





ESTIMACIÓN DEL TRÁNSITO DE AVENIDAS EMPLEANDO EL MÉTODO DE MUSKINGUM EN LA ESTACIÓN EL TAMBO DE LA CUENCA CHICAMA, PERÚ

FLOOD ROUTING ESTIMATION USING MUSKINGUM METHOD IN THE TAMBO STATION IN THE CHICAMA BASIN, PERU

 Arriola Carrasco, Guillermo Gustavo¹

 Villegas Granados, Luis Mariano²

 Arbulú Ramos, José del Carmen³

 Sotomayor Nunura, Gioconda del Socorro⁴



Fecha de recepción : 13/05/2021

Fecha de aprobación : 17/08/2021

Resumen

El objetivo de la investigación es estimar el tránsito de avenidas empleando un tránsito del tipo hidrológico aplicado en ríos que en este caso se escogió el método de Muskingum o llamado también modelo de almacenamiento tipo cuña. El método está basado en las relaciones caudal y almacenamiento para los diferentes intervalos de tiempo los cuales pueden ser aplicables en cuencas hidrográficas pequeñas y medianas. El escenario de investigación fue la estación hidrométrica El Tambo perteneciente a la cuenca Chicama de Perú, considerando para el análisis los registros históricos completos del período 1993 al 2011. El tipo de investigación fue cuantitativo y diseño cuasi-experimental cuya metodología en referencia al método aplicado sugiere que se deben establecer las constantes “ K_j ” definida como la proporcionalidad del volumen en cierto intervalo de tiempo y “ X_j ” como la ponderación del tránsito a lo largo del río, ambas variables se complementan a partir de las funciones matemáticas de entrada y salida de los caudales. Los resultados obtenidos indican que el tránsito de avenidas a partir del método de Muskingum aplicado a la estación El Tambo es el adecuado para los coeficientes promedio “ K_j ” de 0.571 y “ X_j ” de 0.424, llegando a la conclusión que se puede determinar el tránsito de avenidas para un intervalo de 1 hora y el hidrograma de salida.

Palabras Claves: Almacenamiento, caudal, cuenca Chicama, método Muskingum, tránsito de avenidas

Abstract

The objective of the investigation is estimate the flood routing using a hydrological routing type applied to rivers that in this case it's chose Muskingum method or also called storage model wedge type. The method is based on the flow and storage relationships for the different time intervals which may be applicable in small and medium river basins. The research scenario was El Tambo hydrometric station belonging to the Chicama basin of Peru, considering for the analysis complete historical records of the period 1993 to 2011. The type of research was quantitative and quasi-experimental design whose methodology in reference to the applied method suggests that

¹ Ingeniero Civil, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo, Universidad Señor de Sipán, Pimentel-Lambayeque, Perú, garriola@crece.uss.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-2861-1415>.

² Magíster en Gestión Pública, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo, Universidad Señor de Sipán, Pimentel-Lambayeque, Perú, vgranadoslm@crece.uss.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0001-5401-2566>.

³ Doctor en Ciencias Ambientales, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Sistemas y Arquitectura, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú, ingjar@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0746-1681>.

⁴ Doctora en Ciencias de la Educación, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo, Universidad Señor de Sipán, Pimentel-Lambayeque, Perú, giocondasn@crece.uss.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0001-6082-0893>.

should be established the constants " K_j ", defined as the proportionality of the volume in certain time interval and " X_j " as the weighting of the routing along the river, both variables complement each other of the mathematical functions of input and output flows. The results obtained indicate that flood routing from Muskingum method applied to El Tambo station is adequate for the mean coefficients " K_j " of 0.571 and " X_j " of 0.424, reaching the conclusion that it can determine flood routing for a interval of 1 hour and outlet hydrograph.

Key words: Storage, flow, Chicama basin, Muskingum method, flood routing

1. Introducción

El tránsito de avenidas se define como el comportamiento que presenta el caudal durante intervalos de tiempo que pueden ser constantes o variables, debido a este efecto el caudal tiene una secuencia aleatoria que por lo general es creciente y de por sí debido a su naturaleza de comportamiento dentro de una cuenca hidrográfica tiende a ser cambiante pero muy representativo sobre todo en el estudio de desborde de ríos (Lee et al., 2018). El tránsito se puede notar de manera gráfica a través de un hidrograma, el cual al graficar los valores de las avenidas versus el tiempo se puede observar como va evolucionando, por lo que al investigador le convendrá según este criterio elegir que tipo de tránsito emplear por ejemplo para la estimación de futuros desastres por desbordamientos (Ehteram et al., 2018; Bazargan & Norouzi, 2018; Akbari et al., 2020) o para el diseño y eficacia de estructuras hidráulicas (Farzin et al., 2018; Hernández & Martínez, 2019). En un contexto más amplio diversas investigaciones indican tres tipos de tránsitos: los agregados de crecientes, los distribuidos de crecientes y los de onda dinámica, estos tránsitos se diferencian principalmente en el uso de las características hidrológicas, componentes hidráulicas y dinámicas del flujo respectivamente; en ese sentido el método de Muskingum es uno de los adecuados para estimar el tránsito de las crecidas de ríos (Hirpurkar & Ghare, 2015; Hamedi et al., 2016; Yuan et al., 2016; Norouzi & Bazargan, 2020).

Las diversas investigaciones sobre el tránsito de avenidas indican que por medio de este proceso se puede saber los procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca y se pueda prevenir futuras inundaciones (Abbes & Meddi, 2016; Zhang et al., 2017; Zang et al., 2020), también permite determinar un hidrograma de salida empleando por ejemplo el método de Muskingum (Bhuyan et al., 2015), pues a pesar de que el método tenga más de 75 años sigue siendo un tema de interés para la investigación en la hidrología (Gaşiorowski & Szymkiewicz, 2018), así mismo permite estudiar el movimiento de las olas de crecidas y propagación en ríos (Yadav et al., 2015; Reggiani et al., 2016; Yang et al., 2019) inclusive hasta la incorporación de más parámetros al ya establecido por el propio método (Moghaddam et al., 2016) que comúnmente se calibra en base a modelos no lineales (Haddad et al., 2015; Kang et al., 2017) y con la inclusión de más ecuaciones de almacenamiento optimizadas a partir del método de Muskingum original (Bozorg et al., 2019). De igual forma a este modelo se pueden agregar aportes del flujo lateral (Karahhan et al., 2015; Ayvaz & Guraslan, 2017), con mayor cantidad de parámetros como los de tipo exponencial (Zhang, Kang et al., 2017; Niazkar & Afzali, 2017; Gaşiorowski & Szymkiewicz, 2020) y con aplicación de algoritmos (Khalifeh et al., 2020) que optimizan mejor el tránsito continuo mejorando el modelo original (Vatankhah, 2017) y con otras variantes basadas en criterios hidrodinámicos (Perumal et al., 2017), a pesar de ello la estimación de los parámetros del tránsito de avenidas es todo un reto sobre todo durante la secuencia de diferentes períodos de inundaciones (Afzali, 2016), en el proceso de calibración con datos hidrométricos de campo (Niazkar & Afzali, 2016; Barbetta et al., 2017; Bozorg et al., 2020), con cuantificadores de datos a nivel de cuenca (Farahani et al., 2019) como el tiempo de concentración y el volumen de almacenamiento (Yoo et al., 2017), sin embargo los modelos actuales tienden a la aplicación de ecuaciones unidimensionales y métodos numéricos que describen con mejores estimaciones el movimiento del tránsito del flujo como las aplicaciones de Sain-Venant (Fassoni et al., 2017; Fenton, 2019).

