

Estimación de caudales en la cuenca media del Río Magdalena empleando el método de transposición de caudales

Estimation of flows in the middle basin of the Magdalena River using the method of flow transposition

Eduardo Zamudio H.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
fgonzalezc@udistrital.edu.co

Laura M. Moreno S.
Interdico
lmmorenos@correo.udistrital.edu.co

Fredy D. Duitama R.
Sedam Consultores
fdduitamar@correo.udistrital.edu.co

Esta investigación plantea modelos que permiten obtener información del cauce sin programas de medición, de una forma rápida y eficiente asociado a los datos obtenidos entre diferentes estaciones hidrológicas suministradas por el Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), para transferir datos mensuales o diarios de caudal de un sitio aforado a uno sin aforar, lo cual permite generar y calibrar un modelo de equilibrio hidrológico sin la necesidad de implementar nuevas estaciones en los puntos sin aforo, con base en las áreas de drenaje.

Palabras clave: Caudal, estimación, transposición de caudal

This research propose models to get information of the channel without programs of measuring, quickly and efficiently associate data obtained from different hydrological stations supplied by the Institute of Hydrology and Meteorology and Environmental Studies (IDEAM), for transfer monthly or daily streamflow data from a place with information to another that does not have it, allowing generate and calibrate a balance hidrological model without the necessity of implement new stations on the point which does not have the information, based on drainage areas.

Keywords: Estimation, Flow, flow transposition

Tipología del artículo: Investigación

Fecha recepción del manuscrito: Octubre 10, 2014

Fecha aceptación del manuscrito: Noviembre 3, 2014

Investigación financiada por: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Edición digital: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/748>

Cómo citar: Duitama, F., Moreno, L. y Zamudio, E. (2015). *Estimación de caudales en la cuenca media del Río Magdalena empleando el método de transposición de caudales*. Revista Tekhnê, 12(1), 39-48.

Introducción

Según la procuraduría delegada para asuntos ambientales y agrarios se describe lo siguiente respecto al Río Magdalena el cual *es conocido como la principal arteria fluvial de Colombia, debido a que comprende el 49% de la población colombiana, contempla una dinámica social, económica y ambiental en torno al territorio que lo rodea; además por su gran caudal circundante* (Procuraduría, 2013). Dada las potencialidades de la cuenca, los asentamientos humanos se han establecido en las periferias causando un impacto ambiental, que incrementa la vulnerabilidad de las poblaciones y genera amenazas de desastres naturales. Además, se muestra la falta de planeación, como lo indica la procuraduría general de la nación en la publicación: Río Magdalena Informe social, económico y ambiental del día 18 de octubre de 2013:

... la procuraduría ha identificado la existencia de planes y programas, de nivel central y territorial, que han encaminado esfuerzos para afrontar algunas problemáticas identificadas al interior de la cuenca, pero no han repercutido en una escala mayor, debido a que los esfuerzos son aislados, no coordinados y discontinuos en el tiempo...

Motivo por el cual el semillero de investigación UDENS, adscrito a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, promueve los proyectos de investigación en pro de la gestión de recursos de agua en la cuenca media del Río Magdalena. Para tal fin se desarrolla un proyecto de recursos hídricos que plantea modelos que permiten obtener información del cauce sin programas de medición, de una forma rápida y eficiente asociado a los datos obtenidos entre diferentes estaciones hidrológicas suministradas por el Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), para transferir datos mensuales o diarios de caudal de un sitio aforado a uno sin aforar, lo cual permite generar y calibrar un modelo de equilibrio hidrológico sin la necesidad de implementar nuevas estaciones en los puntos sin aforo.

La investigación que se desarrolla se basa en la importancia de establecer caudales en la cuenca media del Río Magdalena, en primera instancia para la planificación de proyectos de abastecimiento de agua con distintos fines. Esto se hace necesario tanto en su diseño como para la seguridad de los mismos sistemas, en la planificación del uso de la tierra, es importante para realizar balances hídricos y determinar la disponibilidad del agua. Además, en los proyectos hidroeléctricos son imprescindibles estos datos, ya que sin el pleno conocimiento de la disponibilidad de agua, no es posible realizar diseños de embalses, establecer problemáticas de sedimentos tanto en diseño como en ejecución de obras para mejoramiento de cuencas.

Para poder simular el comportamiento del cauce, el desarrollo de modelos matemáticos y físicos son de gran importancia, dado que al modelar ciertos fenómenos naturales se pueden crear ecuaciones para predecir su comportamiento. Por lo tanto, la presente investigación consiste en la construcción de un modelo basado en la aplicación de los métodos de transferencia de caudales (Mohamoud y Parmar, 2006), en función del área de drenaje de las estaciones disponibles en la red hidrológica, y los puntos donde no se cuente con estaciones de aforo. Partiendo de las ecuaciones convencionales que se aplican en variedad de canales, tales como la ecuación de Manning y las de transferencia de caudales, se hace necesario precisar la efectividad de estas al momento de implementarlas en un espacio geográfico determinado, como lo es la cuenca media del Río Magdalena, donde se aplica la metodología de las ecuaciones de transferencia empleadas en la investigación desarrollada en la región del medio atlántico EE.UU. estudiadas por Yusuf M. Mohamoud y Rajbir S. Parmar para determinación de caudales, con el fin de verificar si este método puede ser aplicado en la cuenca a estudio.

La zona a estudio se limita a la región comprendida desde Honda hasta el Banco (IDEAM-CORMAGDALENA, 2001), con información de doce estaciones hidrológicas distribuidas en la cuenca, suministrada por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales): Arrancaplumas (2123702), Puerto Salgar (2303701), La Vega (2403712), San Rafael (2403709), La Resaca (2403711), El Molino (2403745), Puerto Colonial (2403730), San Gil (2402701), Guican (2403704), Puente Llano (2402705), Puente la Paz (2406703) y Café Madrid (2319729), con las cuales se plantea el modelo de transferencia de caudales para puntos de control que no cuentan con estaciones de aforo en la región. Los resultados obtenidos demuestran un buen comportamiento para sub-cuencas con características fisiográficas similares, que son analizadas mediante los hidrogramas de caudal específico, con lo cual se evidencia que no es imprescindible su ubicación geográfica en el mismo afluente para poder emplear el método de transferencia de caudales en la cuenca media del Río Magdalena.

Desarrollo del método de transposición de caudales en la cuenca media del Río Magdalena

Procedimiento metodológico

Para el desarrollo de la propuesta se aplica la metodología de una investigación experimental dado que su objetivo es explicar la relación entre dos o más variables, donde se modifica intencionalmente el estado de la variable independiente que se desea evaluar, al tomar dos grupos de estudio uno experimental y otro de control.

