



Investigación y Ciencia

ISSN: 1665-4412

ISSN: 2521-9758

revistaiyc@correo.uaa.mx

Universidad Autónoma de Aguascalientes

México

Matovelle, Carlos; Heras, Diego

Análisis comparativo de las características morfométricas de
sistemas hidrográficos de la vertiente del Pacífico, Ecuador

Investigación y Ciencia, vol. 28, núm. 80, 2020, pp. 22-31

Universidad Autónoma de Aguascalientes

México

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67464474003>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UAEM  redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Análisis comparativo de las características morfométricas de sistemas hidrográficos de la vertiente del Pacífico, Ecuador

Comparative analysis of the morphometric characteristics of hydrographic systems of the Pacific slope, Ecuador

Carlos Matovelle*✉, Diego Heras*

Matovelle, C., & Heras, D. (2020). Análisis comparativo de las características morfométricas de sistemas hidrográficos de la vertiente del Pacífico, Ecuador. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 28(80), 22-31.

RESUMEN

La morfometría de las cuencas hidrográficas de la vertiente del Pacífico en el territorio ecuatoriano es analizada con información topográfica digitalizada en un Modelo de Elevaciones obteniendo características de superficie, relieve y red hídrica, que determinan el comportamiento hidrológico. El análisis se realiza a 13 cuencas hidrográficas que representan un área de 92,775.87 km²; los resultados son obtenidos mediante un análisis estadístico de las relaciones que forman las características morfométricas, obteniendo una caracterización hidrológica de una zona de gran influencia de la vertiente del Pacífico. Los parámetros utilizados son factor de Horton, coeficiente de compacidad, densidad de drenaje, rugosidad de la cuenca, relación de bifurcación y relación de elongación. Para cada uno de los parámetros analizados se calcularon estadísticos de posición y de dispersión, además de pruebas estadísticas y análisis

de agrupamiento, evaluando las relaciones que existen entre cada uno de los sistemas, obteniendo similitudes morfométricas y formando grupos que comparten características semejantes.

ABSTRACT

The morphometry of the hydrographic basins of the Pacific slope in the Ecuadorian territory is analyzed with digitized topographic information in an Elevation Model obtaining surface characteristics, relief, and water network that determine the hydrological behavior. The analysis is carried out in 13 Hydrographic Systems that represent an area of 92775.87 km²; the results are obtained through a statistical analysis of the relationships that form the morphometric characteristics obtaining a hydrological characterization of an area of the great influence of the Pacific Pending. The parameters used are Horton factor, compactness coefficient, drainage density, the roughness of the basin, bifurcation ratio, and elongation ratio. From each parameter, position and dispersion statistics were obtained, statistical tests and cluster analysis were performed, evaluating the relationships that exist between each of the systems, obtaining morphometric similarities and forming groups that share similar characteristics.

Palabras clave: morfometría; cuencas del Pacífico; relación estadística; similitud morfométrica; forma de cuencas.

Keywords: morphometry; Pacific watersheds; statistical relationship; morphometric similarity; shape of basins.

Recibido: 13 de septiembre de 2019, Aceptado: 4 de junio de 2020

* Grupo de Investigación de Contaminación Ambiental y Manejo de Aguas Residuales, Universidad Católica de Cuenca. Av. De las Américas y Humboldt, EC010101, Cuenca, Ecuador. Correo electrónico: cmmatovelleb@ucacue.edu.ec; dherasb@ucacue.edu.ec ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2267-0323>; <http://orcid.org/0000-0002-8729-0981>

✉ Autor para correspondencia

INTRODUCCIÓN

La cuenca hidrográfica se define como un área delimitada en función de la dirección de sus redes de drenaje, en donde su superficie se define por la divisora de aguas a partir del cual la precipitación drena hacia un punto específico (Cotler Ávalos, Galindo Alcántar, González Mora, Pineda López, & Ríos Patrón,

2013). Los criterios para delimitación de cuencas hidrográficas son superficiales y topográficos, ya que en función de la topografía se delimita un área de terreno que drena el agua de precipitación mediante escorrentía a un determinado punto de desagüe. La transformación de agua de precipitación a escorrentía drenada hacia un punto específico se da en función de las condiciones climatológicas y físicas de la zona de estudio, unificando a la naturaleza del suelo y cobertura vegetal que se presente en la cuenca hidrográfica (Gaspari, 2007).

Las características de forma de una cuenca tienen una relación directa en el comportamiento hidrológico y los caudales que pueden llevar los cauces principales, en función de la forma específica que tenga una cuenca su comportamiento hidrológico variaría, por lo que para realizar estudios integrales no basta con conocer los parámetros climáticos sino también los morfométricos, ya que dichos factores de forma son cuantificables y comparables dentro de una misma área de estudio para encontrar relaciones entre características morfométricas y comportamiento hidrológico.