El problema de investigación abordado plantea la siguiente pregunta: ¿Cómo estimar el tránsito de avenidas empleando el método de Muskingum en la estación El Tambo de la cuenca Chicama?, por lo que es necesario determinar el tránsito de avenidas que más se adecúe a la presente investigación que es el de un tipo hidrológico. El objetivo principal de la investigación se basa en estimar el tránsito de

avenidas empleando el método de Muskingum en la estación El Tambo de la cuenca Chicama del Perú. Como propósito y alcance del artículo se busca que al calcular el tránsito de avenidas para la zona de estudio se pueda determinar el tránsito de un día de duración y el hidrograma de salida bajo un análisis de período de registro completo y disponible en la estación El Tambo desde 1993 al 2011, además el estudio se limita a un tramo del río Chicama, empleando para tal fin la información de caudales máximos diarios, además se desarrolla el proceso de organización de la información para poder emplear el método de Muskingum. Finalmente, este estudio se justifica ya que la cuenca Chicama al estar ubicada en la zona norte de la Vertiente del Pacífico del Perú y así como otras cuencas de esta parte del país tienden a producir desbordes de ríos, inundaciones y erosiones en épocas de avenidas debido a que su tránsito de avenidas se produce con caudales máximos.

2. Material y métodos

Para la investigación se consideró pertinente el análisis de los registros históricos (período 1993-2011) de la estación hidrométrica El Tambo, la cual está ubicada en la cuenca del río Chicama en la Región La Libertad (figura 1), teniendo como enfoque principal establecer las constantes “ K_j ” y “ X_j ” por el método de Muskingum para la estimación del tránsito de avenidas. Se tuvo en consideración además un diseño de investigación cuasi experimental, por lo tanto la investigación fue del tipo cuantitativa y con respecto al proceso y tratamiento de la información se obtuvieron previamente los registros proporcionados por la Autoridad Nacional del Agua del Perú para posteriormente determinar el tránsito de avenidas.



Figura 1. Delimitación de la cuenca Chicama y ubicación de la estación hidrométrica El Tambo. Fuente: (SENAMHI, 2020)

En cuanto al método de Muskingum: “El almacenamiento (S) en un tramo del cauce puede descomponerse en dos partes: almacenamiento en prisma, que sería proporcional al caudal de salida (O_j) y almacenamiento en cuña que sería función de la diferencia entre el caudal de entrada y el de salida ($I_j - O_j$), ya que cuanto mayor sea esa diferencia, más pronunciada será la cuña. Supongamos que en el extremo de un canal seco arrojamos un volumen de agua. El pequeño hidrograma generado será inicialmente más alto y de menor duración (posición A) y, a medida que avanza, el mismo volumen pasará por los puntos B y C cada vez con un hidrograma más aplanado. Suponemos que no existe pérdida de volumen (por infiltración o evaporación), de modo que el área comprendida bajo los tres hidrogramas será idéntica, luego se deberá calcular el tránsito de un hidrograma al obtener el hidrograma del punto C a partir del hidrograma del punto A. La utilidad práctica del procedimiento es evidente, por ejemplo el carácter catastrófico de una avenida está relacionado directamente con la altura del pico del

hidrograma (el caudal máximo), de modo que es fundamental calcular cómo ese pico va disminuyendo a medida que nos movemos aguas abajo (figura 2)” (Pazos & Mayorga, 2019, pp. 93-94).

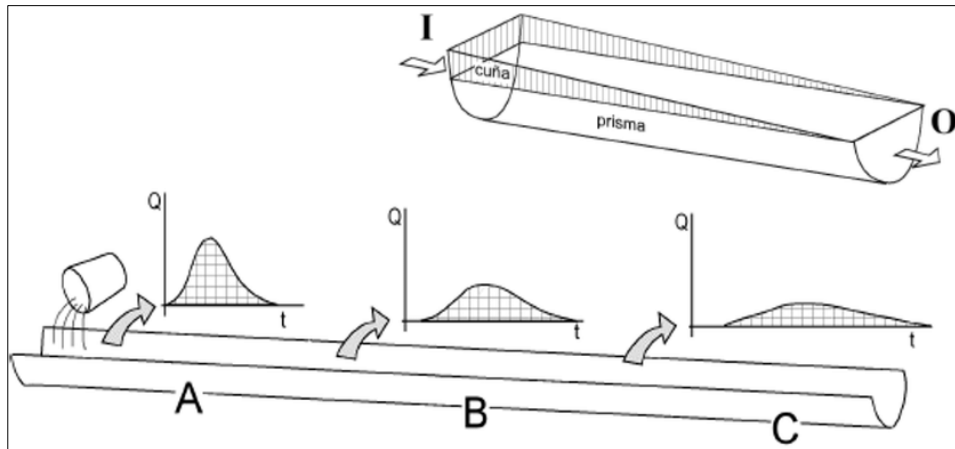


Figura 2. Explicación del tránsito de avenidas aplicado al método de Muskingum. Fuente: (Pazos & Mayorga, 2019)

En este proceso el almacenamiento por prisma se define como:

$$S_1 = K_j * O_j$$

Donde: S_1 es el almacenamiento por prisma; K_j es el coeficiente de proporcionalidad y O_j es el caudal de salida en cierto intervalo de tiempo.

Mientras que el volumen de almacenamiento por cuña se expresa como:

$$S_2 = K_j * X_j * (I_j * O_j)$$

Donde: S_2 es el volumen de almacenamiento por cuña; K_j es el coeficiente de proporcionalidad; X_j es la ponderación del tránsito a lo largo del río ó tramo analizado en la cuenca; I_j es el caudal de entrada en el análisis del tránsito de almacenamiento y O_j es el caudal de salida en cierto intervalo de tiempo.

Luego el tránsito total se representa como la suma del almacenamiento por prisma más el almacenamiento por cuña, que ordenando convenientemente se define como:

$$S = S_1 + S_2 = K_j * (X_j * I_j + (1 - X_j) * O_j)$$

Donde: S es el tránsito total; S_1 es el almacenamiento por prisma; S_2 es el volumen de almacenamiento por cuña; K_j es el coeficiente de proporcionalidad; X_j es la ponderación del tránsito a lo largo del río ó tramo analizado en la cuenca; I_j es el caudal de entrada en el análisis del tránsito de almacenamiento y O_j es el caudal de salida en cierto intervalo de tiempo.

