

Generación de precipitaciones y caudales de máximas avenidas para las cuencas del río Biabo

 Abel Carmona^{*1}, Douglas Sarango² y Mario García³

¹ Universidad Privada del Norte, Lima, Perú

² Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

³ Universidad Nacional del Callao, Lima, Perú

Recibido 31 Jul 2021 – Aceptado 30 Nov 2021 – Publicado 16 Dic 2021

Resumen

Este trabajo se enfoca en el cálculo y validación de los parámetros usados para la generación de caudales de máximas avenidas a lo largo de 16 puntos de interés en el cauce principal del río Biabo. Debido a la insuficiente información de mediciones meteorológicas e hidrométricas dentro de la cuenca, se utilizó la información grillada de precipitación diaria de la base de datos PISCO v2.1 del SENAMHI, el modelo de curvas de duración frecuencia del estudio ILLA-SENAMHI-UNI, y el hidrograma unitario de Snyder, y los resultados obtenidos fueron calibrados en base a los registros de caudales máximos de la estación hidrométrica Requena-Biabo. Así, por ejemplo, para la cuenca de la estación Requena-Biabo, la comparación entre los caudales de máximas avenidas generados con los caudales registrados en para diferentes tiempos de retorno, el error obtenido fluctúa entre $\pm 5\%$.

Palabras clave: Precipitación máxima en 24 horas, hidrograma unitario de Snyder, río Biabo.

Generation of precipitations and flow rates from maximum avenues for the basin of the Biabo river

Abstract

This work focuses on the calculation and validation of the parameters used for the generation of flows of maximum avenues along 16 points of interest in the main channel of the Biabo river. Due to insufficient information from meteorological and hydrometric measurements within the basin, the daily precipitation grid information from the PISCO database v2.1 of SENAMHI was used, the model of frequency duration curves from the ILLA-SENAMHI-UNI study, and the Snyder unit hydrograph, and the results obtained were calibrated based on the records of maximum flows from the Requena-Biabo hydrometric station. Thus, for example, for the Requena-Biabo station basin, the comparison between the flows of maximum floods generated with the flows recorded in for different return times, the error obtained fluctuates between $\pm 5\%$.

Keywords: Maximum precipitation in 24 hours, Snyder unit hydrograph, Biabo river.

Introducción

Actualmente se tiene conocimiento que varias ciudades de nuestro país, como Huaraz e Iquitos, generalmente en la sierra y selva son azotadas por fuertes precipitaciones, y como consecuencia de ello, los caudales de los ríos aumentan y muchas veces por falta de medidas de pre-

vención suceden inundaciones que ocasionan cuantiosas pérdidas materiales y de vidas humanas. Este problema es el que se tiene en la cuenca del río Biabo, que pertenece a los distritos de bajo Biabo y Alto Biabo, provincia de Bellavista, departamento de San Martín, tiene un área de 7149 km² y un perímetro de 523 km (Figura 1), donde han ocurrido graves inundaciones en los años 2007, 2009,

*abel.carmona@upn.edu.pe

© Los autores. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



2011 y 2015. Al no poder conocer los valores de los caudales máximos que pudieran venir en la cuenca del río Biabo, no se puede tomar medidas de prevención ante posibles crecidas del caudal en los ríos ni diseñar medidas de contención adecuadas ante estos desastres, que son causa de la destrucción de zonas de cultivo, daño de infraestructuras como puentes, zonas riverseñas, carreteras, altas concentraciones de limo y sedimentos en los ríos.

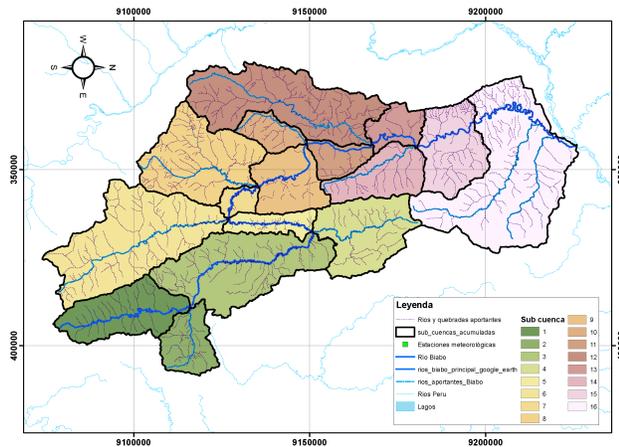


Figura 1: Cuenca río Biabo y sus principales subcuencas.

Por tal motivo es necesario conocer los caudales de máximas avenidas a diferentes tiempos de retorno para las subcuencas del río Biabo y ante la falta de información meteorológica e hidrométrica en diferentes puntos de la cuenca se propone en esta investigación estimar las precipitaciones máximas en 24 horas y caudales de máximas avenidas usando la información grillada de precipitación diaria de la base de datos PISCO v2.1 del SENAMHI y las características morfológicas de las subcuencas del río Biabo de la cuenca del río Marañón (Figura 1) en modelos de precipitación escorrentía.

