

## MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA MAYLANCO UTILIZANDO HEC-HMS

### HYDROLOGICAL MODELING OF MAYLANCO BASIN USING HEC-HMS

**Mario A. Angulo y Oliver C. Saavedra**

*Centro de Investigación en Ingeniería Civil y Ambiental (CIICA)*

*Universidad Privada Bolivia*

oliversaavedra@upb.edu

(Recibido el 15 de Mayo 2018, aceptado para publicación el 18 de Junio 2018)

#### RESUMEN

La modelación hidrológica de cuencas es una necesidad crucial en regiones con problemas de abastecimiento de agua y planificación de recursos hídricos como es el caso de la región metropolitana del departamento de Cochabamba. La cuenca Maylanco es una de las cuencas más importantes de la cuenca del río Rocha. En su territorio se encuentra el municipio de Sacaba, zona urbana de gran crecimiento. En este estudio se realizó la modelación de la cuenca Maylanco con el software HEC-HMS, el cual se utiliza para modelar tormentas de diseño, es decir, caudales máximos en un periodo específico de tiempo. Se realizó una recopilación de datos de la zona de estudio como la precipitaciones desde 1980 a 2016, mapas temáticos de la zona, ubicación de estaciones pluviométricas y modelos de elevación digital. Se analizaron y clasificaron estos datos para obtener información adicional necesaria para la modelación de la cuenca. Se establecieron periodos de retorno de 2, 25, 50, 75 y 100 años con los que se ejecutó el programa para obtener caudales máximos. Se realizaron campañas de medición de caudales en puntos específicos para comparar los caudales observados con los obtenidos mediante la modelación. Se tomaron estaciones con registros de precipitaciones recientes y se analizaron las precipitaciones del primer trimestre de 2018 para identificar eventos para calibrar el modelo. Se seleccionó como punto de calibración la estación hidrométrica “El Abra” que registra el nivel del agua en ese punto cada 15 minutos. Se comparó el volumen en metros cúbicos generado por la simulación del evento con el volumen estimado por los registros de nivel y medición de caudal obteniendo una diferencia del 9% respecto al caudal estimado, lo cual es aceptable. Actualmente el modelo calibrado puede simular los hidrogramas de las sub-cuencas para determinar la variabilidad de las respuestas hidrológicas en la cuenca Maylanco. Este modelo puede ser utilizado para realizar pronósticos de tormentas futuras y determinar franjas de seguridad para ser considerados con los planes de uso de suelo en la zona.

**Palabras Clave:** Cuenca Maylanco, Sacaba, Río Rocha, HEC-HMS, Modelo Hidrológico.

#### ABSTRACT

The hydrologic modeling of basins is a critical need in regions that have problems with water supply and water resources planning such as the case of Rocha river basin. Maylanco basin is one of the most important basins of Rocha river basin. Within Maylanco basin, the municipality of Sacaba is located, the urban zone is growing rapidly. On this study we set-up the model of Maylanco basin using the software HEC-HMS which is used to model storms, maximum flows in a specific period of time. We gathered data of the study area such as precipitation from 1980 to 2016, digital elevation models and thematic maps. We analyzed and classified the spatial data to obtain additional information needed as input to the model. We established return periods of 25, 50, 75 and 100 years to run the HEC-HMS to obtain maximum river discharge within the basin. We carried out monitoring campaigns of river discharge within the river network to be compared simulated values. Furthermore, we used records from rain gauge stations recently installed and analyzed the rain data for the first three months of 2018. These data was used to calibrate model's parameters. We selected as a control point the rain station “El Abra” that records water level every 15 minutes. We compared the accumulated river discharge simulated by the model against the estimated volume using the records of water level and flow measurement, obtaining a difference on 9%. Currently the calibrated model can simulate the hydrographs of the sub-basins to determinate de variability of hydrologic responses within Maylanco basin. This model can be used to predict future storms and propose flooding countermeasures to be considered for future land use plans.

**Keywords:** Maylanco Basin, Sacaba, Río Rocha, HEC-HMS, Hydrologic Model.

#### 1. INTRODUCCIÓN

Las cuencas en países en vías de desarrollo como es el caso de Bolivia tienen varios problemas como ser: la explotación desmesurada de los recursos que disminuye la cantidad de agua disponible, impermeabilización del suelo y destrucción de zonas naturales. A su vez la contaminación en ríos limita la utilización de agua imposibilitando su uso para riego.

El curso principal del Río Rocha se inicia en el Municipio de Sacaba, pasando por Cochabamba, Colcapirhua, Quillacollo, Vinto y Sipe Sipe. El área de aporte al río está conformada por: El Valle de Sacaba, el Valle Cercado y el Valle Bajo. Las nacientes de la cuenca del río Rocha se encuentran al este y son constituidas por las quebradas Tutimayu y Jatun Pajcha en las proximidades de Sacaba, la salida de la cuenca se encuentra al suroeste en el puente del ferrocarril en Parotani. La cuenca del río Rocha abarca una superficie total de 1616 Km<sup>2</sup>, observando que las zonas de

aporte de la zona norte inician en un sector montañoso con pendiente elevada que va disminuyendo en la medida en que se aproximan al río Rocha, los aportes de la zona sur provienen de una región con menor pendiente [1].

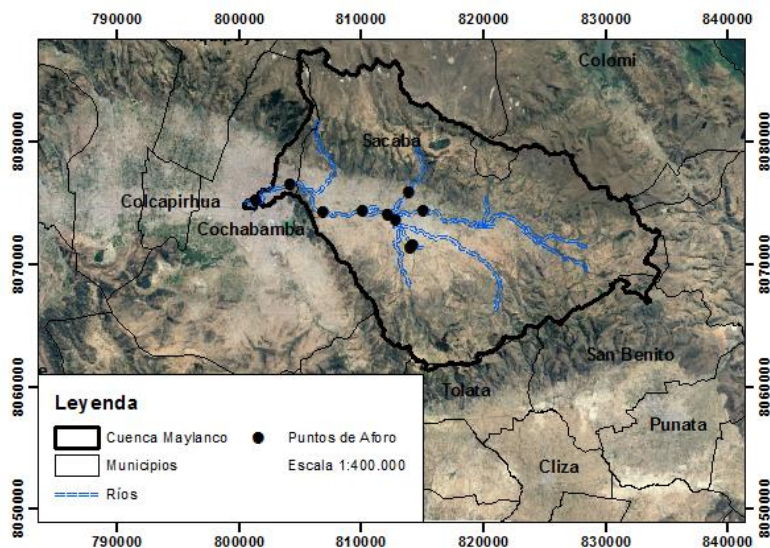
Hasta mediados del siglo pasado, el Río Rocha y sus playas ofrecían un espacio de esparcimiento para la población, integrado a la ciudad. Sin embargo, con el crecimiento urbano de años posteriores, la presión sobre el río aumentó considerablemente. El rápido desarrollo urbano ha incrementado la ocupación del territorio, la actividad industrial y la demanda por el recurso agua, provocando el incremento de diferentes procesos de degradación ambiental. Debido a la baja cobertura vegetal y a impedimentos tales como: canales revestidos, cursos de agua modificados; o la impermeabilización de calles con asfalto, limitan los procesos de infiltración natural, situación que está ocasionando la disminución de la recarga acuífera y por ende la disminución de los caudales de agua en las vertientes, quebradas y riachuelos. El acelerado crecimiento poblacional demanda cada vez más agua y es esta población la que genera paralelamente mayor cantidad de aguas residuales, las cuales llegan al Río Rocha sin ser tratadas, por lo cual durante aproximadamente nueve meses el Río Rocha se convierte en la descarga de aguas residuales [2]. Al mismo tiempo el cambio climático durante los últimos años ha ocasionado el incremento de inundaciones y deslizamientos a lo largo del cauce del río. Se estima que la cuenca del río Rocha tiene un área del orden de 49 km<sup>2</sup> bajo riesgo por inundación, en la que se encuentran 13 635 construcciones valoradas en unos 1 031 millones de dólares, cerca de 77 966 personas expuestas y del orden de 2 479 hectáreas de cultivos expuestas con una valoración aproximada de 7 millones de dólares [3]. Actualmente existen diferentes proyectos y leyes que tienen como objetivo prevenir y mitigar inundaciones en la zona como el Plan Director Urbano del Municipio de Sacaba [4].

