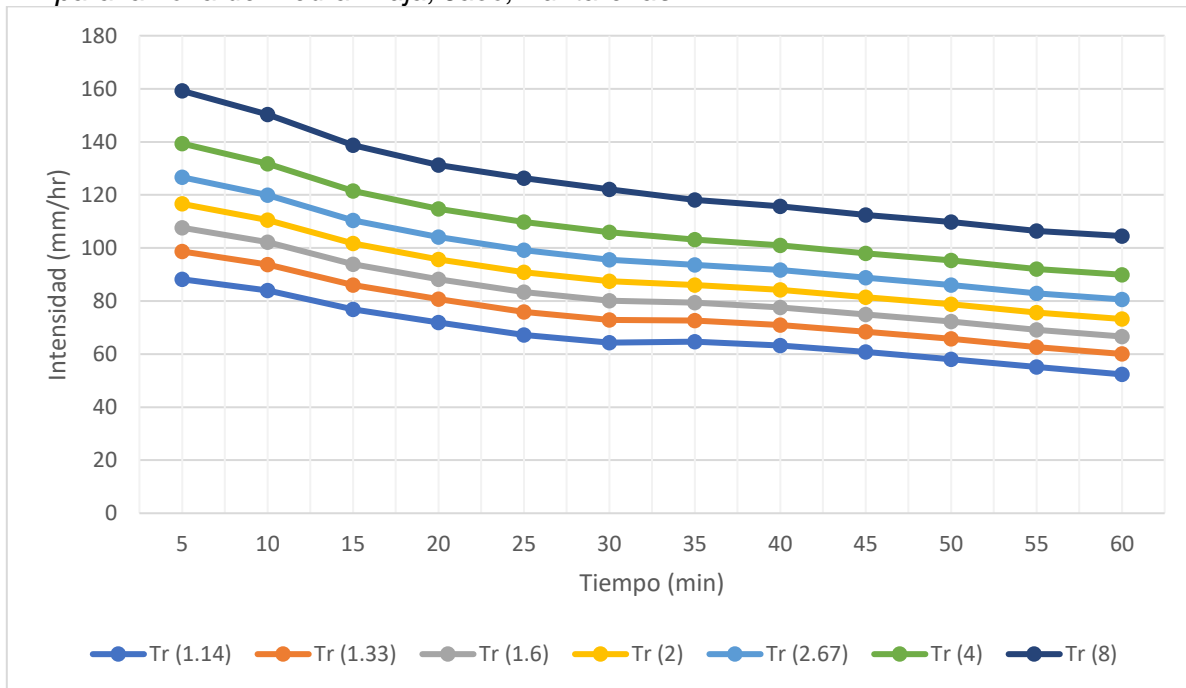
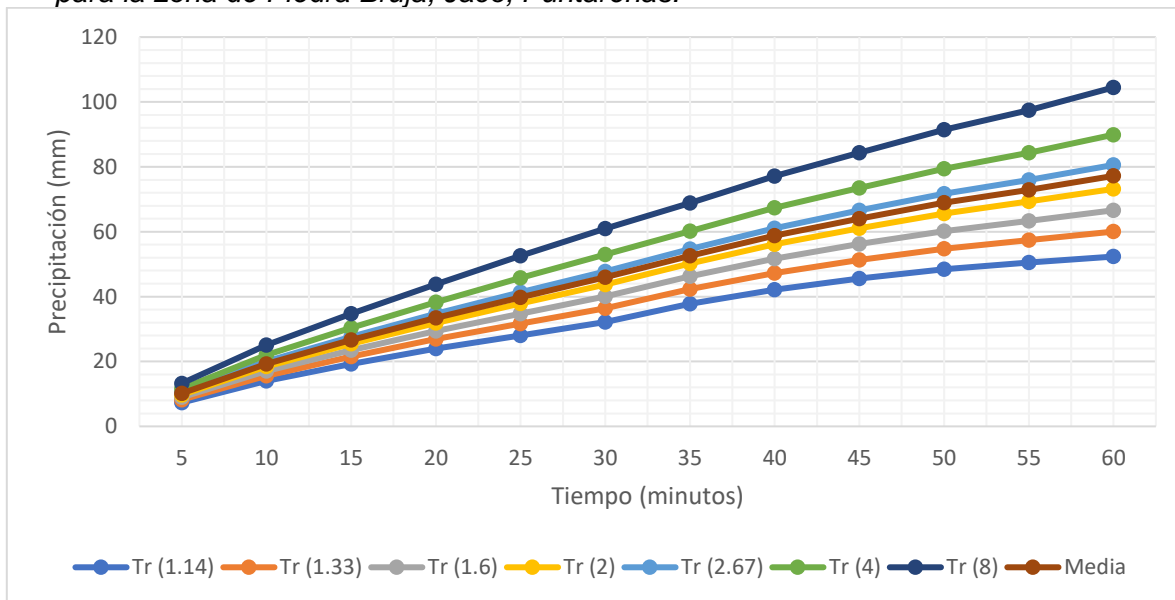


Figura 24. Curvas IDF en una hora para los diferentes periodos de retorno obtenidos para la zona de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Figura 25. Curvas PDF en una hora para los diferentes periodos de retorno obtenidos para la zona de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Los resultados reflejados en las figuras 22, 23, 24 y 25 al igual que las figuras 18, 19, 20 y 21 muestran cómo se comportan estas tormentas de diseño en un determinado periodo de tiempo; permitiendo así una interpretación más simplificada de estos eventos para poder

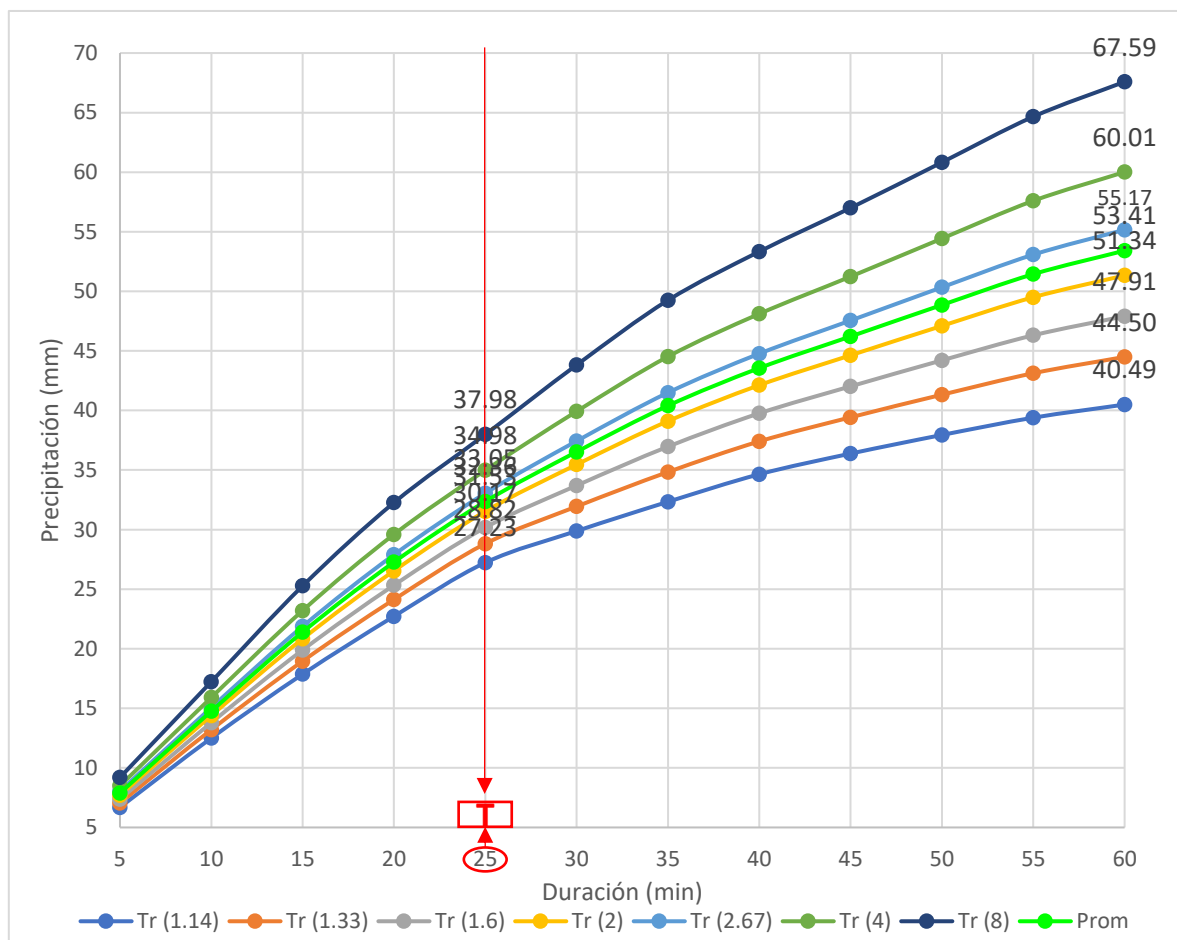
determinar los umbrales de alerta bajo los cuales operará la alerta. Siendo las curvas PDF el resultado seleccionado para la determinación de dichos umbrales.

#### 6.1.2.8 Umbrales de precipitación para el SAT

Llegados a este punto y con los resultados obtenidos hasta el momento, se puede dar una propuesta a cerca de los rangos sobre los cuales la alarma opere. Para esto se hace uso primeramente del tiempo de concentración, dicho parámetro funcionará como el tiempo final sobre el cual operará la alarma; y el otro son las curvas PDF estas brindan un panorama acerca de los comportamientos en fracciones de cinco minutos para cada una de las tormentas de los periodos de retorno establecidos mediante el método de Weibull (cuadros 22 y 23).

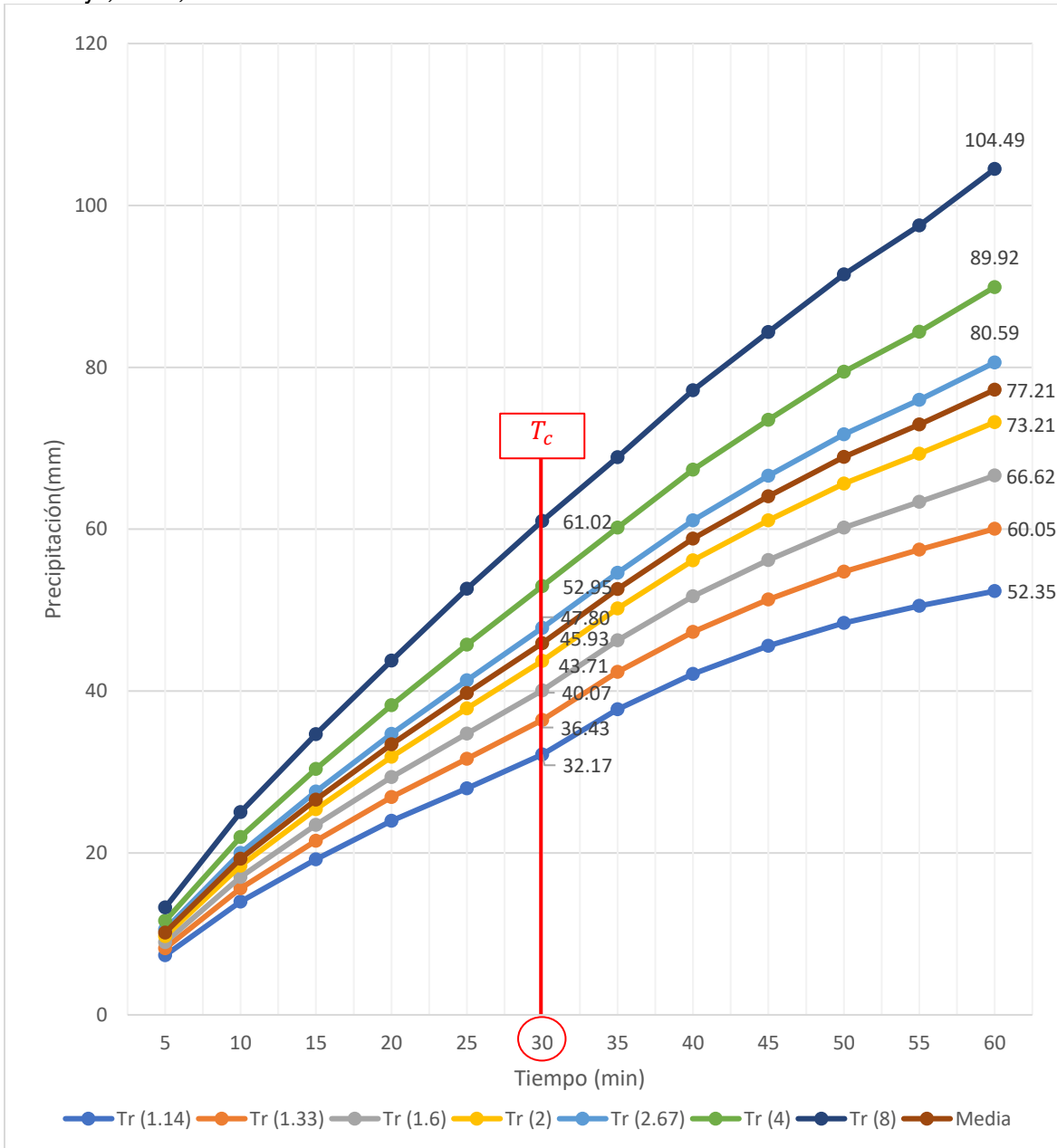
A continuación, se adjunta la curva PDF para cada una de las zonas sujeto de estudio para cada periodo de retorno establecido delimitada en al tiempo de operación del SAT.

Figura 26. Curvas PDF para periodos de retorno obtenidos y curva de calibración de los umbrales de alerta delimitadas al tiempo de concentración para la zona de La Paz, San Ramón, Alajuela.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Figura 27. Curvas PDF para periodos de retorno obtenidos y curva de calibración de los umbrales de alerta delimitadas al tiempo de concentración para la zona de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Los resultados reflejados en la figura 26, son los datos obtenidos de las tormentas de diseño para diferentes periodos de retorno estipulados en el cuadro 21. La figura 26 muestra la precipitación en intervalos cada cinco minutos en un lapso total de 60 minutos con la finalidad de obtener una apreciación mucho más clara del posible volumen de agua precipitada que se registre en estos lapsos de tiempo para así poder establecer los umbrales de alerta.

De esta misma figura 26, se puede apreciar una curva que lleva el nombre de “prom” (línea verde fosforescente) esta línea representa el promedio de los días con mayor PMH seleccionados del periodo de datos de la estación La Paz I para el periodo 2014-2020. Es con esta serie de datos con la cual se pretende calibrar los umbrales de alerta para la zona de La Paz, San Ramón, Alajuela. A continuación, en el cuadro 28 se hace muestra de los umbrales establecidos para la alarma del SAT.

**Cuadro 28.** Umbrales de alerta establecidos para la alarma del SAT utilizando la simbología del CNE; para el área de La Paz, San Ramón, Alajuela.

Minutos	Umbrales de alerta (mm/min)		
5 (V)	7.89 (V)	10.00 (V)	14.76 (V)
10 (V)	14.76 (V)	18.08 (V)	21.40 (A)
15 (A)	21.40 (A)	24.34 (A)	27.27 (N)
20 (N)	27.27 (N)	29.81 (N)	32.36 (R)
25 (R)	32.36 (R)	Mayores a 32.36 mm (R)	

Nota: Para la categorización de alerta se agrega la inicial de cada color en la celda donde V: verde, A: amarillo, N: naranja y R: rojo.

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Estos umbrales (cuadro 28) se clasificaron bajo la metodología de semáforo, donde el color verde indica una alerta leve (un aviso de que empezó el evento), amarillo una alerta de precaución (que el evento comenzó a aumentar su intensidad, por ende, la amenaza aumenta), naranja indica que ya se tiene que comenzar con el protocolo y el color rojo que ya todo mundo tiene que evacuar la zona.

Para obtener los umbrales de Piedra Bruja, en los cuadros 29, 30 y 31 se puede observar los intervalos para la calibración utilizado en los umbrales de precipitación a partir de las curvas PDF y la media en precipitaciones, además se separan el tiempo acumulado de los 5 a 25 minutos de los 30 minutos registrados para que el valor a los 30 minutos determine el estado final de la alerta.

**Cuadro 29.** Cuadro de peligro de las precipitaciones en el intervalo de 30 minutos dependiendo del periodo de retorno, utilizando la simbología del CNE.

Periodo de retorno (Años)	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
Tr (1.14)	7.35	14.00	19.23	23.98	27.99	32.17
Tr (1.33)	8.22	15.63	21.51	26.90	31.63	36.43
Tr (1.6)	8.97	17.02	23.46	29.39	34.74	40.07
Tr (2)	9.72	18.42	25.41	31.90	37.85	43.71
Tr (2.67)	10.55	19.99	27.60	34.70	41.34	47.80
Tr (4)	11.61	21.97	30.37	38.23	45.74	52.95
Tr (8)	13.27	25.06	34.69	43.77	52.63	61.02

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Cuadro 30. Cuadro de peligrosidad de la precipitación acumulada de los 5 a 25 minutos, utilizando la simbología del CNE.

Tiempo (min)	Precipitación acumulada (mm)	Color de peligrosidad de la alarma
5	7	VERDE
	8	
	9	
	10	
	11	
	12	
	13	
10	14	
	16	
	17	
	18	AMARILLA
	20	
22		
25		
25		
15	28	NARANJA
	30	
	30	
20	38	ROJA
	40	
25	40	
	50	

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Cuadro 31. Cuadro de estado final de la alarma a los 30 minutos de precipitación acumulada.

	Precipitación acumulada (mm)	Color de peligrosidad de la alarma
Estado final de la alerta a los 30 minutos	32	VERDE
	36	
	39	
	40	AMARILLO
	47	NARANJA
	50	ROJO
	≥60	

Fuente: Elaboración propia, 2022.





### 6.1.3 Propuesta de protocolo SAT

Como parte de los objetivos establecidos en el presente proyecto, se tiene el elaborar una propuesta de protocolo SAT para cada uno de los sitios sujeto de estudio. No obstante, resalta la necesidad de aclarar ciertos aspectos considerados por los autores de este proyecto en relación con las propuestas de protocolo SAT realizadas. A continuación, se hace muestra de es estos aspectos:

1. Ambas propuestas de protocolos SAT están orientadas a la definición de los pasos a seguir al momento de activarse el SAT.
2. Se elaboró mediante la metodología de colores de amenaza de la CNE y se adecua con la información recopilada para cada zona sujeto de estudio (ver cuadros 28, 30, 31).
3. Es una propuesta de protocolo preliminar, ya que como se mencionó anteriormente, hace falta la etapa tres para la elaboración de SAT (para más detalle ver sección 6.2.1).
4. Por último, falta la realización de simulacros para corroborar si los umbrales de alerta se adaptan al comportamiento de las tormentas de cada una de las zonas sujeto de estudio.





Aclarado estas consideraciones, se procede a hacer muestra de las propuestas de protocolo SAT para cada una de las zonas sujeto de estudio (cuadros 32 y 33).

Cuadro 32. Resumen de la propuesta de protocolo SAT para funcionarios del AyA de la Planta Potabilizadora, La Paz y Unidad Cantonal de San Ramón.

Tipo de Alerta	Condición de Alerta	Descripción	Acciones operativas
Informativa 	Verde (7.89 a 21.39 mm/min en un lapso de 5 a 10 min)	La estación meteorológica “La Paz I” registra un evento (precipitación) que sugiere una potencial amenaza de evento hidrometeorológico extremo; y notifica al jefe técnico sobre esto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vigilar el desarrollo del evento.</li> <li>• Informar al jefe técnico.</li> <li>• Consultar al técnico/operador su posición.</li> </ul>
Preparación 	Amarilla (21.40 a 27.26 mm/min en un lapso de 10 a 15 min)	El evento incrementa su intensidad, por ende, la amenaza aumenta. Se procede a solicitar nuevamente la posición del técnico/operador, esperar respuesta de este, sino activar sirena. El técnico/operador debe estar o desplazarse hacia la planta potabilizadora a esperar indicaciones.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vigilar el desarrollo del evento.</li> <li>• Solicitar ubicación al técnico/operador.</li> <li>• Evaluar la posibilidad de ir a la planta (en caso de no tener respuesta y si las condiciones lo permiten).</li> </ul>
Movilización o contención 	Naranja (27.27 a 32.35 mm/min en un lapso de 15 a 20 min)	El evento incrementó su intensidad a tal punto que es probable la ocurrencia del evento hidrometeorológico extremo (avenida/crecida). Por lo que se solicita a todos los funcionarios presentes en la planta potabilizadora evacuar según las rutas de evacuación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evacuación preventiva del personal de la planta potabilizadora.</li> <li>• Activar Sirena.</li> <li>• Vigilar el desarrollo del evento.</li> <li>• Planificación de las operaciones para asegurar que todos abandonaron la planta potabilizadora.</li> </ul>
Respuesta 	Roja ( $\geq 32.36$ mm/min en un lapso de 20 a 25 min)	En esta etapa la amenaza se ha materializado y generó consecuencias graves en la zona. Por lo cual, se procede a verificar si todos los funcionarios presentes en la planta lograron evacuar con éxito hacia el plantel. Se comienza a monitorear el evento y registrar daños durante y post el evento.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificar el éxito de la evacuación.</li> <li>• Monitorear el desarrollo del evento.</li> <li>• Esperar que el evento termine (sea seguro) e ir a campo a evaluar y registrar daños.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia, 2022 a partir de CNE, 2022.

Cuadro 33. Resumen de la propuesta de protocolo SAT para funcionarios del AyA de la Planta Potabilizadora, Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.

Tipo de Alerta	Condición de Alerta	Descripción	Acciones operativas
Informativa 	Verde (7 a 17 mm/min en un lapso de 5 a 10 min)	La estación meteorológica “Piedra Bruja” registra un evento (precipitación) que sugiere una potencial amenaza de evento hidrometeorológico extremo; y notifica al jefe técnico sobre esto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vigilar el desarrollo del evento.</li> <li>• Informar al jefe técnico.</li> <li>• Consultar al técnico/operador su posición.</li> </ul>
Preparación 	Amarilla (18 a 25 mm/min en un lapso de 10 a 15 min)	El evento incrementa su intensidad, por ende, la amenaza aumenta. Se procede a solicitar nuevamente la posición del técnico/operador, esperar respuesta de este, sino activar sirena. El técnico/operador debe estar o desplazarse hacia la planta potabilizadora a esperar indicaciones.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vigilar el desarrollo del evento.</li> <li>• Solicitar ubicación al técnico/operador.</li> <li>• Evaluar la posibilidad de ir a la planta (en caso de no tener respuesta y si las condiciones lo permiten).</li> </ul>
Movilización o contención 	Naranja (28 a 30 mm/min en un lapso de 15 a 20 min)	El evento incrementó su intensidad a tal punto que es probable la ocurrencia del evento hidrometeorológico extremo (avenida/crecida). Por lo que se solicita a todos los funcionarios presentes en la planta potabilizadora evacuar según las rutas de evacuación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evacuación preventiva del personal de la planta potabilizadora.</li> <li>• Activar Sirena.</li> <li>• Vigilar el desarrollo del evento.</li> <li>• Planificación de las operaciones para asegurar que todos abandonaron la planta potabilizadora.</li> </ul>
Respuesta 	Roja (38 a > 50 mm/min en un lapso de 20 a 25 min)	En esta etapa la amenaza se ha materializado y generó consecuencias graves en la zona. Por lo cual, se procede a verificar si todos los funcionarios presentes en la planta lograron evacuar con éxito hacia el plantel. Se comienza a monitorear el evento y registrar daños durante y post el evento.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificar el éxito de la evacuación.</li> <li>• Monitorear el desarrollo del evento.</li> <li>• Esperar que el evento termine (sea seguro) e ir a campo a evaluar y registrar daños.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia, 2022 a partir de CNE, 2022.

