



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Análisis morfométrico de los sistemas hidrográficos que conforman la
vertiente del Pacífico del Ecuador geográfico**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL**

AUTOR: ANDREA ESTEFANÍA CÓRDOVA ANDRADE

DIRECTOR: ING. CARLOS MARCELO MATOVELLE BUSTOS

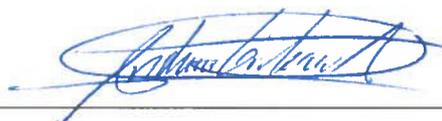
MATRIZ CUENCA

2019

DECLARACIÓN

Yo, Andrea Estefanía Córdova Andrade, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento; y eximo expresamente a la Universidad Católica de Cuenca y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

La Universidad Católica de Cuenca puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y la normatividad institucional vigente.



Andrea Estefanía Córdova Andrade

010572444-7

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo de titulación denominado “Análisis morfométrico de los sistemas hidrográficos que conforman la vertiente del Pacífico del Ecuador geográfico” fue desarrollado por la Srta. Andrea Estefanía Córdova Andrade, bajo mi supervisión.



Carlos Marcelo Matovelle Bustos
Director

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por ayudarme a terminar esta etapa de mi vida, a mis padres Flavio y Gloria, a mi Abuelita Rosita, a mis tíos Celio y Sonia por todo el apoyo que me han dado y por estar siempre a mi lado, a mis hermanos Andrés y Pablo por darme la mano para seguir adelante cumpliendo metas y sueños, y a mi hijo Daniel Alejandro, por darme la fuerza para continuar.

En esta etapa encontré personas maravillosas que ahora puedo llamar mis amigos, los que estuvieron conmigo en este largo camino; Anita, Diego, Bryan, Daniela, Tatiana, Verónica les doy gracias de corazón por estos años a su lado.

De igual manera mis agradecimientos a la Universidad Católica de Cuenca, a mis docentes, por haber compartido sus conocimientos y experiencias con nosotros, y en especial a los Ingenieros Carlos Matovelle, Diego Heras, Diana Macancela y Melva Gonzales por todo su apoyo, cariño, ayuda y comprensión a lo largo de mi vida universitaria.

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado con todo el amor y cariño a mi hijo Daniel Alejandro.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN	<i>i</i>
CERTIFICACIÓN	<i>ii</i>
AGRADECIMIENTO	<i>iii</i>
DEDICATORIA	<i>iv</i>
ÍNDICE DE CONTENIDOS	<i>v</i>
LISTA DE FIGURAS	<i>vii</i>
LISTAS DE TABLAS	<i>viii</i>
LISTA DE ANEXOS	<i>ix</i>
RESUMEN	<i>x</i>
ABSTRACT	<i>xi</i>
CAPITULO I	<i>12</i>
1 INTRODUCCIÓN	<i>12</i>
1.1 Objetivos	<i>13</i>
1.1.1 General	<i>13</i>
1.1.2 Específicos	<i>13</i>
1.2 Justificación	<i>13</i>
2 REVISIÓN DE LITERATURA	<i>15</i>
2.1 Unidades hidrológicas del Ecuador	<i>15</i>
2.2 Sistemas de Información Geográfica (SIG)	<i>16</i>
2.3 Cuencas hidrográficas	<i>17</i>
2.4 Sistemas hidrográficos	<i>17</i>
2.5 Análisis morfométrico	<i>17</i>
2.5.1 Parámetros de forma	<i>18</i>
2.5.1.1 Área de la cuenca	<i>18</i>
2.5.1.2 Perímetro	<i>18</i>
2.5.1.3 Longitud de la cuenca	<i>18</i>
2.5.1.4 Longitud del curso principal	<i>19</i>
2.5.1.5 Elevación de la cuenca	<i>19</i>
2.5.1.6 Relación de elongación	<i>19</i>
2.5.1.7 Coeficiente de compacidad	<i>20</i>
2.5.2 Parámetros de relieve	<i>20</i>
2.5.2.1 Curva hipsométrica	<i>20</i>
2.5.2.2 Pendiente media	<i>21</i>
2.5.2.3 Pendiente del cauce principal	<i>21</i>
2.5.2.4 Coeficiente de rugosidad	<i>22</i>
2.5.2.5 Factor de forma de Horton	<i>22</i>
2.5.3 Parámetros relativos al drenaje	<i>23</i>

2.5.3.1	Densidad de Drenaje	23
2.5.3.2	Longitud total de la red	24
2.5.3.3	Orden de la red hídrica	24
CAPÍTULO III		25
3	MATERIALES Y MÉTODOS	25
3.1	Área de estudio	25
3.2	Delimitación de las cuencas	26
3.3	Caracterización de cuencas	29
3.3.1	Propiedades de superficie	29
3.3.2	Propiedades de la red hídrica	29
3.3.3	Parámetros asociados a la forma de la cuenca	30
3.4	Análisis de dendrograma	30
3.5	Análisis de componentes principales	37
CAPÍTULO IV		46
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
4.1	Resultados	46
4.1.1	Análisis de conglomerados.	46
4.1.2	Componentes principales.	47
cAPÍTULO V		54
5	CONCLUSIONES	54
CAPÍTULO VI		56
6	RECOMENDACIONES	56
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
8	ANEXOS	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Longitud de una cuenca hidrográfica.	19
Figura 2: Curvas hipsométricas.....	21
Figura 3: Área de estudio, vertiente del Pacífico del Ecuador.	25
Figura 4: MDT del Ecuador.	26
Figura 5: MDT relleno.....	27
Figura 6: Dirección de flujo del Ecuador.....	27
Figura 7: Sistemas hidrográficos del Ecuador.	28
Figura 8: Shape de los sistemas hidrográficos del Ecuador.	28
Figura 9: Transformación de Johnson para la densidad de drenaje.	32
Figura 10: Transformación de Johnson para el factor de forma.	33
Figura 11: Transformación de Johnson para la rugosidad de la cuenca.....	33
Figura 12: Transformación de Johnson para la relación de elongación.....	34
Figura 25: Transformación de Johnson para el área poblada.	38
Figura 26: Transformación de Johnson para el área de bosque.....	39
Figura 27: Transformación de Johnson para caudal.	39
Figura 28: Transformación de Johnson para el área de cultivo.	40
Figura 29: Transformación de Johnson para la densidad de drenaje.	41
Figura 30: Transformación de Johnson para el área de mosaico agropecuario.	41
Figura 31: Transformación de Johnson para la precipitación.	42
Figura 32: Transformación de Johnson para la rugosidad de la cuenca.....	43
Figura 33: Transformación de Johnson para la relación de elongación.....	43
Figura 34: Análisis de conglomerados (dendrograma).	46
Figura 35: Gráfica de sedimentación de correlaciones.....	48
Figura 36: Distribución de las variables de las cuencas en relación con el primer y segundo componente.	49
Figura 37: Comportamiento de variables en el primer componente principal.	50
Figura 38: Comportamiento de variables en el segundo componente principal.....	50
Figura 39: Comportamiento de variables en el tercer componente principal.	51
Figura 40: Comportamiento de variables en el cuarto componente principal.....	51
Figura 41: Componentes principales para la caracterización de las cuencas con vertientes al Pacífico.....	52

LISTAS DE TABLAS

Tabla 1: Unidades hidrográficas del Ecuador.	15
Tabla 2: Sistemas hidrográficos del Ecuador.....	15
Tabla 3: Parámetros a analizar.....	31
Tabla 4: Resultados de la prueba de normalidad.	32
Tabla 5: Datos transformados.	35
Tabla 6: Datos transformados y estandarizados.....	36
Tabla 7: Datos para el ACP.	37
Tabla 8: resultados de la prueba de normalidad.....	38
Tabla 9: Datos transformados.	44
Tabla 10: Datos transformados y estandarizados.....	45
Tabla 11: Análisis de componentes principales.-.....	47
Tabla 12: Componentes que representan el 84,5% de variación en los datos de las cuencas hidrográficas.	48

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: MDT de Ecuador (30*30m)	62
Anexo 2: Mapa de uso de suelos de la vertiente del Pacífico.....	63
Anexo 3: Características morfométricas de los sistemas hidrográficos.	64
Anexo 4: Tabla de datos para el análisis de componentes principales.....	65

RESUMEN

El análisis morfométrico de la vertiente del Pacífico considera la caracterización y el análisis estadístico de los 23 sistemas hidrográficos de dicha vertiente, esto para demostrar que existe una relación entre las características de los sistemas, por lo tanto, entre los sistemas en sí. Este trabajo mantiene diferentes etapas, desde la revisión bibliográfica, la caracterización morfométrica, los análisis estadísticos y el análisis de resultados. Se caracterizaron los 23 sistemas hidrográficos obteniendo así los datos de: relación de elongación, densidad de drenaje, coeficiente de compacidad, factor de forma y la rugosidad de la cuenca, las cuales se sometieron a dos análisis, un análisis clúster y uno de componentes principales. Para el análisis de componentes principales se descartaron siete sistemas, por falta de datos de precipitación y caudal. Los sistemas se unieron en cinco grupos, demostrando la similitud de los datos; en el análisis de componentes principales fueron válidas los 4 primeros componentes, el primer componente describe la cobertura vegetal, el segundo componente se afecta por la forma del sistema, el tercer componente agrupa la capacidad de drenaje y el último componente las características de drenaje y población.

PALABRAS CLAVES: SISTEMA HIDROGRÁFICO, VERTIENTE DEL PACÍFICO, CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA, ANÁLISIS CLÚSTER.

ABSTRACT

The morphometric analysis of the Pacific slope considers the characterization and statistical analysis of the 23 hydrographic systems of this slope, this to demonstrate that there is a relationship between the characteristics of the systems, therefore, between the systems themselves. This work maintains different stages, from the bibliographic review, the morphometric characterization, the statistical analyses and the analysis of results. The 23 hydrographic systems were characterized thus obtaining the data: elongation ratio, drainage density, compactness ratio, form factor and the roughness of the basin, which were subjected to two analyzes, a cluster analysis and one of main components. For the analysis of main components, seven systems were discarded, due to lack of rainfall and flow data. The systems were joined in five groups, demonstrating the similarity of the data; in the analysis of main components, the first 4 components were validated, the first component describes the vegetation cover, the second component is affected by the system form, the third component groups the drainage capacity and the last component the drainage characteristics and population.

KEYWORDS: HYDROGRAPHIC SYSTEM, PACIFIC SLOPE, MORPHOMETRIC CHARACTERIZATION, CLUSTER ANALYSIS.

CAPITULO I

1 INTRODUCCIÓN

Guerra y Cunha, (1996) manifiestan que las cuencas hidrográficas son consideradas excelentes unidades de gestión de los elementos naturales y sociales, pues, en esa óptica, es posible acompañar los cambios introducidos por el hombre y las respectivas respuestas de la naturaleza. De acuerdo con estos autores, en naciones más desarrolladas la cuenca hidrográfica también ha sido utilizada como unidad de planificación y gestión, compatibilizando los diversos usos e intereses por el agua y garantizando su calidad y cantidad.

La delimitación de una cuenca hidrográfica es uno de los primeros y más comunes procedimientos ejecutados en análisis hidrológicos o ambientales. Para ello, ha sido común la utilización de informaciones de relieve en formato analógico, como mapas y cartas, lo que compromete la confiabilidad y la reproducción de los resultados debidos a la carga de subjetividad inherente a los métodos manuales (Cardoso, Dias, Carlos, Soares, & Pedro, 2006).

Según Ferreira, (1997), los Sistemas de Información Geográfica pueden considerarse un instrumento para asignar e indicar respuestas a las diversas cuestiones sobre planificación urbana y regional, medio rural y levantamiento de los recursos renovables, describiendo los mecanismos de los cambios que operan en el medio ambiente y auxiliando la planificación y manejo de los recursos naturales de regiones específicas.

El objetivo del presente trabajo fue realizar un análisis morfológico de los sistemas hidrográficos que forman la vertiente del Pacífico del Ecuador, esto con el fin de obtener datos para estudios más completos y para identificar como se agrupan los sistemas y bajo que parámetros, los datos fueron obtenidos a partir de la caracterización morfométrica de 23 sistemas hidrográficos, para el primer análisis denominado clúster se utilizó los siguientes parámetros: factor de forma de Horton, relación de elongación, densidad de drenaje, coeficiente de compacidad y la rugosidad de la cuenca; para el segundo análisis estadístico denominado componentes principales, a los parámetros anteriores se les añadió: precipitación, caudal, área poblada, área de bosque, área de cultivo y área de mosaico agropecuario. Como base del trabajo estadístico se utilizó la metodología aplicada en los estudios "Caracterización morfométrica de la cuenca alta del arroyo Las Lajas, Córdoba: Un análisis estadístico" (Doffo & Bonorino, 2005) y "Análisis de la relación entre variables morfométricas y biofísicas en la estimación de características probabilísticas para la oferta hídrica superficial en Colombia" (Burbano-Girón, Domínguez, & Barón-Ruiz, 2016).