Después el método de Muskingum señala la ecuación general de tránsito en base a la ecuación de sumas del almacenamiento por prisma y por cuña:

$$O_{j+1} = C_1 * I_{j+1} + C_2 * I_j + C_3 * O_j$$

Donde: O_{j+1} es el caudal de salida siguiente al caudal de salida inicial; I_j es el caudal de entrada en el análisis del tránsito de almacenamiento; I_{j+1} es el caudal de entrada de la siguiente posición en el

análisis del tránsito de almacenamiento; O_j es el caudal de salida en cierto intervalo de tiempo; C_1, C_2 y C_3 son las constantes adimensionales del método de Muskingum. Así mismo las constantes de la ecuación del método de Muskingum se expresan de la siguiente manera:

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2 * K_j * X_j}{2 * K_j * (1 - X_j) + \Delta t}$$

Donde: C_1 es la primera constante del método de Muskingum; K_j es el coeficiente de proporcionalidad; X_j es la ponderación del tránsito a lo largo del río ó tramo analizado en la cuenca y Δt es el intervalo de tiempo del tránsito a estimar.

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2 * K_j * X_j}{2 * K_j * (1 - X_j) + \Delta t}$$

Donde: C_2 es la segunda constante del método de Muskingum; K_j es el coeficiente de proporcionalidad; X_j es la ponderación del tránsito a lo largo del río ó tramo analizado en la cuenca y Δt es el intervalo de tiempo del tránsito a estimar.

$$C_3 = \frac{2 * K_j * (1 - X_j) - \Delta t}{2 * K_j * (1 - X_j) + \Delta t}$$

Donde: C_3 es la tercera constante del método de Muskingum; K_j es el coeficiente de proporcionalidad; X_j es la ponderación del tránsito a lo largo del río ó tramo analizado en la cuenca y Δt es el intervalo de tiempo del tránsito a estimar. Cabe indicar que la suma de las constantes C_1, C_2 y C_3 siempre deber sumar la unidad.

Finalmente, la secuencia de cada proceso aplicado en la presente investigación se representa en el siguiente diagrama de flujo (figura 3), sustentado en el propio método de Muskingum (Ouyang *et al.*, 2015; Zhang, Xie, *et al.*, 2017; Zhang, Kang, *et al.*, 2017; Ehteram *et al.*, 2018).

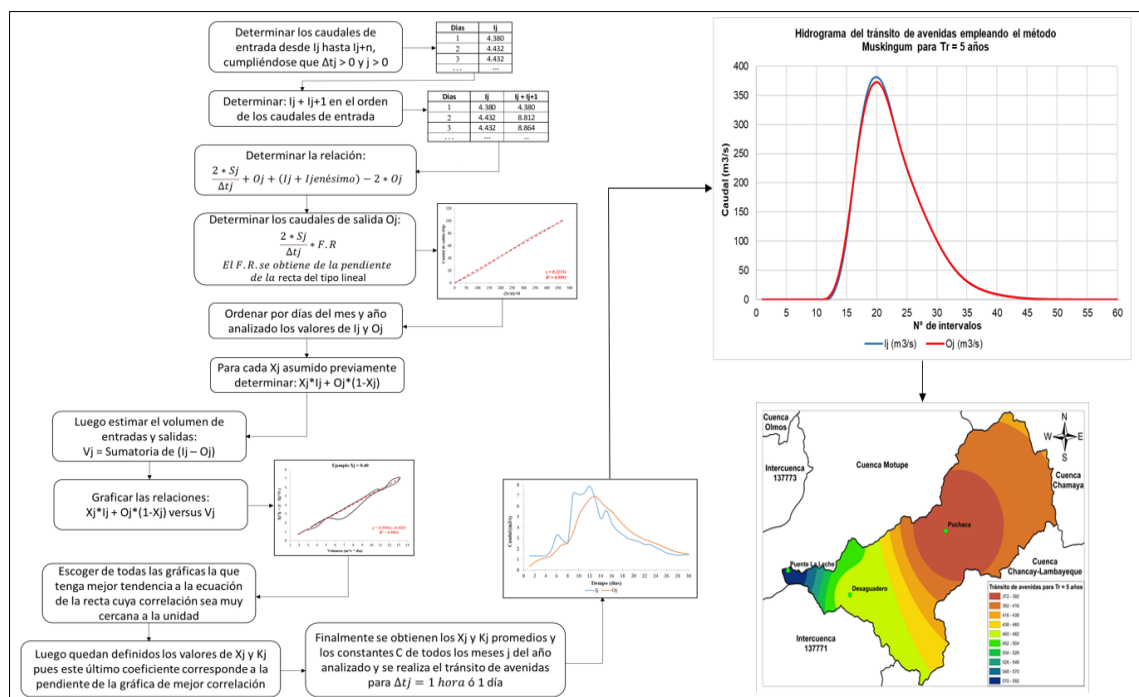


Figura 3. Diagrama de flujo para la estimación del tránsito de avenidas - Método de Muskingum. Elaboración propia.

3. Resultados

Los registros históricos de los caudales máximos de la estación hidrométrica El Tambo en la parte inicial sirvieron para aplicar el análisis del tránsito de avenidas por mes y por año. A manera de ejemplo se indican los resultados obtenidos para el mes de junio del año 1998 (ver tabla 1 y tabla 2) a partir del diagrama de flujo de la figura 3. Se indica además que este procedimiento se realiza para cada mes y para cada año. La figura 4 muestra la obtención del factor de relación (F.R.) para el año 1998 el cual fue de 0.2153, valor que corresponde a la pendiente de la línea de ajuste del tipo lineal.

Tabla 1

Caudales de entrada y salida del mes de junio del año 1998 para obtener el factor de relación

Día	Caudal de entrada (I _j)	I _j + I _{j+1}	(2*S _j /Δt)+O _j	Caudal de entrada (O _j)
1	24.08	24.08	24.08	5.18
2	25.42	49.50	63.22	13.61
3	28.58	54.00	89.99	19.38
4	26.34	54.91	106.15	22.86
5	23.14	49.47	109.92	23.67
6	22.16	45.30	107.88	23.23
7	21.22	43.38	104.80	22.56
8	21.54	42.75	102.43	22.05
9	20.82	42.35	100.67	21.68
10	19.84	40.66	97.98	21.10
11	19.65	39.49	95.28	20.51
12	19.38	39.02	93.28	20.08
13	19.28	38.66	91.77	19.76
14	18.72	38.00	90.25	19.43
15	18.40	37.12	88.51	19.06
16	18.29	36.69	87.09	18.75
17	19.02	37.31	86.90	18.71
18	17.82	36.85	86.33	18.59
19	17.60	35.42	84.58	18.21
20	18.03	35.63	83.79	18.04
21	17.50	35.54	83.25	17.92
22	17.54	35.04	82.44	17.75
23	17.38	34.91	81.85	17.62
24	16.40	33.78	80.38	17.31
25	16.43	32.83	78.60	16.92
26	16.38	32.82	77.57	16.70
27	15.63	32.02	76.19	16.40
28	15.57	31.20	74.58	16.06
29	15.70	31.26	73.73	15.87
30	14.96	30.66	72.64	15.64

Tabla 2

Determinación de los valores X_j para el mes de junio del año 1998.