## 6.2 Discusión de resultados

### 6.2.1 *Componentes y contexto de los SAT en Costa Rica*

A partir de los resultados obtenidos referente a componentes y contexto de los SAT para Costa Rica, se logró determinar que para establecer un SAT ante eventos hidrometeorológicos extremos en las zonas sujeto de estudio (La Paz, San Ramón, Alajuela y Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas), el desarrollo de estos debe elaborarse en cuatro etapas tal y como se puede apreciar en la figura 13 y cuadro 13. Dichas etapas son:

- 1- Conocimiento de los riesgos.
- 2- Seguimiento y alerta.
- 3- Difusión y comunicación.
- 4- Capacidad de respuesta.

Ahora bien, trasladando dichos requerimientos de cada una de estas etapas para el desarrollo de los SAT en cada una de las zonas sujeto de estudio, se tiene que el alcance de este estudio no logra completar cada una de estas cuatro etapas. Las etapas principales para tratar fueron la primera correspondiente al conocimiento de los riesgos y el segundo referente al seguimiento y alerta.

En lo que respecta a la primera etapa (conocimiento de los riesgos) se tiene que esta fue completada en su totalidad basándose en las consideraciones reflejadas en el cuadro 13, ya que fue posible la determinación de los peligros y amenazas en cada uno de los sitios de estudio; estos fueron mencionados en las secciones 2.1.1.1 y 2.1.2.1. Se tiene que la amenaza radica en las precipitaciones que se presentan, las cuales al alcanzar cierta intensidad ya sugiere un peligro para los operadores de la zona. Dichos peligros serían las crecidas/avenidas/inundaciones las cuales atenten contra la vida de los operadores y la infraestructura de las plantas potabilizadoras.

Cabe resaltar que, como parte de esta primera etapa, las otras consideraciones reflejadas en el cuadro 13 también fueron determinadas donde se tiene una clara alteración antropogénica por medio de la infraestructura correspondiente a las tomas superficiales y las plantas potabilizadoras; de las cuales la que mayor vulnerabilidad presenta es la ubicada en Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas; la cual inclusive ya ha sufrido daños debido a eventos hidrometeorológicos extremos. Caso contrario a la localidad de La Paz, San Ramón, Alajuela; donde se ha registrado eventos de las magnitudes registradas en Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas; sin embargo, la amenaza y peligro es el mismo y el contar con el equipo (estación hidrometeorológica) el cual registre información de la amenaza para su posterior análisis, permite establecer un SAT bajo una perspectiva preventiva en vez de proactiva como es habitual en el reaccionar humano.

Mientras a lo que respecta a la recolección sistemática y análisis de datos, se tiene que esta es la parte más importante de esta etapa, ya que a partir de aquí se va recopilando la información de la amenaza (precipitación) que pueda ocasionar los desastres a raíz de los eventos que esta amenaza ocasione, para así poder analizarlos y comprenderlos de una mejor manera. Sin embargo, se topó con el inconveniente de que a la fecha de realizado este estudio el registro de datos con el que cuenta las estaciones dentro de cada una de las zonas sujeto de estudio, es muy limitado. No obstante, estos fueron utilizados ya que se espera que estas estaciones sean el equipo central de los SAT a implementar debido a su ubicación dentro de las plantas potabilizadoras.

A lo que respecta de la segunda etapa, el desarrollo de esta pudo ser abarcado en su totalidad. Esto se determinó partiendo de las consideraciones que contempla dicha etapa que se encuentran reflejadas en el cuadro 13, de las cuales se cuenta con una de gran

importancia que es el equipo de monitoreo las 24 horas del día (las estaciones hidrometeorológicas). Así mismo, se cuenta con la parte científica/técnica encargada del pronóstico a cerca de la posibilidad remota del evento en cuestión; que para el caso del presente proyecto se ve reflejado en los umbrales de alerta determinados para cada sitio sujeto de estudio (Ver secciones 6.1.2.8). Dichos umbrales son del conocimiento para el ente encargado de gestionar el SAT, AyA, quienes se encargarán de emitir la alertar y activar los protocolos correspondientes.

En lo que concierne a la tercera etapa, difusión y comunicación, esta no fue contemplada en el presente estudio debido a que requiere la incorporación de un profesional en el área de programación y telecomunicaciones el cual se encargue de enlazar los umbrales de alerta de precipitación, determinados para cada sitio de estudio (Sección 6.1.2.8) dentro de los registros de cada una de estaciones seleccionadas para posteriormente emitir la alerta al ente encargado de gestionarla por el medio de comunicación seleccionado. Cabe resaltar, que tampoco se contempló el buscar dicho profesional debido a que el ingeniero y jefe de la gestión de riesgo del AyA José Pablo Bonilla Valverde, indicó en una reunión efectuada el 27 de julio de 2022 que él requiere los umbrales de alerta con los cuales va a operar el SAT, ya posterior a la determinación de esto la institución AyA se encargará de brindarle dicha información al profesional en programación y telecomunicaciones para poner en marcha esta etapa (Bonilla 2022, per. com; 27 julio).

En cuanto a la última etapa, capacidad de respuesta, esta fue abarcada de manera parcial debido a que no fue posible cumplir con consideraciones tales como la divulgación de los protocolos, trabajos en conjunto con la comunidad beneficiada con SAT en términos de concientización del riesgo, la realización de simulacros, entre otros que fueron detallados en el cuadro 13. Sin embargo, se obtuvo un gran avance elaborando una propuesta de protocolo a seguir al momento de activarse la alarma; dicho protocolo puede apreciarse en la sección 6.2.3 del presente documento.

## 6.2.2 Análisis de datos de precipitación y determinación de umbrales de alerta

### *6.2.2.1 Selección de tiempo de concentración ( $T_c$ ) como tiempo final de la alerta:*

Tal y como se hizo mención en el apartado de resultados, los parámetros morfométricos de los tramos de las subcuencas de las áreas de estudio resultan un factor clave dentro del contexto que conlleva el presente proyecto. Ya que recapitulando el propósito principal de este proyecto es el de proponer un sistema de alerta temprana ante eventos hidrometeorológicos extremos en cada una de las zonas sujeto de estudio (La Paz, San Ramón, Alajuela y Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas). Por lo cual resulta indispensable conocer dichos parámetros para estimar el comportamiento del evento precipitación-escorrentía.

Para lograr cumplir con dicho propósito, se tomó como punto de partida para los análisis correspondientes, el parámetro correspondiente al tiempo de concentración ( $T_c$ ). Dicho parámetro fue seleccionado ya que, este representa el tiempo que le toma a una gota de lluvia, al momento de precipitar, desplazarse de la zona más alejada de la cuenca al punto de cierre de esta (estación/punto de aforo) considerando factores geográficos y topográficos (Villón, 2015).

Bajo esta definición del tiempo de concentración, es que se estableció dicho parámetro como parte integra del SAT, más específicamente como tiempo límite con el cual trabajará la alerta, para poder determinar los posibles umbrales de alerta en función de este tiempo. Ahora bien, para la obtención de dichos parámetros existen varias maneras como es el uso de trazadores, características hidráulicas de la cuenca, estimando velocidades y/o mediante el uso fórmulas empíricas (Villón, 2015). Para el caso del presente proyecto, el método

utilizado fue el uso de fórmulas empíricas. A continuación, se hace muestra de los resultados obtenidos para cada fórmula.

#### La Paz, San Ramón, Alajuela

Tal y como se pudo apreciar en cuadro 19, se obtuvo cuatro diferentes tiempos de concentración los cuales varían de gran manera en cuanto a los tiempos obtenidos, lo cual demuestra que el uso de fórmulas empíricas puede ocasionar inconsistencias en cuanto a la determinación de este parámetro. No obstante, el uso de métodos de campo para determinar este parámetro como lo es el uso de trazadores fue imposible de implementar debido a términos económicos y de distancia entre los autores de este proyecto y la zona de estudio.

Dado este panorama, se optó que para lo que concierne el sitio de estudio de La Paz, San Ramón, Alajuela; el tiempo de concentración seleccionado fue el obtenido con el método de Kirpich de 23.74 minutos, el cual fue redondeado a 25 minutos en función de que las mediciones bajo las cuales trabaja la estación hidrometeorológica de la zona son de lecturas de precipitación cada cinco minutos. Esto debido a ser el método más conservador e implementado en cuencas pequeñas; a su vez que al dar el tiempo de concentración menor nos brinda un margen de calibración óptimo, ya que si se utiliza tiempos de concentración muy prolongados cabe la posibilidad que al ser cuencas tan pequeñas el evento se materialice y la alerta no cumpla su cometido.

#### Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.

A partir de los datos obtenidos del cuadro 1, vemos que la cuenca es de un área bastante pequeña de 2.48 km<sup>2</sup>, la definición que utilizamos de cuenca pequeña es aquella que su área es menor a 250 Km<sup>2</sup> (Villón, 2015), además estas cuencas responden más a intensidades fuertes en pequeños periodos de tiempo y que las condiciones físicas del suelo son de mayor relevancia que las del cauce (Villón, 2015). Debido a las condiciones físicas del suelo, la morfología de la cuenca, el evento analizado y principalmente al tiempo de concentración de la cuenca, se decidió hacer el análisis de activación de la alarma para un tiempo de 1 hora como máximo.

En lo que concierne a la determinación del tiempo de concentración para esta área de estudio (Piedra Bruja, Jacó), se optó por seleccionar la media de las cuatro metodologías reflejadas en el cuadro 20. Esto debido a que los resultados obtenidos fluctuaron desde los 13 minutos hasta los 46 minutos (cuadro 20), resultando así en un tiempo de concentración aproximado de 30.24 minutos, siendo este a su vez el tiempo de activación con el que operará el SAT para esta zona de estudio con una incertidumbre de 13 minutos.

##### *6.2.2.2 Selección de días con precipitación máxima horaria (PMH):*

Tal y como se mencionó en la sección de resultados, para ambas zonas sujeto de estudio se tomó como datos de precipitación, para realizar los análisis pertinentes, aquellos días (dentro del registro disponible para cada una de las estaciones seleccionadas) en los cuales se presentará la máxima intensidad en el periodo de tiempo de una hora. Esto se hizo, debido a que de contemplar la intensidad máxima en 24 horas o los días con precipitación máxima diaria (PMD), se estaría omitiendo momentos del día en los cuales se podría activar la alarma.

Lo anterior se deduce en función a dos aspectos, el primero el área de las zonas de estudio, las cuales son de poca extensión territorial (km<sup>2</sup>) lo cual aunado del segundo aspecto el tiempo de concentración (Tc), resulta en tiempos de respuesta muy limitados bajo los cuales se deban de tomar acciones al momento de poner en marcha los protocolos de cada una

de las zonas sujeto de estudio. Por lo cual, el extraer la precipitación máxima horaria brinda un panorama más a detalle, cada cinco minutos, del comportamiento del evento en estudio y así poder establecer umbrales de alerta mucho más certeros.

En lo que respecta a la zona de estudio de La Paz, San Ramón, Alajuela; se tiene a que a diferencia del sitio de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas; la estación hidrometeorológica de la zona no ha registrado un evento a magnitudes que haya expuesto en riesgo la vida de los operarios de la planta potabilizadora o la integridad de la misma infraestructura, dicho panorama (no registros de eventos hidrometeorológicos extremos dentro del área de estudio) fue corroborado de igual manera por el operador de la planta potabilizadora que lleva más de 20 años trabajando en la zona el señor Carlos Arias el día que se realizó la gira de campo; y por el ingeniero a cargo de la zona, el cual mencionó que “debido a la topografía de la zona de estudio es poco probable un desbordamiento del río La Paz dentro de área de estudio delimitada” (Ulate, 2022, per. com; 09 noviembre).

Por lo anteriormente mencionado, se determinó que no se cuenta con un evento sobre el cual guiarse para establecer los umbrales con los cuales trabajaría la alarma del SAT. No obstante, se implementó el mismo principio de extraer del periodo seleccionado del registro de datos de la estación “La Paz I” los PMH de cada año, obteniendo así los resultados reflejados en el cuadro 17, y a partir de estos procederes a la generación de periodos de retorno y las tormentas que cada uno de estos periodos trae consigo.

Para la zona Piedra Bruja, Jacó; a partir de entrevistas realizadas a los operadores de esta planta potabilizadora y al Ingeniero Civil encargado de supervisar el área, Bernald Sancho, oficialmente se tiene registro de la inundación ocurrida el día 23 de agosto del 2021 (Sancho, 2022, per. com; 25 mayo), por lo tanto, se analizó el día del evento como se comportó la tormenta, estos análisis se pueden observar con el hietograma del día en la figura 15 y la curva de doble masa en la figura 16.

Cabe resaltar, que del registro de PMH seleccionado para la cuenca de Piedra Bruja, Jacó (cuadro 18); se encontró que el día 15 de noviembre del 2015 se presentó una tormenta con un comportamiento similar a la del día 23 de agosto del 2021. Lo cual, da indicios que pudo haber ocurrido una inundación. Esta hipótesis fue corroborada el día de la gira donde al consultar al ingeniero Bernald Sancho comentó que “efectivamente ese día se presentó un evento hidrometeorológico extremo. Sin embargo, no se cuenta con informes o más información referente a este evento (del 15 de noviembre del 2015) ya que esta se extravió de la base de datos del AyA debido a que hubo cambios de personal (Sancho, 2022, per. com; 25 mayo).

Por lo anterior, referente a la falta de información del evento del 15 de noviembre del 2015, se optó a trabajar y calibrar los umbrales de alerta para esta zona de estudio con los registros del evento ocurrido el 23 de agosto del 2021 ya que, son más recientes y se cuenta con más información acerca del desarrollo y los daños que generó este evento hidrometeorológico extremo.

#### *6.2.2.3 Análisis de los PMH seleccionados:*

Como parte importante del análisis realizado, se tiene que mencionar el cómo se obtuvo los resultados reflejados en el cuadro 24 y 25 para el caso de La Paz, San Ramón, Alajuela y el cuadro 26 y 27 para la localidad de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.

Para la obtención de dichos resultados, lo que se realizó fue el contemplar todas las combinaciones posibles de precipitación para cada día seleccionado en intervalos de cada 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600,

660, 720, 780, 840, 900, 960, 1020, 1080, 1140, 1200, 1260, 1320, 1380, 1440 minutos a lo largo del día a partir del registro de cada una de las estaciones seleccionadas tanto para la zona de La Paz, San Ramón como la zona de Piedra Bruja, Jacó. Estas combinaciones se efectuaron en agrupaciones de “x” cantidad celdas de precipitación en cinco minutos, para igualar uno de los intervalos mencionados anteriormente (por ejemplo: agrupar y sumar tres celdas de los datos disponibles de precipitación cada cinco minutos, resulta en el valor de precipitación para quince minutos).

Cabe resaltar que las agrupaciones efectuadas para cada uno de los intervalos mencionados no fueron elaboradas de manera horaria continua. Ya que se procedió a contemplar dentro del análisis realizado, que a partir de una agrupación para un mismo intervalo de tiempo se da el inicio de otra agrupación. Por ejemplo, para las agrupaciones cada diez minutos se tiene que partiendo de las 00:00:00 del día a las 00:10:00 del día se tiene la primera agrupación, la segunda agrupación corresponde de las 00:05:00 a las 00:15:00 del día y así sucesivamente para este y todos los intervalos de tiempo mencionados anteriormente. Esto se realizó de esta manera debido a que los eventos en estudio (precipitaciones) no poseen un comportamiento como tal el cual se adecue a un tiempo determinado, es decir un evento puede empezar a el día anterior y presentar su máxima intensidad hasta el día siguiente.

Por ende, las combinaciones efectuadas en dichos intervalos permiten contemplar las intensidades máximas de cada uno de los intervalos planteados para cada día en estudio. Esto resulta de vital importancia ya que, tanto los umbrales de alerta como las estaciones meteorológicas para cada uno de los sitios de estudio funcionan en intervalos de cinco minutos, y dichas combinaciones al brindan un panorama más certero sobre el desarrollo de los eventos en estudio.

#### *6.2.2.4 Periodos de retorno obtenidos (T):*

Tal y como se ve reflejado en la sección de resultados, el insumo principal para la determinación de los umbrales de alerta radica en las series de datos anuales de precipitación cada cinco minutos disponibles en cada una de las áreas sujeto de estudio; debido que a partir de esta información se pudo estimar los diferentes comportamientos de las tormentas obtenidas para los periodos de retorno obtenidos.

Dado la anterior premisa, se tiene que la decisión de estimar diferentes periodos retorno fue fundamentada bajo lo mencionado por Villón (2015) que destaca la importancia de los periodos de retorno en materia de análisis hidrológicos, debido a que estos permiten proyectar un posible periodo en el cual un evento de interés, que para el presente caso son los eventos hidrometeorológicos extremos, vuelva a manifestarse.

Para esto, se hizo uso del método de Weibull el cual según Chow (2014) es el método más utilizado al momento de trabar con series máximas anuales, por lo cual es el método que calza bajo la línea de trabajo que se lleva en el presente proyecto. Los resultados obtenidos de la aplicación de este método se reflejan en el cuadro 22 para la zona de La Paz, San Ramón, Alajuela y en el cuadro 23 en el caso de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.

#### *6.2.2.5 Hietogramas y curvas de doble masa de las PMH para análisis de tormentas PMH*

Como se mencionó anteriormente se seleccionó el día 23 de agosto del 2021 para hacer el análisis de la tormenta, como se puede ver la figura 15 las precipitaciones comenzaron a los 900 minutos del día, concretamente a las 3 p.m., las intensidades de la lluvia se mantienen en un rango no mayor a 27.4 mm/hora desde que inició a llover en el día hasta 6 p.m. del día. Sin embargo, la mayor cantidad precipitación del día se concentró a las 7

p.m., donde se registró una intensidad de 108.5 mm/hora. Se puede verificar en la curva de doble masa del día, en la figura 20 que la lluvia acumulada del día pasa de 56 mm durante todo el día, hasta 164.5 mm desde las 6 p.m. hasta las 7 p.m., terminando con una precipitación de 190.8 mm durante todo el día.

Analizando los días con mayor precipitación por año se calculó que el día con mayor precipitación fue el día 4 de octubre del 2018, con una precipitación total del día de 244.4 mm en el día. Sin embargo, como se puede observar en el anexo 8, el hietograma del día muestra como las intensidades de la lluvia por hora no superaron los 30 mm/hora, además no se posee registro que este día ocurriera alguna inundación. El análisis de los hietogramas de los días 4 de octubre del 2018 y 21 de agosto del 2021, además analizando la curva de doble masa en el anexo 9, se observa como el incremento de la precipitación acumulada es gradual, a diferencia de la figura 15 donde la mayor cantidad de precipitación se acumuló en un periodo corto de tiempo, del minuto 1080 al 1140. Estos datos muestran que la cantidad total del día no indica que se generará una inundación, sino la intensidad de precipitación en periodo corto de tiempo, siendo una hora el tiempo donde se puede generar la inundación en la cuenca Piedra Bruja.

Se pueden observar similitudes de hietograma y la curva de doble masa día del evento como del día 15 de noviembre del 2015, teniendo una intensidad de 108.7 mm/hora a las 7 p.m., la curva de doble masa muestra como el acumulado del día pasó del 41.4 mm hasta las 6 p.m. a 150.1 mm a las 7 p.m., sin embargo, no se puede asegurar que este día ocurrió inundación debido a que la información no fue corroborada por los que operan la planta potabilizadora.

#### 6.2.2.6 *Análisis de datos.*

##### a. Con los PMH extraídos del registro.

Para el análisis de datos se seleccionaron las precipitaciones máximas horarias, normalmente este procedimiento se realiza con las precipitaciones máximas diarias para cada año de análisis, pero debido a la morfología de las cuencas de estudio, además de que según en el análisis realizado del hietograma del evento en Jacó, se observó que la intensidad que provoca la inundación es aproximadamente 100 mm en una hora, por esto se estableció este tiempo para hacer el análisis de frecuencia y determinar el tipo de distribución para los datos de precipitación obtenidos.

##### b. Uso de Hydrognomon para el cálculo de Pruebas bondad Smirnov-Kolmogorov y chi cuadrado.

Para este apartado, se tiene el uso del software Hydrognomon con la finalidad de determinar la distribución de mejor ajuste para los datos PMH seleccionados para cada sitio sujeto de estudio. Dentro del ámbito de la hidrología se tiene que los tipos de distribución mayormente implementadas son la Normal, Log-normal de 2 o 3 parámetros, Gamma de 2 o 3 parámetros, Log-Pearson tipo III, Gumbel y log-Gumbel (Villón, 2006). Por lo cual, para las pruebas de bondad y el análisis de frecuencia realizados, solo se tomaron en cuenta estas distribuciones más utilizadas en el campo de la hidrología, los cuadros de anexos 4 y 5, se puede observar que en el caso de los PMH de la estación de Piedra Bruja se ajustan con las pruebas de bondad de Kolmogorov-Smirnov y Chi-cuadrada como las distribuciones que mejor se ajustan son los Log-Pearson tipo III, Pearson tipo III, Log-normal, Exponencial, Gamma y Gumbel, mismo escenario se tiene para la estación La Paz, donde por ambos métodos refleja el ajuste de los datos con estas distribuciones.

##### c. Distribución de Gumbel.

Para saber cuál utilizar se realizó una inspección visual de todas las distribuciones y se compararon con la distribución de los PMH durante el tiempo, este análisis se puede

observar en la figura 17, se determinó que la distribución que mejor se ajusta es la Gumbel, además, la distribución más utilizada para eventos extremos es la de Gumbel (Chow, Maidment y Mays, 1994), por lo tanto, es la que mejor se ajusta al estudio de la tormenta.

#### *6.2.2.7 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) y Curvas Precipitación-Duración-Frecuencia (PDF).*

Las curvas IDF-PDF para la estación de La Paz se puede observar en las figuras 18 y 19 en intervalos de tiempo durante las 24 horas del día, en las figuras 20 y 21 se puede ver las curvas IDF-PDF de la estación de Piedra Bruja. Las curvas IDF-PDF representan el comportamiento de la precipitación durante varios periodos de retorno, estos datos nos permiten visualizar el comportamiento de una tormenta durante un periodo de retorno dado, a su vez, poder calcular la probabilidad de que este fenómeno se repita en el periodo de tiempo estimado o que no ocurra, los eventos con periodos de retorno mayores significan un nivel de riesgo mayor a los periodos de retorno menor, sin embargo, su probabilidad de ocurrencia es menor.

Por lo cual, con la obtención de estos resultados la determinación de los umbrales de alerta para cada una de las zonas de estudio resultó más sencilla de establecer en función de considerar las tormentas que potencialmente signifiquen una amenaza y desestimar aquellas que no lo sean, para que así los rangos de la alerta sean funcionales y no un mecanismo que entorpezca las funciones diarias de los funcionarios llevando a cabo el respectivo protocolo con falsas amenazas.

#### *6.2.2.8 Periodo de una hora en las curvas IDF-PDF.*

Por lo general, en lo que concierne a proyectos de índole hidrológica lo habitual es evaluar el comportamiento del evento en estudio en función de un rango de tiempo determinado por el encargado del estudio; esto con la finalidad de considerar como el evento se va desarrollando en el lapso establecido para así poder tomar acciones de contingencia contra el mismo mediante tiempos de respuesta que permitan mitigar daños o bien diseñar obras de infraestructura capaces de hacerle frente a dicho evento (Burbano y Zamara, 1996).