1.1 Objetivos

1.1.1 General

Analizar estadísticamente las características morfométricas de los sistemas hidrográficos que conforman la vertiente del Pacífico del Ecuador geográfico.

1.1.2 Específicos

- Obtener los datos morfométricas de los 23 sistemas hidrográficos que conforman la vertiente del Pacífico del Ecuador geográfico, a partir de un Sistema de Información Geográfico denominado ArcGis 10.3.
- Analizar mediante clusters los parámetros morfométricos seleccionados y su relación entre sistemas.
- Analizar mediante componentes principales los parámetros morfométricos seleccionados y su relación con el comportamiento hidrológico.

1.2 Justificación

Según CEPAL, (2011) desde el año 1983 hasta la fecha no se ha actualizado el mapa hidrogeológico nacional, realizado a escala 1:1 000 000, ni se dispone de estudios para establecer estrategias de protección del agua, definir y priorizar soluciones y mantener un sistema adecuado de monitoreo y observación.

Para ello es necesario obtener datos y realizar estudios en la zona de la vertiente del Pacífico de Ecuador, este estudio tiene como fin generar un conocimiento global de cómo se comportan y relacionan los sistemas hidrográficos a partir de sus características morfométricas.

La técnica de detección y Sistemas de Información Geográfica es un método conveniente para el análisis morfométrico, las imágenes de satélite proporcionan una vista sinóptica de un área grande y es muy útil en el análisis de morfometría cuenca de drenaje, estas técnicas han probado ser herramientas muy útiles para la caracterización morfométrico con dominio de cuencas y subcuencas (Aher, Adinarayana, & Gorantiwar., 2013; Grohmann, 2004; Singh, 1994).

Para Chandrashekar, Lokesh, Sameena, roopa, & Ranganna, (2015) los sistemas hidrográficos, cuencas y sub-cuencas son consideradas como unidades fundamentales para fines administrativos en la conservación de los recursos naturales. El concepto de manejo de cuencas reconoce las interrelaciones entre los vínculos entre las tierras altas, tierras bajas, el uso del suelo, geomorfología, la pendiente y el suelo.

Las relaciones morfométricas están estrechamente relacionadas a la función hidrológica, ejemplo de esto, es que obteniendo la forma de la red de drenaje de los sistemas se pueden analizar datos como: el tiempo de concentración, tiempo mínimo en formar la esorrentía de una cuenca (Cruz Romero, Gaspari, Rodríguez Vagaría, Carrillo González, & Téllez López, 2015); de la densidad de drenaje se puede identificar el estado erosivo de una cuenca (Senciales, J.M. y Ferre, n.d.).

CAPÍTULO II

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Unidades hidrológicas del Ecuador

Según SENAGUA, (2009) el Ecuador está comprendido por dos regiones hidrográficas o vertientes según presenta la Tabla 1.

Tabla 1: Unidades hidrográficas del Ecuador.

Vertiente	Área en Ecuador (Km2)	% en Ecuador
Pacífico	124563,83	48,59
Amazonas	131806,17	51,41
Total	256370	100

Fuente: SENAGUA, (2009)

El Consejo Nacional de Recursos Hídricos, (2002) mantiene la división para el Ecuador en 31 sistemas hidrográficos, los cuales se encuentran repartidos 24 en la vertiente del Pacífico y 7 a la vertiente del Amazonas.

Los sistemas hidrográficos identificados en el Ecuador se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 2: Sistemas hidrográficos del Ecuador.

N°	VERTIENTE	NOMBRE
1	Pacífico	Carchi
2	Pacífico	Mira
3	Pacífico	Mataje
4	Pacífico	Cayapas
5	Pacífico	Verde
6	Pacífico	Esmeraldas
7	Pacífico	Muisne
8	Pacífico	Jama
9	Pacífico	Chone
10	Pacífico	Portoviejo
11	Pacífico	Jipijapa
12	Pacífico	Zapotal
13	Pacífico	Guayas
14	Pacífico	Taura

15	Pacífico	Cañar
16	Pacífico	Naranjal-Pagua
17	Pacífico	Jubones
18	Pacífico	Santa Rosa
19	Pacífico	Arenillas
20	Pacífico	Zarumilla
21	Pacífico	Puyango
22	Pacífico	Catamayo
23	Pacífico	Puná
24	Pacífico	Galápagos
25	Amazonas	San Miguel-Putumayo
26	Amazonas	Napo
27	Amazonas	Cunambo
28	Amazonas	Pastaza
29	Amazonas	Morona
30	Amazonas	Santiago
31	Amazonas	Chinchi

Fuente: Consejo Nacional de Recursos Hídricos, (2002)

2.2 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

La información geográfica es un componente fundamental en un gran número de actividades de toda índole, y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son la herramienta básica para su manejo y utilización (Olaya, 2009).

Según Ferreira, (1997) los Sistemas de Información Geográfica pueden considerarse un instrumento para asignar e indicar respuestas a las diversas cuestiones sobre planificación urbana, regional, medio rural y levantamiento de los recursos renovables, describiendo los mecanismos de los cambios que operan en el medio ambiente y auxiliando la planificación y manejo de los recursos naturales de regiones específicas.

Para Gaspari et al., (2012) en la actualidad estas herramientas pueden ayudar a realizar la caracterización espacio temporal de las propiedades morfométricas de las cuencas hídricas y de redes de drenaje. La técnica de percepción remota y SIG es un método conveniente para el análisis morfométrico ya que las imágenes de satélite proporcionan una vista sinóptica de un área grande y son muy útiles en el análisis de la morfometría de cuencas de drenaje (Rahaman et al., 2015).

2.3 Cuencas hidrográficas

Según Rahaman et al., (2015) “Una cuenca es una unidad hidrológica natural, con un área topográficamente delimitada drenada por un sistema de corriente de la que el escurrimiento resultante de los flujo de precipitación a partir de un solo punto en la corriente”

Para Reyes et al., (2010) “Una cuenca hidrográfica es el área de aguas superficiales o subterráneas que vierten a una red natural con una o varias corrientes superficiales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor”. Mientras Heras, (1972) define “la cuenca hidrográfica, considerando un punto dado de su curso, al área limitada por el contorno en el interior del cual el agua precipitada corre por su superficie, se encuentra y pasa por un punto determinado del cauce.

Reyes et al., (2010) considera las cuencas como unidades territoriales ideales para la gestión del agua, ya que representan las principales formas terrestres en el ciclo hidrológico que captan y concentran el agua que viene de las precipitaciones; forman un espacio en la cual interactúa el agua con los sistemas físico y biótico, produciendo la interrelación e interdependencia entre dichos sistemas.

2.4 Sistemas hidrográficos

Se puede considerar que el ciclo hidrológico es un sistema compuesto por la precipitación, evapotranspiración, escorrentía y otras fases, este “sistema hidrológico” posee un volumen o estructura en el espacio, que acepta agua operando inmediatamente y produciendo salidas (Cabrera & Eng, n.d.).

Según el estudio de División Hidrográfica del Ecuador del Ministerio del Ambiente se considera un sistema hidrográfico al “*Agrupamiento de cuencas hidrográficas, considerando su homogeneidad climática y espacial*” (Consejo Nacional de Recursos Hídricos, 2002).

2.5 Análisis morfométrico

El estudio morfométrico de la cuenca de drenaje proporciona información precisa al medir características de la red de arroyos de la cuenca. Es bien sabido que la influencia de la morfometría de la cuenca es muy importante en la comprensión del desarrollo topográfico y forma de relieve, las características del suelo y de erosión (Kumar Rai et al., 2017).

Según Fernanda Gaspari et al., (2012) se denomina análisis morfométrico al “estudio de un conjunto de variables lineales, de superficie, de relieve y drenaje; que permite conocer las características físicas de una cuenca, lo cual permite realizar comparaciones entre varias

cuencas”, ayudando así a la interpretación del funcionamiento hidrológico y como sirviendo como herramienta para estrategias de manejo.

Chandrashekar et al., (2015) menciona que el análisis morfométrico de una cuenca es de gran ayuda en la comprensión de la influencia de la morfometría, en los accidentes geográficos y sus características. Considera que el análisis morfométrico es el método más satisfactorio que permite la comprensión de la relación de diversos aspectos dentro de una cuenca de drenaje.

2.5.1 Parámetros de forma

2.5.1.1 Área de la cuenca

Reyes et al., (2010) considera que el área de la cuenca es probablemente la característica morfométrica e hidrológica más importante. El área es el tamaño de la superficie de cada cuenca en Km^2 . Se puede obtener mediante la digitalización y poligonización de las cuencas en un software de sistema de información geográfica. El área de una cuenca se encuentra relacionada con los procesos que en ella ocurren (Anaya, 2012).

2.5.1.2 Perímetro

El perímetro de la cuenca o la longitud de la línea de divorcio de la hoya es un parámetro importante, pues en conexión con el área nos puede decir algo sobre la forma de la cuenca (Reyes et al., 2010).

2.5.1.3 Longitud de la cuenca

La longitud, L, de la cuenca puede estar definida como la distancia horizontal del río principal entre un punto aguas abajo (estación de aforo) y otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca (Fernanda Gaspari et al., 2012)

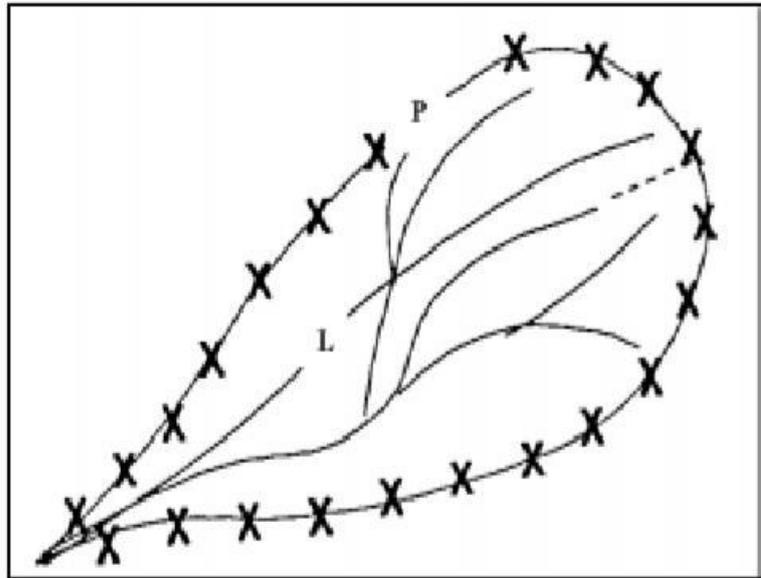


Figura 1: Longitud de una cuenca hidrográfica.
Fuente: Gaspari, (2012)

2.5.1.4 Longitud del curso principal

La longitud del curso principal está considerada como la distancia horizontal del río principal, desde su nacimiento hasta su punto de desfogue o cierre, dentro de los límites de la cuenca, éste parámetro se expresa normalmente en kilómetros (Reyes et al., 2010).

2.5.1.5 Elevación de la cuenca

Reyes et al., (2010) define la elevación de la cuenca como la variación altitudinal de la cuenca hidrográfica que incurre directamente en el clima, por lo tanto, en el régimen hídrico.

2.5.1.6 Relación de elongación

Se define como la relación entre el diámetro de un círculo que posea la misma superficie de la cuenca y la longitud máxima de la cuenca (Díaz, Mamado, Iturbe, Esteller, & Reyna, 1999).

Según Díaz et al., (1999) cuando el valor de la relación de elongación se acerca a la unidad se considera que la cuenca es plana; mientras para cuencas con relieve pronunciado, el valor se encuentra entre 0,6 y 0,8.

Su formulación matemática se presenta en la ecuación (1):

$$Re = 1,128 * \frac{\sqrt{A}}{Lm} \quad (1)$$

Donde:

Re: Relación de elongación

A: Área de la cuenca.

Lm: Longitud máxima de la cuenca

2.5.1.7 Coeficiente de compacidad

Este parámetro es adimensional y relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo teórico de área equivalente al de la cuenca (FJ Gaspari, 2002), de esta manera mientras mayor es el índice, la forma de la cuenca es más distante al círculo (Reyes et al., 2010).

El índice de compacidad se define como:

$$Kc = 0,28 * \left(\frac{P}{\sqrt{A}} \right) \quad (2)$$

Donde:

Kc: Índice de compacidad

P: Perímetro de la cuenca (km)

A: Área de la cuenca (km²)

2.5.2 Parámetros de relieve

2.5.2.1 Curva hipsométrica

Para Reyes et al., (2010) este parámetro “constituye un criterio de la variación territorial del escurrimiento resultante de una región, lo que genera la base para caracterizar zonas climatológicas y ecológicas”

La curva hipsométrica es la representación gráfica de la variación altitudinal de una cuenca y se obtiene a partir de un plano topográfico tomándose los valores en porcentajes del área que están por debajo de una determinada altura, que inicialmente serán la del punto más bajo de la cuenca e irá aumentando de acuerdo a los valores de las cotas de la curva de nivel que encierra las franjas de terreno por ellas definidas y el punto de salida que es generalmente el sitio más bajo de la cuenca (Villón, 2002).

