



ESTIMACIÓN DE CAUDALES MEDIANTE REGIONALIZACIÓN EN LAS CUENCAS NO INSTRUMENTADAS DE LA ZONA ANDINA DEL DEPARTAMENTO DE NARIÑO

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL
TÍTULO DE INGENIERA SANITARIA Y AMBIENTAL**

NATHALIA MARTÍNEZ MAFLA



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE - EIDENAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
JULIO DEL 2024**

**ESTIMACIÓN DE CAUDALES MEDIANTE REGIONALIZACIÓN EN LAS CUENCAS
NO INSTRUMENTADAS DE LA ZONA ANDINA DEL DEPARTAMENTO DE NARIÑO**

NATHALIA MARTINEZ MAFLA

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS
NATURALES Y DEL AMBIENTE - EIDENAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE
INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
JULIO DEL 2024**



**ESTIMACIÓN DE CAUDALES MEDIANTE REGIONALIZACIÓN EN LAS CUENCAS
NO INSTRUMENTADAS DE LA ZONA ANDINA DEL DEPARTAMENTO DE NARIÑO**

NATHALIA MARTINEZ MAFLA

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL
TÍTULO DE INGENIERA SANITARIA Y AMBIENTAL**

DIRECTORES:

YESID CARVAJAL ESCOBAR

Ing. Agrícola Ph.D
Doc. Titular Escuela EIDENAR

WILMAR ALEXANDER TORRES LÓPEZ

Estadístico M.Sc
Doc. Escuela de Estadística

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS
NATURALES Y DEL AMBIENTE - EIDENAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE
INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
JULIO DEL 2024**



TABLA DE CONTENIDO

1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
2.	JUSTIFICACIÓN.....	18
3.	OBJETIVOS.....	19
3.1.	Objetivo General	19
3.2.	Objetivos Específicos	19
4.	MARCO TEORICO	20
4.1.	Gestión integrada del recurso hídrico.....	20
4.2.	Hidroclimatología colombiana.....	20
4.2.1.	Régimen de lluvias	20
4.2.2.	El fenómeno El Niño-La Niña Oscilación del Sur (ENOS).....	21
4.2.3.	Información hidroclimatológica y red de medición	22
4.3.	La Cuenca hidrográfica	22
4.3.1.	Partes y elementos de una cuenca	23
4.3.2.	Caudal específico o unitario de una cuenca	23
4.3.3.	Características morfométricas y fisiográficas de una cuenca y su relación con la escorrentía	23
4.4.	Regionalización: agrupación de cuencas en regiones hidrológicas	26
4.4.1.	Antecedentes de regionalización.....	26
4.4.2.	Metodología para la identificación de regiones hidrológicas homogéneas.....	27
4.5.	Estimación de caudales en cuencas no instrumentadas.....	28
4.5.1.	Métodos de regresión Regresión lineal monovariante para la estimación de caudales 28	
4.5.2.	Regresión lineal múltiple para la estimación de caudales.....	29
4.5.3.	Regresión potencial múltiple y monovariante para la estimación de caudales	29
4.5.4.	Pruebas de bondad de ajuste.....	30
5.	METODOLOGÍA	32
5.1.	Esquema metodológico	32
5.2.	Zona de estudio: Región Andina del Departamento de Nariño	32
5.1.	Red Hidrometereológica: Recopilación de los registros de caudal y precipitación	33

5.2.	Análisis exploratorio y confirmatorio para los registros mensuales de precipitación y caudal	36
5.1.	Imputación de datos faltantes (DF)	37
5.2.	Análisis espaciotemporal de la precipitación y caudal	37
5.3.	Delimitación de las cuencas hidrográficas	37
5.4.	Determinación de características morfométricas y fisiográficas	38
5.5.	Identificación de regiones hidrológicas homogéneas	38
5.5.1.	Pruebas de normalidad	39
5.5.2.	Coeficientes de Correlación	40
5.6.	Estimación de caudales por métodos estadísticos	40
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
6.1.	Imputación de datos faltantes	41
6.2.	Caudales medios mensuales	41
6.2.1.	Análisis gráfico	43
6.3.	Precipitación media mensual	44
6.3.1.	Análisis gráfico	47
6.4.	Caracterización morfométrica y fisiográfica de las cuencas de estudio	47
6.5.	Caracterización hidrometeorológica de las cuencas de estudio	50
6.6.	Identificación de regiones hidrológicas homogéneas: Regionalización	53
6.6.1.	Características morfométricas y fisiográficas evaluadas	54
6.6.2.	Análisis de componentes principales (ACP)	55
6.6.3.	Definición número óptimo de clústeres	59
6.6.4.	Regionalización con QUni y CAMF	60
6.7.	Modelos de estimación de caudales medios mensuales multianuales	63
6.7.1.	Análisis de la regionalización con dos clústeres	65
6.7.2.	Análisis de la regionalización con tres clústeres	67
6.7.3.	Modelo definitivo para la estimación de caudales medios mensuales multianuales para cuencas no instrumentadas	70
6.7.4.	Aplicabilidad y Flexibilidad del modelo desarrollado para la estimación de caudales para cuencas no instrumentadas	76

7.	CONCLUSIONES	78
8.	REFERENCIAS	80
9.	ANEXOS.....	86

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Densidades mínimas recomendadas de estaciones de flujo fluvial.....	22
Tabla 2.	Características morfométricas básicas de una cuenca.....	24
Tabla 3.	Métodos estadísticos empleados para identificación de regiones hidrológicas homogéneas	27
Tabla 4.	Estaciones de estudio del IDEAM con registros de caudal dentro de la zona Andina de Nariño.....	34
Tabla 5.	Estaciones de estudio del IDEAM con registros de precipitación dentro de la zona Andina de Nariño	35
Tabla 6.	Estadísticos descriptivos para las estaciones con registros de caudal medio mensual multianual en m ³ /s.....	41
Tabla 7.	Estadísticos descriptivos para las estaciones con registros de precipitación media mensual multianual en mm.....	44
Tabla 8.	Características morfométricas y fisiográficas base para la caracterización de las cuencas de estudio.....	49
Tabla 9.	Resumen de las variables hidroclimatológicas como el caudal y la precipitación para las cuencas de estudio dentro de la Zona Andina departamento de Nariño	52
Tabla 10.	Matriz de correlación entre las características fisiográficas y morfométricas	54
Tabla 11.	Recopilación de las CAMF con mayor colinealidad entre sí.....	55
Tabla 12.	Características fisiográficas con mejor correlación con el caudal medio mensual multianual.....	55
Tabla 13.	Variable hidrometereológica y Características fisiográficas con mejor correlación con el caudal específico medio mensual multianual.....	55
Tabla 14.	Varianza representativa de las dimensiones o componentes principales.....	56
Tabla 15.	Coordenadas y Cosenos Cuadrados en el ACP de CAMF.....	58
Tabla 16.	Coordenadas y Cosenos Cuadrados en el ACP de QUni.....	58
Tabla 17.	Características morfométricas, fisiográficas e hidroclimatológicas.....	59

Tabla 18. Modelos de regresión evaluados para la estimación del caudal medio mensual multianual	64
Tabla 19. Resultados de los índices de desempeño para los modelos de regresión lineal y múltiple empleados.....	65
Tabla 20. Resultados de los caudales medios mensuales multianuales estimados para los modelos con mejor resultado en sus índices de desempeño para QUniK3	69
Tabla 21. Características Morfométricas y Fisiográficas y coordenadas para las cuencas no instrumentadas definidas	72
Tabla 22. Valores de referencia en m ³ /s para la selección del modelo definitivo de estimación de caudales para cuencas no instrumentadas	72
Tabla 23. Detalle del modelo definitivo seleccionado para la estimación de Caudales Medios Mensuales Multianuales de las cuencas de estudio de la zona Andina del departamento de Nariño.	73
Tabla 24. Detalle de las Características Morfométricas y Fisiográficas (CAMF) empleadas en el modelo definido para la estimación de Caudales Medios Mensuales Multianuales	73

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Características morfométricas básicas de una cuenca.	24
Figura 2. Esquema metodológico.....	32
Figura 3. Ubicación geográfica de la zona de estudio.....	33
Figura 4. Estaciones de caudal y precipitación dentro de la Zona Andina del departamento de Nariño.....	36
Figura 5. Serie temporal reconstruida del caudal para las estaciones PTG y UNI.	42
Figura 6. Diagrama de cajas para las estaciones de estudio con registro de caudales	43
Figura 7. Gráficos de análisis del comportamiento del Caudal para la estación Universidad. (a) Ciclo anual o Hidrograma y (b) Histograma.	43
Figura 8. Serie temporal reconstruida del caudal para las estaciones AAN y LVE.....	46
Figura 9. Diagrama de cajas para las estaciones de estudio con registro de precipitación	46
Figura 10. Gráficos de análisis del comportamiento de la Precipitación para la estación Aeropuerto Antonio Nariño. (a) Hietograma: Ciclo anual de la precipitación, (b) Histograma de la precipitación	47
Figura 11. Cuencas de estudio delimitadas en la zona de estudio.....	48

Figura 12. Isoyeta con la precipitación media mensual multianual para la región Andina del Departamento de Nariño	51
Figura 13. Isoyeta con la precipitación media total anual multianual para la región Andina del Departamento de Nariño	51
Figura 14. Variabilidad acumulada de las componentes principales para CAMF	56
Figura 15. Variabilidad acumulada de las componentes principales para QUni	56
Figura 16. Métodos empleados para la determinación del número óptimo de clústeres para CAMF. (a) Método del codo, (b) Método de la silueta.	59
Figura 17. Agrupaciones de las cuencas hidrográficas utilizando el método K-Means con 3 clústeres para QUni	61
Figura 18. Agrupaciones de las cuencas hidrográficas utilizando el método K-Means con 2 clústeres para QUni	62
Figura 19. Agrupaciones de las cuencas hidrográficas utilizando el método K-Means con 3 clústeres para CAMF.....	62
Figura 20. Agrupaciones de las cuencas hidrográficas utilizando el método K-Means con 2 clústeres para CAMF.....	63
Figura 21. Representación espacial de la regionalización realizada para las cuencas de estudio con dos clústeres para la base de datos del Caudal Unitario Medio Mensual Multianual (QUniK2) ..	66
Figura 22. Resultados de los caudales medios mensuales multianuales estimados para cuencas instrumentadas empleando el modelo con el mejor resultado en sus índices de desempeño para QUniK2	67
Figura 23. Representación espacial de la regionalización realizada para las cuencas de estudio con tres clústeres para la base de datos del Caudal Unitario Medio Mensual Multianual (QUniK3) ..	68
Figura 24. Resultados de los caudales medios mensuales multianuales estimados para el modelo con el mejor resultado en sus índices de desempeño para QUniK3.....	70
Figura 25. Cuencas no instrumentadas definidas dentro de las regiones hidrológicas establecidas	71
Figura 26. Resultados de los Caudales Medios Mensuales Multianuales estimados para las Cuencas Instrumentadas y No Instrumentadas utilizando el modelo definitivo del presente estudio	74
Figura 27. Resultados de los Caudales Unitarios Medios Mensuales Multianuales estimados para el modelo definitivo para el presente estudio.....	75

ABREVIATURAS

Abreviatura	Descripción	Unidades
A:	Área	km ²
Amay :	Área de la vertiente mayor de la cuenca	km ²
Amen :	Área de la vertiente menor de la cuenca	km ²
C :	Constante de estabilidad del río	km ² /km
CAMF:	Características Morfométricas y Fisiográficas	
Co:	Coeficiente orográfico	
Ct :	Índice de torrencialidad	km ⁻²
Dd :	Densidad de drenaje	km/ km ²
Em :	Elevación media de la cuenca	m.s.n.m
Emáx :	Elevación máxima de la cuenca	m.s.n.m
Emín :	Elevación mínima de la cuenca	m.s.n.m
F:	Factor de forma	
I:	Ancho máximo	km
Ia:	Índice de alargamiento	
Ias:	Índice asimétrico	
K3:	Regionalización con tres clústeres	
K2:	Regionalización con dos clústeres	
Kc:	Coeficiente de compacidad	
Km :	Coeficiente de masividad	m/km ²
ΣLi :	Suma de las longitudes de los drenajes que se integran en la cuenca	km
Lc :	Longitud del cauce principal	km
Lm :	Longitud de máximo recorrido	km
Ls :	Longitud cauce principal, medida sobre un trazado suave del cauce	km
MCMFH:	Matriz resumen de las características morfométricas, fisiográficas e hidrometeorológicas de las cuencas	
n1:	Número de corrientes de primer orden según el método de Horton	
P :	Perímetro de la cuenca	km
Pp :	Precipitación total media multianual	mm

QM :	Caudal medio mensual multianual	m ³ /s
QuM y QUni :	Caudal unitario medio mensual multianual	L/s.km ²
S1:	Pendiente media del cauce principal	%
S2:	Pendiente media del cauce principal	%
Sin:	Sinuosidad del cauce principal	
Sm :	Pendiente media de la cuenca	%
Tc1:	Tiempo de concentración	h
Tc2:	Tiempo de concentración	h

RESUMEN

La falta de información hidrometeorológica para los ríos que forman parte de una cuenca dificulta la implementación de estrategias para la adecuada gestión del recurso hídrico. Particularmente en Colombia se tiene un déficit de estaciones de flujo fluvial con respecto a las densidades mínimas recomendadas a nivel global, y en zonas desatendidas por las entidades gubernamentales, como el departamento de Nariño, el déficit es aún más notorio. La zona Andina del departamento de Nariño se encuentra ubicada al suroeste de Colombia, la cual es una región con un importante papel hidrológico para su territorio al haber en ésta nacimientos de ríos que aportan servicios ecosistémicos imprescindibles para la población del territorio; por lo que tener una aproximación de la oferta hídrica disponible de las cuencas ubicadas en esta zona resulta de gran importancia.

El propósito de esta investigación fue la estimación de los caudales medios mensuales multianuales en los ríos principales de las cuencas con déficit de información en la zona de estudio a partir de la regionalización de las características morfométricas, fisiográficas e hidroclimáticas de las mismas. Para ello, se realizó un análisis espacio-temporal de la precipitación y el caudal, se estimaron las características morfométricas y fisiográficas de las cuencas delimitadas y se emplearon análisis de correlación de sus características estimadas con la variable de precipitación y caudal. Se identificaron regiones hidrológicas homogéneas por medio de métodos estadísticos basados en el agrupamiento (análisis de clústeres) por el método de k-means, previo análisis de componentes principales (PCA), y finalmente se estimaron los caudales para las cuencas no instrumentadas presentes dentro de las regiones hidrológicas homogéneas definidas por medio de métodos estadísticos de regresión lineal y potencial múltiple.

En el análisis de clústeres, se identificaron tres clústeres como el número óptimo para definir las regiones hidrológicas homogéneas. Los datos utilizados incluyeron conjuntos como CAMF (características de 19 cuencas) y QUni (caudales unitarios de las mismas cuencas), y se justificó el uso del algoritmo K-means para la regionalización hidrológica. La definición de los modelos definitivos para las estimaciones de caudales unitarios medios mensuales multianuales se realizaron mediante regresión potencial y lineal múltiple, seleccionando el mejor modelo basado en métricas como RMSE, MAPE, R^2 y NSE. De esta forma, el modelo definitivo fue aquel que implementó una regresión múltiple para cuatro variables siendo la combinación A_Co_Km_Lm el modelo seleccionado para implementar a las cuencas hidrográficas no instrumentadas.

Este estudio desarrolló una metodología para la definición de regiones hidrológicas dentro de la zona de estudio, adicional a la implementar para la estimación de caudales, lo cual proporcionó una aproximación a la disponibilidad hídrica dentro de la zona de estudio al implementarse en cuencas no instrumentadas, para lo cual fue definida una cuenca para cada región; los resultados obtenidos fueron para la región 1 (C1), la cuenca PIL_1 tuvo un caudal de 6,72 m³/s, PIP_1 parte de la región 2 tuvo un caudal de 67,74 m³/s, y PNP_1 parte de la región 3 tuvo un caudal de 160,18 m³/s. Los modelos desarrollados resultaron como un aporte importante al ser insumo para futuros estudios hidroclimatológicos y relacionados con la gestión integral del recurso hídrico de la zona de estudio, entre otros, facilitando la toma de decisiones informadas y la planificación de estrategias efectivas para la gestión sostenible del agua en la región Andina del departamento de Nariño.

Palabras clave: Escasez de información hidrológica, Regionalización de regiones hidrológicas homogéneas, Estimación de caudales medios mensuales multianuales empleando métodos estadísticos de regresión, Análisis de componentes principales, Gestión Integral del Recurso Hídrico.

Nota de aceptación:

Firma del evaluador

Firma del evaluador

Santiago de Cali, 2024

DEDICATORIA

Este trabajo de grado va dedicado, en primera instancia, a mí persona, quien se siente orgullosa de poder haber sido capaz, pues sabe todo el esfuerzo y lágrimas que costó culminar este ciclo del trabajo de grado dentro de mi carrera universitaria de pregrado. Además, a mis personas más cercanas como lo son mi familia, mi padre Alfonso Martinez Ramos, madre Sonia Mafla Ramirez y hermana Valentina Martinez Mafla, además de mi mejor amiga Alejandra Rodriguez quien es otra hermana para mí, personas que estuvieron siempre para mí desde el sostenimiento económico como emocional ante una compleja pero hermosa etapa que fue para mí el haber estado en la Universidad del Valle desarrollando mi pregrado de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Finalmente, dedico este trabajo de grado a todas aquellas personas que alguna vez solo han querido “tirar la toalla” ante todo pronóstico que se presentó en sus vidas, a aquellas personas que, solas o con ayuda, pudieron salir de un precipicio que ellas mismas permitieron abordarse e incluso caer, pero, que al poder retomar y apreciar desde la consciencia la hermosa vista que conllevó estar ahí, fue motivo para decir “qué hermoso es querer volver a vivir”.

AGRADECIMIENTOS

Al concluir esta etapa tan significativa de mi vida como lo es mi carrera universitaria de pregrado, y particularmente el ciclo de trabajo de grado que fue un antes y después en mi vida, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas y aspectos de mi vida que han contribuido de alguna manera en este camino hacia la obtención de mi título en Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

En primer lugar, a mi familia, mi padre Alfonso Martinez, madre Sonia Mafla, y hermana Valentina Martinez, por su amor incondicional, apoyo constante y por ser la base sobre la cual he construido mis sueños. Sin su confianza y sacrificios, no habría llegado hasta aquí. Y no puede faltar aquellos miembros de cuatro patas que también han sido una curita para el corazón en aquellos momentos donde más lo requerías, mi perrita hermosa Cindy quien ahora descansa pero estará siempre presente en mi corazón, y mis dos conejos Toby y Romeo, quienes son mis niños mimados y daría esta vida y otra por ellos

A mi mejor amiga Alejandra Rodriguez, quien estuvo en toda mi etapa universitaria siempre apoyándome cuando más lo necesitaba. A mi mejor amigo Jean Carlos Zabala quién ha estado siempre apoyándome, quien desde la música y arte me ha guiado a hallar mi propio camino y respuestas ante senderos que pensé nunca llevarían a ningún lado.

A mi expareja Alejandro, por haber sido parte importante de mi vida durante un tiempo significativo y la mayor parte de mi etapa universitaria, aportando valiosas experiencias y aprendizajes que me han ayudado a crecer como persona.

A mis amistades de la universidad que sé que no quedarán solo como “compas de la U”, sino como colegas y amistades que quiero prevalecer, Lucas Martínez Marin y Julian Collazos Catuche, fuimos y seremos el triteto que destacó por entregar todo tarde, pero siempre dando los mejores resultados, teniendo las mejores risas, y estando el uno para el otro cuando nos necesitamos.

A mis directores de trabajo de grado Yesid Carvajal Escobar y Wilmar Alexander Torres, por su guía, sabiduría y paciencia a lo largo de este proceso. Sus conocimientos, apoyo y consejos han sido fundamentales para la realización de este proyecto.

Al Grupo de Investigación IREHISA y sus integrantes, Julian David Mera, Daniel Zorrilla, Alejandra Acevedo, compañeros de conocimiento y también amigos, que fueron también un pilar importante para mí.

Al programa de Ingeniería Sanitaria y Ambiental y sus profesores, quienes fueron un pilar ante los conocimientos, habilidades y destrezas desarrolladas a lo largo de mi vida universitaria.

A la Universidad del Valle, como desde su campus natural me permitió hallar paz en medio de tanto caos que también podía traer.

A las nuevas amistades y personas que han llegado a mi vida, por ofrecerme su apoyo y afecto en momentos clave, por enseñarme nuevas perspectivas y enriquecer mi vida de maneras inesperadas.

A mis psicoterapeutas, María Teresa Erazo y Wilson Restrepo, por ayudarme en este proceso llamado volver a vivir desde la consciencia, volver a querer vivir cuando ni yo misma sabía que solo estaba en modo automático.

A la inteligencia artificial que me ha acompañado en este viaje, brindándome su apoyo y asistencia en la realización y culminación de este trabajo.

A la naturaleza y la vida misma, los ríos, la montaña, por ser una fuente constante de inspiración y por recordarme la belleza y la complejidad del mundo que me rodea, como la apreciación de la vida vale la pena.

A la música, por ser mi refugio en momentos de estrés y por darme la motivación necesaria para seguir adelante cuando las cosas se ponían difíciles. Por ayudarme a buscar respuestas y también a impulsar mi motivación y sentires.

Y nuevamente y con mayor importancia, a mí misma, quien pudo ser capaz de terminar este ciclo de trabajo de grado el cual en muchas ocasiones solo me vi ofuscada. A la motivación interna de querer superar, de buscar ayuda aunque en muchas ocasiones solo huía de ella, y culminar este proceso, por mantener viva la llama de mi determinación y perseverancia.

Gracias a todos y cada uno de ustedes, este logro es también suyo. Con todo mi cariño y gratitud.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) es un proceso que promueve la gestión, manejo y aprovechamiento coordinado del agua, la tierra y los demás recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social de manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales (GWP, 2022; MINAMBIENTE, 2021). Uno de los aspectos que debe de tenerse en cuenta en la GIRH es la determinación de la disponibilidad en cantidad y calidad del recurso hídrico, pues este es un determinante frente al control, prevención y garantía del bienestar para la población, productores, ecosistema, y en general para todo el territorio de análisis ([Dourojeanni et al., 2002](#)).

La GIRH implica también tener un control sobre la oferta hídrica disponible en las fuentes de aguas superficiales. En el caso de los ríos, normalmente se realiza por medio de estaciones de aforo de caudal. Sin embargo, en muchos casos la información hidrológica de interés en ciertas regiones es escasa o no siempre se encuentra disponible ocasionando que la estimación de la oferta hídrica se encuentre incompleta en algunos instantes de tiempo y/o en lugares de interés. Para el año 1995 las estaciones de medición de caudal en funcionamiento superaban las 60.000 estaciones a nivel mundial, donde se estimó que solo el 1% de las cuencas se encontraban instrumentadas o con un déficit de información hidrológica ([OMM, 1995](#)). Adicionalmente, dos tercios de las redes de monitoreo hidrológico en los países en desarrollo se encuentran en malas condiciones o en deterioro según el Banco Mundial ([World Bank, 2018](#)), afectando la calidad y cantidad de los datos medidos ([Dixon et al., 2020](#)).

En Colombia, al igual que a nivel mundial, también existe un déficit de instrumentación de las cuencas hidrográficas, es así como se ha estimado que hay una baja densidad de estaciones en su red fluvial al encontrarse 4 estaciones cada 10.000 km² (IDEAM, 2019). En el caso de zonas montañosas se ha establecido que la densidad mínima para estaciones de red fluvial debe ser de mínimo 1 estación cada 1.000 km² (OMM, 1994), que, comparado con la instrumentación existente de algunos departamentos con zonas montañosas, existe una gran diferencia. Esto sugiere que gran parte de la oferta hídrica de estos departamentos no pueda ser estimada correctamente.

El departamento de Nariño, ubicado al suroccidente de Colombia, abarca gran parte en este tipo de unidad fisiográfica como las zonas montañosas, pues la Región Andina representa el 40% del territorio Nariñense. Esta región, se caracteriza por concentrar un gran número de nacimientos de ríos y quebradas que son fuentes hídricas importantes para el departamento ([Gobernación de Nariño, 2012, 2016](#)). A pesar de que Nariño cuenta con un importante papel hidrológico en el país, no se han realizado muchos estudios relacionados con la variabilidad climática y de caudales ([Canchala et al., 2020](#)). Adicionalmente, otra dificultad que se presenta en la gestión del recurso hídrico es que la red de estaciones de flujo fluvial es deficiente al no cumplir con la densidad mínima recomendada internacionalmente, pues dentro del departamento actualmente hay 22 estaciones hidrométricas activas, por lo que aproximadamente dentro del territorio hay menos de 7 estaciones por cada 10.000 km² ([IDEAM, 2020](#)), sin garantía de que todas las estaciones disponibles estén funcionando adecuadamente, por lo que aún permanecen muchas corrientes

superficiales sin ningún tipo de registro o con muy escasas mediciones ([IDEAM, 2014](#)). Particularmente dentro de la zona Andina del departamento, zona de estudio de interés, se encuentran 19 estaciones hidrométricas activas con datos fiables, donde, para un área de menos de 15.000 km², podría decirse que se está cumpliendo con las recomendaciones mínimas de la OMM (1994), sin embargo, como se mencionó con anterioridad, los estudios referentes a la disponibilidad hídrica de las cuencas con respecto a sus caudales, han sido mínimos dentro de la región, aportando a la escasez de información e interpretación de la misma dentro de la región.

De esta manera, la escasez de información de aforo de caudales dentro del departamento de Nariño impide conocer el verdadero comportamiento de los caudales de los ríos que componen las cuencas hidrográficas, al igual que su forma de responder ante eventos de precipitación. El cómo se puede instrumentar o calibrar dichas cuencas depende de este tipo de información, por lo tanto, es necesario utilizar metodologías alternas como son los modelos de estimación de series hidrológicas, que permiten realizar la estimación del régimen de caudales en lugares con falta de registros ([Gaviria, 2018](#)).

Uno de los métodos utilizados para suplir la falta de información hidrológica en sitios con escasez o falta de información es la *regionalización*, que puede definirse como la transferencia de información desde un sitio con disponibilidad de información, a otro con escasez de la misma ([Rao & Srinivas, 2006](#)). Es decir, por medio de una cuenca hidrográfica calibrada, instrumentada o con información suficiente, es posible compensar a otra que se encuentre sin calibrar, en sitios sin datos o con poca información, siempre y cuando se cumpla con la condición de que ambos sitios estén ubicados dentro de una región hidrológica homogénea previamente definida, teniendo en cuenta factores a nivel espacial de algunas funciones, variables, y parámetros que permitirán esa transferencia ([Razavi & Coulibaly, 2013](#); [Zuccarelli, 2017](#)).

Por lo tanto, el presente trabajo buscó aplicar la metodología de regionalización para las cuencas de la zona Andina del departamento de Nariño, con fines de estimar caudales medios mensuales en ríos con escasez o falta de información. Para esto, fue utilizada información disponible de las cuencas instrumentadas dentro de la zona de estudio, como sus características fisiográficas y variables hidroclimatológicas.

2. JUSTIFICACIÓN

La disponibilidad de información de aforo de caudales a nivel global es escasa, por lo que la implementación de metodologías para la predicción de caudales es uno de los más grandes retos para el estudio, manejo y planeación del recurso hídrico ([Sivapalan, 2003](#)).

Colombia, es un país con una gran disponibilidad hídrica ([IDEAM, 2018](#)), por lo que el poder contar con estimaciones del comportamiento del régimen de caudales en las cuencas o territorios que se encuentran con escasas de información hidrológica, podría ser de gran utilidad para la adecuada gestión del recurso hídrico (Gaviria, 2018).

El departamento de Nariño, es un territorio del país con un gran papel hidrológico al componer dentro de sí un gran número de nacimientos de ríos y quebradas que son fuentes hídricas importantes para suplir la demanda del departamento ([Gobernación de Nariño, 2012, 2016](#)). Sin embargo, la escasez de información de aforo de caudales dentro del territorio impide una adecuada gestión del recurso hídrico que termina afectando de manera social, ambiental y económica al territorio, impidiendo establecer estrategias de gestión del recurso como caudales de diseño, eventuales escenarios de regulación, proyecto de obras y capacidad de los cursos de agua, entre otros ([Zucarelli, 2017](#)).

Por lo anterior, la estimación del comportamiento del régimen de caudales en las cuencas del departamento resulta de gran importancia. Una de las metodologías empleadas para la predicción de caudales es mediante la identificación de regiones hidrológicas homogéneas, de tal manera que sea posible regionalizar los caudales de los ríos con escasas de información de las cuencas de interés, de tal manera que al regionalizar se busca transferir información de un sitio a otro dentro de un área de comportamiento hidrológico semejante para obtener información hidrológica en sitios sin datos o con poca información.

Es así como el presente estudio buscó aportar a la disciplina de la hidrología y a la zona Andina del departamento de Nariño por medio de la estimación de caudales medios mensuales a través de modelos estadísticos empleando la regionalización, de manera que se busca transferir la información disponible de cuencas aforadas, para estimar los caudales en otras regiones del territorio donde no haya datos disponibles o se presente escasas de los mismos. Además, al regionalizar se busca contribuir también en la delimitación de regiones hidrológicamente homogéneas con respecto a sus relaciones entre el régimen de caudales de las cuencas y sus diferentes características fisiográficas y variables asociadas al clima. De manera que, al tener una aproximación a la disponibilidad hídrica dentro de la zona de estudio, podrá servir como insumo para futuros estudios hidroclimatológicos, estudios relacionados con la gestión integral del recurso hídrico, entre otros.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Estimar caudales en las cuencas hidrográficas no instrumentadas de las regiones homogéneas fisiográfica e hidroclimáticamente de la zona Andina del departamento de Nariño.

3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las variables fisiográficas e hidroclimáticas de las cuencas hidrográficas ubicadas en la zona Andina del departamento de Nariño.
- Definir regiones hidrológicas homogéneas a partir de las variables fisiográficas e hidroclimáticas disponible en las cuencas hidrográficas de la zona Andina del departamento de Nariño.
- Construir modelos estadísticos que permitan estimar caudales en cuencas no instrumentadas en función de las características fisiográficas e hidroclimáticas en cada una de las regiones hidrológicas homogéneas definidas en la zona Andina del departamento de Nariño.

4. MARCO TEORICO

4.1. Gestión integrada del recurso hídrico

[Global Water Partnership \(2022\)](#) definen a la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) como “*un proceso que promueve la gestión, manejo y aprovechamiento coordinado del agua, la tierra y los demás recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social de manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales*”. Dado lo anterior, un objetivo principal que tiene la GIRH es el orientar el desarrollo de políticas públicas en materia de recurso hídrico, a través de una combinación de desarrollo económico, social y la protección de los ecosistemas ([MINAMBIENTE, 2021](#)).

4.2. Hidroclimatología colombiana

El territorio colombiano está situado en la franja ecuatorial, teniendo parte de él en la zona trópica y subtropical del planeta; por esto, Colombia ha sido considerada "como una isla entre tres océanos" (Snow, 1976; citado por [Poveda, 2004](#)), al considerarse que además de estar entre el Caribe y el Pacífico, Colombia recibe la influencia de la circulación atmosférica de la cuenca Amazónica.

La localización del territorio colombiano y su variedad de características físico-geográficas hace que el país presente ciertas particularidades en su clima y fenómenos atmosféricos presentes dentro de él. Particularmente la presencia de la barrera orográfica que constituyen los tres ramales de la cordillera de los Andes, induce la formación de climas locales y regionales de alta complejidad ([IDEAM & UNAL, 2018](#); [Poveda, 2004](#)).

4.2.1. Régimen de lluvias

El IDEAM & UNAL (2018), mencionan que la orografía del país influye directamente en las condiciones climáticas del país, pues dentro de él hay una circulación a gran escala de los vientos alisios (vientos que soplan del Este, del Noreste o del Sureste) los cuales convergen en la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT); junto con los grandes sistemas orográficos que organizan grandes regiones climáticas sobre el territorio. Así, es posible encontrar que las zonas más lluviosas están en la vertiente oriental de la cordillera oriental y en la vertiente occidental de la cordillera occidental, mientras que en los valles interandinos las precipitaciones son menores. Este comportamiento regionalizado, puede clasificarse en tres regiones y en tres regímenes en el ciclo anual de la precipitación: monomodal en la parte oriental, bimodal en las regiones Andina y Caribe y cuasimonomodal (o cuasibimodal) en la región Caribe. En la región Andina y Pacífica, hay dos temporadas de abundantes lluvias (una en marzo-mayo otra en septiembre-noviembre) y dos períodos secos; este régimen bimodal se produce por el efecto del paso de la ZCIT de sur a norte en el primer semestre y de norte a sur en el segundo semestre.

4.2.2. El fenómeno El Niño-La Niña Oscilación del Sur (ENOS)

La variabilidad interanual de la precipitación en el territorio colombiano se ve influenciado por su localización geográfica dentro del Pacífico tropical, pues en este se generan cambios de presión en la atmósfera y anomalías en la temperatura del agua; a lo cual se le conoce como el fenómeno de Oscilación del Sur (ENOS) en sus fases extremas El Niño (fase cálida) provocando una disminución en la precipitación y La Niña (fase fría), lo que altera la circulación en la atmósfera tropical e induce anomalías climáticas a diferentes regiones del planeta ([IDEAM & UNAL, 2018](#)).

En diversas regiones de Colombia, el fenómeno de La Niña se caracteriza por presentar un aumento considerable de las precipitaciones (anomalías positivas) y una disminución de las temperaturas (anomalías negativas), mientras que los efectos de El Niño tienen efectos contrarios a los anteriores mencionados de la fase fría del fenómeno ENOS. Los periodos en que se han presentado los fenómenos El Niño y La Niña, al tratarse de eventos extremos como sequías, inundaciones, deslizamientos, racionamientos de energía, desabastecimiento de agua, entre otros; han ocasionado efectos negativos sobre el medio físico natural, y a nivel socioeconómico por la vulnerabilidad que tienen diversas regiones del país y la poca capacidad de respuesta inmediata ante tales eventos ([Montealegre e IDEAM, 2014](#)). Es por ello que conocer el porcentaje de reducción y/o aumento de la precipitación y del caudal cuando se presentan las fases extremas del ENOS es de vital importancia para avanzar hacia un mejor conocimiento del comportamiento de la oferta hídrica en una cuenca ([Ávila et al., 2013](#))

4.2.2.1. Vulnerabilidad de Colombia ante eventos climáticos extremos

La variabilidad climática en el territorio nacional se evidencia con las emergencias por origen natural declaradas en el país, pues en el periodo de 2011-2014 el 68% correspondieron a eventos hidrometeorológicos cuya principal causa fueron las inundaciones y los deslizamientos. Es así como se evidencia una alta vulnerabilidad para Colombia ante los impactos de eventos climáticos extremos como inundaciones o sequías, afectando gravemente el desarrollo territorial y sectorial del país principalmente a nivel del bienestar social y económico. ([DNP, 2015, 2020](#))

4.2.2.2. Vulnerabilidad del departamento de Nariño ante eventos climáticos extremos

El Departamento Nacional de Planeación (DNP) de Colombia (2015), para el periodo comprendido entre 2006-2014, ubicó al departamento de Nariño en el décimo puesto de los departamentos más afectados por emergencias de origen natural, de tal forma que se ubicó en el quinto puesto en número de familias damnificadas, siendo consecuente que fuese el primer departamento afectado por destrucción de viviendas, y el segundo con más afectaciones sobre la infraestructura vial debido a deslizamiento e inundaciones, relacionándose con la presencia del fenómeno de La Niña. Por otro lado, la ocurrencia del fenómeno de El Niño también tuvo graves consecuencias dentro del territorio, pues afectó extensas hectáreas por incendios de cobertura vegetal, sequía, entre otros efectos; afectando de manera social, ambiental y económica al territorio. ([Gobernación de Nariño, 2016](#))

4.2.3. Información hidroclimatológica y red de medición

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), es la entidad encargada de la gestión de la información hidroclimatológica en la mayor parte del territorio colombiano ([REGATTA, s.f.](#)). La red de medición del IDEAM está compuesto por distintos tipos de estaciones que varían en torno a su tipo de tecnología y variables de interés de medición. Sin embargo, en la mayoría de regiones del país se presenta escasez en la información hidroclimatológica disponible, por lo que no siempre es posible conseguir información de calidad. Algunas variables de interés que son medidas por el IDEAM son la precipitación y el caudal. Para esta última variable son empleadas estaciones hidrométricas para su medición; a nivel global, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (1994) ha definido una densidad mínima de estaciones hidrométricas en función del tipo de unidad fisiográfica, con fines de poder hacer control de los recursos hídricos disponibles en una región, lo cual se aprecia en la Tabla 1.

Tabla 1. Densidades mínimas recomendadas de estaciones de flujo fluvial.

Unidad fisiográfica	Densidad mínima por estación (Superficie en km ² por estación)
Zonas costeras	2.750
Zonas montañosas	1.000
Llanuras interiores	1.875
Zonas escarpadas/ondulantes	1.875
Pequeñas islas	300
Zonas polares y áridas	20.000

Fuente: Organización Meteorológica Mundial (OMM), 1994.

4.3. La Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica, o también conocida como hoya hidrográfica, es el área de aguas superficiales o subterráneas, que por medio de uno o varios cauces naturales vierten sus aguas, ya sea desde un caudal continuo o intermitente, a una red natural. Esto confluye o se unifica en un curso o cauce mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar. Es así como la cuenca hidrográfica permite realizar un balance superficial entre el agua que entra al sistema (precipitación) y el agua que sale del mismo (escorrentía). ([Decreto 1076 de 2015](#); [Reyes et al., 2010](#))

La cuenca hidrográfica tiene un papel muy importante dentro del ciclo hidrológico al tener la capacidad de captar y concentrar la oferta del agua proveniente de las precipitaciones; esto hace que sea considerada la principal forma terrestre dentro de él. Esta consideración hace que sea vista como la unidad territorial adecuada para la gestión integrada de los recursos hídricos. Es así como la cuenca se comporta como un sistema en el cual se interrelacionan y dependen entre sí de manera constante y dinámica los sistemas físicos, bióticos y el sistema socioeconómico compuesto por los

usuarios de las cuencas, independiente de si son habitantes o interventores externos de la misma ([Dourojeanni et al., 2002](#)).

4.3.1. Partes y elementos de una cuenca

El relieve y la forma del terreno caracterizan la topografía y la forma en cómo se divide por partes la cuenca dependiendo su altitud, de tal forma que en una cuenca hidrográfica puede dividirse en tres secciones como *parte alta*, *parte media*, y *parte baja* ([World Vision, 2004](#)). Dentro de la topografía también se incluye la zona por donde el río principal y sus afluentes tienen su curso, definiéndose como cauce principal, que en su paso se encuentra el Talweg o Vaguada siendo este la línea que une las máximas profundidades de cada sección transversal de un río. Este mismo tiene intrínseco otro elemento denominado Vertientes, que corresponde a las áreas receptoras de agua extendidas a lado y lado del Talweg. ([Reyes et. al., 2010](#); [Rocha, 2009](#)).

4.3.2. Caudal específico o unitario de una cuenca

El caudal específico, también conocido como caudal unitario, hace referencia al caudal aportado por área de drenaje, es decir, la escorrentía producida en un determinado punto de la cuenca representado por su caudal en dicho punto. Este parámetro permite comparar el caudal entre cuencas con superficies distintas. En resumen, se puede expresar por medio de la Ecuación 1 ([CVC, 2018](#); [Sanchez, 2013](#)).

$$Q_u = \frac{Q}{A} \quad \text{Ecuación 1} \quad \text{Unidades:} \quad \left[\frac{L}{s.km^2} , \frac{L}{s.ha} \right]$$

4.3.3. Características morfométricas y fisiográficas de una cuenca y su relación con la escorrentía

Las características morfométricas y fisiográficas de una cuenca hidrográfica la describen física y espacialmente, donde además influyen en gran medida sobre el comportamiento de sus eventos hidroclimáticos, tal como de la precipitación y de los caudales que transitan por ella ([Lux, 2015](#)). Estas parten fundamentalmente de dos insumos, (i) de la línea divisora de aguas que corresponde a la delimitación de la cuenca hidrográfica, siendo esta una línea curva definida por las altitudes, con su punto de cierre en la zona más baja de la cuenca correspondiente al punto de salida donde las precipitaciones que caen sobre la cuenca tienden a ser drenadas ([Garay & Agüero, 2018](#)); y (ii) de un Modelo Topográfico o de Elevación Digital de terreno (DEM de sus siglas de inglés) de la cuenca.

A continuación, se describen las principales características morfométricas de una cuenca hidrográfica en base a la *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas* de Reyes, A., Barroso, F. & Carvajal, Y. (2010).

4.3.3.1. Características morfométricas básicas de la cuenca

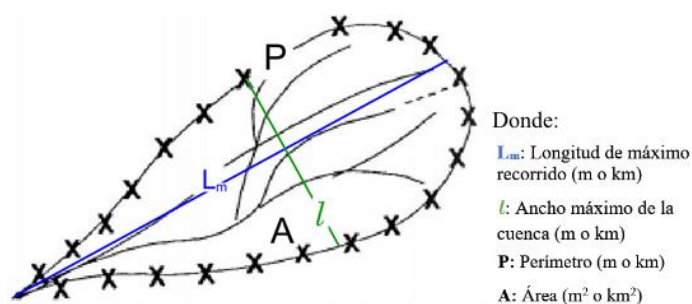


Figura 1. Características morfométricas básicas de una cuenca.

Fuente: Adaptado de Guerrero (s.f.)

Algunas características básicas de la cuenca se definen a partir de la delimitación de la cuenca por medio de su línea divisoria de aguas. En la Figura 1 se aprecian estos parámetros básicos.

A continuación, en la Tabla 2 se presentan en detalle las características morfométricas básicas presentadas en la Figura 1.

Tabla 2. Características morfométricas básicas de una cuenca.

Característica	Descripción
Área (A) o superficie	Es la proyección ortogonal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural. Corresponde a la superficie delimitada por la divisoria de aguas de la zona de estudio; este parámetro se expresa normalmente en km^2 o m^2 (Lux, 2015). Dependiendo del tamaño relativo en km^2 de las superficies hidrológicas, se les denomina (sin ser algo rígido estos términos), los nombres de sector (5 - 20), microcuenca (20 – 100), subcuenca (100 – 300), y cuenca (> 300) (Jiménez & Materón, 1986; citado por Reyes et. al., 2010).
Perímetro (P)	Es la longitud sobre un plano horizontal, que recorre el parteaguas o línea divisoria de aguas. Se expresa normalmente en metros o kilómetros
Longitud (L_m o L)	Es la longitud máxima de recorrido, que se define como la distancia horizontal del río principal entre un punto aguas abajo (estación de aforo) y otro punto ubicado al extremo contrario más lejano del primero ubicado, cortando la línea de contorno de la cuenca (Guerrero, s.f.).
Ancho máximo (l o W)	Se define como la relación entre el área (A) y la longitud de la cuenca (L) (Guerrero, s.f.). $l = \frac{A}{L} \quad (2)$

Fuente: Adaptado de Reyes et. al. (2010)

4.3.3.2. Índices y Coeficientes de Forma

Las características morfométricas tratan de cuantificar por medio de índices y/o coeficientes el movimiento del agua y el cómo responde la cuenca a tal movimiento. De tal manera, estos parámetros son un referente para determinar la dinámica esperada de la escorrentía superficial dentro de la cuenca, donde, además, esta dinámica determina también la forma de la cuenca. Los principales índices y coeficientes de forma son (i) el índice de compacidad (K_c), (ii) el factor de forma (F), (iii) el índice de alargamiento (l_a), y (iv) el índice asimétrico.

4.3.3.3. Pendiente media de la cuenca (S)

La pendiente es la variación de la inclinación de una cuenca, de tal manera que es estimada con base en un plano topográfico que contenga curvas de nivel con igual desnivel entre ellas, empleando alguno de los métodos como el de Alvord y el de Horton.

La pendiente es un indicador de posibles problemas de erosión en zonas con altas pendientes, o problemas de drenaje y sedimentación en zonas con pendientes bajas. También tiene influencia en la red de drenaje de la cuenca, pues afecta directamente el escurrimiento de las aguas lluvias; esto es, en la magnitud y en el tiempo de formación de una creciente en el cauce principal.