La información será analizada por medio de un estudio exploratorio de los datos, con el objeto de determinar las ecuaciones de transferencias de caudales para cada una de las estaciones, con base en información suministrada por el IDEAM, la cual será validada por parámetros estadísticos, donde se realizarán regresiones de tipo lineal y potencial que predicen el comportamiento hidrológico de las cuencas y serán validadas por medio de correlaciones estadísticas e hidrológicas de t (Tiempo) y F (Frecuencia).

El método a emplear de transferencia de caudales mensuales y diarios en las zonas no medidas por estaciones hidrológicas es el siguiente:

- Localización geográfica de las 12 estaciones hidrológicas tomadas para el presente estudio dentro de la cuenca media del Río Magdalena.
- Cálculo de las ecuaciones de transferencia de caudales entre las distintas estaciones, al suponer datos no conocidos en alguna de ellas.
- Validación de la información por medio de coeficientes de correlación para caudales medios y coeficiente de NSE para caudales medios diarios.
- Limitar las ecuaciones de transferencia de caudales en función del área de drenaje.

Logrando así obtener la información en donde la red hidrométrica no cuenta con puntos de control.

Identificación y descripción de las estaciones a estudio

La información corresponde a los caudales mensuales máximos, medios, mínimos y medios diarios desde el año 1934 hasta el 2013, de doce estaciones hidrológicas distribuidas en la cuenca a estudio como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1

Resumen de las estaciones hidrológicas.

ESTACIONES HIDROLÓGICAS									
No.	CODIGO	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	ÁREA DE DRENAJE (km ²)	LATITUD	LONGITUD	ALTURA (m.s.n.m)	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	CORRIENTE
1	2123702	Arancaplumas	54.359	5°12' N	74°43' W	203	TOLIMA	HONDA	MAGDALENA
2	2303701	Puerto Salgar	56.905	5°28' N	74°38' W	172	CUNDINAMARCA	PUERTO SALGAR	MAGDALENA
3	2403712	La Vega	287	5°35' N	72°59' W	2575	BOYACÁ	CUITIVA	IZA
4	2403709	San Rafael	347	5°42' N	73°14' W	2500	BOYACÁ	TUTA	CHULO
5	2403711	La resaca	557	5°40' N	75°59' W	2520	BOYACÁ	PIRAVTOBA	CHUQUITO
6	2403745	El Molino	54	5°43' N	73°07' W	2539	BOYACÁ	PAIPA	SALTIRE
7	2403730	Puerto Colonial	47	5°43' N	72°50' W	2909	BOYACÁ	MONGUI	MONGUI
8	2402701	San Gil	1.849	6°32' N	73°07' W	1113	SANTANDER	SAN GIL	FONCE
9	2403704	Guicán	138	6°27' N	72°25' W	2600	BOYACÁ	GUICÁN	NEVADO
10	2402705	Pie Itano	199	6°17' N	73°07' W	1400	SANTANDER	CHARALA	TÁQUIZA
11	2406703	Pie la paz	21.513	7°06' N	73°25' W	239	SANTANDER	BETULIA	SOGAMOSO
12	2319729	Café Madrid	2.148	7°09' N	73°08' W	600	SANTANDER	GIRÓN	LEBRUJA

Resumen de los caudales mensuales y diarios y descripción del cálculo de hidrogramas de caudal específico

Con base en la información se presenta el promedio aritmético de los caudales mensuales multianuales para cada una de las estaciones en función de: el tiempo, área de drenaje y clasificación del flujo (Máximo, medio, mínimo y medios diarios).

Luego de elaborar las gráficas de los caudales multianuales, se procede a calcular los hidrogramas de caudal específico para cada uno de los cuatro casos a estudio: mínimos, medios y máximos mensuales, y medios diarios respectivamente. Para poder elaborar esta gráfica, se procede a hallar un caudal específico donde se divide el valor del caudal promedio multianual hallado, sobre el área de la estación a estudio.

Estimación de caudales mensuales y diarios usando el método de transferencia

Este método se emplea principalmente con parámetros adimensionales que tengan variables a transferir, lo cual está determinado principalmente por relaciones que incluyen la escurrentía y el área de la cuenca. Este método transfiere información y genera una relación entre el área, caudales y precipitaciones de la cuenca. Se aplica en cuencas donde se tenga información conocida y en zonas donde no se cuente con estos datos, las relaciones son las mostradas en la Ecu. 1 (Esquivel et al., 2013).

$$\frac{Q_c}{A_c P_c} = \frac{Q_s}{A_s P_s} \quad (1)$$

Al considerar que las precipitaciones son homogéneas dentro de la misma cuenca, se obtiene la Ecu. 2.

$$Q_s = Q_c \left(\frac{A_s}{A_c} \right)^n \quad (2)$$

Donde:

- Q_s = caudal de la cuenca sin información (m³/s).
- Q_c = caudal de la cuenca con información (m³/s).
- A_s = Área de la cuenca sin información (km²)
- A_c = Área de la cuenca con información (km²)
- n = Coeficiente de calibración para el caso general

corresponde a 1.

Complementando la información con otras ecuaciones que también son aplicables en los métodos de transferencia, en donde no se tiene en cuenta los datos de precipitación (Ecu. 3, 4 y 5).

$$Q_u = Q_g \left(\frac{A_u}{A_g} \right) \quad (3)$$

$$Q_u = Q_g \arctan \left(\frac{A_u}{A_g} \right) \quad (4)$$

$$Q_u = Q_g \tan \left(\frac{A_u}{A_g} \right) \quad (5)$$

Teniendo en cuenta que las Ecu. 3, 4 y 5 corresponden a los modelos hidrológicos tradicionales y que la Ecu. 2 complementa la ecuación Ecu. 3, al considerar un exponente n en la relación de áreas.

$$Q_s = Q_c \times \left(\frac{A_s}{A_c}\right)^n \quad (6)$$

Y empleando logaritmo natural en ambos lados de la expresión se obtiene el coeficiente n :

$$n = \frac{\ln\left(\frac{Q_s}{Q_c}\right)}{\ln\left(\frac{A_s}{A_c}\right)} \quad (7)$$

Con base en las ecuaciones se emplea el siguiente procedimiento para cada una de las estaciones:

1. Seleccionar una de las estaciones (tabla 1), que se considere como estación conocida.
2. Ubicar la red de estaciones hidrológicas en planimetría e identificar la estación a estudio.
3. Identificar una segunda estación (tabla 1), distinta a la conocida y determinar, el coeficiente n , con la Ecu. 7.
4. Suponer que no se dispone del volumen de agua por unidad de tiempo en la segunda estación.
5. Interpolarse el caudal de la estación desconocida por medio de las Ecu. 2, 3, 4 y 5 con base en los datos de la estación conocida.
6. Calcular el error relativo y el coeficiente de correlación lineal para los caudales mensuales y coeficientes de correlación de Nash Sutcliffe para caudales diarios.

Matriz de resumen para los exponentes n y los coeficientes de correlación

De modo análogo al numeral anterior, se desarrollan en las demás estaciones el procedimiento, exponentes para la Ecu. 2, los coeficientes de correlación lineal para los caudales: mínimos, medios y máximos mensuales, y el coeficiente NSE para caudales medios diarios (tabla 2).