Se divide en tres zonas:

- 1.-Zona donde predomina la producción de sedimentos y aguas (ríos jóvenes).
- 2.- Zona donde predomina el transporte de ambos (ríos maduros)
- 3.- Zona caracterizada por la deposición de sedimentos (ríos en etapa de vejez) (Llamas, 1993).

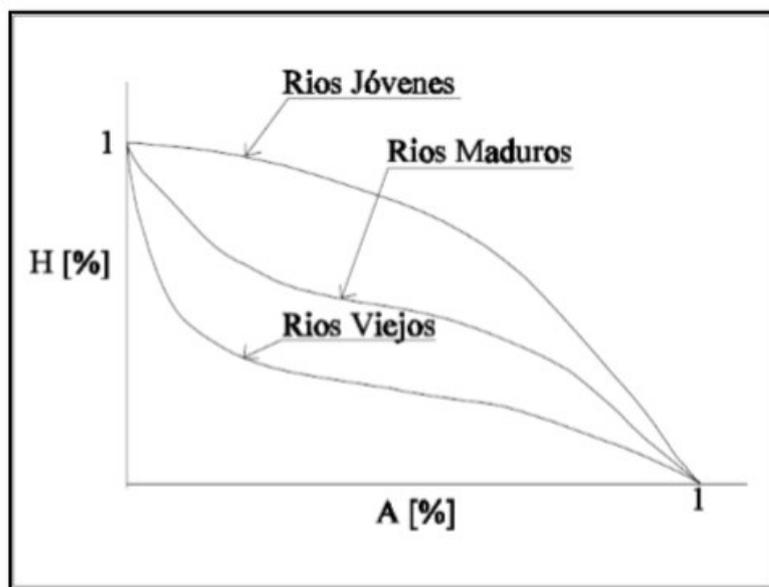


Figura 2: Curvas hipsométricas.
Fuente: Gaspari, (2012)

2.5.2.2 Pendiente media

La pendiente de la cuenca, es un parámetro muy importante en el estudio de toda la cuenca, tiene una relación importante y compleja con la infiltración del suelo, y la contribución del agua subterránea a la escorrentía. Es uno de los factores que controla el tiempo de escurrimiento y concentración de la lluvia en los canales de drenaje, y tiene una importancia directa en relación a las crecidas (Anaya, 2012).

Para Reyes et al., (2010) “La pendiente es la variación de la inclinación de una cuenca, su determinación es importante para definir el comportamiento de la cuenca con respecto a deslizamientos de las capas de suelo. La pendiente media de la cuenca se calcula mediante un plano topográfico que contra curvas de nivel con igual desnivel entre ellas.

2.5.2.3 Pendiente del cauce principal

El conocimiento de la pendiente del cauce principal de una cuenca, es un parámetro importante, en el estudio del comportamiento de recurso hídrico, como por ejemplo, para la determinación de las características optimas de su aprovechamiento hidroeléctrico, o en la solución de problemas de inundaciones (Anaya, 2012).

Reyes et al., (2010) menciona que la pendiente del cauce puede incidir en la capacidad que tiene el flujo para llevar sedimentos, por cuanto la relación es directamente proporcional con la velocidad del agua.

Se determina según la relación entre el desnivel que hay entre los extremos el cauce y la proyección horizontal de su longitud (Villón, 2002).

a. Método de elevaciones externas

Este método consiste en establecer el desnivel entre dos puntos, el punto más alto y el más bajo del río (Reyes et al., 2010). Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$S = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} * 100 \quad (3)$$

Donde:

S: Pendiente media del cauce en %.

H_{max}: Altitud máxima del cauce (ms.n.m.).

H_{min}: Altitud mínima del cauce (ms.n.m.).

L: Longitud del cauce principal de la cuenca (km)

2.5.2.4 Coeficiente de rugosidad

Es la relación existente entre el desnivel de la cuenca (H) y su densidad de drenaje (Dd). Es adimensional (Gaspari et al., 2009). Patton (1988) menciona que cuencas muy disectadas con bajo relieve presentan un coeficiente de rugosidad (Rd) similar a cuencas moderadamente disectadas.

El número de rugosidad se expresa mediante la siguiente ecuación (Lara et al., 2016):

$$Rd = (H_{max} - H_{min}) * Dd \quad (4)$$

Donde:

H_{max}: Altura máxima

H_{min}: Altura Mínima

Dd: Densidad de drenaje

2.5.2.5 Factor de forma de Horton

Se considera a la relación existente entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud máxima, este factor permite medir la tendencia de la cuenca hacia las crecidas. Es

un parámetro adimensional que indica la forma alargada o redonda de la cuenca (Reyes et al., 2010).

Lux, (2014) considera que mientras más bajo es el factor de forma, una cuenca está menos sujeta a crecidas que una cuenca que mantenga la misma área y el factor de forma sea mayor. El factor de forma se define por la ecuación (5):

$$F = \frac{A}{Lm^2} \quad (5)$$

(Horton, 1945)

Donde:

F: Factor de forma.

A: Área de la cuenca.

Lm: Longitud máxima de la cuenca.

2.5.3 Parámetros relativos al drenaje

2.5.3.1 Densidad de Drenaje

La densidad de drenaje, es un parámetro que indica la posible naturaleza de los suelos, que se encuentran en la cuenca. También da una idea sobre el grado de cobertura que existe en la cuenca. Valores altos de drenaje, representan zonas con poca cobertura vegetal, suelos fácilmente erosionables o impermeables. Por el contrario, valores bajos, indican suelos duros, poco erosionables o muy permeables y densas coberturas vegetales (Villón, 2002).

Se expresa con la siguiente ecuación (Villón, 2002):

$$D_d = \frac{L}{A} \quad (6)$$

Donde:

Dd: densidad de drenaje.

L: Longitud total de las corrientes perennes o intermitentes (km).

A: Área total de la cuenca (km²).

2.5.3.2 Longitud total de la red

Reyes et al., (2010) considera que “la longitud total de la red se calcula considerando las corrientes perennes y las intermitentes, incluyendo los cauces efímeros, es decir, aquellos que solo llevan agua durante las lluvias”.

2.5.3.3 Orden de la red hídrica

a. Número de orden

Se considera al número de orden como una clasificación que se da a diferentes cauces y que toman cierto valor, según el grado de bifurcación (Reyes et al., 2010). Para la realización de esta clasificación se requiere de un plano de la cuenca que incluya corrientes perennes e intermitentes (Villón, 2002).

b. Orden de las corrientes

Reyes et al., (2010) denomina corrientes de primer orden a aquellas portadoras de aguas de nacimientos y que no provienen de afluentes, las corrientes de segundo orden se consideran como la suma de las corrientes de primer orden, la unión de dos corrientes de segundo orden forman una de tercer orden, así la unión de las corrientes de orden “n” forman las corrientes “n+1”.

CAPÍTULO III

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

El área de estudio corresponde a los 23 sistemas hidrográficos pertenecientes a la vertiente del Pacífico del Ecuador geográfico, con una superficie aproximada de 123 216 km² que pertenecen al 48,06% del área total del país (Figura 3). El Consejo Nacional de Recursos Hídricos del Ecuador planificó los recursos hídricos con la división en sistemas, cuencas, subcuencas (Consejo Nacional de Recursos Hídricos, 2002).

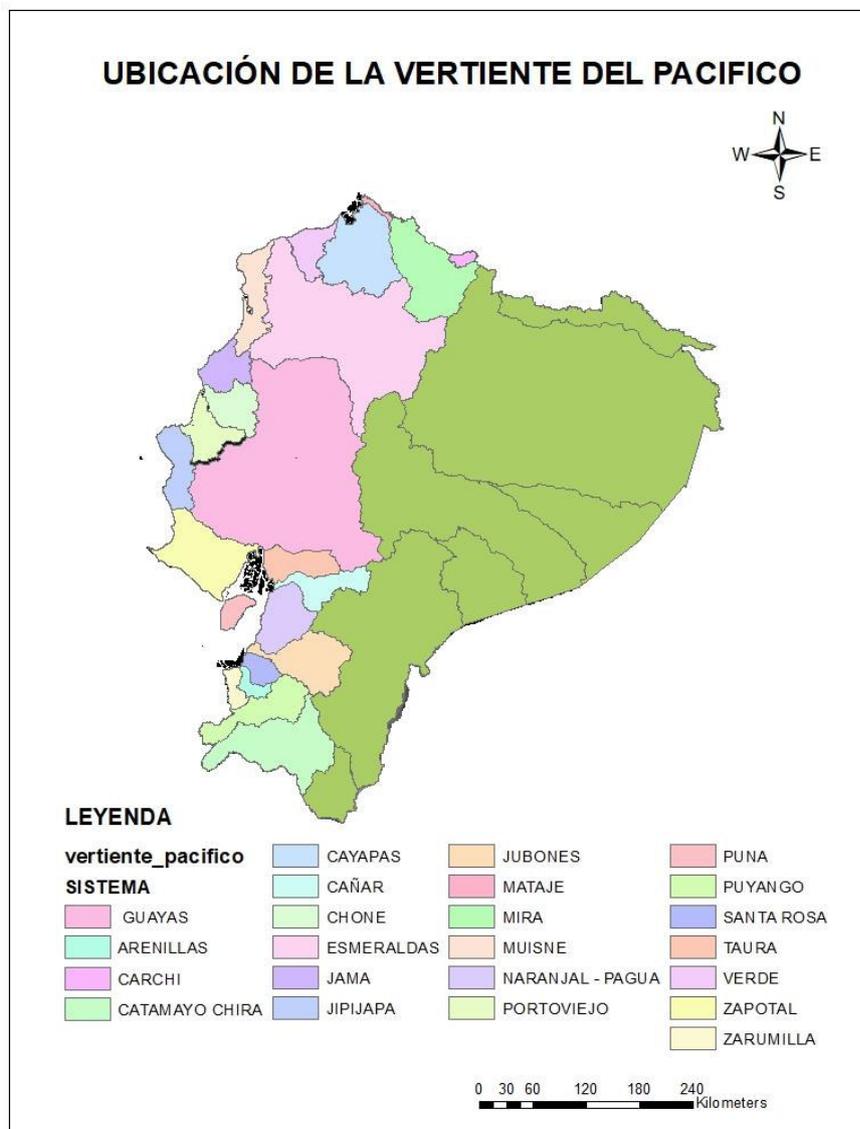


Figura 3: Área de estudio, vertiente del Pacífico del Ecuador.

Fuente: Cartografía IGM

3.2 Delimitación de las cuencas

El proceso de delimitación de cuencas se realizó a partir de un modelo digital de terreno de dimensión 30 × 30 m del Ecuador, mediante un software de geoprocésamiento denominado ArcGIS versión 10.3 (Figura 4).