4.3.3.4. Elevación de la cuenca y elevación media (E_m).

La elevación de la cuenca es la variación altitudinal presente a lo largo de la cuenca hidrográfica, que incide directamente sobre sus características climáticas, ecológicas, de régimen hidrológico, entre otros. Esto se puede describir por medio de la *función o curva hipsométrica*, que es la representación gráfica del relieve de la cuenca en función de las superficies correspondientes. Algunas elevaciones destacables en la cuenca para el respectivo cálculo de otros parámetros son la Elevación mínima (E_{min}), Elevación máxima (E_{max}), Elevación media (E_m). Esta última, corresponde a la cota de la curva de nivel que divide la cuenca en dos zonas de igual área, es decir, la elevación correspondiente al 50% del área total. Su determinación se hace también partiendo de un plano topográfico empleando el método de las cuadrículas o el método área-elevación.

Algunos parámetros o coeficientes propios para la interpretación de la elevación media de la cuenca son el coeficiente de masividad, que permite diferenciar cuencas de igual altura media pero de relieve distinto, y el coeficiente orográfico, el cual expresa el potencial de degradación de la cuenca.

4.3.3.5. Red de drenaje de una cuenca hidrográfica

La red de drenaje de una cuenca hidrográfica está conformada por el cauce principal y sus tributarios, por lo que está relacionada con el movimiento del agua dentro de la cuenca. Los cauces, drenajes o corrientes de agua pueden clasificarse de distintas formas, como (i) según la constancia en la escorrentía o transporte de caudal, encontrándose cauces perennes, intermitentes y efímeros; y (ii) según su forma relacionándose con su influencia en la pendiente de la cuenca, clasificándose como cauces semirrectos, trenzados y meándricos.

Por otro lado, se pueden encontrar distintos tipos de patrones de red de drenaje acorde con las características geomorfológicas que les han dado origen. Pueden encontrarse patrones dendríticos, rectangulares, angulado, radial, paralelo, entre otros. Algunas características morfométricas de la red de drenaje de una cuenca son (i) la longitud del cauce principal (L), (ii) el perfil longitudinal del cauce principal, (iii) la longitud total de la red de drenaje ($\sum L_i$), (iv) el número de orden (n) de las diferentes corrientes, (v) la densidad de drenaje (D_d), (vi) la constante de estabilidad del río (C), (vii) el índice de torrencialidad (C_T), (viii) la pendiente del cauce (S), (ix) el tiempo de concentración (T_c), y (x) la sinuosidad del cauce (S_{in}).

4.4. Regionalización: agrupación de cuencas en regiones hidrológicas

La Regionalización hace referencia a la agrupación de cuencas en regiones hidrológicas homogéneas o semejantes, de tal manera que sea posible la transferencia o extrapolación de información de un sitio instrumentado o con información suficiente a otro sitio no calibrado o con información escasa que cumpla con la condición de tener un área con comportamiento hidrológico semejante, teniendo en cuenta también factores a nivel espacial de algunas funciones, variables, y parámetros que permitirán esa transferencia ([Gaviria, 2018](#); [Zuccarelli, 2017](#)).

Con fines de lograr tal transferencia de información, la regionalización requiere del desarrollo de un método capaz de explicar la variable de interés a extrapolar en el sitio no instrumentado por considerar. En la hidrología, los métodos más empleados para definir regiones homogéneas son aquellos basados en criterios geográficos, fisiográficos y/o climáticos o hidrológicos, así como los métodos basados en la noción de “vecindades” ([Hernández & Santos, 2019](#)).

Las características físicas de la cuenca pueden ser utilizadas para hacer correlaciones con las variables hidrológicas, teniendo en cuenta que: la característica debe ser representativa de los fenómenos que se desean representar y dicha característica debe ser fácil de medir a partir de mapas. Entre los factores físicos de una cuenca los más significativos son: a) área, b) perímetro, c) forma, d) elevación, e) pendiente, f) orientación y g) densidad de drenaje ([Zuccarelli, 2017](#)).

4.4.1. Antecedentes de regionalización

La metodología de regionalización ha sido ampliamente investigada por diferentes autores para identificar regiones homogéneas haciendo análisis regional de precipitaciones y de caudales, de tal forma que se busca información en cuencas o regiones no instrumentadas. [Gaviria \(2018\)](#), construyó curvas de duración de caudales para el territorio colombiano por medio de una regionalización hidrológica empleando 655 cuencas hidrográficas trazadas a partir de las estaciones de medición de caudales diarios del IDEAM, donde además tuvo en cuenta un total de 25 atributos para cada cuenca entre los cuales se encontraron características referentes a su tamaño, forma, condiciones climáticas del lugar donde se ubica, tipo de cobertura del suelo, geología o material predominante del suelo, y condiciones topográficas. [Apolinaro et. al. \(2017\)](#) aplicaron la regionalización de caudales mensuales en la Región Hidrográfica del Titicaca en Perú para aquellas cuencas con escasez de datos, por medio de la determinación de modelos regionales de caudales medios mensuales y de persistencia de los principales ríos; para ello tomaron como variables independientes las características climáticas y fisiográficas de las cuencas en estudio y como variable dependiente los caudales medios mensuales y de persistencia. [Zuccarelli \(2017\)](#) aplicó regionalización para las cuencas hidrográficas del Perú y la cuenca del río Uruguay (abarcando territorio de Argentina, Brasil y Uruguay) a partir de técnicas estadísticas en dos áreas de trabajo: una con gran cantidad de información y otra con poca; de tal forma que se busca encontrar las variables que tienen mayor incidencia en la determinación de regiones homogéneas. [Lauro et. al.](#)

(2021) regionalizaron los caudales máximos anuales de las cuencas del sistema hidrográfico del río Colorado, Argentina; donde el objetivo del trabajo fue encontrar la función que relaciona el caudal máximo anual con las características climáticas y morfométricas de las cuencas analizando inicialmente por doce modelos de regresión simple, teniendo como mejores resultados aquellos presentados cuando la variable predictora es el área y perímetro de la cuenca. Canchala et al., (2020) desarrolló la regionalización de la precipitación mensual para las cuencas del departamento de Nariño, Colombia, por medio del método de Análisis de Componentes Principales No Lineales (ACPNL), permitiendo también determinar regiones climáticas homogéneas como la Región Andina (RA) y la Región Pacífica (RP) del departamento.

4.4.2. Metodología para la identificación de regiones hidrológicas homogéneas

La regionalización abarca gran cantidad y variedad de datos multivariantes, por lo que resulta necesario emplear métodos estadísticos con fines de relacionar, simplificar y confirmar la información. En la Tabla 3 se presentan métodos a emplear junto con su respectiva descripción.

Tabla 3. Métodos estadísticos empleados para identificación de regiones hidrológicas homogéneas

Metodología	Descripción
Análisis de correlación entre variables	Los coeficientes de correlación se utilizan con fines de medir el grado de relación o asociación existente, generalmente, entre dos variables aleatorias. Para este estudio, se empleará el coeficiente de correlación de Pearson, el cual tiene como objetivo medir la fuerza o grado de asociación entre dos variables aleatorias cuantitativas que poseen una distribución normal bivariada conjunta (Restrepo & González, 2007).
Análisis de componentes principales (ACP)	Permite extraer la información importante de una la matriz de variables previamente definida, de tal manera que se pueda expresar la información como un conjunto de pocas variables nuevas denominadas Componentes Principales (CP), las cuales corresponden a una combinación lineal de las originales (Kassambara, 2017), por lo que este conjunto de CP será aquel donde se han transformado el conjunto original de variables en otro conjunto con nuevas variables incorreladas entre sí (que no tenga repetición o redundancia en la información), con fines de estudiar las relaciones que se presentan entre n variables correlacionadas (Cuadras, 2007).
Agrupamiento jerárquico en componentes principales (AJCP)	Tiene como objetivo identificar grupos o conglomerados de objetos similares dentro de un conjunto de datos de interés (Kassambara, 2017). Las estrategias de agrupamiento permite combinar los métodos estándar utilizados en los análisis de datos multivariados como (i) métodos de componentes principales (ACP), (ii) de agrupación jerárquica, que buscan identificar grupos de observaciones similares en un conjunto de datos (Amat-Rodrigo, 2017), y (iii) de agrupación no jerárquica o de particiones como K-means (Kaufman & Rousseeuw, 2005). Estas dos últimas estrategias, corresponden a la clasificación de los AJCP.
Selección de numero de grupos	La conformación de grupos se realiza por medio del algoritmo k-means, método no jerárquico de AJCP. Consiste en agrupar las particiones de M puntos de N dimensiones en K clústers, de manera que la suma de las distancias euclidianas de los puntos al centroide (correspondiente a la media aritmética) de su respectivo clúster sea la mínima posible (Hartigan, 1975), o visto de otra forma, que la varianza interna sea lo más pequeña posible.

Metodología	Descripción
Determinación del número óptimo de clústeres	Los K clústers definidos con anterioridad, resultan necesarios de optimizar de forma que la suma de las varianzas internas de todos ellos sea lo menor posible, por lo que es necesario definir un modo de cuantificar la varianza interna (Amat, 2017). Esto es posible realizarlo empleando los siguientes métodos: (i) método de la silueta "silhouette" (para el ancho promedio de la silueta) que mide la calidad de un agrupamiento, y será la idónea aquella que maximice la silueta promedio sobre un rango de valores posibles para k, y (ii) método del codo "wss" (para el total dentro de la suma del cuadrado) que mide la compacidad del agrupamiento, donde se busca que sea la menor posible (Kaufman & Rousseeuw, 2005).

4.5. Estimación de caudales en cuencas no instrumentadas

La estimación de caudales de un río para cuencas no instrumentadas se puede realizar de diversas maneras, el método a emplear dependerá fundamentalmente del tipo de información disponible y de los requerimientos o necesidades. Los métodos a emplear, de acuerdo con [Poveda et al. \(2002\)](#) pueden clasificarse en distintos grupos como: (i) los que apuntan a la estimación de ciertos índices, tales como la media o cuantiles específicos a partir de técnicas de regionalización, involucrando parámetros geomorfológicos, fisiográficos, climáticos e hidrológicos; (ii) métodos gráficos (construcción de curvas regionales); (iii) técnicas de interpolación espacial; y (iv) los que permiten estimar ciertas características del caudal a partir de series sintéticas de caudal. Un método básico ampliamente empleado en la hidrología (Campos-Aranda, 2016), el cual se ve relacionado con el primer método mencionado, es por medio del desarrollo de ecuaciones de regresión, las cuales pueden ir desde regresiones lineales o potenciales, monovariantes o implementando múltiples variables, de manera que relacionen los registros de caudal con las características de drenaje de la cuenca. Este enfoque permite establecer relaciones cuantitativas entre el caudal y variables explicativas como el área de la cuenca, la pendiente del terreno, la precipitación y otros factores climáticos y geográficos, lo cual resulta de utilidad al facilitar la predicción de caudales en cuencas no instrumentadas a partir de datos disponibles en cuencas similares.

A continuación, se detalla sobre estos métodos previamente mencionados que relacionan un tipo de regresión, las cuales estadísticamente son válidas a aplicar para las variables hidroclimatológicas como el caudal.

4.5.1. Métodos de regresión Regresión lineal monovariante para la estimación de caudales

La regresión lineal monovariante es una técnica estadística utilizada para modelar la relación entre dos variables continuas: una variable dependiente (en este caso, los caudales) y una variable independiente (como la precipitación o el nivel del agua en un punto específico). El proceso comienza con la recopilación de datos históricos tanto de los caudales como de la variable independiente seleccionada. Es crucial que estos datos sean consistentes y cubran un período de tiempo adecuado para capturar la variabilidad existente.

Una vez recopilados los datos, se realiza un análisis exploratorio para entender mejor su distribución, identificar tendencias y detectar posibles valores atípicos. Esto incluye la creación de gráficos de dispersión que permiten visualizar la relación entre el caudal y la variable independiente.

El siguiente paso es formular el modelo de regresión lineal, que se expresa mediante la ecuación $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon$. En esta ecuación Y representa el caudal, X la variable independiente, β_0 la ordenada al origen (intercepto), β_1 la pendiente de la recta de regresión y ϵ el término de error. Para estimar los parámetros β_0 y β_1 , se utiliza el método de mínimos cuadrados, que minimiza la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y los valores predichos por el modelo. Este proceso se puede realizar con diversas herramientas estadísticas como Excel, R o Python.

La bondad de ajuste del modelo se evalúa mediante el coeficiente de determinación (R^2), que indica qué proporción de la variabilidad en la variable dependiente es explicada por la variable independiente. Además, se analizan los residuos, que son las diferencias entre los valores observados y los predichos, para verificar su independencia y homocedasticidad (constancia de la varianza). Para validar el modelo, se dividen los datos en conjuntos de entrenamiento y prueba. Esto permite evaluar la capacidad predictiva del modelo, utilizando métricas como el error cuadrático medio (MSE), el error absoluto medio (MAE), entre otros, para el conjunto de prueba (James, G., et. al., 2023; Tranmer, M., & Elliot, M., 2008).

4.5.2. Regresión lineal múltiple para la estimación de caudales

La regresión lineal múltiple (RLMu) en el campo de hidrología permite transferir información de las características del escurrimiento calculadas en cuencas aforadas, hacia otras donde tal información es necesaria y no existen aforos ([Campos-Aranda, 2016](#)). La RLMu describe la relación tipo lineal entre una variable dependiente (Y) (también conocida como la respuesta) y varias (p) variables independientes (X_p) (denominadas predictores o regresores) ([MathWorks, s.f.](#)). La ecuación (3) expresa el modelo general de la regresión lineal múltiple, donde β_j representa las estimaciones de parámetros lineales que se deben calcular, y ϵ representa el término de error.

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_p X_p + \epsilon_i \quad (3)$$

Para el desarrollo de las funciones de regresión, inicialmente deben ser definidas las variables independientes, que serán aquellas con mayor correlación ([Rojas et. al., 2009](#)). Estas funciones de regresión suelen desarrollarse teniendo en cuenta un periodo de retorno, que está directamente relacionado con la probabilidad de ocurrencia.

4.5.3. Regresión potencial múltiple y monovariante para la estimación de caudales

La regresión potencial múltiple es una técnica estadística utilizada para modelar la relación entre una variable dependiente y múltiples variables independientes. Este método es particularmente útil cuando la variable dependiente o respuesta está influenciado por varios factores simultáneamente.

La formulación del modelo de regresión potencial múltiple se basa en una ecuación del tipo:

$$\log(Y) = \beta_0 + \beta_1 X_1^{\gamma_1} + \beta_2 X_2^{\gamma_2} + \dots + \beta_n X_n^{\gamma_n} + \epsilon \quad \text{Ecuación 4}$$

$$Y = e^{\beta_0 + \beta_1 X_1^{\gamma_1} + \beta_2 X_2^{\gamma_2} + \dots + \beta_n X_n^{\gamma_n} + \epsilon} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde Y representa el caudal, X_i son las variables independientes, β_0 es la ordenada de origen, β_i son los coeficientes de regresión y γ_i son los exponentes asociados a cada variable independiente, y ϵ es el término de error. La misma ecuación aplica para una regresión potencial monovariante, solo que $n=1$.

Para estimar los parámetros β_i y γ_i , se utiliza un enfoque iterativo que minimiza la suma de los errores al cuadrado entre los valores observados y los predichos por el modelo. Este proceso generalmente se realiza utilizando software estadístico especializado, como R o Python, que implementa algoritmos de optimización para ajustar el modelo de regresión potencial múltiple (Zaiontz, C., 2015).

4.5.4. Pruebas de bondad de ajuste

Los modelos estadísticos para la estimación de caudales siguen una distribución de probabilidad al desarrollarse teniendo en cuenta un periodo de retorno. Para las distribuciones de probabilidad resulta necesario aplicar pruebas de bondad del ajuste con fines de poder probar su ajuste comparando los valores teóricos y muestrales de las funciones de frecuencia relativa o de frecuencia acumulada ([Chow et. al., 1994](#)). Para las distribuciones de frecuencia relativa, es utilizada la prueba de bondad de ajuste X^2 , cuyo propósito es encontrar la distribución de probabilidad adecuada para una serie de datos. Esta prueba compara las frecuencias observadas con las frecuencias esperadas bajo una hipótesis nula específica, y un valor de X^2 menor indica un mejor ajuste del modelo.

Con fines de encontrar la distribución de probabilidad de una serie de datos. Para las distribuciones de frecuencia acumulada es utilizada la prueba de Kolmogorov-Smirnov que busca encontrar el tipo de distribución de probabilidad de una serie de datos ([Azarang & García, 1996](#)). Esta prueba mide la distancia máxima entre la distribución acumulada empírica de la muestra y la distribución acumulada teórica propuesta, donde un valor menor de la estadística de Kolmogorov-Smirnov indica un mejor ajuste.

Con relación al tipo de distribución de probabilidad, está el tipo en que la población es normalmente distribuida, donde para comprobar este comportamiento de la muestra suele ser utilizada la prueba de normalidad de [Jarque & Bera \(1980\)](#), la cual involucra tanto la asimetría, como la curtosis en la serie de datos y su estadística se distribuye de manera aproximadamente X^2 con dos grados de libertad bajo la hipótesis nula de normalidad (Triana, 2021). Un valor de Jarque-Bera cercano a cero sugiere que la muestra es consistente con una distribución normal.

Otra metodología implementada para evaluar la bondad de ajuste, es mediante índices de desempeño (ID) los cuales permiten la validación de supuestos para los modelos de regresión, donde como índices de desempeño se encuentran algunas métricas como el RMSE (Root Mean Square Error), MAPE (Mean Absolute Percentage Error), R^2 (coeficiente de determinación) y NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) ([Campos-Aranda, 2016](#); Montgomery, D., et. al., 2012; Gupta, H., 1999). A continuación, se detalla sobre estos índices de desempeño, los cuales fueron importantes a tener en cuenta dentro del presente estudio. Para las ecuaciones presentadas a continuación, se tiene en cuenta los valores observados (y_i), los valores predichos ($\hat{y}_i$) y la media de los valores observados ($\bar{y}$)

El *Error Cuadrático Medio (RMSE)* es una medida de la diferencia entre los valores predichos por un modelo o estimador y los valores observados. RMSE Calcula la raíz cuadrada de la media de los errores cuadráticos entre los valores observados y los valores predichos. Es una medida de la dispersión de los errores y es sensible a grandes errores debido al cuadrado en la fórmula (ver Ecuación 6).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad \text{Ecuación 6}$$

El *Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE)* mide el error porcentual medio entre las predicciones y los valores observados, expresado como un porcentaje del valor observado. Calcula el error porcentual absoluto medio entre los valores observados y los valores predichos, expresado como un porcentaje del valor observado. Es útil para evaluar la precisión relativa del modelo en diferentes rangos de valores observados (ver Ecuación 7).

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

El coeficiente de determinación (R^2) Es una medida estadística que indica qué tan bien se ajustan los datos a la línea de regresión ajustada. Mide la proporción de la varianza total de la variable dependiente que es explicada por el modelo.

Un valor de cercano a 1 indica un buen ajuste del modelo a los datos observados (ver Ecuación 8).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Ecuación 8}$$

Finalmente, la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) es una medida de la eficiencia predictiva de un modelo hidrológico a comparar, utilizando la media de los valores observados. Un valor de NSE mayor que cero indica que el modelo es mejor que usar la media, un valor cercano a uno indicará que el modelo tiene una buena capacidad predictiva en comparación, mientras que un valor negativo indica que la media es una mejor estimación que el modelo (ver Ecuación 9).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Ecuación 9}$$

5. METODOLOGÍA

5.1. Esquema metodológico

En la Figura 2 se muestra el esquema metodológico de las macro actividades desarrolladas para el cumplimiento de los objetivos planteados de esta investigación. Para realizar la estimación de caudales medios mensuales en cuencas hidrográficas no instrumentadas empleando la metodología de regionalización en la zona Andina del departamento de Nariño, en primera instancia se caracterizaron las variables fisiográficas e hidroclimáticas de las cuencas hidrográficas de la zona de estudio (objetivo 1); posterior a ello, se definieron las regiones hidrológicas homogéneas a partir de las variables fisiográficas e hidroclimáticas disponibles (objetivo 2), para finalmente estimar los caudales medios mensuales en las cuencas hidrográficas instrumentadas y no instrumentadas por medio de modelos estadísticos basados en las regiones hidrológicas homogéneas definidas (objetivo 3 y objetivo general). A continuación, se presenta en detalle la metodología implementada para cada objetivo específico.

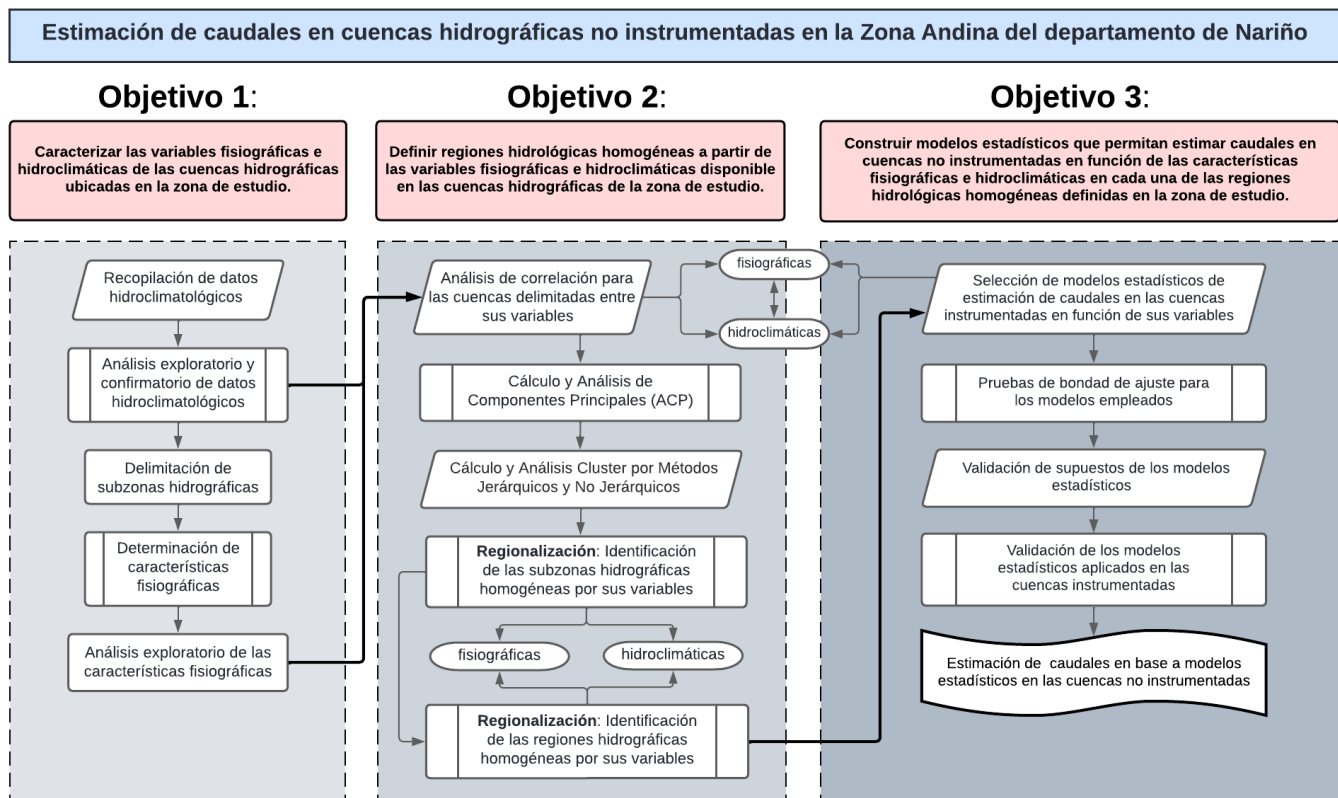


Figura 2. Esquema metodológico

5.2. Zona de estudio: Región Andina del Departamento de Nariño

El departamento de Nariño tiene una posición geoestratégica al estar ubicado en extremo del sur occidente colombiano delimitado entre las coordenadas 79° - 77°W y 0° - 3°N, con una altitud máxima de 4.767 msnm, promedio de 2.467 msnm y mínima de 0 msnm, su extensión total es de

33.268 km², dentro del cual cuenta con unas complejas características topográficas que influyen en su climatología y disponibilidad del recurso hídrico al estar integrado por tres grandes regiones geográficas de Colombia como la Amazonía, el Pacífico, y la Andina ([Gobernación de Nariño, 2012, 2016](#)).

La zona de estudio corresponde a la Región Andina del departamento de Nariño, la cual abarca el 40% del territorio Nariñense atravesando de norte a sur la parte central del departamento, para una extensión aproximada de 13.307 km² (ver Figura 3). Posee una amplia variación altitudinal entre los 169 y 4.756 m.s.n.m.

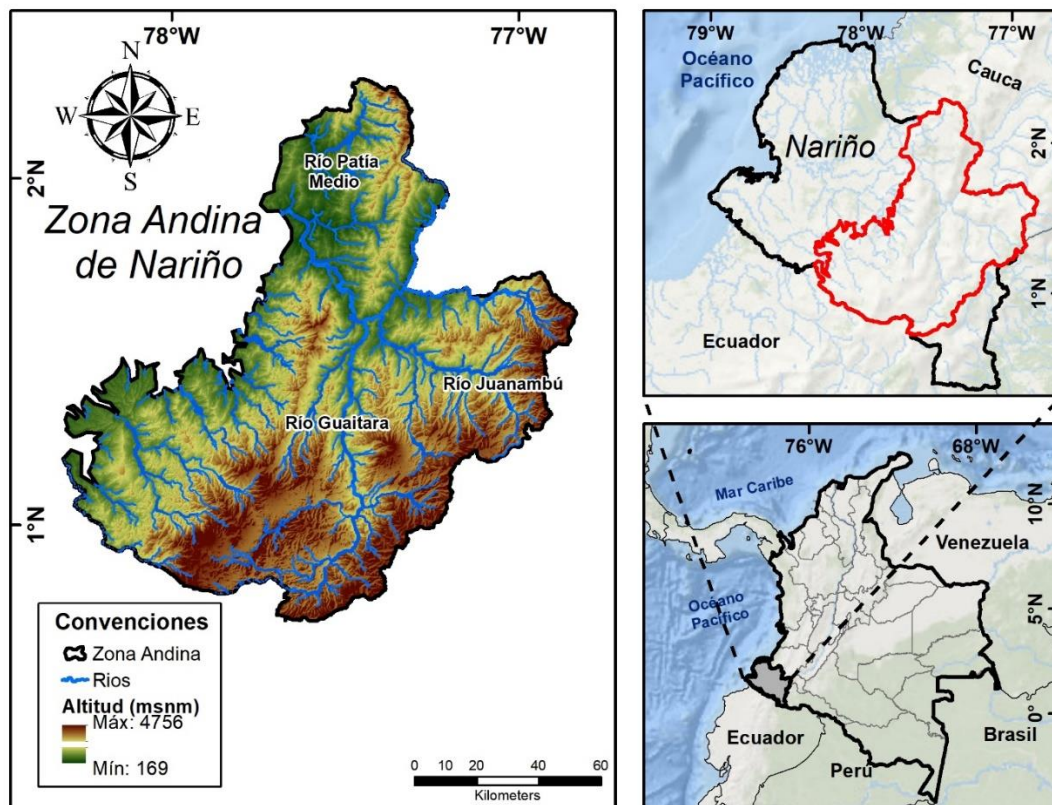


Figura 3. Ubicación geográfica de la zona de estudio.

Fuente: elaboración propia en ArcGIS

5.1. Red Hidrometereológica: Recopilación de los registros de caudal y precipitación

Se realizó una revisión de las estaciones disponibles de la red hidrometeorológica del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) de Colombia por medio del Catálogo Nacional de Estaciones (CNE) y del portal de Consulta y Descarga de datos hidrometeorológicos (DHIME), con fines de identificar las estaciones con registros mensuales de Precipitación y Caudal útiles para el presente estudio. Para ello, preliminarmente se tuvieron en cuenta los criterios presentados a continuación:

1. Periodo de registro con una longitud mínima de 30 años.

2. Vigencia de operación activa.

3. Ubicación distribuida dentro de la zona de estudio.

Una vez recopilada la información de las estaciones identificadas, se determinó un primer periodo de registro común buscando tener los registros más actuales a la fecha. De manera que, bajo ese primer periodo de registro definido y tentativo, se tuvo como cuarto criterio:

4. Tener un Porcentaje de Datos Faltantes (PDF) inferior al 20% para las series de precipitación, y del 40% para las de caudal.

Los anteriores PDF se establecieron teniendo en cuenta la calidad de las series hidrometereológicas, pues ello imposibilitó abordar más estaciones disponibles dentro de la zona de estudio. Con lo anterior, se identificó las estaciones de caudal (19) y precipitación (37) útiles para el presente estudio las cuales se aprecian en las Tabla 4 y Tabla 5

Finalmente, se definió un periodo de estudio de 35 años desde 1984 al 2018, donde las series hidrometereológicas fueron descargadas a una escala mensual.

Tabla 4. Estaciones de estudio del IDEAM con registros de caudal dentro de la zona Andina de Nariño.

Código	Nombre	Abreviatura	Coordenadas		Altitud (msnm)	Río principal
			Longitud	Latitud		
51027020	Pilispi	PILI	-77,99	1,21	1259	Mira
51027040	Palpis	PAL	-78,05	1,22	930	Mira
51027050	Pipiguay	PIP	-78,10	1,24	420	Mira
52017001	Puerto Nuevo Patía	PNP	-77,25	1,91	525	Patía alto
52017010	Puente Guascas	PTG	-77,43	1,59	450	Patía alto
52037010	Canada	CAN	-77,01	1,67	1750	Mayo
52047010	Universidad	UNI	-77,29	1,23	2500	Juanambú
52047020	Puente Juanambú	PTJ	-77,31	1,52	760	Juanambú
52047030	Bocatoma Centenario	CEN	-77,25	1,20	2740	Juanambú
52047040	Providencia	PRV	-77,30	1,43	1250	Juanambú
52057010	Pilcuan	PIL	-77,47	1,02	1780	Guaitara
52057030	Agroyaco	AGR	-77,44	1,57	480	Guaitara
52057040	Carlosama	CAR	-77,69	0,84	2920	Guaitara
52057050	San Pedro	SPE	-77,48	1,38	850	Guaitara
52057060	Yunguilla	YUN	-77,58	1,35	1450	Guaitara
52067030	Vergel El	VER	-77,65	1,53	1240	Telembí
52067040	Sande El	SND	-77,77	1,40	200	Telembí
52077010	Puente Pusmeo	PTP	-77,48	1,62	380	Patía medio
52077020	Los Nortes	NOR	-77,53	1,74	340	Patía medio

Fuente: Adaptado del IDEAM (2017).

Tabla 5. Estaciones de estudio del IDEAM con registros de precipitación dentro de la zona Andina de Nariño

Código	Nombre	Abre- viatura	Coordenadas		Altitud (msnm)
			Latitud	Longitud	
52045020	Aeropuerto Antonio Nariño	AAN	1,39	-77,29	1796
52040050	Aponte	APO	1,40	-77,03	1800
52055230	Aeropuerto San Luis	ASL	0,86	-77,68	2961
52040160	Berruecos	BER	1,51	-77,14	2200
52055030	Bombona	BOM	1,18	-77,47	1493
52055210	Botana - Aut	BOT	1,16	-77,28	2820
52040040	Buesaco	BUE	1,40	-77,15	220
52050130	Chiles	CHI	0,81	-77,85	3100
52030090	Cruz La	CRUZ	1,60	-76,83	2248
52050110	Cumbal	CUM	0,91	-77,79	392
52010140	Guasca La	GCA	1,59	-77,43	500
52050050	Guachaves	GCH	1,22	-77,68	2834
52050100	Gualmatan	GMT	0,91	-77,58	2830
52030060	Hidromayo Camp	HID	1,67	-77,02	1820
52050090	Imues	IMU	1,06	-77,50	2550
51020010	Junin	JUN	1,34	-78,12	950
52050140	Vivero Linares	LIN	1,35	-77,53	1480
52070030	Llano Verde	LVE	1,74	-77,53	340
52010060	Mamaconde	MAM	1,96	-77,22	650
52040070	Narino	NAR	1,28	-77,36	2590
52055220	El Paraiso	PAR	1,07	-77,64	3120
52050010	Penol El	PEÑ	1,45	-77,44	1620
52080010	Pisanda	PIS	1,65	-77,51	350
52050120	Puerres	PUE	0,89	-77,50	2817
52050060	Rio Bobo	RBB	1,10	-77,30	364
52040060	Rosal Del Monte	RMO	1,29	-77,17	2568
52010030	Rosario El	ROS	1,74	-77,34	1700
52050020	Samaniego	SAM	1,34	-77,59	1700
52050040	Sandona	SAN	1,32	-77,48	20
52045030	San Bernardo	SBO	1,54	-77,03	2190
52060050	Sande El	SDE	1,41	-77,78	840
52045040	Taminango	TAM	1,55	-77,27	1875
52055060	Tanama	TAN	1,37	-77,58	1500
52050080	Tangua	TGA	1,09	-77,39	2420
52030030	Union La	UNI	1,58	-77,13	1745
52060040	Vergel El	VER	1,53	-77,64	1770
52035040	Viento Libre	VTL	1,62	-77,34	1400

Fuente: Adaptado del IDEAM (2017).

La ubicación espacial de las estaciones de precipitación y caudal se muestra en la Figura 4 donde se buscó abarcar de forma distribuida toda la zona de estudio.

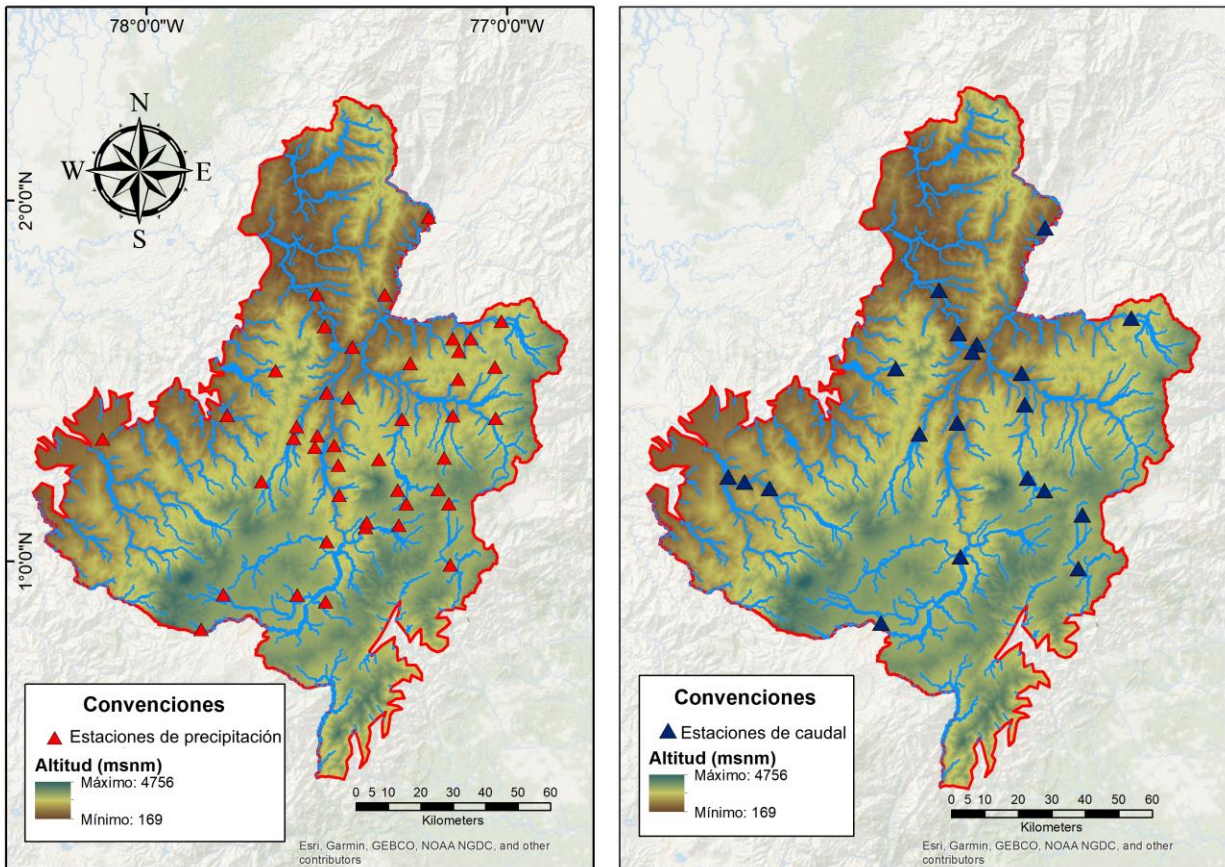


Figura 4. Estaciones de caudal y precipitación dentro de la Zona Andina del departamento de Nariño.
Fuente: Elaboración propia.

5.2. Análisis exploratorio y confirmatorio para los registros mensuales de precipitación y caudal

El periodo de estudio definido fue de 35 años desde 1984 al 2018, donde se tuvo en cuenta como principal criterio mantener la mayor cantidad de estaciones medidoras de caudal de acuerdo con su porcentaje de datos faltantes. Para los registros mensuales obtenidos de precipitación y caudal se realizó un análisis exploratorio y confirmatorio de los datos con fines de conocer el comportamiento general de las series históricas, para lo cual se (i) calcularon los estadísticos descriptivos básicos (promedio, máximo, mínimo, desviación estándar, y coeficiente de variación), y (ii) se realizaron gráficos de diagrama de cajas para identificar los datos atípicos y erróneos existentes en cada estación ([Castro & Carvajal-Escobar, 2010](#); [Triana, 2021](#)). Para los análisis y las pruebas estadísticas, se utilizarán hojas de cálculo de Microsoft Excel y el software de programación R.

5.3. Imputación de datos faltantes (DF)

El análisis de las series temporales de una variable hidroclimatológica implica la necesidad de tener una base de datos continuos, homogéneos y que abarquen el máximo intervalo temporal posible la mayor continuidad de sus registros. Sin embargo, es común que en las estaciones medidoras se presenten eventos nulos o con falta de información debido a la ausencia o falla de la lectura, falla del instrumento de registro, error de transcripción, entre otros ([Herrera et. al., 2017](#)). Estos datos faltantes (DF) limitan el análisis y provocan que la calidad de las series sea dudosa y una fuente de error, por ello está la necesidad de completar o imputar aquellos DF dentro de la serie de estudio. Es por ello que para el presente estudio se vio la necesidad de emplear metodologías que permitieran completar las series, donde de acuerdo con la literatura reciente desarrollada por autores como [Canchala et al., \(2019\)](#), sugiere que el mejor método se realizó mediante el Análisis de Componentes Principales no Lineales (NLPCA) utilizando redes neuronales artificiales, para lo cual fue utilizado el software de programación R junto con MATLAB. Para las series de caudales medios mensuales, se realizó primero un análisis de correlación entre cada estación lo cual se muestra en el Anexo 3, con fines de que al imputar los datos se tuvieran mejores resultados. Para las series de precipitación se imputó los datos entre todas las estaciones debido a la magnitud de los datos, y, que se observó que no había mejoría en la imputación de datos al agrupar las estaciones.

5.4. Análisis espaciotemporal de la precipitación y caudal

Para las series con datos completos (i) se reestimaron los estadísticos descriptivos y compararon con los calculados con las series incompletas, se elaboraron gráficos (ii) de series temporales, (iii) ciclo anual (hidrogramas y hietogramas), e (iv) histogramas de frecuencia, con fines de conocer el comportamiento y tendencias de las series históricas de caudales y precipitaciones. Además, para la caracterización espacial de la precipitación se realizaron isoyetas de precipitación media anual y mensual de las estaciones empleando sistemas de información geográfica (SIG) por medio del método Cokriging con el modelo de semivariograma tipo esférico tomando la altitud como covariable de acuerdo con lo sugerido por [Cerón et al. \(2021\)](#).

5.5. Delimitación de las cuencas hidrográficas

La delimitación de las cuencas por medio de su línea divisoria de aguas es necesaria para determinar sus características morfométricas, fisiográficas e hidroclimáticas. Para el presente estudio, fueron delimitadas de dos formas: (i) por medio de la zonificación de unidades hidrográficas de Colombia ya elaborada por el IDEAM, la cual parte de una división mayor en áreas hidrográficas que se asocian a grandes vertientes, donde a su vez se dividen en unidades de menor jerarquía, zonas y subzonas ([IDEAM, 2013](#)); y (ii) por medio de herramientas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), precisamente con el software ArcGIS el cual permite modelar cuencas hidrográficas a través de la superficie de un Modelo Digital de Elevación (DEM, de sus siglas de inglés). El DEM para la zona de estudio se obtuvo por medio del sensor

ALOSPALSAR que dispone de imágenes ráster descargables con una precisión de 12,5 m, disponibles en el portal de la NASA ASF Data Search Vertex: <http://earthdata.nasa.gov/>. Para el anterior método, se delimitaron las subcuencas hasta las estaciones hidrométricas previamente definidas dentro de la zona de estudio, pues a partir de la densidad de los sitios de medición es como se define una estructura espacial y los patrones de comportamiento dentro de un espacio geográfico (Cabral, 2011; Gutiérrez-López & Aparicio, 2020).

5.6. Determinación de características morfométricas y fisiográficas

Una vez delimitadas las subcuencas hidrográficas, se calcularon sus características fisiográficas por medio del software SIG ArcGIS, y con Microsoft Excel. Desde su línea divisoria de aguas se calcularon características básicas como el área, el perímetro, la longitud máxima de recorrido, y el ancho. Con insumos como la línea divisoria de aguas, el DEM y las ecuaciones de las características descritas en la *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas* de Reyes et. al. (2010), correspondientes a las mencionadas en el apartado del Marco Teórico del presente estudio: 4.4.2. *Características morfométricas y fisiográficas de una cuenca y su relación con la escorrentía*, se calcularon las características morfométricas y fisiográficas restantes. Debido a la extensa cantidad de información con la que se trabajó, estas características junto con sus variables hidrometereológicas como el caudal medio mensual multianual, caudal específico medio mensual multianual, y la precipitación total anual, fueron recopiladas en una matriz para facilitar la organización de los datos, la cual se presenta en el Anexo 2.

5.7. Identificación de regiones hidrológicas homogéneas

Teniendo en cuenta la cantidad y variedad de los datos de n-dimensiones que fueron recolectados de las diferentes cuencas, se propuso inicialmente hacer un análisis de correlación de variables (Lauro et al., 2021) utilizando el coeficiente de correlación de Pearson para aquellas muestras con comportamiento normal, y utilizando el coeficiente de correlación de Spearman para aquellas muestras con un comportamiento distinto al mencionado (Restrepo & González, 2007). Por medio de estos coeficientes, se buscó determinar qué parámetros que poseen mayor correlación entre sí, para lo cual fue empleada la matriz previamente definida de las variables morfométricas, fisiográficas e hidrometereológicas (MCMFH), las cuales fueron implementadas para los modelos multivariados para el cálculo de caudales.

Con fines de evaluar el mejor comportamiento de los modelos de estimación de caudales para las regiones a determinar, estas fueron definidas por dos métodos: (i) haciendo una regionalización por medio de las series de caudales específicos medios mensuales de las cuencas (QUni), pues este parámetro permite comparar cuencas con diferentes áreas, y (ii) haciendo una regionalización por medio de las características morfométricas y fisiográficas de las cuencas (CAMF). Para la segunda metodología de regionalización empleada, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) a la MCMFH con fines de reducir la dimensionalidad de los datos, conservando la mayor cantidad posible de información (Kassambara, 2017).

Para cada método de regionalización definido, fueron aplicados métodos de agrupamiento no jerárquica como el método k-means, donde este último fue empleado para la selección del número de grupos K-clústeres, los cuales fueron definidos el número óptimo de clústeres empleando el método de la silueta, y el método del codo ([Kassambara, 2017](#)).

Este método fue seleccionado por varios factores, tales como su eficiencia en grandes volúmenes de datos, ya que K-Means es conocido por su eficiencia computacional, especialmente adecuado para grandes conjuntos de datos; su robustez ante separación clara entre grupos, pues funciona bien cuando hay una separación notable entre los grupos de datos, como en el caso de las cuencas hidrográficas con variabilidad considerable; su facilidad de escalabilidad, pues puede manejar datos con unidades y magnitudes variables; y su segmentación clara, porque aunque los métodos jerárquicos como el clustering jerárquico aglomerativo (hclust) proporcionan una visión detallada de la estructura jerárquica, K-Means es preferible cuando se busca una segmentación clara sin necesidad de una estructura jerárquica explícita.

