

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

INFORME FINAL

Programa de Investigación en Recursos Naturales y Ambiente

–PUIRNA-

**Estudio hidrológico e hidráulico para modelación a inundaciones en la cuenca de los ríos
Sis-Icán y propuesta preventiva a desastres**

Partida presupuestaria del proyecto de investigación: 4.8.63.0.28

Proyecto número AP3-2022

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS Y AMBIENTALES

–IIA-

FACULTAD DE AGRONOMÍA

UNIDAD AVALADORA

Dr. Tomás Antonio Padilla Cámara

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Guatemala, 28 de febrero del 2023

Autoridades

Dra. Alice Burgos Paniagua
Directora General de Investigación

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar
Coordinador General de Programas

M.Sc. Andrea Rodas,
Coordinadora Programa Universitario de Investigación
En Recursos Naturales y Ambiente (PUIRNA)

Autores

Nombre del coordinador del proyecto: Tomás Antonio Padilla Cámara

Nombre del investigador: Pedro Alejandro Soto Reyes

Nombre del auxiliar de investigación II: Jorge Luis Azzari Dominguez

Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación (Digi), 2022. El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la Digi de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la partida presupuestaria 4.8.63.0.28 con código **AP3-2022** en el Programa Universitario de Investigación en Recursos Naturales **-PUIRNA-**

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.



Universidad de San Carlos de Guatemala
Dirección General de Investigación



1 Índice general

2	Resumen y palabras claves	10
	Abstract and keyword	11
3	Introducción	12
4	Planteamiento del problema	14
5	Delimitación en tiempo y espacio	15
5.1	Delimitación en tiempo	15
5.2	Delimitación espacial	15
6.	Marco teórico	17
6.1	Oferta del agua en la cuenca	17
6.2	Manejo de recursos hídricos	18
6.3	Amenaza y vulnerabilidad a inundaciones	19
6.4	Modelación hidrológica e hidráulica	20
6.5	Procedimientos actuales utilizados para la estimación de recursos hídricos	21
6.6	Estudios hidrológicos e hidráulicos para el ordenamiento territorial de una cuenca	22

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

7	Estado del arte	23
8	Objetivos	25
8.1	Objetivo general	25
8.2	Objetivos específicos	25
9	Hipótesis	25
10	Materiales y métodos	26
10.1	Enfoque de la investigación	26
10.2	Método	26
10.3	Recolección de información	29
10.4	Técnicas e instrumentos	29
10.5	Procesamiento y análisis de la información	31
11	Resultados y discusión	33
11.1	Resultados	33
11.1.1	Aspectos biofísicos de la cuenca de los ríos Sis-Icán	33
11.1.2	Pendientes	34
11.1.3	Subcuencas	36
11.1.4	Geología	38
11.1.5	Geomorfología	40
11.1.6	Suelos	42
11.1.7	Usos de suelo	44
11.1.8	Morfometría de la cuenca	46
11.1.9	Climatología de la cuenca	53
11.1.10	Escorrentamiento superficial	68
11.1.11	Estadística hidrológica	81
11.1.12	Balance hídrico	87
11.1.13	Modelamiento para estimación a inundaciones	89
11.2	Discusión de resultados	110
11.2.1	Aspectos biofísicos de la cuenca	110
11.2.2	Análisis de la Morfometría de la cuenca de los ríos Sis-Icán	115

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

11.2.3	Análisis de climatología	117
11.2.4	Análisis de escurrimiento superficial	120
11.2.5	Estadística hidrológica	122
11.2.6	Balance hídrico	124
11.2.7	Modelamiento para estimación a inundaciones	127
12	Conclusiones	131
13	Referencias	133
14	Apéndice	137
15	Vinculación	149
16	Estrategia de difusión, divulgación y protección intelectual	150
17	Aporte de la propuesta de investigación a los ODS:	151
18	Orden de pago final (incluir únicamente al personal con contrato vigente)	152
19	Declaración del Coordinador(a) del proyecto de investigación	152
20	Aval del Director(a) del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario	153
21	Visado de la Dirección General de Investigación	153

Índice de cuadros

Cuadro 1 Porcentaje de pendientes dentro de la cuenca de los ríos Sis-Icán	34
Cuadro 2 Porcentaje y área de unidades geológicas dentro de la cuenca de los ríos Sis-Icán.	36
Cuadro 3 Porcentaje y área de unidades geológicas dentro de la cuenca de los ríos Sis-Icán	38
Cuadro 4 Porcentaje y área de unidades geomorfológicas dentro de la cuenca de los ríos Sis-Icán	40
Cuadro 5 Porcentaje y área de usos de suelo dentro de la cuenca de los ríos Sis-Icán.	44
Cuadro 6 Datos de corrientes de la cuenca de los ríos Sis-Icán	46
Cuadro 7 Cálculo de Longitud acumulada de corrientes	49
Cuadro 8 Aspectos de superficie de la cuenca.	49
Cuadro 9 Cuantificación de intersección y longitud de curvas a nivel presentes en cuenca (Método de Horton)	50
Cuadro 10 Cuantificación de intersección y longitud de curvas a nivel presentes en cuenca (Método de Horton)	51
Cuadro 11 Localización georreferenciada de estaciones meteorológicas	53
Cuadro 12 Registros de precipitación pluvial (acumuladas y promedio) en registro histórico de años. Parte alta de la cuenca.	55
Cuadro 13 Registros de precipitación pluvial promedio anual. Parte alta de la cuenca.	56
Cuadro 14 Datos promedio de lluvia y cálculo de ETP promedio anual. Parte alta de la cuenca.	59
Cuadro 15 Registros de precipitación pluvial (acumuladas y promedio) en registro histórico de años. Parte media de la cuenca de los ríos Sis-Icán.	60
Cuadro 16 Datos promedio de lluvia y cálculo de ETP promedio anual. Parte media de la cuenca.	63
Cuadro 17 Registros de precipitación pluvial (acumuladas y promedio) en registro histórico de años. Parte baja de la cuenca.	64
Cuadro 18 Registros de precipitación pluvial promedio anual. Parte baja de la cuenca.	65
Cuadro 19 Datos promedio de lluvia y cálculo de ETP promedio anual. Parte baja de la cuenca.	67
Cuadro 20 Localización georreferenciada de estaciones hidrológicas	69
Cuadro 21 Datos de caudal acumulado en los años 2003-2022. Estación La Franja.	69
Cuadro 22 Datos de caudal promedio en los años 2003-2022. Estación La Franja.	70

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Cuadro 23 Datos de caudal promedio mensual en año hidrológico. Estación La Franja.	72
Cuadro 24 Cálculo de volumen promedio mensual en año hidrológico. Estación La Franja.	74
Cuadro 25 Datos de caudal acumulado en los años 2003-2022. Estación La Máquina.	75
Cuadro 26 Datos de caudal promedio en los años 2003-2022. Estación La Máquina.	76
Cuadro 27 Datos de caudal acumulado promedio mensual. Estación La Máquina.	77
Cuadro 28 Datos de caudal promedio mensual en año hidrológico. Estación La Máquina.	78
Cuadro 29 Cálculo de volumen promedio mensual en año hidrológico. Estación La Máquina.	79
Cuadro 30 Determinación de caudales característicos.	81
Cuadro 31 Uso actual y clasificación de la tierra de la cuenca de los ríos Sis-Icán	82
Cuadro 32 Aspectos de cuenca y de su caudal	82
Cuadro 33 Datos de cálculo estadístico para caudal máximo (Método Pearson III). Estación La Franja.	83
Cuadro 34 Datos de cálculo estadístico para caudal máximo (Método Pearson III). Estación La Máquina.	83
Cuadro 35 Datos de cálculo estadístico para caudal máximo (Método Gumble I). Estación La Franja.	84
Cuadro 36 Datos de cálculo estadístico para caudal máximo (Método Gumble I). Estación La Máquina.	84
Cuadro 37 Cálculos de intensidad, duración en minutos y frecuencia en años.	85
Cuadro 38 Resultados de variables de infiltración y características de suelo en diferentes segmentos de cuenca	87
Cuadro 39 Balance hídrico de suelo (Parte alta de cuenca de los ríos Sis-Icán)	87
Cuadro 40 Balance hídrico de suelo (Parte media de cuenca de los ríos Sis-Icán)	88
Cuadro 41 Balance hídrico de suelo (Parte baja de cuenca de los ríos Sis-Icán)	88
Cuadro 42 Puntos críticos con amenaza a inundaciones	108
Cuadro 43 Registro caudales estación La Máquina 2003-2010	143
Cuadro 44 Registro caudales estación La Máquina 2010 -2018	144
Cuadro 45 Registro caudales estación La Máquina 2018 - 2022 y resumen histórico	145
Cuadro 46 Registro caudales estación La Franja 2003-2010	146
Cuadro 47 Registro caudales estación La Máquina 2010 -2018	147
Cuadro 48 Registro caudales estación La Franja 2018 - 2022 y resumen histórico	148
Cuadro 49 Cálculo de longitud media de corrientes.	149

Índice de figuras

Figura. 1 Departamentos ubicados en la cuenca de los ríos Sis-Icán	16
Figura. 2 Mapa de pendiente de la cuenca de los ríos Sis-Icán	35
Figura. 3 Mapa de subcuencas pertenecientes a la cuenca de los ríos Sis-Icán.	37
Figura. 4 Mapa geológico de la cuenca de los ríos Sis-Icán.	39
Figura. 5. Mapa geomorfológico de la cuenca de los ríos Sis-Icán.	41

Figura. 6 Porcentaje y área de unidades de suelo dentro de la cuenca de los ríos Sis-Icán.	42
Figura. 7 Mapa de suelos de la cuenca de los ríos Sis-Icán.	43
Figura. 8 Mapa de usos de suelo de la cuenca de los ríos Sis-Icán.	45
Figura. 9 Gráfica Log Nu vs U	47
Figura. 10 Gráfica Nu vs U.	47
Figura. 11 Gráfica de porcentaje área acumulada y elevación de cuenca, para encontrar elevación media	52
Figura. 14 Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas.	54
Figura. 13 Precipitación acumulada años 2013-2022 Parte alta de cuenca. Estación Buena Vista.	55
Figura. 14 Precipitación promedio años 2013-2022 Parte alta de cuenca. Estación Buena Vista.	56
Figura. 17 Precipitación promedio anual. Parte alta de la cuenca. Estación Buena Vista	57
Figura. 16 Climadiagrama. Parte alta de la cuenca.	58
Figura. 17 Relación Precipitación-ETP parte alta de cuenca.	59
Figura. 18 Precipitación acumulada años 2006-2022 parte media de cuenca.	60
Figura. 19 Precipitación promedio años 2006-2022 parte media de cuenca	61
Figura. 20 Registros de precipitación pluvial promedio anual. Parte media de la cuenca	61
Figura. 21 Precipitación promedio anual. Parte media de la cuenca.	62
Figura. 22 Climadiagrama parte alta de la cuenca. Parte alta de la cuenca.	62
Figura. 24 Relación Precipitación-ETP. Parte media de cuenca.	63
Figura. 24 Precipitación acumulada años 2015-2022 Parte baja de cuenca. Estación San Nicolás.	64
Figura. 25 Precipitación promedio años 2015-2022 Parte baja de cuenca. Estación San Nicolás.	65
Figura. 26 Precipitación promedio anual. Parte media de cuenca, estación San Nicolás	66
Figura. 27 Climadiagrama. Parte baja de la cuenca	66
Figura. 28 Relación Precipitación-ETP. Parte baja de cuenca.	67
Figura. 29 Mapa de ubicación de estaciones hidrométricas.	68
Figura. 30 Gráfica de caudal acumulado en los años transcurridos 2003-2022. Estación La Franja	70
Figura. 31 Gráfica de caudal promedio en los años transcurridos 2003-2022. Estación La Franja.	71
Figura. 32 Gráfica de caudal acumulado promedio mensual durante año hidrológico. Estación La Franja.	72
Figura. 33 Gráfica de caudal promedio mensual en año hidrológico. Estación La Franja.	73
Figura. 34 Gráfica de caudal base y superficial promedio mensual en año hidrológico. Estación La Franja.	73
Figura. 38 Gráfica de volumen promedio oferente mensual en año hidrológico. Estación La Franja.	74
Figura. 36 Gráfica de caudal acumulado en los años transcurridos 2003-2022. Estación La Máquina.	75
Figura. 37 Gráfica de caudal promedio en los años transcurridos 2003-2022. Estación La Máquina.	76
Figura. 38 Gráfica de caudal acumulado promedio mensual durante año hidrológico. Estación La Máquina.	77
Figura. 39 Gráfica de caudal promedio mensual en año hidrológico. Estación La Máquina.	78
Figura. 40 Gráfica de caudal base y superficial promedio mensual en año hidrológico. Estación La Máquina.	79
Figura. 41 Gráfica de volumen promedio oferente mensual en año hidrológico. Estación La Máquina.	80
Figura. 42 Gráfica de curva de caudales característicos de la cuenca de los ríos Sis-Icán.	81

Figura. 43 Curva de intensidad, duración y frecuencia modulada para la cuenca.	86
Figura. 44 Modelo de elevación digital, cuenca de los ríos Sis-Icán. Elaborado en ArcMap 10.8	89
Figura. 45 Apreciación del modelo de la cuenca con curvas a nivel a cada 10 metros.	90
Figura. 46 Proyección del MED en RAS-Mapper, edición.	90
Figura. 47 Proyección geométrica, segmento río Icán. RAS-Mapper, edición.	91
Figura. 48 Perspectiva x,y,z, segmento de la unión de los ríos Sis-Icán o Estero el Tulate con el programa HEC RAS.	92
Figura. 49 Ejemplo de una visualización de perfil de las secciones generadas con HEC-RAS	92
Figura. 50 Modelo de inundación Sis-Icán con caudal máximo del periodo 2003-2022, comunidades y predios en área de influencia directa.	93
Figura. 51 Modelo obtenido con caudal máximo temporalidad 2003-2022, subcuencas.	94
Figura. 52 Modelo obtenido con caudal máximo temporalidad 2003-2022 y zonificación de áreas susceptibles a inundación.	95
Figura. 53 Modelo obtenido con Pearson III. Tasa de retorno de 50 años, comunidades y predios identificados en área de influencia directa	96
Figura. 54 Modelo obtenido con Pearson III. Tasa de retorno de 50 años, subcuencas.	97
Figura. 55 Modelo obtenido con Pearson III. Tasa de retorno de 50 años zonificación de áreas susceptibles a inundación.	98
Figura. 56 Modelo obtenido con Pearson III. Tasa de retorno de 100 años, comunidades y predios identificados en área de influencia directa	99
Figura. 57 Modelo obtenido con Pearson III. Tasa de retorno de 100 años, subcuencas.	100
Figura. 58 Modelo obtenido con Pearson III. Tasa de retorno de 100 años zonificación de áreas susceptibles a inundación.	101
Figura. 59 Modelo obtenido con Gumbel. Tasa de retorno de 50 años, comunidades y predios identificados en área de influencia directa.	102
Figura. 60 Modelo obtenido con Gumbel. Tasa de retorno de 50 años, subcuencas :	103
<i>Figura. 61 Modelo obtenido con Gumbel. Tasa de retorno de 50 años zonificación de áreas susceptibles a inundación</i>	104
Figura. 62 Modelo obtenido con Gumbel. Tasa de retorno de 100 años, comunidades y predios identificados en área de influencia directa.	105
Figura. 63 Modelo obtenido con Gumbel. Tasa de retorno de 100 años, subcuencas.	106
Figura. 64 Modelo obtenido con Gumbel. Tasa de retorno de 100 años zonificación de áreas susceptibles a inundación.	107
Figura. 65 Zonificación final de áreas con amenaza de inundación.	109
Figura. 66 Reunión con Municipalidad de Mazatenango, Suchitepéquez	137
Figura. 67 Aval de visita, Municipalidad de Mazatenango, Suchitepéquez	138
Figura. 68 Recorrido de campo, Cuenca de los ríos Sis-Icán, Suchitepéquez	138
Figura. 69 Recorrido de campo, Cuenca de los ríos Sis-Icán, Suchitepéquez	139

Figura. 70 Identificación de puntos susceptibles a desastres por inundación, Cuenca de los ríos Sis-Icán, Suchitepéquez	140
Figura. 71 Georreferenciación de puntos, Cuenca de los ríos Sis-Icán, Suchitepéquez	140
Figura. 72 . Observación del comportamiento del caudal, Cuenca de los ríos Sis-Icán, Suchitepéquez	141
Figura. 73 Acompañamiento, Municipalidad de Mazatenango, Suchitepéquez	141
Figura. 74 Visita a la municipalidad de San José La Máquina.	142
Figura. 75 . Plática y planificación de trabajo con la encargada de la Unidad de Gestión Ambiental Municipal de San José La Máquina (Leidy Romero).	142

2 Resumen y palabras claves

La cuenca de los ríos Sis – Icán pertenece a la vertiente del pacífico, cuya característica es el poseer ríos muy caudalosos que, en época lluviosa, representa un aumento considerable de nivel de agua de sus cauces principales, dejando a su paso daños cuantiosos al sector civil, y al sector agrícola. Por tanto, es importante tener información tanto de los efectos disparadores, como del comportamiento hídrico de los ríos principales dentro del área como precedente para la coordinación y manejo de la cuenca, así como la organización de los distintos actores involucrados para la gestión de riesgos.

Se llevó a cabo un estudio detallado de la cuenca de los ríos Sis-Icán con el objetivo de comprender su comportamiento hidrológico e hidráulico, y detectar las zonas propensas a inundaciones. Para ello, se recopiló información climática, hidrométrica y biofísica de la cuenca, se analizó el comportamiento del agua y se creó un modelo hidráulico para examinar el flujo de los ríos y detectar las áreas de riesgo de inundación. Luego, se utilizó un sistema de información geográfica para dividir la cuenca en áreas de susceptibilidad de amenazas naturales a

inundaciones de los cauces principales de los ríos Sis e Icán. Todos estos esfuerzos permitieron obtener una visión clara de la situación hidrológica e hidráulica de la cuenca, lo que a su vez facilitará la elaboración de medidas efectivas de prevención y mitigación de riesgos asociados a inundaciones.

Palabras clave: Cuantificación, proyecto, estudio, hidrología, prevención, inundaciones, desastres.

Abstract and keyword

The Sis - Icán river basin belongs to the Pacific slope, whose characteristic is that it has very large rivers that, in the rainy season, represent a considerable increase in the water level of its main channels, leaving considerable damage to the sector in its wake. civilian, and the agricultural sector. Therefore, it is important to have information on both the triggering effects and the water behavior of the main rivers within the area as a precedent for the coordination and management of the basin, as well as the organization of the different actors involved for risk management.

A detailed study of the Sis-Icán river basin was carried out with the objective of understanding its hydrological and hydraulic behavior, and detecting areas prone to flooding. To do this, climatic, hydrometric, and biophysical information on the basin was collected, water behavior was

analyzed, and a hydraulic model was created to examine river flow and detect flood risk areas. Then, a geographic information system was used to divide the basin into areas of susceptibility to natural threats to flooding from the main channels of the Sis and Iacán rivers. All these efforts made it possible to obtain a clear vision of the hydrological and hydraulic situation of the basin, which in turn will facilitate the development of effective measures for the prevention and mitigation of risks associated with floods.

Keywords: Quantification, project, study, hydrology, prevention, floods, disasters.

3 Introducción

La realización de investigaciones hidrológicas es esencial para el crecimiento de una comunidad, una región o incluso un país. Estos estudios permiten entender el comportamiento del agua en una zona determinada, su distribución en la región y la disponibilidad que tiene para las diferentes partes interesadas o para el uso en sectores específicos del área. Así mismo, contribuye en la planificación, diseño, construcción y operación de un proyecto. (Herrera, 2014).

Dicho avance debe asegurar la sostenibilidad y la preservación del medio ambiente, con especial atención en la protección del agua y la implementación de estrategias para el diseño y el ordenamiento territorial.; la mejora de los recursos hídricos es un requisito fundamental para lograr una planificación civil sostenible (Rodríguez, et al., 2005).

El manejo del recurso hídrico está en la agenda global para la correcta gestión integral, que asegure las disposiciones de demanda de una población, así como también la calidad de vida de las personas.

El cambio climático en tiempos actuales es un tema preocupante para la gobernanza de cualquier nación. Este fenómeno es abordado por la comunidad científica como una de las tendencias de la sociedad postmoderna (Díaz, 2012).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Organización de las Naciones Unidas, 1992) describe el cambio climático como una modificación del clima causada directa o indirectamente por las actividades humanas, que altera la composición de la atmósfera global y se suma a la variabilidad natural del ambiente en un período de tiempo comparable.

Centroamérica se encuentra en una región geográfica que experimenta fluctuaciones en las condiciones climáticas y atmosféricas, tales como huracanes, sequías y eventos recurrentes como El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y su fase fría, conocida como "La Niña", los cuales han causado graves daños tanto humanos como económicos. Esta alta vulnerabilidad es el resultado de una gestión ambiental inadecuada que se manifiesta en la deforestación, el uso inapropiado del suelo y una contaminación significativa con elevados índices. (Padilla, 2012).

El cambio climático incrementa la probabilidad de eventos climáticos extremos, tales como precipitaciones intensas que pueden causar inundaciones, deslizamientos de tierra, huracanes y ciclones, así como aumentos en la temperatura que pueden resultar en olas de frío y calor (Riebeek, 2005). En general, estos cambios afectan los procesos naturales y actividades comerciales y agropecuarias. Particularmente, la acumulación de agua tendría repercusiones en la salud de la población, la intensificación de la erosión costera y la pérdida de tierras litorales debido al incremento del nivel del mar, así como a la disminución de las fuentes de agua dulce. (Unidad para el Cambio Rural, 2012).

Las inundaciones son una amenaza natural cuando grandes cantidades de agua se salen de sus límites normales de manera incontrolada. Estas situaciones son comúnmente desencadenadas por fuertes precipitaciones. (Organización Meteorológica Mundial, 2012).

Guatemala es un país del istmo centroamericano, de región climática tropical, en donde las amenazas de índole hidrometeorológico son recurrentes con impactos significativos sobre el mismo. El índice global de riesgo en el 2017 ubica al país en el noveno lugar en relación a los impactos socio-económicos, derivado de un desastre natural (Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres, 2019).

En Guatemala, la región más propensa a las inundaciones es la costa de la vertiente del Pacífico, la cual tiene una mayor densidad de población. Esto se debe a las condiciones topográficas de las cuencas de respuesta rápida, las cuales tienen corto recorrido y fuertes pendientes, así como a la alta precipitación que se concentra principalmente en los meses de mayo a noviembre en las zonas altas (Medina, 2007). Este informe toma como área de estudio la cuenca de los ríos Sis-Icán, ya que esta cuenca posee las condiciones y factores medibles para desarrollar un análisis hidrológico, así como también, la aplicación herramientas técnicas, para la identificación de zonas críticas a inundaciones, con el fin de la socialización de los resultados, así como la propuesta de acciones mitigantes para la reducción del riesgo, previniendo desastres futuros.

El estudio es de carácter mixto, lo que involucra la recopilación y examen de información tanto cualitativa como cuantitativa. La investigación es no experimental y de tipo correlacional. Y también se clasifica como tipo descriptiva y diagnóstica.

4 Planteamiento del problema

La base científica para sustentar cualquier análisis del recurso, es la información, sobre todo en registros históricos y antecedentes del área. Desafortunadamente, Guatemala presenta una limitada

disponibilidad de ambos tipos de datos. Además, es necesario llevar a cabo investigaciones y análisis en relación a diversos aspectos de los recursos hídricos. (Basterrechea & Guerra, 2019).

En la mayoría de cuencas de Guatemala hay carencia de información del ciclo hidrológico como lluvia, infiltración, evapotranspiración, escorrentía superficial y subterránea, para la formulación de planes y programas de manejo de los recursos hídricos (Herrera et al., 2007).

Las amenazas a inundaciones en las épocas recientes, ha sido de los fenómenos con mayor incremento y recurrencia a nivel nacional, donde la mayoría se ha llevado a cabo en la vertiente del Pacífico del país. Afectando de manera negativa a la región, generando pérdidas de vidas humanas, significativos daños económicos a la infraestructura y a las actividades agrícolas. El aumento en la vulnerabilidad de la región local significa que eventos de menor intensidad pueden tener consecuencias devastadoras similares a las ocasionadas por eventos de mayor intensidad (CONRED 2016).

En la actualidad en la cuenca del río Sis-Icán, son pocos los estudios que se han realizado, la cual ha manifestado una problemática en la sociedad en relación a su comportamiento hidrológico.

Según lo expuesto anteriormente, en esta cuenca ha acontecido desastres en relación a sus eventos extremos de lluvia, evidenciado así sucesos de inundación en cada uno de los cauces principales (Ríos Sis e Icán). Así mismo una caracterización base de la cuenca en función del establecimiento de bocabarras (Pellecer, 2015).

5 Delimitación en tiempo y espacio

Delimitación en tiempo

La investigación inició en febrero del 2022 y finalizó a finales del mes de noviembre del 2022. En el principio del plan de trabajo se analizó, gestionó y se generó información climatológica e hidrológica de la cuenca, así como, algunos factores descriptivos de la región.

En fase de campo se realizó la georreferenciación e información de los puntos de aforo, elaboración de mapas, y la identificación del comportamiento de ríos dentro de la cuenca y acercamiento con autoridades municipales.

Delimitación espacial

La cuenca del río Sis-Icán se localiza entre las coordenadas geográficas de 14° 5' a 14° 41' latitud Norte y 91° 26' a 91° 44' longitud Oeste y en coordenadas GTM: 366191 a 399436 m E y 1,558965 a 1,625376 m N. La superficie de la cuenca del río Sis-Icán es de aproximadamente de 919 km² de los cuales se divide en cobertura departamental de 790 km² (85.8%) con el departamento de Suchitepéquez, 114 km² (12.4%) perteneciente al departamento de Retalhuleu y 18 km² (1.83%) perteneciente a Sololá, como se detalla en la figura 1. De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística (INE), la población total en la cuenca es de 151076 habitantes distribuidos en 18 municipios (INE, 2018).

La cuenca tiene como estudio fundamental dos cauces principales, uno de ellos es el río Sis y por otro lado el río Icán, la conjunción de ambos ríos forma una cuenca cuya orientación de drenaje es hacia al Sur, precisamente en el Océano Pacífico, desde las partes altas al Norte con alturas de 2504 msnm, ubicándose en la ladera Sur-Oeste del Volcán Santo Tomás, en el municipio de Nahualá, Sololá. Teniendo su paso medio, al Oeste en el municipio de Cuyotenango y al Este en el municipio de Santo Domingo, ambos en el departamento de Suchitepéquez, estas localizaciones tienen alturas de aproximadamente 200 a 400 msnm hasta el nivel del mar en El Tulate, San Andrés Villa Seca, Suchitepéquez.

Los patrones de drenaje se dividen en dos, al Norte se clasifica como paralelas, esto en relación a la topografía del lugar. Mientras que en la parte media de la cuenca hacia el Sur, son de tipo detríticas, en la que está presente en la mayoría del área de estudio.

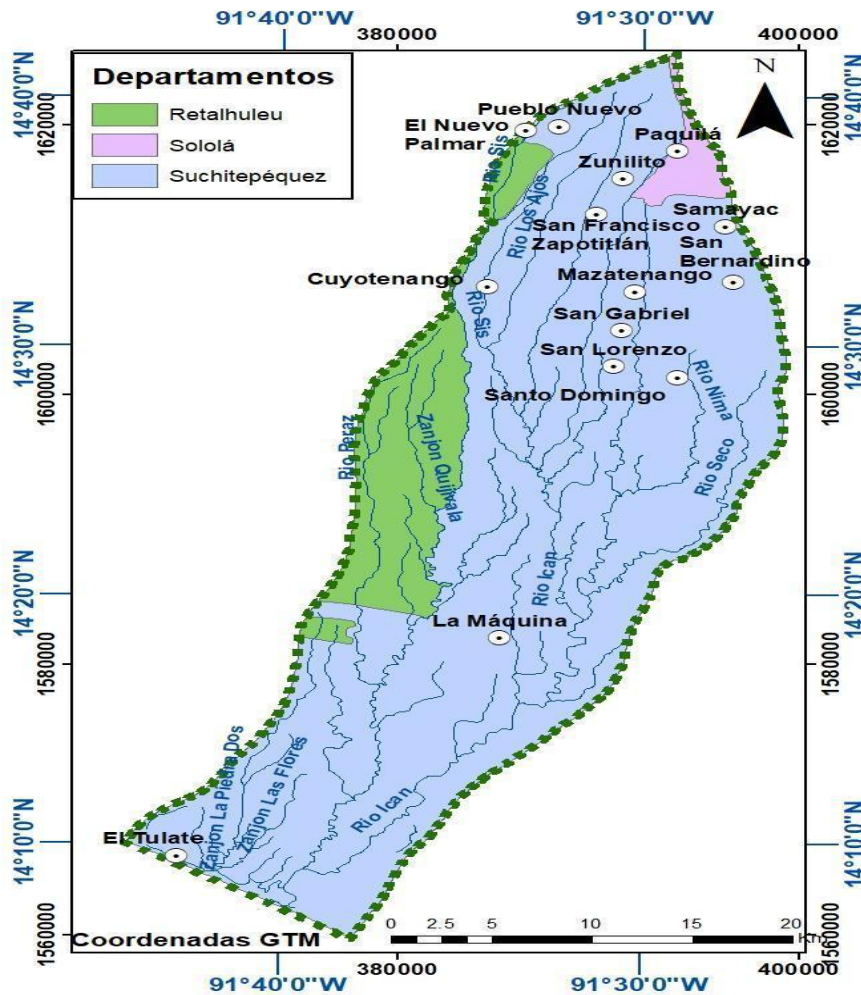


Figura. 1 Departamentos ubicados en la cuenca de los ríos Sis-Icán

6. Marco teórico

La investigación a efectuar consiste en estimar la cantidad de la oferta de agua y una zonificación de inundaciones en la cuenca de los ríos Sis-Icán para elaborar una propuesta de manejo de cuencas en acciones mitigantes para prevención. El fundamento teórico que constituye las partes principales de la investigación es: oferta del agua en la cuenca, manejo de recursos hídricos, amenazas y vulnerabilidad a inundaciones, modelación hidrológica, procedimientos actuales utilizados para la estimación de recursos y estudios hidrológicos e hidráulicos para el ordenamiento y planificación territorial de una cuenca.

Oferta del agua en la cuenca

La oferta hídrica es la cantidad de agua que hay disponible dentro de la cuenca, para ser utilizado en su proceso de desarrollo. En relación a la hidrología y gestión de riesgos, se puede determinar la disponibilidad potencial del recurso hídrico mediante la cantidad natural y la constante renovación del agua, en función a los eventos extremos de lluvia.

En Guatemala existe una relativa alta disponibilidad de agua, la cual varía por región hidrológica considerada de un total de 8. Sin embargo, la representación en el país del área considerada es de la región 1 (San Marcos, Quetzaltenango, Retalhuleu, Suchitepéquez y Sololá) con datos aproximados de un área de 10421 Km², una población de aproximadamente 600000 habitantes, un volumen de agua renovable de 14.03 m³/año y un caudal específico de 42.68 L/seg/Km², constituyendo una región húmeda y con alto escurrimiento superficial (Herrera, 2011).

Acorde a lo evaluado por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), la cuenca de los ríos Sis-Icán tiene un área de 919 km² y una disponibilidad alta del recurso hídrico superficial de 44.5 m³/s, cuyo caudal específico es de 80 L/s/km² (INSIVUMEH 2004).

Según el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático -ICC- (2019), menciona algunos caudales característicos en época de estiaje en una temporalidad de 3 años (2017, 2018 y 2019), para cada uno de los ríos tanto del Sis como del Icán. Estos datos se han monitoreado con una

frecuencia de una vez por semana en los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo, que es la representatividad de época de verano en Guatemala. Para el río Sis, se ha desglosado dos espacios de medición, una sobre la subcuenca del río Peraz (Parte alta y punto de aforo), de las cuales ha arrojado datos promedio de caudal de 0.13 m³/s y de 0.28 m³/s respectivamente. Y la otra sobre el cauce principal del río Sis (Parte alta y desembocadura), en las que los caudales promedios medidos detallan un dato de 0.7 m³/s, en la parte alta, y un valor de 2.43 m³/s para la desembocadura. Este último criterio se aplicó para el río Icán (Parte alta, 2 puntos de aforo y desembocadura). Para la parte alta el dato promedio de caudal registrado es de 0.71 m³/s, tomando en cuenta los ríos Nimá e Icán, el mes de febrero no se presentaron datos. Y para la desembocadura el dato de caudal promedio es de 6.05 m³/s.

No hay un estudio descriptivo hidrológico a detalle para esta cuenca, pero si se cuenta con información base como climática, hidrológica y biofísica para integrarse.

Manejo de recursos hídricos

El agua es un recurso natural crítico que desempeña un papel vital en el suministro y manejo de las comunidades, pero es un recurso limitado y vulnerable (Martínez & Villalejo García, 2018). Entre los principales factores que contribuyen a la presión sobre los recursos hídricos se incluyen la sobrepoblación, la contaminación, los cambios en los patrones de uso y ciclo del agua y el cambio climático, que en gran medida se deben a la actividad humana (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2008). La escasez de agua puede amenazar la seguridad humana en términos de producción de alimentos, salud y estabilidad social y política (Padilla, 2012).

Según SEGEPLAN (2011), en Guatemala, la política nacional del agua tiene como objetivos específicos en síntesis: i) proteger, conservar y mejorar las fuentes de agua, así como los bosques, suelos y riberas de los ríos que regulan el ciclo hidrológico en las cuencas, con el fin de contribuir a la adaptación al cambio climático; ii) mejorar la gobernabilidad y gestión del agua, la planificación hidrológica y el sistema nacional de obras hidráulicas que regulan el ciclo hidrológico para satisfacer la mayor cantidad de demandas, anticipar los requisitos futuros y manejar los riesgos hídricos con el objetivo de contribuir al desarrollo económico, social y a la lucha contra el cambio climático

Los programas y la gestión para el manejo de este recurso, tienen que ser incentivadas por los entes reguladores del agua y del ambiente y las oficinas del gobierno en general, que se delegan para realizar esta función. Sin embargo, es importante que la atención se realice específicamente a nivel de cuenca para su evaluación y protección.

La gestión del agua implica la conservación del recurso mediante la interacción de variables biofísicas, socioeconómicas y culturales en la comunidad. Para asegurar una buena gestión de los recursos hídricos, se debe utilizar como unidad de análisis la cuenca hidrográfica y emplear herramientas económicas para promover la eficiencia en la gestión del agua, fomentando la participación de las comunidades locales en la gestión de los recursos hídricos de su región (Global Water Partnership, 2017).

El enfoque de manejo integrado de los recursos hídricos aborda tanto el manejo de la oferta como de la demanda de agua y promueve la existencia de organizaciones competentes, marcos reguladores (leyes, normas, estrategias, planes, programas y reglamentos) y recursos humanos capacitados para la gestión del agua (GWP, 2017).

El objetivo de una política del agua es asegurar la disponibilidad del recurso en términos de cantidad y calidad para los diversos usos, protegiéndolo al mismo tiempo, en beneficio tanto de las comunidades como del medio ambiente. Esto se logra mediante el manejo integrado de los recursos hídricos para su uso eficiente y sostenible, sin conflictos entre los diferentes usuarios. (Herrera, 2011).

Amenaza y vulnerabilidad a inundaciones

Se puede definir una amenaza natural como la repetición de eventos extremos en una zona determinada, que en el caso de las inundaciones se refiere a la presencia de agua en áreas que normalmente están secas. Las inundaciones pueden ser causadas por diferentes factores, como el aumento temporal del nivel de los ríos, lagos u otros cuerpos de agua, lluvias intensas, exceso de precipitaciones, derretimiento de glaciares, entre otros. En cierta medida, es posible controlar las inundaciones mediante medidas de mitigación y el uso adecuado de la tierra (Constantino y Dávila, 2011)

De acuerdo a CONRED, se estima que en el período entre 2017 y 2018, aproximadamente 1.1 millones de personas residían en áreas consideradas vulnerables a la amenaza natural mencionada en el país, según un informe de UNOCHA de 2017. Durante la temporada de lluvias de cada año, se estima que alrededor de 750,000 personas resultan afectadas, en su mayoría en zonas costeras o llanuras que están expuestas a la inundación de los ríos, tal como se indica en los datos mencionados anteriormente.

De acuerdo con Ochoa (2020), Guatemala ocupa el séptimo lugar a nivel mundial en riesgo de desastres, debido a actividades de deforestación significativas y una gran influencia de fenómenos hidrometeorológicos relacionados con el cambio climático, como sequías, huracanes, inundaciones, depresiones, tormentas tropicales, entre otros factores como el aumento de la población, políticas públicas poco efectivas para obtener financiamiento y tecnología moderna. Por lo tanto, la gestión integral del recurso hídrico con una participación activa se convierte en una alternativa necesaria y sostenible para reducir conflictos existentes y prevenir futuros desastres.

Las inundaciones vinculadas a un huracán en 1949 causaron una gran cantidad de muertes en el país, que se estima en alrededor de 40,000 según EM-DAT (2017).

La parte baja de las cuencas en el sur de Guatemala, ha sufrido impactos por estos fenómenos en las últimas décadas (Guerra, et al., 2017). La recurrencia de amenaza a inundaciones en la parte Sur ha acontecido en los años 1949, 1969, 1998, 2005, 2010 y 2011 asociadas a eventos extremos de lluvia (Guerra et al., 2017).

Modelación hidrológica e hidráulica

La modelización de cuencas implica la integración de procesos hidrológicos en un modelo para fines de análisis, diseño, escurrimiento a largo plazo, predicción de volumen, pronóstico de flujo en tiempo real u otros propósitos. Los modelos son importantes para simular y predecir los fenómenos físicos en diferentes escalas de tiempo y espacio, y pueden proporcionar información sobre relaciones causa-efecto sin alterar los sistemas reales (Herrera, 2014).

Según Andrade (2013), un modelo hidrológico es una versión simplificada de un sistema real complejo, ya sea en forma física o matemática. En términos matemáticos, el sistema real se representa mediante una expresión analítica.

El modelo hidrológico considera factores naturales como la precipitación y la escorrentía para calcular la cantidad de agua que fluye directamente desde una cuenca o región debido a las lluvias durante un período determinado. Este modelo incluye diferentes métodos para calcular las pérdidas, los hidrogramas, el flujo base y la propagación en los cauces, lo que permite simular los procesos hidrológicos en eventos específicos o de manera continua (Estrada y Pacheco, 2012).

Además de lo anterior, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten la integración de datos en la modelación hidrológica y considerar las características físicas y geográficas específicas de las cuencas en un sistema de prevención de inundaciones que permita la predicción y la toma de decisiones correspondientes. Estos sistemas son una herramienta útil para abordar preguntas relacionadas con la distribución espacial y temporal del flujo de agua (Estrada y Pacheco, 2012).

Procedimientos actuales utilizados para la estimación de recursos hídricos

La hidrología se ha convertido en un elemento fundamental en la planificación del uso de los recursos hídricos y en los proyectos de ingeniería relacionados con la disposición de aguas servidas, el suministro de agua, la protección contra inundaciones, el drenaje y la recreación. Además, la integración de la hidrología con la geografía matemática, especialmente a través de los sistemas de información geográfica, ha hecho necesario el uso de computadoras para el procesamiento de información existente, análisis y simulación de eventos hidrológicos. (Herrera, 2014).

Los procedimientos que se utilizan regularmente para el cálculo y estimación de los recursos hídricos en las cuencas hidrográficas son la resolución de lluvia por medio de la instrumentación y estaciones automatizadas con pluviómetros y pluviógrafos, la evapotranspiración con los métodos de Thornthwaite y Hargreaves, y el escurrimiento superficial por medio de aforos con molinetes (Calderón, 2016).

Sin embargo, las investigaciones en los últimos años se han centrado sobre los factores que condicionan la precipitación en áreas de montaña y desarrollo de modelos que reflejen su

distribución espacial. Así como, la elaboración de modelos de cuencas con escasez de recurso hídrico superficial y la incorporación de métodos que permitan cartografiar de mejor manera los parámetros hidrogeológicos para estimar de forma precisa la recarga hídrica de las cuencas, con el fin de aprovechar el agua subterránea (Herrera et al., 2011).

Se han incentivado técnicas para la evaluación de variables de escorrentía y tiempos característicos en modelos hidrológicos que simulan el comportamiento de crecidas en cuencas. En la actualidad, se desarrollan modelos en tiempo real que permiten pronosticar hidrogramas y que pueden ser incorporados en sistemas de información hidrológica automáticos, lo que facilita la planificación y gestión óptima de los componentes de drenaje de presas (ICC, 2019).

Existen tres modelos de eventos hidrológicos principales: HEC-RAS, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos; TR-20, desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos del USDA; y SWMM, el Modelo de Gestión de Agua de Tormenta, creado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. El HEC-RAS y el TR-20 se utilizan para simular hidrogramas de crecidas en el análisis y diseño de planes de control de flujo, mientras que el SWMM se utiliza para el análisis y diseño de aplicaciones que requieren una determinación simultánea de la cantidad y la calidad del agua. (Herrera, 2014).

Se pueden identificar varios modelos de proceso continuo, como el SSARR, desarrollado y respaldado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos División Pacífico Norte; el Modelo de Cuenca Stanford (SWM), desarrollado en la Universidad de Stanford; y el Modelo Sacramento, creado conjuntamente por el Servicio Meteorológico Nacional de Estados Unidos y el Departamento de California de Recursos Hídricos. Estos modelos están diseñados para permitir la elaboración de diseños hidrológicos, predecir la cantidad de escurrimiento en función del tiempo y hacer pronósticos de flujo en tiempo real (López y Patiño, 2017).

Recientemente, la evaluación de caudales de ríos en eventos extremos de tormentas y huracanes, con la delimitación de áreas de inundación, se hacen como herramienta auxiliar con drones para la toma de fotos, imágenes y videos en tiempo real, importante para el auxilio y evacuación de las personas.

Para la planificación de recursos hídricos de una cuenca, se debe estimar la oferta hídrica mediante el balance del recurso agua dentro de la cuenca, y un estudio hidrológico a detalle (Angulo, 2018).

Estudios hidrológicos e hidráulicos para el ordenamiento territorial de una cuenca

Con la finalidad de obtener factores de diseño en obras de uniformidad de los cauces principales, como también para la ordenamiento y planificación de un territorio, se desarrollan estudios hidrológicos pertinentes que consisten en primera medida, en determinar de constantes hidrometeorológicas y modelos de terreno de las cuencas, que se utilizan como resultados disparadores a los modelos matemáticos de simulación del recurso hídrico. Los caudales máximos obtenidos a través de la simulación de curvas de superficie libre en régimen permanente se asocian con la probabilidad de ocurrencia de eventos similares en el futuro, permitiendo la identificación de zonas susceptibles a inundaciones (Maza et al., 1995).