Revisión de Literatura

Distribución teórica probabilística

Las distribuciones teóricas probabilísticas que más se aplican en hidrología, para la generación de las precipitaciones máximas en 24 horas y caudales máximos de avenidas, son: Distribución Normal o Gaussiana, Distribución Log-Normal de 2 y 3 parámetros, Distribución Gamma de 2 y 3 parámetros, y Distribución de Gumbel. Todas estas distribuciones se encuentran disponibles en el software Hidroesta (<http://innova-civil.blogspot.com/2017/11/descargar-hidroesta-2.html>). Para determinar la mejor distribución teórica de probabilidades que se ajustan a los datos analizados se usó la prueba Kolmogorov-Smirnov [1].

Tiempo de concentración (Tc)

Mendoza (2005) [2], define al tiempo de concentración (T_c) como: El tiempo recorrido por una gota de agua de lluvia que escurre superficialmente desde el lugar más lejano de la cuenca hasta el punto de desfogue. Para la obtención de este parámetro se pueden emplear diferentes fórmulas que se relacionan con otros parámetros morfológicos de la cuenca, como: Método de SCS-Ranser, Método de California Culvert Practice, Método de Kirpich, Método de Témez, Método de Giandotti, Método de Ven te chow, Método de Clark, Método de Ventura-Heron y Método de Passini.

Estimación de caudales máximos utilizando modelo precipitación escorrentía

Los modelos de precipitación escorrentía con fundamento en hidrogramas sintéticos permiten generar los caudales de máximas avenidas para diferentes periodos de retorno usando los parámetros geomorfológicos de una cuenca. Los hidrogramas unitarios sintéticos permiten elaborar un hidrograma de escorrentía superficial para precipitaciones máximas en 24 horas para cuencas sin registros de caudal [3]. Los modelos más usados son: Hidrograma unitario sintético del SCS, Hidrograma unitario sintético de Snyder, Hidrograma unitario sintético de Williams y Hann. En esta investigación se usó el segundo de los métodos mencionados.

Hidrograma unitario sintético de Snyder

Los componentes para este modelo son [2]:

- (a) Tiempo de rezago: Snyder plantea que el tiempo de retraso (T_R) es constante para una cuenca, y se calcula con la ecuación 1.

$$T_R = \frac{L_C^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1900S_C^{0.5}} \quad (1)$$

Donde:

T_R = Tiempo de rezago expresado en horas.

L_C = Medida del cauce principal expresado en pies.

S = Almacenamiento o el factor de retención calculado con base al número de curva (CN).

S_C = Pendiente de la cuenca expresada en porcentaje.

Si el tiempo de concentración es menor que el tiempo de rezago, se deberá usar la ecuación 2:

$$T_c = \frac{5}{3}T_R \quad (2)$$

Donde:

T_c = es el periodo de la concentración expresado en horas.

Factores de reducción del área geográfica fija (FRA)

Severiano (2014) indica que los factores de área geográfica fija (**FRA**), se originan con las estadísticas de los registros de precipitaciones máximas puntuales y no de tormentas individuales [4]. Estos factores sirven para estimar tormentas de diseño. Estos factores relacionan la altura de precipitación en un punto de la cuenca con la altura de precipitación promedio del área total de la cuenca (Ecuación 10).

$$FRA = \frac{P_a}{P_p} = 1 - e^{-1.1*T^{0.25}} + e^{-1.1*T-0.01*A} \quad (10)$$

Donde:

P_a = Precipitación máxima puntual, para la duración y área de interés.

P_p = Precipitación media de los valores máximos puntuales, para la duración y área de interés-

T = duración de la tormenta, en días.

A = área de la cuenca, en millas cuadradas.

Distribución de la lluvia en el tiempo y cálculo de la precipitación efectiva

Chow et al. (1994) [5] mencionan que la precipitación efectiva se calcula por el método de infiltración del *Soil Conservation Service (SCS)*, (Ecuación 11).

$$P_e(accumul) = \frac{(LLacum_{(t)}FRA - I_a)}{(LLacum_{(t)}FRA - I_a + S)} \quad (11)$$

Donde:

P_e = Escorrentía directa o la lluvia efectiva en mm.

$LLacum_{(t)}$ = Lluvia acumulada para un tiempo t en mm.

FRA = Factor de área geográfica fija.

I_a = Lluvia inicial para la cual aún no ocasiona escorrentía en mm (Ecuación 12).

S = Retención potencial máxima en milímetros, representada por la Ecuación 13.

$$I_a = 0.2S \quad (12)$$

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (13)$$

$$P_e(periodo) = P_e(accumil)_{(t+1)} - P_e(accumul)_{(t)} \quad (14)$$

Curvas Intensidad - duración - frecuencia (IDF)

La intensidad de la precipitación se calcula con la ecuación 15.

$$I = \frac{10^k T^m}{t^n} \quad (15)$$

Donde:

I = Intensidad máxima en mm/h.

T = período de retorno en años.

t = duración de la precipitación en minutos.

k, n, m = constantes (adimensional).