Tabla 2

Diagrama explicativo para matriz de resumen de n .

RESUMEN DE "N PROMEDIO MULTIANUAL"												
CAUDALES	HACIA											
	Arrancaplumas	Puerto Salgar	La Vega	San Rafael	La resaca	El Molino	Puerto Colonial	San Gil	Gulcan	Pte llano	Pte la paz	Café Madrid
Arrancaplumas												
Puerto Salgar	ZONA I						ZONA II					
La Vega												
San Rafael												
La resaca												
El Molino												
Puerto Colonial												
San Gil	ZONA IV						ZONA III					
Gulcan												
Pte llano												
Pte la paz												
Café Madrid												

La tabla 2 sectoriza las estaciones en 4 zonas, relacionadas con su ubicación geográfica, donde:

- Zona I: Corresponde a las estaciones Arrancaplumas y Puerto Salgar pertenecientes a la cuenca media del Río Magdalena, y que pertenecen al afluente principal.
- Zona II: Transferencia de caudales de la Zona I hacia las demás estaciones que no pertenecen al afluente principal, es decir, las estaciones pertenecientes a la Zona IV.

- Zona III: Corresponde a las estaciones pertenecientes a la cuenca media del Magdalena-Cauca y pertenecientes a las corrientes de: Iza, Chulo, Chiquito, Salitre, Mongiui, Fonce, Nevado, Taquiza, Sogamoso y Lebrija.
- Zona IV: Transferencia de caudales de la Zona III hacia las estaciones de la Zona I.

Para la lectura apropiada de la matriz del coeficiente de correlación lineal o de Nash (tabla 3) se recomienda seguir los siguientes pasos:

Tabla 3

Diagrama explicativo para tabla de resumen del coeficientes de correlación.

RESUMEN DE COEFICIENTE DE CORRELACION												
CAUDALES	HACIA											
	Arrancaplumas	Puerto Salgar	La Vega	San Rafael	La resaca	El Molino	Puerto Colonial	San Gil	Gulcan	Pte llano	Pte la paz	Café Madrid
Arrancaplumas												
Puerto Salgar												
La Vega												
San Rafael												
La resaca												
El Molino												
Puerto Colonial												
San Gil												
Gulcan												
Pte llano												
Pte la paz												
Café Madrid												

TABLA DE VALOR- COEFICIENTE DE CORRELACION LINEAL	
	Excelente
	Buena
	Aceptable
	Regular
	Inaceptable

1. Su lectura se realiza de izquierda a derecha, y de abajo hacia arriba como se indica con las flechas en la tabla.

2. El valor determinado al interceptar la fila y la columna es único para cada celda, de tal modo que para conocer el coeficiente de un valor siempre tiene que hacerse del modo expreso en el paso 1.

3. La tabla de valor indica un rango de cinco colores, los cuales indican que tan confiable es la transposición de una estación a otra, en función del coeficiente de correlación lineal para caudales mensuales y el coeficiente de NSE (*Nash Sutcliffe Efficiency*) para caudales medios diarios.

En las tablas 4 a 11 se resumen los coeficientes n calculados mediante el procedimiento expuesto con anterioridad y sus coeficientes de correlación con los datos suministrados por el IDEAM, al realizar la transferencia de caudales de una estación a otra.

Tabla 4

Matriz resumen del coeficiente n para caudales mínimos mensuales.

RESUMEN DE "N PROMEDIO MULTIANUAL"												
CAUDALES MÍNIMOS MENSUALES	HACIA											
	Arrancaplumas	Puerto Salgar	La Vega	San Rafael	La resaca	El Molino	Puerto Colonial	San Gil	Gulcan	Pte llano	Pte la paz	Café Madrid
Arrancaplumas												
Puerto Salgar	4.66											
La Vega	1.58	1.61										
San Rafael	1.48	1.51	4.20									
La resaca	1.66	1.69	0.99	-0.30								
El Molino	1.33	1.37	0.64	1.01	0.74							
Puerto Colonial	1.13	1.15	-0.18	0.24	0.13	-10.09						
San Gil	0.85	0.90	2.90	2.73	3.90	1.83	1.38					
Gulcan	0.96	0.99	-3.45	-1.87	-1.34	3.83	2.04	1.11				
Pte llano	0.72	0.75	-11.66	-6.21	-3.49	4.08	2.72	0.52	4.71			
Pte la paz	1.39	1.51	1.62	1.51	1.73	1.35	1.09	0.69	0.89	0.60		
Café Madrid	1.34	1.39	1.96	1.73	2.44	1.36	0.95	-9.75	0.52	-0.13	1.33	

Tabla 5
Resumen del coeficiente de correlación lineal para caudales mínimos mensuales.

CAUDALES MÍNIMOS MENSUALES		RESUMEN DE "COEFICIENTE DE CORRELACIÓN"											
		HACIA											
		Arrancapulumas	Puerto Salgar	La Vega	San Rafael	La resaca	El Molino	Puerto Colonial	San Gil	Guicán	Pte llano	Pte la paz	Café Madrid
Arrancapulumas		0.99	0.97	0.97	0.67	0.38	0.61	-0.19	0.68	0.72	0.59	0.60	0.63
Puerto Salgar		0.97	0.92	0.71	0.38	0.67	0.13	0.78	0.72	0.70	0.67	0.67	0.63
La Vega		0.97	0.71	0.38	0.38	0.67	0.13	0.78	0.72	0.70	0.67	0.67	0.63
San Rafael		0.67	0.31	0.51	0.20	0.52	0.22	0.75	0.73	0.54	0.81	0.22	0.22
La resaca		0.38	0.38	0.90	0.70	0.20	0.15	0.60	0.44	0.79	0.30	0.67	0.45
El Molino		0.61	0.69	0.08	0.52	0.33	0.00	0.00	0.44	0.30	0.83	0.52	0.69
Puerto Colonial		0.19	0.13	0.83	0.22	0.60	0.00	0.00	0.05	0.51	0.01	0.12	0.04
San Gil		0.68	0.78	0.28	0.75	0.44	0.71	0.88	0.57	0.87	0.92	0.88	0.88
Guicán		0.72	0.69	0.81	0.70	0.79	0.88	0.51	0.57	0.29	0.71	0.54	0.54
Pte llano		0.59	0.70	0.04	0.54	0.34	0.83	0.01	0.87	0.29	0.67	0.78	0.78
Pte la paz		0.60	0.67	0.47	0.81	0.67	0.52	0.14	0.92	0.71	0.67	0.80	0.80
Café Madrid		0.63	0.71	0.25	0.85	0.45	0.69	0.01	0.88	0.54	0.78	0.80	0.80

Tabla 6
Matriz resumen del coeficiente n para caudales medios mensuales.