7 Estado del arte

Uno de los objetivos por parte del Banco de Desarrollo de América Latina (2019), es el promover la reducción de la contaminación hídrica, el cuidado de los ecosistemas y la protección ante los desastres naturales en función de la disminución o aumento de agua. Por otro lado, a nivel regional son escasos los países que poseen agencias nacionales dedicadas a la promoción de organismos, autoridades y consejos a nivel de cuenca. Algunos grupos han llegado a conformarse como entidades, pero estas presentan problemas de sostenibilidad.

Para el Banco Interamericano de Desarrollo (2007) el objetivo primordial es en función de una política de gestión de riesgos que gira alrededor de la reducción y la prevención de desastres, la socialización es la prevención y la mitigación, para una respuesta directa en los casos de emergencia, así evitando los desastres mayores y la recuperación efectiva sostenible de las áreas afectadas.

La GWP (2017), afirma que Centroamérica posee de una buena cantidad del recurso hídrico, pero interesa implementar una gestión hídrica integral que permita el uso eficiente de los recursos hídricos. Para ello define cuatro acciones a implementar en la gestión integrada del agua: i) sistema de información de agua; ii) desarrollo de planes y programas a nivel de cuenca basados en la oferta y la demanda, considerando el ciclo hidrológico y efectos del cambio climático, iii) control de la contaminación, y iv) gestión de riesgo.

En Guatemala hay limitados trabajos realizados de forma hidrológica sobre todo la oferta del agua, en algunas ocasiones derivado por una falta de cálculos precisos de mediciones meteorológicas e hidrológicas. Además, se presenta un régimen de lluvia variable, que hace que en la vertiente del Pacífico se concentre el 23.7% del volumen disponible de agua superficial en 18 cuencas, donde habita la mayor cantidad de personas y en ella se llevan a cabo las mayores actividades económicas. (Basterrechea y Guerra, 2019).

La implementación de un plan que lleve a cabo el manejo de recursos hídricos a nivel de cuenca, son muy limitados en Guatemala, ya que se requiere sistemas de mediación y el convencimiento de diferentes sectores sociales, como entidades gubernamentales, sociedad civil y sector privado. Pero existen experiencias positivas en la parte baja de las cuencas Madre Vieja y Achiguate de la vertiente del Pacífico por parte de la Gobernación de Escuintla, Acción Contra el Hambre (ACH) y el ICC (2017), en la que se han implementado medidas estratégicas como, por ejemplo: monitoreo de ríos y generación de información climática, acercamiento con las comunidades, uso racional del agua, regulación del caudal hasta el área de drenaje costero, promoción de actividades en conjunto con el sector social para mitigación y prevención de inundaciones y restauración de bosques riparios.

En relación a esto último para la región de la Costa Sur, el Instituto de Cambio Climático, ha efectuado estudios específicos tanto de tema hidrológico como de modelación de inundaciones, para las diferentes cuencas, como por ejemplo: Estudio hidrológico de la cuenca del río Coyolate (2011), Estudio hidrológico de la cuenca del río Achiguate (2012), Estudio hidrológico de la cuenca del río María Linda (2012), Estudio Hidrológico para la cuenca del río Los Esclavos (2012) Estudio hidráulico para el río Coyolate en determinación de zonas de inundación (2013), Estudio hidrológico de la cuenca del río Madre Vieja (2015) y Determinación de las áreas susceptibles a inundaciones en la parte baja de la cuenca del río Ocosito mediante modelación y percepción comunitaria (2016). En los años recientes, estos estudios han potencializado la formación de comités locales para el manejo de cuencas, sobre todo en temas de prevención a desastres, junto con la ayuda de la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED).

Dentro de la cuenca del río Sis-Icán hay una creciente necesidad tanto de elaborar un estudio que dictamine el comportamiento de sus ríos, así como promover un programa de manejo de la cuenca

para disminuir el riesgo de contaminación y reducir las inundaciones en la parte baja. Por lo que se promueve una línea de referencia mediante este estudio con la finalidad de formar un precedente que incluya a todos los sectores: instituciones gubernamentales, sociedad civil, sector privado y academia, y que tenga participación en el manejo de la cuenca. Sin embargo, se requiere del apoyo de la ciencia y de herramientas tecnológicas para evaluar el dinamismo del agua, que permita destacar las potencialidades y problemas del área de estudio, proponiendo un programa para disminución de desastres en visión de largo plazo.

8 Objetivos

Objetivo general

Determinar la situación hidrológica e hidráulica de la cuenca de los ríos Sis-Icán para modelación de inundaciones con el fin de elaborar localizar las zonas con amenazas a inundaciones.

Objetivos específicos

- Recopilar información antecedente de carácter climático e hidrométrico e información biofísica para caracterizar la cuenca de los ríos Sis-Icán.
- Realizar un diagnóstico y análisis del comportamiento hídrico de la cuenca de los ríos Sis-Icán.
- Elaborar una modelación hidráulica que examine el comportamiento de los cauces principales de los ríos Sis e Icán y detecte las áreas de inundación.
- Zonificar con sistemas de información geográfica las áreas con susceptibilidad de amenazas naturales a inundaciones de los cauces principales de los ríos Sis e Icán.

9 Hipótesis

La evaluación hidrológica y el modelamiento hidráulico en la cuenca de los ríos Sis-Icán, generará una línea base del comportamiento del recurso hídrico e inundaciones y propone un programa de prevención de desastres.

10 Materiales y métodos

Enfoque de la investigación

La investigación se cataloga de tipo mixto, ya que involucró la recolección y análisis de datos cualitativos y cuantitativos, así como, la integración y discusión conjunta, por los problemas complejos y diversos dentro de la cuenca. El diseño es longitudinal porque se estimaron datos de clima y caudal en su registro histórico ya que busca demostrar la secuencia temporal de los fenómenos. La investigación es no experimental y de tipo correlacional, ya que es un estudio de campo y gabinete donde se recolectaron y analizaron datos de meteorológicos e hidrométricos, tanto de época reciente como la búsqueda de registros históricos, que se fundamentan en la medición numérica y procedimientos estadísticos para la integración y discusión de las variables como medias mensuales y anuales de lluvia, temperatura, humedad, evapotranspiración y volumen de agua superficial. Al mismo tiempo estas variables permitieron el modelamiento hidráulico para las inundaciones.

El estudio es también de tipo descriptivo y diagnóstico, porque se realizó una recolección de información por medio de la observación en campo y satelital, la entrevista (libre) con municipalidades, la finalidad es la información primaria del comportamiento hídrico de la cuenca, la zonificación y mapeo de las áreas afectadas.

La integración de la información en mapas temáticos, permitió la descripción y diagnóstico de las principales áreas, como la cobertura, usos actuales de suelo, modelo de elevación digital, geología y pendientes.

Método

La recopilación y síntesis de datos meteorológicos se realizó de acuerdo a la estación del INSIVUMEH “Mazatenango” ubicada en el municipio de Mazatenango (Coordenadas GTM , 391934, 1615953) de Mazatenango, la estación “Buena Vista” de ANACAFE ubicada en San Felipe Retalhulehu (Coordenadas GTM, 376937, 1615953) y las estaciones de ICC “Tulula, Lorena, Naranjales, San Nicolás y Providencia” ubicadas en la costa pacífica sur del país (cuadro 12). La mayoría son estaciones tipo B y C, que permitieron tabular los datos diarios y mensuales de precipitación pluvial, evaporación de tanque, temperatura y humedad.

Los datos de caudal se obtuvieron primordialmente de dos estaciones hidrométricas: La Franja (río Sis, parte baja de la cuenca) y La Máquina ubicadas en el municipio de Cuyotenago sobre el río Sis, en la parte media de la cuenca (Coordenadas GTM, 387391, 1593448; 380467, 1582564). Ambas estaciones son del INSIVUMEH.

Por medio de los cálculos y una ordenación de datos históricos, se logró obtener un panorama del comportamiento tanto climático como hídrico en la presente cuenca. El análisis tuvo en cuenta detalles como generalidades biofísicas, así como aspectos de morfometría de cuenca que incluyen aspectos lineales, de superficie y de relieve.

En el contexto de apreciación acerca de recurrencia, y de registros históricos dentro de la cuenca, se estiman un aproximado de contingencias en eventos futuros, por lo que se utiliza los parámetros probabilísticos que se considera según el comportamiento hídrico de la zona, y de la síntesis de datos generados, a partir, de los registros en temporalidades anuales y mensuales.

La estadística hidrológica está enfocada para el presente estudio, en la clasificación de caudales característicos, donde se utiliza promedios anuales, en un registro diario. Por otro lado, se realiza un cálculo de estimación de caudal de consideración máximo de diseño, esto relacionado a los diferentes usos empleados en la cuenca, utilizando el método del servicio de Conservación de Suelos (SCS).

Seguido a esto, se diseña por medio de datos máximos de lluvia en la estación meteorológica de Mazatenango, la curva de intensidad, duración y frecuencia, esta tiene como objetivo el considerar las lluvias de máxima a ocurrencia en un período de retorno, la cual se considera en intervalos de 50 y 100 años con los métodos de distribución de Pearson tipo III y Gumbel (Herrera, 2014).

Se ha empleado el cálculo del balance hídrico de suelo, que es propio y adecuado para el área de estudio, ya que en su mayoría el uso actual es de índole agrícola, el método utilizado para generar los resultados es por el propuesto por Schosinky en el año 2006, en segmentación de cuenca en su parte alta, media y baja.

La determinación de la modelación hidráulica se realizó por medio del software HEC-RAS 6.3.1 y su complemento RAS-Mapper. Por medio de esta herramienta se definió la geometría de los ríos Sis-Icán, generando información de los cauces, bancos, dirección del flujo y secciones transversales. Los datos de entrada fueron en base a la topografía, valores de caudal y de lluvia. Parte de la modelación fue el de emplear cálculos de probabilidad de caudales máximos, utilizando técnicas de estadística hidrológica. Se fundamenta en los períodos de retorno de 50 y 100 años. También la zonificación y detección de áreas inundables, que junto a este modelo se utilizaron como base temática la geomorfología e imagen satelital.

Por medio del software HEC-RAS y su complemento RAS-Mapper se ha dividido la geometría de los ríos en tres segmentos; geometría del río Sis, geometría del río Icán y geometría del estero o unión de los ríos Sis-Icán.

Aunado a esto, se ha dado continuidad con el tratamiento de los datos generados en la geometría; delimitación del cauce “River”, delimitación de bancos de la trayectoria del río “Banks” y la delimitación de flujo de dirección del cauce del río “Flow Paths”, la generación de las secciones transversales del cauce del río. Para ello se ha aplicado la capa de rugosidad de Manning, en la cual, se asignan distintos valores según el uso del suelo y características geomorfológicas observadas con ayuda de imágenes satelitales. El coeficiente de rugosidad de Manning es un índice el cual determina la resistencia de un flujo en un canal (Araya. González & Jiménez, 2018).

La propuesta en concreto del programa de prevención a desastres naturales de la cuenca de los ríos Sis-Icán, se realizó de acuerdo al diagnóstico de las características principales de la cuenca, los principales problemas relacionados con la amenaza a inundaciones y las soluciones planteadas por los habitantes e investigadores del proyecto.

Recolección de información

Para la obtención de información se consultaron fuentes primarias y secundarias. Se permitió obtener intercambio y retroalimentación de información referente a los aspectos biofísicos y los puntos de interés con susceptibilidad a inundaciones dentro de la cuenca por parte de la municipalidad de San José La Máquina y la municipalidad de Mazatenango. Así mismo, se pudo obtener un registro con imágenes fotográficas y georreferenciar puntos de interés. Con lo anterior se pudo generar información primaria.

La información secundaria se basó en el registro de caudal de 19 años en las estaciones hidrométricas instaladas por INSIVUMEH. Para obtener información climática, se utilizaron datos registrados en estaciones del INSIVUMEH, ICC y ANACAFÉ.

Por otro lado, la información del modelo del terreno, se realizó en base a pendientes y curvas a nivel con la base de datos en formato Shapefiles del Ministerio de Agricultura, Ganadería y

Alimentación y el geportal de la Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia. Con el soporte del software ArcGis 10.8 (2020) y QGIS Firenze 3.28 (2022) se elaboraron los mapas temáticos

Técnicas e instrumentos

Se realizaron los cálculos de climatología y se presentaron gráficos que muestran el comportamiento atmosférico de la región en relación a variables como la precipitación, temperatura y humedad relativa. Se prestó especial atención a la segmentación de la cuenca en sus partes alta, media y baja, teniendo en cuenta el registro histórico existente en cada una de estas áreas.

Para conocer la cantidad de agua superficial, se recopilaron datos de caudales para sistematizarlos según el registro promedio y acumulado mensual. Con ello se ordenaron los datos, analizado desde el punto de vista histórico, su registro de caudal, detallando el comportamiento hídrico durante un año hidrológico, así como también, el cálculo del volumen oferente aproximado y con ello se realizó una representación de la cuenca total.; dicha información se procesó con base al registro de las estaciones hidrométricas en las partes media y baja de la cuenca de INSIVUMEH.

Aunado a lo anterior, se presenta el cálculo de probabilidad de caudales máximos, con el método de Gumbel I y Pearson III, para cada estación hidrométrica, consideradas anteriormente para el desarrollo de esorrentía superficial (Estación La Franja y La Máquina). Para ello se establece los valores máximos diarios, en anteriores años, dando como producto la estimación de parámetros estadísticos como media y desviación estándar, dando como resultados caudales probables con una tasa de retorno de 50 y 100 años.

Posteriormente, se complementó el análisis con estadística hidrológica que consideró las probabilidades en tasa de retorno de ocurrencia tanto de caudal máximo como de intensidad, duración y frecuencia de precipitación. Este análisis culminó con la presentación y cálculo del

balance hídrico de la cuenca, que proporciona un panorama de entradas y salidas hídricas habituales dentro del área de estudio.

A partir de la recopilación de datos de caudales proporcionados por INSIVUMEH, los datos rectificadas en campo e imágenes satelitales se elaboró un modelo de simulación hidrológica utilizando el software HEC-RAS 6.3.1 (2022) (Muñoz et al., 2022). el cual permitió la zonificación de las áreas con mayor amenaza.

El modelamiento estuvo aunado a los caudales obtenidos en los resultados del diagnóstico hidrológico de la cuenca, como también, de los análisis de la formulación y elaboración de elevaciones digitales del terreno y la observación con imágenes satelitales durante la digitalización de datos.

Para modelar los tramos de los ríos Sis-Icán, se empleó el software HEC-RAS, el cual se divide en modelado de secciones transversales y modelado de flujo. En primer lugar, se necesitaron parámetros de entrada para llevar a cabo el modelado, y se basó en el resultado de los análisis hidrológicos para determinar los caudales máximos, al definir la topografía del área y establecer los coeficientes de rugosidad (n de Manning) con el complemento RAS-Mapper con valores acordes a las características observadas por medio de imagen satelital

Para lo anterior se emplearon los siguientes pasos; Determinación de la geometría del canal por medio de RAS Mapper; Generación un archivo de importación con la información geométrica de las secciones transversales en HEC-RAS; Modelización del flujo en HEC-RAS y generación de archivo de exportación para ArcGIS y; Elaboración de cartografía final. El modelo de elevación digital obtenido fue obtenido del sitio web de ASF Vertex con resolución 12.5 m.

Los productos obtenidos en el desarrollo de cálculos hidráulicos se han proyectado en mapas con las simulaciones del caudal máximo del periodo 2003-2022, tasas de retorno de 50 y 100 años con el método de distribución de Pearson III y tasas de retorno de 50 y 100 años con el método de distribución de Gumbel, así como la zonificación generada con los resultados obtenidos en la modelación y comparativa con el mapa de zonas susceptibles a amenaza a inundación elaborado por el IARNA y Pérez, G. (2009) (ver discusión de resultados).

La técnica para recolectar información del comportamiento hídrico de los cauces, antecedentes de desastres, zonificación de amenazas de inundación e información biofísica de la cuenca de los ríos Sis-Icán fue también por medio de observación en campo sin intervención (observación directa), consulta con autoridades municipales de Mazatenango y San José La Máquina con quienes se obtuvo facilidad y acceso durante las vistas de campo programadas.

Procesamiento y análisis de la información

Para cuantificar la variabilidad de agua superficial, se hizo uso de la técnica de análisis de la curva de caudales característicos, que es una gráfica de frecuencias acumuladas que expresa el porcentaje de tiempo en el cual un valor de caudal es igualado o excedido para un valor dado de tiempo.

Así mismo, se estimó el volumen de agua promedio oferente acumulado y mensual en un año hidrológico de cada estación hidrométrica y se determinaron los caudales máximos, caudales base y superficial promedio. Así como también la elaboración de climadiagramas, estimación de

la relación precipitación-ETP, estimación de la precipitación acumulada y promedio en la parte baja, media y alta de la cuenca, curva de caudales característicos.

En síntesis, para el modelamiento de caudales máximos con HEC-RAS se empleó un régimen de flujo mixto. Se utilizó el complemento RAS Mapper para editar la geometría de los segmentos estudiados de los ríos Sis-Icán. Posteriormente se incorporó los caudales de retorno de 50 y 100 años. Finalmente se realizó la corrida del software para la proyección de resultados.

El objetivo del modelamiento es la predicción de áreas de inundaciones y conocer las posibles medidas de mitigación del mismo en el sistema hidrológico en diferentes escenarios. La generación de mapas temáticos se realizó por medio de sistemas de información geográfica (SIG), utilizando el programa ArcGis 10.8 (ArcMap 10.8) y QGIS Firenze 3.28.

En última instancia, se creó un mapa que zonificó las amenazas de inundación, utilizando los cálculos realizados, el criterio técnico y la aplicación en las diferentes fases del proyecto. Este mapa fue sintetizado en un modelo que contó con el soporte de ArcGIS 10.8 para su correspondiente apreciación y uso.

Se contempló utilizar como fuente auxiliar en el análisis de lluvia-escorrentía HEC-HMS, sin embargo, durante la elaboración del presente estudio el sitio oficial del cuerpo de ingenieros de Estados Unidos no se encontraba disponible para su instalación.

11 Resultados y discusión

Con el presente apartado se menciona los diferentes conceptos que se ha calculado y en base a esto, el análisis integral, en función, de la composición y sistema de la cuenca de los ríos Sis-Icán, dando como resultado un modelo que determina zonas inundables, en relación a los diferentes factores que intervienen para su zonificación utilizando programas que son apropiados a las entradas y salidas hídricas en el área de estudio.

Como parte de entendimiento de este sistema, tiene un alcance de establecer los datos en registro histórico de lo pertinente a la síntesis de la cuenca, como por ejemplo el clima y su comportamiento de escurrimiento superficial, que, aunado a esto, se adhiere generalidades compositivas de la zona a analizar.

Resultados

A continuación, se presentan los resultados de la investigación:

11.1.1 Aspectos biofísicos de la cuenca de los ríos Sis-Icán

En el análisis de los aspectos biofísicos de la cuenca de los ríos Sis-Icán, se consideraron todos aquellos factores que determinan la información primaria y componen la naturalidad del área. Muchos de ellos sirvieron como base para los criterios técnicos necesarios para la generación de otro tipo de información, como pendientes, suelos, geología, uso de suelo y geomorfología.

Durante su desarrollo, fue importante considerar la creación de mapas temáticos que mostraran la ubicación de áreas con características relacionadas a los criterios técnicos. Estos mapas permitieron una mejor comprensión de las condiciones naturales de la cuenca y su interpretación en cuanto a su disposición y distinción en cobertura dividida en porcentajes relacionados con la totalidad del área.

Con esto se pretende demostrar, las aptitudes, potencialidades y conocimiento de la conformación de la cuenca, para efecto, de investigación, considera su relación con ciertos aspectos específicos del comportamiento natural, tanto climático como hídrico, y permite referenciar detalles de su sistema superficial.

11.1.2 Pendientes

Cuadro 1 Porcentaje de pendientes dentro de la cuenca de los ríos Sis-Icán

Pendientes (%)			
No	Descripción	Área (Km2)	Porcentaje (%)
1	0-12%	898.84	96.66
2	12-25%	26.57	2.86
3	25-50%	4.48	0.48
Total		929.89	100

Fuente: elaboración propia

Figura. 2 Mapa de pendiente de la cuenca de los ríos Sis-Icán



Fuente: elaboración propia

11.1.3 Subcuencas

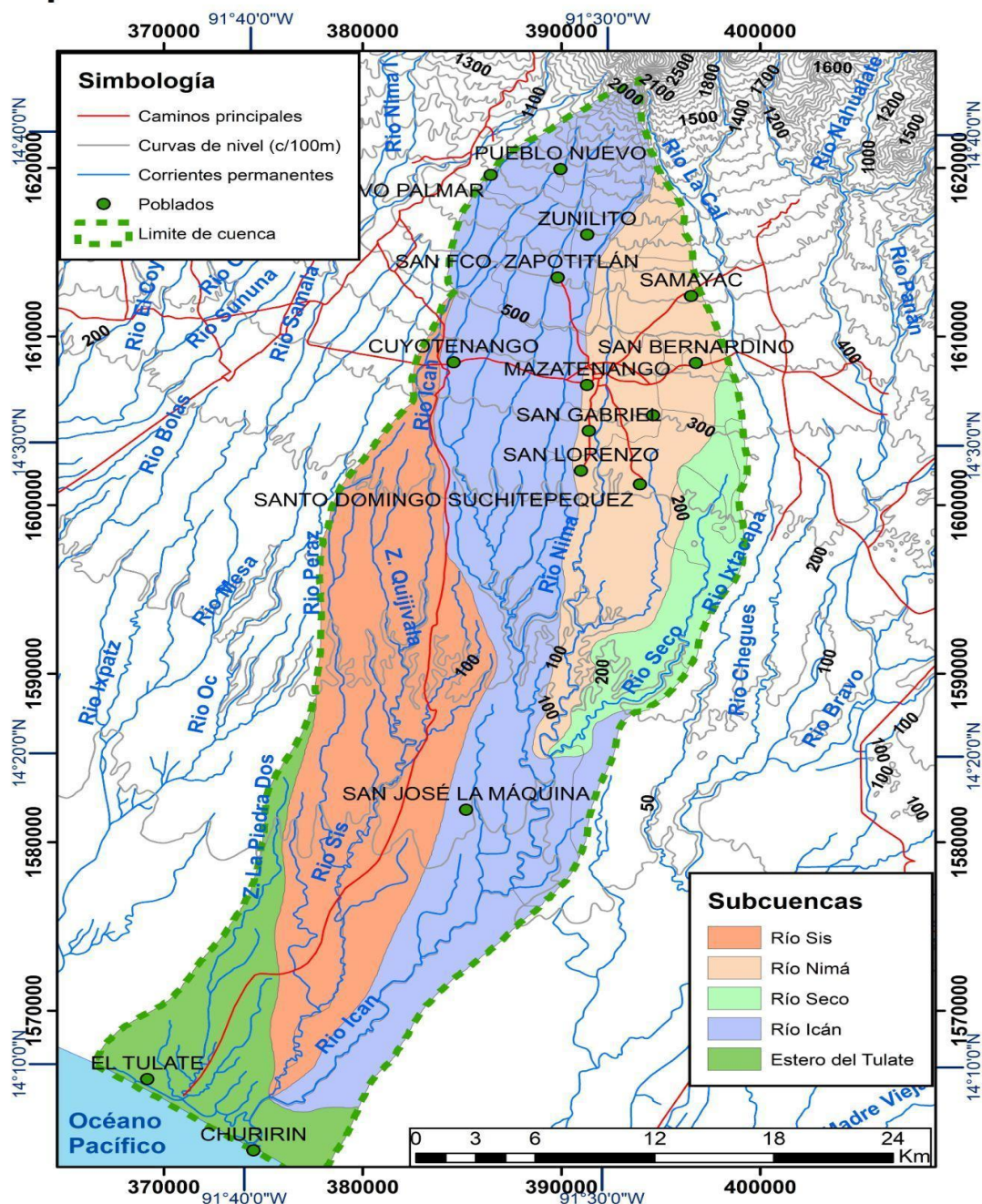
Cuadro 2 Porcentaje y área de unidades geológicas dentro de la cuenca de los ríos Sis-Icán.

Subcuencas			
No	Descripción	Área (Km2)	Porcentaje (%)
1	Estero del Tulate	99.69	10.72
2	Río Icán	356.80	38.37
3	Río Nimá	154.89	16.66
4	Río Seco	65.69	7.06
5	Río Sis	252.82	27.19
TOTAL		929.89	100

Fuente: elaboración propia.

Figura. 3 Mapa de subcuencas pertenecientes a la cuenca de los ríos Sis-Icán.

Mapa de subcuencas de cuenca de los ríos Sis-Icán



Fuente: elaboración propia

11.1.4 Geología

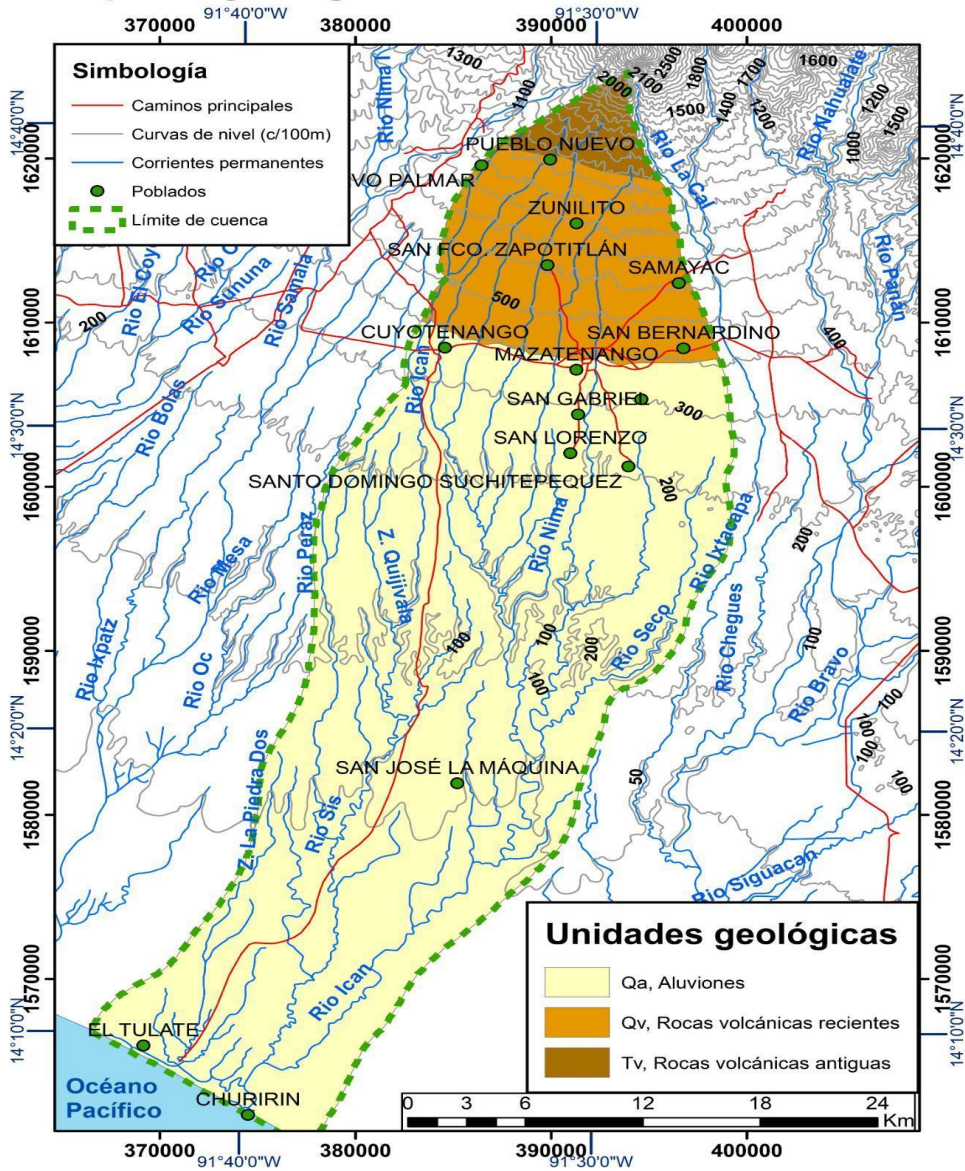
Cuadro 3 Porcentaje y área de unidades geológicas dentro de la cuenca de los ríos Sis-Icán

Geología			
No	Descripción	Área (Km2)	Porcentaje (%)
1	Tv	24.11	2.59
2	Qv	143.89	15.47
3	Qa	761.90	81.93
TOTAL		929.89	100

Fuente: elaboración propia

Figura. 4 Mapa geológico de la cuenca de los ríos Sis-Icán.

Mapa de geología cuenca de los ríos Sis-Icán



Fuente: elaboración propia

11.1.5 Geomorfología

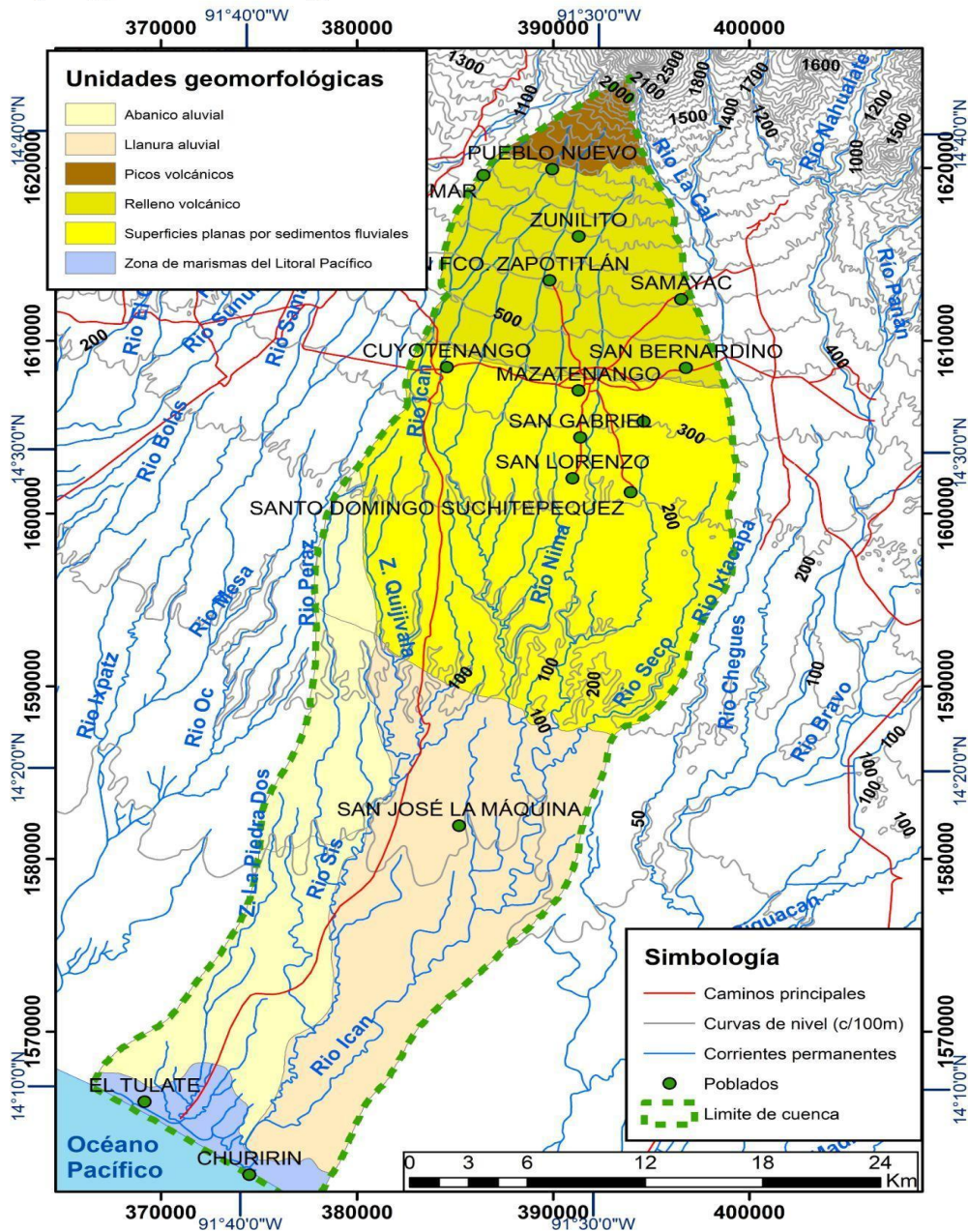
Cuadro 4 Porcentaje y área de unidades geomorfológicas dentro de la cuenca de los ríos Sis-Icán

Geomorfología			
No	Descripción	Área (Km2)	Porcentaje (%)
1	Abanico aluvial	161.56	17.37
2	Llanura aluvial	234.99	25.27
3	Picos volcánicos	20.88	2.25
4	Relleno volcánico	146.50	15.75
5	Superficies planas por sedimentos fluviales	334.66	35.99
6	Zonas marismas del Litoral pacifico	31.31	3.37
TOTAL		929.89	100

Fuente: elaboración propia.

Figura. 5. Mapa geomorfológico de la cuenca de los ríos Sis-Icán.

Mapa geomorfológico de cuenca de los ríos Sis-Icán



Fuente: elaboración propia.

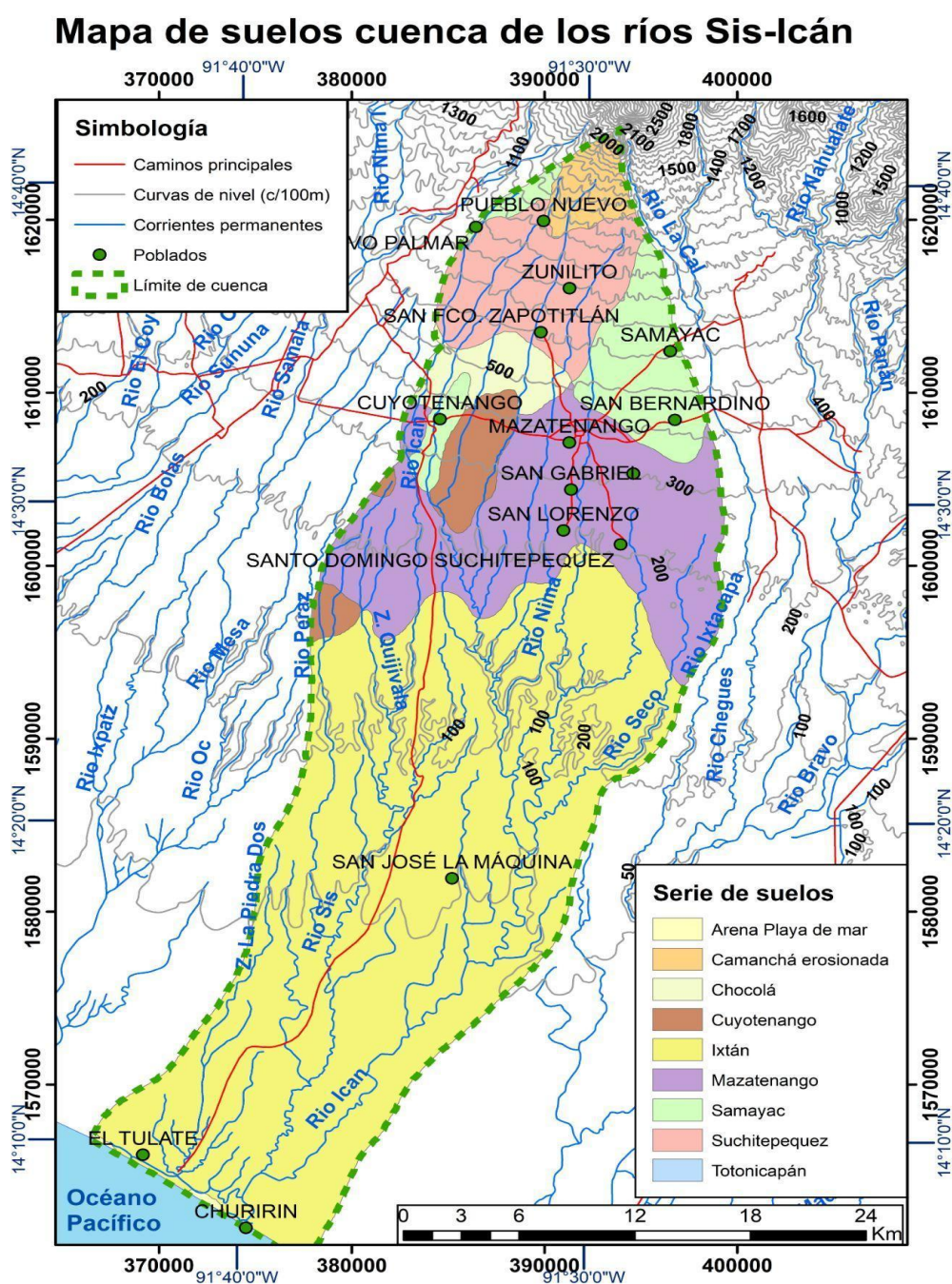
11.1.6 Suelos

Figura. 6 Porcentaje y área de unidades de suelo dentro de la cuenca de los ríos Sis-Icán.

Suelos			
No	Descripción	Área (Km2)	Porcentaje (%)
1	Arena de Mar	1.20	0.13
2	Camanchá erosionada	17.40	1.87
3	Chocolá	22.84	2.46
4	Cuyotenango	28.59	3.07
5	Ixtán	556.35	59.83
6	Mazatenango	174.54	18.77
7	Samayac	61.27	6.59
8	Suchitepéquez	67.56	7.27
9	Totonicapán	0.14	0.02
TOTAL		929.89	100

Fuente: elaboración propia

Figura. 7 Mapa de suelos de la cuenca de los ríos Sis-Icán.



Fuente: elaboración propia.

11.1.7 Usos de suelo

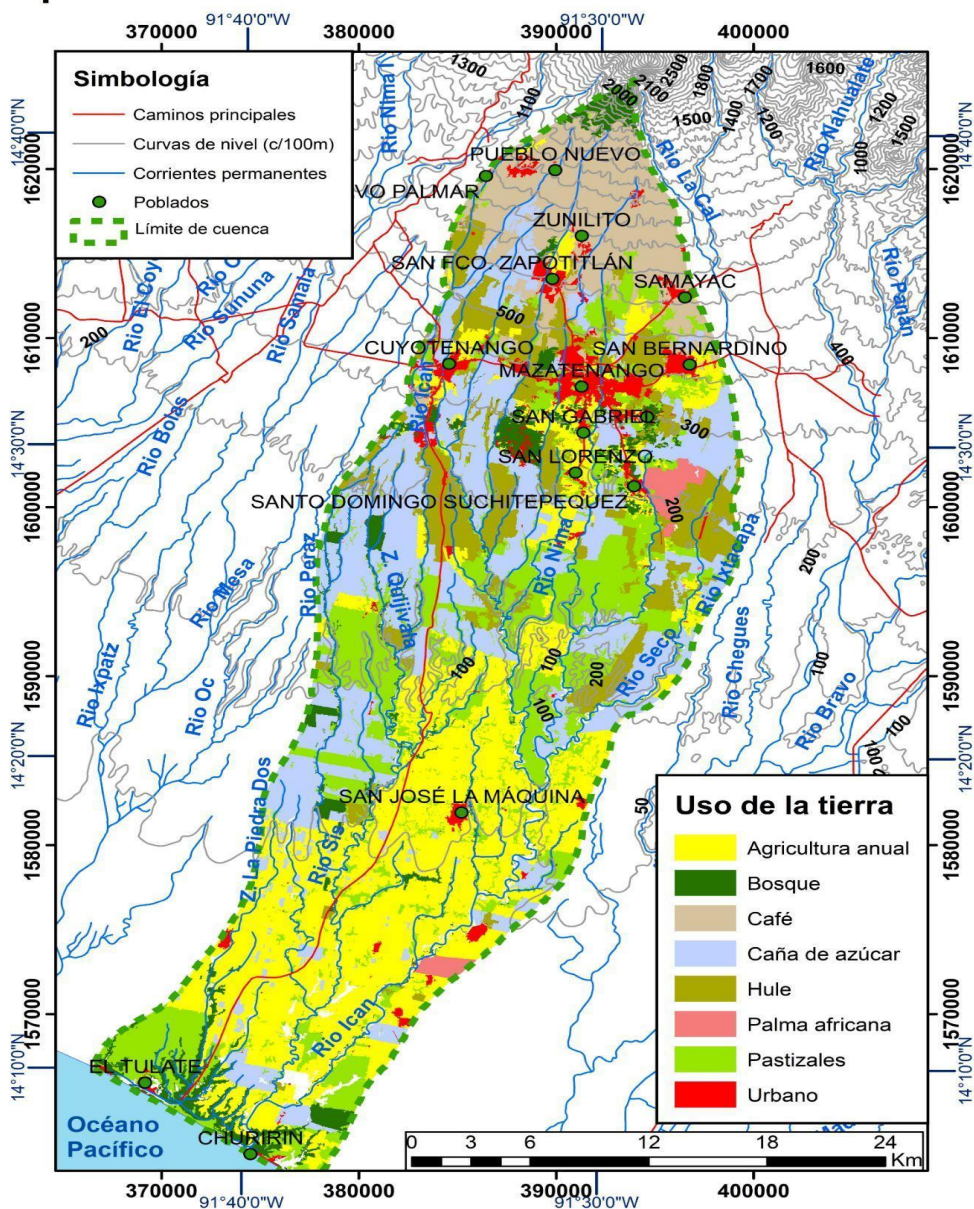
Cuadro 5 Porcentaje y área de usos de suelo dentro de la cuenca de los ríos Sis-Icán.

Uso de suelo			
No	Descripción	Área (Km2)	Porcentaje (%)
1	Agricultura anual	279.18	30.02
2	Bosque	50.91	5.48
3	Caña de azúcar	201.82	21.70
4	Café	83.64	8.99
5	Hule	96.60	10.39
6	Palma Africana	10.14	1.09
7	Pastizales	176.76	19.01
8	Área urbana	30.84	3.32
TOTAL		929.89	100

Fuente: elaboración propia.

Figura. 8 Mapa de usos de suelo de la cuenca de los ríos Sis-Icán.

Mapa de uso de la tierra cuenca de los ríos Sis-Icán



Fuente: elaboración propia.

11.1.8 Morfometría de la cuenca

Durante la realización del estudio, se calcularon diversos parámetros morfométricos de la cuenca, incluyendo el área de la cuenca, la longitud del río principal, las clasificaciones de drenaje y los datos de elevación. Estos parámetros son fundamentales en la comprensión de la cuenca como unidad básica en cuanto a su área y especificidad, y son determinantes para los estudios hidrológicos enfocados en la escorrentía superficial.