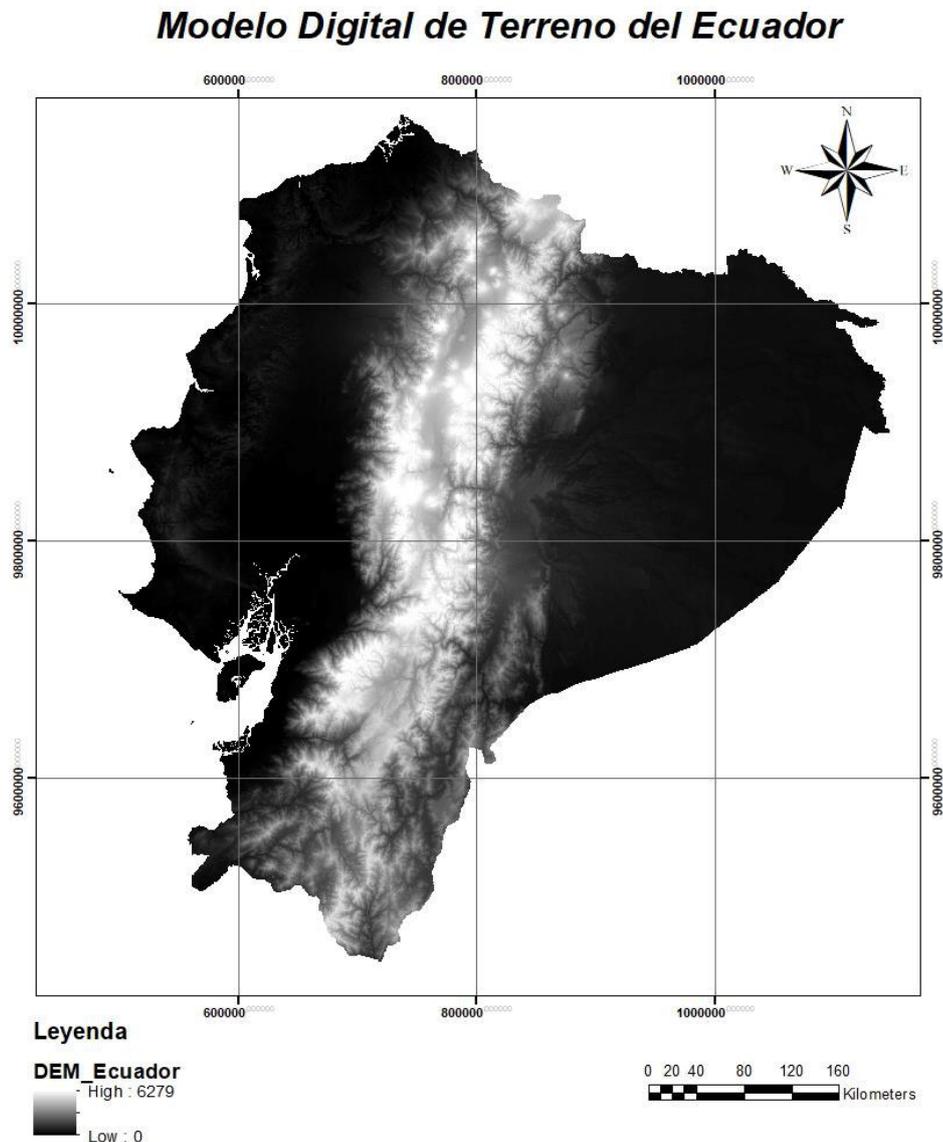


Figura 4: MDT del Ecuador.
Fuente: Instituto Geográfico Militar, (2008)

Previo a la delimitación de cuencas, primero se necesita rellenar sumideros, los sumideros se deben rellenar para garantizar la representación correcta de cuencas y arroyos (Matovelle, n.d.), esto mediante la herramienta “Fill” del “ArcToolbox”, “Spatial Analyst Tools”, del paquete “Hydrology” (Figura 5).

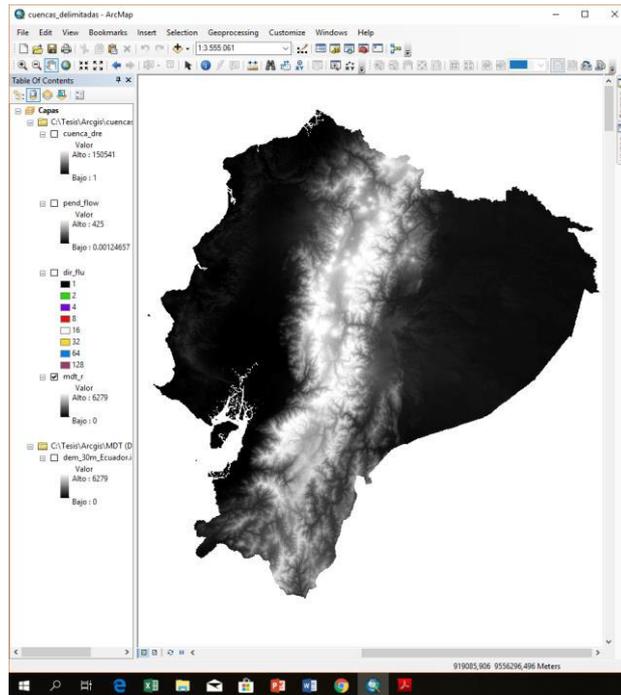


Figura 5: MDT rellenado.
Fuente: Cartografía IGM

Una vez rellenado el MDT se procede a calcular la dirección de flujo, la cual está determinada por la dirección de mayor pendiente desde cada celda (Matovelle, n.d.), la dirección de flujo se obtiene a partir de la herramienta “Flow Direction” del “ArcToolbox”, “Spatial Analyst Tools”, del paquete “Hydrology” (Figura 6).

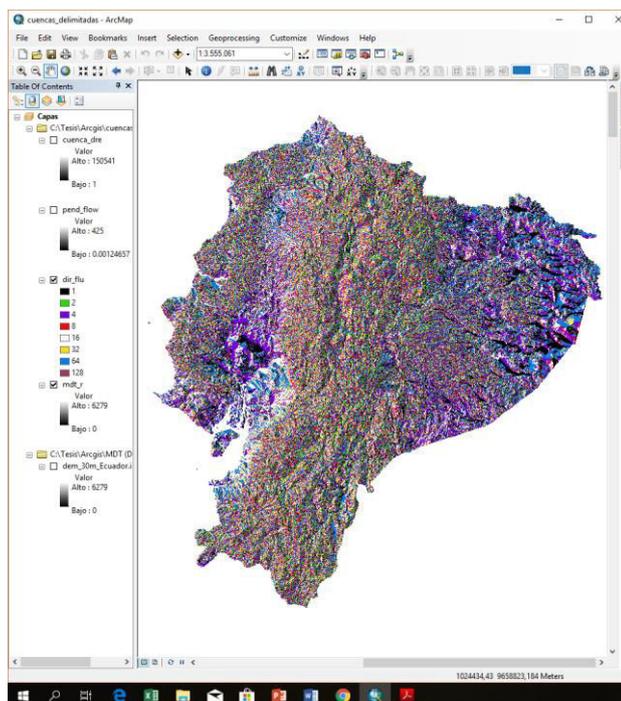


Figura 6: Dirección de flujo del Ecuador.
Fuente: Cartografía IGM

La determinación de cuencas de drenaje se realiza mediante la creación de un ráster que delinea todas las cuencas de drenaje, esto se realiza mediante la herramienta “BASIN” del “ArcToolbox”, “Spatial Analyst Tools” del paquete “Hydrology”. de software ArcGIS 10.3, obteniendo así la división hidrográfica del Ecuador (Figura 7).



Figura 7: Sistemas hidrográficos del Ecuador.
Fuente: Cartografía IGM

Una vez obtenido el ráster, se lo debe pasar a shape para poder recortarlo, mediante la herramienta “Raster to Polyline” del “ArcToolBox”, “Conversion Tools” del paquete “From Raster” (Figura 8).

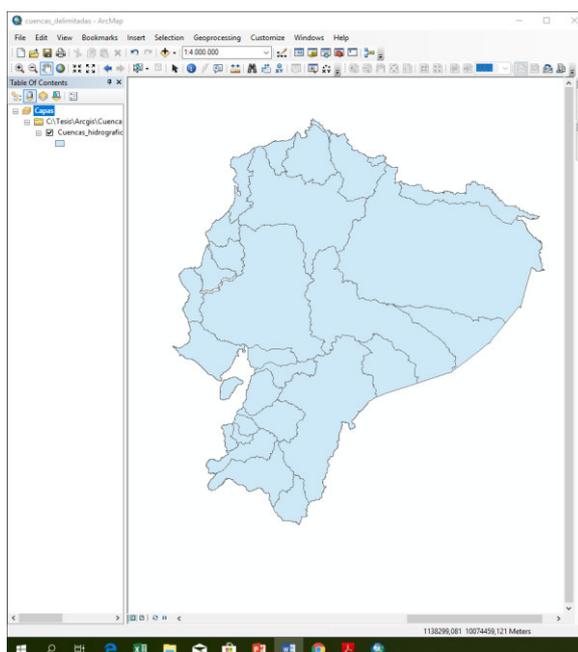


Figura 8: Shape de los sistemas hidrográficos del Ecuador.
Fuente: Cartografía IGM

3.3 Caracterización de cuencas

De la división hidrográfica del Ecuador, se tomaron en cuenta los veinte y tres sistemas de la parte central y oeste del país. Para la caracterización de cada sistema se procedió a recortar el MDT y el shape creado, sistema por sistema.

3.3.1 Propiedades de superficie

Una vez recortado el shape, se obtienen los datos de área, perímetro, cota máxima, cota mínima y las coordenadas de los centroides, para esto en la tabla de atributos se agrega una columna, se da click derecho en la misma abriendo la herramienta "Calculate Geometry" y se selecciona cada uno de los datos necesarios.

Seguido de esto se obtuvo la pendiente promedio de la cuenca, mediante la herramienta "Slope" del paquete "Surface" del ArcToolbox, una vez obtenido el mapa de pendiente se reclasifico en porcentaje mediante la herramienta "Reclassify" del paquete "Reclass" del ArcToolbox. Para sacar el resumen de los datos obtenidos del mapa utilizamos la herramienta "Zonal Statistics as Table" del paquete "Zonal" del "ArcToolbox", los datos de las filas Value y Count se pasaron a Excel y con la fórmula (suma (Promedio* número de ocurrencias)) /suma (número de ocurrencias), obteniendo así la pendiente media de la cuenca.

3.3.2 Propiedades de la red hídrica

Como primer parámetro de la red hídrica se obtuvo la longitud del cauce principal mediante la herramienta "Flow Length" del paquete "Hydrology".

Una vez obtenido el dato de la longitud de la red se procedió a calcular el orden de la red hídrica mediante las herramientas "Stream Link" y "Stream Order" del paquete "Hydrology".

Para obtener la longitud total de la red hídrica se convirtió el shape¹ de stream order a un shape de polilínea, a través de la tabla de atributos se calculó la sumatoria de la longitud de cada uno de las ordenes hídricas sumándolas al final.

Seguido de la longitud total se calculó la pendiente promedio de la red hídrica, para lo cual se unieron los shape es de pendientes reclasificadas y el de la red hídrica, mediante la herramienta "Interpolate Shape". Una vez obtenido el nuevo shape se creó una tabla estadística zonal, de la tabla se extrae el valor medio y el número de ocurrencias (MEAN,

¹ "Un shapefile o shape es un formato sencillo y no topológico que se utiliza para almacenar la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas." (Esri, n.d.)

COUNT), en Excel se lo pondera y se obtuvo la pendiente promedio dividiendo la suma de la ponderación para la suma de repeticiones. El análisis de geoprocesamiento de datos se realizó en el software ArcGIS 10.3 (Doffo & Bonorino, 2005).

3.3.3 Parámetros asociados a la forma de la cuenca

La pendiente del cauce principal en porcentaje se obtuvo a través de la fórmula:

$(\text{cota máxima} - \text{cota mínima}) / \text{longitud del cauce principal}$ (F & JA, 1987; FJ Gaspari, 2002)

El factor de forma de Horton se calculó mediante la fórmula:

$\text{Área} / \text{Longitud del cauce principal}^2$ (Horton, 1945).

La relación de elongación está dada y se calculó mediante la fórmula:

$1,128 * \left(\sqrt[2]{\text{Área}} / \text{Longitud del cauce principal} \right)$ (Díaz et al., 1999).

La determinación de la densidad de drenaje se efectuó a través de la fórmula:

$\text{Longitud total de la red hidrica} / \text{Área}$ (Villón, 2002).

El coeficiente de compacidad se obtuvo mediante la utilización de la fórmula:

$0,28 * \left(\text{perímetro} / \sqrt[2]{\text{Área}} \right)$ (Villón, 2002).

Por último, la rugosidad de la cuenca fue obtenida mediante la fórmula:

$\text{densidad de drenaje} * (\text{cota máxima} - \text{cota mínima})$ (Lara et al., 2016).

3.4 Análisis de dendrograma

El desarrollo del análisis estadístico de conglomerados² se realizó con el software estadístico R y Minitab, y se analizaron los siguientes vectores de datos de los parámetros morfométricos:

² Para De la Fuente Fernández, (2011) el análisis de conglomerados “es una técnica estadística multivariante que busca agrupar elementos (o variables) tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos”. Autores como Garcia considera que es una técnica de grupo estructural, que tienen como objetivo resumir información, dentro de este análisis ninguna variable se considera dependiente, no se puede analizar diferentes tipos de escalas (García, Serrano, & Cavazos, n.d.).

- Factor de forma (Kf)
- Relación de elongación (Re)
- Densidad de drenaje (Dd)
- Coeficiente de compacidad (Kc)
- Rugosidad de la cuenca (Rd)

Se analizaron 23 sistemas hidrográficos cuyos nombres y parámetros se pueden observar en la tabla 3

Tabla 3: Parámetros a analizar.