Con fines de sintetizar la información agrupada se representó por medio de gráficos tipo Perfiles Comparativos de Agrupamientos, gráficos propios de la metodología de partición como lo es K-means, los cuales son cruciales para visualizar cómo se agrupan las observaciones alrededor de cada centroide de la agrupación establecida por el método K-means, permitiendo una interpretación clara de la cohesión dentro de cada clúster y la separación entre clústeres. En aplicaciones como la hidrología y la ingeniería ambiental, estos gráficos ayudan a identificar patrones hidroclimatológicos y regiones homogéneas. De esta forma, fueron identificadas las regiones homogéneas a las cuales hacen parte las cuencas hidrográficas de la Zona Andina del departamento de Nariño. Para la implementación de los métodos descritos, fue utilizado el software de programación R, mientras que el procesamiento de la información fue realizado por medio de Microsoft Excel, y para su graficación geoespacial, el software ArcGIS - Arcmap.

5.7.1. Pruebas de normalidad

Con fines de analizar el comportamiento y tipo de distribución que siguen las muestras de interés, se realizaron pruebas de normalidad analíticas con fines de validar o invalidar la hipótesis nula (H_0) de que los datos provienen de una población distribuida normalmente. Las pruebas de normalidad tienen un nivel de significancia (p o p -value) que permiten refutar o validar la hipótesis nula (H_0); para el presente estudio se tomó un $p \geq 0.05$ para la validación de H_0 ([Dietrichson, 2019](#)). Las pruebas de normalidad empleadas fueron (i) Jarque-Bera, (ii) Anderson Darling, (iii) Lilliefors, y (iv) Shapiro-Wilk, de acuerdo con lo recomendado por [Pedrosa et. al., \(2015\)](#), las cuales se evaluaron con ayuda del lenguaje de programación R. Esto fue desarrollado con fines de determinar el comportamiento de las Características Morfométricas y fisiográficas, teniendo en cuenta que para poder hacer pruebas de correlación entre sí, se debía tener claridad del tipo de distribución que seguía (distribución normal o una distinta a este).

La metodología analítica presenta la desventaja de que el p -value calculado se ve afectado por el tamaño de la muestra, por lo que para muestras grandes este valor puede verse sesgado al obtener

p -values bajos ([DATAtab Team, 2023](#)). Por lo anterior, se analizó también por medio de pruebas gráficas como histogramas y gráficos QQ. Estas pruebas fueron evaluadas para las series mensuales completas de (i) caudales, y (ii) precipitación.

5.7.2. Coeficientes de Correlación

Al determinar si el tipo de distribución correspondía a una distribución normal, o a una no paramétrica, de las muestras evaluadas de las series de (i) precipitación, (ii) caudal, (iii) caudal específico, y (iv) las características morfométricas de las cuencas, se analizó el comportamiento entre las variables de cada muestra de interés por medio de coeficientes de asociación o correlación, de manera que se permita cuantificar el grado de ajuste y de relación lineal entre las variables de interés. Dependiendo de si las series siguen una distribución normal, se estimó los coeficientes de correlación de Pearson para una distribución normal, y Spearman para aquellas series con distribuciones distintas a la mencionada con anterioridad ([Díaz et. al., 2014](#)), lo cual se puede apreciar en el Anexo 2.

5.8. Estimación de caudales por métodos estadísticos

La estimación de caudales de los ríos principales de las cuencas no instrumentadas se realizó teniendo definidas las regiones hidrológicas homogéneas por los dos métodos empleados mencionados con anterioridad. En base a esto, se aplicaron modelos estadísticos de (i) regresión lineal simple o monovariable (RLMo), (ii) regresión potencial simple o monovariable (RPMo), (iii) regresión lineal múltiple (RLMu), y (iii) regresión potencial múltiple (RPMu) para la estimación de los caudales en las cuencas instrumentadas. Fueron definidas como variables dependientes (i) el Caudal Medio Mensual Multianual (QM), y (ii) el Caudal Especifico o Unitario Medio Mensual Multianual (QuM), donde cada una fue evaluada de manera individual en los determinados modelos diseñados. Fueron definidas como variables independientes (X_p) las características morfométricas, fisiográficas y/o hidrometereológicas que presentaron mayor correlación acorde con las pruebas previamente estimadas. Estas variables fueron analizadas previamente desde la matriz de correlación, con fines de escoger variables que no presentaran colinealidad entre sí, pues esto podría afectar a los modelos desarrollados.

Con fines de evaluar y validar los modelos previamente desarrollados, se calcularon índices de desempeño como (i) el coeficiente de determinación (R^2), (ii) el Error cuadrático medio (RMSE), (iii) la Eficiencia de Nash - Sutcliffe (NSE), y (iv) el Error absoluto medio porcentual (MAPE). Estos índices permiten también validar aspectos como la capacidad explicativa del modelo (R^2), la precisión de las predicciones (RMSE), la replicación de la variabilidad observada (NSE), y la validación de modelos al proporcionar una medida directa de la precisión relativa del modelo en términos porcentuales, lo cual es especialmente importante en situaciones donde la magnitud absoluta de los errores puede variar significativamente entre observaciones (MAPE). Los anteriores índices fueron calculados para los modelos estimados por medio del software de programación R y mediante Microsoft Excel.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Imputación de datos faltantes

La imputación de datos faltantes fue aplicada para las series mensuales de caudal y precipitación para las estaciones de estudio por medio de un Análisis de Componentes Principales no Lineales (NLPCA) usando redes neuronales artificiales en los lenguajes de programación de R y MATLAB, donde se realizó 15 iteraciones para cada imputación realizada, y se escogió la iteración que tuviera los valores más bajos de RMSE, MAPE, y la menor cantidad de datos negativos.

6.2. Caudales medios mensuales

Las estaciones de caudales medios mensuales fueron agrupadas entre sí al realizar un análisis con el índice de correlación (Pearson o Spearman) entre estaciones (ver Anexo 3), de manera que al imputar sus datos faltantes se obtuvieran mejores resultados. Una vez se obtuvo las series completas, fueron calculados los estadísticos descriptivos, los cuales se muestran junto con el porcentaje de datos faltantes (%DF) en la Tabla 6.

Tabla 6. Estadísticos descriptivos para las estaciones con registros de caudal medio mensual multianual en m³/s.

Estación	Imp	Iteración	DF (%)	RMSE	MAPE (%)	Negativos	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv,est	CV (%)
PNP	1	15	29,0	1,54	4,10	0	139,41	3,93	640,58	103,57	74,29
PTG			40,0				215,40	49,50	876,90	134,53	62,46
AGR			38,3				76,86	8,09	248,50	32,45	42,21
CAR			5,7				3,32	0,86	15,55	1,92	57,84
YUN			4,3				6,81	0,91	32,32	5,00	73,43
PTP			32,4				315,22	87,83	1006,00	170,31	54,03
NOR	2	11	36,7	0,69	1,91	0	368,04	70,94	1418,00	225,19	61,18
PILI			4,0				24,66	4,36	74,44	13,01	52,78
PAL			21,0				45,33	0,68	162,33	28,16	62,13
PIP			36,4				125,88	12,11	606,26	76,60	60,86
VER			14,3				3,76	0,22	15,22	2,57	68,33
SND			37,1				16,13	1,32	52,27	8,50	52,72
CAN	3	12	10,5	0,38	2,16	0	13,56	4,04	46,30	5,29	38,99
UNI			3,3				3,35	0,80	10,30	1,54	46,08
PTJ			9,8				36,30	7,48	160,20	16,83	46,37
CEN			21,9				1,46	0,13	7,82	0,83	56,79
PRV			31,0				9,25	1,44	29,59	4,78	51,67
PIL			23,8				33,71	2,17	99,10	13,87	41,14
SPE			3,6				54,91	3,92	190,10	23,88	43,48

Por medio de la Tabla 6 es posible evidenciar las estaciones con los caudales más altos desde 640 a 1420 m³/s, como las estaciones NOR, PTP, PTG, y PNP, que de acuerdo con la Figura 4 y Tabla 4 se encuentran ubicadas a lo largo del Río Patía. Por otro lado, los valores mínimos de caudal

reportados fueron de las estaciones CEN, CAR, UNI y VER. Otras estaciones también reportaron valores mínimos inferiores a $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Estos eventos extremos pueden ser apreciados también desde el gráfico de serie temporal (Figura 5 y el Anexo 4), los cuales están relacionados desde el contexto colombiano con la variabilidad climática por la presencia del fenómeno ENOS (El Niño Oscilación del Sur) en sus fases fría (“La Niña”) y cálida (“El Niño”). Desde 1980 los años destacables donde ha sucedido el fenómeno de la Niña han ocurrido en 1984/1985, 1989, 1999/2000 y 2010/2011 ([CAR, 2017](#); [Euscátegui & Hurtado, 2011](#)), mientras que El Niño ha destacado en años como 1982/1983, 1997/1998, y 2015/2016 ([Frey et. al., 2016](#)), años que coinciden con los eventos extremos máximos y mínimos visibilizados en las series temporales de caudal y precipitación.

Por otro lado, de la Tabla 6 también se puede evidenciar que más de la mitad de las estaciones (11) cuentan con un %DF superior al 20%, destacando la estación PTG aquella con el mayor %DF (40%) siendo este el límite permisible, y por otro lado, se encuentra la estación UNI con el menor %DF de 3.3%, siendo la estación con mejor continuidad y consistencia. La Figura 5 muestra las series temporales reconstruidas de las dos estaciones previamente mencionadas, mientras que en el Anexo 4 se encuentran las series temporales para las demás estaciones.

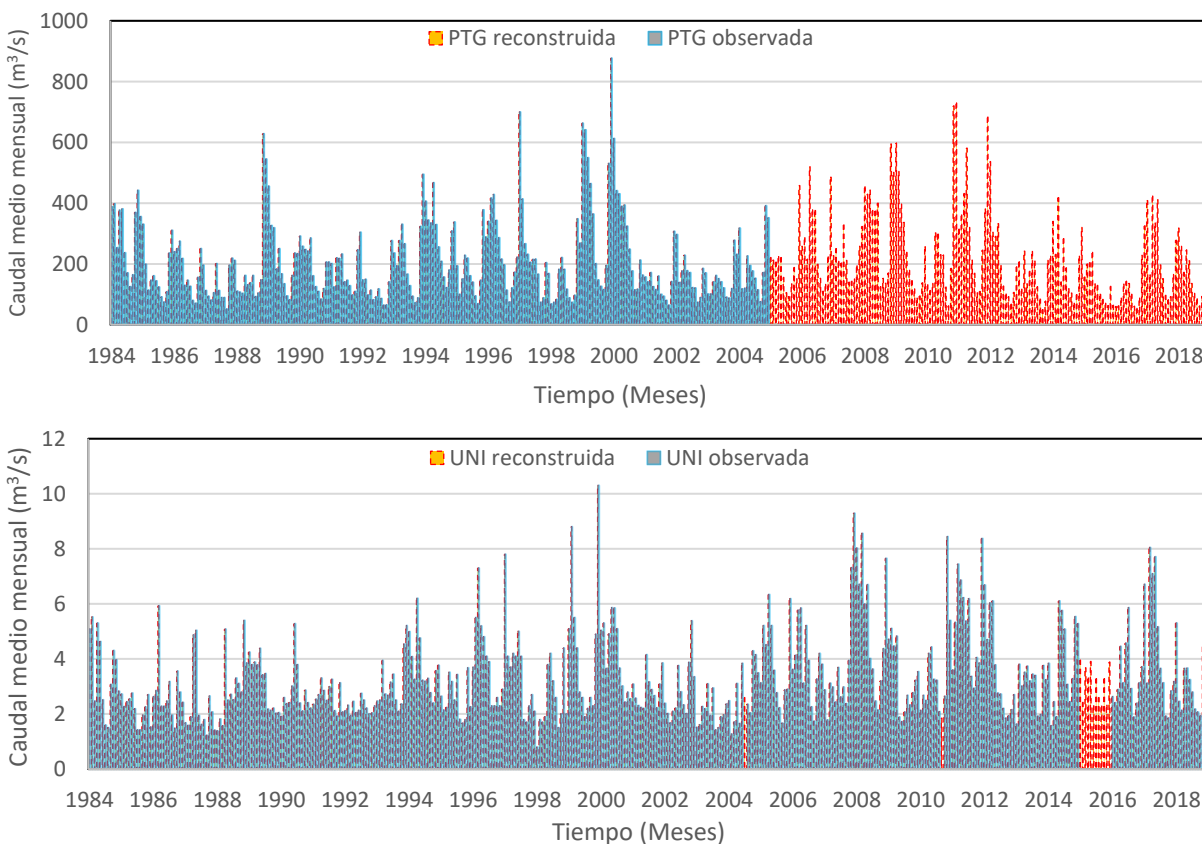


Figura 5. Serie temporal reconstruida del caudal para las estaciones PTG y UNI.

Esta variabilidad también se puede observar claramente en los diagramas de cajas, que representan la distribución y variabilidad de la precipitación en diferentes estaciones, como se muestra en la Figura 6.

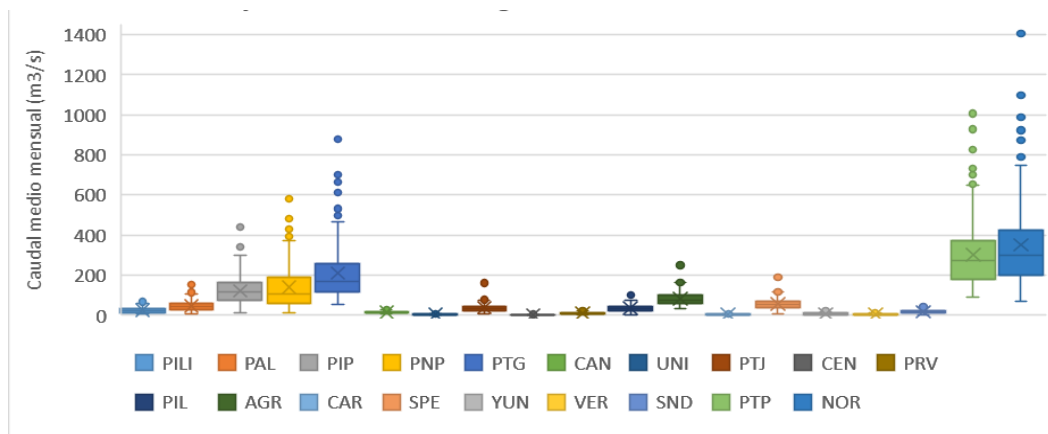


Figura 6. Diagrama de cajas para las estaciones de estudio con registro de caudales

Los diagramas de cajas muestran desde su mediana de los caudales medios mensuales, indicada por la línea horizontal dentro de cada caja, muestra el valor central de la precipitación en cada estación. Estaciones como PTP, NOR, PTG, PNP y PIP, presentan mayor variabilidad en sus registros de caudales medios mensuales, con cajas y bigotes altos, así como en la extensión de sus bigotes superiores y la presencia de valores atípicos, indicando eventos de crecientes en los ríos, relacionado directamente con los altos valores reportados de precipitación media mensual, como se abordará también su respectivo análisis. Por otro lado, se aprecia que la mayoría de las estaciones (11 de 19) conservan sus cajas en rangos inferiores a los 50 m³/s, por lo que su tendencia central presenta valores dentro de este rango, resultando entonces estaciones como PTP y NOR las cuales tienen valores con tendencia central entre los 150 a 450 m³/s, lo cual se ve también relacionado desde su distribución geográfica, área de influencia, y demás características que se abordarán después.

6.2.1. Análisis gráfico

En relación con los gráficos realizados para analizar el comportamiento de los caudales, se utilizó la estación Universidad (UNI) debido a que fue la estación con mejor continuidad de sus registros (ver Figura 7).

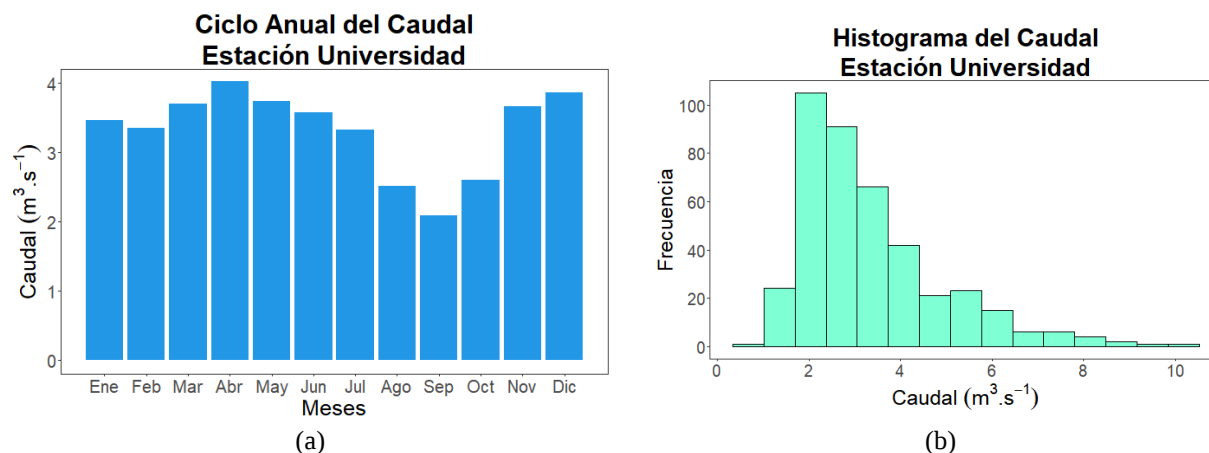


Figura 7. Gráficos de análisis del comportamiento del Caudal para la estación Universidad. (a) Ciclo anual o Hidrograma y (b) Histograma.

La Figura 7a muestra el ciclo anual o hidrograma del caudal medio mensual multianual para la estación UNI, donde es posible apreciar que tiene un comportamiento bimodal teniendo sus valores máximos entre marzo - mayo, y noviembre – enero, y sus mínimos en febrero y septiembre, donde es importante resaltar que en este último mes es donde su comportamiento hacia sus valores mínimos es más pronunciado. Este mismo comportamiento se evidencia para las demás estaciones de estudio (ver Anexo 5). Finalmente, del histograma presentado en la Figura 7b es posible detallar que la tendencia de los registros de caudal para esta estación es hacia sus valores inferiores a los 4 m³/s, comportamiento que es muy similar al de las demás estaciones en el sentido que tienden a tener valores por debajo o cercanos a su media (ver Anexo 6).

6.3. Precipitación media mensual

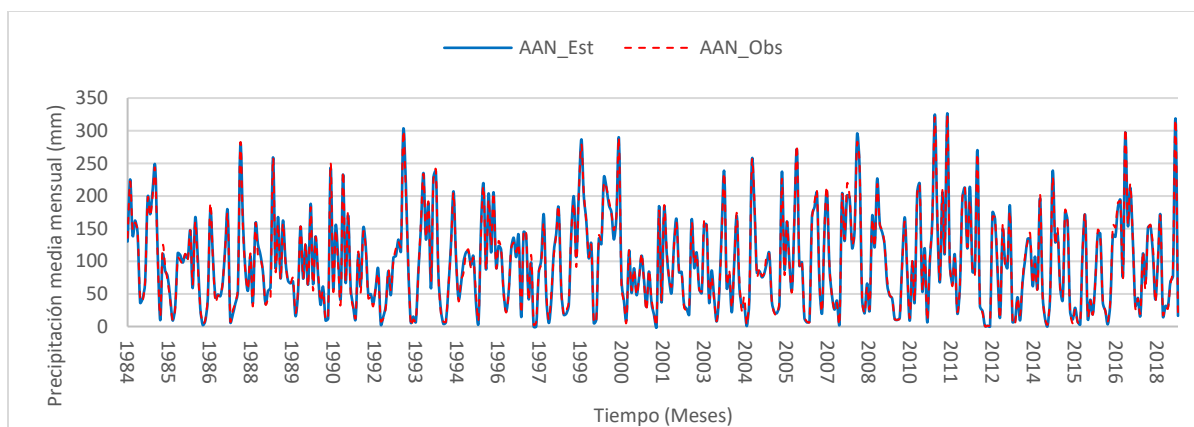
La precipitación es una variable hidrometeorológica inherentemente aleatoria, por lo que exhibe naturalmente altas variaciones en su comportamiento. Conocer de esta variabilidad es crucial para entender el régimen hidrológico de las cuencas de estudio, donde, para abordar las fluctuaciones en los datos de precipitación media mensual multianual de las cuencas de estudio, se aplicó un procedimiento de imputación de datos faltantes similar al utilizado para los caudales. Se seleccionó la iteración No. 2 para las 37 estaciones de monitoreo de la precipitación, resultados que se presentan en la Tabla 7, donde se refleja la distribución de los valores originales frente a los imputados.

Tabla 7. Estadísticos descriptivos para las estaciones con registros de precipitación media mensual multianual en mm.

Estación	DF (%)	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv,est	CV (%)	RMSE	MAPE (%)	Negativos
AAN	0,00	99,19	0,00	326,60	71,96	72,55	3,50	24,04	0,00
APO	0,71	128,25	0,00	702,80	114,64	89,39	4,36	12,48	3,00
ASL	0,00	72,85	7,50	279,40	43,63	59,89	10,98	18,50	0,00
BER	4,05	146,49	0,00	624,50	112,56	76,84	3,09	7,84	3,00
BOM	2,14	87,07	0,00	275,50	61,24	70,34	5,77	13,91	9,00
BOT	0,71	77,14	0,00	217,30	40,49	52,49	10,41	17,32	0,00
BUE	1,19	106,30	0,00	544,90	92,33	86,86	3,36	14,55	18,00
CHI	2,38	92,71	0,00	355,20	61,91	66,77	3,70	9,36	2,00
CRUZ	0,48	112,64	0,00	472,90	92,37	82,00	2,60	6,24	0,00
CUM	0,24	74,93	2,30	312,60	48,38	64,57	8,46	14,55	1,00
GCA	0,24	48,76	0,00	247,90	45,50	93,30	5,70	37,51	22,00
GCV	0,71	138,31	0,00	417,60	91,64	66,26	3,05	3,59	2,00
GUA	2,38	79,24	5,50	459,50	53,83	67,93	4,94	8,52	0,00
HID	1,19	110,21	0,00	468,10	89,22	80,96	2,99	15,00	9,00
IMU	0,95	83,31	0,00	251,70	60,03	72,06	6,12	13,32	3,00
JUN	0,48	723,35	42,00	1497,20	269,94	37,32	2,56	0,53	0,00
LIN	2,14	107,99	0,00	392,90	76,36	70,71	3,87	7,92	3,00
LVE	11,43	160,50	0,00	791,00	121,32	75,59	3,97	4,33	0,00

Estación	DF (%)	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv,est	CV (%)	RMSE	MAPE (%)	Negativos
MAM	0,95	110,85	0,00	503,00	96,31	86,88	3,42	7,98	9,00
NAR	1,67	167,34	0,00	578,90	126,14	75,38	3,88	6,24	1,00
PAR	1,67	190,45	0,00	758,90	147,36	77,37	4,81	6,26	3,00
PEÑ	0,00	91,56	0,00	330,10	65,30	71,32	7,25	18,15	4,00
PIS	0,00	105,28	0,00	387,20	78,49	74,56	3,18	4,93	1,00
PUE	0,48	86,31	4,60	397,40	48,72	56,45	3,31	5,72	1,00
RBB	1,43	91,85	6,00	282,00	53,11	57,82	5,81	9,23	1,00
RDM	0,95	112,32	0,00	429,70	89,19	79,41	2,90	7,19	5,00
ROS	1,67	197,83	0,00	827,30	160,25	81,01	4,42	7,16	6,00
SAM	0,00	124,73	0,00	548,30	97,55	78,21	3,87	6,53	4,00
SAN	1,67	96,65	0,00	456,00	78,68	81,41	3,17	9,50	10,00
SBN	2,14	169,39	0,50	539,20	118,52	69,97	3,81	4,32	1,00
SDE	2,86	377,42	4,40	1112,50	224,93	59,60	3,10	1,56	1,00
TAM	0,71	141,31	0,00	515,20	95,60	67,65	3,37	7,13	5,00
TAN	0,95	114,23	0,00	431,30	79,75	69,81	4,19	7,53	3,00
TGA	0,71	84,50	0,00	281,90	61,09	72,30	7,39	19,16	4,00
UNI	0,71	167,35	0,00	560,00	116,38	69,55	3,27	4,27	4,00
VER	2,14	213,40	0,00	656,60	144,43	67,68	3,63	2,84	0,00
VTL	6,67	69,27	0,00	243,20	49,51	71,47	7,96	40,79	9,00
							4,65	10,97	147,00
							PROM		TOTAL

Se resalta que el porcentaje de datos faltantes para la precipitación fue inferior al 12% para todas las estaciones, siendo la estación LVE con el máximo valor de 11.43%, mientras que aquella con un registro completo fue AAN, la cual tuvo un %DF del 0%. Este bajo porcentaje de datos faltantes asegura que las variaciones observadas en los datos de precipitación sean representativas de la variabilidad real y no de la falta de datos, proporcionando una base sólida para el análisis hidrológico de las cuencas estudiadas. La Figura 8 muestra las series temporales reconstruidas de las dos estaciones previamente mencionadas.



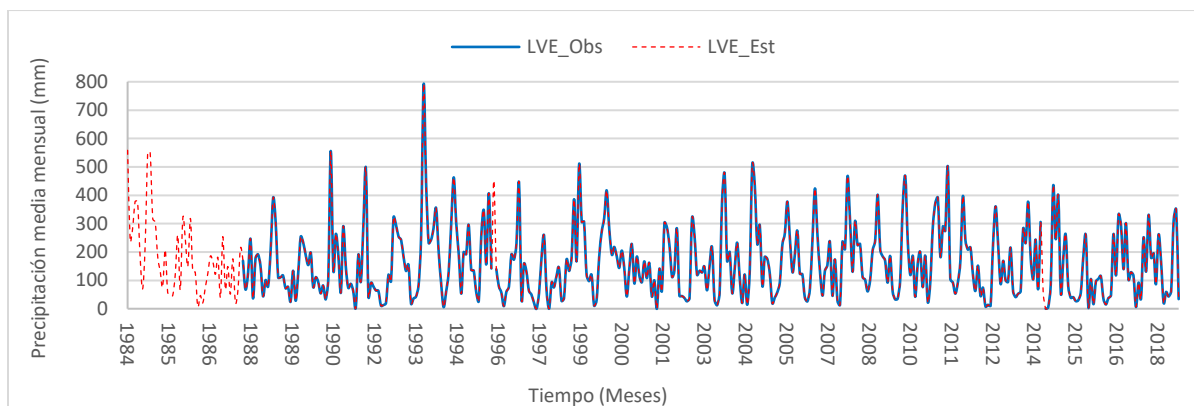


Figura 8. Serie temporal reconstruida del caudal para las estaciones AAN y LVE.

El comportamiento de las series de precipitación muestra una tendencia similar a la observada en las series de caudales en términos de valores extremos, como se aprecia en las Figura 5 y Figura 8, correspondientes a los gráficos de serie temporal del caudal y la precipitación. Esta variabilidad también se puede observar claramente en los diagramas de cajas, que representan la distribución y variabilidad de la precipitación en diferentes estaciones, como se muestra en la Figura 9.

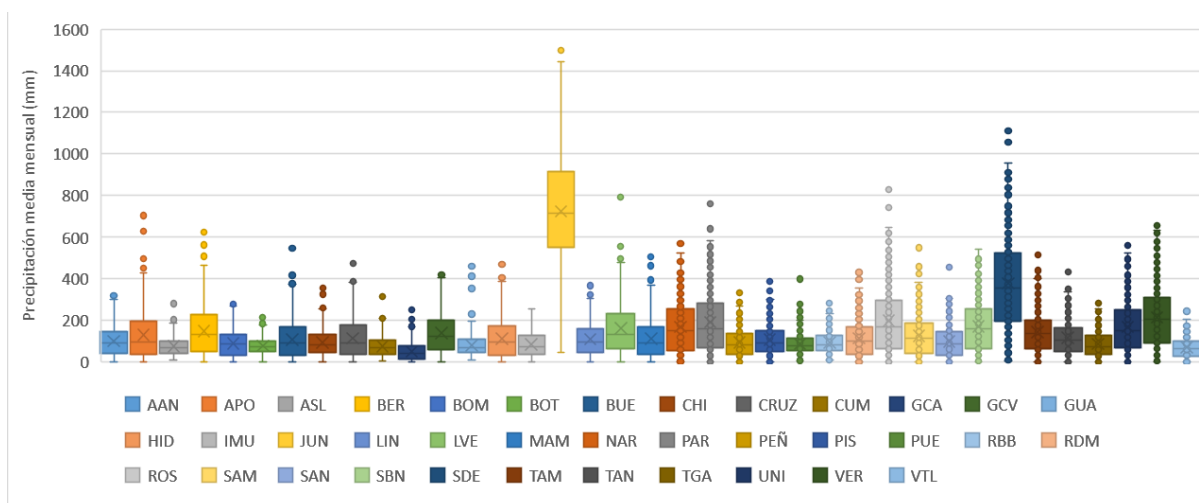


Figura 9. Diagrama de cajas para las estaciones de estudio con registro de precipitación

Los diagramas de cajas muestran desde su mediana de la precipitación mensual, indicada por la línea horizontal dentro de cada caja, muestra el valor central de la precipitación en cada estación. Estaciones como JUN y GCA presentan mayor variabilidad en la precipitación mensual, con cajas y bigotes altos, así como numerosos valores atípicos, indicando eventos de precipitación extremos. En contraste, estaciones como AAN y BOT tienen menor variabilidad, con cajas más pequeñas y menos valores atípicos.

Por otro lado, de acuerdo con la distribución de la precipitación media mensual observada en los diagramas de cajas, la mayoría de las estaciones muestran una concentración de datos con valores inferiores a 200 mm, como indica el rango intercuartílico, es decir las internamente las cajas, que van desde el primer cuartil (Q1) hasta el tercer cuartil (Q3). No obstante, se identifican valores

atípicos y datos en los bigotes superiores del diagrama, especialmente en el intervalo de 200 a 600 mm, destacando una variabilidad significativa en las precipitaciones.

6.3.1. Análisis gráfico

Otro tipo de gráficos que permiten el análisis del comportamiento de la precipitación, son aquellos tipo ciclo anual que para la precipitación se le conoce como Hietograma, el cual permite identificar el comportamiento de la precipitación a lo largo del año, permitiendo identificar qué tipo de régimen hidrológico le corresponde; y los histogramas los cuales permiten conocer la distribución de los datos registrados con respecto a la frecuencia y sus valores. Estos gráficos se presentan en la Figura 10, donde se ha utilizado los datos de la estación Aeropuerto Antonio Nariño (AAN).

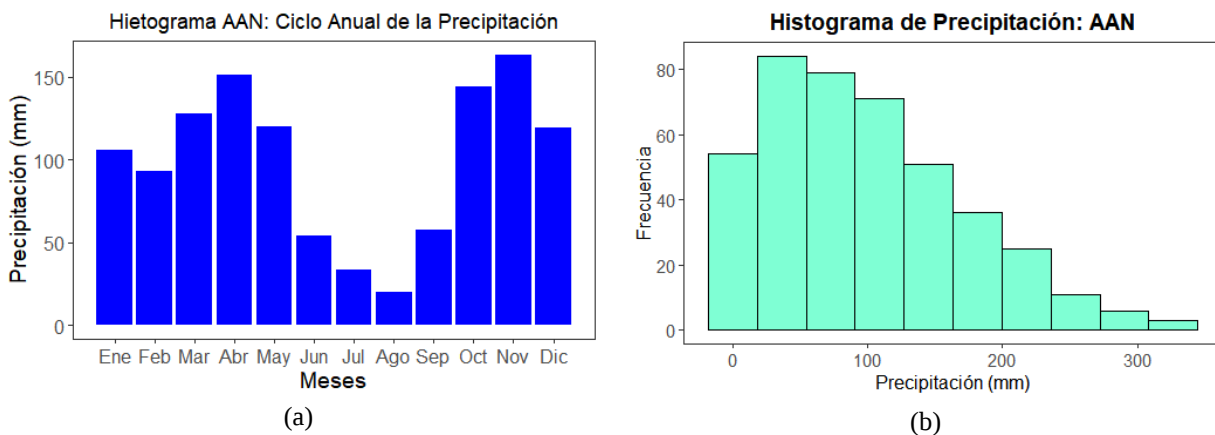


Figura 10. Gráficos de análisis del comportamiento de la Precipitación para la estación Aeropuerto Antonio Nariño. (a) Hietograma: Ciclo anual de la precipitación, (b) Histograma de la precipitación

La Figura 10a muestra el ciclo anual o hietograma de la precipitación media mensual multianual para la estación AAN, donde es posible apreciar que, así como para los caudales, se tiene un comportamiento bimodal teniendo sus valores máximos entre marzo - mayo, y octubre – diciembre, y sus mínimos en febrero, y en agosto, donde es resaltable como en este último mes su comportamiento hacia sus valores mínimos es más pronunciado. Este mismo comportamiento se evidencia para las demás estaciones de estudio (ver Anexo 5). Por otro lado, del histograma presentado en la Figura 10b es posible detallar que la tendencia de los registros de la precipitación para esta estación es hacia sus valores inferiores a los 150 mm, comportamiento que es muy similar al de las demás estaciones en el sentido que tienden a tener valores por debajo o cercanos a su media (ver Anexo 6).

6.4. Caracterización morfométrica y fisiográfica de las cuencas de estudio

Con base en las 19 estaciones de caudal disponibles dentro de la zona de estudio, se delimitaron las respectivas cuencas para cada río principal al cual la estación de estudio correspondía como punto de cierre de la cuenca, teniendo en cuenta desde la definición de una cuenca hidrográfica, la cual se conoce como el área de terreno donde toda el agua superficial converge hacia un único punto de salida, siendo usualmente un río o un embalse. La delimitación de la cuenca se basa en el

parteaguas, que es la línea que separa las aguas que fluyen hacia diferentes cuencas, el cual toma en cuenta el relieve y la topografía del terreno, lo cual es fundamental para comprender la dinámica hidrológica de la región, y es motivo para entender el por qué una cuenca hidrográfica no debe ser determinada por las divisiones políticas de la región. Por esta razón, algunas de las cuencas delimitadas pueden extenderse más allá de la zona de estudio y abarcar áreas del departamento del Cauca e incluso del país vecino, Ecuador. Incluir el total de su área es esencial para un análisis hidrológico preciso, ya que la cuenca hidrográfica representa la unidad básica de estudio en hidrología y es vital para la gestión de recursos hídricos, la planificación ambiental y la mitigación de riesgos naturales. En la Figura 11 se pueden apreciar las cuencas delimitadas en la zona de estudio, donde una vez definidas, se procedió a determinar sus características morfométricas y fisiográficas.

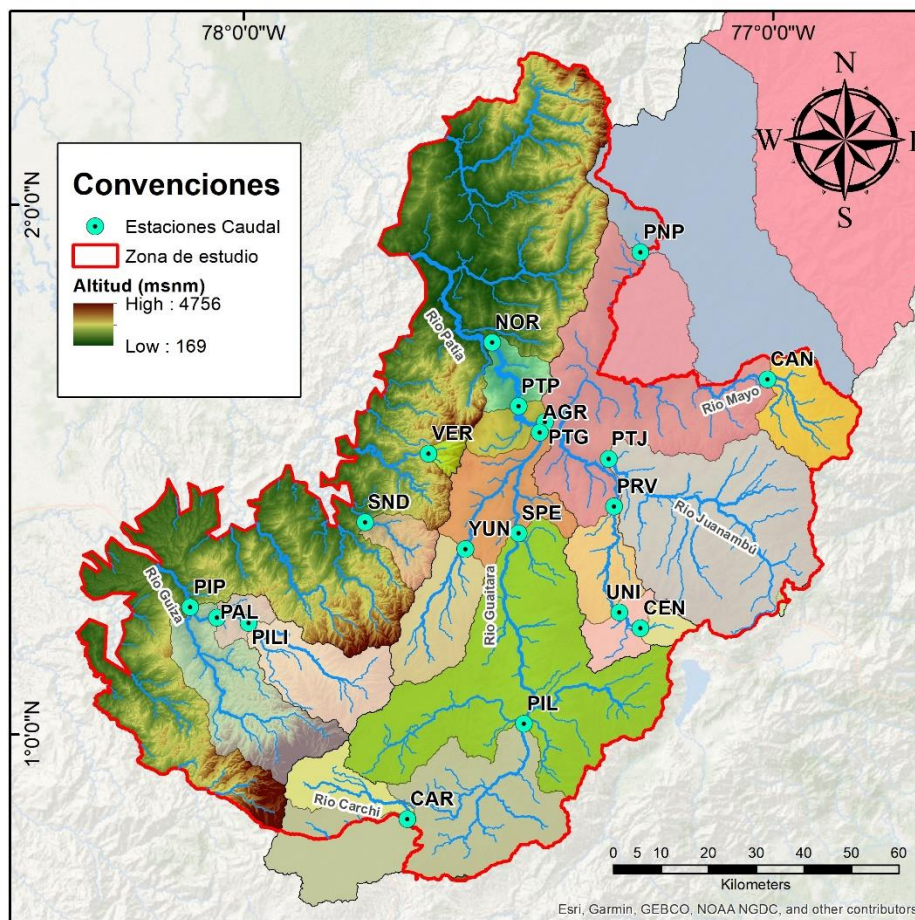


Figura 11. Cuencas de estudio delimitadas en la zona de estudio.

El Anexo 1 muestra la recopilación de las 26 características morfométricas y fisiográficas recopiladas para cada cuenca. En la Tabla 8 se muestran algunas de las características con las cuales se puede dar una descripción morfométrica y fisiográfica general de las cuencas.

Tabla 8. Características morfométricas y fisiográficas base para la caracterización de las cuencas de estudio.

No,	Abreviatura	A	Kc	F	Ia	Ias	Km	Co	Dd	C	Tc
1	CEN	68	1,32	0,47	1,2	1,1	44,9	0,14	2,3	0,43	1,72
2	VER	43	1,24	0,62	0,88	2,8	56,0	0,14	1,85	0,54	0,85
3	SND	151	1,36	0,49	1,26	2,0	12,2	0,022	2,02	0,49	2,37
4	CAR	198	1,81	0,27	1,6	1,8	17,2	0,059	2,52	0,4	5,26
5	YUN	372	1,37	0,35	2,03	1,3	7,1	0,019	1,99	0,5	3,72
6	SPE	3201	1,68	0,4	1,38	1,0	0,9	0,003	2,25	0,44	14,7
7	PIL	1431	1,76	0,38	0,94	1,4	2,2	0,007	2,3	0,43	9,5
8	PRV	459	1,56	0,37	1,41	1,1	5,7	0,015	2,31	0,43	5,89
9	PTJ	1340	1,41	0,57	1,15	1,0	1,8	0,004	2,1	0,48	9,02
10	UNI	213	1,5	0,74	0,68	2,6	14,0	0,04	2,45	0,41	3,72
11	CAN	335	1,36	0,58	1,26	1,4	8,3	0,02	2,09	0,48	3,34
12	PTG	8749	1,59	0,56	0,78	3,2	0,2	0,0004	2,19	0,46	18,3
13	PNP	5065	1,5	0,68	1,15	1,9	0,3	0,0006	2,2	0,45	14,1
14	PTP	12894	1,84	0,81	0,54	5,1	0,2	0,0003	2,19	0,46	19,7
15	NOR	13047	1,85	0,85	0,53	6,4	0,2	0,0003	2,19	0,46	19,3
16	AGR	3992	1,74	0,33	1,78	1,3	0,7	0,002	2,2	0,45	16,8
17	PILI	421	1,51	0,39	1,65	2,7	6,1	0,02	2,49	0,4	4,07
18	PAL	514	1,7	0,32	2,0	2,0	4,9	0,01	2,49	0,4	4,97
19	PIPI	1107	1,45	0,53	1,44	5,1	2,2	0,01	2,46	0,41	5,6

A (km²): Área total de la cuenca F: Factor de forma (adm) Kc: Coeficiente de compacidad (adm) Ias: Índice asimétrico (adm)
Ia: Índice de alargamiento(adm) Km (m/km²): Coeficiente de masividad Co: Coeficiente orográfico
Dd (km/km²): Densidad de drenaje C (km²/km): Constante de estabilidad del Tc(h): Tiempo de concentración

El área de las cuencas varía significativamente, desde 43 km² (VER) hasta 13047 km² (NOR), indicando diferentes capacidades de captación de agua, y así mismo, distintos niveles de corrientes en las fuentes hídricas presentes dentro de la zona de estudio, viéndose representado en los distintos tipos de cuencas y subcuencas que se pueden encontrar. Según el tamaño espacial ocupado por las cuencas de interés, la mayoría se categorizan como cuencas debido a que superan los 300 km² en área. Sin embargo, hay cinco de ellas cuya área es inferior a este umbral, por lo tanto, se clasifican como subcuencas.

El coeficiente de compacidad (Kc) oscila entre 1,24 y 1,85, sugiriendo que ninguna cuenca es perfectamente circular. El factor de forma (F) varía de 0,27 (CAR) a 0,85 (NOR), mientras que el índice de alargamiento (Ia) oscila entre 0,53 (NOR) y 2,03 (YUN), indicando la tendencia a producir escorrentía por este factor, de manera que al haber presencia de lluvias dentro de la zona, habrá una tendencia a ser adecuadamente drenada hacia sus cuerpos de agua cercanos, contribuyendo al ciclo hidrológico regional y la forma alargada de las cuencas. El índice de asimetría (Ias) muestra una desviación de la simetría, con valores que van de 1,0 (SPD, PTJ) a 6,4 (NOR). El coeficiente de masividad (Km) de las diferentes cuencas varía considerablemente, lo

cual refleja la diversidad en la rugosidad de la topografía de cada región. Según los datos, cuencas como VER (Km = 56,0) y CEN (Km = 44,9) se clasifican como montañosas, con terrenos significativamente accidentados que influyen la generación de escorrentía y la respuesta hidrológica. En contraste, cuencas como NOR (Km = 0,2) muestran una topografía moderadamente montañosa, caracterizada por un relieve menos pronunciado en comparación con las cuencas montañosas. Esta observación sugiere una tendencia inversa entre el tamaño de la cuenca y la rugosidad de su topografía, donde cuencas más grandes tienden a tener una topografía menos accidentada. Lo anterior también se ve reflejado con el coeficiente orográfico (Co), donde para todas las cuencas se presentan valores bajos inferiores a 6, lo que sugiere que las cuencas tienen relieves pocos accidentados. La densidad de drenaje (Dd) oscila entre 1,85 (VER) y 2,52 (CAR), evidenciando entonces una densidad de drenaje de moderada a alta, mientras que el coeficiente de estabilidad del río (C) con valores bajos ($< 0,15$) para todas las cuencas indica presencia de rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo, es decir mayor erodabilidad. Finalmente, el tiempo de concentración (Tc) varía considerablemente desde 0,85 horas (VER) a 19,7 horas (PTP), sugiriendo que las cuencas más grandes como NOR, PTP y PTG tienen tiempos de concentración más largos, lo que implica que la escorrentía superficial tardará más tiempo en alcanzar el punto de salida.

Este análisis destaca cómo las diferencias en las características morfométricas y fisiográficas influyen en la capacidad de drenaje y la eficiencia de la escorrentía en cada cuenca, por lo que, de manera general, se puede concluir que la mayoría de las cuencas tienen una forma oval oblonga a rectangular oblonga, son alargadas con baja susceptibilidad a las avenidas, esto teniendo en cuenta que el drenaje en ellas es bueno, con un tiempo de concentración variable muy influenciado por el tamaño de la cuenca. Sus cauces principales son alargados y se encuentran recargados hacia una de sus vertientes. Son cuencas moderadamente montañosas con relieve poco accidentado, y en su terreno se presentan rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.

6.5. Caracterización hidrometereológica de las cuencas de estudio

La precipitación, como se ha mencionado con anterioridad, tiene una influencia directamente proporcional a la cantidad de agua disponible en una cuenca en su cauce principal, teniendo en cuenta que relación se debe a que la precipitación actúa como la principal fuente de recarga de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Teniendo en cuenta esto, fue estimada la precipitación media mensual multianual para las cuencas de estudio teniendo en cuenta los datos reportados por las estaciones aledañas, donde, fueron elaboradas isoyetas con la precipitación media anual y media mensual. A continuación, las Figura 12 y Figura 13 muestran se presentan los resultados obtenidos.