Dentro de los aspectos lineales, superficie y relieve, en su ejecución de cálculo de datos, se manifestaron las características físicas y de avenamiento, que permitieron tener una línea base de información de la naturaleza de la cuenca.

- Área de la cuenca: 929.89 Km²
- Perímetro de la cuenca: 156.49 Km.

Aspectos lineales

- Número de corrientes permanentes: 37
- Número de corrientes intermitentes: 18
- Gráfica Log Nu vs U

Cuadro 6 Datos de corrientes de la cuenca de los ríos Sis-Icán

Orden de corrientes	No de corrientes	Longitud de corrientes	Log Nu
u	Nu	Km	
1	39	327.29	1.59
2	11	98.3	1.04
3	4	38.1	0.60
4	1	9.87	0.00
Total	55	473.56	1.74

Fuente: elaboración propia.

Figura. 9 Gráfica Log Nu vs U

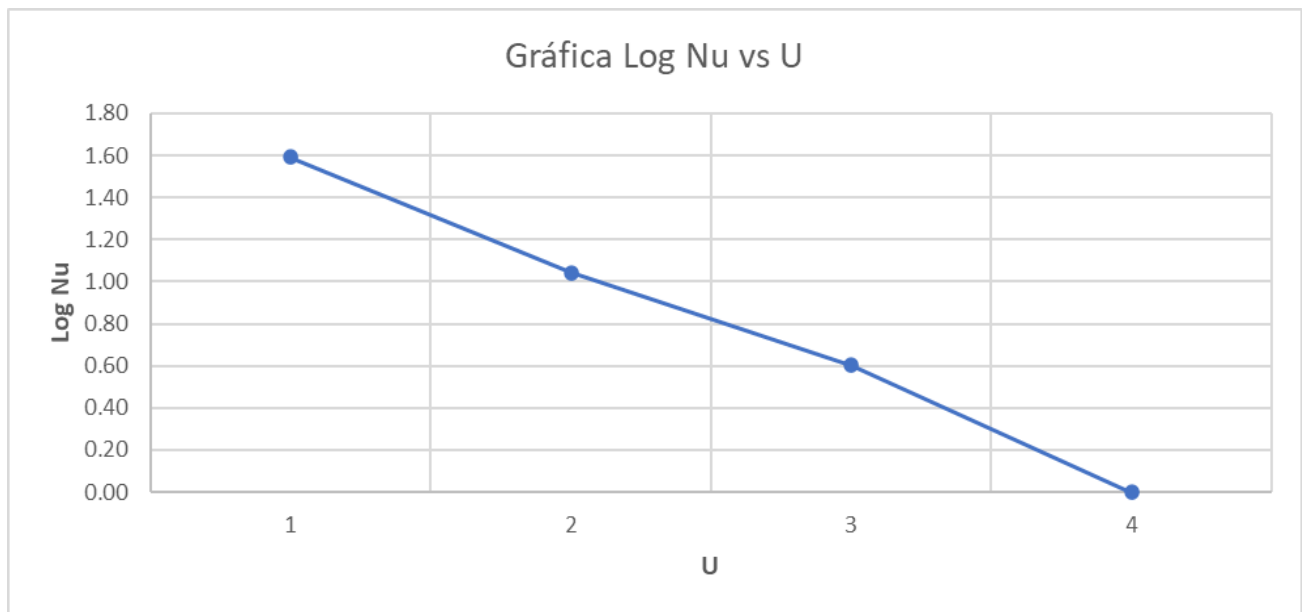
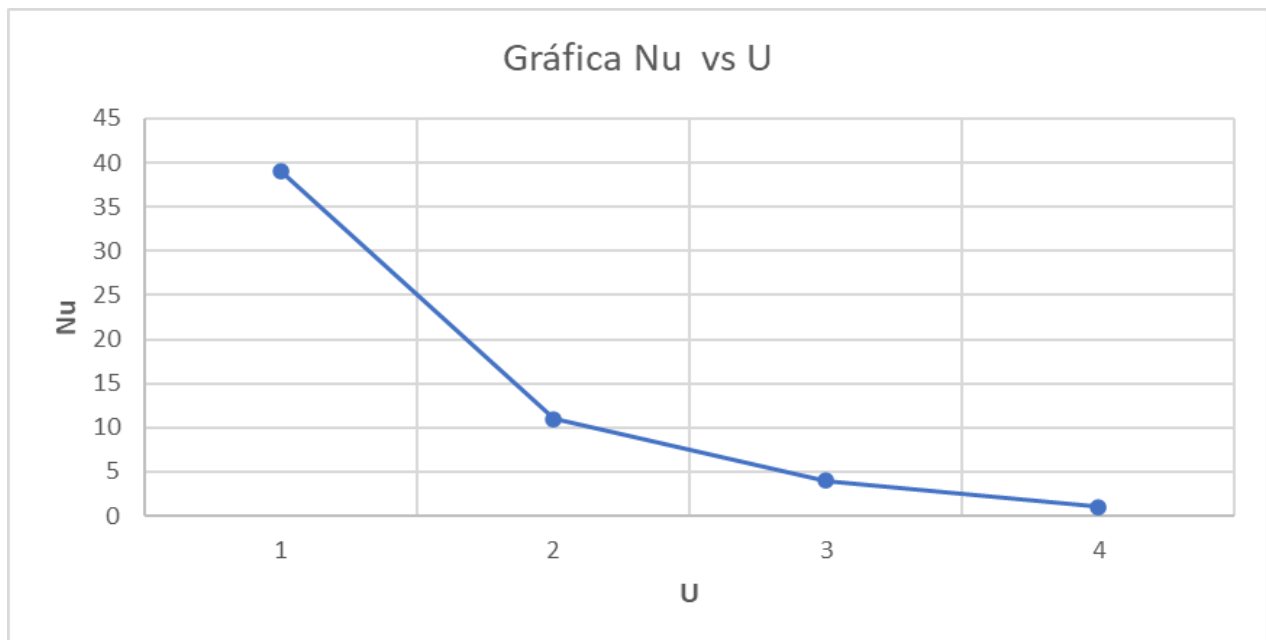


Figura. 10 Gráfica Nu vs U.



Fuente: elaboración propia.

- Radio de bifurcación no medio (Rb):

- Rb1: 3.55
- Rb2: 2.75
- Rb: 4.00
- Rbm: 3.43

El radio de bifurcación medio resultante es de 3.43

- Longitud media de corrientes (Lu):

- Lu1: 3.55
- Lu2: 2.75
- Lu3: 4.00
- Lu4: 3.43
- Lu: 8.61

La longitud media resultante de las corrientes es de 8.61 Km.

- Radio de longitud medio (RL):

- RL2: 1.06
- RL3: 1.07
- RL4: 1.04
- RL: 1.06

El radio de longitud medio resultante es de 1.06 Km.

- Longitud acumulada de corrientes (La):

Cuadro 7 Cálculo de Longitud acumulada de corrientes

	Km
La1	327.29
La2	98.30
La3	38.10
La4	9.87
La	473.56

Fuente: elaboración propia.

La longitud acumulada de corrientes resultante es de 483.56 Km

Aspectos de superficie

Cuadro 8 Aspectos de superficie de la cuenca.

<u>Aspecto</u>	<u>Resultado</u>
Relación de forma (Rf)	0.15.
Relación circular (Rc)	0.48.
Coefficiente de compacidad (Kc)	1.44
Densidad de drenaje (D)	0.51Km/Km ² .

Frecuencia de corrientes (Fc)	0.1.
--------------------------------------	------

Fuente: elaboración propia.

Aspectos de relieve

- Pendiente media de la cuenca (Sc)=

Cuadro 9 Cuantificación de intersección y longitud de curvas a nivel presentes en cuenca (Método de Horton)

No Línea	Intersecciones		Longitud (km)	
	Nx	Ny	Lx	Ly
1	0	0	7.28	2.6
2	0	0	13	5.98
3	0	0	13.26	10.92
4	0	1	12.48	21.58
5	0	6	13	36.14
6	0	9	14.3	34.84
7	0	8	12.48	40.82
8	0	17	15.34	42.38
9	0	16	14.56	41.86
10	14	35	16.64	34.84
11	23	12	17.68	26.52
12	8	3	18.46	11.7
13	0	0	19.5	0
14	13	0	18.98	0
15	0	0	17.68	0
16	5	0	15.6	0
17	5	0	14.3	0
18	2	0	12.74	0
19	5	0	11.44	0
20	8	0	10.4	0
21	9	0	7.8	0
22	6	0	3.9	0

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Fuente: elaboración propia.

El total de intersecciones resultante es 98 en eje cartesiano x y 107 en el eje cartesiano y. Así mismo, la pendiente media de la cuenca resultante a través del método de Horton es de: 3.35%

- Pendiente del cauce principal (Scp) (Método analítico):

La pendiente media de la cuenca resultante a través del método analítico es de: 3%.

– Elevación media de la cuenca (Em) (Método de la curva hipsométrica):

Cuadro 10 Cuantificación de intersección y longitud de curvas a nivel presentes en cuenca (Método de Horton)

Intervalo Curvas	Area parcial (Km2)	% Área parcial	% Área Acumulada	Cota media * Ai
2300-2400	0.12	0.013	0.013	282.00
2200-2300	0.19	0.020	0.033	427.50
2100-2200	0.26	0.028	0.061	559.00
2000-2100	0.21	0.023	0.084	430.50
1900-2000	0.43	0.046	0.130	838.50
1800-1900	0.64	0.069	0.199	1184.00
1700-1800	0.52	0.056	0.255	910.00
1600-1700	0.86	0.092	0.347	1419.00
1500-1600	1.14	0.123	0.470	1767.00
1400-1500	2.18	0.234	0.704	3161.00
1300-1400	2.98	0.320	1.025	4023.00
1200-1300	4.01	0.431	1.456	5012.50
1100-1200	6.33	0.681	2.137	7279.50
1000-1100	8.42	0.905	3.042	8841.00
900-1000	11.94	1.284	4.326	11343.00
800-900	14.41	1.550	5.876	12248.50
700-800	19.35	2.081	7.957	14512.50
600-700	21.16	2.276	10.232	13754.00
500-600	32.45	3.490	13.722	17847.50
400-500	34.11	3.668	17.390	15240.50

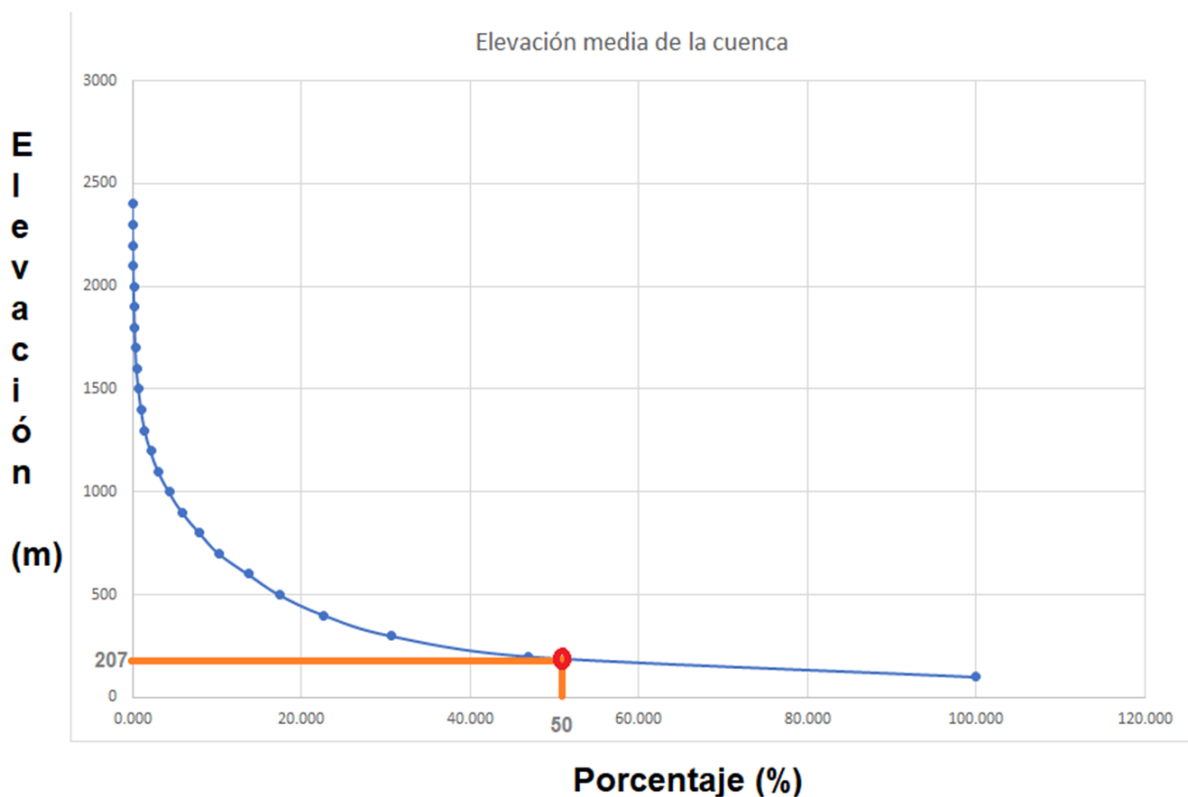
Fuente: elaboración propia.

La elevación media de la cuenca (E_m) con el método de la curva hipsométrica) es de 219 m s. n. m.

La elevación mediana: 1200 m s. n. m., con una elevación máxima de 2400 m s. n. m. y elevación mínima de 0 m s. n. m.

El área parcial cuantificada en el intervalo de curvas es de 929.90 Km²

Figura. 11 Gráfica de porcentaje área acumulada y elevación de cuenca, para encontrar elevación media



Fuente: elaboración propia.

- Coeficiente de relieve (Cr):

El Coeficiente de relieve resultante es de 0.04.

11.1.9 Climatología de la cuenca

Se presentan a continuación las estaciones hidrométricas de La Franja y La Máquina de INSIVUMEH, en sus características geográficas de posición y con sus coordenadas correspondientes.

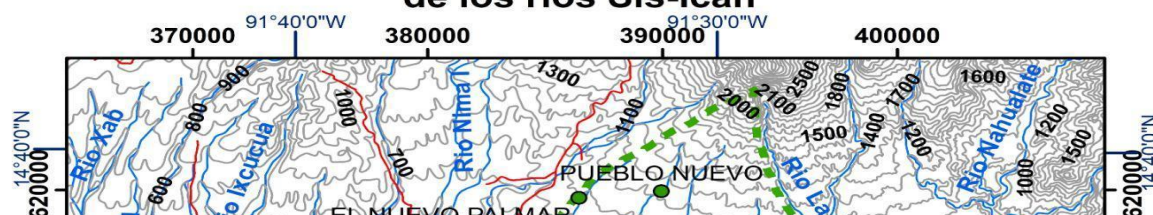
Cuadro 11 Localización georreferenciada de estaciones meteorológicas

No	Estación Meteorológica	Coordendas GTM		Coordenadas geográficas	
		X	Y	Longitud	Latitud
1	Buena Vista	376937	1615953	91° 38' 32.49" W	14° 36' 40.21" N
2	Mazatenango	391934	1606717	91° 30' 10.03" W	14° 31' 41.99" N
3	Tululá	382524	1604731	91° 35' 24.02" W	14° 30' 35.97" N
4	Lorena	400852	1605757	91° 25' 12.01" W	14° 31' 11.98" N
5	Naranjales	394314	1589189	91° 28' 48.03" W	14° 22' 11.99" N
6	San Nicolás	381272	1568226	91° 36' 0.03" W	14° 10' 47.99" N

Fuente: elaboración propia.

Figura. 12 Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas.

Mapa de estaciones meteorológicas de la cuenca de los ríos Sis-Icán



Fuente: elaboración propia.

Variables atmosféricas en parte alta de cuenca

En la parte alta de la cuenca, se encontraron las siguientes variables atmosféricas.

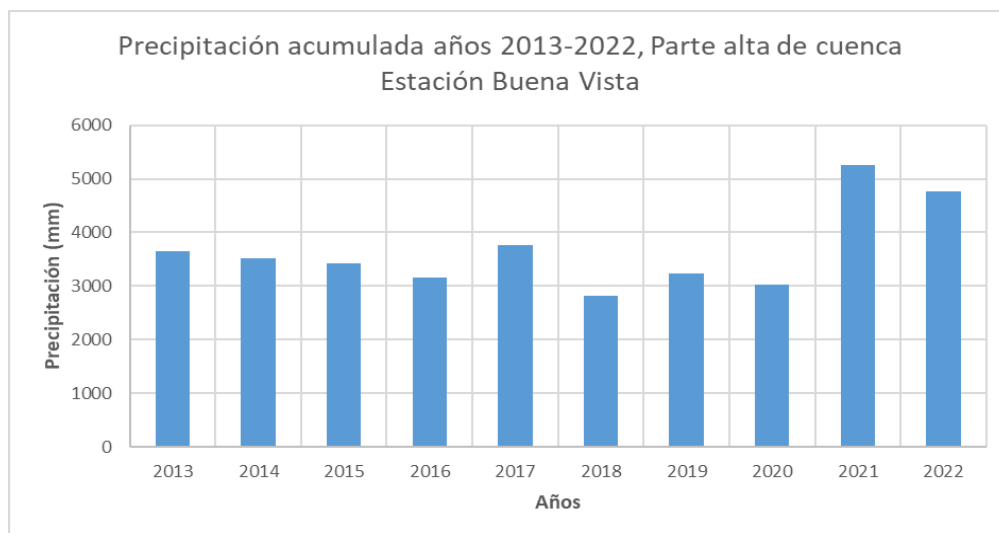
- Análisis de precipitación en registros anuales

Cuadro 12 Registros de precipitación pluvial (acumuladas y promedio) en registro histórico de años. Parte alta de la cuenca.

Año	Pp(mm) Ac	Pp(mm) prom
2013	3647.2	303.9
2014	3520.55	293.4
2015	3420.85	285.1
2016	3154.5	262.9
2017	3755.8	313.0
2018	2821.4	235.1
2019	3227.4	269.0
2020	3034.85	252.9
2021	5259.8	438.3
2022	4767.7	397.3

Fuente: elaboración propia con datos de ANACAFE.

Figura. 13 Precipitación acumulada años 2013-2022 Parte alta de cuenca. Estación Buena Vista.



Fuente: elaboración propia con datos de ANACAFE

Figura. 14 Precipitación promedio años 2013-2022 Parte alta de cuenca. Estación Buena Vista.



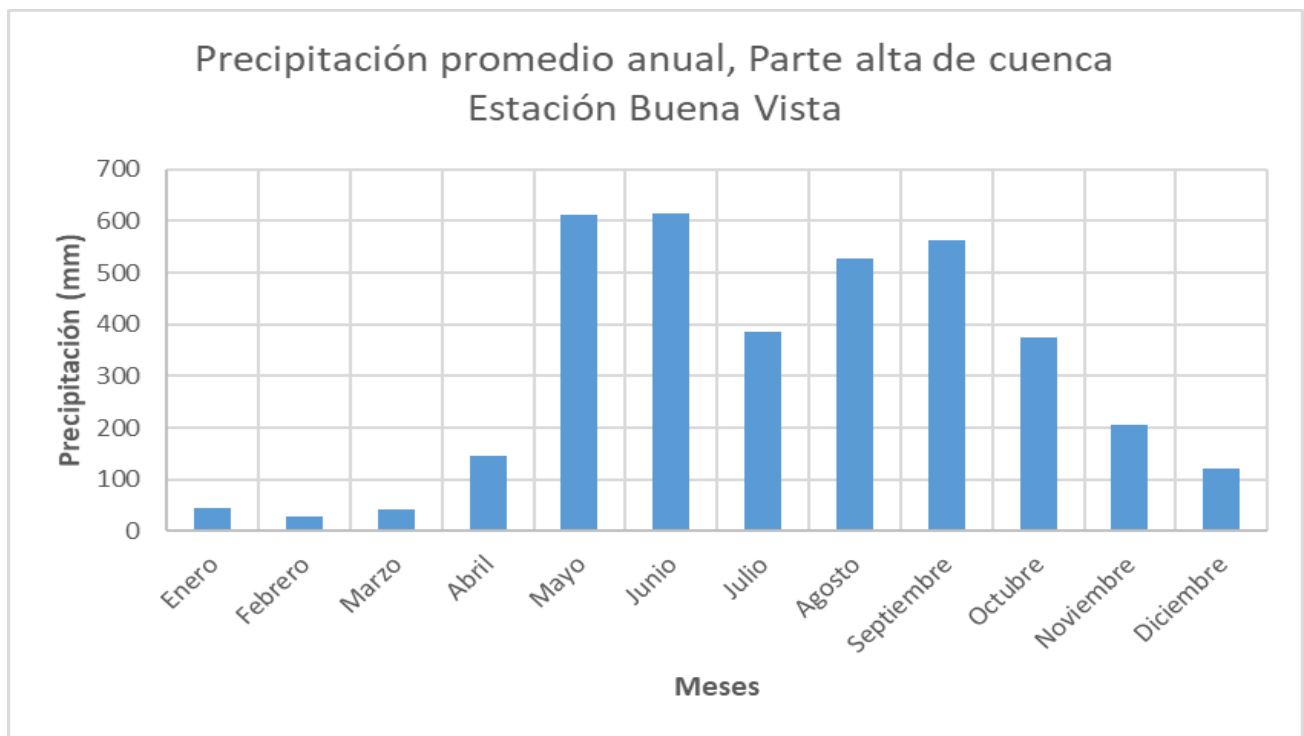
Fuente: elaboración propia con datos de ANACAFE

Cuadro 13 Registros de precipitación pluvial promedio anual. Parte alta de la cuenca.

Meses	Pp(mm) Prom
Enero	45.185
Febrero	28.865
Marzo	42.525
Abril	145.01
Mayo	610.57
Junio	614.27
Julio	384.7
Agosto	526.09
Septiembre	561.78
Octubre	374.525
Noviembre	205.65
Diciembre	121.835
TOTAL	3661.005

Fuente: elaboración propia con datos de ANACAFE

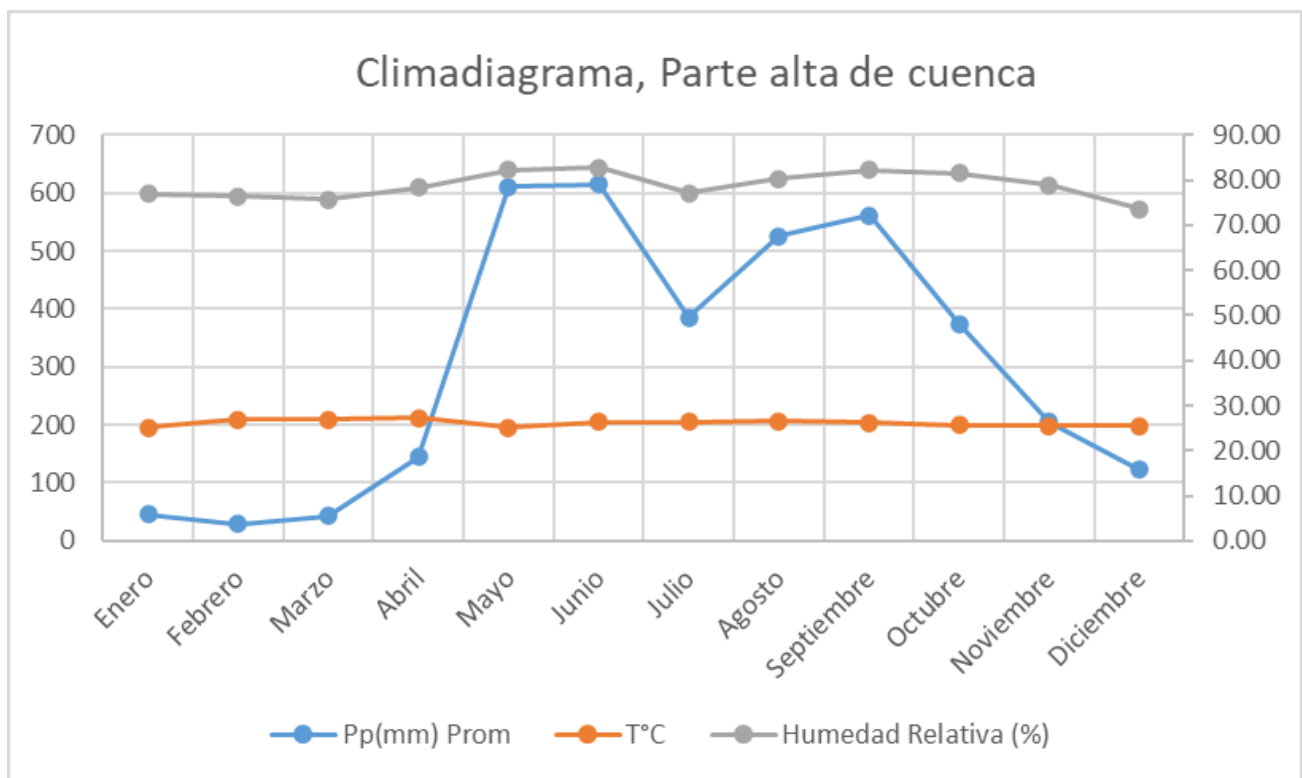
Figura. 15 Precipitación promedio anual. Parte alta de la cuenca. Estación Buena Vista



Fuente: elaboración propia con datos de ANACAFE

- Análisis de climadiagrama

Figura. 16 Climadiagrama. Parte alta de la cuenca.



Fuente: elaboración propia.

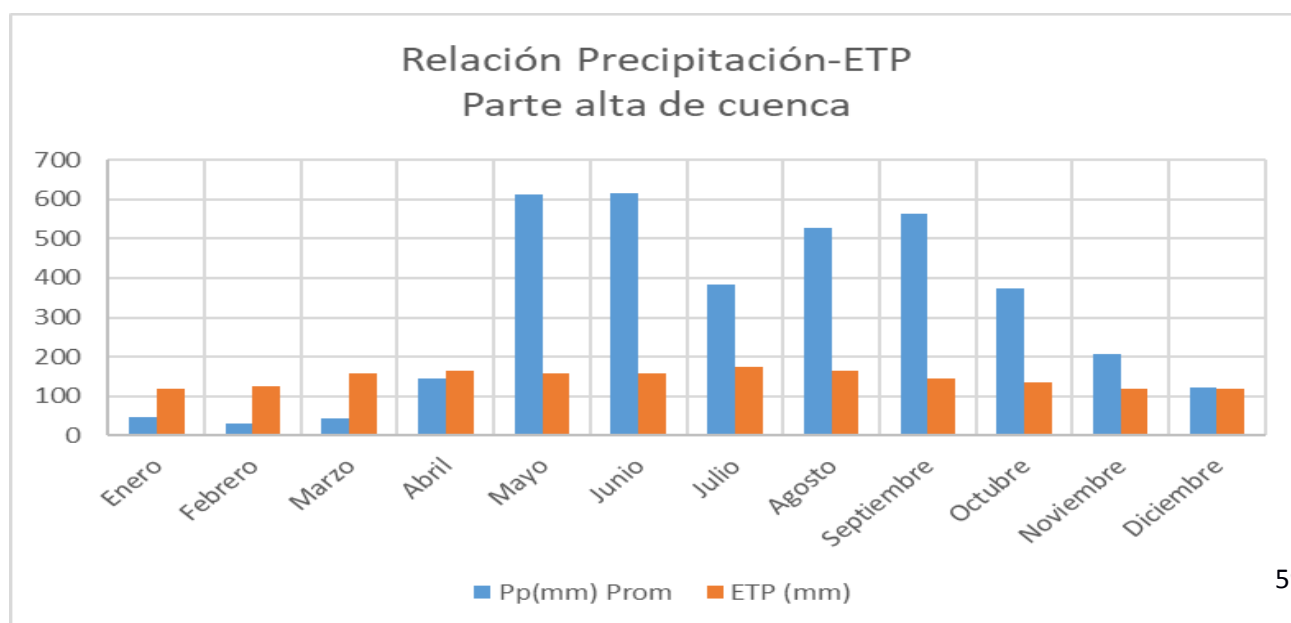
- Relación Precipitación y Evapotranspiración

Cuadro 14 Datos promedio de lluvia y cálculo de ETP promedio anual. Parte alta de la cuenca.

Meses	Pp(mm) Prom	ETP (mm)
Enero	45.185	118.0557
Febrero	28.865	125.467
Marzo	42.525	158.4239
Abril	145.01	163.6454
Mayo	610.57	158.9068
Junio	614.27	158.9088
Julio	384.7	175.4598
Agosto	526.09	164.0463
Septiembre	561.78	146.0876
Octubre	374.525	134.0304
Noviembre	205.65	117.0934
Diciembre	121.835	118.2517
TOTAL	3661.005	1738.377

Fuente: elaboración propia.

Figura. 17 Relación Precipitación-ETP parte alta de cuenca.



Fuente: elaboración propia.

Variables atmosféricas en parte media de cuenca

En la parte media de la cuenca, se encontraron las siguientes variables atmosféricas.

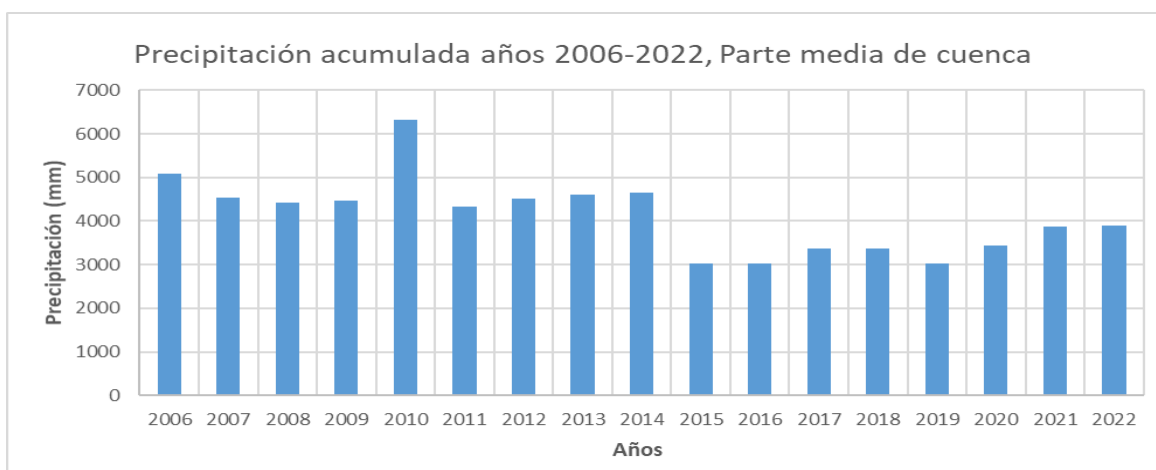
- Análisis de precipitación en registros anuales

Cuadro 15 Registros de precipitación pluvial (acumuladas y promedio) en registro histórico de años. Parte media de la cuenca de los ríos Sis-Icán.

Año	Pp(mm) Ac	Pp(mm) prom
2006	5093.1	424.4
2007	4528.7	377.4
2008	4425.7	368.8
2009	4477.2	373.1
2010	6313.0	526.1
2011	4321.4	360.1
2012	4521.2	376.8
2013	4595.1	382.9
2014	4638.3	386.5
2015	3015.5	251.3
2016	3035.5	253.0
2017	3376.4	281.4
2018	3376.9	281.4
2019	3025.5	252.1
2020	3440.9	286.7
2021	3878.0	323.2
2022	3896.4	324.7

Fuente: elaboración propia.

Figura. 18 Precipitación acumulada años 2006-2022 parte media de cuenca.



Fuente: elaboración propia.

Figura. 19 Precipitación promedio años 2006-2022 parte media de cuenca



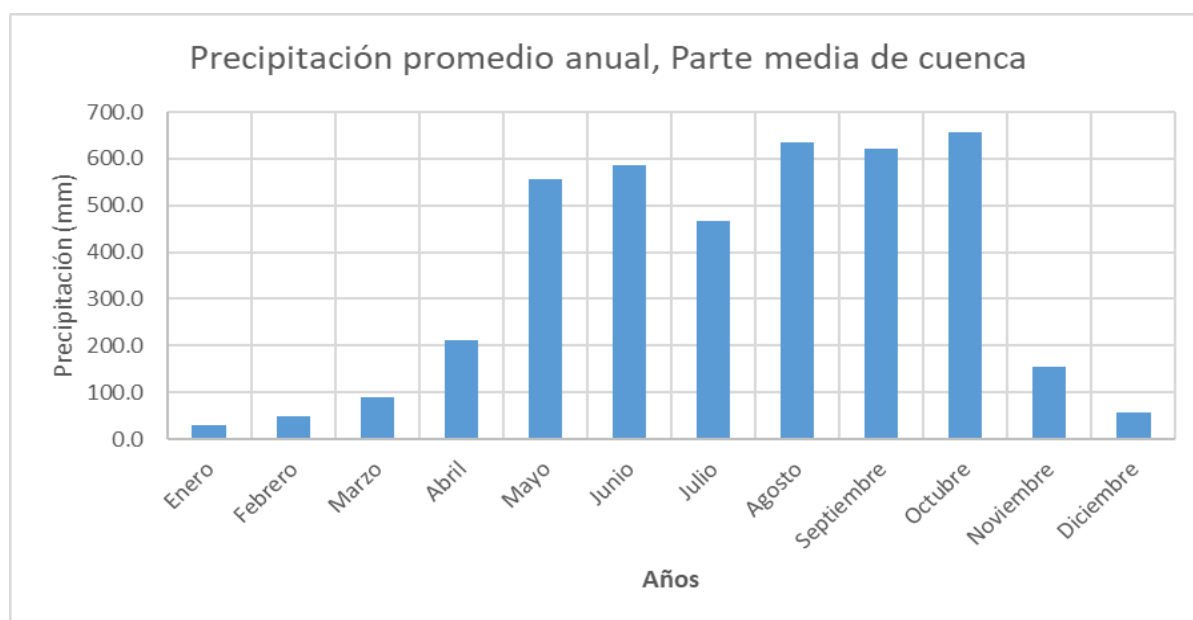
Fuente: elaboración propia.

Figura. 20 Registros de precipitación pluvial promedio anual. Parte media de la cuenca

Meses	Pp(mm) Prom
Enero	30.7
Febrero	47.7
Marzo	89.6
Abril	210.4
Mayo	557.5
Junio	587.2
Julio	467.2
Agosto	635.7
Septiembre	620.8
Octubre	656.3
Noviembre	154.9
Diciembre	30.7

Fuente: elaboración propia.

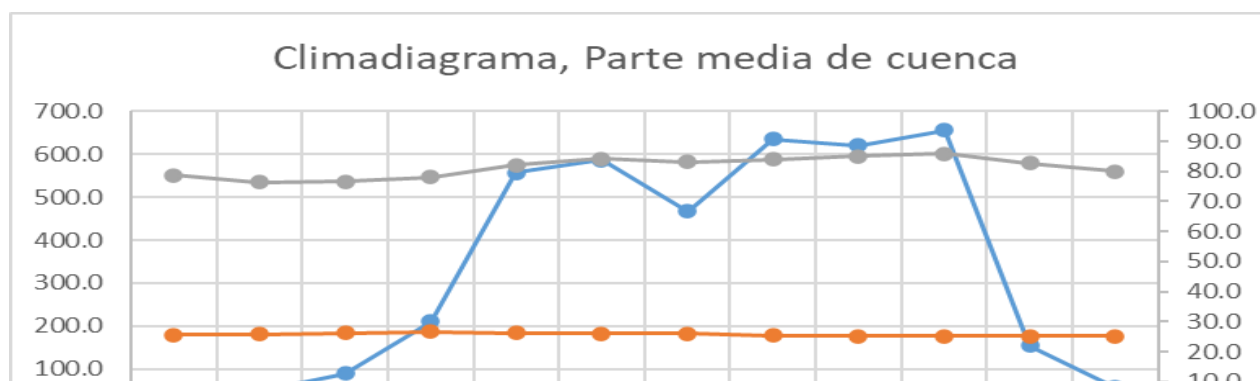
Figura. 21 Precipitación promedio anual. Parte media de la cuenca.



Fuente: elaboración propia.

- *Análisis de climadiagrama*

Figura. 22 Climadiagrama parte alta de la cuenca. Parte alta de la cuenca.



Fuente: elaboración propia.

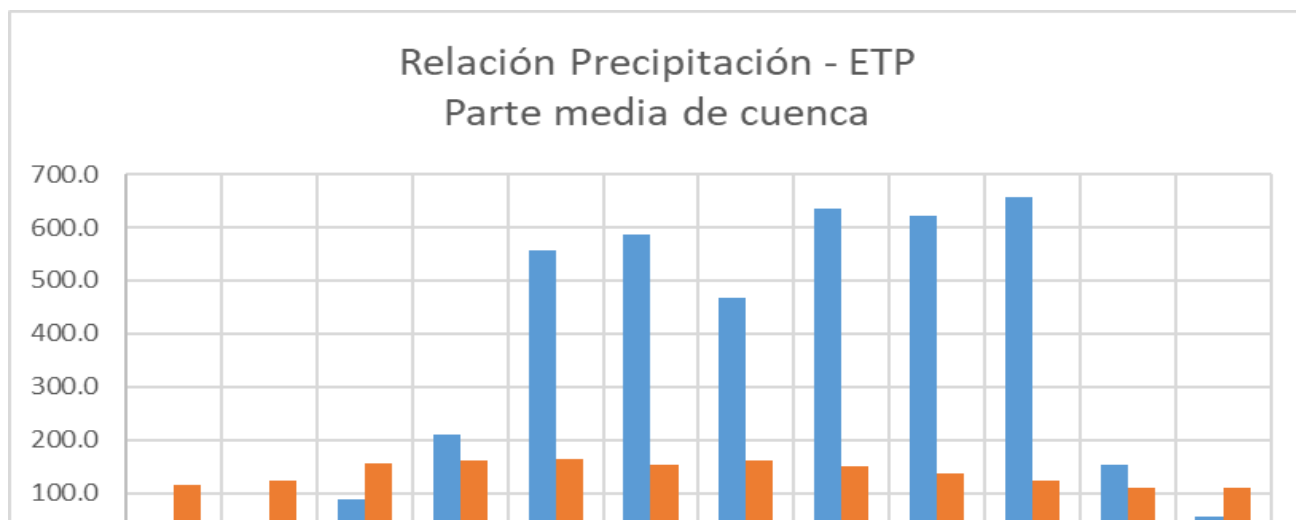
- Relación Precipitación y Evapotranspiración

Cuadro 16 Datos promedio de lluvia y cálculo de ETP promedio anual. Parte media de la cuenca.

Meses	Pp(mm) Prom	ETP(mm)
Enero	30.7	116.8
Febrero	47.7	122.6
Marzo	89.6	155.3
Abril	210.4	162.3
Mayo	557.5	163.9
Junio	587.2	154.0
Julio	467.2	160.8
Agosto	635.7	151.8
Septiembre	620.8	136.5
Octubre	656.3	124.0
Noviembre	154.9	110.4
Diciembre	57.1	110.0
TOTAL/PROM	4115.2	1668.4

Fuente: elaboración propia.

Figura. 23 Relación Precipitación-ETP. Parte media de cuenca.



Fuente: elaboración propia.

Variables atmosféricas en parte baja de cuenca

En la parte alta de la cuenca, se encontraron las siguientes variables atmosféricas.

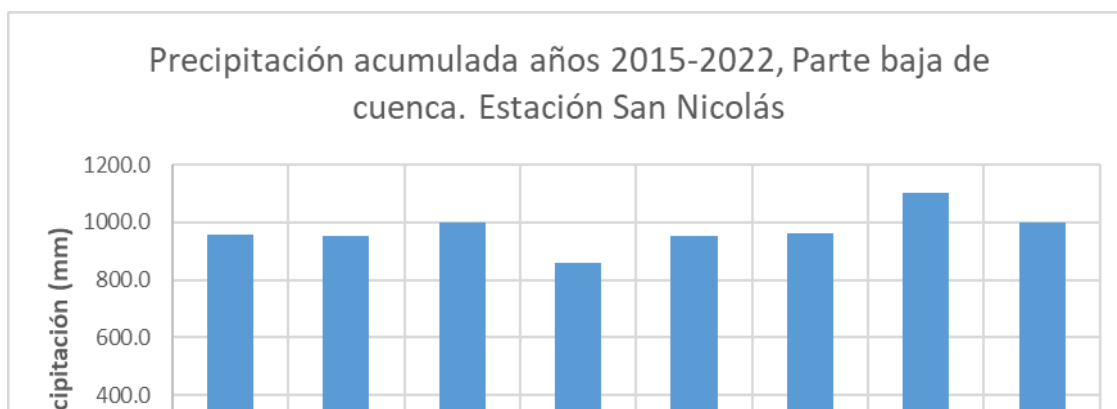
- Análisis de precipitación en registros anuales

Cuadro 17 Registros de precipitación pluvial (acumuladas y promedio) en registro histórico de años. Parte baja de la cuenca.

Año	Pp(mm) Ac	Pp(mm) prom
2015	956.0	79.7
2016	954.2	79.5
2017	997.4	83.1
2018	856.8	71.4
2019	951.8	79.3
2020	961.0	80.1
2021	1100.4	91.7
2022	997.9	83.2

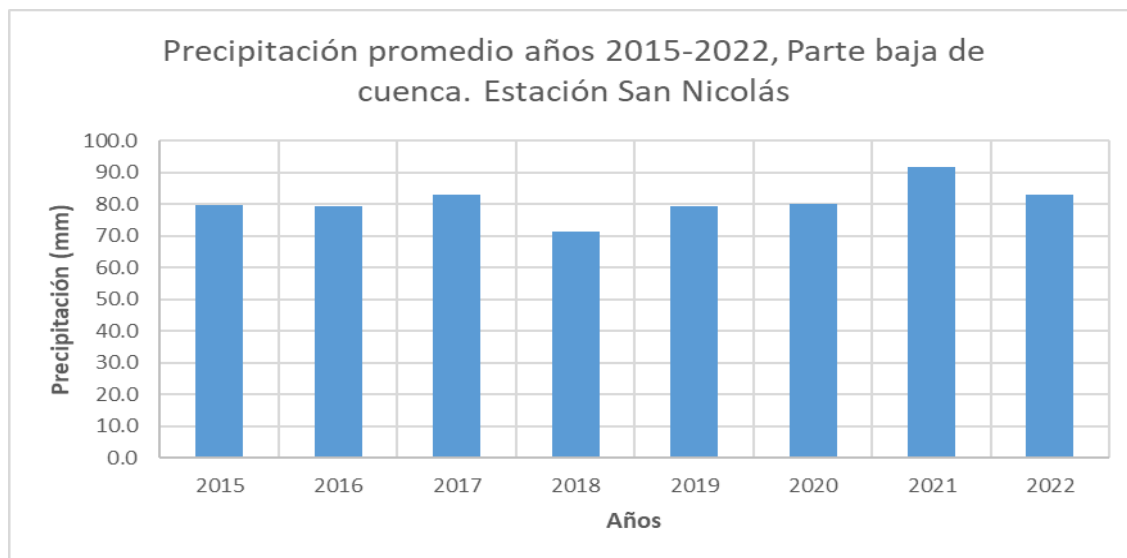
Fuente: elaboración propia

Figura. 24 Precipitación acumulada años 2015-2022 Parte baja de cuenca. Estación San Nicolás.