N° del sistema	Nombre del sistema	Parámetros asociados a la forma de la cuenca				
		Factor de forma de Horton (Kf)	Relación de elongación (Re)	Densidad de drenaje (Dd)	Coeficiente de compacidad (Kc)	Rugosidad de la cuenca (Rd)
1	Esmeraldas	0,181033	0,479941	2,142947	2,596425	12396,945506
2	Guayas	0,346947	0,664417	3,176163	2,270564	15795,059602
3	Cañar	0,161921	0,453900	6,694941	2,558339	29946,472972
4	Catamayo	0,194271	0,497179	2,056734	2,378948	7433,036427
5	Puyango	0,319283	0,637377	2,039559	2,418498	7568,805296
6	Mira	0,156744	0,446586	2,065565	2,053530	9916,776221
7	Cayapas	0,354633	0,671736	2,714040	2,145678	9432,916777
8	Taura	0,181739	0,480876	3,469230	2,366999	11202,142481
9	Naranjal-Pagua	0,005401	0,082900	2,792655	1,656916	12259,755972
10	Santa Rosa	0,323065	0,641142	2,785244	1,659103	9775,859927
11	Arenillas	0,278223	0,594984	2,463050	2,097895	5396,541630
12	Zarumilla	0,766623	0,987643	2,631790	2,029395	3131,830276
13	Carchi	0,257992	0,572944	2,090328	1,767117	3977,894126
14	Mataje	0,294616	0,612262	2,051895	3,213766	1064,933673
15	Verde	0,277552	0,594266	1,994033	2,157216	1232,312221
16	Muisne	0,513942	0,808660	2,098363	3,036413	1630,428048
17	Jama	0,344138	0,661722	2,133505	1,903307	1430,514849
18	Chone	0,463716	0,768131	3,046550	2,218142	1940,652096
19	Portoviejo	0,401000	0,714301	2,588308	2,058425	1464,982047
20	Jipijapa	1,289815	1,281070	2,176943	2,009014	1741,554355
21	Zapotal	1,395067	1,332314	2,818062	2,942448	2341,809367
22	Puná	4,780923	2,466408	2,897927	2,629879	170,977667
23	Jubones	0,182231	0,481526	2,097129	1,587436	8631,782566

Fuente: Elaboración propia

Se verificaron los supuestos de normalidad en cada uno de los vectores de datos que describen los parámetros asociados a la morfometría de los sistemas mediante el test de normalidad de Anderson-Darling, el cual permite determinar si los datos provienen de una población con distribución normal. La comprobación de la normalidad de los datos es para

verificar las técnicas paramétricas a utilizar. En este caso el nivel de significancia utilizado para la prueba es $\alpha=0.05$ (Anderson & Darling, 1954).

Tabla 4: Resultados de la prueba de normalidad.

	Kf	Re	Dd	Kc	Rd
P.value	1,628814e-11	4,796972e-06	6,843292e-07	0,5044997	0,004639259

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4 se puede apreciar que el único valor con un valor-p no significativo es el de Kc y no rechaza la hipótesis nula que afirma que los datos provienen de una distribución normal. Para poder aplicar algunas técnicas estadísticas paramétricas se normalizaron³ los datos mediante la técnica de transformación de Johnson⁴.

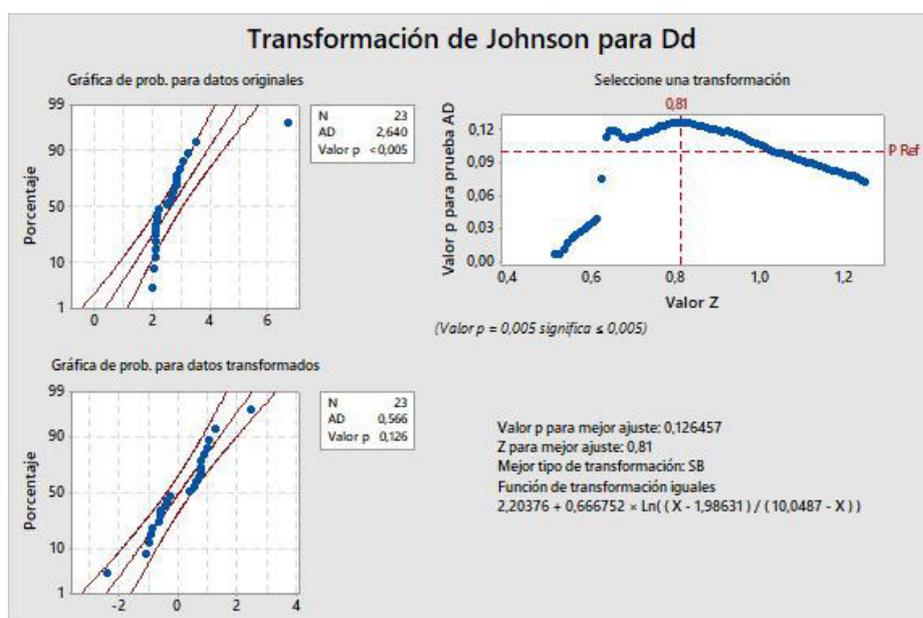


Figura 9: Transformación de Johnson para la densidad de drenaje.

Fuente: Elaboración propia

La figura 9 hace referencia a la densidad de drenaje, mostrando en la gráfica superior izquierda la distribución de los datos, el valor de p, el cual representa la probabilidad que mide la hipótesis nula, cuyo valor-p es $< 0,005$ demostrando que los datos no presentan una distribución normal; la segunda grafica ubicada en la parte superior derecha muestra la transformación de los datos, la cual se logró mediante la ecuación $2,20376 + 0,0333752 * \ln\left(\frac{X - 1,98631}{10,0487 - X}\right)$, la última grafica representa los datos transformados, donde se puede apreciar una distribución normal con un valor p = 0,126

³ La normalización consiste en alinear distribuciones a una distribución normal.

⁴ El Sistema de Familias de Distribuciones de Johnson, (Chou, Polansky, & Mason, n.d.), consiste en determinar la distribución (dentro de la familia de distribuciones de Johnson) a la que pertenecen los datos, y una vez determinada, realizar transformaciones sobre ellos, con el fin de poder aplicarlos (Lagos & Vargas, 2003).

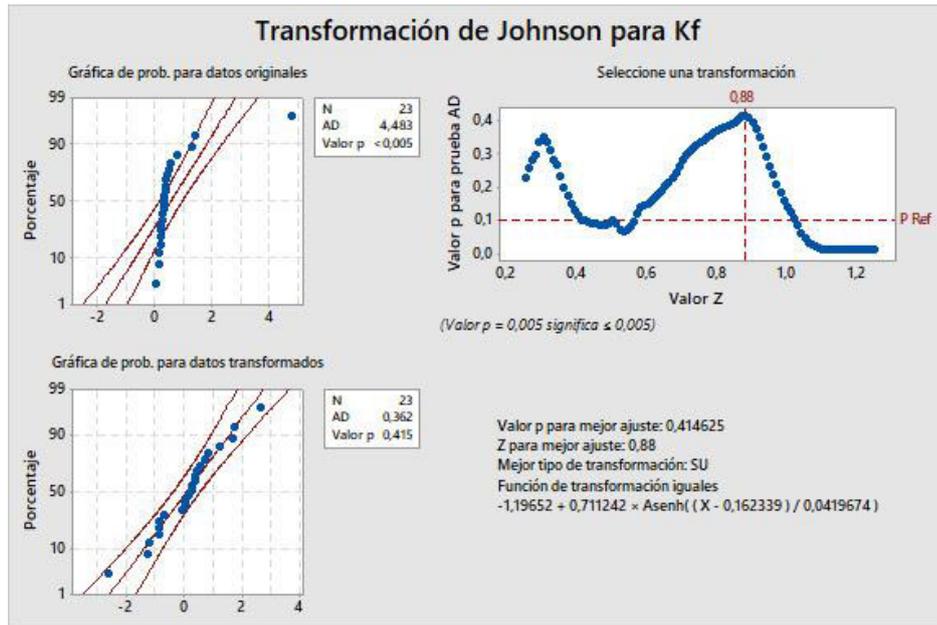


Figura 10: Transformación de Johnson para el factor de forma.
Fuente: Elaboración propia

En la figura 10, perteneciente al factor de forma de Horton, podemos observar la gráfica superior izquierda la cual muestra la distribución de los datos junto al valor de $p < 0,005$, mostrando que los datos presentes no mantienen una distribución normal; la segunda gráfica ubicada en la parte superior derecha muestra la transformación de los datos, la cual se logró mediante la ecuación $-1,19652 + 0,711242 * Aseinh\left(\frac{X - 0,162339}{0,0419674}\right)$, la última gráfica representa la datos transformados, donde se puede apreciar una distribución normal con un valor $p = 0,415$

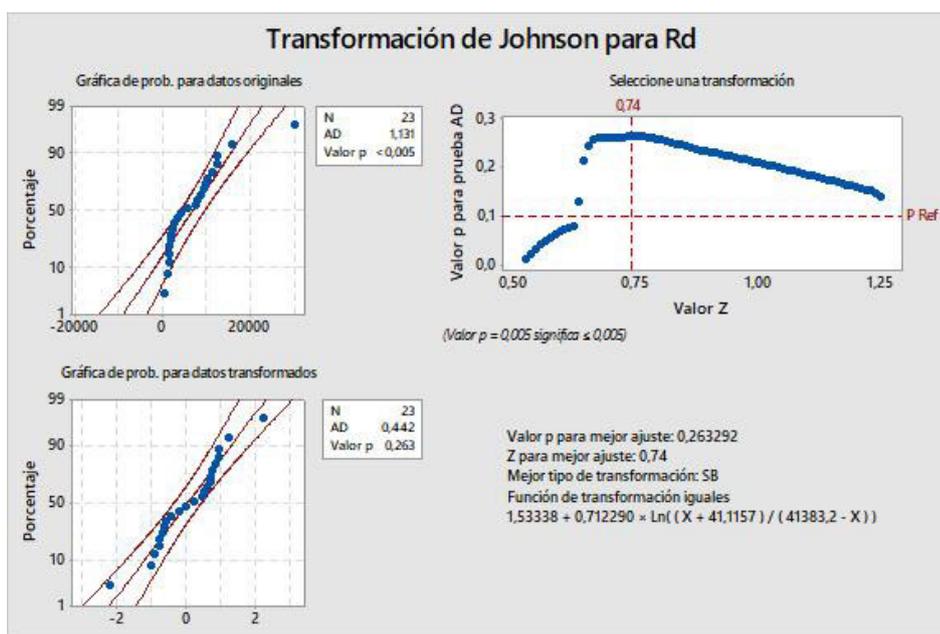


Figura 11: Transformación de Johnson para la rugosidad de la cuenca.
Fuente: Elaboración propia

La figura 11 nos muestra los resultados de la transformación de Johnson para la rugosidad de la cuenca, podemos observar la gráfica superior izquierda la cual muestra la distribución de los datos con un valor de $p < 0,005$, mostrando que los datos presentes no mantienen una distribución normal; la segunda grafica ubicada en la parte superior derecha muestra la transformación de los datos, arrojando la ecuación $1,53338 + 0,712290 * \ln\left(\frac{X + 41,1157}{41383,2 - X}\right)$, la gráfica inferior representa los datos transformados, donde se puede apreciar una distribución normal con un valor $p = 0,263$

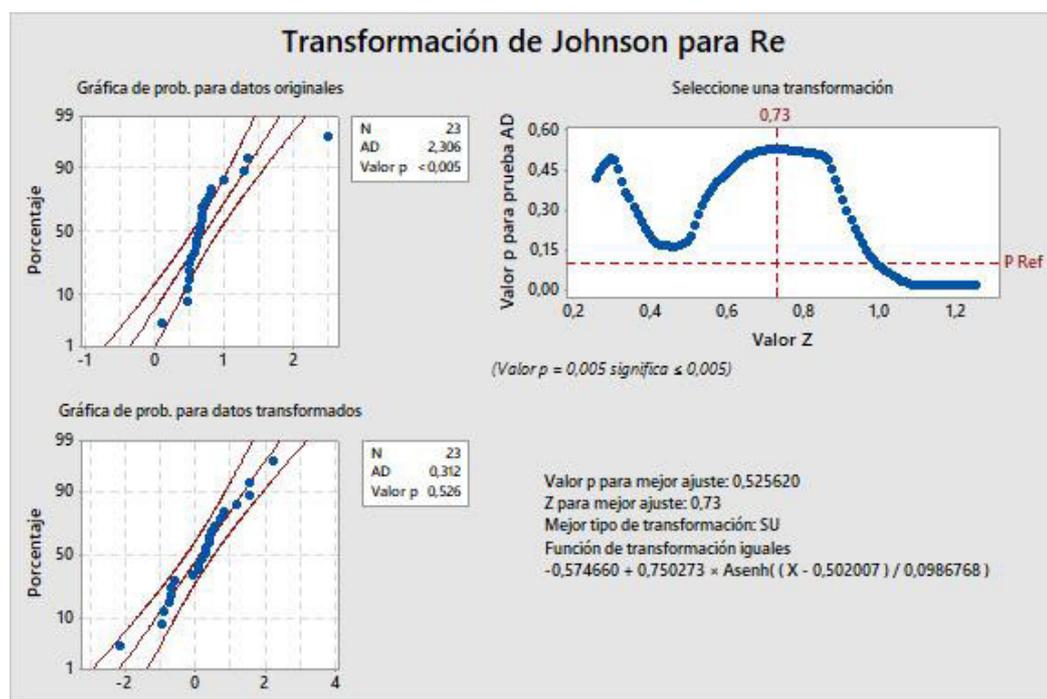


Figura 12: Transformación de Johnson para la relación de elongación.
Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la transformación de Johnson para la relación de elongación se pueden observar en la figura 12, la primera grafica representa la prueba de normalidad, donde se puede observar una distribución anormal de los datos, el valor $p < 0,005$ constata que los valores no son normales, la segunda grafica muestra la transformación de Johnson mediante la ecuación $-0,574660 + 0,750273 * \operatorname{Aseinh}\left(\frac{X - 0,502007}{0,0986768}\right)$, la tercera grafica muestra los datos ya transformados con una distribución normal en los mismo constatada por el valor $p=0,526$.