A la fecha, los valles Alto, central y bajo son las zonas más estudiadas hidrológicamente de la cuenca del Río Rocha, no así la cuenca de Maylanco. En esta cuenca, conformada por casi la totalidad del municipio de Sacaba, no existen estaciones pluviométricas que tengan registros consistentes de precipitación de años pasados. Recientemente se han instalado 3 estaciones nuevas en la cuenca Maylanco que han registrado datos de precipitación desde diciembre de 2017 hasta la fecha. La información recolectada por estas estaciones será de gran utilidad para estudios e investigaciones de la zona, como también para el desarrollo de los proyectos planteados en el “Plan Director del Río Rocha” [2].

Para entender los procesos hidrológicos en las sub-cuencas, se requiere una modelación hidrológica por sub-cuenca y que considere el uso actual de suelo. Para corroborar los caudales simulados, campañas de aforo son necesarias por sub-cuenca. El objetivo de este estudio es configurar un modelo hidrológico de la cuenca Maylanco con el HEC-HMS para analizar la respuesta de la cuenca durante eventos del 2018. A su vez se desea determinar la variabilidad de los procesos hidrológicos por sub-cuenca con mediciones de caudal.

## 2. AREA DE ESTUDIO

La Cuenca del Río Rocha es una de las cuencas más importantes del departamento de Cochabamba. En ella habitan aproximadamente el 76% de la población del departamento, con una superficie de 3 655 km<sup>2</sup>. La cuenca incluye 24 municipios del Departamento de Cochabamba con alrededor de 1 310 908 habitantes [5]. El río Rocha recorre los Valles de Sacaba, Cercado, Bajo y Alto. A su vez, la cuenca de Maylanco tiene un área de 450 km<sup>2</sup>, dentro de ella está ubicada la mayor parte del municipio de Sacaba, tiene una población de 172 466 habitantes [5]. Es la subcuenca del río Rocha que posee mayor longitud de tramo de río. En la Figura 1 se presenta el área de estudio.



**Figura 1:** Área de estudio.

Fuente: Elaboración Propia sobre Google Earth y Mapa de Municipios de GeoBolivia

La principal contribución del río Rocha fue la agricultura de la región, tanto por sus aguas de riego, como por los fértiles sedimentos que dejaban sus periódicos desbordes. Asimismo, era fuente de recreación y esparcimiento de los ciudadanos. Las características morfológicas de la cuenca, la remoción de la cobertura vegetal y malas prácticas de producción, han causado un incremento en el agua superficial o de escorrentía ocasionando de esta manera inundaciones que han significado severos daños, traducidos en la pérdida de suelos, viviendas e infraestructura social y productiva, así como de servicios [2].

El suelo de la zona está compuesto por areniscas, limolitas cuarcitas y depósitos aluviales en su mayoría. En cuanto a su uso de suelos, predomina una vegetación dispersa vivaz, matorral pajonal andino, agricultura múltiple, y en menor medida estructura urbana y rural. El paisaje está modificado e intervenido por intensas áreas de cultivo y pastoreo.

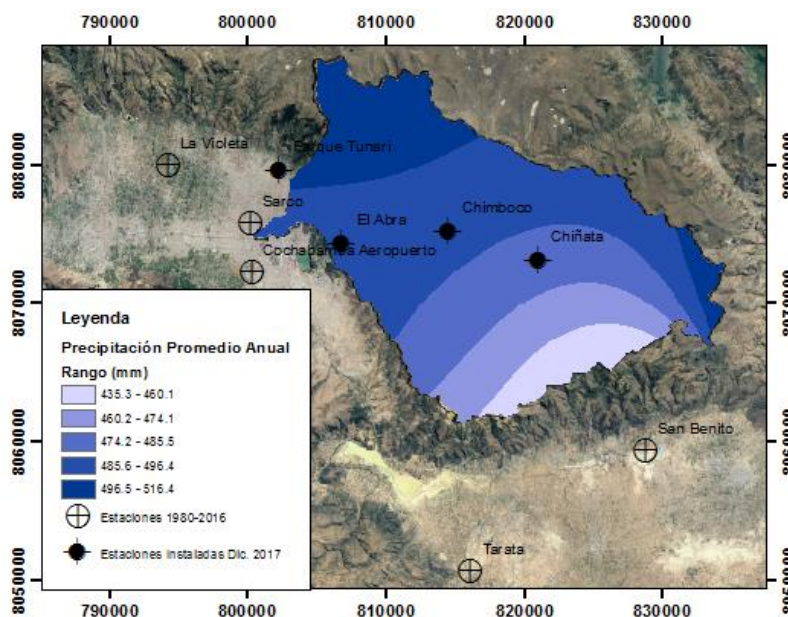
En cuanto a la elevación, el punto más alto de la zona se encuentra a 4509 msnm y el punto más bajo se encuentra a 2553 msnm. El río principal de la cuenca, el río Maylanco Figura 2, tiene una longitud de 37.1 km y presenta una pendiente de 2% desde el inicio del río a la salida de la cuenca.



**Figura 2:** Río Maylanco, Coordenadas UTM, Longitud 806792 y Latitud 8074274.

Fuente: Elaboración propia.

La Cuenca Maylanco presenta una precipitación media anual de 458 mm. La distribución de la precipitación no es uniforme, en la zona norte en el área del Parque Nacional Tunari, siendo la precipitación media anual máxima de la zona de 516 mm que va disminuyendo en profundidad en la parte sur, siendo la mínima de 435 mm. En la Figura 3 se muestra la precipitación promedio anual de la cuenca.

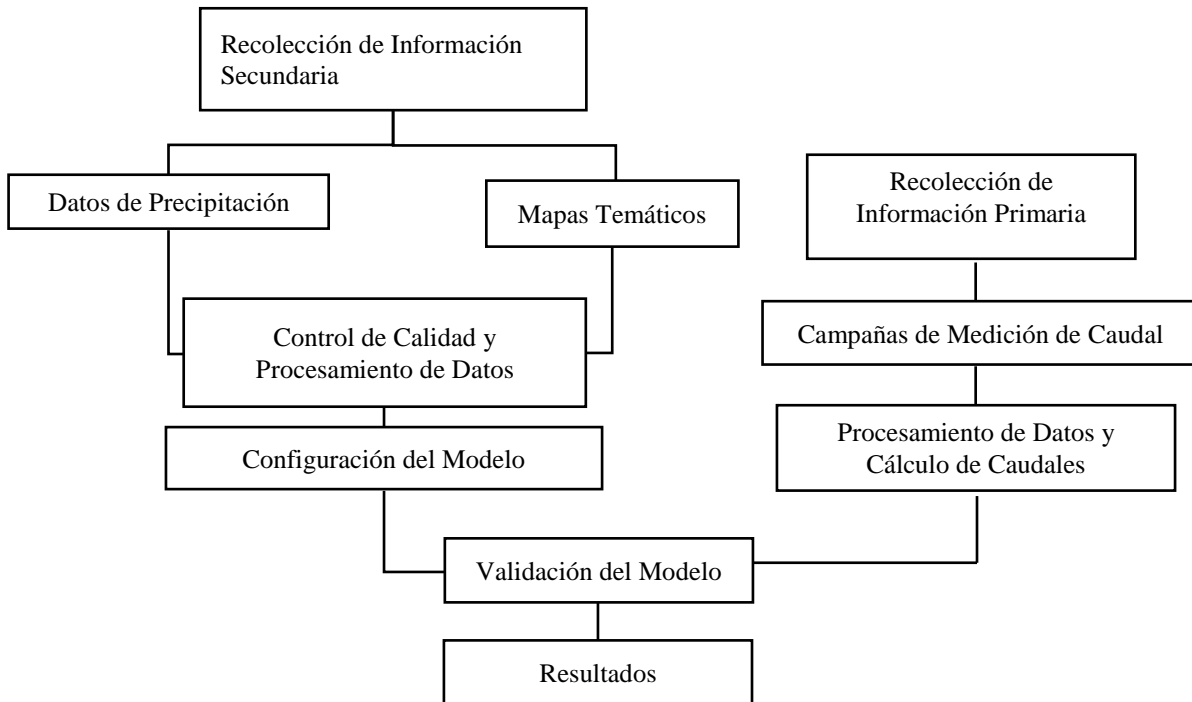


**Figura 3:** Precipitación Media Anual de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración Propia.

### 3. METODOLOGÍA

Se realizó una recolección de datos primarios y secundarios. Para los datos secundarios se seleccionaron las estaciones pluviométricas que aportan a la cuenca de estudio, y se obtuvieron sus datos de precipitación formateados para ingresar al modelo. Se procesó esta información para obtener curvas IDF y hietogramas para periodos de retorno específicos. Se consiguió modelos de elevación digital y mapas temáticos. Con los mapas temáticos y modelos de elevación digital se obtuvieron tiempos de concentración y lag time. Utilizando estos datos obtenidos se configuró el modelo. En cuanto a la recolección de información primaria se realizaron campañas de medición de caudales en puntos específicos de la zona de estudio utilizando un molinete que mide las velocidades del flujo, procesando estas velocidades se pudo obtener el caudal del lugar. Para calibrar el modelo se comparó el volumen de agua generado por un evento en un punto específico de la zona de estudio con el volumen estimado mediante nivel de agua monitoreados. Una vez calibrado el modelo se ejecutó la simulación para precipitación máxima. Finalmente se obtuvieron los resultados y se procedió a analizarlos. La Figura 4 presenta un flujograma del proceso de elaboración del modelo.



