



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias (Hidrología Ambiental)

Modelación hidráulica para la zonificación de peligro por inundación en la  
cuenca de San José del Cabo, Baja California Sur, México.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

Geol. Javier Alexis Trasviña Carrillo

Dirigido por:

Dr. Eusebio Ventura Ramos

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos  
Presidente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Jobst Wurl  
Secretario

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Martín Alfonso Gutiérrez López  
Vocal

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. José Antonio Quevedo Tiznado  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortázar  
Suplente

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
Dr. Manuel Toledano Ayala.  
Director de la facultad

\_\_\_\_\_  
Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.

# Resumen

La región de San José del Cabo, Baja California Sur, México, es periódicamente afectada por eventos de ciclones tropicales. La ocurrencia de dichos fenómenos en la región, así como la mala planeación urbana asociada al incremento poblacional, a traído consigo repercusiones que van desde daños a estructuras residenciales y viales, hasta pérdida de vidas humanas. El área de estudio carece de una modelación hidráulica a detalle asociada a fenómenos de ciclones tropicales para la zonificación del peligro, así mismo, los grandes caudales asociados a la incidencia de estos eventos permiten el estudio de efecto de la potencia de corrientes sobre los cambios geomorfológicos en los arroyos de la zona. Debido a esto, se sugiere la realización de una caracterización de peligro por inundaciones asociada a una modelación hidráulica y a una cuantificación de cambios en la geomorfología de los arroyos. La metodología engloba desde el procesamiento de la información hidrometeorológica hasta, hasta una modelación hidráulica y el análisis estadístico de variaciones en la morfología de los cauces. Con ello fue posible la caracterización espacial del área de estudio por su peligrosidad. De acuerdo con los resultados, el arroyo El pedregal presenta un mayor número de zonas de alta peligrosidad, comparada con los arroyos el Saltito y El Cajón. Por otra parte, es apreciable una correlación positiva entre el ensanchamiento de arroyos y la potencia total de corrientes para zonas en las que la potencia de corrientes total es menor a  $4,700 \text{ W/m}$ .

**Palabras clave:** modelación hidráulica, potencia de corrientes total, peligro por inundación

## **Abstract**

San José del Cabo región, in Baja California Sur State, Mexico, is periodically affected by tropical ciclones. This events, along with bad urban area planning associated with a high rate of population growth, bring with it repercussions like structural damages to residents and streets and even human losses. The study area lacks hydraulic modeling of tropical cyclone events for hazard characterization. Likewise, the large runoff volumes produced by these events allow for the study the relationship between stream power and geomorphological changes in rivers. The methodology encompassing from the processing of meteorological information to the hydraulic modelling and the statistical analysis of the morphology variation of the river. According to the results, El Pedregal river presents the highest number of high hazard zones, when compared with the El Saltito and El Cajón River. On the other hand, a positive correlation between the increase of the river width and total stream power was noted for zones with values of total stream power less than 4,700 W/m

**Keywords:** hidraulic modelling, total stream power, flood hazard

# Índice

<b>1. Introducción.....</b>	<b>16</b>
1.1 Justificación.....	17
1.2 Hipótesis.....	18
1.3 Objetivos .....	18
1.3.1 Objetivos específicos .....	18
<b>2. Antecedentes.....</b>	<b>20</b>
2.1 Área de estudio.....	20
2.2 Literatura consultada .....	21
2.2.1 Panorama general sobre riesgo, peligro, vulnerabilidad y exposición.....	22
2.2.2 Aspectos generales sobre ciclones tropicales.....	23
2.2.3 Análisis de frecuencia para eventos hidrometeorológicos .....	26
2.2.4 Generalidades sobre estudio de peligro por inundación .....	30
2.3.5 Metodologías de modelación hidrológica e hidráulica .....	33
2.3.6 Dinámica fluvial y potencia de corrientes.....	43
2.3.7 Descripción de programas utilizados .....	47
2.3 Descripción del área de estudio.....	47

2.3.1	Hidrología .....	48
2.3.2	Clima .....	49
2.3.3	Geología .....	52
2.3.4	Tipo de suelo .....	53
2.3.5	Uso de suelo .....	54
<b>3.</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>56</b>
3.1	Procesamiento de la información hidrometeorológica.....	60
3.2	Análisis morfométrico y número de curva.....	64
3.3	Encuestas e información histórica.....	66
3.3	Modelación hidrológica de las cuencas de aporte .....	67
3.4	Modelación hidráulica.....	70
3.5	Identificación de variaciones geomorfológicas de los cauces y ajuste de ecuaciones de potencia.....	71
3.6	Caracterización de peligro y generación de mapas .....	74
<b>4.</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>75</b>
4.1	Procesamiento de la información hidrometeorológica.....	75
4.2	Análisis morfométrico y de número de curva .....	82
4.2.6	Análisis morfométrico.....	82
4.2.7	Obtención del parámetro de número de curva .....	84

4.3	Encuestas e información histórica.....	86
4.4	Modelación hidrológica de las cuencas de aporte .....	89
4.5	Modelación hidráulica.....	94
4.6	Identificación de cambios en la morfología de arroyos y ajuste de ecuaciones de potencia.....	96
4.7	Caracterización de peligrosidad .....	98
4.7.1	Análisis de la modelación de tormentas de diseño sobre las áreas propuestas. 98	
4.7.2	Caracterización y análisis de peligrosidad utilizando los modelos de flujo.	108
<b>5.</b>	<b>Conclusión.....</b>	<b>116</b>
<b>7.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>118</b>
<b>8.</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>132</b>

# Índice de Figuras

Dirección General de Bibliotecas UAQ

<b>Figura 1.-</b> Área de estudio, cuenca hidrológica de San José del Cabo (CHSJC), Baja California Sur .....	20
<b>Figura 2</b> Ejemplo de diseño cartográfico para la identificación de peligro y riesgo. ....	37
<b>Figura 3</b> Hidrografía y topografía de la cuenca de la CHSJC.....	49
<b>Figura 4</b> Distribución de tipos de clima en el interior de la CHSJC de acuerdo con Köppen, modificada por García (García, 1973) .....	51
<b>Figura 5</b> Distribución de la geología y geológico-estructural en el interior de la cuenca de San José del Cabo, tomado de (Martinez-Gutierrez et al., 2002) .....	53
<b>Figura 6</b> Tipos de suelo en el interior de la cuenca de San José del Cabo de acuerdo con (INIFAP, 1995) .....	54
<b>Figura 7</b> Distribución del uso de suelo en el interior de la cuenca de San José del Cabo ..	55
Figura 8.- modelo cartográfico de las etapas del desarrollo del trabajo: 1.- Recopilación de la información, 2.- Procesamiento de la información hidrometeorológica, 3.- Análisis morfométrico y obtención de número de curva, 4.- Modelación hidrológica de las cuencas de aporte, 5.- Modelación hidráulica, 6.- Análisis de variaciones en el ancho del cauce, 7.- Obtención de valores de potencia de corrientes, 8.- Análisis de variaciones en el cauce en función de la potencia de corrientes y 9.- Caracterización de peligro y generación de mapas. ....	58
<b>Figura 9</b> Comparación gráfica de datos extraídos de cada estación con datos ajustados de forma acumulativa para los ajustes de la distribución Gumbel.....	76
<b>Figura 10</b> Comparación gráfica de datos extraídos de cada estación con datos ajustados de forma acumulativa para los ajustes de la distribución Gumbel.....	76
<b>Figura 11</b> Valores de precipitación de diseño para la subcuenca El Saltito. Cada tormenta se categoriza por periodo de retorno (tr) en años. ....	80



<b>Figura 12</b> Valores de precipitación de diseño para la subcuenca El Cajón. Cada evento se categoriza por periodo de retorno (tr) en años. ....	81
<b>Figura 13</b> Valores de precipitación diseño para la subcuenca El Pedregal. Cada evento se categoriza por periodo de retorno (tr) en años. ....	81
<b>Figura 14</b> Altura del agua reportada durante el H. Odile, mediante encuestas realizadas. Para el Arroyo El Saltito. ....	87
<b>Figura 15</b> Altura del agua reportada durante el H. Odile, mediante encuestas realizadas. Para el Arroyo El Pedregal.....	87
<b>Figura 16</b> Altura del agua reportada durante el H. Odile, mediante encuestas realizadas. Para el Arroyo El Cajón. ....	88
<b>Figura 17</b> Variaciones de caudales asociado a variaciones de absorción inicial de 0.1 a 0.2 .....	90
<b>Figura 18</b> Variación de caudal asociada a variaciones de número de curva.....	90
<b>Figura 19</b> Escurrimiento y precipitación para la subcuenca el Saltito, asociada a diferentes periodos de retorno.....	92
<b>Figura 20</b> Escurrimiento y precipitación para la subcuenca el Cajon, asociada a diferentes periodos de retorno.....	92
<b>Figura 21</b> Escurrimiento y precipitación para la subcuenca el Pedregal, asociada a diferentes periodos de retorno.....	93
<b>Figura 22</b> Comparación de niveles de altura agua encuestados contra niveles de agua modelados (metros) para el evento huracán Odile (2014). ....	95
<b>Figura 23</b> Comparación entre la suma de cuadrados dentro de cada grupo y el número de clusters utilizados .....	96

<b>Figura 24</b> Relación entre potencia de corrientes y diferencia de corrientes .....	97
<b>Figura 25</b> Variación de valores de altura del agua para el arroyo El Saltito periodo de retorno de 10 años .....	99
<b>Figura 26</b> Variación de valores de velocidad para el arroyo El Saltito periodo de retorno de 10 años .....	99
<b>Figura 27</b> Variación de valores de altura del agua para el arroyo El Pedregal periodo de retorno de 10 años .....	100
<b>Figura 28</b> Variación de valores de velocidad para el arroyo El Pedregal periodo de retorno de 10 años.....	100
<b>Figura 29</b> Variación de valores de altura del agua para el arroyo El Cajón periodo de retorno de 10 años .....	101
<b>Figura 30</b> Variación de valores de velocidad para el arroyo El Cajón periodo de retorno de 10 años .....	101
<b>Figura 31</b> Variación de valores de altura del agua para el arroyo El Saltito periodo de retorno de 100 años .....	102
<b>Figura 32</b> Variación de valores de velocidad para el arroyo El Saltito periodo de retorno de 100 años .....	102
<b>Figura 33</b> Variación de valores de altura del agua para el arroyo El Pedregal periodo de retorno de 100 años .....	103
<b>Figura 34</b> Variación de valores de velocidad para el arroyo El Pedregal periodo de retorno de 100 años.....	103
<b>Figura 35</b> Variación de valores de altura del agua para el arroyo El Cajón periodo de retorno de 100 años .....	104

<b>Figura 36</b> Variación de valores de velocidad para el arroyo El Cajón periodo de retorno de 100 años .....	104
<b>Figura 37</b> Variación de valores de altura del agua para el arroyo El Saltito periodo de retorno de 500 años .....	105
<b>Figura 38</b> Variación de valores de velocidad para el arroyo El Saltito periodo de retorno de 500 años .....	105
<b>Figura 39</b> Variación de valores de altura del agua para el arroyo El Pedregal periodo de retorno de 500 años .....	106
<b>Figura 40</b> Variación de valores de velocidad para el arroyo El Pedregal periodo de retorno de 500 años.....	106
<b>Figura 41</b> Variación de valores de altura del agua para el arroyo El Cajón periodo de retorno de 500 años .....	107
<b>Figura 42</b> Variación de valores de velocidad para el arroyo El Cajón periodo de retorno de 500 años .....	107
<b>Figura 43</b> Caracterización de valores de peligro para el arroyo El Pedregal, para un periodo de retorno de 10 años.....	109
<b>Figura 44</b> Caracterización de valores de peligro para el arroyo El Pedregal, para un periodo de retorno de 100 años.....	110
<b>Figura 45</b> Caracterización de valores de peligro para el arroyo El Pedregal, para un periodo de retorno de 500 años.....	110
<b>Figura 46</b> Caracterización de valores de peligro para el arroyo El Cajon, para un periodo de retorno de 10 años.....	111

<b>Figura 47</b> Caracterización de valores de peligro para el arroyo El Cajón, para un periodo de retorno de 100 años. ....	111
<b>Figura 48</b> Caracterización de valores de peligro para el arroyo El Cajón, para un periodo de retorno de 500 años. ....	112
<b>Figura 49</b> Caracterización de valores de peligro para el arroyo El Saltito, para un periodo de retorno de 10 años. ....	112
<b>Figura 50</b> Caracterización de valores de peligro para el arroyo El Saltito, para un periodo de retorno de 100 años. ....	113
<b>Figura 51</b> Caracterización de valores de peligro para el arroyo El Saltito, para un periodo de retorno de 500 años. ....	113
<b>Figura 52</b> Delimitación de zonas con valor influencia de crecimiento sobre los valores de potencia de corrientes para el arroyo El Saltito. Zonas de color rojo más intenso representan zonas donde la variación es más grande a un cierto valor de potencia. ....	115
<b>Figura 53</b> Delimitación de zonas con valor influencia de crecimiento sobre los valores de potencia de corrientes para el arroyo El Pedregal. Zonas de color rojo más intenso representan zonas donde la variación es más grande a un cierto valor de potencia. ....	115
<b>Figura 54</b> Delimitación de zonas con valor influencia de crecimiento sobre los valores de potencia de corrientes para el arroyo El Cajón. Zonas de color rojo más intenso representan zonas donde la variación es más grande a un cierto valor de potencia. ....	116

# Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Ejemplos de algunos de los ciclones tropicales que han producido volúmenes de precipitación importante en México.....	25
<b>Tabla 2</b> Categorización de peligrosidad de acuerdo con Abt et al., (1989); Rescdam, (2000); Wade et al., (2005). .....	39
<b>Tabla 3</b> Listado de estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio (CONAGUA, 2018) .....	61
<b>Tabla 4</b> Resultados de las pruebas estadísticas para probar la confiabilidad de las estaciones meteorológicas. Los valores presentados son pi values de las distintas pruebas.75	
<b>Tabla 5</b> Resultados de las pruebas Kolmogorov Smirnov y Von Cramer para la bondad de ajuste de los modelos de probabilidad. Se muestran los pi-values por estación meteorológica.....	75
<b>Tabla 6</b> Resultados de la estimación de valores de precipitación por periodos de retorno para la estación Santa Anita.....	77
<b>Tabla 7</b> Resultados de la estimación de valores de precipitación por periodos de retorno para la estación La Soledad.....	77
<b>Tabla 8</b> Resultados de la estimación de valores de precipitación por periodos de retorno para la estación San Felipe.....	78
<b>Tabla 9</b> Resultados de la estimación de valores de precipitación por periodos de retorno para la estación San José.....	78
<b>Tabla 10</b> Ponderación de la influencia de cada estación analizada por subcuenca para cada estación meteorológica. Estación La Soledad fue omitida debido a que obtuvo 0% en todos los casos. ....	79

<b>Tabla 11</b> Valores de precipitación acumulada en 24 horas ponderada para cada subcuenca analizada.....	79
<b>Tabla 12</b> Parámetros e índices morfométricos catalogados como básicos. “Ac” = área de cada subcuenca (km <sup>2</sup> ); “Pc” = perímetro de cada subcuenca (km); “Lc” = largo de cada subcuenca (km); “Lco” = largo total de corrientes (km); “Rc” = relieve de la cuenca (m); “Pp” = pendiente promedio de la cuenca (grados); “Ppc” = pendiente promedio en el cauce principal (grados). .....	82
<b>Tabla 13</b> Parámetros e índices morfométricos catalogados como derivados. “Fc” = frecuencia de corrientes; “Df” = densidad fluvial (km/km <sup>2</sup> ); “Td” = textura de drenaje; “Te” = tasa de elongación; “Ff” = factor de forma.....	83
<b>Tabla 14</b> Ponderación de número de curva por área en subcuenca El Saltito.....	85
<b>Tabla 15</b> Ponderación de número de curva por área en subcuenca El Pedregal .....	85
<b>Tabla 16</b> Ponderación de número de curva por área en la subcuenca El Cajón.....	85
<b>Tabla 17</b> Coeficientes de regresión lineal resultados del análisis de sensibilidad, asociado las variables CN, área, absorción inicial y tiempo de retardo con respecto al caudal pico..	89
<b>Tabla 18</b> Coeficientes de regresión lineal resultados del análisis de sensibilidad, asociado las variables CN, área, absorción inicial y tiempo de retardo con respecto al caudal pico..	89
<b>Tabla 19.-</b> Resultado de caudales pico obtenidos mediante modelación (MOD) y caudales pico obtenidos mediante relaciones de área (CPP). Unidades en m <sup>3</sup> *s <sup>-1</sup> .....	91
<b>Tabla 20</b> Valores de número de curva, absorción inicial y coeficientes de correlación (Spearman) para cada subcuenca obtenidos de la calibración. ....	91
<b>Tabla 21</b> Caudales picos asociados a cada uno de los escurrimientos de diseño asociados a cada una de las cuencas.....	93

<b>Tabla 22</b> Comparación de zonas afectadas para diferentes periodos de retorno. Los asteriscos señalan zonas en las que si se muestra afectación de acuerdo con la clasificación utilizada. ....	108
<b>Tabla 23</b> Comparación de zonas afectadas para diferentes periodos de retorno. Los asteriscos señalan zonas en las que si se muestra afectación de acuerdo con la clasificación utilizada. ....	108
<b>Tabla 24</b> Comparación de zonas afectadas para diferentes periodos de retorno. Los asteriscos señalan zonas en las que si se muestra afectación de acuerdo con la clasificación utilizada. ....	109
<b>Tabla 25</b> Relación entre zonas que se ven afectadas por Incremento en el ancho de corrientes y zonas de peligrosidad. ....	114

Dirección General de Bibliotecas UNO

## 1. INTRODUCCIÓN

La región de San José del Cabo se encuentra en la zona sur del estado de Baja California Sur (B. C. S.), en la península de Baja California, al noroeste de México y es uno de los destinos turísticos más importantes de México. Esta región se ve periódicamente afectada por eventos de ciclones tropicales. La ocurrencia de dichos fenómenos en la región, la mala planeación urbana asociada al incremento poblacional y los efectos de los grandes volúmenes de agua sobre la morfología de los arroyos, traen consigo repercusiones que van desde daños a cimientos de estructuras residenciales y viales, caída de edificios, pérdidas económicas que alcanzan los miles de millones de pesos, e inclusive, pérdida de vidas humanas.

En los últimos años la tasa de crecimiento poblacional anual promedio del municipio de Los Cabos ha ido en aumento. Por ejemplo, para el lapso 2000 - 2010, la tasa de crecimiento poblacional para la región fue de 82 % mayor a la media estatal y nacional para ese periodo (INEGI, 2001, 2011). Como producto del incremento en la densidad de población, se obtiene un incremento en la demanda de recursos y servicios, así como en la demanda de creación de viviendas para la expansión territorial.

El peligro de inundaciones en una cierta región es, por lo general, atribuido a lluvias de naturaleza torrencial. Esto es especialmente cierto para cuencas pequeñas con pendientes pronunciadas, con baja permeabilidad geológica y con ocurrencia de lluvias intensas (Kourgialas y Karatzas, 2016). En estos casos se pueden originar inundaciones relámpago, que debido a que tienen un tiempo de concentración extremadamente corto, son difíciles de predecir y tratar (Kourgialas y Karatzas, 2016). En la región los valores de precipitación durante dichos eventos pueden alcanzar valores que van de entre 100 a 400 mm de precipitación diaria acumulada. Los eventos de ciclones tropicales pueden durar días o semanas en disiparse y se registran principalmente en los meses de mayo a noviembre (Wurl y Martínez Gutiérrez, 2006; Wurl y Valdez Aragón, 2002).



En el área de estudio se han realizado diversas investigaciones con el fin de caracterizar la exposición y vulnerabilidad a inundación. Sin embargo, los estudios carecen de una modelación hidráulica a detalle asociada a fenómenos de ciclones tropicales para la zonificación del peligro. Por otra parte, el área carece de estudios sobre el efecto de las corrientes en función a los cambios geomorfológicos del paisaje. Este factor es importante porque engloba el peligro dirigido hacia la prospección de en la zona. La consideración de esta variable, podría traducirse en la prevención de deslaves, fallos en estructuras y grandes pérdidas económicas.

Es debido a los factores previamente mencionados, se sugirió la realización de una caracterización de peligrosidad asociado a eventos de inundación en los arroyos de la región de San José del Cabo. Así mismo se buscó la cuantificación del efecto de grandes volúmenes de escurrimiento en la morfología de los arroyos. Esta clase de trabajos es sumamente importante para un correcto planeamiento urbano y el desarrollo sustentable de las comunidades, debido a que permite identificar la peligrosidad y el grado de exposición de las zonas urbanas.

## **1.1 Justificación**

En el área de estudio se han realizado diversas investigaciones con el fin de caracterizar la exposición y vulnerabilidad a inundación. Sin embargo, los estudios carecen de una modelación hidráulica a detalle asociada a fenómenos de ciclones tropicales para la zonificación del peligro. Por otra parte, el área carece de estudios sobre el efecto de las corrientes en función a los cambios geomorfológicos del paisaje. Este factor es importante porque engloba el peligro dirigido hacia la prospección de construcciones establecidas o prospectadas cerca a los cauces de los arroyos. La consideración de esta variable, podría traducirse en la prevención de deslaves, fallos en estructuras y grandes pérdidas económicas.

Debido a la incidencia de ciclones tropicales en la región, a la presión del crecimiento poblacional y al incremento en la masa territorial, se sugiere la realización de una caracterización de peligro por inundaciones asociada a una modelación hidráulica y a una cuantificación de cambios en la geomorfología de los arroyos. Este trabajo permitirá cuantificar espacial de la peligrosidad actual y el grado de exposición actual, de las inundaciones asociadas a eventos ciclónicos, así también correlacionar la intensidad de dichos eventos con los cambios geomorfológicos al paisaje. De esta manera, es posible prevenir pérdidas económicas y vidas humanas.

## **1.2 Hipótesis**

Una modelación hidráulica de eventos de inundación en la zona sur del estado de Baja California Sur contribuirá a la caracterización y diagnóstico de zonas de peligrosidad asociadas a la incidencia de eventos ciclónicos, así como cambios en la configuración espacial de los arroyos, en función de la intensidad de dichos eventos.

## **1.3 Objetivos**

Caracterizar y diagnosticar las zonas de peligro por eventos de inundación en la zona sur del estado de Baja California Sur, específicamente en la región de San José del Cabo; así como conocer el efecto que tienen los ciclones tropicales sobre el cambio en la geomorfología de los arroyos. La realización de este estudio permitirá conocer el grado de peligro asociado a dichos fenómenos en la región y pudiendo realizar estimaciones para escenarios hipotéticos para lluvias extremas.

### **1.3.1 Objetivos específicos**

Los objetivos específicos de este proyecto se ordenaron de la siguiente manera:

- Analizar el estado del arte concerniente a la modelación hidráulica, estudios hidrológicos y de valoración de peligro.
- Procesar y analizar la información hidrometeorológica

- Realizar una caracterización fisiográfica y de número de curva para el área de estudio, mediante la recopilación de información.
- Realizar modelaciones hidrológicas e hidráulica asociadas a tormentas de diseño.
- Caracterizar la peligrosidad de la zona mediante los resultados obtenidos.
- Caracterizar las zonas vulnerables a cambios en ancho de los arroyos por incremento en la potencia de corrientes asociada a eventos de precipitación por ciclones tropicales.

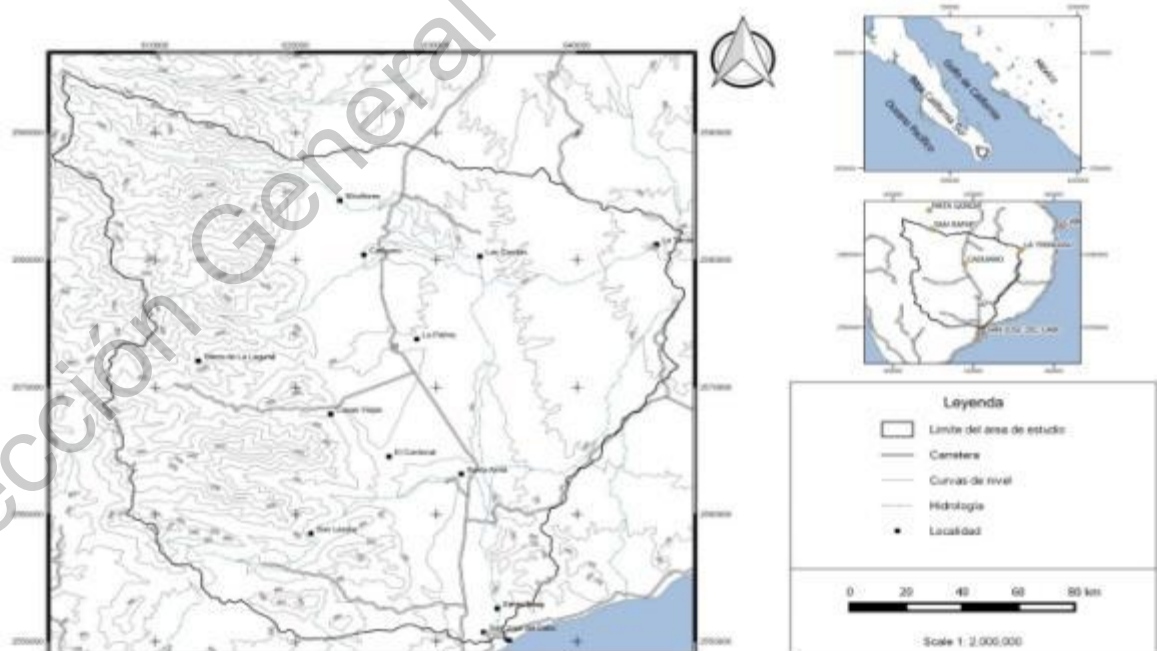
Dirección General de Bibliotecas UFRQ

## 2. ANTECEDENTES

El apartado de antecedentes se dividió en 2 subsecciones principales: 1. “Área de estudio”, en donde se presenta información general sobre la ubicación del área de estudio y 2.- “Literatura consultada” donde se mencionan aspectos generales sobre conceptos y metodologías relacionadas al tema.

### 2.1 Área de estudio

El área de estudio es la cuenca hidrológica de San José del Cabo (CHSJC), la cual se localiza en el extremo sur del estado de Baja California Sur, México, en las coordenadas 619639E, 2549079N y 637044E y 2589798N. La cuenca se limita al oeste por la Sierra de La Laguna, al este por la Sierra de La Trinidad y al sur por el Golfo de California en transición con el océano Pacífico (Figura 1). Baja California Sur se localiza dentro de la influencia del cinturón de desiertos asociados a celdas atmosféricas de alta presión con aire seco. Esta característica domina en latitudes que van de 23 a 30 norte y sur (Wurl, 2007).



**Figura 1.-** Área de estudio, cuenca hidrológica de San José del Cabo (CHSJC), Baja California Sur

La cuenca hidrológica de San José del Cabo constituye el área proveedora del recurso agua para todo el Corredor turístico-urbano del municipio de Los Cabos. El corredor integra 116 localidades, representando el 91.5 % del total de la población del municipio. Esto incluye a todas las localidades que integran la mancha urbana, de San José, San Lucas y Ciudad del Sol, así como a las del corredor turístico y localidades conurbadas a San José consideradas como rurales (Wurl y Valdez Aragón, 2007).

## **2.2 Literatura consultada**

El término “Cuenca” hace referencia a un área de la superficie de la tierra, caracterizada por que en ella se da la captura agua en cualquiera de sus formas (lluvia, nieve, rocío, etc.) y su posterior drenado a un cuerpo de agua común. Los límites de una cuenca están definidos por las mayores elevaciones del terreno, denominadas parteaguas, las cuales dan la dirección de movimiento del flujo de agua dentro de la cuenca (DeBarry, 2004).

La gestión cuencas es la evaluación detallada de los procesos, influencias y problemáticas que ocurren en el interior de una cuenca. El término “Sustentabilidad” se refiere al manejo responsable de los recursos, de manera que estos puedan mantenerse productivos con el tiempo para futuras generaciones. Esto es sumamente importante debido a que de ello depende la salud, seguridad y bienestar de los organismos que habitan la tierra. Gracias a ello, es posible tomar decisiones para preservar los recursos que se encuentran en una cuenca o para mitigar procesos no deseados dentro de la misma (DeBarry, 2004).

Algunos aspectos que son comúnmente estudiados dentro del manejo de cuencas son: control de inundaciones, estudios de régimen hidrológico, preservación de humedales, estudios de geomorfología fluvial, problemas de erosión y sedimentación, desarrollo sustentable, calidad del agua, crecimiento poblacional y cambio de uso de suelo, entre otros (DeBarry, 2004).

### 2.2.1 Panorama general sobre riesgo, peligro, vulnerabilidad y exposición

Los desastres ocurren debido a la presencia de condiciones de riesgo como resultado de la acción de un fenómeno perturbador sobre un bien expuesto. La existencia de un riesgo implica la presencia de un “agente perturbador” tenga la probabilidad de ocasionar daños a un sistema afectable (Por ejemplo, un asentamiento humano) en un grado tal, que constituye un desastre. Por ejemplo, un huracán no constituye un riesgo por sí mismo, esto debido a que, si este llegara a una zona deshabitada, no afectaría ningún asentamiento humano y no se produciría un desastre (CENAPRED, 2004).

De acuerdo con CENAPRED (2006) la definición de “Riesgo” puede ser determinado como la suma de los factores “Peligro”, “Vulnerabilidad” y “Exposición” y puede ser expresada por la ecuación (1).

$$\text{Riesgo} = f(\text{Peligro}, \text{Vulnerabilidad}, \text{Exposición})$$

$$R = f(P, V, E) \quad (1)$$

El peligro puede ser definido como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad, tiempo y sitio dado (CENAPRED, 2004). Usualmente se busca la parametrización cuantitativos de los fenómenos perturbadores asociados a significados físicos.

Dos términos asociados al concepto de peligro son: “magnitud” e “intensidad”. De acuerdo con CENAPRED, (2004) la magnitud es la medida del tamaño del fenómeno, de su potencial destructivo y de la energía que libera por éste. La intensidad es una medida de la fuerza con que se manifiesta el fenómeno en un sitio dado. Usualmente el estudio del peligro se encuentra asociado a la construcción de escenarios hipotéticos con distintos periodos de retorno, con el fin de determinar los efectos del mismo en un sitio de interés. Periodo de retorno se define como lapso promedio entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada (Barragán Regalado, 2016). Es importante considerar que el

concepto de periodo de retorno, no implica que el proceso sea cíclico, o que deba transcurrir siempre un cierto tiempo para que el evento se repita.

El término Vulnerabilidad es usualmente definido como la susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por un fenómeno perturbador, es decir el grado de pérdidas esperadas. una población que se encuentra preparada para responder de manera adecuada ante un evento (ej. Erupción volcánica o un huracán) presenta menor vulnerabilidad que otra que no está preparada de esa forma (CENAPRED, 2004).

El término “Exposición” hace referencia a la cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio y que son factibles de ser dañados. Por lo general se le asignan unidades monetarias, porcentajes o cantidad de construcciones o personas. La exposición puede disminuir con el alertamiento anticipado de la ocurrencia de un fenómeno, ya sea a través de una evacuación o inclusive evitando el asentamiento en el sitio (CENAPRED, 2004).

Las caracterizaciones de riesgo, peligro, vulnerabilidad y o exposición suelen ir acompañadas de representaciones geográficas de las intensidades o de los efectos de eventos extremos. Esto resulta de gran utilidad para el establecimiento y priorización de acciones de mitigación y prevención de desastres. Ejemplos de escenarios de peligro son la representación de los alcances de una inundación con los tirantes máximos de agua que puede tener una zona; distribución de caída de ceniza consecuencia de una erupción volcánica; la intensidad máxima del movimiento del terreno en distintos sitios debido a un sismo, entre otros (CENAPRED, 2004).

### **2.2.2 Aspectos generales sobre ciclones tropicales**

Los ciclones tropicales son sistemas giratorios de tormentas con gran escala, los cuales se forman sobre aguas oceánicas de regiones tropicales y subtropicales (Montgomery, 2014). De acuerdo con CONAGUA (2011) los ciclones tropicales inician su desarrollo como

pequeñas perturbaciones atmosféricas, manifestadas como una ondulación en las líneas de igual presión características de los mapas meteorológicos. Cuando ocurre este suceso, el evento es llamado onda tropical; sin embargo, aún no se considera un ciclón, debido a que no se presenta un flujo de viento giratorio ni líneas de igual presión a su alrededor (si presenta actividad convectiva).

Los ciclones tropicales pueden ser clasificados en función de su viento máximo sostenido. Una depresión tropical es un ciclón cuyo viento máximo sostenido (VMS) es menor a los 61.2 km/h. Una tormenta tropical posee un VMS entre 63 km/h y 118 km/h. Un huracán posee un VMS igual o mayor a 119 km/h. Además, una vez superada la barrera de los 119 km/h, los ciclones tropicales son catalogados en escala de 1 al 5 en orden ascendente de acuerdo con la intensidad de su VMS. Esta es la escala Saffir-Simpson (CONAGUA, 2011). Los ciclones tropicales categoría 1 poseen un VMS entre 119 y 153 km/h; aquella categoría 2 poseen entre 154 y 177 km/h; si poseen VMS entre 178 y 209 km/h son categoría 3; si poseen un VMS entre 210 y 251 km/h son categoría 4 y si poseen entre 252 y 400 km/h son categoría 5.