Tabla 5: Datos transformados.

N° del sistema	Nombre del sistema	Datos transformados				
		Factor de forma de Horton (Kf)	Relación de elongación (Re)	Densidad de drenaje (Dd)	Coefficiente de compacidad (Kc)	Rugosidad de la cuenca (Rd)
1	Esmeraldas	-0,88934	-0,74106	-0,41085	2,59643	0,93074
2	Guayas	0,35908	0,38048	1,03448	2,27056	1,19161
3	Cañar	-1,20361	-0,92730	2,43000	2,55834	2,22000
4	Catamayo	-0,69736	-0,61135	-0,95108	2,37895	0,45538
5	Puyango	0,24698	0,26678	-1,13889	2,41850	0,47105
6	Mira	-1,29106	-0,97655	-0,87157	2,05353	0,71386
7	Cayapas	0,38740	0,40890	0,66327	2,14568	0,66751
8	Taura	-0,87844	-0,73412	1,21034	2,36700	0,83004
9	Naranjal-Pagua	-2,64000	-2,19000	0,73885	1,65692	0,91948
10	Santa Rosa	0,26336	0,28349	0,73202	1,65910	0,70052
11	Arenillas	0,04113	0,05552	0,35883	2,09790	0,18730
12	Zarumilla	1,19432	1,14866	0,57587	2,02940	-0,23987
13	Carchi	-0,08559	-0,07343	-0,68822	1,76712	-0,05557
14	Mataje	0,13024	0,14707	-0,99894	3,21377	-1,02802
15	Verde	0,03725	0,05154	-2,43000	2,15722	-0,92468
16	Muisne	0,81082	0,81481	-0,63793	3,03641	-0,72381
17	Jama	0,34845	0,36977	-0,45310	1,90331	-0,81811
18	Chone	0,70209	0,71430	0,94512	2,21814	-0,59697
19	Portoviejo	0,53816	0,55778	0,52547	2,05843	-0,80101
20	Jipijapa	1,63730	1,49863	-0,27701	2,00901	-0,67597
21	Zapotal	1,70074	1,54607	0,76188	2,94245	-0,45839
22	Puná	2,64000	2,19000	0,83041	2,62988	-2,22000
23	Jubones	-0,87090	-0,72928	-0,64542	1,58744	0,58693

Fuente: Elaboración propia

La tabla 5 presenta los valores obtenidos de la transformación de Johnson.

Tabla 6: Datos transformados y estandarizados.

N° del sistema	Nombre del sistema	Datos transformados y estandarizados				
		Factor de forma de Horton (Kf)	Relación de elongación (Re)	Densidad de drenaje (Dd)	Coefficiente de compacidad (Kc)	Rugosidad de la cuenca (Rd)
1	Esmeraldas	-0,41546	-0,55589	-0,52030	0,79571	0,80336
2	Guayas	-0,24511	-0,15569	0,53314	0,04672	1,30467
3	Cañar	-0,43508	-0,61238	4,12082	0,70817	3,39240
4	Catamayo	-0,40186	-0,51849	-0,60821	0,29584	0,07104
5	Puyango	-0,27352	-0,21435	-0,62572	0,38675	0,09107
6	Mira	-0,44039	-0,62825	-0,59920	-0,45213	0,43746
7	Cayapas	-0,23722	-0,13982	0,06197	-0,24033	0,36608
8	Taura	-0,41473	-0,55386	0,83195	0,26838	0,62709
9	Naranjal-Pagua	-0,59577	-1,41721	0,14213	-1,36374	0,78312
10	Santa Rosa	-0,26963	-0,20619	0,13457	-1,35872	0,41667
11	Arenillas	-0,31567	-0,30632	-0,19393	-0,35016	-0,22940
12	Zarumilla	0,18576	0,54550	-0,02189	-0,50760	-0,56350
13	Carchi	-0,33644	-0,35413	-0,57395	-1,11045	-0,43869
14	Mataje	-0,29884	-0,26884	-0,61314	2,21466	-0,86843
15	Verde	-0,31636	-0,30787	-0,67213	-0,21381	-0,84374
16	Muisne	-0,07366	0,15722	-0,56576	1,80702	-0,78500
17	Jama	-0,24800	-0,16154	-0,52993	-0,79742	-0,81449
18	Chone	-0,12523	0,06930	0,40099	-0,07377	-0,73924
19	Portoviejo	-0,18962	-0,04748	-0,06622	-0,44088	-0,80941
20	Jipijapa	0,72291	1,18204	-0,48564	-0,55445	-0,76861
21	Zapotal	0,83098	1,29321	0,16803	1,59104	-0,68005
22	Puná	4,30718	3,75346	0,24946	0,87260	-1,00031
23	Jubones	-0,41423	-0,55245	-0,56702	-1,52344	0,24789

Fuente: Elaboración propia

Una vez transformados los datos se procedió a estandarizarlos⁵, con el fin de tenerlos en una sola unidad, con respecto al eje z, en la tabla 6 se presentan los datos transformados y estandarizados, para su posterior uso en el dendrograma realizado tanto en R como en Minitab.

⁵ Le estandarización de datos consiste en eliminar las medidas de los mismos, transformándolos en una sola medida con respecto al eje z.

3.5 Análisis de componentes principales

Para el análisis de componentes principales⁶ se aplicó sobre los datos descritos en la tabla 7.

Debido a la falta de estaciones meteorológicas que permitan obtener los datos de precipitación y caudales se descartaron del análisis los siguientes sistemas: Zarumilla, Verde, Muisne, Jipijapa, Zapotal, Puná, Mataje

Tabla 7: Datos para el ACP.

DATOS OBTENIDOS												
N°	Nombre del Sistema	Kf	Re	Dd	Kc	Rd	Precipitación	Caudal	A.poblada	Bosque	Cultivo	M.agropecuario
1	Esmeraldas	0,2	0,5	2,1	2,6	12396,9	1544,8	900,7	552,6	5284,1	2985,1	3110,7
2	Guayas	0,3	0,7	3,2	2,3	15795,1	1496,5	241,2	408,4	4004,4	12238,2	3466,1
3	Cañar	0,2	0,5	6,7	2,6	29946,5	529,9	53,9	6,1	353,5	322,6	68,4
4	Catamayo	0,2	0,5	2,1	2,4	7433,0	1316,0	13,5	14,6	1120,1	379,3	56,7
5	Puyango	0,3	0,6	2,0	2,4	7568,8	1511,5	82,0	23,4	2428,3	561,4	152,2
6	Mira	0,2	0,4	2,1	2,1	9916,8	682,5	11,6	42,3	2256,2	774,6	582,2
7	Cayapas	0,4	0,7	2,7	2,1	9432,9	3256,3	1306,5	6,0	5079,9	398,7	238,6
8	Taura	0,2	0,5	3,5	2,4	11202,1	1356,0	37,5	24,5	393,6	1317,1	65,5
9	Naranjal-Pagua	0,0	0,1	2,8	1,7	12259,8	514,1	4,5	18,4	838,5	826,2	6,4
10	Santa Rosa	0,3	0,6	2,8	1,7	9775,9	684,9	2,9	23,2	268,8	295,0	6,1
11	Arenillas	0,3	0,6	2,5	2,1	5396,5	514,9	11,2	5,3	145,0	108,8	338,0
12	Carchi	0,3	0,6	2,1	1,8	3977,9	1192,6	1,4	9,2	0,3	38,9	26,6
13	Jama	0,3	0,7	2,1	1,9	1430,5	613,9	16,4	6,2	471,6	114,3	60,2
14	Chone	0,5	0,8	3,0	2,2	1940,7	961,9	54,5	30,2	408,5	496,9	157,0
15	Portoviejo	0,4	0,7	2,6	2,1	1465,0	579,4	9,0	55,4	819,3	617,8	46,7
16	Jubones	0,2	0,5	2,1	1,6	8631,8	597,7	3,7	37,1	446,9	195,4	95,6

Fuente: Elaboración propia

La tabla 7 presenta los datos de coeficiente de forma, relación de elongación, densidad de drenaje, coeficiente de compacidad, relación de elongación, precipitación, caudal, área poblada, área de bosque, área de cultivo y área de mosaico agrícola de los sistemas 16 hidrográficos utilizados en el análisis de componentes principales.

⁶ El análisis de componentes principales es una técnica que permitirá describir el conjunto de variables de la tabla 7 en términos de nuevas variables, se reducirá el número de variables relevantes para el estudio.

Al igual que en el análisis clúster, para realizar el análisis de componentes principales se realizaron las pruebas de normalidad y transformación de Johnson necesarias a cada uno de los parámetros a analizar.

Tabla 8: resultados de la prueba de normalidad

	Kf	Re	Dd	Kc	Rd	Pr
P. value	3,86E-01	4,51E-02	2,70E-05	6,15E-01	4,66E-02	2,64E-03

	Ca	A.P	B	Cuñt	M.A
P. value	2,01E-09	6,00E-10	2,17E-04	1,01E-09	1,31E-09

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 8 se puede observar que los parámetros con un valor-p no significativo son Kf y Kc los cuales no rechaza la hipótesis nula que afirma que los datos provienen de una distribución normal. Para poder aplicar las técnicas estadísticas paramétricas se transformaron los datos anormales mediante la técnica de transformación de Johnson.

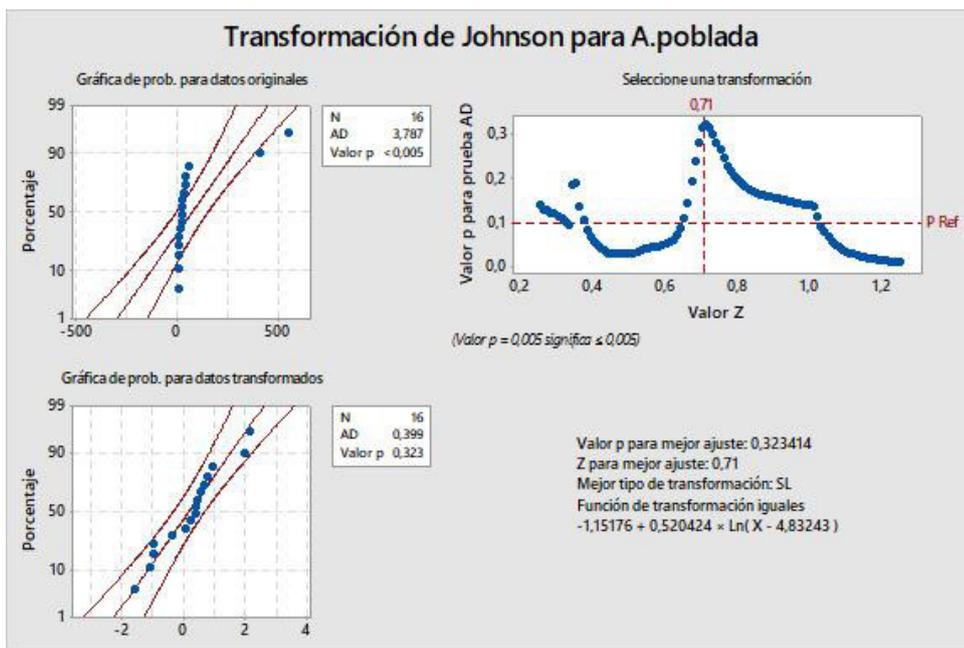


Figura 13: Transformación de Johnson para el área poblada.

Fuente: Elaboración propia

La figura 13 nos muestra los resultados de la transformación de Johnson para el área poblada, podemos observar la gráfica superior izquierda la cual muestra la distribución de los datos con un valor de $p < 0,005$, mostrando que los datos presentes no mantienen una distribución normal; la segunda grafica ubicada en la parte superior derecha muestra la transformación de los datos, arrojando la ecuación $-1,15176 + 0,520424 * \ln(X - 4,83243)$, la gráfica inferior representa los datos transformados, donde se puede apreciar una distribución normal con un valor $p = 0,323$.