CAUDALES MEDIOS MENSUALES		RESUMEN DE "N PROMEDIO MULTIANUAL"											
		HACIA											
		Arrancapulumas	Puerto Salgar	La Vega	San Rafael	La resaca	El Molino	Puerto Colonial	San Gil	Guicán	Pte llano	Pte la paz	Café Madrid
Arrancapulumas		4.09	1.47	1.38	1.48	1.27	1.03	0.81	0.96	0.71	1.16	1.33	1.33
Puerto Salgar		4.05	1.30	1.41	1.51	1.29	1.06	0.86	0.98	0.73	1.26	1.37	1.37
La Vega		1.47	1.30	0.63	3.88	1.40	0.63	-0.21	2.66	-2.72	-10.30	1.54	1.70
San Rafael		1.38	1.41	3.69	0.41	0.70	0.18	2.53	-1.39	-5.46	1.43	1.47	1.47
La resaca		1.48	1.31	1.40	0.41	0.85	0.22	3.30	-0.74	-2.74	1.56	1.84	1.84
El Molino		1.27	1.29	0.63	0.97	0.85	-10.33	1.70	3.25	3.70	1.28	1.22	1.22
Puerto Colonial		1.04	1.04	-0.21	0.18	0.22	-10.33	1.25	1.50	2.35	1.02	0.80	0.80
San Gil		0.82	0.84	2.66	2.53	3.36	1.70	1.25	1.15	0.33	0.69	-10.31	-10.31
Guicán		0.96	0.98	-2.72	-1.38	-0.76	3.25	1.50	1.15	0.87	0.92	0.52	0.52
Pte llano		0.70	0.73	-10.33	-9.46	-22.76	3.70	2.51	0.53	4.87	0.61	-0.15	-0.15
Pte la paz		1.16	1.33	1.33	1.43	1.55	1.28	1.02	0.70	0.92	0.62	1.40	1.40
Café Madrid		1.33	1.37	1.70	1.47	1.84	1.22	0.80	-10.31	0.52	-0.15	1.40	1.40

Tabla 7
Resumen del coeficiente de correlación lineal para caudales medios mensuales.

CAUDALES MEDIOS MENSUALES		RESUMEN DE "COEFICIENTE DE CORRELACIÓN"											
		HACIA											
		Arrancapulumas	Puerto Salgar	La Vega	San Rafael	La resaca	El Molino	Puerto Colonial	San Gil	Guicán	Pte llano	Pte la paz	Café Madrid
Arrancapulumas		0.99	0.97	0.97	0.67	0.38	0.61	-0.19	0.68	0.72	0.59	0.60	0.63
Puerto Salgar		0.97	0.92	0.71	0.38	0.67	0.13	0.78	0.72	0.70	0.67	0.67	0.63
La Vega		0.97	0.71	0.38	0.38	0.67	0.13	0.78	0.72	0.70	0.67	0.67	0.63
San Rafael		0.67	0.31	0.51	0.20	0.52	0.22	0.75	0.73	0.54	0.81	0.22	0.22
La resaca		0.38	0.38	0.90	0.70	0.20	0.15	0.60	0.44	0.79	0.30	0.67	0.45
El Molino		0.61	0.69	0.08	0.52	0.33	0.00	0.00	0.44	0.30	0.83	0.52	0.69
Puerto Colonial		0.19	0.13	0.83	0.22	0.60	0.00	0.00	0.05	0.51	0.01	0.12	0.04
San Gil		0.68	0.78	0.28	0.75	0.44	0.71	0.88	0.57	0.87	0.92	0.88	0.88
Guicán		0.72	0.69	0.81	0.70	0.79	0.88	0.51	0.57	0.29	0.71	0.54	0.54
Pte llano		0.59	0.70	0.04	0.54	0.34	0.83	0.01	0.87	0.29	0.67	0.78	0.78
Pte la paz		0.60	0.67	0.47	0.81	0.67	0.52	0.14	0.92	0.71	0.67	0.80	0.80
Café Madrid		0.63	0.71	0.25	0.85	0.45	0.69	0.01	0.88	0.54	0.78	0.80	0.80

Tabla 8
Matriz resumen del coeficiente n para caudales máximos mensuales.

CAUDALES MÁXIMOS MENSUALES		RESUMEN DE "N PROMEDIO MULTIANUAL"											
		HACIA											
		Arrancapulumas	Puerto Salgar	La Vega	San Rafael	La resaca	El Molino	Puerto Colonial	San Gil	Guicán	Pte llano	Pte la paz	Café Madrid
Arrancapulumas		4.00	1.23	1.30	1.28	1.12	0.88	0.59	0.89	0.53	0.78	1.10	1.10
Puerto Salgar		4.00	1.25	1.33	1.31	1.13	0.92	0.64	0.91	0.55	0.87	1.15	1.15
La Vega		1.23	1.25	0.80	0.84	0.77	-0.03	2.36	-1.54	-9.48	1.32	1.42	1.42
San Rafael		1.30	1.33	-0.80	1.50	0.61	-0.10	2.72	-1.39	-6.52	1.42	1.65	1.65
La resaca		1.28	1.31	0.94	1.50	0.79	0.20	3.20	-0.41	-2.83	1.43	1.76	1.76
El Molino		1.12	1.13	0.77	0.61	0.79	-9.71	1.61	2.38	3.65	1.18	1.13	1.13
Puerto Colonial		0.90	0.92	-0.03	-0.10	0.20	-9.71	1.18	1.00	2.37	0.92	0.73	0.73
San Gil		0.60	0.64	2.36	2.72	3.20	1.61	1.18	1.26	0.42	0.54	-10.33	-10.33
Guicán		0.89	0.91	-1.54	-1.39	-0.41	2.38	1.00	1.26	0.40	0.91	0.63	0.63
Pte llano		0.53	0.55	-9.48	-6.52	-2.83	3.65	2.37	0.42	6.40	0.48	0.48	-0.26
Pte la paz		0.78	0.92	1.30	1.42	1.39	1.18	0.91	0.54	0.90	0.48	0.48	1.24
Café Madrid		1.10	1.15	1.42	1.65	1.70	1.13	0.73	-10.33	0.63	-0.26	1.24	1.24

Al analizar las matrices se tienen las siguientes apreciaciones para cada zona al considerar los caudales mínimos, medios, máximos mensuales y medios diarios:

Tabla 9
Resumen del coeficiente de correlación lineal para caudales máximos mensuales.