De acuerdo con Vadillo-Romero et al., (2006), en el este del océano Pacífico, entre los años 1966 y 2004 hubo una ocurrencia promedio de 16.2 ciclones por año, conformada por 8.8 huracanes y 7.4 tormentas tropicales. Su análisis mostro una gran variabilidad geográfica en las trayectorias de los ciclones, siendo que un gran número impacta las costas de México. Dichos autores mencionan que el Golfo de Tehuantepec es la región de formación aproximadamente 50 % de los ciclones tropicales que se mueven en dirección Noroeste.

La península de Baja California es periódicamente afectada por la presencia de ciclones tropicales. La temporada de huracanes en es esta región es entre los meses de mayo y noviembre. Las lluvias originadas por estos eventos conforman una cantidad considerable del porcentaje de precipitación anual. En esta región la mayoría de las lluvias extremas son generadas por ciclones tropicales, aunque en raras ocasiones se presentan lluvias fuertes monzónicas (Wurl & Martínez Gutiérrez, 2006).



Algunos de ciclones tropicales que han originado la mayor cantidad de lluvia en el oeste de México son: El Huracán Juliette en el año 2001, incidiendo en la península de Baja California registrando 1011 mm en 24 horas y el Huracán Pauline en 1997, ocasionando 686 mm de lluvia en el estado de Guerrero (Roth, 2007f; Roth, 2007i). La **Tabla 1** presenta algunos de los mayores eventos de precipitación asociada a ciclones tropicales para la zona oeste de México.

Debido a la complejidad de los ciclones tropicales, las predicciones de tiempo y localización, así como el entendimiento de sus procesos físicos internos es uno de las problemáticas centrales de la meteorología y ciencias afines, hasta el día de hoy. (Montgomery, 2014)

**Tabla 1** Ejemplos de algunos de los ciclones tropicales que han producido volúmenes de precipitación importante en México.

No.	Precipitación (mm)	Tormenta	Año	Localidad	Referencia
1	1011	Juliette	2001	B. C. S	(Roth, 2007f)
2	686	Pauline	1997	Guerrero	(Roth, 2007i)
3	628.1	Odile	1984	Guerrero	(Roth, 2007h)
4	610.1	Isis	1998	B. C. S	(Roth, 2007e)
5	570	Flossie	2001	Oaxaca	(Roth, 2007b)
6	566.9	Greg	1999	Colima	(Roth, 2007c)
7	531.9	Nora	1997	Sinaloa	(Roth, 2007g)
8	525.3	Eugene	1987	Quintana Roo	(Roth, 2007a)
9	523	Lidia	1981	Sinaloa	(Roth, 2007j)
10	500.1	Ignacio	2003	B. C. S	(Roth, 2007d)

### 2.2.3 Análisis de frecuencia para eventos hidrometeorológicos

El análisis de frecuencia de uno de los tópicos más importantes de los campos de la hidrología y la meteorología (Hanson y Vogel, 2008). Este tipo de análisis es muy importante debido a que permite valorar el riesgo de desastres naturales (Shoji & Kitaura, 1999). El análisis de frecuencia se encarga de la interpretación del registro histórico de lluvias, con el objetivo de identificar la probabilidad de ocurrencia de futuros eventos de una magnitud específica (Kumar y Bhardwaj, 2015).

Seleccionar una distribución de probabilidad que represente adecuadamente la ocurrencia y lámina de precipitación es una de las principales partes del proceso de un análisis de frecuencia (Hanson & Vogel, 2008). Algunas de las distribuciones de probabilidad más utilizadas para este tipo de análisis son: Log-Pearson tipo III, Log-normal, Gumbel, Kappa, Generalizada de Valores Extremos (GEV), Generalizada Pareto y Exponencial (Deidda y Puliga, 2006; Hanson y Vogel, 2008; Park y Jung, 2002; Prieto et al., 2016; Shoji y Kitaura, 1999; Woolhiser y Roldan, 1982).

La teoría de probabilidad se basa en el estudio de la ocurrencia de eventos aleatorios y tiene el objetivo de caracterizar un valor con base en la probabilidad que tiene de ocurrir. Esta ocurrencia se acerca a la unidad cuando es alta y a cero cuando es casi nula. Una variable es aleatoria cuando su probabilidad de ocurrencia depende exclusivamente de la suerte. Esta variable es agrupada en clases, las cuales sirven para ajustar distribuciones, llamadas funciones de distribuciones de probabilidad. Estas distribuciones son útiles para la estimación de la ocurrencia de eventos dentro de un intervalo matemático de comportamiento. A esto se le conoce comúnmente como “Inferencia estadística” (Acuña, 2003).

Sí la función de distribución de probabilidad asociada a un evento específico es conocida, entonces es posible determinar la probabilidad de ocurrencia del mismo. Algunas de las distribuciones de probabilidad más comúnmente utilizadas en hidrología son: Log-normal y GEV (Campos-Aranda, 2013; Campos-Aranda, 2014; Cheong y Gadba, 2017; Flowers-

Cano et al., 2014; Francés García, 1998; Freeman, 1991; Gaál et al., 2010; Parkes y Demeritt, 2016).

Es importante denotar, que para que los resultados de un análisis de frecuencia sean válidos, los registros deben de cumplir con ciertos criterios estadísticos. Los datos deben Poseer aleatoriedad, independencia, homogeneidad y estacionalidad. Es decir los datos deben de proceder de una variable aleatoria, originada por un único proceso natural que no cambia en el tiempo, y que por lo tanto, está libre de persistencia, tendencia, cambios en la media y exceso o déficit de variabilidad (Campos-aranda, 2014).

### **Distribución General de Valores Extremos**

Especializada para la estimación teórica de crecientes y precipitaciones máximas anuales. Cada miembro de la familia de distribuciones de Valores Extremos se caracteriza por su parámetro de forma  $k$ . La ecuación general se denomina distribución General de Valores Extremos (GVE) y puede ser expresada como la ecuación (2).

$$X = u + \frac{\alpha}{k} [1 - \exp(-k * y)] \quad (2)$$

Siendo  $X$  la variable que se estima probabilísticamente,  $u$  el parámetro ubicación,  $\alpha$  el parámetro de escala, y  $k$  el parámetro de forma. Así mismo  $y$  es la variable reducida de la función de probabilidad Gumbel de no excedencia. Esta puede expresarse como en la ecuación (3).

$$y = -\ln[-\ln F(x)] = -\ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{Tr} \right) \right] \quad (3)$$

Las tres familias de distribuciones de Valores Extremos se definen de acuerdo al signo del parámetro  $k$ . De esta forma, si  $k = 0$ , se considera una distribución de Valores Extremos tipo 1 o Gumbel; si  $k < 0$  se considera una distribución de Valores Extremos tipo 2 o Log-Gumbel y si  $k > 0$  se considera una distribución de Valores Extremos tipo 3 o Weibull.

Existen diversas metodologías para la estimación de parámetros de ajuste para distribuciones de probabilidad. Algunos de los métodos más utilizados son: momentos, sextiles, momentos L, máxima verosimilitud y optimización de una función objetivo.

### **Distribución Bi-Gumbel o Gumbel de dos poblaciones**

La distribución doble Gumbel (o Bi-Gumbel) para dos poblaciones se utiliza para la consideración dentro un análisis de frecuencia a eventos que son mutuamente excluyentes. Por ejemplo, en las zonas costeras del Golfo de México y el Océano Pacífico es posible encontrar registros de lluvias asociadas a precipitaciones por fenómenos regionales y además precipitaciones originadas por eventos ciclónicos (Barragán Regalado, 2016; Escalante-Sandoval, 2018).

La distribución doble Gumbel puede ser expresada como en (3):

$$F(x) = P * \exp \left\{ - \exp * \left( - \frac{x - \beta_1}{\alpha_1} \right) \right\} + (1 + P) * \exp \left\{ - \exp * \left( - \frac{x - \beta_2}{\alpha_2} \right) \right\} \quad (3)$$

Donde  $P$  es la probabilidad de ocurrencia de eventos no ciclónicos;  $x$  es la variable aleatoria para la cual se estima la probabilidad de no excedencia;  $\alpha_1$  es el parámetro de escala de la población no ciclónica;  $\beta_1$  es el parámetro de ubicación de la población no ciclónica;  $\alpha_2$  es el parámetro de escala de la población ciclónica y  $\beta_2$  es el parámetro de ubicación de la población ciclónica (Barragán Regalado, 2016; Escalante-Sandoval, 2018).

### **Estimación de la máxima verosimilitud**

La estimación de la máxima verosimilitud (por sus siglas en inglés MLE) es uno de los métodos más utilizados para el ajuste de distribuciones de probabilidad (Cheong y Gadba,

2017; Flowers-Cano et al., 2014; Francés García, 1998; Rahman et al., 2013). Para una determinada muestra  $\mathbf{D}$  con un modelo probabilístico ( $\mathbf{D}|\theta$ ), con parámetros  $\theta$  y  $I$  siendo el largo de la muestra. Este método busca determinar los parámetros  $\theta$  que maximicen la verosimilitud de  $\mathbf{D}$ . Asumiendo los datos como independientes e idénticamente distribuidos, la función de verosimilitud de todas las muestras es la función de verosimilitud de cada evento particular (Gaál et al., 2010). Esto se puede expresar como en la ecuación (4).

$$\ell(\mathbf{D}|\theta) = \prod_{i=1}^I \ell(d_i|\theta) \quad (4)$$

Algunos ejemplos de estudios recientes asociados a la utilización de un análisis de frecuencia son:

Parkes y Demeritt, (2016) describen la utilización de un modelo bayesiano, en conjunción con el método Cadenas de Markov y Montecarlo, para el análisis de frecuencia de inundaciones en la región de Cumbria, Reino Unido. Ellos buscaron reducir la incertidumbre de las estimaciones de frecuencia de inundaciones utilizando datos históricos de inundación que datan de los años 1800.

Liu et al., (2017) Utilizaron modelos basados en estadística bayesiana, específicamente el método *Naive Bayes* basado en entropía, así como herramientas de Sistemas de Información Geográfica, para la evaluación espacial de riesgo por inundación. El método *Naive Bayes* tiene la característica de interpretar las variables dentro de un fenómeno específico como independientes unas de otras. El término entropía se refiere a la valoración de algunas variables sobre otras, mitigando efectos de independencia condicional.

Han y Coulibaly (2017) mencionan que la elaboración de estimaciones de alerta temprana por inundaciones utilizando estadística bayesiana, permite una caracterización teórica ideal de la incertidumbre en la incidencia de dichos eventos. La utilización de estadística bayesiana para éste tipo de estudios es una forma efectiva de análisis, debido a que toma en consideración todas las fuentes de incertidumbre de los fenómenos y produce una

distribución predictiva del estado y descarga de un río. En tiempos más recientes la utilización de estos métodos ha sido desarrollada y extrapolada a otras áreas de la ciencia.

Cheong y Gadba, (2017) realizaron un modelado del caudal máximo del flujo del río Sabah, Malasia, utilizando una distribución generalizada probabilidad de valores extremos (GEV). Para éste tipo de análisis generalmente se hace uso del método Máxima Verosimilitud. La Teoría de Valores Extremos (ETV) es una rama de la estadística, en la cual se encarga del modelado y estimación de eventos raros. En general EVT estudia la cola de la estimación en lugar del cuerpo de la distribución inferior. EVT es ampliamente utilizada en el contexto financiero, *survival análisis*, *risk management* y para el estudio de variables geofísicas.

Teng et al., (2017) categorizaron las metodologías usadas en el análisis de inundaciones en tres principales tipos: Métodos empíricos, modelos hidrodinámicos y métodos simplificados. Dichos métodos se desarrollaron con los objetivos de: 1.- entender los procesos intrínsecos en la dinámica de los fluidos en ríos, planicies de inundación y 2.- predecir el comportamiento de los flujos en zonas de inundación. En estos métodos, se busca obtener variables como volumen de agua, tirante de agua, área inundada, velocidad de flujo, entre otros (Cervantes Jaimes, 2012; Scuderi et al., 2000; Teng et al., 2017; Aguilar Sarmiento, 2017). Dicha información es utilizada para la valoración de riesgos por inundación y para el manejo de zonas de inundación.

#### **2.2.4 Generalidades sobre estudio de peligro por inundación**

Una inundación puede definirse como un evento hidrológico caracterizado por grandes descargas o tirantes de agua, los cuales se incrementan hasta provocar la ocupación temporal de cierta zona por el agua (Torres Sam, 2015). Otros autores denominan “Inundación” al flujo o invasión de agua por exceso de escurrimiento superficial o por su acumulación en terrenos planos, normalmente secos, ocasionados o por insuficiencia de drenaje, tanto natural como artificial (SEDATU, Arqco, & Evaluación de Riesgos Naturales y Antropogénicos, 2013). Algunos factores que intervienen en la generación de

una inundación son: precipitaciones intensas o de larga duración, las características del suelo, drenaje natural o artificial de las cuencas, falla de presas, entre otros (Moel, van Alphen, & Aerts, 2009; SEDATU et al., 2013; Torres Sam, 2015). Un factor muy importante es el incremento en la zona urbana, el cual generalmente trae como consecuencia la disminución de las zonas de infiltración y el incremento del coeficiente de escurrimiento del suelo (Torres Sam, 2015).

Existen diversos métodos para la caracterización de peligrosidad de las inundaciones. Algunos ejemplos son: Los métodos históricos, los métodos paleohidrológicos, metodologías basadas en la modelación hidrológica. A continuación, se describe cada una de ellas.

#### **Métodos históricos**

Los métodos históricos consisten en el empleo de información histórica, como manuscritos e impresos de archivos, bibliotecas y hemerotecas, testimonios, audiovisuales, marcas de elementos artificiales o naturales a lo largo de márgenes de un río para reconstruir la extensión cubierta a la cota alcanzada por las aguas durante una crecida desencadenada en el periodo histórico. Esta metodología se basa en el supuesto de que si el agua alcanzó cierto nivel de profundizada en el pasado, podría volverlo a alcanzar en el futuro. La búsqueda y recopilación de información histórica, se basa principalmente en tres fases: búsqueda y recopilación de la documentación, análisis e interpretación de la información e integración de los datos en el análisis estadístico de los caudales (Herrero et al., 2008).

#### **Métodos paleohidrológicos**

Este tipo de métodos se refiere al empleo de fuentes de información procedentes del registro geológico-sedimentológico. Dentro de esta clasificación podría incluirse la reconstrucción basada en la competencia de flujo y las que emplean indicadores de paleonivel o paleoestado. Sin embargo, esto no implica que las paleoinundaciones estudiadas con estos métodos tengan que haber ocurrido necesariamente hace miles de

años, al contrario, pueden estudiarse inundaciones históricas recientes de la que no existe otra información sistemática o documental (Herrero et al., 2008).

#### *Métodos basados en la competencia del flujo.*

Se basan en relacionar las características de los sedimentos y depósitos generados durante o tras un evento de inundación, con las características de flujo durante esta (Benito et al., 2002). Un ejemplo de relación es el vínculo entre el tamaño y forma de los sedimentos y la capacidad de transporte, con lo cual se puede inferir parámetros como la velocidad, tensión de arrastre, entre otros. Con esta información, es posible estimar paleocaudales empleado modelos hidráulicos. También existen fórmulas que relacionan estos tamaños con la potencia hidráulica crítica o caudal crítico necesario para el inicio del movimiento de los mismos. Normalmente, para el estudio de paleoinundaciones se emplean partículas muy gruesas como cantos, bloques y grandes bloques (Benito et al., 2002)

Uno de los factores más comúnmente asociado al transporte y sedimentación en los cauces es la potencia de corrientes. La potencia de corrientes es la medida de la fuerza principal que actúa en el canal. Esta es principalmente determinada por el gradiente del canal y la descarga. Este factor determina la capacidad de la corriente para transportar sedimento y para desarrollar trabajo geomorfológico (Bizzi y Lerner, 2015). Algunos autores mencionan que la potencia de corrientes juega un papel importante en la geometría de los arroyos, ya sea por ensanchamiento o aumentando la profundidad de los ríos (Anees et al., 2016). Un ejemplo dello es el trabajo de Magilligan et al., (2015). Ellos estudiaron la eficacia de la potencia de corrientes y la duración del flujo en respuesta a eventos de inundación catastróficos.

#### *Métodos basados en los indicadores de paleonivel o paleoestado*

Estos métodos incluyen el estudio de acumulaciones de sedimentos, evidencia dendrogeomorfológica y botánicas, líneas de erosión y otras evidencias geológicas. En general, la información obtenida por estos indicadores de paleoestado corresponde con la



mínima cota alcanzada por la lámina de agua durante crecida que los generó. Sin embargo, algunos de estos indicadores, se forman en zonas del margen muy próximas al nivel máximo de inundación e indican con bastante precisión la altura máxima alcanzada por las aguas durante la paleocrecida (Herrero et al., 2008).

### **2.3.5 Metodologías de modelación hidrológica e hidráulica**

#### *Modelos hidrológicos*

De acuerdo con Devia et al. (2015) un modelo hidrológico puede ser definido como un conjunto de ecuaciones las cuales ayudan predecir el comportamiento de un sistema, así como entender los distintos procesos hidrológicos que existen en una zona específica. La unidad espacial que se utiliza en los estudios hidrológicos es la cuenca. Comúnmente estos modelos se utilizan para el entendimiento y estimación del proceso lluvia-escurrimiento en el interior de una cuenca. Dentro de estos modelos se generalmente es requerido el uso parámetros específicos los cuales describen las características físicas de una cuenca e información referente a la precipitación en la zona (Devia et al., 2015).

Entre los métodos hidrológicos de estimación de caudales se encuentra el método de Número de Curva. Este método es ampliamente utilizado para la estimación de caudales en cuencas de tamaño pequeño y medio, las cuales no cuentan con estaciones hidrométricas. El caudal pico de descarga, generado a partir de este método es derivado de las aproximaciones para la obtención del hidrograma triangular, resultado de una precipitación en exceso durante una duración específica. Para la utilización se requiere la obtención del parámetro conocido como Número de Curva, el cual se encuentra directamente asociado al tipo de suelo, cubierta vegetal y condición hidrológica de la superficie del suelo (Maidment et al., 1993; Choudhari, Panigrahi, y Paul, 2014). De manera conjunta, es posible identificar las condiciones de humedad antecedente del suelo, las cuales se caracterizan en: seco, promedio o húmedo. Este método es especialmente conveniente para zonas donde no se tiene mucha información.

### Modelos hidráulicos

Se trata de la utilización de modelos matemáticos para la simulación el comportamiento del agua bajo condiciones específicas o posibles escenarios hipotéticos. A grandes rasgos los modelos hidrodinámicos se pueden clasificar de acuerdo con el número dimensiones simuladas: una dimensión, dos dimensiones y tres dimensiones. Los modelos de una dimensión son las representaciones más simples del flujo en zonas de inundación. Este tipo de modelos son comúnmente usados cuando el flujo no necesita ser simulado con gran detalle o cuando el flujo se encuentra confinado a una dimensión (ej. en una tubería). Las ecuaciones que comúnmente se utilizan para la modelación de inundación son las ecuaciones de Saint-Venant en sus formas unidimensional (ecuación 5 y 6). Las ecuaciones de Saint-Venant se formulan a partir de las ecuaciones de continuidad y momento. La modelación unidimensional toma algunas hipótesis para su resolución, entre las que destacan: la componente de aceleración se considera despreciable; los efectos no dispersivos de la turbulencia se consideran despreciables (Aguilar Sarmiento, 2017; Cervantes Jaimes, 2012; Delgado Parra, 2016; Teng et al., 2017).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + V_x * \frac{\partial h}{\partial x} = i_e \quad (5)$$

Donde  $\frac{\partial h}{\partial t}$  es la variación del tirante de agua en el tiempo (m/s),  $V_x$  es el componente de la velocidad promediada con la altura,  $\frac{\partial h}{\partial x}$  es la variación del tirante en la longitud (adimensional) y  $i_e$  es la intensidad de precipitación en exceso.

$$S_{fx} = S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} * \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{1}{g} * \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad (6)$$

Donde:  $S_{fx}$  es el componente de pendiente de fricción (adimensional),  $S_{0x}$  es la pendiente de fondo (adimensional),  $\frac{\partial h}{\partial x}$  es la variación del tirante de agua en la longitud (adimensional),  $\frac{V_x}{g} * \frac{\partial V_x}{\partial x}$  es la aceleración convectiva (adimensional) y  $\frac{1}{g} * \frac{\partial V_x}{\partial t}$  es la aceleración local.

Los modelos en dos dimensiones simulan el comportamiento del agua asumiendo que la profundidad del agua (componente Z) es relativamente más somera que las otras dos componentes (Ecuaciones 7, 8 y 9). Por lo que el modelo da como resultado un valor promediado de los cambios de velocidad con la altura. El modelo en dos dimensiones es el más ampliamente utilizado. Este utiliza las ecuaciones de Saint-Venant en dos dimensiones (Teng et al., 2017). Las modelaciones en dos dimensiones se utilizan cuando se infiere que la variación vertical de velocidad es relativamente pequeña. A este tipo de modelación se le conoce también como modelo de aguas someras.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} * (h\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y} * (h\bar{v}) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} * (h\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x} * (h\bar{u}^2) + \frac{\partial}{\partial y} (h\bar{v}\bar{u}) = -gh * \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} [\tau_{sx} - \tau_{bx} + F_x] \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} * (h\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\bar{u}\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\bar{v}^2) = -gh * \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho} [\tau_{sy} - \tau_{by} + F_y] \quad (9)$$

Donde  $h$  se refiere al tirante de agua (m),  $\bar{u}$  se refiere al componente x de la velocidad media en la altura (m/s),  $\bar{v}$  se refiere al componente y de la velocidad media en la altura (m/s),  $g$  se refiere a la aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>),  $\zeta$  se refiere a la elevación media de la superficie libre (m),  $\rho$  se refiere a la densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>),  $\tau_{sx}$  se refiere al esfuerzo cortante de la superficie libre (kg/m<sup>2</sup>),  $\tau_{bx}$  se refiere al esfuerzo cortante de fondo (kg/m<sup>2</sup>),  $\tau_{sy}$  se refiere al esfuerzo cortante de superficie libre (kg/m<sup>2</sup>),  $\tau_{by}$  se refiere al esfuerzo cortante en el fondo (kg/m<sup>2</sup>).

Los modelos en tres dimensiones son especialmente importantes para la modelación de turbulencia vertical, vórtices, flujos en espiral y en especial para la modelación de flujos catastróficos como los que ocurren durante la ruptura de una presa, tsunamis, inundaciones, etc. (Ver ecuación 10). Para la creación de una simulación en tres dimensiones, generalmente, se utiliza la ecuación de Navier Stock en tres dimensiones.

Ecuación de conservación de momento:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u * u\Delta + \frac{1}{\rho} \nabla p = g + \nabla * \nabla u \quad (10)$$

Con la condición de incompresibilidad  $\nabla u = 0$

Donde  $u$  se refiere a la velocidad (m/s),  $\rho$  se refiere a la densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ ),  $p$  se refiere a la presión ( $\text{kg/m}^2$ ) y  $g$  se refiere a la aceleración de la gravedad ( $\text{m/s}^2$ ).

Teng et al., (2017) mencionan que, en muchas ocasiones, una modelación de inundación 3d suele considerarse innecesaria cuando se compara con los resultados obtenidos por una modelación 2d. La ventaja de las modelaciones en dos dimensiones es que requieren de una menor cantidad de información para obtener resultados igualmente válidos. Algunos trabajos de simulación de inundaciones de forma unidimensional son los realizados por Aguilar Sarmiento, (2017), Delgado Parra (2016), Wurl et al., (2017) entre otros. Algunos trabajos de simulación de inundaciones de forma bidimensional son los publicados Costabile y Macchione (2015), Torres Sam (2015) y Wurl et al., (2015) entre otros. La selección del modelo correcto depende del contexto del trabajo, de la cantidad de información disponible para el área a estudiar, la escala etc. (Teng et al., 2017).

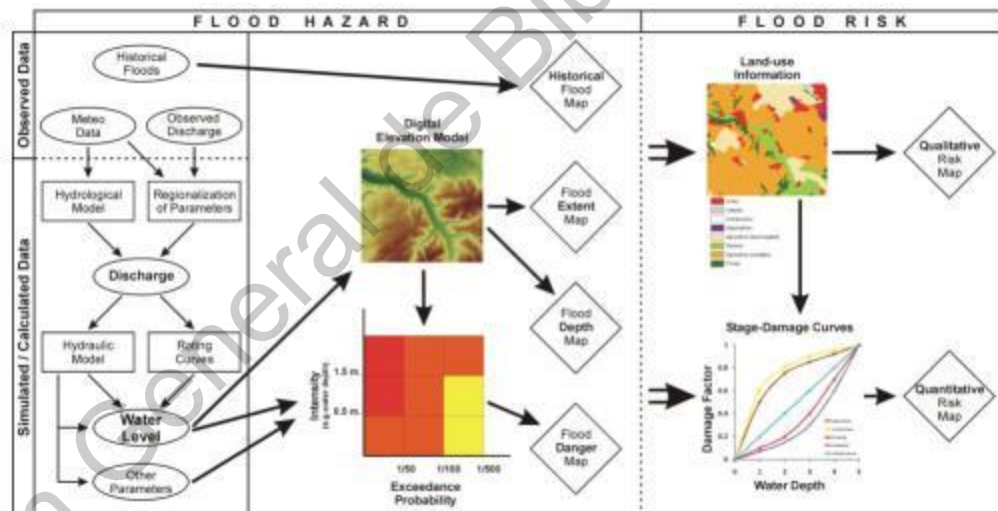
Los modelos unidimensionales se utilizan generalmente en la modelación de cauces con características relativamente rectas, sin confluencias de otros ríos. Por otra parte, los modelos bidimensionales son útiles cuando los causes presentan curvas o discurren por grandes llanuras de inundación, cuando hay confluencias, existen flujos alrededor de estructuras importantes, o el flujo atraviesa una zona urbana entre otros.

Los resultados de los modelos deben ser validados, preferiblemente con datos históricos o geomorfológicos, tanto en la delimitación del área inundable, como en los calados y la velocidad de corriente. Sí existiera una disparidad ente ellos tendrán más peso los obtenidos a través de geomorfología y datos históricos, debido a sus fundamentos en elementos físicos reconocibles y documentación preexistente, procurando utilizar todos para obtener un análisis integrado de la peligrosidad por avenidas e inundaciones, lo más fiable y real posible.

### 2.4.6.1 Representación cartográfica de peligro por inundación

El manejo de la información obtenida en a través de las metodologías para el estudio de inundaciones generalmente es presentado en forma de mapas. Existen diferentes tipos de mapas de inundación, siendo los principales: los mapas de riesgo por inundación y mapas de peligro por inundación.

Los mapas de peligro por inundación contienen información acerca de la probabilidad y magnitud del evento. Por otra parte, los mapas de riesgo por inundación contienen, además, información acerca de las consecuencias de dicho evento, como daño económico, número de personas afectadas, entre otros (Moel et al., 2009) (**Figura 2**).



**Figura 2** Ejemplo de diseño cartográfico para la identificación de peligro y riesgo.

Algunas de las funciones los mapas de peligro por inundación tienen la cualidad de mostrar parámetros como: la extensión de las inundaciones de acuerdo con clases de probabilidad de eventos anteriores; la profundidad de las inundaciones; la velocidad del flujo; la propagación de la inundación y el grado de peligrosidad asociado (EXCIMAP, 2007).

Los propósitos principales de un mapa de peligro por inundación son: para planeamiento y manejo de uso de suelo; para el manejo integrado de cuencas; para el manejo y planeación del recurso agua; para la evaluación de peligrosidad asociada a los límites de los canales; para el planeamiento y manejo de emergencia; para el planeamiento de medidas técnicas y para crear conciencia sobre los peligros asociados a las construcciones urbanas. Las escalas, detalle y público al que van dirigidos pueden ser variados (EXCIMAP, 2007).

Dentro de cada clasificación existen diferentes métodos de cuantificar tanto el peligro como el riesgo. Esto tiene como resultado que puedan existir una gran variedad de mapas de inundación y metodologías (Moel et al., 2009). De la misma forma existen diversos parámetros con los cuales poder denotar o valorar la peligrosidad de una inundación. Algunos de estos parámetros son: la extensión de la inundación, la profundidad o tirante de agua durante el evento, velocidad de flujo, duración, propagación del frente de agua, tasa de cambio del nivel de agua, entre otros (Moel et al., 2009; Teng et al., 2017; Torres Sam, 2015).

De manera sea más fácil tener una imagen clara sobre la totalidad del fenómeno, los parámetros pueden ser conjugados para la formulación de clases cualitativas. Esto se lleva a cabo utilizando matrices que relacionan parámetros en una sola medida de peligro.

Una de las clasificaciones de peligrosidad más utilizadas se basa en el estudio recopilatorio durante más de 15 años, acerca del flujo de agua necesario para impedir a una persona de sus habilidades para ponerse de pie y caminar (Abt et al., 1989; Rescdam, 2000; Wade et al., 2005). Este tipo de caracterización provee de información muy importante para identificar los umbrales de peligrosidad para individuos expuestos a eventos de inundación. Dicha caracterización puede expresarse como en (11)

$$HR = d * (v + 0.5) + DF \quad (11)$$

Donde  $HR$  se refiere al grado de peligrosidad por inundación;  $d$  se refiere a la profundidad de la inundación (m);  $v$  se refiere a la velocidad del flujo de agua ( $m*s^{-1}$ ) y  $DF$  se refiere

al factor de escombros (que varía entre 0, 0.5 y 1, dependiendo en que tan probable es que los escombros produzcan un incremento significativo en la peligrosidad)

De acuerdo con dicha clasificación, para una situación sin la presencia de escombros, los autores proveen una guía del grado de peligrosidad para una persona durante un evento de inundación: valores menores a un factor de HR de 0.75, se consideran como un grado de peligrosidad baja, asociada a su vez a zonas de inundación con flujos de agua muy someros o con agua profunda estancada; un valor de HR de entre 0.75 a 1.25 se considera un grado de peligrosidad moderada, siendo peligroso solo para algunas personas (por ejemplo niños), y que posee zonas donde el flujo es muy rápido o profundo; valores de HR de entre 1.25 a 2.5 pueden clasificarse como un grado de peligrosidad significativa, el cual ya se considera peligroso para la mayoría de las personas, y donde se da la existencia de zonas de flujo profundas y rápidas y finalmente zonas con valores de HR valores a 2.5 pueden considerarse de peligrosidad extrema, zona los flujos son muy profundos y rápidos (Abt et al., 1989; Rescdam, 2000; Wade et al., 2005) (Tabla 2) .

**Tabla 2** Categorización de peligrosidad de acuerdo con Abt et al., (1989); Rescdam, (2000); Wade et al., (2005).

<b>HR = d x (v+0.5)</b>	<b>Grado de peligro por inundación</b>	<b>Descripción</b>
<b>&lt;0.75</b>	Bajo	“Zonas con flujos someros o profundos pero estancados”
<b>0.75 – 1.25</b>	Moderado	“Algunas zonas con flujos profundos o rápidos”
<b>1.25 – 2.5</b>	Significante	“Existencia de zonas con flujos profundos y rápidos”

Algunos ejemplos de estudios relacionados a nivel local y global son:

Wurl, García y Lamadrid (2015) realizaron un análisis de peligro por inundación en el oasis de La Purísima, Baja California Sur. Ellos calcularon el caudal máximo, volumen y frecuencia de las crecidas de los arroyos bajo diferentes escenarios de lluvias extremas utilizando simulaciones hidráulicas.

Wurl et al., (2017) realizaron un cálculo para la determinación de zonas de inundación en la región de Comondú, Baja California Sur, utilizando modelación hidráulica a través del software HEC-RAS. Este software es empleado para la modelación de perfiles de aguas superficiales.

En la ciudad de Insurgentes, Baja California Sur, al norte del área de estudio, Avilés-Cannett, (2017) realizó una modelación hidráulica de escenarios de peligro por inundación para diferentes periodos de retorno. Para dicho estudio se utilizó el software HEC-RAS en combinación con sistemas de información geográfica. De acuerdo con sus resultados se obtuvo que el área de inundación en la zona de estudio puede alcanzar áreas de inundación de  $1,324,522 m^2$  para un periodo de retorno de dos años.

Al sur del área de la cuenca de San José del Cabo, Mendoza-Albañez, (2014) realizó un análisis geomorfológico de caracterización de zonas con riesgo potencial de inundación. Para la realización de dicho trabajo se utilizaron herramientas de sistemas de información geográfica. Sus resultados indicaron que el poblado de San José del Cabo, debido a su ubicación y distribución altimétrica posee un rango de exposición a inundaciones que va de intensamente inundable a poco inundable (Mendoza-Albañez, 2014), esto basándose en los criterios de clasificación de Sánchez Celada y Batista Silva (2005).



Los trabajos realizados por Kourgialas y Karatzas, (2016), Tanguy et al., (2017), Torres Sam, (2015), Klemas, (2015), Zazo et al., (2017) estiman el peligro y riesgo de inundación combinando herramientas de Sistemas de Información Geográfica y el manejo de imágenes satelitales para la generación de mapas de riesgo por inundación.