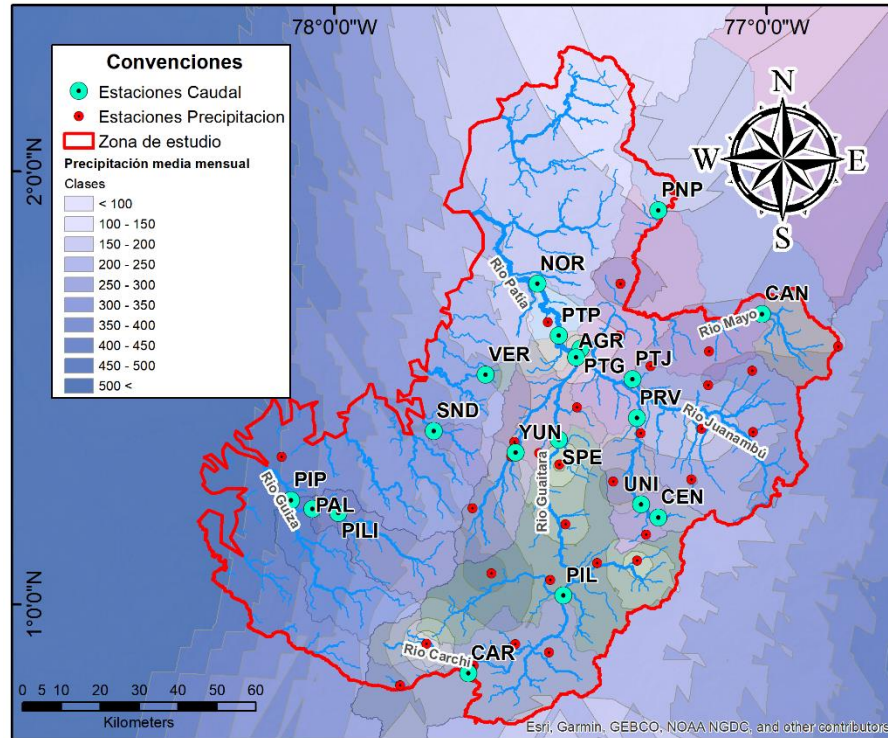


Figura 12. Isoyeta con la precipitación media mensual multianual para la región Andina del Departamento de Nariño

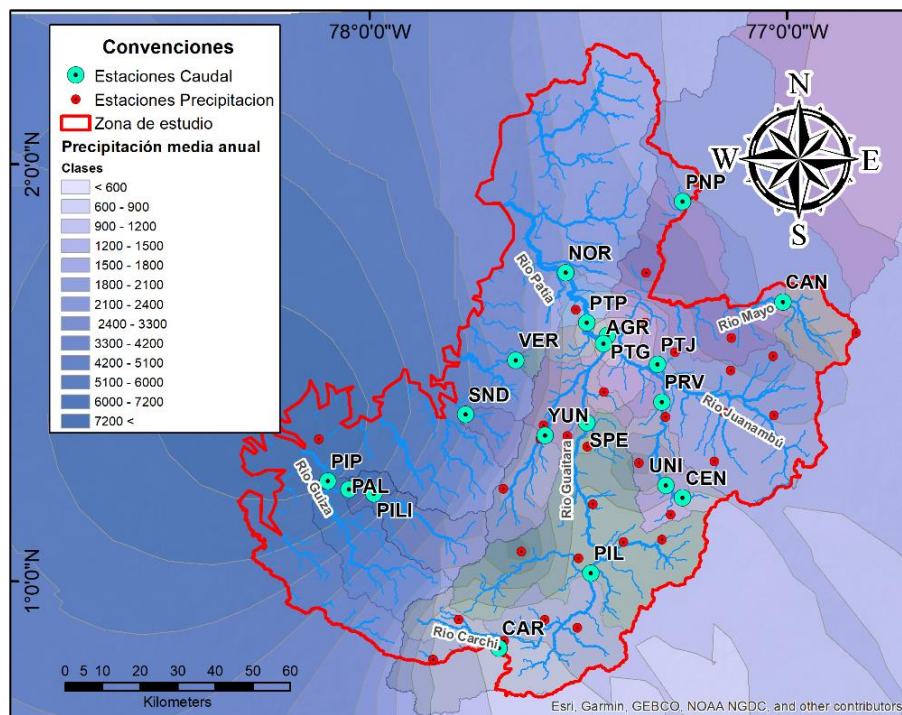


Figura 13. Isoyeta con la precipitación media total anual multianual para la región Andina del Departamento de Nariño

La precipitación dentro de la zona de estudio, como se mencionó con anterioridad, cuenta con un régimen bimodal en el año, teniendo dos temporadas de abundante lluvia dentro de un año. En la Figura 13 puede apreciarse esto, donde en contraste a la Figura 12 correspondiente a la precipitación media mensual multianual, esta última aborda el acumulado de la precipitación en todo el año, teniendo en cuenta también el hecho de que la precipitación es una variable aleatoria de por sí, y que se ve directamente afectada por varios fenómenos naturales convergentes de la zona desde su misma ubicación geográfica, como desde factores inherentes a la zona como sus características fisiográficas y morfométricas. Uno de estos fenómenos es la presencia de una circulación a gran escala de vientos alisios (vientos que soplan del Este, del Noreste o del Sureste) los cuales convergen en la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT); así, es posible encontrar que las zonas más lluviosas con registros de precipitación superiores a los 3300 mm al año, están principalmente hacia el suroeste y en algunas zonas aisladas del este. Estas regiones están influenciadas por corrientes de aire húmedo que provienen de la Amazonía y la Orinoquía, así como la topografía que favorece la acumulación de humedad y, por lo tanto, una mayor precipitación. Zonas con precipitación más moderada, con valores entre los 1200 y 3300 mm anuales, cubre la mayor parte de la región, siendo gran parte de su centro y noreste, indicando una distribución más uniforme de las lluvias en estas áreas. Además, la presencia de ríos como el Guáitara y el Juanambú, unos de los principales afluentes del Patía, sugiere que estas zonas tienen una influencia significativa de los cuerpos de agua, que ayudan a mantener un régimen de precipitación y caudal constante. Finalmente, las áreas con menor precipitación se encuentran principalmente en la parte noroccidental de la zona de estudio. Este patrón puede deberse a factores orográficos y climáticos, donde las montañas bloquean el paso de las masas de aire húmedo, resultando en una menor precipitación en estas regiones.

A continuación, se presenta en la Tabla 9 un resumen de las variables hidroclimatológicas abordadas como lo son el caudal y la precipitación.

Tabla 9. Resumen de las variables hidroclimatológicas como el caudal y la precipitación para las cuencas de estudio dentro de la Zona Andina departamento de Nariño

Cuencas	QM (m³/s)	QuM (L/s,km²)	A (km²)	PpTT (mm/año)	PpTM (mm/mes)
CEN	1,46	21,55	67,59	1182,11	225,00
CAR	3,32	16,74	198,28	1332,50	207,95
UNI	3,35	15,69	213,28	1193,81	246,36
VER	3,76	86,67	43,43	2208,54	243,95
YUN	6,81	18,33	371,72	1658,67	253,10
PRV	9,25	20,16	458,96	1371,45	226,04
CAN	13,56	40,44	335,19	1485,61	240,97
SND	16,13	107,08	150,61	2845,70	278,54
PILI	24,66	58,51	421,38	3183,13	308,97
PIL	33,71	23,56	1431,14	1222,42	228,83
PTJ	36,30	27,10	1339,63	1481,92	223,65
PAL	45,33	88,25	513,66	3744,29	322,35
SPE	54,91	17,15	3201,12	1202,20	221,13

Cuencas	QM (m ³ /s)	QuM (L/s,km ²)	A (km ²)	PpTT (mm/año)	PpTM (mm/mes)
AGR	76,86	19,25	3992,42	1268,12	220,06
PIP	125,88	113,75	1106,60	4082,31	343,20
PNP	139,41	27,53	5064,84	1395,82	166,40
PTG	215,40	24,62	8749,24	1493,75	232,92
PTP	315,22	24,45	12893,80	1374,34	229,31
NOR	368,04	28,21	13047,49	1375,59	192,91
Promedio	78,60	41,00	2821,07	1847,49	242,72
Máx	368,04	113,75	13047,49	4082,31	343,20
Mín	1,46	15,69	43,43	1182,11	166,40
Desv	108,98	32,72	4214,71	915,41	43,56
CV (%)	138,65	79,79	149,40	49,55	17,95

QM (m³/s): Caudal medio mensual multianual PpTT (mm): Precipitación total media multianual
PpTM (mm): Precipitación total mensual media multianual QuM (L/s,km²): Caudal unitario medio mensual multianual
A (km²): Área total de la cuenca

El caudal unitario medio (QuM) fue evaluado también teniendo en cuenta que es un indicador de la eficiencia hidrológica de una cuenca porque relaciona el caudal con el área de la cuenca, donde además, permite realizar una Comparación Estandarizada al normalizar el caudal por unidad de área, permitiendo una comparación entre cuencas de diferentes tamaños de manera equitativa, de manera que ayuda a identificar cuáles cuencas generan más caudal por cada kilómetro cuadrado al tener un alto valor, lo cual sugiere que la cuenca es eficiente en convertir la precipitación en caudal. Lo anterior se ve influenciado también en las características morfométricas y fisiográficas, tales como factores propios de las cuencas como si tiene una mayor pendiente, suelos menos permeables, o una vegetación que contribuye a una rápida escorrentía superficial.

El análisis de las cuencas estudiadas revela una considerable variabilidad en los parámetros hidrológicos y climáticos. El caudal medio (QM) varía significativamente entre las cuencas, con la cuenca NOR presentando el caudal más alto (368,04 m³/s) y la cuenca CEN el más bajo (1,46 m³/s). El caudal unitario medio (QuM) muestra que cuencas como PIP y SND son más eficientes en la producción de caudal por unidad de área, mientras que la Cuenca UNI tiene la menor eficiencia. La gran variabilidad en el tamaño de las cuencas, encontrando a NOR y PTP como las más grandes dentro de la zona de estudio, y así mismo, encontrando cuencas con áreas considerablemente pequeñas como lo son VER y CEN. En cuanto a la precipitación, las cuencas PIP y PAL reciben la mayor precipitación total anual, cuencas que se encuentran precisamente hacia el sureste del departamento de Nariño, colindando con la zona del Pacífico de la misma; mientras que CEN y UNI son aquellas con menor precipitación registrada. Por otro lado, la precipitación media mensual multianual resulta más uniforme, siendo PIP y YUN aquellas que mostraron los valores más altos.

6.6. Identificación de regiones hidrológicas homogéneas: Regionalización

El comportamiento de los caudales estimados se evaluó utilizando dos bases de datos con el objetivo de determinar el mejor modelo para la estimación de caudales. Esta evaluación fue directamente influenciada por las regiones homogéneas definidas según el tipo de datos manejados

y las cuencas incluidas en estas regiones. El objetivo fue obtener estimaciones que se aproximaran lo más posible a los datos observados. Se realizaron regionalizaciones utilizando dos enfoques: (i) utilizando series de caudales unitarios medios mensuales de las cuencas (QUni), lo cual permite comparar cuencas con diferentes áreas, y (ii) utilizando características morfométricas y fisiográficas de las cuencas (CAMF).

Considerando la cantidad de datos disponibles en cada base de datos, se llevó a cabo un Análisis de Componentes Principales (ACP) con el fin de reducir su dimensionalidad, manteniendo la máxima cantidad de información posible ([Kassambara, 2017](#)). Para cada método de regionalización definido, se aplicó la metodología de agrupamiento o clusterización jerárquica mediante k-means, donde, para evaluar el número óptimo de clústeres, fueron utilizados métodos como el de la silueta y del codo ([Kassambara, 2017](#)). A continuación, se profundiza en los detalles de estos métodos.

6.6.1. Características morfométricas y fisiográficas evaluadas

En el presente estudio, en un inicio, se trabajó con un total de 26 características fisiográficas y morfométricas, por lo con fines de analizar en mayor detalle las características entre ellas (colinealidad) y su correlación con las variables respuesta (QuM y QM), se realizó una matriz de correlación la cual interpreta que para valores mayores a 0,8, se presenta una alta colinealidad o correlación; lo anterior se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Matriz de correlación entre las características fisiográficas y morfométricas

	QM	PpT	Qu	A	P	Lm	I	Lc	Ls	Amay	Amen	F	Kc	Ia	Ias	Emin	Emax	Em	Km	Co	Sm	Li	Dd	C	n1	Ct	S	Tc	Sin
QM	1.00																												
PpT	0.22	1.00																											
QuM	0.32	0.81	1.00																										
A	0.92	-0.08	-0.02	1.00																									
P	0.91	-0.09	-0.06	0.99	1.00																								
Lm	0.91	-0.08	-0.05	0.98	0.99	1.00																							
I	0.86	-0.22	-0.11	0.96	0.95	0.93	1.00																						
Lc	0.87	-0.15	-0.12	0.98	0.99	0.99	0.94	1.00																					
Ls	0.89	-0.13	-0.10	0.99	0.99	0.99	0.95	1.00	1.00																				
Amay	0.94	-0.02	0.02	0.99	0.99	0.97	0.95	0.97	0.98	1.00																			
Amen	0.88	-0.11	-0.09	0.98	0.98	0.98	0.94	0.98	0.98	0.96	1.00																		
F	0.66	-0.20	-0.04	0.63	0.54	0.35	0.63	0.34	0.37	0.66	0.41	1.00																	
Kc	0.55	-0.23	-0.38	0.59	0.67	0.68	0.62	0.68	0.68	0.58	0.57	-0.01	1.00																
Ia	-0.56	0.40	0.18	-0.58	-0.51	-0.35	-0.63	-0.36	-0.38	-0.60	-0.40	-0.84	-0.13	1.00															
Ias	0.43	-0.44	0.48	0.23	0.22	0.19	0.26	0.16	0.19	0.29	0.14	0.49	0.25	-0.41	1.00														
Emin	-0.93	-0.24	-0.30	-0.82	-0.81	-0.81	-0.73	-0.79	-0.80	-0.84	-0.80	-0.35	-0.40	0.22	-0.39	1.00													
Emax	0.56	-0.38	-0.33	0.70	0.73	0.72	0.76	0.74	0.75	0.71	0.69	0.03	0.78	-0.16	0.16	-0.40	1.00												
Em	-0.58	-0.25	-0.35	-0.52	-0.47	-0.43	-0.47	-0.39	-0.42	-0.51	-0.47	-0.53	0.13	0.30	-0.45	0.76	0.21	1.00											
Km	-0.95	0.00	-0.06	-0.99	-0.98	-0.97	-0.94	-0.97	-0.97	-0.99	-0.97	-0.27	-0.63	0.26	-0.24	0.88	-0.64	0.53	1.00										
Co	-0.95	-0.01	-0.06	-0.98	-0.98	-0.97	-0.93	-0.96	-0.97	-0.98	-0.97	-0.27	-0.63	0.26	-0.24	0.89	-0.63	0.55	0.998	1.00									
Sm	0.06	-0.54	-0.20	0.18	0.12	0.08	0.16	0.11	0.10	0.17	0.21	0.35	-0.31	-0.38	-0.14	-0.11	-0.34	-0.32	0.26	0.20	1.00								
Li	0.68	-0.39	-0.34	0.85	0.84	0.83	0.86	0.86	0.85	0.81	0.89	0.33	0.58	-0.44	0.02	-0.65	0.65	-0.28	-0.83	-0.82	0.26	1.00							
Dd	-0.26	-0.93	-0.81	0.04	0.06	0.05	0.20	0.12	0.09	-0.02	0.09	-0.08	0.35	-0.26	-0.39	0.27	0.40	0.55	0.04	0.04	-0.18	0.38	1.00						
C	0.26	0.93	0.81	-0.04	-0.06	-0.05	-0.20	-0.12	-0.09	0.02	-0.09	0.08	-0.35	0.26	0.39	-0.27	-0.40	-0.55	-0.04	-0.04	0.18	-0.38	-1.00	1.00					
n1	0.67	-0.39	-0.34	0.83	0.83	0.82	0.84	0.85	0.84	0.79	0.88	0.31	0.58	-0.44	0.02	-0.64	0.66	-0.28	-0.81	-0.81	0.29	1.00	0.38	-0.38	1.00				
Ct	0.30	-0.17	-0.02	0.27	0.28	0.29	0.31	0.28	0.27	0.23	0.32	0.40	0.17	-0.55	0.15	-0.36	0.20	-0.42	-0.29	-0.30	0.53	0.52	0.27	-0.27	0.55	1.00			
S2	-0.68	0.35	0.33	-0.84	-0.86	-0.84	-0.88	-0.86	-0.86	-0.82	-0.84	-0.24	-0.80	0.39	-0.22	0.58	-0.81	0.21	0.80	0.79	0.14	-0.84	-0.41	0.41	-0.84	-0.48	1.00		
Tc2	0.83	-0.22	-0.20	0.96	0.96	0.98	0.94	0.99	0.99	0.94	0.96	0.14	0.80	-0.27	0.17	-0.75	0.80	-0.31	-0.94	-0.94	-0.10	0.87	0.22	-0.22	0.86	0.34	-0.92	1.00	
Sin	-0.36	-0.59	-0.53	-0.23	-0.15	-0.02	-0.22	0.06	0.01	-0.28	0.02	-0.34	0.04	0.16	-0.62	0.09	0.12	0.37	-0.18	-0.16	0.37	-0.20	0.63	-0.61	-0.21	0.54	-0.22	0.05	1.00

La Tabla 10 evidencia cómo entre múltiples variables se presenta una colinealidad significativa, la cual podría representar un problema de multicolinealidad al evaluar modelos de regresión múltiple. Este problema de multicolinealidad podría entorpecer los resultados obtenidos, afectando tanto la precisión como la interpretabilidad de los modelos. Por lo tanto, es crucial analizar los modelos resultantes con el fin de evaluar si la multicolinealidad presente entre la mayoría de las variables puede influir negativamente en los resultados finales, pues, este factor no es el único influyente en

la obtención del o de los mejores modelos de regresión múltiple a obtener, lo cual se abordará próximamente. La Tabla 11 recopila algunas de las CAMF con mayor colinealidad entre sí, con fines de poder facilitar el análisis de estas con posterioridad.

Tabla 11. Recopilación de las CAMF con mayor colinealidad entre sí.

	A	P	Lm	I	Lc	Ls	Amax	Amen	Emin	Emax	Km	Co	Li	n1
A	1.00													
P	0.99	1.00												
Lm	0.98	0.99	1.00											
I	0.96	0.95	0.93	1.00										
Lc	0.98	0.99	0.99	0.94	1.00									
Ls	0.99	0.99	0.99	0.95	1.00	1.00								
Amax	0.99	0.99	0.97	0.95	0.97	0.98	1.00							
Amen	0.98	0.98	0.98	0.94	0.98	0.98	0.96	1.00						
Emin	-0.82	-0.81	-0.81			-0.80	-0.84	-0.80	1.00					
Km	-0.99	-0.98	-0.97	-0.94	-0.97	-0.97	-0.99	-0.97	0.88		1.00			
Co	-0.98	-0.98	-0.97	-0.93	-0.96	-0.97	-0.98	-0.97	0.89		1.00	1.00		
Li	0.85	0.84	0.83	0.86	0.86	0.85	0.81	0.89			-0.83	-0.82	1.00	
n1	0.83	0.83	0.82	0.84	0.85	0.84		0.88			-0.81	-0.81	1.00	1.00
S	-0.84	-0.86	-0.84	-0.88	-0.86	-0.86	-0.82	-0.84		-0.81			-0.84	-0.84
Tc	0.96	0.98	0.98	0.94	0.99	0.99	0.94	0.96		0.80	-0.94	-0.94	0.87	0.86

Por otro lado, la Tabla 12 y Tabla 13 presentan las variables con mejor correlación con las dos variables respuesta a evaluar (QM y QuM).

Tabla 12. Características fisiográficas con mejor correlación con el caudal medio mensual multianual

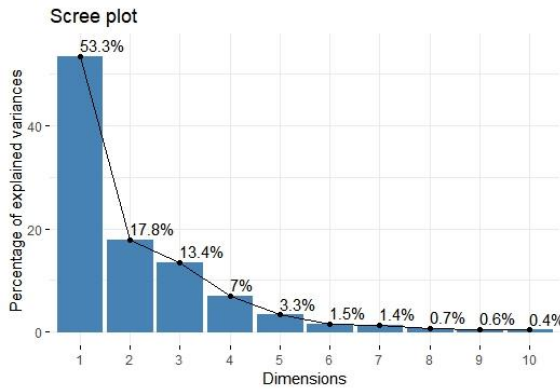
	A	P	Lm	I	Lc	Ls	Amax	Amen	F	Emin	Km	Co	Li	n1	S	Tc
QM	0,92	0,91	0,91	0,86	0,87	0,89	0,94	0,88	0,66	-0,93	-0,95	-0,95	0,68	0,67	-0,68	0,83

Tabla 13. Variable hidrometeorológica y Características fisiográficas con mejor correlación con el caudal específico medio mensual multianual

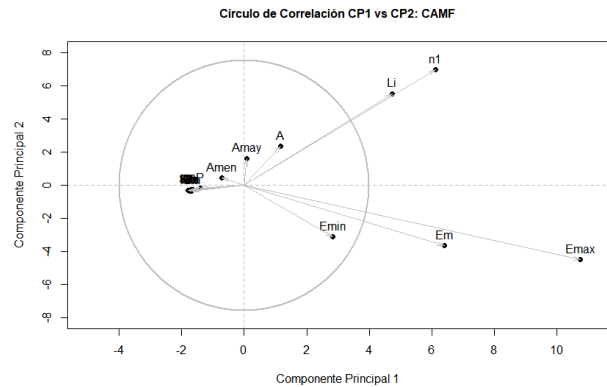
	PpT	Dd	C
QuM	0,81	-0,81	0,81

6.6.2. Análisis de componentes principales (ACP)

Se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) para las bases de datos utilizadas, con el fin de evaluar su comportamiento en relación con la regionalización establecida. El análisis incluyó tanto las Características Morfométricas y Fisiográficas (CAMF) como los Caudales Unitarios Medios Mensuales Multianuales (QUni). Este enfoque permitió comprender la estructura subyacente y la variabilidad de los datos, facilitando así una mejor interpretación de las interrelaciones entre las diferentes variables y su influencia en la regionalización hidrológica. A continuación, la Tabla 14, Figura 14 y Figura 15 muestra cómo se comportaron los datos de acuerdo con su variabilidad.



(a) Gráfico tipo Scree plot



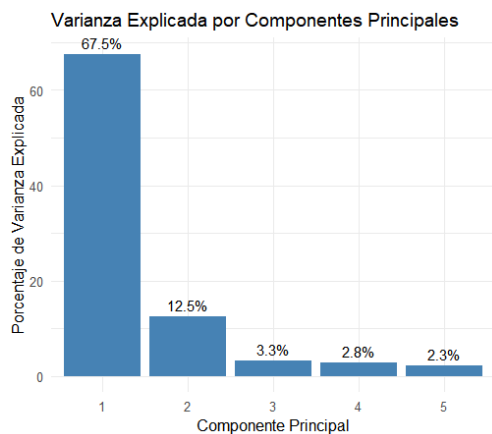
(b) Gráfico del círculo unitario

Figura 14. Variabilidad acumulada de las componentes principales para CAMF

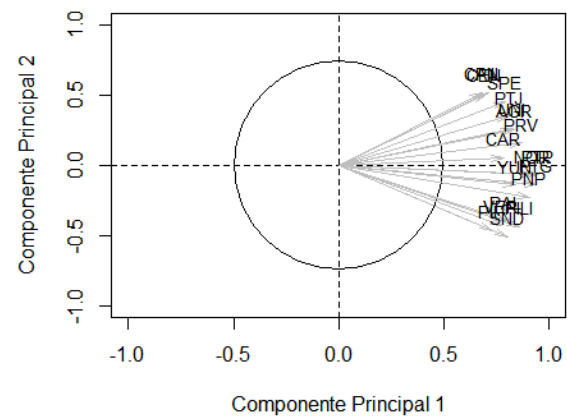
Tabla 14. Varianza representativa de las dimensiones o componentes principales.

Orden	Valor pro- pio varianza	Proporción Varianza explicada	%Acumu- lado expli- cado
Dim,1	13,69	52,63	52,63
Dim,2	4,84	18,61	71,25
Dim,3	3,43	13,19	84,44
Dim,4	1,61	6,19	90,63
Dim,5	0,92	3,53	94,16
Dim,6	0,48	1,84	95,99
Dim,7	0,36	1,40	97,39
Dim,8	0,25	0,95	98,34
Dim,9	0,17	0,64	98,98
Dim,10	0,13	0,51	99,49

Orden	Valor pro- pio varianza	Proporción Varianza explicada	%Acumu- lado expli- cado
Dim,1	12,83	67,53	67,53
Dim,2	2,38	12,54	80,07
Dim,3	0,63	3,29	83,36
Dim,4	0,53	2,80	86,16
Dim,5	0,43	2,28	88,44
Dim,6	0,40	2,11	90,54
Dim,7	0,35	1,82	92,36
Dim,8	0,28	1,46	93,82
Dim,9	0,24	1,24	95,06
Dim,10	0,18	0,96	96,02



(a) Gráfico tipo Scree plot



(b) Gráfico del círculo unitario

Figura 15. Variabilidad acumulada de las componentes principales para QUni

Este análisis identificó que las dos primeras componentes principales fueron las más significativas, capturando más del 70% de la variabilidad total en ambas bases de datos, lo cual se ve reflejado en los gráficos tipo Scree Plot, donde se aprecia esta concentración de varianza en las primeras dos componentes, proporcionando una visualización efectiva de cómo estas variables estaban relacionadas y qué dimensiones eran las más informativas para la modelización posterior.

El círculo unitario se comporta como una representación gráfica del análisis de correlación entre las variables originales y las componentes principales, donde para ambas bases de datos, se destacó principalmente en las dos primeras componentes principales (CP1 y CP2).

En el caso de las características morfométricas y fisiográficas (CAMF), el círculo unitario muestra la significativa variabilidad entre estas características. Las flechas representan la dirección y la magnitud de la contribución de cada variable en el espacio de componentes principales. Se observa que muchas flechas están concentradas hacia el eje X positivo, lo que indica que estas variables tienen una fuerte contribución positiva a CP1. Sin embargo, otras flechas están más dispersas y varían en longitud, sugiriendo que tienen una contribución diversa y menos uniforme en el espacio de componentes principales. La longitud de las flechas indica la importancia relativa de cada variable, con flechas más largas representando una mayor influencia en la variabilidad total explicada por CP1 y CP2.

Por otro lado, para los datos del caudal unitario mensual multianual (QUni), las variables representadas son las cuencas específicas. Cada cuenca se considera un individuo en el análisis, y se evalúa cómo varían en relación con las componentes principales definidas por los datos de caudal. En este análisis, se observó que todas las cuencas tienen una contribución importante y positiva con CP1, lo que sugiere una fuerte influencia de CP1 en explicar la variabilidad entre las cuencas. En contraste, las contribuciones a CP2 son más variables, con algunas cuencas mostrando contribuciones positivas y otras negativas, reflejando una diversidad en cómo se comportan estas cuencas en relación con CP2. La magnitud de las flechas desde el origen indica la fuerza de la contribución de cada cuenca, con flechas más largas sugiriendo una mayor importancia relativa.

Estas observaciones son cruciales para entender la estructura subyacente de los datos y proporcionan una base sólida para aplicar la técnica de regionalización utilizando el análisis de componentes principales y el método K-Means. Al identificar las principales fuentes de variabilidad y cómo las cuencas y características se distribuyen en el espacio de componentes principales, se puede proceder a la regionalización con una comprensión más clara de las relaciones y patrones en los datos.

Lo anterior también se ve reflejado en las Tabla 15 y Tabla 16, donde se muestran las coordenadas dentro de las componentes principales. Estas coordenadas representaron las proyecciones de las variables originales en el espacio definido por las componentes principales del análisis de componentes principales (ACP). Además, se incluye el coseno cuadrado, el cual indica la calidad de la representación de cada variable en dicho espacio. Valores cercanos a 1 denotan una alta representatividad, mientras que valores cercanos a 0 indican una baja representación. Las variables con coordenadas negativas en la dimensión CP1 sugieren una relación inversa con respecto a la

tendencia general observada en esta componente principal, ofreciendo así una comprensión más profunda de cómo estas variables se relacionan entre sí en el contexto del estudio.

Tabla 15. Coordenadas y Cosenos
Cuadrados en el ACP de CAMF

	Coseno Cuadrado		Coordenadas	
	Dim.1	Dim.2	Dim.1	Dim.2
A	0,20	0,80	1,16	2,33
P	0,97	0,02	-1,39	-0,20
Lm	0,97	0,03	-1,69	-0,29
I	0,97	0,03	-1,71	-0,28
Lc	0,97	0,03	-1,63	-0,28
Ls	0,97	0,03	-1,66	-0,28
Amay	0,00	0,91	0,08	1,59
Amen	0,53	0,19	-0,72	0,43
F	0,97	0,03	-1,80	-0,31
Kc	0,97	0,03	-1,80	-0,31
Ia	0,97	0,03	-1,80	-0,31
Ias	0,97	0,03	-1,80	-0,31
Emin	0,40	0,49	2,83	-3,13
Emax	0,85	0,15	10,73	-4,51
Em	0,75	0,25	6,39	-3,66
Km	0,96	0,04	-1,76	-0,35
Co	0,97	0,03	-1,80	-0,31
Sm	0,95	0,04	-1,69	-0,36
Li	0,42	0,57	4,73	5,50
Dd	0,97	0,03	-1,80	-0,31
C	0,97	0,03	-1,80	-0,31
n1	0,44	0,56	6,11	6,95
Ct	0,97	0,03	-1,80	-0,31
S	0,97	0,03	-1,79	-0,32
Tc	0,97	0,03	-1,79	-0,31
Sin	0,97	0,03	-1,80	-0,31

Tabla 16. Coordenadas y Cosenos
Cuadrados en el ACP de QUni.

	Coseno Cuadrado		Coordenadas	
	Dim.1	Dim.2	Dim.1	Dim.2
PNP	0,82	0,05	0,91	-0,23
PTG	0,89	0,02	0,94	-0,14
AGR	0,70	0,06	0,84	0,25
CAR	0,62	0,00	0,78	0,06
YUN	0,70	0,02	0,84	-0,14
PTP	0,90	0,00	0,95	-0,07
NOR	0,85	0,00	0,92	-0,07
PILI	0,74	0,19	0,86	-0,43
PAL	0,64	0,16	0,80	-0,40
PIP	0,53	0,21	0,73	-0,46
VER	0,60	0,18	0,78	-0,42
SND	0,64	0,26	0,80	-0,51
CAN	0,46	0,27	0,68	0,52
UNI	0,69	0,07	0,83	0,26
PTJ	0,65	0,12	0,81	0,35
CEN	0,49	0,26	0,70	0,51
PRV	0,76	0,03	0,87	0,16
PIL	0,51	0,27	0,71	0,52
SPE	0,63	0,21	0,79	0,46

La Tabla 15 al mostrar la representación de las proyecciones de las variables originales en el espacio definido por las componentes principales del ACP, refleja que todas las variables evaluadas, a excepción de Emin, Emax, Em, Li y n1, se encuentran muy bien representadas dentro de la primera dimensión, pues sus valores son cercanos a 1; mientras que estas últimas mencionadas, aportan información significativa al espacio de la segunda dimensión. Lo anterior, refleja la pertinencia de haber escogido las variables evaluadas y el haber permanecido las dos primeras dimensiones, que como se menciono con anterioridad, capturan mas del 70% de la variabilidad de los datos.

Por otro lado, de la Tabla 16 se encuentra que cuencas como PNP, PTG, PTP, y NOR al tener valores cercanos a 1 del coseno cuadrado dentro de la primera dimensión, sugiere que están bien representadas en este espacio, lo cual también se ve reflejado desde sus coordenadas, pues cuencas como PNP y PTP indican una fuerte alineación con esta componente. Sin embargo, es de apreciar como otras estaciones mantienen valores intermedios (entre los 0,4 y 0,6), por lo que su influencia dentro de las dimensiones no es tan significativa como para otras estaciones.

Adicionalmente, se evaluó la dificultad de ciertas variables para poder determinar su relevancia en un estudio hidrológico de una cuenca. Si bien todas las variables son necesarias para realizar un adecuado estudio, con el fin de facilitar el trabajo del investigador o interesado en aplicar los modelos, se descartaron algunas variables, tales como las relacionadas con la red de drenaje de una cuenca. Finalmente, las variables consideradas para el presente estudio a implementar en los modelos evaluados para las cuencas instrumentadas fueron un total de 19 variables, las cuales se muestran en la Tabla 17. La selección de estas también terminó siendo desde prueba y error una vez fueron aplicados los modelos para la estimación de caudales, lo cual se abordará en la sección 6.7. *Modelos de estimación de caudales medios mensuales multianuales.*

Tabla 17. Características morfométricas, fisiográficas e hidroclimatológicas

CAMF DEFINIDAS A EVALUAR				
A (km ²)	Emin (msnm)	Kc	Ls (km)	Sin
Amen (km ²)	F	Km	P (km)	Sm (m/m)
Co	I (km)	Lc (km)	PpT (mm/año)	Tc (h)
Em (msnm)	Ia	Lm (km)	S (m/m)	

6.6.3. Definición número óptimo de clústeres

Previo a realizar la regionalización de las cuencas de estudio con fines de definir su mejor agrupación a definir, se realizaron pruebas para definir el número óptimo de clústeres, donde fueron empleando el método de la silueta y el método del codo, resultados que se aprecian en la Figura 16a y b.

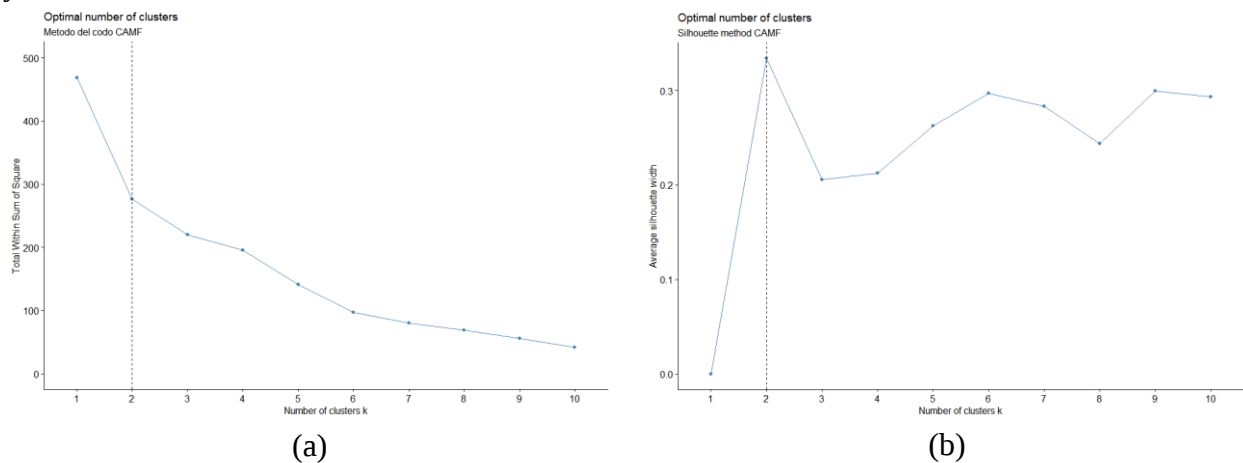


Figura 16. Métodos empleados para la determinación del número óptimo de clústeres para CAMF. (a) Método del codo, (b) Método de la silueta.

Basado en los métodos utilizados, se sugiere que para las características morfométricas y fisiográficas se debería trabajar idealmente con un total de 2 clústeres, de acuerdo con la técnica de la silueta. Aunque la técnica del codo también muestra un quiebre en $k=2$, su tendencia más clara se observa a partir de $k=6$. Sin embargo, en el contexto del presente estudio, donde se cuenta con un total de 19 estaciones de medición de caudal, particiones mayores no resultan viables debido a la limitada cantidad de datos disponibles.

Para la base de datos del QUni no fue posible evaluar el número óptimo de clústeres por factores como su alta dimensionalidad, teniendo en cuenta que este emplea los 420 registros de los meses para 35 años de estudio, pues los métodos del codo y la silueta son sensibles a la dimensionalidad de los datos. En bases de datos de alta dimensionalidad, las distancias entre puntos se vuelven menos significativas, lo que puede llevar a resultados poco claros o no interpretables ([Kaufman, L., & Rousseeuw, P. J., 1990](#)).

De esta forma, se decidió la elección de $k=2$ y $k=3$ como clústeres a evaluar para la regionalización mediante el método k-means fue guiada por una combinación de consideraciones estadísticas y pragmáticas, dada la limitación en la precisión de los métodos utilizados para determinar el número óptimo de clusters. Estas elecciones se fundamentaron en la observación de patrones en los datos y en la interpretación de cómo los clusters podrían reflejar las características subyacentes de las cuencas al implementarlos en los modelos de estimación de caudales. Adicionalmente, a pesar de cumplir con la densidad mínima para estaciones de red fluvial en zonas montañosas recomendada por la OMM (1994), la cual establece que debe ser de mínimo 1 estación cada 1.000 km², la aplicación de métodos estadísticos en un conjunto de datos pequeño puede ser limitada (Muñoz, J., 2012), como lo fue el caso de la presente investigación el haber implementado modelos de regresión múltiple. Finalmente, el método de partición utilizado para la definición de clústeres, como el k-means, permitió analizar el comportamiento de los datos bajo las distintas configuraciones de agrupación, lo que facilitó una comprensión más completa de la sensibilidad de los cambios de k con respecto a la segmentación e interpretación de los datos estimados, los cuales se veían directamente influenciados de las regiones definidas (Murray, A., 1999).

6.6.4. Regionalización con QUni y CAMF

Las bases de datos CAMF y QUni fueron evaluadas y regionalizadas utilizando entre 2 y 3 clústeres, teniendo en cuenta que, si bien el número óptimo de clústeres sugería trabajar con 2 agrupaciones, se decidió trabajar hasta con 3 clústeres con el fin de evaluar si la regionalización podía tener mejores resultados en su estimado. Esto se realizó con el propósito de analizar cómo estos clústeres se comportan en los modelos utilizados para estimar los caudales.

El método empleado para la agrupación de cuencas o regionalización fue el método de K-Means. Este método no es jerárquico, sino de partición, lo que significa que agrupa datos en un conjunto de n observaciones en k clústeres, donde cada observación pertenece al clúster con el centroide más cercano. El objetivo de K-Means es minimizar la varianza dentro de cada clúster, es decir, la

suma de las distancias cuadradas entre cada punto de un clúster y su centroide (Hennig et. al., 2015).

Los resultados de la regionalización implementando el método de K-Means se presentan a través de los Perfiles Comparativos de Agrupamientos para las Cuencas Hidrográficas de estudio, ilustrados en la Figura 17 hasta la Figura 20. Dado que K-Means es un método de partición, no es posible generar gráficos como dendrogramas, que son característicos de métodos jerárquicos. Por lo tanto, la mejor representación gráfica se logra a través de estos perfiles comparativos, los cuales muestran la distancia de las observaciones (cuencas) desde el centroide de cada clúster asignado.