I _j (m ³ /s)	O _j (m ³ /s)	V _j (m ³ /s*día)	X _j *I _j + (1 - X _j)*O _j					
			X _j = 0.10	X _j = 0.20	X _j = 0.30	X _j = 0.40	X _j = 0.50	X _j = 0.60
24.08	5.18	18.90	7.07	8.96	10.85	12.74	14.63	16.52
25.42	13.61	34.25	14.79	15.97	17.15	18.34	19.52	20.70

28.58	19.38	44.76	20.30	21.22	22.14	23.06	23.98	24.90
26.34	22.86	51.10	23.20	23.55	23.90	24.25	24.60	24.94
23.14	23.67	52.57	23.61	23.56	23.51	23.45	23.40	23.35
22.16	23.23	51.78	23.12	23.01	22.91	22.80	22.69	22.59
21.22	22.56	50.57	22.43	22.29	22.16	22.03	21.89	21.76
21.54	22.05	49.64	22.00	21.95	21.90	21.85	21.79	21.74
20.82	21.68	48.95	21.59	21.50	21.42	21.33	21.25	21.16
19.84	21.10	47.89	20.97	20.84	20.72	20.59	20.47	20.34
19.65	20.51	46.83	20.43	20.34	20.25	20.17	20.08	19.99
19.38	20.08	46.04	20.01	19.94	19.87	19.80	19.73	19.66
19.28	19.76	45.45	19.71	19.66	19.61	19.57	19.52	19.47
18.72	19.43	44.86	19.36	19.29	19.22	19.15	19.08	19.00
18.40	19.06	44.17	18.99	18.92	18.86	18.79	18.73	18.66
18.29	18.75	43.62	18.70	18.66	18.61	18.56	18.52	18.47
19.02	18.71	43.54	18.74	18.77	18.80	18.84	18.87	18.90
17.82	18.59	43.32	18.51	18.43	18.36	18.28	18.21	18.13
17.60	18.21	42.63	18.15	18.09	18.03	17.97	17.90	17.84
18.03	18.04	42.32	18.04	18.04	18.04	18.04	18.04	18.04
17.50	17.92	42.11	17.88	17.84	17.80	17.76	17.71	17.67
17.54	17.75	41.79	17.73	17.71	17.69	17.66	17.64	17.62
17.38	17.62	41.56	17.60	17.57	17.55	17.52	17.50	17.47
16.40	17.31	40.99	17.22	17.13	17.03	16.94	16.85	16.76
16.43	16.92	40.29	16.87	16.82	16.78	16.73	16.68	16.63
16.38	16.70	39.88	16.67	16.64	16.61	16.57	16.54	16.51
15.63	16.40	39.34	16.33	16.25	16.17	16.09	16.02	15.94
15.57	16.06	38.71	16.01	15.96	15.91	15.86	15.81	15.76
15.70	15.87	38.38	15.86	15.84	15.82	15.80	15.79	15.77
14.96	15.64	37.95	15.57	15.50	15.44	15.37	15.30	15.23

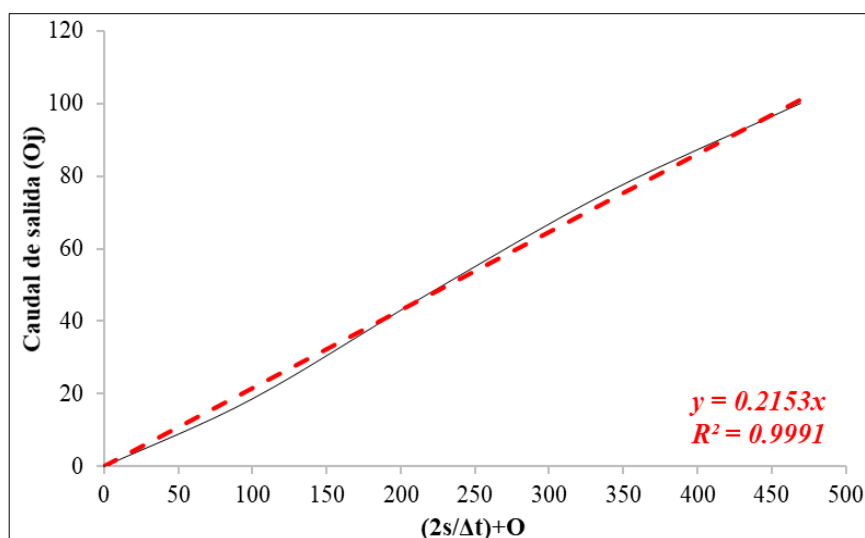


Figura 4. Factor de relación (F.R.) 0.2153 para el año 1998. Elaboración propia.