Chen et al., (2015) realizaron un análisis y caracterización de zonas de inundación. En este trabajo se propone un nuevo método de zonificación de riesgo por inundación, en donde se evalúan cinco índices de riesgo: “Driving force”, refiriéndose a la lluvia acumulada durante tres horas antes del evento de inundación; “Pressure index”, definido como el tirante de agua mínimo para que existan afectaciones a zonas urbanas; “State index”, definido como la profundidad de la zona inundada durante el evento; “Impact index”, definido como el nivel de daño causado como resultado de un evento de inundación dado y “Response Index”, refiriéndose a las medidas de prevención y mitigación vigentes en el área de estudio.

Tanguy et al., (2017) realizó un mapeo de áreas de inundación en Canadá, combinando imágenes de satélite RADARSAT y cálculo de periodos de retorno. En este trabajo los autores resaltan la importancia de las metodologías que involucran imágenes satelitales diciendo “Gracias a la capacidad de obtener información sinóptica y detallada, durante el día y la noche, en todas las condiciones climáticas, los satélites Synthetic Aperture Radar (SAR) son considerados como una de las mejores herramientas para la adquisición de información para la generación de mapas de inundación”.

Cervantes Jaimes, (2012) llevó a cabo la elaboración de mapas de riesgo por inundación utilizando modelación 2d, para zonas específicas de los ríos Coatán y Huehuetán. Para esto, se propuso una nueva metodología de caracterización de riesgo tomando en cuenta las variables: tirante de agua y velocidad de flujo. Siendo la segunda la más importante en la pérdida de estabilidad de las personas que se enfrentan a eventos de esta índole.

Delgado Parra, (2016) realizó una comparación de modelos hidráulicos unidimensionales, bidimensionales y cuasi-bidimensionales, para la simulación de inundaciones y elaboración

de mapas de peligro y riesgo. El autor utilizó el software Hec-Ras 5.0, y realizó modelaciones en un meandro del río Llobregat, España. Con respecto a los diferentes métodos, el autor concluye: “El método bidimensional es el más preciso, pero tiene el gran problema que es necesario mucho tiempo de cálculos cuando se tienen mallas grandes que contengan muchas celdas”, sin embargo, el autor concluye que, para zonas planas, este tipo de modelo es el más óptimo. Sobre los modelos unidimensionales, el autor concluye que son los modelos más sencillos de utilizar y con los que es relativamente sencillo obtener resultados estables; sin embargo, éste modelo solo tiene buenos resultados en las zonas cercanas al cauce principal. Sobre la modelación cuasi-bidimensional el autor concluye “Resulta ser un modelo muy difícil de manejar, en el cual es difícil conseguir que los resultados sean estables”.

Rodríguez-Gaviria, (2016) propone dos metodologías para la evaluación de riesgo por inundación en las cabeceras municipales. La primera metodología combina métodos históricos, geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos a partir de datos recogidos en trabajos de campo, redes hidrológicas nacionales, ortofotos, cartografía básica y modelos digitales de elevación. Todo ello con el fin de generar mapas de peligro por inundación. La segunda metodología consiste en la generación de mapas de vulnerabilidad que abordan variables de exposición, susceptibilidad y capacidad de acuerdo con el modelo Turner adaptado y que fueron exploradas a través de la información obtenida de informes, noticias, bases de datos, transectos, entrevistas, talleres comunitarios y encuestas en hogares.

Liu et al., (2017) combinaron estadística bayesiana, sistemas de información geográfica y sensores remotos para la determinación espacial del peligro por inundaciones. Los factores ambientales tomados por ellos fueron: precipitación extrema, evapotranspiración, índice de agua neto, retención de agua por parte del suelo, elevación, pendiente, proximidad del drenaje, densidad, clima, suelo, vegetación, hidrología y topografía. Estos índices fueron valorados usando un método estadístico basado en la entropía. Posteriormente los factores fueron delimitados espacialmente, utilizando métodos estadísticos bayesianos y fueron validados utilizando imágenes satelitales.

Caicedo-Paez (2017) propone el desarrollo de un modelo hidrodinámico para la determinación de alertas tempranas por inundación en la ecorregión de La Mojana, Colombia. Las variables que se tomaron en cuenta fueron para el estudio fueron: la topografía de la zona, condiciones hidrológicas, características de la población y las coordenadas de la región.

Kourgialas y Karatzas, (2016) realizaron un estudio para estimar el riesgo por inundación en Creta, Grecia. Para ello utilizaron herramientas de sistemas de información geográfica, y la valorización cualitativa de variables asociadas a la presencia de inundación. Los factores que utilizaron fueron: Acumulación de flujo, intensidad de precipitación, elevación, geología, uso de suelo y pendiente. La confiabilidad de sus resultados fue verificada utilizando información de mapas históricos de inundación.

Scuderi et al., (2000) realizaron un estudio utilizando imágenes satelitales y sistemas de información geográfica para la generación mapas de número de curva. El método de número de curva contribuye a la representación de las características medias del complejo suelo-vegetación. Este tiene una relación directa con el estado de humedad del suelo, el uso de suelo, etc. Por lo tanto, el método de número de curva contribuye al estudio del proceso lluvia-escurrimiento, permitiendo conocer que parte de la lluvia total es interceptada por la vegetación, que fracción es almacenada superficialmente en depresiones, cual se infiltra y, por último, que porcentaje corresponde al escurrimiento superficial.

### **2.3.6 Dinámica fluvial y potencia de corrientes.**

El termino dinámica fluvial hace referencia al conjunto de procesos conformados por: flujo de agua a través del canal; erosión, transporte y deposición de sedimento en el canal y cambios en la morfología del cauce, producto de la interacción entre el flujo y transporte de sedimentos en el canal (De Rosa et al., 2019).

De acuerdo con Alam et al. (2007) la morfología de los arroyos es el resultado de las interacciones mutuas entre las variables dinámica de fluidos, configuración de los arroyos,

carga de sedimento y composición del lecho de los arroyos. El mismo autor menciona que este tipo de análisis es indispensable para el planeamiento urbano y el desarrollo sustentable de las comunidades. De Rosa et al., (2019) menciona que a una escala, grande, un análisis de este tipo puede indicar, de un modo preventivo y estimativo, las áreas más sensibles a cambios potenciales de inestabilidad causados por los procesos de la dinámica fluvial.

De acuerdo con Magilligan et al. (2015), el efecto de tormentas con rápidos incrementos en las tasas de la descarga, inclusive aquellas con corta duración, pueden llegar a ser altamente significativas con respecto a las variaciones de la morfología de los arroyos. El mismo autor menciona, en el mismo contexto, que la incidencia de eventos ciclónicos puede llegar a ser un importante lente de observación sobre el efecto de estos sobre los procesos naturales. Los cambios en la geometría de los canales naturales en el presente, son el resultado de la acumulación de los procesos de erosión y depositación en los últimos millones de años (Yang y Stall, 1974).

Las ríos, arroyos y demás corrientes, exhiben una gran variabilidad en espacio y en tiempo. La variación espacial en fuerza de flujo controla los procesos de erosión y deposición; Sin embargo, factores como el contexto geomorfológico local o las alteraciones humanas, juegan un papel muy importante (Lea y Legleiter, 2016). Erosión significativa, ensanchamiento de los cauces, modificación de las planicies de inundación y la propensión a la inestabilidad del terreno son algunos de los efectos de grandes descargas (Magilligan et al., 2015). Dentro de este contexto, el termino conocido como potencia de corrientes (PC) ha sido asociada como un predictor de los cambios en las dimensiones de los arroyos y sus partes así como la dinámica en el interior de canal (Lea y Legleiter, 2016). La PC es uno de los parámetros más ampliamente utilizado para investigar, ingeniería y manejar los sistemas de ríos (Gartner, 2016).

La PC es, esencialmente, el producto de la descarga de corrientes, la pendiente del cauce y el peso del agua (Gartner, 2016; Lea y Legleiter, 2016). El valor de PC depende directamente de la tasa en la cual la energía potencial es convertida en energía cinética y el

agua se mueve cuesta abajo. Misma que a su vez es determinada por la descarga y la pendiente. (Lea y Legleiter, 2016). Los usos de la PC se han incrementado debido a la creciente facilidad con la que este valor puede ser obtenido gracias al uso de satélites y sistemas de información geográfica, modelos digitales de elevación más exactos y precisos así como el incremento del poder computacional (De Rosa et al., 2019; Gartner, 2016).

El término PC fue concebido originalmente por Bagnold (1966). Sembrando los cimientos para la cuantificación de la tasa de energía, proporcional a la unidad de distancia en la corriente, para así investigar el transporte en el sedimento mismo (Gartner, 2016). Dicho término está dado por la ecuación (12).

$$\Omega = \rho * g * Q * S \quad (12)$$

Donde  $\Omega$  es la PC,  $\rho$  es la densidad del agua (1,000 kg/m<sup>3</sup> a 4°C),  $g$  es gravedad (9.8 m/s<sup>2</sup>),  $Q$  es la descarga del río y  $S$  es la pendiente de energía, que es equivalente a la pendiente del canal en un flujo uniforme. Este valor es expresado en W/m, y puede ser considerado como una medida de la fuerza que actúa dentro de un canal, así mismo influenciando la capacidad de la corriente para transportar sedimento. (De Rosa et al., 2019).

Sí la PC se divide entre el ancho de corrientes se denomina potencia media de corrientes o Potencia Específica de Corrientes (PEC) (Lea y Legleiter, 2016). Bagnold (1966), define este término como: “El poder medio disponible en la columna de fluido por unidad de área del canal” y puede ser expresado por (13):

$$\omega = \Omega/W \quad (13)$$

Donde  $W$  es el ancho del canal (Lea y Legleiter, 2016).

Bagnold (1966) considero en sus estudios las corrientes como máquinas de transporte de sedimento, donde la tasa de trabajo es hecha con el poder disponible en un cierto tiempo. Dicho autor, derivó la ecuación de la potencia de corrientes utilizando principios físicos, sin hacer asunciones de un modelo empírico o un ajuste de parámetros. (Gartner, 2016).

Este autor Gartner, (2016), describe 4 importantes características de la PC asociado al transporte de sedimento. Que hay que tener en consideración para su uso.

1. En diversos artículos se ha investigado sobre la variación en la potencia de corrientes. Sin embargo, en todos se mantiene una correlación positiva con PC y el flujo de sedimento.
2. Esta relación es verdadera solo arriba de cierto umbral de PC, conocido como potencia de corriente crítica. Este umbral se incrementa entre mayor tamaño tengan las partículas de sedimento. Cuando la PC es baja el flujo de sedimento es mínimo o inexistente.
3. La mayoría de las ecuaciones de PC pueden predecir el flujo de sedimento para canales aluviales. Esta correlación puede ser aplicada en canales cuyo lecho es el basamento, sin embargo, el flujo de sedimento se comportará de forma diferente.
4. La PC y la PEC no consideran la fuerza resistiva en el transporte de sedimento. Solo lo hacen en algunas aplicaciones específicas.

Bizzi y Lernov (2013) encontraron que existen combinaciones únicas de PC y PEC. Así mismo, los canales pueden ser correlacionadas utilizando estas combinaciones a la dominancia de los procesos que ocurren dentro de ellos.

La PC y las variables relacionadas han demostrado ser factores dominantes en la determinación de la dinámica interna de los canales (Yang y Stall, 1974). La PC ha demostrado tener una gran influencia sobre los patrones de la forma de canal, la forma del lecho, migraciones de canal, agregación y disgregación de canales, dinámica de zonas de inundación, cambios geomorfológicos extremos en zonas de inundación, grueso en el tamaño de granos, incremento en la propensión de deslizamiento de terreno, incisión en el basamento entre otros (Gartner, 2016). Algunos trabajos teorizan que la potencia de corrientes tiene a ser máxima en a la zona media de las cuencas debido a que está en relación con las variaciones de descarga y pendiente (Gartner, 2016).

### **2.3.7 Descripción de programas utilizados**

#### **R**

R (R Core Team, 2018) es un ambiente de programación gratuito especializado en computación estadística y graficación. Este funciona sobre una gran variedad de plataformas UNIX, Windows y MacOS. Este proporciona, entre otras cosas un lenguaje de programación, gráficos de alto nivel, interfaces para el manejo de otros lenguajes y herramientas de depuración. El lenguaje R fue creado a partir de lenguaje S, durante los años 80's y ha sido de ampliamente utilizado por la comunidad estadística desde entonces. En particular, este permite la posibilidad de escribir funciones que toman expresiones como input, algo que es muy comúnmente utilizado para modelación estadística y graficación (R Core Team, 2018).

#### **QGIS**

El programa QGIS es un programa de código libre utilizado para el manejo de Sistemas de Información geográfica. QGIS puede ser utilizado en la mayoría de las plataformas de Unix, Windows y macOS. Este programa fue desarrollado utilizando las herramientas Qt y lenguaje C++, es amigable con el usuario y actualmente se encuentra ampliamente documentado (Quantum, 2012). El programa fue creado para soportar una gran variedad de formatos vectoriales y raster. QGIS permite la colaboración de usuarios mediante la creación e intercambio de *plug-in* con los usuarios. Así mismo, QGIS fue lanzado bajo la GNU General Public Licence (GPL). Lo que significa que los usuarios pueden inspeccionar y modificar el código fuente (Quantum, 2012).

### **2.3 Descripción del área de estudio**

El apartado “Descripción del área de estudio” se dividió en 5 subapartados: 1. Hidrología, 2. Clima, 3. Geología, 4. Tipo de suelo y 5. Uso de suelo.

### 2.3.1 Hidrología

La CHSJC tiene un área de 1,278.46 m<sup>2</sup> y es una de las cuencas más grandes del estado de Baja California Sur (Martínez Gutiérrez et al., 2007). La cuenca se ubica entre dos cadenas montañosas, al oeste se localiza la Sierra La Laguna y al este la Sierra La Trinidad. La cuenca San José no cuenta con ríos o corrientes de agua superficial permanentes; sus arroyos son corrientes efímeras que conducen agua exclusivamente en época de lluvia. Por lo tanto, la única fuente confiable de agua en la región es la subterránea, la cual está disponible en el acuífero que corresponde a la CHSJC (Wurl y Valdez Aragón, 2007).

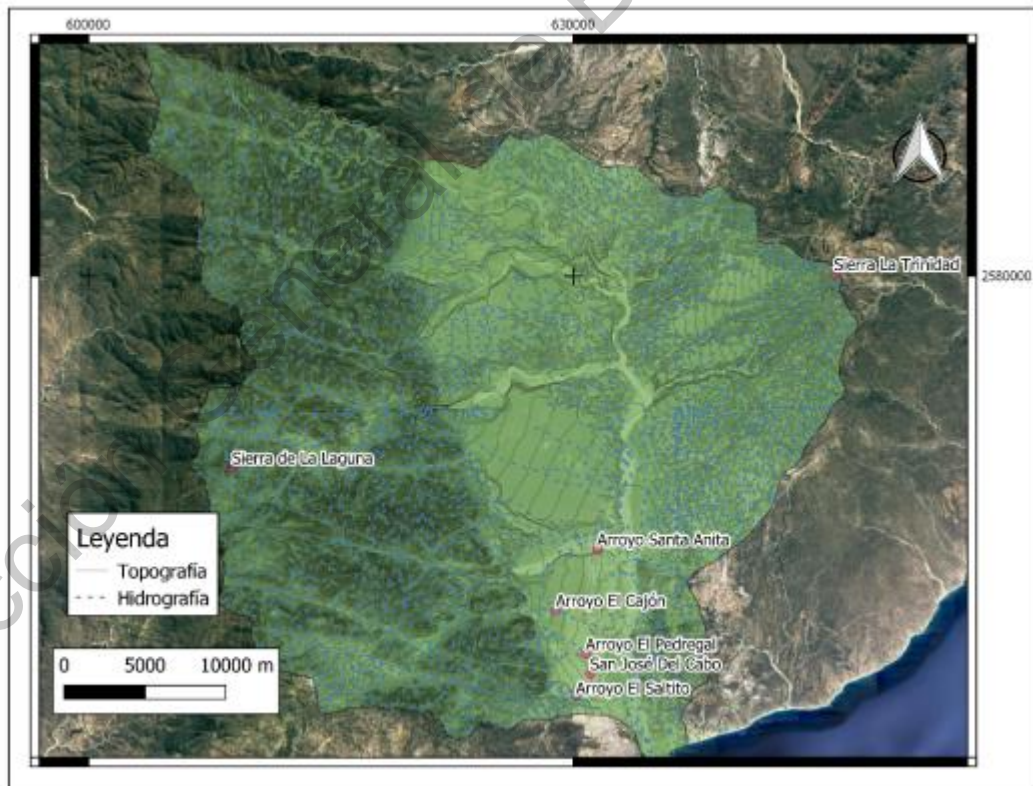
El cauce principal de la CHSJC es de orden 7 y recibe los afluentes provenientes de las subcuencas de la Sierra La Laguna y de la Sierra La Trinidad. El cauce principal posee una dirección N-S y desemboca en el Mar de Cortés vía el Estero de San José. Los arroyos provenientes de la Sierra de La Laguna pueden clasificarse con un orden de corrientes 6, mientras que los arroyos de la Sierra La Trinidad solo alcanzan el orden 5 (Wurl et al., 2002; Strahler, 1952)

Topográficamente el área de estudio presenta sus mayores elevaciones hacia el oeste (hasta 2080 msnm), en el parteaguas conocido como Sierra de La Laguna; mientras que las zonas más bajas (0 msnm) se localizan al sur de la cuenca, en la desembocadura de la cuenca del arroyo de San José del Cabo con el Mar. En general el patrón de drenaje presenta variaciones relacionadas a la litología y la topográfica, predominan los patrones paralelos, sub-paralelo y dendrítico (CONAGUA, 2009). En un sistema dendrítico hay muchas corrientes que contribuyen al cauce principal, por lo que la forma análoga la unión de todas las corrientes es un árbol. Los patrones de drenaje paralelo se originan debido a la presencia de pendientes muy escarpadas. Debido a esta gran pendiente las corrientes fluirán de manera recta en la misma dirección con pocos tributarios. Un drenaje de tipo paralelo También puede desarrollarse debido a la presencia de geoformas elongadas y paralelas resistentes a la erosión (por ejemplo, afloramientos de basamento granítico). La presencia de patrones de drenaje paralelo también puede indicar la presencia de fallas (Ali et al., 2008) (**Figura 3**).



### 2.3.2 Clima

Baja California Sur se localiza dentro de la influencia del cinturón de desiertos, que dominan en latitudes entre 23 y 30 norte y sur. La causa principal de estos desiertos o regiones áridas es que coinciden con las celdas o zonas permanentes de alta presión, con aire seco y descendente. Además, el clima es influenciado por la corriente fría de California que baña las costas occidentales de la península ocasiona una inversión térmica y pluviométrica acentuando las condiciones de aridez. Por ello, aproximadamente tres cuartas partes de la entidad son áridas y, las porciones que no lo son, como es el caso de la Sierra La Laguna, lo deben a su gran elevación (más de 2,000 m) (Wurl & Valdez Aragón, 2002).

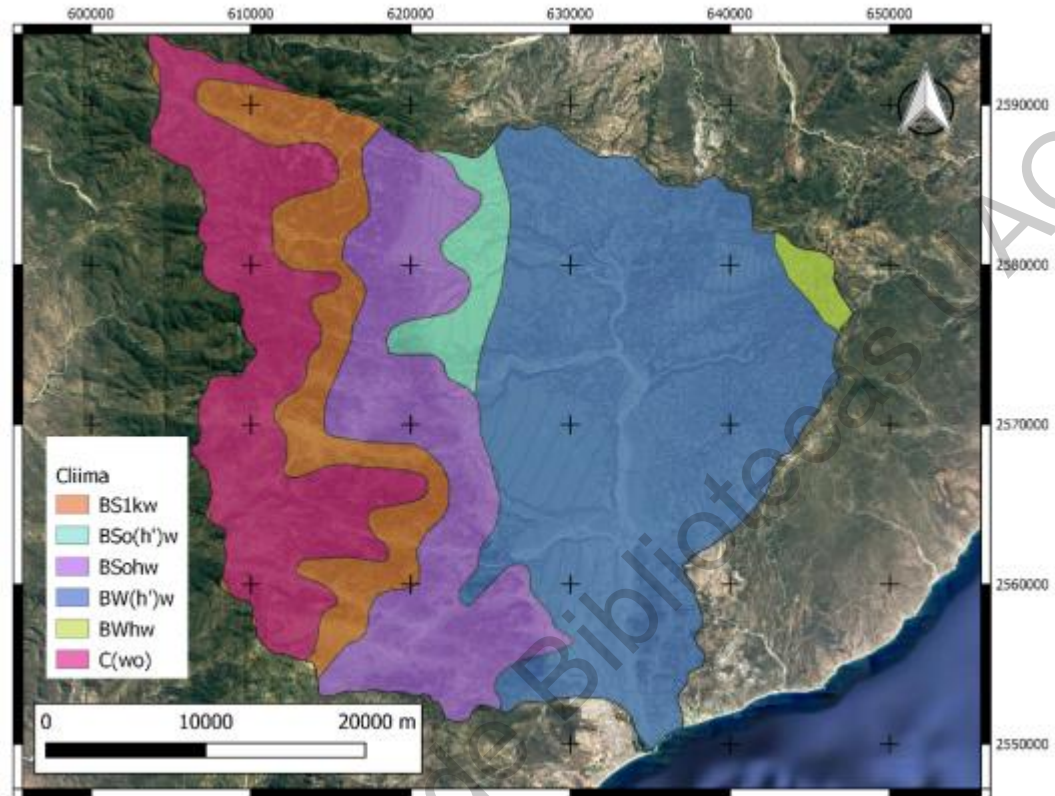


**Figura 3** Hidrografía y topografía de la cuenca de la CHSJC.

De acuerdo con la información de la carta de climas de LA Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 1997) y la clasificación de Köppen, modificada por García (García, 1973), en la CHSJC existen 6 tipos de climas.

- En la porción noreste de la cuenca, sobre las zonas más elevadas de la Sierra La Trinidad se presenta un clima “BWhw”, el cual corresponde a un clima muy árido, semicálido. Posee una temperatura media entre 18° C y 22° C, donde las lluvias se presentan principalmente en verano.
- En las laderas de esta sierra, así como en las partes bajas de la cuenca y en las zonas bajas de la Sierra La Laguna predomina un clima de tipo “BW(h’w)”. Este se caracteriza por ser muy árido, cálido, con temperatura media anual mayor de 22° C, lluvias en verano y un porcentaje de lluvias invernales de 5 al 10% del total anual
- En una pequeña región al noroeste de la cuenca, representada por la estación de Agua Caliente (4 % del área de la cuenca) se presenta un clima de tipo “BSo(h’w)”. Este se caracteriza por ser árido, cálido.
- En las partes medias de la Sierra La Laguna entre las cotas de 300 y 800 msnm se presenta un clima de tipo “BSohw” que se caracteriza por ser árido y semicálido, con temperatura media anual entre 18° C y 22° C.
- En altitudes mayores, entre las cotas de 800 y 1000 msnm, el clima es de tipo “BS1kw”, el cual se caracteriza por ser semiárido, templado, con temperatura media anual entre 12° C y 18° C. La temperatura del mes más frío puede llegar a -3° C.
- En las partes más elevadas de la Sierra La Laguna el clima es “C(wo)” templado subhúmedo, con una temperatura media anual entre 12° C y 18° C.

De estos climas, el predominante es “BW(h’w)” y que se presenta en 46% de la superficie de la cuenca; seguido por el clima “C(wo)” con 19%. Los climas menos predominantes son “BWhw” que se presentan en 2% de la superficie de la cuenca y “BSo(h’w)” con 4% (Figura 4).



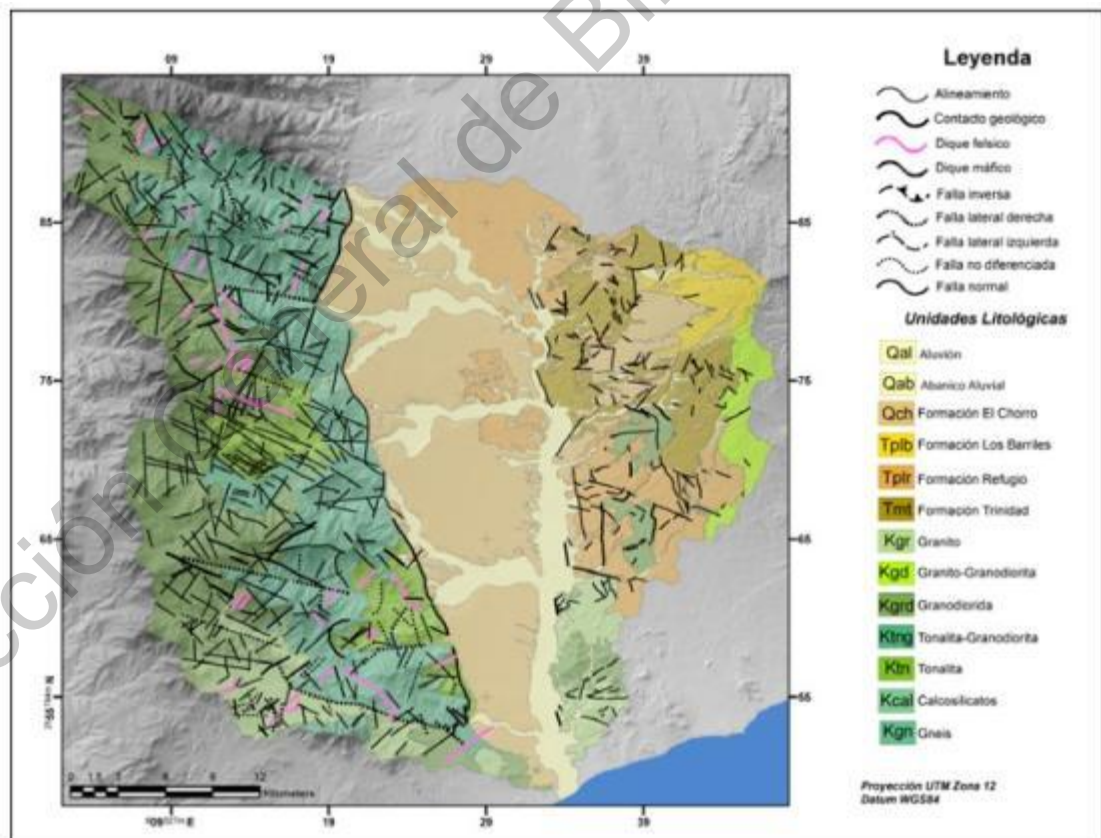
**Figura 4** Distribución de tipos de clima en el interior de la CHSJC de acuerdo con Köppen, modificada por García (García, 1973)

La precipitación dentro del área de estudio varía entre los rangos 125 a 400mm para la zona este, y entre 400 y 600 mm para la zona oeste (Vidal-Zepeda, 2001). El mayor volumen de precipitación en esta zona, es aportado debido a la presencia de ciclones tropicales durante el verano. Las lluvias durante dichos eventos comúnmente alcanzan valores entre 90 a 240 mm de precipitación acumulada en 24 horas. Dichos eventos pueden durar días o semanas en disiparse y se registran principalmente en los meses de mayo a noviembre (Wurl, 2007; Wurl & Valdez Aragón, 2007). Un ejemplo histórico es la incidencia del huracán Juliette, ocurrido entre los días 27 y 30 de septiembre del año 2001. El huracán Juliette se caracterizó por la cantidad de lluvia liberada sobre la región, en algunas zonas alcanzando 1011mm de precipitación acumulada en 3 días continuos (Antinao & Farfán, 2013).

### 2.3.3 Geología

Las rocas expuestas en la cuenca son agrupadas en tres conjuntos litoestratigráficos denominados informalmente: Complejo Metamórfico, Ensamble Plutónico y Unidades Sedimentarias. El Complejo Metamórfico solamente está expuesto en la margen occidental de la cuenca, en el área que corresponde a la Sierra La Laguna; mientras que el Ensamble Plutónico está presente en ambas márgenes de la cuenca. Las unidades sedimentarias componen la mayor parte de la cuenca hidrológica (Martínez Gutiérrez et al., 2007).

Las rocas más antiguas expuestas en esta región corresponden a un ensamble ígneo compuesto de granito, granito-granodiorita y rocas volcánicas, y un paquete sedimentario constituido por rocas sedimentarias de origen continental y marino que forman y bordean la



Sierra La Trinidad, respectivamente (Martínez Gutiérrez et al., 2007; **Figura 5**).

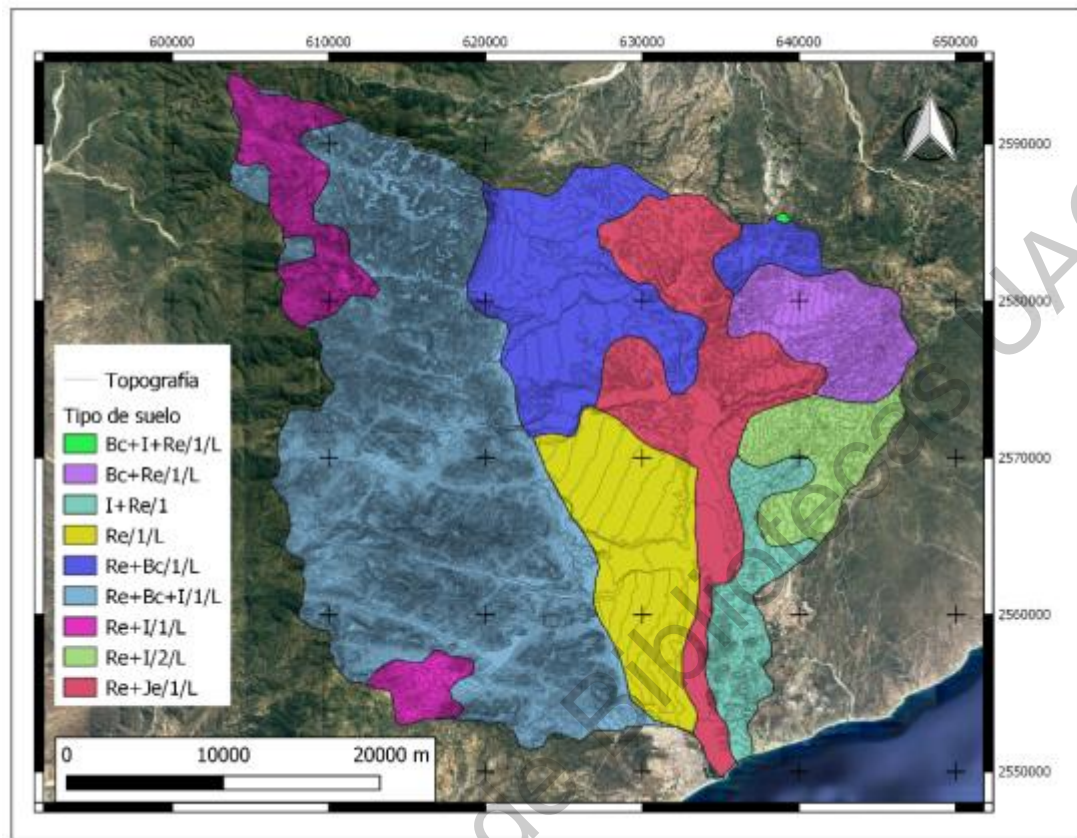
**Figura 5** Distribución de la geología y geológico-estructural en el interior de la cuenca de San José del Cabo, tomado de (Martinez-Gutierrez et al., 2002)

#### **2.3.4 Tipo de suelo**

El área de estudio se conforma principalmente de tres tipos de suelo: Cambisol Cromico, Litosol y Regosol Eutrico; siendo el ultimo el más abundante (INIFAP, 1995). El tipo de suelo Cambisol se caracteriza por diferenciación de horizontes manifestado por cambios en el color, la estructura o el lavado de carbonatos, entre otros. Los Cambisoles se desarrollan sobre materiales de alteración procedentes de un amplio abanico de rocas, entre ellos destacan los depósitos de carácter eólico, aluvial o coluvial. Los Cambisoles Cromicos se caracterizan debido a que La mayor parte del horizonte B tiene un matiz de 7.5 YR y una pureza en húmedo mayor de 4, o un matiz más rojo que 7.5 YR (INIFAP, 1995).

El tipo de suelo Litosol, también conocido como Leptosol, se caracterizan por tener un espesor reducido. El material original puede ser cualquiera tanto rocas como materiales no consolidados con menos del 10 % de tierra fina. Aparecen fundamentalmente en zonas altas o medias con una topografía escarpada y elevadas pendientes. Se encuentran en todas las zonas climáticas y, particularmente, en áreas fuertemente erosionadas (INIFAP, 1995).