El estudio ILLA-SENAMHI-UNI (1983) [6], indica la relación existente para las precipitaciones e intensidades (Ecuaciones 16, 17, 18 y 19)

Para $h < 4$:

$$\frac{I_t}{I_{24h}} = \left(\frac{t+b}{24} \right)^{n-1} \quad (16)$$

$$\frac{P_t}{P_{24h}} = \left(\frac{t+b}{24} \right)^n \quad (17)$$

Para $h \geq 4$:

$$\frac{I_t}{I_{24h}} = \left(\frac{t}{24} \right)^{n-1} \quad (18)$$

$$\frac{P_t}{P_{24h}} = \left(\frac{t+b}{24} \right)^{n-1} \quad (19)$$

Donde:

h = Intervalo en horas.

n = Parámetro de duración (adimensional).

b = Parámetro de duración por región (adimensional).

P_t = Precipitación para una hora estimada (mm).

P_{24h} = Precipitación máxima en un día (mm).

I_t = Intensidad de precipitación para una hora estimada.

I_{24h} = Intensidad de precipitación máxima para 24 horas.

Teniendo la precipitación máxima para diferentes tiempos de retorno en una cuenca específica y considerando que estas suceden en un tiempo de 24 horas, se podrá encontrar el valor de la intensidad en 24 horas para cada tiempo de retorno con la Ecuación 20.

$$I_{24h} = \frac{P_{24h}}{24} \quad (20)$$

Los valores de las constantes k, n, m y b se obtienen del estudio ILLA-SENAMHI-UNI (1983) [6], siendo estos valores de 2.1655, -0.5355, 0.0929 y 0.2 respectivamente.

Caudales instantáneos

El Manual de Hidrología [7], indica que para transformar caudales máximos diarios a caudales máximos instantáneos se usa la relación de Fuller (Ecuación 21).

$$Q_{inst} = Q(1 + 2.66A^{-0.33}) \quad (21)$$

Donde:

Q_{inst} = Caudales máximos instantáneos (m³/s)

Q = Caudales medio diario (m³/s)

A = Área de la cuenca (km²)

Combinaciones hidrológicas de suelo-vegetación

Chereque (1989) [8], indica que se puede obtener un número de curva (CN) para una cuenca con diferentes partes de vegetación y suelo, considerando la Tabla 1.

Áreas de bosque y pastizales en el oeste de los Estados Unidos (Para cuencas de la condición III, e la = 0.2S)					
Vegetación	Condición	Grupos de suelos			
		A	B	C	D
Herbacea	Mala	90	94	97	
	Regular	84	92	95	
	Buena	77	86	93	
Artemisia	Mala	81	90		
	Regular	66	83		
	Buena	55	66		
Roble - Tiemblo	Mala	80	86		
	Regular	60	73		
	Buena	50	60		
Junípero	Mala	87	93		
	Regular	73	85		
	Buena	60	77		

Tabla 1: CN de escurrimiento para áreas de bosque y pastizales en el oeste de los Estados Unidos [8].

Caudal base

El caudal base para el cálculo de los caudales máximos para diferentes períodos de retorno se obtiene con la ecuación 22.

$$Q_{base} = \frac{Q_{nov} + Q_{dic} + Q_{ene} + Q_{feb} + Q_{mar} + Q_{abr}}{6} \quad (22)$$

Donde:

Q_{base} = Caudal que discurre por la cuenca antes que ocurra el caudal de avenidas (m^3/s)

Q_{mes} = Caudal promedio mensual de la serie histórica mensual de caudales del período de información que se cuenta (m^3/s).

Materiales y Metodología

Delimitación de las subcuencas del río Biabo

Los parámetros morfológicos para la cuenca hasta el punto de control N°15, donde se ubica la estación hidrométrica Requena-Biabo (Tabla 2).

Datos morfológicos de la cuenca hasta Punto de Control N°15						
Punto de Control N°	Caudal Base m^3/s	Altitud Media $msnm$	Área de Drenaje km^2	Pend. Cuenca %	Longitud de río ¹ km	CN
15	207.53	1005.5	5939.1	0.1521	110.79	84.43

¹Longitud del cauce principal

Tabla 2: Datos morfológicos para la cuenca hasta la estación Requena-Biabo

Se tiene cuatro estaciones de precipitaciones en la cuenca Biabo, por lo que se consideraron 93 estaciones virtuales con datos de precipitación de la base de datos PISCO v2.1 del SENAMHI (Figura 1). Al multiplicar el área y la precipitación diaria por cada polígono de las subcuencas y los polígonos de Thiessen se determinó la precipitación promedio diaria de cada subcuenca (1981-2016). Esto nos permitió evaluar la precipitación máxima por cada año (Figura 3).