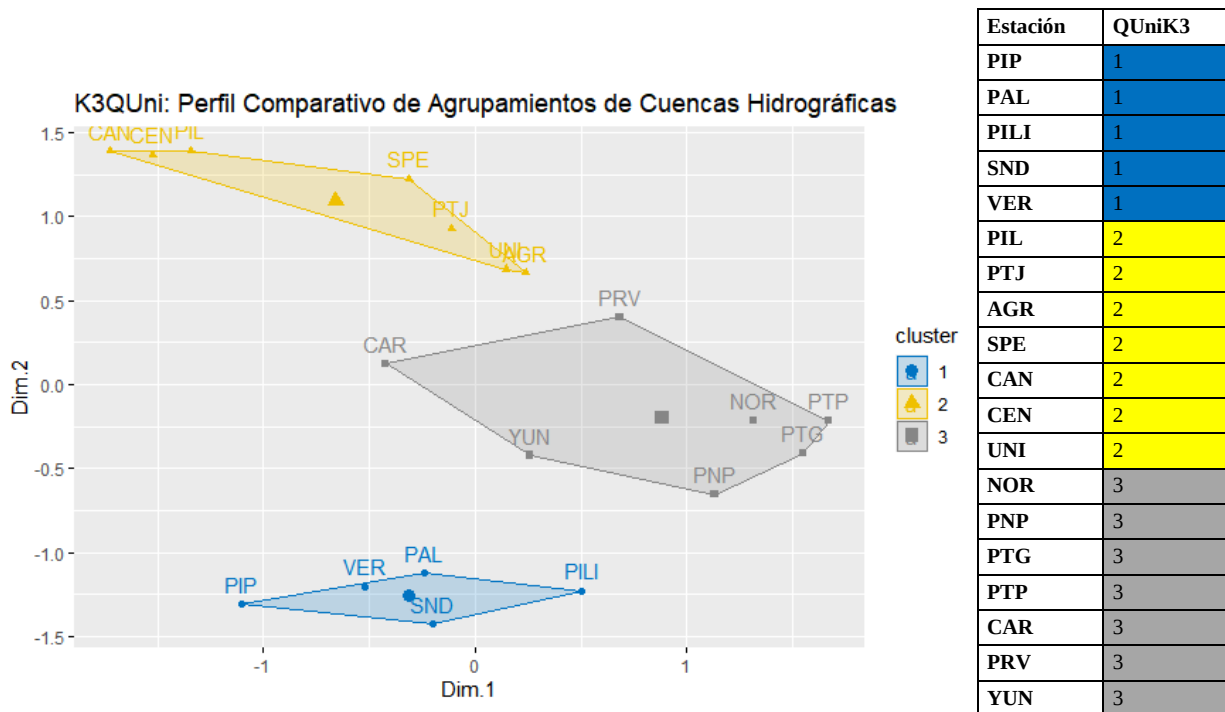


Figura 17. Agrupaciones de las cuencas hidrográficas utilizando el método K-Means con 3 clústeres para QUni

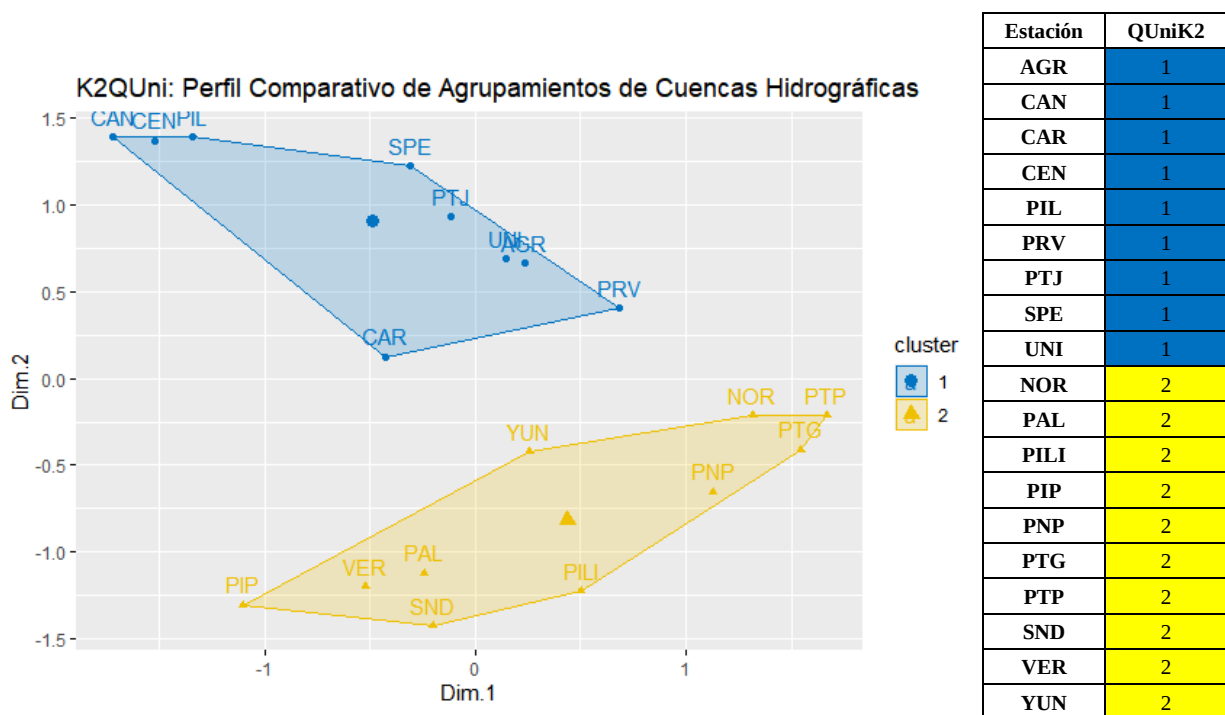


Figura 18. Agrupaciones de las cuencas hidrográficas utilizando el método K-Means con 2 clústeres para QUni

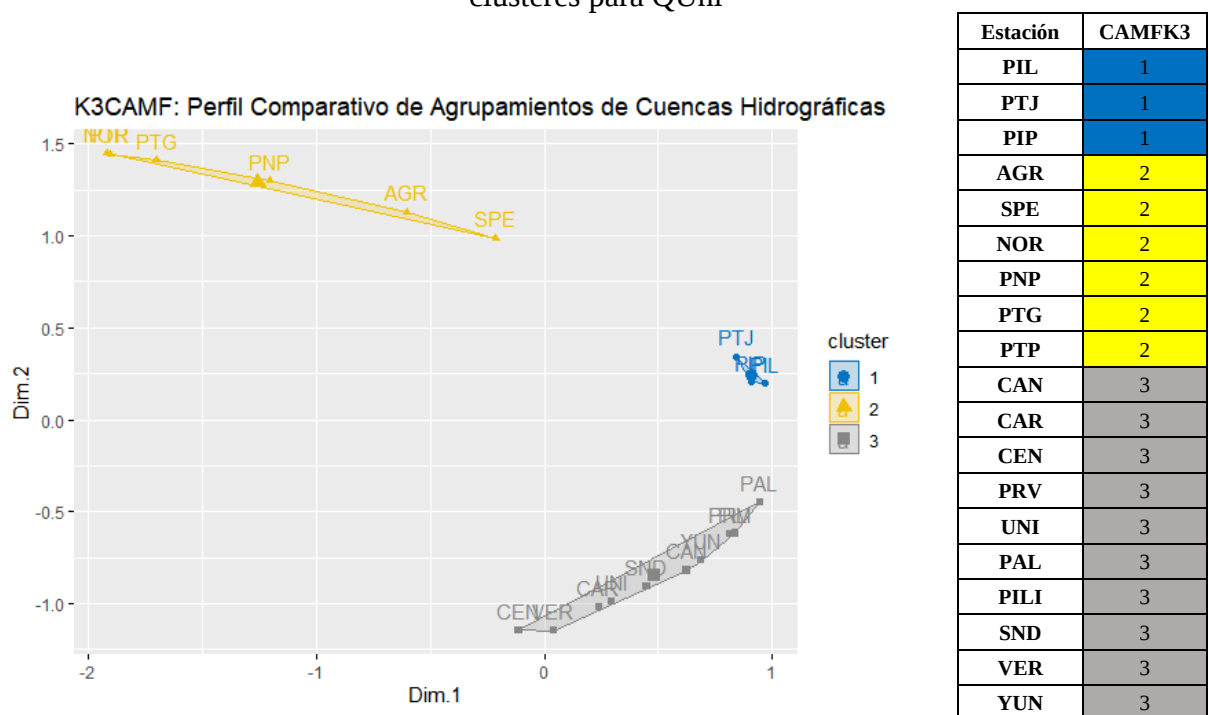


Figura 19. Agrupaciones de las cuencas hidrográficas utilizando el método K-Means con 3 clústeres para CAMF

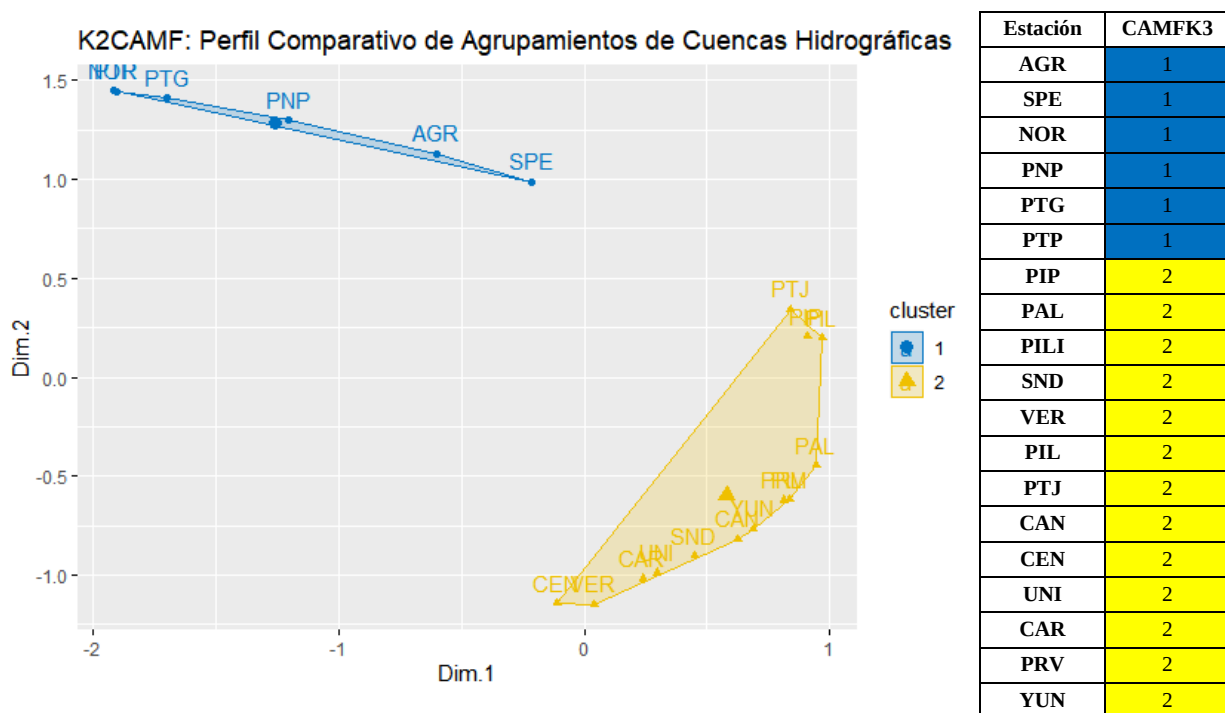


Figura 20. Agrupaciones de las cuencas hidrográficas utilizando el método K-Means con 2 clústeres para CAMF

Las regionalizaciones mencionadas fueron empleadas para evaluar cuál de ellas era la más adecuada para la modelación de los caudales a estimar, de modo que la selección de la regionalización óptima se discutirá posteriormente. Sin embargo, es importante destacar que la regionalización de CAMFK3, mostrada en la Figura 20, presenta un tercer clúster que agrupa solamente a 3 cuencas. Esto implica que su implementación en la estimación de los caudales podría no ser representativa debido a la baja cantidad de datos disponibles para el análisis. Para que estos modelos sean efectivos, se requiere una base de datos sólida para estimar los caudales con precisión, y aunque se han implementado 19 estaciones, estas podrían no ofrecer una representatividad suficiente para los objetivos del estudio. No obstante, la falta de información hidrometeorológica justifica la necesidad del presente estudio y la implementación de esta metodología con una baja cantidad de datos a implementar. Por lo tanto, se concluye que la regionalización CAMFK3 no es viable para la estimación de los caudales medios mensuales multianuales y queda descartada como opción.

6.7. Modelos de estimación de caudales medios mensuales multianuales

Con fines de estimar los caudales medios mensuales multianuales de las cuencas de estudio dentro de la zona andina del departamento de Nariño, se decidió emplear modelos de Regresión Lineal Múltiple (RLMu) y de Regresión Potencial Múltiple (RPMu). Estos modelos tomaron hasta cuatro variables, que en este caso fueron las características morfológicas y fisiográficas de las cuencas. Adicionalmente, se utilizó otra metodología para calcular el caudal medio (QM) a partir del caudal

unitario medio mensual multianual (QuM). Esta variable es crucial para comparar la eficiencia de drenaje entre las cuencas de interés. El uso del QuM se justifica porque proporciona una medida estandarizada del caudal que permite comparar cuencas de diferentes tamaños y características. Al normalizar el caudal por unidad de área, el QuM facilita la evaluación de la respuesta hidrológica de las cuencas a las precipitaciones y otras variables climáticas, permitiendo una comparación más directa y significativa de su eficiencia de drenaje.

La evaluación del modelo a emplear se realizó de manera descendiente con fines de evaluar la mejor medida que, se tuvo como hipótesis, sería aquella que implementara mayor cantidad de variables, de esta forma, fueron evaluados los siguientes modelos presentados en la Tabla 18. Además, se resalta que fueron evaluadas las 19 variables mencionadas en la Tabla 17

Tabla 18. Modelos de regresión evaluados para la estimación del caudal medio mensual multianual

No.	Modelo	Variable predictoria	Clústeres	Regionalización	C1	C2	C3	Tipo de regresión	Variables
1	QM_K2_QUni_RLMu_4	QM	K2	QUni	10	9		RLMu	4
2	QM_K2_QUni_RLMu_3	QM	K2	QUni	10	9		RLMu	3
3	QM_K2_QUni_RPMu_4	QM	K2	QUni	10	9		RPMu	4
4	QM_K2_QUni_RPMu_3	QM	K2	QUni	10	9		RPMu	3
5	QM_K2_CAMF_RLMu_4	QM	K2	CAMF	13	6		RLMu	4
6	QM_K2_CAMF_RLMu_3	QM	K2	CAMF	13	6		RLMu	3
7	QM_K2_CAMF_RPMu_4	QM	K2	CAMF	13	6		RPMu	4
8	QM_K2_CAMF_RPMu_3	QM	K2	CAMF	13	6		RPMu	3
9	QM_K3_QUni_RLMu_4	QM	K3	QUni	7	5	7	RLMu	4
10	QM_K3_QUni_RLMu_3	QM	K3	QUni	7	5	7	RLMu	3
11	QM_K3_QUni_RPMu_4	QM	K3	QUni	7	5	7	RPMu	4
12	QM_K3_QUni_RPMu_3	QM	K3	QUni	7	5	7	RPMu	3
13	QuM_K2_QUni_RLMu_4	QuM	K2	QUni	10	9		RLMu	4
14	QuM_K2_QUni_RLMu_3	QuM	K2	QUni	10	9		RLMu	3
15	QuM_K2_QUni_RPMu_4	QuM	K2	QUni	10	9		RPMu	4
16	QuM_K2_QUni_RPMu_3	QuM	K2	QUni	10	9		RPMu	3
17	QuM_K2_CAMF_RLMu_4	QuM	K2	CAMF	13	6		RLMu	4
18	QuM_K2_CAMF_RLMu_3	QuM	K2	CAMF	13	6		RLMu	3
19	QuM_K2_CAMF_RPMu_4	QuM	K2	CAMF	13	6		RPMu	4
20	QuM_K2_CAMF_RPMu_3	QuM	K2	CAMF	13	6		RPMu	3
21	QuM_K3_QUni_RLMu_4	QuM	K3	QUni	7	5	7	RLMu	4
22	QuM_K3_QUni_RLMu_3	QuM	K3	QUni	7	5	7	RLMu	3
23	QuM_K3_QUni_RPMu_4	QuM	K3	QUni	7	5	7	RPMu	4
24	QuM_K3_QUni_RPMu_3	QuM	K3	QUni	7	5	7	RPMu	3

Con fines de evaluar y validar los modelos previamente desarrollados, se calcularon índices de desempeño como (i) el coeficiente de determinación (R^2), (ii) el Error cuadrático medio (RMSE), (iii) la Eficiencia de Nash - Sutcliffe (NSE), y (iv) el Error absoluto medio porcentual (MAPE). Estos índices permiten también validar aspectos como la capacidad explicativa del modelo (R^2), la precisión de las predicciones (RMSE), la replicación de la variabilidad observada (NSE), y la validación de modelos al proporcionar una medida directa de la precisión relativa del modelo en términos porcentuales, lo cual es especialmente importante en situaciones donde la magnitud

absoluta de los errores puede variar significativamente entre observaciones (MAPE). Este último fue el índice más determinante para los modelos a escoger, pues este permite evaluar cuán cerca están las predicciones del modelo con respecto a los valores observados. Teniendo en cuenta la magnitud de los posibles resultados a obtener, donde al ser 19 CAMF disponibles, y 4 variables a combinar, se podían obtener hasta 5814 resultados para cada modelo de regresión múltiple con cuatro variables; de los cuales por medio de los índices de desempeño se determinó cual o cuales podían ser representativos. En la Tabla 19 se presenta los resultados con mejores índices de desempeño y con variables más fáciles de implementar en los modelos, donde, se resaltan con borde rojo aquellas filas con los modelos que reflejaron mejores índices de desempeño para la estimación de caudales medios mensuales multianuales para las cuencas instrumentadas de estudio.

Tabla 19. Resultados de los índices de desempeño para los modelos de regresión lineal y múltiple empleados

No.	Modelo	Variables	PROMEDIO				Cluster 1				Cluster 2				Cluster 3			
			RMSE	R2	MAPE	NSE	RMSE	R2	MAPE	NSE	RMSE	R2	MAPE	NSE	RMSE	R2	MAPE	NSE
1	QM_K2_QUni_RLMu_4	Co_Emin_Km_P	13.31	0.97	18.82	0.97	22.19	0.97	16.60	0.97	4.43	0.97	21.04	0.97				
2	QM_K2_QUni_RLMu_3	Co_Emin_P	13.85	0.97	24.25	0.97	23.25	0.97	25.67	0.97	4.44	0.97	22.84	0.97				
3	QM_K2_QUni_RPMu_4	I_la_PpT_Sm	8.97	0.99	11.28	0.99	15.33	0.99	14.60	0.99	2.60	0.99	7.96	0.99				
4	QM_K2_QUni_RPMu_3	I_P_PpT	26.88	0.95	18.29	0.91	51.47	0.91	24.95	0.83	2.29	0.99	11.63	0.99				
5	QM_K2_CAMF_RLMu_4	A_Amen_F_I	7.61	0.98	19.24	0.98	5.17	0.97	33.74	0.97	10.05	0.99	4.75	0.99				
6	QM_K2_CAMF_RLMu_3	A_Amen_I	8.49	0.98	24.29	0.98	5.35	0.97	41.77	0.97	11.64	0.99	6.82	0.99				
7	QM_K2_CAMF_RPMu_4	A_Co_PpT_S	5.09	1.00	7.05	1.00	2.05	1.00	10.98	1.00	13.06	0.99	2.52	0.99				
8	QM_K2_CAMF_RPMu_3	Em_P_PpT	7.60	0.99	8.52	0.99	4.14	0.99	14.13	0.98	11.05	0.99	2.90	0.99				
9	QM_K3_QUni_RLMu_4	Co_Em_Lc_P	4.27	1.00	3.09	1.00	1.88	0.99	2.73	0.99	0.00	1.00	0.00	1.00	10.94	0.99	6.53	0.99
10	QM_K3_QUni_RLMu_3	Em_Lm_P	4.55	1.00	10.20	1.00	0.74	1.00	5.81	1.00	0.52	1.00	2.27	1.00	12.38	0.99	22.50	0.99
11	QM_K3_QUni_RPMu_4	Co_Emin_Km_S	4.98	1.00	1.80	1.00	1.51	1.00	2.55	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	13.43	0.99	2.86	0.99
12	QM_K3_QUni_RPMu_3	Em_Km_PpT	5.68	1.00	3.06	0.99	1.97	1.00	4.79	0.99	0.63	1.00	0.65	1.00	14.44	0.99	3.73	0.99
13	QuM_K2_QUni_RLMu_4	Emin_I_PpT_S	9.80	0.99	7.16	0.99	16.93	0.98	6.96	0.98	2.67	0.99	7.36	0.99				
14	QuM_K2_QUni_RLMu_3	Emin_PpT_Sm	12.02	0.98	11.37	0.97	19.80	0.98	9.86	0.98	4.23	0.97	12.88	0.97				
15	QuM_K2_QUni_RPMu_4	Emin_I_PpT_S	6.15	1.00	5.19	0.99	10.81	0.99	7.32	0.99	1.49	1.00	3.06	1.00				
16	QuM_K2_QUni_RPMu_3	Emin_PpT_S	7.69	0.99	8.98	0.99	12.50	0.99	8.35	0.99	2.89	0.99	9.61	0.99				
17	QuM_K2_CAMF_RLMu_4	Ia_Lc_PpT_S	2.17	1.00	9.52	1.00	2.93	0.99	18.65	0.99	1.42	1.00	0.39	1.00				
18	QuM_K2_CAMF_RLMu_3	I_PpT_S	3.23	0.99	11.07	0.99	4.20	0.98	20.49	0.98	2.25	1.00	1.64	1.00				
19	QuM_K2_CAMF_RPMu_4	Ia_PpT_S_Tc	2.90	0.99	7.69	0.98	5.64	0.99	15.33	0.97	0.15	1.00	0.04	1.00				
20	QuM_K2_CAMF_RPMu_3	I_PpT_S	2.92	1.00	9.00	0.99	3.78	0.99	16.40	0.99	2.05	1.00	1.59	1.00				
21	QuM_K3_QUni_RLMu_4	A_Co_F_Km	3.85	1.00	1.06	1.00	0.61	1.00	1.01	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	10.94	0.99	2.18	0.99
22	QuM_K3_QUni_RLMu_3	Em_PpT_Sm	5.52	1.00	3.02	1.00	1.76	1.00	3.67	1.00	0.85	1.00	1.24	1.00	13.95	0.99	4.14	0.99
23	QuM_K3_QUni_RPMu_4	Emin_I_Lc_Tc	1.17	1.00	0.98	1.00	0.50	1.00	2.02	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	3.01	1.00	0.93	1.00
24	QuM_K3_QUni_RPMu_3	Em_Km_PpT	5.68	1.00	3.06	0.99	1.97	1.00	4.79	0.99	0.63	1.00	0.65	1.00	14.44	0.99	3.73	0.99

6.7.1. Análisis de la regionalización con dos clústeres

De los resultados para los índices de desempeño de modelos evaluados que se observan en la Tabla 19, se puede apreciar que para los modelos evaluados con dos clúster, los resultados del Error Absoluto Medio Porcentual (MAPE) Promedio (PROM) de las Regresiones Lineales Múltiples fueron desde valores entre los 9,52% hasta 24,29%, donde, resulta importante también fijarse en los índices de cada clúster del modelo, pues también se aprecia la diferencia entre cada agrupación teniendo en cuenta sus distintas características, resultado coherente conforme a la metodología empleada de K-Means. De esta forma, promediar el modelo puede llegar a tener sesgos referente a cuál puede realmente ser el mejor, pues, por ejemplo para aquel modelo con un MAPE_PROM de 9,52% correspondiente al modelo QuM_K2_CAMF_RLMu_4, para su Cluster 1 (C1) cuenta con un MAPE_C1 de 18,65%, mientras para su Cluster 2 (C2) de 0,39%. Lo mismo sucede para las Regresiones Potenciales Múltiples, donde, el modelo con mejores resultados fue

QuM_K2_QUni_RPMu_4 con un MAPE_PROM de 5,19%, MAPE_C1 de 7,32%, y MAPE_C2 de 3,06%, resultado que, podría llegarse a implementar en caso de querer solo agrupar dos regiones y seguir también lo establecido desde los resultados del número óptimo de clústeres que fue de un total de 2 agrupaciones. De esta forma, la Figura 21 muestra la distribución geoespacial de la regionalización realizada para las cuencas de estudio con dos clústeres para la base de datos del Caudal Unitario Medio Mensual Multianual (QUniK2).

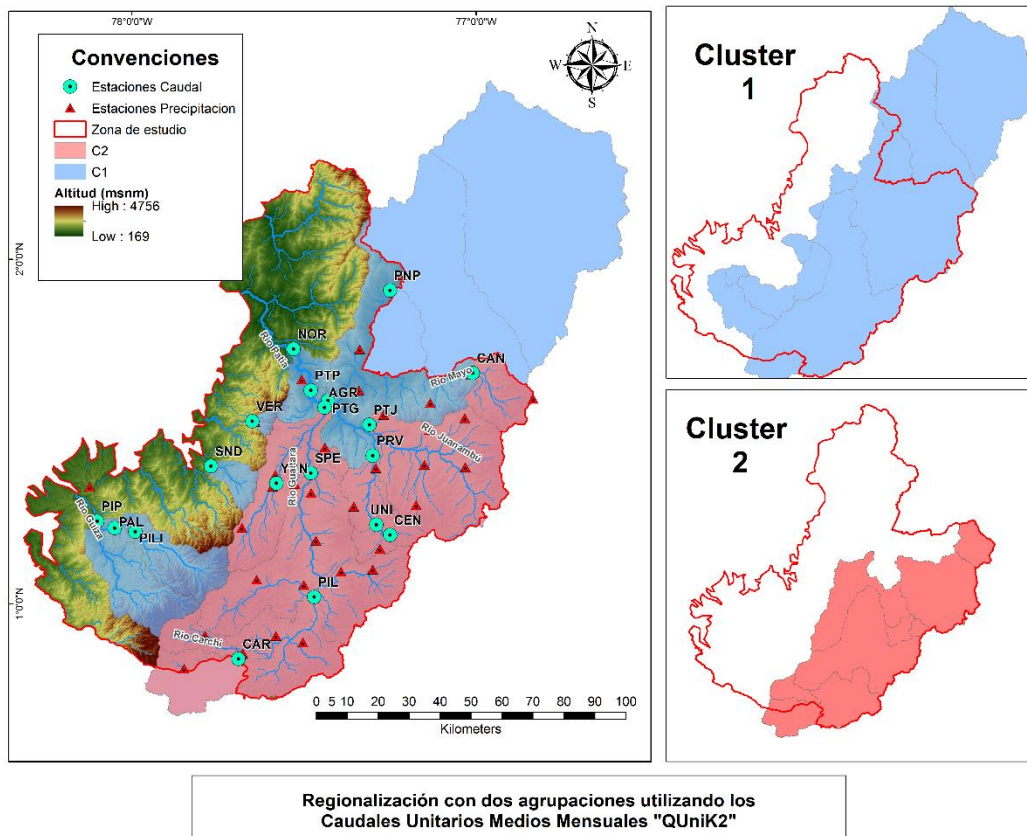


Figura 21. Representación espacial de la regionalización realizada para las cuencas de estudio con dos clústeres para la base de datos del Caudal Unitario Medio Mensual Multianual (QUniK2)

Las regiones hidrológicas homogéneas definidas como “QUniK2” presentan la particularidad de estar una inmersa en otra al referirse a términos geoespaciales, con C2 siendo una subregión dentro de C1, lo cual puede ser justificado por la variabilidad en los caudales entre cuencas, donde una región más grande (C1) engloba áreas con características más específicas (C2). Además, los caudales fueron evaluados desde sus Caudales Unitarios (QUni) los cuales facilitan la estandarización y comparación de los resultados, asegurando que las diferencias en los caudales no se deban únicamente a las variaciones en el tamaño de las cuencas, sino a las características hidrológicas e hidroclimáticas intrínsecas de cada una.

Teniendo en cuenta lo anterior, por medio de la Figura 22 se presentan los valores obtenidos para el modelo QuM_K2_QUni_RPMu_4, teniendo en cuenta que puede ser también empleado en caso

de querer emplear un modelo con una regionalización de dos clústeres, el cual, también demostró tener buenos resultados para la estimación de caudales medios mensuales multianuales.

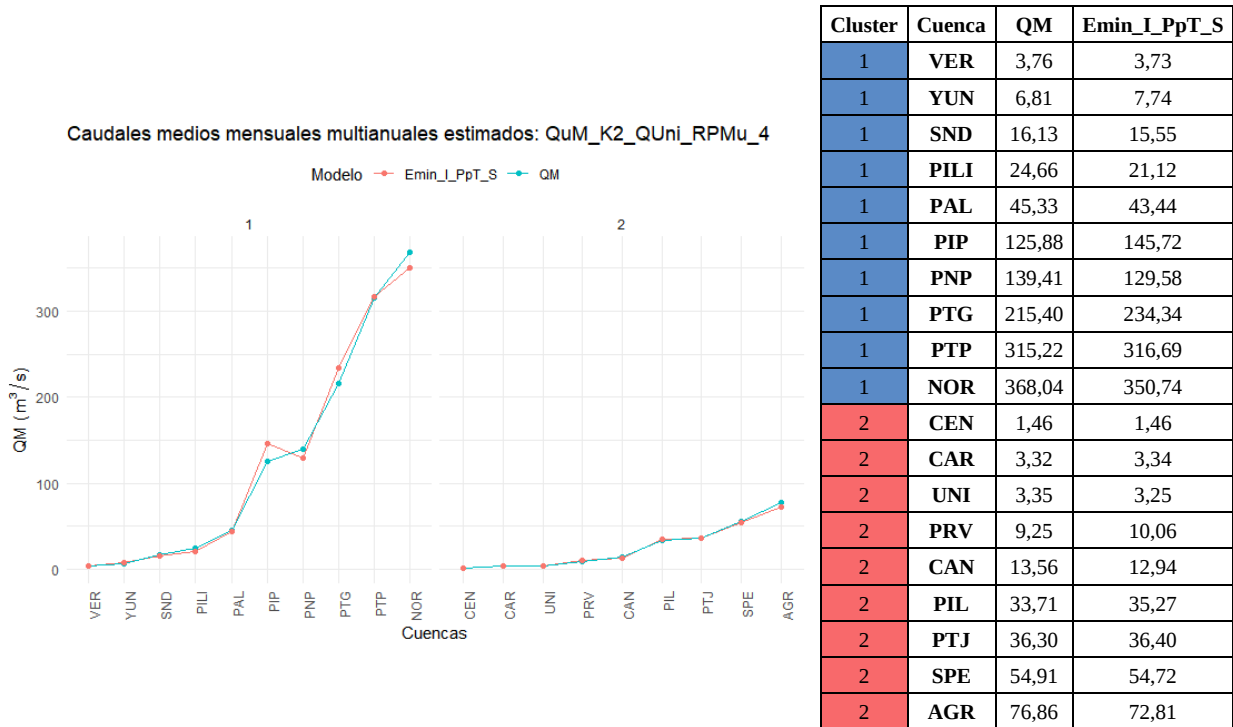


Figura 22. Resultados de los caudales medios mensuales multianuales estimados para cuencas instrumentadas empleando el modelo con el mejor resultado en sus índices de desempeño para QUniK2

$$QM_{C1} \left(\frac{m^3}{s} \right) = \frac{A}{1000} \cdot e^{2,835 - 0,001 \cdot Emin - 0,001 \cdot I + 0,001 \cdot PpT + 0,192 \cdot S} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$QM_{C2} \left(\frac{m^3}{s} \right) = \frac{A}{1000} \cdot e^{-1,526 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot Emin + 0,014 \cdot PpT + 0,002 \cdot S} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$QuM_{C1} \left(\frac{L}{s \cdot km^2} \right) = e^{2,835 - 0,001 \cdot Emin - 0,001 \cdot I + 0,001 \cdot PpT + 0,192 \cdot S} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$QuM_{C2} \left(\frac{L}{s \cdot km^2} \right) = e^{-1,526 + 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot Emin + 0,014 \cdot PpT + 0,002 \cdot S} \quad \text{Ecuación 13}$$

6.7.2. Análisis de la regionalización con tres clústeres

La regionalización tipo QUniK3, la cual se representa en la Figura 23 su distribución geoespacial dentro de la zona Andina del departamento de Nariño, se destacó por arrojar el mejor desempeño de los modelos evaluados, obteniendo valores de MAPE_PROM para la estimación de QuM como variable directa de 1,06% para QuM_K3_QUni_RLMu_4 y de 0,76% para

QuM_K3_QUni_RPMu_4. Los modelos donde se empleó como variable respuesta QM, arrojaron resultados de MAPE_PROM desde los 10,20% hasta el 1,8%, valores que pueden también ser considerados para la estimación de los caudales teniendo en cuenta que también tuvieron un buen desempeño.

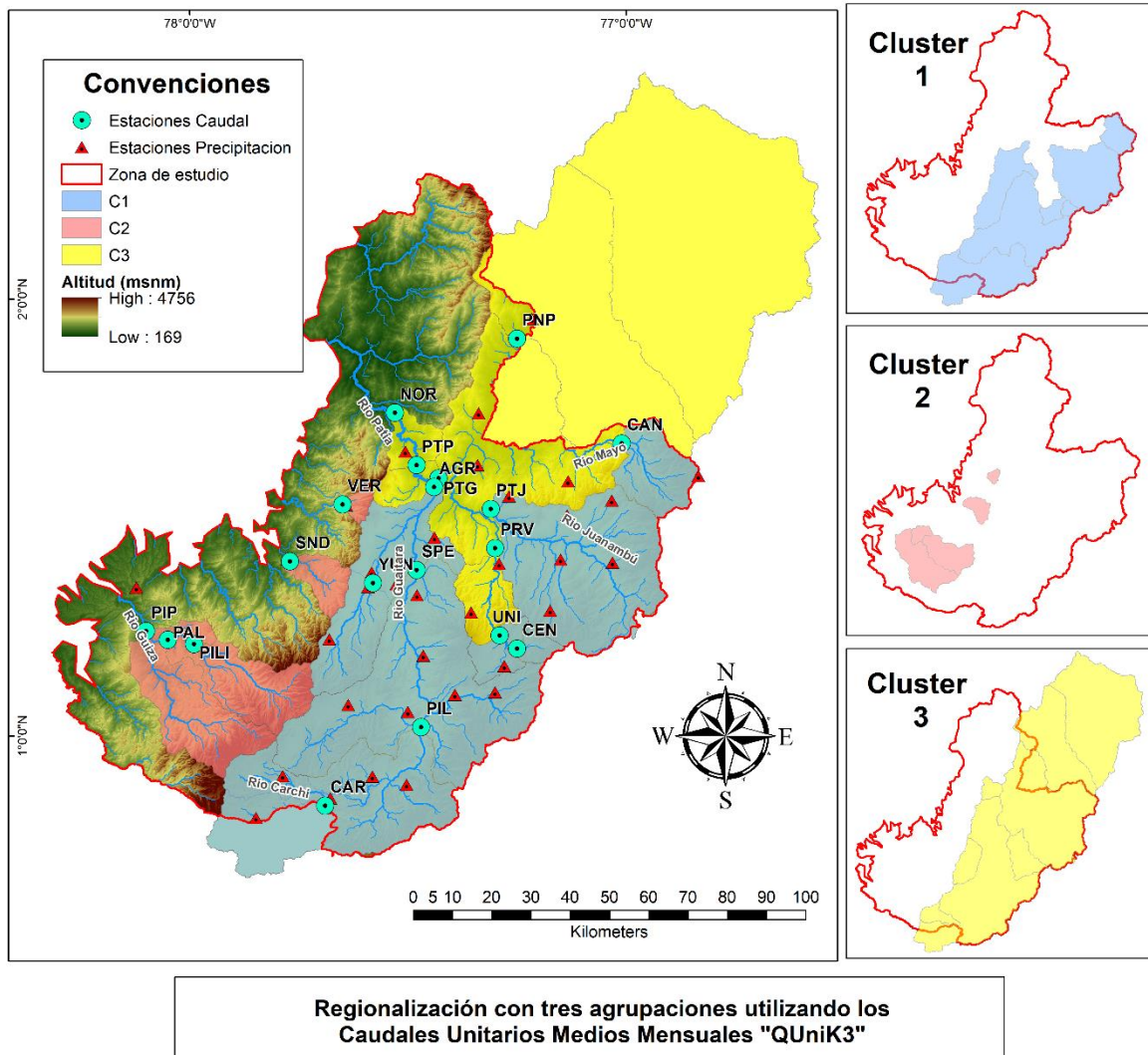


Figura 23. Representación espacial de la regionalización realizada para las cuencas de estudio con tres clústeres para la base de datos del Caudal Unitario Medio Mensual Multianual (QUniK3)

La regionalización con tres clústeres para QUni presenta la misma particularidad presentada con dos clústeres, la cual, va del hecho que una región (C1) se encuentra inmersa geoespacialmente dentro de otra (C3). Esta regionalización, también permite diferenciar que la segunda región definida (C2) se compone por cuencas que sus cauces principales pertenecen a vertientes distintas a las que convergen hacia el río principal de la zona como lo es el Río Patía; estas cuencas, particularmente, se encuentran convergiendo hacia algún cauce principal que hace parte ya de la zona pacífica del departamento de Nariño, lo cual resultó de utilidad al haber implementado esta tercera partición dentro del método de K-means, pues da una mejor diferenciación de las cuencas

específicas que componen la región homogénea (C2), punto que no era diferenciable al solo implementar dos regiones, como se discutió con anterioridad.

Otro análisis posible que se ve reflejado tanto para la regionalización con 2 como con 3 clústeres, es que los mejores resultados fueron para aquellos donde como variable respuesta se tuvo QuM, y, para aquellos donde fue aplicada una Regresión Potencial Multiple (RPMu). Lo anterior puede explicarse teniendo en cuenta que el QuM facilita la comparación entre diferentes cuencas al normalizar los caudales por unidad de área ([Chow et. al., 1994](#)). Esta normalización reduce la influencia de las diferencias en tamaño entre las cuencas, permitiendo que las relaciones subyacentes sean más fácilmente capturadas por los modelos de regresión. Por otro lado, con respecto al hecho de encontrar mejores resultados al aplicar Regresiones Potenciales Múltiples, posiblemente se deba a que este tipo de regresión permite abordar una mayor complejidad de los datos ([Muñoz, J., 2012](#)), caso como lo son las variables hidrológicas y sus interacciones entre las variables fisiográficas y climáticas.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el Anexo 8 se puede apreciar con mayor detalle los modelos desarrollados para QuM_K3_QUni_RLMu_4, QuM_K3_QUni_RPMu_4 y QuM_K3_QUni_RPMu_3, resultados que vale la pena revisar en caso de querer implementar modelos con distintas CAMF con fines de evaluar su desempeño, pues, se puede apreciar que la robustez de los modelos aplicados permite obtener resultados muy próximos a los presentados por las estaciones hidrometereológicas de las cuales se obtuvo la base para la estimación de los caudales evaluados en el presente estudio.

Con fines de traer a correlación los modelos más representativos obtenidos, por medio de la Tabla 20 y Figura 24 se puede apreciar los resultados de los modelos evaluados para QUniK3, evidenciando su buen desempeño ante la predicción de los caudales medios mensuales multianuales.

Tabla 20. Resultados de los caudales medios mensuales multianuales estimados para los modelos con mejor resultado en sus índices de desempeño para QUniK3

Cluster	Cuenca	QM	QuM_K3QUni_RPMu		QuM_K3QUni_RLMu		QM_K3QUni_RPMu		QM_K3QUni_RLMu	
			Em_F_Km_PpT	Em_Km_PpT	Co_F_Km_P	Em_PpT_Sm	A_Lm_P_Sm	Em_I_Sm	Em_Lm_Sm_Tc	Em_Lm_P
1	CEN	1.46	1.46	1.40	1.46	1.31	1.48	1.63	1.51	1.88
1	UNI	3.35	3.36	3.87	3.37	3.43	3.30	2.94	3.69	3.48
1	CAN	13.56	13.54	13.65	13.61	13.62	13.31	12.80	13.68	13.61
1	PIL	33.71	33.76	32.66	33.73	34.19	33.79	35.36	33.06	32.45
1	PTJ	36.30	36.31	36.74	35.81	35.71	37.02	39.78	35.96	35.91
1	SPE	54.91	54.61	53.66	55.81	59.32	55.33	59.08	55.20	56.25
1	AGR	76.86	77.11	71.96	76.31	78.11	75.99	67.06	77.05	76.56
2	VER	3.76	3.76	3.76	3.76	3.75	3.76	3.64	3.76	3.97
2	SND	16.13	16.13	16.11	16.13	16.12	16.13	16.68	16.13	16.04
2	PIL	24.66	24.66	24.81	24.66	25.21	24.66	31.31	24.66	23.87
2	PAL	45.33	45.33	44.64	45.33	44.14	45.33	36.08	45.33	46.14
2	PIP	125.88	125.88	127.10	125.88	127.24	125.88	124.41	125.88	125.74
3	CAR	3.32	3.33	3.27	3.32	3.21	3.34	3.13	3.14	3.27
3	YUN	6.81	6.81	6.72	6.87	6.72	6.86	6.44	7.28	1.19
3	PRV	9.25	9.15	9.86	9.16	10.07	9.10	10.93	9.44	14.45
3	PNP	139.41	139.02	139.26	140.46	139.82	141.01	123.29	140.50	142.48
3	PTG	215.40	216.11	221.52	212.68	219.20	212.83	244.50	215.62	211.03
3	PTP	315.22	336.58	327.94	336.43	329.13	333.15	327.75	346.92	338.28
3	NOR	368.04	347.30	332.53	348.65	334.07	349.83	334.15	334.55	346.74

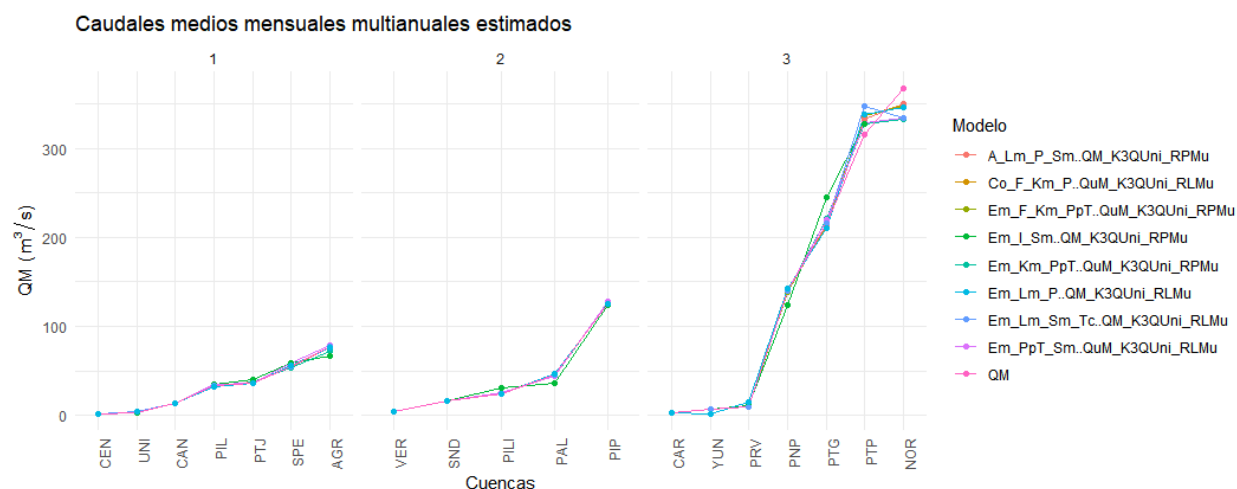


Figura 24. Resultados de los caudales medios mensuales multianuales estimados para el modelo con el mejor resultado en sus índices de desempeño para QUniK3.

6.7.3. Modelo definitivo para la estimación de caudales medios mensuales multianuales para cuencas no instrumentadas

Una vez realizado el respectivo análisis sobre los modelos con mejor desempeño obtenido al evaluar QuM como variable respuesta en los modelos de Regresión Potencial Múltiple, se decidió optar por el modelo desarrollado para QuM_K3_QUni_RPMu_4. Se seleccionó este último modelo debido a su sólido desempeño, con un MAPE máximo inferior al 6% para las agrupaciones evaluadas.

Para poder aplicar este modelo en cuencas no instrumentadas (CNI), fueron definidas zonas hidrológicas de interés, para lo cual se tuvo en cuenta como criterio el hecho de que se encontrara inmersa geoespacialmente dentro de las regiones definidas. De esta forma, se delimitó una cuenca a evaluar por cada región, para un total de tres cuencas no instrumentadas a evaluar, las cuales se pueden apreciar en la Figura 25.

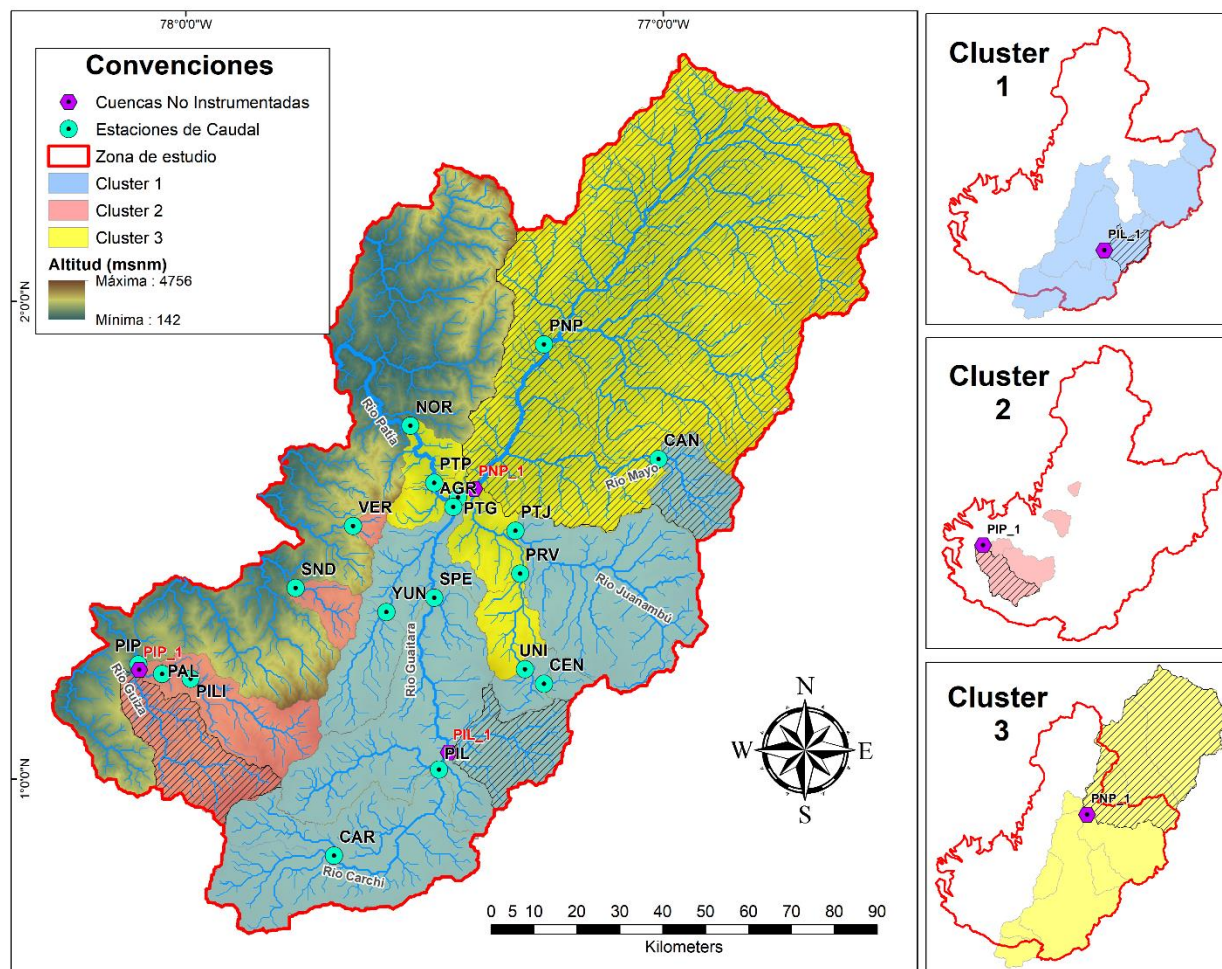


Figura 25. Cuencas no instrumentadas definidas dentro de las regiones hidrológicas establecidas

Teniendo en cuenta el buen desempeño del modelo desarrollado para las cuencas instrumentadas, se buscó escoger como modelo definitivo para las cuencas no instrumentadas, aquel que empleara las CAMF simples para obtener de una cuenca, con fines de que su aplicabilidad no implicara un desgaste mayor para el investigador al querer aplicarlo en nuevas zonas hidrográficas de interés a evaluar; esta flexibilidad es posible teniendo en cuenta que, como se aprecia en el Anexo 7, el MAPE_MAX por clúster fue inferior al 6%. De esta forma, las variables evaluadas y calculadas para cada cuenca se detallan en la Tabla 21, las cuales se basan de CAMF iniciales como el Área (A), Perímetro (P), Elevación media de la cuenca (Em), el Ancho máximo (I), y la Longitud de máximo recorrido (Lm).

A continuación, la Tabla 21 presenta las CAMF estimadas, así como las coordenadas geográficas (latitud y longitud) de las cuencas no instrumentadas seleccionadas para el estudio.