La necesidad de disponer de herramientas adecuadas para la gestión del recurso hídrico se va poniendo de manifiesto con el paso de los años, la optimización en la gestión es prioritaria, considerando incrementos en la demanda de usos de agua y una marcada disminución de la precipitación por efecto del cambio climático (Hernández Pasichana & Posada Arrubla, 2018; Ruiz-Ortiz, García-López, Solera, & Paredes, 2019). Existen muchas herramientas de modelación para la gestión pero que no pueden ser correctamente utilizadas por la falta de información para que el modelo se calibre y ajuste de mejor manera. Analizar las características morfométricas y buscar relaciones estadísticamente válidas entre ellas es parte inicial de la solución al problema en cuestión (Méndez, Pacheco, Cartaya, Marciano, & León, 2015; Torres-Tabares, Velasco-Santamaría, & Ramírez-Merlano, 2014).

El estudio del ciclo hidrológico tiene como unidad fundamental la cuenca, los análisis de estos estudios generalmente están enfocados en la simulación del proceso natural del flujo de agua que puede modelarse junto a otros procesos como el transporte de sedimentos, transformación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua (Singh & Frevert, 2006), pero al analizar estos procesos se dejan de lado otros componentes del ciclo hidrológico que tienen igual importancia para un entendimiento global del sistema, como son los parámetros de forma. Estos además de indicar el tipo de cuenca de

análisis pueden dar un conocimiento del comportamiento del sistema.

La aplicación de modelos matemáticos para el estudio del ciclo hidrológico se basa en enfoques deterministas, los cuales usan sistemas de ecuaciones diferenciales para representar procesos físicos que describen el movimiento del agua; sin embargo, también se pueden obtener modelos mediante la experiencia o la estadística (Viessman & Lewis, 2003), para esto serán necesarios los datos históricos representativos de un sistema analizado. De estos planteamientos es necesario considerar sus diferencias e implicaciones: primero, la necesidad de un alto volumen de información requerida para un análisis integrado en cualquier cuenca en función al número de variables y parámetros requeridos en el modelo y tamaño de la cuenca; segundo, la baja disponibilidad de dicha información (Burbano-Girón, Domínguez, & Etter, 2009), sobre todo en lugares en donde la infraestructura de monitoreo es deficiente.

Otra aproximación al modelamiento hidrológico es mediante los modelos estocásticos, que usan menor información comparados con los deterministas, ya que no es necesario un conocimiento profundo de cada parámetro de la zona analizada, involucrando comúnmente componentes del ciclo hidrológico como precipitación, evaporación y escorrentía; además de variables como la pendiente, y de parámetros físicos inherentes al sistema que describen características del proceso; obteniendo en todos los casos muy buenos ajustes en las probabilidades de escorrentía generadas (Frolov, Vyruchalkina, & Solomonova, 2003).

Los modelos estocásticos han sido utilizados por mucho tiempo para realizar evaluaciones a sistemas de recursos hídricos, capacidad y operación de los embalses, efectividad de gestión, planificar la implementación de infraestructura de regulación natural o artificial y generar escenarios para simular el comportamiento futuro de sistemas (Avilés-Añazco, Solera-Solera, & Paredes-Arquiola, 2016).

Ante las dificultades de obtención de información mencionadas han surgido varios enfoques para sustituir los vacíos de información en la modelación hidrológica. Se enfatiza en la construcción de modelos menos complejos basados en relaciones estadísticas, tales como los análisis de regresión múltiple, análisis factoriales de tipo componentes o componentes principales, o aproximaciones bayesianas (Vilaysane, Takara, Luo, Akkharath, & Duan, 2015), que se pueden aplicar a parámetros de forma de las cuencas. La principal ventaja de estos enfoques es que permiten integrar parámetros y variables, tan-

to para modelos deterministas como estocásticos, lo que reduce los problemas de falta de información (Burbano-Girón, Domínguez, & Barón-Ruiz, 2016).

En este análisis se busca tener un conocimiento inicial entre cuencas hidrográficas que formen la vertiente del Pacífico en el territorio ecuatoriano para entender en investigaciones y análisis posteriores los procesos hidrológicos que ocurren en el territorio analizado. Este análisis pretende caracterizar una zona geomorfológica por medio de parámetros de forma que sean aptos para un tratamiento matemático y estadístico y esto permita disminuir la subjetividad en las conclusiones que se deriven de esos parámetros (Doffo & González Bonorino, 2005). Se le da un particular análisis a la obtención y validación de los resultados de los tiempos de concentración obtenidos mediante fórmulas que se basan en relaciones de las características morfométricas. El tiempo de concentración y retardo son variables utilizadas en el diseño hidrológico para determinar la capacidad hidráulica máxima de diferentes obras de infraestructura; se trata de variables que son propias para cada zona y dependen de los parámetros morfométricos como de las precipitaciones (Vélez Upegui & Botero Gutiérrez, 2011).

Conocer dichas características dentro de la zona de estudio permite tener una base para realizar estudios hidrológicos de alto nivel, conocer los aportes de las cuencas, modelos para predecir caudales para dimensionamiento de obras hidráulicas y proyectar sistemas de riego. Dentro de la vertiente del Pacífico los estudios son escasos y las características que poseen estos sistemas permiten tener un área de gran interés de investigación que parte desde sus características de forma y la generación de los tiempos de concentración en función de las características morfométricas analizadas. Las cuencas que vierten hacia el Pacífico tienen formas y características distintas a las de la vertiente amazónica, condicionando un ciclo hidrológico distinto y permitiendo estudios complementarios a las cuencas amazónicas. Son evidentes las diferencias de áreas, hipsometrías, cobertura vegetal, redes de drenaje (figura 1) con clara distinción de las dos vertientes.