Por lo cual, retomando los resultados obtenidos referente a las curvas IDF y PDF de las zonas sujeto de estudio (figuras 18, 19, 20 y 21) los cuales se encuentran graficas en función de 24 horas del día, se optó por delimitarlas a una hora partiendo de la premisa del corto periodo de concentración que cuenta cada zona de estudio y que el estudio hidrológico fue elaborado en función de las precipitaciones máximas horarias (PMH) obteniendo así los resultados reflejados en las figuras 22, 23, 24, 25.

Retomando lo elaborado, se tiene que de los resultados reflejados en las figuras 18 y 19 se puede apreciar el comportamiento de las precipitaciones para diferentes tiempos de retorno para la zona de La Paz, San Ramón, Alajuela en función de las curvas IDF y PDF obtenidas. Sin embargo, la comprensión de estas no es muy clara para el rango de 24 horas, más aún cuando el tiempo sobre el cual se basa la alerta comprende un rango hasta los 25 minutos delimitado por el tiempo de concentración; es por esto por lo que se decidió graficar nuevamente los resultados obtenidos hasta la primera hora (60 minutos) de los eventos derivados de los periodos de retorno obtenidos resultando así en las curvas IDF y PDF reflejadas en las figuras 22 y 23 respectivamente. Misma delimitación fue realizada para los resultados obtenidos en la zona de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas, los cuales se pueden apreciar en figura 24 y 25.

#### 6.2.2.9 Umbrales de Alerta

##### Umbrales de Alerta La Paz, San Ramón, Alajuela

En lo que corresponde a los umbrales de alerta para la zona de La Paz, San Ramón, Alajuela. Se tiene que estos fueron determinados a partir del promedio obtenido de los días con mayor PMH seleccionados (cuadro 17). Para corroborar si este promedio establecido como la guía sobre la cual basar los umbrales de alerta, se procedió a graficar este promedio en conjunto con las diferentes tormentas obtenidas para los periodos de retorno obtenidos (figura 26).

De dicho resultado (figura 26) se pudo observar como este promedio se ajusta en el centro de la gráfica (la línea verde fosforescente de la figura 26); lo cual se traduce en un buen indicio sobre el cual partir, ya que este promedio estaría delimitando los eventos de mayor significancia por encima de esta correspondientes a los periodos de retorno de 2.67, 4 y 8 años, dichos años serían los que representan mayor riesgo debido a que son los que poseen una mayor intensidad en los rangos de tiempo delimitados. A su vez, se tiene que dicho promedio excluye los periodos de retorno correspondientes a los años de 1.14, 1.33, 1.6 y 2 años ya que estos presentan un valor de precipitación en los rangos establecidos menor al del promedio; esto se traduce a que son eventos de menor significancia que no muestran mayor riesgo de evento hidrometeorológico extremo, por lo cual no activarían la alarma.

Otro aspecto de vital importancia, dentro de los filtros realizados para la determinación de los umbrales de alerta de la zona de estudio correspondiente a La Paz, San Ramón, Alajuela; fue el de seleccionar de todo el registro disponible en la estación La Paz I para el periodo de 2013-2021, aquellos días con una PMH mayor a 34.90 mm/hr este valor fue determinado a partir de que es el dato de PMH menor de los años seleccionados para los análisis del presente estudio para la zona de La Paz, San Ramón, Alajuela (ver cuadro 17).

La selección de estos días con PMH mayor a 34.90 mm/hr tiene como propósito el de determinar la efectividad de los umbrales de alerta; ya que se debe tener presente que al ser una alerta se debe contemplar que la activación de esta sea porque de verdad está ocurriendo un evento que puede significar una amenaza. Ahora bien, al aplicar esta selección se logró determinar que la alarma en el periodo comprendido del 25-07-2013 a 05-04-2020 se registró un total de 22 días con una PMH igual o mayor a 34.90 mm/hr.

##### Umbrales de Alerta Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.

Mediante el tiempo de concentración y las curvas PDF de una hora se establecen los umbrales de alerta, en la figura 27 se puede apreciar cómo se interpola el tiempo de concentración establecido con las curvas PDF. Debido a que la estación meteorológica ingresa los datos en precipitaciones y no en intensidades se utilizaran solo los datos de las curvas PDF, las curvas representaran el acumulado de precipitaciones para que se presentan en un periodo de retorno específico, el periodo de retorno de 8 años posee una precipitación acumulada en una hora mayor a los 100 mm, lo que como se observó en el hietograma de la figura 15 y la curva de doble masa en la figura 16 representaron el evento de inundación del día 23 de agosto del 2021, por lo que se establecen las precipitaciones de la curva con el periodo de retorno de 8 años como los valores de alerta roja.

El periodo de retorno de 4 años representa el acontecimiento del día 15 de noviembre del 2015, no obstante, como este día presentaron condiciones similares al 23 de agosto del 2021, se tomarán los valores de la curva en la figura 27 con el periodo de retorno de 4 años como un valor de alerta roja. Para establecer el rango de alerta naranja se utilizó el periodo

de retorno de 2.67 años, esto debido a que como se puede apreciar en la figura 27 este periodo supera a la media de los PMH que se utilizaron para hacer las curvas PDF, además de que estas precipitaciones pueden tener una intensidad de 80.59 mm/hora, lo que significa un peligro bastante elevado ya que está muy cercano a las precipitaciones generadas en el día del evento.

La alarma de color amarillo se estableció la más cercana a la media de los PMH graficados en la figura 27 pero no la supera, por lo que se escogió el periodo de retorno de 2 años para representar la simbología amarilla, ya que una precipitación acumulada en una hora de 73.21 mm puede representar una posible amenaza latente, no obstante, no escala el riesgo para evacuar. Por último, la alarma verde se les asignan a los periodos de retorno de 1.6, 1.33 y 1.44, ya que representan eventos con menos potencial de riesgo, no obstante, la probabilidad de su activación durante el año es de la más elevada, como se observa en el cuadro 23 ronda entre el 62.5% y 87.5%, por lo que es muy probable que estas alarmas se activen uno o más veces por año.

Como se mencionó anteriormente el periodo de retorno se utilizará para interpolar las curvas PDF y determinar el nivel de alerta, aunque el tiempo de concentración obtenido es de 30.09 minutos, para efectos prácticos se redondeará a 30 minutos. En el cuadro 29 se puede apreciar cómo se categorizó cada periodo de retorno según su nivel de amenaza, se seleccionaron los datos de 5 a 30 minutos debido al tiempo de concentración estimado.

Con el cuadro 30 se realizó la activación de la alarma acorde al tiempo y acorde a la precipitación acumulada en ese tiempo medido, primero se establece la precipitación mínima de activación, para ello se selecciona la precipitación menor de 5 minutos en el periodo de retorno de 1.14 años, para efectos prácticos del estudio y la activación de la alerta se redondea las precipitaciones, además que se ajustará a cada tipo de alerta que se accione progresivamente durante los 25 minutos.

En el cuadro 30 se observa como la alerta se acciona a partir de que la estación detecta una precipitación mayor o igual a 7 mm, a partir de aquí se comenzará a registrar el tiempo y la precipitación acumulada, dependiendo de qué fase temporal y la precipitación acumulada su color irá variando. Para el estado final de la alarma se utiliza la precipitación acumulada a los 30 minutos, este estado compara toda la precipitación acumulada en ese lapso de tiempo con los valores finales de 30 minutos que se ven en el cuadro 31, por lo que el estado final de la alarma evalúa cuanta precipitación se acumuló a los 30 minutos y verifica en cuál de las alertas se encuentra según su color, cabe recalcar que las acciones que debe tomar las personas en riesgo no deben esperar hasta el estado final de la alarma, sino que tomen la acción pertinente en el momento que se accione cada nivel alerta.

#### *6.2.2.10 Días hipotéticos que se hubiera activado la alerta. La Paz, San Ramón, Alajuela*

Se contempló aquellos días con la PMD anual para el registro de años disponibles en el periodo 2013-2020 para la estación La Paz I dando un total de siete días donde se podría haber activado la alarma (dos de estos siete días ya se incluyeron en la selección de PMH > 34.90 mm/hr, por lo cual se encontraron sólo cinco días nuevos donde se pudo activar la alarma); se omite el año 2021 ya que cuenta con datos hasta el mes de abril; lo cual hace alusión a la época más seca del año para esta zona donde no se registra precipitaciones con alta intensidad además de ser los meses con menor precipitación acumulada mensual. Por último, también se contempló evaluar aquellos días donde la estación registró en cinco minutos una precipitación igual o mayor a 7.89 mm ya que este es el rango con el cuál empieza a funcionar la alerta establecida encontrando así once días los cuales activan la

alarma y no cumplen con un PMH igual o mayor a 34.90 mm/hr y tampoco son días con PMD mensual y/o anual. A continuación, se hace muestra de los días en los cuales se pudo haber activado la alerta.

*Cuadro 34. Días de activación de la alarma y su activación dependiendo de la precipitación y el tiempo acumulado para el sitio de estudio de La Paz, San Ramón, Alajuela.*

<b>Total de días que sonó la alarma con su respectiva codificación según CNE</b>							
<b>Tiempo (minutos)</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>PMD (mm/día)</b>	<b>I máx 1 hr (mm/hr)</b>
<b>Umbrales de alerta (mm/min)</b>	<b>7.89</b>	<b>14.76</b>	<b>21.40</b>	<b>27.27</b>	<b>32.36</b>		
<b>Fecha</b>	<b>Umbrales de alerta (mm/min)</b>						
	<b>5 min</b>	<b>10 min</b>	<b>15 min</b>	<b>20 min</b>	<b>25 min</b>		
24/8/2013	9.5	17.7	24.5	25.8	30	70.5	44.1
4/9/2013	8.3	16.6	22.6	30.9	36.7	80.7	46.2
11/10/2013	12.1	22	31.7	41.3	51.2	149.9	84.6
28/10/2013	8.5	16.9	23.6	28.8	34.6	98.1	59.3
10/5/2014	3.4	6.3	7.8	8.8	12	73.1	15.7
11/9/2014	6.8	12.2	18.3	23.6	26.8	68.4	38
27/9/2014	8.2	14.9	16.9	22.6	24	39.2	30.9
17/10/2014	8.3	14.3	17.5	19.4	18.9	61.8	22.2
4/6/2015	8.8	13.6	19.6	20.7	21.4	25	21.6
8/8/2015	5.6	10.3	12	12.7	16.9	64.1	37.1
9/8/2015	6.8	12.5	18.7	24.4	22	45.6	35.9
10/8/2015	8.1	15.1	22.2	24	33.5	58.9	51.7
22/8/2015	8.7	17.4	23	29.4	34.8	89.4	62.9
21/9/2015	5.8	11.3	12.4	14.9	22	64.1	36.4
12/9/2016	6.6	12.7	18.2	21.2	24.5	60.4	44.5
26/9/2016	8.6	15	21.6	23.9	31.2	62.5	49.7
6/10/2016	8.2	13.5	21.7	21.6	25.7	81.3	40.9
<b>27/11/2016</b>	<b>1.8</b>	<b>3.6</b>	<b>4.9</b>	<b>6.3</b>	<b>7.8</b>	<b>103.3</b>	<b>13.7</b>
1/6/2017	8.3	10.8	13.7	19.1	20.8	34.4	30
31/7/2017	8.5	10.1	11.5	13.1	11.6	22.9	13.1
5/9/2017	5.9	11.8	17.1	16.9	18.9	43.4	37.6
14/9/2017	8.2	15	21.6	26.7	30.2	81	31.5
5/10/2017	4.5	7.8	9.1	12.1	13	183.6	22.3
24/5/2018	8.5	15.7	24.2	25.3	33.8	125.3	59.2
14/9/2018	8.3	15.2	21	24.3	22.9	87.3	47.5
<b>4/10/2018</b>	<b>1.4</b>	<b>2.6</b>	<b>3.8</b>	<b>4.9</b>	<b>5.8</b>	<b>135</b>	<b>13.5</b>
9/5/2019	8.3	12.2	15.8	19.7	17.6	35.5	27.2
5/6/2019	8.3	14.7	17.1	18.3	13.6	38.8	18.9
13/7/2019	7.6	12.8	18.1	19.6	21.1	61.7	34.9

Continuación del cuadro 34							
8/10/2019	8.1	15.7	21.4	24.6	21.7	53.6	29.3
5/6/2020	9.8	13.7	14.1	14.4	13.5	44.2	14.5
9/6/2020	8	13.7	15.9	26.4	28.2	61.9	46.3
21/6/2020	8.1	15.8	20.1	25.6	26.9	79.8	41.5
30/6/2020	9.3	16.9	23.9	32.3	37.7	68.1	47.3
20/7/2020	9.1	15.7	19.2	27.2	34.7	121.7	48.7
4/8/2020	9.9	19	16.3	26.2	27.8	48.4	31.2
28/8/2020	9.6	13.7	20.8	24.9	25.2	68.7	45.5
16/9/2020	10.1	20.2	27.7	37.8	43.9	62.5	46.5

Fuente: Elaboración propia, 2022.

De los filtros realizados para determinar los posibles días en los cuales la alarma pudo haberse activado (cuadro 34), se obtuvo que de los 38 días seleccionados únicamente dos días no lograron activar la alerta, estos son el 27/11/2016 y el 4/10/2018 (filas resaltadas en color gris); se resaltan estos días debido a que a pesar de ser días en los cuales se registró una precipitación acumulada en 24 horas mayor a 100 mm, 103.3 y 135.0 mm/día respectivamente. Lo anterior indica que el planteamiento basado en la selección de PMH fue la mejor opción para la determinación de los umbrales de alerta, ya que días muy lluviosos como estos (27/11/2016 y el 4/10/2018) no siempre significa que el evento se dio en un intervalo corto de tiempo, sino que este se dio de manera paulatina, brindando así el tiempo suficiente para que la cuenca drene dicha precipitación de manera eficiente evitando así eventos hidrometeorológicos extremos.

#### Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.

A continuación, se hará una representación de los días que se pudo accionar la alarma durante los 7 años de registro mediante esta metodología, además se indicará la precipitación total del día (PMD), la intensidad máxima que por hora del día que registra la estación y la intensidad en una hora a partir de que se accione la alarma.

*Cuadro 35. Días de activación de la alarma y su activación dependiendo de la precipitación y el tiempo acumulado.*

Fecha	Precipitación acumulada a partir de la activación de la alarma						PMD (mm/día)	I <sub>max</sub> 1hrs del día (mm/hr)	Intensidad de la alerta durante 1 hora (mm/hr)
	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min			
28/6/2015	7.2	9.2	10.1	11.6	12.1	12.2	25.5	18.9	12.5
29/6/2015	8.7	14.8	19.2	20.8	21.2	21.5	77.6	41.8	22.5
5/8/2015	7	16	17.3	17.3	17.4	17.4	24.1	24	17.4
9/9/2015	9.3	16.7	20.2	22.6	24.1	24.4	78.9	34.3	27.1
7/10/2015	7.4	11.2	15.1	18.7	22.8	25.6	54.7	35.5	28
18/10/2015	8.5	16.8	22.7	30.3	39.2	49	144.6	56.1	70.3

Continuación del cuadro 35									
6/11/2015	7.4	11.7	13.4	13.6	14	14.4	33.5	21.8	15.7
15/11/2015	7.2	13.9	22.4	34.5	43.3	52.3	164.9	108.7	108.7
17/11/2015	7.4	13.9	20.5	24.2	27.3	29.1	71.6	47.5	36.7
14/12/2015	8	12.5	17.2	18.3	18.7	18.7	32.5	32.1	18.8
24/5/2016	8.4	16	21	22.9	26.7	29.7	62.1	40.9	34.6
6/6/2016	8.9	20.1	26	34.7	41.9	49.4	97.2	47.9	77.5
20/7/2016	8.4	11.8	12.6	12.7	12.7	12.7	26.3	18.9	12.8
11/8/2016	8.2	16.5	19.7	21.1	21.6	22	52.4	33.4	27.4
17/8/2016	7.6	14.3	18.8	22	26.8	29	59.5	37	33.3
25/8/2016	8.2	17.2	23.5	25.4	25.7	25.8	50.3	26.7	26.7
30/8/2016	7.6	12.7	14.8	16.8	17.3	17.5	98.9	33.2	26.3
19/9/2016	7.1	12.5	15	16.4	17.5	18.2	28.4	18.4	22.2
25/5/2017	8.2	15	20.2	25.7	29.9	31.9	78	48.5	43.3
4/6/2017	7.8	15.1	20.4	23.8	24.4	24.5	62.7	31.9	24.5
9/6/2017	7.8	14.3	18.6	21.1	25.3	30.1	79	49	51.3
3/7/2017	10	18.4	26.6	33.3	41.7	50.9	108.9	37.2	68.8
3/7/2017	8.4	13.7	15.9	17.6	17.8	17.9	108.9	37.2	19.2
5/10/2017	8	10.7	12.4	14.2	14.9	15.3	196.3	29.2	17.4
13/11/2017	8	16.3	21.3	23.3	26.3	29.5	70.9	45	42.4
20/6/2018	7.1	13.2	17.9	20.1	23.4	28.8	65.5	38.5	40.9
28/6/2018	7.3	14.3	18.3	22	23.4	23.8	40.5	26.7	24
7/7/2018	8.1	13.7	18.1	20.1	20.6	21.1	37.5	33.4	21.7
27/7/2018	7.5	15.6	18	18.5	19.2	22.9	50.8	28.4	35.7
31/7/2018	7.5	18.2	30.1	35.7	38.4	43	75.8	55.1	47.4

Continuación del cuadro 35									
24/9/2018	7.1	12.1	16.5	19.9	22.3	23.7	53.5	36.5	25.6
11/10/2018	7	14.8	20.1	24.5	25.6	26.9	121	34.7	37
7/6/2019	7.7	13.8	14.9	15.3	15.6	16.4	30	20.9	16.7
30/8/2019	7.4	11.8	14.8	16	16.1	16.4	49.4	33.3	23.1
29/4/2020	8.2	14.5	16.3	16.7	17.5	17.5	27.4	25.3	17.5
17/5/2020	8	14.7	21.4	27.7	32.6	35.8	49.1	25.4	39.9
23/6/2020	7.6	13.3	17.5	25.6	33.7	40.3	106.5	66.8	70.6
29/6/2020	10	17.6	21.2	23.7	24.6	25	53.7	26.1	26.1
30/6/2020	7.1	15.5	22.3	29	33.6	38.7	69.9	59.4	47.1
26/7/2020	7.3	17.6	25.4	31.7	35.2	37.7	93.2	48.3	55.3
9/8/2020	11	20.3	25.4	27.1	28	28.8	39.7	37	30.7
24/8/2020	7.9	16	26.7	34.9	41.2	46.8	140.5	62	79.7
12/9/2020	7.5	14.5	19.3	22.1	25	26.6	90.1	39.1	30
28/9/2020	8.8	15	17.3	19.3	22.5	25.3	50	23.9	40.2
9/10/2020	7.6	12.5	20.3	26	27.9	30.1	77.1	58.5	33.4
24/10/2020	7	13	17.3	21.9	27.2	32	138.6	53.8	62.5
24/10/2020	7.1	12.9	16.8	19	20	20.5	138.6	53.8	26.3
27/11/2020	8.2	12.1	12.6	12.6	12.7	12.7	27.2	27.1	12.7
2/12/2020	7.1	11.8	15.1	17.4	19.1	20	52.6	35.6	24.6
16/4/2021	8.5	14.1	17.1	23.1	34.3	43.5	108.7	68.1	71.2
4/5/2021	7.3	14.3	19.2	21.5	23	23.9	45.8	17.8	25.1
6/8/2021	8.3	11.9	15.9	23.1	25.1	26.2	35.9	31.3	28
23/8/2021	7	16.4	26.7	40.5	53.7	65	190.8	108.5	110.9
10/9/2021	7.2	10.8	11.5	12	12.5	12.9	84.9	36.6	13.9

Continuación del cuadro 35									
16/10/2021	8.2	14.1	16.9	20.7	26.4	30.7	95.9	55.1	75
16/10/2021	9.1	19.6	29.1	35.3	39.1	41.7	95.9	55.1	47.1
2/11/2021	8.2	12	12.9	13	13	13	26.3	16.5	13.2

Nota: Los días resaltados en color celeste representa que la alarma se activó más de una vez durante el día.

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Como se observa en el cuadro 35, no siempre la alarma se acciona paulatinamente acorde a los colores de amenaza, por ejemplo la primera fecha en que se acciona un color que no es el verde sería el 15 de noviembre del 2015, este día no se accionó el estado amarillo sino que paso al estado naranja directamente, esto se debe principalmente a que un gran volumen de lluvia se acumula en un periodo de tiempo extremadamente corto, y se observa que el estado final de la alerta a los 30 min de naranja, ya que se encuentra en ese rango acorde al cuadro 31. Un ejemplo de que se accione la alarma de forma paulatina es el día 6 de junio del 2016, como se observa pasa del estado verde al amarillo, para seguidamente pasar al estado rojo al minuto 25, sin embargo, el estado final de la alarma no queda en rojo debido a que la precipitación acumulada no se encuentra en el rango que describe el cuadro 31 que es de 50 a más de 60 mm en media hora, además vemos que la precipitación acumulada en una hora a partir de que se detectaron las precipitaciones mayores a 7 mm, es de 70 mm/hr, por lo que puede significar un peligro para el personal que opera la planta, por lo que se recomienda evacuar las instalaciones.

Existen casos de que en un mismo día se accionen más de una vez la alarma, por ejemplo los días 3 de julio del 2017, 24 de octubre del 2020 y 16 de octubre del 2021 se accionaron más de una alarma verde en un mismo día, ya al pasar la media hora de medición de precipitación acumulada, la alarma se puede volver a activar siempre y cuando se detecte una precipitación mayor a 7 mm, no obstante, no necesariamente tuvieron el mismo estado de alarma, por ejemplo el día 3 de julio del 2017 la primera vez que se detectó precipitaciones mayores a 7 mm el estado de alarma llego hasta alerta roja, mientras que la segunda alerta activada en el día quedo en alerta verde, por lo que no necesariamente que se accionen dos alarmas en un día significa que tendrán el mismo grado de amenaza, sin embargo, siempre se le debe dar mayor importancia al estado que indica un mayor riesgo.

Analizando el día que se conoce que ocurrió inundación, el día 23 de agosto del 2021, se observa cómo se activaron solo tres niveles de alerta, pasando del verde al amarillo y saltándose el naranja para inmediatamente activar el rojo, específicamente a los 20 minutos después de detectar una precipitación mayor a los 7 mm. Este día como posee una precipitación registrada en la estación de 108.5 en una hora, sin embargo, la intensidad que se detecta a partir de la activación de la alarma es de 110.9, por lo que la alarma puede detectar intensidades mayores o menores a las máximas del día dependiendo de las precipitaciones no contabilizadas menores a 7 mm.

El siguiente cuadro realiza un resumen del estado final de las alarmas activadas por año y en qué tipo de simbología quedó, lo que permite asimilar que tan probable es en qué estado final una alarma que sea accione sea verde, amarillo, naranja o rojo.

Cuadro 36. Cantidad de alarmas activadas por años y dependiendo de su simbología para las zonas sujeto de estudio.