Tabla 21. Características Morfométricas y Fisiográficas y coordenadas para las cuencas no instrumentadas definidas

Cluster	Cuenca	A	Lm	I	Ia	Em	Cuenca	Cluster		
1	PIL_1	427,87	31,17	26,04	1,20	3067,64	PNP_1	1	Longitud	1° 36' 30" N
2	PIP_1	567,27	42,87	18,75	2,29	2192,52			Latitud	77° 23' 44,999" O
3	PNP_1	6665,61	119,46	70,36	1,70	1659,35	PIL_1	2	Longitud	1° 3' 22,958" N
									Latitud	77° 26' 57,957" O
							PIP_1	3	Longitud	1° 13' 44,995" N
									Latitud	78° 5' 52,5" O

Cluster	Cuenca	Co	F	Km	P	Kc
1	PIL_1	0,0220	0,44	7,17	111,63	1,51
2	PIP_1	0,0085	0,31	3,87	134,23	1,58
3	PNP_1	0,0004	0,47	0,25	403,01	1,38

A (km²): Área total de la cuenca P (km): Perímetro de la cuenca Lm (km): Longitud de máximo recorrido I (km): Ancho máximo
F: Factor de forma (adm) Kc: Coeficiente de compacidad (adm) Ia: Índice de alargamiento (adm) Co: Coeficiente orográfico
Em (m,s,n,m): Elevación media de la cuenca Km (m/km²): Coeficiente de masividad

Las cuencas no instrumentadas definidas poseen una forma oval oblonga a rectangular oblonga, a excepción de PNP_1 la cual mantiene una forma oval redonda a oval oblonga; son alargadas con baja susceptibilidad a las avenidas, lo anterior, se puede ver al tener un cauce principal alargado, y, al ser una cuenca moderadamente montañosa con relieve poco accidentado.

Las CAMF mencionadas en la Tabla 21 fueron evaluadas para los modelos mencionados con anterioridad, sin embargo, la metodología para la selección del mejor modelo teniendo en cuenta el comportamiento de las cuencas no instrumentadas (CNI), se diferencié a la metodología base de las cuencas instrumentadas (CI) la cual buscó obtener las mejores métricas, desde el hecho que al no tener ningún dato referente a la disponibilidad hídrica en el punto de desemboque de las CNI, se tuvo como referencia los puntos más cercanos a esta con disponibilidad de información, es decir, se evaluó la disponibilidad hídrica aguas arriba y aguas abajo del cauce principal al cual la subcuenca evaluada aportaría. Fue necesario realizar un análisis exhaustivo con respecto a los resultados obtenidos, pues la variabilidad de los resultados fue considerable, tal como se aprecia en el Anexo 9, y de una forma resumida en la Tabla 22, donde se muestra también valores de los caudales de las vertientes aguas arriba, abajo, o cercanas del punto de desemboque de interés.

Tabla 22. Valores de referencia en m³/s para la selección del modelo definitivo de estimación de caudales para cuencas no instrumentadas

							DISPONIBILIDAD HÍDRICA AGUAS			
Cluster	Modelo	MEDIANA	MIN		MAX		ARRIBA O CERCANA		ABAJO	
1	PIL_2	17,734	3,430	A_Co_Km_P	115,203	Co_Ia_Km_Lm	PIL	33,710	SPE	54,91
2	PIP_1	34,672	3,382	A_I_Kc_P	2077275,163	A_F_I_Ia	PAL	45,330	PIP	125,88
3	PNP_1	18,655	126,281	A_Co_F_Ia	211,299	A_Co_I_Ia	PNP	139,410	PTG	215,40
							CAN	13.560		

Por ejemplo, para la cuenca PNP_1 al tener aguas arriba la cuenca PNP, esta debía de esperarse valores superiores a los 139 m³/s, donde, como otra aportante a este punto se tuvo la cuenca CAN, y aguas arriba se encontraba PTG la cual tiene también como aportante a PTJ y PRV; con las

consideraciones anteriores, era de esperarse valores aproximados para PNP_1 entre los 153 a 170 m³/s, de manera que aquellos modelos que como resultado dieron valores inferiores o superiores a estos, fueron descartados, a pesar de contar con buenas métricas como modelo de estimación para cuencas instrumentadas. Consideraciones similares fueron tenidas en cuenta para las demás CNI evaluadas.

Finalmente, el modelo seleccionado para el presente estudio, fue aquel que implementó la combinación de las variables “A_Co_Km_Lm” dentro de un modelo de Regresión Múltiple Potencial (RPMu) que tuvo como variable respuesta el Caudal Unitario Medio Mensual Multianual (QuM) para una regionalización con un total de tres regiones (K3) que implementó la serie histórica de los Caudales Unitarios (QUni) medios mensuales, modelo que de manera abreviada se denominó “QuM_A_Co_Km_Lm_RPMu4_K3QUni”. El modelo y las variables escogidas se detalla en la Tabla 23, el cual se detalla sobre sus variables empleadas en la Tabla 24.

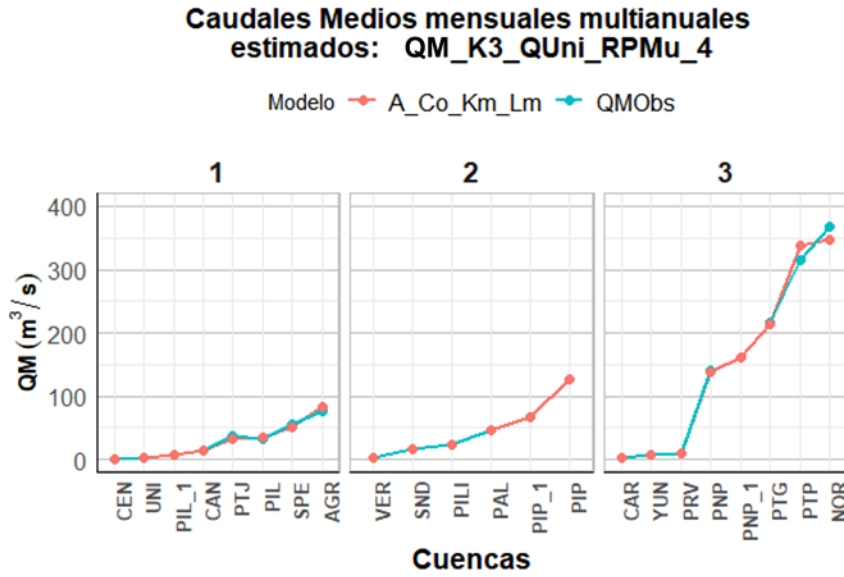
Tabla 23. Detalle del modelo definitivo seleccionado para la estimación de Caudales Medios Mensuales Multianuales de las cuencas de estudio de la zona Andina del departamento de Nariño.

Clústeres	Regionalización	C1	C2	C3	Variable predictoría	Tipo de regresión	Variables
K3	Quni	7	5	7	QuM	RPMu	A_Co_Km_Lm

Tabla 24. Detalle de las Características Morfométricas y Fisiográficas (CAMF) empleadas en el modelo definido para la estimación de Caudales Medios Mensuales Multianuales

Variable			Unidades	Ecuación	Interpretación
X1	A	Área o superficie total de la cuenca	km ²		
X2	Co	Coeficiente orográfico	Adimensional	$C_o = \frac{Em^2}{A}$	$C_o > 6$: Es un relieve accidentado. $C_o < 6$: Es un relieve poco accidentado.
X3	Km	Coeficiente de masividad	Adimensional	$K_m = \frac{Em}{A}$	$0 < K_m < 35$: Moderadamente montañosa. $35 < K_m < 70$: Montañosa. $70 < K_m < 105$: Muy montañosa.
X4	Lm	Lm (km): Longitud de máximo recorrido	km		

A continuación, en la Figura 26 se presenta a detalle los resultados obtenidos del caudal estimado para las CI y CNI, con sus respectivos índices de desempeño y gráfico.



	RMSE_QM	R2_QM	MAPE_QM	NSE_QM
PROMEDIO	4,935	0,993	2,556	0,992
C1	3,259	0,987	5,415	0,984
C2	0,002	1,000	0,003	1,000
C3	11,543	0,993	2,249	0,993

Cluster	Cuenca	QM	A_Co_Km_Lm
1	CEN	1,46	1,424
1	UNI	3,35	3,646
1	PIL_1		6,720
1	CAN	13,56	13,705
1	PTJ	36,3	33,459
1	PIL	33,71	33,989
1	SPE	54,91	50,548
1	AGR	76,86	83,720
2	VER	3,76	3,760
2	SND	16,13	16,131
2	PILI	24,66	24,659
2	PAL	45,33	45,330
2	PIP_1		67,743
2	PIP	125,88	125,875
3	CAR	3,32	3,319
3	YUN	6,81	6,746
3	PRV	9,25	9,361
3	PNP	139,41	139,314
3	PNP_1		160,184
3	PTG	215,4	213,676
3	PTP	315,22	336,911
3	NOR	368,04	346,610

Figura 26. Resultados de los Caudales Medios Mensuales Multianuales estimados para las Cuencas Instrumentadas y No Instrumentadas utilizando el modelo definitivo del presente estudio

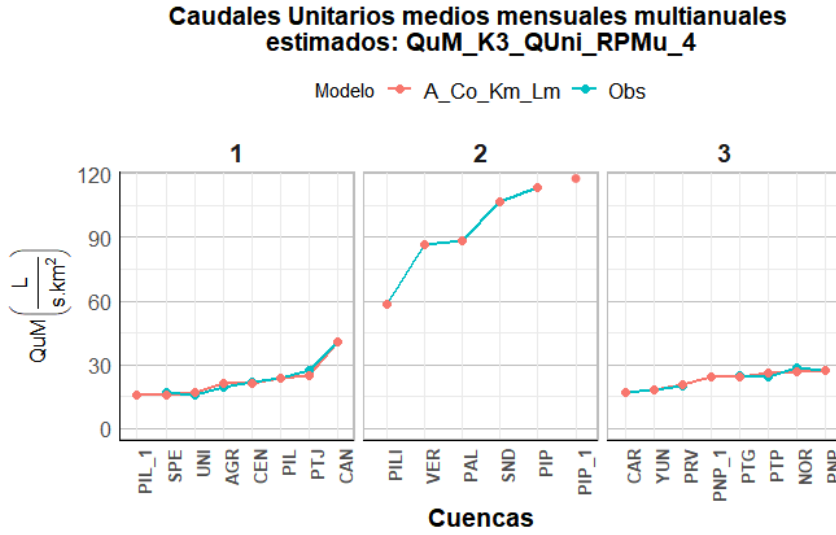
A continuación, se presentan las ecuaciones para los Caudales Medios Mensuales Multianuales estimados para cada clúster del modelo definitivo QM_K3_QUni_RPMu_4.

$$QM_{C1} \left(\frac{m^3}{s} \right) = \frac{A}{1000} \cdot e^{1,379 - 0,0012 \cdot A - 522,543 \cdot Co + 1,608 \cdot Km + 0,061 \cdot Lm} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$QM_{C2} \left(\frac{m^3}{s} \right) = \frac{A}{1000} \cdot e^{2,328 - 4,62 \times 10^{-5} \cdot A - 147,263 \cdot Co + 0,388 \cdot Km + 0,052 \cdot Lm} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$QM_{C3} \left(\frac{m^3}{s} \right) = \frac{A}{1000} \cdot e^{3,742 + 1,64 \times 10^{-5} \cdot A + 63,672 \cdot Co - 0,263 \cdot Km - 0,005 \cdot Lm} \quad \text{Ecuación 16}$$

Así mismo, la Figura 27 presenta los resultados de Caudales Unitarios Medios Mensuales Multianuales estimados, como sus respectivas ecuaciones.



Cluster	Cuenca	QuM	A_Co_Km_Lm
1	PIL_1		15.707
1	SPE	17.15	15.791
1	UNI	15.71	17.095
1	AGR	19.25	20.970
1	CEN	21.6	21.065
1	PIL	23.55	23.749
1	PTJ	27.1	24.976
1	CAN	40.45	40.887
2	PILI	58.52	58.520
2	VER	86.58	86.580
2	PAL	88.25	88.250
2	SND	107.1	107.100
2	PIP	113.75	113.750
2	PIP_1		119.419
3	CAR	16.74	16.738
3	YUN	18.32	18.148
3	PRV	20.15	20.396
3	PNP_1		24.031
3	PTG	24.62	24.422
3	PTP	24.45	26.130
3	NOR	28.21	26.565
3	PNP	27.53	27.506

Figura 27. Resultados de los Caudales Unitarios Medios Mensuales Multianuales estimados para el modelo definitivo para el presente estudio.

$$QuM_{C1} \left(\frac{L}{s \cdot km^2} \right) = e^{1,379 - 0,0012 \cdot A - 522,543 \cdot Co + 1,608 \cdot Km + 0,061 \cdot Lm} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$QuM_{C2} \left(\frac{L}{s \cdot km^2} \right) = e^{2,328 - 4,62 \times 10^{-5} \cdot A - 147,263 \cdot Co + 0,388 \cdot Km + 0,052 \cdot Lm} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$QuM_{C3} \left(\frac{L}{s \cdot km^2} \right) = e^{3,742 + 1,64 \times 10^{-5} \cdot A + 63,672 \cdot Co - 0,263 \cdot Km - 0,005 \cdot Lm} \quad \text{Ecuación 19}$$

Los resultados obtenidos de los Caudales Medios Mensuales Multianuales (QM) estimados para las Cuencas Instrumentadas y No Instrumentadas (CI y CNI) mostraron una acoplación adecuada al modelo desarrollado teniendo en cuenta que, por ejemplo, para el clúster 1 aquella cuenca con mayor diferencia entre su valor observado (76,86 m³/s) y valor estimado (83,72 m³/s) fue la cuenca AGR, con una diferencia de 6,86 m³/s; este resultado a pesar de tener una magnitud considerable, puede aceptarse teniendo en cuenta la magnitud total del caudal disponible en este punto de medición de caudal. Así mismo, para el clúster 3 se observó una diferencia máxima de 21,69 m³/s para los valores observados y estimados de PTP, los cuales, superan los 300 m³/s. Estos resultados reflejan la sensibilidad que posee el modelo ante la estimación de caudales con valores de amplia magnitud, pero así mismo, la variabilidad que estos poseen con respecto a las CAMF a implementar dentro de los modelos, pues, por ejemplo, caudales de amplia magnitud como el de la cuenca PTG

perteneciente al clúster 3, tuvo una diferencia entre su valor observado versus el estimado de 1,72 m³/s, a pesar de tener una magnitud superior a los 200 m³/s.

Los Caudales Medios Mensuales Multianuales (QM) de las cuencas no instrumentadas para el clúster 1 (C1), particularmente la cuenca PIL_1, reportó un valor de 6,72 m³/s, para el clúster 2 (C2) la cuenca delimitada PIP_1 reportó un valor de 67,74 m³/s, y para el clúster 3 (C3), PNP_1 registró 160,18 m³/s; estos valores se encuentran acorde al análisis hidrológico realizado conforme a las puntos de desemboque con disponibilidad de información más cercanos aguas arriba y aguas abajo de las cuencas delimitadas. Por otro lado, los Caudales Unitarios Medios Mensuales Multianuales (QuM) estimados para PIL_1_C1 fue de 15,70 L/s.km², para PIP_1_C2 de 119,419 L/s.km², y finalmente para PNP_1_C3, de 24,03 L/s.km²; los anteriores valores fueron estimados teniendo en cuenta que el modelo desarrollado fue enfocado en estimar como variable respuesta el QuM teniendo en cuenta que este permite una comparación más equitativa entre cuencas de diferentes tamaños, y, por lo tanto, con variabilidad en sus CAMF. Utilizar el caudal unitario facilita la estandarización y comparación de los resultados, asegurando que las diferencias en los caudales no se deban únicamente a las variaciones en el tamaño de las cuencas, sino a las características hidrológicas y climáticas intrínsecas de cada una ([Chow et. al., 1994](#)) .

6.7.4. Aplicabilidad y Flexibilidad del modelo desarrollado para la estimación de caudales para cuencas no instrumentadas

Dentro de un estudio hidrológico de una cuenca hidrográfica resulta crucial contar con las CAMF y características hidroclimatológicas de la misma, pues estas permiten comprender mejor la dinámica del recurso hídrico disponible en la cuenca, facilitando la toma de decisiones informadas en la Gestión Integral de Los Recursos Hídricos ([Dourojeanni et al., 2002](#)). Dentro del presente estudio, se da la claridad que este buscó desarrollar un modelo que resultara simple a implementar desde la obtención de sus CAMF, lo cual no quiere decir que las variables evaluadas hayan sido las más óptimas para su aplicación, pues como se pudo apreciar, otras variables evaluadas para las cuencas instrumentadas reflejaron tener un mejor comportamiento desde sus métricas y correlación con la variable respuesta QuM.

No obstante, este estudio se abordó desde la flexibilidad observada que aportó la metodología desarrollada, permitiendo evaluar el comportamiento de los caudales estimados utilizando diferentes CAMF disponibles. Se obtuvieron resultados óptimos al evaluar las cuencas instrumentadas disponibles, donde, por resultados óptimos se refiere a que, por ejemplo, el modelo definitivo seleccionado arrojó métricas con un MAPE inferior al 6%, sesgado por los clústeres evaluados.

De esta forma, la metodología implementada en el presente estudio puede ser adaptada a las necesidades e información disponible del investigador, de manera que, al querer aplicarse en otras zonas hidrográficas de interés que se encuentren internamente en términos geoespaciales, dentro de las regiones hidrológicas establecidas, se pueda evaluar el comportamiento de los caudales

estimados para las cuencas no instrumentadas dentro de la Zona Andina del Departamento de Nariño, Colombia.

Finalmente, teniendo en cuenta la metodología desarrollada, para futuras líneas de investigación puede ser evaluada para la estimación de otros tipos de caudales medios haciendo referencia en términos temporales, tales como caudales para cada mes, para cada trimestre, entre otros. Esto queda como aporte para futuras líneas de investigación que deseen evaluar la metodología desarrollada en el presente estudio.

7. CONCLUSIONES

La escasez de información de aforo de caudales en el departamento de Nariño y su impacto en la gestión del recurso hídrico fue un motivo para el desarrollo de este estudio, para el cual se pretendió desarrollar una metodología para la estimación de los Caudales Medios Mensuales Multianuales basada en la regionalización de las cuencas de estudio abarcadas.

Las cuencas hidrográficas presentes dentro de la zona Andina del departamento de Nariño abarcadas presentaron una variabilidad considerable en sus características morfológicas, fisiográficas e hidroclimatológicas, de las cuales, se puede concluir que su variabilidad se ve muy influenciada por el tamaño total de su superficie, pero de manera general la mayoría de las cuencas abarcadas tienen una forma oval oblonga a rectangular oblonga, son alargadas con baja susceptibilidad a las avenidas, esto teniendo en cuenta que el drenaje en ellas es bueno, con un tiempo de concentración variable muy influenciado por el tamaño de la cuenca. Sus cauces principales son alargados y se encuentran recargados hacia una de sus vertientes. Son cuencas moderadamente montañosas con relieve poco accidentado, y en su terreno se presentan rocas débiles, escasa o nula vegetación y baja capacidad de infiltración del suelo.

La metodología integral definida para la estimación de los Caudales Medios Mensuales Multianuales de las cuencas de interés fue desarrollada con el objetivo de aplicarse en cuencas no instrumentadas incluidas en el estudio. Esto implicó tener en cuenta una serie de criterios, comenzando por definir como (i) variable respuesta el Caudal Unitario Medio Mensual Multianual (QuM). Además, fue crucial (ii) seleccionar adecuadamente las variables predictoras empleadas. Como modelo definitivo, se escogió la combinación de variables $A_Co_Km_Lm$. No obstante, los resultados de los índices de desempeño para otros modelos desarrollados mostraron que hay más combinaciones que pueden arrojar buenos resultados para la estimación de caudales.

Siguiendo con la metodología desarrollada, se vio la necesidad de (iii) desarrollar una estrategia de regionalización mediante las series temporales de los Caudales Unitarios Mensuales Multianuales (QUni). A estas series se les aplicó un (iv) Análisis de Componentes Principales (ACP) con el fin de reducir la dimensionalidad de los datos y poder implementarlos adecuadamente en la regionalización realizada empleando el (v) método de partición K-Means, el cual se utilizó debido a su efectividad reportada al trabajar con grandes volúmenes de datos y su robustez ante la separación clara entre grupos, lo cual fue un factor relevante por el cual se decidió por este método, considerando la notable variabilidad de las cuencas hidrográficas.

La regionalización permitió definir el número de regiones a trabajar y establecer a qué agrupación o clúster debía corresponder cada cuenca. Como resultado, se determinaron tres regiones hidrológicas homogéneas como el mejor modelo a aplicar. Finalmente, se aplicaron (vi) Modelos de Regresiones Potenciales Múltiples (RPMu) utilizando (vii) un total de cuatro variables.

La metodología desarrollada no solo permitió estimar los caudales basados en sus características morfológicas y fisiográficas, sino que también contribuyó a la delimitación de regiones

hidrológicamente homogéneas. Este enfoque no solo mejora la comprensión del comportamiento hidrológico regional, sino que también sienta las bases para futuras investigaciones y estrategias de gestión integral del recurso hídrico en la región.

Con los modelos desarrollados, fue posible estimar caudales para cuencas no instrumentadas es decir carentes de registros de aforos. De manera que este estudio proporcionó una aproximación a la disponibilidad hídrica dentro de las tres regiones homogéneas definidas en la zona Andina del departamento de Nariño, para lo cual fue definido como modelo definitivo el emplear una regresión múltiple potencial con la combinación de las variables $A_Co_Km_Lm$, de manera que para su implementación fueron seleccionadas una cuenca no instrumentada para cada región; los resultados obtenidos fueron para la región 1 (C1), la cuenca PIL_1 tuvo un caudal de $6,72 \text{ m}^3/\text{s}$, PIP_1 parte de la región 2 tuvo un caudal de $67,74 \text{ m}^3/\text{s}$, y PNP_1 parte de la región 3 tuvo un caudal de $160,18 \text{ m}^3/\text{s}$.

Los modelos desarrollados resultaron como un aporte importante al ser insumo para futuros estudios hidroclimatológicos y relacionados con la gestión integral del recurso hídrico de la zona de estudio, pues además, la metodología puede ser aplicada para la estimación de otros tipos de caudales, como los mensuales o trimestrales. Esto queda como aporte para futuras líneas de investigación que deseen evaluar la efectividad de la metodología desarrollada en el presente estudio.

Este resultado demostró que los criterios abarcados para la selección del modelo definitivo para la estimación de los Caudales Medios Mensuales Multianuales (QM) para las cuencas de estudio dentro de la Zona Andina del departamento de Nariño, Colombia, fueron adecuados al haber tenido en cuenta criterios como (i) las variables predictoras empleadas, (ii) la estrategia de regionalización por medio de las series temporales de los Caudales Unitarios Mensuales Multianuales (QUni) al cual fue aplicado un (iii) Análisis de Componentes Principales (ACP) el cual fue utilizado en (iv) el método de partición K-Means para determinar el número de regiones a trabajar y establecer a qué agrupación o clúster debía corresponder cada cuenca, para finalmente poder aplicar (v) los Modelos de Regresiones Potenciales Múltiples (RPMu) utilizando (vi) un total de cuatro variables. Inicialmente, se tuvo en cuenta un posible problema de multicolinealidad por la cantidad de variables a implementar y por sus características, pues desde la matriz de correlación (ver Anexo 2) se evidenció que las CAMF contaban con una alta colinealidad entre sí, sin embargo, los resultados obtenidos desde los índices de desempeño demostraron que la robustez de la metodología empleada fue adecuada para abarcar la complejidad que implica estimar variables hidroclimatológicas complejas como los caudales medios mensuales multianuales para cuencas instrumentadas y no instrumentadas, donde, para estas últimas, se debió tener en cuenta (vii) la influencia de las corrientes y aforos cercanos, aguas arriba y aguas abajo del punto de desembocadura definido para la cuenca de interés. Lo anterior, según el criterio del investigador, para que los resultados estimados fueran aproximados a la realidad de sus corrientes cercanas, convergentes a otros cauces principales de influencia en las cuencas definidas.

8. REFERENCIAS

- Amat Rodrigo, J. (2017). Clustering y heatmaps: aprendizaje no supervisado. Consultado el 25 de julio de 2022. Obtenido de [cienciadedatos.net: https://www.cienciadedatos.net/documentos/37_clustering_y_heatmaps](https://www.cienciadedatos.net/documentos/37_clustering_y_heatmaps)
- Ávila Díaz, Á. J., Carvajal Escobar, Y., & Gutiérrez Serna, S. E. (2014). Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali. *Tecnura*, 18(41). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.3.a09>
- Azarang Esfandiari, M. R., & García Dunna, E. (1996). Pruebas de bondad de ajuste. In M. MacGraw-Hill (Ed.), *Simulación y análisis de modelos estocásticos* (pp. 11-19).
- Cabral, N. (2011). Criterios técnicos de delimitación y codificación de cuencas, caso específico región oriental del Paraguay. *Secretaría del Ambiente*, 36.
- Campos-Aranda, D. F. (2016). Una aplicación hidrológica de la regresión lineal múltiple ponderada. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(4), 161-173.
- Canchala, T. (2020). Defining the Monthly Rainfall Variability in Southwestern Colombia linking their Teleconnections with Large Scale Climate Indices. [Tesis doctoral]. Universidad del Valle.
- Canchala, T., Carvajal-Escobar, Y., Alfonso-Morales, W., Cerón, W. L., & Caicedo, E. (2019). Estimation of missing data of monthly rainfall in southwestern Colombia using artificial neural networks. *Data in brief*, 26, 104517.
- Castro, L. M., & Escobar, Y. C. (2010). Análisis de tendencia y homogeneidad de series climáticas. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente* (9), 15-25.
- Ceron, W. L., Andreoli, R. V., Kayano, M. T., Canchala, T., Carvajal-Escobar, Y., & Souza, R. A. (2021). Comparison of spatial interpolation methods for annual and seasonal rainfall in two hotspots of biodiversity in South America. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 93.
- Chow, V. T., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Editorial McGraw-Hill. Santa Fe de Bogotá-Colombia.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR. (2017). Diez respuestas sobre el fenómeno de la niña y sus impactos en jurisdicción CAR. Dirección de Recursos Naturales.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC. (2018). Caudales específicos para las cuencas en el departamento del Valle del Cauca. Santiago de Cali.
- Cuadras, C. M. (2007). *Nuevos métodos de análisis multivariante*. CMC Editions.

- Decreto 1076 de 2015 [Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República de Colombia]. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. 26 de mayo de 2015.
- Departamento Nacional de Planeación - DNP. (2015). 3.181 muertos y 12,3 millones de afectados: las cifras de desastres naturales entre 2006 y 2014. Consultado el 10 de junio de 2022. Obtenido del Portal WEB DNP: <https://www.dnp.gov.co/Paginas/3-181-muertos,-21-594-emergencias-y-12,3-millones-de-afectados-las-cifras-de-los-desastres-naturales-entre-2006-y-2014-.aspx>
- Departamento Nacional de Planeación - DNP. (2020). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Consultado el 10 de junio de 2022. Obtenido del Portal WEB DNP: <https://www.dnp.gov.co/programas/ambiente/CambioClimatico/Paginas/Plan-Nacional-de-Adaptacion.aspx>
- Díaz, I., García, C., León, M., Ruiz, F., Torres, F., Lizama, P., & Boccardo, G. (2014). Guía de Asociación entre variables, Pearson y Spearman en SPSS. *Universidad de Chile FACSO*.
- Dietrichson, A. (2019). Métodos Cuantitativos. Universidad Nacional de San Martín. Argentina. Obtenido en bookdown: <https://bookdown.org/dietrichson/metodos-cuantitativos/edición.html#edición>
- Dixon, H., Sandström, S., Cudennec, C., Lins, H. F., Abrate, T., Bérod, D., Chernov, I., Ravalitera, N., Sighomnou, D. & Teichert, F. (2020). Intergovernmental cooperation for hydrometry—what, why and how? *Hydrological Sciences Journal*, 1-15.
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A., & Chávez, G. (2002). Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica.
- Euscátegui, C., & Hurtado, G. (2011). Análisis del impacto del fenómeno «La Niña» 2010-2011 en la hidroclimatología del país. IDEAM. Bogotá, Colombia.
- Frey, O., Huggel, C., & Steinemann, M. (2016). El fenómeno de El Niño y sus impactos asociados. En *Cambio Climático y Medio Ambiente: Informe Nexus N° 2*, pp. 6. Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación – COSUDE.
- Garay, D. D., & Agüero, J. N. G. (2018). Delimitación Hidrográfica y Caracterización Morfométrica de la Cuenca del Río Anzulón. Ediciones INTA.
- Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Senisterra, G., Denegri, G. A., Delgado, M. I., & Besteiro, S. I. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *Augm Domus*, 4.
- Gaviria Arbeláez, C. J. (2018). Regionalización de curvas de duración de caudales en Colombia. [Tesis de Maestría]. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.

- Gobernación de Nariño. (2012). Plan de Desarrollo Departamental 2012 – 2015 “Nariño Mejor”. Obtenido de: http://uvsalud.univalle.edu.co/pdf/procesos_de_interes/departamental/pnnarino.pdf
- Gobernación de Nariño (2016). Plan Participativo de Desarrollo Departamental “Nariño Corazón del Mundo, 2019”.
- Guerrero, O. A. (2002). Geomorfología de cuencas. Universidad de los Andes. Venezuela. Consultado el 8 de julio de 2022. Obtenido de: http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/oguerrero/4_Geomorfologia.pdf
- Gutiérrez-López, A., & Aparicio, J. (2020). Las seis reglas de la regionalización en hidrología. *Aqua-LAC*, 12(1), 81-89.
- Global Water Partnership – GWP. (2022). ¿Qué es la GIRH? ? Consultado el 10 de junio del 2022. Obtenido de: <https://www.gwp.org/es/GWP-Sud-America/ACERCA/como/Que-es-la-GIRH/>
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135-143.
- Hartigan, J. A. (1975). *Clustering algorithms*. John Wiley & Sons, Inc.
- Herrera, G. S., Gaytán, J. R. C., & González, F. M. C. (2017). Estimación de datos faltantes de precipitación por el método de regresión lineal: Caso de estudio Cuenca Guadalupe, Baja California, México. *Investigación y Ciencia: de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*(71), 34-44.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2013). Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia. Bogotá, D. C., Colombia: Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2018). Reporte de avance del estudio nacional del agua 2018. <http://www.ideam.gov.co/documents/24277/0/Cartilla+ENA+pags.pdf/41815df7-5a90-4d9e-bcb4-a590c2702087>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Universidad Nacional de Colombia - IDEAM & UNAL. (2018). La variabilidad climática y el cambio climático en Colombia.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2019). Plan de Acción Anual 2019 - IV trimestre (Consolidado de los cuatro trimestres. Informe de seguimiento final). Obtenido de: http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/transparencia-y-acceso-a-informacion-publica/presupuesto/-/document_library_display/CTJlFyd4ztKv/view/107694199

- James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R., Taylor, J. (2023). Linear Regression. In: An Introduction to Statistical Learning. Springer Texts in Statistics. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38747-0_3
- Jarque, C. M., & Bera, A. K. (1980). Efficient tests for normality, homoscedasticity and serial independence of regression residuals. *Economics letters*, 6(3), 255-259.
- Kassambara, A. (2017). Practical Guide to Principal Component Methods in R. Ed. 1. Publicado por STHDA.
- Kaufman, L., & Rousseeuw, P. J. (2009). Finding groups in data: an introduction to cluster analysis. John Wiley & Sons.
- Lauro, C., Vich, A., Moreiras, S. M., Bastidas, L., Otta, S., & Vaccarino, E. (2021). Regionalización del caudal máximo anual en cuencas del sistema hidrográfico del Río Colorado, Argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 47(2).
- Lujano Laura, A., Quispe Aragón, J. P., Lujano Laura, E., & Tapia Aguilar, B. (2017). Regionalización de caudales mensuales en la región hidrográfica del Titicaca, Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 19(2), 219-230.
- Lux, B. (2016). Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MINAMBIENTE. (2021). Gestión Integral del Recurso Hídrico. Consultado el 10 de junio de 2022. Obtenido de: <https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/>
- Montealegre, J. (2014). Actualización del componente meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Montealegre, J.E. & Pabón Caicedo, J. D. (2000). La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña-Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorología. Colombia*. 2. 7-21.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). Introduction to Linear Regression Analysis. Wiley.
- Muñoz Leiva, J. H. (2012). Contraste de Métodos Estadísticos para Estimación de Caudales Pico en una Red de Drenaje Urbano. [Tesis de maestría]. Universitat Politècnica de València. Valencia, España. <http://hdl.handle.net/10251/18047>
- Murray, A. T. (1999). Spatial analysis using clustering methods: Evaluating central point and median approaches. *Journal of Geographical Systems*, 1, 367-383.

- Olaya Ochoa, J. (2012). Métodos de regresión no paramétrica. Programa Editorial UNIVALLE.
- Organización Meteorológica Mundial - OMM. (1994). Capítulo 20: Diseño y evaluación de redes hidrológicas. Guía de prácticas hidrológicas-adquisición y proceso de datos, análisis, medición y otras aplicaciones (5 ed.).
- Pedrosa, I., Juarros-Basterretxea, J., Robles-Fernández, A., Basteiro, J., & García-Cueto, E. (2015). Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas, ¿qué estadístico utilizar? *Universitas psychologica*, 14(1), 245-254.
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 28(107), 201-222.
- Poveda, G., Vélez Upegui, J., Mesa Sánchez, O., Ceballos Bonilla, L., Zuluaga Arias, M., & Hoyos Ortiz, C. (2002). Estimación de Caudales Mínimos para Colombia mediante Regionalización y Aplicación de la curva de Recesión de Caudales. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas.
- Quevedo Tejada, D. I., Mesa Sánchez, Ó. J., Vélez Upegui, J. I., & Giraldo Osorio, J. D. (2002). Regionalización de características medias de la cuenca con aplicación en la estimación de caudales máximos. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia.
- Real Academia Española - RAE. (2022). Torrente. Definición. Consultado el 3 de agosto de 2022. Obtenido de: <https://dle.rae.es/torrente>
- Rao, A. R., & Srinivas, V. (2006). Regionalization of watersheds by hybrid-cluster analysis. *Journal of Hydrology*, 318(1-4), 37-56.
- Razavi, T., & Coulibaly, P. (2013). Streamflow prediction in ungauged basins: review of regionalization methods. *Journal of hydrologic engineering*, 18(8), 958-975.
- REGATTA. (s.f.). Instituciones clave: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Consultado el 11 de julio del 2022. Obtenido de: <https://cambioclimatico-regatta.org/index.php/es/instituciones-clave/item/instituto-de-hidrologia-meteorologia-y-estudios-ambientales-ideam>
- Restrepo, L. F., & González, J. (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(2), 183-192.
- Reyes Trujillo, A., Barroso, F. U., & Carvajal Escobar, Y. (2010). Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas. Programa Editorial UNIVALLE.
- Rocha Felices, A. (2009). La morfología fluvial y su incidencia en la estabilidad de las obras viales VII Congreso Internacional de Obras de Infraestructura Vial,

- Perú. http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/ROCHA/Morfologia_fluvial_y_su_influencia.pdf
- Sánchez, F. J. (2022). Medida de caudales. Hidrología superficial y subterránea (2 ed., pp. 440). Dpto. de Geología. Universidad de Salamanca (España). <https://hidrologia.usal.es/temas/Aforos.pdf>
- Santibáñez, J. (2019). Modelos no paramétricos y de regresión: Validación de supuestos. http://sigma.iimas.unam.mx/jsantibanez/Cursos/Ciencias/2019_1/estadistica2/notas/regresion/3_vs.pdf
- Sivapalan, M. (2003). Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology. *Hydrological processes*, 17(15), 3163-3170.
- Tibshirani, R., Walther, G., & Hastie, T. (2001). Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 63(2), 411-423.
- Torres, G. H., & Granados, G. R. S. (2019). Predicción hidrológica en cuencas no instrumentadas estado del arte. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*.
- Tranmer, M., & Elliot, M. (2008). Multiple linear regression. *The Cathie Marsh Centre for Census and Survey Research (CCSR)*, 5(5), 1-5.
- Triana Madrid, J. C. (2021). Evaluación de la sequía en el departamento de Nariño mediante el índice estandarizado de precipitación evapotranspiración(SPEI) utilizando inteligencia artificial. [Tesis de pregrado]. Universidad del Valle. <http://hdl.handle.net/10893/21520>
- Vogel, R. M., & Fennessey, N. (1994). Flow duration curves I: new interpretation and confidence intervals. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(4).
- World Bank. (2018). Assessment of the state of hydrological services in developing countries. Washington D.C.: International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank.
- World Visión. (2004). Manual de manejo de cuencas. San Salvador, El Salvador.
- Zaiontz, C., (2015). Power Regression. Real Statistics Using Excel. <https://real-statistics.com/regression/power-regression/>
- Zucarelli, G. V. (2017). Regionalización hidrológica con métodos estadísticos multivariados. [Tesis de doctorado]. Universidade da Coruña. La Coruña, España.

9. ANEXOS

Anexo 1. Características morfométricas y fisiográficas recopiladas para las cuencas de estudio

Abreviatura	QM	PpT	QuM	A	P	Lm	I	Lc	Ls	Amay	Amen	F	Kc	Ia	Ias	Emin	Emax	Em	Km	Co	Sm	Li	Dd	C	n1	Ct	S	Tc	Sin
VER	3,8	2209	86,7	43,4	29,3	8,4	9,5	9,7	8,7	32,0	11,4	0,62	1,24	0,88	2,81	1665	3552	2432	56,0	0,14	57,4	80,4	1,9	0,54	116	2,67	12,4	0,9	1,12
CEN	1,5	1182	21,6	67,6	38,7	12,0	10,0	15,1	13,1	34,7	32,9	0,47	1,32	1,20	1,05	2615	3637	3033	44,9	0,14	27,4	155,6	2,3	0,43	172	2,54	4,8	1,7	1,15
SND	16,1	2846	107,1	150,6	59,8	17,6	14,0	25,5	21,7	100,6	50,1	0,49	1,36	1,26	2,01	754	2996	1837	12,2	0,02	52,6	305,0	2,0	0,49	422	2,80	6,0	2,4	1,17
CAR	3,3	1332	16,7	198,3	91,3	27,2	17,0	38,8	33,1	126,3	71,9	0,27	1,81	1,60	1,76	2817	4756	3420	17,2	0,06	21,3	499,7	2,5	0,40	549	2,77	1,8	5,3	1,17
UNI	3,3	1194	15,7	213,3	78,4	17,0	25,0	29,5	25,1	153,6	59,6	0,74	1,50	0,68	2,58	2464	4205	2980	14,0	0,04	24,8	522,0	2,4	0,41	531	2,49	2,5	3,7	1,17
CAN	13,6	1486	40,4	335,2	89,1	24,0	19,0	33,6	28,9	198,1	137,1	0,58	1,36	1,26	1,44	1665	4178	2775	8,3	0,02	42,4	699,3	2,1	0,48	874	2,61	4,3	3,3	1,16
YUN	6,8	1659	18,3	371,7	94,3	32,4	16,0	40,6	33,8	208,7	163,0	0,35	1,37	2,03	1,28	1354	3951	2628	7,1	0,02	44,4	739,6	2,0	0,50	888	2,39	4,7	3,7	1,20
PILI	24,7	3183	58,5	421,4	110,5	33,0	20,1	41,3	38,0	307,5	113,9	0,39	1,51	1,65	2,70	1175	4031	2589	6,1	0,02	46,0	1048,1	2,5	0,40	1130	2,68	3,9	4,1	1,09
PRV	9,3	1371	20,2	459,0	119,0	35,2	25,0	60,3	48,5	238,1	220,8	0,37	1,56	1,41	1,08	1055	4221	2637	5,7	0,02	33,4	1061,9	2,3	0,43	1122	2,44	3,2	5,9	1,24
PAL	45,3	3744	88,2	513,7	137,3	40,1	20,1	51,1	46,4	345,0	168,6	0,32	1,70	2,00	2,05	937	4031	2511	4,9	0,01	45,3	1280,5	2,5	0,40	1450	2,82	3,5	5,0	1,10
PIP	125,9	4082	113,8	1106,6	171,7	45,7	31,8	58,9	52,7	924,2	182,4	0,53	1,45	1,44	5,07	693	4756	2381	2,2	0,01	46,7	2720,6	2,5	0,41	3330	3,01	3,4	5,6	1,12
PTJ	36,3	1482	27,1	1339,6	183,7	48,5	42,0	87,3	72,3	669,8	669,8	0,57	1,41	1,15	1,00	758	4138	2421	1,8	0,00	42,3	2810,0	2,1	0,48	3536	2,64	2,2	9,0	1,21
PIL	33,7	1222	23,6	1431,1	238,1	61,2	65,0	97,7	81,8	833,9	597,2	0,38	1,76	0,94	1,40	1756	4756	3150	2,2	0,01	24,0	3293,6	2,3	0,43	3745	2,62	2,4	9,5	1,19
SPE	54,9	1202	17,2	3201,1	339,8	89,4	65,0	149,2	122,2	1612,9	1588,2	0,40	1,68	1,38	1,02	728	4756	2921	0,9	0,00	30,1	7200,5	2,2	0,44	8432	2,63	1,8	14,7	1,22
AGR	76,9	1268	19,3	3992,4	392,4	110,2	62,0	176,2	144,9	2283,4	1709,0	0,33	1,74	1,78	1,34	421	4756	2762	0,7	0,00	33,9	8797,9	2,2	0,45	10498	2,63	1,8	16,8	1,22
PNP	139,4	1396	27,5	5064,8	382,4	86,6	75,0	133,3	116,5	3307,3	1757,5	0,68	1,50	1,15	1,88	498	4412	1686	0,3	0,00	37,3	11150,2	2,2	0,45	14500	2,86	1,6	14,1	1,14
PTG	215,4	1494	24,6	8749,2	531,7	124,5	160,0	182,1	160,6	6677,1	2072,2	0,56	1,59	0,78	3,22	419	4412	1821	0,2	0,00	38,3	19119,0	2,2	0,46	24302	2,78	1,5	18,3	1,13
PTP	315,2	1374	24,4	12893,8	744,7	126,4	232,0	194,3	171,8	10786,4	2107,4	0,81	1,84	0,54	5,12	362	4756	2111	0,2	0,00	37,1	28227,1	2,2	0,46	35220	2,73	1,4	19,7	1,13
NOR	368,0	1376	28,2	13047,5	756,3	123,8	232,0	185,3	165,1	11281,5	1766,0	0,85	1,85	0,53	6,39	277	4756	2099	0,2	0,00	37,3	28551,3	2,2	0,46	35642	2,73	1,4	19,3	1,12

QM (m³/s): Caudal medio mensual multianual PpT (mm): Precipitación total media multianual QuM (L/s,km²): Caudal unitario medio mensual multianual A (km²): Área total de la cuenca P (km): Perímetro de la cuenca
Lm (km): Longitud de máximo recorrido I (km): Ancho máximo Lc (km): Longitud del cauce principal Ls (km): Longitud cauce principal, medida sobre un trazado suave del cauce
Amay (km²): Área de la vertiente mayor Amen (km²): Área de la vertiente menor F: Factor de forma (adm) Kc: Coeficiente de compacidad (adm) Ia: Índice de alargamiento(adm) Ias: Índice asimétrico (adm)
Emín (m,s,n,m): Elevación mínima de la cuenca Emáx (m,s,n,m): Elevación máxima de la cuenca Em (m,s,n,m): Elevación media de la cuenca Km (m/km2): Coeficiente de masividad
Co: Coeficiente orográfico Sm (%): Pendiente media de la cuenca $\sum$ Li (km): Suma de las longitudes de los drenajes que se integran en la cuenca Dd (km/km2): Densidad de drenaje
C (km2/km): Constante de estabilidad del río n1: Número de corrientes de primer orden según el método de Horton Ct (km²): Índice de torrencialidad
S(%): Pendiente media del cauce principal (Método Taylor Schwarz) Tc(h): Tiempo de concentración (Fórmula de Kirpich a partir de S2) Sin: Sinuosidad del cauce principal (adm)

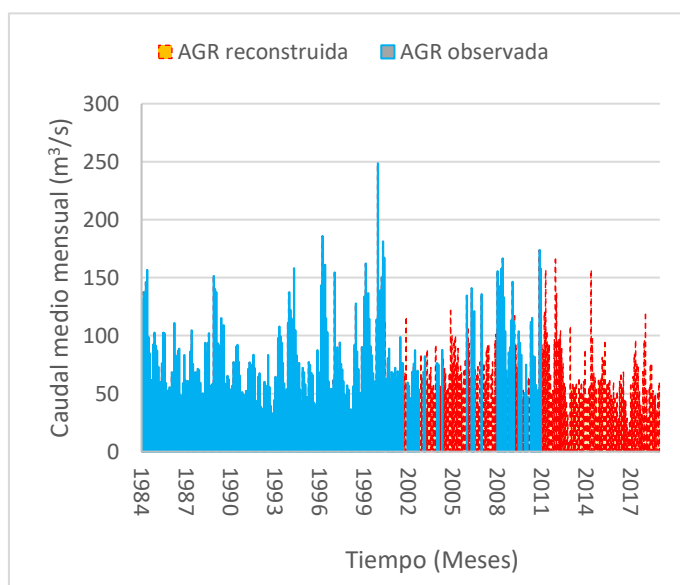
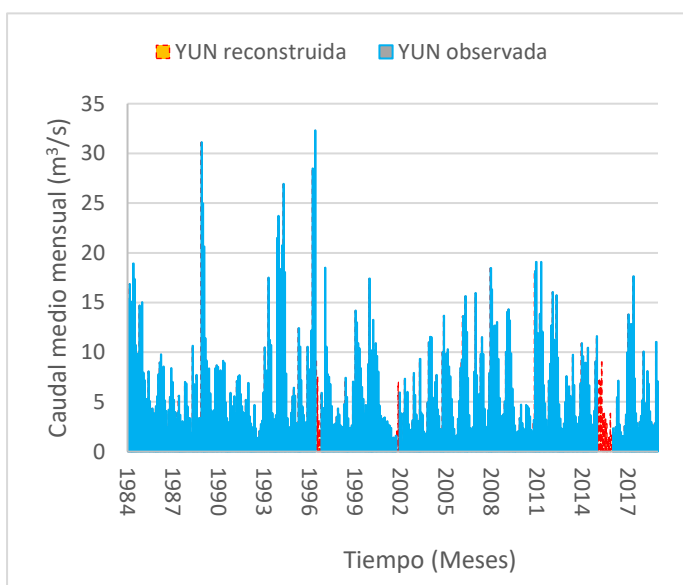
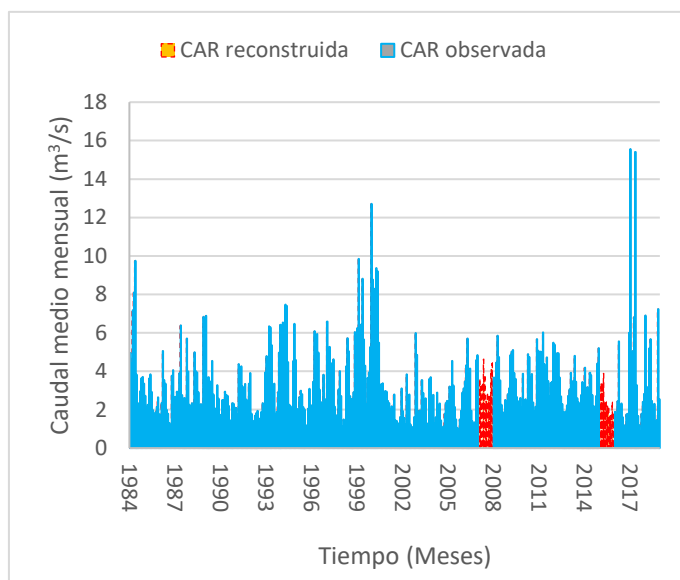
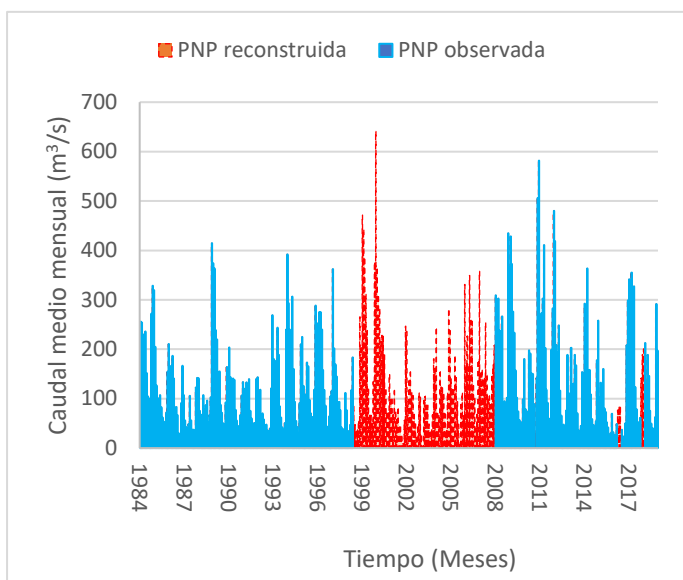
Anexo 2. Tabla resumen de correlaciones entre las características fisiográficas y las variables hidrometereológicas de caudal, precipitación, y caudal específico.