CAUDALES MÁXIMOS MENSUALES		RESUMEN DE "COEFICIENTE DE CORRELACIÓN"											
		HACIA											
		Arrancapulumas	Puerto Salgar	La Vega	San Rafael	La resaca	El Molino	Puerto Colonial	San Gil	Guicán	Pte llano	Pte la paz	Café Madrid
Arrancapulumas		0.98	0.98	0.49	0.73	0.58	0.70	0.13	0.62	0.54	0.64	0.64	0.28
Puerto Salgar		0.98	0.98	0.40	0.67	0.48	0.73	0.07	0.62	0.54	0.58	0.61	0.28
La Vega		0.49	0.40	0.67	0.57	0.90	0.37	0.30	0.54	0.54	0.64	0.47	0.14
San Rafael		0.73	0.67	0.57	0.53	0.72	0.24	0.64	0.64	0.83	0.74	0.57	0.38
La resaca		0.58	0.48	0.90	0.70	0.72	0.30	0.56	0.48	0.74	0.25	0.65	0.20
El Molino		0.70	0.73	0.31	0.60	0.37	0.00	0.48	0.40	0.81	0.70	0.57	0.57
Puerto Colonial		0.13	0.07	0.57	0.15	0.56	0.00	0.01	0.40	0.40	0.09	0.01	0.01
San Gil		0.62	0.62	0.33	0.83	0.48	0.77	0.01	0.57	0.89	0.94	0.79	0.79
Guicán		0.54	0.47	0.84	0.74	0.95	0.43	0.40	0.57	0.30	0.73	0.29	0.29
Pte llano		0.53	0.58	0.44	0.59	0.23	0.88	0.88	0.89	0.33	0.33	0.73	0.73
Pte la paz		0.64	0.61	0.47	0.74	0.65	0.70	0.09	0.94	0.73	0.73	0.70	0.70
Café Madrid		0.28	0.30	0.14	0.40	0.20	0.54	0.01	0.79	0.29	0.76	0.70	0.70

Tabla 10
Matriz resumen del coeficiente n para caudales medios diarios.

CAUDALES MEDIOS DIARIOS		RESUMEN DE "N PROMEDIO MULTIANUAL"											
		HACIA											
		Arrancapulumas	Puerto Salgar	La Vega	San Rafael	La resaca	El Molino	Puerto Colonial	San Gil	Guicán	Pte llano	Pte la paz	Café Madrid
Arrancapulumas		4.07	1.48	1.30	1.41	1.51	1.30	1.06	0.86	0.98	0.73	1.29	1.33
Puerto Salgar		4.07	1.30	1.41	1.51	1.30	1.06	0.86	0.98	0.73	1.29	1.37	1.37
La Vega		1.48	1.30	0.63	3.87	1.42	0.66	-0.22	2.69	-2.79	-10.41	1.55	1.72
San Rafael		1.39	1.41	3.67	0.43	0.79	0.17	2.55	-1.41	-5.13	1.41	1.50	1.50
La resaca		1.49	1.31	1.42	0.43	0.88	0.22	3.39	-0.79	-2.79	1.57	1.87	1.87
El Molino		1.28	1.30	0.66	0.99	0.88	-10.90	1.73	3.35	3.77	1.30	1.24	1.24
Puerto Colonial		1.04	1.04	-0.22	0.17	0.22	-10.90	1.25	1.52	2.36	1.03	0.80	0.80
San Gil		0.81	0.88	2.69	2.55	3.39	1.73	1.25	1.14	0.34	0.69	-10.29	-10.29
Guicán		0.96	0.98	-2.79	-1.41	-0.79	3.35	1.52	1.14	0.84	0.73	0.32	0.32
Pte llano		0.70	0.73	-10.41	-5.53	-2.79	3.77	2.36	0.54	4.84	0.61	-0.15	-0.15
Pte la paz		1.16	1.29	1.35	1.44	1.57	1.30	1.03	0.69	0.92	0.61	1.40	1.40
Café Madrid		1.33	1.37	1.72	1.50	1.87	1.24	0.80	-10.29	0.52	-0.15	1.40	1.40

Tabla 11
Resumen del coeficiente NSE para caudales medios diarios.

CAUDALES MEDIOS DIARIOS		RESUMEN DE "COEFICIENTE DE NASH-SUTCLIFFE"											
		HACIA											
		Arrancapulumas	Puerto Salgar	La Vega	San Rafael	La resaca	El Molino	Puerto Colonial	San Gil	Guicán	Pte llano	Pte la paz	Café Madrid
Arrancapulumas		0.98											

Análisis de resultados y conclusiones

Dentro de los factores característicos que se tomaron en cuenta en el proyecto, solo se incluyen en el modelo matemático el área y el caudal de cada estación aforada. Se recomienda para futuros proyectos de investigación generar modelos que incluyan factores como la precipitación, intensidad de lluvias, aspectos climatológicos y las características geomorfológicas de la cuenca, de tal forma que cada una de estas consideraciones se incluya como un coeficiente que altere las ecuaciones del modelo, y de esta forma lograr ver disminuido el porcentaje de incertidumbre que genera la predicción de caudales.

Al realizar un análisis del hidrograma de caudal específico, se puede observar que la estación de puente colonial, no concuerda con ninguna otra estación aforada, ya que las crecientes de caudal se observan en un periodo entre mayo y agosto, lo cual no es muy confiable, puesto que a nivel general las mayores precipitaciones anuales se presentan en los meses de abril a junio y septiembre a noviembre. A raíz de esta incertidumbre, se presenta la inquietud al IDEAM, a lo cual dieron como respuesta ser una entidad capacitada para certificar la dinámica hídrica de los ríos, aunque aclaran que el uso de navegadores no tienen la precisión adecuada o requerida para algunos proyectos. Adicional a ello, si en el estudio se consideran datos muy antiguos, la precisión de los navegadores estaba supeditada al avance tecnológico de la época.

Al emplear el modelo de transferencia de caudales en la cuenca media del Río Magdalena delimitada por las estaciones a estudio, es necesario que los hidrogramas de caudal específico, tengan cierta homogeneidad, debido a que su comportamiento tiene una influencia implícita con sus características fisiográficas y climáticas. En caso contrario se afecta el modelo de transferencia, como se observa en la estación Puente Colonial (1400 msnm) que tiene un comportamiento atípico, respecto a las demás estaciones, donde al realizar la transferencia de caudales con la Ecu. 2 y con los exponentes obtenidos se tiene un coeficiente de correlación lineal promedio de $r^2 = 0.20$ para caudales mensuales, lo que indica que los caudales simulados no presentan una correlación directa con ninguna de las estaciones. Además, al calcular el coeficiente de Nash NSE = -6.99 para caudales medios diarios, indica que la media de los datos observados son mejores que los calculados (Fig. 1).

En conclusión, el método de transferencia de caudales puede ser empleado en la cuenca media del Río Magdalena, siempre y cuando las estaciones tomadas para realizar la transferencia de caudales, tengan unos diagramas de caudal específico con cierta similitud. Además, se debe considerar el comportamiento de las funciones predictoras determinadas mediante el coeficiente n , lo anterior con el fin de obtener unos buenos resultados al emplear el método de la transferencia de caudales.