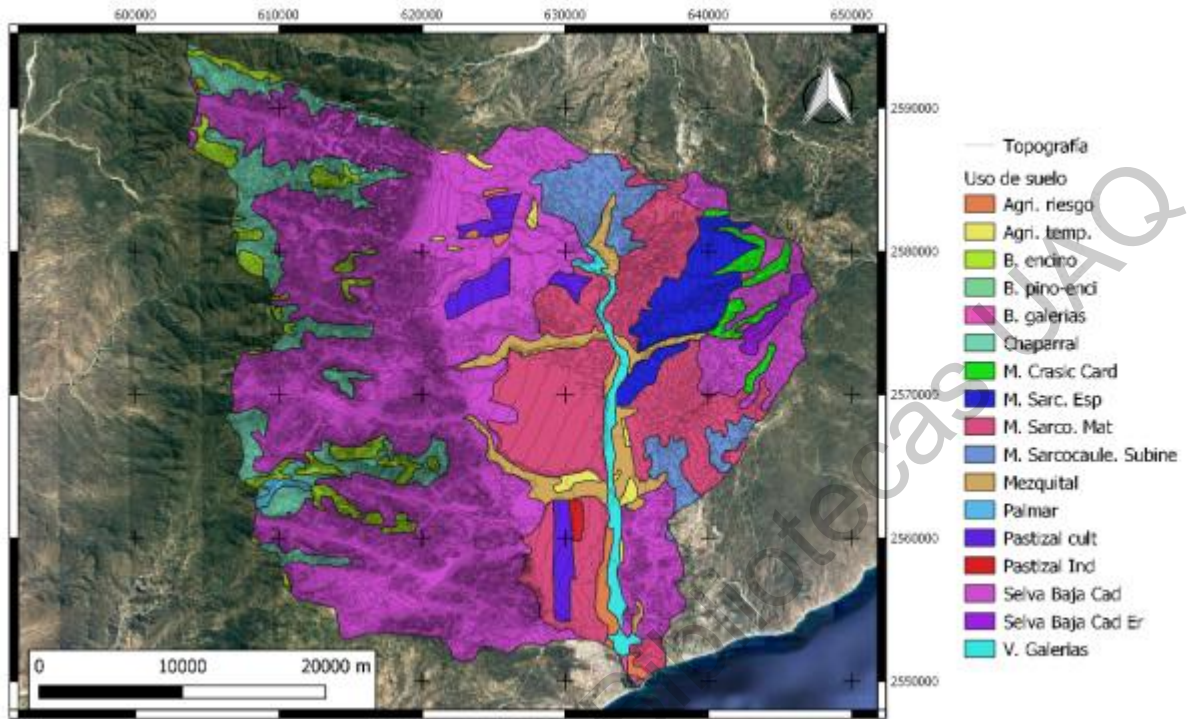
Los tipos de suelo Regosol se desarrollan sobre materiales no consolidados, alterados y de textura fina. Aparecen en cualquier zona climática sin permafrost y a cualquier altitud. Son muy comunes en zonas áridas, en los trópicos secos y en las regiones montañosas (INIFAP, 1995) (**Figura 6**).



**Figura 6** Tipos de suelo en el interior de la cuenca de San José del Cabo de acuerdo con (INIFAP, 1995)

### 2.3.5 Uso de suelo

Los usos de uso que ocupan mayor área en el interior de la cuenca son: Bosque de encino, con un 11.2 % del área de la cuenca; Mezquital, con un 11.2 % de la cuenca, y agricultura temporal, con un 10.6 % de la cuenca, entre otros (INEGI, 2010) (**Figura 7**).



**Figura 7** Distribución del uso de suelo en el interior de la cuenca de San José del Cabo

### 3. METODOLOGÍA

La metodología se dividió en nueve partes: 1.- Recopilación de la información, 2.- Procesamiento de la información hidrometeorológica, 3.- Análisis morfométrico y obtención de número de curva, 4.- Modelación hidrológica de las cuencas de aporte, 5.- Modelación hidráulica, 6.- Análisis de variaciones en el ancho del cauce, 7.- Obtención de valores de potencia de corrientes, 8.- Análisis de variaciones en el cauce en función de la potencia de corrientes y 9.- Caracterización de peligro y generación de mapas. A continuación, se describe de manera sucinta los pasos utilizados para el desarrollo del proyecto, así como sus datos de entrada, salida. Los datos específicos de cada uno de los pasos (precisión, limitaciones de insumos, etc.) se describen con detalle en los apartados 3.1 a 3.6.

La etapa uno consistió en la recopilación de información referente al área de estudio. Se consideraron artículos, reportes, tesis entre otros. La información fue condensada a manera de síntesis y cartografiada utilizando software QGIS para facilitar su entendimiento. Algunos ejemplos de los tipos de información recopilada fueron: características fisiográficas del área de estudio, estudios anteriores relacionados a la temática del presente trabajo e información histórica de eventos climatológicos, entre otros. Los resultados de este paso se presentan en los apartados “2.1.- Área de estudio”, “2.2.- Literatura consultada”, “2.3.- Descripción del área de estudio” y “3.3 Encuestas e información histórica”.

El paso dos tuvo por objetivo el procesamiento de la información hidrometeorológica mediante pruebas y análisis estadísticos. Se buscó la estimación de tormentas de diseño ponderadas para cada una de las subcuencas y expresadas en distintos periodos de retorno. Los datos de entrada para este paso fueron los datos de las distintas estaciones meteorológicas automáticas y no automáticas encontradas en las zonas aledañas del área de estudio. Los análisis estadísticos fueron realizados en el ambiente de programación Rstudio (R Core Team, 2018) y los hietogramas sintéticos del Servicio de Conservación de Suelos



(NRCS, 1986). Las salidas este paso fueron tormentas de diseño con duración de 24 horas y para distintos periodos de retorno, ponderadas por cuencas.

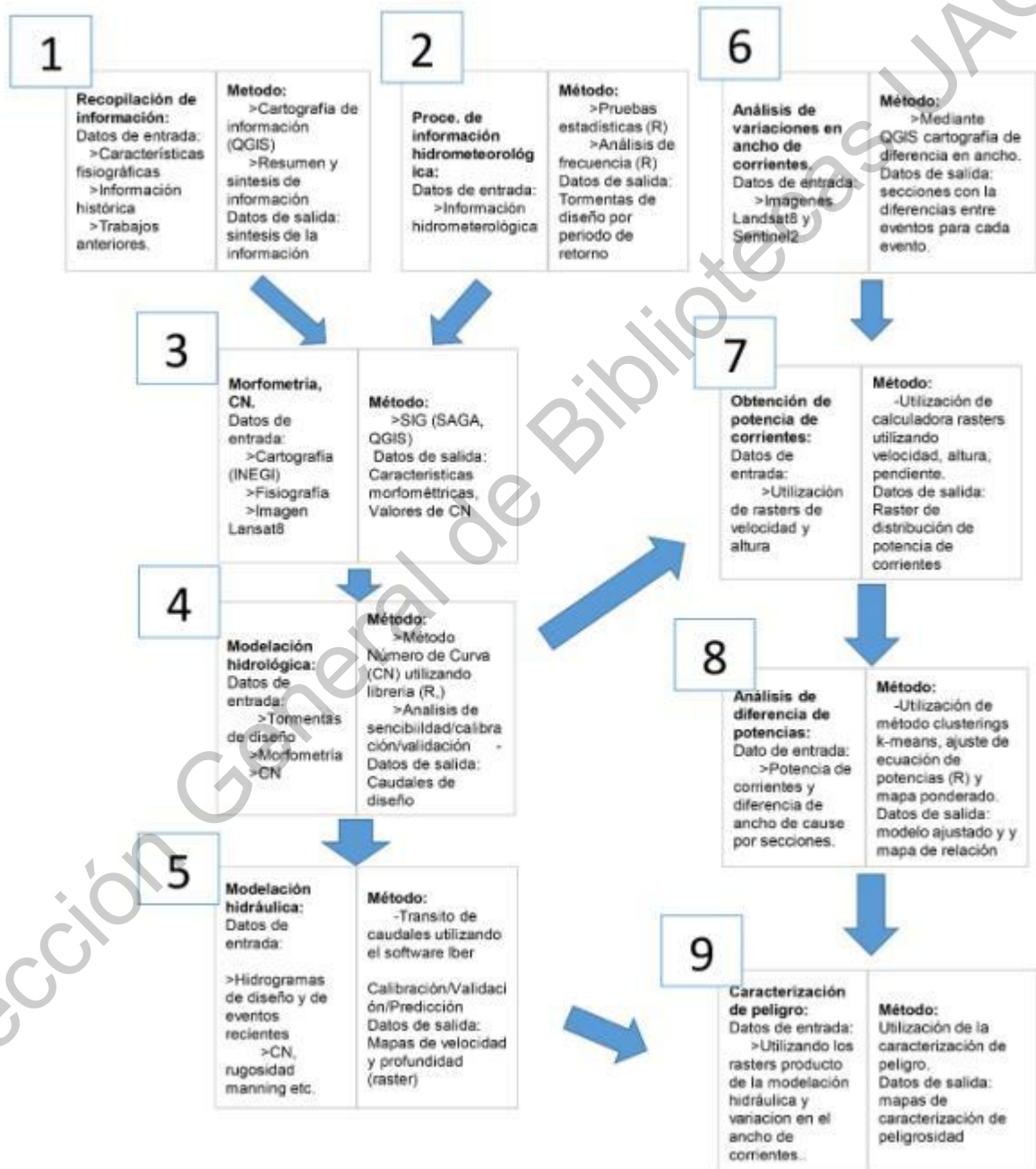


Figura 8.- modelo cartográfico de las etapas del desarrollo del trabajo: 1.- Recopilación de la información, 2.- Procesamiento de la información hidrometeorológica, 3.- Análisis morfométrico y obtención de número de curva, 4.- Modelación hidrológica de las cuencas de aporte, 5.- Modelación hidráulica, 6.- Análisis de variaciones en el ancho del cauce, 7.- Obtención de valores de potencia de corrientes, 8.- Análisis de variaciones en el cauce en función de la potencia de corrientes y 9.- Caracterización de peligro y generación de mapas.

El paso número tres consistió en la realización del análisis morfométrico para cada una de las subcuencas, así como la obtención de los valores de número de curva ponderado. Los datos de entrada para este paso fueron la información cartográfica y fisiográfica del área de estudio, así imágenes Landsat8 para la determinación de uso de suelo mediante algoritmos de clasificación semiautomáticos. Se utilizaron los softwares QGIS (Quantum, 2012) y SAGA (Bock et al., 2011), principalmente el *plug-in* "Semi-automatic classification plug-in" (Congedo, 2016). Los datos de salida de este paso fueron diversos parámetros morfométricos de cada una de las subcuencas estudiadas, así como los valores de número de curva ponderados para estas.

El paso cuatro consistió en la modelación hidrológica de caudales asociados a las subcuencas del área de estudio. Los datos de entrada de este paso fueron los datos de precipitación de las tormentas de diseño, así como los parámetros morfométricos y de número de curva ponderado en pasos anteriores. Este paso se llevó a cabo utilizando el modelo de hidrológico de número de curva, utilizando el ambiente de programación Rstudio, específicamente la librería "RgeoRAS" elaborada por el Servicio Geológico Nacional Australiano (Geoscience-Australia, 2015). El método hidrológico utilizado fue el método de Número de Curva (Ponce y Hawkins, 1996). La modelación se dividió en 3 etapas: 1.- Análisis de sensibilidad, 2.- Calibración y 3.- Validación. El análisis de sensibilidad se realizó utilizando el método one-at-a-time. La calibración y validación se realizó utilizando relaciones de áreas y caudales pico, con respecto a la subcuenca vecina "La Palma". Esta subcuenca cuenta con mediciones hidrométricas por hora para periodos específicos. Para la calibración y validación se utilizaron los criterios de Pearson, Kendall y Spearman.

El paso cinco tuvo como objetivo la modelación hidráulica a lo largo de los cauces que atraviesan el poblado de San José del Cabo. Se buscó la obtención de la distribución espacial del tirante y velocidad de agua en las diferentes zonas durante eventos ciclónicos. Los insumos utilizados en este paso fueron los volúmenes de escurrimiento asociados a las tormentas de diseño, así como los parámetros de Número de Curva y rugosidad de Manning, obtenidos a partir de análisis espacial y de la literatura, respectivamente. La modelación hidráulica se realizó utilizando el software Iber, el cual hace uso de las ecuaciones de Navier Stokes en 2 dimensiones promediadas en profundidad (Shallow water equations). El programa funciona mediante una malla de polígonos con tamaños no fijos. Las salidas del cinco fueron rasters con tamaño de celda de 5 x 5 metros, asociados a las velocidades máximas y tirantes máximos del agua en los arroyos y zonas inundables, durante los eventos de ciclones tropicales.

El paso número seis tuvo por objetivo el análisis de los cambios en el ancho de las corrientes del área de estudio, antes y después de la ocurrencia de ciclones tropicales. Para este análisis se utilizaron como insumos, imágenes Landsat8 y Sentinel2, con resolución espacial de 30 y 5 metros respectivamente. Los eventos analizados fueron: La tormenta tropical Lidia, El huracán Odile y el Huracán Newton. Las imágenes se eligieron por fecha, antes y después de cada evento. Se utilizó el software QGIS (Quantum, 2012) para el manejo y medición de las imágenes. Los cauces fueron divididos en sección cada 200 metros aproximadamente. Las distancias antes y después de cada evento fueron medidas utilizando secciones trazadas por vectores perpendiculares a la dirección de flujo. Los datos de salida de este paso fueron valores de diferencia de tamaño en cauces, para cada uno de los eventos ciclónicos y para cada sección de cada arroyo.

El objetivo del paso siete fue la obtención de la variable potencia de corriente, asociada a los eventos ciclónicos, para cada una de las secciones obtenidas. Los insumos de este paso fueron, los rasters de distribución espacial de velocidad y tirante de agua con discretización espacial de 5 metros, así los modelos digitales de elevación Lidar con distribución espacial de 5 metros. Para la realización de este método se utilizó la ecuación de potencia de corrientes total (Bagnold, 1966) y el software QGIS (Quantum, 2012), mediante la

calculadora raster. Los datos de salida de este paso fueron valores medios de potencia de corrientes para cada una de las secciones.

El paso ocho tuvo por objetivo probar la viabilidad de un ajuste de potencia de corriente y variación en el ancho del cauce. Se buscó conocer si para el área de estudio existe una relación directa entre la potencia de corriente y el ancho del cauce, así como cuáles son las zonas más vulnerables a este fenómeno. Los insumos de este paso fueron los datos de diferencia en el ancho de corriente y potencia de corrientes de distintos ciclones tropicales, obtenidos a partir de la utilización de sistemas de información geográfica. Para el desarrollo de este paso se utilizó el ambiente de programación Rstudio (R Core Team, 2018). En donde se utilizó el método de *clustering* con el objetivo de identificar patrones grupos dentro relacionados entre los insumos. El ajuste se realizó mediante el método de máxima verosimilitud. Las salidas de este paso fueron el ajuste de un modelo para correlacionar la potencia de corrientes con las variaciones en el ancho de cauce, y la caracterización mediante mapas de las zonas más vulnerables a ser afectadas por dichos cauces.

El objetivo del paso 9 fue la caracterización de peligrosidad de la zona en función de la velocidad, profundidad y periodo de retorno en cada uno de los arroyos modelados. Los datos de entrada utilizados para dicho propósito fueron los obtenidos de la modelación hidráulica y de las relaciones potencias de corrientes. La salida de este proceso fueron mapas de peligrosidad por inundación y de zonas susceptibles a ser modificadas por avenidas.

### **3.1 Procesamiento de la información hidrometeorológica.**

Para esta etapa se utilizó la información proporcionada por las estaciones meteorológicas más cercanas al poblado de San José del Cabo (CONAGUA, 2018). Estas estaciones corresponden a los nombres: “La Soledad sur”, clave 3137; “San Felipe”, clave 3051; “San

José”, clave 3056 y “Santa Anita”, clave 3094. Todas las estaciones poseen datos de precipitación acumulada en 24 horas, para periodos que van entre 35 y 75 años, aproximadamente, y un porcentaje total de datos faltantes menor al 10% (**Tabla 3**). Para la limpieza de datos y la aplicación de pruebas estadísticas se utilizó el ambiente de programación R (R Core Team, 2018). Para la generación de mapas y ubicación de las estaciones se utilizó el software QGIS 3.2.3 (Quantum, 2012).

**Tabla 3** Listado de estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio (CONAGUA, 2018)

Nombre	Coordenadas	Rango	Porcentaje de datos faltantes
San Felipe	23.0792° y -109.7215°	01/02/1939 - 31/12/2016	3.36%
San José	23.0703° y -109.7047°	01/04/1933 - 31/12/2016	7.76%
Santa Anita	23.1789° y -109.7013°	13/05/1973 - 31/12/2016	4.05%
La Soledad	23.1433° y -110.0011°	16/03/1978 - 31/12/2016	4.06%

Se seleccionó un periodo común de 36 años para todas las estaciones, el cual va del año 1981 a 2016, tomando en cuenta los valores de precipitación máximos anuales asociados solo a eventos de precipitación por ciclones tropicales. Además, se buscó que cumpliera con los requisitos estadísticos para poder validar la estimación de valores de precipitación. Para la identificación de precipitaciones en la base de datos de CONAGUA se utilizó como referencia la base de datos de la NOA para huracanes en el Noreste y Centro del océano Pacífico (NOA, 2018). Se consideraron solamente los huracanes mencionados que se hayan acercado a la península de Baja California.

Para poder considerar las estimaciones probabilísticas como válidas, es necesario se cumplan con distintos criterios estadísticos (Campos-aranda, 2014; Grub y Robson, 2000):

los datos deben de ser aleatorios, independientes, homogéneos y tener estacionalidad. Es decir, los datos deben ser aleatorios y no estar asociados a más de un evento, no deben tener cambios bruscos en su varianza ni deben de seguir una tendencia monotónica, los datos deben de ser independientes e idénticamente distribuidos. Para probar ello se utilizaron distintas pruebas estadísticas:

Para probar la aleatoriedad de los datos se utilizó la prueba estadística “Wald-Wolfowitz runs test”, la cual se especializa en identificar la aleatoriedad para datos continuos (Brownlee, 1965). Para probar la independencia de los datos se utilizó la prueba “Box-Pierce Test”, la cual es una prueba estadística utilizada para examinar una hipótesis nula de independencia en series de tiempo (Box y Pierce, 1970). Para probar la homogeneidad se utilizaron las pruebas “Normal Standar Homogeneity Test”, “Buishand Range Test”, “Pettit Test” y “Von Neumann Ratio Test”. Todas ellas examinan la hipótesis nula de que los datos analizados son homogéneos (Kang y Yusof, 2012). Para probar la estacionalidad “Mann-Kendall Trend Test”, cuya hipótesis nula especifica que lo datos no siguen una tendencia monotónica (Hipel y McLeod, 1994).

Las librerías utilizadas para el análisis estadístico fueron: “randtests”, para “Wald-Wolfowitz runs test” (Caeiro & Mateus, 2014); “iki.dataclim”, para las pruebas “Normal Standar Homogeneity Test”, “Buishand Range Test”, “Pettit Test” y “Von Neumann Ratio Test”(Orlowsky, 2014); “trend”, para la prueba “Mann-Kendall Trend Test” (Pohlert, 2018) y la librería “stats”, para la prueba “Box-Pierce Test” (R Core Team, 2018). Esta última librería es la librería que es instalada por defecto junto con la instalación de R.

Una vez que se aseguró que los datos cumplieran con las especificaciones, se procedió a realizar un análisis de frecuencia, mediante un ajuste de distribuciones de probabilidad. El análisis se realizó utilizando únicamente la información extraída para eventos de precipitación máxima anual en 24 horas por eventos ciclones tropicales. Es debido a ello que no se consideró la utilización de distribuciones de probabilidad que analizan dos o más poblaciones (ej. Gumbel de dos poblaciones). Para el análisis de frecuencia se utilizó la distribución de probabilidad Gumbel (Alam et al., 2018; AlHassoun, 2011; Baratti et al.,

2012; Jesudasan-Julius, 2018; Koutsoyiannis y Baloutsos, 2000; López-Lambraño et al., 2017). Debido a que solo se consideraron tormentas originadas por ciclones tropicales, se consideró adecuada una duración de tormenta de diseño de 24 horas. Utilizando los modelos estadísticos ajustados se calculó la precipitación asociada a periodos de retorno de 1, 5, 10, 25, 50, 100, y 500 años. Los periodos de retorno fueron elegidos para poder facilitar la delimitación de escenarios con probabilidad alta, media y baja, y poder asociarlos a clasificaciones de peligro (Moel et al., 2009). Los resultados fueron estimados para cada estación analizada.

Para el ajuste de esta distribución se utilizó la librería “famle” dentro de R (Francois Aucoin, 2017). Se realizó el ajuste mediante el método de máxima verosimilitud. La bondad de ajuste se probó mediante el método de “Kolmogorov Smirnov test”, el cual presenta una hipótesis nula que afirma que dos conjuntos de datos están asociados a una misma distribución de probabilidad (Conover, 1999). Utilizando la librería “FAdist” (F Aucoin, 2015), permite la generación de datos aleatorios asociados a ciertas distribuciones de probabilidad. Con ello se generaron 100 datos aleatorios asociados a la distribución Gumbel, específicamente utilizando los parámetros de mejor ajuste de “escala” y “locación”, para cada una de las estaciones. Se realizaron las pruebas “Kolmogorov Smirnov test” (J. Wang, Tsang, & Marsaglia, 2003) y “Von Cramer Mises” (Anderson, 1962) utilizando los datos de precipitación extraídos de cada estación contra valores generados a partir de las distribuciones de probabilidad con el mejor ajuste. Para la utilización de este método se utilizó la librería “stats” (R Core Team, 2018). Para comprobar la confiabilidad del ajuste se compararon los resultados obtenidos del análisis de frecuencia, con los datos obtenidos de un análisis de frecuencia hipotético utilizando la distribución Gumbel de dos poblaciones y utilizando todo el registro de precipitación. Si los resultados se encontraron dentro de un intervalo de 95% se consideró aceptable.

Se utilizó el método de polígonos de Thiessen para la ponderación de la influencia de cada estación para cada una de las subcuencas analizadas (Cudworth, 1989). Se realizó una ponderación de las áreas de influencia en el interior de cada cuenca, asociando el efecto que

tendría cada una de las estaciones analizadas y su respectivo cálculo de precipitación por periodo de retorno.

Las precipitaciones se disgregaron en duraciones más cortas utilizando los hietogramas sintéticos reportados por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USDA-NRCS, 2015). Para la disgregación se utilizó el hietograma tipo III, el cual se basa en el análisis de estaciones periódicamente afectados por la incidencia de huracanes al este de los Estados Unidos. De esta forma se generaron tormentas de diseño para duraciones de 24 horas y periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años. Estas servirán posteriormente para los cálculos de los modelos hidrológicos e hidráulicos.

### **3.2 Análisis morfométrico y número de curva**

Se analizó la morfometría de las subcuencas que conforman el área de estudio. Entre los parámetros morfométricos analizados se encuentran: área, perímetro, largo de la cuenca, largo del cauce principal, frecuencia de corriente, densidad de corrientes, entre otros. Los parámetros básicos del análisis morfométrico fueron utilizados para el cálculo del número de curva en conjunción con datos espaciales de tipo y uso de suelo. Se realizó un análisis utilizando una imagen de satélite Landsat8 y sistemas de información geográfica para la obtención de un parámetro de número de curva ponderado para cada una de las subcuencas analizadas

Para el análisis morfométrico se utilizaron los softwares SAGA 2.3.2 (System for Automated Geoscientific Analyses) (Bock et al., 2011) y QGIS 3.2.1. (Quantum, 2012). Ambos programas son gratuitos y posee una amplia comunidad y soporte de usuarios. Como insumos se utilizaron los modelos digitales de terreno de tipo LIDAR escala 1:10,000, con un tamaño de celda de 5x5 m. Las claves de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) utilizados fueron: F12B33F2, F12B34D1, F12B34D2, F12B34E1, F12B34E2, F12B34F1, F12B34F2, F12B33F4, F12B34D3, F12B34D4, F12B34E3, F12B34E4, F12B34F3, F12B34F4, F12B43C2, F12B44A1, F12B44A2, F12B44B1, F12B44B2, F12B44C1, F12B44C2, F12B45A1, F12B43C4, F12B44A3, F12B44A4, F12B44B3, F12B44B4, F12B44C3, F12B44C4, F12B45A3, F12B43F2, F12B44D1,



F12B44D2, F12B44E1, F12B44E2, F12B44F1, F12B44F2, F12B45D1, F12B43F4, F12B44D3, F12B44D4, F12B44E3, F12B44E4, F12B44F3, F12B44F4, F12B45D3. Los datos fueron reinterpolados utilizando el método “Triangular Irregular Network” (TIN), con un tamaño de celda de 5 metros.

Para el análisis de los modelos digitales de elevación se utilizaron distintas herramientas: se utilizó la corrección de depresiones de Wang y Liu (L. Wang y Liu, 2006). Este algoritmo detecta y rellena depresiones que pudieran afectar el procesamiento de algoritmos para estudios hidrológicos y de cuencas. Posteriormente se utilizaron las funciones “Flow accumulation” (Conrad, 2006), “Upslope” (Freeman, 1991; O’Callaghan y Mark, 1984; Quinn, Beven, Chevallier, y Planchon, 1991; Tarboton, 1997), “Channel Network and Drainage Basin” (Conrad, 2006). El algoritmo “Flow Accumulation” permite obtener el trazo de la dirección del flujo en todas las celdas del modelo digital de elevación de forma separada, hasta que todas converjan en un solo punto, hasta el término del modelo digital de elevación o hasta encontrar un sumidero (Conrad, 2006). El algoritmo “Upslope” permite, mediante la identificación de una celda específica, conocer las áreas de contribución para dicha celda “aguas arriba”. De esta forma es posible identificar los límites de cada subcuenca. El algoritmo “Channel Network and Drainage Basin” permite conocer las redes de drenaje en el interior de la cuenca, a partir de un cierto umbral asociado a un área de captación para el comienzo de la creación de redes de drenaje de orden 1 según Strahler (Strahler, 1957). Dicha área de captación se encuentra asociada al tamaño de pixel del modelo digital de elevación. Con ello se obtuvieron los parámetros: área de la cuenca, perímetro de la cuenca, largo de cada subcuenca, largo total de corrientes, relieve de la cuenca, pendiente promedio de la cuenca (grados), pendiente promedio del cauce principal (grados) y número de cauces. Por otra parte, también se buscaron las relaciones: frecuencia de corrientes, densidad fluvial, textura de drenaje, tasa de elongación y factor de forma. Esta información permite la identificación de manera cualitativa del comportamiento de respuesta de la cuenca ante eventos de precipitación.

Para la caracterización del Número de curva se realizó una caracterización generalizada de la CHSJC y luego se segmentó para cada una de las subcuencas, de esta manera se puede

facilitar la tarea. Para la realización de este paso se utilizó la herramienta denominada “Semi automatic classification plugin” (Congedo, 2016). Como insumo se utilizó una imagen LANDSAT 8 del día 26 de mayo del año 2018. Previo a su análisis se utilizó la corrección atmosférica (Dark Object Substraction) DOS1. Se realizó una clasificación de firmas espectrales por medio de polígonos de entrenamiento. La clasificación utilizada fue: 1.- Zona urbana, 2.- Calles y carreteras, 3.- Vegetación primaria, 4.- Vegetación secundaria y 5.- Arroyos. El método de ajuste fue máxima verosimilitud y se validó utilizando 50 puntos aleatorios. Para que una clasificación se considerara como válida se esperó que al menos 40 de los 50 puntos estuvieran clasificados correctamente, es decir, 80 % del total de los puntos aleatorios de muestreo. Se realizó una calibración con respecto a la información obtenida en la validación. La zona de estudio también fue clasificada con respecto a su tipo de suelo de acuerdo a datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 1988). Se combinó la información obtenida de uso de suelo con la textura del suelo para poder caracterizar el área en función del Número de Curva (CN) (USDA-NRCS, 2010). Con ello fue posible obtener el parámetro de Número de Curva, el cual sirvió como insumo para las modelaciones hidrológica e hidráulica.

### **3.3 Encuestas e información histórica**

El objetivo de esta etapa fue la delimitación espacial de influencia de eventos de inundación históricos. Se buscó la reconstrucción del tirante del agua de los eventos de ciclones tropicales más recientes en la zona.

Para ello se realizó una encuesta en las zonas aledañas a cada uno de los arroyos en el área de estudio. La información resultante se complementó con información documental de diversos medios de comunicación como: periódicos, páginas de internet, revistas y redes sociales. Las encuestas fueron realizadas durante un periodo de 7 semanas, haciendo visitas a campo distintos puntos cercanos a la zona de transición entre el poblado de San José del Cabo y los arroyos que cruzan por este. Las encuestas son una alternativa económica y

flexible ante la necesidad de información actualizada sobre aspectos específicos (Rodríguez-Gaviria, 2016).

Para la generación de las encuestas el cuestionario se presenta en el Anexo 10. Se consideró el número de manzanas como población total, de esta forma, el número de muestras fue determinado basado en la metodología de Bartlett (Kotlik y Higgins, 2001). Se buscó tener suficientes muestras para una representatividad del 95% con un error marginal de 5%. Los resultados obtenidos de las encuestas fueron cartografiados utilizando el software QGIS (Quantum, 2012), a partir de las coordenadas de cada punto encuestado.

Los resultados de la encuesta fueron utilizados para la calibración y validación de los escenarios de inundaciones históricas, en conjunción con las noticias y reportes obtenidos por medios de comunicación tradicionales (televisión y periódicos) e internet.

### **3.3 Modelación hidrológica de las cuencas de aporte**

Para la identificación del comportamiento lluvia – escurrimiento, para cada una de las microcuencas estudiadas se utilizó el método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos del Número de Curva (Ponce & Hawkins, 1996). Este método es ampliamente utilizado para la estimación de caudales en cuencas de tamaño pequeño y medio, las cuales no cuentan con estaciones hidrométricas. El caudal pico de descarga, generado a partir de este método es derivado de las aproximaciones para la obtención del hidrograma triangular, resultado de una precipitación en exceso durante una duración específica. Para la utilización se requiere la obtención del parámetro conocido como Número de Curva, el cual se encuentra directamente asociado al tipo de suelo, cubierta vegetal y condición hidrológica de la superficie del suelo (Maidment & others, 1993; Choudhari, Panigrahi, & Paul, 2014). De manera conjunta, es posible identificar las condiciones de humedad antecedente del suelo, las cuales se caracterizan en: seco, promedio o húmedo. Este método es especialmente conveniente para zonas donde no se tiene mucha información.

Es importante denotar que para el presente trabajo no se consideró un modelo hidrológico semi-distribuido debido al tamaño de las subcuencas y al tiempo de concentración resultante en cada una de ellas (menor a una hora). Debido a ello se consideraron cada una de las subcuencas como modelos agregados.

Se realizó un análisis de sensibilidad utilizando las variables del modelo hidrológico de Número de Curva con el fin de conocer el efecto individual de sus variaciones sobre los resultados de escurrimiento esperados. El método utilizado para el análisis de sensibilidad fue “One-at-a-time” (OAT), en el cual se toma en cuenta la variación los parámetros uno por uno, para detectar su efecto en su hidrograma de salida. Para esto se utilizó el ambiente de programación R (R Core Team, 2018; National Weather Service, 2005) específicamente la librería “RgeoRAS” (Geoscience-Australia, 2015). Se variaron los parámetros: Número de Curva, en un intervalo que va entre 50 y 100 en pasos de 1; Área de la cuenca, variando entre 1 y 200 kilómetros en pasos de 5 kilómetro; absorción inicial, variando de 0.1 a 0.2 en intervalos de 0.01 y tiempo de retardo variando de 20 minutos a 60 minutos con un tamaño de intervalo de 5 minutos. De esta forma se ligaron 201960 corridas experimentales para el análisis. Se utilizó la precipitación asociada al Huracán Cristina. Se revisaron las relaciones individuales de efectos entre cada una de las variables (número de curva, área de la cuenca, absorción inicial, tiempo de retardo) y las variables de respuesta (caudal pico y volumen).

Posteriormente, se realizó una calibración del modelo utilizando relaciones de proporcionalidad de área de aporte, volumen y caudal pico, utilizando la subcuenca vecina “La Palma” con respecto a las subcuencas del área de estudio (El Saltito, El Pedregal y El Cajón). Para esto se utilizaron mediciones de eventos ciclónicos de la estación hidrométrica número 6001, encontrada en la salida de la subcuenca “La Palma”. Esta estación posee mediciones de caudal máximo por hora, para un periodo que abarca del 4 de enero de 1983 al 1 de enero de 1995. Se selección esta subcuenca debido a que posee características morfométricas, geológicas, de tipo de suelo y uso de suelo, similares a las de las subcuencas del área de estudio.

Los eventos ciclónicos utilizados para la calibración fueron: el huracán Norbert, con fecha 09/07/1984 y el huracán Cristina, con fecha 14/07/1984. Los eventos utilizados para la validación fueron: el huracán Kiko, con fecha 27/08/1989 y el huracán Fausto 19/08/1984. Para el proceso de calibración y validación se tomó la precipitación acumulada en 24 horas de los días de ocurrencia de los eventos ciclónicos elegidos en la estación hidrométrica (Huracanes, Norbert, Cristina, Kiko y Fausto). Bajo la hipótesis de una precipitación homogénea en las cuencas de estudio, la cual era igual a la de la cuenca vecina “La Palma” se realizaron modelaciones y variaciones de parámetros en los modelos de las subcuencas del área de estudio. De esta forma, y de acuerdo a una proporcionalidad de área entre la cuenca “La Palma” y las subcuencas estudiadas. Se buscó el caudal proporcional y el caudal modelado.

Por ejemplo, durante el evento huracán Norbert se registró un caudal pico de 245.9 m/s en la Subcuenca La Palma. El área de la subcuenca La Palma es de 116.48 km, mientras que el área de la subcuenca El Pedregal es de 4.36 km. Por ello, utilizando una regla de tres, bajo la hipótesis de una precipitación homogénea y características físicas similares, se estima que el caudal pico de la subcuenca El Pedregal para dicho evento debió de ser de aproximadamente de 9.19 m/s. De esta forma se buscó un ajuste para los eventos ciclónicos previamente mencionados.