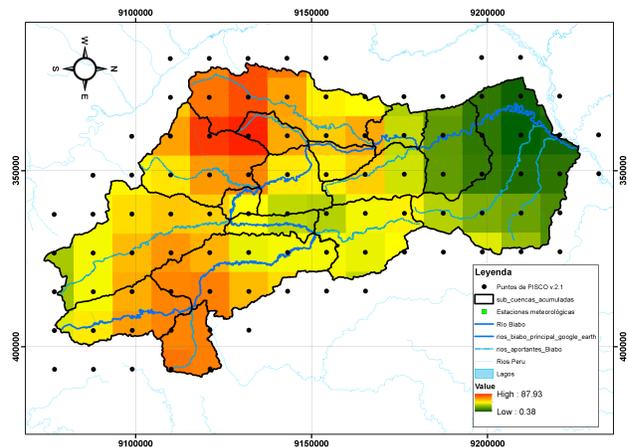


Figura 3: Polígonos de Thiessen de precipitación PISCO v2.1 y puntos de estudio en el cauce principal del río Biabo para el 24/10/1981.

Obtención del caudal base

La estación Requena-Biabo tiene una serie de caudales promedio mensuales obtenida por el SENAMHI (1994-2017). En la Tabla 3 se presenta el resumen del promedio mensual histórico de esta información.

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Prom	183.8	235.4	245.6	216.7	145.8	93.2	68.4	54.1	64.7	116.5	160.2	192.2

Tabla 3: Caudales promedio mensuales (m^3/s) registrados en estación Requena-Biabo (1994-2017). [9].

Comparación entre data PISCO v2.1 y datos históricos de pluviómetros en tierra

Se comparó la data grillada PISCO v2.1 con los datos de precipitación mensual de cuatro estaciones disponibles dentro de la cuenca del río Biabo, estaciones Cuzco-Biabo, José Olaya, La Unión y Nuevo Lima, los coeficientes de determinación obtenidos son del orden de 0.60 y 0.90 (Figura 4).

Datos históricos de caudales máximos

La cuenca Biabo solo cuenta con la estación hidrométrica Requena-Biabo ubicada en el punto de control Nº15, que cuenta con registros de caudales máximos (Figura 5), esta estación sirvió para la calibración del modelo precipitación escorrentía para las diferentes subcuencas del río Biabo.

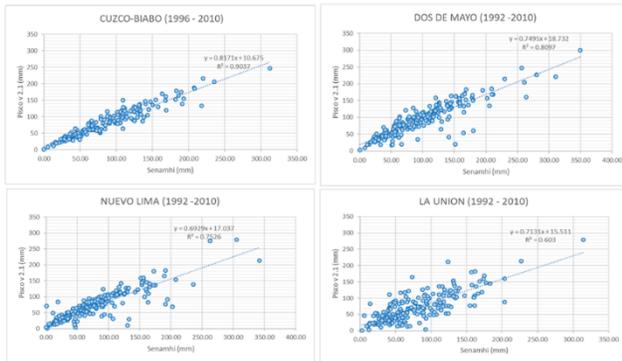


Figura 4: Comparación de los datos de precipitación mensual histórica dentro de la cuenca Biabo con data de precipitación grillada PISCO v2.1.



Figura 5: Caudales diarios registrados en estación Requena-Biabo. [9].

Valores máximos de precipitación para las cuencas

En la Tabla 4 se puede apreciar el procedimiento de selección que se hizo para los valores máximos anuales de precipitación de PISCO v2.1 para la cuenca hasta el punto de control Nº15, donde se ubica la estación hidrométrica Requena-Biabo.

P_{max} 24 hrs para la cuenca hasta punto control Nº15 con datos de PISCO v.2.1 (Area = 5939.1 km²)

Día	Año	P_{max} 24 hrs	Día	Año	P_{max} 24 hrs
24/10/1981	1981	52.49	17/02/1999	1999	43.59
18/02/1982	1982	66.36	25/10/2000	2000	86.65
09/03/1983	1983	64.51	10/01/2001	2001	46.17
23/11/1984	1984	69.86	13/11/2002	2002	39.29
04/10/1985	1985	52.48	11/10/2003	2003	93.16
18/03/1986	1986	51.49	29/11/2004	2004	71.05
26/11/1987	1987	72.19	17/02/2005	2005	48.58
02/03/1988	1988	66.56	11/11/2006	2006	70.51
07/03/1989	1989	42.04	28/10/2007	2007	68.26
04/10/1990	1990	61.12	15/03/2008	2008	67.71
04/03/1991	1991	76.26	12/03/2009	2009	52.11
17/03/1992	1992	42.54	06/02/2010	2010	91.30
27/03/1993	1993	44.45	07/11/2011	2011	49.31
06/03/1994	1994	58.87	06/10/2012	2012	43.15
13/11/1995	1995	50.93	13/11/2013	2013	76.81
05/11/1996	1996	42.04	25/03/2014	2014	46.58
25/09/1997	1997	35.09	06/11/2015	2015	52.57
11/02/1998	1998	73.84	08/10/2016	2016	50.90

Tabla 4: Precipitación máxima promedio en 24 horas anual para la cuenca hasta el punto de control Nº15

Precipitaciones y caudales para diferentes tiempos de retorno

Aplicando la fórmula de Fuller (Ecuación 21) a los registros de caudales máximos diarios de cada año (1993-2017) mostrados en la Figura 5, se obtienen los caudales máximos instantáneos. En la Tabla 5, se muestra las diferentes distribuciones teóricas de probabilidades usadas para la obtención de los caudales máximos diarios para diferentes períodos de retorno en la cuenca hasta el punto de control Nº15, estación Requena-Biabo. La distribución teórica de probabilidades Gamma 3 parámetros es la que mejor se ajusta a los datos de caudales máximos diarios (1993-2017) es la con un delta ordinario 0.111 que es el menor de las demás distribuciones, con un nivel de significación del 5%.