Cantidad de Alarmas registradas por año							
Zona de estudio	Año	Alerta verde	Alertas amarillas	Alertas naranjas	Alertas rojas	Total por año	Probabilidad de que se active la alarma por cada año
Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas	2015	8	0	1	1	10	17.54%
	2016	7	0	1	0	8	14.04%
	2017	6	0	0	1	7	12.28%
	2018	6	1	0	0	7	12.28%
	2019	2	0	0	0	2	3.51%
	2020	13	2	0	0	15	26.32%
	2021	5	2	0	1	8	14.04%
	Total	47	5	2	3	57	100%
Porcentaje de activación de alertas acorde a su categoría (%)		82.46%	8.77%	3.51%	5.26%	100%	100%
Cantidad de Alarmas registradas por año							
Zona de estudio	Año	Alerta verde	Alertas amarillas	Alertas naranjas	Alertas rojas	Total por año	Probabilidad de que se active la alarma por cada año
La Paz, San Ramón, Alajuela	2013	0	0	1	3	4	11.76%
	2014	2	2	0	0	4	11.76%
	2015	1	3	0	2	6	17.65%
	2016	0	2	1	0	3	8.82%
	2017	4	0	1	0	5	14.71%
	2018	0	1	0	1	2	5.88%
	2019	2	2	0	0	4	11.76%
	2020	1	3	1	1	6	17.65%
	Total	10	13	4	7	34	100%
Porcentaje de activación de alertas acorde a su categoría (%)		29.41%	38.24%	11.76%	20.59%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Como se puede observar en el cuadro 36, la mayoría de las ocasiones que acciona una alarma, en la zona de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas; su estado final terminará en verde, porcentualmente el 82.46% de las veces que se acciona una alarma, su estado final será verde, un 8.77% su estado final será amarillo, un 3.51% será naranja y un 5.26% será roja. Esta tabla nos da información muy importante como que es más probable que una alarma cuando llega a naranja es más probable que termine en un estado rojo a que se mantenga en naranja.

En lo que respecta a la zona de La Paz, San Ramón, Alajuela; se tiene que los resultados del cuadro 36 denotan que para el total de años de registro únicamente se cuenta con un total de 34 activaciones. Esto resulta positivo en términos de eficiencia, ya que si vemos los días de activación por año se denota que la alarma no se estaría activando de manera constante generando así interrupciones en las labores de los operadores del AyA como así mismo ahorro económico evitando la movilización de preparativos según los pasos a seguir del protocolo SAT.

### 6.2.3 Propuesta de protocolo SAT

#### Propuesta de protocolo SAT para La Paz, San Ramón, Alajuela.

En lo que respecta al resultado reflejado en el cuadro 32, se tiene que aclarar que este es un resumen de todas las consideraciones propuestas en el protocolo para esta zona sujeto de estudio (para más detalle sobre la propuesta de protocolo ver anexo 11). Gran parte del resultado obtenido fue gracias a la gira realizada el 25 de mayo del 2022 a ambas plantas potabilizadoras, ya que así fue posible determinar varios aspectos de vital consideración previo a elaborar las propuestas de protocolo SAT.

Entre estas consideraciones destaca que no se cuenta con ningún tipo de protocolo a seguir al momento de manifestar los eventos hidrometeorológicos extremos, sino que realizan evacuaciones bajo la intuición y conocimiento de los operadores de la planta según vaya desarrollándose el comportamiento del evento (precipitación). A razón de esto, se tiene que las acciones a realizar y los involucrados de ejecutarlas y acatarlas no se encuentran establecidos; por lo cual para establecer la propuesta de protocolo SAT se parte desde cero considerando la metodología de colores de amenaza de la CNE (Anexo 10)

Otro de los aspectos a considerar son los medios de comunicación y difusión de la alerta, donde a raíz de la misma gira del 25 de mayo del 2022, se logró corroborar que en la zona de la planta potabilizadora y las tomas de agua no se cuenta con buena señal móvil. Esto también fue corroborado por el ingeniero a cargo de la zona Henry Ulate Torres, al cual se le consultó vía correo electrónico sobre el medio de comunicación entre el plantel y el/los técnicos/operadores de la planta potabilizadora; a lo cual respondió que el único medio de comunicación es mediante internet de fibra óptica. Mientras que otros medios convencionales como red telefónica tanto fija como móvil, es deficiente; mismo caso para la comunicación por radio esto fue determinado por medio de pruebas con equipos del AyA y el ICE (Ulate, 2022, per. com; 09 noviembre).

El último aspecto a considerar es que el AyA en este sitio de estudio (La Paz, San Ramón, Alajuela) forma parte del Comité Municipal de Emergencias (CME) de la región, este es un aspecto importante ya que dentro de este comité se encuentran la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) y el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), además de otros entes que a futuro podrían formar parte de este SAT como lo son Municipalidad de San Ramón, Área rectora Ministerio de Salud, PANI, Dirección Hospital Luis Valverde Vega, Ministerio de Seguridad Pública, OIJ, Cruz Roja y entre otros (Ulate, 2022, per. com; 09 noviembre).

Sin embargo, se hace especial mención al CNE y IMN debido a que el Ing. Henry Ulate Torres aclara que, si bien no se cuenta con un sistema que alerta sobre este tipo de eventos en la zona, estas dos instituciones les envían informes sobre la posibilidad que se manifiesten este tipo de eventos para que ellos tomen cartas en el asunto y prevengan los daños que pudiesen ocurrir (Ulate, 2022, per. com; 09 noviembre).

Partiendo de estas consideraciones, se procedió a la elaboración de la propuesta de protocolo SAT ante eventos hidrometeorológicos extremos para La Paz, San Ramón, Alajuela (ver cuadro 32 y anexo 11). De los resultados reflejados en el cuadro 32 se denota que el protocolo elaborado se conforma de cuatro condiciones de alarma, estas condiciones a su vez tienen asignados un ícono, color y significado con la intención de obtener una inclusión más amplia en cuanto a la interpretación de cada condición de alarma y las actividades a realizar.

Primeramente, se afrontó el hecho de establecer las acciones por medio de lo estipulado en la metodología de colores de amenaza de la CNE. Resultando así en acciones de:

- **Informativas (verde):** A cargo del jefe técnico ubicado en el plantel, el cual tiene la responsabilidad de gestionar las condiciones de la alarma (según las reciba), e informar sobre esto a los técnicos/operados que se encuentren en la planta potabilizadora, los cuales a su vez deben informar de su ubicación y tareas que realicen en el momento. Así mismo, el jefe técnico debe seguir monitoreando el desarrollo del evento.
- **Preparativas (amarillo):** En esta condición ambos funcionarios (jefe técnico y técnico/operador) tienen acciones que realizar. El jefe técnico, debe consultar al técnico/operador sobre su condición, ubicación e indicar el estado de la alerta; en caso de que el técnico/operador no conteste debe activarse la sirena. El técnico/operador al enterarse que se encuentra en condición amarilla debe reportar lo solicitado (condición y ubicación) y dirigirse a la planta potabilizadora a enlazar comunicación con el plantel esperando el desarrollo del evento e indicaciones a realizar.  
Esto se definió así debido a que dentro de las funciones que tiene el técnico/operador de la planta potabilizadora, está la de brindar mantenimiento a las tomas de agua (figura 9), esta función por sí sola expone al técnico/operador a un grado de vulnerabilidad mayor; por lo cual el estar en la toma ante la amenaza de eventos hidrometeorológicos extremos resulta imprudente. Además, el estar en la planta potabilizadora permite una mejor comunicación debido a la señal de internet que se cuenta en esta área.
- **Movilización (naranja):** De pasar de condición amarilla a naranja, se tiene que ya se debió tener contacto con el técnico/operador; ya que esta condición el jefe técnico le solicita a todo el personal que se encuentre en la planta evacuar las instalaciones debido a que la intensidad del evento sigue en aumento; así mismo el técnico/operador tiene la responsabilidad de reportar su condición y ubicación antes, durante y post evacuación. De no contactar con el técnico/operador, el jefe técnico debe evaluar que, si en cinco minutos no se registra un aumento considerable de la intensidad del evento, debe desplazar los recursos necesarios para verificar si el técnico/operador está a salvo.
- **Respuesta (rojo):** Llegados a esta condición, el contacto entre el jefe técnico y el técnico/operador debe ser constante, hasta llegar al plantel de la Unidad Cantonal del AyA-San Ramón. Llegados al punto de reunión, se procede a verificar (en conjunto jefe técnico y técnico/operador) si la evacuación fue un éxito, caso contrario se debe evaluar el desarrollo del evento para ir en la búsqueda de los funcionarios

faltantes. También se debe monitorear el desarrollo del evento, registrar y evaluar los daños que este dejó a su paso.

Por último, cabe destacar que cada una de estas condiciones funcionan bajo los umbrales de alerta establecidos para el área de estudio correspondiente a La Paz, San Ramón, Alajuela (ver cuadro 28).

Otro aspecto fundamental en las propuestas de protocolo SAT a elaborar, recae en la comunicación/difusión de la alerta. Considerando la deficiencia de la operación de la red telefónica móvil celular y fija y de radio de telecomunicaciones en el sector de la planta potabilizadora y toma de agua; se tiene que la opción más viable para el proceso de comunicación/difusión de la alerta es la que se presenta en la figura 28.

Figura 28. Proceso de comunicación/difusión de la alerta del protocolo SAT de La Paz, San Ramón, Alajuela.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Del proceso de comunicación/difusión de la alerta mostrado en la figura 28, cabe destacar que de esta manera se contará con dos vías de comunicación con las cuales poner en marcha las acciones respectivas para cada condición de la alarma que cuenta el SAT. La primera vía es el internet, enlazando directamente al jefe técnico con el/los operadores de las plantas potabilizadoras; la segunda vía es por medio de una sirena que tendría dos métodos de activación, el primero de manera automática conectando la sirena con la estación hidrometeorológica y que cuando se activen los umbrales determinados la sirena se active; el otro método sería manual a cargo de jefe técnico de la zona de estudio pertinente.

Finalmente, se tiene que el protocolo elaborado es una propuesta debido a que este requiere de ciertos aspectos previo a su puesta en operación como lo es el programar los canales de comunicación/difusión de la alerta y posteriormente, la puesta en marcha de simulacros para corroborar, y de ser necesario, calibrar los umbrales de alerta determinados (cuadro 28) ya que hay recordar que en esta zona no se cuentan con registro de eventos hidrometeorológicos extremos bajo los cuales guiarse para verificar la precisión de estos. Además, mencionar que cuando la propuesta de protocolo entre en función esta tiene una vigencia de cinco años, ya que es recomendable el estar actualizando los estudios de las tormentas de la zona para un mejor funcionamiento del SAT.

### Propuesta de protocolo SAT para Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas

Para el caso de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas se basó en el artículo 14 de la Ley Nacional Emergencias y Prevención del Riesgo N° 8488, el cual establece que ante situaciones riesgo, desastre o peligro inminente se debe seguir el criterio técnico científico para tomar acciones eficaces ante este tipo de situaciones, siempre apoyados por el Estado, el sector privado o población en general. En el artículo 30 de la Ley, establece tres fases de acción ante situaciones de emergencias, la primera fase de respuesta, la segunda es rehabilitación y la tercera fase es la reconstrucción, por la naturaleza del proyecto solo se implementará la fase de respuesta. La fase de respuesta es la etapa del protocolo donde se toman acciones inmediatas ante un evento de alto riesgo, estas acciones se centran en salvaguardar las vidas de las personas, infraestructura pública vital, bienes y servicios vitales, mediante la implementación de acciones como alertas, alarmas, información pública, evacuación y reubicación temporal de las personas o animales hacia sitios seguros (Asamblea Legislativa, 2020).

Mencionada la base legal de este apartado, se propone una metodología a seguir con base en los resultados obtenidos del estudio y los umbrales de alerta, esta metodología tiene su fundamento en el Manual de Diseño e implementación de un Sistema de Alerta Temprana de Inundaciones en Cuencas Menores de la Organización de los Estados Americanos, además de metodologías implementadas en otros SAT'S de referencia en el país e internacionalmente.

#### Evaluación de la situación.

Esta etapa requiere una gran coordinación entre las entidades involucradas en el proyecto, como lo puede ser Instituto de Acueductos y Alcantarillados (AyA), la Municipalidad de Jacó y la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias de Costa Rica (CNE). El ente principal encargado de velar por la evaluación de la situación es el AyA, específicamente la sucursal que se encuentra en Jacó, ya que esta posee los registros de la estación meteorológica con la que funciona el sistema de alerta.

La evaluación se basa estrictamente en los datos hidrológicos obtenidos en el estudio, cuando los datos estudiados perciben una situación de riesgo que indica que puede ocurrir una inundación, se le debe comunicar tanto al personal que opera en la planta, como los encargados de operar la estación hidrometeorológica. Para ello se cuenta con tres diferentes condiciones al momento que se activa la alerta:

**Advertencia de inundación:** Se detecta que existe un riesgo tanto hidrológico como hidrometeorológico, que puede incrementar paulatinamente dependiendo de los datos obtenidos en el estudio, sin embargo, es una etapa temprana para evacuar las instalaciones, por lo que se recomienda mantenerse atento a la información proporcionada y esperar cómo evolucionan los acontecimientos preparándose para la siguiente etapa, esta fase se puede representar con el color verde o amarillo.

**Alerta de inundación:** Esta etapa indica que el peligro ha escalado lo suficiente para que la probabilidad de una inundación sea lo suficientemente alta para evacuar las instalaciones. Se le debe emitir un mensaje (alerta) al personal de la planta para que tomen las vías de evacuación recomendadas por el estudio, sin embargo, si el personal de AyA ve necesario tomar vías alternas y posee conocimientos técnicos y científicos para validarlos se puede tomar esas rutas, esta fase se puede ver representada por el color naranja o rojo.

**Alarma de inundación:** La última fase indica que ninguna persona se debe encontrar en las instalaciones. Se recomienda alertar a la población cercana de la planta para evitar

pérdidas humanas, siguiendo al personal de la evacuación. Además, se deberá realizar un informe de los daños a la infraestructura después de ocurrido el evento. También realizar un análisis meteorológico del día del evento para poder calibrar el SAT en futuros acontecimientos (actualizaciones del estudio hidrológico referente a la tormenta).

#### Difusión de la Alerta.

Esta sección plantea los sistemas para comunicar la alerta entre el AyA de Jacó y los operarios de la planta potabilizadora. El primer sistema es más recomendado y el segundo solo se deberá implementar en caso de que no se cuente con el principal.

#### **Sistema principal recomendado.**

Como la alerta estará calibrada acorde con los datos de la estación meteorológica se debe utilizar esa como principal medio de comunicación. Esto permitirá a los operarios de la planta tomar acciones en tiempo real y puedan evaluar la situación con mayor tiempo de reacción, esto se podrá lograr implementando un sistema de colores acorde a la simbología del estudio en la estación meteorológica de la planta. El sistema también deberá comunicar a la subsele del AyA en Jacó para que los funcionarios estén pendientes del personal que se encuentra en la planta o en caso de que los operadores se encuentren fuera de la planta, comunicarles que no se dirijan a ella, por la probabilidad de peligro inminente.

Es necesario recordar que la alerta funciona con los umbrales determinados para esta cada zona de estudio, por lo cual se recomienda como principal medio de comunicación un híbrido entre la estación hidrometeorológica y una sirena. Esto permitirá un aviso mucho más preciso y rápido hacia los operadores de la planta potabilizadora, brindándoles el tiempo necesario para tomar las acciones de contingencia pertinentes según la condición de la alarma. Así mismo, se tiene que el sistema también deberá comunicar a la subsele del AyA en Jacó para que así los funcionarios del plantel establezcan comunicación con el personal que se encuentra en la planta o en caso de que los operadores se encuentren fuera de la planta, comunicarles que no se dirijan a ella por la probabilidad de un peligro eminente.

#### **Sistema secundario provisional.**

Por la ubicación de la planta potabilizadora, esta opción solo se tomará en cuenta siempre y cuando el sistema principal no este habilitado. La señal telefónica o de radio en la zona no es la más adecuada para emitir señales de alerta, siendo el radio la vía de comunicación más fiable después del sistema de alerta principal. Por último, se debe utilizar dispositivos telefónicos en caso de que los otros medios se encuentren fuera de funcionamiento.

#### Plan de emergencia.

El plan de emergencia muestra las actividades que debe realizarse para que el SAT funcione de la forma más óptima posible, entre ellas se encuentra el orden de responsabilidades que se debe seguir ante una situación de emergencia ya sea en la sede del AyA como en la planta, el plan emergencia abarca también las posibles rutas de evacuación y lo bienes vitales de la planta.

#### Rutas de evacuación.

Para la ruta de evacuación se realizaron tres mapas donde indican las rutas de tránsito principales y secundarias que posee la planta de agua potable. Realizando inspección de los mapas realizados se puede observar características la ubicación de la cuenca de estudio, la ubicación del Río Copey donde deposita sus aguas la cuenca de estudio,

además de las vías de escape, los puntos de reunión y las zonas de peligrosidad dependiendo de su color, serán más o menos peligrosas, siendo la primera la de mayor peligro a 5 metros de distancia del medio del cauce, la segunda se encuentra a 10 metros del medio del cauce y por último la tercer área de peligro se encuentra a 50 metros desde el centro del río.

A continuación, se describirá las principales rutas de evacuación de la planta, se comentarán sus ventajas y desventajas, además de las implicaciones para tomar estas rutas:

### **Ruta de evacuación principal.**

La ruta principal va directamente desde la planta hasta las oficinas del AyA en Jacó, posee una longitud aproximada de 6.3Km, es la más extensa de las tres rutas propuestas, sin embargo, el punto de reunión es el más seguro, ya que es el que se encuentra más alejado del cauce. Existen tres puntos críticos de esta ruta, el primero se encuentra a 130 metros desde la planta si se sigue la ruta estipulada, el segundo se encuentra a 310 metros desde la planta siguiendo la ruta y el último se encuentra a 1.9 Km desde la planta. Los primeros dos puntos críticos se deben a que en esas secciones del río se le suma el caudal de otras dos microcuencas, por lo que en estas dos secciones se suman los caudales de las dos microcuencas al caudal proveniente de la cuenca de estudio, por lo que se espera que el nivel del agua sea mayor, en el tercer punto crítico se debe atravesar el río Copey por medio de un puente, por lo que dependiendo del caudal del río en ese momento se deberá pasar el puente o no. Por último, cabe mencionar que esta ruta solo se debe utilizar en el caso de que se encuentren vehículos automotrices como automóviles o motocicletas, ya que la distancia es relativamente larga para utilizar caminando.

### **Ruta de evacuación secundaria.**

Esta ruta de evacuación finaliza en el “Punto de reunión 2”, posee una longitud aproximada de 600 metros, la ruta solo se debe utilizar bajo las siguientes circunstancias:

1. No se posea vehículo automotriz, sea automóvil o motocicleta para trasladarse de la planta a las instalaciones del AyA.
2. El tercer punto crítico de la Ruta de evacuación primaria se encuentre bloqueado, sea por el nivel del agua o por otras circunstancias.
3. El nivel del cauce del río sobrepase la zona de riesgo verde en secciones posteriores al Punto de reunión 2.
4. Exista algún herido en la planta y se deba trasladar a una zona segura lo más alejada de la planta.

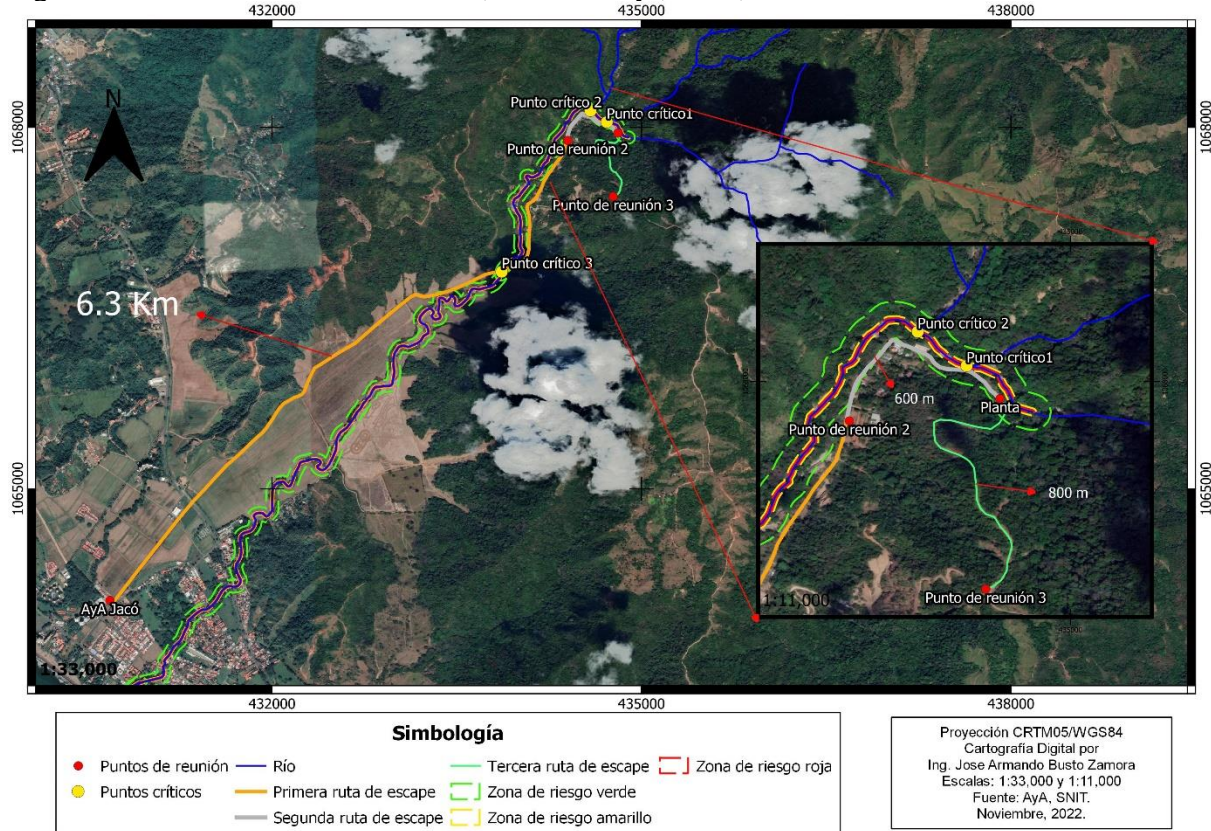
### **Ruta de evacuación terciaria.**

Esta ruta de evacuación finaliza en el “Punto de reunión 3”, posee una longitud aproximada de 800 metros y solo se debe utilizar bajo las siguientes circunstancias:

1. No se posea vehículo automotriz, sea automóvil o motocicleta para trasladarse de la planta a las instalaciones del AyA.
2. Los puntos críticos 1, 2 3 de las anteriores rutas se encuentren bloqueados ya sea por el nivel del cauce o por cualquier otra circunstancia.
3. La salida principal de la planta se encuentre bloqueada completamente por derrumbes o cualquier otra circunstancia.

**Nota:** Esta ruta es la menos favorable, ya que se encuentra en un terreno bastante peligroso por lo escarpado que es, además de su cercanía con árboles que puede caer, solo se recomienda utilizar esta ruta bajo una situación de extrema emergencia.

Figura 29. Rutas de evacuación, Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

#### 6.2.4 Discusión de objetivos

En este apartado se discutirá sobre el alcance obtenido en el presente proyecto referente a los objetivos estipulados en la sección 1.4.2 del presente documento.

En cuanto al primer objetivo específico planteado, referente a la recopilación de información técnica para el desarrollo de SAT ante evento hidrometeorológicos extremos, se puede mencionar que este fue cumplido con éxito. Esto se ve reflejado en la sección 6.1.1 donde a raíz del resultado obtenido se logró determinar un aspecto de vital importancia dentro del marco de desarrollo de los SAT en Costa Rica, este aspecto es que el país no ha incursionado en profundidad en este tipo de mecanismos (SAT), sino que cuenta con otro tipo de sistema para el monitoreo, análisis y alerta de amenazas naturaleza denominado Puntos de Diagnóstico de la Red Institucional de Comunicación y Monitoreo de Alerta de la CNE (PDRIC) la cual se extiende por todo el país.