Las variables seleccionadas para la calibración fueron el número de curva y la abstracción inicial. Por otra parte, no se utilizó el coeficiente de retardo como una variable de calibración debido que no se conoce el inicio de la precipitación (información pluviométrica tiene una discretización 24 horas). La variación de datos en la calibración fue acotada a un valor de 0.5 por debajo y por arriba los valores originalmente obtenidos, en pasos de 0.1. Esto se eligió para no modificar en gran cantidad los datos obtenidos imágenes de satélite en pasos anteriores. El rango de variación de valores de absorción inicial fue de 0.13 a 0.17 en pasos de 0.01.

A partir de la variación de parámetros del modelo hidrológico, se buscó obtener el mejor ajuste entre los datos calculados por relaciones de área entre las cuencas con respecto a las

microcuencas analizadas. Se denotaron las diferencias y similitudes en función de las diferencias en forma de error medio cuadrático, coeficiente de  $R^2$ . Es importante denotar que este tipo de comparación solo puede ser posible si se declaran las hipótesis de: lluvia uniformemente distribuida en todas las cuencas, así como características fisiográficas similares.

Una vez que los modelos fueron calibrados y validados, se extrajeron los datos de los eventos H. Odile y H. Newton. Los eventos fueron extraídos de las estaciones de 24 horas, ponderados y modelados utilizando cada uno de los modelos calibrados por subcuenca.

### **3.4 Modelación hidráulica**

La modelación hidráulica se llevó a cabo en el software IBER. Este programa basa en la solución de las ecuaciones de Navier Stokes en 2 dimensiones promediadas en profundidad (Shallow Water Equation) utilizando el método de volúmenes finitos. Se trata de un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en regímenes permanente y no permanente (Bladé et al., 2014). De acuerdo con Bladé et al., (2014) el rango de aplicación del programa Iber incluye: la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas de inundación, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios. Este software es gratuito y se encuentra bien documentado.

El modelo generado utilizó una rejilla de tamaño no fijo el cual varía entre 5 m, para la zona urbana más cercana al arroyo y de 20 metros para las zonas más alejadas de la zona urbana. Se consideró un número de curva igual al calculado previamente en cada subcuencas, una altura inicial del agua de 0 (debido a que se trata de corrientes efímeras) y una condición antecedente seca.

Se realizó un análisis de sensibilidad utilizando como variable el número de manning en distribución en cada uno de los cauces modelados. El objetivo de esto fue conocer los efectos de las variaciones de velocidad, profundidad y de área de afectación, ocasionados por diferentes arreglos espaciales del número de manning.

Las configuraciones de número de manning para el análisis de sensibilidad se describen a continuación: El factor de “River” fue utilizado para describir el cauce del arroyo. Se utilizaron los niveles 0.025, 0.03, 0.035 (Chow, 1959). Estos valores corresponden a valores en el cauce principal, que van de un canal limpio sin depresiones, hasta un canal limpio, pero con mayor cantidad de irregularidad, piedras y pastos. El factor de Brushland fue también, utilizado en la mayoría de las planicies de inundaciones, no correspondientes a las zonas urbanas. Los niveles de variación utilizados fueron 0.035, 0.04, 0.045 y 0.050 (Chow, 1959). El factor de Baresoil, se utilizó para denotar las zonas en las cuales se tienen construcciones urbanas. Los niveles utilizados fueron 0.023 y 0.030 (Chow, 1959).

Se corrió el modelo 24 veces para acotar cada uno de las combinaciones de número de manning a manera factorial y sus efectos individuales. La tormenta utilizada para modelar el escenario de análisis de sensibilidad fue el Huracán Paúl (2012). Se denotaron los cambios en las variables velocidad, profundidad y área de influencia para cada una de los arreglos. Posteriormente se realizó la calibración utilizando los 3 arroyos conjuntamente. Se calibró utilizando el coeficiente de manning, buscando el mejor ajuste entre las alturas de agua modeladas en el programa Iber. La calibración se realizó manualmente utilizando el mismo conjunto de combinaciones que las usadas en el análisis de sensibilidad. La configuración de valores de número de manning resultante fue utilizada para modelar los datos obtenidos de huracán Odile. Esto se decidió así debido a la falta de información reciente.

Una vez que el modelo ha sido calibrado y validado, este se utilizó para transitar los caudales asociados distintos periodos de retorno (previamente descritos). Los resultados de cada modelación fueron extraídos en formato raster con un tamaño de celda de 5x5 metros y fueron procesados en el programa QGIS (Quantum, 2012).

### **3.5 Identificación de variaciones geomorfológicas de los cauces y ajuste de ecuaciones de potencia**

En esta etapa se engloban los pasos “Análisis de variaciones en ancho de corrientes”, “Obtención de potencia de corrientes” y “Análisis de diferencia de potencias”.

Para la delimitación de las variaciones en el ancho de las corrientes se utilizaron imágenes satelitales Sentinel2 y Landsat8. Se delimitaron los cambios en los márgenes de los arroyos antes y después de cada evento. Se analizaron 6 imágenes satelitales de tipo Sentinel2 y Landsat8, con fechas 14/09/2017, 05/08/2017, 14/09/2016, 05/08/2016 y 29/09/2014 y 28/08/2014. Las imágenes Sentinel2 poseen una resolución espacial de 10x10 m por pixel, mientras que las imágenes Landsat8 poseen una resolución espacial de 30x30 m. Se digitalizaron los cauces de los arroyos y se realizó una comparación espacial de los formatos vectoriales obtenidos. No se tomaron los valores de diferencia de corriente menores al valor de 1 pixel para cada imagen debido a los límites de resolución de cada conjunto de imágenes. Para el análisis y las mediciones espaciales se utilizó el software QGIS (Quantum, 2012). De esta manera se obtuvo una base de datos que poseía valores de variaciones en el ancho de corriente por sección asociados a diferentes eventos.

Para la obtención de valores de potencia se recurrió a la ecuación de Bagnold (1966) asociada a la potencia de corrientes total (ecuación  $\_$ ). Para ello fue necesario el procesamiento en formato raster de distintas capas de información, utilizando el software QGIS (Quantum, 2012).

- La densidad del agua utilizada fue de  $1,000 \text{ kg/m}^3$ . Se utilizó dicho valor debido a que es el estándar de densidad del agua a una temperatura de  $4 \text{ C}^\circ$  y no se cuenta con mediciones de temperatura. No se tomaron en cuenta las variaciones en la densidad del fluido debido al alcance del proyecto.
- Para el valor de gravedad se utilizó el estándar de  $9.8 \text{ m/s}^2$
- Para la obtención del parámetro Q se realizó una operación en conjunto con las capas raster de velocidad y tirante de agua obtenidas de la simulación hidráulica. Se multiplicó el raster de tirante de agua, por la constante 5, (correspondiendo al ancho de cada celda) y el resultado de esto se multiplico por la velocidad. para obtener el caudal para cada una de las celdas.
- Para la obtención del parámetro S fue necesario, dividir los cauces utilizando las secciones utilizadas en los pasos anteriores. Para poder realizar el cálculo, se empleó la hipótesis de cada una de las secciones funciona como un flujo uniforme:



de esta forma, es posible suponer que la pendiente de energía en cada una de las secciones es equivalente a la pendiente en el fondo del canal. Gracias a ello fue posible calcular la pendiente utilizando la diferencia de alturas al comienzo y fin de cada sección, y su respectivo largo utilizando los modelos digitales de elevación LIDAR. El valor fue colocado a cada polígono de sección, y la capa vectorial fu convertida a capa raster.

Por la tanto la ecuación resultante utilizada para en la calculadora raster dentro del programa QGIS (Quantum, 2012) puede ser expresada como (13)

$$\Omega Raster = \rho * g * RAF * 5 * RVF * SRaster \quad (13)$$

Donde  $\Omega Raster$  se refiere a la capa raster resultante con la potencia de corrientes;  $\rho$  se refiere a la densidad del agua;  $g$  se refiere a la gravedad;  $RAF$  se refiere al raster de altura de fluido (extraído de la modelación);  $RVF$  se refiere al raster de la velocidad de fluido (extraído de la modelación) y  $SRaster$  se refiere al raster de pendiente generado para cada una de las secciones. De esta forma fue posible conseguir un raster de potencia de corrientes para cada arroyo para su posterior análisis.

Para el análisis de los resultados obtenidos los valores de potencia y variación fueron limpiados y analizados utilizando el ambiente de programación R (R Core Team, 2018). Los valores de VAC fueron redondearon correspondiente asociado al tamaño de pixel más próximo, por ejemplo, sí el resultado obtenido era 32 m y se estaba utilizando una imagen sentinel2, entonces el valor era redondeado a 30 m (debido a que la resolución de estas imágenes es de 10 m). Se omitieron los datos donde la diferencia en el ancho de los cauces fuera 0 antes y después de cada evento. Esto se decidió así para no afectar la bondad de ajuste del modelo en las zonas donde la potencia de corrientes si posee algún efecto.

Se realizó el método de *clustering* k-means para poder encontrar patrones en la distribución de los datos. Para la detección del número de clusters óptimo se monitoreo iterativamente las variaciones dentro de cada cluster. Por lo general, número óptimo de clusters se estima buscando el valor mínimo de la suma de las diferencias en distancia entre cada punto y el centroide del cluster. Los resultados fueron analizados en la búsqueda de un sentido cualitativo espacial. Resultados anormales o fuera de los grupos principales fueron excluidos. Se buscó la existencia de una correlación en el área de estudio. Se buscaron relaciones espaciales entre los datos de potencia de corrientes y diferencia en ancho de arroyos. Los resultados fueron cartografiados de las zonas proporcionalmente propensas a ser modificadas en función a la potencia de corrientes.

### **3.6 Caracterización de peligro y generación de mapas**

Se generaron mapas de peligrosidad para para cada arroyo dentro del área de estudio. Se utilizó la clasificación de peligrosidad mencionada por Abt et al., (1989), Rescdam, (2000) y Wade et al., (2005). Esta se basa en un estudio recopilatorio de más de 15 años, a cerca del flujo de agua necesario para impedir a una persona de sus habilidades para ponerse de pie y caminar. Esta clasificación es comúnmente utilizada en Reino Unidos y otros países de la Union Europea y utiliza como parámetros de entrada la velocidad del flujo, la profundidad de la lámina de flujo

Con base en la información obtenida se generaron mapas de asociados a la peligrosidad de las corrientes.

- Mapa de velocidad y profundidad de corrientes para cada zona asociados a diferentes periodos de retorno.
- Mapa de zonas de erosión y crecimiento en el ancho de corrientes.
- Mapa de peligrosidad (Abt et al., 1989; Rescdam, 2000; Wade et al., 2005).

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Procesamiento de la información hidrometeorológica

De acuerdo con las pruebas estadísticas, la información hidrometeorológica es aceptable dentro de los estándares para su utilización en un análisis de frecuencia; las pruebas confirman la aleatoriedad, no dependencia, homogeneidad y estacionalidad de los valores extraídos para el periodo de 36 años (1981 a 2016) (Box & Pierce, 1970; Brownlee, 1965; Hipel & McLeod, 1994; Kang & Yusof, 2012; Campos-Aranda, 2014) (Tabla 4).

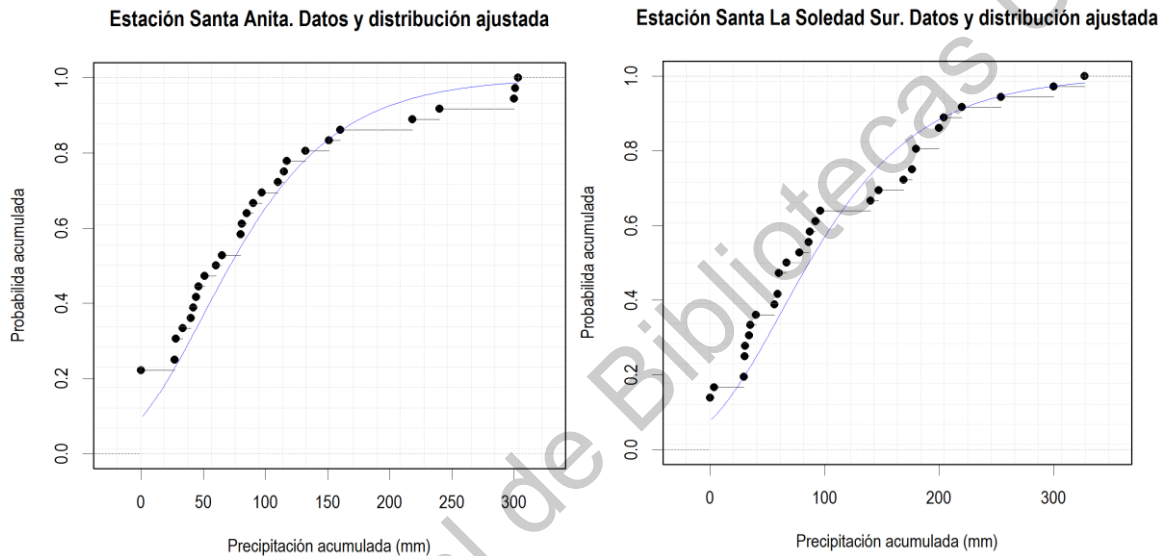
**Tabla 4** Resultados de las pruebas estadísticas para probar la confiabilidad de las estaciones meteorológicas. Los valores presentados son pi valores de las distintas pruebas.

Métodos / Estaciones	St. Santa Anita	St. La Soledad Sur	St. San Felipe	St. San José
“Wald-Wolfowitz runs test”	0.4988	0.4988	1	0.1761
"Box-Pierce Test"	0.1477	0.2397	0.2058	0.056
“Normal Standar Homogeneity Test”	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05
“Buishand Range Test”	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05
“Pettit Test”	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05
“Von Neumann Ratio Test”	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05
“Mann-Kendall Trend Test”	0.7318	0.7954	0.6427	0.7021

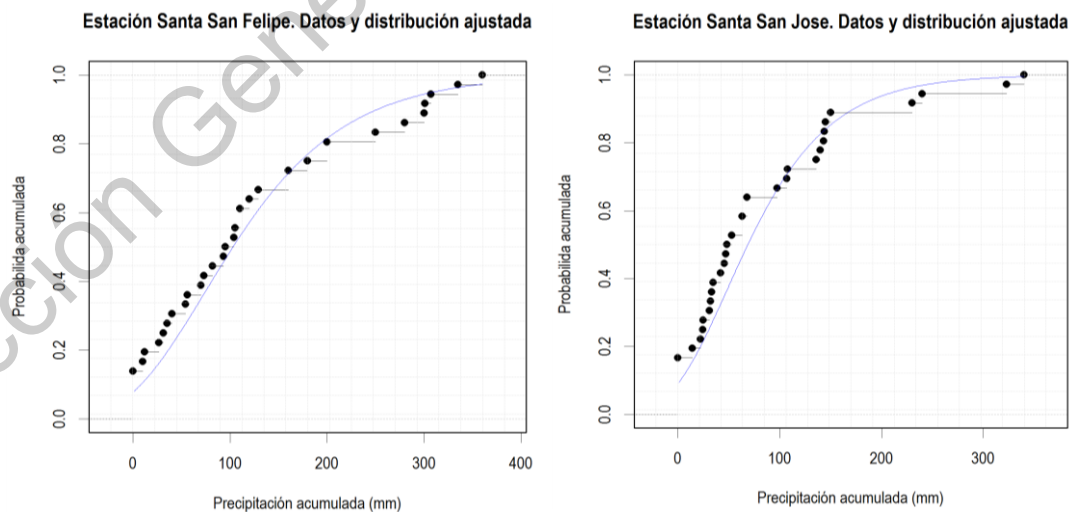
De acuerdo con los resultados de las pruebas “Kolmogorov Smirnov” y “Von Cramer”, el ajuste de la distribución Gumbel, es compatible con todas las estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio, con una confiabilidad de 0.95 % (Tabla 5; Figuras 9 y 10).

**Tabla 5** Resultados de las pruebas Kolmogorov Smirnov y Von Cramer para la bondad de ajuste de los modelos de probabilidad. Se muestran los pi-valores por estación meteorológica

Pi-value / Estaciones	St. Santa Anita	St. La Soledad Sur	St. San Felipe	St. San José
Kolmogorov Smirnov	0.7551	0.6879	0.9265	0.5234
Von Cramer	0.1545759	0.1459627	0.1566826	0.136643



**Figura 9** Comparación gráfica de datos extraídos de cada estación con datos ajustados de forma acumulativa para los ajustes de la distribución Gumbel



**Figura 10** Comparación gráfica de datos extraídos de cada estación con datos ajustados de forma acumulativa para los ajustes de la distribución Gumbel

La precipitación estimada a cada periodo de retorno: 2,5,10,25,50, 100 y 500 años para cada una de las estaciones se presentan en las tablas 6 a 8. Se aplicó una corrección de intervalo fijo 1.13, para acotar por inconsistencias temporales que pudieran existir en cada estación meteorológica (Rius & Redaño, 2015).

**Tabla 6** Resultados de la estimación de valores de precipitación por periodos de retorno para la estación Santa Anita

<b>Periodo de retorno en años</b>	<b>Precip. (mm)</b>	<b>Corrección de intervalo fijo</b>	<b>Precip. Correjada (mm)</b>
2	70.6	1.13	79.8
5	137.2	1.13	155.1
10	181.5	1.13	204.9
25	237.1	1.13	267.9
50	278.4	1.13	314.6
100	319.5	1.13	361
500	414.3	1.13	468.2

**Tabla 7** Resultados de la estimación de valores de precipitación por periodos de retorno para la estación La Soledad

<b>Periodo de retorno (años)</b>	<b>Precip. (mm)</b>	<b>Corrección de intervalo fijo</b>	<b>Precip. Correjada (mm)</b>
2	85.5	1.13	96.6
5	160.61	1.13	181.5
10	210.4	1.13	237.7
25	273.2	1.13	308.7

50	319.9	1.13	361.4
100	366.1	1.13	413.7
500	473.1	1.13	534.6

**Tabla 8** Resultados de la estimación de valores de precipitación por periodos de retorno para la estación San Felipe

<b>Periodo de retorno (años)</b>	<b>Precip. (mm)</b>	<b>Corrección por intervalo fijo</b>	<b>Precip. Correjada (mm)</b>
2	102.3	1.13	115.6
5	192.1	1.13	217.2
10	251.6	1.13	284.4
25	326.8	1.13	369.3
50	382.6	1.13	432.4
100	438	1.13	494.9
500	565.9	1.13	639.5

**Tabla 9** Resultados de la estimación de valores de precipitación por periodos de retorno para la estación San José

<b>Periodo de retorno (años)</b>	<b>Precip. (mm)</b>	<b>Corrección por intervalo fijo</b>	<b>Precip. Correjada (mm)</b>
2	67.9	1.13	76.7
5	130.8	1.13	147.8
10	172.4	1.13	194.8
25	225	1.13	254.3

50	264.1	1.13	298.4
100	302.8	1.13	342.2
500	392.3	1.13	443.3

De acuerdo con los valores de área obtenidos por el método de polígonos de Thiessen (Cudworth, 1989), las estaciones con área de influencia sobre las subcuencas estudiadas son: la estación San José, estación Santa Anita y estación San Felipe. Se ponderó la influencia de cada estación sobre la distribución espacial de áreas en las subcuencas. A partir de esto, se ponderó la precipitación para cada cuenta, en cada periodo de retorno (Tabla 10 y 11).

**Tabla 10** Ponderación de la influencia de cada estación analizada por subcuenca para cada estación meteorológica. Estación La Soledad fue omitida debido a que obtuvo 0% en todos los casos.

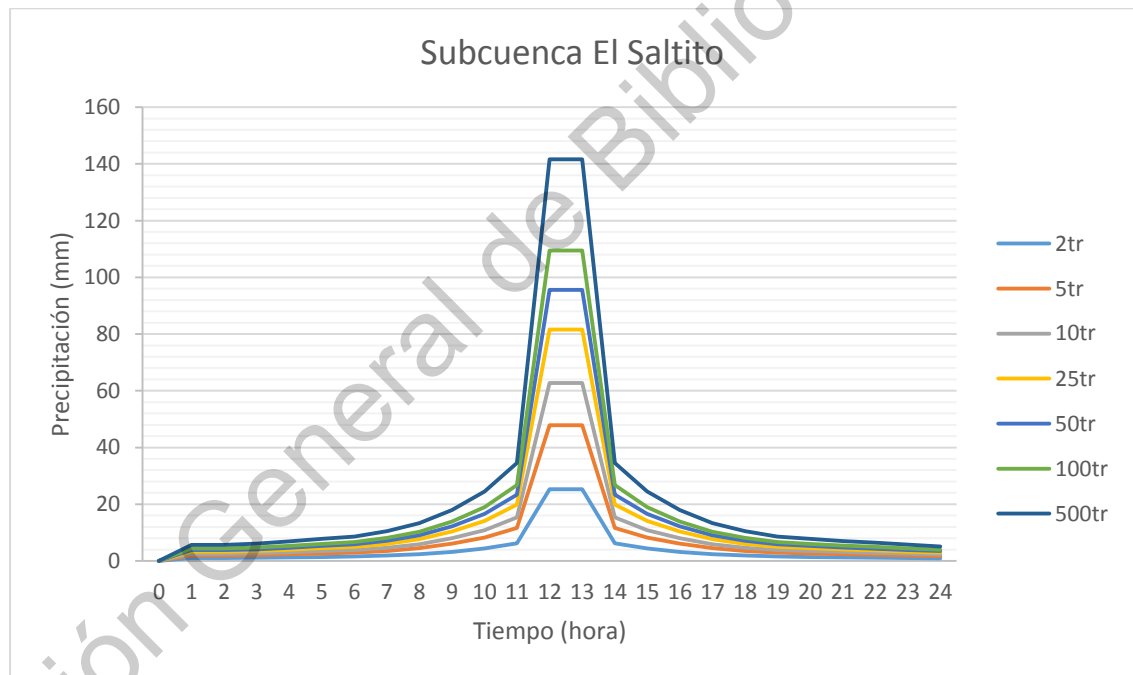
	<b>El Saltito</b>	<b>El Cajón</b>	<b>El Pedregal</b>
San José	37.28%	57.7%	1%
Santa Anita	0%	0%	38.4%
San Felipe	62.72%	42.3%	60.5%

**Tabla 11** Valores de precipitación acumulada en 24 horas ponderada para cada subcuenca analizada.

	<b>El Saltito</b>	<b>El Cajón</b>	<b>El Pedregal</b>
<b>Periodo de retorno (años)</b>	<b>Precip. Correjada (mm)</b>	<b>Precip. Correjada (mm)</b>	<b>Precip. Correjada (mm)</b>
2	101.07	93.13	101.42
5	191.26	177.10	192.59
10	250.98	232.70	252.95
25	326.44	302.94	329.22

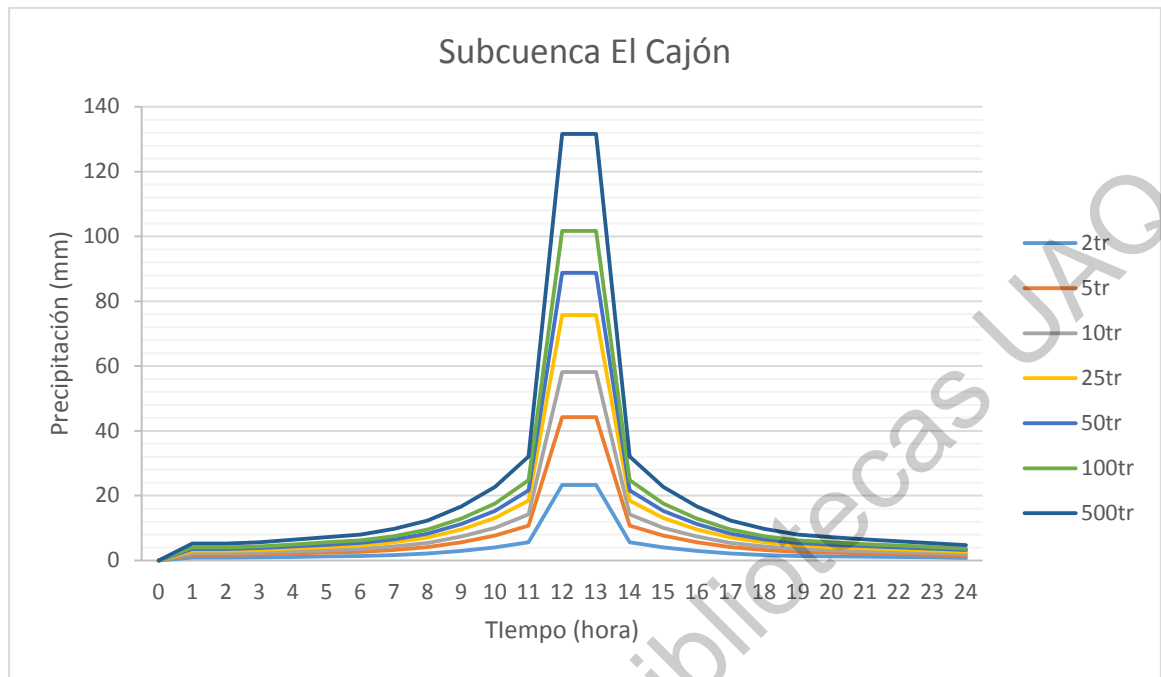
50	382.42	355.05	385.80
100	437.98	406.78	441.96
500	566.38	526.31	571.74

Las tormentas de diseño generadas con los hietogramas sintéticos del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USDA–Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS, 2015) se presentan en las figuras 11 a 13. Las tablas con valores de precipitación se presentan en los **Anexo 1** a **Anexo 3**

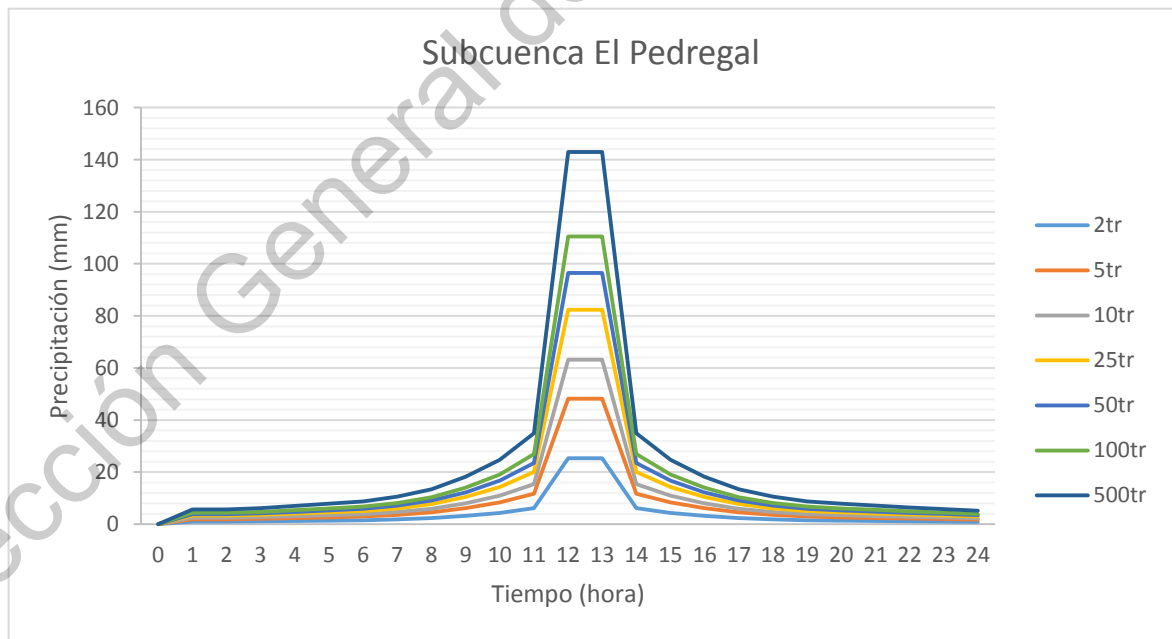


**Figura 11** Valores de precipitación de diseño para la subcuenca El Saltito. Cada tormenta se categoriza por periodo de retorno (tr) en años.





**Figura 12** Valores de precipitación de diseño para la subcuenca El Cajón. Cada evento se categoriza por periodo de retorno (tr) en años.



**Figura 13** Valores de precipitación de diseño para la subcuenca El Pedregal. Cada evento se categoriza por periodo de retorno (tr) en años.

## 4.2 Análisis morfométrico y de número de curva

### 4.2.6 Análisis morfométrico

Las áreas estimadas para las subcuencas El Cajón, El Pedregal y El Saltito fueron: 4.36 km<sup>2</sup>, 4.35 km<sup>2</sup>, 23.28 km<sup>2</sup>, respectivamente. Los largos totales de cauces para las subcuencas fueron, 27.98 km para la cuenca El Cajón, 23.59 km para la subcuenca El Pedregal y 35.92 km para la subcuenca El Saltito. Existe una marcada relación entre el área total de las subcuencas y el largo total de las corrientes, esto debido a que entre mayor sea el área, mayor será el área de captación que contribuye a la red de drenaje (Schumm, 1956) (Tabla 12). Previos autores han mencionado la existencia un estado de erosión acelerado en las subcuencas encontradas al oeste de la Cuenca Hidrológica de San José del Cabo, evidenciado por un gran número de cauces de orden 1, comparado con cauces del resto de ordenes (CONAGUA, 2009, 2016). En el presente estudio se observó la misma relación inversa en la subcuenca El Saltito, El Pedregal y El Cajón.

**Tabla 12** Parámetros e índices morfométricos catalogados como básicos. “Ac” = área de cada subcuenca (km<sup>2</sup>); “Pc” = perímetro de cada subcuenca (km); “Lc” = largo de cada subcuenca (km); “Lco” = largo total de corrientes (km); “Rc” = relieve de la cuenca (m); “Pp” = pendiente promedio de la cuenca (grados); “Ppc” = pendiente promedio en el cauce principal (grados).

Subcuenca	Ac	Pc	Lc	Lco	Rc	Pp	Ppc
El Cajón	4.36	12.71	3.2	27.98	640	24.36	7.49
El Pedregal	4.35	12.95	3.6	23.59	510	28.79	8.06
El Saltito	23.28	36.48	6.09	35.92	841.25	21.44	5.6

Se obtuvo que la pendiente media para subcuencas El Cajón, El Pedregal y El Saltito es de 24.36°, 28.79° y 21.44°, respectivamente. La pendiente media de las cuencas El Cajón y El Saltito puede ser clasificada como como “Muy fuerte” (entre 20% y 50% o 11.31° y 26.57°), mientras que la pendiente media de la subcuenca El Pedregal, puede ser considerada como “Escarpada” (entre 50% y 70% o 26.57° y 34.99°) (Gaspari et al., 2013). Estos valores son relativamente altos debido a la influencia la Sierra de La Laguna en la sección oeste de la CHSJC. Autores previos mencionan que las subcuencas encontradas en

la zona de la Sierra de La Laguna poseen, en general, mayor tamaño, heterogeneidad morfológica y pendiente que el resto de la subcuencas de la CHSJC (Wurl et al., 2002). Así mismo, también mencionan que estas cuencas son las que aportan mayor escurrimiento hacia el cauce principal.

La pendiente promedio en los cauces fue de 7.49°, 8.06° y 5.6° para las subcuencas El Cajón, El Pedregal y El Saltito. Las primeras dos podrían clasificarse como “accidentadas”, mientras que la asociada al El Saltito como “presenta lomadas” (Gaspari et al., 2013). Valores relativamente altos de pendiente conllevan a mayores escurrimientos superficiales y menores tasas de infiltración; así mismo el arrastre de sedimento tiene a ser mayor cuando el escurrimiento superficial posee una mayor pendiente y una vegetación escasa (Verstappen, 1983).

Por otra parte, la densidad de drenaje se encuentra en un intervalo de 1.46 a 1.54 km/ km<sup>2</sup>. Por lo tanto, la densidad de drenaje para las cuencas puede ser catalogada como “Gruesa” (Strahler, 1957). Los valores de frecuencia de corrientes para las tres subcuencas van en un intervalo de 1.85 a 2.2 por km<sup>2</sup>. Los valores de frecuencia de corrientes por debajo de 3 por km<sup>2</sup> pueden ser clasificados como “Frecuencia Gruesa” (Horton, 1945). La textura de drenaje va de 1.18 a 3.91 por km por lo que pueden considerarse como texturas “Gruesas” (Smith, 1950). Algunos de los factores que más afectan a la frecuencia de corrientes son: el clima, la litología y características estructurales de las rocas, relieve, capacidad de infiltración y presencia de vegetación (Horton, 1945). En este caso, para las tres subcuencas, la dureza de las rocas que conforman el basamento de la Sierra de La Laguna limitan la densidad de drenaje (Strahler, 1957) (Tabla 13).

**Tabla 13** Parámetros e índices morfométricos catalogados como derivados. “Fc” = frecuencia de corrientes; “Df” = densidad fluvial (km/km<sup>2</sup>); “Td” = textura de drenaje; “Te” = tasa de elongación; “Ff” = factor de forma.