Con base en los resultados de las tablas 4 a 11, se agrupan las estaciones en función del comportamiento de los coeficientes de correlación lineal en los caudales mensuales, y el coeficiente de correlación de Nash Sutcliffe Efficient en los caudales medios diarios, al realizar la transferencia de caudales de una estación a otra (tabla 12).

Al comparar el coeficiente de NSE con el coeficiente de correlación de lineal r^2 , se observa que el coeficiente r^2 indica un buen comportamiento, pero al observar la Fig. 1 se demuestra que dicho parámetro no es determinante al realizar la transferencia de caudales, en vista que sus hidrogramas de caudal específico no tienen similitud, en contraste con el coeficiente de correlación de NASH, el cual muestra una relación de transferencia de caudales más ajustada a la realidad, ya que los datos negativos indican que no existe una buena correlación (Figs. 2 y 3).

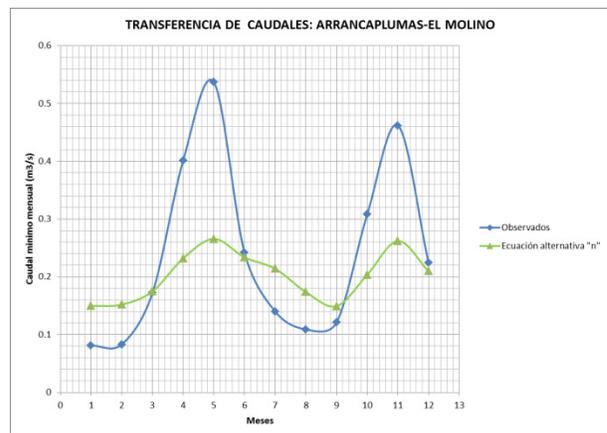


Figura 2. Transferencia de caudales mensuales.

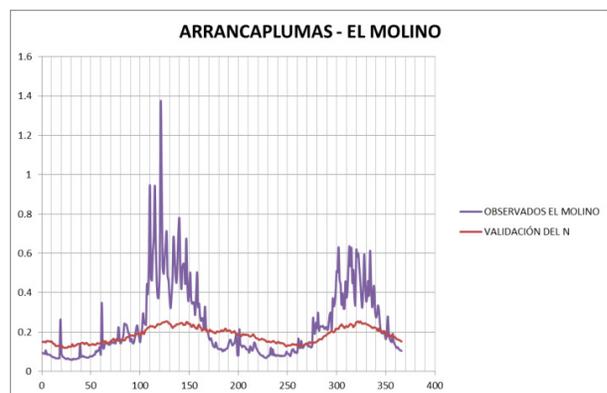


Figura 3. Transferencia de caudales diarios.

Con base en los coeficientes de correlación de NASH, se clasifican las estaciones a estudio en tres grupos, teniendo como parámetro un NSE mayor o igual a 0,50 (Figs. 4, 5 y 6).

Según las figuras, se evidencia que no es posible definir un rango de similitud para los diagramas de caudal

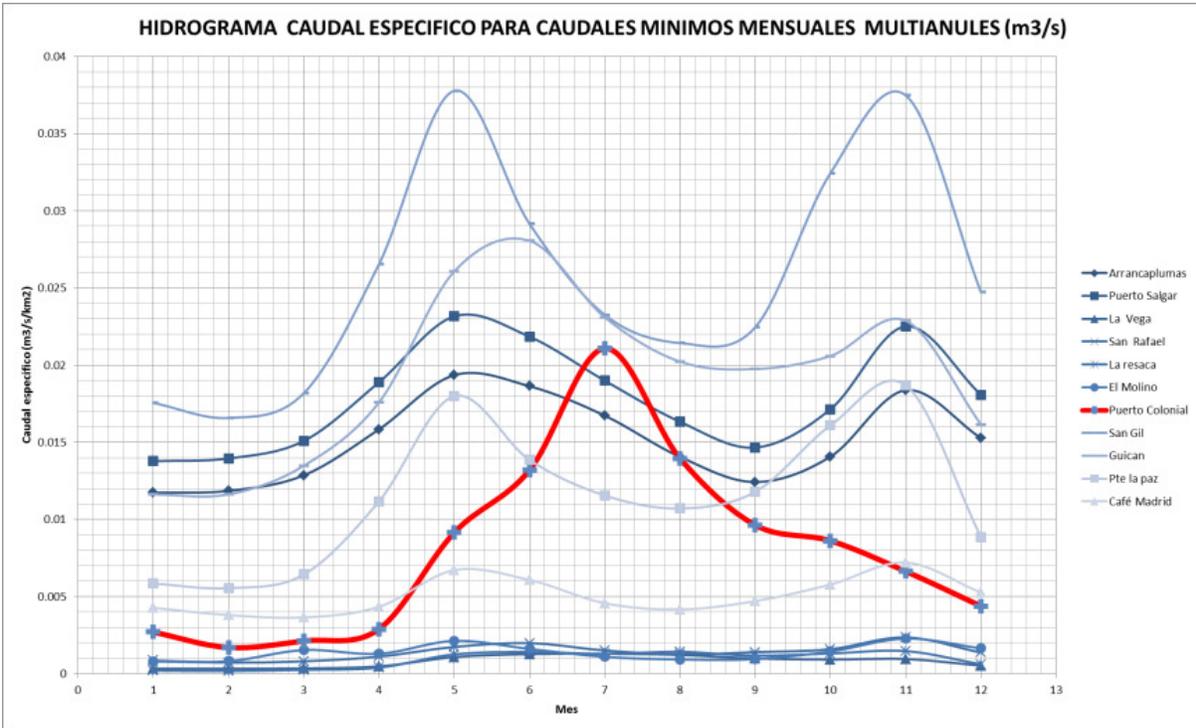


Figura 1. Hidrogramas caudal específico para caudales mínimos mensuales multianuales.

Tabla 12

Agrupación por coeficientes de correlación.

COMPARACIÓN DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN CON EL COEFICIENTE DE NSE					
Grupo	Estaciones	Coeficiente de correlación			Coeficiente NSE
		Caudal máximo mensual	Caudal medio mensual	Caudal mínimo mensual	Caudal medio diario
Grupo A	Arrancaplumas y Puerto Salgar	0.98	0.99	0.99	0.98 a 0.99
Grupo B	La Vega, La Resaca y San Rafael	0.31 a 0.93	0.59 a 0.95	0.51 a 0.90	0.11 a 0.84
Grupo C	San Gil, Puente Llano, Puente la Paz y Café Madrid	0.70 a 0.94	0.78 a 0.95	0.67 a 0.92	0.23 a 0.91

específico, debido a que la aplicación del método no depende directamente del hidrograma, dado que la ubicación de las estaciones se encuentran distribuidas en diferentes afluentes de la cuenca Media del Río Magdalena, lo cual se ve reflejado en la variación del caudal normalizado y no permite estandarizar un rango. Sin embargo, se encuentra cierta semejanza gráfica y la agrupación de las estaciones tiene una cercanía regional.