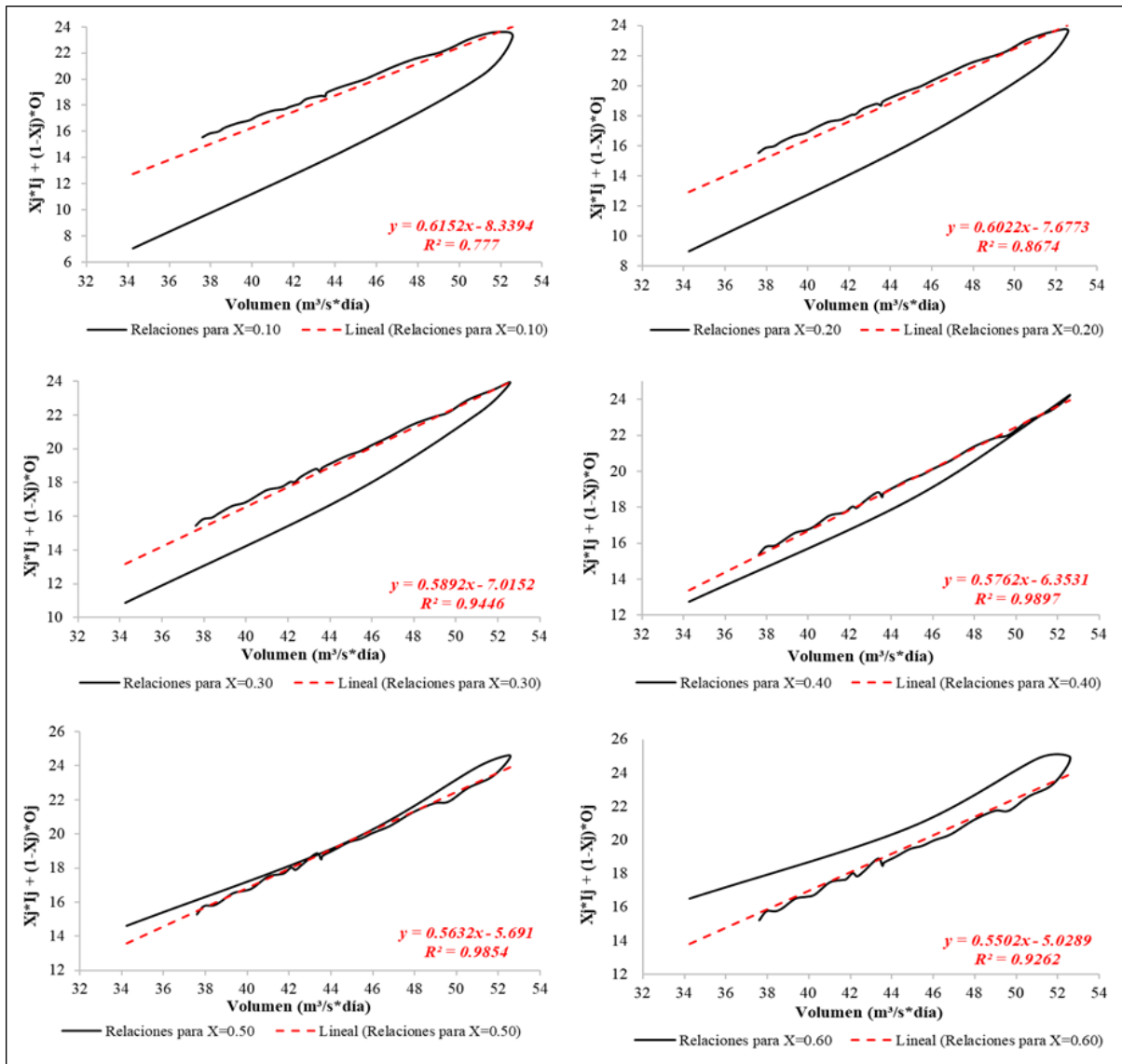


Figura 5. Relaciones de caudales de entrada, caudales de salida y volumen en base al método de Muskingum para el mes de junio del año 1998. Elaboración propia.

La figura 5 indica los valores de “Kj” y “Xj” considerados para obtener la mejor tendencia a una recta cuya correlación sea muy cercana a la unidad, por lo que se escogió la gráfica para X=0.40 y K=0.5762, que presentaron un coeficiente de correlación muy alto ($r = 0.9948$) y el coeficiente de determinación fue $R^2 = 0.9897$ el cual indica que el 98.97% de las relaciones del tránsito si se corresponde al volumen de descarga de ese mes, mientras que sólo el 1.03% no los relaciona.

Posteriormente se estimaron los coeficientes de la ecuación del método de Muskingum para un intervalo de 1 hora ($\Delta t = 1$ hora) y se aprecia además que la suma de C_1 , C_2 y C_3 es la unidad verificándose de esta manera la aplicación del método. Consecuentemente se estimó el tránsito de avenidas (figura 6) por el método de Muskingum para el mes de junio del año 1998 donde se destaca que los resultados obtenidos son los adecuados para predecir el tránsito del flujo en la cuenca Chicama.

$$C_1 = \frac{1 - 2 * 0.5762 * 0.40}{2 * 0.5762 * (1 - 0.40) + 1} \rightarrow C_1 = 0.319$$

Donde: C_1 es la primera constante del método de Muskingum.

$$C_2 = \frac{1 + 2 * 0.5762 * 0.40}{2 * 0.5762 * (1 - 0.40) + 1} \rightarrow C_2 = 0.864$$

Donde: C_2 es la segunda constante del método de Muskingum.

$$C_3 = \frac{2 * 0.5762 * (1 - 0.40) - 1}{2 * 0.5762 * (1 - 0.40) + 1} \rightarrow C_3 = -0.182$$

Donde: C_3 es la tercera constante del método de Muskingum.

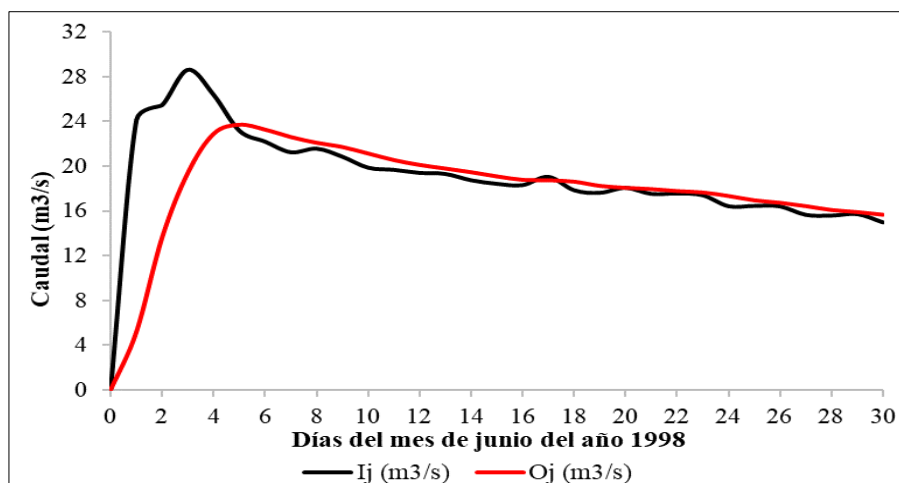


Figura 6. Tránsito de avenidas generado para el mes de junio correspondiente al año 1998 con el método de Muskingum. Elaboración propia.

También, este proceso se repite para cada mes de cada año y se toman los valores promedio de los doce meses por cada año y se obtienen los coeficientes “ X_j ” y “ K_j ” (Norouzi & Bazargan, 2020) para un intervalo de 1 hora ($\Delta t = 1$ hora). Los valores deducidos se señalan en la tabla 3, se demuestra en tanto que existe poca dispersión de los coeficientes “ X_j ” y “ K_j ” pues los coeficientes de variación estimados fueron de 0.046 y 0.025 respectivamente, satisfaciendo estadísticamente estos resultados.

Tabla 3

Valores promedio de los coeficientes “ X_j ” y “ K_j ” para el período 1992 al 2011.

Año	Valores promedio	
	X_j	K_j
1993	0.480	0.570
1994	0.400	0.590
1995	0.430	0.600
1996	0.450	0.600
1997	0.430	0.560
1998	0.380	0.590
1999	0.420	0.570
2000	0.430	0.590
2001	0.420	0.560
2002	0.430	0.560
2003	0.430	0.570
2004	0.430	0.560
2005	0.410	0.570
2006	0.420	0.560

2007	0.410	0.560
2008	0.430	0.560
2009	0.420	0.560
2010	0.420	0.560
2011	0.410	0.560
Promedio	0.424	0.571
Desviación estándar	0.020	0.014
Coefficiente de variación	0.046	0.025

Inmediatamente se estimaron los coeficientes de la ecuación del método de Muskingum con $X_j = 0.424$ y $K_j = 0.571$ y $\Delta t = 1$ hora, que corresponden al período 1993 - 2011

$$C_1 \text{ promedio} = \frac{1 - 2 * 0.571 * 0.424}{2 * 0.571 * (1 - 0.424) + 1} \rightarrow C_1 \text{ promedio} = 0.311$$

Donde: C_1 es la primera constante promedio del método de Muskingum.

$$C_2 \text{ promedio} = \frac{1 + 2 * 0.571 * 0.424}{2 * 0.571 * (1 - 0.424) + 1} \rightarrow C_2 = 0.895$$

Donde: C_2 es la segunda constante promedio del método de Muskingum.

$$C_3 \text{ promedio} = \frac{2 * 0.571 * (1 - 0.424) - 1}{2 * 0.571 * (1 - 0.424) + 1} \rightarrow C_3 = -0.206$$

Donde: C_3 es la tercera constante promedio del método de Muskingum.