Así mismo, se logró determinar que para desarrollar un SAT se debe tener consideraciones específicas de índole técnico, operacional, administrativo y social, dichas consideraciones pueden verse a mayor detalle en la sección 6.1.1 del presente documento. Se destaca este aspecto a razón que teniendo presente estas consideraciones el desarrollo de las propuestas SAT para cada una de las zonas sujeto de estudio pudo fraccionarse en cuatro etapas; de las cuales se pudo completar las dos primeras y la última de manera parcial,

mientras que la tercera no fue posible llevar a cabo en su totalidad (para más detalle sobre estas etapas y su desarrollo ver sección 6.2.1).

Para el segundo objetivo planteado, correspondiente al análisis de información hidrometeorológica para la caracterización de eventos hidrometeorológicos extremos en las zonas sujeto de estudio; se tiene que este fue cumplido, primeramente, por medio de la gira de campo realizada el 25 de mayo del 2022. Donde al consultarle a los operadores de las dos plantas potabilizadoras, situadas en las zonas sujeto de estudio, a cerca de la manifestación de eventos hidrometeorológicos extremos (inundaciones) y la fecha de estos, permitió establecer el punto de partida para comenzar a analizar el comportamiento de las tormentas causantes de dichos eventos. Logrando determinar que, para la zona de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas la manifestación de estos eventos suele presentarse con precipitaciones con intensidades que igualen y/o superen los 100 mm/hr tal y como fue para los días 15 de noviembre del 2015 y el 23 de agosto del 2021. Mientras que, para el sitio de La Paz, San Ramón, Alajueta, se tiene que, de los nueve años de registro, no se han registrado eventos de tal magnitud que atente contra la vida de los operadores de la planta (Para más detalle a cerca de eventos manifestados ver sección de antecedentes en el capítulo dos de contexto).

Seguidamente, referente a la información hidrometeorológica se tiene que esta fue tomada de las estaciones hidrometeorológicas ubicadas en las plantas potabilizadoras del AyA (cuadro 15 y 16), esta información cual fue analizada mediante los softwares Excel e Hydrognomon 4, donde no se descartaron registros que sobresalieran al promedio debido a que estos son los de primer interés dentro del contexto de desarrollar los SAT para cada área en estudio ya que estos, al ser datos precipitación altos/extremos, pueden ser los causantes de los eventos de los cuales se quiere monitorear y alertar.

En lo que concierne el tercer objetivo planteado, la determinación de umbrales de alerta por medio de la caracterización de los eventos hidrometeorológicos extremos, se tiene que este también fue cumplido en su totalidad, muestra de esto se puede apreciar en la sección seis de resultados (cuadro 28, 29, 30 y 31). De dicho resultado se puede apreciar que la propuesta de umbrales de alerta obtenida y brindada al AyA trabaja bajo un tiempo de 25 minutos para la Paz, San Ramón, Alajueta y de 30 minutos para Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas. Estos tiempos fueron establecidos en función del tiempo de concentración para cada área sujeto de estudio, cabe resaltar que los umbrales obtenidos son propuestas brindadas al AyA, ya que estos entrarán a ser probados (al momento que se programe el sistema de difusión de la alerta) para así corroborar la eficiencia y precisión de estos por medio de simulacros para realizar los ajustes pertinentes de ser necesario.

Por último, se tiene el cuarto objetivo el cual consiste en la elaboración de las propuestas de protocolo SAT, en lo que respecta a este objetivo se tiene que este no pudo completarse en su totalidad. El motivo es que la propuesta a protocolo a dar no estará del todo completa, debido a que aún no se tiene claro el medio de comunicación por el cual se emitirá la alerta al momento de presentarse la amenaza de evento hidrometeorológico extremo. Esto es a razón de la programación de los sistemas de comunicación entre la estación y el encargado de emitir la alerta, aspectos que aún están por definirse y corre por parte de la institución dueña de estos SAT (AyA) el seleccionar los sistemas de comunicación/difusión de la alerta y el programador encargado de desarrollar este sistema.

#### 6.2.5 Discusión de metodología

Esta etapa se recompilaron lo datos de las estaciones meteorológicos, estos datos se obtuvieron gracias a la colaboración del Dr. Jose Pablo Bonilla y la Lic. María José Aguilar, los datos de las estaciones se encuentran en formato Excel. Los años de registro de la

estación de la Paz son de 9 años, desde 2013 hasta 2021, en el caso de Piedra Bruja son 7 años de registro, la ubicación de estas estaciones se puede observar la sección 6.1.2.

La delimitación de la zona de estudio se logró obtener mediante los archivos vectoriales proporcionados por la Lic. María José Aguilar, los mapas de las cuencas de analizadas, se puede visualizar en las figuras 4, 6 y 7 del capítulo de contexto, esta delimitación nos permite obtener los datos morfométricos de las cuencas de estudio mediante modelos de elevación digital y archivos vectoriales del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT).

Los parámetros morfométricos fueron obtenidos utilizados en el cuadro 11 del capítulo 5, y los tiempos de concentración de las cuencas se obtuvieron mediante las ecuaciones que aparecen en el cuadro 12 sin embargo, debido a la metodología utilizada se ampliaron las formas para determinar el tiempo de concentración de las cuencas, utilizando las ecuaciones de Ven Te Chow y la fórmula de Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos para cuencas menores a 10 Km<sup>2</sup>, esta ampliación se implementó con la finalidad de obtener resultados más cercanos a la realidad, ya que de este dato se calibra el modelo hidrológico de las cuencas, además de las curvas IDF-PDF.

La caracterización de los suelos se realizó mediante la metodología de caracterización de suelos no supervisada, mediante imágenes satelitales y la clasificación de suelos de Roy, logramos obtener la clasificación y tipos de suelos, este resultado se utilizó en la construcción de tiempos de concentración.

Iniciado el proyecto, contemplamos que se necesitaría el registro de las precipitaciones máximas días anuales (PMD) de las estaciones meteorológicas, sin embargo, dado las condiciones morfométricas de las cuencas estudiadas optamos por obtener las precipitaciones máximas horarias anuales (PMH). Nuestro intervalo para que ocurra inundaciones en las cuencas de estudio es de una hora, por lo que se debió acomodar los datos de precipitaciones de cada 5 minutos a cada hora, para ello utilizamos el programa R-Studio y mediante líneas de códigos obtuvimos los resultados deseados para el estudio.

Esta etapa del proyecto se centraría en la construcción de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para construir los hietogramas de bloque alternos, sin embargo, debido a que los datos proporcionados por las estaciones meteorológicas poseen registros de precipitaciones cada 5 minutos se optó por generar hidrogramas representativos de la estación y los días de eventos, ya que serían de mayor precisión que los histogramas de bloque alterno. En lugar construir hidrogramas de bloque alterno, se generaron curvas PDF, con la finalidad de utilizarlas como base del sistema de alerta, que mediante las curvas PDF y el tiempo de concentración de la cuenca se obtuvo los umbrales de alerta.

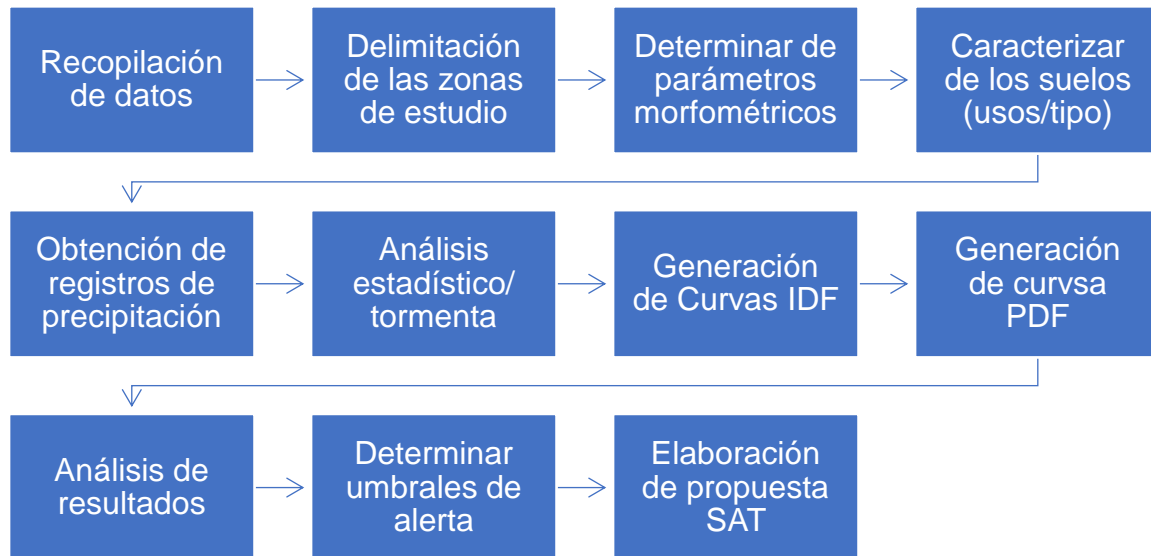
Para ello, una vez determinado los periodos de retorno, las distribuciones de mejor ajuste para las zonas de estudio y las precipitaciones máximas según el orden de combinaciones posibles en los PMH, se calculan curvas IDF y las curvas PDF. Para el cálculo de las curvas PDF se ordenaron las precipitaciones máximas registradas durante los días de PMH, este orden sigue la metodología de Weibull para el cálculo de los periodos de retorno, luego se utiliza la ecuación de función de distribución de probabilidad de Gumbel, para ello se calcula el promedio, la desviación estándar y los parámetros  $\alpha$  y  $u$  (Linsley et al., 1977). Una vez calculado las precipitaciones máximas como se puede observar en los cuadros 24, 25, 26 y 27, se calculan las intensidades máximas acordes al tiempo correspondiente del día.

Como se mencionó anteriormente el hietograma de bloque alterno fue sustituido por la construcción de curvas PDF, sin embargo, se analizaron hidrogramas característicos,

mediante los datos de la estación, estos hidrogramas cumplieron la función de identificar el comportamiento de la tormenta, por lo que su función cambio a identificar el tiempo y la precipitación de peligro.

La modelación hidrológica fue realizada, sin embargo, para el estudio fueron resultados secundarios, ya que los umbrales de precipitación fueron generados a partir de las curvas PDF, sin embargo, la modelación nos permitirá fundamentar nuestros resultados, debido a que nos indicará los caudales que significaran peligro acorde a las precipitaciones obtenidas. Los umbrales de alerta se obtuvieron a partir de la generación de curvas IDF-PDF, además, se logró elaborar una propuesta de Sistema de Alerta Temprana con base en estos resultados.

Figura 30. Metodología seguida para la elaboración de resultados del proyecto.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Finalmente, se tiene que aclarar que a lo que respecta la simbología utilizada para la caracterización de los diferentes estados de alerta; se partió con la estipulada con la de la Organización de los Estados Americanos (OEA) debido a que este ente tiene experiencia en el área de los SAT para Latinoamérica. Sin embargo, se realizó una combinación de esta simbología con la de la Comisión Nacional de Emergencias de Costa Rica, la cual dictamina cuatro niveles de alerta ante un evento de emergencia. La simbología del CNE se basa en simbologías de colores; verde, amarillo, naranja y rojo, cada uno posee un significado diferente y una toma de acciones diferentes en el Anexo 10 se puede apreciar sus diferencias y el significado de cada simbología, mediante esta simbología se estableció el nivel de activación de la alarma acorde a la precipitación acumulada que puede generar un evento de inundación.

## **Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones**

En este capítulo se hará muestra, manera concisa, de los puntos más relevantes obtenidos del presente proyecto/estudio; además de brindar recomendaciones de mejora con la finalidad de ser tomadas en cuenta en pro de mejorar los resultados obtenidos reflejados en el presente documento (capítulo 6).

### **7.1 Conclusiones**

#### **7.1.1 Elaboración de los SAT ante eventos hidrometeorológicos extremos:**

Dentro de los aspectos más importantes y relevantes obtenidos a raíz del presente proyecto; es que este no logra abarcar en su totalidad la puesta en marcha del SAT, sin embargo, se logró elaborar gran parte de los requerimientos de los componentes que integran un SAT. Además, se logró identificar que ambos sitios de estudios cuentan con todos estos requerimientos para que los SAT a desarrollados puedan llegar a establecerse en su totalidad.

También se determinó que no se puede establecer un SAT en su totalidad debido a los componentes e insumos que estos deben poseer (figura 13); tal y como es el contar con un mapa de riesgo, el cual no fue posible elaborar en el presente estudio debido a que este requeriría de un levantamiento topográfico para así poder realizar modelaciones hidráulicas con las cuales poder detectar los sectores de mayor riesgo al momento de presentarse el evento.

Otro parte fundamental para llegar a la conclusión de que el presente proyecto no alcanza a establecer un SAT en todos los aspectos es la falta de integración de otras instituciones como lo puede ser CNE y Municipalidad de las zonas en estudio; además de las comunidades aledañas a las áreas de estudio. Sin embargo, esta parte no fue priorizada ya que se decidió, en conjunto con el supervisor de la institución que solicitó el presente proyecto, priorizar la parte técnica para la determinación de los umbrales de alerta, debido a como se mencionó anteriormente la implementación de estos SAT se encuentra en sus primeros pasos.

#### **7.1.2 Umbrales de alerta**

En lo que respecta a los umbrales de alerta se tiene que la metodología seleccionada (creación de hietogramas, curvas IDF y PDF) brindó un resultado bastante conservador en términos de determinar niveles de precipitación en rangos de tiempos de cada cinco minutos tal y como se ve reflejado en las secciones 6.1.2.6 y 6.1.2.7. Sin embargo, hay que hacer mención que estos resultados son preliminares debido a que si bien se han registrado eventos que han ocasionado graves afectaciones, como es el caso de Piedra bruja, Jacó, Puntarenas; la base de datos perteneciente a las estaciones hidrometeorológicas poseen muy pocos años de registro, lo cual al estar trabajando en pronóstico y deducción de una posible amenaza de índole hidrológica se requiere contar con un mayor número de años de registro para una mejor predicción y entendimiento de estos eventos en cada una de las zonas de estudio.

Por ende, estos umbrales de alerta posterior a la entrega al ente encargado de gestionarlos, AyA, entrarán en una fase de prueba (simulacro) con la finalidad de verificar si estos se adecuan de manera eficiente a tormentas las cuales puedan causar eventos que deriven en crecidas/avenidas/inundaciones que atenten contra la vida de los operadores de las plantas potabilizadoras de las zonas sujeto de estudio.

Por último, se obtuvo que los umbrales de alerta obtenidos para cada uno de los sitios sujeto de estudio son representativos y conservadores. Esto se dice, ya que se logró determinar

que con estos umbrales la alerta no se activa de manera frecuente, sino que esta se activa al momento de manifestarse un evento que de verdad pueda generar riesgos. Lo anterior es un resultado de vital importancia, ya que, si la alarma se activase de manera frecuente y sin presentar un peligro real, esta no cumpliría con su cometido de resguardar la integridad de los operadores, sino que casi contrario perjudicaría a los mismo haciendo que estos tengan que dejar sus funciones habituales debido a eventos que no sugieran un peligro.

### 7.1.3 Propuesta de protocolo SAT

A modo de conclusión de lo que fueron los resultados obtenidos de las propuestas de protocolo SAT ante eventos hidrometeorológicos extremos, se tiene que se logró brindar un insumo de gran valor para cada una de las áreas sujeto de estudio. Esto se dice ya que si bien, las propuestas de protocolo son preliminares, estos son un punto de partida para la gestión del riesgo para cada uno de los sitios sujeto de estudio, debido a que estos no cuentan con ningún insumo/herramienta de este tipo, por lo cual se obtuvo una mejora en el ámbito de la gestión del riesgo.

Así mismo, si bien es cierto que estos resultados (SAT ante eventos hidrometeorológicos extremos y propuesta de protocolo) pertenecen y son de uso para funcionarios del AyA de cada una de las áreas de estudio; no se omite la posibilidad a futuro de dar a conocer con los Comité Municipal de Emergencia (CME) sobre estos insumos para contemplar opciones de mejora en pro de optimar la gestión del riesgo en las áreas de estudio.

## **7.2 Recomendaciones**

### 7.2.1 Elaboración de los SAT ante eventos hidrometeorológicos extremos:

Primeramente, se tiene que el modelo bajo el cual operará los SAT en cada uno de los sitios sujeto de estudio, son con la relación precipitación-escorrentía. Por lo cual, se deduce que el causante de los daños al momento de iniciar el evento son las crecidas/avenidas/inundaciones; a razón de esto se recomienda el realizar una modelación hidráulica de los cuerpos de agua situados dentro de las zonas de estudio. Esto brindaría un panorama mucho más claro del comportamiento de estos eventos hidrometeorológicos extremos, lo cual a su vez se traduce en una mejor comprensión de estos eventos y así poder optimizar el funcionamiento de los SAT.

Para llevar a cabo dicho estudio, se cuenta con varias opciones como buscar profesionales que brinden este tipo de servicios, si dentro de las capacidades financieras de la institución (AyA) es posible; o bien buscar nuevamente estudiantes de las carreras de ingeniería hidrológica e ingeniería en topografía y catastro (ambas carreras impartidas por UNA) esto con la finalidad que se trabajen en conjunto elaborando cada uno su proyecto de graduación en relación a un estudio hidráulico en las zonas sujeto de estudio.

Otra recomendación es iniciar la integración de otras instituciones en los SAT elaborados, como lo pueden ser las Municipalidades, CME (de cada una de las zonas sujeto de estudio), CNE, ICE, IMN que son habituales en ámbitos de la gestión del riesgo tal y como se aprecia en los Puntos de Diagnóstico de la Red Institucional de Comunicación y Monitoreo de Alerta de la CNE (PDRIC). Esto con la finalidad optimizar el funcionamiento de los SAT mediante mejoras en cuanto a equipo de monitoreo y alerta; además de incentivar una expansión de estos a lo largo del distrito; ya que recordemos que este SAT, en primeras instancias, es de uso para el AyA por cual comunidades aledañas no se verían beneficiadas con la implementación de dichos sistemas. Así mismo, el poder integrar otros entes en la gestión de los SAT puede sugerir inversiones económicas dentro del desarrollo de estos sistemas para una mejor gestión de los desastres naturales causados por los eventos hidrometeorológicos extremos.

Por último, se tiene que, de no contar con las capacidades técnicas, económicas, financieras, legales, ambientales, entre otras; para mejorar ambos SAT ante eventos hidrometeorológicos extremos de los sitios sujeto de estudio; se recomienda el establecer como prioridad de mejoras la localidad de Piedra Bruja en Jacó de Puntarenas cuando se tenga la oportunidad. Esto se dice a raíz de los grandes eventos que han ocurrido en años anteriores, y a la fecha de realizado el presente proyecto, se ha logrado observar como es habitual la manifestación de eventos de tales magnitudes que exponen la vida tanto de los operadores de esta zona como los habitantes del distrito de Jacó.

### 7.2.2 Umbrales de alerta

Tal y como se hizo muestra en el capítulo seis del presente documento, fue posible la obtención de umbrales de alerta con los cuales operará los SAT al momento de presentarse el evento (secciones 6.1.2.8 y 6.2.2.9). Sin embargo, se tiene a continuación una serie de recomendaciones para lograr obtener una mejor eficiencia en cuanto a la operación de estos sistemas.

1. La primera recomendación, es mantener la recolección de datos de precipitación cada cinco minutos hasta lograr obtener un buen número de años (mínimo 20 años de registro) para cada una de las zonas sujeto de estudio. Esto se menciona debido a que en el ámbito de la hidrología el contar con una buena base de datos (extensa en años) resulta en una gran ayuda ya que entre más información se posea sobre determinado fenómeno el comprender su comportamiento será de mayor facilidad. Lo anterior dentro del contexto de los SAT a elaborar resulta sumamente necesario ya que, dado el propósito que tienen los SAT (predecir un posible evento hidrometeorológico extremo) el comprender el comportamiento de estos eventos permitirá establecer tiempos de respuesta más precisos.
2. La segunda recomendación es asociada a la primera; ya que se recomienda estar en constante actualización de los análisis hidrológicos relacionados específicamente al comportamiento de las tormentas que puedan desembocar en crecidas/avenidas/inundaciones en las áreas de estudio. Esto se sugiere a razón de lo mismo, los pocos años de registro que hay en cada una de las estaciones seleccionadas para determinar los umbrales de alerta.
3. La tercera recomendación recae en la elaboración de hietogramas característicos de la zona, esto se sugiere ya que el contar con estos insumos, permitirá poseer un panorama más certero a cerca de la distribución temporal de las precipitaciones en las zonas sujeto de estudio, y de esta manera poder establecer tiempos de respuestas más acordes al comportamiento que presentan las tormentas en cada uno de los lugares donde se realizó el presente proyecto. Como referencia para esto se puede guiar en los estudios realizados por Maroto (2011) y Murillo (1994) llamados “Distribución temporal de la precipitación en el Valle del Guarco.” y “Estudio de intensidades de lluvia en la cuenca del río Virilla.” respectivamente.
4. Por último, dado que el evento que causa el daño son las crecidas/avenidas/inundaciones en las áreas de estudio se recomienda el implementar estaciones fluviométricas, ya que así se podrá contar con un monitoreo mucho más preciso del evento hidrometeorológico extremo, lo cual se traduce en mejores tiempos de respuestas a la hora de presentarse dicho evento.

Cabe resaltar que las anteriores recomendaciones, a excepción de la cuarta, se sugiere implementar cuando se cuente con una base de datos sólida en cuanto a años de registro se refiere para así poder tener un pronóstico mucho más certero de los eventos en estudio de cada uno de los sitios sujeto de estudio.

### 7.2.3 Propuesta de protocolo SAT

Las secciones 6.2.3 y 6.1.3 muestra un esquema del protocolo de Sistema de Alerta Temprana para inundaciones basado en conocimientos técnicos y científicos estudiados durante el proyecto. Sin embargo, este protocolo puede ser mejorado mediante futuros proyectos vinculados a este estudio, por medio de una serie de recomendaciones que sugeriremos se podrá obtener un SAT más preciso y que cada vez más disminuya los riesgos que se puedan presentar ante posibles inundaciones en las plantas potabilizadoras en estudio, las recomendaciones son las siguientes:

1. Tener conocimientos del comportamiento del cauce es fundamental, debido a que el nivel río va a ser el que indique la peligrosidad del evento hidrometeorológico, por esta razón, realizar una modelación hidráulica en las cuencas de estudio, permitirá tener mayor detalle de la amenaza de los ríos. La modelación hidráulica permitirá realizar mapas de inundación que indique las zonas con mayor vulnerabilidad ante un evento hidrometeorológico extremo, con esta información se podrán realizar rutas de evacuación más precisas y seguras, ya que mostrará el verdadero comportamiento del río.
2. Este proyecto se basó principalmente entre la cooperación del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados y la Universidad Nacional de Costa Rica, la cooperación entre distintas instituciones públicas (CNE, ICE, Municipalidades, Comités Cantonales, Universidades Estatales, entre otros, generaría una mayor fiabilidad en estos proyectos, ya que los recursos que poseen cada una de las instituciones pueden ser aprovechados para generar proyectos que ayuden a salvaguardar las vidas de los trabajadores de las plantas de agua potable, por lo que una mejora en la comunicación entre las instituciones mejoraría el desempeño del proyecto.
3. Los datos obtenidos se realizaron con periodos de tiempo muy cortos, por lo que la fiabilidad de los datos no abarcará periodos mayores a los que ya se han vivido, actualizar estos datos cada cierto periodo de tiempo generará modelos más precisos, con incertidumbres cada vez menores, permitiéndonos tener un mayor entendimiento del comportamiento de las cuencas hidrográficas que se estudian, recomendamos que estos datos sean calibrados en periodos mínimos de 5 años y cada vez que se presente un evento hidrometeorológico extremo.