**Figura 4:** Flujograma del proceso de modelado.

Fuente: Elaboración Propia.

#### 3.1 Configuración del Modelo con HEC-HMS

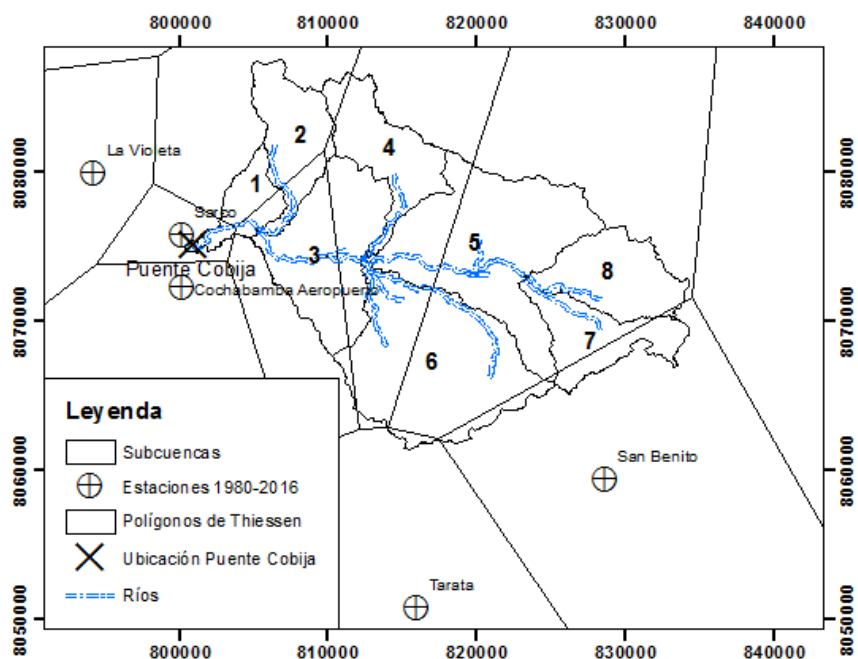
Un modelo de sistema hidrológico es una aproximación al sistema real; sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conecta estas variables [6]. En otras palabras, un modelo hidrológico es una simulación de la realidad, de los procesos y eventos hidrológicos que suceden y transcurren en un determinado espacio, en este caso una cuenca. Desde sus inicios los modelos desempeñan un papel importante en muchas áreas de la hidrología. Por ejemplo, su aplicación es común en la previsión de la alarma temprana de riesgos de avenidas e inundaciones, la gestión y planificación de cuencas en la agricultura, en el diseño de infraestructuras como plantas de tratamiento de agua, pantanos y presas, los estudios de impacto del cambio climático, etc. [7]

El HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center’s Hydrologic Modeling System) es un programa de simulación hidrológica por eventos, lineal y semi-distribuido, desarrollado para estimar las hidrogramas de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos al pico) a partir de condiciones extremas de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa [8].

#### 3.2 División de la Cuenca de Estudio

Para tener un mejor control de la zona de estudio, se dividió la cuenca de Mayalanco en sub-cuencas porque cada subcuenca tiene sus propias características y variables que deben ser tomadas en cuenta.

Mediante el Software ArcGIS se realizó la subdivisión de la cuenca en 8 sub-cuencas utilizando una codificación propia. Las cuencas impares son aquellas por donde fluye el tramo principal del río, mientras que las cuencas pares son aquellas que aportan al río. En la Figura 5 se observa la subdivisión de la cuenca, se observa que las 5 y 6 son las subcuencas más extensas.



**Figura 5:** Sub-cuencas y áreas de influencia de las estaciones pluviométricas.

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.3 Datos de Precipitación

Se contó con información de distintas estaciones pluviométricas del departamento de Cochabamba, que corresponde a precipitaciones diarias desde 1980 a 2016. Debe resaltarse que la cuenca Maylanco no posee estaciones dentro de su territorio con un tiempo de registro de precipitación suficiente para ser utilizadas en la configuración del modelo.

Se analizaron 9 estaciones que son las más próximas a la cuenca de Estudio. Utilizando polígonos de Thiessen se encontró el área de influencia de cada estación y se seleccionaron aquellas que aportan a la cuenca de estudio. Se escogieron 5 estaciones para la configuración del modelo. Las 5 estaciones seleccionadas fueron las estaciones de: Sarco, La Tamborada, San Benito, Tarata y Sacabambilla Baja. Ver Figura 5.

Se puede observar que las subcuencas son influenciadas por 2 o más estaciones. La Tabla 1 presenta el área de influencia de cada estación respecto a cada subcuenca.

**TABLA 1 - ÁREA DE INFLUENCIA DE ESTACIONES**

Estación	Área de Influencia en Sub-cuencas (Km <sup>2</sup> )							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Sarco	18.78	37.08	21.13	30.36	-	-	-	-
La Tamborada	-	-	46.4	10.4	47.61	57.77	-	-
San Benito	-	-	-	-	57.15	43.64	33.37	33.7
Tarata	-	-	-	-	-	3.56	-	-
Sacabambilla Baja	-	-	-	-	-	-	1.46	7.29

Fuente: Elaboración Propia.

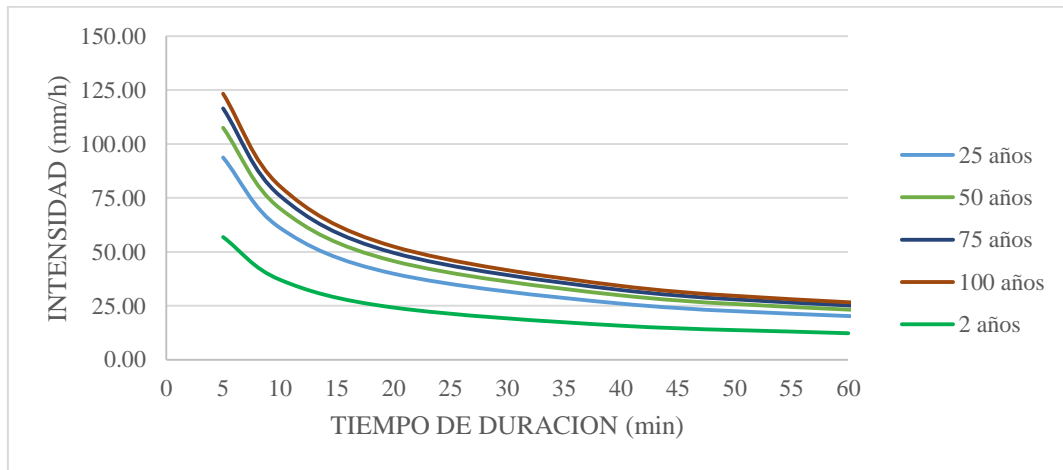
La preparación de los datos de precipitación es la variable más importante para estudios hidrológicos. La forma más común de hacerlo es utilizar una tormenta de diseño o un evento que involucre una relación entre la intensidad de lluvia (o profundidad), la duración y las frecuencias o periodos de retorno de diseño. Una vez seleccionadas las estaciones que se utilizaron para la configuración del modelo, se obtuvo las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) para cada una de las estaciones pluviométricas.