El objetivo principal del estudio fue calcular las características morfométricas mediante el análisis con sistemas de información geográfico de 13 cuencas que drenen sus aguas hacia el Océano Pacífico y sus relaciones estadísticas. Con los datos obtenidos se realizan conclusiones mediante validaciones estadísticas para que las interpretaciones tengan confiabilidad y obtener similitud entre cuencas que permita un agrupamiento por similitud.



Figura 1. Fotografía satelital de las cuencas vertientes del Pacífico. Imagen tomada de Gloe (15 de junio de 2018).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la obtención de los parámetros morfométricos y su posterior análisis se eligieron 13 cuencas hidrográficas que abarcan la mayor parte del territorio ecuatoriano, cuyo punto de desagüe es el Océano Pacífico, tanto en área como en ubicación de norte a sur. Se trabaja sobre los sistemas de Esmeraldas, Guayas, Cañar, Jubones, Catamayo y Puyango; en la figura 2 se observan las cuencas que tienen vertiente en el Pacífico y las seleccionadas para el análisis.

El área total de la vertiente del Pacífico es de 123,453 km² y el área de las cuencas seleccionadas es de 92,775.87 km², lo que representa 75 % del área total como área de estudio realizado en la presente investigación; además se observa una expansión de norte a sur que abarca la selección y representa un área de interés investigativo en todo el territorio; es decir, no se ha centralizado el estudio al norte, sur o centro del país, se han considerado cuencas en toda la extensión. La delimitación de las cuencas se realiza a partir del MDE de 3 m de tamaño de celda y luego se calculan los parámetros morfométricos a partir de los shapes generados de cada cuenca hidrográfica.

Cada sistema hidrográfico es analizado de manera individual obteniendo parámetros aislados que luego son relacionados y analizados entre sí. De acuerdo con (Chow, Maidment, & Mays, 1994) los

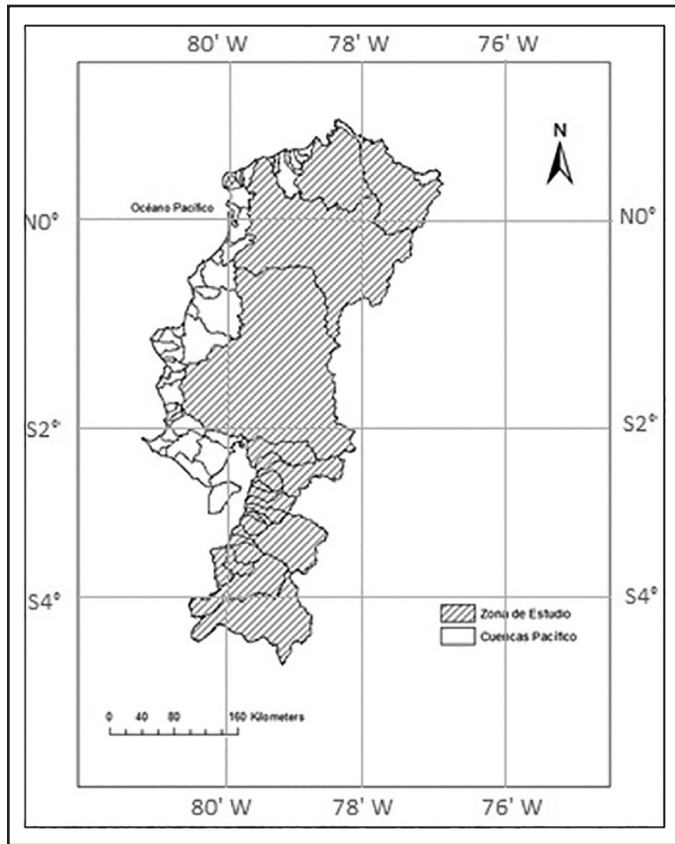


Figura 2. Cuencas hidrográficas seleccionadas.
Elaboración propia.

parámetros morfométricos analizados, en función de su relación con la respuesta hidrológica, son:

- Los parámetros de forma en donde se calcula el área

- El perímetro a partir de las características superficiales

- Las cotas máximas y mínimas que son obtenidas a partir de las elevaciones del modelo digital utilizado.

Se calcula también el coeficiente de compacidad de Gravellius (K_c) (adimensional) que relaciona el perímetro de un círculo con área similar al de la cuenca, así como el índice de homogeneidad, que también es un factor adimensional que indica la relación del área de la cuenca con la de un rectángulo (Cruz Romero, Gaspari, Rodríguez Vagaría, Carrillo González, & Téllez López, 2015). Al comparar el área de una circunferencia con el de la cuenca mediante el coeficiente de Gravelius los valores cercanos a 1 indican que la cuenca tiene una forma circular, además de indicar la tendencia del área y forma de la cuenca a concentrar altos caudales de escurrimiento.