Subcuenca	Fc	Df	Td	Te	Ff
El Cajon	2.98	1.23	1.02	0.74	0.43
El	2.07	1.4	0.7	0.65	0.34

Pedregal

El Saltito	1.85	1.54	1.18	0.89	0.63
------------	------	------	------	------	------

---

La tasa de elongación va de 0.65 a 0.89, por lo que entran en dos categorías. La subcuenca El Saltito puede ser categorizada como “ovalada” mientras las subcuencas El Cajón y El Pedregal pueden ser categorizadas como “Poco elongadas” (Strahler, 1957). El factor de forma de las subcuencas varía de 0.34 a 0.63, siendo la cuenca El Saltito la cuenca con el mayor valor y la subcuenca El Pedregal la del menor valor. Esto reafirma lo encontrado en la tasa de elongación. Las cuencas que poseen una tendencia hacia una forma circular tienden a ser más eficientes para la descarga de agua, teniendo picos más altos en duraciones más cortas (Horton, 1932). Cuando el factor de forma es cercano a 1, la subcuenca poseerá una forma más redondeada. Una cuenca con factor de forma bajo se caracterizará por tener una forma alargada por ser una cuenca alargada, y por consiguiente ser menor propensa a tener lluvias simultáneamente sobre toda su superficie, ocasionando crecidas de magnitud relativamente menor, sí se le compara con cuencas de menor tamaño y con un factor de forma más similar a la unidad (Henaos, 1988).

#### **4.2.7 Obtención del parámetro de número de curva**

A partir de la discretización espacial de tipo de suelo, elaborada con imágenes satelitales y tipo de suelo obtenida de la FAO (FAO, 1988) se obtuvo el valor de número de curva. Los valores se obtuvieron a partir de la clasificación del SCRN (NRCS, 1986). Para el caso de las tres subcuencas, el uso de suelo predominante fue el denominado como “vegetación secundaria”, por lo que la influencia de este y los tipos de suelo en el área, provocaron una tendencia predominante alrededor de 79 CN. Los valores específicos obtenidos para cada subcuenca se enlistan a continuación:

Para la subcuenca El Saltito se obtuvieron números de curva que varían entre 69 y 85, así como un ponderado de 79; para la cuenca El Cajón se obtuvieron valores que varían entre 79 y 85, con ponderado de 78.9; para la cuenca El Pedregal se obtuvieron valores que varían entre 79 y 85, con un ponderado de 79.04 (Tabla 14 a 15).

**Tabla 14** Ponderación de número de curva por área en subcuenca El Saltito

CN	Área (km <sup>2</sup> )	%
69	0.18	0.773
79	22.8	97.938
85	0.3	1.289
Total	23.28	

**Tabla 15** Ponderación de número de curva por área en subcuenca El Pedregal

CN	Area (km <sup>2</sup> )	%
85	0.038	0.87
69	0.004	0.09
79	4.314	99.04
Total	4.356	

**Tabla 16** Ponderación de número de curva por área en la subcuenca El Cajón

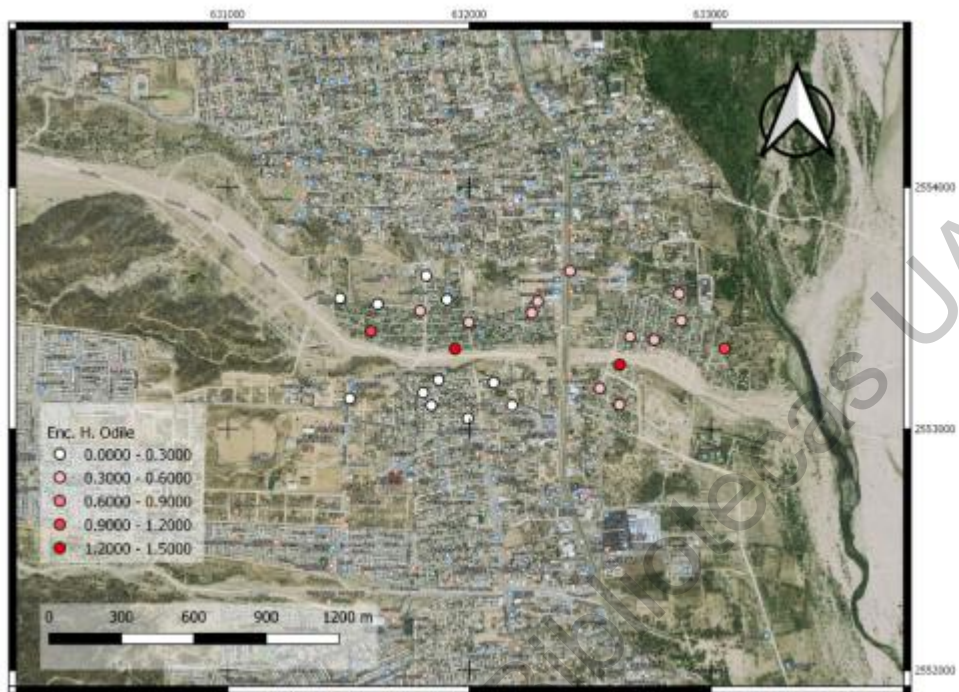
CN	Area (km <sup>2</sup> )	%
85	0.021	0.49
69	0.055	1.25
79	4.287	98.26
Total	4.363	

Tomado en cuenta los valores de pendiente media en el cauce, largo máximo de corrientes y número de curva, se determinaron los tiempos de concentración: 67.43 minutos para la subcuenca El Saltito; 21.86 minutos para la cuenca El Cajón y 22.76 minutos para la cuenca El Pedregal. El coeficiente de almacenamiento utilizado para la determinación de los HUIC en las subcuencas analizadas fue considerado igual al tiempo de concentración multiplicado por 0.6 (E. H, 2010). Considerando esto, se determinó un valor de tiempo de retraso específico para cada subcuenca: 40.53 minutos para El Saltito; 11.27 minutos para la cuenca El Cajón y 13.7 minutos para la subcuenca El Pedregal. Estos parámetros fueron posteriormente utilizados y calibrados para la generación de caudales de diseño.

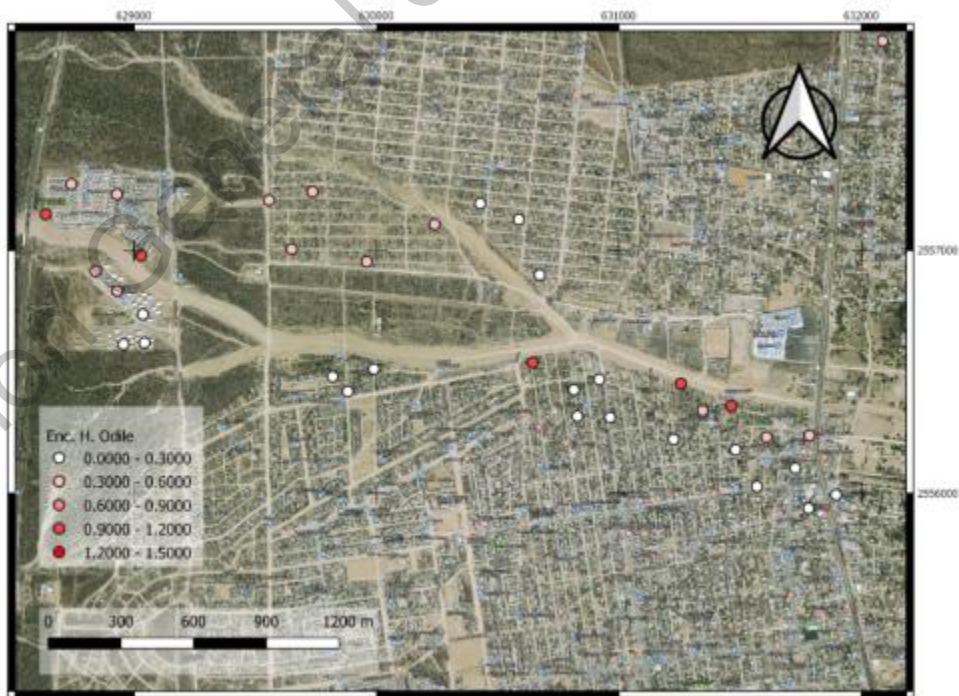
### **4.3 Encuestas e información histórica**

Los resultados obtenidos de las encuestas indican que los eventos mejor recordados por los habitantes en las zonas encuestadas son: el H. Odile y la T. T. Lidia, debido a que son las más recientes. Se encontró que el que aproximadamente el 85 % de los encuestados tiene aproximadamente menos de 6 años de haberse establecido en la región. Es debido a ello que la mayoría de las encuestas tiene memoria para eventos ciclónicos recientes.

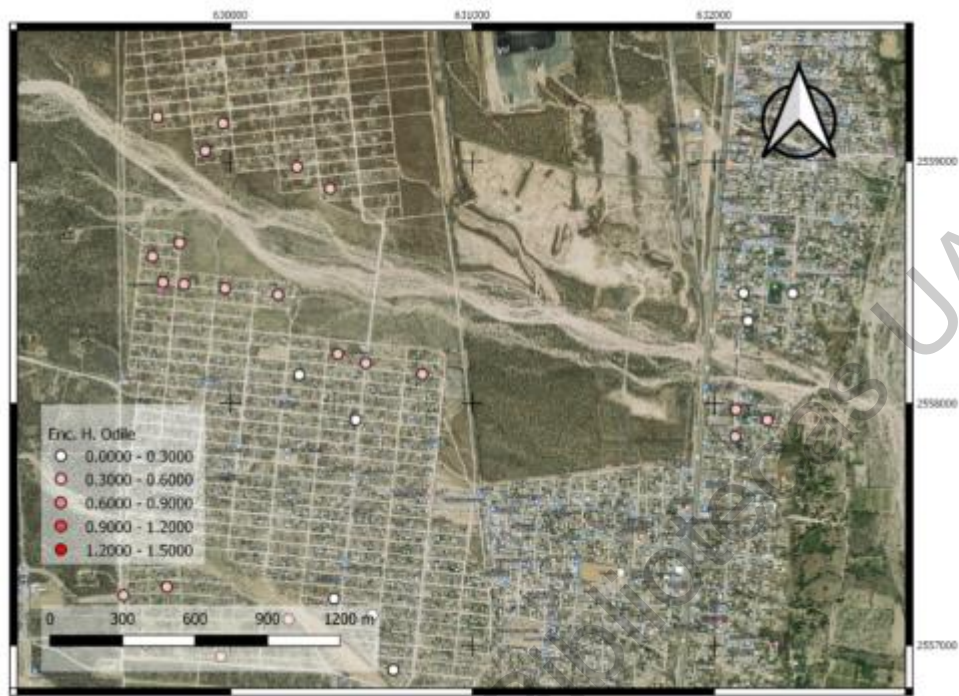
Se pudo observar una tendencia en la información obtenida mediante noticias. La cantidad de detalles específicos en las noticias de cada evento es inversa a los desastres ocasionados durante el mismo. El huracán Newton no presenta afectaciones graves; de esta forma la respuesta esperada de este, al ser modelado, es la no afectación a la zona urbana. Por lo que en el mapa solo se presentan los resultados de las encuestas. Las figuras 14 a 16 presentan los datos obtenidos mediante las encuestas e información histórica para el evento H. Odile



**Figura 14** Altura del agua reportada durante el H. Odile, mediante encuestas realizadas. Para el Arroyo El Saltito.



**Figura 15** Altura del agua reportada durante el H. Odile, mediante encuestas realizadas. Para el Arroyo El Pedregal.



**Figura 16** Altura del agua reportada durante el H. Odile, mediante encuestas realizadas. Para el Arroyo El Cajón.

Por otra parte, se tomó en consideración la información presentada por Protección Civil, asociada a zonas afectación por inundaciones en eventos de ciclones recientes. Las principales zonas afectadas dentro del área presentadas en dicho son: La parte sur del poblado Santa Anita, La parte sur del poblado San Bernabé, Asentamientos humanos y comerciales ubicados en el Arroyo El Zacatal, Asentamientos humanos y comerciales ubicados en el arroyo El Saltito (Vado de Santa Rosa) y Colonia Guaymitas (Área colindante a La Carretera).



#### 4.4 Modelación hidrológica de las cuencas de aporte

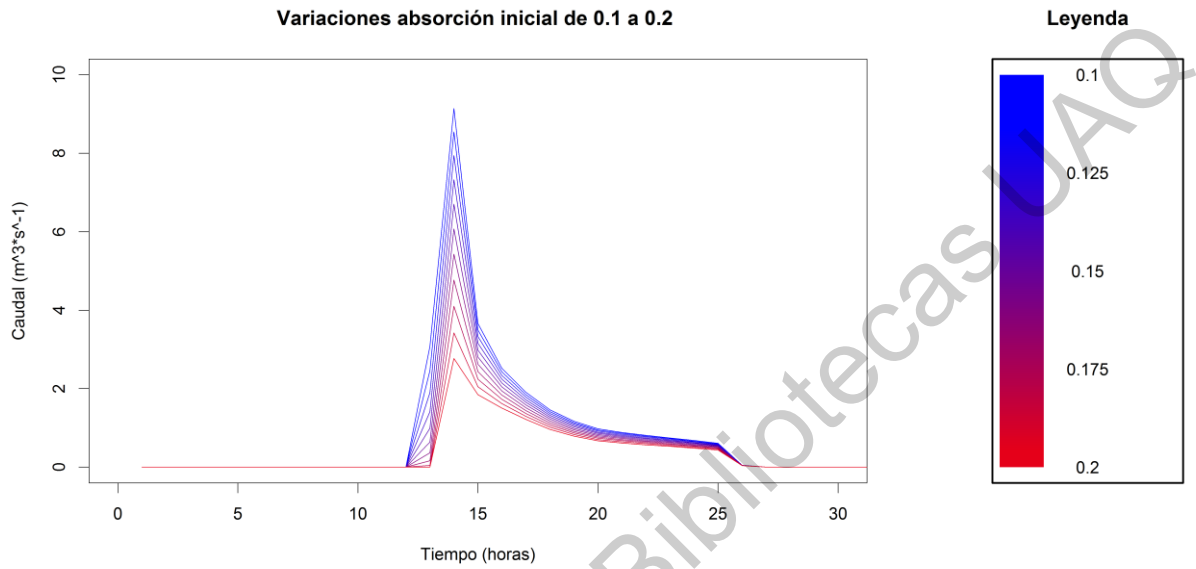
Los resultados del análisis de sensibilidad para las corridas simuladas mostraron una relación positiva para las variables número de curva y el área de la cuenca con respecto a las variables de respuesta, así como una relación negativa para la absorción inicial y el tiempo de retardo con respecto a las variables de respuesta. Por otra parte, las variables con mayor influencia con respecto a las variables de respuesta fueron el número de curva y la absorción inicial; teniendo el primero un efecto positivo mientras el segundo uno negativo (Tabla 17 a 18; Figuras 17 y 18).

**Tabla 17** Coeficientes de regresión lineal resultados del análisis de sensibilidad, asociado las variables CN, área, absorción inicial y tiempo de retardo con respecto al caudal pico

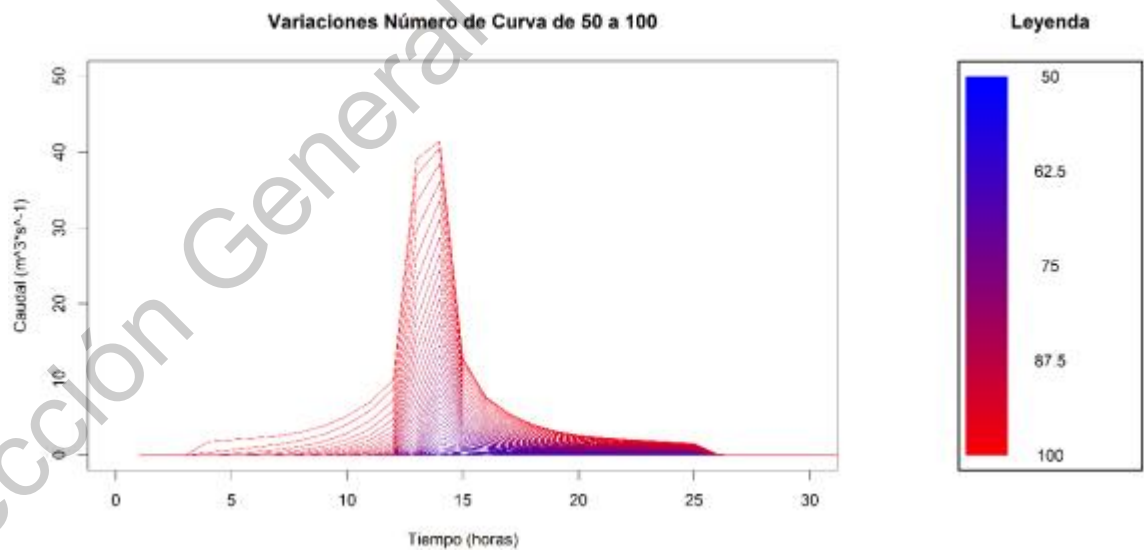
Caudal Pico				
	Estimado	STD. Error	t value	P-Value
Intercept	-2.19E+02	8.88E-01	-247.1	<2e-16
CN	3.53E+00	7.66E-03	460.33	<2e-16
Area	4.62E-01	1.95E-03	236.49	<2e-16
Absorción Ini.	-1.16E+02	3.57E+00	-32.64	<2e-16
T. Retra	-6.92E-01	8.73E-03	-79.22	<2e-16

**Tabla 18** Coeficientes de regresión lineal resultados del análisis de sensibilidad, asociado las variables CN, área, absorción inicial y tiempo de retardo con respecto al caudal pico

Volumen				
	Estimado	STD. Error	t value	P-Value
Intercept	-7.51E+02	3.09E+00	243.03	<2e-16
CN	1.18E+01	2.67E-02	441.6	<2e-16
Area	1.54E+00	6.80E-03	226.5	<2e-16
Absorción Ini.	-3.86E+02	1.24E+01	-31.14	<2e-16
T. Retra	-1.86E+00	3.04E-02	-61.03	<2e-16



**Figura 17** Variaciones de caudales asociado a variaciones de absorción inicial de 0.1 a 0.2



**Figura 18** Variación de caudal asociada a variaciones de número de curva.

El proceso de calibración dio como resultado valores de absorción inicial de 0.13 para todas las subcuencas (el más bajo posible), así como valores de número de curva de 79.4 para la subcuenca El Cajón, 79.5 para la subcuenca El Saltito y 79.54 para la subcuenca El Pedregal. (Tabla 19 y 20).

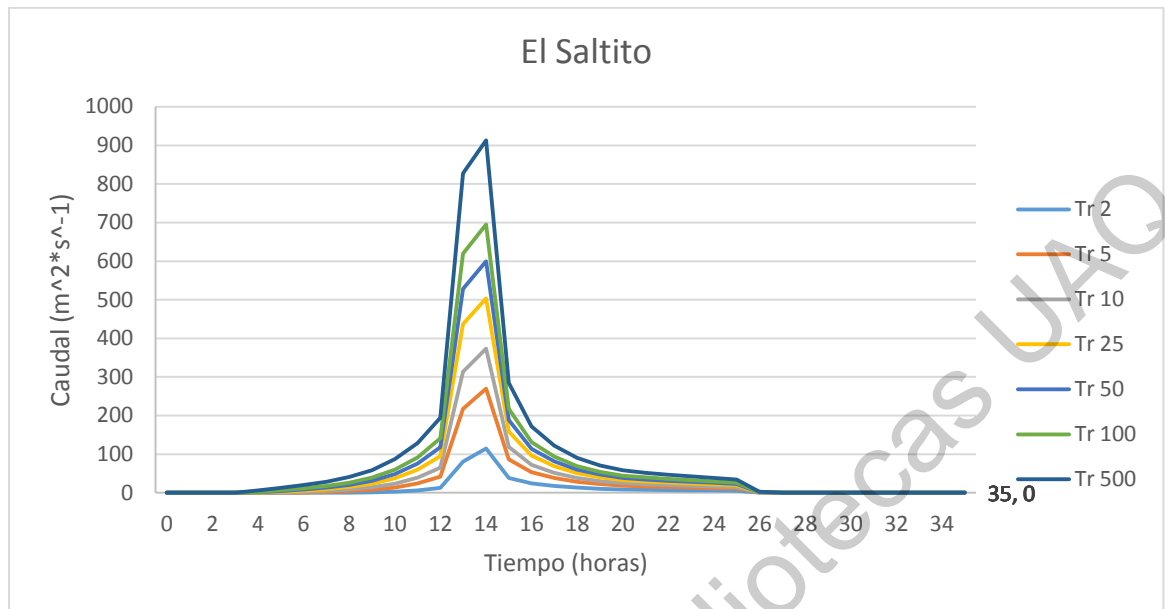
**Tabla 19.-** Resultado de caudales pico obtenidos mediante modelación (MOD) y caudales pico obtenidos mediante relaciones de área (CPP). Unidades en  $m^3*s^{-1}$

<b>Evento</b>	<b>Fecha</b>	<b>CPP El Saltito</b>	<b>MOD El Saltito</b>	<b>CPP El Pedregal</b>	<b>MOD El Pedregal</b>	<b>CPP El Cajón</b>	<b>MOD El Cajón</b>
Norbert	9/7/1984	50.58	40	9.19	11.76	9.21	12.09
Cristina	14/07/1984	9.26	5.36	1.68	2.33	1.69	2.52
Kiko	27/08/1989	19.01	19	3.45	5.35	3.46	5.76
Fausto	19/08/1984	1.03	0.505	0.19	0.186	0.19	0.23

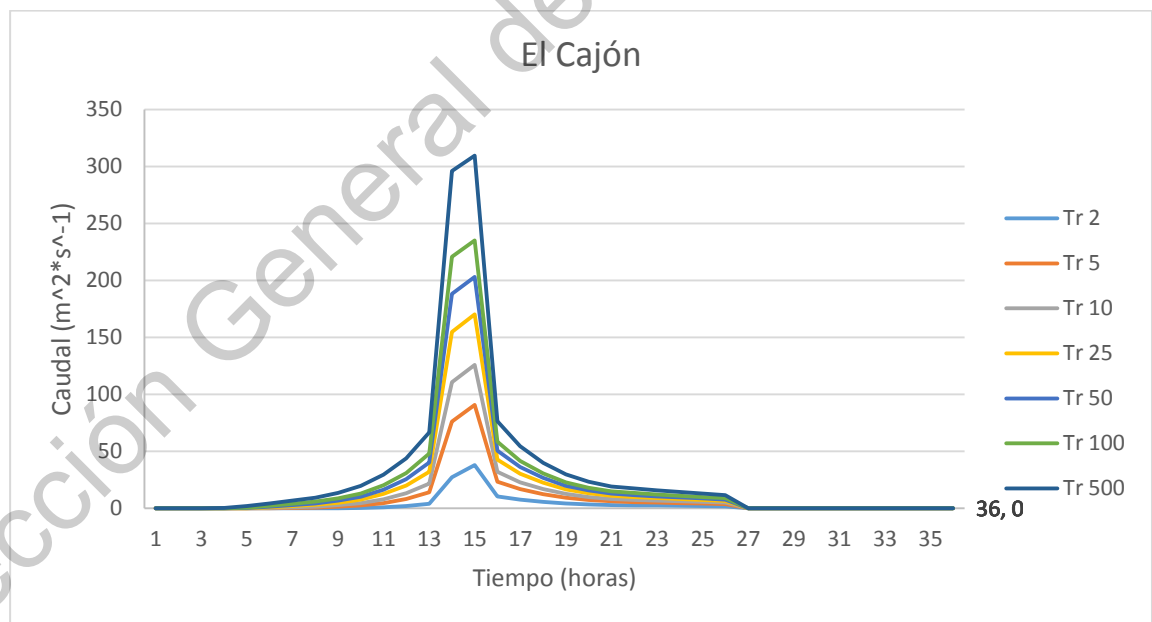
**Tabla 20** Valores de número de curva, absorción inicial y coeficientes de correlación (Spearman) para cada subcuenca obtenidos de la calibración.

	<b>CN</b>	<b>Absorción Inic.</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>El Cajón</b>	79.4	0.13	0.98
<b>EL Saltito</b>	79.5	0.13	0.99
<b>El Pedregal</b>	79.54	0.13	0.98

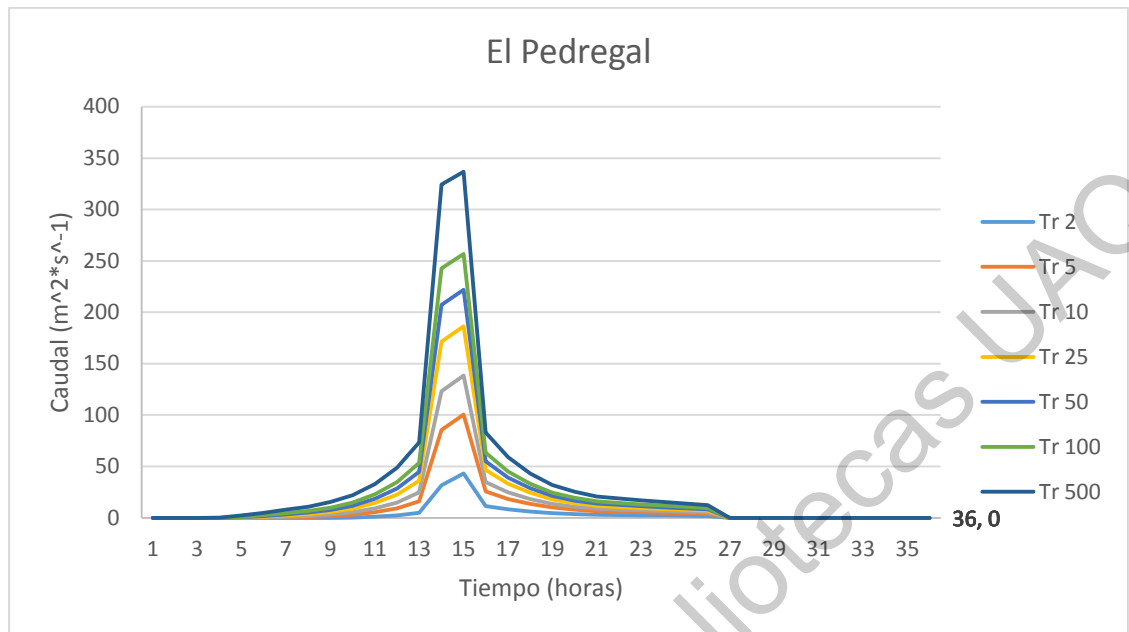
Así también se generaron escurrimientos a partir de las tormentas de diseño obtenidas en el análisis de frecuencia. Estas tormentas poseen una duración de 24 horas y están asociadas a periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años (Figuras 19 a 21). La Tabla 21 presenta los caudales pico asociados a cada escurrimiento modelado por periodo de retorno.



**Figura 19** Escurrimiento y precipitación para la subcuenca el Saltito, asociada a diferentes periodos de retorno.



**Figura 20** Escurrimiento y precipitación para la subcuenca el Cajon, asociada a diferentes periodos de retorno.



**Figura 21** Esguerriminto y precipitación para la subcuenca el Pedregal, asociada a diferentes periodos de retorno.

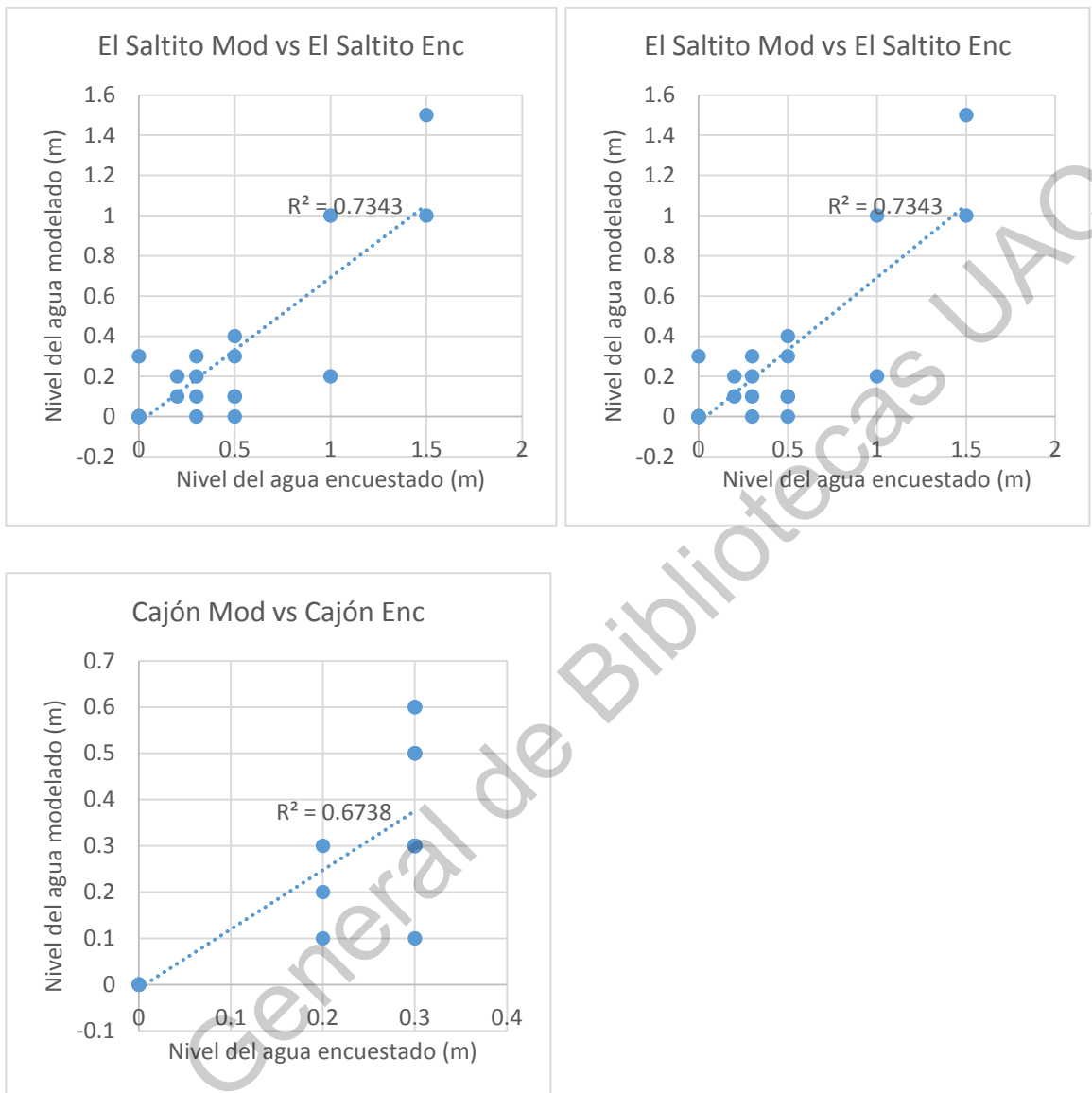
**Tabla 21** Caudales picos asociados a cada uno de los esguerrimintos de diseño asociados a cada una de las cuencas.

	El Saltito	El Cajon	El Pedregal
2	114.935029	37.8968213	43.0345475
5	269.825206	90.6012255	100.365806
10	373.490947	125.866448	138.555518
25	503.78981	170.066899	186.506974
50	599.884485	202.960193	221.834543
100	694.9391	235.18846	256.746566
500	913.17274	309.425227	336.966317

## 4.5 Modelación hidráulica

Los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad fueron congruentes con los tres arroyos analizados. De acuerdo con los resultados: la velocidad media se relaciona negativamente con los coeficientes de manning para todas las zonas; la velocidad máxima y la profundidad media se encuentran mayormente controladas por la discretización de dicho coeficiente en el lecho del arroyo. Por otra parte, de acuerdo con los resultados obtenidos, la profundidad máxima se encuentra mayormente influenciada por el coeficiente de manning en las zonas de vegetación. El tamaño del área de influencia del flujo se encuentra mayormente asociada de forma negativa con los coeficientes de escurrimiento en el cauce del arroyo y en las zonas de suelo desnudo. Con respecto a la distancia entre los límites del área de influencia de flujo y las zonas de afectación se encontró una mayor influencia al coeficiente en el interior de los arroyos.

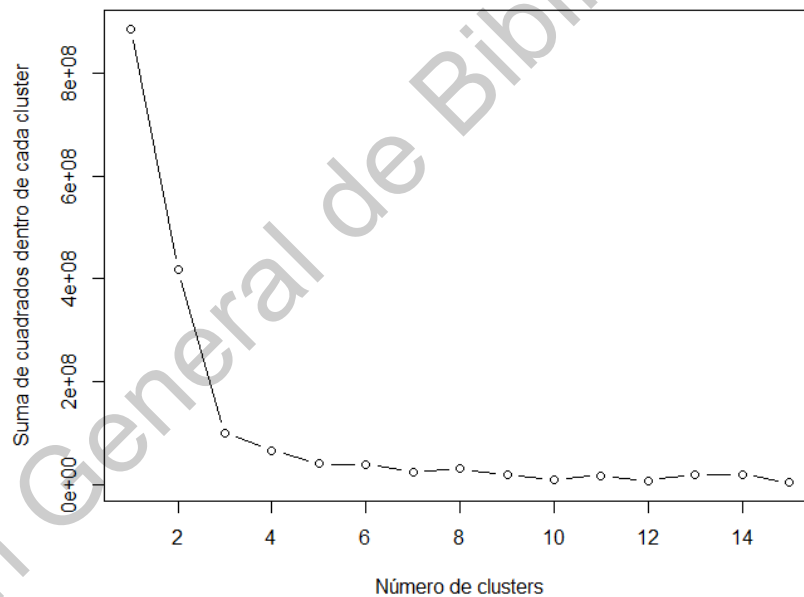
Los coeficientes calibrados producen valores de altura de agua similares de los mostrados por la información histórica con un factor de correlación de  $R^2$  de 0.67 para el arroyo El Cajón, 0.56 para el arroyo El Pedregal y de 0.73 para el arroyo El Saltito. De acuerdo con los resultados de la calibración, las mejores combinaciones de coeficientes de rugosidad para todos los arroyos utilizados fueron: baresoil 0.023, utilizado en la zona urbana; river de 0.03, utilizado en el lecho del arroyo y brushland de 0.05 utilizado en las zonas con vegetación (Figura 22).