Se deben obtener curvas IDF para cada subcuenca que esté influenciada por 2 o más estaciones. Para ello se calculó nuevos valores de precipitaciones como si cada subcuenca tuviera su propia estación. Los nuevos valores de precipitación se obtuvieron con la siguiente fórmula:

$$P = \frac{\sum p_i A_i}{\sum A_i} \tag{1}$$

donde  $P$ : Precipitación final,  $p_i$ : precipitación que aporta la estación  $i$ ,  $A_i$ : Área de influencia de la estación  $i$ .

Las curvas IDF se calcularon par periodos de retorno de 2, 25, 50, 75 y 100. Se puede observar la gráfica las curvas IDF para la estación de Sarco en la Figura 6.



**Figura 6:** Curvas IDF para la estación de Sarco para diferentes periodos de retorno.

Fuente: Elaboración Propia.

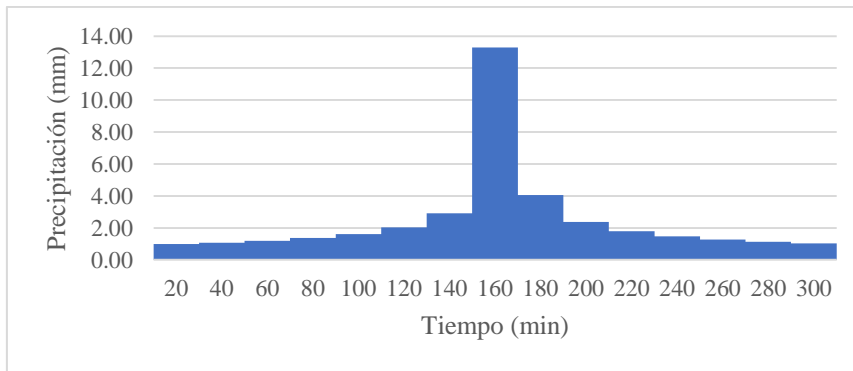
Se procedió a la elaboración de hietogramas para cada una de las curvas IDF. Un hietograma es un gráfico que expresa precipitación en función de tiempo. Un hietograma se refiere a un día o a una tormenta concreta, específicamente las horas que duró la tormenta.

Para la modelación de la cuenca, los hietogramas se realizaron con intervalos de tiempo de 20 minutos para una duración de 300 minutos, es decir 5 horas. La Tabla 2 expone el hietograma de la estación de Sarco para un periodo de retorno de 25 años y la Figura 7 presenta visualmente los valores del hietograma para el mismo periodo de tiempo.

**TABLA 2 - HIETOGRAMA DE PRECIPITACIONES DE SARCO PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS**

Periodo de retorno		25	años	
Intervalo de tiempo		20	min	
t min	Intensidad mm/h	Precipitación mm	$\Delta$ Precipitación mm	Hietograma mm
20	39.87	13.29	13.29	0.98
40	26.01	17.34	4.05	1.08
60	20.26	20.26	2.92	1.20
80	16.97	22.62	2.36	1.36
100	14.79	24.64	2.02	1.61
120	13.21	26.43	1.79	2.02
140	12.02	28.04	1.61	2.92
160	11.07	29.51	1.47	13.29
180	10.29	30.88	1.36	4.05
200	9.64	32.15	1.27	2.36
220	9.09	33.35	1.20	1.79
240	8.62	34.48	1.13	1.47
260	8.20	35.55	1.08	1.27
280	7.84	36.58	1.03	1.13
300	7.51	37.56	0.98	1.03

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 7:** Hietograma de precipitaciones de Sarco para un Periodo de Retorno de 25 años.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Los valores de precipitación de los hietogramas son los valores de la tormenta de diseño que se introdujeron en HEC-HMS para su modelación.

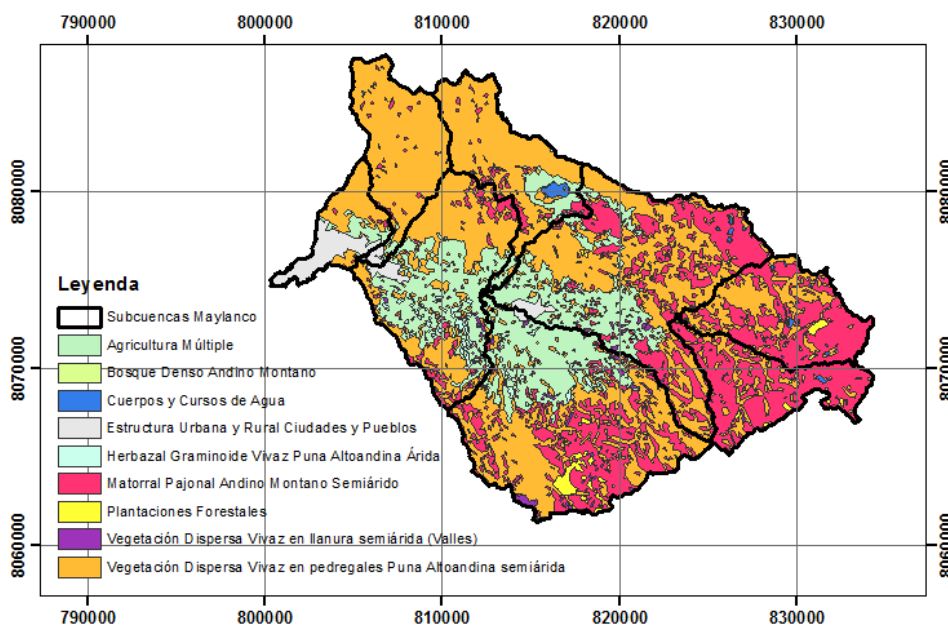
### 3.4 Mapas Temáticos

Se deben calcular distintos parámetros para la modelación de la cuenca. Para ellos son necesarios mapas temáticos que nos brindan información de las características de la zona. En este modelo se utilizaron 2 mapas temáticos. Un mapa de tipo de suelos y un mapa de uso de suelos.

El mapa de tipo de suelos se obtuvo de la página web de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Este mapa es un documento con información sobre el tipo de suelos de todo el territorio boliviano. En cuanto al mapa de uso de suelos se utilizó el mapa COBUSO 2010, un mapa muy detallado del uso de suelos de Bolivia. Utilizando ArcGIS se realizó un recorte de los mapas sobre la zona de estudio y se hizo un análisis de sus características.

En la Figura 9 se tiene se muestra el mapa de uso de suelos utilizado. Al ser un mapa bien detallado, se debe clasificar el área de cada uso de suelos abarca sobre cada subcuenca, puesto que esa información es fundamental para la obtención de ciertos parámetros.

En la Tabla 3 se muestran el área que ocupa cada uso de suelos en cada subcuenca. Se puede apreciar que la vegetación dispersa vivaz en pedregales y en llanura es la más representativa, seguida de matorral andino y en tercer lugar la agricultura múltiple. La Figura 8 presenta el mapa de uso de suelos donde se puede apreciar que la vegetación dispersa y matorral pajonal son las dos clases más dominantes. La Tabla 3 contiene el área que ocupa cada tipo de uso de suelos respecto a cada subcuenca.



**Figura 8:** Mapa de Uso de Suelos

**Fuente:** [9]

TABLA 3 - ÁREA DE CADA TIPO DE USO DE SUELO

Descripción	Área por Cuenca (Km <sup>2</sup> )							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Vegetación Dispersa Vivaz en Pedregales y en Llanura	8.62	33.86	30.91	30.71	44.28	47.99	6.62	14.96
Matorral Pajonal Andino	0.32	1.53	8.91	3.83	34.96	28.65	27.53	25.23
Agricultura Múltiple	2.40	0.89	26.23	6.22	23.89	25.38	-	-
Estructura Urbana y Rural Ciudades y Pueblos	7.45	0.80	1.48	-	1.42	0.43	-	-
Plantaciones Forestales	-	-	-	-	0.21	2.52	0.68	0.80
<b>Total</b>	<b>18.78</b>	<b>37.08</b>	<b>67.53</b>	<b>40.76</b>	<b>104.75</b>	<b>104.97</b>	<b>34.83</b>	<b>40.99</b>

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.5 Número de Curva

El número de curva (CN) es un parámetro empírico que se calcula con el método desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los EEUU. Se representa mediante un número adimensional, en curvas estandarizadas, las que varían entre 0 y 100, donde un área con CN igual a 1 significa que toda la precipitación se infiltra y una zona con CN igual a 100 es impermeable [6].