Dentro de los parámetros de relieve las curvas hipsométricas se analizan como las variaciones de altura de acuerdo con el porcentaje de área que se tiene en cada una de las cuencas analizadas mediante el procesamiento de modelos digitales de elevación con la ayuda de sistemas de información geográfica, al obtener información sintetizada sobre la altitud y forma de la cuenca, así como el tiempo de ocurrencia de la escorrentía superficial (Luo & Harlin, 2003), y es también utilizada para interpretar las etapas del paisaje y los procesos de erosión que ocurren en una cuenca (Luo, 2000) al representar gráficamente la distribución del área de la cuenca en diferentes tramos de altura.

Dentro de los parámetros de la red hidrográfica se calculan las longitudes totales de la red hídrica, longitud del cauce principal, densidad fluvial, al igual que los procesos previos se parte de la red hidrográfica generada con las herramientas de los sistemas de información geográfica. Se trabaja un modelo digital de elevaciones con un tamaño de celda de 3 m y se considera un criterio de área aportante de 2 km², para indicar este criterio se coloca la subcuenca del río Rircay, en donde se genera la red hidrográfica digitalizada (figura 3).

En el análisis de las cuencas se emplearon varias relaciones morfométricas que vinculan los parámetros obtenidos, se encuentran indicados en la tabla 1 y su significado se describe a continuación: la densidad de drenaje (D_d) es una expresión de la longitud de cauces que se pueden formar. D_d está gobernada por el tipo de precipitación que caiga sobre la cuenca, cubierta vegetal, topografía y tipo de suelo (Doffo & González Bonorino, 2005). Con el

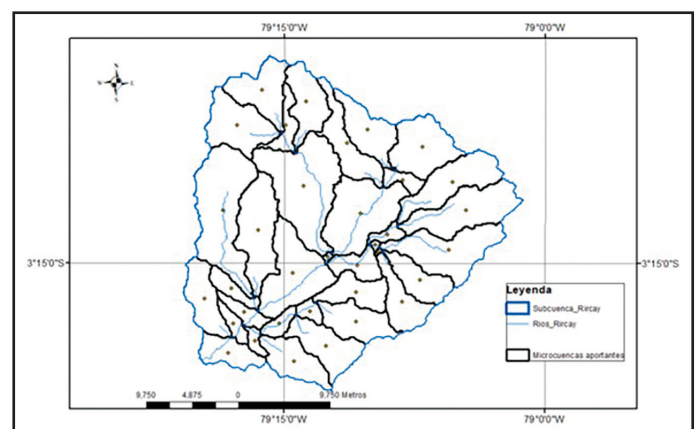


Figura 3. Subcuenca del río Rircay. Criterios de superficie para determinación de la red hidrográfica.
Elaboración propia.

objetivo de determinar el drenaje de la cuenca y analizando su densidad se puede considerar que valores de densidad de drenaje de 0.5 km/km² o mayores indican una eficiencia alta de la red de drenaje. La rugosidad de cuenca (R_d) vincula la densidad de drenaje con el relieve, cuencas densidades de drenaje elevadas y con bajo relieve presentan un índice de rugosidad similar a cuencas moderadamente disectadas y con alto relieve (Patton & Baker, 1976).

La relación de bifurcación (R_b) describe un aspecto de la organización de la red de drenaje. La relación de bifurcación media para cada cuenca analizada se obtiene como promedio de las relaciones parciales existentes. En el esquema de Strahler (1957) el menor valor teórico de R_b es 2 y corresponde a dos tributarios y un colector, que según este autor es el mínimo nivel que puede existir en una cuenca. Una red de drenaje de tipo dendrítico tiende a valores altos de R_b , mientras que una de tipo paralelo puede dar valores cercanos a 2. La ley de Horton K_f se conoce como la relación entre los números de cursos que existan en cada orden de la red y una relación geométrica de la cuenca (Doffo & González Bonorino, 2005), siendo la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca y mide lo alargada que puede ser la cuenca. Una cuenca con un factor de forma bajo está menos expuesta a crecientes que una de la misma área, pero con un mayor factor de forma. Los factores geológicos son los encargados de moldear la fisiografía de una región y la forma que tienen las cuencas hidrográficas, dándole cada uno de los valores morfométricos mencionados. Un valor de K_f superior a la unidad proporciona el grado de achatamiento de ella o de un río principal corto y, por consecuencia, tienden a concentrar la escorrentía de una lluvia intensa, lo que forma fácilmente grandes avenidas.

Procesamiento estadístico

En primer lugar se determinará si los parámetros morfométricos de las cuencas del Pacífico provienen de una distribución normal para poder aplicar los tratamientos estadísticos empleando métodos paramétricos. El test de normalidad aplicado es el test de normalidad de Anderson-Darling en los 13 datos disponibles en cada vector de indicadores vinculados a la morfometría de la cuenca del Pacífico.

El test de normalidad de Anderson-Darling mide qué tan bien los datos siguen la distribución normal. La hipótesis nula describe: H_0 , los datos siguen una distribución normal, y la hipótesis alternativa es que los datos no siguen la distribución normal. La prueba se realiza de manera estándar con respecto a un

nivel de significancia $\alpha = 0.05$. En consecuencia, se debe rechazar la normalidad de los datos si el p -valor resultante es mucho menor que el valor del nivel de significancia (Cox & Hinkley, 2013; Walpole, Myers, R. H., Myers, S. L., & Keying, 2012).