Fuente: elaboración propia con datos de ICC.

Figura. 25 Precipitación promedio años 2015-2022 Parte baja de cuenca. Estación San Nicolás.



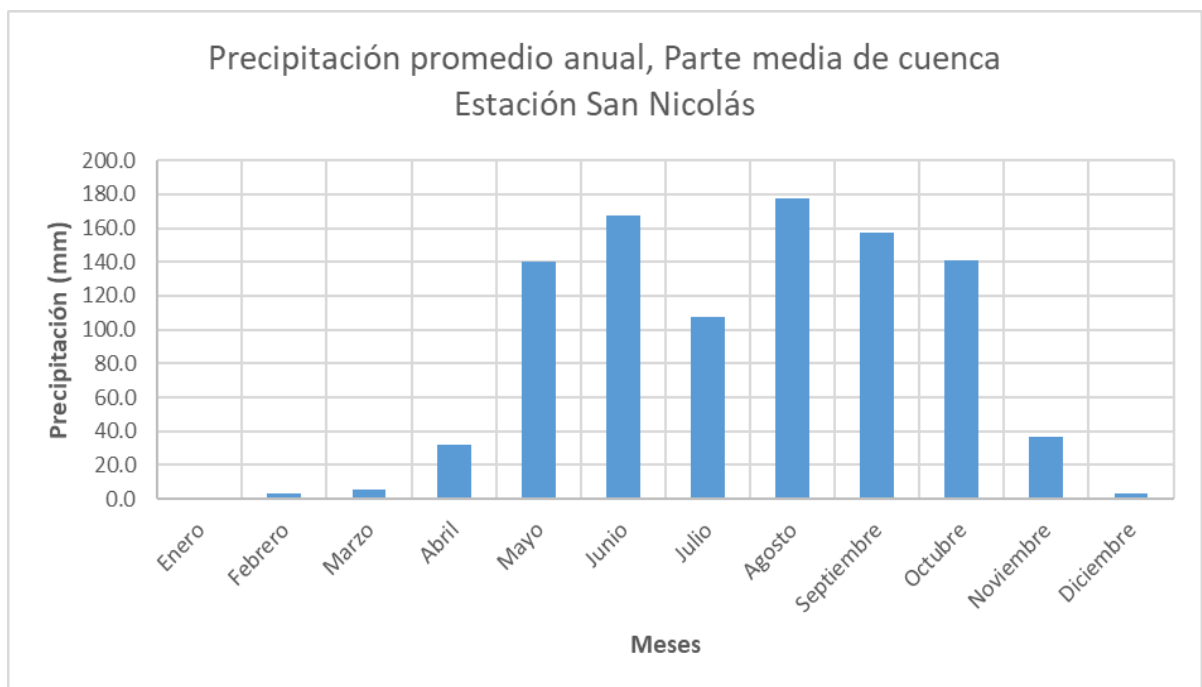
Fuente: elaboración propia con datos de ICC.

Cuadro 18 Registros de precipitación pluvial promedio anual. Parte baja de la cuenca.

Meses	Pp(mm) Prom
Enero	0.3
Febrero	2.9
Marzo	5.3
Abril	32.1
Mayo	140.5
Junio	167.4

Fuente: elaboración propia.

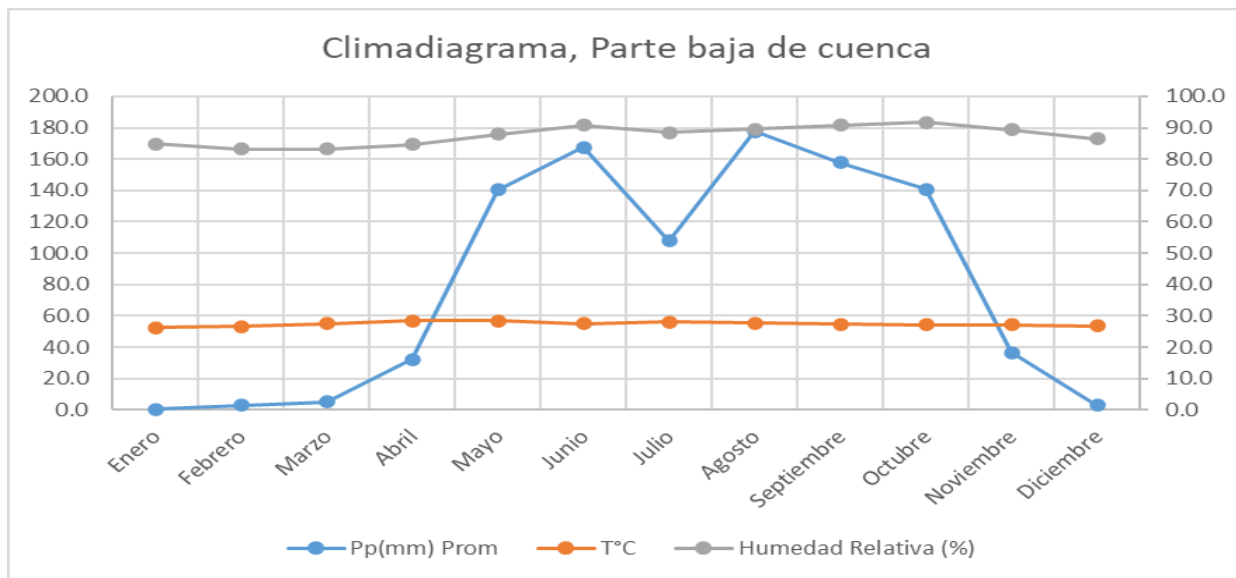
Figura. 26 Precipitación promedio anual. Parte media de cuenca, estación San Nicolás



Fuente: elaboración propia con datos de ICC.

Análisis de climadiagrama

Figura. 27 Climadiagrama. Parte baja de la cuenca



Fuente: elaboración propia.

- Relación Precipitación y Evapotranspiración

Cuadro 19 Datos promedio de lluvia y cálculo de ETP promedio anual. Parte baja de la cuenca.

Meses	Pp(mm) Prom	ETP (mm)
Enero	0.3	109.1
Febrero	2.9	114.5
Marzo	5.3	147.0
Abril	32.1	154.3
Mayo	140.5	155.4
Junio	167.4	139.2
Julio	107.7	152.8
Agosto	177.6	143.2
Septiembre	157.7	126.8
Octubre	140.8	113.6
Noviembre	36.8	102.3
Diciembre	3.0	103.5
TOTAL	971.9	1561.7

Fuente: elaboración propia.

Figura. 28 Relación Precipitación-ETP. Parte baja de cuenca.

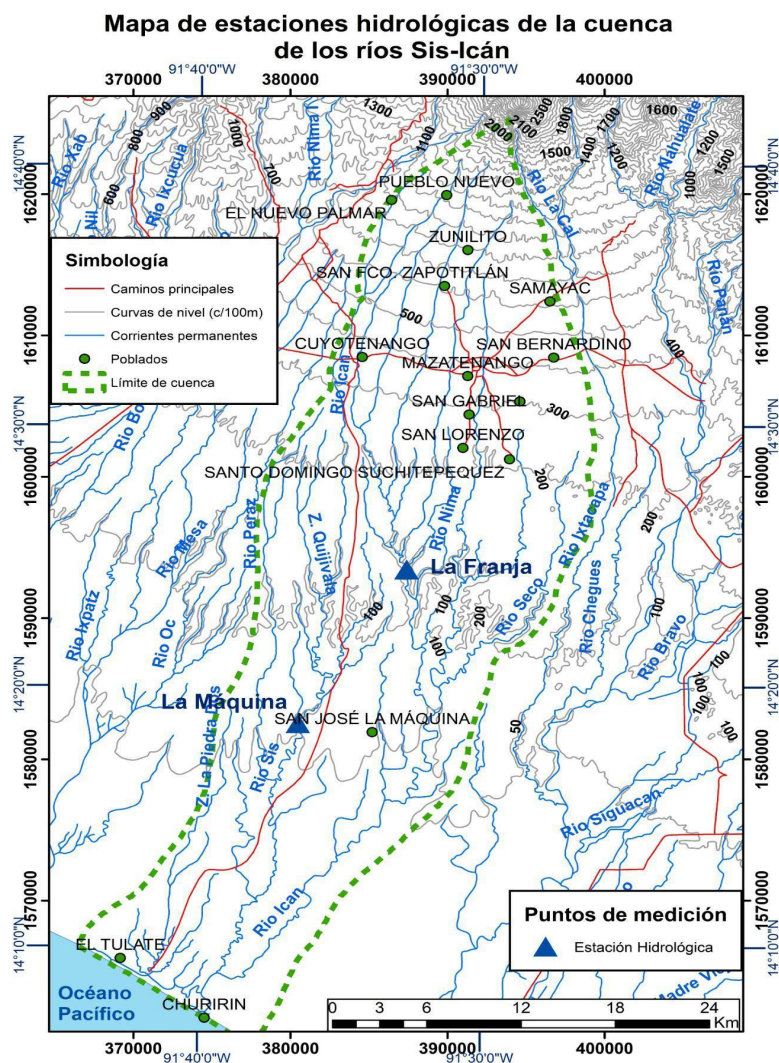


Fuente: elaboración propia.

11.1.10 Esguerrimiento superficial

Los resultados que se presentan en este apartado, relacionan el comportamiento hídrico superficial dentro la cuenca, que al igual que el anterior análisis de climatología, esta se presenta de forma segmentada a lo largo del área de estudio.

Figura. 29 Mapa de ubicación de estaciones hidrométricas.



Fuente: elaboración propia.

Cuadro 20 Localización georreferenciada de estaciones hidrológicas

No	Estación Hidrológica	Coordenadas GTM		Coordenadas Geográficas	
		X	Y	Longitud	Latitud
1	La Franja	387391	1593448	91° 32' 39.74" W	14° 24' 29.59" N
2	La Máquina	380467	1582564	91° 36' 29.16" W	14° 18' 34.38" N

Fuente: elaboración propia.

Datos estación La Franja

Caudal acumulado y promedio en años de registro

Cuadro 21 Datos de caudal acumulado en los años 2003-2022. Estación La Franja.

Años	Caudal acumulado
2003-2004	3380.28
2004-2005	1956.35
2005-2006	3585.36
2006-2007	2803.29
2007-2008	2908.82
2008-2009	5047.96
2009-2010	4223.70
2010-2011	6230.29
2011-2012	4808.99
2012-2013	4205.12
2013-2014	4077.12
2014-2015	2942.84
2015-2016	5271.97
2016-2017	6015.76
2017-2018	3912.20
2018-2019	3294.30
2019-2020	2682.68
2020-2021	3384.63
2021-2022	3217.08

Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

Figura. 30 Gráfica de caudal acumulado en los años transcurridos 2003-2022. Estación La Franja



Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

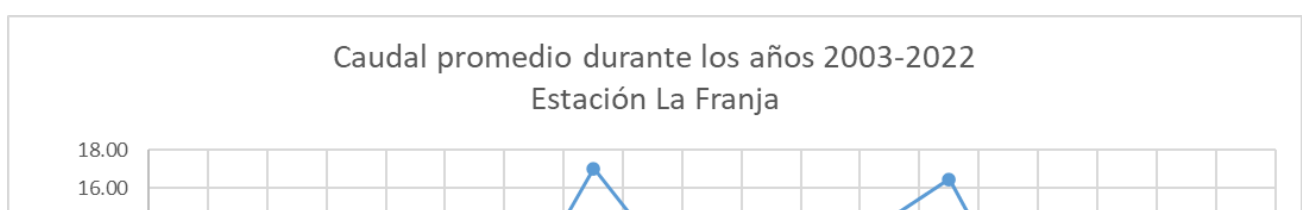
Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

Cuadro 22 Datos de caudal promedio en los años 2003-2022. Estación La Franja.

Años	Caudal promedio
2003-2004	9.23
2004-2005	5.33
2005-2006	9.77
2006-2007	7.66
2007-2008	7.94
2008-2009	13.85
2009-2010	11.56
2010-2011	17.03
2011-2012	13.12
2012-2013	11.47
2013-2014	11.12
2014-2015	8.04
2015-2016	14.42
2016-2017	16.45
2017-2018	10.68
2018-2019	9.01
2019-2020	7.33
2020-2021	9.27
2021-2022	8.73

Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

Figura. 31 Gráfica de caudal promedio en los años transcurridos 2003-2022. Estación La Franja.



Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

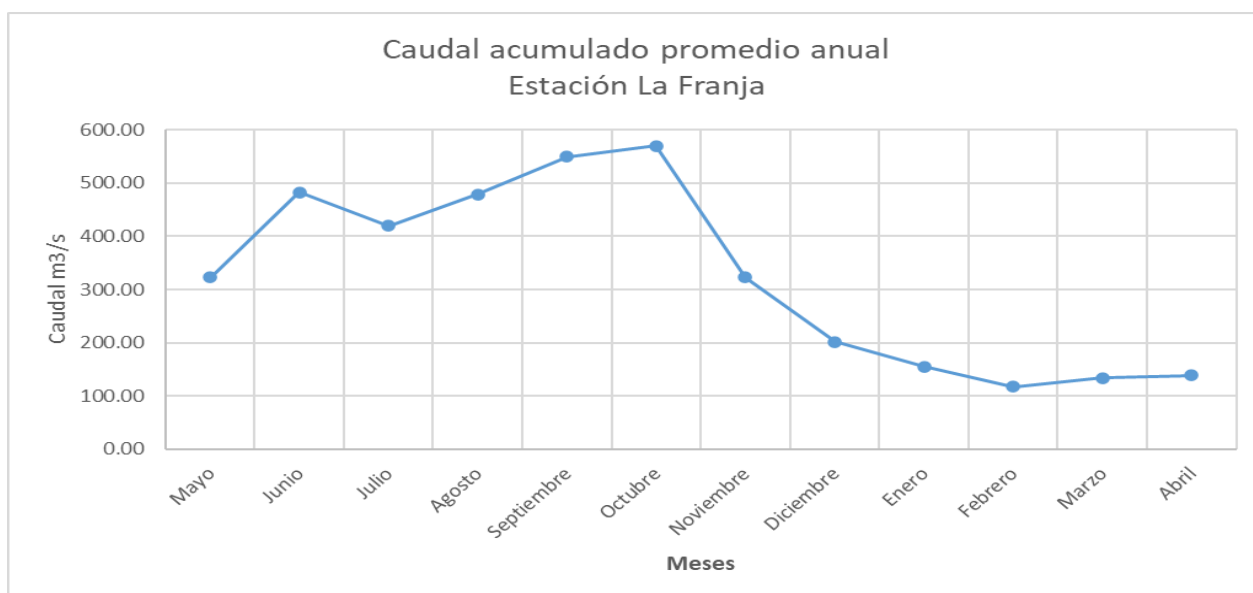
Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

Caudal acumulado y promedio mensual

Meses	Caudal acumulado promedio
Mayo	322.44
Junio	482.23
Julio	419.45
Agosto	478.41
Septiembre	549.57
Octubre	569.65
Noviembre	322.62
Diciembre	202.17
Enero	155.14
Febrero	117.23
Marzo	134.13
Abril	139.01

Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

Figura. 32 Gráfica de caudal acumulado promedio mensual durante año hidrológico. Estación La Franja.



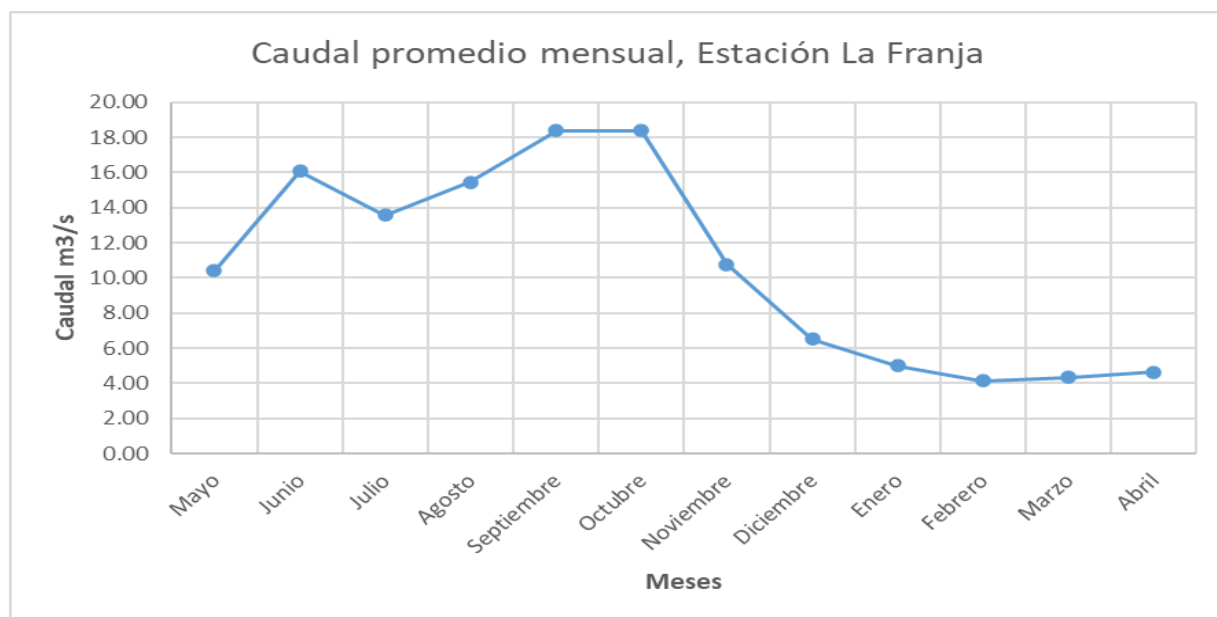
Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

Cuadro 23 Datos de caudal promedio mensual en año hidrológico. Estación La Franja.

Meses	Caudal promedio
Mayo	10.40
Junio	16.07
Julio	13.56
Agosto	15.43
Septiembre	18.37
Octubre	18.38
Noviembre	10.75
Diciembre	6.52
Enero	5.00
Febrero	4.13
Marzo	4.33
Abril	4.63

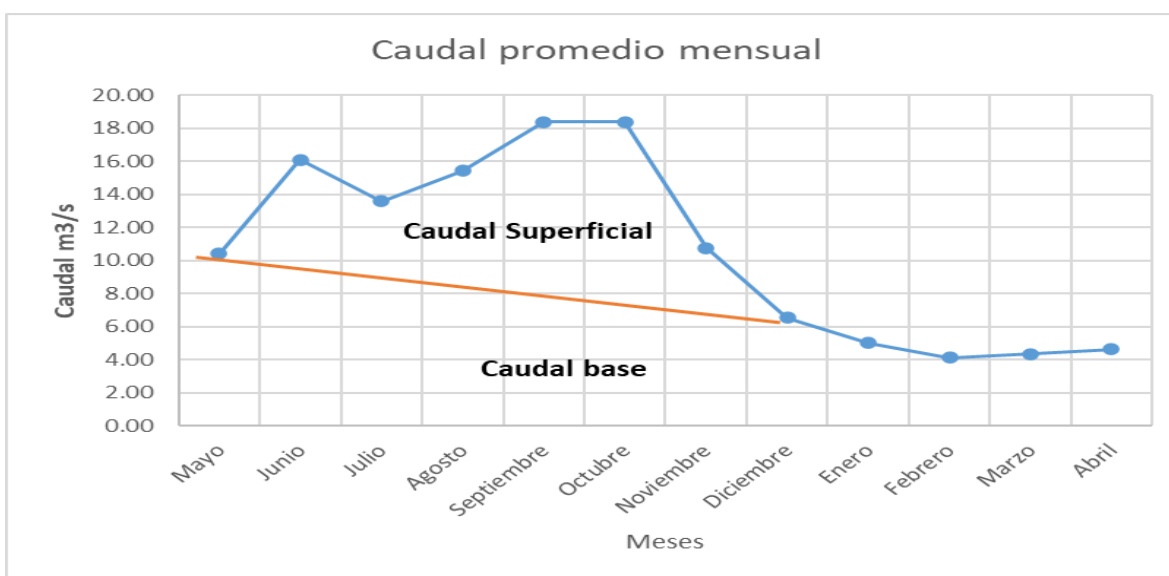
Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

Figura. 33 Gráfica de caudal promedio mensual en año hidrológico. Estación La Franja.



Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

Figura. 34 Gráfica de caudal base y superficial promedio mensual en año hidrológico. Estación La Franja.



Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

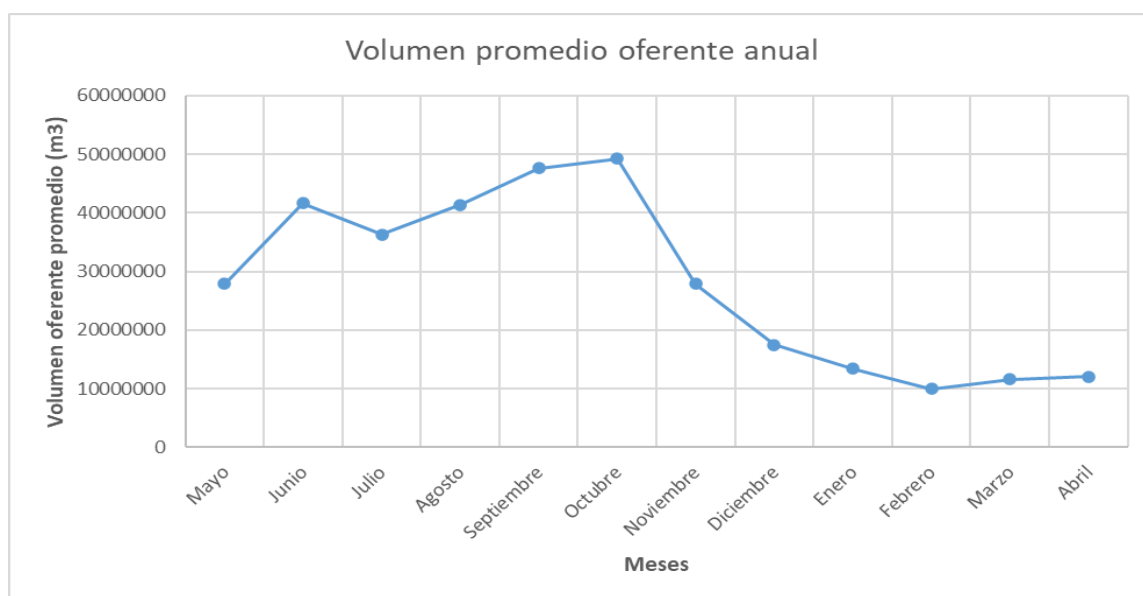
Volumen disponible

Cuadro 24 Cálculo de volumen promedio mensual en año hidrológico. Estación La Franja.

Meses	Disponibilidad (m3)
Mayo	27859057.28
Junio	41665006.59
Julio	36326069.01
Agosto	41334372.4
Septiembre	47615278.29
Octubre	49217717.05
Noviembre	27873961.56
Diciembre	17467163.61
Enero	13403970.21
Febrero	9987560.737
Marzo	11589249.34
Abril	12010167.81
TOTAL	336349573.9

Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

Figura. 35 Gráfica de volumen promedio oferente mensual en año hidrológico. Estación La Franja.



Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

Datos estación La Máquina

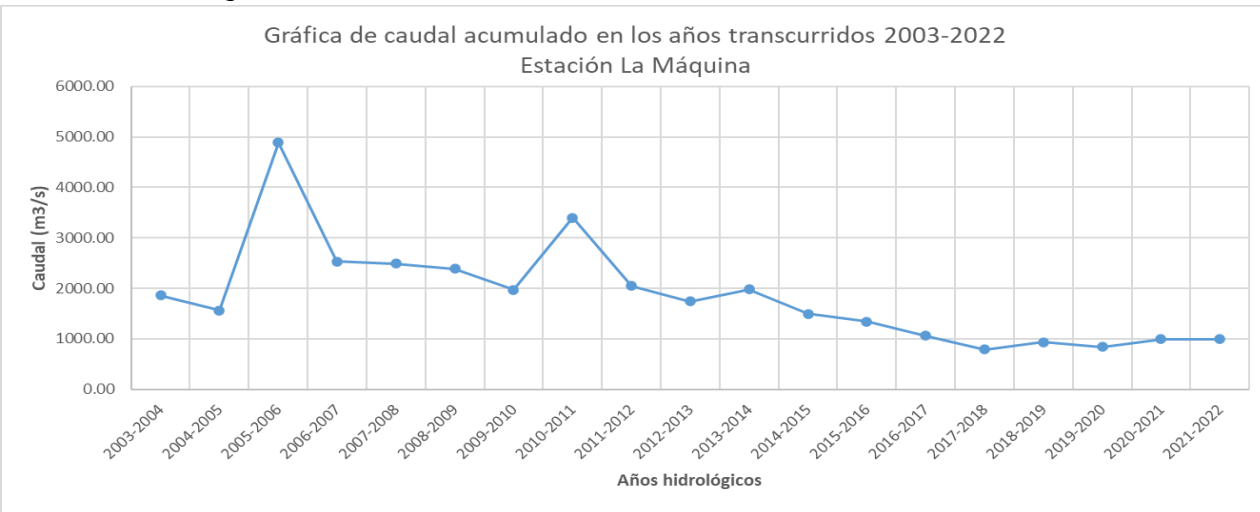
Caudal acumulado y promedio en años de registro

Cuadro 25 Datos de caudal acumulado en los años 2003-2022. Estación La Máquina.

Años	Caudal acumulado
2003-2004	1859.37
2004-2005	1566.19
2005-2006	4886.56
2006-2007	2531.61
2007-2008	2486.24
2008-2009	2387.01
2009-2010	1975.29
2010-2011	3399.81
2011-2012	2044.73
2012-2013	1743.12
2013-2014	1975.37
2014-2015	1490.53
2015-2016	1345.84
2016-2017	1062.58
2017-2018	789.12
2018-2019	935.47
2019-2020	843.40

Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

Figura. 36 Gráfica de caudal acumulado en los años transcurridos 2003-2022. Estación La Máquina.



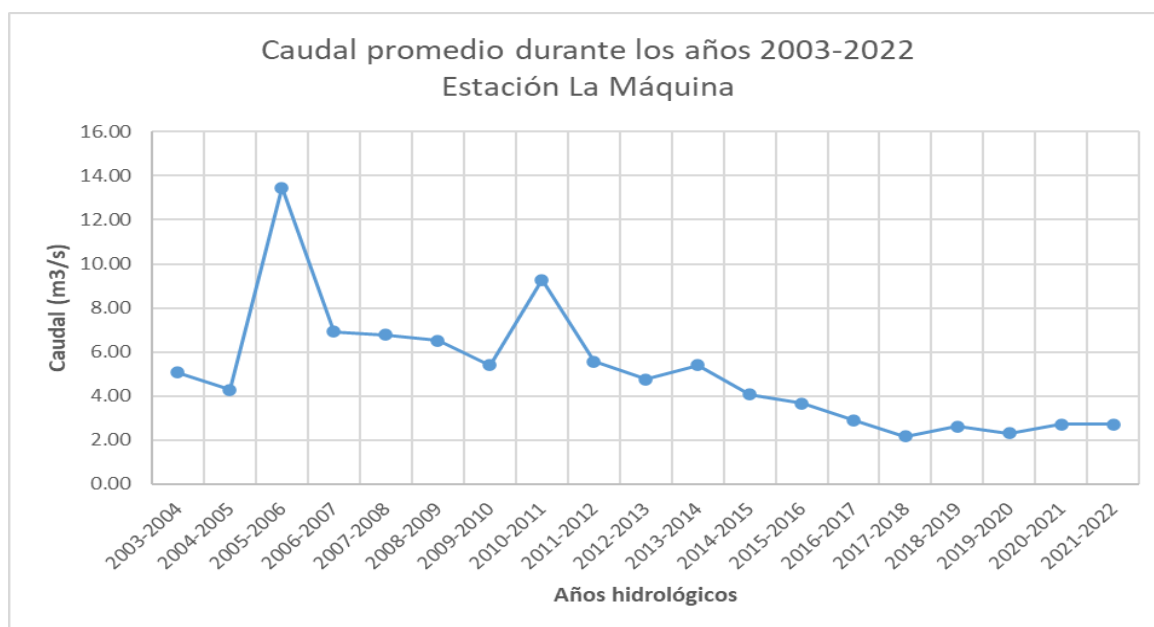
Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

Cuadro 26 Datos de caudal promedio en los años 2003-2022. Estación La Máquina.

Años	Caudal promedio
2003-2004	5.08
2004-2005	4.28
2005-2006	13.45
2006-2007	6.92
2007-2008	6.79
2008-2009	6.51
2009-2010	5.41
2010-2011	9.27
2011-2012	5.57
2012-2013	4.76
2013-2014	5.40
2014-2015	4.08
2015-2016	3.68
2016-2017	2.90
2017-2018	2.16
2018-2019	2.62
2019-2020	2.30
2020-2021	2.72
2021-2022	2.72

Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

Figura. 37 Gráfica de caudal promedio en los años transcurridos 2003-2022. Estación La Máquina.



Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

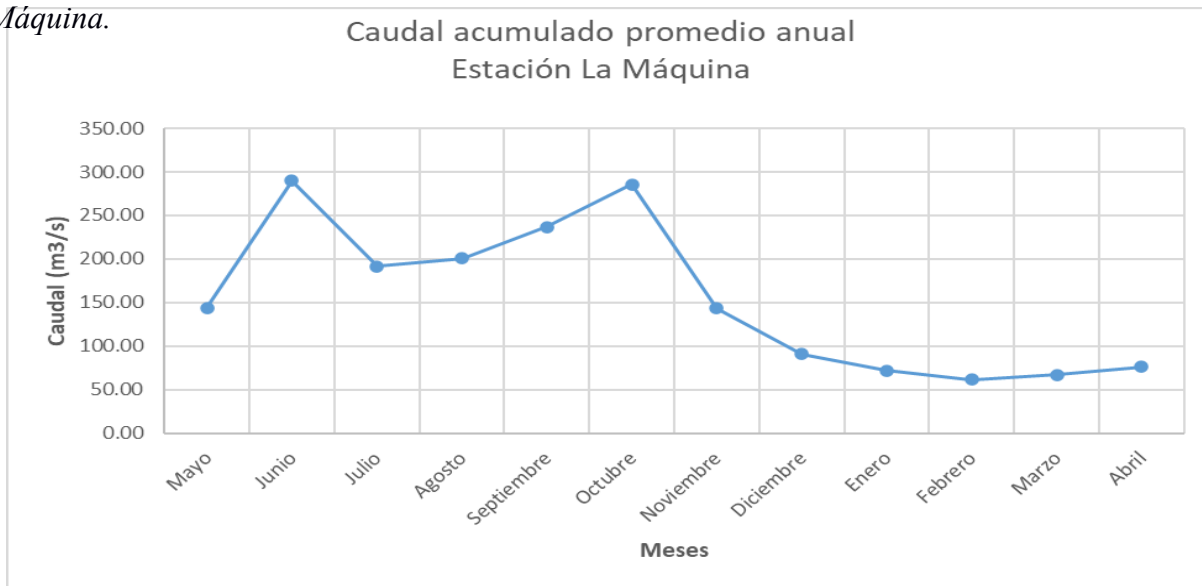
Caudal acumulado y promedio mensual

Cuadro 27 Datos de caudal acumulado promedio mensual. Estación La Máquina.

Meses	Caudal acumulado promedio
Mayo	144.19
Junio	290.02
Julio	191.46
Agosto	200.90
Septiembre	236.77
Octubre	285.42
Noviembre	143.15
Diciembre	91.00
Enero	71.85
Febrero	61.26
Marzo	66.74
Abril	75.88

Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

Figura. 38 Gráfica de caudal acumulado promedio mensual durante año hidrológico. Estación La Máquina.



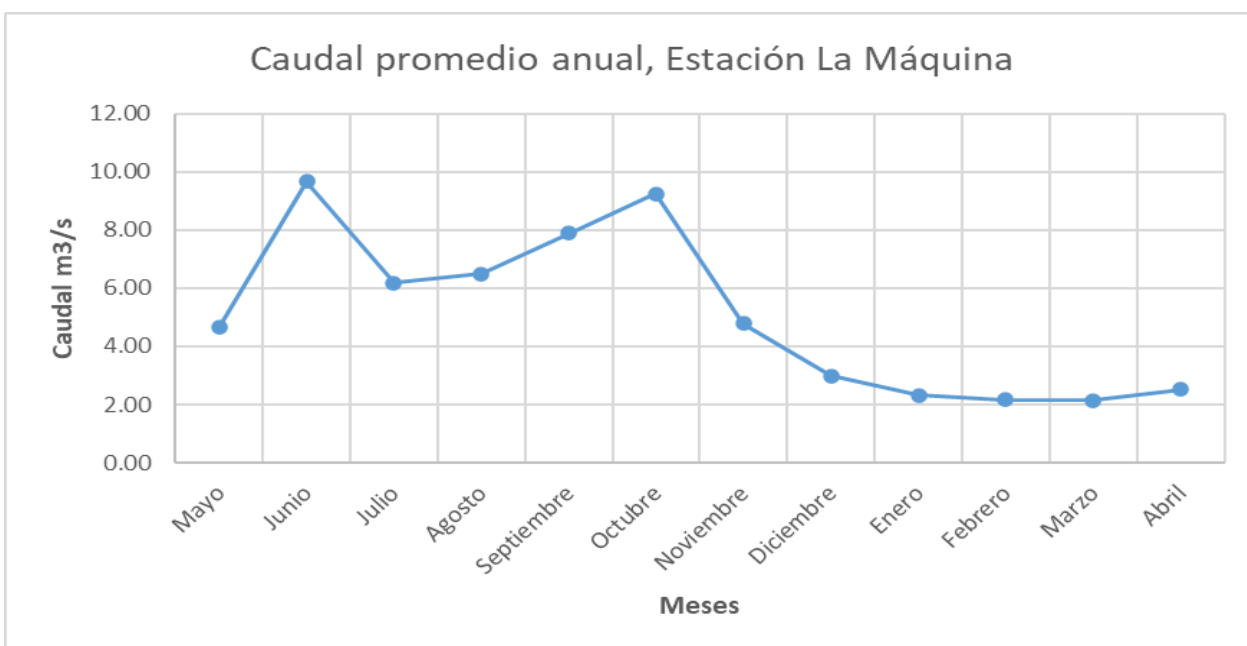
Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

Cuadro 28 Datos de caudal promedio mensual en año hidrológico. Estación La Máquina.

Meses	Caudal promedio
Mayo	4.65
Junio	9.66
Julio	6.18
Agosto	6.48
Septiembre	7.89
Octubre	9.24
Noviembre	4.77
Diciembre	2.99
Enero	2.32
Febrero	2.17
Marzo	2.15
Abril	2.53

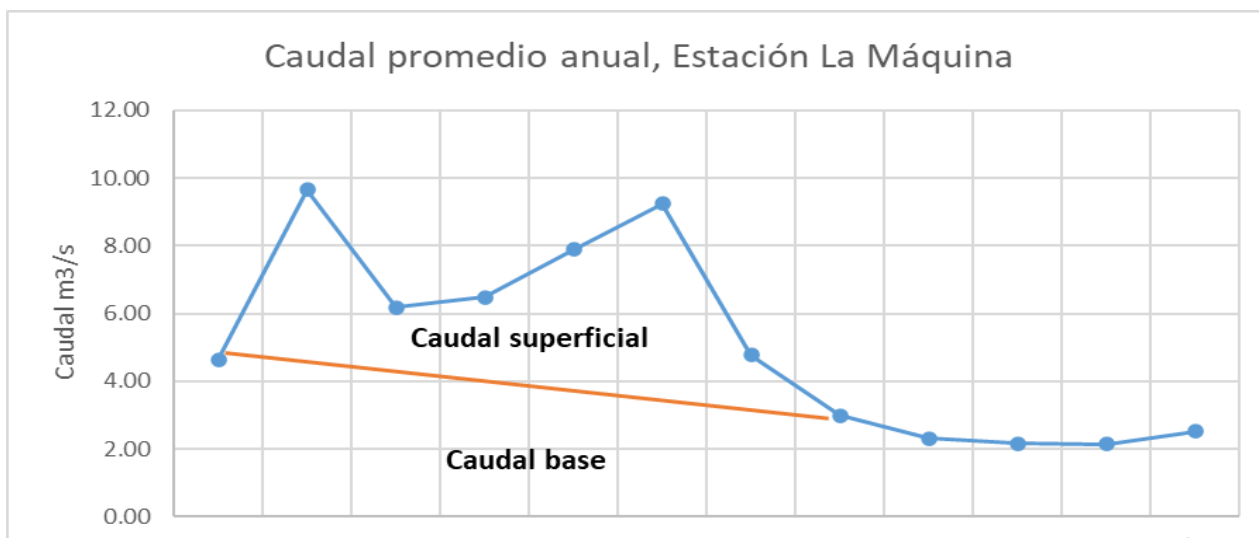
Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

Figura. 39 Gráfica de caudal promedio mensual en año hidrológico. Estación La Máquina.



Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

Figura. 40 Gráfica de caudal base y superficial promedio mensual en año hidrológico. Estación La Máquina.



Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

Volumen disponible

Cuadro 29 Cálculo de volumen promedio mensual en año hidrológico. Estación La Máquina.

Meses	Disponibilidad (m3)
Mayo	12457681.2
Junio	25030316.51
Julio	16541730.62
Agosto	17357982.88
Septiembre	20456545.55
Octubre	24737208.45
Noviembre	12368119.52
Diciembre	8010112.88
Enero	6207563.491
Febrero	5243158.958
Marzo	5766743.003
Abril	6555953.918
TOTAL	160733117

Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

Figura. 41 Gráfica de volumen promedio oferente mensual en año hidrológico. Estación La Máquina.

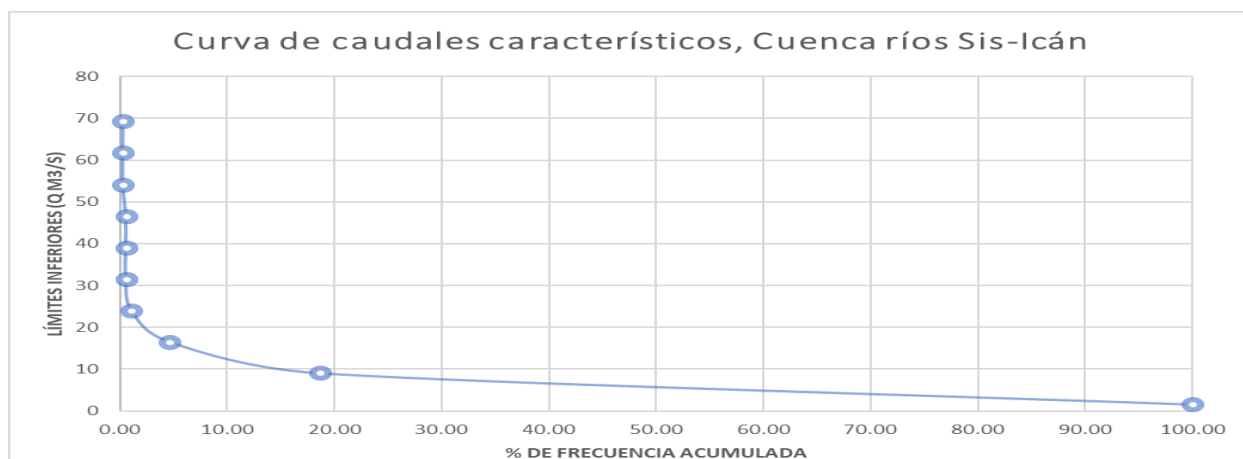


Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH.

11.1.11 Estadística hidrológica

Caudales característicos de la cuenca

Figura. 42 Gráfica de curva de caudales característicos de la cuenca de los ríos Sis-Icán.



Fuente: elaboración propia

Cuadro 30 Determinación de caudales característicos.

Caudal característico	% de frecuencia acumulada	Valor de caudal (m³/s)
Máximo	2.74	32.4
Medio	50	7.53
Mínimo	97.3	2.08
Aguas altas	0 a 10	Ver gráfica
Aguas medias	10 a 80	Ver gráfica
Aguas bajas	80 a 100	Ver gráfica
1 mes	8.34	13.66
3 meses	25	9.46
9 meses	75	3.78
Caudal ecológico	95	2.14
Caudal ecológico	90.4	2.35

Fuente: elaboración propia

Estimación de caudal de diseño (Método del servicio de Conservación de Suelos (SCS)).

Cuadro 31 Uso actual y clasificación de la tierra de la cuenca de los ríos Sis-Icán

Uso de suelo	Km²	%	Condición hidrológica	Grupo de suelos	No de curva (CN)
Uso urbano	30.84	3.32	Mala	C	92
Cultivos anuales	481	51.73	Buena	D	89
Cultivos perennes	190.38	20.47	Buena	A	65
Matorral	176.76	19.01	Regular	C	79
Bosque	50.91	5.48	Regular	A	36

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Fuente: elaboración propia

Cuadro 32 Aspectos de cuenca y de su caudal

Aspecto	Ponderación	Observación
Número de curva ponderado (CN)	80.01	El número de curva debe tomarse como condición III (más de 5.5 cm), por lo que es una cuenca húmeda, CNIII=91
Infiltración potencial (S)	25.1 mm.	2.51 cm de infiltración potencial
Tiempo de concentración (Tc)	537.32 min.	
Tasa de retorno (Tr)(100 años)	25.94 mm	A, B y n parámetros de ajuste de estación meteorológica.
Lámina de escorrentía (Q)	9.51mm	
Caudal máximo (qp) Método del servicio de conservación de suelos	188511.33 L/s	188.511 m ³ /s

Fuente: elaboración propia

Estimación de caudales máximos

Cuadro 33 Datos de cálculo estadístico para caudal máximo (Método Pearson III). Estación La Franja.