La Fig. 7 presenta el flujograma de procesos, el cual está enfocado en facilitar el desarrollo paso a paso de la aplicación del modelo matemático para la transferencia de caudales en la cuenca media del Río Magdalena.

Referencias

Esquivel, G., Sánchez, I., Velásquez, M., López, A., López, R., y Bueno, P. (2013). Modelación del escurrimiento

en una subcuenca del trópico húmedo de México y su análisis mediante índices de eficiencia predictiva. *Agrofaz*, 13(2), 113-118.

IDEAM-CORMAGDALENA. (2001). *Estudio ambiental de la cuenca magdalena - cauca y elementos para su ordenamiento territorial*. (Convenio 003 de 1999)

Mohamoud, Y., y Parmar, R. (2006). Estimating streamflow and associated hydraulic geometry, the mid-atlantic region, usa. *Journal of the American Water Resources Association*, 42(3), 755-768.

Procuraduría. (2013). *Río magdalena: Informe social, económico y ambiental*. (PROCURADURIA DELEGADA PARA ASUNTOS AMBIENTALES Y AGRARIOS)

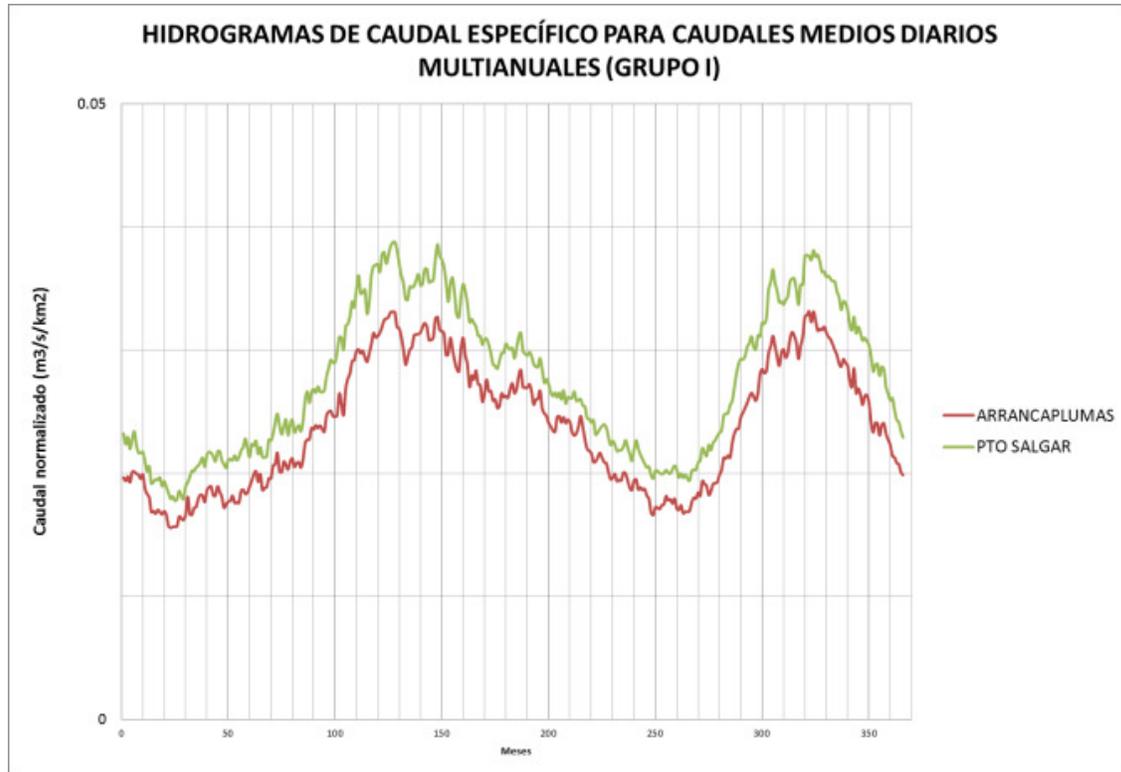


Figura 4. Homogeneidad de caudales (Grupo I).

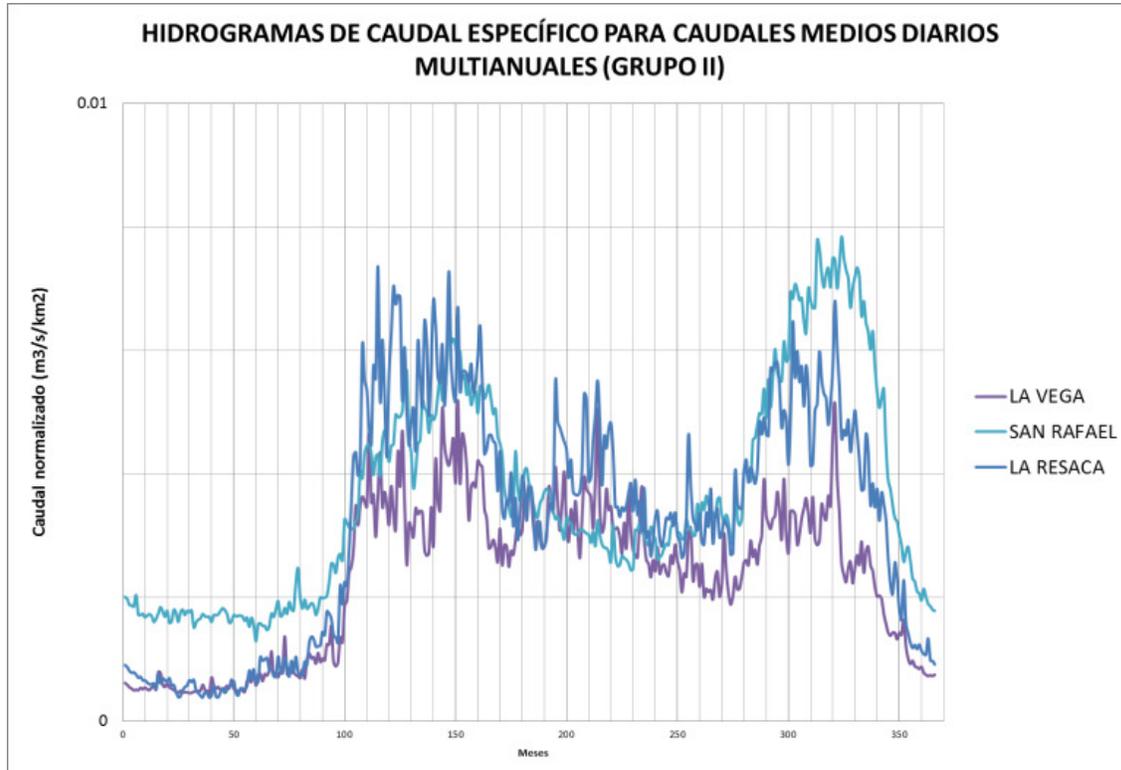


Figura 5. Homogeneidad de caudales (Grupo II).