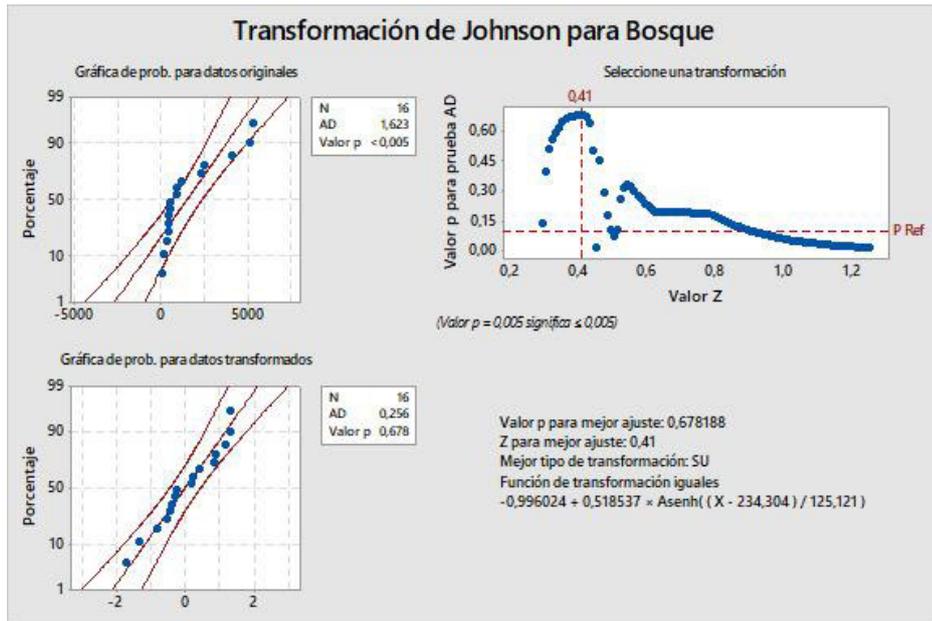


Figura 14: Transformación de Johnson para el área de bosque.
Fuente: Elaboración propia

En la figura 14 podemos observar los resultados de la transformación de Johnson para el área de bosque, podemos observar la gráfica superior izquierda la cual muestra la distribución de los datos con un valor de $p < 0,005$, mostrando que los datos presentes no mantienen una distribución normal; la segunda grafica ubicada en la parte superior derecha muestra la transformación de los datos, arrojando la ecuación $-0,996024 + 0,518537 * \text{Asenh}\left(\frac{X - 234,304}{125,121}\right)$, en la gráfica inferior se presentan los datos transformados, donde se puede apreciar una distribución normal con un valor $p = 0,678$.

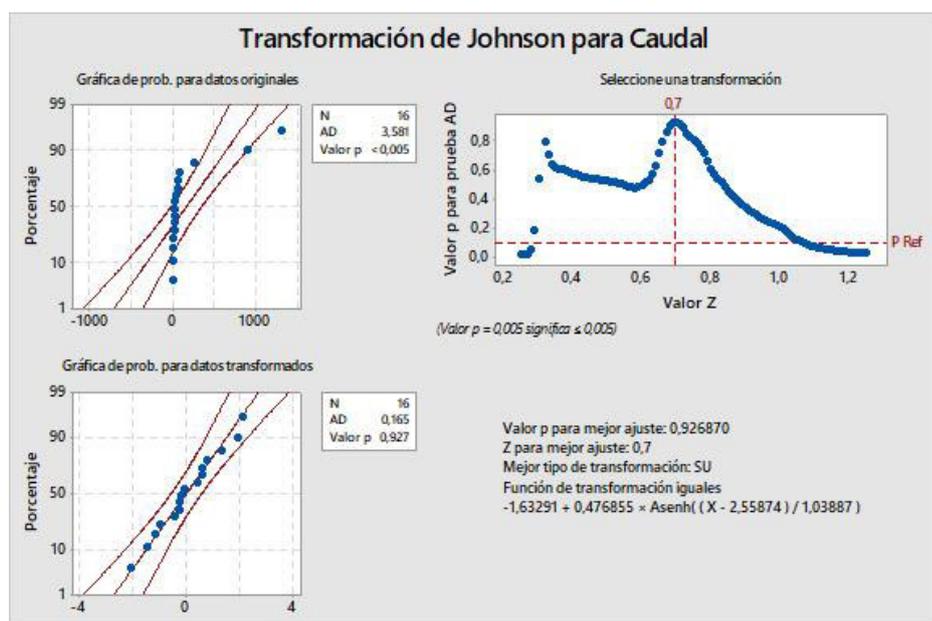


Figura 15: Transformación de Johnson para caudal.
Fuente: Elaboración propia

La figura 15 representa los resultados de la transformación de Johnson para el área de bosque, podemos observar la gráfica superior izquierda donde se puede observar la distribución de los datos con un valor de $p < 0,005$, mostrando que los datos presentes no mantienen una distribución normal; la segunda grafica ubicada en la parte superior derecha muestra la transformación de los datos, arrojando la ecuación $-1,63291 + 0,476855 * \text{Asenh}\left(\frac{X - 2,55874}{1,03887}\right)$, en la gráfica inferior se presentan los datos transformados, donde se puede apreciar una distribución normal con un valor $p = 0,927$.

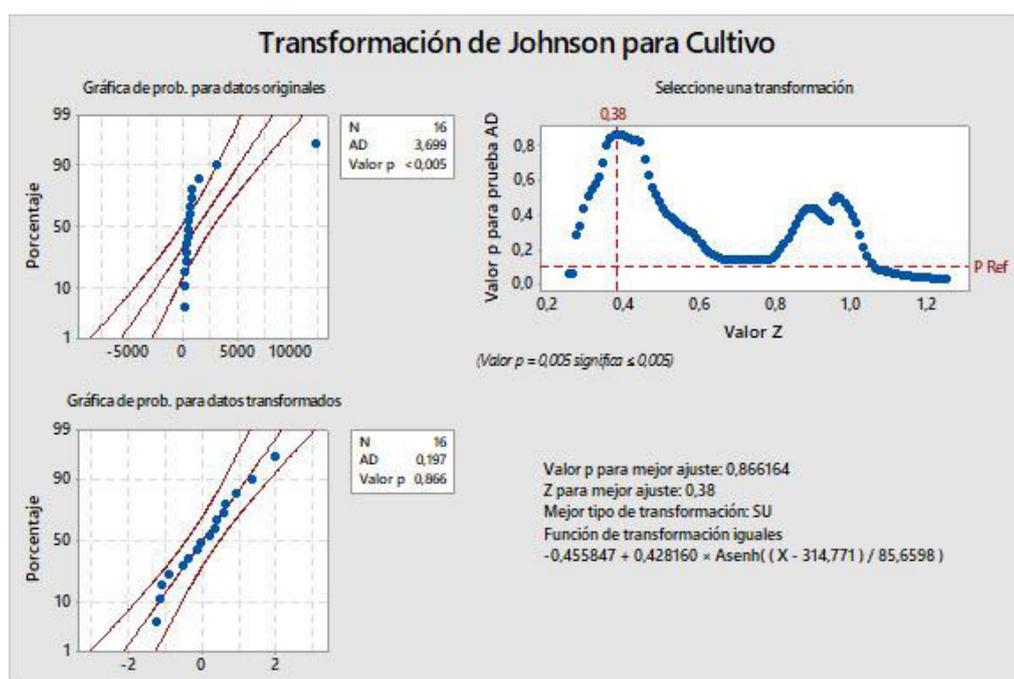


Figura 16: Transformación de Johnson para el área de cultivo.
Fuente: Elaboración propia

El resultado de la transformación de Johnson para el área de cultivos se puede observar en la figura 16, la gráfica superior representa los datos con distribución anormal y un valor $p < 0,005$, la segunda grafica ubicada en la parte superior derecha muestra la transformación de los datos, arrojando la ecuación $-0,4558471 + 0,428160 * \text{Asenh}\left(\frac{X - 2314,771}{85,6598}\right)$, en la gráfica inferior se presentan los datos transformados, donde se puede apreciar una distribución normal con un valor $p = 0,866$.

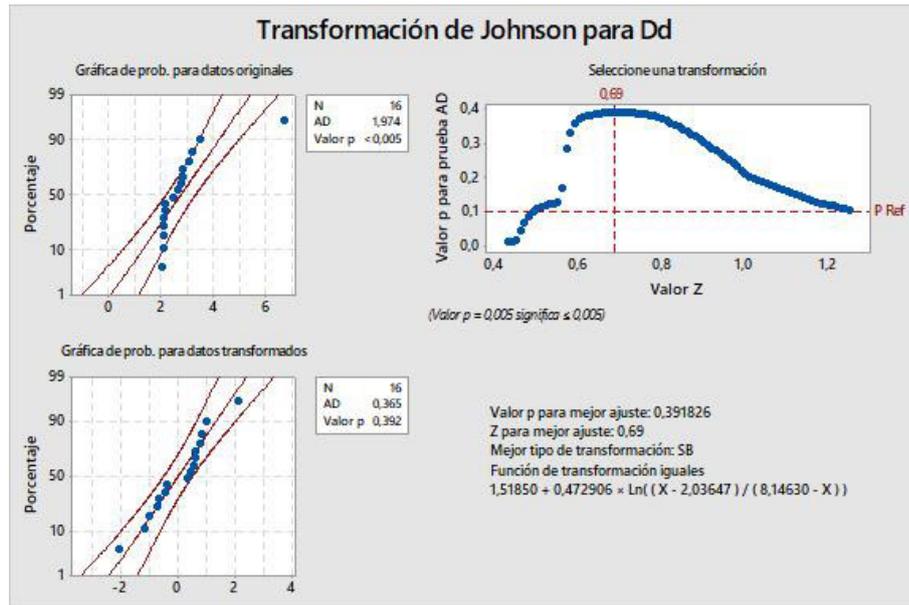


Figura 17: Transformación de Johnson para la densidad de drenaje.
Fuente: Elaboración propia

La figura 17 nos muestra los resultados de la transformación de Johnson para la densidad de drenaje, podemos observar la gráfica superior izquierda la cual muestra la distribución de los datos con un valor de $p < 0,005$, mostrando que los datos presentes no mantienen una distribución normal; la segunda grafica ubicada en la parte superior derecha muestra la transformación de los datos, arrojando la ecuación $1,51850 + 0,472906 * \ln\left(\frac{X - 2,03647}{8,14630 - X}\right)$, la gráfica inferior representa los datos transformados, donde se puede apreciar una distribución normal con un valor $p = 0,392$.

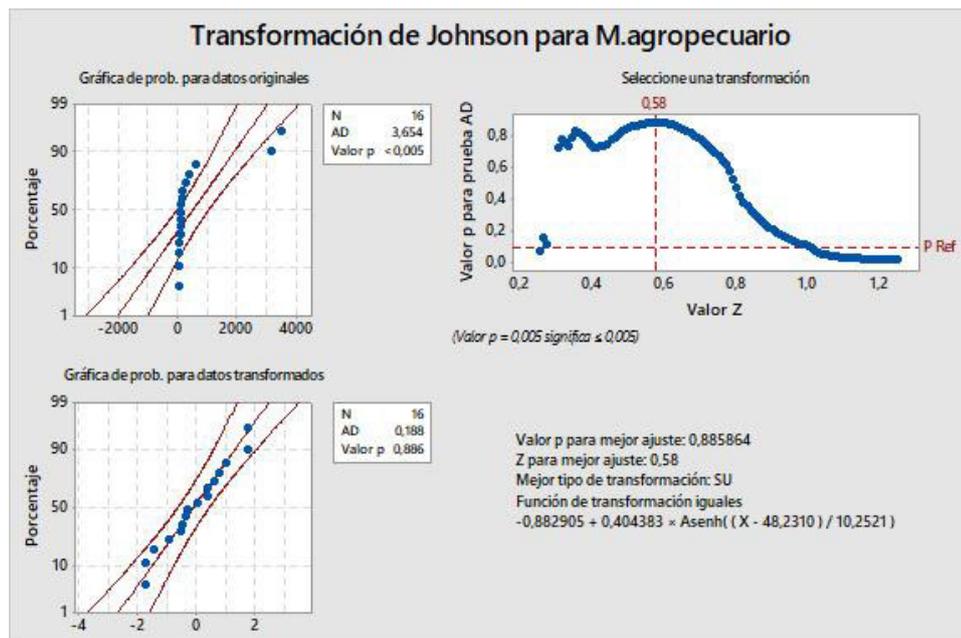


Figura 18: Transformación de Johnson para el área de mosaico agropecuario.
Fuente: Elaboración propia

El resultado de la transformación de Johnson para el área de mosaico agropecuario se puede observar en la figura 18, la gráfica superior representa los datos con distribución anormal y un valor $p < 0,005$, la segunda grafica ubicada en la parte superior derecha muestra la transformación de los datos, arrojando la ecuación $-0,882905 + 0,404383 * \text{Asenh}\left(\frac{X - 48,2310}{10,2521}\right)$, en la gráfica inferior se presentan los datos transformados, donde se puede apreciar una distribución normal con un valor $p = 0,886$.