Año hidrológico	Fecha	Caudal (m ³ /s)	Ln X	(LnX-Ln _{xm}) ²	(LnX-Ln _{xm}) ³
2005-2006	5/10/2005	262.67	5.571	2.577	4.1375
2010-2011	27/06/2010	200.66	5.302	1.785	2.3853
2008-2009	6/09/2008	87.13	4.467	0.252	0.1264
2016-2017	14/09/2016	75.06	4.318	0.124	0.0439
2018-2019	31/05/2018	75.06	4.318	0.124	0.0439
2017-2018	30/09/2017	69.23	4.238	0.074	0.0201
2013-2014	16/07/2013	65.24	4.178	0.045	0.0096
2020-2021	5/06/2020	58.01	4.061	0.009	0.0009
2011-2012	12/10/2011	50.01	3.912	0.003	-0.0002
2007-2008	12/10/2007	45.38	3.815	0.023	-0.003410
2019-2020	8/06/2019	42.37	3.746	0.048	-0.0105
2003-2004	1/10/2003	39.90	3.686	0.078	-0.0217
2009-2010	8/07/2009	39.90	3.686	0.078	-0.0217
2015-2016	23/11/2015	38.45	3.649	0.100	-0.0316
2012-2013	9/10/2012	34.65	3.545	0.177	-0.0742
2006-2007	11/11/2006	30.52	3.418	0.299	-0.1637

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Media	3.966	Media	3.966
Sy	0.663	Sy	0.663
Cs ó g	0.973	Cs ó g	0.973
LnX(100 años)	5.895	LnX(50 años)	5.592
X(100 años)	363.21 m3/s	X(50 años)	268.27 m3/s

Fuente: elaboración propia

Sy: Desviación estándar, X: Caudal probabilístico.

Cuadro 34 Datos de cálculo estadístico para caudal máximo (Método Pearson III). Estación La Máquina.

Año hidrológico	Fecha	Caudal (m3/s)	Ln X	(LnX-Ln _{xm}) ²	(LnX-Ln _{xm}) ³
2005-2006	11/10/2005	276.63	5.623	6.128	15.1681
2010-2011	31/05/2010	84.95	4.442	1.676	2.1706
2011-2012	16/06/2011	35.04	3.557	0.168	0.0686
2013-2014	27/10/2013	28.46	3.349	0.041	0.0082
2007-2008	15/10/2007	27.86	3.327	0.032	0.0058
2006-2007	31/10/2006	26.11	3.262	0.013	0.0015
2008-2009	7/09/2008	24.99	3.218	0.005	0.0004
2003-2004	1/10/2003	23.32	3.150	0.000	0.0000
2012-2013	21/10/2012	20.86	3.038	0.012	-0.0013
2018-2019	14/08/2018	19.91	2.991	0.024	-0.003791
2004-2005	19/10/2004	19.45	2.968	0.032	-0.0058
2016-2017	2/06/2016	19.00	2.944	0.041	-0.0084
2014-2015	14/10/2014	16.44	2.800	0.121	-0.0420
2015-2016	19/10/2015	15.65	2.750	0.157	-0.0625
2021-2022	3/09/2021	13.65	2.614	0.285	-0.1519
2020-2021	18/06/2020	13.26	2.585	0.316	-0.1780
2009-2010	28/08/2009	13.13	2.575	0.328	-0.1875
2019-2020	30/05/2019	10.87	2.386	0.579	-0.4406
2017-2018	8/05/2017	9.20	2.219	0.861	-0.7988
			59.798	10.819	15.5427

Media	3.147	Media	3.147
Sy	0.775	Sy	0.775
Cs ó g	2.071	Cs ó g	2.071
LnX(100 años)	5.992	LnX(50 años)	5.434
X(100 años)	400.61 m3/s	X(50 años)	229.06 m3/s

Fuente: elaboración propia

Cuadro 35 Datos de cálculo estadístico para caudal máximo (Método Gumble I). Estación La Franja.

Año hidrológico	Fecha	Caudal (m3/s)	(X-X _m) ²
2005-2006	5/10/2005	262.67	38,040.39
2010-2011	27/06/2010	200.66	17,698.75
2008-2009	6/09/2008	87.13	380.34
2016-2017	14/09/2016	75.06	55.26
2018-2019	31/05/2018	75.06	55.26
2017-2018	30/09/2017	69.23	2.58
2013-2014	16/07/2013	65.24	5.70
2020-2021	5/06/2020	58.01	92.51
2011-2012	12/10/2011	50.01	310.40
2007-2008	12/10/2007	45.38	495.15
2019-2020	8/06/2019	42.37	638.18
2003-2004	1/10/2003	39.90	768.60
2009-2010	8/07/2009	39.90	768.60
2015-2016	23/11/2015	38.45	851.40
2012-2013	9/10/2012	34.65	1,087.56
2006-2007	11/11/2006	30.52	1,376.94

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Fuente: elaboración propia

Cuadro 36 Datos de cálculo estadístico para caudal máximo (Método Gumble I). Estación La Máquina.

Año hidrológico	Fecha	Caudal (m3/s)	(X-Xm)2
2005-2006	11/10/2005	276.63	57,528.40
2010-2011	31/05/2010	84.95	2,320.42
2011-2012	16/06/2011	35.04	3.01
2013-2014	27/10/2013	28.46	69.13
2007-2008	15/10/2007	27.86	79.52
2006-2007	31/10/2006	26.11	113.83
2008-2009	7/09/2008	24.99	139.01
2003-2004	1/10/2003	23.32	181.02
2012-2013	21/10/2012	20.86	253.42
2018-2019	14/08/2018	19.91	284.47
2004-2005	19/10/2004	19.45	300.25
2016-2017	2/06/2016	19.00	316.17
2014-2015	14/10/2014	16.44	413.62
2015-2016	19/10/2015	15.65	446.47
2021-2022	3/09/2021	13.65	534.96
2020-2021	18/06/2020	13.26	553.15
2009-2010	28/08/2009	13.13	559.29
2019-2020	30/05/2019	10.87	671.09
2017-2018	8/05/2017	9.20	760.49
		698.81	65,527.70
Media	36.78		
Desv. Est	60.34		
X(50años)	228.65	228.65 m3/s	
X(100años)	268.47	268.47 m3/s	

Fuente: elaboración propia

Curva de intensidad, duración y frecuencia (IDF)

$$I = \frac{3910.5723 * T^{0.087189}}{t^{0.61639}}$$

I= Intensidad de precipitación (mm/hora)

T= Periodo de retorno (años)

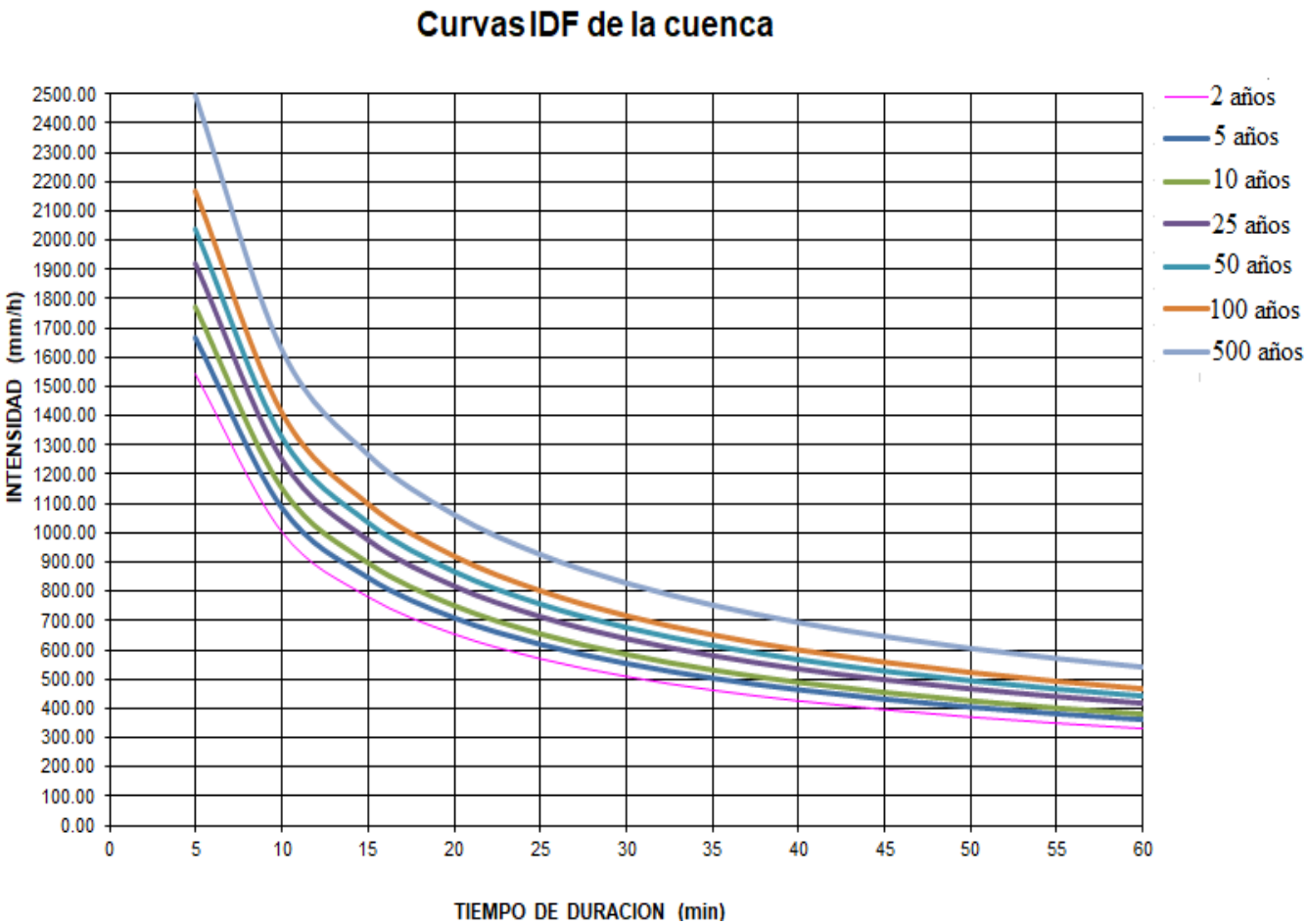
t= Tiempo de duración de precipitación (min)

Cuadro 37 Cálculos de intensidad, duración en minutos y frecuencia en años.

Tabla de intensidades - Tiempo de duración												
Frecuencia años	Duración en minutos											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	1540.46	1004.85	782.64	655.47	571.24	510.52	464.24	427.56	397.62	372.62	351.36	333.01
5	1668.58	1088.42	847.73	709.98	618.75	552.98	502.85	463.12	430.69	403.61	380.58	360.71
10	1772.53	1156.23	900.54	754.21	657.29	587.42	534.18	491.97	457.52	428.75	404.29	383.18
25	1919.95	1252.39	975.44	816.94	711.96	636.28	578.61	532.89	495.57	464.41	437.91	415.05
50	2039.56	1330.41	1036.20	867.83	756.31	675.92	614.65	566.09	526.45	493.34	465.20	440.90
100	2166.62	1413.29	1100.76	921.89	803.43	718.03	652.94	601.35	559.24	524.08	494.18	468.37
500	2493.01	1626.20	1266.58	1060.77	924.46	826.20	751.31	691.95	643.49	603.03	568.62	538.93

Fuente: elaboración propia

Figura. 43 Curva de intensidad, duración y frecuencia modulada para la cuenca.



Fuente: elaboración propia

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

11.1.12 Balance hídrico

Factores considerados para el cálculo de balance hídrico

Cuadro 38 Resultados de variables de infiltración y características de suelo en diferentes segmentos de cuenca

Variables	Parte alta	Parte media	Parte baja
fc (mm/d)	412	320	245
DS (g/cm ³)	1.3	1.4	1.25
PR (mm)	1500	1300	250
CC	604.5	364	103.13
PM	234	182	50
Textura	Franco Limoso	Franco Limoso	Arcilloso

Fuente: elaboración propia

fc (mm/d): factor de infiltración

DS (g/cm³): Densidad de suelo

PR(mm): Profundidad radicular

CC (mm): Capacidad de campo de suelo; PM (mm): Punto de Marchitez de suelo.

Balance hídrico de suelo (Parte alta de cuenca de los ríos Sis-Icán)

Cuadro 39 Balance hídrico de suelo (Parte alta de cuenca de los ríos Sis-Icán)

Concept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	374.53	205.65	121.84	45.185	28.865	42.525	145.01	610.57	614.27	384.7	526.09	561.78	3661.01
Ret (mm)	44.94	24.68	14.62	5.42	5.00	5.10	17.40	73.27	73.71	46.16	63.13	67.41	440.86
Pi (mm)	184.57	101.34	60.04	22.27	13.36	20.96	71.46	300.89	302.71	189.58	259.26	276.85	1803.28
ESC (mm)	145.02	79.63	47.17	17.50	10.50	16.47	56.15	236.41	237.85	148.96	203.70	217.52	1416.87
ETP (mm)	114.4	110.1	101.1	110.5	116.6	153.1	169.8	167.6	152.4	164.9	152.8	130	1643.30
HSi (mm)	604.50	604.50	597.05	562.60	495.83	436.22	384.01	377.23	531.77	604.50	604.50	604.50	
C1	1.00	1.00	1.00	0.95	0.74	0.60	0.60	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	1.00	0.98	0.87	0.66	0.51	0.35	0.32	0.75	1.00	1.00	1.00	1.00	
HD (mm)	555.07	471.84	423.09	350.87	275.20	223.17	221.47	444.12	600.49	560.08	629.76	647.35	
ETR (mm)	114.40	108.80	94.48	89.04	72.98	73.17	78.24	146.34	152.40	164.90	152.80	130.00	1377.55
HSf (mm)	604.50	597.05	562.60	495.83	436.22	384.01	377.23	531.77	604.50	604.50	604.50	604.50	
DCC (mm)	0.00	7.45	41.90	108.67	168.28	220.49	227.27	72.73	0.00	0.00	0.00	0.00	
Rp (mm)	70.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	77.59	24.68	106.46	146.85	425.73
NR (mm)	0.00	8.76	48.51	130.13	211.90	300.43	318.83	93.98	0.00	0.00	0.00	0.00	1113

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Fuente: elaboración propia

Balance hídrico de suelo (Parte media de cuenca de los ríos Sis-Icán)

Cuadro 40 Balance hídrico de suelo (Parte media de cuenca de los ríos Sis-Icán)

Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	656.31	154.85	57.139	30.732	47.729	89.622	210.44	557.48	587.19	467.17	635.71	620.84	4115.22
Ret (mm)	78.76	18.58	6.86	5.00	5.73	10.75	25.25	66.90	70.46	56.06	76.29	74.50	495.14
Pi (mm)	288.78	68.14	25.14	12.87	21.00	39.43	92.59	245.29	258.37	205.55	279.71	273.17	1810.04
ESC (mm)	288.78	68.14	25.14	12.87	21.00	39.43	92.59	245.29	258.37	205.55	279.71	273.17	1810.04
ETP (mm)	123.99	110.39	110.02	116.78	122.57	155.33	162.27	163.93	153.95	160.79	151.84	136.54	1668.40
HSi (mm)	364.00	364.00	334.56	284.75	247.23	229.71	226.51	251.36	346.81	364.00	364.00	364.00	
C1	1.00	1.00	0.98	0.64	0.47	0.48	0.75	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	1.00	0.77	0.39	0.23	0.15	0.07	0.08	0.83	1.00	1.00	1.00	1.00	
HD (mm)	470.78	250.14	177.70	115.61	86.23	87.15	137.10	314.65	423.17	387.55	461.71	455.17	
ETR (mm)	123.99	97.57	74.95	50.38	38.52	42.64	67.75	149.84	153.95	160.79	151.84	136.54	1248.76
HSf (mm)	364.00	334.56	284.75	247.23	229.71	226.51	251.36	346.81	364.00	364.00	364.00	364.00	
DCC (mm)	0.00	29.44	79.25	116.77	134.29	137.49	112.64	17.19	0.00	0.00	0.00	0.00	
Rp (mm)	164.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	87.22	44.77	127.87	136.63	561.28
NR (mm)	0.00	42.25	114.32	183.17	218.34	250.18	207.17	31.28	0.00	0.00	0.00	0.00	1047

Fuente: elaboración propia

Balance hídrico de suelo (Parte baja de cuenca de los ríos Sis-Icán)

Cuadro 41 Balance hídrico de suelo (Parte baja de cuenca de los ríos Sis-Icán)

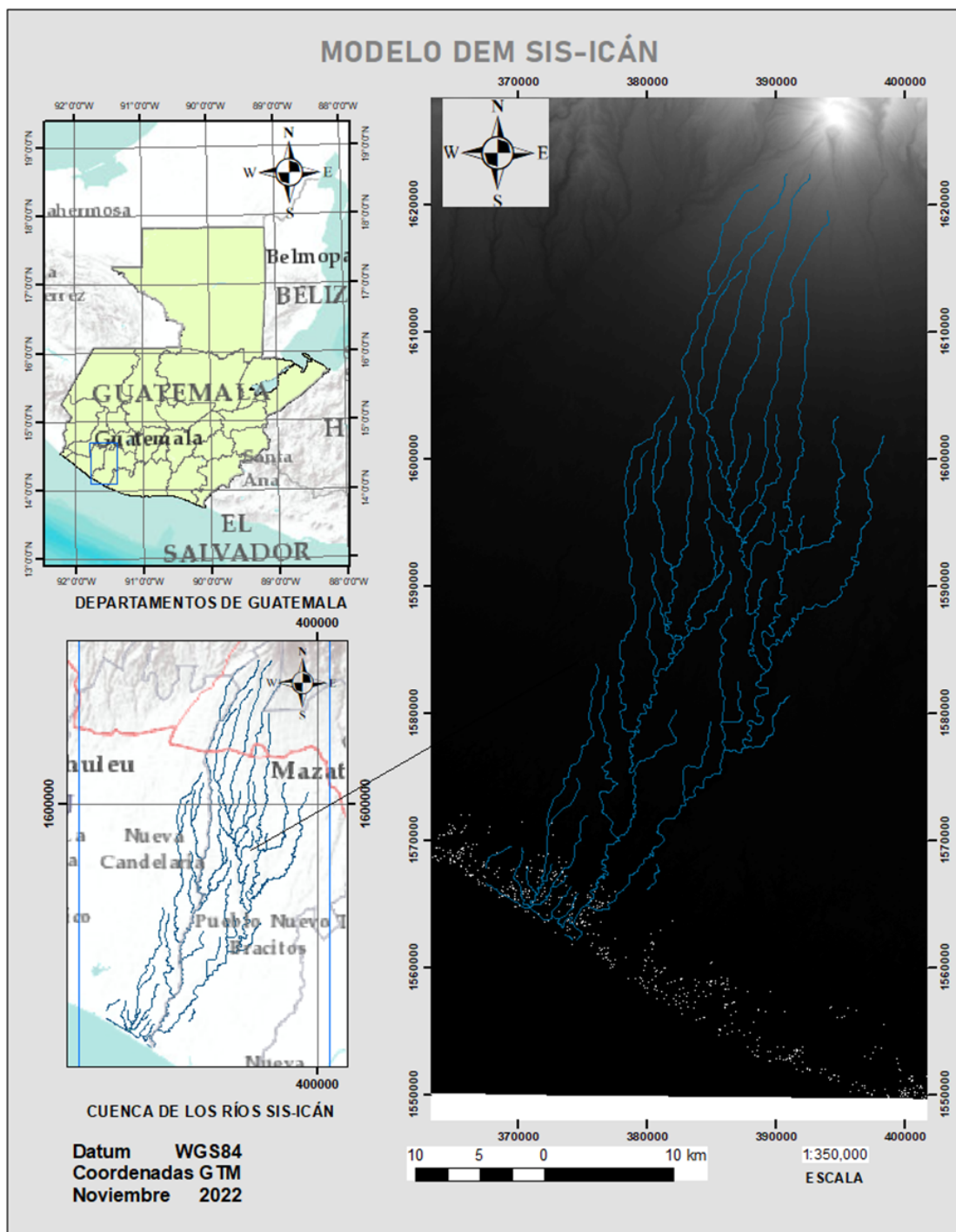
Concepto	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
P (mm)	140.8	36.767	2.9667	0.275	2.875	5.25	32.075	140.53	167.43	107.7	177.58	157.7	971.93
Ret (mm)	16.90	5.00	2.97	0.28	2.88	5.00	5.00	16.86	20.09	12.92	21.31	18.92	128.12
Pi (mm)	74.34	19.06	0.00	0.00	0.00	0.15	16.25	74.20	88.40	56.87	93.76	83.27	506.29
ESC (mm)	49.56	12.71	0.00	0.00	0.00	0.10	10.83	49.46	58.93	37.91	62.51	55.51	337.52
ETP (mm)	113.59	102.26	103.51	109.12	114.45	147.03	154.28	155.44	139.21	152.82	143.19	126.82	1561.73
HSi (mm)	412.50	103.13	71.06	50.54	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	68.79	50.00	72.16	
C1	1.00	1.00	0.40	0.01	0.00	0.00	0.31	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
C2	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
HD (mm)	436.84	72.19	21.06	0.54	0.00	0.15	16.25	74.20	88.40	75.66	93.76	105.43	
ETR (mm)	113.59	51.13	20.51	0.54	0.00	0.15	16.25	74.20	69.61	75.66	71.60	63.41	556.64
HSf (mm)	103.13	71.06	50.54	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	68.79	50.00	72.16	92.02	
DCC (mm)	0.00	32.07	52.58	53.13	53.13	53.13	53.13	53.13	34.33	53.13	30.96	11.10	
Rp (mm)	270.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	270.12
NR (mm)	0.00	83.20	135.58	161.70	167.58	200.01	191.16	134.36	103.94	130.29	102.56	74.51	1485

Fuente: elaboración propia

11.1.13 Modelamiento para estimación a inundaciones

Descripción del modelo

Figura. 44 Modelo de elevación digital, cuenca de los ríos Sis-Icán. Elaborado en ArcMap 10.8



Fuente: elaboración propia

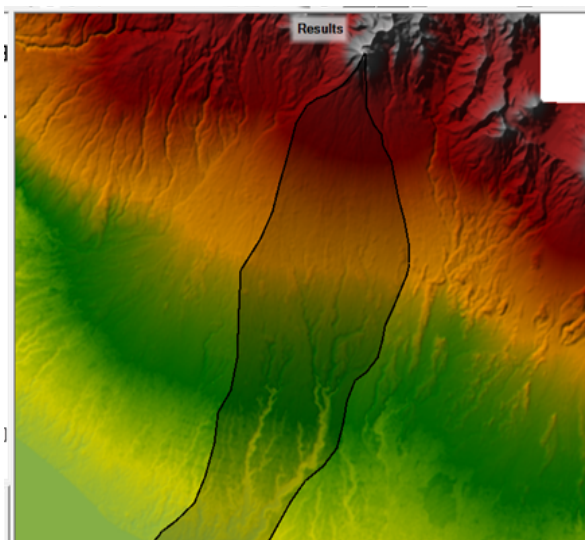
Figura. 45 *Apreciación del modelo de la cuenca con curvas a nivel a cada 10 metros.*



Fuente: elaboración propia

Desarrollo de cálculos hidráulicos

Figura. 46 Proyección del MED en RAS-Mapper, edición.

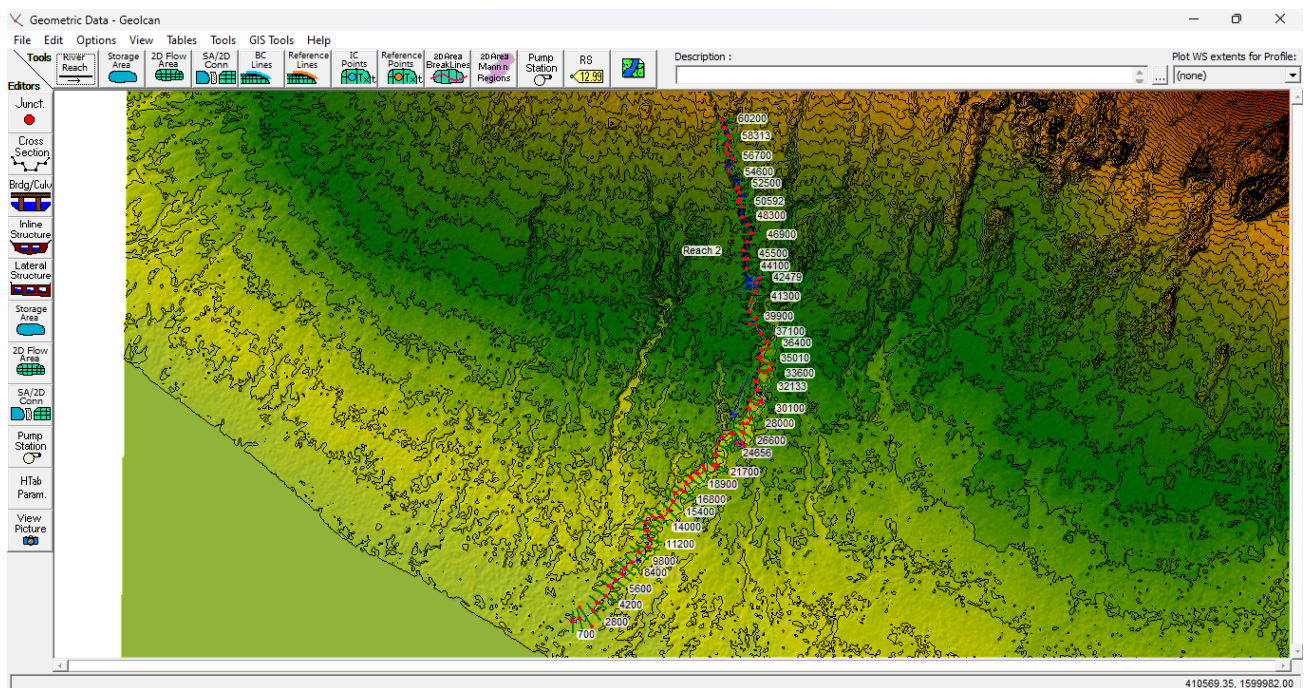


Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Fuente: elaboración propia

Figura. 47 Proyección geométrica, segmento río Icán. RAS-Mapper, edición.

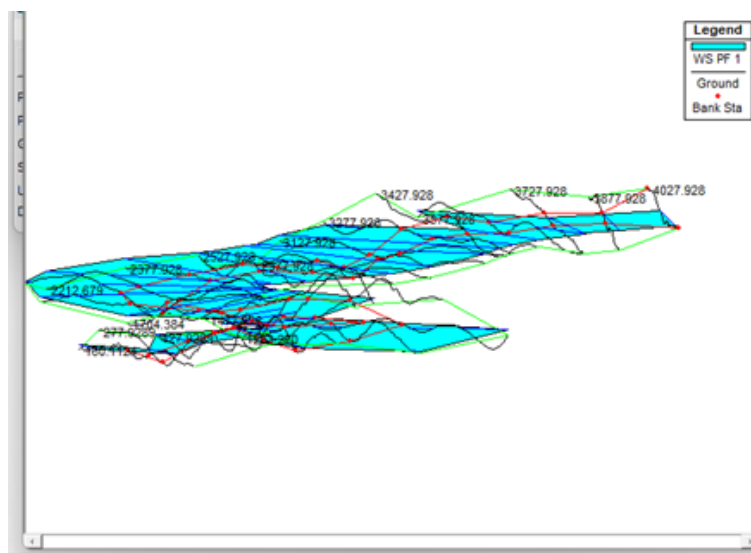


Fuente: elaboración propia

A partir de la generación de los datos geométricos con el complemento RAS-Mapper y el modelamiento a inundaciones en HEC-RAS 6.3.1, se ha obtenido un proyecto con los datos geométricos resultantes, introduciendo las condiciones del entorno y datos de caudal (ver discusión de resultados).

Al importar los datos geométricos a HEC-RAS se ha podido visualizar la perspectiva x, y, z de los ríos Sis-Icán:

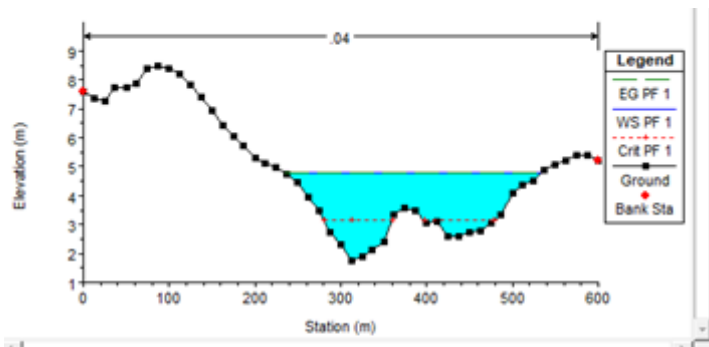
Figura. 48 Perspectiva x,y,z, segmento de la unión de los ríos Sis-Icán o Estero el Tulate con el programa HEC RAS.



Fuente: elaboración propia

Así mismo, se observan cada una de las secciones transversales generadas:

Figura. 49 Ejemplo de una visualización de perfil de las secciones generadas con HEC-RAS

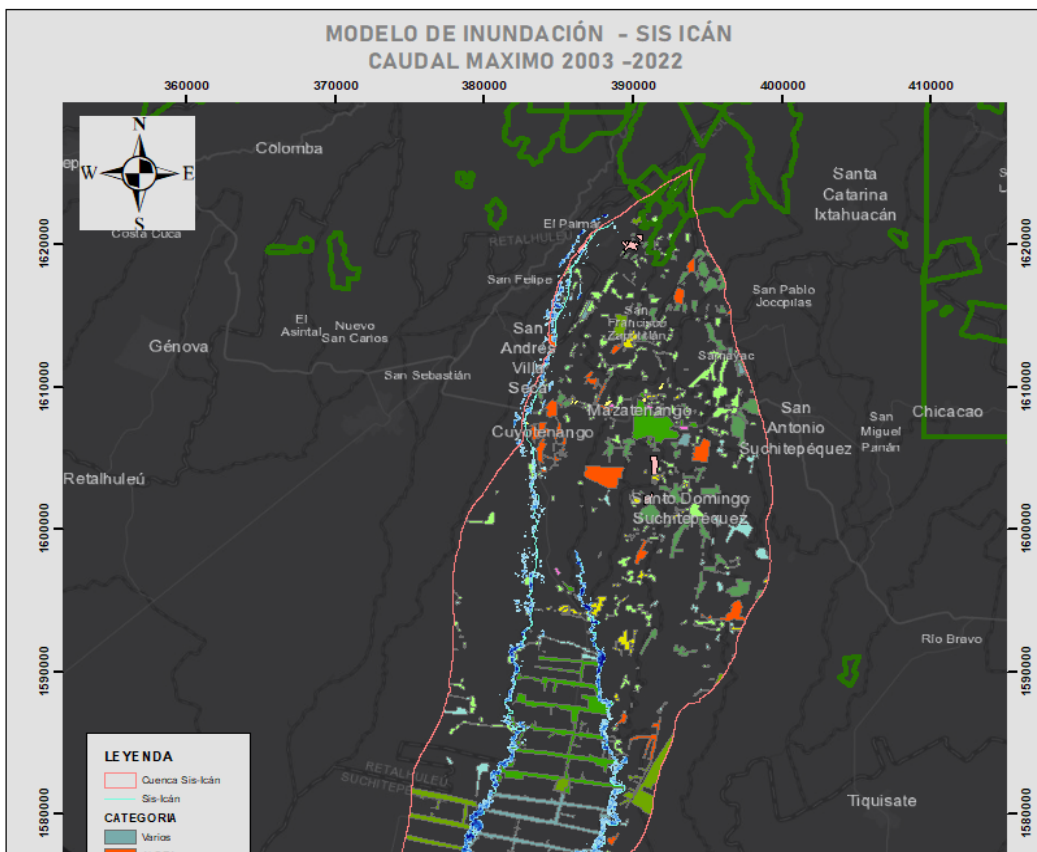


Fuente: elaboración propia

Proyección de resultados.

- 1) Modelo obtenido con caudal máximo temporalidad 2003-2022, comunidades y predios identificados en área de influencia directa:

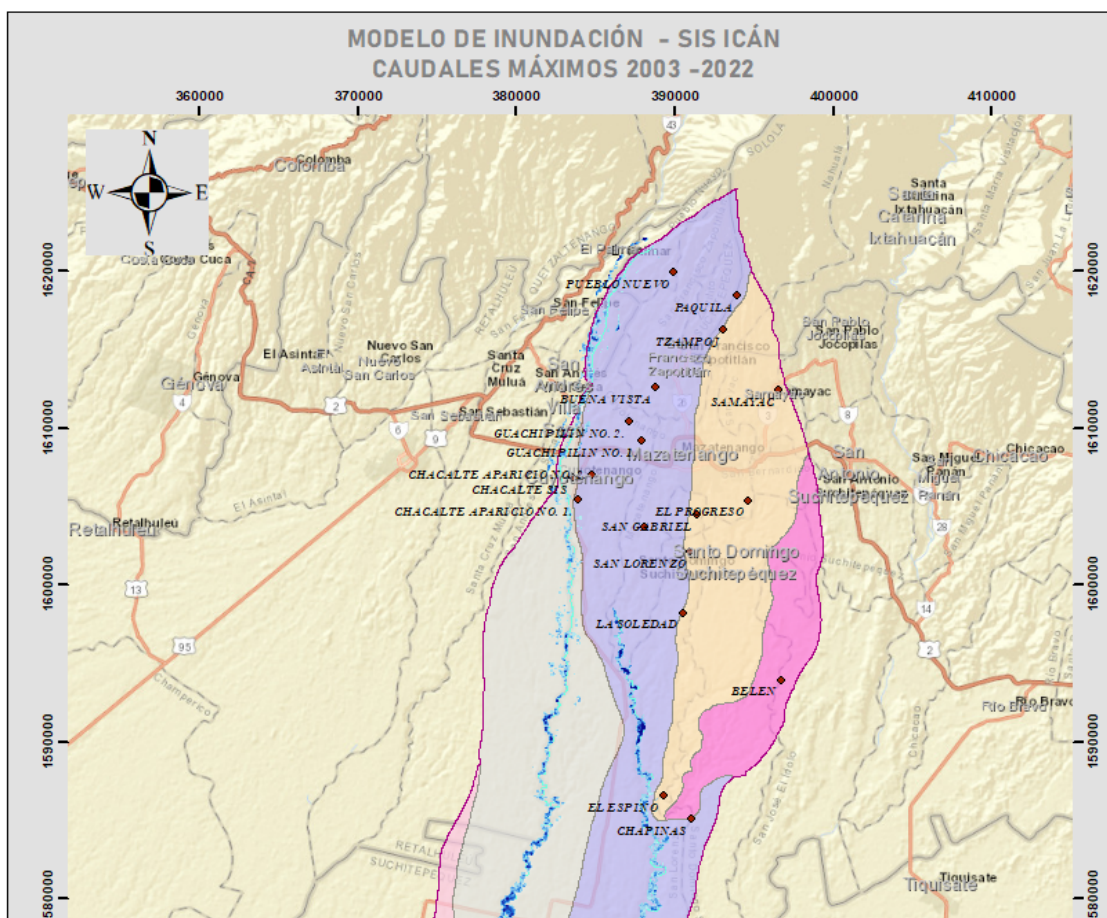
Figura. 50 Modelo de inundación Sis-Icán con caudal máximo del periodo 2003-2022, comunidades y predios en área de influencia directa.



Fuente: elaboración propia.

2) Modelo obtenido con caudal máximo temporalidad 2003-2022, subcuencas:

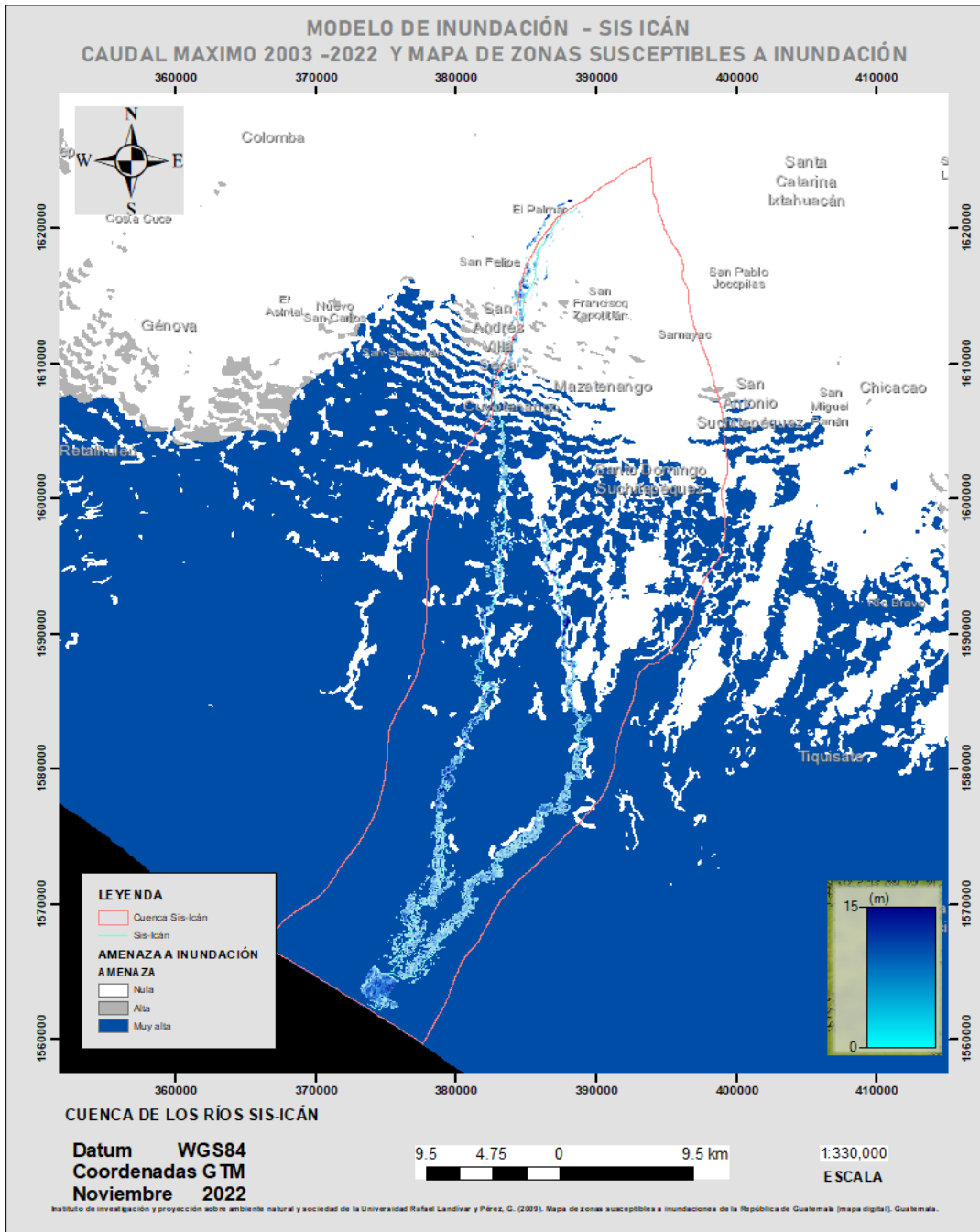
Figura. 51 Modelo obtenido con caudal máximo temporalidad 2003-2022, subcuencas.



Fuente: elaboración propia.

- 3) Modelo obtenido con caudal máximo temporalidad 2003-2022 y zonificación de áreas susceptibles a inundación:

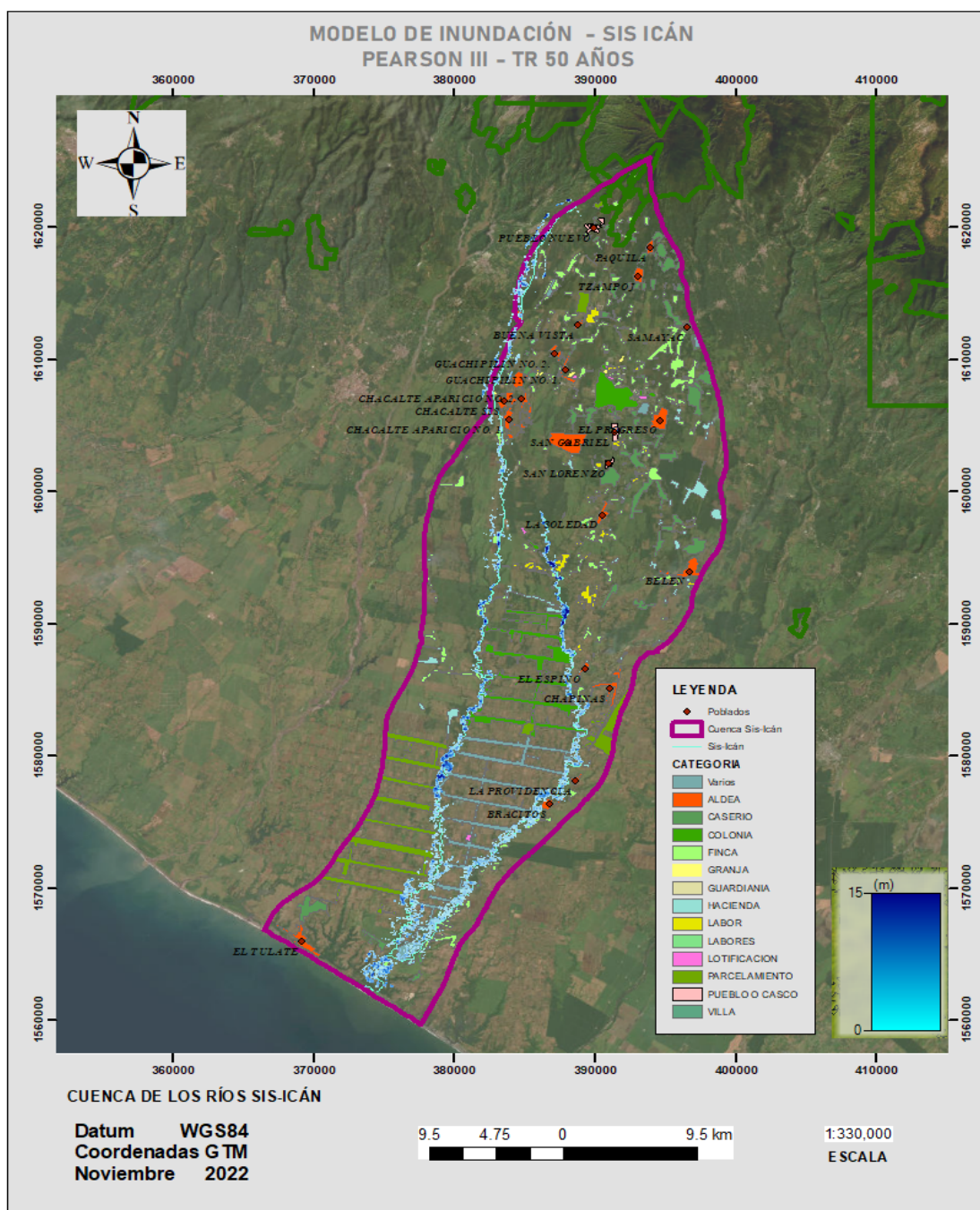
Figura. 52 Modelo obtenido con caudal máximo temporalidad 2003-2022 y zonificación de áreas susceptibles a inundación.