**Figura 22** Comparación de niveles de altura agua encuestados contra niveles de agua modelados (metros) para el evento huracán Odile (2014).

## 4.6 Identificación de cambios en la morfología de arroyos y ajuste de ecuaciones de potencia

Los valores de potencia obtenidos por los tres arroyos, en los tres eventos dieron resultados muy variables. A partir del proceso iterativo se encontró un número óptimo de 6 clusters asociado a los datos obtenidos del análisis espacial, con una disminución del 96.2 % de error. De acuerdo con los resultados puede apreciarse una correlación positiva en entre la diferencia de corrientes antes y después de cada evento y potencia total de corrientes menores a 10,000 W/m (clusters 1 a 4). Valores superiores a dicho límite parecen encontrarse (clusters 5 y 6) parecen no seguir la tendencia previamente dicha (Figura 23 y 24).



**Figura 23** Comparación entre la suma de cuadrados dentro de cada grupo y el número de clusters utilizados

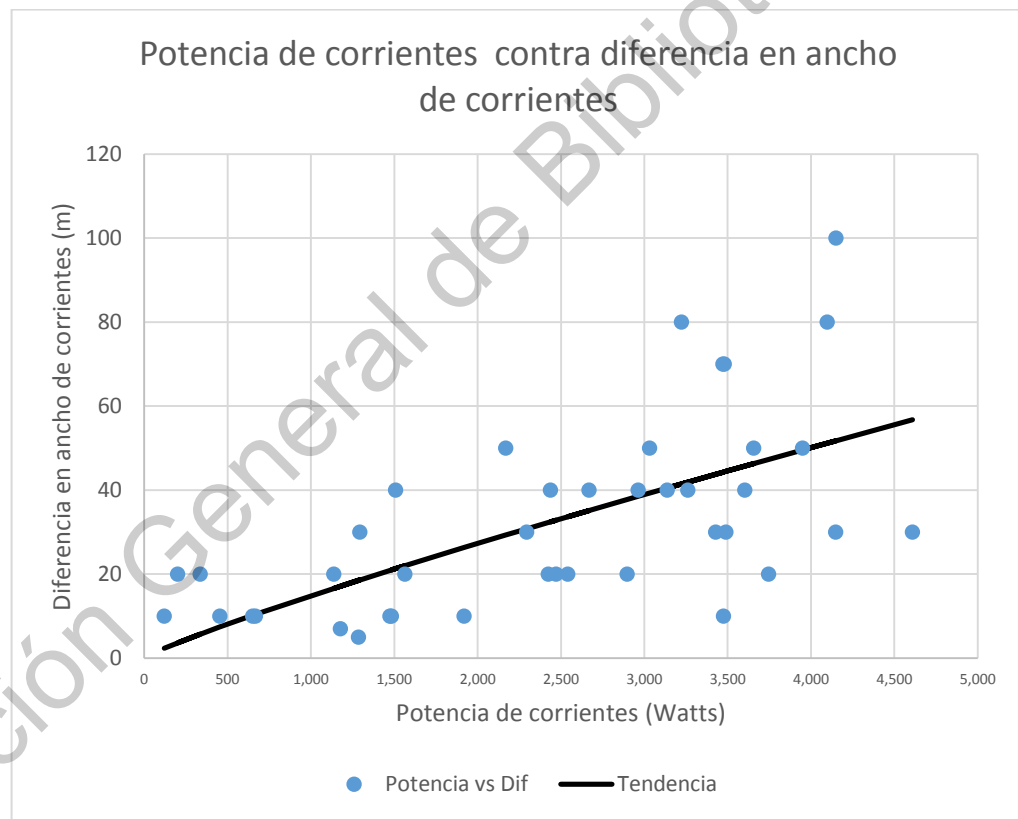
Se obtuvo como resultado un coeficiente de correlación de 0.61. El ajuste de la ecuación de potencia de corrientes puede ser expresada como (13).

$$0.034 * potencia^{0.876} \quad (13)$$



Este valor no alcanza el valor comúnmente utilizado de 0.95, sin embargo, esto podría ser explicado debido a la falta de más eventos o por irregularidades en el terreno. Los valores de crecimiento de corrientes fueron comparados entre sí. Se generó un mapa denotando aquellas zonas con una mayor vulnerabilidad a valores de potencia que podrían influenciar el crecimiento de arroyos.

La determinación de esta zona es importante para la prevención durante la selección de zonas de construcción, de manera que aquellas más susceptibles son menos favorables para dicha selección como zonas de construcción. El mapa de zonas de vulnerabilidad se presenta en el apartado de caracterización de peligro.



**Figura 24** Relación entre potencia de corrientes y diferencia de corrientes

Los valores corrientes a 0 m de diferencia antes y después de cada evento fueron omitidos. Estos valores pueden estar asociados con zonas en las que, a pesar de que existe una corriente que pasa a través de ellos, la resistencia del terreno o la configuración de las

corrientes es tal que no es posible obtener las condiciones necesarias para que se produzca un cambio en las geoformas del área de estudio.

## **4.7 Caracterización de peligrosidad**

### **4.7.1 Análisis de la modelación de tormentas de diseño sobre las áreas propuestas.**

Para el periodo de retorno de 10 años la profundidad media y la profundidad máxima para cada arroyo fueron: 0.39 m y 3.38 m para el arroyo de la subcuenca El Saltito, 0.23 m Y 2.01 m para el arroyo de la subcuenca el pedregal y 0.23 m y 1.65 m para el arroyo de la cuenca El Cajón. La velocidad y media y máxima para cada arroyo fue: 1.21 m/s y 5.92 m/s para el arroyo el saltito, 0.62 m/s y 5.14 m/s para el arroyo el pedregal y 0.64 m/s y 4.84 m/s para el arroyo el cajón.

Para el periodo de retorno de 100 años la profundidad media y la profundidad máxima para cada arroyo fueron: 0.5 m y 4.37 m para el arroyo de la subcuenca El Saltito, 0.27 m y 2.57 m para el arroyo de la subcuenca el pedregal y 0.26 m Y 2.03 m para el arroyo de la cuenca El Cajón. La velocidad media y máxima se obtenida para cada arroyo fue: 1.47 m/s y 6.9 m/s para el arroyo el saltito, 0.85 m/s y 5.71 m/s para el arroyo el pedregal y 0.83 m/s y 5.83 m/s para el arroyo el cajón. Para el periodo de retorno de 500 años la profundidad media y la profundidad máxima para cada arroyo fueron: 0.5 m y 4.37 m para el arroyo de la subcuenca El Saltito, 0.27 m y 2.57 m para el arroyo de la subcuenca el pedregal y 0.28 m Y 2.12 m para el arroyo de la cuenca El Cajón. La velocidad media y máxima fueron: 1.66 m/s y 7.49 m/s para el arroyo el saltito, 0.99 m/s y 6.19 m/s para el arroyo el pedregal y 0.96 m/s y 6.41 m/s para el arroyo el cajón (Figura 25 a 42).



**Figura 25** Variación de valores de altura del agua para el arroyo El Saltillo periodo de retorno de 10 años



**Figura 26** Variación de valores de velocidad para el arroyo El Saltillo periodo de retorno de 10 años



**Figura 27** Variación de valores de altura del agua para el arroyo El Pedregal periodo de retorno de 10 años



**Figura 28** Variación de valores de velocidad para el arroyo El Pedregal periodo de retorno de 10 años



**Figura 29** Variación de valores de altura del agua para el arroyo El Cajón periodo de retorno de 10 años



**Figura 30** Variación de valores de velocidad para el arroyo El Cajón periodo de retorno de 10 años



**Figura 31** Variación de valores de altura del agua para el arroyo El Saltito periodo de retorno de 100 años



**Figura 32** Variación de valores de velocidad para el arroyo El Saltito periodo de retorno de 100 años



**Figura 33** Variación de valores de altura del agua para el arroyo El Pedregal periodo de retorno de 100 años



**Figura 34** Variación de valores de velocidad para el arroyo El Pedregal periodo de retorno de 100 años



**Figura 35** Variación de valores de altura del agua para el arroyo El Cajón periodo de retorno de 100 años



**Figura 36** Variación de valores de velocidad para el arroyo El Cajón periodo de retorno de 100 años





**Figura 37** Variación de valores de altura del agua para el arroyo El Saltito periodo de retorno de 500 años



**Figura 38** Variación de valores de velocidad para el arroyo El Saltito periodo de retorno de 500 años



**Figura 39** Variación de valores de altura del agua para el arroyo El Pedregal periodo de retorno de 500 años



**Figura 40** Variación de valores de velocidad para el arroyo El Pedregal periodo de retorno de 500 años



**Figura 41** Variación de valores de altura del agua para el arroyo El Cajón periodo de retorno de 500 años



**Figura 42** Variación de valores de velocidad para el arroyo El Cajón periodo de retorno de 500 años

#### 4.7.2 Caracterización y análisis de peligrosidad utilizando los modelos de flujo

De acuerdo con la clasificación menciona por Abt et al., (1989), Rescdam, (2000) y Wade et al., (2005), las zonas de afectación para cada uno de los arroyos fue:

- Para el arroyo El Pedregal: La zona norte de colonia Puerto Nuevo, La zona Sur del poblado de San José, la zona SE del poblado de San José, la zona norte del poblado El Zacatal y la zona NO del poblado El Zacatal. De acuerdo con los resultados, todas estas zonas poseen características asociadas a una peligrosidad a partir de un periodo de retorno de 10 años. Por ello todas fueron clasificadas con una peligrosidad alta (Figura 43 a 45, Tabla 22).

**Tabla 22** Comparación de zonas afectadas para diferentes periodos de retorno. Los asteriscos señalan zonas en las que si se muestra afectación de acuerdo con la clasificación utilizada.

Poblado	10tr	100tr	500tr
N Puerto Nuevo	*	*	*
S San José Viejo	*	*	*
SE San José Viejo	*	*	*
N El Zacatal	*	*	*
NO El Zacatal	*	*	*

- Para el arroyo El Cajón: las zonas N y Noroeste del poblado de San José del Cabo. De acuerdo con los resultados ambas presentan condiciones de alta peligrosidad a partir de periodos de retorno de 10 años. Pero estas fueron categorizadas como zonas de alta peligrosidad (Figura 46 a 48).

**Tabla 23** Comparación de zonas afectadas para diferentes periodos de retorno. Los asteriscos señalan zonas en las que si se muestra afectación de acuerdo con la clasificación utilizada.

Poblado	10tr	100tr	500tr
N San José Viejo	*	*	*
NO San José Viejo	*	*	*

- Para el arroyo El Saltito: el vado de Santa Rosa y la zona SE del poblado de Santa Rosa, poseen condiciones peligrosidad alta desde un periodo de retorno de 10 años. Por ello fueron clasificadas como zonas de peligrosidad alta. La zona Sur del poblado de Santa Rosa, la zona Norte y Noreste del poblado de Las Guaymitas

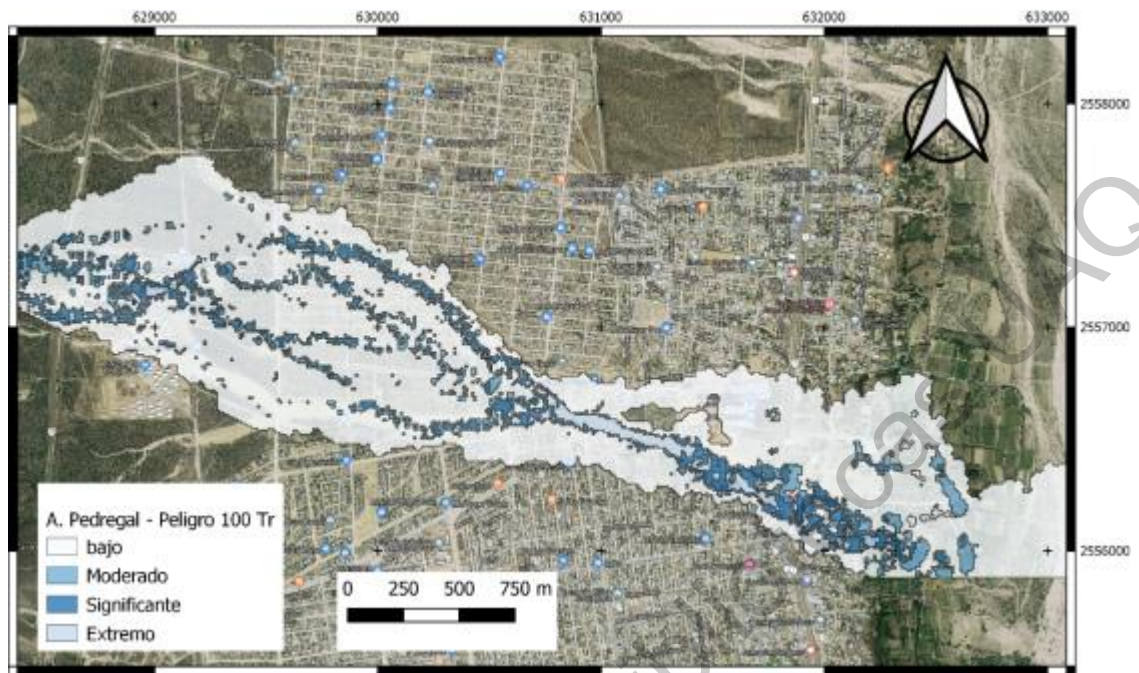
poseen condiciones de peligrosidad alta a partir de un periodo de retorno de 100 años. Por ello fueron clasificadas como de peligrosidad media. Por otra parte, la zona Este del poblado de Las Guaymitas posee condiciones de peligrosidad alta a partir de un periodo de retorno de 500 años. Por ello fue clasificada como una zona de peligrosidad baja (Figuras 49 a 51).

**Tabla 24** Comparación de zonas afectadas para diferentes periodos de retorno. Los asteriscos señalan zonas en las que si se muestra afectación de acuerdo con la clasificación utilizada.

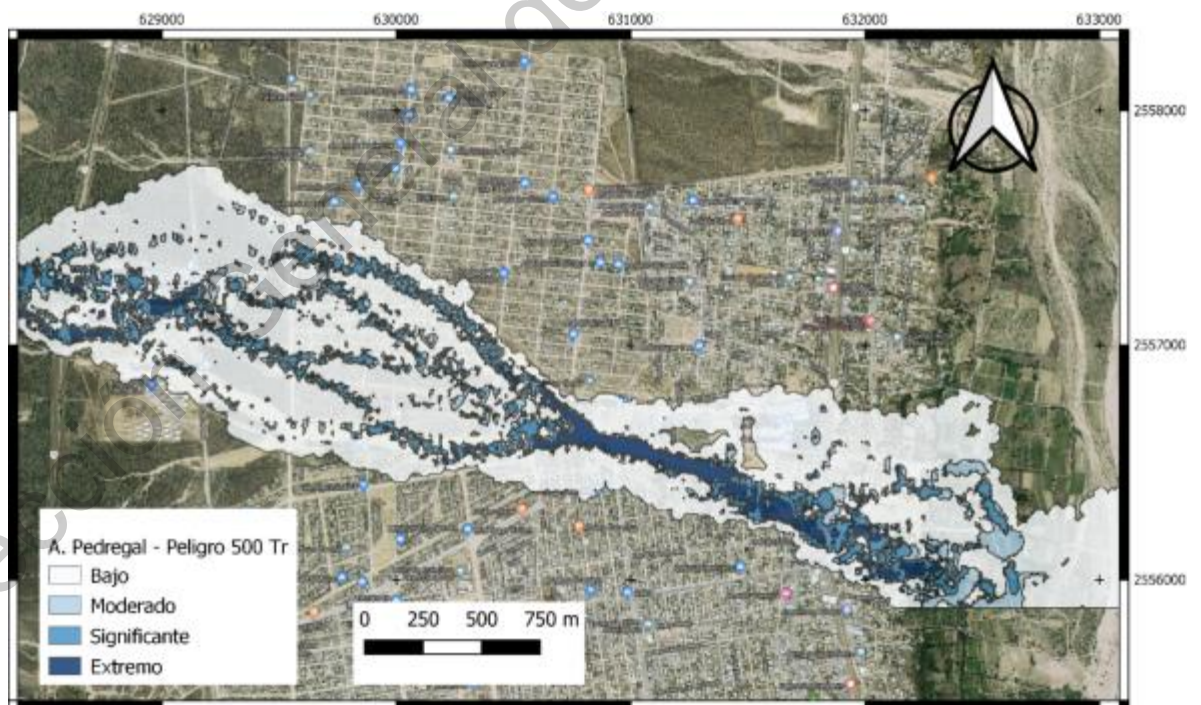
Poblado	10tr	100tr	500tr
Vado de Santa Rosa	*	*	*
SE Santa Rosa	*	*	*
S Santa Rosa		*	*
N Guaymitas		*	*
NE Guaymitas		*	*
E Guaymitas			*



**Figura 43** Caracterización de valores de peligro para el arroyo El Pedregal, para un periodo de retorno de 10 años.



**Figura 44** Caracterización de valores de peligro para el arroyo El Pedregal, para un periodo de retorno de 100 años.



**Figura 45** Caracterización de valores de peligro para el arroyo El Pedregal, para un periodo de retorno de 500 años.



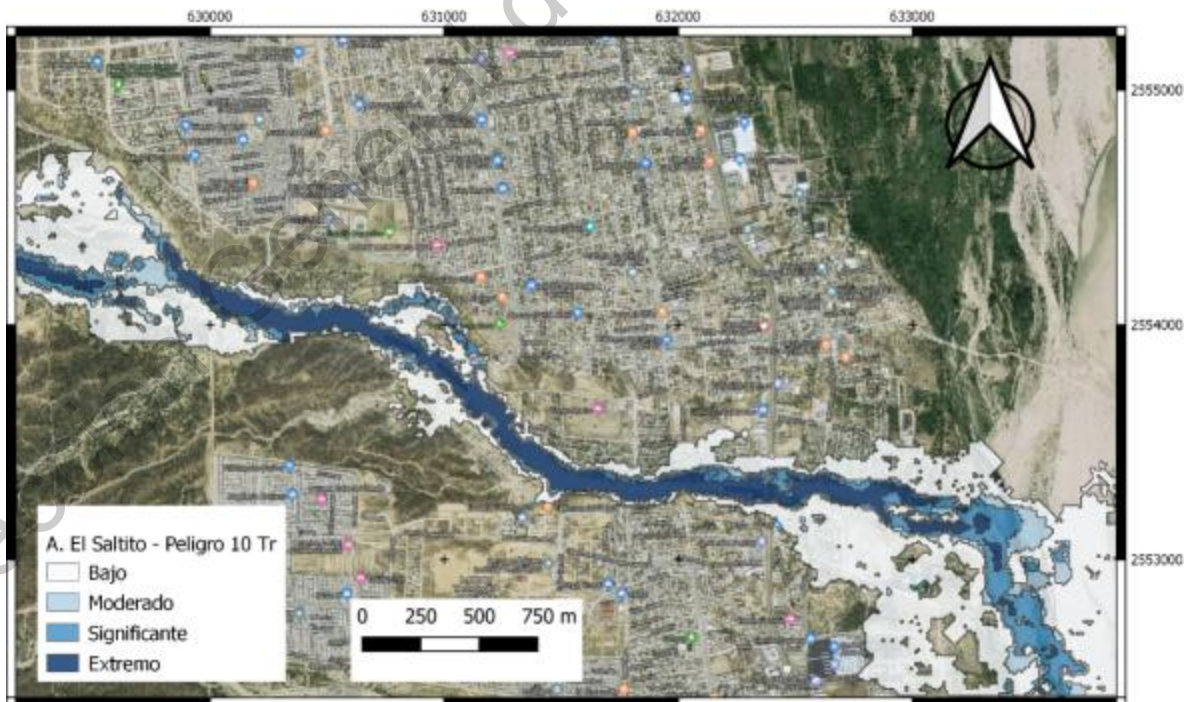
**Figura 46** Caracterización de valores de peligro para el arroyo El Cajon, para un periodo de retorno de 10 años.



**Figura 47** Caracterización de valores de peligro para el arroyo El Cajón, para un periodo de retorno de 100 años.



**Figura 48** Caracterización de valores de peligro para el arroyo El Cajón, para un periodo de retorno de 500 años.



**Figura 49** Caracterización de valores de peligro para el arroyo El Saltito, para un periodo de retorno de 10 años.





**Figura 50** Caracterización de valores de peligro para el arroyo El Salto, para un periodo de retorno de 100 años.



**Figura 51** Caracterización de valores de peligro para el arroyo El Salto, para un periodo de retorno de 500 años.

Las figuras 52 a 54 presentan los resultados de esta caracterización ponderada mediante porcentajes de variación en cada tramo del arroyo. Las zonas del cauce que presentan una mayor susceptibilidad a un crecimiento relativo de corrientes son: la zona Suroeste del poblado El Zacatal, la zona Norte del poblado San José Viejo y la zona Sureste del poblado Santa Rosa. Específicamente, la zona aledaña a la colonia Puerto Nuevo, La zona noroeste del poblado El Zacatal, la zona sur del poblado Santa Rosa, presenta un crecimiento en ancho de corrientes considerable, pero no considerado como alto.

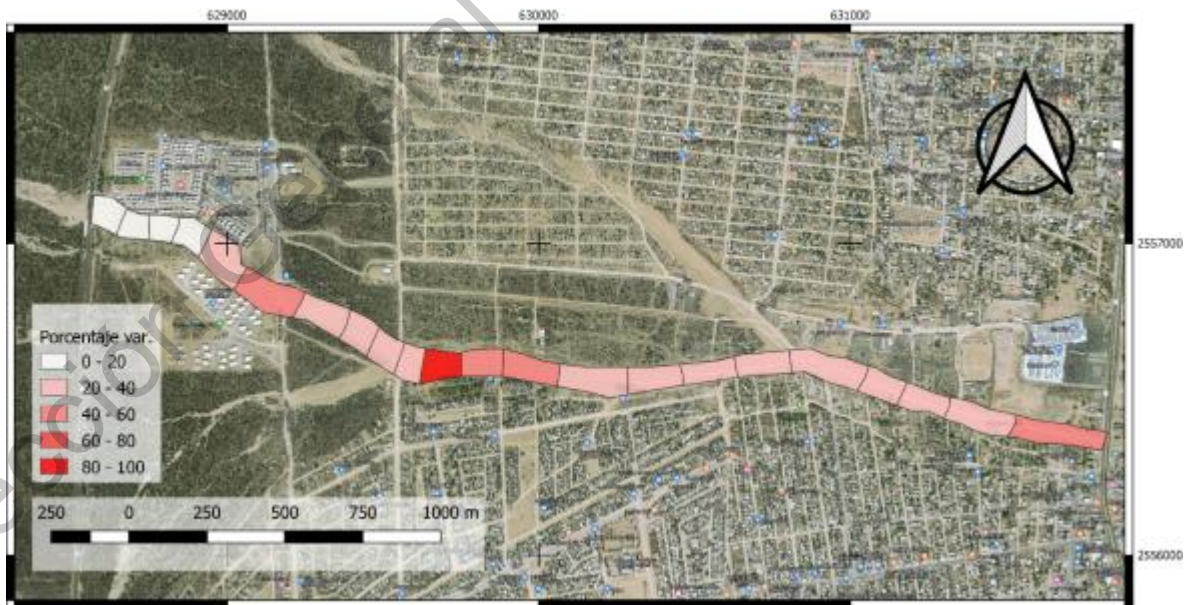
En la mayoría de los casos parece haber una correlación entre el peligro de inundación y el incremento del ancho de corrientes, sin embargo, esto no es el caso para las zonas Sureste del poblado El Zacatal donde el incremento en el ancho de corrientes es alto, mientras que el peligro por inundación es nulo. Por otra parte, al Noroeste del poblado El Zacatal el incremento en el ancho de corrientes es medio, mientras la peligrosidad de inundación es Alta.

**Tabla 25** Relación entre zonas que se ven afectadas por Incremento en el ancho de corrientes y zonas de peligrosidad.

<b>Tramo del Cauce</b>	<b>IAC</b>	<b>Peligro Inu.</b>
SE El Zacatal	Alto	Nulo
N San José	Alto	Alto
SE Santa Rosa	Alto	Alto
N Puerto Nuevo	Alto	Alto
NO El Zacatal	Medio	Alto
S Santa Rosa	Medio	Medio



**Figura 52** Delimitación de zonas con valor influencia de crecimiento sobre los valores de potencia de corrientes para el arroyo El Saltito. Zonas de color rojo más intenso representan zonas donde la variación es más grande a un cierto valor de potencia.



**Figura 53** Delimitación de zonas con valor influencia de crecimiento sobre los valores de potencia de corrientes para el arroyo El Pedregal. Zonas de color rojo más intenso representan zonas donde la variación es más grande a un cierto valor de potencia.



**Figura 54** Delimitación de zonas con valor influencia de crecimiento sobre los valores de potencia de corrientes para el arroyo El Cajón. Zonas de color rojo más intenso representan zonas donde la variación es más grande a un cierto valor de potencia.

## 5. CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se cumplió con el objetivo propuesto de caracterizar y diagnosticar las zonas de peligro por eventos de inundación en la zona sur del estado de Baja California Sur, específicamente en la región de San José del Cabo; así como conocer el efecto que tienen los ciclones tropicales sobre el cambio en la geomorfología de los arroyos.

Este trabajo permitirá cuantificar espacial de la peligrosidad actual y el grado de exposición actual, de las inundaciones asociadas a eventos ciclónicos, así también correlacionar la intensidad de dichos eventos con los cambios geomorfológicos al paisaje. De esta manera, es posible prevenir pérdidas económicas y vidas humanas.

De acuerdo con los resultados, el arroyo El pedregal presenta un mayor número de zonas de alta peligrosidad, comparada con los arroyos el Saltito y El Cajón.

Para el arroyo El Saltito: el vado de Santa Rosa y la zona SE del poblado de Santa Rosa, poseen condiciones de peligrosidad alta desde un periodo de retorno de 10 años. Por ello fueron clasificadas como zonas de peligrosidad alta. La zona Sur del poblado de Santa Rosa, la zona Norte y Noreste del poblado de Las Guaymitas poseen condiciones de peligrosidad alta a partir de un periodo de retorno de 100 años. Por ello fueron clasificadas como de peligrosidad media. Por otra parte, la zona Este del poblado de Las Guaymitas posee condiciones de peligrosidad alta a partir de un periodo de retorno de 500 años. Por ello fue clasificada como una zona de peligrosidad baja.

Para el arroyo El Pedregal: La zona norte de colonia Puerto Nuevo, La zona Sur del poblado de San José, la zona SE del poblado de San José, la zona norte del poblado El Zacatal y la zona NO del poblado El Zacatal. De acuerdo con los resultados, todas estas zonas poseen características asociadas a una peligrosidad a partir de un periodo de retorno de 10 años. Por ello todas fueron clasificadas con una peligrosidad alta.

Para el arroyo El Cajón: las zonas N y Noroeste del poblado de San José del Cabo. De acuerdo con los resultados ambas presentan condiciones de alta peligrosidad a partir de periodos de retorno de 10 años. Pero estas fueron categorizadas como zonas de alta peligrosidad

En el presente trabajo se encontró la existencia de una correlación positiva entre el crecimiento de arroyos y la potencia de corrientes, específicamente, para aquellas zonas en las que la potencia de corrientes es menor a 4,700 W/m. Los valores de crecimiento de corrientes por encima de dicho límite no poseen una tendencia aparente.

De acuerdo a los resultados, puede ser detectado que, en las zonas donde el cauce presenta una forma recta, la potencia es mayor y el crecimiento de corrientes es menor. Se sugiere que una mejor eficiencia en los cauces producto de un reacomodo en la geomorfología de los mismos lleva a la generación de mayores valores de potencia de corrientes total con relativamente menor efecto de erosión en los bordes de dichas zonas.

Las zonas del cauce que presentan una mayor susceptibilidad a un crecimiento relativo de corrientes son: la zona Suroeste del poblado El Zacatal, la zona Norte del poblado San José Viejo y la zona Sureste del poblado Santa Rosa. Específicamente, la zona aledaña a la colonia Puerto Nuevo, La zona noroeste del poblado El Zacatal, la zona sur del poblado Santa Rosa, presenta un crecimiento en ancho de corrientes considerable, pero no considerado como alto.

En la mayoría de los casos parece haber una correlación entre el peligro de inundación y el incremento del ancho de corrientes, sin embargo, esto no es el caso para las zonas Sureste del poblado El Zacatal donde el incremento en el ancho de corrientes el alto, mientras que el peligroso por inundación es nulo. Por otra parte, al Noroeste del poblado El Zacatal el incremento en el ancho de corrientes es medio, mientras la peligrosidad de inundación es Alta.

## **7. RESUMEN FINANCIERO**

El presente proyecto no recibió aportaciones complementarias, ni estaban tampoco contempladas en la propuesta.

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

Acuña-Acuña, J. (2003). Ingeniería de confiabilidad. Primera edición, Editorial Tecnológica de CR. 328 pp. ISBN: 9977-66-141-3.

Aguilar Sarmiento, J. L. (2017). Evaluación de las condiciones hidráulicas en esteros y canales mediante. Tesis de Licenciatura. Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador. pp. 84.

Alam, M., Emura, K., Farnham, C., y Yuan, J. (2018). Best-Fit Probability Distributions and Return Periods for Maximum

Monthly Rainfall in Bangladesh. *Climate*, 6(1), pp. 9. <https://doi.org/10.3390/cli6010009>

Al-Hassoun, S. A. (2011). Developing an empirical formulae to estimate rainfall intensity in Riyadh region. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 23(2), pp. 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2011.03.003>

Ali, C. A., Mohamed, K. R., Leman, M. S., Komoo, I., & Unjah, Y. (2008). Field guide to geology of Langkawi Geopark. Cataloguing-in-Publication Data, pp. 82

Anderson, T. W. (1962). On the distribution of the two-sample Cramer-von Mises criterion. *The Annals of Mathematical Statistics*, pp. 1148–1159.

Anees, M. T., Abdullah, K., Nawawi, M. N. M., Ab Rahman, N. N. N., Piah, A. R. M., Zakaria, N. A., Mohd. Omar, A. K. (2016). Numerical modeling techniques for flood analysis. *Journal of African Earth Sciences*, 124, pp. 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.10.001>

Antinao, J. L., & Farfán, L. M. (2013). Occurrence of landslides during the approach of tropical cyclone Juliette (2001) to Baja California Sur, Mexico. *Atmosfera*, 26(2), pp. 183–208. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(13\)71071-3](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(13)71071-3)

Aucoin, F. (2015). Package ‘FAdist’. CRAN Repository. v. 2.2.

Aucoin, Francois. (2017). FAMle: Maximum Likelihood and Bayesian Estimation of Univariate Probability Distributions. Retrieved from <https://cran.r-project.org/package=FAMle>

Avilés-Cannett. (2017). Modelación de Escenarios de Peligro por Inundaciones para Diferentes Periodos de Retorno en Ciudad Insurgentes Baja California Sur, México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California Sur, pp. 106.

Baratti, E., Montanari, A., Castellarin, A., Salinas, J. L., Viglione, A., & Bezzi, A. (2012). Estimating the flood frequency distribution at seasonal and annual time scales. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(12), pp. 4651–4660. <https://doi.org/10.5194/hess-16-4651-2012>

Benito, G., Ayala-Carcedo, J., & Olcina, J. (2002). La paleohidrología en el análisis de inundaciones. *Riesgos Naturales*. Barcelona, Ariel, pp. 953–967.

Bizzi, S., & Lerner, D. N. (2015). The use of stream power as an indicator of channel sensitivity to erosion and deposition processes. *River Research and Applications*, 31(1), pp. 16–27.

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 30(1), pp. 1–10.

Bock, M., Böhner, J., Conrad, O., (2011). SAGA. System for Automated Geoscientific Analyses.v. 2.1. 4. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 1991-2007.

Box, G. E. P., & Pierce, D. A. (1970). Distribution of residual autocorrelations in autoregressive-integrated moving average time series models. *Journal of the American Statistical Association*, 65(332), pp. 1509–1526.

Brownlee, K. A. (1965). *Statistical theory and methodology in science and engineering* (Vol. 150). Wiley New York. pp. 616.

Caeiro, F., & Mateus, A. (2014). randtests: Testing randomness in R. R Package Version.

Caicedo-Paez, A. (2017). Modelación hidrodinámica para la determinación de alertas tempranas por inundación en la ecoregión de La Mojana -Nechí, Antioquia. Tesis de Licenciatura, Universidad Católica de Colombia. pp. 84.

Campos-Aranda, Daniel F. (2014). Análisis regional de frecuencia de crecientes en la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), México. 1: Índices de estacionalidad y regiones de influencia. *Agrociencia*, 48(2), pp. 147–158.