RESULTADOS

La caracterización morfométrica de las cuencas del Pacífico se encuentra definida por los parámetros seleccionados y calculados (tabla 2), el motivo principal del análisis estadístico es explorar el significado de los índices morfométricos en las cuencas seleccionadas del Pacífico.

La morfometría permite hallar parámetros que caractericen un ambiente geomorfológico y que se puedan tratar mediante análisis estadísticos que eviten la subjetividad en los análisis derivados de estos parámetros (Doffo & González Bonorino, 2005). En la tabla 3 se presentan los valores p resultantes de la prueba estadística de normalidad.

En este caso únicamente los valores de los indicadores morfométricos R_b y K_c provienen de una distribución normal al no rechazar la hipótesis nula de la prueba. Se procede a describir al sesgo de las distribuciones como una guía para sugerir las transformaciones adecuadas mediante las curvas de densidad (figura 4).

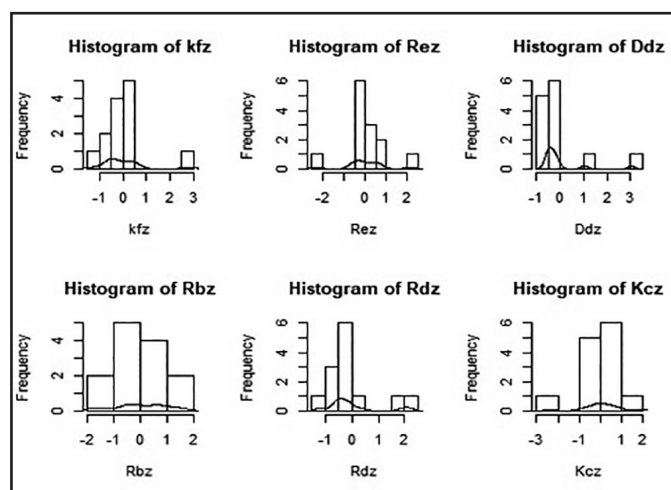


Figura 4. Curvas de densidad de los parámetros morfométricos. Elaboración propia.

Tabla 1
Parámetros morfométricos calculados

Parámetro	Fórmula	Elementos
Densidad de drenaje	$Dd = L/A$	L= Longitud de la red hídrica A= Área de la cuenca
Rugosidad de la cuenca	$Rd = Dd * RR$	RR= Alt _{max} - Alt _{min}
Relación de bifurcación	$Rb = N_u/N_{u+1}$	N _u = Número de cauces de la cuenca
Relación de elongación	$Re = 1.128\sqrt{A}/L$	
Coefficiente de compacidad	$K_c = P/2\pi R$	P= Perímetro de la cuenca R= Radio de la circunferencia
Factor de forma	$K_f = A/L^2$	

Nota: Elaboración propia.

Tabla 2
Resultados de los parámetros morfométricos

Sistema	Área (km ²)	Longitud del cauce (km)	Kf	Re	Dd	Rb	Rd	Kc
Jubones	4235.61	152.46	0.1822	0.481	2.09	0.888	8631.78	0.7704
Esmeraldas	21621.34	345.59	0.1810	0.479	2.14	0.900	12396.9	1.2559
Guayas	32121.93	304.28	0.3469	0.664	3.17	0.900	15795.0	1.5204
Cañar	2443.17	122.84	0.1619	0.453	6.69	0.875	29946.4	1.1703
Catamayo	7170.99	192.13	0.1943	0.497	2.05	0.888	7433.03	1.1920
Puyango	3628.87	106.61	0.3193	0.637	2.03	0.875	7568.80	1.5536
Mira	6511.04	203.81	0.1567	0.446	2.06	0.888	9916.77	0.9242
Cayapas	6311.55	133.41	0.3546	0.671	2.71	0.888	9432.91	1.4526
Taura	2372.75	114.26	0.1817	0.480	3.46	0.875	11202.1	1.1471
Nar_Pag	3364.83	789.29	0.0054	0.082	2.79	0.875	12259.7	0.1384
Santa Rosa	1048.86	56.98	0.3231	0.641	2.78	0.857	9775.86	1.0720
Arenillas	649.20	48.31	0.2782	0.595	12.5	0.875	27573.2	1.2580
Zarumilla	791.77	32.14	0.7666	0.987	2.63	0.857	3131.83	2.0200

Nota: Elaboración propia.

Tabla 3
Prueba de normalidad

kf	Re	Dd	Rb	Rd	Kc
0.01	0.043	3.46e-	0.08	0.00	0.27
2	6	06	0	3	2

Nota: Elaboración propia.

Al analizar la figura 4 se puede notar que generalmente las distribuciones poseen un sesgo positivo que evidencian mayor acumulación de datos en los valores relativamente bajos de las distribuciones, específicamente para las variables *Kf*, *Dd* y *Rd*. Esto se puede cuantificar mediante un coeficiente de sesgo que se observa en la tabla 4.