Fuente: elaboración propia & IARNA y Pérez, G. (2009)

- 4) Modelo obtenido con Pearson III. Tasa de retorno de 50 años, comunidades y predios identificados en área de influencia directa:

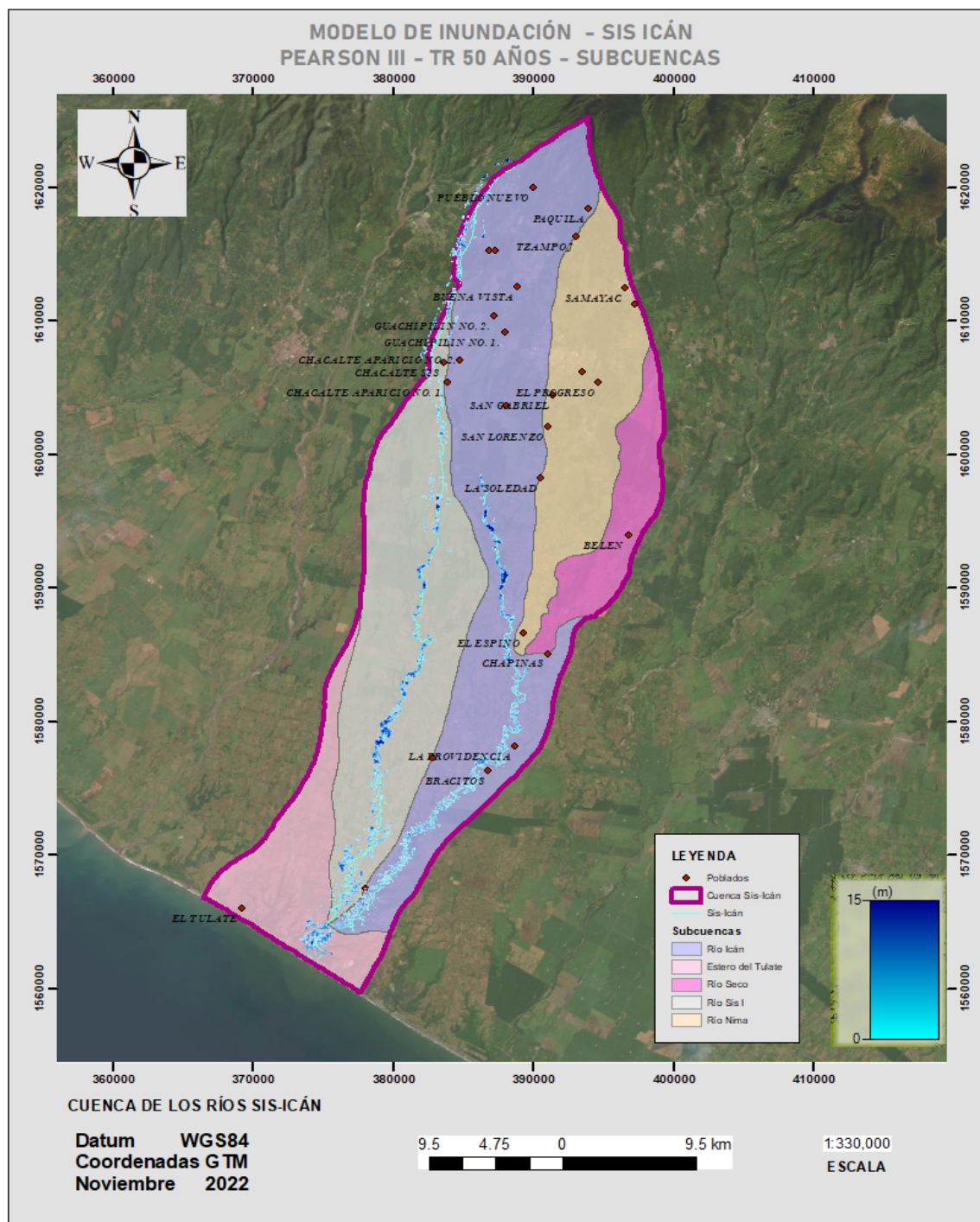
Figura. 53 Modelo obtenido con Pearson III. Tasa de retorno de 50 años, comunidades y predios identificados en área de influencia directa



Fuente: elaboración propia.

5) Modelo obtenido con Pearson III. Tasa de retorno de 50 años, subcuencas:

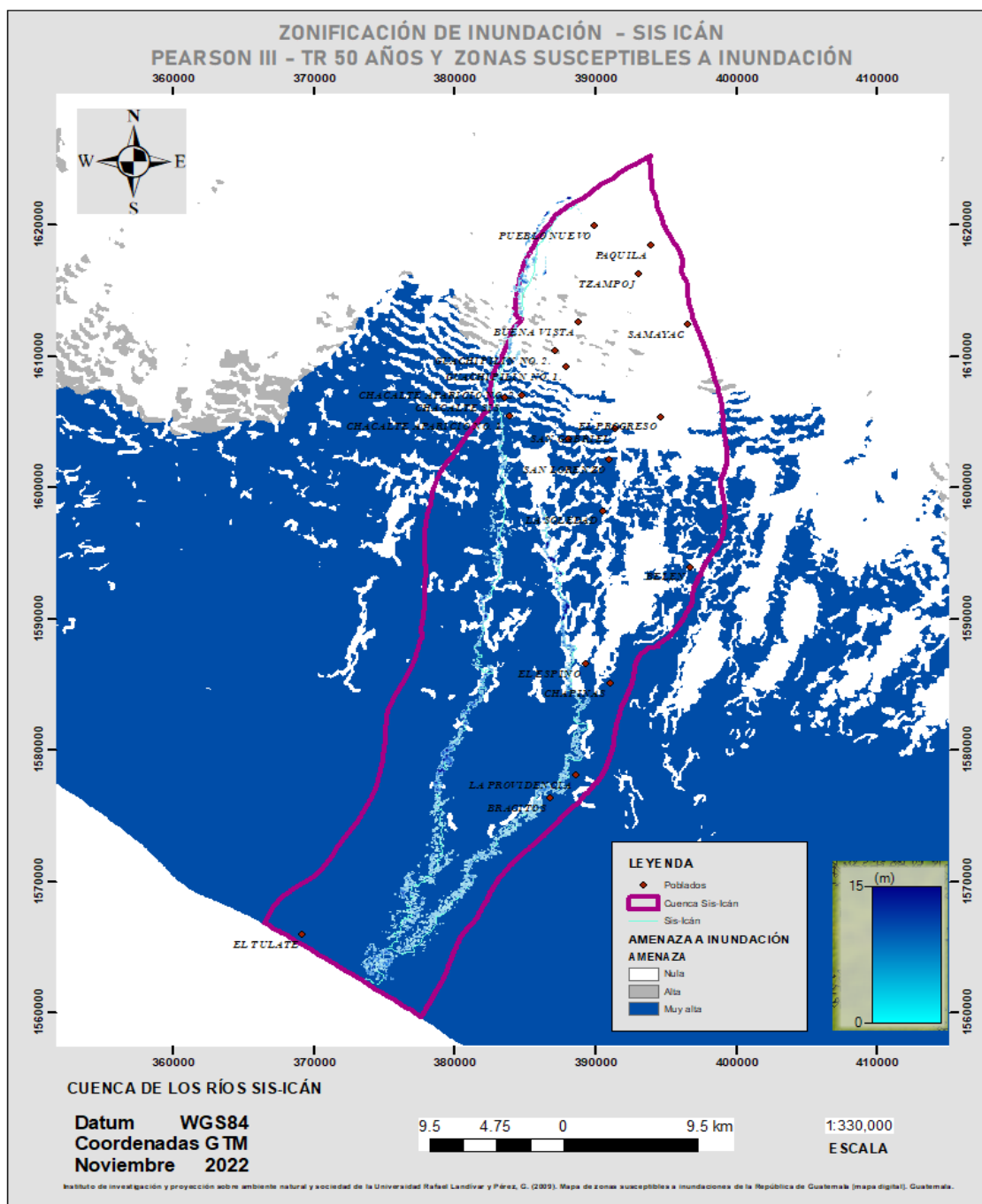
Figura. 54 Modelo obtenido con Pearson III. Tasa de retorno de 50 años, subcuencas.



Fuente: elaboración propia.

- 6) Modelo obtenido con Pearson III. Tasa de retorno de 50 años zonificación de áreas susceptibles a inundación:

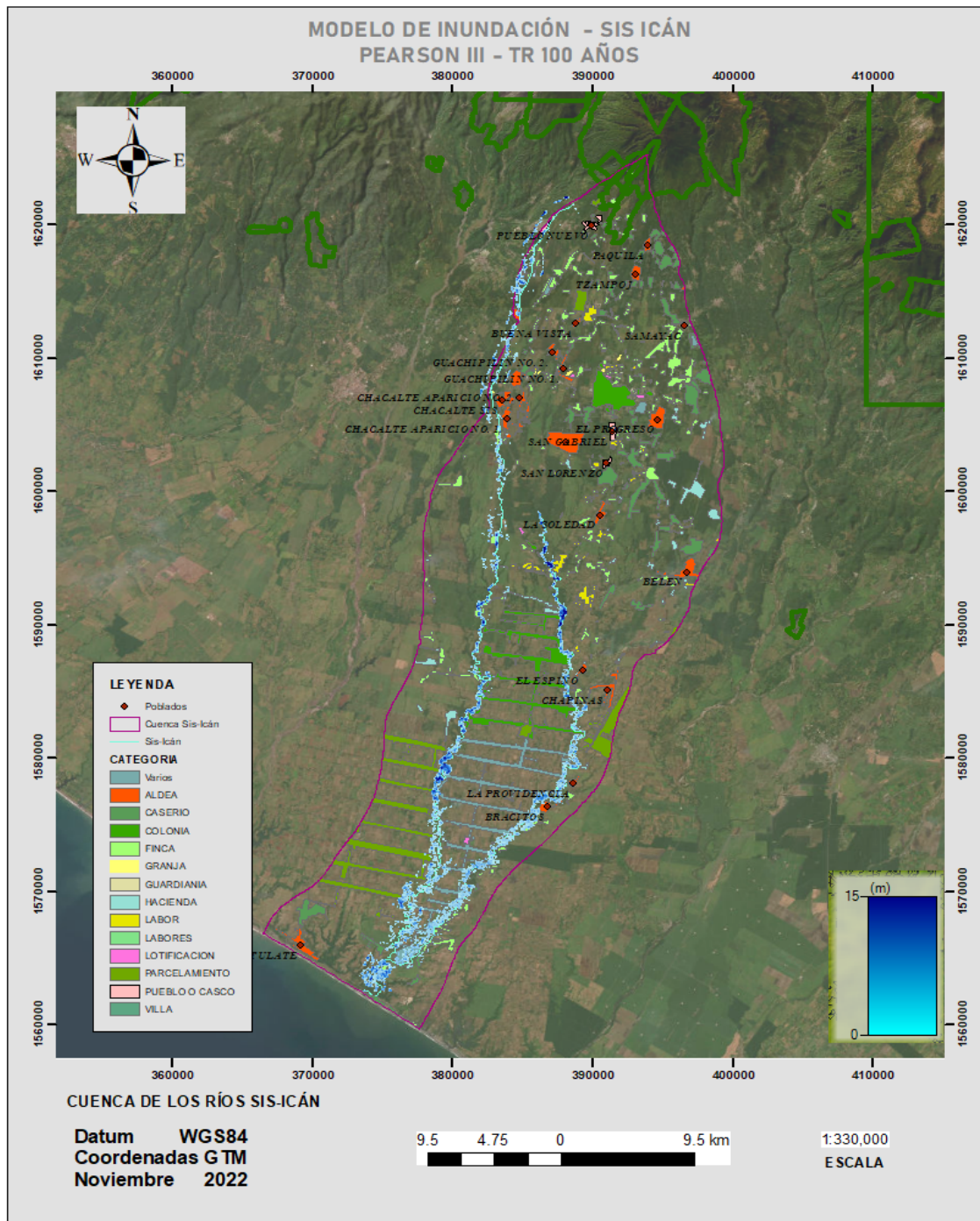
Figura. 55 Modelo obtenido con Pearson III. Tasa de retorno de 50 años zonificación de áreas susceptibles a inundación.



Fuente: elaboración propia & IARNA y Pérez, G. (2009)

7) Modelo obtenido con Pearson III. Tasa de retorno de 100 años, comunidades y predios

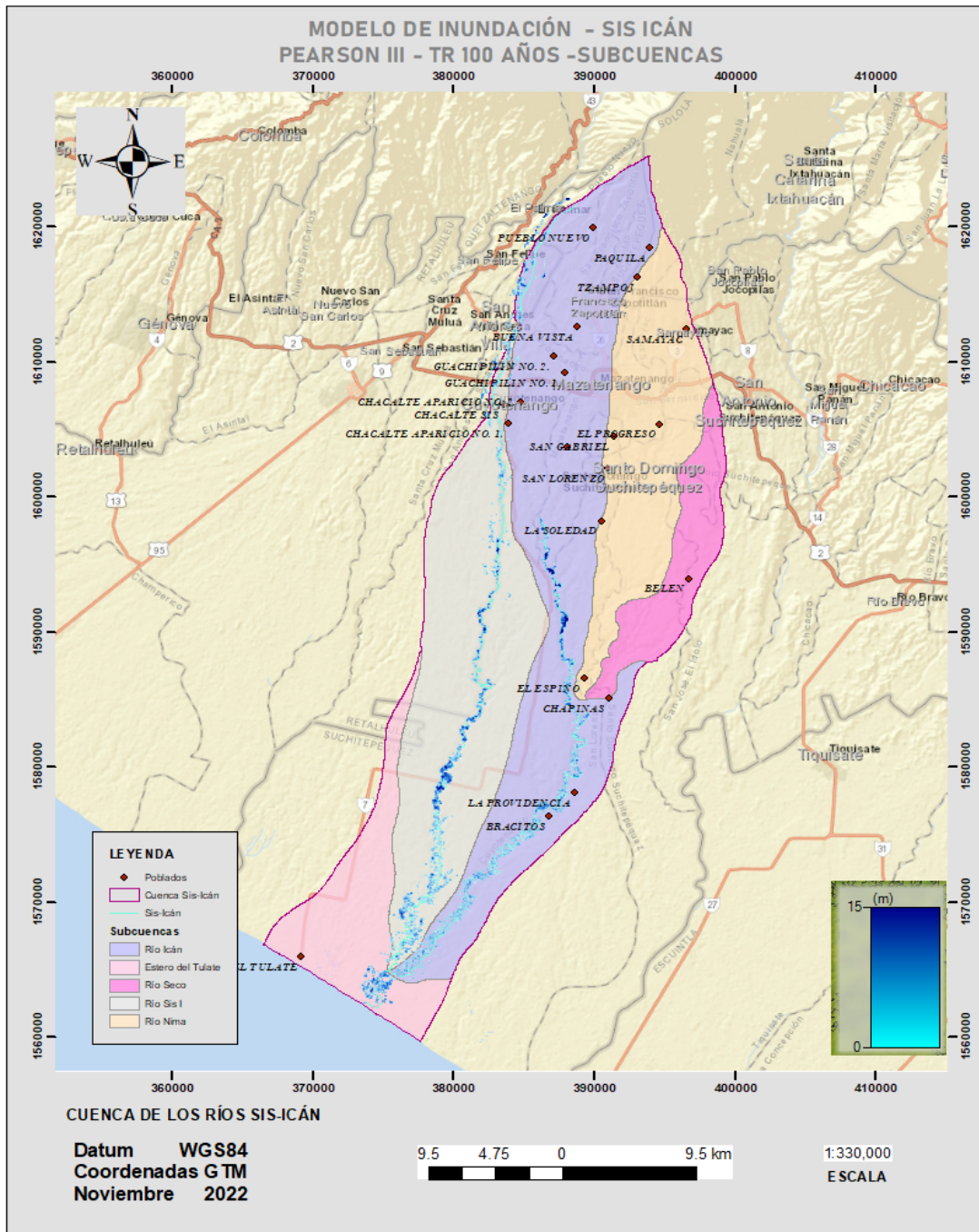
Figura. 56 Modelo obtenido con Pearson III. Tasa de retorno de 100 años, comunidades y predios identificados en área de influencia directa



Fuente: elaboración propia

. 8) Modelo obtenido con Pearson III. Tasa de retorno de 100 años Subcuencas

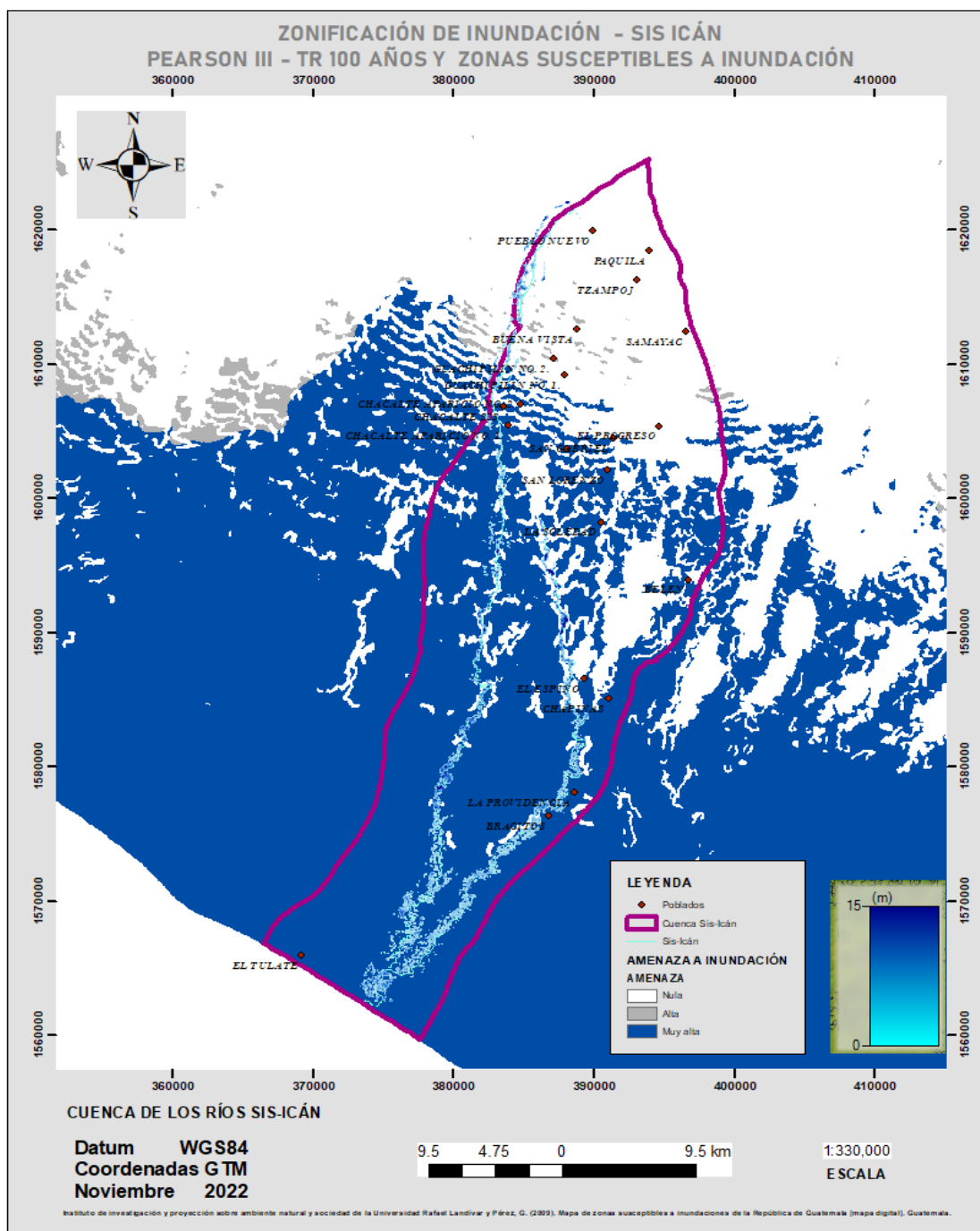
Figura. 57 Modelo obtenido con Pearson III. Tasa de retorno de 100 años, subcuencas.



Fuente: elaboración propia

- 8) Modelo obtenido con Pearson III. Tasa de retorno de 100 años zonificación de áreas susceptibles a inundación:

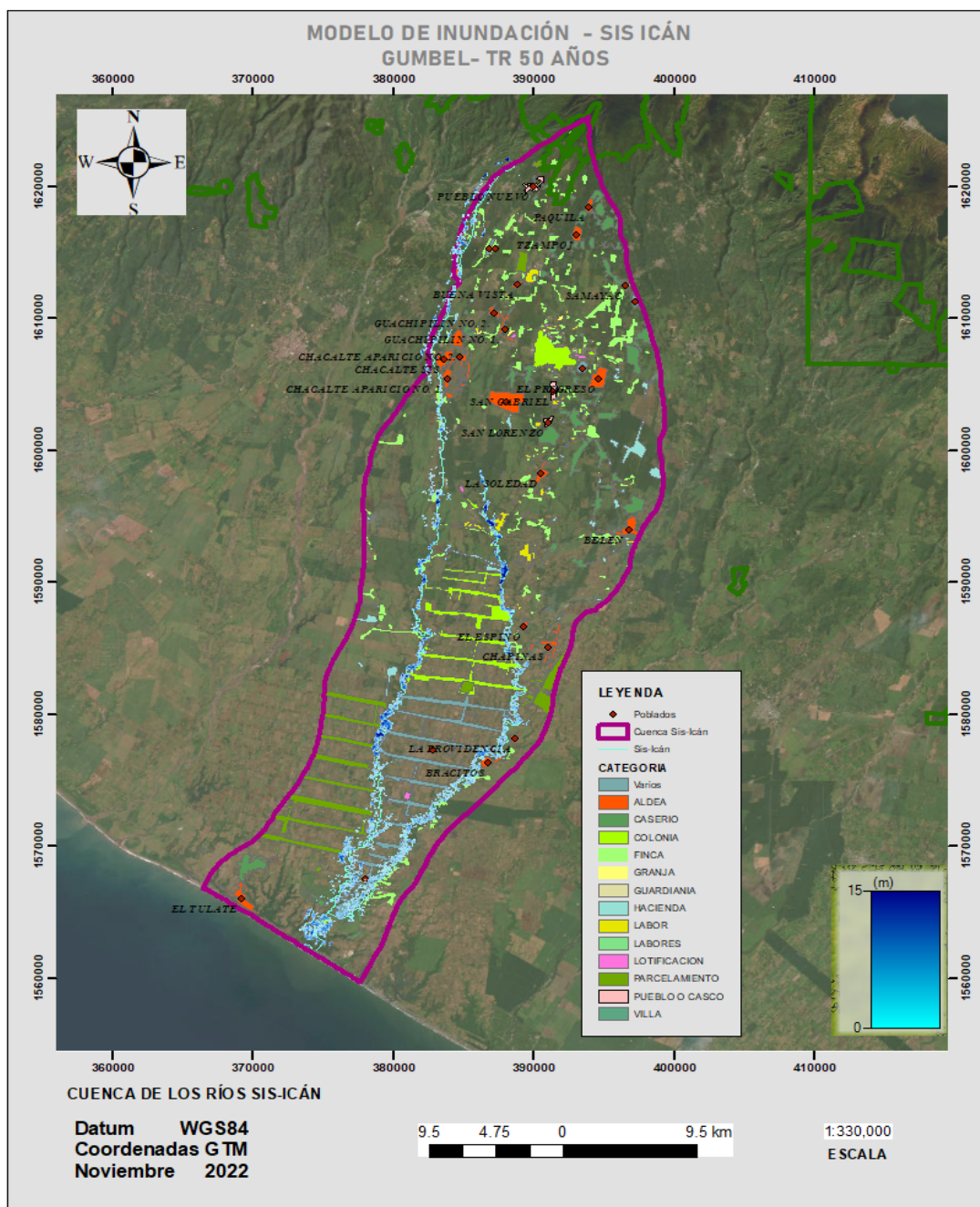
Figura. 58 Modelo obtenido con Pearson III. Tasa de retorno de 100 años zonificación de áreas susceptibles a inundación.



Fuente: elaboración propia & IARNA y Pérez, G. (2009).

9) Modelo obtenido con Gumbel. Tasa de retorno de 50 años, comunidades y predios identificados en área de influencia directa:

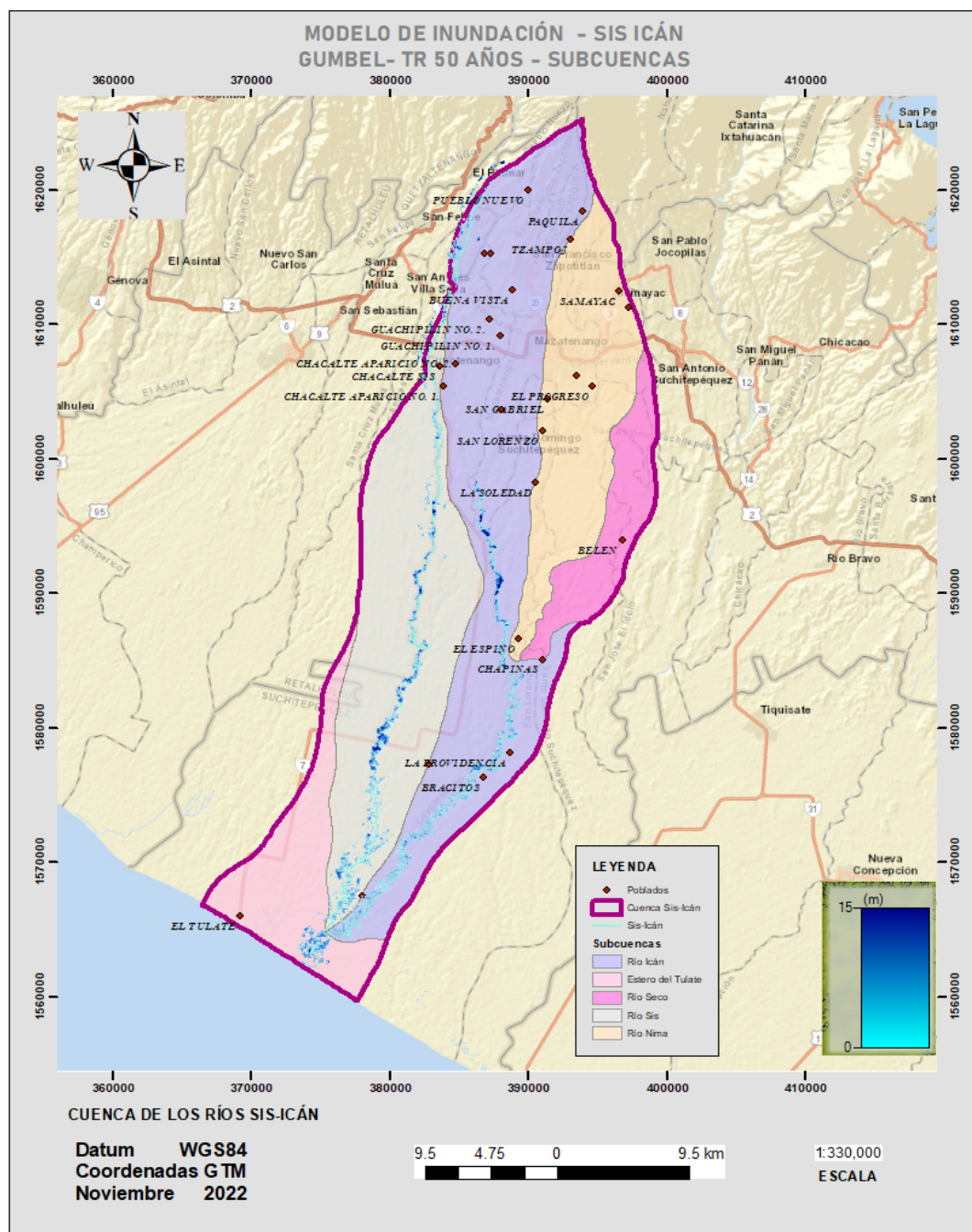
Figura. 59 Modelo obtenido con Gumbel. Tasa de retorno de 50 años, comunidades y predios identificados en área de influencia directa.



Fuente: elaboración propia

10) Modelo obtenido con Gumbel. Tasa de retorno de 50 años, subcuencas :

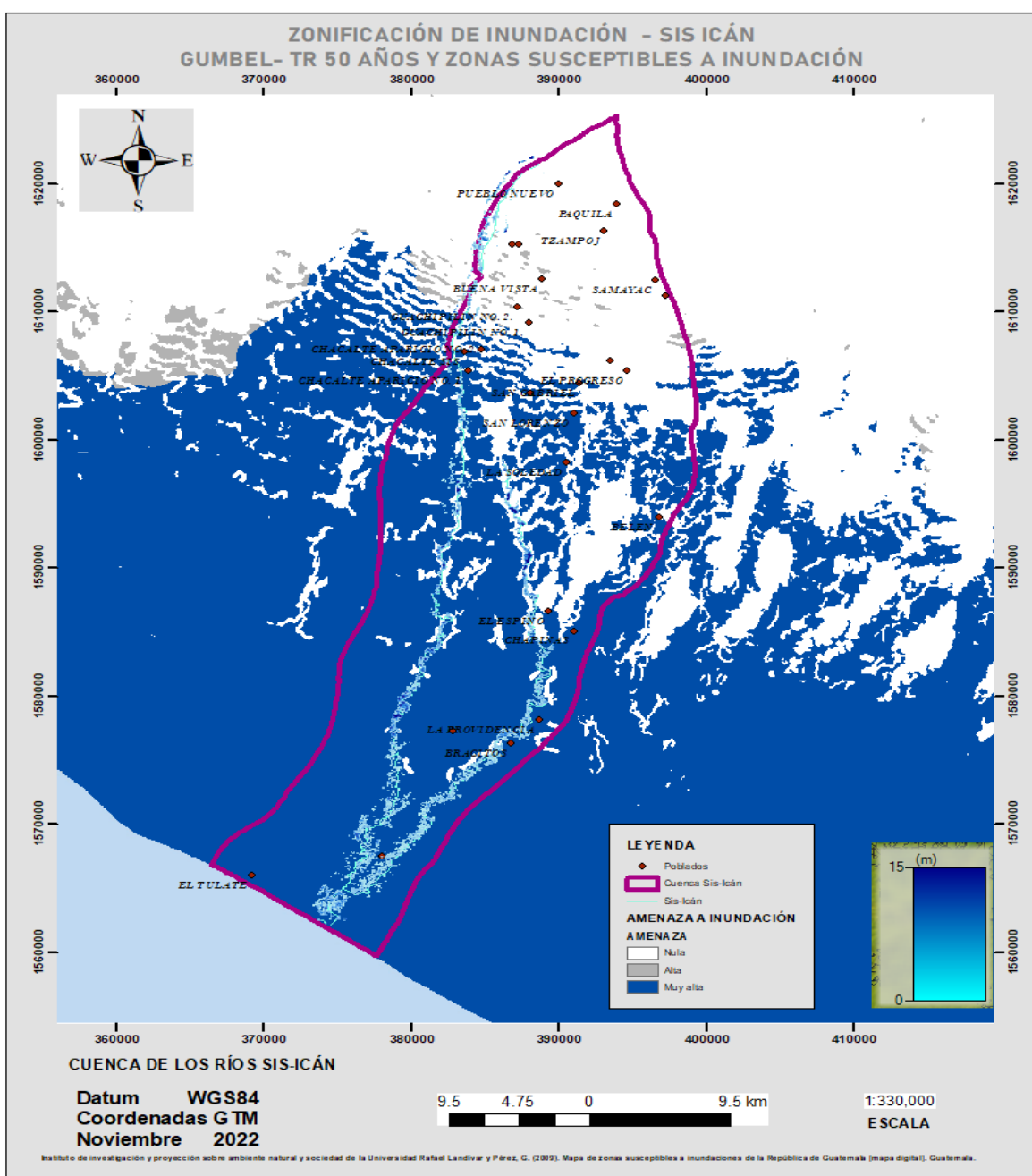
Figura. 60 Modelo obtenido con Gumbel. Tasa de retorno de 50 años, subcuencas :



Fuente: elaboración propia

11) Modelo obtenido con Gumbel. Tasa de retorno de 50 años zonificación de áreas susceptibles a inundación:

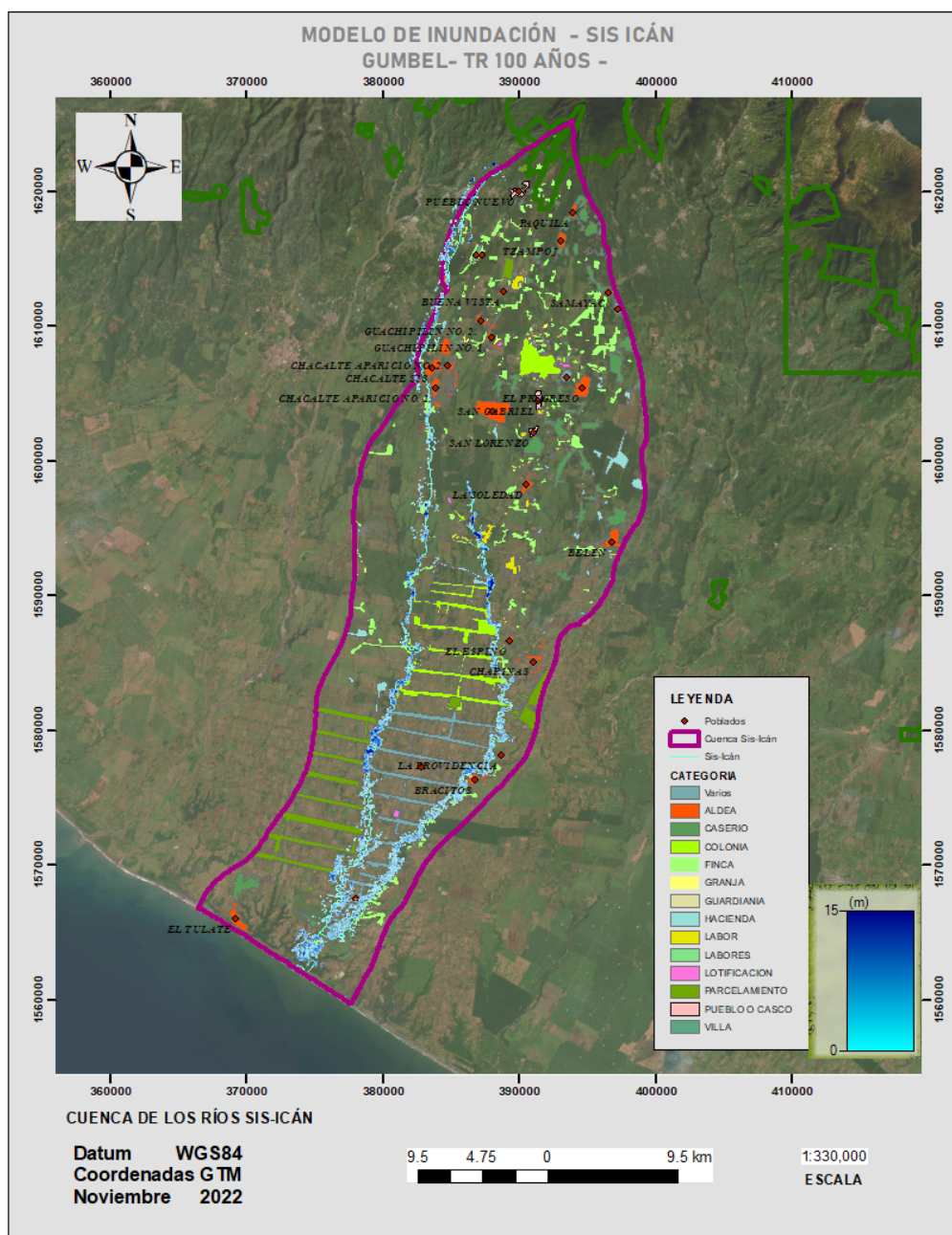
Figura. 61 Modelo obtenido con Gumbel. Tasa de retorno de 50 años zonificación de áreas susceptibles a inundación



Fuente: elaboración propia & IARNA y Pérez, G. (2009).

12) Modelo obtenido con Gumbel. Tasa de retorno de 100 años, comunidades y predios identificados en área de influencia directa:

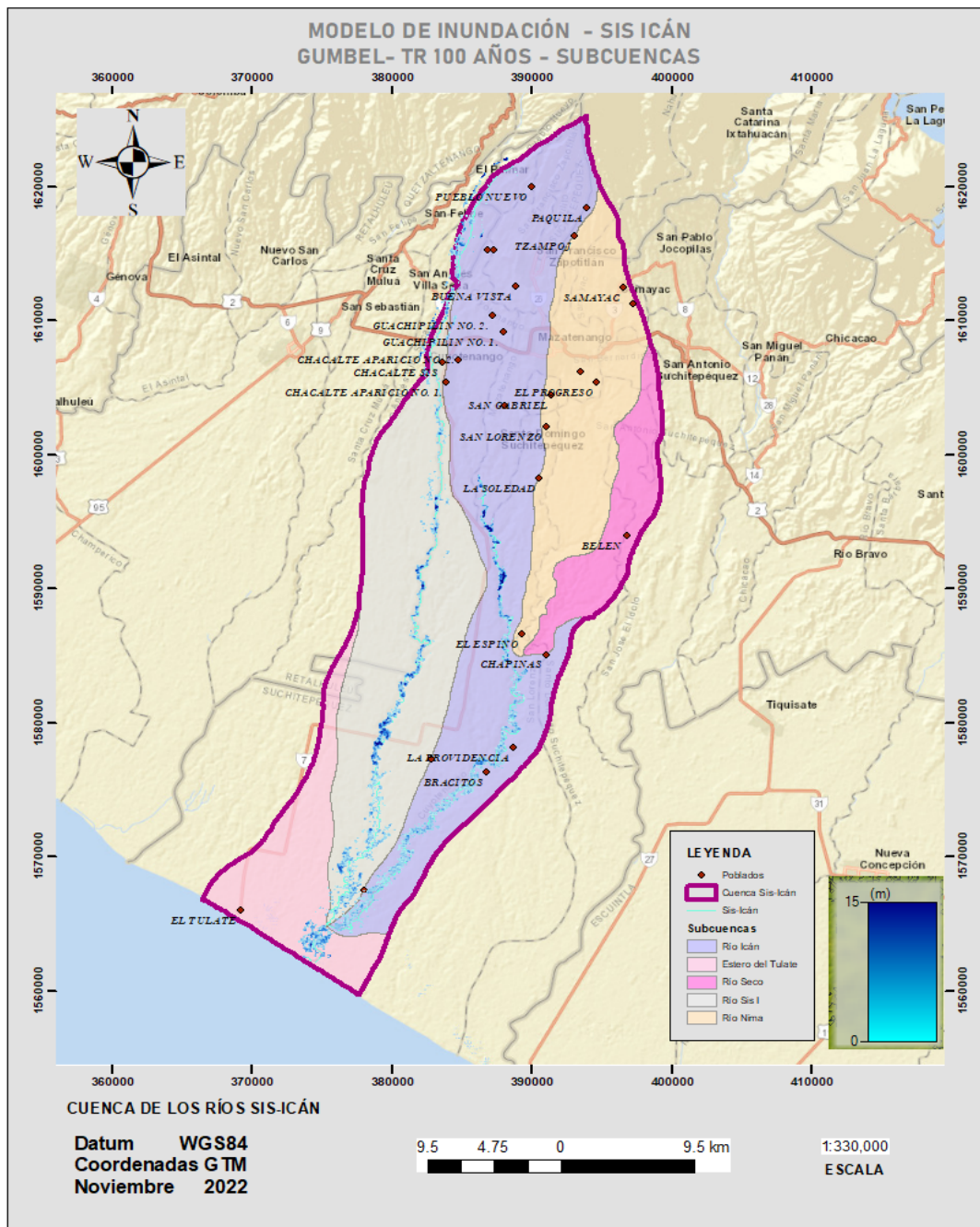
Figura. 62 Modelo obtenido con Gumbel. Tasa de retorno de 100 años, comunidades y predios identificados en área de influencia directa.



Fuente: elaboración propia

13) Modelo obtenido con Gumbel. Tasa de retorno de 100 años, subcuencas :

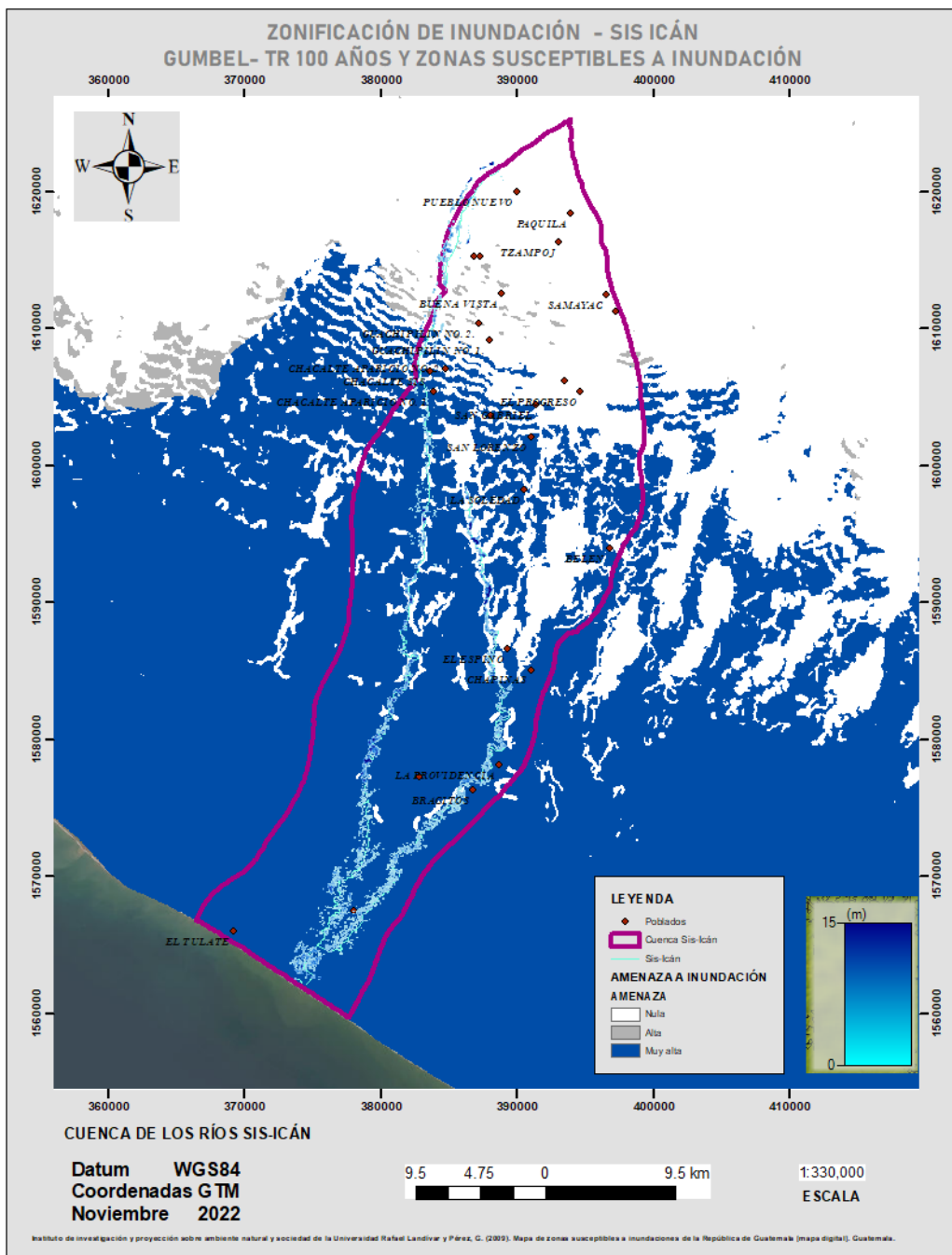
Figura. 63 Modelo obtenido con Gumbel. Tasa de retorno de 100 años, subcuencas.