Campos-Aranda, D F. (2013). Contraste de la distribución Logística Generalizada en 31 registros históricos de eventos máximos anuales. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(1), pp. 113–123.



CENAPRED. (2009). Características e impactos socioeconómicos de los principales desastres en la República Mexicana, en el año 2007, Serie: Impacto socioeconómico de los desastres en México. México, D.F. pp. 269.

CENAPRED, (2006). Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Atlas Nacional de Riesgos (Vol. 1). <https://doi.org/10.1080/15377850802605684>

Cervantes Jaimes, C. E. (2012). Generación de mapas de riesgo de inundación mediante modelación en dos dimensiones. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 109

Chen, Y., Zhou, H., Zhang, H., Du, G., & Zhou, J. (2015). Urban flood risk warning under rapid urbanization. *Environmental Research*, 139, pp. 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.02.028>

Cheong, R. Y., & Gadba, D. (2017). Modelling maximum river flow by using Bayesian Modelling maximum river flow by using Bayesian Markov. Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 890 (2017) 012146 doi :10.1088/1742-6596/890/1/012146.

Choudhari, K., Panigrahi, B., & Paul, J. C. (2014). Simulation of rainfall-runoff process using HEC-HMS model for Balijore. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 5(2), pp. 253–265. <https://doi.org/Code : EIJGGS5021>

Chow, V. Te. (1959). Open channel flow. London: McGRAW-HILL, 11(95), pp. 99–136.

CONABIO. (1997). Mapa de climas. Escala 1:1,000,000.

CONAGUA. (2009). Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero (0319) San José del Cabo estado de Baja California Sur. pp. 31.

CONAGUA. (2011). Análisis de las temporadas de huracanes de los años 2009, 2010 y 2011 en México. Retrieved from <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/cgsmn-2-12.pdf>.

CONAGUA. (2016). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero San José del Cabo, estado de Baja California Sur: México. Comisión Nacional del Agua, Subdirección Gerencia Técnica. pp 31.

CONAGUA. (2018). Información Climatológica. Retrieved June 5, 2018, from <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica>

Congedo, L. (2016). Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Roma: Sapienza University of Rome. <https://doi.org/DOI:10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>

Conover, W. J. (1999). Practical Nonparametric Statistics, John Wiley & Sons. INC, New York.

Costabile, P., & Macchione, F. (2015). Enhancing river model set-up for 2-D dynamic flood modelling. *Environmental Modelling and Software*, 67, 89–107. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.01.009>

Cudworth, A. G. (1989). Flood Hydrology Manual: A Water Resources Technical Publication, 258.

De Rosa, P., Fredduzzi, A., & Cencetti, C. (2019). Stream Power Determination in GIS: An Index to Evaluate the Most 'Sensitive' Points of a River. *Water*, 11(6), pp. 1145. <https://doi.org/10.3390/w11061145>

DeBarry, P. A. (2004). Watershed processes, assessment and management. Wiley. pp. 720.

Deidda, R., & Puliga, M. (2006). Sensitivity of goodness-of-fit statistics to rainfall data rounding off. *Physics and Chemistry of the Earth*, 31(18), pp. 1240–1251. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.04.041>

Delgado Parra, A. (2016). Modelización 1D, 1D/2D y 2D de la inundabilidad en el meandro de Sant Boi de Llobregat mediante la nueva aplicación HEC-RAS 5.0, Treball, Universidad Politècnica de Catalunya

Mokus, V. (2010). Time of Concentration. In Hydrology. National Engineering Handbook, Natural Resources Conservation Service, Soil Conservation Service, pp. 1–17.

F. A. O, (1988). UNESCO soil map of the world, revised legend. World Resources Report, 60, 138.

Flowers-Cano, R. S., Flowers, R. J., & Rivera-Trejo, F. (2014). Evaluación de criterios de selección de modelos probabilísticos: validación con series de valores máximos simulados. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 5(5), pp. 189–197.

Francés García, F. (1998). Utilización de la función de distribución de probabilidad TCEV con información no sistemática dentro de un análisis regional. Aplicación a los ríos Júcar y Turia. *Ingeniería Del Agua*, 1998, Vol. 5, Núm. 1, pp. 13.

Freeman, T. G. (1991). Calculating catchment área with divergent flow based on a regular grid. *Computers & Geosciences*, 17(3), pp. 413–422.

Gaál, L., Szolgay, J., Kohnová, S., Hlavčová, K., & Viglione, A. (2010). Inclusion of historical information in flood frequency analysis using a Bayesian MCMC technique: a case study for the power dam Orlick, Czech Republic. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 40(2), pp. 121–147. <https://doi.org/10.2478/v10126-010-0005-5>

García, E. (1973). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana), pp. 98.

Gaspari, F. J., Vagaría, A. M. R., Senisterra, G. E., Denegri, G. A., Delgado, M. I., & Besteiro, S. I. (2013). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS*, 4, pp. 143–158.

Glick, P., Kostyack, J., Pittman, J., Briceno, T., & Wahlund, N. (2014). Natural Defenses from Hurricanes and Floods: Protecting America's Communities and Ecosystems in an Era of Extreme Weather, pp. 76.

Grub, H., & Robson, A. (2000). Detecting Trend and Other Changes in Hydrological Data. *Exploratory / Visual Analysis*, (May), pp. 17–41. [https://doi.org/WMO/TD-No. 1013](https://doi.org/WMO/TD-No.1013)

Han, S., & Coulibaly, P. (2017). Bayesian flood forecasting methods: A review. *Journal of Hydrology*, 551, pp. 340-351.

Hanson, L. S., & Vogel, R. (2008). The Probability Distribution of Daily Rainfall in the United States. *World Environmental and Water Resources Congress 2008*, pp. 1–10. [https://doi.org/10.1061/40976\(316\)585](https://doi.org/10.1061/40976(316)585)

Henaos, J. (1988). *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas*. Bogotá, Colombia: Universidad Santo Tomás, Centro de enseñanza desescolarizada, Universidad Santo Tomás, Centro de enseñanza desescolarizada.

Herrero, A., Laín, H. L., & Isidro, M. (2008). *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones Guía metodológica para su elaboración*. Instituto Geológico y Minero de España IGME. Madrid, España. pp. 113-118.

Hipel, K. W., & McLeod, A. I. (1994). *Time series modelling of water resources and environmental systems*, Elsevier, 45, pp. 1012.

Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 350–361.

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), pp. 275–370.

INEGI. (2001). *Memoria XII censo general de población y vivienda 2000*. Retrieved June 22, 2019, from [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1329/702825006519/702825006519\\_1.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1329/702825006519/702825006519_1.pdf)

INEGI. (2010). Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso del suelo y vegetación: escala 1: 250 000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía: Aguascalientes, Aguascalientes.

INEGI. (2011). Censo General de población y Vivienda 2010. Retrieved June 22, 2019, from

[http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/poblacion/2010/perfil\\_socio/uem/702825047610\\_1.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/poblacion/2010/perfil_socio/uem/702825047610_1.pdf)

INIFAP. (1995). Carta de Suelos 1:1000000.

Jesudasan-Julius, J. (2018). Intensity-Duration-Frequency Analysis of Rainfall for a Site in Chennai City, 5(3), pp. 875–880.

Kang, H. M., & Yusof, F. (2012). Homogeneity tests on daily rainfall series. *Int. J. Contemp. Math. Sciences*, 7(1), pp. 9–22.

Klemas, V. (2015). Remote Sensing of Floods and Flood-Prone Areas: An Overview. *Journal of Coastal Research*, 314, pp. 1005–1013. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00160.1>

Kotrlik, J., & Higgins, C. (2001). Organizational research: Determining appropriate sample size in survey research appropriate sample size in survey research. *Information Technology, Learning, and Performance Journal*, 19(1), pp. 43.

Kourgialas, N. N., & Karatzas, G. P. (2016). A flood risk decision making approach for Mediterranean tree crops using GIS; climate change effects and flood-tolerant species. *Environmental Science and Policy*, 63, pp. 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.05.020>

Koutsoyiannis, D., & Baloutsos, G. (2000). Analysis of a long record of annual maximum rainfall in Athens, Greece, and design rainfall inferences. *Natural Hazards*, 22(1), pp. 29–48. <https://doi.org/10.1023/A:1008001312219>

Kumar, R., & Bhardwaj, A. (2015). Probability analysis of return period of daily maximum rainfall in annual data set of Ludhiana , Punjab, 49(2),pp. 160–164. <https://doi.org/10.5958/0976-058X.2015.00023.2>

Liu, R., Chen, Y., Wu, J., Gao, L., Barrett, D., Xu, T., ... Yu, J. (2017). Integrating Entropy-Based Naïve Bayes and GIS for Spatial Evaluation of Flood Hazard. *Risk Analysis*, 37(4), pp . 756–773. <https://doi.org/10.1111/risa.12698>

López-Lambraño, A. A., Fuentes, C., González-Sosa, E., & López-Ramos, A. A. (2017). Pérdidas por intercepción de la vegetación y su efecto en la relación intensidad, duración y frecuencia (IDF) de la lluvia en una cuenca semiárida. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(4), pp. 37–56. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-03>

Magilligan, F. J., Buraas, E. M., & Renshaw, C. E. (2015). The efficacy of stream power and flow duration on geomorphic responses to catastrophic flooding. *Geomorphology*, 228, pp. 175–188. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.08.016>

Maidment, D. R., et al., (1993). *Handbook of hydrology* (Vol. 9780070). McGraw-Hill New York. pp. 1424

Martinez-Gutierrez, G., Díaz Gutiérrez, J. J., & Cosío González, O. G. (2002). Capítulo 1 Geología. In Programa de Manejo para Cuenca Hidrológica-Forestal San José del Cabo, B.C.S, La Paz, Baja California Sur, México: CIBNOR-UABCS, pp. 2-46.

Martínez Gutiérrez, G. M., Díaz Gutiérrez, J. J., & Cosío González, O. G. (2007). Geología. Informe final. In Programa de Manejo para la Cuenca Hidrológica- Forestal San José del Cabo, B.C.S: La Paz B. C. S, pp. 1–40.

Mendoza-Albañez, A. (2014). Geomorfología y riesgos por inundación en la parte baja de la cuenca de San José del Cabo B. C. S. (Un análisis del crecimiento población y de la mancha urbana 1970-2010), Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California Sur, pp. 150

Moel, H., van Alphen, J., & Aerts, J. C. J. H. (2009). Flood maps in Europe &ndash; methods, availability and use. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(2), pp. 289–301. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-289-2009>

Montgomery, M. T. (2014). Tropical Cyclone Formation, 0469(January 1993). Retrieved March 10, 2019, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1993\)050<0285](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1993)050<0285)

National Weather Service. (2005). Unit Hydrograph (UHG) Technical Manual. Retrieved March 10, 2019, from [https://www.nohrsc.noaa.gov/technology/gis/uhg\\_manual.html](https://www.nohrsc.noaa.gov/technology/gis/uhg_manual.html)

NOA. (2018). The Northeast and North Central Pacific hurricane database 1949–2017.

NRCS. (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55. USDA Natural Resource Conservation Service Conservation Engineering Division Technical Release 55, pp. 164. <https://doi.org/Technical Release 55>

O’Callaghan, J. F., & Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28(3), pp. 323–344.

Orlowsky, B. (2014). *iki. dataclim: Consistency, Homogeneity and Summary Statistics of Climatological Data*. R package version 1.0.

Park, J. S., & Jung, H. S. (2002). Modelling Korean extreme rainfall using a Kappa distribution and maximum likelihood estimate. *Theoretical and Applied Climatology*, 72(1–2), pp. 55–64. <https://doi.org/10.1007/s007040200012>

Parkes, B., & Demeritt, D. (2016). Defining the hundred year flood : A Bayesian approach for using historic data to reduce uncertainty in flood frequency estimates. *Journal of Hydrology*, 540, pp. 1189–1208. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.025>

Pohlert, T. (2018). *trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection*. R Package Version 1.1.1.

Ponce, V. M., & Hawkins, R. H. (1996). Runoff curve number: Has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1), pp. 11–19.

Prieto, R. B., Vivian, D., Valdés, P., & Ramírez, R. A. (2016). Estudio de Aplicación del Análisis Regional de Frecuencias Basado en L-Momentos al Caso de las Precipitaciones Anuales en la Provincia de Case Study of Regional Frequency Analysis Based in L-Moments to the Case of the Annual Rainfall in the Province of Ca. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31(4), pp. 539–545. <https://doi.org/10.1590/0102-7786312314b20140125>

Quantum, G. I. S. (2012). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.

Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., & Planchon, O. (1991). The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5(1), pp. 59–79.

R Core Team. (2018). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria. Retrieved from <https://www.r-project.org/>

Rahman, A. S., Rahman, A., Zaman, M. A., Haddad, K., Ahsan, A., & Imteaz, M. (2013). A study on selection of probability distributions for at-site flood frequency analysis in Australia. *Natural Hazards*, 69(3), pp. 1803–1813. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0775-y>

Rius, A., & Redaño, A. (2015). Ajustando el factor de corrección para medidas de precipitación realizadas con intervalos temporales fijos según el régimen pluviométrico de la localidad, 12–13.

Rodríguez-Gaviria, E. M. (2016). Diseño metodológico para la evaluación del riesgo por inundación a nivel local con información escasa, pp. 379.

Roth, D. M. (2007a). “Hurricane Eugene.”, National Oceanic and Atmospheric Administration.



Roth, D. M. (2007b). "Hurricane Flossie.", National Oceanic and Atmospheric Administration.

Roth, D. M. (2007c). "Hurricane Greg.", National Oceanic and Atmospheric Administration.

Roth, D. M. (2007d). "Hurricane Ignacio.", National Oceanic and Atmospheric Administration.

Roth, D. M. (2007e). "Hurricane Isis.", National Oceanic and Atmospheric Administration.

Roth, D. M. (2007f). "Hurricane Juliette.", National Oceanic and Atmospheric Administration.

Roth, D. M. (2007g). "Hurricane Nora.", National Oceanic and Atmospheric Administration.

Roth, D. M. (2007h). "Hurricane Odile.", National Oceanic and Atmospheric Administration.

Roth, D. M. (2007i). "Hurricane Pauline.", National Oceanic and Atmospheric Administration.

Roth, D. M. (2007j). "Tropical Storm Lidia.", National Oceanic and Atmospheric Administration.

Sánchez Celada, M., & Batista Silva, J. L. (2005). Evaluación del peligro y vulnerabilidad ante la ocurrencia de inundaciones. Cuenca del Cauto. Cuba. Mapping: Map and Sig Consulting, (102), pp. 88-93.

Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. Geological Society of America Bulletin, 67(5), pp. 597-646.

Scuderi, C. M., Stenta, H. R., & Riccardi, G. A. (2000). Uso de imágenes satelitales y SIG en la generación de mapas de CN y evaluación de la agregación espacial de este parámetro mediante modelación, pp. 79–111.

SEDATU, Arqco, A., & Evaluación de Riesgos Naturales y Antropogénicos, S. A. de C. V. (2013). Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Los Cabos, Baja California Sur 2013, 52(55), pp. 371. <https://doi.org/020021ME042>

Shoji, T., & Kitaura, H. (1999). Statistical and Geostatistical Analysis of Rain Fall in Central Japan, 01, pp. 1–11.

Smith, K. G. (1950). Standards for grading texture of erosional topography. American Journal of Science, 248(9), pp. 655–668.

Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (área-altitude) analysis of erosional topography. Geological Society of America Bulletin, 63(11), pp. 1117–1142.

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. Eos, Transactions American Geophysical Union, 38(6), pp. 913–920.

Tanguy, M., Chokmani, K., Bernier, M., Poulin, J., & Raymond, S. (2017). River flood mapping in urban areas combining Radarsat-2 data and flood return period data. Remote Sensing of Environment, 198, pp. 442–459. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.042>

Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. Water Resources Research, 33(2), pp. 309–319.

Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. Environmental Modelling and Software, 90, pp. 201–216. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>

Torres Sam, L. O. (2015). SIG aplicado a la zonificación por amenaza de inundación en la cuenca del río Polochic, Alta Verapaz, Guatemala, (c).

USDA-NRCS. (2010). National Engineering Handbook Chapter 15, Time of Concentration, pp. 1–15.

USDA–Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS). (2015). Storm Rainfall Depth and Distribution. National Engineering Handbook, Part 630, (September), pp. 79.

Vadillo-Romero, E., Zaytsev, O., & Morales-Pérez, R. (2006). Tropical cyclone statistics in the Northeastern Pacific, 20(2), pp. 197–213.

Verstappen, H. T. (1983). Applied Geomorphology. Geomorphological Surveys for Environmental Development. Elsevier Science Publishers, pp. 437, ISBN-13: 978-0444421814.

Vidal-Zepeda, R. (2001). Catálogo de metadatos geográficos 1:4000000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

Wang, J., Tsang, W. W., & Marsaglia, G. (2003). Evaluating Kolmogorov's distribution. Journal of Statistical Software, 8(18), pp. 1-4.

Wang, L., & Liu, H. (2006). An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. International Journal of Geographical Information Science, 20(2), pp. 193–213.

Weight, W. D. (2008). Hydrogeology field manual (2nd ed.). Montana, US: McGraw-Hill., pp. 771 <https://doi.org/10.1036/0071477497>

Woolhiser, D. A., & Roldan, J. (1982). Stochastic Daily Precipitation Models: 2. A comparison of distribution amounts. Water Resources Research, 18(5), pp. 1461–1468.

Wurl, J. (2007). Capítulo 3 Efectos de los Ciclones Tropicales en el clima. In Programa de Manejo para Cuenca Hidrológica-Forestal San José del Cabo, B.C.S, La Paz, Baja California Sur, México: CIBNOR-UABCS, pp. 57–68.

Wurl, J., García, C. N. M., & Lamadrid, M. Á. I. (2015). Caracterización del peligro por inundaciones en el oasis La Purísima, Baja California Sur, México. *Investigaciones Geograficas*, 87(87), pp. 76–87. <https://doi.org/10.14350/rig.41858>

Wurl, J., Hernández Morales, P., Gaytán García, J., Martínez Meza, J. E., & Imaz Lamadrid, M. A. (2002). Hidrogeología. Informe final. In Programa de Manejo para Cuenca Hidrológica-Forestal San José del Cabo, B.C.S, La Paz, Baja California Sur, México: CIBNOR-UABCS, pp. 69-159.

Wurl, J., Martínez García, C. N., & Imaz Lamadrid, M. A. (2017). Hydrologic response to climate change in arid regions: Case study in los Comondu, Baja California Sur, Mexico. *Hidrobiologica*, 27(1), pp. 13–22.

Wurl, J., & Martínez Gutiérrez, G. (2006). El efecto de ciclones tropicales sobre el clima en la cuenca de Santiago, Baja California Sur, México. In III Simposio Internacional en Ingeniería y Ciencias para la Sustentabilidad Ambiental y Semana del Ambiente, pp. 5-6.

Wurl, J., & Valdez Aragón, A. R. (2007). Clima. Informe Final. In Programa de Manejo para Cuenca Hidrológica-Forestal San José del Cabo, B.C.S. La Paz, Baja California Sur, México: (CONAFOR-2002-C01- 5671). CIBNOR-UABCS, pp. 46 - 56.

Zazo, S., Rodríguez-González, P., Molina, J. L., Hernández-López, D., & González-Aguilera, D. (2017). Flood Analysis Supported by Low-cost Geometric Modelling. *River Research and Applications*, 33(4), pp. 620–631. <https://doi.org/10.1002/rra.3113>

## 9. ANEXOS

**Anexo 1** Valores de precipitación por hora y por periodo de retorno para la subcuenca El Saltito. Estos valores fueron obtenidos con ayuda de los hietogramas sintéticos de USDA-NRCS (2015).

Hora	El Saltito						
	Periodo de retorno en años						
	2	5	10	25	50	100	500
1	1.01	1.91	2.51	3.26	3.82	4.38	5.66
2	1.01	1.91	2.51	3.26	3.82	4.38	5.66
3	1.09	2.06	2.70	3.51	4.11	4.71	6.09

4	1.24	2.34	3.07	4.00	4.68	5.37	6.94
5	1.39	2.63	3.45	4.49	5.26	6.02	7.79
6	1.54	2.92	3.83	4.98	5.83	6.68	8.64
7	1.87	3.54	4.64	6.04	7.07	8.10	10.48
8	2.38	4.49	5.90	7.67	8.99	10.29	13.31
9	3.21	6.07	7.97	10.36	12.14	13.91	17.98
10	4.37	8.27	10.86	14.12	16.54	18.94	24.50
11	6.16	11.67	15.31	19.91	23.33	26.72	34.55
12	25.27	47.82	62.75	81.61	95.60	109.50	141.60
13	25.27	47.82	62.75	81.61	95.60	109.50	141.60
14	6.16	11.67	15.31	19.91	23.33	26.72	34.55
15	4.37	8.27	10.86	14.12	16.54	18.94	24.50
16	3.21	6.07	7.97	10.36	12.14	13.91	17.98
17	2.38	4.49	5.90	7.67	8.99	10.29	13.31
18	1.87	3.54	4.64	6.04	7.07	8.10	10.48
19	1.54	2.92	3.83	4.98	5.83	6.68	8.64
20	1.39	2.63	3.45	4.49	5.26	6.02	7.79
21	1.26	2.38	3.12	4.06	4.76	5.45	7.05
22	1.14	2.16	2.84	3.69	4.33	4.95	6.41
23	1.03	1.95	2.56	3.33	3.90	4.46	5.77
24	0.92	1.73	2.27	2.96	3.46	3.97	5.13

**Anexo 2** Valores de precipitación por hora y por periodo de retorno para la subcuenca El Cajón. Estos valores fueron obtenidos con ayuda de los hietogramas sintéticos de USDA-NRCS (2015).

Hora	El Cajon						
	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
1	0.9	1.8	2.3	3.0	3.6	4.1	5.3
2	0.9	1.8	2.3	3.0	3.6	4.1	5.3
3	1.0	1.9	2.5	3.3	3.8	4.4	5.7
4	1.1	2.2	2.9	3.7	4.3	5.0	6.4
5	1.3	2.4	3.2	4.2	4.9	5.6	7.2
6	1.4	2.7	3.5	4.6	5.4	6.2	8.0
7	1.7	3.3	4.3	5.6	6.6	7.5	9.7
8	2.2	4.2	5.5	7.1	8.3	9.6	12.4
9	3.0	5.6	7.4	9.6	11.3	12.9	16.7
10	4.0	7.7	10.1	13.1	15.4	17.6	22.8
11	5.7	10.8	14.2	18.5	21.7	24.8	32.1
12	23.3	44.3	58.2	75.7	88.8	101.7	131.6
13	23.3	44.3	58.2	75.7	88.8	101.7	131.6
14	5.7	10.8	14.2	18.5	21.7	24.8	32.1
15	4.0	7.7	10.1	13.1	15.4	17.6	22.8
16	3.0	5.6	7.4	9.6	11.3	12.9	16.7
17	2.2	4.2	5.5	7.1	8.3	9.6	12.4
18	1.7	3.3	4.3	5.6	6.6	7.5	9.7
19	1.4	2.7	3.5	4.6	5.4	6.2	8.0
20	1.3	2.4	3.2	4.2	4.9	5.6	7.2
21	1.2	2.2	2.9	3.8	4.4	5.1	6.5
22	1.1	2.0	2.6	3.4	4.0	4.6	6.0
23	0.9	1.8	2.4	3.1	3.6	4.1	5.4
24	0.8	1.6	2.1	2.7	3.2	3.7	4.8

**Anexo 3** Valores de precipitación por hora y por periodo de retorno para la subcuenca El Pedregal. Estos valores fueron obtenidos con ayuda de los hietogramas sintéticos de USDA-NRCS (2015).

Hora	El Pedregal						
	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
1	1.01	1.93	2.53	3.29	3.86	4.42	5.72
2	1.01	1.93	2.53	3.29	3.86	4.42	5.72

3	1.09	2.07	2.72	3.54	4.15	4.75	6.15
4	1.24	2.36	3.10	4.03	4.73	5.41	7.00
5	1.39	2.65	3.48	4.53	5.30	6.08	7.86
6	1.55	2.94	3.86	5.02	5.88	6.74	8.72
7	1.88	3.56	4.68	6.09	7.14	8.18	10.58
8	2.38	4.53	5.94	7.74	9.07	10.39	13.44
9	3.22	6.11	8.03	10.45	12.25	14.03	18.15
10	4.39	8.33	10.94	14.24	16.69	19.11	24.73
11	6.19	11.75	15.43	20.08	23.53	26.96	34.88
12	25.36	48.15	63.24	82.31	96.45	110.49	142.94
13	25.36	48.15	63.24	82.31	96.45	110.49	142.94
14	6.19	11.75	15.43	20.08	23.53	26.96	34.88
15	4.39	8.33	10.94	14.24	16.69	19.11	24.73
16	3.22	6.11	8.03	10.45	12.25	14.03	18.15
17	2.38	4.53	5.94	7.74	9.07	10.39	13.44
18	1.88	3.56	4.68	6.09	7.14	8.18	10.58
19	1.55	2.94	3.86	5.02	5.88	6.74	8.72
20	1.39	2.65	3.48	4.53	5.30	6.08	7.86
21	1.26	2.40	3.15	4.10	4.80	5.50	7.11
22	1.15	2.18	2.86	3.72	4.36	5.00	6.47
23	1.03	1.96	2.58	3.35	3.93	4.50	5.83
24	0.92	1.74	2.29	2.98	3.50	4.00	5.18

**Anexo 4** Coeficientes de la regresión lineal múltiple y su significancia asociada con variaciones en la velocidad media debido al cambio de coeficiente de manning (B), error estándar (SE), coeficiente T-test de regresión para cada coeficiente (t) y valor p-value.

Velocidad media		B	SE	t	p-value
Saltito	Intercept	1.20788	0.02085	57.941	2.00E-16
	BareSoil	-2.98528	0.45665	-6.537	2.27E-06
	River	-9.5484	0.3915	-24.389	2.37E-16
	Brushland	-2.86257	0.28591	-10.012	3.10E-09
Pedregal	Intercept	0.81712	0.01213	67.34	2.00E-16
	BareSoil	-5.37021	0.26581	-20.2	8.90E-15
	River	-4.85172	0.22788	-21.29	3.26E-15
	Brushland	-2.42047	0.16642	-14.54	4.25E-12
Cajón					

	Intercept	0.92074	0.01169	78.752	2.00E-16
	BareSoil	0.13985	0.25611	0.546	0.591
	River	-12.25224	0.21957	-55.802	2.00E-16
	Brushland	-0.99415	0.16035	-6.2	4.68E-06

**Anexo 5** Coeficientes de la regresión lineal múltiple y su significancia asociada con variaciones en la velocidad máxima debido al cambio de coeficiente de manning (B), error estándar (SE), coeficiente T-test de regresión para cada coeficiente (t) y valor p-value.

Velocidad Máxima		B	SE	t	p-level
Saltito	Intercept	6.5221	0.2392	27.262	2.00E-16
	BareSoil	-3.6905	5.2407	-0.704	0.489
	River	-77	4.4929	-17.138	2.01E-13
	Brushland	2.9667	3.2812	0.904	0.377
Pedregal	Intercept	6.00E+00	1.74E-01	34.487	2.00E-16
	BareSoil	-7.41E+01	3.81E+00	-19.427	1.88E-14
	River	-8.63E+00	3.27E+00	-2.639	0.0157
	Brushland	-1.12E-13	2.39E+00	0	1
Cajón	Intercept	4.9367	0.1033	47.782	<2e-16
	BareSoil	2.0238	2.2632	0.894	0.382
	River	-51	1.9403	-26.285	<2e-16
	Brushland	1.4333	1.417	1.012	0.324

**Anexo 6** Coeficientes de la regresión lineal múltiple y su significancia asociada con variaciones en la profundidad media debido al cambio de coeficiente de manning (B), error estándar (SE), coeficiente T-test de regresión para cada coeficiente (t) y valor p-value.

Profundidad media		B	SE	t	p-level
Saltito	Intercept	0.25374	0.0111	22.855	8.34E-16
	BareSoil	0.36057	0.24319	1.483	0.154
	River	1.32471	0.2085	6.354	3.36E-06
	Brushland	0.08606	0.15226	0.565	0.578



Pedregal					
	Intercept	0.18564	0.004828	38.453	2.00E-16
	BareSoil	0.350946	0.10575	3.319	0.00343
	River	0.470032	0.090662	5.184	4.50E-05
	Brushland	0.078639	0.06621	1.188	0.24886
Cajón					
	Intercept	0.212948	0.004788	44.477	2.00E-16
	BareSoil	0.013927	0.104878	0.133	0.89568
	River	0.307365	0.089914	3.418	0.00272
	Brushland	0.041624	0.065664	0.634	0.53333

**Anexo 7** Coeficientes de la regresión lineal múltiple y su significancia asociada con variaciones en la velocidad máxima debido al cambio de coeficiente de manning (B), error estándar (SE), coeficiente T-test de regresión para cada coeficiente (t) y valor p-value.

Profundidad máxima		B	SE	t	p-level
Saltito					
	Intercept	0.5049	0.5528	0.913	0.37196
	BareSoil	11.0714	12.1086	0.914	0.37143
	River	22.125	10.3809	2.131	0.04566
	Brushland	26.1	7.5812	3.443	0.00257
Pedregal					
	Intercept	0.5932	0.5273	1.125	0.2739
	BareSoil	18.6905	11.5512	1.618	0.1213
	River	15.75	9.9031	1.59	0.1274
	Brushland	12.9667	7.2322	1.793	0.0881
Cajón					
	Intercept	2.5101	0.6862	3.658	0.00156
	BareSoil	-10.9524	15.0317	-0.729	0.47468
	River	-17.5	12.887	-1.358	0.1896
	Brushland	0.8667	9.4114	0.092	0.92754

**Anexo 8** Coeficientes de la regresión lineal múltiple y su significancia asociada con variaciones en el área debido al cambio de coeficiente de manning (B), error estándar (SE), coeficiente T-test de regresión para cada coeficiente (t) y valor p-value.

Area		B	SE	t	p-level
Saltito	Intercept	1130087	21711	52.051	<2e-16
	BareSoil	-1034524	475583	-2.175	0.0418
	River	-1207813	407728	-2.962	0.0077
	Brushland	555000	297762	1.864	0.0771
Pedregal	Intercept	1662432	29279	56.78	<2e-16
	BareSoil	813095	641349	1.268	0.2194
	River	-982188	549842	-1.786	0.0892
	Brushland	-895167	401548	-2.229	0.0374
Cajón	Intercept	1626139	41097	39.568	2.00E-16
	BareSoil	-181250	900232	-0.201	0.842
	River	-5510313	771788	-7.14	6.45E-07
	Brushland	-247417	563634	-0.439	0.665

**Anexo 9** Coeficientes de la regresión lineal múltiple y su significancia asociada con variaciones en la distancia hacia las áreas de interés debido al cambio de coeficiente de manning (B), error estándar (SE), coeficiente T-test de regresión para cada coeficiente (t) y valor p-value.

Distancia hacia areas de interes		B	SE	t	p-level
Saltito	Intercept	47.353	5.543	8.542	4.17E-08
	BareSoil	119	121.43	0.98	0.3388
	River	-187.425	104.104	-1.8	0.0869
	Brushland	-99.96	76.027	-1.315	0.2035
Pedregal	Intercept	26.77	24.87	1.076	0.295
	BareSoil	278.33	544.8	0.511	0.615
	River	4.5	467.07	0.01	0.992
	Brushland	-405.67	341.1	-1.189	0.248
Cajón	Intercept	60.66	33.06	1.835	0.0814
	BareSoil	297.26	724.19	0.41	0.6858
	River	-936.38	620.86	-1.508	0.1471
	Brushland	-249.7	453.41	-0.551	0.5879

**Anexo 10** plantilla para encuestas (Elaboración propia)

Nombre del encuestador: \_\_\_\_\_

**Información sobre la vivienda:**

Dirección: \_\_\_\_\_

Coordenadas de la vivienda: \_\_\_\_\_

Fecha y hora de finalización de la encuesta: \_\_\_\_\_

Clave de fotografías: \_\_\_\_\_

Nombre de la persona que responde a la encuesta: \_\_\_\_\_

Tiempo viviendo en esta residencia: \_\_\_\_\_

Características generales de la vivienda (Número de pisos, elevación):

\_\_\_\_\_

**Sobre eventos de inundación:**

¿La vivienda se inunda o se ha inundado en el pasado? Si \_\_\_\_, No \_\_\_\_.

¿Qué eventos de esta índole recuerda que hayan afectado su vivienda?

Evento (fecha o nombre del evento)	Duración (horas, día, semanas)	Nivel con respecto a cuerpo o marcas (tobillos, rodillas, cadera, cintura...)	Daños (caída de postes, arboles, muros, arrastre de carros, etc. )

¿Cómo considera el daño a la vivienda? Poco \_\_\_\_, Mucho \_\_\_\_, Desastroso \_\_\_\_.

¿Cómo considera las pérdidas económicas (otros...)? Poco \_\_\_\_, Mucho \_\_\_\_,

Desastroso \_\_\_\_.

Durante la ocurrencia de un evento de ciclón tropical:

- a) Los habitantes de la casa permanecen en la vivienda durante los eventos
- b) Los habitantes de la casa evacuan totalmente

Comentarios:

\_\_\_\_\_