Para obtener estos números de curva se debe emplear tablas estandarizadas. Según el método simplificado de Ponce y Hawkins, el CN se puede determinar empleando solamente la información del uso de suelo y del tipo de suelo. Cada sub-cuenca posee distintos usos de suelo, por lo tanto, se debe calcular un número de curva ponderado para cada subcuenca según el área que más abarca cada uso de suelo.

$$CN = \frac{\sum Cn_i A_i}{\sum A_i} \quad (2)$$

donde  $CN$ : número de curva ponderado,  $Cn_i$ : número de curva del tipo de uso de suelos  $i$ ,  $A_i$ : Área que ocupa la clase de uso de suelos  $i$ .

Los resultados para el número de curva de cada subcuenca fueron los presentados en la Tabla 4. Se observa que las subcuencas que más se encuentran al Este tienen números de curva similares y más altos, por lo tanto, se deduce que es una zona de poca infiltración de agua. Se presenta los valores del número de curva para cada sub-cuenca en la Tabla 4.

TABLA 4 - NÚMERO DE CURVA PONDERADO PARA CADA SUBCUENCA

Sub-cuenca	CN Ponderado
1	73
2	80
3	75
4	81
5	83
6	83
7	84
8	83

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.6 Tiempo de Concentración

El tiempo de concentración de una cuenca, se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida. Está determinado por el tiempo que tarda llegar a la salida de cuenca el punto hidrológico más alejado. Es el momento en el que el caudal se considera constante.

Se obtuvo el tiempo de concentración para cada subcuenca con datos de longitud de tramo de río y pendiente con la ecuación de Kirpich (3).



$$T_c = 0.66 \left(\frac{L}{S}\right)^{0.77} \quad (3)$$

donde  $T_c$ : tiempo de concentración,  $L$ : longitud de tramo del río,  $S$ : pendiente en m/m.

De esta manera se obtuvieron los siguientes tiempos de concentración en horas de la Tabla 5.

**TABLA 5 - TIEMPO DE CONCENTRACIÓN PARA CADA SUBCUENCA**

	Sub-cuencas							
	1	2	3	4	5	6	7	8
TC (Hr)	1.97	0.87	2.65	0.83	2.29	2.20	0.92	0.82

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.7 Lag Time

En el método de SCS para transformar la precipitación neta en caudal se nos solicita introducir el *lag* en minutos. Según este método, el *lag* (tiempo que transcurre desde el centro de gravedad de la precipitación neta hasta la punta del hidrograma) es de aproximadamente 0.6 del tiempo de concentración, (4).

$$Lag = 0.6 T_c \quad (4)$$

donde  $T_c$ : tiempo de concentración.

De esta manera se obtuvieron los siguientes tiempos de retraso en horas, Tabla 6.

**TABLA 6 - LAG PARA CADA SUBCUENCA**

	Sub-cuencas							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Lag (Hr)	1.18	0.52	1.59	0.50	1.38	1.32	0.55	0.54

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.8 Puntos de Aforo

Se realizó una medición de caudales en diferentes puntos de la zona de estudio para comparar la información con los caudales simulados por el modelo y posteriormente calibrar el modelo para que se aproxime más a la realidad.

Los puntos de aforo fueron seleccionados bajo criterios de distancia, accesibilidad y confluencia de ríos. Se realizaron mediciones a lo largo de enero, febrero y principios del mes de marzo utilizando un caudalímetro que mide la velocidad del río. Con estos datos de velocidad de flujo y las medidas de sección del río se obtiene el caudal para cada punto.

Los aforos con molinete en las campañas sirvieron para convertir los niveles de agua monitoreados en caudal. En la Tabla 7, se muestra la ubicación de los puntos de aforo.

**TABLA 7 - UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE AFORO EN COORDENADAS UTM**

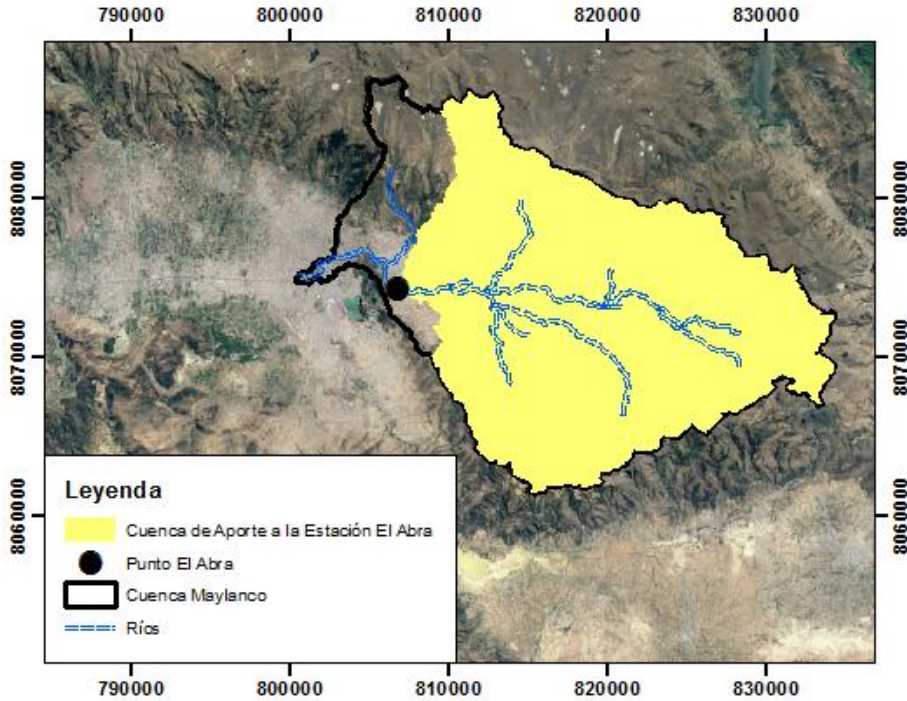
Punto	Longitud	Latitud
1	801230	8075244
2	804040	8076552
3	810076	8074384
4	812032	8074150
5	812697	8073669
6	813833	8075949
7	814956	8074435
8	814110	8071624
9	813907	8071410
10	806792	8074274

Fuente: Elaboración Propia.

**3.8 Método de Calibración**

Para calibrar el modelo se compararon los volúmenes simulados en un determinado punto, con caudales reales del mismo punto. Se tenía la medición de caudales de 3 días seguidos a la misma hora en la ubicación donde se encuentra la estación pluviométrica “El Abra”. También se tenía los datos de nivel de agua de ese punto de todos los días del año con intervalos de 15 minutos.

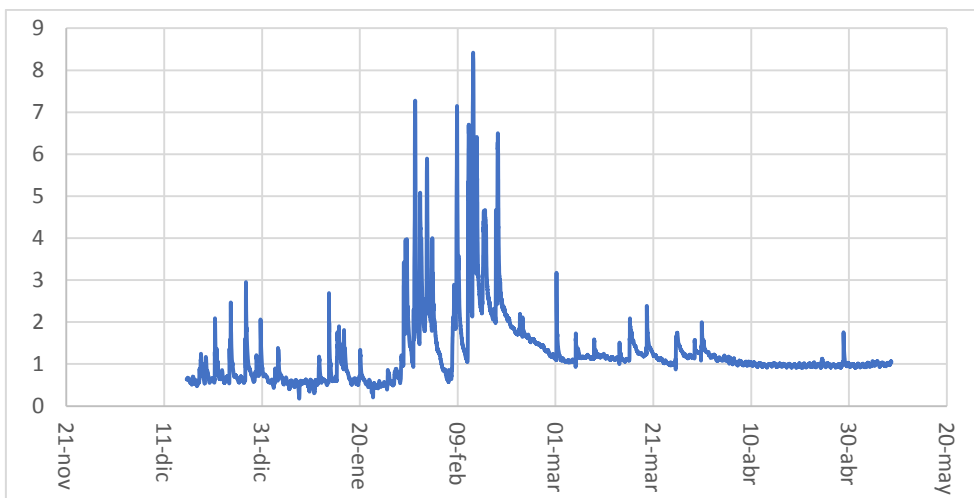
Se estableció que para un nivel de agua de 52 cm en el punto “El Abra” se tiene un caudal de 1.56 m<sup>3</sup>/s de acuerdo a caudales medidos en la zona de estudio. Con esta relación se pudo transformar los niveles del agua observados en este punto en caudal y eventualmente en volúmenes. La Figura 9 muestra la cuenca de aporte para la estación de El Abra.