Distribuciones probabilísticas cuenca Nº15	Tiempos de retorno (años)							Deltas ordinarios
	5 m3/s	50 m3/s	100 m3/s	200 m3/s	500 m3/s	1000 m3/s	10000 m3/s	
(r)1-9 Normal	1297.9	1788.9	1899.2	2000.2	2122.6	2208.5	2463.0	0.125
Lognormal 2P	1264.5	2147.9	2419.6	2698.2	3079.0	3377.9	4445.4	0.115
Lognormal 3P	1259.1	2009.1	2224.2	2439.1	2724.8	2943.4	3691.1	0.121
Gamma 2P	1266.5	1939.8	2116.6	2286.2	2501.0	2656.1	3093.3	0.119
Gamma 3P	1287.5	1873.3	2016.6	2151.2	2318.0	2436.4	2763.7	0.111
Gumbell	1248.5	2006.7	2227.2	2446.8	2736.5	2955.5	3682.5	0.126

Tabla 5: Deltas ordinarios para diferentes distribuciones de probabilidades hasta el punto de control Nº15 usando caudales máximos diarios

Se realizó, un análisis con diferentes distribuciones probabilistas para las precipitaciones máximas en 24 horas en la cuenca hasta el punto de control Nº15, siendo la distribución teórica de probabilidades Gamma 3 parámetros la que mejor se ajusta a los datos por tener un

delta ordinario de 0.1183 que es el menor de las demás distribuciones con un nivel de significación del 5 % (Tabla 6).

Finalmente se corrigieron los valores de las precipitaciones máximas diarias según lo recomendado por la World Meteorological Organization se debe realizar el ajuste por un factor de 1.13 para corregir sesgos de subestimación de mediciones tomadas en intervalos fijos cada 24 horas [10].

Distribuciones probabilísticas cuenca Nº15	Tiempos de retorno (años)							Deltas ordinarios
	5	50	100	200	500	1000	10000	
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
Normal	71.7	90.1	94.3	98.0	102.6	105.9	115.4	0.175
Lognormal 2P	70.7	96.1	103.0	109.7	118.5	125.0	146.7	0.141
Lognormal 3P	70.2	101.9	111.5	121.3	134.6	145.0	181.9	0.147
Gamma 2P	70.8	92.9	98.4	103.6	110.0	114.7	127.5	0.155
Gamma 3P	71.1	94.5	100.3	105.9	112.9	117.9	131.7	0.118
Gumbell	69.8	98.3	106.6	114.8	125.7	133.9	161.2	0.130
Valores corregidos	80.3	106.7	113.4	119.7	127.5	133.2	148.8	

Tabla 6: Deltas ordinarios para diferentes distribuciones de probabilidades hasta el punto de control Nº15 usando precipitaciones máximas diarias.

Cálculo de curvas de precipitación máxima acumulada

Del estudio [6], para la zona de estudio se obtiene el parámetro de duración $n = 0.405$ y parámetro de duración por región $b = 0.2$ y con las relaciones respectivas se obtiene la información para elaborar las gráficas que relacionan el tiempo y las precipitaciones máximas acumuladas (Figura 6).

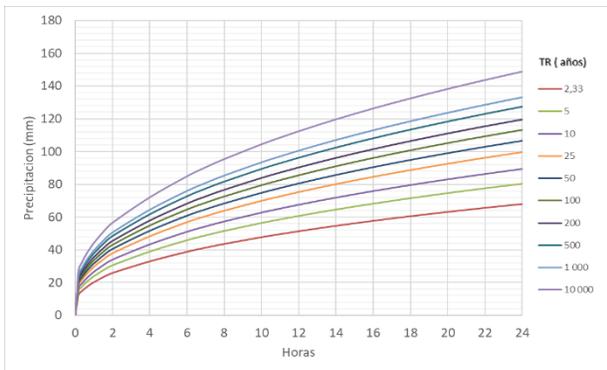


Figura 6: Curvas de precipitación máximas acumuladas para diferentes tiempos de retorno para la cuenca hasta el punto de control Nº15.

Cálculo de las curvas IDF

Se obtuvieron los parámetros para las ecuaciones intensidad duración frecuencia (IDF) para la cuenca hasta el punto de control Nº15 en el cauce principal del río Biabo, donde $m = 0.0929$, $n = -0.5355$ y $k = 2.1655$. Las curvas IDF para varios tiempos

de retorno para este punto de control (Figura 7).