### 7.2.4 Completación de datos faltantes

Referente a la completación de datos faltantes en los registros que presentan y presentarán las estaciones hidrometeorológicas de las zonas de estudio, se tiene que resaltar que para el presente proyecto no fue requerido el uso de alguna de estas metodologías ya que los datos con los cuales se trabajó, primeramente estaban muy completos y que las metodologías para rellenar estos faltantes trabajan en función de datos referente a lapsos de día o meses, por lo cual estos no se adecuan a este proyecto debido a que se está trabajando con periodos de tiempo de cada cinco minutos. No obstante, se recomienda que al momento de presentar faltante de datos significativos recurrir a la metodología implementada por Ureña et al., (2016), el cual propone dos diferentes metodologías para la completación de datos por medio de estaciones cercanas o bien haciendo uso del mismo registro con el que cuenta la estación en estudio.

## Capítulo 8. Referencias

- Acosta-Castellanos, P. M. y Sierra-Aponte, L. X. (2013). *Evaluación de métodos de construcción de curvas IDF a partir de distribuciones de probabilidad y parámetros de ajuste*. Colombia. Revista Facultad de Ingeniería, pp. 3-4. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0121-11292013000200003](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-11292013000200003). [Consultado el 10 de junio del 2022.]
- Alba, E. F. (2020). Eventos extremos de caudales ciudad de la paz con aplicación específica (Área Hidrología). *Revista iigeo*, 1(11), 33-59.
- Araya-Orozco, J. A. (2017). Efectos del Huracán Otto sobre la estructura y composición florística de un bosque primario en Boca Tapada de Pital, San Carlos, Costa Rica.
- Bogantes, R., Laporte, G., Quesada, C., & Vásquez, A. (2002). Zonificación Geotécnica General de Costa Rica considerando elementos edáficos y climáticos. In VIII Geotechnic's National Seminar and III Center American Encounter of Geotechnical People (pp. 159-181).
- Burbano, L. L., y Zarama, M. V. (1996). La importancia de la hidrología en el manejo de cuencas hidrográficas. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 14(1 y 2).
- Cadavid-Cartagena, E. A. (2007). Curvas IDF, Hietogramas de Diseño de Obras Infraestructura e Impacto Económico del Período de Retorno. Colombia. Universidad de los Andes, p. 3.
- Carballo, D. A. C., y Carazo, R. E. (2012). Sistemas de alerta temprana para monitoreo de deslizamientos. *Infraestructura Vial*, (25), 14-19.
- Carvajal, E. (2021). Reportan 250 familias afectadas por lluvias en Jacó. CrHoy. 24 de agosto. Disponible en: <https://www.crhoy.com/nacionales/video-y-fotos-reportan-250-familias-afectadas-por-lluvias-en-jaco/>
- Carvajal, L. F., y Roldán, E. (2007). Calibración del modelo lluvia-escorrentía agregado GR4J aplicación: Cuenca del río aburrá. *Dyna*, 74(152), 73-87.
- Casado, A., Gentili, J., Campo, A. M. y Peiry, J. L. (2010). Evaluación de la calidad de modelos digitales de elevación derivados de curvas de nivel para aplicaciones hidrológicas. Tecnologías de la Información Geográfica del sur argentino. Argentina. Disponible en [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/68243675/Evaluacin de la calidad de modelos dig it20210722-26285-13lseya-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1656048518&Signature=BgR98jFbFHJq4NUTtRCICpDIXv9u9fEGGK3OFD1WMMVnMnFkKT5fQZYhkgjUSExr9BVJp9tk2nk3yaGA1hI2D-x4qvLHXnJA8FJCebyxDbQROZ4os~3S91v3FBNhP1nVZgvZt0DI8py4IZDRpLrEZQjBcll~rTAZrHOa7WWQT65JtBlhR908UchgY-pCiJdqL5dGuqMYUrKe2TSchp20r1Mimfl8vzbKjQgV4gHzApyNcn94v1VcJ5X~jqc-Scyaeb8hZlwMtlZPFPyvlxXREI06X7-WbGGb5JqOsbgT3uO0F7-T02VAbbH8hSRjLtsWMrN3CtPW4oqYuya3orarw\\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/68243675/Evaluacin%20de%20la%20calidad%20de%20modelos%20dig%20it20210722-26285-13lseya-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1656048518&Signature=BgR98jFbFHJq4NUTtRCICpDIXv9u9fEGGK3OFD1WMMVnMnFkKT5fQZYhkgjUSExr9BVJp9tk2nk3yaGA1hI2D-x4qvLHXnJA8FJCebyxDbQROZ4os~3S91v3FBNhP1nVZgvZt0DI8py4IZDRpLrEZQjBcll~rTAZrHOa7WWQT65JtBlhR908UchgY-pCiJdqL5dGuqMYUrKe2TSchp20r1Mimfl8vzbKjQgV4gHzApyNcn94v1VcJ5X~jqc-Scyaeb8hZlwMtlZPFPyvlxXREI06X7-WbGGb5JqOsbgT3uO0F7-T02VAbbH8hSRjLtsWMrN3CtPW4oqYuya3orarw_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA).
- Cauas, D. (2015). Definición de las variables, enfoque y tipo de investigación. *Bogotá: biblioteca electrónica de la universidad Nacional de Colombia*, 2, 1-11.
- Chavarría Córdoba, J. A., Barrantes Castillo, G. y Quesada Román, A. (2016). La Gestión de Riesgo a Desastres en Costa Rica: síntesis del III Congreso Nacional de Gestión de

Riesgo a Desastres y Adaptación al Cambio Climático, *Entorno Geográfico*, (12). doi: 10.25100/eg. v0i12.3548.

Chow, V. T. (1994). Hidrología aplicada /cVen Te Chow, David R. Maidment, Larry W. Mays; traducción: Juan G. Saldarriaga. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill.

Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W. (1994). HIDROLOGÍA APLICADA. U.S.A. McGraw W-HILL INTERAMERICANA, S.A., p 465-479.

Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE). (2019, 11 julio). *San Ramón - descripción de amenazas*. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias Costa Rica. [https://www.cne.go.cr/reduccion\\_riesgo/mapas\\_amenazas/mapas\\_de\\_amaneza/alajuela/San%20Ramon%20-%20descripcion%20de%20amenazas.pdf](https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/mapas_amenazas/mapas_de_amaneza/alajuela/San%20Ramon%20-%20descripcion%20de%20amenazas.pdf)

Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE). (2015). "Política Nacional de Gestión del Riesgo 2016-2030". San José, C.R.: CNE.

Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE). (2018). Decreto de emergencia N° 40677, p. 8. Recuperado de <https://www.cne.go.cr/recuperacion/declaratoria/planes/Plan%20General%20de%20la%20Emergencia%2040677.pdf>

Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE). (2021). PLAN GENERAL DE LA EMERGENCIA Situación provocada por los efectos del Huracán ETA, p.11. Recuperado de <https://www.cne.go.cr/recuperacion/declaratoria/planes/Plan%20General%20de%20la%20Emergencia%20Huracan%20Eta%2042705.pdf>

Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE). (2016). AMENAZAS DE ORIGEN NATURAL CANTÓN DE GARABITO, p. 1-3. Recuperado de [https://www.cne.go.cr/reduccion\\_riesgo/mapas\\_amenazas/mapas\\_de\\_amaneza/puntarena/s/Garabito%20-%20descripcion%20de%20amenazas.pdf](https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/mapas_amenazas/mapas_de_amaneza/puntarena/s/Garabito%20-%20descripcion%20de%20amenazas.pdf)

Dávila, D. (2016). Sistemas de alerta temprana ante inundaciones en América Latina Jiménez Montes De Oca, R. L. (2019). Diseño e implementación de un sistema de alerta temprana (SAT) de peligros naturales, para la prevención en la gestión del riesgo de desastres y salvaguardar la integridad física de los estudiantes de educación básica regular de la región Arequipa 2019.

Domínguez-Calle, E., y Lozano-Báez, S. Estado del arte de los sistemas de alerta temprana en Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales 38, n.º 148 (7 de octubre de 2014): 321. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.132>.

Duque-Sarango, P., Patiño, D. M., López, X. E. (2019). *Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HECHMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical*. Ecuador. Universidad Politécnica Salesiana, pp. 352-353. DOI: 10.4067/S0718-07642019000600351

Durán, D. C., & Román, A. Q. (2017). Impacto de los eventos hidrometeorológicos en Costa Rica, periodo 2000-2015. *Geo Uerj*, (30), 440-465.

Estrada Sifontes, V., & Pacheco Moya, R. M. (2012). Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 33(1), 94-105. Recuperado en 19 de mayo de 2022, de

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382012000100008&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382012000100008&lng=es&tlng=es).

- EWC III, I. S. D. R. (2006). Tercera Conferencia Internacional sobre Alerta Temprana. *Desarrollo de Sistemas de Alerta temprana*.
- Excel, MS (2007). Microsoft Excel. Condado de Denver, Estados Unidos.
- Gisbert, J. M., Ibáñez, S. A., Moreno, H. R. (2011). INCEPTISOLES. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural de la Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12884/inceptisoles.pdf>
- Gisbert, J. M., Ibáñez, S. A., Moreno, H. R. (2011). ULTISOLES. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural de la Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12868/Ultisoles.pdf?sequence=3>
- Gobierno de Costa Rica. (2010). Plan Nacional para la gestión del riesgo 2010-2015. *Marco estratégico para la aplicación de la política de Gestión del Riesgo*.
- Gravelius, H. (1914). Grundrifi der gesamten Gewcisserkunde. Compendium of Hydrology. Berlín: Goschen.
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions*, 13(1), 350 - 361.
- Hydrologic Engineering Center. (s. f.). *HEC-HMS*. Recuperado 11 de junio de 2022, de <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- INEC. (2017). *Estadísticas Vitales 2016 Población, Nacimientos, Defunciones y Matrimonios*. Costa Rica, 113. <http://www.inec.go.cr/sites/default/files/documentos-biblioteca-virtual/repoblancev2016.pdf>
- Instituto de Acueductos y Alcantarillados. (2018). Aplicación De Modelos de Simulación y Análisis Geoespacial-Ambiental para el estudio de tendencias en la cobertura y Uso De La Tierra Y La Dinámica del Ecosistema en treinta y dos Cuencas Hidrográficas de Costa Rica Cuenca Quebrada Piedra Bruja. Geoinn Geospatial Innovations, S.A. Recuperado de <https://dspaceaya.igniteonline.la/handle/aya/242>
- Jardi, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, 19, 41-68.
- Kirpich ZP. 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Journal of Civil Engineering*. 10(6): 362
- Kozani, S., Markonis, I. (2009). *HYDROGNOMON: Guía del usuario*. Universidad Técnica Nacional de Atenas, pp. 4-5.
- Kozanis, S., Christofides, A., Mamassis, N., Efstratiadis, A. y Koutsoyiannis, D. (2010). Hydrognomon: software de código abierto para el análisis de datos hidrológicos. *Actas de la Asamblea General de la Unión Europea de Geociencias (EGU)*, Viena, Austria, 2-7.
- Lavell, A. (2001). Sobre la gestión del riesgo: apuntes hacia una definición. *Biblioteca Virtual en Salud de Desastres-OPS*, 4, 1-22.
- Linsley, R.K., Kohler, M.A., Paulhus, J.L.H. (1977). *Hidrología para ingenieros*, 2a. ed. ed. MacGraw-Hill, México.

- López, M., (2021). Desbordamiento del Río Copey en Jacó provoca pérdidas a 51 familias. Ameliarueda.com. p. 1.
- Marengo, J.A., Menéndez, A., Guetter, A., Hogue, Terri., y Mechoso, C.R. (2006). Eventos Hidrometeorológicos Extremos. Caracterización y Evaluación de Métodos de Predicción de Eventos Extremos de Clima y de la Hidrología en la Cuenca del Plata.
- Monje, C. (2011). Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa. Guía didáctica.
- Montero Sánchez, E., Araya Rojas, A., Granados Rojas, L., & Rueda Araya, D. (2016). Adaptación autónoma a eventos hidrometeorológicos extremos. Estudio de caso sobre la convivencia de un territorio indígena con el riesgo climático en la cuenca del río Sixaola, Costa Rica. *Revista De Ciencias Ambientales*, 50(2), 20-37. <https://doi.org/10.15359/rca.50-2.2>
- Moreno, D, Quiñones Bolaños, É y Tovar Garrido, L. (2014). *Los Sistemas de Alerta Temprana, SAT, una herramienta para la prevención de desastres por inundación y efectos del cambio climático*. universidad de Cartagena.
- Municipalidad de San Ramón (2016b). Mapa Turístico y Cultural del Cantón. Bienvenidos al Cantón de San Ramón de Alajuela, Costa Rica.
- Municipalidad de San Ramón. (2016a). Geografía [en línea]. [Consultado el 6 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://sites.google.com/sanramondigital.net/sanramongocr/sanramón/aspectos-físicos>
- NEH. Time of Concentration. Parte 630. Hydrology. National Engineering Handbook. Capítulo 15. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Natural Resources Conservation Service. p 1-17. 2010.
- Organización de Estados Americanos. (2010). *Manual para el Diseño, Instalación, Operación y Mantenimiento de Sistemas Comunitarios de Alerta Temprana ante Inundaciones*. Honduras: OEA, pp. 46-60.
- Orozco, R. & Cedeño, B. (2018). Servicio de mapoteca virtual de la Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional. *Revista Geográfica de América Central*, 3(61E), 597-607. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/11255/14375>
- Orozco-Montoya, R. A., Brenes-Maykall, A., y Sura-Fonseca, R. (2022). Inventario Histórico de Desastres en Costa Rica en el Periodo 1970-2020. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres-REDER*, 6(1), 66-82.
- Peñafiel, H. (2021). *Modelo de elevación digital (med) y selección de sitios para rellenos sanitarios en el cantón paján* (bachelor's thesis, jipijapa. Unesum).
- Porras, C., Murillo, D., y Rodríguez, R. (2021, febrero). *Estudio de ingeniería para el programa de los Planes de Gestión del Riesgo (PGR) Cuenca* (N.º 5). Ingenierías Jorge Lizano & Asociados.
- Porras, J. (2021, 28 enero). Estudio de hidrología básica del cauce de agua de la microcuenca que se localiza el área de proyecto: Proyecto: Delegación policial distrital de Río Frío. En Ministerio de Justicia y Paz (MJP) (N.o 2010C37-S-301-DOC-REV1). Recuperado el 9 de octubre del 2022, de: [http://mjp.go.cr/UCP/DelegacionesPoliciales/LOTE\\_1\\_RIO\\_FRIO/04.%20Lote%201%20Estudio%20de%20Hidrolog%C3%ADa%20R%C3%ADo%20Frio.pdf](http://mjp.go.cr/UCP/DelegacionesPoliciales/LOTE_1_RIO_FRIO/04.%20Lote%201%20Estudio%20de%20Hidrolog%C3%ADa%20R%C3%ADo%20Frio.pdf)


- QGIS. (2022). Descubre QGIS. Recuperado 11 de junio de 2022, de <https://www.qgis.org/es/site/about/index.html>
- Quesada-Román, Adolfo, & Calderón-Ramírez, Guillermo. (2018). Gestión del riesgo y política pública en el cantón de Desamparados, Costa Rica. *Uniciencia*, 32(2), 1-19. <https://dx.doi.org/10.15359/ru.32-2.1>
- Retana, J. (2012). Eventos hidrometeorológicos extremos lluviosos en Costa Rica desde la perspectiva de la adaptación al cambio en el clima. *Revista de Ciencias Ambientales*, 44(1), 5-16.
- Rivero, D. S. B. (2008). Metodología de la Investigación, Editorial Shalom.
- Rodriguez Gutiérrez, D., Altamirano Jiménez, C., Castillo Vargas, L., & Vargas Rojas, A. (2005). Atlas climatológico (Nº de versión 2). Windows. Palmares, Alajuela, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional.
- Ruíz, C. D. R. E. (2017). Metodología para determinar la factibilidad de un proyecto. *Revista Publicando*, 4(13 (3)), 172-188.
- Saborío, R. M., Granados, R. R. (2013). Diagnóstico sociocultural y físicoespacial de las comunidades del cantón de Garabito. Ministerio de Vivienda y Asentamientos humanos, p. 10.
- Sacachipana Berrios, J. J. (2019). Modelamiento hidráulico bidimensional de la bocatoma Jila San Jerónimo con HEC–RAS.
- Sánchez Hernández, J, Mejía Fernández, F y Zambrano Nájera, J. (2018). *Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas – SIMAC Red de estaciones meteorológicas, hidrometeorológicas, de alerta y alarma (SAT) de las quebradas Manizales, El Guamo y Olivares ubicadas en el municipio de Manizales*. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.
- Sánchez Molina, A, & Murillo Garza, A. (2021). Enfoques metodológicos en la investigación histórica: cuantitativa, cualitativa y comparativa. *Debates por la historia*, 9(2), 147-181. Epub 20 de junio de 2022. <https://doi.org/10.54167/debates-por-la-historia.v9i2.792>
- Sandoval-Eraza, W. R., Aguilera-Ortiz, E. P. (2014). *Determinación de Caudales en cuencas con poca información Hidroógica*. Ecuador. Revista Ciencia UNEMI, pp. 2-9.
- Sapag Chain, N., Sapag Chain, R. y Sapag., J.M. (2014). Preparación y evaluación de proyectos. Mc Graw Hill Interamericana.
- Senistierra, G. E., Rodríguez-Vagaría, A. M., Gaspari, F. J., Mazzucchelli, M. G. (2014). Aspectos morfométricos de la cuenca alta del arroyo Napaleofú, provincia de Buenos Aires-Argentina. Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*, p. 288. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/3477/347733745004.pdf> .
- SETENA, S. (2017). Reglamento General Sobre Los Procedimientos de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) No 31849-MINAE-S-MOPTMAG-MEIC. *Sist. Costarric. Inf. Jurídica*, 102.
- Seu-Soto, N. (1996). Estudio topohidráulico e hidrológico para el cruce del km .0 + 20 sobre el río Altar estado de Sonora. México. Universidad de Sonora División de Ingeniería, pp. 61-63.
- Sherman, L. (1932). Stream-flow from rainfall by the unit-graph method. *Engineering News-Record*, (108):501–505.

- Siles Alvarado, L. B. (2020). Caracterización fisicoquímica del agua superficial en la subcuenca del río La Paz, San Ramón, Alajuela Costa Rica; como indicador del impacto ambiental por urbanismo en la zona.
- Sistema Nacional De Información Territorial. (2022). Servicios OGC. SNIT, Costa Rica. Costa Rica. Disponible en [https://www.snitcr.go.cr/ico\\_servicios\\_ogc](https://www.snitcr.go.cr/ico_servicios_ogc).
- Solano, J., y Villalobos, R. (2000). *Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica*. San José: Instituto Meteorológico Nacional. Instituto Meteorológico Nacional. Recuperado de [www.imn.ac.cr](http://www.imn.ac.cr).
- Témez, J.R. Extended and improved Rational Method. Proc. XXIV Congress, Madrid, España. Vol. A. pp 33-40. 1991.
- UNESCO-CEPREDENAC. (2011). Proyecto Fortalecimiento de capacidades en los Sistemas de Alerta Temprana en América Central, desde una perspectiva de multiamenaza: Inventario y caracterización SAT - Informe Costa Rica (inf. etc.). Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. San José.
- UNISDR (2015). Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030. Recuperado de: [Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 \(unisdr.org\)](http://www.unisdr.org)
- UNISDR (2016). Impacto de los desastres en América Latina y El Caribe 1990-2013. URL: <https://www.preventionweb.net/publication/impacto-de-los-desastres-en-america-latina-y-el-caribe-1990-2013>
- Ureña Mora, P., Alfaro Martínez, E. J., & Soley Alfaro, F. J. (2016). Propuestas metodológicas para el rellenado de datos ausentes en series de tiempo geofísicas. Guía Práctica de uso.
- US Army Corps of Engineers. (2021). *HEC-HMS User's Manual*. United State of North America. Disponible en <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/latest> .
- Vallejos-Vásquez, S., Esquivel-Valverde, L. E., Hidalgo-Madrigal, M. (2012). Histórico de desastres en Costa Rica febrero 1723 – septiembre 2012. CNE, p. 16-28. Recuperado de <https://www.bvs.sa.cr/ambiente/4923.pdf>
- Vargas-Losada, H. F., Tovar-Rubiano, M. F. y Villanueva-Muñoz, J. C. (2016). Los SAT (Sistemas De Alertas Tempranas), *Revista Científica*, 26, pp. 21–28. doi: 10.14483/23448350.11087.
- Vega, X. (2020). Diferentes soluciones para la delimitación y codificación de cuencas superficiales cubanas. Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría. Recuperado de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382020000200075#B4](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382020000200075#B4)
- Villón Béjar, M. (2015). Hidrología, 1. ed. ed. Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Villón, M. (2006). HIDROLOGÍA ESTADÍSTICA. Costa Rica. Editoria Tecnológica de Costa Rica, p. 307-347.
- Villón, M. (2012). Hidroesta 2. Manual del usuario. Instituto Tecnológico de Costa Rica, (Ed) CDMB, 384.
- Zucarelli, G. V., Hammerly, R. C. (2013). Determinación de curvas envolventes de caudales máximos observados y esperados para la República Argentina. Argentina. Universidad Nacional del Litoral, Argentina, p. 188.

## Capítulo 9. Anexos

### Anexo 1.

Figura 31. Resultado obtenido y codificación del riesgo en el Plan de Gestión de Riesgo para Cuencas para la planta potabilizadora de La Paz, San Ramón.

		Formulario de Informe de Estudio Técnico Especializado (ETE)				Página 6 de 20			
		CÓDIGO: S-287 Informe Fase 5 - 2021-02-25			N° de Versión: 00				
NOMBRE DEL SISTEMA Y COMPONENTE				EVALUACION DE LA AMENAZA					
#	Código	Nombre de Sistema	Componente	Amenaza de Deslizamiento	Amenaza de Inundación	Amenaza Alud Torrencial	Amenaza Volcánica	Amenaza Sísmica	Amenaza Tsunami
13	PC-A-10	San Mateo	Torre Agua Cruda Queb. Los Mores	8	10	8	2	2	1
			Torre Agua Cruda Machuca	9	28	10	2	8	1
			Planta Potabilizadora	9	4	2	3	18	1
14	MEA-12	Quilínisi	Torre Agua Cruda Río Tebercia	8	10	18	2	8	1
			Torre Agua Cruda Río Negro	9	10	18	2	8	1
			Planta Potabilizadora	20	1	1	2	8	1
15	PC-A-04	Fiealdes Norte	Torre Agua Cruda Río La Paz	4	15	8	2	4	1
			Torre Agua Cruda Zurtubel	9	8	8	2	4	1
			Planta Potabilizadora	8	8	8	2	8	1

**Cuadro 1** Tabla de resumen de evaluación de amenaza (continuación)

Los colores son tomados de la codificación de Riesgos del SEVRI la cual se indica a continuación

<b>CRITICO 16-25</b>
<b>ALTO 10-15</b>
<b>MEDIO 5-9</b>
<b>BAJO 1-7</b>

**Cuadro 2** Codificación del color de los riesgos

Fuente: Porras et al., 2021, p.6.

### Anexo 2.

Cuadro 37. Desglose de gastos de las giras de campo a efectuar dentro de la ejecución del proyecto.