Luego reemplazando los valores respectivos queda definida la ecuación del método de Muskingum para la estación El Tambo de la cuenca Chicama:

$$O_{j+1} = 0.311 * I_{j+1} + 0.895 * I_j - 0.206 * O_j$$

Donde: O_{j+1} es el caudal de salida siguiente al caudal de salida inicial; I_j es el caudal de entrada en el análisis del tránsito de almacenamiento; I_{j+1} es el caudal de entrada de la siguiente posición en el análisis del tránsito de almacenamiento y O_j es el caudal de salida en cierto intervalo de tiempo.

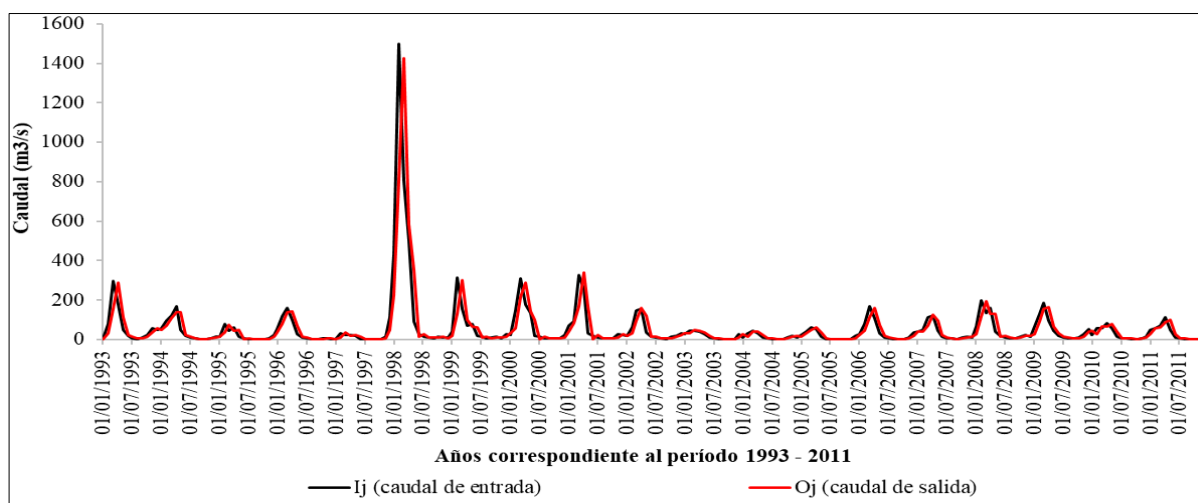


Figura 7. Tránsito de avenidas (O_j) generado para el período 1993 al 2011 con el método de Muskingum.
Elaboración propia.

En consecuencia, los caudales mostrados en la figura 7, indican que el tránsito de avenidas es muy similar al registro disponible pues muestra un caudal máximo superior a 1400 m³/s en la misma fecha del registro histórico.

Por último, al hacer la curva de volúmenes (V_j) versus la relación de “tránsito de avenida” (figura 8) para todo el registro histórico de caudales (I_j e I_{j+1}) en concordancia con los caudales de salida (O_{j+1}) se obtuvo un coeficiente de correlación de $r = 0.9998$ indicando una correlación muy alta y con respecto al coeficiente de determinación (R^2) fue de 0.9996 lo que muestra una muy buena relación de las variables analizadas en este estudio, por lo que se infiere que el método de Muskingum es el adecuado

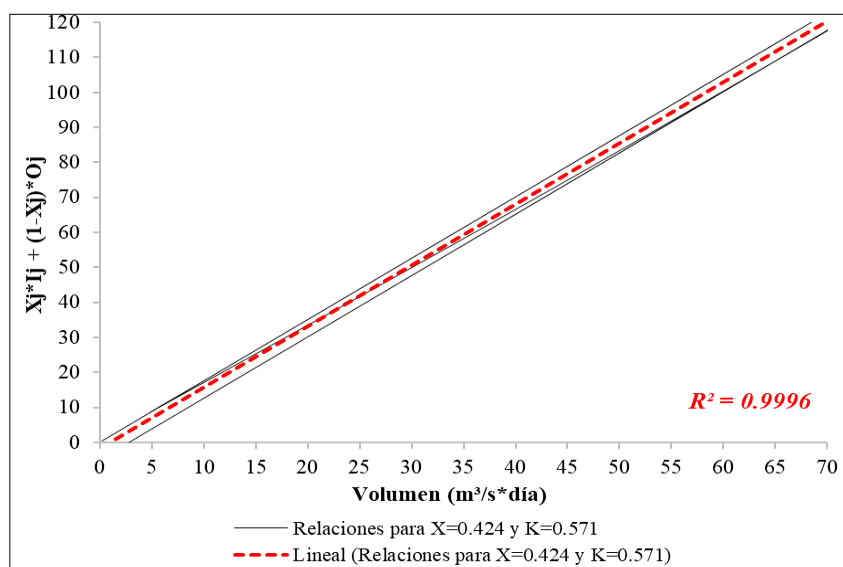


Figura 8. Relaciones de caudales de entrada (I_j), caudales de salida (O_j) y volumen (V_j) en base al método de Muskingum aplicado
Elaboración propia.

4. Discusión

Los resultados obtenidos concuerdan con lo indicado por Bhuyan *et al.* (2015) pues al igual que dicha publicación se pudo generar un hidrograma de salida, pero basado en los registros históricos disponibles de una estación hidrométrica (estación El Tambo de la cuenca Chicama) tal y como el análisis realizado por Moghaddam *et al.* (2016) pues mencionan sobre la estimación de estos parámetros que reducen significativamente la separación entre el caudal observado con el caudal estimado, pues el modelo original de Muskingum sólo emplea datos de tiempo fijo para todo el intervalo de crecida (Afzali, 2016), lo cual como se aprecian en los resultados obtenidos en la presente investigación fueron adecuados y favorables por la consideración de un solo punto de descarga, pero a diferencia de Bhuyan *et al.* (2015) si se puede generar un hidrograma de inundación no sólo con precipitaciones si no también con caudales a nivel diario concordante en ese sentido con lo estudiado por Yoo *et al.* (2017).