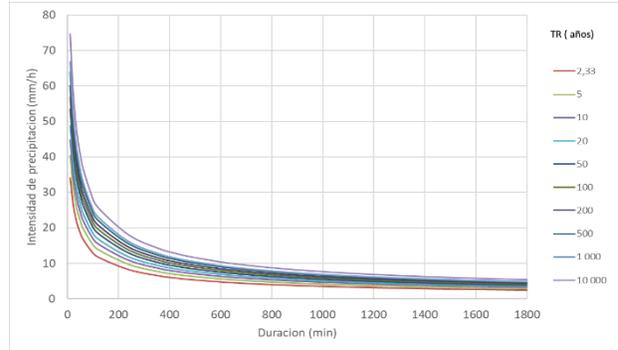


Figura 7: Curvas IDF en 24 horas para diferentes tiempos de Retorno para la cuenca hasta el punto de control Nº15.

Cálculo de los tiempos de concentración (T_c)

Usando los parámetros morfológicos de la Tabla 2, se calcularon los tiempos de concentración para la cuenca hasta la estación Requena-Biabo (Tabla 7).

Tiempos de concentración para la sub cuenca 15	T_c		
	Días	Horas	Minutos
Scs-Ranser	1.22	29.28	1757
California Culvert Practice	1.29	30.97	1858
Kirpich	1.4	33.67	2020
Temez	2.44	58.66	3520
Giandiotti	0.73	17.41	1045
Ven Te Chow	0.91	21.79	1307
Ventura Heron	0.96	23.08	1385
Tc Seleccionado	1.22	29.28	1757

Tabla 7: Tiempo de concentración de la cuenca hasta el punto de control Nº15.

Cálculo de los factores de reducción por área (FRA)

Se obtuvo un FRA igual a 0.69, que relaciona el T_c y el valor del área en km^2 hasta el punto de control Nº15, tal como se indica en la Tabla 8.

Cuenca	T_c Días	Área km^2	FRA %
Requena-Biabo	1.22	5939.1	0.69

Tabla 8: Coeficientes de reducción de la precipitación por Área (FRA).

Distribución de la lluvia en el tiempo y cálculo del hietograma total

Se ha dividido el tiempo de concentración T_c en 10 partes para ver cómo es la ocurrencia del hietograma.

Con los valores de tiempo acumulado se fue a las gráficas de precipitación de diseño para duraciones en 24 horas y con estas se obtuvo los valores de lluvia acumulada, las cuales fueron multiplicadas por el FRA. Finalmente, la lluvia total se obtiene aplicando la Ecuación 23.

$$P_{total} = (FRA)(LLacum_{t+1} - LLacum_t) \quad (23)$$

Donde:

$LLacum_t$ = lluvia acumulada en un tiempo t (mm)

$LLacum_{t+1}$ = la lluvia acumulada en un tiempo t+1 (mm)

P_{total} = precipitación total (mm)

En la Figura 8, se muestra la variación de la precipitación total en intervalos respecto a los tiempos en minutos.

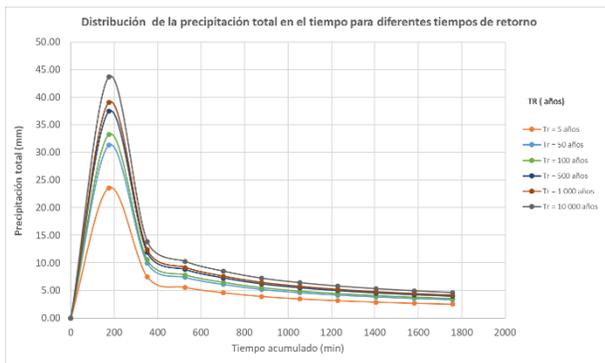


Figura 8: Distribución de la precipitación total en el tiempo para diferentes tiempos de retorno para la cuenca hasta el punto de control N°15.

Cálculo de la precipitación efectiva (método de infiltración del S.C.S)

Aplicando las ecuaciones 11, 12, 13 y 14 se calculó la repartición de la precipitación a lo largo del tiempo y la forma del hidrograma total de la precipitación efectiva (Figura 9). Para la cuenca hasta el punto de control N°15, la condición para la cuenca será la Condición III, se encuentra en el grupo de suelo C, con vegetación herbácea de calidad buena, obteniéndose un $CN = 84.72$ y $S = 45.8$ mm e $I_a = 9.16$ mm.

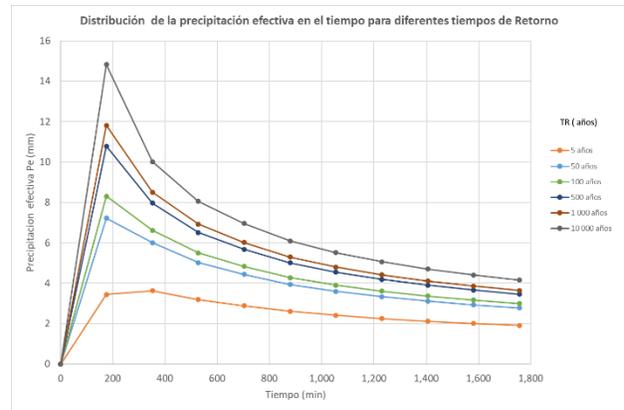


Figura 9: Distribución de la precipitación efectiva en el tiempo para diferentes tiempos de retorno cuenca punto control N°15.