Gira de campo					
Rubro	Precio unitario ¢	Cantidad	Unidad	Precio Total	Observaciones
Alimentación <sup>1</sup>	¢ 13 500.00	4	día	¢ 54 000.00	Desayuno, almuerzo y cena
Alimentación <sup>1</sup>	¢ 13 500.00	4	día	¢ 54 000.00	Desayuno, almuerzo y cena
Transporte <sup>2</sup>	¢ 11 425.00	3	día	¢ 39 275.00	Ruta: Liberia-Puntarenas-Jacó-San José-Liberia (+5000¢ de taxis)
Transporte <sup>2</sup>	¢ 12 500.00	3	día	¢ 42 500.00	Ruta: Nicoya-San Ramón- San José- Nicoya (+5000¢ de taxis)

Hospedaje <sup>3</sup>	₡ 20 000.00	2	noche	₡ 40 000.00	Jacó
Hospedaje <sup>3</sup>	₡ 19 100.00	2	noche	₡ 38 200.00	San Ramón
Insumos para gira de campo	₡ 34 987.50	2	Varios	₡ 69 975.00	Botas, capa impermeable, machete, sombreros y cinta métrica
Otros	₡ 4 800.00	2	Varios	₡ 9 600.00	Insumos por pandemia de covid-19 (mascarillas y alcohol en gel)
Total					₡ 347 550.00

**Nota.** 1- Los precios para alimentación fueron establecidos según lo estipulado en la Contraloría de la República. 2- Los precios para transportes fueron establecidos consultando a empresas de transportes que trabajan en las rutas establecidas. 3- Los precios para hospedaje fueron establecidos según lo estipulado en la Contraloría de la República.

Fuente: Elaboración propia, 2022.

### Anexo 3.

**Cuadro 38.** *Falencias detectadas dentro del modo operativo de cada uno de los ocho PDRIC ante inundaciones de Costa Rica.*

PDRIC	Aspectos que mejorar
Cañas-Lajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Incorporación de un SAT preventiva para la protección de las comunidades ribereñas contra inundaciones.</li> <li>➤ Mejorar el acceso de información de la instrumentación y observación y monitoreo que operan en este PDRIC, ya que dos entes diferentes (ICE y CNE) contienen diferentes partes de información.</li> <li>➤ Integrar los puntos de monitoreo del ICE en la PDRIC.</li> <li>➤ Expandir la instrumentación ya que es usada únicamente por la población en riesgo.</li> <li>➤ Actualizar/reparar el registro de datos referentes a precipitación ya que dicha celda en la mayoría de los espacios sale en blanco.</li> <li>➤ Realizar informes al IMN referente a los datos registrados.</li> <li>➤ Elaboración de mapas de riesgo, actualización del análisis hidrológico (último fue en 2003).</li> <li>➤ Elaboración de un protocolo a seguir ya que este no se encuentra bien definido.</li> </ul>
Sarapiquí-Sucio	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Falta de cooperación del ICE a la hora de brindar información referente a los PDRIC.</li> <li>➤ Elaborar mapas de riesgo.</li> <li>➤ Actualización de los análisis hidrometeorológicos en la región.</li> </ul>
Corredores-Caño Seco	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Si bien, se está coordinando para la puesta en marcha de un SAT; se denota la falta de estudios técnicos que acompañen y respalden dicho SAT.</li> <li>➤ No hay mapa de riesgo.</li> </ul>
Parrita-Pirris	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Falta de sirenas para alertar a la comunidad.</li> <li>➤ Elaborar mapas de riesgos.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Actualización de los análisis de los eventos hidrometeorológicos.</li> <li>➤ Falta claridad en cuanto al modo de operación y encargados de la misma.</li> </ul>
Sixaola-Telire	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Bananeras encargadas del control y monitoreo de inundaciones, pero difícil acceso a dicha información.</li> <li>➤ Sirena en mal estado.</li> <li>➤ Deficiencias o carencia total de los sistemas de procesamiento de datos.</li> <li>➤ Elaborar mapa de riesgo.</li> <li>➤ Actualización de los análisis de los eventos hidrometeorológicos.</li> </ul>
Barranca	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ No se cuenta con instrumentación para el sistema de comunicación.</li> <li>➤ Elaborar mapa de riesgo.</li> <li>➤ Actualización de los análisis de los eventos hidrometeorológicos.</li> </ul>
Matina-Chirripó	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Elaborar mapa de riesgo.</li> <li>➤ Actualización de los análisis de los eventos hidrometeorológicos.</li> </ul>
Reventazón-Parismina	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Elaborar mapa de riesgo.</li> <li>➤ Actualización de los análisis de los eventos hidrometeorológicos.</li> <li>➤ Es el único que no cuenta con comités comunales para el manejo de respuesta a emergencias.</li> </ul>

Fuente: UNESCO-CEPRENAC (2011).

#### Anexo 4.

*Cuadro 39. Prueba de Bondad Kolmogorov-Smirnov para los PMH de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.*

Kolmogorov-Smirnov test for:All data	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	DMax
Pareto	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97.94%	0.14568
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97.58%	0.14856
GEV-Min (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97.57%	0.14864
Pareto (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96.87%	0.15353
GEV-Min	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96.50%	0.15587
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96.35%	0.15674
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	95.69%	0.16041
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	95.65%	0.16062
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	95.54%	0.16122
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	94.83%	0.16472
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	94.63%	0.16563
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	94.50%	0.16624
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	94.44%	0.16653
Galton	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	93.67%	0.16987
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	93.57%	0.17028

EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	93.48%	0.17064
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	93.27%	0.17151
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	91.75%	0.17733
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	90.06%	0.18318
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	87.73%	0.19048
EV2-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	83.49%	0.20232
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	83.36%	0.20265
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	81.76%	0.2068
GEV-Min (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	76.00%	0.22083
GEV-Min (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	74.75%	0.22376
EV1-Min (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	63.18%	0.24994
EV1-Min (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	61.87%	0.25288

Fuente: Elaboración propia, 2022.

#### Anexo 5.

**Cuadro 40.** Prueba de bondad X-Cuadrada para los PMH de Piedra Bruja, Jacó, Puntarenas.

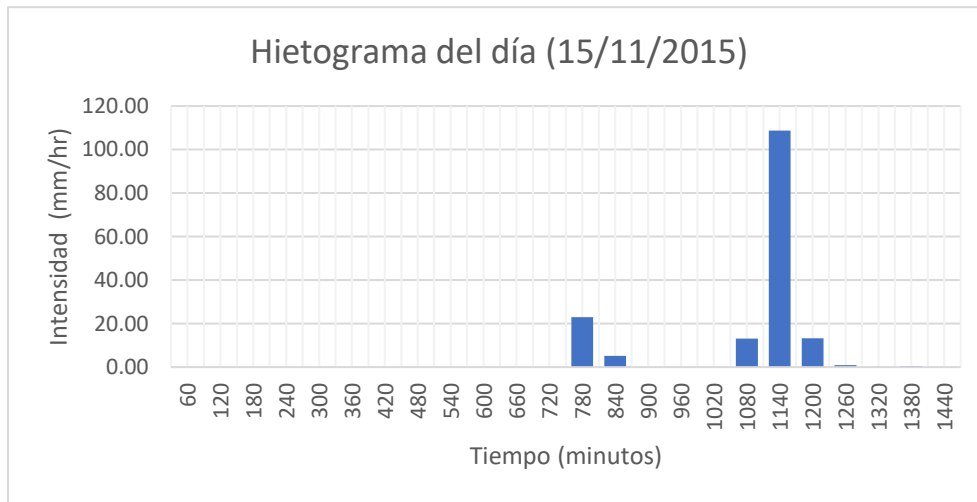
X-Square test for All data	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	Pearson Param.
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	51.27%	0.42857
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	51.27%	0.42857
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	51.27%	0.42857
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	51.27%	0.42857
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	51.27%	0.42857
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	51.27%	0.42857
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	51.27%	0.42857
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	21.00%	1.57143
EV2-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	21.00%	1.57143
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	21.00%	1.57143
Normal	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	9.95%	2.71429
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	9.95%	2.71429
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	9.95%	2.71429
EV1-Min (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	9.95%	2.71429

EV3-Min (Weibull, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	9.95%	2.71429
GEV-Min (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	9.95%	2.71429
GEV-Min (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	9.95%	2.71429
EV1-Min (Gumbel)	ACCEPT	REJECT	REJECT	2.53%	5

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Anexo 6.

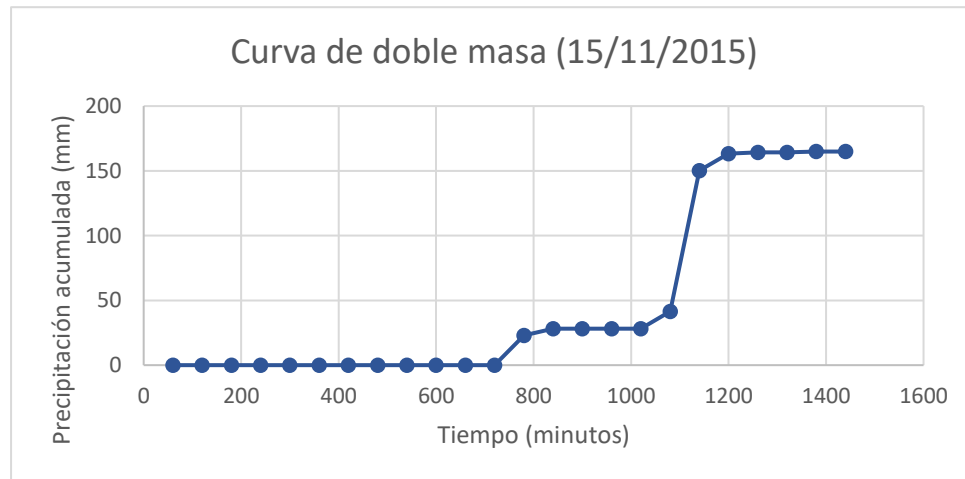
Figura 32. Hietograma del día 15 de noviembre del 2015.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Anexo 7.

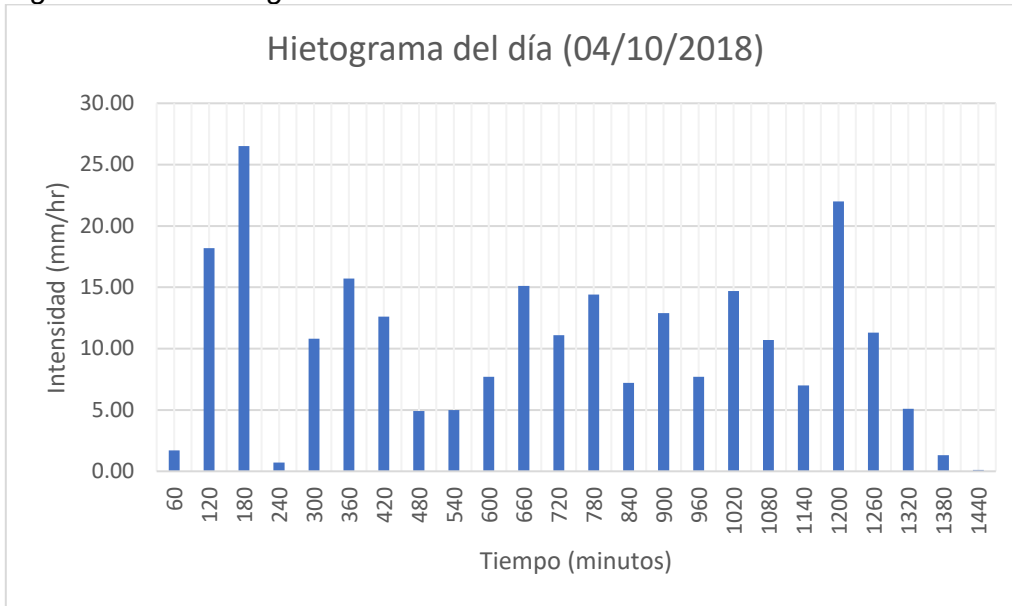
Figura 33. Curva de doble masa del día 15 de noviembre del 2015.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Anexo 8.

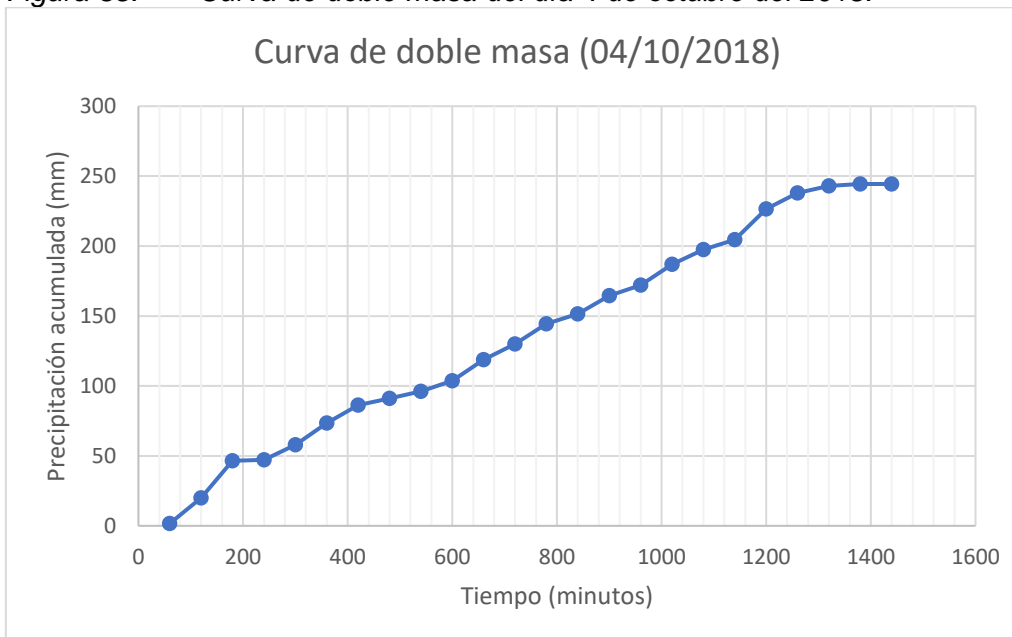
Figura 34. Hietograma del día 4 de octubre del 2018.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Anexo 9.

Figura 35. Curva de doble masa del día 4 de octubre del 2018.



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Anexo 10.

Cuadro 41. Simbología de colores de amenaza según la Comisión Nacional de Emergencias de Costa Rica.

Tipo de Alerta	Condición de Alerta	Descripción	Acciones operativas
Informativa	Verde	Representa la posibilidad de que se dé un fenómeno que potencialmente se puede volver una amenaza que tiene la posibilidad de escalar a un escenario de condición de emergencia.	Vigilar. Informar.
Preparación	Amarilla	Esta esta representa una escalada en la amenaza potencial, puede determinar un nivel de certeza de que el evento ocurrirá si sigue escalando con el tiempo.	Vigilar. Activar. Evaluar. Gestionar información. Movilizar recursos.
Movilización o contención	Naranja	Este nivel de alerta representa ya con certeza de que puede ocurrir el evento que producirá un impacto en el lugar, existen registros históricos que, de sucesos similares, se deben tomar acciones para reducir el impacto, aunque el evento no se haya presentado.	Vigilar. Evacuación Preventiva. Evaluación de necesidades. Planificación de las operaciones. Gestión de información.
Respuesta	Roja	En esta etapa la amenaza se ha materializado y generó consecuencias graves en la zona.	Vigilar. Evacuación. Evaluación de daños y necesidades. Respuesta y Rehabilitación. Gestión de información.

Fuente: CNE, 2022.

Anexo 11

Documento de la Propuesta de protocolo elaborado para la Planta Potabilizadora y la Unidad Cantonal del AyA-San Ramón.

# Propuesta Protocolo SAT

Para eventos hidrometeorológicos extremos



Destinado para la planta potabilizadora de La Paz, San Ramón, Alajuela, Costa Rica.

# Con respecto a esta propuesta de protocolo:

- Se tiene que el presente es un insumo (preliminar) destinado a la gestión del riesgo ante eventos hidrometeorológicos extremos por medio de un Sistema de Alerta Temprana (SAT).
- Este pertenece y es de uso para funcionarios del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), de la sede y planta potabilizadora de La Paz la San Ramón, Alajuela, Costa Rica.
- Este contempla los pasos a seguir al momento de activarse el SAT según la condición de la Alerta.
- Fue elaborado por el estudiante de Licenciatura en Ingeniería Hidrológica Pablo César Benavides Juárez como parte de su Proyecto Final de Graduación (PFG) llamado “Propuesta de sistema de alerta temprana para la gestión de riesgo ante eventos hidrometeorológicos extremos en dos plantas potabilizadoras en Costa Rica: Piedra Bruja en Jacó y La Paz en San Ramón.” En conjunto con el área funcional de gestión del riesgo del AyA.





## ¿Qué es un SAT?

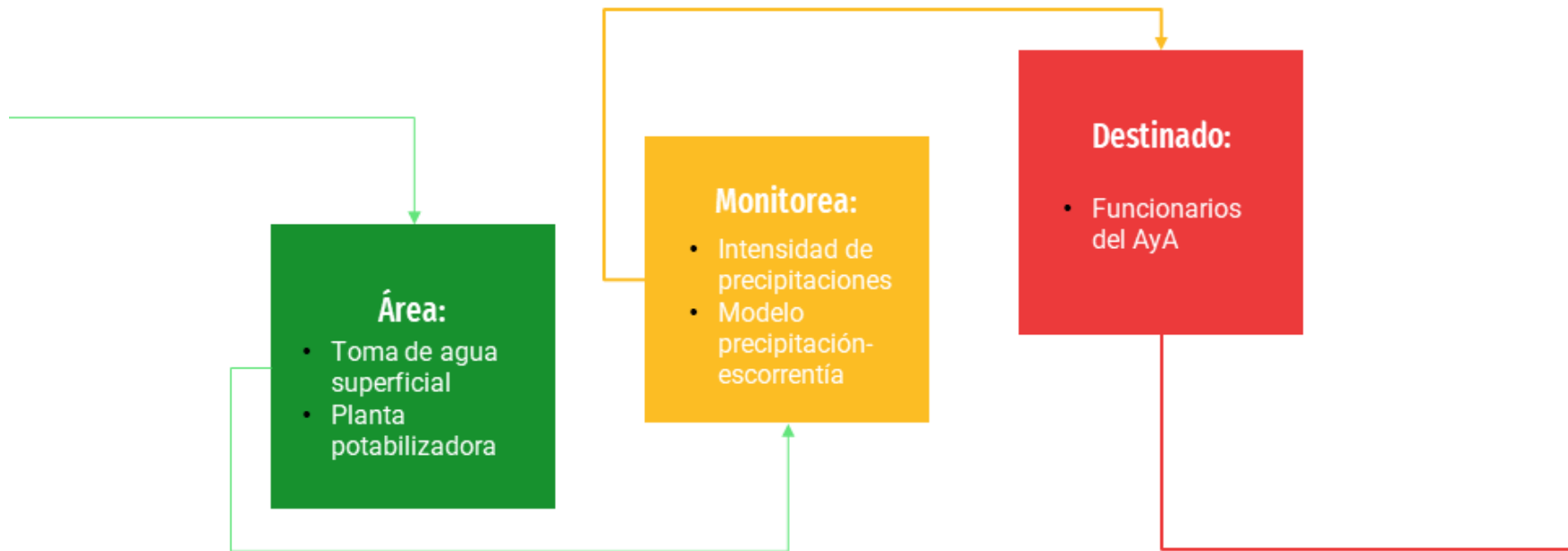
Los Sistema de Alerta Temprana (SAT), son herramientas capaces de recopilar información sobre posibles amenazas para analizar, comprender y prever la posibilidad de un evento y así poder emitir alertas a las comunidades cercanas logrando así mitigar el impacto que el evento pueda ocasionar (Sánchez et al., 2018).

Fuente: Sánchez Hernández, J, Mejía Fernández, F y Zambrano Nájera, J. (2018). Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas – SIMAC Red de estaciones meteorológicas, hidrometeorológicas, de alerta y alarma (SAT) de las quebradas Manizales, El Guamo y Olivares ubicadas en el municipio de Manizales. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales

## Con respecto al SAT elaborado:

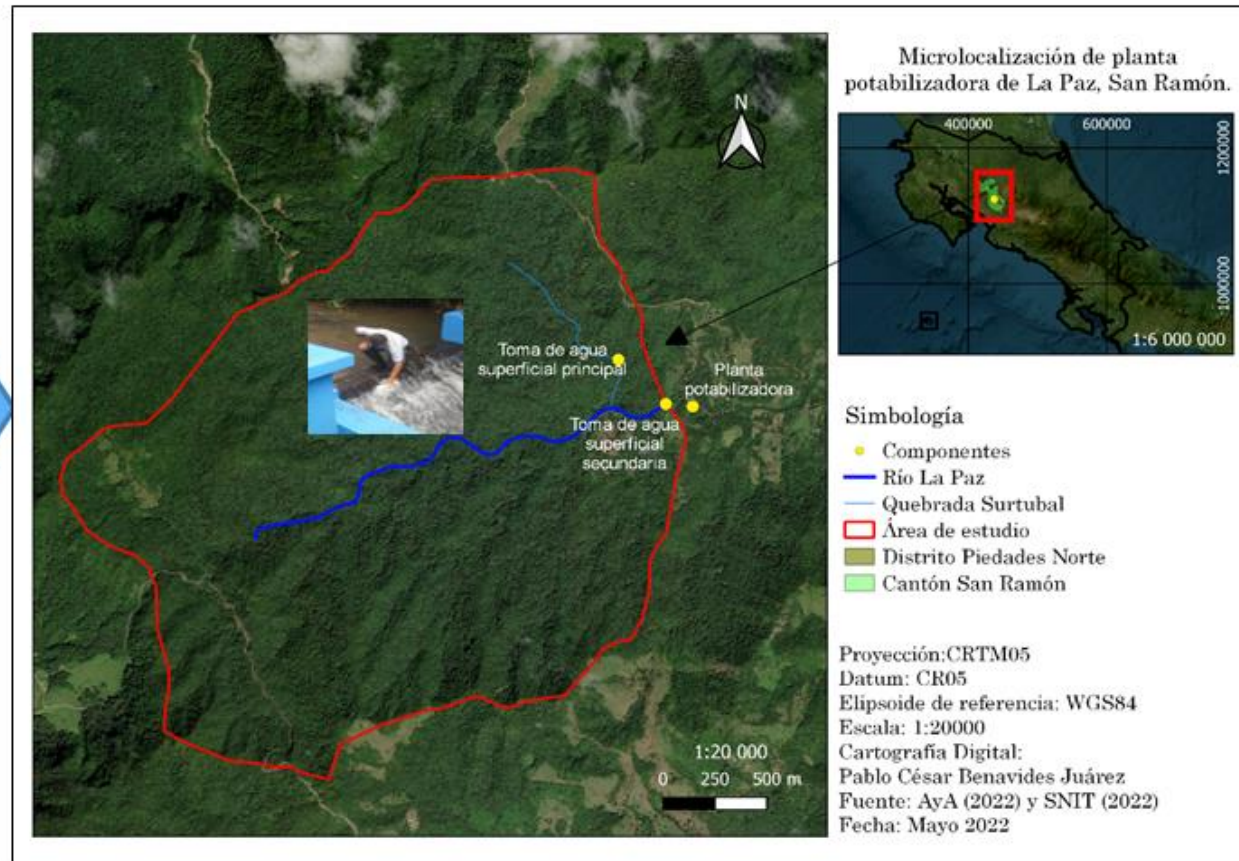


# Consideraciones del presente SAT



# Área de influencia del SAT

Figura 1. Mapa de microlocalización del área de estudio en La Paz, San Ramón de Alajuela, Costa Rica



# Metodología para establecer propuesta de protocolo

Cuadro 1. Simbología de colores de amenaza según la Comisión Nacional de Emergencias de Costa Rica.