Dicho tipo de sesgo en transformaciones como las logarítmicas provoca valores negativos imposibilitando la transformación; sobre los datos no normales *kf*, *Re*, *Dd* y *Rd* se aplican transformaciones de Johnson para conseguir la normalidad en los vectores resultantes (Husson, Lê, & Pagès, 2013). Una vez aplicada la transformación los datos resultan normales y se prosigue con el tratamiento estadístico empleando métodos paramétricos que resultan ser más robustos que los métodos no paramétricos, los resultados de la prueba de normalidad aplicada a los datos transformados se exponen en la tabla 5.

Tabla 4
Cuantificación del sesgo

kfz	Rez	Ddz	Rbz	Rdz	Kcz
1.568	-0.136	2.423	-0.275	1.334	-0.576

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5
Valores p de normalidad

Kf_t	Re_t	Dd_t	Rb_t	Rd_t	Kc_t
0.2453	0.2115	0.5284	0.0804	0.9431	0.2720

Nota: Elaboración propia.

Se aprecia que todos los valores *p* resultan mayores al valor $\alpha = 0.05$, por tanto, se declaran normales. Con los datos normalizados se procede

a encontrar la matriz de correlación. En vista de la transformación de los datos y ya que los parámetros analizados tienen diferentes unidades calculadas se normalizan los datos a puntuaciones *Z*. En la figura 5 se puede apreciar la matriz de correlación de los datos normalizados y estandarizados.

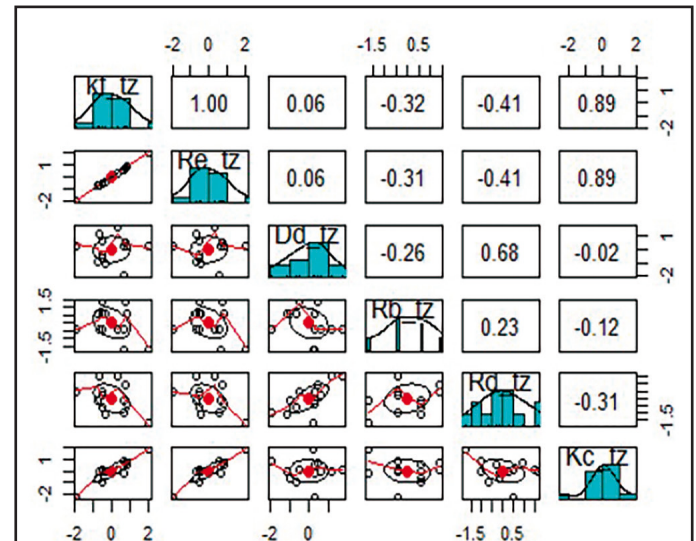


Figura 5. Matriz de dispersión, histograma y correlación.
Elaboración propia.

Hay interacciones fuertes entre los pares: (*k_f* y *Re_t*) con un valor $r = 0.999$, entre (*Re_tz* y *Kc_tz*) con un valor de $r = 0.89$, entre (*kf_tz* y *Kc_tz*) con un valor de $r = 0.89$, finalmente hay una interacción positiva relevante entre (*Rd_tz* y *Dd_tz*) con un valor de $r = 0.68$. Ya que no se seleccionó ninguna división específica de agrupamiento de las cuencas estudiadas, sino se utiliza el criterio de hipsometría para la selección de este estudio, se explora la posibilidad de existencia de algún agrupamiento natural por sus características morfométricas. Para lograr este análisis se recurre al análisis de agrupamiento (clúster análisis) que se basa en una matriz de distancias. En el dendrograma de la figura 6 se obtiene que los grupos relacionados están vinculados por las líneas horizontales y las alturas a la que se unen dos grupos representan la distancia que hay entre las características morfométricas de cada grupo formado.

En el dendrograma se comprueba que existe similitud de los parámetros morfométricos analizados entre diferentes grupos de cuencas hidrográficas con vertiente hacia el Pacífico en el Ecuador, ya que el análisis realiza agrupamientos en función de la similitud de características analizadas.

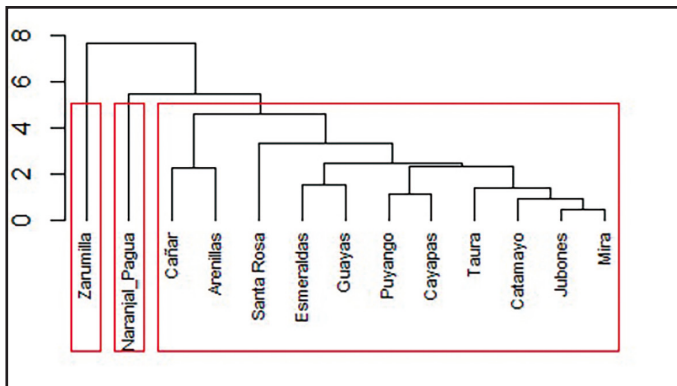


Figura 6. Dendrograma de las características morfométricas en las cuencas analizadas.

Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Existe una relación muy fuerte entre el coeficiente de forma, coeficiente de compacidad y relación de elongación de las cuencas analizadas. Las tres son medidas que intentan cuantificar la forma alargada o no de una cuenca, esto indica que en un análisis posterior de las cuencas de estudio es necesario el cálculo solo de una de las variables, esto permite simplificar parámetros y optimizar análisis. Existen diversos criterios de correlación entre parámetros de cuencas que consideran relaciones estadísticas para indicar que los parámetros tienen relaciones válidas ($R^2 \geq 0.50$) (Guevara Gutiérrez, Olguín López, Mancilla Villa, & Barreto García, 2019), además de relacionar de esta manera los parámetros se pueden plantear similitudes entre diferentes sistemas (Meza Rodríguez & Martínez Rivera, 2010), llegando incluso a tener cuencas tan similares que estudios aplicados en ellas se pueden replicar con certeza numérica.

Otra relación para considerar es la que tienen la densidad de drenaje con la rugosidad de la cuenca; si bien la rugosidad es un parámetro calculado a partir de la densidad de drenaje y se esperaría que la relación fuera igual a la unidad, se observa que el factor de correlación es de 0.68, lo que indica que no es una relación y esto se debe a que dichos parámetros dependen además de las características de forma de los parámetros geológicos y ecológicos de las cuencas (Peña Llopis, 2007), al ser de diferentes áreas y con diferentes usos de suelo, cada una presenta un comportamiento particular de la red de drenaje. Dependerá además de la sensibilidad del método utilizado para determinar la red de drenaje para que la relación sea más marcada, como se observa en el estudio de Camino et al. (2018).

El dendrograma hace evidente la tendencia a la formación de tres grupos a una distancia estadística aproximada común de 5 entre Naranjal_Pagua y las cuencas a su derecha y una distancia mayor de la cuenca en Zarumilla. Existe un agrupamiento fuerte con una distancia estadística en el intervalo [1.5 y 2] entre las cuencas Cañar, Arenillas, Santa Rosa, Esmeraldas Guayas, Puyango, Cayapas, Tura, Catamayo, Jubones y Mira. En el dendrograma se puede apreciar que las características morfométricas de Zarumilla son muy diferentes a las del resto del grupo, pues existe mayor distancia, aproximadamente 7.8. Por otra parte, Naranjal_Pagua forma otra categorización a una distancia aproximada de 5.7 y que forma parte del conjunto a su derecha fuertemente agrupado. Jubones y Mira comparte características a una distancia aproximada de 1.5 y se agrupan con Catamayo y Taura, compartiendo algunas características. Se forma otro conjunto dentro de este gran grupo a una distancia aproximada de 1.8 con Puyango y Cayapas. De las 13 cuencas en el análisis, la primera división que corresponde a Zarumilla, significa 7.6%, igual que Naranjal_Pagua. El 84.61% corresponde a la agrupación de las cuencas Cañar, Arenillas, Santa Rosa, Esmeraldas Guayas, Puyango, Cayapas, Tura, Catamayo, Jubones y Mira.

CONCLUSIONES

Empezar con modelos estadísticos para conocer una zona de gran interés hidrológico poco estudiada es una alternativa que permite ir obteniendo resultados y características que pueden disminuir la zona de análisis con criterios adecuados sin perder precisión en los resultados extrapolados. La metodología estadística empleada ha tenido que ir acoplándose a los datos que se generan, desde el análisis de normalidad hasta las pruebas de agrupamiento, esto se da en sistemas de datos tan variables como las cuencas hidrográficas, en donde variables físicas condicionan los resultados obtenidos que deben procesarse para obtener modelos estadísticos. Las cuencas hidrográficas analizadas que forman parte de la vertiente del Pacífico muestran relaciones particulares similares entre ellas, esto ha permitido realizar un conjunto evidenciando la formación de agrupamientos por condiciones naturales analizadas estadísticamente, esto indica que se pueden reducir de gran manera zonas de análisis sin perder precisión en los resultados y estos podrán ser extrapolados a los grupos de características similares.

Agradecimientos

La publicación es parte del Proyecto Caracterización morfométrica de las cuencas del Pacífico - Ecuador,

financiado en la V Convocatoria de Proyectos de Investigación de la Universidad Católica de Cuenca.