**Figura 9:** Cuenca de aporte a la estación El Abra.

Fuente: Elaboración Propia.

Para identificar el evento para calibrar el modelo se analizó el hidrograma de caudales de la estación “El Abra” desde diciembre de 2017 a principios de mayo de 2018, los cuales puede ser observados en la en la Figura 10.

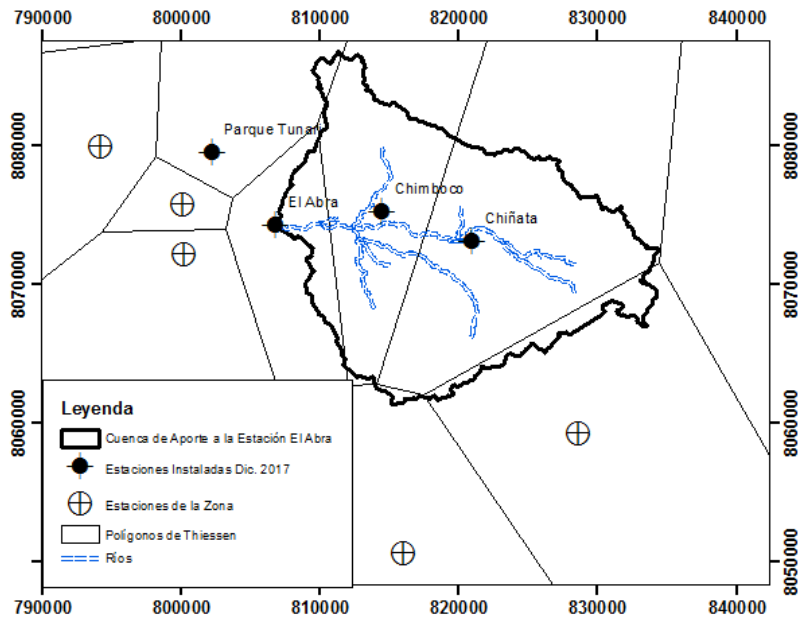


**Figura 10:** Caudales de El Abra de diciembre de 2017 a abril de 2018.

Fuente: Elaboración Propia.

▪ **Evento para Calibración**

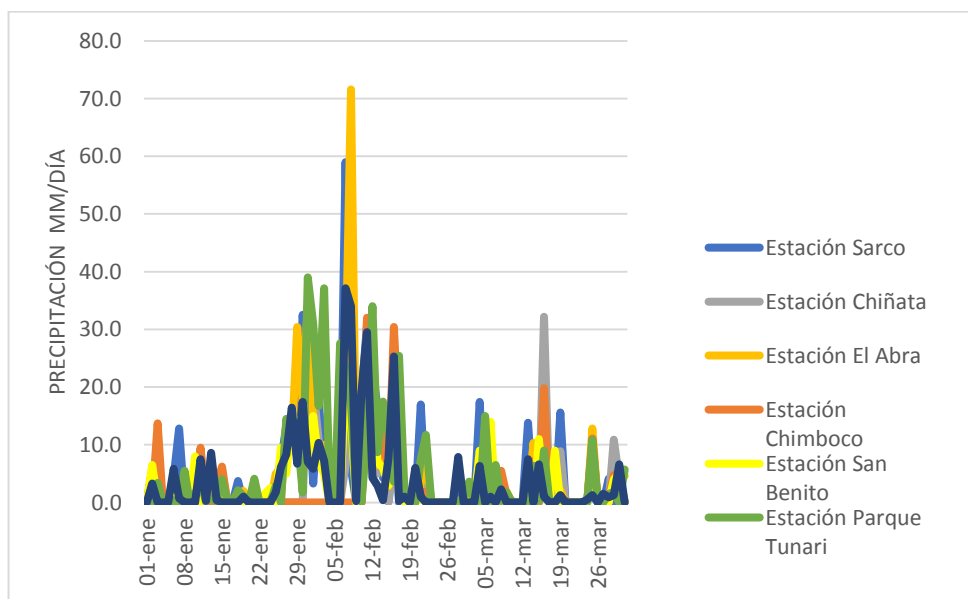
Para calibrar el modelo de la cuenca se deben utilizar precipitaciones de un día en el que haya habido un evento. Con este propósito se seleccionaron estaciones pluviométricas para utilizar sus precipitaciones registradas. Las estaciones debían poseer datos de precipitación del primer trimestre de 2018. Las estaciones seleccionadas fueron: Parque Tunari, El Abra, Chimboco, Chiñata, San Benito y Tarata. Utilizando Polígonos de Thiessen se encontró el área de Influencia de cada estación. La Figura 11 presenta el área de influencia para de las estaciones instaladas en 2017 cuyos datos serán utilizados para la calibración.



**Figura 11:** Áreas de influencia de estaciones pluviométricas instaladas en diciembre 2017.

Fuente: Elaboración Propia.

Posteriormente se recopiló la información de precipitación de las estaciones pluviométricas. Usando un gráfico comparativo de las precipitaciones de cada estación, se analizaron los eventos y se seleccionaron días adecuados en los que hubo evento y que a la vez se haya registrado datos de precipitación del evento por parte de las estaciones pluviométricas. En la Figura 12 se puede observar las precipitaciones registradas en las estaciones de calibración desde enero a marzo de 2018.

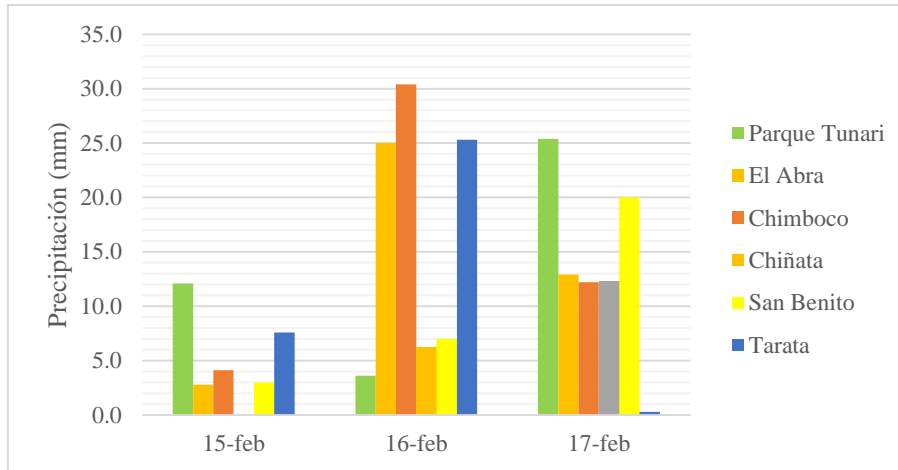


**Figura 12:** Precipitación de estaciones de calibración para el 1er Trimestre de 2018.

Fuente: Elaboración Propia.

Se encontró que las precipitaciones del día 16 y 17 de febrero son altas y que todas las estaciones tienen datos de precipitación de esos días. Por este motivo, las precipitaciones de este periodo de tiempo son las más adecuadas para realizar la validación.

En el modelo se estableció una tormenta de 72 horas de duración que inicia el día 15 de febrero a las 00:00 horas debido a que ese día comienza a llover con precipitaciones pequeñas. La tormenta termina el 18 de febrero a las 00:00 horas. Se introdujo en el modelo las precipitaciones de cada día en periodos uniformes de 15 minutos y se establecieron intervalos de control igualmente de 15 minutos debido a que los niveles medidos en la estación “El Abra” se encuentran registrados cada 15 minutos. En la Figura 13 se presenta la precipitación diaria de cada estación de los días 15, 16 y 17 de febrero.