La diversidad de coeficientes “K” y “X” del método de Muskingum obtenidos para el período de 1993-2011 que incluyó un análisis mensual y anual con valores promedio aceptables en función al coeficiente de variación indican una adecuada concordancia a las condiciones de un tránsito hidrológico a nivel diario y mensual, así mismo en contraste los resultados de Bozorg *et al.* (2019) se deduce que mientras mas iteraciones se realicen a nivel mensual y anual de los caudales de entrada se tendrá una mejor predicción de los caudales de salida lo cual fue logrado adecuadamente quedando demostrado con la ecuación estimada en base al método de Muskingum para la estación El Tambo. Para Bazargan & Norouzi (2018) en sus resultados logrados señalan que si se utilizan valores promedio en lugar de valores constantes de “K”, “X” y “ Δt ” para los tránsitos de avenidas, la precisión del flujo de salida calculado se incrementará particularmente en la obtención caudal máximo del pico del hidrograma, tal efecto se

pudo ver en el caudal máximo deducido del tránsito de avenidas que se obtuvo para la estación El Tambo de la cuenca Chicama.

Otro aspecto relevante y que no se consideró en esta investigación fue el de evaluar los aportes hídricos hacia la zona de la estación hidrométrica sobre todo cuando se desee estimar eventos extremos con posibles inundaciones (Abbes & Meddi, 2016; Arriola *et al.*, 2020), pues es necesario la aplicación de algún modelo hidrológico del tipo lluvia-descarga con mayor cantidad de estaciones hidrométricas en la cuenca, ya que diversas investigaciones actuales indican que se requieren enfoques y modelos más rigurosos para mejorar la precisión computacional del proceso de calibración aplicando el método de Muskingum (Niazkar & Afzali, 2016); igualmente se debe tener en cuenta la contribución de flujo lateral distribuido uniformemente a lo largo del tramo de estudio (Yadav *et al.*, 2015; Karahan *et al.*, 2015; Kang *et al.*, 2017; Ayvaz & Gurarslan, 2017; Gąsiorowski & Szymkiewicz, 2020), el cual no fue evaluado debido a que no se contó con mediciones in situ como las aplicadas por la investigación de Barbetta *et al.* (2017).

5. Conclusiones

Se estimó el tránsito de avenidas el cual fue del tipo hidrológico empleando el método de Muskingum para la estación hidrométrica El Tambo de la cuenca Chicama considerando una longitud de registro de caudales a nivel diario de 19 años completos correspondiente al período 1993-2011, con lo que concluye que el método es válido para su aplicación en cuencas del norte del Perú.

Se determinó el tránsito de avenidas para la zona de estudio cuyos coeficientes promedio fueron $X_j=0.424$ y $K_j=0.571$ para una duración de 1 hora, concluyendo en que los valores promedio son estadísticamente aceptables, pues los coeficientes de variación son muy inferiores la unidad.

Se estableció el hidrograma de salida bajo un análisis de registros completos de la estación hidrométrica El Tambo empleando para ello la ecuación general del método de Muskingum basada en los caudales registrados a nivel diario y mensual, con lo que se concluye que para realizar un tránsito de avenidas de este tipo es necesario información completa, a pesar de ello se recomienda abordar investigaciones en estaciones hidrométricas con falta de datos pues las diversas publicaciones sobre el método de Muskingum indican que las aplicaciones del método en los variados campos de la hidrología son muy prometedores dentro de los cuales están la generación de caudales diarios y el análisis de extremos.

6. Referencias

- Abbes, A., & Meddi, M. (2016). Study of propagation and floods routing in north-western region of Algeria. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 6(2), 118-142. doi:<https://doi.org/10.1504/IJHST.2016.075578>
- Afzali, S. (2016). Variable-parameter Muskingum model. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 40(1), 59-68. doi:<https://doi.org/10.1007/s40996-016-0001-8>
- Akbari, R., Hessami, M., & Shojaee, S. (2020). Flood Routing: Improving outflow using a new non-linear Muskingum model with four variable parameters coupled with PSO-GA algorithm. *Water Resources Management*, 34(10), 3291-3316. doi:<https://doi.org/10.1007/s11269-020-02613-5>
- Arriola, G., Villegas, L., & Sotomayor, G. (2020). Análisis de las curvas de infiltración para determinar caudales máximos en zonas de escasa información ante eventos extremos. *Revista Científica Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 7(1). doi:<https://doi.org/10.26495/icti.v7i1.1352>
- Ayvaz, M., & Guraslan, G. (2017). A new partitioning approach for nonlinear Muskingum flood routing models with lateral flow contribution. *Journal of Hydrology*, 553, 142-159. doi:<https://www.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.050>
- Barbetta, S., Moramarco, T., & Perumal, M. (2017). A Muskingum-based methodology for river discharge estimation and rating curve development under significant lateral inflow conditions. *Journal of Hydrology*, 554, 216-232. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.022>

- Bazargan, J., & Narouzi, H. (2018). Investigation the effect of using variable values for the parameters of the linear Muskingum method using the particle swarm algorithm (PSO). *Water Resources Management*, 32(14), 4763-4777. doi:https://doi.org/10.1007/s11269-018-2082-6
- Bhuyan, M., Kumar, S., Jena, J., & Bhunya, P. (2015). Flood hydrograph with synthetic unit hydrograph routing. *Water Resources Management*, 29(15), 5765-5782. doi:https://doi.org/10.1007/s11269-015-1145-1
- Bozorg, O., Abdi, M., Hamed, F., Pazoki, M., & Loáiciga, H. (2019). Generalized storage equations for flood routing with nonlinear Muskingum models. *Water Resources Management*, 33(8), 2677-2691. doi:https://doi.org/10.1007/s11269-019-02247-2
- Bozorg, O., Mohammad, S., Hamed, F., Pazoki, M., & Loáiciga, H. (2020). Application of a new hybrid non-linear Muskingum model to flood routing. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, 173(3), 109-120. doi:https://doi.org/10.1680/jwama.19.00075
- Ehteram, M., Binti, F., Mundher, Z., Abdulmohsin, H., Falah, M., Abdul, M., . . . El-Shafie, A. (2018). Improving the Muskingum flood routing method using a hybrid of particle swarm optimization and bat algorithm. *Water*, 10(6), 1-21. doi:https://doi.org/10.3390/w10060807
- Ehteram, M., Binti, F., Mundher, Z., Abdulmohsin, H., Falah, M., Bt. Abdul, M., . . . El-Shafie, A. (2018). Improving the Muskingum flood routing method using a hybrid of particle swarm optimization and bat algorithm. *Water*, 10(6), 1-21. doi:https://doi.org/10.3390/w10060807
- Farahani, N., Karami, H., Farzin, S., Ehteram, M., Kisi, O., & El Shaife, A. (2019). A new method for flood routing utilizing four-parameter nonlinear Muskingum and Shark algorithm. *Water Resources Management*, 33(14), 4879-4893. doi:https://doi.org/10.1007/s11269-019-02409-2
- Farzin, S., Singh, V., Karami, H., Farahani, N., Ehteram, M., Kisi, O., . . . El-Shafie, A. (2018). Flood routing in river reaches using a three-parameter Muskingum model coupled with an Improved Bat Algorithm. *Water*, 10(9), 1-24. doi:https://doi.org/10.3390/w10091130
- Fassoni-Andrade, A., Mainardi, F., Collischonn, W., Fassoni, A., & Dias, R. (2018). Comparison of numerical schemes of river flood routing with an inertial approximation of the Saint Venant equations. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 23(10). doi:https://doi.org/10.1590/2318-0331.0318170069
- Fenton, J. (2019). Flood routing methods. *Journal of Hydrology*, 570, 251-264. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.006
- Gąsiorowski, D., & Szymkiewicz, R. (2018). Dimensionally consistent nonlinear Muskingum equation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23(9). doi:https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001691
- Gąsiorowski, D., & Szymkiewicz, R. (2020). Identification of parameters influencing the accuracy of the solution of the nonlinear Muskingum equation. *Water Resources Management*, 34, 3147-3164. doi:https://doi.org/10.1007/s11269-020-02599-0
- Haddad, O., Hamed, F., Fallah, E., Orouji, H., & Mariño, M. (2015). Application of a hybrid optimization method in Muskingum parameter estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(2). doi:https://www.doi.org/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0000929
- Hamed, F., Bozorg, O., Pazoki, M., Asgari, H., Parsa, M., & Loáiciga, H. (2016). Parameter estimation of extended nonlinear Muskingum models with the weed optimization algorithm. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(12). doi:http://doi.org/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0001095
- Hernández, J., & Martínez, S. (2019). Tránsito de avenidas en vasos: ¿hidrológico o hidráulico? *Tecnología y Ciencias del Agua*, 10(6), 147-177. doi:https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-06-06
- Hirpurkar, P., & Ghare, A. (2015). Parameter estimation for the nonlinear forms of the Muskingum model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(8). doi:http://doi.org/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001122
- Kang, L., Zhou, L., & Zhang, S. (2017). Parameter estimation of two improved nonlinear Muskingum models considering the lateral flow using a hybrid algorithm. *Water Resources Management*, 31(14), 4449-4467. doi:https://doi.org/10.1007/s11269-017-1758-7
- Karahan, H., Guraslan, G., & Geem, Z. (2015). A new nonlinear Muskingum flood routing model incorporating lateral flow. *Engineering Optimization*, 47(6), 737-749. doi:https://doi.org/10.1080/0305215X.2014.918115