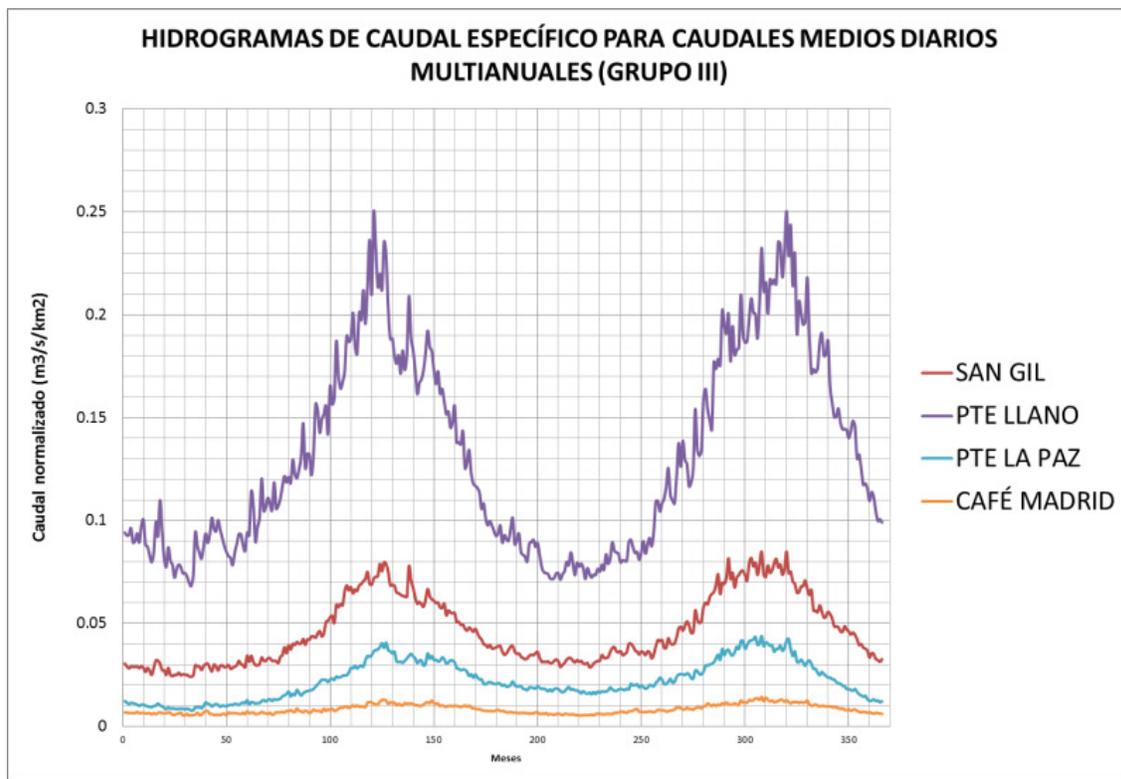


Figura 6. Homogeneidad de caudales (Grupo III).

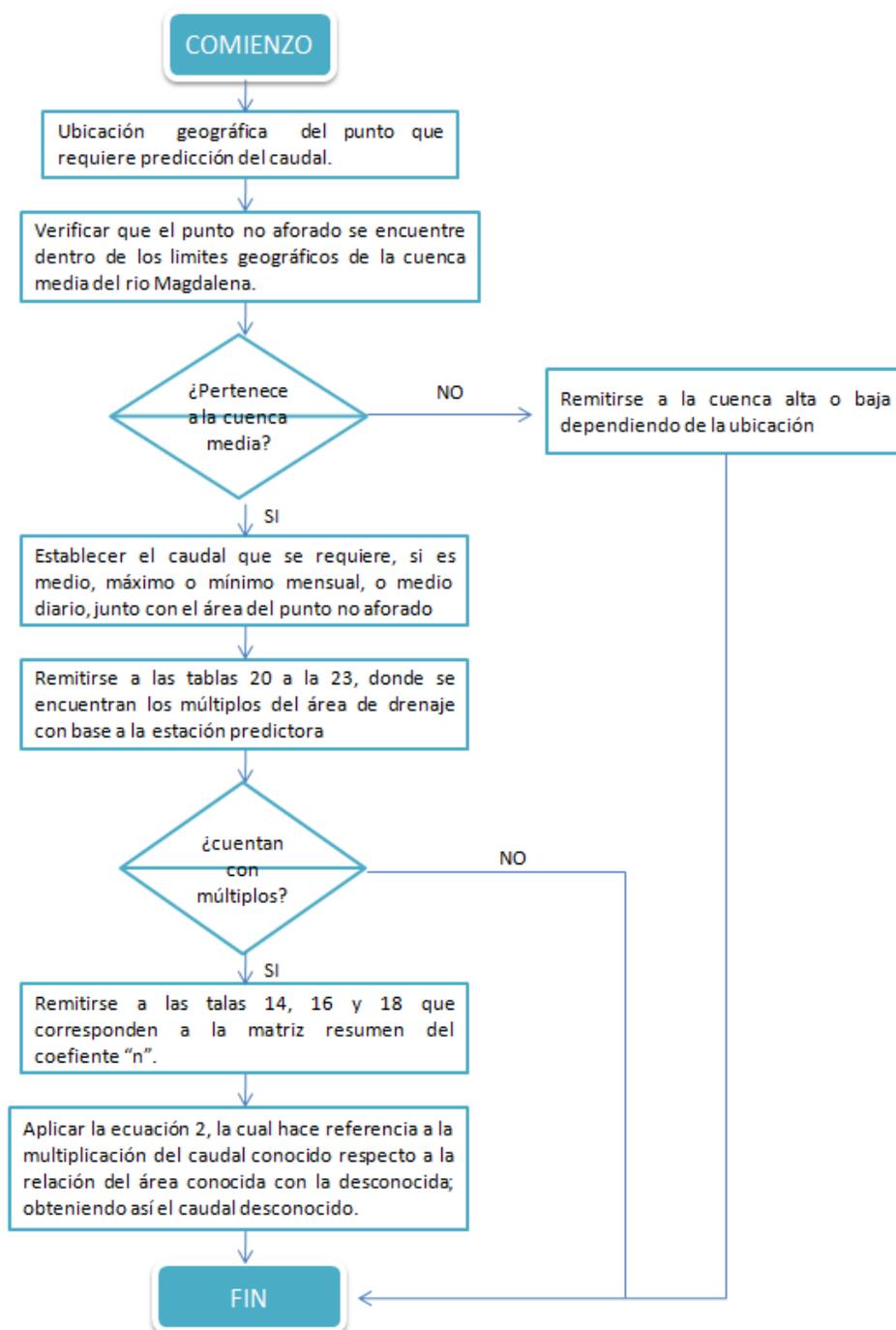


Figura 7. Flujograma de procesos para el cálculo de caudales en zonas no aforadas.