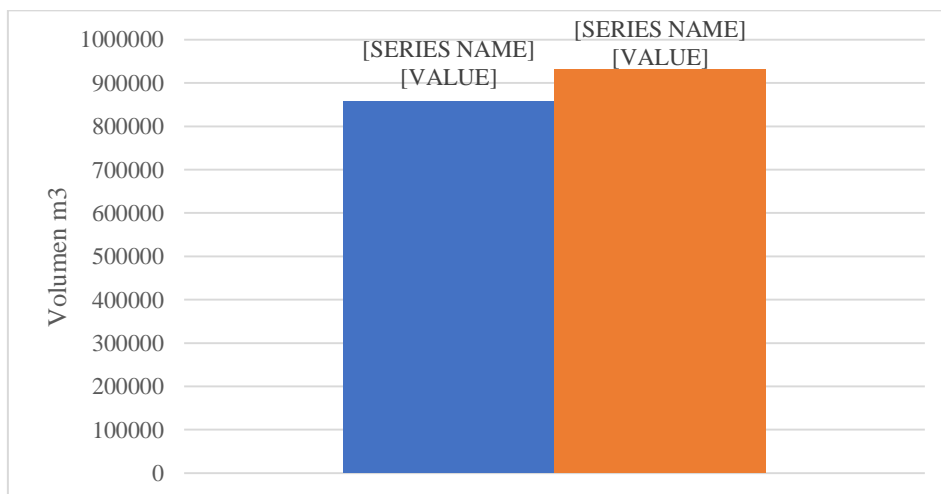
**Figura 13:** Precipitación diaria de estaciones del 15-17 de febrero.

Fuente: Elaboración Propia.

Se obtuvo que el volumen simulado de agua en el punto “El Abra” es de 857 000 m<sup>3</sup>, mientras que en el volumen estimado en el punto de la estación “El Abra” fue de 932 000 m<sup>3</sup>, Figura 15. Se observó que los volúmenes observados e integrados se aproximan a los observados con una diferencia del 9%.

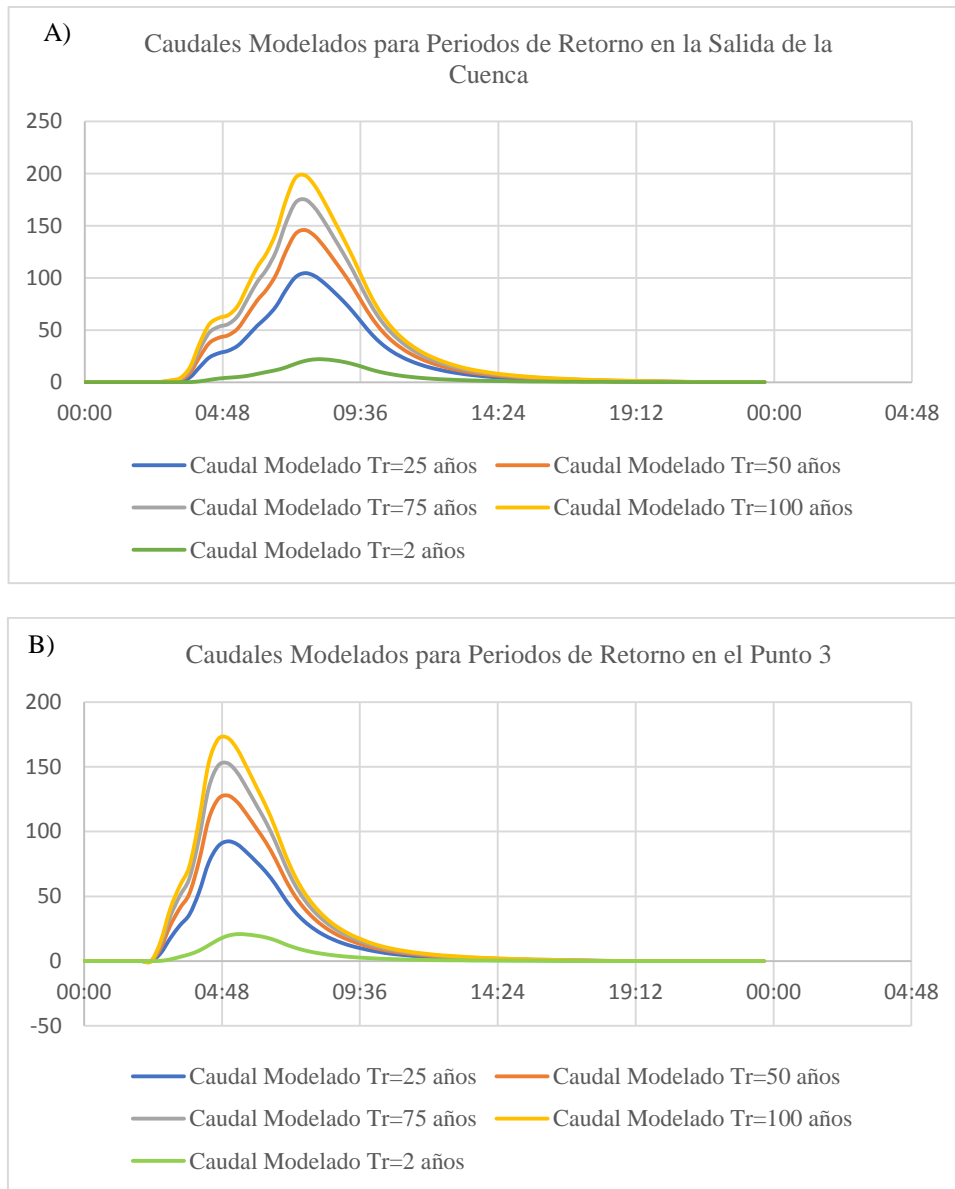
#### 4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En esta sección se explican los resultados obtenidos con la ejecución del modelo HEC-HMS. Los primeros resultados obtenidos fueron los caudales de salida de la cuenca para precipitaciones máximas con periodos de retorno de 2, 25, 50, 75 y 100 años. En la figura 14 se observan los volúmenes de caudal simulado y el estimado y en la Figura 15 se visualizan los caudales máximos para cada periodo de retorno en la salida de la cuenca y el punto “El Abra”.



**Figura 14:** Volumen Simulado y Volumen Estimado en la estación “El Abra”.

Fuente: Elaboración Propia.



**Figura 15:** A) Hidrograma para Caudal de Salida de la Cuenca, B) Hidrograma para el Caudal del Punto “El Abra”.  
Fuente: Elaboración Propia.

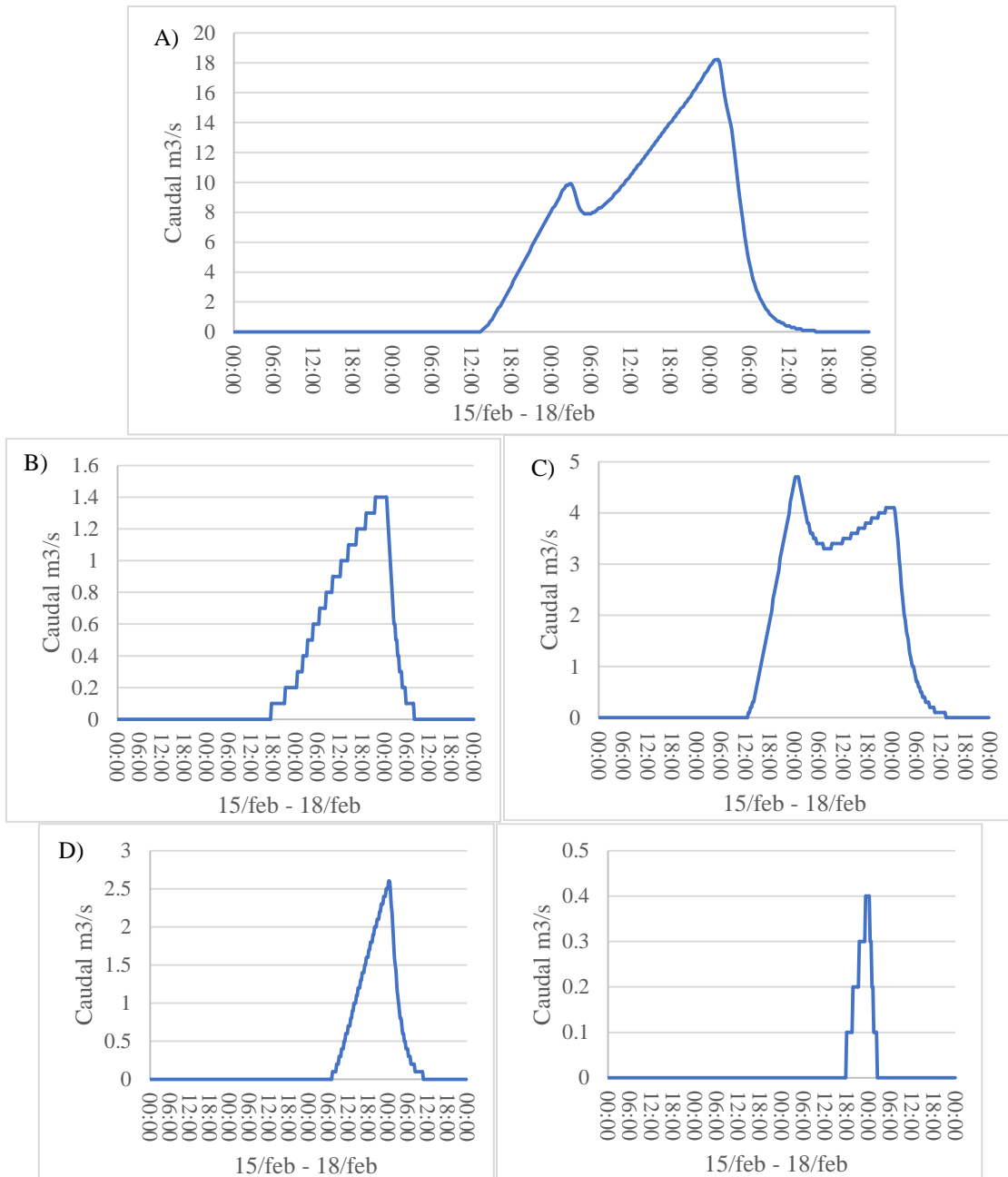
Se observa que la diferencia de volúmenes es de 9%, lo cual es aceptable. También se observa que los caudales pico tiene lugar a las 05:00 horas y va disminuyendo hasta llegar 0 a las 15:20 horas. En la Tabla 8 se muestra los caudales máximos de la cuenca para los diferentes periodos de retorno.