Cálculo del hidrograma de escorrentía por el método de Snyder

Se consideró los datos morfológicos de la cuenca hasta el punto de control N°15 (Tabla 2).

- (a) Cálculo del Hidrograma unitario de Snyder: En la Tabla 9 se muestran los parámetros necesarios para la construcción de hidrograma unitario de Snyder.

Variable	Cantidad	Unidad
C_p	0.75	
T_R	18.57	horas
T_c	29.28	horas
t_s	3.38	horas
u_p	49.00	$m^3/s/mm$
T_p	33.21	horas
t_b	5.32	días
t_b'	132.83	horas
W_{50}	31.72	horas
W_{75}	18.13	horas

Tabla 9: Parámetros para la construcción del hidrograma unitario de Snyder de la cuenca hasta el punto de control N°15

- (b) Coordenadas puntos del hidrograma: Con los parámetros de la Tabla 9 y la Figura 2 se procedió a construir el hidrograma unitario de Snyder de la cuenca hasta el punto de control N°15 (Tabla 10 y Figura 10).

Nombre	T	Q (m ³ /s/mm)
Punto 0	0.00	0.00
A	22.63	24.50
B	27.17	36.75
Tp	33.21	49.00
D	45.29	36.75
E	54.35	24.50
F	132.83	0.00

Tabla 10: Coordenadas del hidrograma de Snyder para la cuenca hasta el punto de control N°15.

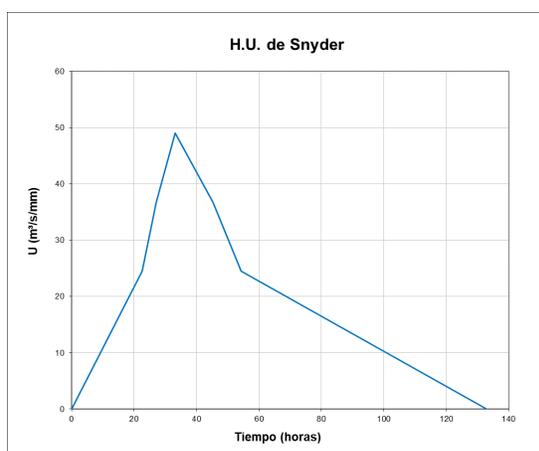


Figura 10: Hidrograma unitario de Snyder para la cuenca hasta el punto de control N°15.

Se usa un sistema de convolución para generar el hidrograma de escorrentía directa para un determinado tiempo de retorno. Este sistema multiplica cada intervalo de hora con la precipitación efectiva por los diferentes valores de caudal del hidrograma unitario de Snyder. En la Figura 11 se presentan los resultados de hidrogramas de escorrentía directa para diferentes tiempos de retorno para el punto de control N°15 que incluye el caudal base determinado en la Tabla 2.

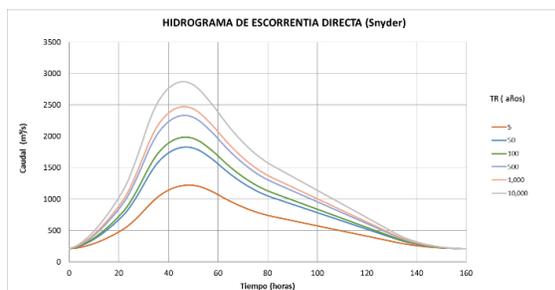


Figura 11: Hidrograma de escorrentía directa por el método de Snyder para diferentes tiempos de retorno hasta el punto de control N°15.

(c) Comparación de caudales máximos generados y los registrados en Requena-Biabo: Para la cuenca hasta el punto de control N°15 se realizó una comparación entre los caudales de máximas avenidas generados con los caudales registrados en la estación Requena-Biabo para diferentes tiempos de retorno, el error obtenido fluctúa entre $\pm 5\%$, (Tabla 11 y Figura 12).

TR (años)	Snyder (m ³ /s)	Caudal Max (m ³ /s)	Error (%)
2.3	964.2	1002.5	3.82
5	1222.2	1287.5	5.07
10	1423.1	1490.3	4.51
25	1661.1	1718.8	3.36
50	1828.4	1873.3	2.39
100	1987.9	2016.6	1.43
500	2334.2	2318.0	-0.7
1000	2473.9	2436.4	-1.54
10000	2868.4	2763.7	-3.79

Tabla 11: Valores de caudales pico para diferentes tiempos de retorno usando los hidrogramas de escorrentía del Snyder para la cuenca hasta el punto de control N°15.