Fuente: elaboración propia

14) Modelo obtenido con Gumbel. Tasa de retorno de 100 años zonificación de áreas susceptibles a inundación:

Figura. 64 Modelo obtenido con Gumbel. Tasa de retorno de 100 años zonificación de áreas susceptibles a inundación.



Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Fuente: elaboración propia & IARNA y Pérez, G. (2009).

Puntos en alta amenaza de inundación

A partir de la revisión y análisis de imagen satelital en conjunto con los resultados preliminares, se plasman en el siguiente los puntos con mayor amenaza a inundación en la cuenca:

Cuadro 42 Puntos críticos con amenaza a inundaciones

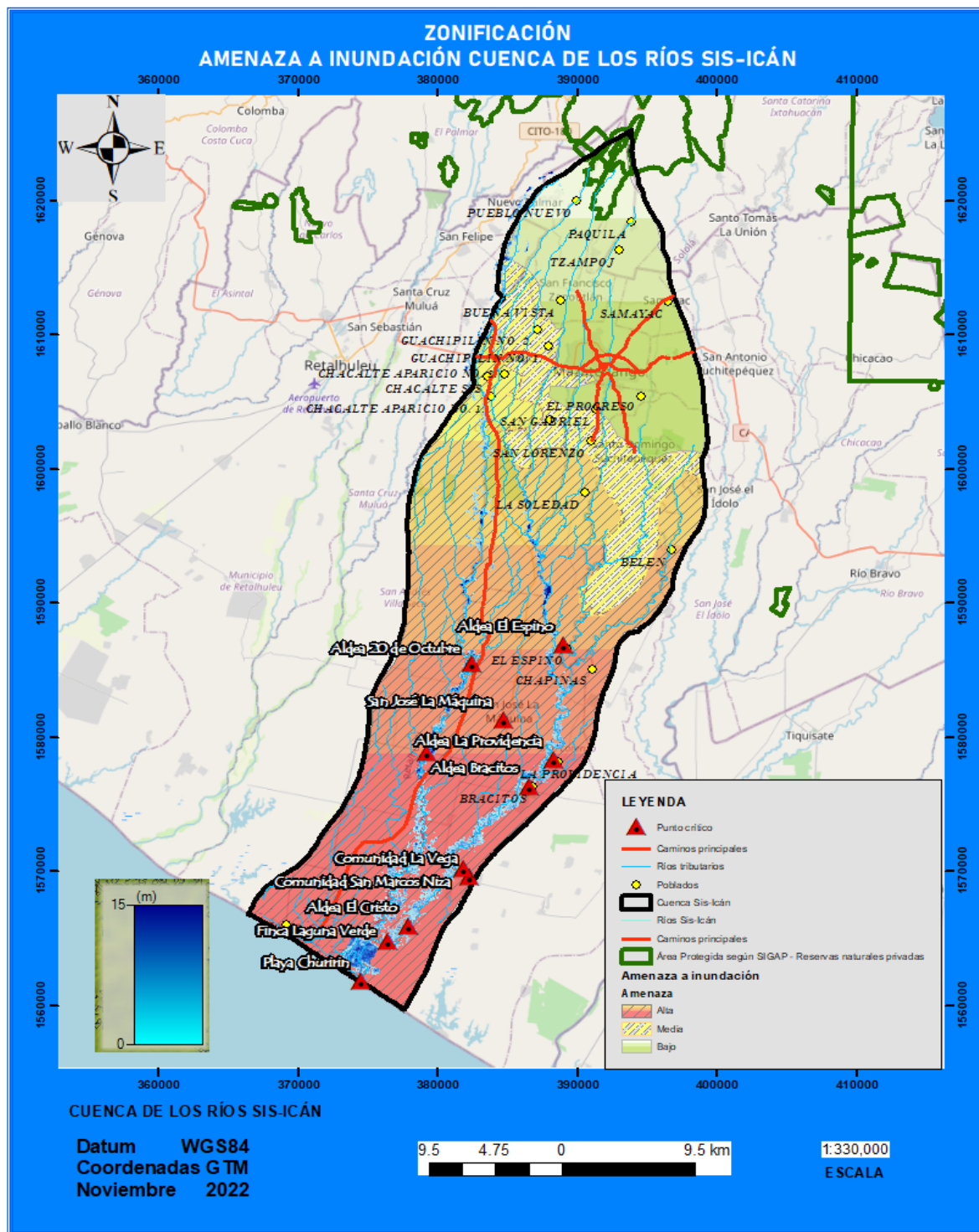
Punto en alta amenaza dentro de la Cuenca de los Ríos Sis-Icán.	Nombre	Coordenadas geográficas	Río
Aldea	Aldea El Cristo	14.1583380, -91.6310309	Icán
Finca	Finca Laguna Verde	14.148107, -91.645178	Icán
Playa	Churirín	14.1208915, -91.66282529	Etero tulate o unión ríos Sis-Icán
Aldea	Bracitos	14.253162, -91.551325	Icán
Centro comunitario	Comunidad San Marcos Niza	14.197594, -91.595165.	Icán
Aldea	Comunidad La vega	14.191930, -91.591067	Icán
Aldea	La Providencia	14.270796, -91.535482	Icán
Aldea	El Espino	14.348862, -91.528893	Icán
Garita Municipal y conjunto de casas	Garita Municipal y conjunto de casas de San Andrés villaseca	14.2758203, -91.619876	Sis
Aldea	Aldea 20 de Octubre	14.3353172, -91.5902713	Sis
Municipio	San José La Máquina	14.298012, -91.569135	Sis

Fuente: elaboración propia

Zonificación

A partir de los resultados obtenidos preliminarmente, se ha generado el mapa de zonificación de zonas con amenaza a inundación, donde se identifican los puntos críticos dentro de la cuenca. En la discusión de resultados se profundiza a detalle los criterios para la delimitación que se presenta a continuación:

Figura. 65 Zonificación final de áreas con amenaza de inundación.



Fuente: elaboración propia

Discusión de resultados

11.1.14 Aspectos biofísicos de la cuenca

Pendientes

En la cuenca de los ríos Sis-Icán, se consideró importante el conocimiento de las características del relieve, en particular el cálculo de las pendientes para poder elaborar en detalle una representación visible de este elemento. Para lograrlo, se utilizaron como referencia las curvas a nivel que abarcan la cuenca desde su punto más alto hasta su desembocadura final. La elevación máxima de la cuenca es de aproximadamente 2400 metros sobre el nivel del mar, mientras que su punto de salida al mar se encuentra a nivel del mar (0 msnm)..

Después de calcular las pendientes en la cuenca de los ríos Sis-Icán, se observaron tres rangos importantes de clasificación del relieve: 25-50%, 12-25% y 0-12%. El primer rango, correspondiente a pendientes del 25% al 50%, es característico de la parte más alta de la cuenca, donde nace el río. Estas pendientes son irregulares y pertenecen a la ladera del Volcán Santo Tomás al norte. Esta área cubre una superficie mínima de 4.48 kilómetros cuadrados, lo que equivale al 0.48% del área total de estudio.

Seguido a esto el relieve decrece en la irregularidad del terreno, siendo esta una porción de terreno moderadamente escarpada dentro de el intervalo de 12 a 25% de pendiente, esto significa el pie de ladera del Volcán, y equivale a una superficie de 26.57 Km², clasificado en un 2.86% de la totalidad del área. Las pendientes altas y moderadas no tienen una significancia relevante dentro de la zona de estudio.

Ahora bien, en un 0-12% de pendiente, que tiene una superficie de cobertura de aproximadamente del 96.66% de la totalidad del área, se considera como la representación de relieve de la cuenca, en la que puede considerarse una zona plana y con muy pocas elevaciones de consideración que intervengan en la fisiografía. Estas cifras detallan un 898.84 Km².

Subcuencas en la cuenca de los ríos Sis-Icán

En la clasificación de subcuencas se detallan cuatro importantes, como lo son el río Icán, río Sis, Río Nimá y Río Seco, tomando en cuanto a su vez el terreno compositivo del estero de El Tulate, en la parte Sur de la cuenca.

Se ha identificado que en la parte Nor-Este de la cuenca de los ríos Sis-Icán, se encuentra la subcuenca del río Seco, que se sitúa con una fluidez única de corriente de permanencia, y significa un área de captación de 65.69 Km², equivalente a un 7.06% de la cuenca. La misma tiene un punto de aforo, que es compartido por la subcuenca del río Nimá, siendo su conformación de dos ríos permanentes importantes, como el río Nimá I y II, la cual, expresa un área de 154.89 Km², y una relación de 16.66% de intervención de la zona.

Se observó que ambas subcuencas influyen y aportan dicho flujo a la subcuenca del río Icán, que tiene su origen en la parte Norte, desde las faldas del Volcán Santo Tomás, y donde es la parte más alta de la corriente principal de la cuenca. Esta subcuenca atraviesa municipios en su punto más elevado de Pueblo Nuevo, Cuyotenango y San José La Máquina. Esta subcuenca tiene una extensión superficial de 356.80 Km², proporcional al 38.37% de la cuenca. Dicha subcuenca tiene la mayor cobertura dentro del sitio de estudio.

Se pudo constatar que esta última tiene un trayecto de parta alta hasta baja del sitio, uniéndose en su punto de aforo con la subcuenca del río Sis, cuyo origen se establece en la parte Oeste de la delimitación de la zona, y atraviesa los municipios de Cuyotenango, Mazatenango hasta San José La Máquina. Dicho punto de aforo conforma fluvialmente la cuenca hasta su desembocadura. El área correspondiente a esta subcuenca es de 252.82 Km², relacionado al 27.19%, de la totalidad del área.

Como resultado del análisis de subcuencas de la cuenca de los ríos Sis-Icán, se debe considerar el sistema de esteros que se encuentra en el límite del Océano Pacífico. Este sistema está formado por

pantanos y corrientes de agua que se originan por la licuefacción del área, lo que es característico en las zonas planas cercanas al litoral y se relaciona fisiográficamente con los deltas locales. Durante el invierno, este sistema se alimenta principalmente del zanjón La Piedra y suele permanecer hasta el inicio del verano.

El área que representa este aporte hídrico es de 99.69 kilómetros cuadrados, lo que equivale al 10.72% del territorio.

Geología

La geología presente en el lugar tiene una característica volcánica y de deposición, la cual se describe en el transcurso del relieve de la cuenca. Este tipo de variables altitudinales, especifica el dinamismo de formación geológica en algunos estratos importantes, y que juegan un papel muy importante en el ciclo de las rocas y de la diagénesis. En la parte Norte de la zona de estudio, refiere a materiales producto de lavas, que, en años anteriores, estas tuvieron un origen de foco eruptivo local, como el Volcán Santo Tomás, esto tiene particularidades de densidad, consolidación y su período formativo, la cual es Terciario. Las rocas que pertenecen a este grupo son las Andesitas y Basaltos (Tv).

En la transición de parte alta y parte media alta de cuenca, se ubican materiales combinados de tefra y roca piroclástica junto con contactos de roca formada por lava, en su mayoría, estas originadas en transición de secuencia de ladera, regularmente son de períodos cuaternarios (Qv), y a más detalle, se puede observar pequeñas intrusiones magmáticas. Estos materiales están presentes en un 15.47% de la totalidad.

La representación de la cuenca son los materiales aluviales (Qa), de formaciones recientes y cuaternarias, y son característicos de las cuencas que tienen su desembocadura al océano pacífico. La explicación de este tipo de materiales es su formación fuertemente influenciada por su relieve y pendiente, que considera su paso desde la parte alta hasta áreas planas, que tienen la función

receptora de materiales, considerándose dos tipos de metamorfismo tanto regional como local, dando como producto sedimentos volcánicos.

La vía de transporte es colectiva, de tipo aerohidrodinámico, que relaciona los movimientos de viento desde la zona del pacífico al Norte en Cadena volcánica, y, por otro lado, su transporte fluvial en los cauces presentes de la cuenca, donde aunado esto involucra su gradiente hidráulico. Estos aluviones tienen presencia superficial en el 81.93% de la cuenca, equivalente a 761.90 Km² de superficie.

Geomorfología

Se ha determinado que la geomorfología de la cuenca de los ríos Sis-Icán, están fuertemente vinculados a los análisis de pendiente, altitud, curvas a nivel, geología y fisiografía, dando como resultado diferentes tipos de unidades geomorfológicas presentes en el área. Dicho desarrollo de la temática, también aporta diferentes puntos de vista, y base científica, para el comportamiento hídrico de la zona, que puede exponer zonas inundables en relación fluvial. Dentro de la influencia del área de estudio, se encuentran clasificados unidades geomorfológicas como Abanicos aluviales, Llanuras aluviales, Picos volcánicos, Rellenos volcánicos, Superficies planas por sedimentos fluviales y Zonas marismas del litoral pacífico.

Este análisis conlleva que en la parte Norte, siendo de terreno irregular, su material geológico formativo, y su fisiografía perteneciente a ladera del Volcán Santo Tomás, se clasifica en Pico volcánico. Derivado de esta zona de transición y de cambio en pendiente local, estas forman en las faldas de dichas laderas, un relleno volcánico de tipo cuaternario, que alterna con materiales piroclásticos, en una zona no tan irregular, asentando roca y estratos superficiales recientes, producto de la remanencia de actividades volcánicas. El área que representa esta parte Norte de la cuenca es de 167.38 Km².

Como se ha mencionado en anteriores abordajes del análisis de cuenca, la característica primordial de la misma, es su terreno plano y sus materiales aluviales, de las cuales conforman relieves de deposición local, traducidos a superficies planas por sedimentos volcánicos. Por otro lado, se observan abanicos que es la relación propia del aporte fluvial o de ríos, que son parte de los tipos de transporte hacia partes bajas. Y, por último, llanuras aluviales, que comprende el mismo origen fluvial, pero en condiciones mucho más planas y en influencia de una mayor presencia de corrientes, regularmente es indicativo de zonas de inundación. La geomorfología fluvial-aluvial, descrita anteriormente, corresponde al 78.63% de la cuenca.

Se ha verificado que las zonas marismas del litoral pacífico se relaciona mucho la influencia de las corrientes marítimas, así como también de las condiciones de viento local y oleaje, en combinación con lo aportado de los estuarios fluviales como parte final de desembocadura de la cuenca, y la interacción con el estuario específico. Estas zonas representan un área proporcional de 31.31 Km².

Suelos

De acuerdo a los análisis del factor de suelo dentro del área, esta se ha hecho en referencias anteriores como el estudio realizado por Simmons, Tarano y Pinto en el año 1959 para la república de Guatemala. Posicionando dicho estudio para la intervención del área a desarrollar, se ha clasificado 8 unidades de suelo, siendo abordadas en un conjunto de segmentos de cuenca a lo largo de sus transiciones. Dichas unidades corresponden a Arena de mar, Camanchá erosionada, Chocóla, Cuyotenango, Ixtán, Mazatenango, Samayac y Suchitepéquez.

Se determinó que en la parte Norte de la cuenca, existe una influencia volcánica formativa local, por lo que son características las unidades Camanchá erosionada, Chocóla, Samayac, y Suchitepéquez, estas tienen particularidades de génesis rocosa en lahares y ceniza volcánica, presentes en sitios con fuerte o moderado escarpe, con textura superficial de franca limosa, buen drenaje, color café muy oscuro, granulometría de tamaño medio y con erodabilidad regular a alta. La extensión superficial de estas unidades representa 169.07 Km² de la cuenca.

En la parte media, se encuentran las unidades de suelo Mazatenango y Cuyotenango, donde sus características refieren a una deposición de materiales formativos cuaternarios, dependiente del dinamismo desde la parte Norte, conformándose en materiales volcánicos y ceniza volcánica pomácea, su textura superficial es franca-limosa, comúnmente observados en la declive del pacífico, con drenaje bueno a moderado, de color café grisáceo oscuro, granulometría de tamaño medio y con bajo riesgo a erosión. Esta área corresponde al equivalente del 21.84 % del área total de estudio.

En partes bajas se manifiesta una representación de unidad de suelo, correspondiente a la serie de suelos Ixtán, que ocupa el 60% relacionada a la totalidad de área de la cuenca, que equivale al cálculo de 556.35 Km², las propiedades físicas de este suelo se describen como materiales de deposición de grano fino, con textura superficial arcillosa, observables en lugares planos, con drenaje moderado, de color café muy oscuro, granulometría de tamaño muy fino y de erodabilidad baja. Esta unidad limita con arena de mar.

Usos de suelo

Cuando se refiere a usos de suelo, estas tienen la descripción de las actividades de desarrollo que son relacionadas a la influencia al área de análisis. En la cuenca de los ríos Sis-Icán particularmente es conocida por su alta actividad de producción agrícola, tanto en cultivos anuales como de ganadería. En la clasificación de detalles de usos, se desglosan la Agricultura anual, Bosque, Caña de Azúcar, Café, Hule, Palma africana, Pastos y Área urbana.

Se identificó que el cultivo de café y la presencia de bosque tanto natural como de plantación, es por aptitud de suelo, una de las cualidades de la parte Norte de la cuenca, ya que por irregularidades en su pendiente y condiciones de zona de vida, se considera correcta su producción, en estos sitios, que a su vez tiene la categorización de protección. Este tipo de uso tiene una extensión de 134.55 Km².

En la agricultura perenne, se encuentra principalmente asociado al cultivo de producción de hule, que es de vocación forestal, y la producción de aceite que se encuentra en plantaciones de palma africana, este tipo de actividad agrícola corresponde a una extensión de 107.04 Km².

En agricultura anual, corresponde a extensión de siembras de maíz, frijol y sobre todo caña de azúcar que es la actividad más recurrente dentro de la cuenca, al considerarse suelos con muchos aportes de minerales, potencializando así su fertilidad, para la implementación de dicha actividad. En relación a la totalidad de la cuenca estas equivalen a 51.72% cubriendo aproximadamente 480.92 Km².

El pastoreo o la ganadería, ocupan un campo total de 176.76 Km², estando presente a lo largo de la extensión de la cuenca. Y las zonas urbanas corresponde a un 3.32%, que principalmente se refiere a los cascos de asentamiento urbano municipal.

11.1.15 Análisis de la Morfometría de la cuenca de los ríos Sis-Icán

La pudo constatar que la cuenca tiene una ubicación a lo largo de los municipios de Pueblo Nuevo en la parte alta, a su paso por Mazatenango, Santo Domingo Suchitepéquez y San José La Máquina, todos pertenecientes al departamento de Suchitepéquez, la cual, constituye un sistema hídrico característico de la zona Sur del país. Esta se caracteriza por ser una cuenca exorreica, donde desemboca y tiene un trayecto transitorio de paso fluvial hacia el mar.

Se observa que el perímetro de la cuenca es de 156.49 kilómetros, presentando en su mayoría corrientes permanentes, que inician en el Norte de la cuenca (Norte a Sur), a faldas del Volcán Santo Tomás, a su vez, hay pocas corrientes intermitentes, iniciando su recorrido como río Ican y finalizando a la desembocadura de El Tulate.

En relación al número de orden, es una cuenca de orden 4, donde tiene una magnitud relativamente grande con 55 corrientes y una longitud acumulada de 473.56 kilómetros.

En los aspectos lineales existen 37 corrientes permanentes y 17 corrientes intermitentes, donde el gráfico de relación Log Nu vs U, tiene un sentido negativo y recto, lo cual viabiliza la correcta contabilización de corrientes, el radio de bifurcación media detalla la intersección entre corrientes dentro de la cuenca cuyo valor es de 3.43, siendo un valor normal.

En la longitud media de corrientes indican que las pendientes de la cuenca son planas, puesto que las longitudes son extendidas en promedio con un valor de 8.61 kilómetros, con respecto a su derivación en la gráfica Log Lu vs U, determina un proceso correcto de cálculo al ser en sentido positivo. En el radio de longitud media demuestra un promedio de longitud entre corrientes hasta bifurcarse en un aproximado de 1.06 kilómetros.

En cuanto a los resultados del análisis de los aspectos de superficie, se puede observar que el área de estudio corresponde a una cuenca de gran tamaño, con una superficie de 929.89 Km² o 9298.9 hectáreas. Su forma es alargada, con una relación de forma de 0.15, lo que indica que es más ancha que alta. La densidad de drenaje es moderada, de 0.51 km/km², lo que sugiere que la cuenca tiene una buena capacidad para drenar el agua de lluvia. El relieve es bajo, con una relación circular de 0.48, lo que indica que la cuenca no es muy circular. El coeficiente de compacidad calculado es de 1.44, lo que sugiere que la cuenca es alargada, ya que su perímetro (P) es mayor que su longitud circular.

Aunado a los análisis de superficie, el radio de elongación detalla la amplitud en ancho de la cuenca cuyo valor es de 0.44, lo cual, da como resultado una cuenca compacta. En la frecuencia o densidad de drenajes, esta tiene un dato de 0.06 cauce/ Km², que significa, el estado de los cauces, en forma concentrada y no tan dispersa a lo largo de la cuenca, por lo que su aparición es menor.

Con respecto a los aspectos de relieve, la pendiente media de la cuenca fue realizada a través del método Horton con un resultado de 3% de pendiente, donde la velocidad de flujo es media. En la pendiente del cauce principal se ve influida en la parte Norte de la cuenca, donde las pendientes son más elevadas, pero en relación a las pendientes de la cuenca, este tiene un dato de 3%, utilizando el método analítico.

En la elevación media de la cuenca, se ha utilizado el método de la curva hipsométrica cuyos cálculos y gráfica da un valor de 207 msnm. Según esta gráfica muestra que la cuenca tiene un grado de madurez en estado senil. Por último, el coeficiente de relieve cuyo dato es de 0.03 da como

resultado una estimación de producción media anual de sedimentos de $300 \text{ m}^3/\text{Km}^2/\text{año}$ según la gráfica de Schum, dando como resultado valores de erosión bajos.

11.1.16 Análisis de climatología

En el análisis atmosférico de cada segmentación de la cuenca, se han priorizado los datos promediados y calculados en registro histórico de variables como la precipitación, temperatura y humedad relativa, tanto en dinamismo histórico como en promedio anual. También se ha tenido en cuenta la relación de evapotranspiración potencial.

En la parte alta de la cuenca, se ha tomado en cuenta una estación meteorológica de primer orden cuyo nombre responde al de Buena Vista, propiedad de la Asociación Nacional del Café (ANACAFE), cuyo registro de variables meteorológicas tienen una periodicidad de 9 años, en intervalo de los años 2013 al 2022.

La precipitación anual acumulada dentro del intervalo de años antes mencionada, tiene un registro máximo en el año 2021, con un dato de lamina de lluvia de 5259.8 mm, a su vez esto representa un promedio de lluvia de 438.3 mm. En relación al dato mínimo de presencia de precipitación pluvial, corresponde en el año 2018, con un acumulado de lámina de lluvia de 2821.4 mm, que a su vez esto representa un promedio de lluvia de 235.1 mm. En el último año (2022) estos registros han oscilado en un acumulado de 4767.7 mm y un promedio de lluvia de 397.3 mm.

En las variables meteorológicas promedio para la parte alta, se observa que la precipitación máxima se encuentra en el mes de junio (614.27 mm), y la precipitación mínima en el mes de febrero (28.87 mm), la tendencia de los datos de lluvia promedio consiste en época de verano evidenciando poco registro de lluvia, manifestando un alza en el mes de mayo como aparición normal de la temporada de invierno durante este sector, a su vez, paso de canícula en el mes de julio (384.7 mm), elevando su registro nuevamente en el mes de agosto, y decreciendo su manifestación en mes de noviembre. El promedio de temperatura anual es de 26.11°C y una humedad relativa de 79%.

En comparación con la evapotranspiración potencial, esta registra una máxima promedio en el mes de julio de 175.46 mm, y se evidencia un estrés hídrico particularmente en meses de verano (enero,

febrero, marzo y abril) en los demás meses se observa más cantidad de lluvia entrante que saliente. La relación de lluvia excede la potencialidad de pérdida dentro de la cuenca en promedio anual, con un acumulado de precipitación de 3661.01 mm y de ETP 1738.38 mm.

En la zona media de la cuenca se han considerado 4 estaciones meteorológicas de segundo orden, una de las cuales pertenece al Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), llamada Mazatenango, y 3 estaciones pertenecientes al Instituto de Cambio Climático (ICC), denominadas Tzulá, Lorena y Naranjales. La estación de Mazatenango cuenta con registros de 16 años, mientras que las otras tres estaciones cuentan con registros de 7 años. Se ha recopilado datos y se han promediado para su observación en un intervalo de años que va desde 2006 hasta 2022.

La precipitación anual acumulada durante el intervalo de años mencionado alcanzó un máximo en el año 2010, con un registro de lámina de lluvia de 6313 mm, lo que representa un promedio de lluvia de 526.1 mm. Este evento extremo de intensidad de lluvia se debió a la tormenta Agatha. Por otro lado, el mínimo registro de precipitación pluvial se presentó en el año 2015, con un acumulado de lámina de lluvia de 3015.5 mm, lo que equivale a un promedio de lluvia de 251.3 mm. En el último año (2022), los registros oscilaron entre un acumulado de 3896.4 mm y un promedio de lluvia de 324.7 mm.

En las variables meteorológicas promedio para la parte media, se ha observado que la precipitación máxima se encuentra en el mes de octubre (656.3 mm), y la precipitación mínima en el mes de enero (30.7 mm), la tendencia de los datos de lluvia promedio consiste en época de verano evidenciando poco registro de lluvia, manifestando un alza en el mes de mayo como aparición normal de la temporada de invierno durante este sector, a su vez, paso de canícula en el mes de julio (467.2 mm), elevando su registro nuevamente en el mes de agosto, y decreciendo su manifestación en mes de noviembre. El promedio de temperatura anual es de 25.77 °C y una humedad relativa de 81%.

En comparación con la evapotranspiración potencial, esta registra una máxima promedio en el mes de mayo de 163.9 mm, y se evidencia un estrés hídrico particularmente en 4 meses específicamente

(enero, febrero, marzo y diciembre) en los demás meses se observa más cantidad de lluvia entrante que saliente. La relación de lluvia excede la potencialidad de pérdida dentro de la cuenca en promedio anual, con un acumulado de precipitación de 4115.2 mm y de ETP 1668.4 mm.

Con respecto a la parte baja de la cuenca, se ha utilizado la estación San Nicolás, propiedad del Instituto de Cambio Climático (ICC), es de característica de segundo orden, cuyo registro de variables meteorológicas tienen una periodicidad de 7 años, en intervalo de los años 2015 al 2022.

La precipitación anual acumulada dentro del intervalo de años antes mencionada, tiene un registro máximo en el año 2021, con un dato de lámina de lluvia de 1100.4 mm, a su vez esto representa un promedio de lluvia de 91.7 mm. En relación al dato mínimo de presencia de precipitación pluvial, corresponde en el año 2018, con un acumulado de lámina de lluvia de 856.8 mm, que a su vez esto representa un promedio de lluvia de 71.4 mm. En el último año (2022) estos registros han oscilado en un acumulado de 997.9 mm y un promedio de lluvia de 83.2 mm.

En las variables meteorológicas promedio para la parte baja, se observa que la precipitación máxima se encuentra en el mes de agosto (177.6 mm), y la precipitación mínima en el mes de enero (0.3 mm), la tendencia de los datos de lluvia promedio consiste en época de verano evidenciando poco registro de lluvia, manifestando un alza en el mes de mayo como aparición normal de la temporada de invierno durante este sector, a su vez, paso de canícula en el mes de julio (107.7 mm), elevando su registro nuevamente en el mes de agosto, y decreciendo su manifestación en mes de noviembre. El promedio de temperatura anual es de 27.4 °C y una humedad relativa de 88%.

En comparación con la evapotranspiración potencial, esta registra una máxima promedio en el mes de mayo de 155.4 mm, y se evidencia un estrés hídrico particularmente en los meses de enero a mayo, julio, noviembre y diciembre, en los demás meses se observa más cantidad de lluvia entrante que saliente. La relación de lluvia carece a la potencialidad de pérdida dentro de la cuenca en promedio anual, con un acumulado de precipitación de 971.9 mm y de ETP 1561.7 mm.

11.1.17 Análisis de escurrimiento superficial

En los análisis de escurrimiento superficial, se ha determinado mediante datos de caudales que se han medido desde estaciones hidrométricas presentes en el área, que esta cuenca tiene la particularidad de poseer ríos caudalosos en transición de parte alta hacia la parte baja. Con los datos calculados y ordenados, permite la visualización del comportamiento en su flujo hídrico tanto en registro histórico, como de los promedios mensuales, aplicados al año hidrológico, estimando así variables como acumulados y promedios anuales dentro del registro de años, promedio mensual durante el año hidrológico y su estimación de volumen promedio anual.

Las gráficas que se presentan muestra de manera visual el dinamismo hídrico en temporalidad considerada. El enfoque del detalle de estudio se realiza bajo los datos de las estaciones existentes en la cuenca, en este caso, la estación hidrométrica La Franja y La Máquina.

La estación hidrométrica La Franja se encuentra en la parte media de la cuenca, esta tiene una captación directamente con el flujo del río Icán, esta estación presenta registros desde el año 2003 hasta el año 2022. Los caudales han sido calculados con la fórmula de la estación, de la cual ha sido calibrada y de esta deriva de la toma de sus niveles diarios.

Los resultados que manifiesta dichos cálculos abordan principalmente en el acumulado durante el registro histórico anual, teniendo su dato máximo en el año 2010-2011, con un valor de caudal acumulado de 6230.29 m³/s, que, a su vez, representa un promedio de 17.03 m³/s. En dicho dato demuestra las crecidas que relaciona a un evento extremo, suscitado en el año 2010, con el paso de la tormenta Agatha y que es reflejado en sus gráficas.

Por otro lado, en estos registros, se observa el dato mínimo de caudal en el año 2004-2005, con un valor acumulado de 1956.35 m³/s y con un promedio de 5.33 m³/s. Para el último año que se ha registrado datos de caudal (2021-2022), se observa datos acumulados de caudal de 3217.08 m³/s, con un promedio de 8.73 m³/s.

A los promedios mensuales durante el año hidrológico, se emplea el mismo criterio, donde se observa que el mes que presenta mayor flujo de caudal es en octubre, con un estimado acumulado de

569.65 m³/s y con promedio de 18.38 m³/s, y el dato menor se localiza en el mes de febrero con un dato acumulado de 117.23 m³/s y con un promedio de 4.13 m³/s.

En cuanto a la separación del caudal base y el caudal superficial, se realiza con el criterio de la unión de dos puntos que divide los decaimientos hídricos y sus crecidas. Los caudales que determinan dicha división, demuestran un caudal base de 6.2 a 10.3 m³/s y un caudal superficial de 10.3 m³/s a 18.4 m³/s.

En la disponibilidad del volumen oferente característica de esta parte de la cuenca, y en relación al río Icán, este tiene un total promedio 336 millones de metros cúbicos anuales.

La estación hidrométrica La Máquina se encuentra en la parte media baja de la cuenca, esta tiene una captación directamente con el flujo del río Sis, esta estación presenta registros desde el año 2003 hasta el año 2022. Los caudales han sido calculados con la fórmula de la estación, de la cual ha sido calibrada y de esta deriva de la toma de sus niveles diarios.

Los resultados que manifiesta dichos cálculos abordan principalmente en el acumulado durante el registro histórico anual, teniendo su dato máximo en el año 2005-2006, con un valor de caudal acumulado de 4886.56 m³/s, que, a su vez, representa un promedio de 13.45 m³/s. En dicho dato demuestra las crecidas que relaciona a un evento extremo, suscitado en el año 2005, con el paso de la tormenta Stan y que es reflejado en sus gráficas.

Por otro lado, en estos registros, se observa el dato mínimo de caudal en el año 2017-2018, con un valor de 789.12 m³/s acumulado y con un promedio de 2.16 m³/s. Para el último año que se ha registrado datos de caudal (2021-2022), se observa datos acumulados de caudal de 997.09 m³/s, con un promedio de 2.72 m³/s.

A los promedios mensuales durante el año hidrológico, se emplea el mismo criterio, donde se observa que el mes que presenta mayor flujo de caudal es en junio, con un estimado de caudal 290.02 m³/s acumulado y con promedio de 9.66 m³/s, y el dato menor se localiza en el mes de febrero con un dato acumulado de 61.26 m³/s y con un promedio de 2.17 m³/s.

En cuanto a la separación del caudal base y el caudal superficial, se realiza con el criterio de la unión de dos puntos que divide los decaimientos hídricos y sus crecidas. Los caudales que determinan dicha división, demuestran un caudal base 2.2 a 4.2 m³/s y un caudal superficial de 4.2 m³/s a 9.7 m³/s.

En la disponibilidad del volumen oferente característica de esta parte de la cuenca, y en relación al río Sis, este tiene un total promedio 160 millones de metros cúbicos anuales.

El comportamiento hídrico no tiene una similitud constante, dado que estos datos son tomados en diferentes puntos geográficos de la cuenca, con condiciones de captación diferentes, por ejemplo, en la estación La Franja, se encuentra una densidad mayor de flujo de corrientes tributarias al río Icán, caso contrario, con la estación La Máquina, que su densidad de drenaje en comparación es menor, también influye las condiciones de sitio.

En un acumulado aproximado, al conjuntar los datos de oferta hídrica de las estaciones, considera que la cuenca tiene una potencialidad total de 506 millones de metros cúbicos de agua, en promedio anual.

11.1.18 Estadística hidrológica

La aplicación de la estadística hidrológica en la cuenca de los ríos Sis-Icán permitió reunir datos en un espacio y tiempo de manera que se pudiera realizar una clasificación específica y criterios predecibles o determinísticos, siempre dentro de un rango aproximado, lo que en eventos procesales se conoce como estocástica. Para conocer los diferentes tipos de resultados, era de vital importancia tener en cuenta dos conceptos fundamentales: frecuencia y recurrencia, ya que esto servía como base para determinar probabilidades y distribuciones.

En el primer análisis estocástico, se hace bajo el criterio de datos diarios de caudal durante un año completo hidrológico, esto deriva a conocer la dispersión y tendencia de datos, y agruparse para hacer su relación de frecuencia dentro de un intervalo, entre límites tanto inferiores como superiores. La síntesis de toda esta información detalla un grupo de intervalo de caudales en relación al porcentaje de frecuencia, a lo cual, estos datos generan una curva de caudales característicos en el

transcurso de un año hidrológico, cuyos datos significativos son de un caudal máximo de 32.4 m³/s, con un porcentaje de frecuencia de 2.74%, caudal medio de 2.08 m³/s, con un porcentaje de frecuencia de 97.3%, y un caudal medio de 7.53 m³/s, con un porcentaje del 50%.

Se empleó el método para el cálculo del caudal máximo en el diseño de proyectos con la metodología de conservación de suelos (SCS). Esta metodología ha implicado realizar una serie de cálculos que culminaron en el resultado del caudal final. Cabe destacar que este cálculo se ha basado en la clasificación hidrológica de los suelos en grupos A, B, C y D, según su potencial de escorrentía, y en la clasificación de las condiciones hidrológicas, que pueden ser media, buena o pobre, según el porcentaje de cobertura y la intensidad de pastoreo. Es importante tener en cuenta que este método se realiza en función del uso del suelo.

Siguiente a esto se ha clasificado el resultado de número de curva (CN), a lo que posteriormente se lo sitúa en una condición de humedad antecedente (AMC) nivel III, a una precipitación acumulada de los 5 días previos al evento en más de 5.25 centímetros. Los datos de tasa de retorno y tasa de concentración se han realizado con parámetros propios de una calibración de estación meteorológica, cumpliendo las condiciones de sitio, dando como resultado de caudal máximo de diseño para una tasa de retorno de 100 años de 188.51 m³/s, que debe de tomarse en cuenta como referencia para una situación específica del área.

Seguido a esto se han elaborado cálculos para caudal máximo bajo dos metodologías, que corresponden a Pearson III y Gumbel I, las cuales vinculan a dos estaciones hidrométricas (La Franja y La Máquina), con esto se ordena y busca la fecha según el año hidrológico, el máximo registro de caudal diario, con esto se pretende, la estimación estocástica de proyección de caudal máximo, en dos tasas de retorno, principalmente en 50 y 100 años. Los registros tienen un intervalo en años desde el 2003 hasta 2022 (19 años), y da como resultado la media, desviación estándar (Sy) y un coeficiente (Cs), que sirve de referencia para la interpolación sugerida según las tablas de calibración para el cálculo de dichos caudales probabilísticos.

La comparación de ellos, es en función de los resultados, según el método, y de una forma individual de la representación de la estación hidrológica en relación de la cuenca, dando como resultado, en la estación La Franja (Río Icán), un caudal probable con tasa de retorno de 50 años, en el método de Pearson III de $268.27 \text{ m}^3/\text{s}$, que en comparación con el método de Gumbel I, la relación no varía significativamente con un dato de $263.81 \text{ m}^3/\text{s}$, a su vez para una tasa de retorno de 100 años, según el método de Pearson III, el resultado de caudal probable es de $363.21 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo que la variación no repercute en relevancia conforme al método de Gumbel I, cuyo dato es de $304.53 \text{ m}^3/\text{s}$.

En el caso de la estación La Máquina, si se observan variaciones significativas, específicamente en el resultado de los caudales probables comparativos de los diferentes métodos (Pearson III y Gumbel I), con respecto a la tasa de retorno de 100 años, dando como resultado $400.61 \text{ m}^3/\text{s}$ y $268.47 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, esto puede deberse a que en el método de Pearson III, los coeficientes referenciales para la tabla de calibración, están sujetas a la dispersión de datos máximos, como se puede analizar, estos tienden a serlo, lo cual, generan una discordancia de cálculo. Por otro lado, los resultados para la tasa de retorno de 50 años, no presenta variación relevante, con un resultado de $229.06 \text{ m}^3/\text{s}$ y $228.65 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente.

En el análisis de intensidad, duración y frecuencia, se ha tomado en cuenta, la estación meteorológica con datos de registros más consistentes de lluvia, en un período prolongado, por lo que se ha utilizado la estación Mazatenango, ya que esta tiene datos desde el año 2006 al 2022, sintetizando por cada año transcurrido el promedio de cada mes, y filtrando el dato máximo.

Con estos datos se ha elaborado durante el proceso, regresiones estocásticas, para la generación de variables y parámetros que detallen probabilidades, con tasas de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, conjuntando con la fórmula de intensidad y a su vez tomando en cuenta su duración de minutos en intervalo de 5 para la conformación de 1 hora. Con este cálculo se ha permitido elaborar la gráfica mediante la curva IDF, que detalla el comportamiento probabilístico para precipitación.

11.1.19 Balance hídrico

El balance hídrico en la cuenca tiene la particularidad de evidenciar el comportamiento hídrico disponible y la pérdida que influye a través de su evapotranspiración. Para el desarrollo de dicho apartado, se realizaron cálculos por medio de la metodología de Schosinky (2006), la cual contemplaba factores físicos de suelo como capacidad de infiltración, densidad de suelo, capacidad de campo y punto de marchitez. Asimismo, se consideraron constantes naturales representativas del área a tomar en cuenta, como en este caso, constante de pendiente, cultivo y de suelo. Al combinar estos factores con los elementos externos climáticos, se evidenció la potencialidad ya sea de disponer del recurso hídrico, así como de la capacidad de pérdida.

El criterio para conocer dichos datos en la totalidad de la cuenca, parte en segmentar la misma, en tres regiones (alta, media y baja). La aplicación de los cálculos se ha realizado en base a las condiciones del lugar, donde los resultados se generan a partir del régimen de precipitación (entradas) y de evapotranspiración (salidas), teniendo en cuenta la lámina producida disponible en escorrentía y recarga potencial.

Se determinó que en la parte alta de la cuenca, se encuentra tipos de suelos representativos Suchitepéquez y Samayac, que tienen características de capacidad de infiltración de 412 mm/día, a su vez una densidad de suelo de 1.3 g/cm³, una capacidad de campo de 604.5 mm, un punto de Marchitez de 234 mm y textura particular de franco limoso.

El cultivo que corresponde a la representación del área, es comúnmente plantaciones forestales, bosque y café, por lo que, al integrar el promedio de profundidad radicular, este generalmente tiene una extensión de 1500 mm, esta influye sobre la retención de agua para el paso hacia su almacenamiento y flujo del caudal base superficial.

Se ha obtenido el valor de precipitación acumulada que es de 3661.01 mm/año y de Evapotranspiración acumulada de 1643.30 mm/año. Como síntesis de lo antes aplicado a la capacidad disponible del recurso hídrico para la parte alta de la cuenca es de una lámina de 1416.87 mm/año de escorrentía superficial y 425.73 mm/año de recarga potencial. Estos valores se pueden

considerar de moderados a altos, ya que es una zona que, con combinación al clima, se le conoce como un área de recarga hídrica.

En la parte media de la cuenca, se encuentra tipos de suelos representativos Mazatenango y Cuyotenango, que tienen características de capacidad de infiltración de 320 mm/día, a su vez una densidad de suelo de 1.4 g/cm^3 , una capacidad de campo de 364 mm, un punto de Marchitez de 182 mm y textura particular de franco limoso.

El cultivo que corresponde a la representación del área, es comúnmente plantaciones de caña de azúcar, por lo que, al integrar al calcular la profundidad radicular, este generalmente tiene una extensión de 1300 mm.

El valor de precipitación acumulada es de 4115.22 mm/año y de Evapotranspiración acumulada de 1668.40 mm/año. Como síntesis de lo antes aplicado a la capacidad disponible del recurso hídrico para la parte media de la cuenca es de una lámina de 1810.04 mm/año de escorrentía superficial y 561.28 mm/año de recarga potencial. Estos valores se pueden considerar de alta potencialidad, puesto que el área tiene la característica de extender su influencia superficial a aires de convección del pacífico que llega a relacionarse a los orogénicos de la cadena volcánica al Norte, esto genera un punto de rocío e influye en altas precipitaciones, producto de este dinamismo.