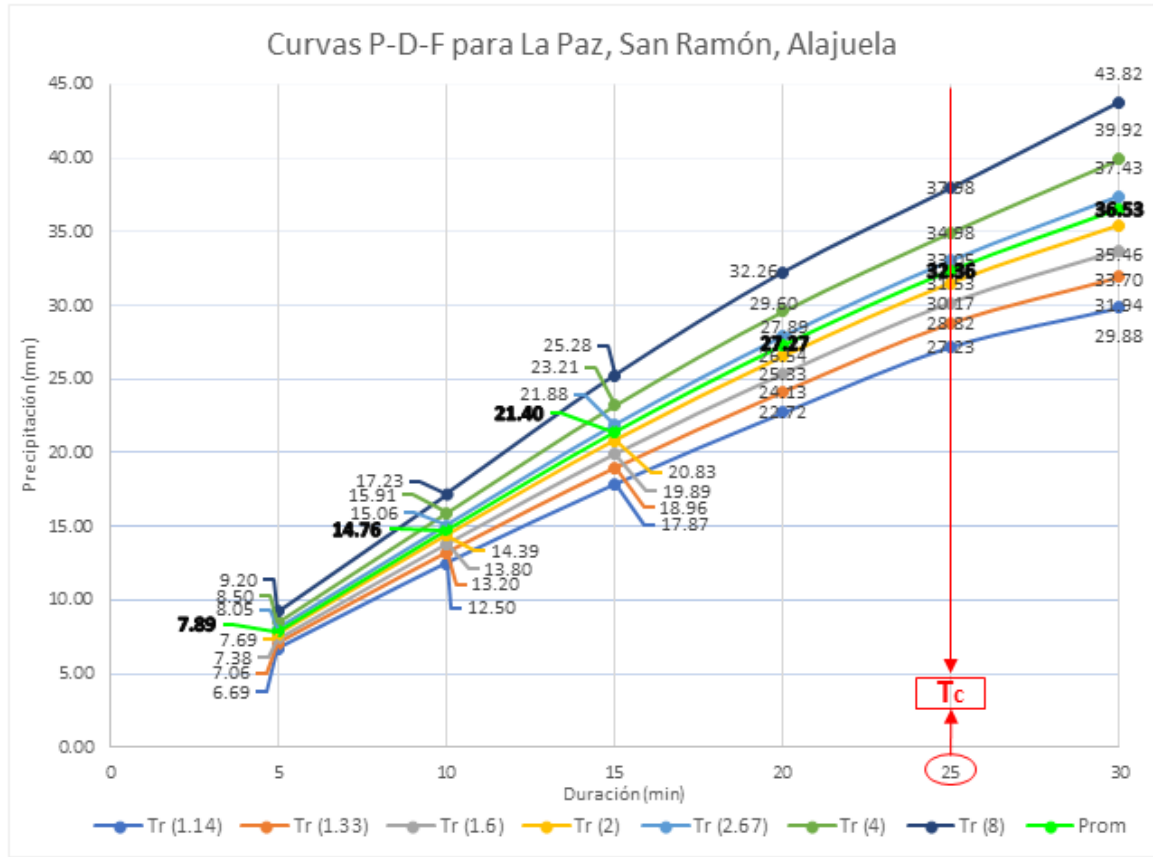
Tipo de Alerta	Condición de Alerta	Descripción	Acciones operativas
Informativa	Verde	Representa la posibilidad de que se dé un fenómeno que potencialmente se puede volver una amenaza que tiene la posibilidad de escalar a un escenario de condición de emergencia.	Vigilar. Informar.
Preparación	Amarilla	Esta esta representa una escalada en la amenaza potencial, puede determinar un nivel de certeza de que el evento ocurrirá si sigue escalando con el tiempo.	Vigilar. Activar. Evaluar. Gestionar información. Movilizar recursos.
Movilización o contención	Naranja	Este nivel de alerta representa ya con certeza de que puede ocurrir el evento que producirá un impacto en el lugar, existen registros históricos que de sucesos similares, se deben tomar acciones para reducir el impacto, aunque el evento no se haya presentado.	Vigilar. Evacuación Preventiva. Evaluación de necesidades. Planificación de las operaciones. Gestión de información.
Respuesta	Roja	En esta etapa la amenaza se ha materializado y generó consecuencias graves en la zona.	Vigilar. Evacuación. Evaluación de daños y necesidades. Respuesta y Rehabilitación. Gestión de información.

Fuente: CNE, 2022.

Fuente: CNE. (2022). Alertas, Preparativos y Respuestas. [https://www.cne.go.cr/preparativos\\_respuestas/alertas.aspx](https://www.cne.go.cr/preparativos_respuestas/alertas.aspx)

# Monitoreo y análisis de tormenta

Figura 2. Curvas PDF para periodos de retorno obtenidos y curva de calibración de los umbrales de alerta delimitadas al tiempo de concentración para la zona de La Paz, San Ramón, Alajuela.



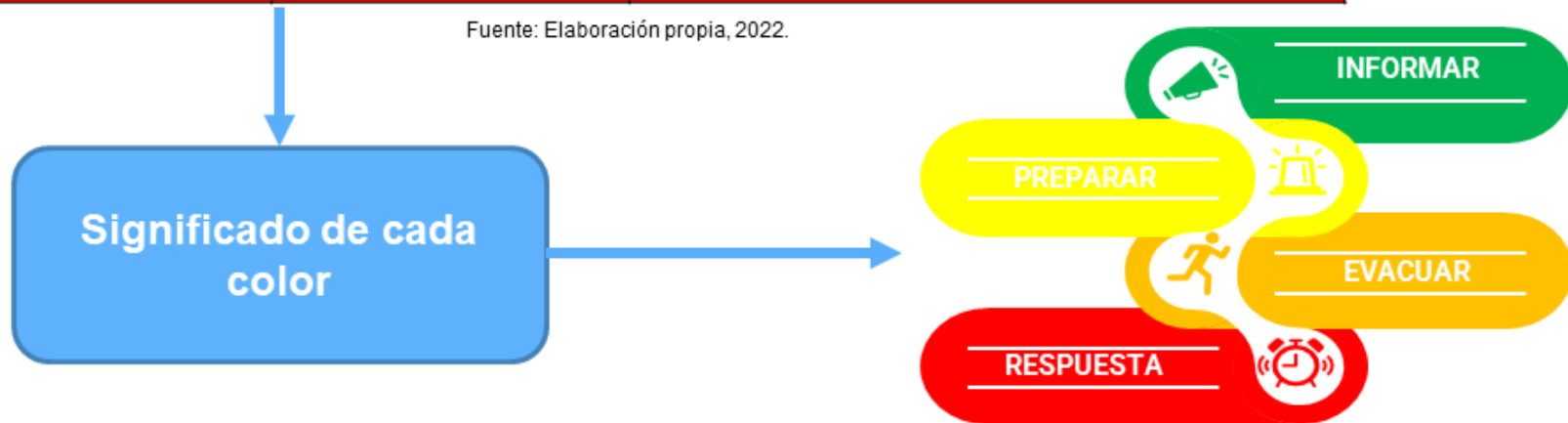
Fuente: Elaboración propia, 2022.

# Umbrales de alerta

Cuadro 2. Umbrales de alerta establecidos para la alarma del SAT utilizando la simbología del CNE; para el área de La Paz, San Ramón, Alajuela

Minutos	Umbrales de alerta (mm/min)		
5	7.89	10.00	14.76
10	14.76	18.08	21.4
15	21.4	24.34	27.27
20	27.27	29.81	32.36
25	32.36	Mayores a 32.36 mm	

Fuente: Elaboración propia, 2022.



# Acciones operativas y encargados



: Jefe técnico (desde el plantel)



: Técnico/operador de planta (desde planta potabilizadora)



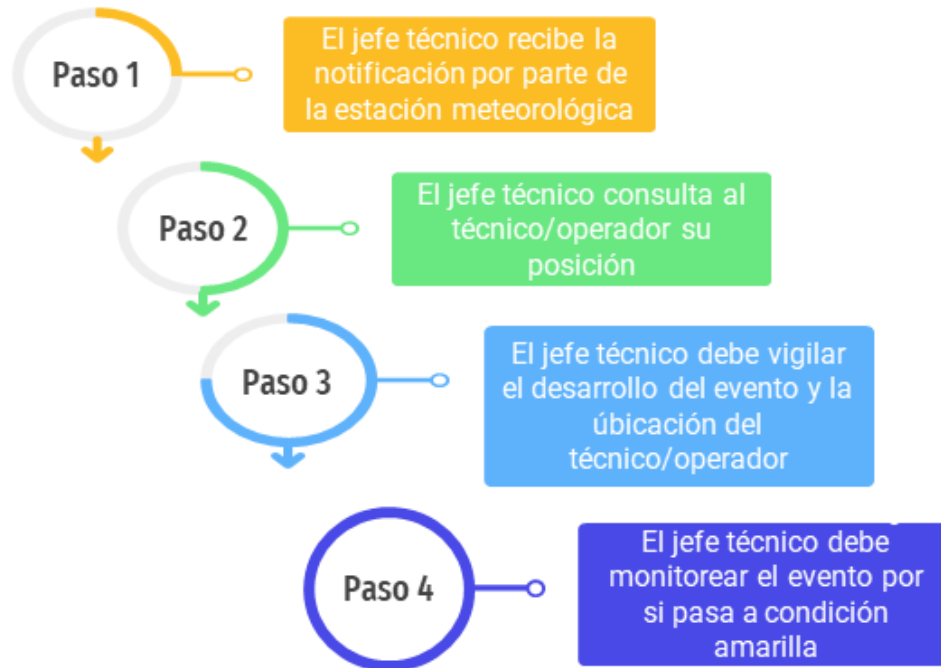
**Detalle de cada etapa de la propuesta de protocolo.**



# Etapa #1. Informar



La alerta llega al plantel



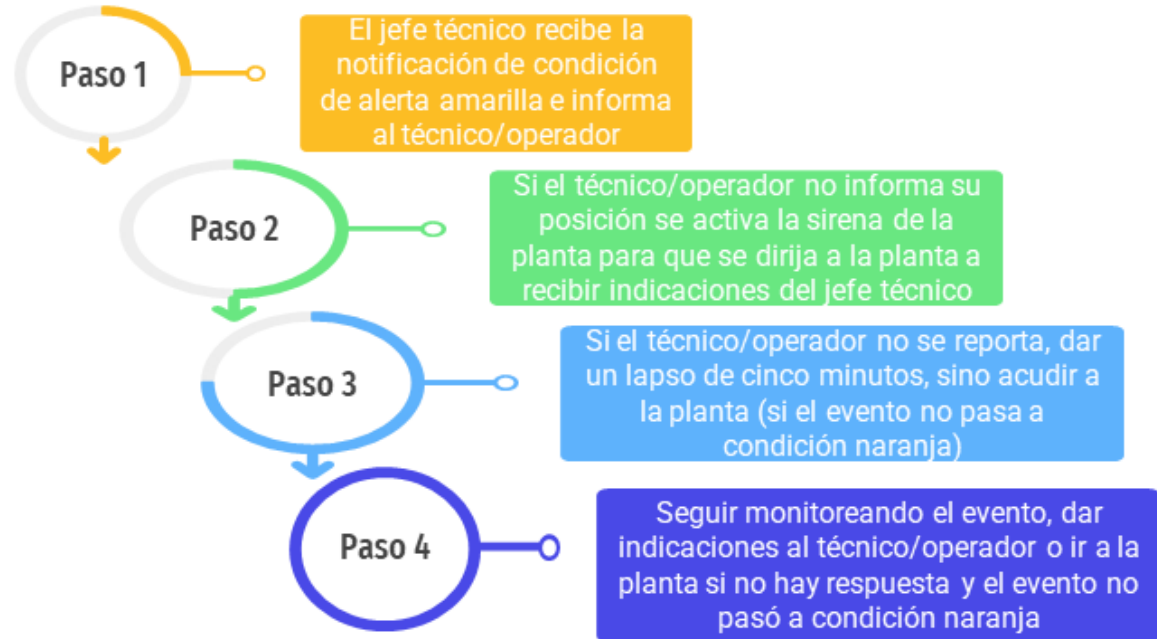
= 7.89 a 18.08 mm/min en un lapso de 5 a 10 min de comenzado el evento

## Etapa #2. Preparar



### 2. Preparar

El jefe técnico informa al técnico/operador de la amenaza



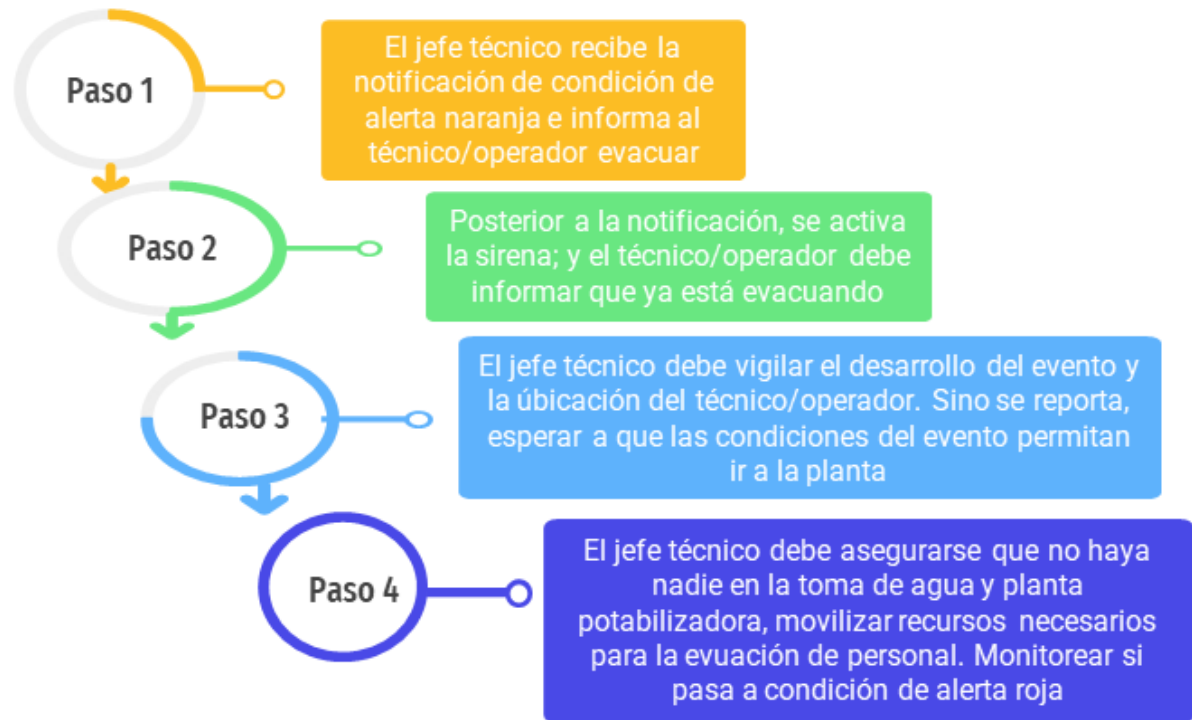
= 21.40 a 24.34 mm/min en un lapso de 10 a 15 min de comenzado el evento

## Etapa #3. Evacuar



### 3. Evacuar

El jefe técnico da orden al técnico/operador de salir de la planta



= 27.27 a 29.81 mm/min en un lapso de 15 a 20 min de comenzado el evento

# Etapa #4. Respuesta



**4. Respuesta**  
Evaluar los impactos del evento



= 32.36 a >32.36 mm/min en un lapso de 20 a 25 min de comenzado el evento

# Proceso de comunicación

## 2. Notificación a jefe técnico (plantel)

La estación meteorológica emite las alertas según los umbrales establecidos

## 4. Notificar al técnico/operador (planta)

Desde el plantel se alerta al técnico de planta sobre la amenaza y se brinda indicaciones

## 5. Evacuar de la planta potabilizadora

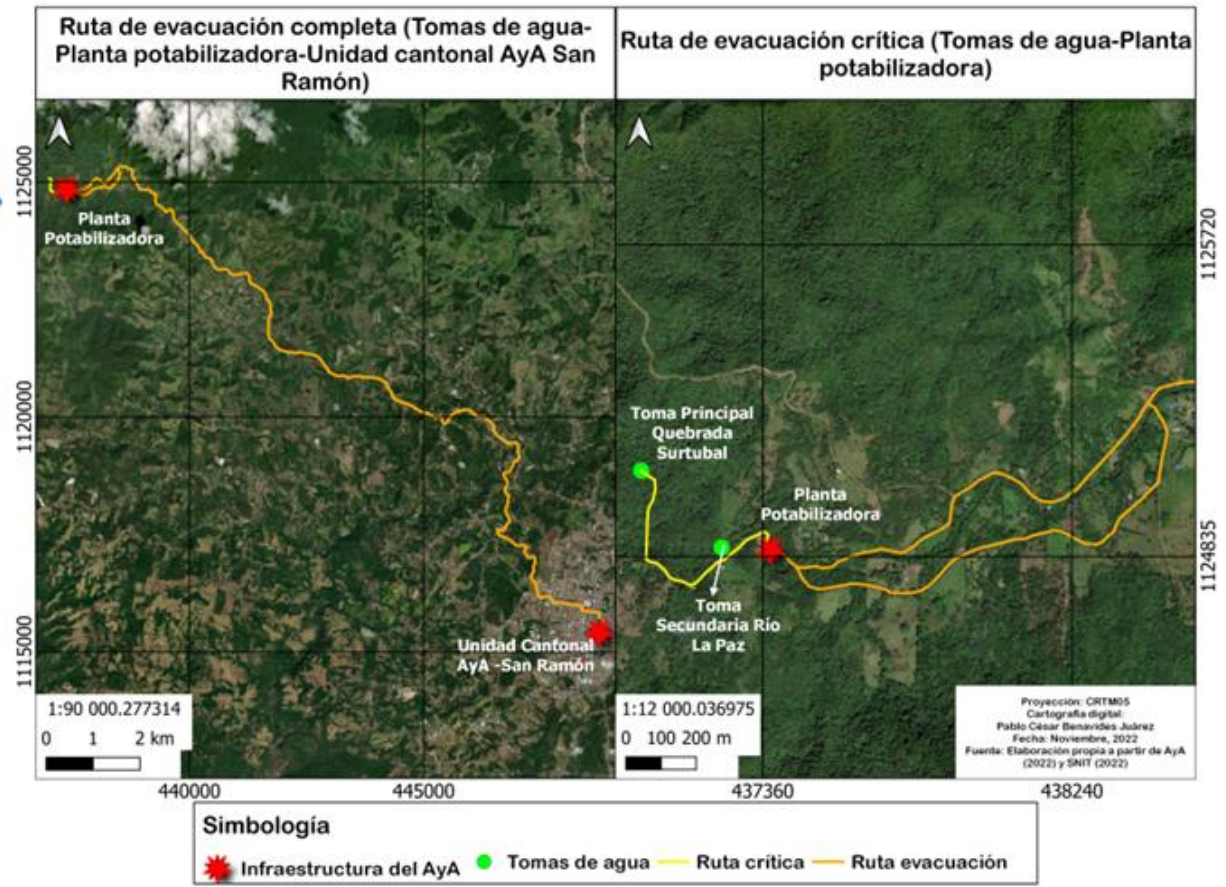
Todos los funcionarios, al recibir la orden, deben evacuar e informar su posición hasta estar seguros



# Mapa de la ruta de evacuación





Figura 3. Mapa de propuesta de la ruta de evacuación para el protocolo SAT en el área de estudio en La Paz, San Ramón de Alajuela, Costa Rica

Las rutas de evacuación contemplan:  
 1- Ir de la toma de agua hacia la planta potabilizadora en condición amarilla  
 2- En condición naranja evacuar por calle filtros o calle Orlich hasta llegar a la ruta nacional 705 rumbo a la Unidad Cantonal AyA-San Ramón



# Resumen de propuesta de protocolo SAT

Cuadro 3. Resumen de la propuesta de protocolo SAT para funcionarios del AyA de la Planta Potabilizadora, La Paz y Unidad Cantonal de San Ramón.

Tipo de Alerta	Condición de Alerta	Descripción	Acciones operativas
Informativa 	Verde (7.89 a 18.08 mm/min en un lapso de 5 a 10 min)	La estación meteorológica "La Paz II" registra un evento (precipitación) que sugiere una potencial amenaza de evento hidrometeorológico extremo; y notifica al jefe técnico sobre esto	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vigilar el desarrollo del evento.</li> <li>Informar al jefe técnico.</li> <li>Consultar al técnico/operador su posición.</li> </ul>
Preparación 	Amarilla (21.40 a 24.34 mm/min en un lapso de 10 a 15 min)	El evento incrementa su intensidad, por ende la amenaza aumenta. Se procede a solicitar nuevamente la posición del técnico/operador, esperar respuesta de este, sino activar sirena. El técnico/operador debe estar o desplazarse hacia la planta potabilizadora a esperar indicaciones.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vigilar el desarrollo del evento.</li> <li>Solicitar ubicación al técnico/operador.</li> <li>Evaluar la posibilidad de ir a la planta (en caso de no tener respuesta y si las condiciones lo permite).</li> </ul>
Movilización o contención 	Naranja (27.27 a 29.81 mm/min en un lapso de 15 a 20 min)	El evento incrementó su intensidad a tal punto que es probable la ocurrencia del evento hidrometeorológico extremo (avenida/crecida). Por lo que se solicita a todos los funcionarios presentes en la planta potabilizadora evacuar según las rutas de evacuación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Evacuación preventiva del personal de la planta potabilizadora.</li> <li>Activar Sirena.</li> <li>Vigilar el desarrollo del evento.</li> <li>Planificación de las operaciones para asegurar que todos abandonaron la planta potabilizadora.</li> </ul>
Respuesta 	Roja (32.36 a > 32.36 mm/min en un lapso de 20 a 25 min)	En esta etapa la amenaza se ha materializado y generó consecuencias graves en la zona. Por lo cual, se procede a verificar si todos los funcionarios presentes en la planta lograron evacuar con éxito hacia el plantel. Se comienza a monitorear el evento y registrar daños durante y post el evento.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verificar el éxito de la evacuación.</li> <li>Monitorear el desarrollo del evento.</li> <li>Esperar que el evento termine (sea seguro) e ir a campo a evaluar y registrar daños.</li> </ul>

Fuente:Elaboración propia, 2022 a partir de CNE, 2022.

Fuente: CNE. (2022). Alertas, Preparativos y Respuestas. [https://www.cne.go.cr/preparativos\\_respuestas/alertas.aspx](https://www.cne.go.cr/preparativos_respuestas/alertas.aspx)

## Conclusiones:

- La presente propuesta de protocolo SAT, es preliminar, ya que no se ha registrado eventos hidrometeorológicos extremos en la zona.
- El resultado obtenido sugiere un punto de partida sobre el cual poder calibrar este SAT para una mejora de la gestión del riesgo en la zona de La Paz, San Ramón, Alajuela, Costa Rica.
- Se está a la espera de definir el medio de comunicación y la posibilidad de incluir la sirena en la planta potabilizadora de la zona sujeto de estudio.
- Falta el programar los umbrales de alerta obtenidos con la estación meteorológica "La Paz II" con los medios de comunicación que emitirán la alarma.
- Se recomienda el realizar una modelación hidráulica sobre el cauce del río La Paz, para obtener un panorama más claro sobre las tormentas que puedan sugerir una potencial amenaza y las zonas más vulnerables.
- Por último, se recomienda el seguir con el monitoreo y recolección de información hidrometeorológica para cada 5 años actualizar los estudios efectuados.