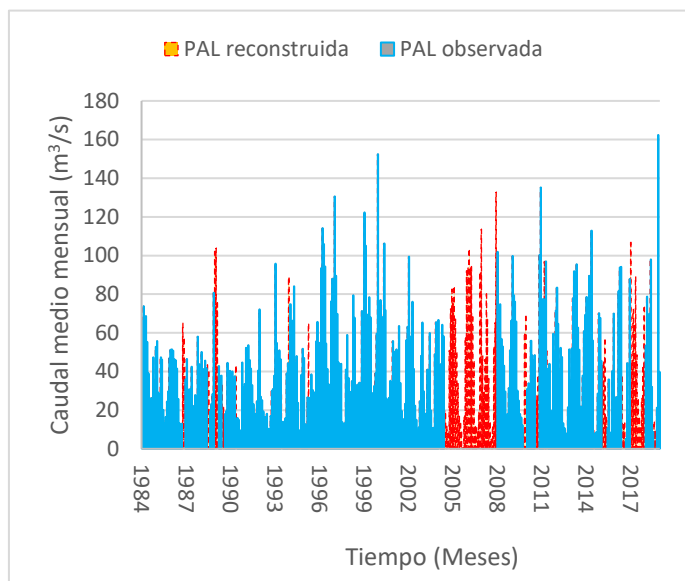
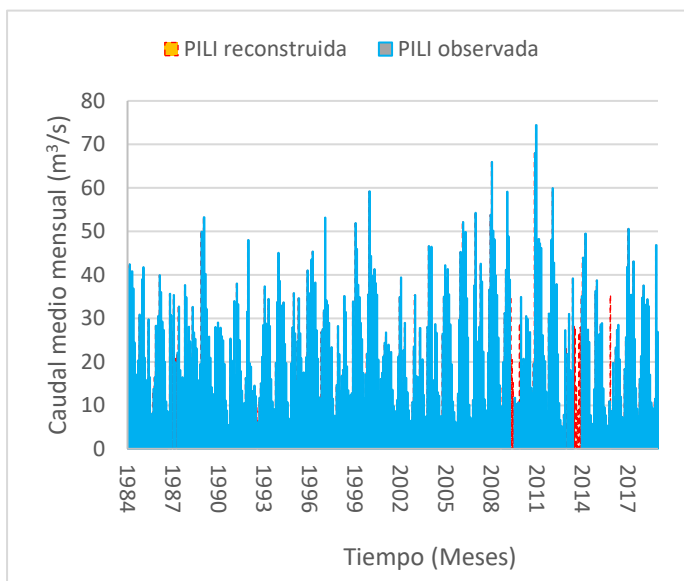
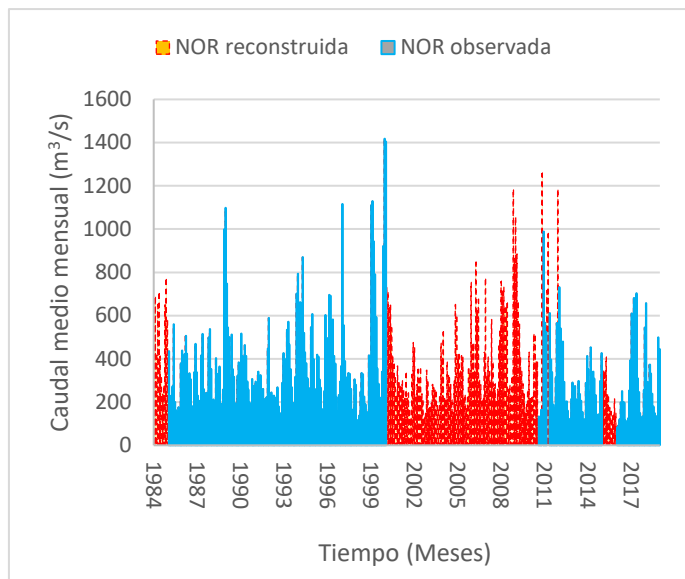
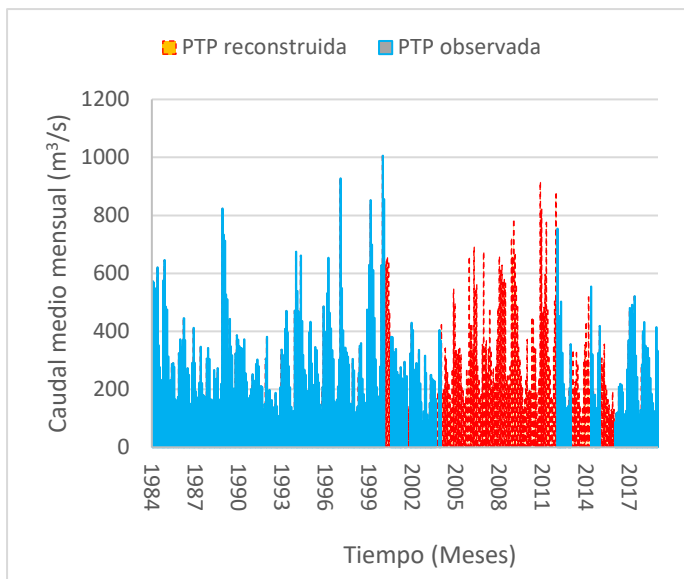
	QM	PpT	QuM	A	P	Lm	I	Lc	Ls	Amay	Amen	F	Kc	Ia	Ias	Emin	Emax	Em	Km	Co	Sm	Li	Dd	C	n1	Ct	S	Tc	Sin
QM	1,00																												
PpT	0,22	1,00																											
QuM	0,32	0,81	1,00																										
A	0,92	-0,08	-0,02	1,00																									
P	0,91	-0,09	-0,06	0,99	1,00																								
Lm	0,91	-0,08	-0,05	0,98	0,99	1,00																							
I	0,86	-0,22	-0,11	0,96	0,95	0,93	1,00																						
Lc	0,87	-0,15	-0,12	0,98	0,99	0,99	0,94	1,00																					
Ls	0,89	-0,13	-0,10	0,99	0,99	0,99	0,95	1,00	1,00																				
Amay	0,94	-0,02	0,02	0,99	0,99	0,97	0,95	0,97	0,98	1,00																			
Amen	0,88	-0,11	-0,09	0,98	0,98	0,98	0,94	0,98	0,98	0,96	1,00																		
F	0,66	-0,20	-0,04	0,63	0,54	0,35	0,63	0,34	0,37	0,66	0,41	1,00																	
Kc	0,55	-0,23	-0,38	0,59	0,67	0,68	0,62	0,68	0,68	0,58	0,57	-0,01	1,00																
Ia	-0,56	0,40	0,18	-0,58	-0,51	-0,35	-0,63	-0,36	-0,38	-0,60	-0,40	-0,84	-0,13	1,00															
Ias	0,43	0,44	0,48	0,23	0,22	0,19	0,26	0,16	0,19	0,29	0,14	0,49	0,25	-0,41	1,00														
Emin	-0,93	-0,24	-0,30	-0,82	-0,81	-0,81	-0,73	-0,79	-0,80	-0,84	-0,80	-0,35	-0,40	0,22	-0,39	1,00													
Emax	0,56	-0,38	-0,33	0,70	0,73	0,72	0,76	0,74	0,75	0,71	0,69	0,03	0,78	-0,16	0,16	-0,40	1,00												
Em	-0,58	-0,25	-0,35	-0,52	-0,47	-0,43	-0,47	-0,39	-0,42	-0,51	-0,47	-0,53	0,13	0,30	-0,45	0,76	0,21	1,00											
Km	-0,95	0,00	-0,06	-0,99	-0,98	-0,97	-0,94	-0,97	-0,97	-0,99	-0,97	-0,27	-0,63	0,26	-0,24	0,88	-0,64	0,53	1,00										
Co	-0,95	-0,01	-0,06	-0,98	-0,98	-0,97	-0,93	-0,96	-0,97	-0,98	-0,97	-0,27	-0,63	0,26	-0,24	0,89	-0,63	0,55	0,998	1,00									
Sm	0,06	-0,54	-0,20	0,18	0,12	0,08	0,16	0,11	0,10	0,17	0,21	0,35	-0,31	-0,38	-0,14	-0,11	-0,34	-0,32	0,26	0,20	1,00								
Li	0,68	-0,39	-0,34	0,85	0,84	0,83	0,86	0,86	0,85	0,81	0,89	0,33	0,58	-0,44	0,02	-0,65	0,65	-0,28	-0,83	-0,82	0,26	1,00							
Dd	-0,26	-0,93	-0,81	0,04	0,06	0,05	0,20	0,12	0,09	-0,02	0,09	-0,08	0,35	-0,26	-0,39	0,27	0,40	0,55	0,04	0,04	-0,18	0,38	1,00						
C	0,26	0,93	0,81	-0,04	-0,06	-0,05	-0,20	-0,12	-0,09	0,02	-0,09	0,08	-0,35	0,26	0,39	-0,27	-0,40	-0,55	-0,04	-0,04	0,18	-0,38	-1,00	1,00					
n1	0,67	-0,39	-0,34	0,83	0,83	0,82	0,84	0,85	0,84	0,79	0,88	0,31	0,58	-0,44	0,02	-0,64	0,66	-0,28	-0,81	-0,81	0,29	1,00	0,38	-0,38	1,00				
Ct	0,30	-0,17	-0,02	0,27	0,28	0,29	0,31	0,28	0,27	0,23	0,32	0,40	0,17	-0,55	0,15	-0,36	0,20	-0,42	-0,29	-0,30	0,53	0,52	0,27	-0,27	0,55	1,00			
S	-0,68	0,35	0,33	-0,84	-0,86	-0,84	-0,88	-0,86	-0,86	-0,82	-0,84	-0,24	-0,80	0,39	-0,22	0,58	-0,81	0,21	0,80	0,79	0,14	-0,84	-0,41	0,41	-0,84	-0,48	1,00		
Tc	0,83	-0,22	-0,20	0,96	0,98	0,98	0,94	0,99	0,99	0,94	0,96	0,14	0,80	-0,27	0,17	-0,75	0,80	-0,31	-0,94	-0,94	-0,10	0,87	0,22	-0,22	0,86	0,34	-0,92	1,00	
Sin	-0,36	-0,59	-0,53	-0,23	-0,15	-0,02	-0,22	0,06	0,01	-0,28	0,02	-0,34	0,04	0,16	-0,62	0,09	0,12	0,37	-0,18	-0,16	0,37	-0,20	0,63	-0,61	-0,21	0,54	-0,22	0,05	1,00

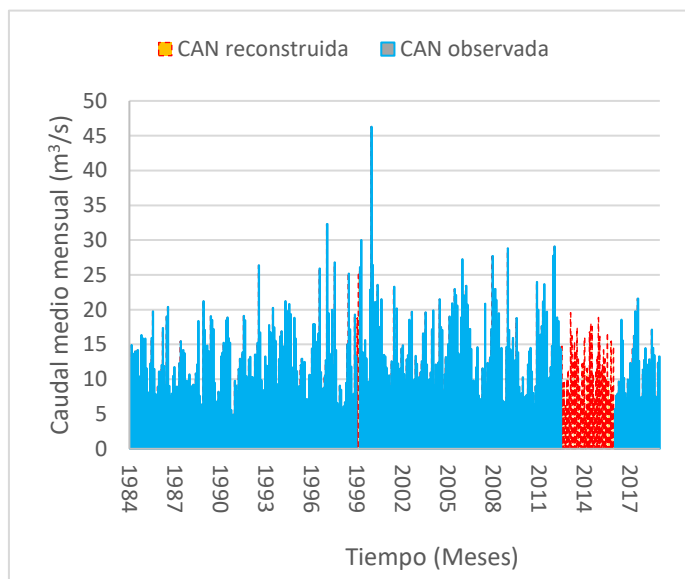
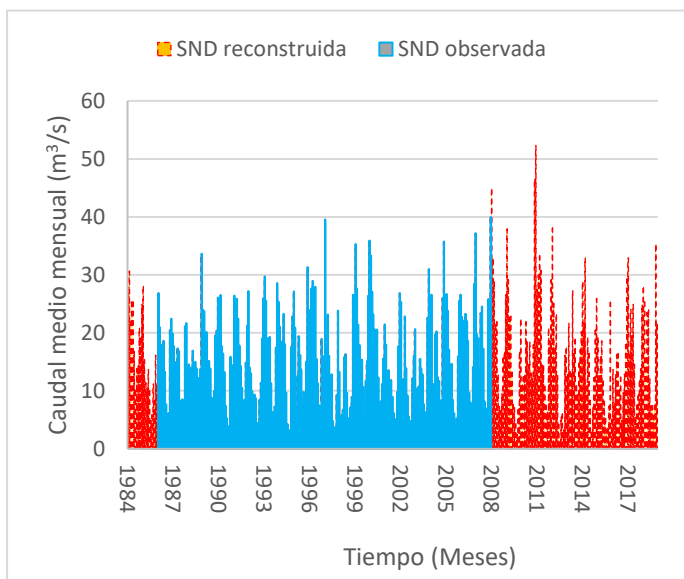
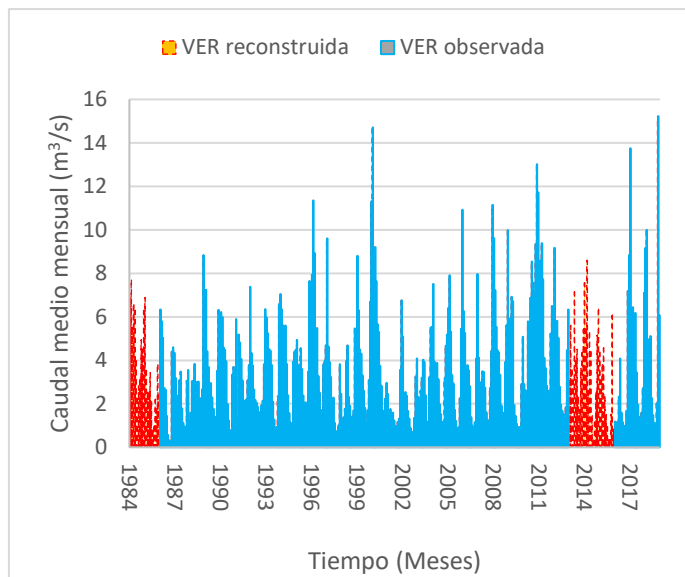
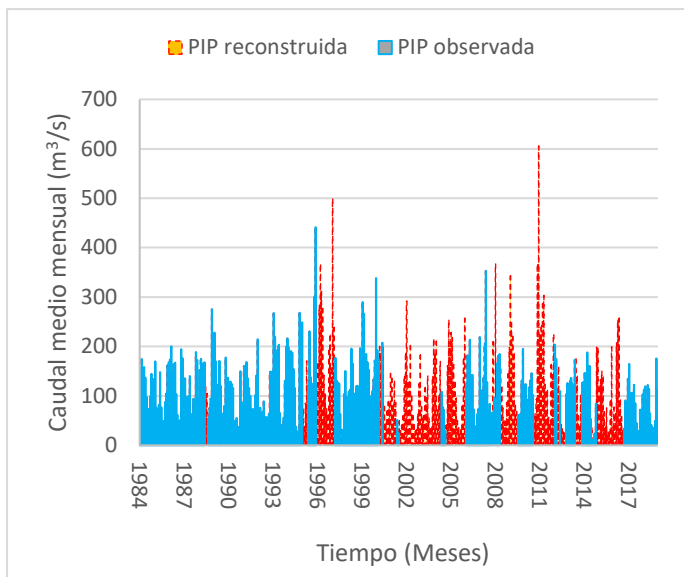
Anexo 3. Tabla de correlaciones entre estaciones medidoras de caudal.

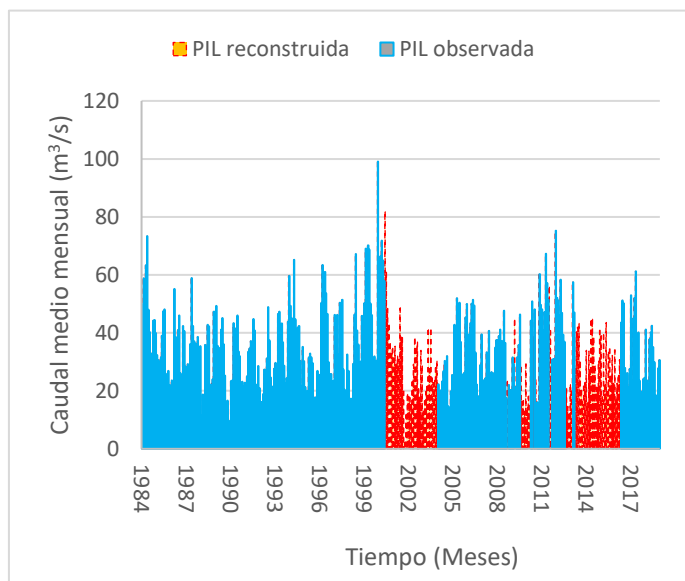
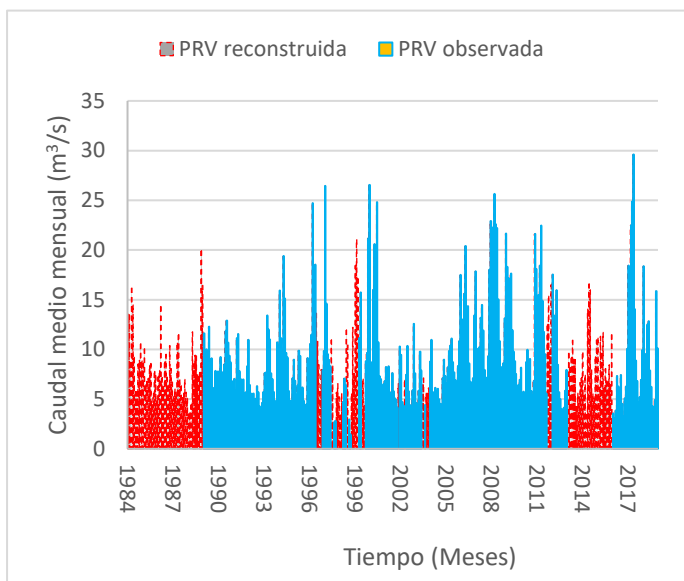
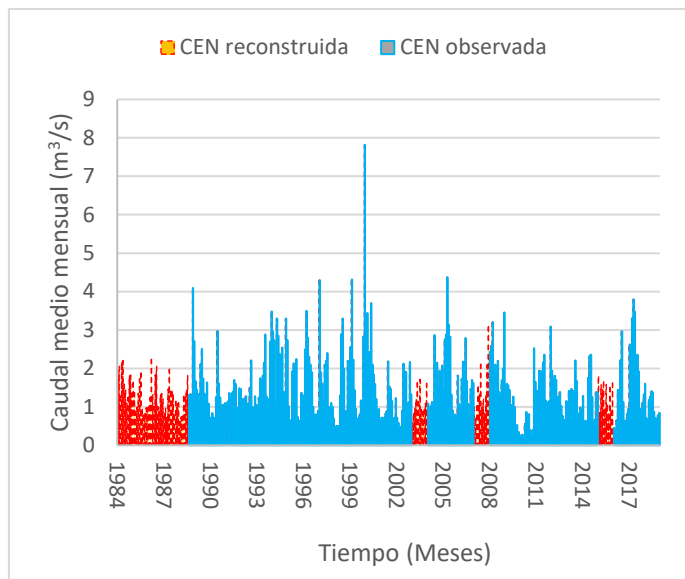
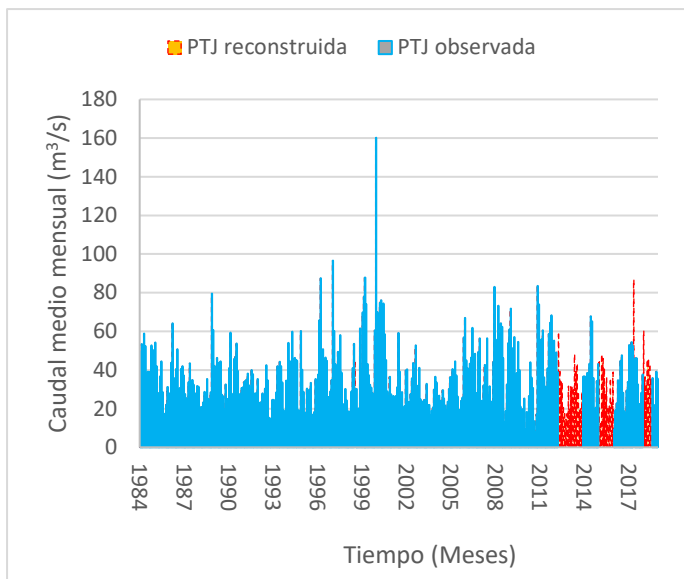
	<i>PILI</i>	<i>PAL</i>	<i>PIP</i>	<i>PNP</i>	<i>PTG</i>	<i>CAN</i>	<i>UNI</i>	<i>PTJ</i>	<i>CEN</i>	<i>PRV</i>	<i>PIL</i>	<i>AGR</i>	<i>CAR</i>	<i>SPE</i>	<i>YUN</i>	<i>VER</i>	<i>SND</i>	<i>PTP</i>	<i>NOR</i>
<i>PILI</i>	1,00																		
<i>PAL</i>	0,85	1,00																	
<i>PIP</i>	0,75	0,72	1,00																
<i>PNP</i>	0,87	0,73	0,61	1,00															
<i>PTG</i>	0,82	0,77	0,65	0,95	1,00														
<i>CAN</i>	0,38	0,36	0,18	0,50	0,60	1,00													
<i>UNI</i>	0,61	0,59	0,36	0,68	0,74	0,67	1,00												
<i>PTJ</i>	0,54	0,53	0,34	0,59	0,78	0,73	0,72	1,00											
<i>CEN</i>	0,37	0,38	0,32	0,47	0,67	0,72	0,77	0,71	1,00										
<i>PRV</i>	0,74	0,67	0,39	0,76	0,77	0,59	0,84	0,75	0,60	1,00									
<i>PIL</i>	0,45	0,46	0,31	0,46	0,63	0,71	0,65	0,69	0,65	0,59	1,00								
<i>AGR</i>	0,66	0,65	0,43	0,71	0,76	0,71	0,83	0,82	0,74	0,86	0,82	1,00							
<i>CAR</i>	0,64	0,66	0,55	0,61	0,75	0,42	0,65	0,61	0,56	0,71	0,70	0,75	1,00						
<i>SPE</i>	0,52	0,47	0,32	0,62	0,61	0,71	0,76	0,76	0,68	0,79	0,81	0,91	0,67	1,00					
<i>YUN</i>	0,76	0,65	0,57	0,77	0,76	0,41	0,62	0,57	0,52	0,74	0,56	0,74	0,66	0,61	1,00				
<i>VER</i>	0,82	0,75	0,58	0,82	0,83	0,36	0,58	0,51	0,33	0,61	0,34	0,54	0,59	0,42	0,65	1,00			
<i>SND</i>	0,89	0,80	0,74	0,78	0,76	0,22	0,50	0,45	0,34	0,61	0,29	0,49	0,58	0,33	0,69	0,85	1,00		
<i>PTP</i>	0,81	0,67	0,63	0,91	0,97	0,63	0,73	0,77	0,67	0,77	0,67	0,80	0,72	0,71	0,79	0,75	0,73	1,00	
<i>NOR</i>	0,79	0,64	0,64	0,86	0,95	0,65	0,68	0,72	0,67	0,75	0,62	0,77	0,73	0,67	0,77	0,72	0,75	0,94	1,00

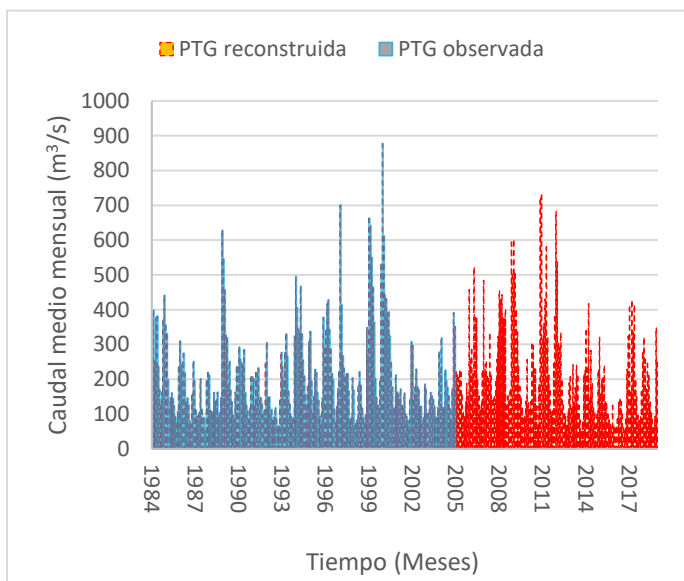
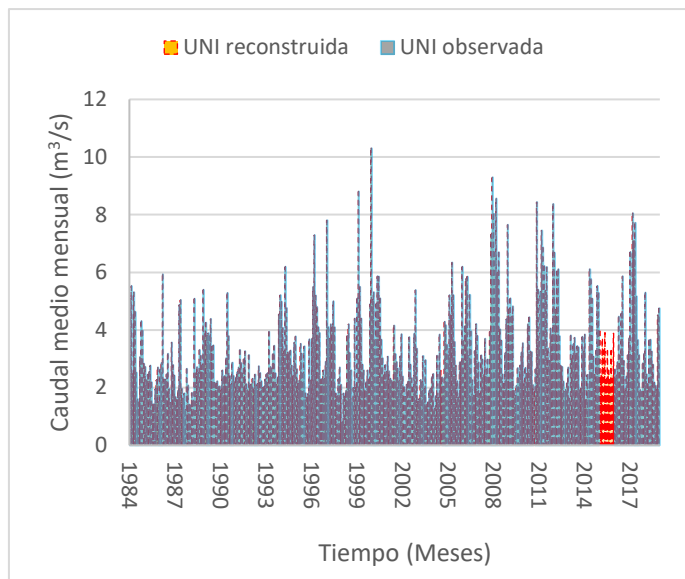
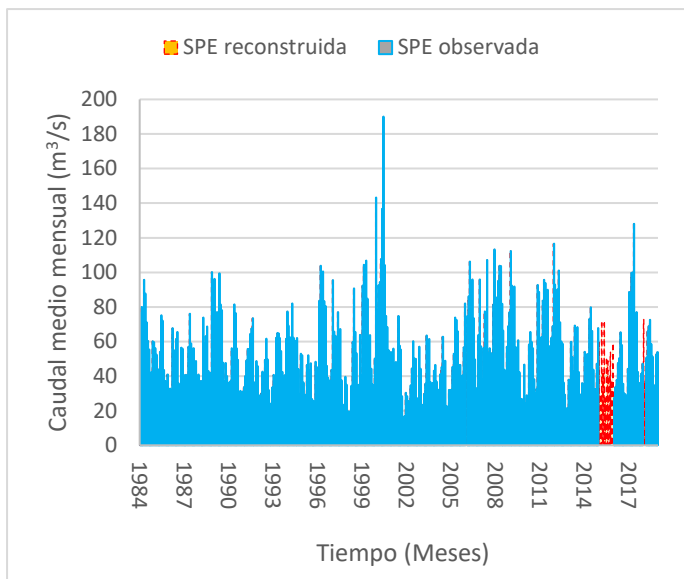
Anexo 4. Series temporales de las estaciones medidoras de caudal



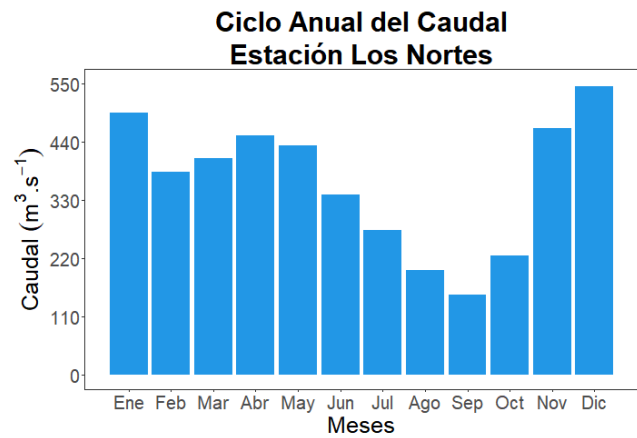
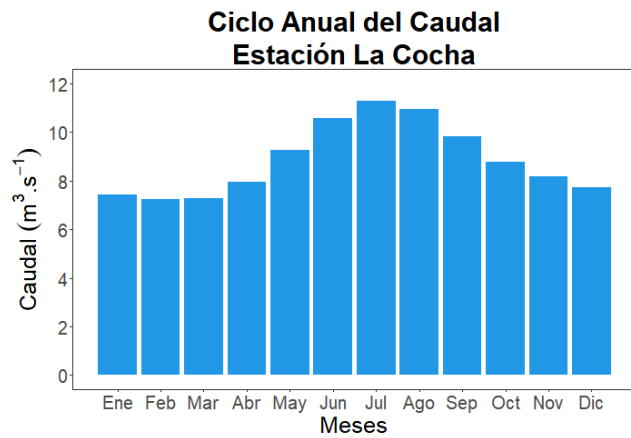
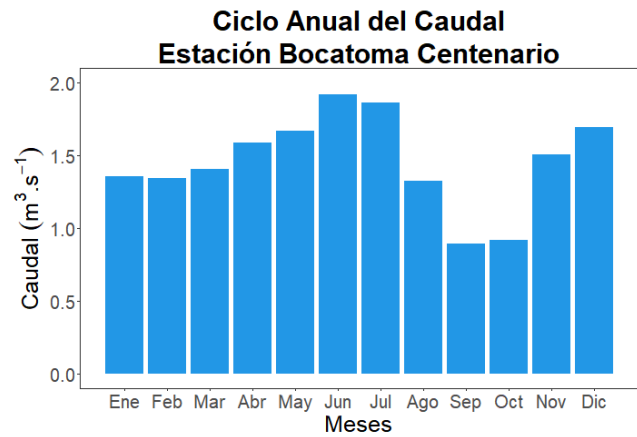
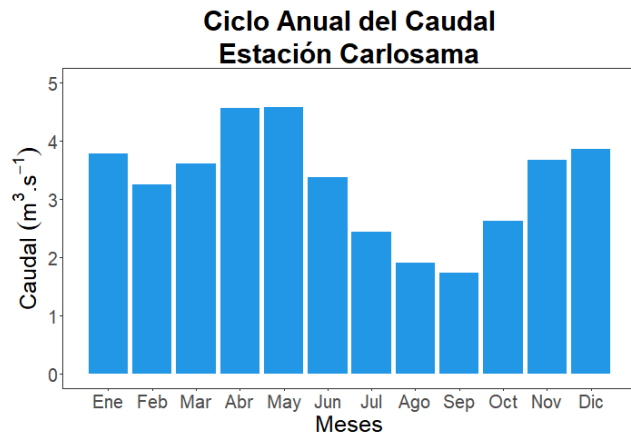
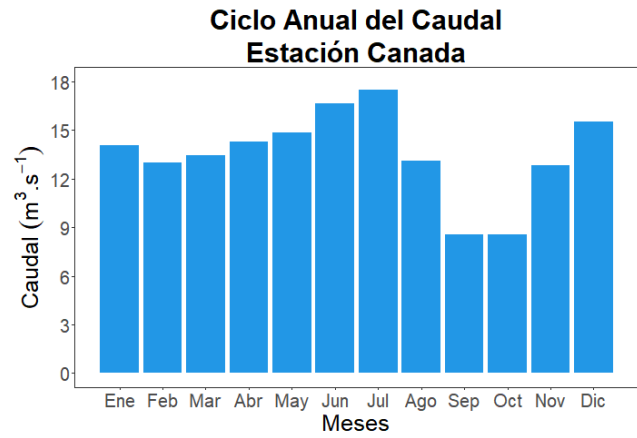
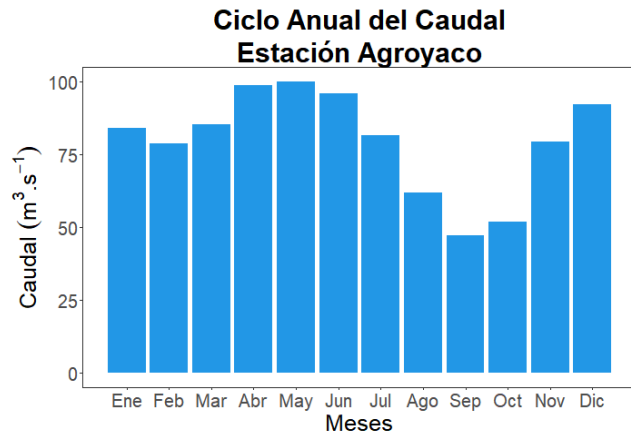


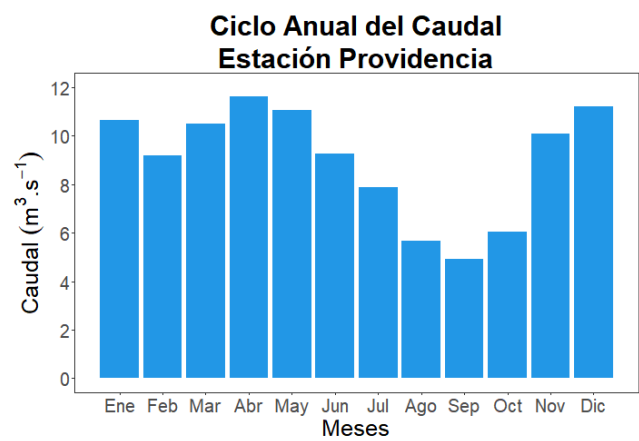
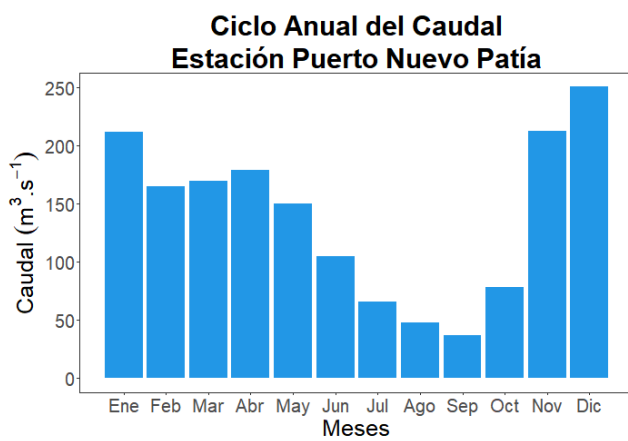
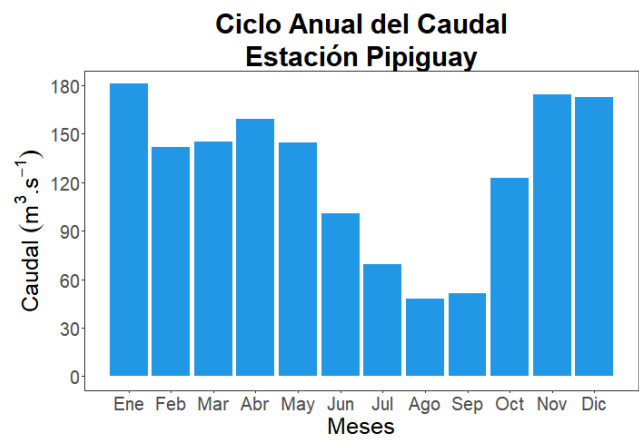
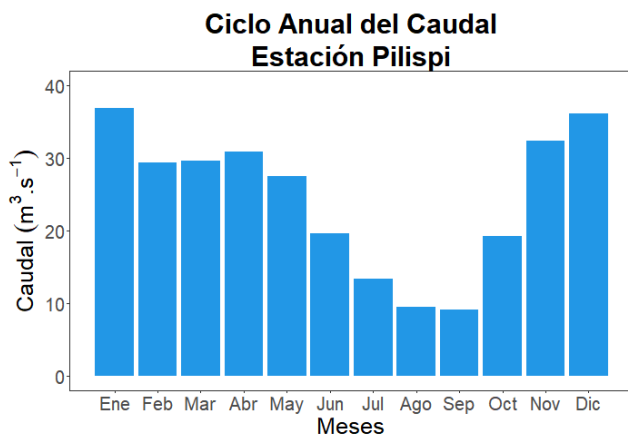
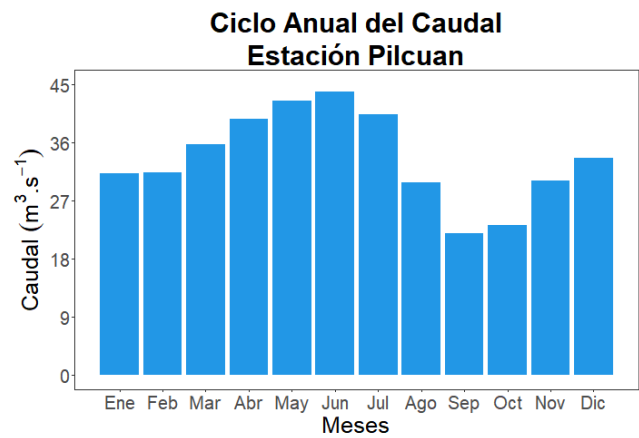
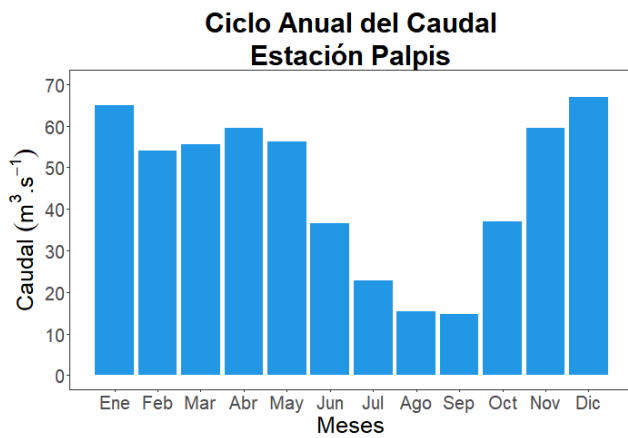




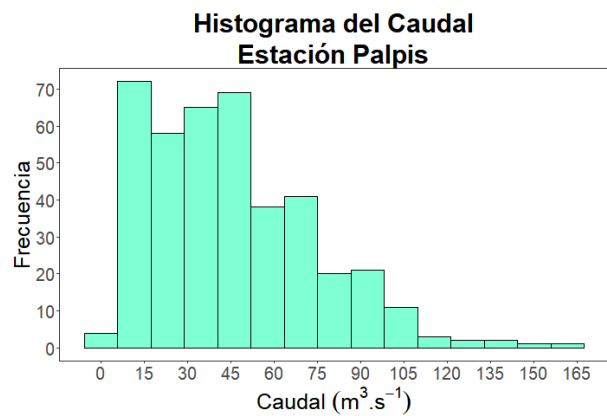
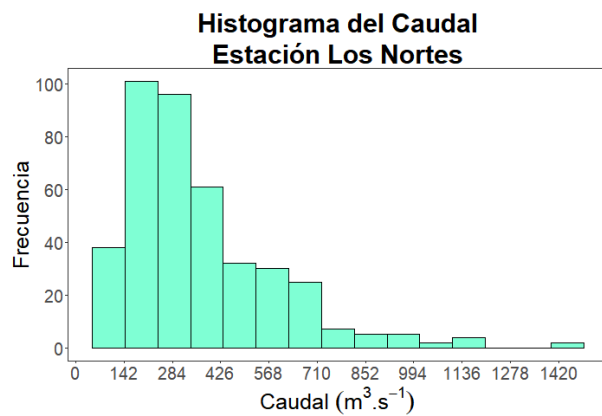
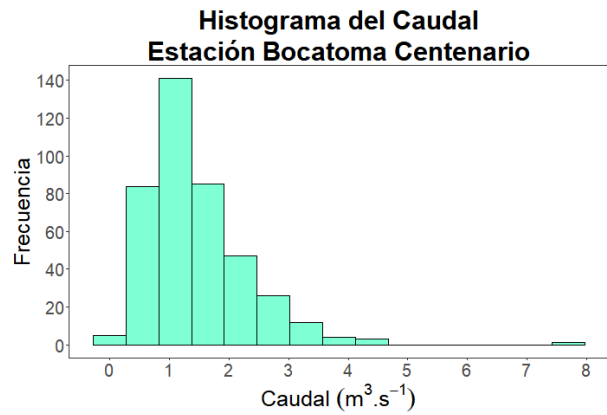
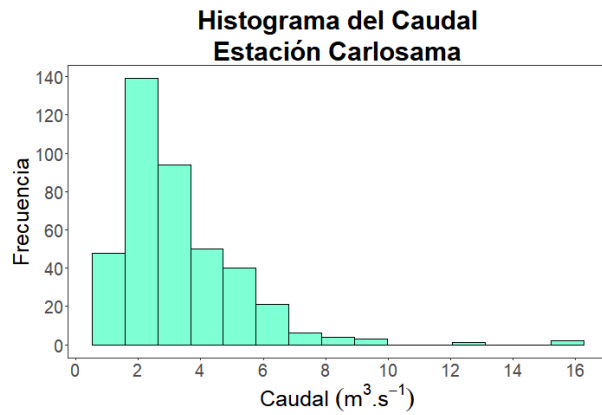
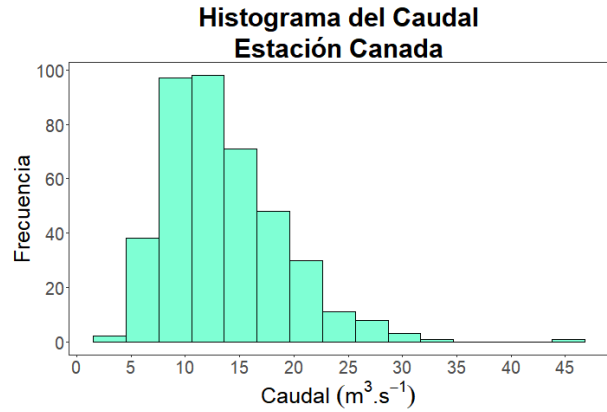
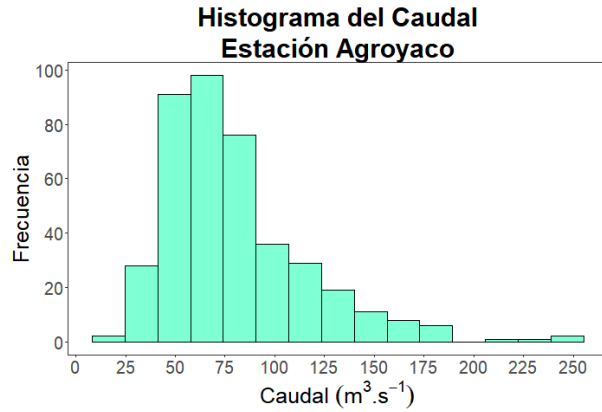