En la parte baja de la cuenca, se encuentra el tipo de suelo representativo Ixtán, que tiene características de capacidad de infiltración de 245 mm/día, a su vez una densidad de suelo de 1.25 g/cm^3 , una capacidad de campo de 103.13 mm, un punto de Marchitez de 50 mm y textura particular de arcilloso.

El cultivo que corresponde a la representación del área, es comúnmente agricultura anual (maíz, frijol, etc..) por lo que, al integrar el promedio de profundidad radicular, este generalmente tiene una extensión de 250 mm, esta influye sobre la retención de agua para el paso hacia su almacenamiento y flujo del caudal base superficial.

El valor de precipitación acumulada es de 971.93 mm/año y de Evapotranspiración acumulada de 1561.73 mm/año. Como síntesis de lo antes aplicado a la capacidad disponible del recurso hídrico para la parte baja de la cuenca es de una lámina de 337.52 mm/año de escorrentía superficial y 270.12 mm/año de recarga potencial. Los valores presentados en esta área detallan un menor valor, en función de generar disponibilidad del recurso hídrico, tanto por textura de suelo que es arcilla semipermeable, y de las altas temperaturas que aumentan el valor de ETP, superando la manifestación de lluvia. Aun así, por tema de relieve dentro de la cuenca, esta zona provee una reserva del recurso hídrico muy importante, tanto de forma subterránea como superficial.

En la adhesión de las diferentes manifestaciones y cálculos de la segmentación de la cuenca, este tiene un valor total aproximado de generación disponible del recurso hídrico de 3564.43 mm/año en escorrentía superficial y una capacidad de 1257.13 mm/año de recarga potencial.

11.1.20 Modelamiento para estimación a inundaciones

Para el desarrollo de cálculos hidráulicos se ingresaron los datos geométricos generados que se dividieron en tres segmentos; geometría del río Sis, geometría del río Icán y geometría del estero o unión de los ríos Sis-Icán. Para cada segmento la geometría y el índice o coeficiente de Manning varió según las características observadas al digitalizar con auxilio de la capa de imagen satelital proporcionada por Google Satelite sobre el terreno de estudio. El coeficiente de Manning se basó en parámetros geométricos del flujo, la pendiente hidráulica y el coeficiente de rugosidad “n” obtenidos en observación y recorrido de campo, digitalización por medio de imagen satelital y por revisión bibliográfica (coeficiente de rugosidad).

Cabe mencionar que al aplicar la ecuación de Manning la mayor dificultad está en la determinación del coeficiente de rugosidad n, ya que no existe un método exacto para la selección de su valor. (Pastora, 2010). El coeficiente de rugosidad “n” se ha seleccionado con el criterio del libro de "Hidráulica de Canales Abiertos" de Ven Te Chow donde se recogen valores recomendados de coeficiente de rugosidad de Manning para diferentes casos. A partir de lo anterior se genera una capa shape con el coeficiente de rugosidad “n” que se exporta de HEC-RAS y RAS-Mapper.

Ya que se trabajan tres segmentos en el modelamiento, cada parámetro geométrico varió según sus características topográficas, por ejemplo, los transectos del río Icán fueron de 77, mientras que en la unión de los ríos Sis-Icán o Estero El Tulate fueron 12. Lo anterior es debido a que las distancias variaron para acoplarse al modelo del terreno.

Aunado a lo anterior, para cada segmento analizado en HEC RAS, se han introducido las condiciones del entorno y datos de caudal. El sistema HEC-RAS contiene componentes de análisis de río, así como características de diseño hidráulico que se pueden proyectar una vez que se calculan los perfiles básicos de la superficie del agua (Mora & Gilberto, 2016).

Con el programa se ha permitido simular el desbordamiento del caudal de los ríos Sis-Icán en distintos escenarios; para un periodo de retorno de 50 y 100 años con el método de distribución de Pearson III y Gumbel, así como el escenario de caudal máximo durante el periodo 2003-2022, siendo Octubre del 2005 el caudal máximo registrado durante dicha temporalidad (Figuras 53, 54 y 55).

De acuerdo a Sanchez (2006) durante el huracán Stan se generaron lluvias del orden de 500 mm en los primeros cinco días de octubre de 2005 en muchas zonas del país. Así mismo, la baja de temperatura provocado por la nubosidad asociada a los sistemas ciclónicos de esos días anuló la evapotranspiración del medio, creando saturación en el ambiente y los suelos y favoreciendo a la escorrentía superficial, aportando un gran volumen de agua que estimuló el acelerado crecimiento de los caudales de los ríos, provocando en pocas horas muchas inundaciones en tierras bajas, sobrepasando la altura de muchos puentes y en muchos casos, destruyéndolos (Figura 73).

Se ha empleado el método de Pearson III ya que esta distribución permite obtener resultados de aceptable confiabilidad cuando se efectúan predicciones con grandes periodos de retorno (Gamba & Gonzalez, 2015). En la proyección de resultados (Figuras 56, 57,58,59,60 y 61) se observa que las áreas con mayor amenaza a inundación en periodos de retorno de 50 y 100 años se localizan a medias del transecto de la corriente del río Sis, las zonas septentrionales y medias del río Icán y la zona del Estero del Tulate, la cual, es la zona con mayor amenaza a inundación.

Así mismo, se aplica el método de distribución de Gumbel, el cual, representa las distribuciones de valores extremos, es llamada también valor extremo tipo I o distribución doble exponencial (Granda, 2018). Similar a los resultados con Pearson III, los periodos de retorno de 50 y 100 años se localizan a medias del transecto de la corriente del río Sis, las zonas septentrionales y medias del río Icán y la zona del Estero del Tulte, la cual, es la zona con mayor amenaza a inundación (Figuras 62, 63, 64, 65, 66 y 67).

En el desarrollo del modelamiento se ha realizado un análisis de flujo permanente en toda la cuenca de estudio. Los datos requeridos para realizar el análisis de flujo permanente fueron sometidos al número de perfiles, los datos del flujo y las condiciones de frontera.

Para la ejecución de la simulación hidráulica del cauce de los ríos Sis-Icán, se ha procedido a generar un “plan” y con la función Run/steady flow análisis se introducen los datos geométricos, los datos hidráulicos y los datos de rugosidad. Se el régimen de flujo en selección es de tipo mixto

Con los resultados obtenidos en cada modelo realizado, se ha realizado una intersección entre las simulaciones y las capa Ráster del “Mapa de zonas susceptibles a inundaciones de la República de Guatemala [mapa digital]” proporcionada por el Instituto de investigación y proyección sobre ambiente natural y sociedad de la Universidad Rafael Landívar y Pérez, G. (2009) (Figuras 55, 58, 61, 64 y 67). Estas proyecciones permiten observar que efectivamente las zonas bajas de la cuenca de los ríos Sis-Icán presentan mayor susceptibilidad a una inundación

Finalmente, el resultado fue la zonificación de la cuenca con base a los modelos simulados, tomando un cauce extremo de 928 m³/s (temporalidad de cauces máximos), unido a las zonas susceptibles según el IARNA y Pérez (2009), la geomorfología y la observación de imagen satelital. Siendo un 64 % de la cuenca ubicado en alta amenaza de inundación; un 14.39 % se ubica en amenaza media a inundación; mientras que el 21.5 % del territorio está poco amenazado a una inundación (Figura 68).

En la zona de alta amenaza a inundaciones se ubican 11 puntos entre casas, aldeas y otros (Cuadro 44) los cuales deben de monitorearse para su respectivo plan de emergencia, contingencia, mitigación y resiliencia ante amenazas.

Con la zonificación a inundaciones se anticipa y suministra un mapa para las autoridades locales y/o municipales delimitando en la cuenca los amenazas a crecidas de caudales que pueden significar daños materiales a infraestructura, pérdidas de vidas humanas u otros aspectos socioambientales y económicos relacionados con las actividades productivas de las zonas delimitadas, siendo en buena parte el uso de suelo para las actividades de agricultura anual, caña de azúcar, café, hule, palma africana y pastos, es apropiado definir un plan preventivo y reactivo para los escenarios expuestos.

La parte baja de la cuenca representa una alerta ante eventos de lluvia externa, por lo que a nivel institucional se deben de propiciar las condiciones de prevención y respuesta antes tales eventos.

Con base a los resultados expuestos también en el balance hídrico, es durante la época de lluvia la que representa la mayor amenaza para las comunidades de la cuenca, por lo tanto, es menester la organización comunitaria con lineamientos para aminorar impactos socioambientales. Así mismo, planes de emergencia para que la población pueda evacuar en situaciones de riesgo.

Entre los elementos principales de gestión de riesgos que se consideran necesarios aplicar en la planificación territorial y manejo de la cuenca se determinó; 1) propuestas de obras civiles de protección a inundaciones; 2) estudio, monitoreo y mantenimiento de puentes ; 3) planificar en el ordenamiento municipal la prevención y reubicación de aislamientos y conjuntos sociales en las zonas de alto y mediana amenaza; 4) integrar un estudio multidisciplinario con enfoque participativo en las comunidades para promover la prevención a desastres, así como la educación, divulgación y constante capacitación de la organización comunitaria e institucional; 5) lineamientos normativos de gestión de riesgo que que regulen la construcción de viviendas en las zonas de alta amenaza de inundación. , planes de emergencia; 6) incentivar la participación de distintos sectores de la población y el apoyo institucional; 7) aplicar los criterios técnicos del sistema de alerta temprana de la CONRED.

12 Conclusiones

1. En resumen, el análisis y caracterización de la cuenca de los ríos Sis-Icán es fundamental para entender su comportamiento hidrológico e hidráulico y detectar las áreas con susceptibilidad a inundaciones. Para ello, se ha recopilado información climática, hidrométrica y biofísica de la cuenca, se ha realizado un diagnóstico y análisis del comportamiento hídrico, y se ha elaborado una modelación hidráulica que permita examinar el comportamiento de los cauces y detectar las áreas de inundación. Posteriormente, se ha zonificado con sistemas de información geográfica las áreas con susceptibilidad de amenazas naturales a inundaciones de los cauces principales de los ríos Sis e Icán. Todo esto ha permitido determinar la situación hidrológica e hidráulica de la cuenca y elaborar medidas de prevención y mitigación de amenazas asociadas a inundaciones
2. Se recopiló información antecedente de carácter climático e hidrométrico e información biofísica para caracterizar la cuenca de los ríos Sis-Icán. se llevó a cabo una importante tarea de recopilación de información antecedente de carácter climático e hidrométrico, así como información biofísica para caracterizar la cuenca de los ríos Sis-Icán. Esta tarea fue esencial para entender mejor la dinámica de la cuenca hidrográfica y los procesos naturales que allí ocurren. La información climática recopilada incluyó datos históricos sobre la precipitación, temperatura y humedad, entre otros parámetros climáticos relevantes.
3. Se realizó un diagnóstico y análisis exhaustivo del comportamiento hídrico de la cuenca de los ríos Sis-Icán, el cual permitió identificar los principales factores que influyen en la disponibilidad y calidad del recurso hídrico en la zona.

4. Se ejecutó una modelación hidráulica para examinar el comportamiento de los cauces principales de los ríos Sis e Icán y detectar las áreas de inundación. Esta tarea fue fundamental para comprender mejor los patrones de inundación en la cuenca de estos ríos y prever posibles riesgos y desastres naturales en la zona. La modelación hidráulica involucró la simulación de los flujos de agua en los cauces principales de los ríos, así como la predicción de los niveles de agua durante eventos extremos de precipitación. Con esta información, se pudo identificar las áreas de inundación potencial en la cuenca y evaluar la amenaza latente para las comunidades locales.
5. En resumen, la zonificación con sistemas de información geográfica (SIG) fue una tarea fundamental para identificar las áreas con susceptibilidad de amenazas naturales a inundaciones de los cauces principales de los ríos Sis e Icán. Esta tarea permitió comprender mejor los patrones de inundación en la cuenca de estos ríos y prever las amenazas y posibles riesgos por desastres naturales en la zona. La zonificación con SIG permitió establecer diferentes niveles de amenaza de inundación en la cuenca, lo que fue crucial para planificar y tomar medidas preventivas y de gestión de riesgos. De esta manera, se pudo reducir la vulnerabilidad de las comunidades locales y minimizar los impactos negativos en el medio ambiente.

13 Referencias

- Andrade, M. A., Mello, C. R., & Beskow, S. (2013). Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande. *Revista científica de ingeniería agrícola y ambiente de Brasil*, 17(1), 69-76.
- Angulo, M. (2018). Gestión de la disponibilidad hídrica en la unidad hidrográfica río Sucio, cuenca 64, Nicaragua. *Revista Científica Agua, Saneamiento y Ambiente*, 13(1), 39-48.
- Banco de Desarrollo de América Latina, Venezuela. (2019). *Estrategia del agua 2019-2022*. Uruguay.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2007). Riesgos y desastres: su gestión municipal en Centroamérica. Estados Unidos.
- Basterrechea, M., & Guerra, A. (2019). *Recursos hídricos*. Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala, Editorial Universitaria UVG.
- Calderón, H. (2016). Retos de la evaluación de los recursos hídricos en cuencas pobremente aforadas, la situación de Nicaragua y Centroamérica. *Revista Científica Agua y Conocimiento*, 2(1), 49-64
- Centro Nacional de Investigación Atmosférica (UCAR). (2012). *The COMET Program: UCAR community program*. https://www.meted.ucar.edu/climate/impacts/region_es/index.htm
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill.
- Constantino, R., & Dávila, H. (2011). Una aproximación a la vulnerabilidad y la resiliencia ante eventos hidrometeorológicos extremos en México. *Revista científica de Política y Cultura*, 1(36), 15-44.
- Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres CONRED. (2016). *Glosario de gestión integral de riesgos a desastres*. Guatemala.
- Díaz, G. (2012). El cambio climático. *Revista científica Ciencia y Sociedad*, 37(2), 227-240.
- Estrada, V., & Pacheco, R. (2012). Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. *Revista científica Ingeniería hidráulica y ambiental*, 33(1), 94-105.
- Gobernación de Escuintla, Acción Contra el Hambre, Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático. (2017). *Sistematización de la experiencia de las mesas técnicas de los ríos Madre Vieja y Achiguate en el Departamento de Escuintla*. Guatemala.

- Gordillo, C. (2016). Monitoreo ante inundaciones en comunidades de la cuenca baja del Río Ostúa y Lago Guija, Guatemala. *Revista científica Ciencia, Tecnología y Salud*, 3(2), 192.
- Global Water Partnership. (2017). *Situación de los recursos hídricos en Centroamérica: hacia una gestión integrada*. Honduras.
- Guerra, A., Liere, M., Yax, P., Alfaro, G., Gil, S. y Blacutt L. (2017). Gestión de riesgo de inundaciones en el río Coyolate: ejemplo de adaptación al cambio climático en Guatemala. *Revista Yu'am*, 2(3), 27-37.
- Herrera, I., Orozco, E. y Padilla, T. (2007). *Guía para el manejo de cuencas hidrográficas*. Guatemala: CARA.
- Herrera, I., Orozco, O., y Mujica, A. (2011). Estrategia para el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo en una zona semiárida de Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(3), 12-18.
- Herrera, I. (2011). *Manual de Hidrología*. (2ª ed.). Guatemala: CARA.
- Herrera, I. (2014). *Manual de Hidrología*. (3ª ed.). Guatemala: CARA.
- Hijar, G., Bonilla, C., Munayco, C. V., Gutierrez, E. L., & Ramos, W. (2016). Fenómeno el niño y desastres naturales: intervenciones en salud pública para la preparación y respuesta. *Revista peruana de medicina experimental y salud pública*, 33, 300-310.
- Instituto Nacional de Estadística, Guatemala (INE). (2018). *Resultados censo 2018*. Guatemala: INE.
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). (2004). *Análisis regional de crecidas para la República de Guatemala*.
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). (2009). *Atlas hidrológico de Guatemala*.
- Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC). (2011). Estudio hidrológico de la cuenca del río Coyolate. Guatemala: ICC.
- Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC). (2012). Estudio hidrológico de la cuenca del río Achiguate. Guatemala: ICC.
- Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC). (2012). Estudio hidrológico de la cuenca del río Los Esclavos. Guatemala: ICC.
- Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC). (2012). Estudio hidrológico de la cuenca del río María Linda. Guatemala: ICC.

- Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC). (2013). Estudio hidráulico del río Coyolate para la determinación de zonas susceptibles a inundación. Guatemala: ICC.
- Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC). (2015). Estudio hidrológico de la cuenca del río Madre Vieja. Guatemala: ICC.
- Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC). (2015). Mapeo de zonas críticas de inundaciones en la cuenca del río Nahualate. Guatemala: ICC.
- Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC). (2016). Determinación de las áreas susceptibles a Inundaciones en la parte baja de la cuenca del río Ocosito mediante modelación y percepción comunitaria. Guatemala: ICC.
- Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC). (2019). *Síntesis del sistema de información de los ríos de la costa sur de Guatemala: promedios de caudales comparativos en la temporada seca de los años 2017, 2018 y 2019*. Guatemala: ICC.
- Izabá-Ruiz, R., & García, D. (2018). Estimación de la disponibilidad hídrica superficial en la microcuenca del río Mapachá, San Lorenzo, Boaco. *Revista Científica Agua y Conocimiento*, 4, 23-37.
- Martínez Valdés, Y., & Villalejo García, V. M. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 39(1), 58-72.
- Maza, J., Fernández, P., Vargas, A., Fornero, L., Trípodí D., Yañez, H., & Nuñez M. (1995). Estudios hidrológicos e hidráulicos para el ordenamiento territorial de una cuenca. *Revista científica Ingeniería del Agua*, 2(1), 31-44.
- Medina, B. Y. (2007). Deslizamiento y impactos ambientales de los huracanes Mitch y Stan, en Guatemala. *Jornadas Internacionales sobre Gestión del Riesgo de Inundaciones y Deslizamientos de Laderas*.
- Molina, A. (2017). Determinación de las áreas susceptibles a inundaciones de la parte baja de la cuenca del río Ocosito mediante modelación y percepción comunitaria. (Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos: Guatemala).
- Mulligan, B., Ryan, C., & Padilla T. (2011). Delineating volcanic aquifer recharge areas using geochemical and isotopic tools. *Revista científica Hydrogeology Journal*, 19(7), 1335-1347.
- Muñoz, M. J. N., Bustos, C. M., Arcentales, A. V., & Córdova, F. (2022). Evaluación de modelos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales para la generación de mapas de inundaciones en un río de montaña. *AlfaPublicaciones*, 4(1), 163-182

- Muñoz, M. J. N., Bustos, C. M., Arcentales, A. V., & Córdova, F. (2022). Evaluación de modelos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales para la generación de mapas de inundaciones en un río de montaña. *AlfaPublicaciones*, 4(1), 163-182.
- Ochoa, W. (2020). Gestión del agua con enfoque participativo en Guatemala frente al cambio climático. *Revista científica del SEP*, 3(1), 33-37.
- Olona, C. M., Caballero, L. I., & del CEDEX, H. Estudios hidrológicos e hidráulicos en el marco del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (Tema B: Hidrología, usos y gestión del agua).
- Organización de las Naciones Unidas para la Ciencia y Cultura, España (UNESCO). (2016). *Los derechos humanos al agua y saneamiento en la Agenda 2030*.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1992). *Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. Brasil.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2019). *Análisis común de País*. Guatemala: ONU.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italia (FAO). (2008). *Sistema de información sobre el uso del agua en la agricultura y el medio rural*. Recuperado de <http://www.fao.org/nr/water/Guatemala/indexsp.stm>.
- Organización Mundial de Meteorología (OMM). (2012). *Glosario Hidrológico Internacional*. Suiza.
- Padilla, T. (2005). Evaluación del potencial hídrico en la microcuenca del río Cantil, para el aprovechamiento de las aguas subterráneas en la finca Sabana Grande, El Rodeo, Escuintla, Guatemala. *Revista Geológica de América Central*, (32), 81-97.
- Padilla, T., García N., & Pérez W. (2010). Caracterización física-química y Bacteriológica, en dos épocas del año, de la subcuenca del río Quiscab, Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(3), 43-46.
- Padilla, T. (2012). *Estrategia para mejorar la calidad del agua superficial en la subcuenca del río Quiscab, en el Departamento de Sololá, Guatemala* (Tesis doctorado, Universidad Máximo Gómez Báez de Ciego de Ávila: Cuba).
- Padilla, T., & García N. (2012). Hidroquímica del agua superficial de la subcuenca del río Quiscab, Guatemala”. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(), 17-20
- Pellecer, F. (2015). *Caracterización de las bocabarras de la vertiente del Pacífico de Guatemala* (Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos: Guatemala).
- Riebeek, H. (2005). The Rising Cost of Natural Hazards. NASA Earth Observatory. <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/RisingCost/>.

- Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia (SEGEPLAN). (2011). Política nacional del agua de Guatemala y su estrategia. Guatemala: SEGEPLAN.
- Serrano, S., Reisancho, A., Lizano, R., Borbor-Córdova, M., & Stewart A. (2016). Análisis de inundaciones costeras por precipitaciones intensas, cambio climático y fenómeno de El Niño. Caso de estudio: Machala. *Revista científica de Ciencias de la Vida*, 24(2), 56-68.
- Sigui, N. (2016). Por qué continúa la contaminación de aguas en Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 3(2), 167-176.
- The Emergency Events Database (EM-DAT). (2017). Floods in Guatemala. <https://www.emdat.be/>
- Turcios, H. (2018). Análisis de inundaciones pluviales en la ciudad de Antigua Guatemala. (Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos: Guatemala).
- United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (UNOCHA). (2017). *Humanitarian needs overview*. Guatemala: UNDP.
- Vergara, M., Ellis, E., Cruz, J., Alarcón L. y Galván, U. (2011). La conceptualización de las inundaciones y la percepción del riesgo ambiental. *Revista científica de Política y Cultura*, 1(36), 45-69.

14 Apéndice

Figura. 66 Reunión con Municipalidad de Mazatenango, Suchitepéquez

Informe final proyecto de investigación 2022

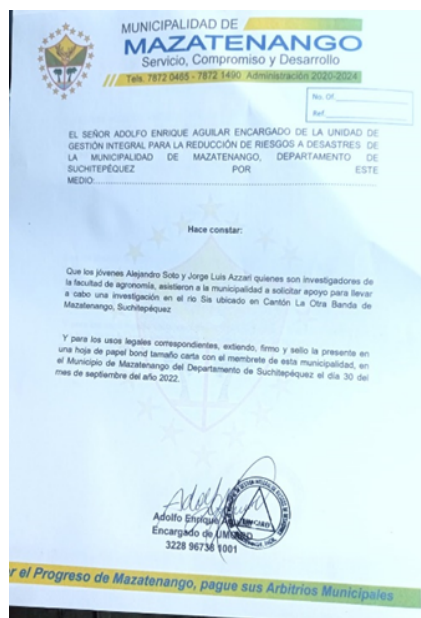
Dirección General de Investigación –DIGI-



Fuente: elaboración propia.

Fuente: elaboración propia.

Figura. 67 Aval de visita, Municipalidad de Mazatenango, Suchitepéquez



Fuente: elaboración propia.

Figura. 68 Recorrido de campo, Cuenca de los ríos Sis-Icán, Suchitepéquez



Fuente: elaboración propia.

Figura. 69 Recorrido de campo, Cuenca de los ríos Sis-Icán, Suchitepéquez

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-



Fuente: elaboración propia

Figura. 70 Identificación de puntos susceptibles a desastres por inundación, Cuenca de los ríos Sis-Icán, Suchitepéquez



Fuente: elaboración propia

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Figura. 71 Georreferenciación de puntos, Cuenca de los ríos Sis-Icán, Suchitepéquez



Fuente: elaboración propia

Figura. 72 . Observación del comportamiento del caudal, Cuenca de los ríos Sis-Icán, Suchitepéquez



Fuente: elaboración propia

Figura. 73 Acompañamiento, Municipalidad de Mazatenango, Suchitepéquez



Fuente: elaboración propia

Figura. 74 Visita a la municipalidad de San José La Máquina.

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-



Fuente: elaboración propia

Figura. 75 . Plática y planificación de trabajo con la encargada de la Unidad de Gestión Ambiental Municipal de San José La Máquina (Leidy Romero).



Fuente: elaboración propia

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Cuadro 43 Registro caudales estación La Máquina 2003-2010

AÑOS	2003-2004		2004-2005		2005-2006		2006-2007		2007-2008		2008-2009		2009-2010	
	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M
MAYO	135.17	4.36	126.97	4.10	257.62	8.31	195.80	6.32	156.70	5.05	153.64	4.96	153.05	4.94
JUNIO	261.30	8.71	173.96	5.80	1742.78	58.09	378.28	12.61	210.71	7.02	241.07	8.04	208.38	6.95
JULIO	188.05	6.07	171.69	5.54	351.32	11.33	349.45	11.27	192.86	6.22	282.03	9.10	153.88	4.96
AGOSTO	179.26	5.78	190.11	6.13	207.29	6.69	301.63	9.73	297.87	9.61	381.09	12.29	168.65	5.44
SEPTIEMBRE	272.19	9.07	279.18	9.31	408.68	13.62	303.87	10.13	335.16	11.17	342.67	11.42	220.88	7.36
OCTUBRE	343.14	11.07	282.63	9.12	815.70	26.86	306.93	9.90	428.02	13.81	364.95	11.77	224.30	7.24
NOVIEMBRE	165.46	5.52	78.81	2.63	260.64	8.69	200.59	6.69	177.72	5.92	160.10	5.34	229.53	7.65
DICIEMBRE	83.15	2.68	41.57	1.34	190.56	6.15	126.96	4.10	140.17	4.52	114.49	3.69	142.55	4.60
ENERO	57.87	1.87	40.10	1.29	184.26	5.94	103.04	3.32	128.80	4.15	99.74	3.22	129.84	4.19
FEBRERO	47.61	1.64	38.77	1.38	145.95	5.21	85.55	3.06	116.68	4.02	82.61	2.95	108.84	3.89
MARZO	52.22	1.68	51.86	1.67	154.44	4.98	90.50	2.92	121.89	3.93	87.10	2.81	114.40	3.69
ABRIL	73.96	2.47	90.55	3.02	167.33	5.58	89.01	2.97	179.66	5.99	77.50	2.58	120.99	4.03
SUMATORIA	1859.37	5.08	1566.19	4.28	4886.56	13.45	2531.61	6.92	2486.24	6.79	2387.01	6.51	1975.29	5.41

Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Cuadro 44 Registro caudales estación La Máquina 2010 -2018

AÑOS	2010-2011		2011-2012		2012-2013		2013-2014		2014-2015		2015-2016		2016-2017		2017-2018	
MESES	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M
MAYO	324.88	10.48	147.71	4.76	170.53	5.50	125.96	4.06	170.92	5.51	107.54	3.47	96.23	3.10	79.43	2.56
JUNIO	514.77	17.16	227.91	7.60	158.47	5.28	210.20	7.01	192.74	6.42	136.90	4.56	200.23	6.67	123.16	4.11
JULIO	644.61	20.79	269.64	8.70	143.34	4.62	160.31	5.17	110.65	3.57	103.59	3.34	105.93	3.42	79.66	2.57
AGOSTO	596.76	19.25	240.55	7.76	185.75	5.99	208.87	6.74	93.83	3.03	106.16	3.42	99.54	3.21	81.03	2.61
SEPTIEMBRE	524.02	17.47	230.98	7.70	168.91	5.63	240.00	8.00	170.63	5.69	167.48	5.58	155.08	5.17	122.29	4.08
OCTUBRE	227.00	7.32	355.57	11.47	325.54	10.50	378.82	12.22	249.27	8.04	221.99	7.16	161.99	5.23	117.37	3.79
NOVIEMBRE	137.81	4.59	127.42	4.25	158.02	5.27	193.23	6.44	159.56	5.32	217.11	7.24	101.78	3.39	55.24	1.84
DICIEMBRE	114.95	3.71	99.16	3.20	108.87	3.51	122.06	3.94	80.01	2.58	114.98	3.71	50.59	1.63	30.41	0.98
ENERO	80.32	2.59	91.28	2.94	89.26	2.88	90.19	2.91	61.63	1.99	58.83	1.90	20.25	0.65	21.82	0.70
FEBRERO	65.36	2.33	80.30	2.77	73.12	2.61	74.98	2.68	56.15	2.01	39.69	1.37	16.85	0.60	19.31	0.69
MARZO	78.76	2.54	85.65	2.76	81.86	2.64	93.31	3.01	63.32	2.04	37.42	1.21	28.94	0.93	19.67	0.63
ABRIL	90.57	3.02	88.57	2.95	79.45	2.65	77.44	2.58	81.82	2.73	34.15	1.14	25.17	0.84	39.74	1.32
SUMATORIA	3399.81	9.27	2044.73	5.57	1743.12	4.76	1975.37	5.40	1490.53	4.08	1345.84	3.68	1062.58	2.90	789.12	2.16

Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Cuadro 45 Registro caudales estación La Máquina 2018 - 2022 y resumen histórico

AÑOS	2018-2019		2019-2020		2020-2021		2021-2022		TOTAL MENSUAL AÑOS	
MESES	ACUM		ACUM		ACUM		ACUM		ACUM	PROM
MAYO	98.65416816	3.1823925	75.3958070 7	2.43212280 9	73.254731	2.363055832	90.08024288	2.905814287	2739.53637 5	4.65116532 2
JUNIO	125.52	4.18	112.82	3.76	154.38	5.15	130.80	4.36	5504.35201 3	9.65675791 2
JULIO	59.74	1.93	69.94	2.26	105.32	3.40	95.63	3.08	3637.64909 4	6.17597469 3
AGOSTO	126.11	4.07	88.07	2.84	105.69	3.41	158.88	5.13	3817.14901 2	6.48072837 4
SEPTIEMBRE	120.33	4.01	108.22	3.61	153.92	5.13	174.04	5.80	4498.54589 5	7.89218578 2
OCTUBRE	187.65	6.05	155.20	5.01	157.32	5.07	119.54	3.86	5422.93537 6	9.23581557 9
NOVIEMBRE	59.81	1.99	81.86	2.73	84.96	2.83	70.20	2.34	2719.84109 9	4.77165105 5
DICIEMBRE	69.00	2.23	42.50	1.37	50.73	1.64	38.78	1.25	1761.48315 7	2.99063354 3
ENERO	40.63	1.31	33.66	1.09	1.88	0.06	31.68	1.02	1365.08919 4	2.31763869 9
FEBRERO	33.00	1.17	25.43	0.88	28.82	1.03	25.00	0.89	1164.03173 1	2.16731107 7

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

MARZO	22.79	0.74	22.65	0.73	31.77	1.02	29.61	0.96	1268.14950	2.15305518
ABRIL	18.62	0.62	27.66	0.92	46.69	1.56	32.84	1.09	1441.70282	2.52930320
SUMATORIA	961.87	2.62	843.40	2.30	994.73	2.72	997.09	2.72		

Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH

Cuadro 46 Registro caudales estación La Franja 2003-2010

AÑOS	2003-2004		2004-2005		2005-2006		2006-2007		2007-2008		2008-2009		2009-2010	
	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M
MAYO	157.40	5.08	98.15	3.17	162.27	5.23	238.15	7.68	148.87	4.80	339.35	10.95	274.81	8.86
JUNIO	609.83	20.33	187.66	6.26	396.86	13.23	457.90	15.26	327.23	10.91	654.74	21.82	537.40	17.91
JULIO	488.26	15.75	200.95	6.48	450.75	14.54	313.84	10.12	225.97	7.29	747.48	24.11	413.87	13.35
AGOSTO	377.69	12.18	294.43	9.50	331.09	10.68	312.26	10.07	509.61	16.44	881.15	28.42	452.71	14.60
SEPTIEMBRE	622.47	20.75	430.09	14.34	395.88	13.20	329.03	10.97	638.04	21.27	847.04	29.21	536.80	17.89
OCTUBRE	603.10	19.45	443.11	14.29	927.73	29.93	480.31	15.49	568.98	18.35	644.07	20.78	584.27	18.85
NOVIEMBRE	284.17	9.47	145.38	4.85	255.70	8.52	340.12	11.34	172.45	5.75	295.09	9.84	502.11	16.74
DICIEMBRE	108.36	3.50	52.60	1.70	170.39	5.50	89.12	2.87	78.59	2.54	179.45	5.79	251.69	8.12

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

ENERO	46.80	1.51	23.89	0.77	158.26	5.11	76.32	2.46	52.92	1.71	136.46	4.40	189.07	6.10
FEBRERO	25.05	0.86	11.71	0.42	102.10	3.65	46.29	1.64	41.59	1.43	106.73	3.81	151.49	5.41
MARZO	30.58	0.99	24.01	0.77	103.06	3.32	52.55	1.70	45.00	1.45	112.97	3.64	139.95	4.51
ABRIL	26.57	0.89	44.37	1.48	131.26	4.38	67.40	2.25	99.55	3.32	103.41	3.45	189.54	6.32
SUMATORIA	3380.2	9.23	1956.3	5.33	3585.3	9.77	2803.2	7.66	2908.8	7.94	5047.9	13.85	4223.7	11.56
	8		5		6		9		2		6		0	

Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH

Cuadro 47 Registro caudales estación La Máquina 2010 -2018

AÑOS	2010-2 011		2011-2 012		2012-2 013		2013-2 014		2014-2 015		2015-2 016		2016-2 017		2017-2 018	
MESES	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M
MAYO	540.43	17.43	372.52	12.02	382.82	12.35	338.00	10.90	353.66	11.41	202.08	6.52	623.55	20.11	519.18	16.75

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

JUNIO	1004.5 5	33.49	518.11	17.27	428.99	14.30	601.31	20.04	446.51	14.88	325.03	10.83	743.90	24.80	652.81	21.76
JULIO	795.94	25.68	519.49	16.76	323.76	10.44	595.66	19.21	211.55	6.82	178.78	5.77	601.60	19.41	411.64	13.28
AGOSTO	944.64	30.47	630.85	20.35	611.08	19.71	522.34	16.85	203.46	6.56	242.31	7.82	587.85	18.96	414.64	13.38
SEPTIEMBRE	1174.2 4	39.14	791.72	26.39	545.76	18.19	587.25	19.58	468.14	15.60	408.92	13.63	1234.5 7	41.15	687.49	22.92
OCTUBRE	636.45	20.53	800.78	25.83	794.50	25.63	641.05	20.68	542.40	17.50	626.61	20.21	782.43	25.24	499.62	16.12
NOVIEMBRE	366.53	12.22	310.98	10.37	401.46	13.38	295.04	9.83	252.62	8.42	571.17	19.04	527.47	17.58	241.59	8.05
DICIEMBRE	206.40	6.66	211.44	6.82	250.07	8.07	152.68	4.93	119.96	3.87	674.97	21.77	263.02	8.48	109.89	3.54
ENERO	124.49	4.02	182.39	5.88	165.32	5.33	91.50	2.95	90.39	2.92	563.67	18.18	173.90	5.61	170.86	5.51
FEBRERO	127.35	4.55	139.09	4.80	110.21	3.94	70.22	2.51	69.75	2.49	489.65	16.88	149.16	5.33	43.04	1.54
MARZO	165.20	5.33	126.91	4.09	92.06	2.97	97.52	3.15	90.10	2.91	507.85	16.38	173.18	5.59	68.65	2.21
ABRIL	144.06	4.80	204.71	6.82	99.07	3.30	84.54	2.82	94.30	3.14	480.94	16.03	155.14	5.17	92.80	3.09
SUMATORIA	6230.3	17.03	4809	13.12	4205.1	11.47	4077.1	11.12	2942.8	8.044	5272	14.42	6015.8	16.45	3912.2	10.68

Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH

Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

AÑOS	2018-2019		2019-2020		2020-2021		2021-2022		TOTAL MENSUAL AÑOS	
	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PRO M	ACUM	PROM
MAYO	466.70	15.05	127.89	4.13	392.65	12.67	387.93	12.51	6126.41	10.40
JUNIO	376.83	12.56	591.18	19.71	220.97	7.37	80.60	2.69	9162.44	16.07
JULIO	111.57	3.60	374.94	12.09	567.13	18.90	436.28	14.07	7969.47	13.56
AGOSTO	205.74	6.64	402.74	12.99	612.17	19.75	552.97	17.84	9089.73	15.43
SEPTIEMBRE	151.50	5.05	138.95	4.63	225.94	7.53	227.92	7.60	10441.74	18.37
OCTUBRE	162.98	5.26	292.66	9.44	152.88	4.93	639.41	20.63	10823.34	18.38
NOVIEMBRE	446.74	14.89	273.83	9.13	395.27	13.18	51.95	1.73	6129.69	10.75
DICIEMBRE	349.29	11.27	136.32	4.40	229.90	7.42	207.03	6.68	3841.16	6.52
ENERO	302.81	9.77	90.95	2.93	165.32	5.33	142.32	4.59	2947.63	5.00
FEBRERO	227.29	7.92	69.98	2.50	132.04	4.67	114.70	4.10	2227.43	4.13
MARZO	249.89	8.06	93.81	3.03	131.03	4.23	244.23	7.88	2548.56	4.33
ABRIL	242.96	8.10	89.42	2.98	159.34	5.31	131.74	4.39	2641.12	4.63
SUMATORIA	3294.30	9.01	2682.68	7.33	3384.63	9.27	3217.08	8.73		

Fuente: elaboración propia con datos de INSIVUMEH

Cuadro 49 Cálculo de longitud media de corrientes.

	Km	Log
Lu1	8.39	0.924
Lu2	8.94	0.951
Lu3	9.53	0.979
Lu4	9.87	0.994
Lu	8.61	0.935

Fuente: elaboración propia

15 Vinculación

En la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos, existe una vinculación con la Universidad de Costa Rica, Universidad de Waterloo de Canadá y la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, en la que se ha formado la Red Centroamericana de Manejo de Recursos Hídricos (CARA). Esta asociación del programa ha implementado una sociedad académica en toda Centroamérica para proyectos curriculares de maestría en las universidades donde una ciencia muy importante y focal es la hidrología, para el intercambio académico y de resultados de investigaciones.

La Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos ha abierto en el año 2,021 una maestría en Manejo de Cuencas, de modo que la investigación estará vinculada en una zona de estudio recurrente.

Así mismo, la Universidad de San Carlos tiene un convenio con la Universidad Máximo Gómez Báez de Ciego de Ávila de Cuba, para la formación de doctores en ciencias y el intercambio académico en el Centro de Estudios Hidrotécnicos, donde se da también la cooperación para la publicación de artículos científicos en revistas internacionales.

16 Estrategia de difusión, divulgación y protección intelectual

Los resultados de la investigación se difundieron principalmente por medio de un manuscrito científico. En todos los medios se darán los créditos correspondientes a la Universidad de San Carlos de Guatemala, a la Dirección General de Investigación -DIGI- quien cofinanció el presente proyecto y al Instituto de Investigaciones Agronómicas y Ambientales- IIAA- de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala -FAUSAC-.

Los resultados se publicarán en medios locales como la Revista Tikalia de la Facultad de Agronomía y la Revista Ciencia, Tecnología y Salud de la Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos.

La Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala también tiene la posibilidad de publicar artículos científicos dentro de la Red Centroamericana de Manejo de Recursos Hídricos (CARA) y en revistas de México

17 Aporte de la propuesta de investigación a los ODS:

En el avance de la nueva Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible implementados por la ONU en septiembre del 2015, se definieron 17 objetivos (ODS). La propuesta del presente estudio va en función del objetivo 13: **Tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos**. Este objetivo añade 3 metas primordiales en relación a el manejo de áreas naturales y focalizando el dinamismo social, donde la 13.1 señala el fortalecimiento de resiliencia y adaptación a los riesgos relacionados con el clima y desastres naturales, 13.2 en promover políticas, estrategias y planes relativos al cambio climático y el 13.3 educación y sensibilización a través de movilización de recursos económicos y la gestión del cambio climático para aumentar la capacidad de planificación y mayor eficacia haciendo hincapié en comunidades locales y marginadas. (UNESCO, 2016).



La investigación contribuye a aportar una línea base del conocimiento técnico a la problemática del cambio climático, el ordenamiento territorial y manejo dentro de la cuenca de los ríos Sis-Icán, e incentivando a su vez, el involucramiento de los actores pertinentes del área. Esto permitirá presentar proyectos para la gestión de riesgos, promoviendo planes de respuesta y resiliencia.

El estudio también promueve la integración y la organización de los sectores sociales, entidades públicas y privadas para la formación de un grupo de autogestión en el área. Así mismo, una base para establecer una autoridad de manejo de la cuenca de los ríos Sis-Icán. Esto es muy factible ya que el departamento de Suchitepéquez representa más del 80% de injerencia en la división política territorial.

Informe final proyecto de investigación 2022


Dirección General de Investigación –DIGI-

18 Orden de pago final (incluir únicamente al personal con contrato vigente)

Nombres y apellidos	Categoría (investigador /auxiliar)	Registro de personal	Procede pago de mes (Sí / No)	Firma
Pedro Alejandro Soto Reyes	Investigador	20150884		
Jorge Luis Azzari Dominguez	Auxiliar II	20220650		


19 Declaración del Coordinador(a) del proyecto de investigación

El Coordinador de proyecto de investigación con base en el *Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación*, artículos 13 y 20, deja constancia que el personal contratado para el proyecto de investigación que coordina ha cumplido a satisfacción con la entrega de informes individuales por lo que es procedente hacer efectivo el pago correspondiente.


Dr. Tomás Antonio Padilla Cámara	 Firma
Fecha: 28/02/2023	

20 Aval del Director(a) del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario

De conformidad con el artículo 13 y 19 del *Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación* otorgo el aval al presente informe mensual de las actividades realizadas en el proyecto “**Estudio hidrológico e hidráulico para modelación a inundaciones en la cuenca de los ríos Sis-Icán y propuesta preventiva a desastres**”, en mi calidad de **Director del Instituto de Investigaciones Agronómicas y Ambientales** mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

<p>Vo.Bo. Ing. Agro. Calos López Búcaro</p>	 <p>Ing. Agro. Carlos López Búcaro.</p> <p>Firma</p>
<p>Fecha: 28/02/2023</p>	

21 Visado de la Dirección General de Investigación

<p>Vo.Bo. M. Sc. Andrea Rodas Coordinador del Programa de Investigación en Recursos Naturales y Ambiente</p>	 <p>Firma</p>
--	--


Informe final proyecto de investigación 2022

Dirección General de Investigación –DIGI-

Fecha: 28/02/2023

Vo.Bo. Ing. Agr. Julio Rufino Salazar
Coordinador General de Programas Universitarios
de Investigación

Firma


Ing. MARIANO Julio Rufino Salazar Pérez
Coordinador General de Programas de
Investigación, Digi-Usac

Fecha: 28/02/2023