- Khalifeh, S., Esmaili, K., Khodashenas, S., & Khalifeh, V. (2020). Estimation of nonlinear parameters of the type 5 Muskingum model using SOS algorithm. *MethodsX*, 7. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101040>
- Lee, E., Lee, H., & Kim, J. (2018). Development and application of advanced Muskingum flood routing model considering continuous flow. *Water*, 10(6), 760. doi:<https://doi.org/10.3390/w10060760>
- Moghaddam, A., Behmanesh, J., & Farsijani, A. (2016). Parameters estimation for the new four-parameter nonlinear Muskingum model using the particle swarm optimization. *Water Resources Management*, 30(7), 2143-2160. doi:<https://doi.org/10.1007/s11269-016-1278-x>
- Niazkar, M., & Afzali, S. (2016). Application of new hybrid optimization technique for parameter estimation of new improved version of Muskingum model. *Water Resources Management*, 30(13), 4713-4730. doi:<https://doi.org/10.1007/s11269-016-1449-9>
- Niazkar, M., & Afzali, S. (2017). New nonlinear variable-parameter Muskingum models. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 21(7), 2958-2967. doi:<https://doi.org/10.1007/s12205-017-0652-4>
- Norouzi, H., & Bazargan, J. (2020). Flood routing by linear Muskingum method using two basic floods data using particle swarm optimization (PSO) algorithm. *Water Science and Technology: Water Supply*, 20(5), 1897-1908. doi:<https://doi.org/10.2166/ws.2020.099>
- Ouyang, A., Liu, L.-B., Sheng, Z., & Wu, F. (2015). A Class of parameter estimation methods for nonlinear Muskingum model using hybrid invasive weed optimization algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 15. doi:<https://doi.org/10.1155/2015/573894>
- Pazos, M., & Mayorga, D. (2019). *Hidrología agrícola* (Primera ed.). Babahoyo, Ecuador: Centro de Investigación y Desarrollo Profesional (CIDEPRO). doi:<https://doi.org/10.29018/978-9942-823-20-5>
- Perumal, M., Tayfur, G., Rao, C., & Gurarlan, G. (2017). Evaluation of a physically based quasi-linear and a conceptually based nonlinear Muskingum methods. *Journal of Hydrology*, 546, 437-449. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.025>
- Reggiani, P., Todini, E., & Meißner, D. (2016). On mass and momentum conservation in the variable-parameter Muskingum method. *Journal of Hydrology*, 543(Part B), 562-576. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.10.030>
- SENAMHI. (2020). *Condiciones deficitarias en la cuenca Chicama durante el año hidrológico 2019-2020*. Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Obtenido de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02662SENA-5.pdf>
- Vatankhah, A. (2017). Non-linear Muskingum model with inflowbased exponent. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, 170(2), 66-80. doi:<https://doi.org/10.1680/jwama.14.00130>
- Yadav, B., Perumal, M., & Bardossy, A. (2015). Variable parameter McCarthy- Muskingum routing method considering lateral flow. *Journal of Hydrology*, 523, 489-499. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.068>
- Yang, W., Wang, J., Sui, J., Zhang, F., & Zhang, B. (2019). A modified Muskingum flow routing model for flood wave propagation. *Water Resources Management*, 33(14), 4865-4878. doi:<https://doi.org/10.1007/s11269-019-02412-7>
- Yoo, C., Lee, J., & Lee, M. (2017). Parameter estimation of the Muskingum channel flood - routing model in ungauged channel reaches. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(7). doi:<http://doi.org/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001507>
- Yuan, X., Wu, X., Tian, H., Yuan, Y., & Adnan, R. (2016). Parameter identification of nonlinear Muskingum model with backtracking search algorithm. *Water Resources Management*, 30(8), 2767-2783. doi:<https://doi.org/10.1007/s11269-016-1321-y>
- Zang, S., Li, Z., Yao, C., Zhang, K., Sun, M., & Kong, X. (2020). A new runoff routing scheme for Xin'anjiang model and its routing parameters estimation based on geographical information. *Water*, 12(12), 3429. doi:<https://doi.org/10.3390/w12123429>
- Zhang, G., Xie, T., Zhang, L., Hua, X., Wu, C., Chen, X., . . . Zhao, B. (2017). "In-Process Type" dynamic Muskingum model parameter estimation method. *Water*, 9(11), 849. doi:<https://doi.org/10.3390/w9110849>

ARRIOLA, G., VILLEGAS, L., ARBULÚ, J. y SOTOMAYOR, G. Estimación del tránsito de avenidas empleando el método de Muskingum en la estación El Tambo de la cuenca Chicama, Perú. *Rev. INGENIERÍA: Ciencia, Tecnología e Innovación*. Agosto-Diciembre 2021. Vol. 8/No. 2, pp. 15-29. ISSN: 2313-1926, versión electrónica.

Zhang, S., Kang, L., Zhou, L., & Guo, X. (2017). A new modified nonlinear Muskingum model and its parameter estimation using the adaptive genetic algorithm. *Hydrology Research*, 48(1), 17-27. doi:<https://doi.org/10.2166/nh.2016.185>