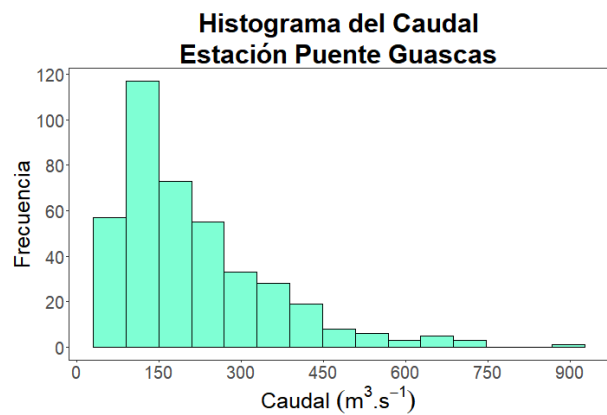
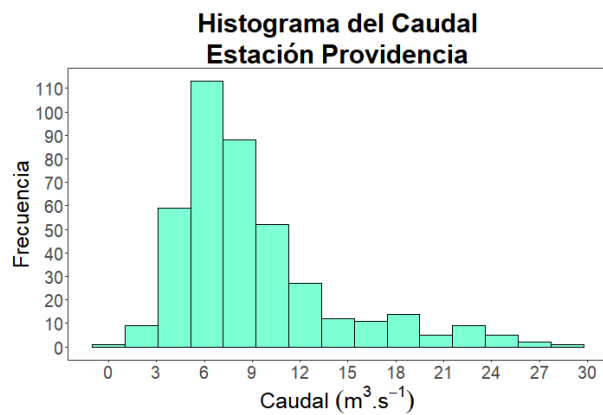
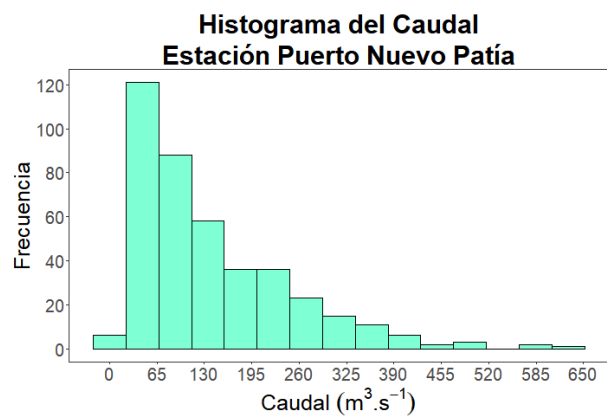
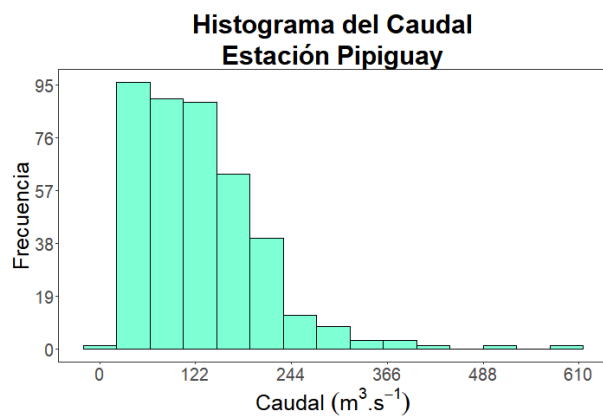
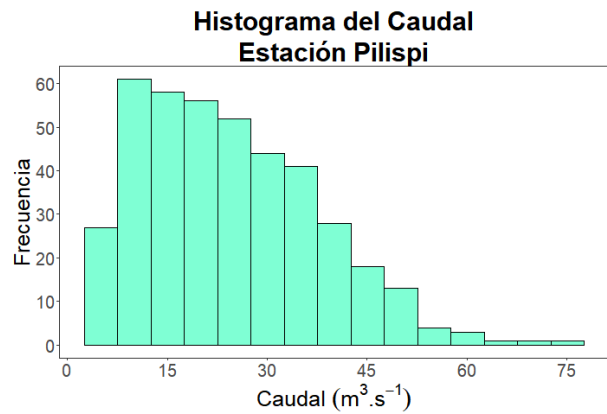
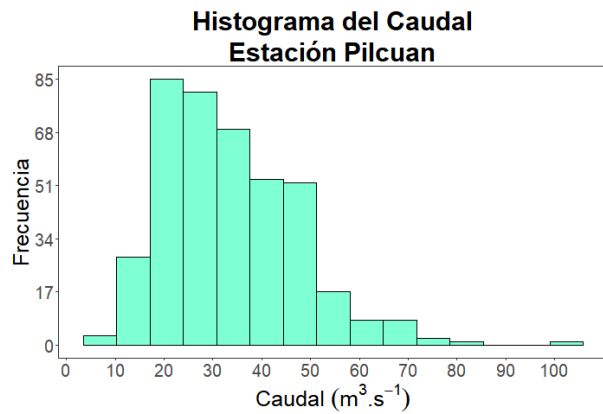
Anexo 5. Ciclo anual de las estaciones medidoras de caudal

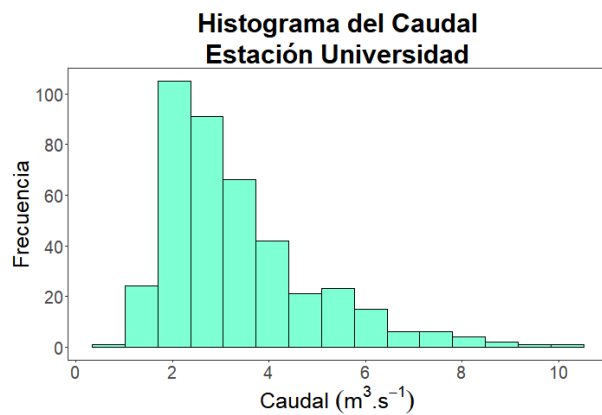
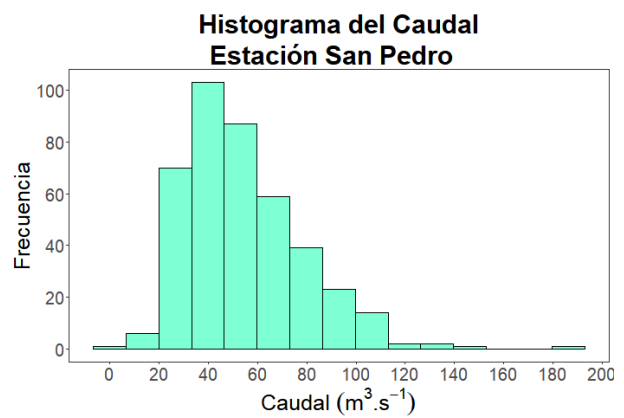
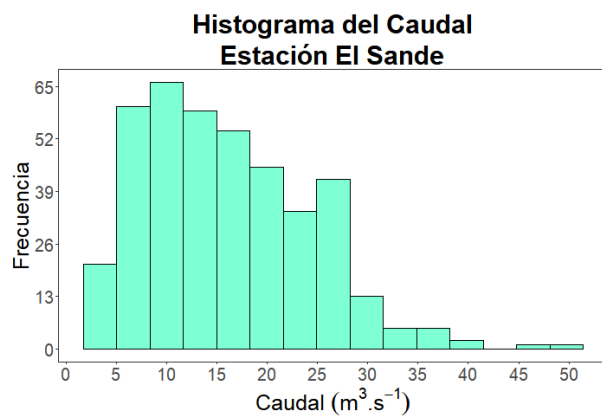
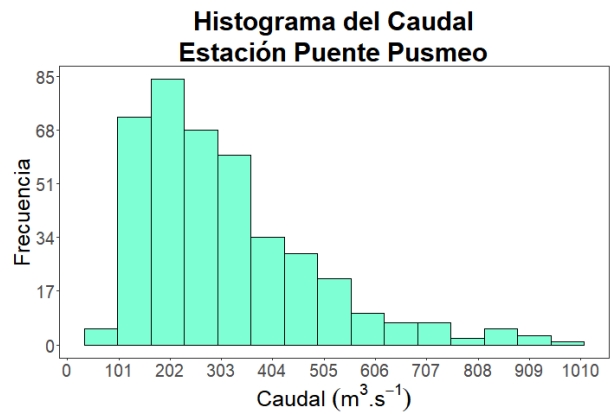
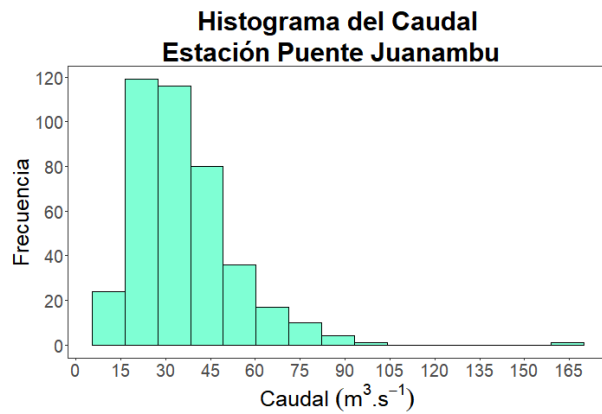


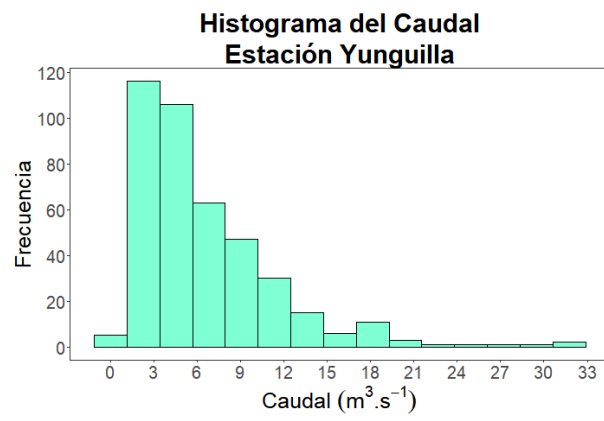


Anexo 6. Histogramas de las estaciones medidoras de caudal









Anexo 7. Detalle de los modelos evaluados de Regresión Potencial Múltiple (RPMu) con cuatro variables (4) para la regionalización con tres clústeres empleando la serie temporal de los Caudales Unitarios Medios Mensuales Multianuales (QUniK3): QUniK3RPMu4

Modelo	PROMEDIO				Cluster 1				Cluster 2				Cluster 3			
	RMSE	R2	MAPE	NSE	RMSE	R2	MAPE	NSE	RMSE	R2	MAPE	NSE	RMSE	R2	MAPE	NSE
Em_F_Km_PpT	3.803	0.998	0.758	0.998	0.151	1.000	0.195	1.000	0.002	1.000	0.003	1.000	11.257	0.994	2.077	0.994
Co_Em_F_PpT	3.833	0.998	0.777	0.998	0.152	1.000	0.221	1.000	0.002	1.000	0.003	1.000	11.344	0.994	2.106	0.994
Emin_Ia_Lc_Tc	1.467	0.999	0.936	0.999	1.449	0.997	2.031	0.997	0.002	1.000	0.003	1.000	2.950	1.000	0.775	1.000
Emin_I_Lc_Tc	1.170	1.000	0.983	1.000	0.499	1.000	2.018	1.000	0.002	1.000	0.003	1.000	3.010	1.000	0.929	1.000
Em_F_Kc_PpT	4.031	0.998	1.016	0.998	0.718	0.999	0.896	0.999	0.002	1.000	0.003	1.000	11.373	0.994	2.148	0.994
A_Co_I_Ia	3.943	0.998	1.061	0.998	0.709	0.999	0.999	0.999	0.002	1.000	0.003	1.000	11.119	0.994	2.181	0.994
Em_F_PpT_S	3.989	0.998	1.063	0.998	0.499	1.000	1.118	1.000	0.002	1.000	0.003	1.000	11.465	0.993	2.069	0.993
Em_F_Lc_P	4.170	0.997	1.106	0.997	0.218	1.000	0.492	1.000	0.002	1.000	0.003	1.000	12.289	0.993	2.823	0.993
A_I_Ia_Km	4.017	0.998	1.113	0.998	0.736	0.999	1.033	0.999	0.002	1.000	0.003	1.000	11.313	0.994	2.305	0.994
Amen_PpT_S_Sm	2.074	1.000	1.139	0.999	0.707	0.999	1.411	0.999	0.002	1.000	0.003	1.000	5.512	0.999	2.003	0.998
Em_F_PpT_Tc	3.881	0.998	1.145	0.998	0.530	1.000	1.213	1.000	0.002	1.000	0.003	1.000	11.110	0.994	2.221	0.994
F_Ls_P_PpT	4.237	0.997	1.160	0.997	0.505	1.000	0.661	1.000	0.002	1.000	0.003	1.000	12.204	0.993	2.816	0.993
Em_F_PpT_Sin	4.179	0.997	1.179	0.997	1.075	0.999	1.447	0.998	0.002	1.000	0.003	1.000	11.460	0.993	2.086	0.993
Em_F_Ls_PpT	3.847	0.998	1.182	0.998	0.607	1.000	1.302	0.999	0.002	1.000	0.003	1.000	10.932	0.994	2.242	0.994
Em_F_P_PpT	3.903	0.998	1.198	0.998	0.637	0.999	1.408	0.999	0.002	1.000	0.003	1.000	11.069	0.994	2.183	0.994
F_Lc_P_PpT	4.353	0.997	1.204	0.997	0.446	1.000	0.965	1.000	0.002	1.000	0.003	1.000	12.610	0.992	2.645	0.992
Em_F_Lc_PpT	3.825	0.998	1.209	0.998	0.619	1.000	1.363	0.999	0.002	1.000	0.003	1.000	10.853	0.994	2.261	0.994
Em_F_I_PpT	3.974	0.998	1.234	0.998	0.883	0.999	1.540	0.999	0.002	1.000	0.003	1.000	11.036	0.994	2.160	0.994
A_Emin_P_Sin	3.688	0.998	1.284	0.998	1.273	0.998	1.848	0.998	0.002	1.000	0.003	1.000	9.790	0.995	2.001	0.995
Co_I_Ia_P	3.920	0.998	1.292	0.998	0.907	0.999	1.952	0.999	0.002	1.000	0.003	1.000	10.852	0.994	1.922	0.994
I_Ia_Km_P	3.961	0.998	1.307	0.998	0.892	0.999	1.926	0.999	0.002	1.000	0.003	1.000	10.989	0.994	1.993	0.994
Emin_Lc_Sin_Tc	1.286	0.999	1.312	0.999	0.864	0.999	3.226	0.999	0.002	1.000	0.003	1.000	2.992	1.000	0.709	1.000
Em_F_Lm_PpT	4.011	0.998	1.330	0.998	0.894	0.999	1.798	0.999	0.002	1.000	0.003	1.000	11.136	0.994	2.191	0.994
Co_Km_PpT_S	4.878	0.997	1.368	0.997	0.440	1.000	0.829	1.000	0.002	1.000	0.003	1.000	14.191	0.990	3.273	0.990
I_PpT_S_Sm	4.240	0.997	1.374	0.997	0.783	0.999	1.959	0.999	0.002	1.000	0.003	1.000	11.936	0.993	2.161	0.993
A_F_Km_P	3.979	0.998	1.382	0.998	0.777	0.999	1.639	0.999	0.002	1.000	0.003	1.000	11.158	0.994	2.504	0.994
P_PpT_S_Sm	4.526	0.997	1.426	0.997	1.425	0.997	1.787	0.997	0.002	1.000	0.003	1.000	12.152	0.993	2.487	0.993
Emin_Ls_Sin_Tc	2.042	0.998	1.426	0.998	1.797	0.996	3.272	0.995	0.002	1.000	0.003	1.000	4.328	0.999	1.003	0.999
A_Co_F_P	4.000	0.998	1.437	0.998	0.811	0.999	1.708	0.999	0.002	1.000	0.003	1.000	11.185	0.994	2.600	0.994
Em_Emin_F_PpT	4.145	0.997	1.437	0.997	0.970	0.999	2.284	0.999	0.002	1.000	0.003	1.000	11.464	0.993	2.026	0.993

Modelo	Cluster 1					Cluster 2					Cluster 3				
	Intercept	X1	X2	X3	X4	Intercept	X1	X2	X3	X4	Intercept	X1	X2	X3	X4
Em_F_Km_PpT	-4.438	0.001	-0.531	0.005	0.004	4.531	-0.001	-0.153	0.018	0.001	3.894	0.000	0.378	0.004	0.000
Co_Em_F_PpT	-4.456	1.765	0.001	-0.526	0.004	4.762	7.203	-0.001	-0.176	0.001	3.882	0.826	0.000	0.361	0.000
Emin_Ia_Lc_Tc	6.122	-0.001	-0.636	0.084	-0.985	3.644	0.000	0.536	0.440	-4.562	3.262	0.000	0.045	-0.019	0.193
Emin_I_Lc_Tc	5.124	-0.001	0.012	0.053	-0.714	4.321	0.000	-0.035	0.411	-4.040	3.334	0.000	0.000	-0.018	0.184
Em_F_Kc_PpT	-3.107	0.001	-0.745	-0.544	0.003	-1.731	-0.001	5.471	3.927	0.000	3.984	0.000	0.396	-0.066	0.000
A_Co_I_Ia	1.591	-0.001	-5.002	0.014	1.721	10.084	0.007	-12.581	-0.371	-0.771	3.485	0.000	-3.630	-0.008	-0.213
Em_F_PpT_S	-3.015	0.001	-0.494	0.003	0.075	3.791	-0.001	-0.294	0.001	0.113	3.886	0.000	0.340	0.000	0.000
Em_F_Lc_P	11.709	-0.002	-2.511	-0.096	0.041	15.768	-0.003	-8.123	-0.433	0.146	2.563	0.000	1.137	0.003	-0.001
A_I_Ia_Km	1.601	-0.001	0.014	1.727	-0.016	10.931	0.008	-0.412	-0.936	-0.037	3.471	0.000	-0.007	-0.194	-0.014
Amen_PpT_S_Sm	-3.252	0.000	0.006	0.271	-0.076	-11.001	0.039	-0.003	-0.415	0.459	3.159	0.000	-0.001	-0.366	0.063
Em_F_PpT_Tc	-2.108	0.001	-1.001	0.003	-0.023	1.391	0.000	0.215	0.002	-0.622	3.947	0.000	0.404	0.000	-0.003
F_Ls_P_PpT	0.763	-1.399	0.000	0.010	0.003	0.559	0.540	0.000	-0.003	0.002	2.532	1.245	0.000	-0.001	0.000
Em_F_PpT_Sin	2.104	0.001	-0.735	0.003	-3.904	-52.495	0.004	-0.314	0.000	42.173	3.971	0.000	0.330	0.000	-0.062
Em_F_Ls_PpT	-2.233	0.001	-1.050	0.000	0.003	0.824	0.000	0.366	0.000	0.002	3.937	0.000	0.420	0.000	0.000
Em_F_P_PpT	-2.526	0.001	-1.014	-0.001	0.003	-1.818	0.000	2.103	-0.027	0.002	3.830	0.000	0.475	0.000	0.000
F_Lc_P_PpT	0.805	-1.365	-0.023	0.009	0.002	-0.158	1.137	-0.041	-0.011	0.002	2.510	1.226	0.004	-0.001	0.000
Em_F_Lc_PpT	-2.200	0.001	-1.049	-0.002	0.003	0.947	0.000	0.495	-0.068	0.002	3.950	0.000	0.424	0.000	0.000
Em_F_I_PpT	-3.442	0.001	-0.820	-0.004	0.003	1.919	0.000	2.881	-0.063	0.001	3.802	0.000	0.459	0.000	0.000
A_Emin_P_Sin	32.299	-0.001	-0.001	0.007	-23.883	-33.320	-0.001	0.002	0.025	29.817	3.871	0.000	0.000	0.005	-0.977
Co_I_Ia_P	1.629	-6.353	0.037	1.989	-0.012	12.940	-15.088	-0.457	-4.973	0.079	3.140	-3.278	-0.005	-0.133	0.002
I_Ia_Km_P	1.642	0.037	1.998	-0.020	-0.012	14.293	-0.516	-5.643	-0.045	0.088	3.145	-0.005	-0.120	-0.012	0.002
Emin_Lc_Sin_Tc	-23.577	0.000	0.107	24.676	-1.318	-64.147	0.005	-0.142	53.689	2.517	3.792	0.000	-0.019	-0.341	0.181
Em_F_Lm_PpT	-2.390	0.001	-1.076	-0.004	0.003	-0.055	0.000	0.582	-0.090	0.002	3.912	0.000	0.401	0.000	0.000
Co_Km_PpT_S	0.145	182.720	-0.572	0.002	0.336	1.527	-77.593	0.196	0.001	0.078	3.930	70.569	-0.273	-0.001	0.117
I_PpT_S_Sm	-1.144	0.009	0.003	0.253	-0.018	-4.347	-0.019	0.001	-0.063	0.137	3.649	-0.001	-0.001	-0.140	0.036
A_F_Km_P	8.363	0.001	-4.803	-0.053	-0.019	-25.993	-0.029	45.493	-0.052	0.227	2.583	0.000	-0.013	-0.011	0.005
P_PpT_S_Sm	-2.129	0.002	0.004	0.248	-0.047	-3.232	-0.009	0.001	-0.021	0.095	3.697	0.000	-0.001	-0.150	0.038
Emin_Ls_Sin_Tc	-12.866	0.000	0.000	15.281	-0.980	-65.650	0.005	0.000	54.190	3.847	4.966	0.000	0.000	-1.373	0.167
A_Co_F_P	8.200	0.001	-16.653	-4.711	-0.019	-22.295	-0.025	-17.291	39.596	0.200	2.538	0.000	-2.915	-0.065	0.006
Em_Emin_F_PpT	-2.662	0.001	0.000	-1.021	0.003	3.766	-0.003	0.003	0.140	0.002	3.883	0.000	0.000	0.357	0.000

Anexo 7. Detalle de los modelos evaluados de Regresión Potencial Múltiple (RPMu) con cuatro variables (4) para la regionalización con tres clústeres empleando la serie temporal de los Caudales Unitarios Medios Mensuales Multianuales (QUniK3)

Cluster	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
Modelo	UNI	SPE	AGR	CEN	PIL	PTJ	CAN	PILI	VER	PAL	SND	PIP	CAR	YUN	PRV	PTP	PTG	PNP	NOR
QM	3.350	54.910	76.860	1.460	33.710	36.300	13.560	24.660	3.760	45.330	16.130	125.880	3.320	6.810	9.250	315.220	215.400	139.410	368.040
Em_F_Km_PpT	3.355	54.606	77.114	1.460	33.763	36.309	13.544	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.332	6.807	9.147	336.583	216.109	139.021	347.303
Co_Em_F_PpT	3.355	54.586	77.083	1.460	33.788	36.332	13.537	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.328	6.803	9.166	336.896	216.390	138.649	347.319
Emin_Ia_Lc_Tc	3.400	52.190	79.431	1.462	33.751	37.080	13.282	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.318	6.830	9.225	321.651	211.728	139.971	365.643
Emin_I_Lc_Tc	3.270	54.377	76.642	1.511	33.959	37.366	13.105	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.321	6.753	9.331	321.217	212.890	140.069	363.491
Em_F_Kc_PpT	3.336	56.402	75.707	1.453	33.493	36.270	13.618	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.298	6.825	9.294	337.351	214.143	138.658	347.707
A_Co_I_Ia	3.378	53.696	78.206	1.456	34.023	35.936	13.556	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.329	6.810	9.145	332.991	218.596	140.024	344.825
Em_F_PpT_S	3.363	55.447	77.751	1.450	33.172	35.719	13.750	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.308	6.806	9.256	337.577	216.009	137.947	347.601
Em_F_Lc_P	3.349	55.223	77.069	1.464	33.357	36.058	13.640	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.298	6.972	9.112	338.950	212.202	139.731	346.047
A_I_Ia_Km	3.379	53.645	78.257	1.457	34.034	35.936	13.552	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.334	6.809	9.122	332.879	219.365	139.966	344.207
Amen_PpT_S_Sm	3.325	53.634	78.071	1.481	33.836	36.869	13.311	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.343	6.879	9.109	323.574	212.206	133.949	378.179
Em_F_PpT_Tc	3.354	54.180	76.282	1.454	34.504	36.944	13.324	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.292	6.838	9.317	336.729	212.882	139.190	348.163
F_Ls_P_PpT	3.337	55.582	75.745	1.459	33.832	36.563	13.503	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.348	6.866	9.079	338.492	211.561	140.880	346.037
Em_F_PpT_Sin	3.395	53.620	79.347	1.442	33.665	35.818	13.633	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.313	6.803	9.231	337.470	216.351	138.004	347.513
Em_F_Ls_PpT	3.350	54.453	75.851	1.453	34.563	37.045	13.303	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.292	6.846	9.312	336.197	212.197	139.668	348.387
Em_F_P_PpT	3.351	54.359	75.872	1.452	34.638	37.087	13.284	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.297	6.843	9.291	336.429	212.538	139.663	348.050
F_Lc_P_PpT	3.351	54.561	76.122	1.453	34.370	36.807	13.382	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.330	6.867	9.154	339.642	211.301	140.273	345.700
Em_F_Lc_PpT	3.351	54.373	75.894	1.452	34.607	37.065	13.292	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.293	6.849	9.309	335.967	211.957	139.849	348.493
Em_F_I_PpT	3.384	54.801	78.969	1.441	33.164	35.492	13.784	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.302	6.844	9.267	336.203	212.431	139.974	347.961
A_Emin_P_Sin	3.427	52.566	79.247	1.441	33.769	36.650	13.445	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.311	6.855	9.178	332.941	213.918	140.630	349.248
Co_I_Ia_P	3.322	55.651	75.698	1.469	32.992	38.103	13.252	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.324	6.801	9.210	334.537	214.927	140.323	346.824
I_Ia_Km_P	3.322	55.588	75.751	1.469	33.003	38.113	13.248	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.328	6.802	9.183	334.326	215.791	140.333	346.149
Emin_Lc_Sin_Tc	3.240	53.702	77.396	1.549	33.731	38.001	12.805	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.317	6.832	9.235	321.813	211.103	139.532	367.188
Em_F_Lm_PpT	3.348	54.766	75.131	1.444	34.891	37.336	13.215	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.294	6.839	9.307	336.726	212.883	139.285	348.061
Co_Km_PpT_S	3.309	55.927	77.161	1.465	33.248	36.190	13.600	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.317	6.793	9.312	345.399	218.798	132.364	347.119
I_PpT_S_Sm	3.292	55.024	75.403	1.497	33.834	37.698	13.134	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.309	6.786	9.294	335.527	217.259	139.237	343.928
A_F_Km_P	3.392	55.964	76.673	1.450	33.768	34.579	13.895	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.309	6.758	9.425	337.518	210.886	139.047	349.231
P_PpT_S_Sm	3.367	52.510	79.741	1.477	33.651	36.630	13.339	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.304	6.772	9.335	335.948	218.483	138.269	343.685
Emin_Ls_Sin_Tc	3.348	51.558	79.666	1.504	33.789	38.037	12.877	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.318	6.810	9.224	322.630	213.574	141.068	359.666
A_Co_F_P	3.393	56.027	76.646	1.450	33.769	34.514	13.906	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.311	6.746	9.450	337.775	210.520	138.878	349.524
Em_Emin_F_PpT	3.388	53.002	77.412	1.434	35.090	37.080	13.205	24.659	3.760	45.330	16.131	125.875	3.319	6.807	9.206	337.309	216.007	138.459	347.286

Anexo 7. Detalle de los modelos evaluados de Regresión Potencial Múltiple (RPMu) con cuatro variables (4) para la regionalización con tres clústeres empleando la serie temporal de los Caudales Unitarios Medios Mensuales Multianuales (QUniK3)

Cluster	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
Modelo	UNI	SPE	AGR	CEN	PIL	PTJ	CAN	PILI	VER	PAL	SND	PIP	CAR	YUN	PRV	PTP	PTG	PNP	NOR
QuM	15.710	17.150	19.250	21.600	23.550	27.100	40.450	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.740	18.320	20.150	24.450	24.620	27.530	28.210
Em_F_Km_PpT	15.731	17.059	19.315	21.594	23.592	27.104	40.408	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.804	18.312	19.929	26.104	24.700	27.448	26.618
Co_Em_F_PpT	15.730	17.052	19.307	21.596	23.609	27.121	40.385	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.783	18.303	19.972	26.129	24.732	27.375	26.620
Emin_Ia_Lc_Tc	15.939	16.304	19.895	21.625	23.584	27.679	39.626	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.731	18.373	20.101	24.946	24.200	27.636	28.024
Emin_I_Lc_Tc	15.334	16.987	19.197	22.350	23.729	27.893	39.098	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.748	18.168	20.330	24.913	24.332	27.655	27.859
Em_F_Kc_PpT	15.640	17.619	18.963	21.499	23.403	27.074	40.629	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.631	18.361	20.250	26.164	24.476	27.377	26.649
A_Co_I_Ia	15.837	16.774	19.589	21.548	23.774	26.825	40.443	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.787	18.320	19.925	25.826	24.985	27.646	26.428
Em_F_PpT_S	15.767	17.321	19.475	21.447	23.179	26.663	41.023	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.681	18.309	20.168	26.181	24.689	27.236	26.641
Em_F_Lc_P	15.704	17.251	19.304	21.661	23.308	26.917	40.693	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.631	18.755	19.853	26.288	24.254	27.589	26.522
A_I_Ia_Km	15.841	16.758	19.601	21.549	23.781	26.825	40.432	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.814	18.318	19.876	25.817	25.072	27.635	26.381
Amen_PpT_S_Sm	15.588	16.755	19.555	21.913	23.643	27.522	39.712	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.858	18.506	19.848	25.095	24.254	26.447	28.985
Em_F_PpT_Tc	15.728	16.925	19.107	21.513	24.110	27.578	39.751	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.601	18.397	20.300	26.116	24.331	27.482	26.684
F_Ls_P_PpT	15.645	17.363	18.972	21.589	23.640	27.293	40.286	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.885	18.470	19.781	26.252	24.181	27.815	26.521
Em_F_PpT_Sin	15.916	16.750	19.874	21.337	23.523	26.737	40.672	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.710	18.300	20.113	26.173	24.728	27.247	26.634
Em_F_Ls_PpT	15.705	17.011	18.999	21.498	24.151	27.653	39.688	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.604	18.417	20.289	26.074	24.253	27.576	26.701
Em_F_P_PpT	15.713	16.981	19.004	21.477	24.203	27.685	39.632	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.628	18.408	20.243	26.092	24.292	27.575	26.676
F_Lc_P_PpT	15.712	17.044	19.066	21.500	24.016	27.475	39.925	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.796	18.472	19.946	26.342	24.151	27.695	26.495
Em_F_Lc_PpT	15.712	16.986	19.009	21.486	24.181	27.668	39.656	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.606	18.424	20.282	26.056	24.226	27.612	26.710
Em_F_I_PpT	15.868	17.119	19.780	21.318	23.173	26.494	41.124	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.653	18.413	20.191	26.075	24.280	27.636	26.669
A_Emin_P_Sin	16.068	16.421	19.849	21.326	23.596	27.358	40.111	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.696	18.440	19.997	25.822	24.450	27.766	26.767
Co_I_Ia_P	15.575	17.385	18.960	21.729	23.053	28.443	39.537	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.764	18.296	20.066	25.946	24.565	27.705	26.582
I_Ia_Km_P	15.578	17.365	18.974	21.729	23.061	28.451	39.525	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.785	18.298	20.009	25.929	24.664	27.707	26.530
Emin_Lc_Sin_Tc	15.193	16.776	19.386	22.916	23.570	28.367	38.201	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.730	18.379	20.123	24.959	24.128	27.549	28.142
Em_F_Lm_PpT	15.695	17.108	18.818	21.365	24.380	27.871	39.424	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.611	18.397	20.279	26.115	24.332	27.500	26.677
Co_Km_PpT_S	15.515	17.471	19.327	21.680	23.232	27.015	40.573	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.726	18.276	20.291	26.788	25.008	26.134	26.604
I_PpT_S_Sm	15.433	17.189	18.887	22.142	23.641	28.141	39.184	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.690	18.255	20.249	26.022	24.832	27.491	26.360
A_F_Km_P	15.903	17.483	19.205	21.453	23.595	25.813	41.454	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.689	18.180	20.537	26.177	24.103	27.453	26.766
P_PpT_S_Sm	15.785	16.404	19.973	21.855	23.514	27.343	39.795	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.663	18.218	20.341	26.055	24.972	27.300	26.341
Emin_Ls_Sin_Tc	15.699	16.106	19.954	22.258	23.610	28.394	38.417	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.731	18.320	20.097	25.022	24.411	27.852	27.566
A_Co_F_P	15.910	17.502	19.198	21.450	23.596	25.764	41.487	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.698	18.148	20.589	26.197	24.062	27.420	26.789
Em Emin_F_PpT	15.884	16.557	19.390	21.211	24.519	27.679	39.397	58.520	86.580	88.250	107.100	113.750	16.737	18.312	20.058	26.161	24.689	27.337	26.617

Anexo 8. Detalle de los modelos evaluados de para la regionalización con tres clústeres empleando la serie temporal de los Caudales Unitarios Medios Mensuales Multianuales (QUniK3)

Debido a la magnitud de los datos a adjuntar, se presentan en siguiente archivo Excel para aquellos interesados en consultar los modelos, en los cuales, es posible encontrar los valores de los Caudales Medios Mensuales Multianuales (QM), los Caudales Unitarios Medios Mensuales Multianuales (QuM), los resultados de sus métricas calculadas, y los valores de los coeficientes para cada ecuación desarrollada. En caso de encontrar el vínculo roto o errores al ingresar al archivo de interés, por favor contactarse al correo Nathalia.mafla@correounivalle.edu.co o lianatha.23@gmail.com.

Los códigos desarrollados en R también pueden ser solicitados vía correo.

Modelos: [Anexo 8. Modelos de regresion QM y QuM QUni.xlsx](#)

Anexo 9. Resultados de los modelos desarrollados para la estimación de caudales medios mensuales para cuencas instrumentadas y no instrumentadas

Cluster	Modelo	QM	A Co. J.	A. I. Ia. Km	Co. J. Ia. P	I. Ia. Km. P	A. F. Km. P	A. Co. F. P	A. Ia. Km. P	A. Co. Ia. P	Co. F. Km. P	A. Co. F. Km. P	Co. F. Km. Lm	F. Ia. Km. P	Co. F. Ia. P	A. F. Ia. Km	A. Co. F. Ia	Co. Ia. Km. Lm	A. F. J. Ia	A. Co. Ia. Km	Co. F. J. Lm	F. J. Km. Lm	F. Ia. Km. Lm	Co. F. J. P	Co. F. Ia. Lm	F. J. Km. P	A. F. Ia. P	A. J. Kc. P	A. Co. Km. P	A. Co. Km. Lm	A. Em. Ia. P	A. F. J. Km
1	AGR	76.860	78.206	78.257	75.698	75.751	76.673	76.646	79.940	79.917	75.919	75.899	74.759	78.281	78.214	79.113	79.055	79.178	76.803	81.544	78.441	78.581	75.866	79.237	75.845	79.384	81.060	78.349	75.132	83.720	78.714	80.346
1	CAN	13.560	13.556	13.552	13.252	13.248	13.895	13.906	13.705	13.710	14.056	14.096	14.109	13.814	13.826	13.755	13.765	12.979	13.055	13.410	14.080	14.073	13.948	13.968	13.955	13.959	13.587	13.412	14.283	13.705	12.046	13.966
1	CEN	1.460	1.456	1.457	1.469	1.469	1.450	1.450	1.446	1.446	1.443	1.442	1.443	1.448	1.448	1.447	1.463	1.485	1.446	1.433	1.433	1.451	1.434	1.450	1.434	1.451	1.327	1.427	1.424	1.593	1.430	
1	PIL	33.710	34.023	34.034	32.992	33.003	33.768	33.769	34.134	34.132	34.012	33.958	33.646	33.993	33.982	34.122	34.114	32.967	33.444	33.792	34.567	34.607	33.528	34.796	33.522	34.831	34.346	32.070	33.675	33.989	35.214	34.840
1	PIL_2	16.134	16.295	14.976	15.166	15.166	26.204	25.176	16.873	16.736	12.413	10.461	11.262	21.070	20.689	18.809	18.596	115.203	12.045	28.031	24.789	25.548	20.290	24.585	19.942	25.321	14.504	15.701	3.430	6.720	13.906	25.041
1	PTJ	36.300	35.936	35.936	38.103	38.113	34.579	34.514	34.817	34.800	33.361	33.096	33.048	34.695	34.650	34.745	34.714	38.869	38.346	36.044	32.360	32.331	34.419	32.734	34.379	32.705	34.807	38.447	31.492	33.459	38.636	32.505
1	PTJ_1	23.364	23.331	30.074	30.042	15.403	15.493	15.533	20.508	20.492	16.286	16.497	16.158	17.778	17.726	19.096	19.041	24.682	35.259	21.815	12.638	12.524	17.703	13.210	17.657	13.094	22.464	19.943	18.269	19.843	20.814	12.662
1	SPE	54.910	53.696	53.645	55.651	55.588	55.964	56.027	52.740	52.770	57.136	57.451	59.049	54.296	54.389	53.483	53.554	52.211	54.121	51.019	55.083	54.941	57.131	53.895	57.185	53.763	51.723	53.279	59.434	50.548	51.572	53.386
1	UNI	3.350	3.378	3.379	3.322	3.322	3.392	3.393	3.449	3.449	3.429	3.438	3.425	3.414	3.414	3.428	3.428	3.404	3.314	3.484	3.511	3.516	3.383	3.514	3.384	3.519	3.465	3.738	3.548	3.646	3.232	3.551

Cluster	Modelo	QM	A Co. J. Ia	A. I. Ia. Km	Co. J. Ia. P	I. Ia. Km. P	A. F. Km. P	A. Co. F. P	A. Ia. Km. P	A. Co. Ia. P	Co. F. Km. P	A. Co. F. Km. P	Co. F. Km. Lm	F. Ia. Km. P	Co. F. Ia. P	A. F. Ia. Km	A. Co. F. Ia	Co. Ia. Km. Lm	A. F. J. Ia	A. Co. Ia. Km	Co. F. J. Lm	F. J. Km. Lm	F. Ia. Km. Lm	Co. F. J. P	Co. F. Ia. Lm	F. J. Km. P	A. F. Ia. P	A. J. Kc. P	A. Co. Km. P	A. Co. Km. Lm	A. Em. Ia. P	A. F. J. Km
2	PAL	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330	45.330
2	PIL	24.660	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659	24.659
2	PIP	125.880	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875	125.875
2	PIP_1	99.644	102.632	18.264	15.678	3.469	4.992	178873.250	161791.336	96.452	65.936	67.692	399.377	341.077	251.173	225.459	68.046	207275.169	76.022	125.292	136.413	225.981	60.736	208.987	61.224	487081.350	3.382	54.090	67.743	49964.310	114.047	
2	SND	16.130	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131	16.131
2	VER	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760	3.760

Cluster	Modelo	QM	A Co. J. Ia	A. I. Ia. Km	Co. J. Ia. P	I. Ia. Km. P	A. F. Km. P	A. Co. F. P	A. Ia. Km. P	A. Co. Ia. P	Co. F. Km. P	A. Co. F. Km. P	Co. F. Km. Lm	F. Ia. Km. P	Co. F. Ia. P	A. F. Ia. Km	A. Co. F. Ia	Co. Ia. Km. Lm	A. F. J. Ia	A. Co. Ia. Km	Co. F. J. Lm	F. J. Km. Lm	F. Ia. Km. Lm	Co. F. J. P	Co. F. Ia. Lm	F. J. Km. P	A. F. Ia. P	A. J. Kc. P	A. Co. Km. P	A. Co. Km. Lm	A. Em. Ia. P	A. F. J. Km
3	YUN	6.810	6.810	6.805	6.801	6.802	6.758	6.746	6.801	6.798	6.893	6.878	6.806	6.869	6.862	6.942	6.834	6.704	6.622	6.876	7.114	7.113	7.154	7.090	7.181	7.076	6.640	6.832	6.738	6.746	6.785	7.321
3	CAR	3.320	3.329	3.334	3.324	3.328	3.309	3.311	3.307	3.308	3.320	3.320	3.319	3.253	3.266	3.259	3.271	3.319	3.576	3.319	3.309	3.304	3.237	3.310	3.256	3.307	3.545	3.317	3.319	3.319	3.349	3.268
3	NOR	368.040	344.825	344.207	346.824	346.149	349.231	349.524	349.845	350.724	347.521	347.560	347.706	357.292	359.119	356.280	357.961	338.516	358.057	337.319	348.912	348.834	359.359	348.221	361.023	348.079	354.305	348.105	347.230	346.610	345.955	351.760
3	PNP	139.410	140.024	139.966	140.323	140.333	139.047	138.878	139.436	139.275	140.732	140.717	140.009	133.602	132.867	134.656	134.015	139.054	140.544	134.658	140.102	140.031	126.886	140.170	125.718	140.174	140.945	140.330	139.311	139.314	140.769	137.947
3	PNP_1	211.299	210.256	183.524	184.334	137.584	135.620	138.730	136.387	161.063	159.057	158.889	129.630	126.382	129.528	126.281	164.382	171.041	178.374	175.899	175.401	145.591	202.584	145.310	198.583	133.576	130.126	142.453	160.184	146.303	204.702	
3	PRV	9.250	9.145	9.122	9.210	9.183	9.425	9.450	9.372	9.396	9.104	9.129	9.255	9.751	9.781	9.735	9.769	9.425	8.968	9.145	8.867	8.885	9.424	8.893	9.365	8.917	8.981	9.231	9.375	9.361	9.136	8.876
3	PTG	215.400	218.596	219.365	214.927	215.791	210.886	210.520	209.796	208.721	213.221	213.056	212.670	205.187	203.428	205.377	203.680	222.402	201.446	230.363	212.940	212.994	210.439	212.879	209.841	213.034	203.023	211.835	213.502	213.676	215.436	209.284
3	PTP	315.220	332.991	332.879	334.537	334.326	337.518	337.775	337.745	338.190	335.362	335.432	336.585	341.427	342.435	340.594	341.479	331.776	338.458	333.593	335.282	335.320	347.913	335.924	349.355	335.859	339.899	336.508	336.485	336.911	334.504	337.861