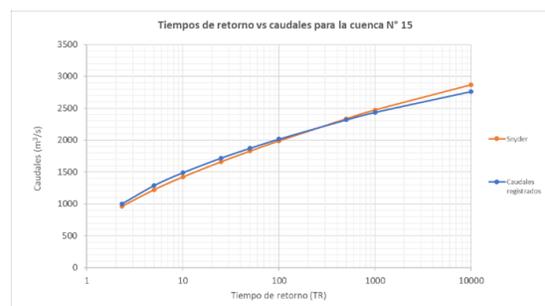


Figura 12: Comparación de los tiempos de retorno versus los caudales pico de los hidrogramas de escorrentía de Snyder en el punto de control N°15.

Caudales de máximas avenidas para las subcuencas del río Biabo

Se obtuvieron los caudales pico a diferentes tiempos de retorno para los 16 puntos de control a lo largo del cauce principal del río Biabo siguiendo la misma metodología desarrollada para obtener los caudales picos de la cuenca hasta el punto de control N°15 basada el método del hidrograma unitario de Snyder (Figura 13).

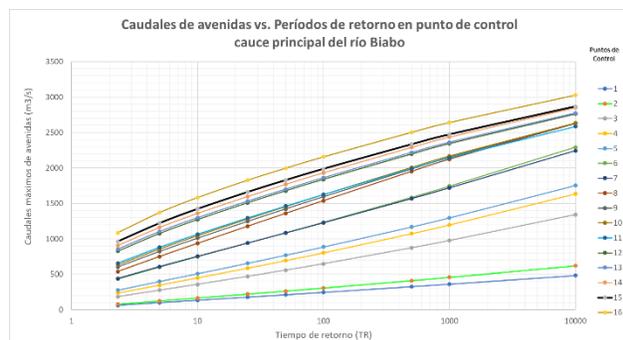


Figura 13: Curvas de tiempos de retorno vs caudales pico para los 16 puntos de control en cauce principal del río Biabo.

Conclusiones

Se generaron las precipitaciones máximas diarias para diferentes tiempos de retorno para la cuenca hasta el punto de control Nº15, donde se ubica la estación hidrométrica Requena-Biabo considerando los datos grillados de PISCO v2.1 y las curvas IDF deducidas del estudio [6].

Se generaron caudales de máximas avenidas para diferentes tiempos de retorno para cuenca hasta el punto de control Nº15 del cauce principal del río Biabo, en base a las precipitaciones máximas diarias generadas, los

hidrogramas unitarios de Snyder y el valor de curva número (CN) obtenidas para esta cuenca. Los porcentajes de error entre los caudales pico generados con respecto a los obtenidos con los caudales registrados en la estación hidrométrica Requena-Biabo fluctúan entre $\pm 5\%$.

Se ha generado las precipitaciones máximas diarias y caudales de máximas avenidas para las cuencas en los 16 puntos de control a lo largo del cauce del río Biabo, para diferentes tiempos de retorno, para la determinación de las zonas de inundación y el dimensionamiento de obras de protección y de encauzamiento dentro de la cuenca del río Biabo.

Recomendaciones

Identificar las zonas de inundación con los caudales de máximas avenidas para diferentes periodos de retorno en la zona baja de la cuenca del río Biabo utilizando software de simulación hidráulica como HEC-RAS, IBER, y FLOW 2D.

Instalar más estaciones pluviográficas dentro de la cuenca del río Biabo para mejorar los resultados obtenidos en la presente investigación.

Instalar más estaciones hidrográficas en la cuenca del río Biabo, para contar con registros horarios de medición de caudales para poder generar los hidrogramas unitarios propios en la cuenca.

Referencias

- [1] B. Villón. Hidroesta (1era ed.), Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Agrícola (2005).
- [2] F. Mendoza. Hidrogramas unitarios geomorfológicos basados en la función de densidad de probabilidad gamma, Universidad nacional autónoma de México, División de estudios de posgrado Facultad de ingeniería (2005). <http://132.248.9.34/pd2005/0601628/0601628.pdf>
- [3] H. Rojo. Estimación de caudales máximos usando hidrogramas unitarios sintéticos y el método racional (2002) http://julianrojo.weebly.com/uploads/1/2/0/0/12008328/modelos_lluvia_escorrentia
- [4] C. Severiano. Estimación de factores de reducción areal, aplicación a los estados de Durango y Tamaulipas (2014). <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7055/tesis.pdf.pdf?sequence=1>
- [5] V. Chow, D. Maidment and L. Mays. Hidrología aplicada (1era ed.), Colombia: Editorial Mc Graw-Hill Interamericana S.A. (1994).
- [6] ILLA-SENAMHI-UNI, Estudio de Hidrología del Perú, IILA (1983).
- [7] Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje (2011). http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/P_recientes/970.pdf
- [8] M. Chereque. Hidrología para estudiantes de ingeniería Civil (2a ed.). Pontifica Universidad Católica del Perú (PUCP), (1989). <http://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/28689/hidrologia.pdf>
- [9] SENAMHI (2018), <http://snirh.ana.gob.pe/visors2/>
- [10] A. Chúa. Desarrollo y calibración de un sistema informático para el análisis de tormentas, máximas avenidas y generación de lluvia escorrentía (2017). <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2947/P40-C28-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>