REFERENCIAS

- Avilés-Añazco, A., Solera-Solera, A., and Paredes-Arquiola, J. (2016). Análisis del rendimiento de sistemas hídricos en desarrollo mediante el acople de modelos estocásticos hidrológicos y optimización de redes de flujo. *Ingenius*, 15. doi: 10.17163/ings.n15.2016.05
- Burbano-Girón, J., Domínguez, E., & Barón-Ruiz, O. (2016). Análisis de la relación entre variables morfométricas y biofísicas en la estimación de características probabilísticas para la oferta hídrica superficial en Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(156), 514-526. doi: 10.18257/raccefyn.291
- Burbano-Girón, J., Domínguez, E., & Etter, A. (2009). Modelación del efecto de escenarios de cobertura sobre la migración de nutrientes en la cuenca alta del río Magdalena (Huila, Colombia). *Ingeniería y Universidad*, 13(2), 341-369.
- Camino, M. A., Bó, M. J., Cionchi, J. L., Del Río, J. L., López de Armentia, A., & De Marco, S. G. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía* 27(1), 73-97.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada* (ed. Martha Edba Suárez). Santa Fé de Bogotá.
- Cotler Ávalos, H., Galindo Alcántar, A., González Mora, I. D., Pineda López, R. F., & Ríos Patrón, E. (2013). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. México: SEMARNAT. Recuperado de http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/Cuencas_final_2014.pdf
- Cox, D. R., & Hinkley, D. V. (2013). *Theoretical Statistics*. US: Chapman and Hall/CRC.
- Cruz Romero, B., Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Carrillo González, F. M., & Téllez López, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigacion y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 23(64), 26-34.
- Doffo, N., & González Bonorino, G. (2005). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del arroyo Las Lajas, Córdoba: Un análisis estadístico. *Revista de La Asociacion Geologica Argentina*, 60(1), 16-22.
- Frolov, A. V., Vyruchalkina, T. Y., & Solomonova, I. V. (2003). Dynamic-stochastic modeling of rivers rising from lakes. *Water Resources*, 30(6), 627-631.
- Gaspari, F. J. (2007). *Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas utilizando sistemas de informacion geográfica (SIG)*. Buenos Aires: Universidad Internacional de Andalucía.
- Gloe, A. [@u/AJgloe]. (15 de junio de 2018). Exaggerated Relief Map of the Andes and Amazon Basin [Fotografía en Reddit]. Recuperada de https://www.reddit.com/r/Map_Porn/comments/986911/exaggerated_relief_map_of_the_andes_and_amazon/?utm_source=share&utm_medium=web2x
- Guevara Gutiérrez, R. D., Olguín López, J. L., Mancilla Villa,, O. R., & Barreto García, O. A. (2019). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Ayuquila, Jalisco-México. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 24, 141-158. doi: 10.21138/GF.622
- Hernández Pasichana, S. M., & Posada Arrubla, A. (2018). Avances de la investigación sobre la gestión integral del recurso hídrico en Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 553-563.
- Husson, F., Lê, S., & Pagès, J. (2013). *Análisis de datos con R*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Luo, W. (2000). Quantifying groundwater-sapping landforms with a hypsometric technique. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E1), 1685-1694. doi: 10.1029/1999JE001096
- Luo, W., & Harlin, J. M. (2003). A theoretical travel time based on watershed hypsometry. *Journal of the American Water Resources Association*, 39(4), 785-792.
- Méndez, W., Pacheco, H., Cartaya, S., Marcano, A., & León, C. (2015). Caracterización hidroclimatológica y morfométrica de la cuenca del río San Julián (estado Vargas, Venezuela): Aportes para la evaluación de la amenaza hidrogeomorfológica. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 133-156.

- Meza Rodríguez, D., & Martínez Rivera, L. M. (2010). *Análisis morfométrico de las cuencas de la red MEX-LTER: Estudio de diez cuencas a nivel nacional en México* (52 pp.). Universidad de Guadalajara/RED MEX-LTER: México. Recuperado de https://www.academia.edu/35320017/ANALISIS_MORFOM%C3%89TRICO_DE_LAS_CUENCAS_DE_LA_RED_MEXLTER_ESTUDIO_DE_DIEZ_CUENCAS_A_NIVEL_NACIONAL_EN_M%C3%89XICO
- Patton, P. C., & Baker, V. R.. (1976). Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. *Water Resources Research*, 12(5), 941-952.
- Peña Llopis, J. (2007). *Efectos ecológicos de los cambios de coberturas y usos de suelo en la Marina Baixa (Alicante)* (Tesis doctoral, Universidad de Alicante). Recuperada de <https://www.pik-potsdam.de/news/public-events/archiv/alter-net/alumni/tesis-juanpena.pdf>
- Ruiz-Ortiz, V., García-López, S., Solera, A., & Paredes, J. (2019). Contribution of decision support systems to water management improvement in basins with high evaporation in mediterranean climates. *Hydrology Research*, 50(4), 1020-1036.
- Singh, V. P., & Frevert, D. K. (Eds.). (2006). *Mathematical models of large watershed hydrology*. Colorado,US: Water Resources Publications.
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913-920.
- Torres-Tabares, A., Velasco-Santamaría, Y. M., & Ramírez-Merlano, J. A. (2014). Características morfológicas, morfométricas, merísticas y manejo de la primera alimentación de larvas de escalar altum (*Pterophyllum altum*) (Pellegrin, 1903). *ORINOQUIA*, 18(extra 1), 183-192.
- Vélez Upegui, J. J., & Botero Gutiérrez, A. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. *Dyna*, 78(165), 58-71.
- Viessman, W., & Lewis, G. L. (2003). *Introduction to Hydrology* (5th. ed.). Upper Saddle River, NJ, US: Prentice Hall.
- Vilaysane, B., Takara, K., Luo, P., Akkharath, I., & Duan, W. (2015). Hydrological stream flow modelling for calibration and uncertainty analysis using SWAT model in the Xedone river basin, Lao PDR. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 380-390.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Keying, Y. (2012). *Probabilidad y Estadística para ingeniería y ciencias* (9ª. ed.). México: Pearson Educación.