**TABLA 8 - CAUDALES PICO**

Caudal Modelado (m <sup>3</sup> /s)					
	2 años	25 años	50 años	75 años	100 años
Salida de la Cuenca	21.9	100.6	142.1	172	195.9
El Abra	20.8	92.4	122.7	152.7	172.3

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 16 se muestran los hidrogramas simulados para la tormenta del 15 al 18 de febrero del 2018 para las subcuencas principales del río.



**Figura 16:** Hidrogramas simulados a la salida de la cuenca Maylanco, panel (A); subcuenca 1, panel (B); subcuenca 3, panel (C); subcuenca 5, panel (D) y subcuenca 7, panel (E).

Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 9 se observa el comportamiento de las subcuencas que atraviesan el curso principal del río Maylanco para el evento del 15 al 17 de febrero. Aunque la subcuenca 6 es la más extensa, el mayor caudal se ha generado en la subcuenca 4 debido a las altas precipitaciones el 16 de Febrero del 2018.

**TABLA 9 – COMPORTAMIENTO DE LAS SUB-CUENCAS QUE ATRAVIESAN EL CURSO PRINCIPAL DEL RÍO MAYLANCO PARA EL EVENTO DEL 15 AL 17 DE FEBRERO DE 2018**

Sub-Cuenca	1	2	3	4	5	6	7	8
Área	18.78	37.08	67.53	40.76	104.75	104.97	34.83	40.99
Precipitación 15 de Febrero	9.41	10.09	3.37	4.00	1.04	1.76	1.28	0.03
Precipitación 16 de Febrero	11.87	8.42	27.36	29.98	12.31	15.17	6.54	6.21
Precipitación 17 de Febrero	17.88	22.64	12.59	12.25	12.27	12.50	12.38	15.58
Caudal Pico	1.4	4	4.1	2.7	2.6	3.7	2.6	0.8

Fuente: Elaboración Propia.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha empleado la información de los pluviómetros de la zona de estudio para obtener áreas de influencias de éstas y hietogramas de precipitaciones máximas con periodos de retorno de 2, 25, 50, 75 y 100 años. Además del modelo de elevación digital, se han preparado mapas temáticos (uso de suelo y textura) se ha encontrado que la vegetación dispersa y matorral pajonal son las dos clases más dominantes. Para estimar las abstracciones en la cuenca se han utilizado números de curva. Una vez configurado el modelo HEC-HMS para la cuenca Maylanco, se logró convertir las precipitaciones en caudales. Se obtuvo un tiempo de concentración de toda la cuenca de 8 horas.

Para calibrar los parámetros del modelo se comparó el volumen simulado con el volumen estimado (con observaciones de nivel y velocidad) en la estación “El Abra” utilizando las precipitaciones del evento 15 a 17 de febrero de 2018, obteniendo volúmenes aproximados entre sí del 9%, lo cual es aceptable y valida el modelo. Los parámetros asociados al uso de suelo fueron probados para ajustar los volúmenes simulados. Se observó que el modelo es sensible al número de curva. El caudal simulado con un periodo de retorno de 2 años que es de 22 m<sup>3</sup>/s, que se aproxima claramente al caudal reportado en la literatura de 23 m<sup>3</sup>/s. Los resultados de modelación para periodos de retorno de 25, 50, 75 y 100 años se obtuvieron caudales pico en la salida de la cuenca de 100, 142, 172 y 196 m<sup>3</sup>/s respectivamente. Los caudales simulados con periodos de retorno de 25 y 50 años se aproximan con valores reportados; en cambio para un periodo de retorno de 100 años, sobre estima ligeramente, lo cual corrobora nuestros resultados. Actualmente el modelo calibrado puede simular los hidrogramas de las subcuencas para determinar la variabilidad de las respuestas hidrológicas en la cuenca Maylanco. subcuencas 3 y 5 son las que más caudal aportan y se deberían prestar mayor atención en los planes de uso de suelo. Si aumenta las áreas urbanas el número de curva se acerca a 100, lo cual generara mayor caudal y por ende amenaza de inundación.

En el evento 15-18 Febrero del 2018 donde varios municipios en valle de Cochabamba fueron afectados, se observó que el caudal pico simulado para Maylanco alcanzo los 18 m<sup>3</sup>/s, el cual es menor a un periodo de retorno de 2 años. Como efecto de este evento se evidencio aguas abajo del puente de “El Abra” inundaciones temporales de 5 cm. Es decir que es una zona potencialmente inundable y se deberían realizar estudios de modelación hidrodinámica para estimar el área de inundación y sus profundidades con los caudales obtenidos en este estudio. Este modelo puede ser utilizado para realizar pronósticos de tormentas futuras y determinar franjas de seguridad para ser considerados con los planes de uso de suelo en la zona.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a SENAMHI por compartir sus datos de precipitaciones y nivel de agua de la zona de estudio.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Honorable Alcandía Municipal de Cochabamba, «Programa Nacional de Cuencas: Informe Cuenca del Río Rocha».
- [2] Servicio Departamental de Cuencas y Dirección de Planificación y Gestión Integral de Cuencas, «Plan Director de la Cuenca del Río Rocha,» Impresion Quality SRL, La Paz, Bolivia, Cochabamba, 2015.
- [3] I. T. y. C. S.A.S, «Resumen Ejecutivo de Riesgos Rocha,» Cochabamba.
- [4] Honorable Consejo Municipal de Sacaba, «El Plan Director Urbano del Municipio de Sacaba,» 2017.
- [5] Instituto Nacional de Estadística Bolivia, Censo Población y Vivienda 2012, La Paz, 2018.
- [6] D. R. M. L. W. M. Ven Te Chow, Hidrología Aplicada, 1994.
- [7] J. A. Pascual Aguilar, «Guía Práctica Sobre la Modelización Hidrológica y HEC-HMS,» Alcalá de Henares, Parque Científico Tecnológico de la Universidad de Alcalá, 2016.
- [8] US Army Corps of Engineers/Hydrologic Engineering Center, «HEC-HMS,» [En línea]. Available: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>. [Último acceso: 29 Agosto 2017].
- [9] Unidad Técnica Nacional de Información de la Tierra, «GeoBolivia,» Viceministerio de Tierra VT, 2010. [En línea]. Available: <http://geo.gob.bo/download/?w=mddryt&l=CoberturaUso2010>.
- [10] Empresa Mísicuni, «Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental - Proyecto Mísicuni Fase I,» Cochabamba - Bolivia, 2009.