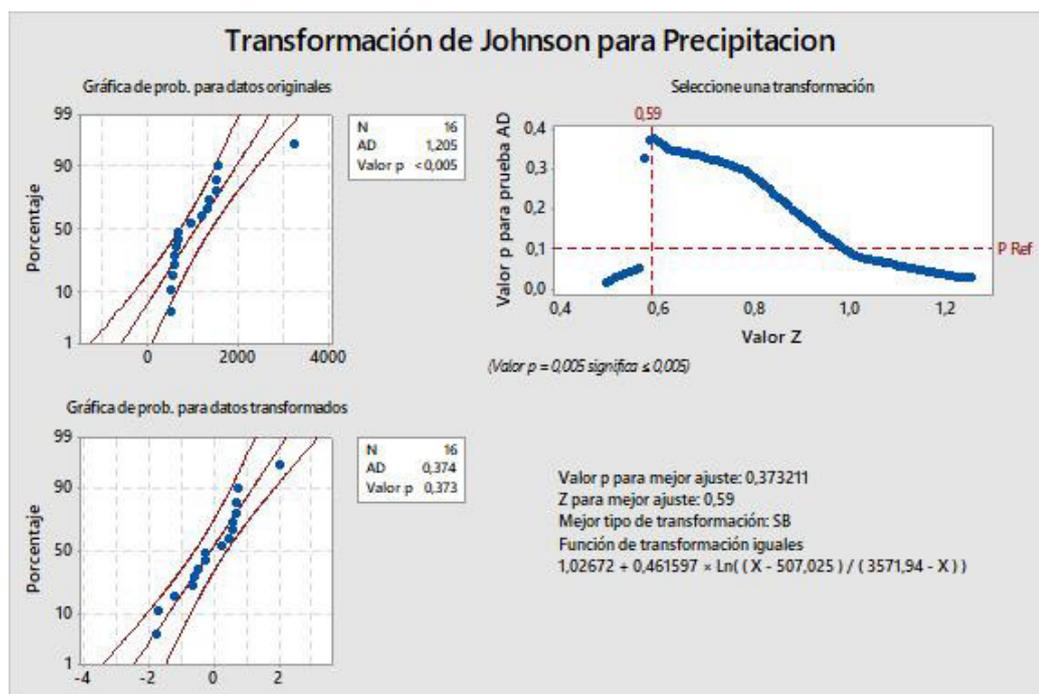


Figura 19: Transformación de Johnson para la precipitación.
Fuente: Elaboración propia

En la figura 19 se puede observar la transformación de Johnson para la precipitación, la primera grafica muestra una distribución anormal con un valor $p < 0,005$, la segunda grafica representa la transformación realizada mediante la ecuación $1,02672 + 0,461597 * \ln\left(\frac{X - 507,025}{3571,94 - X}\right)$, la última grafica representa los valores ya transformados, con una distribución normal, con valor $p = 0,373$.

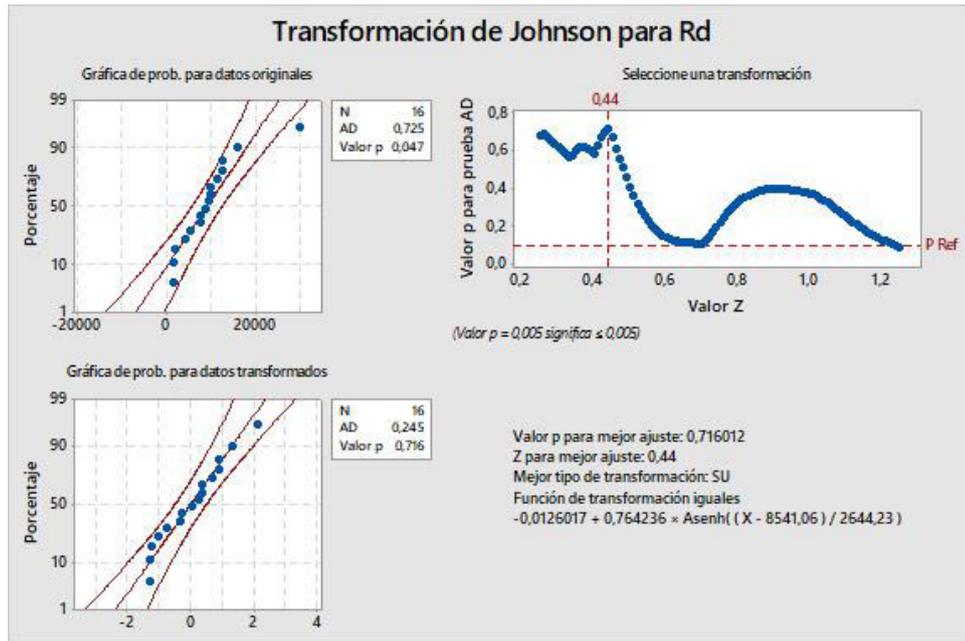


Figura 20: Transformación de Johnson para la rugosidad de la cuenca.
Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura 20, la primera grafica muestra una distribución anormal con un valor $p < 0,005$, la transformación de Johnson en la rugosidad de la cuenca se realizó mediante la ecuación $-0,0126017 + 0,764236 * \text{Aseinh}\left(\frac{X - 8541,06}{2644,23}\right)$, la gráfica ubicada en la parte inferior demuestra que los datos se encuentran dispersos de forma normal con un valor $p = 0,716$.

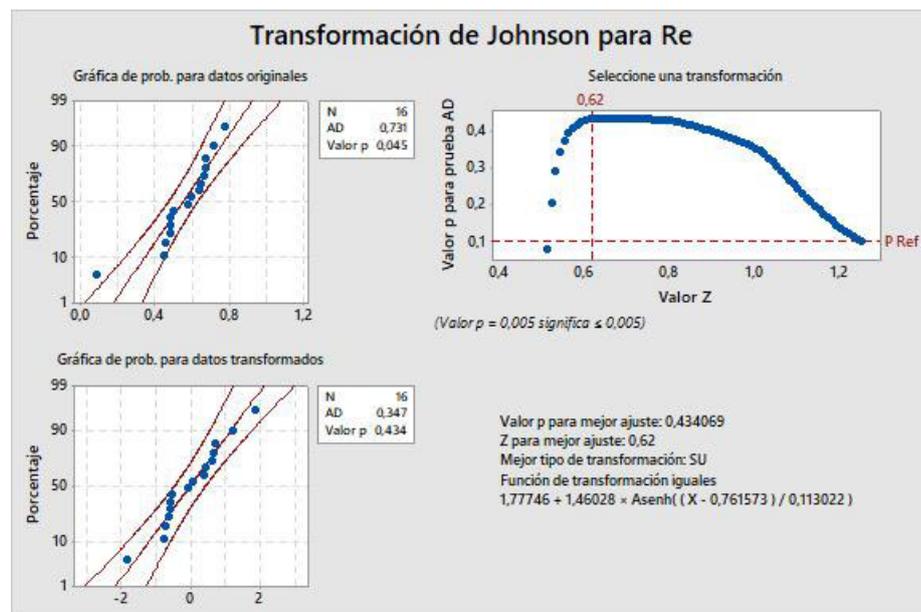


Figura 21: Transformación de Johnson para la relación de elongación.
Fuente: Elaboración propia

En la figura 21 se puede observar la transformación de Johnson para la relación de elongación, esto por medio de la ecuación $1,77746 + 1,46028 * \text{Asenh}\left(\frac{X - 0,761573}{0,113022}\right)$, la gráfica inferior demuestra la normalidad de los datos con un valor $p = 0,434$.

Tabla 9: Datos transformados.

DATOS TRANSFORMADOS												
N°	Nombre del Sistema	Kf	Re	Dd	Kc	Rd	Precipitación	Caudal	A.poblada	Bosque	Cultivo	M.agropecuario
1	Esmeraldas	0,2	-0,62	-0,39	2,6	0,88	0,72	1,92	2,13	1,28	1,31	1,70
2	Guayas	0,3	0,64	0,82	2,3	1,31	0,68	1,29	1,97	1,13	1,95	1,75
3	Cañar	0,2	-0,74	2,07	2,6	2,12	-1,23	0,56	-1,01	-0,56	-0,42	-0,30
4	Catamayo	0,2	-0,54	-1,18	2,4	-0,32	0,55	-0,18	0,04	0,38	-0,16	-0,58
5	Puyango	0,3	0,39	-2,07	2,4	-0,29	0,70	0,77	0,37	0,85	0,31	0,34
6	Mira	0,2	-0,78	-1,01	2,1	0,37	-0,27	-0,27	0,73	0,81	0,56	1,00
7	Cayapas	0,4	0,71	0,53	2,1	0,24	2,03	2,10	-1,08	1,26	-0,08	0,58
8	Taura Naranjal-	0,2	-0,62	0,96	2,4	0,66	0,58	0,37	0,40	-0,45	0,89	-0,36
9	Pagua	0,0	-1,86	0,59	1,7	0,86	-1,78	-0,98	0,20	0,19	0,61	-1,74
10	Santa Rosa	0,3	0,42	0,59	1,7	0,33	-0,26	-1,48	0,36	-0,85	-0,55	-1,74
11	Arenillas	0,3	0,05	0,29	2,1	-0,78	-1,72	-0,29	-1,60	-1,34	-1,15	0,75
12	Carchi	0,3	-0,10	-0,71	1,8	-1,02	0,45	-2,10	-0,39	-1,71	-1,26	-1,49
13	Jama	0,3	0,61	-0,43	1,9	-1,32	-0,51	-0,07	-0,98	-0,27	-1,13	-0,48
14	Chone	0,5	1,86	0,75	2,2	-1,27	0,22	0,56	0,53	-0,41	0,19	0,35
15	Portoviejo	0,4	1,18	0,43	2,1	-1,32	-0,69	-0,43	0,89	0,17	0,39	-0,94
16	Jubones	0,2	-0,62	-0,66	1,6	0,01	-0,58	-1,20	0,66	-0,32	-0,94	0,02

Fuente: Elaboración propia

La tabla número 9 contiene los valores transformados mediante el programa Minitab, utilizando las transformaciones de Johnson.

Tabla 10: Datos transformados y estandarizados.

DATOS TRANSFORMADOS Y ESTANDARIZADOS												
N°	Nombre del Sistema	Kf	Re	Dd	Kc	Rd	Precipitación	Caudal	A.poblada	Bosque	Cultivo	M.agropecuario
1	Esmeraldas	-0,68	-0,68	-0,42	1,51	0,84	0,78	1,61	1,86	1,40	1,38	1,62
2	Guayas	0,76	0,70	0,77	0,50	1,27	0,75	1,07	1,71	1,23	2,07	1,66
3	Cañar	-0,84	-0,81	1,99	1,40	2,06	-1,15	0,45	-1,17	-0,62	-0,48	-0,21
4	Catamayo	-0,56	-0,59	-1,19	0,84	-0,35	0,62	-0,18	-0,16	0,41	-0,21	-0,46
5	Puyango	0,52	0,43	-2,06	0,96	-0,31	0,76	0,62	0,16	0,92	0,30	0,37
6	Mira	-0,89	-0,85	-1,02	-0,17	0,34	-0,20	-0,26	0,51	0,88	0,57	0,98
7	Cayapas	0,82	0,78	0,49	0,12	0,21	2,08	1,77	-1,23	1,38	-0,13	0,60
8	Taura Naranjal-	-0,67	-0,68	0,90	0,80	0,63	0,65	0,29	0,19	-0,50	0,93	-0,26
9	Pagua	-2,20	-2,03	0,54	-1,40	0,82	-1,69	-0,87	0,00	0,19	0,62	-1,52
10	Santa Rosa	0,55	0,46	0,54	-1,39	0,30	-0,19	-1,30	0,16	-0,95	-0,63	-1,53
11	Arenillas	0,16	0,06	0,25	-0,03	-0,80	-1,64	-0,28	-1,73	-1,48	-1,27	0,75
12	Carchi	-0,01	-0,11	-0,74	-1,06	-1,03	0,52	-1,83	-0,57	-1,90	-1,40	-1,29
13	Jama	0,73	0,67	-0,46	-0,64	-1,33	-0,43	-0,09	-1,14	-0,31	-1,26	-0,37
14	Chone	1,77	2,03	0,70	0,34	-1,28	0,29	0,45	0,32	-0,46	0,17	0,39
15	Portoviejo	1,22	1,29	0,38	-0,16	-1,33	-0,62	-0,40	0,66	0,18	0,39	-0,80
16	Jubones	-0,67	-0,67	-0,68	-1,62	-0,02	-0,51	-1,05	0,44	-0,36	-1,05	0,08

Fuente: Elaboración propia

Una vez realizada la transformación y estandarización de los datos, presentados en la tabla 10, se realizó el análisis de componentes principales utilizando los softwares Minitab y R.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

4.1.1 Análisis de conglomerados.

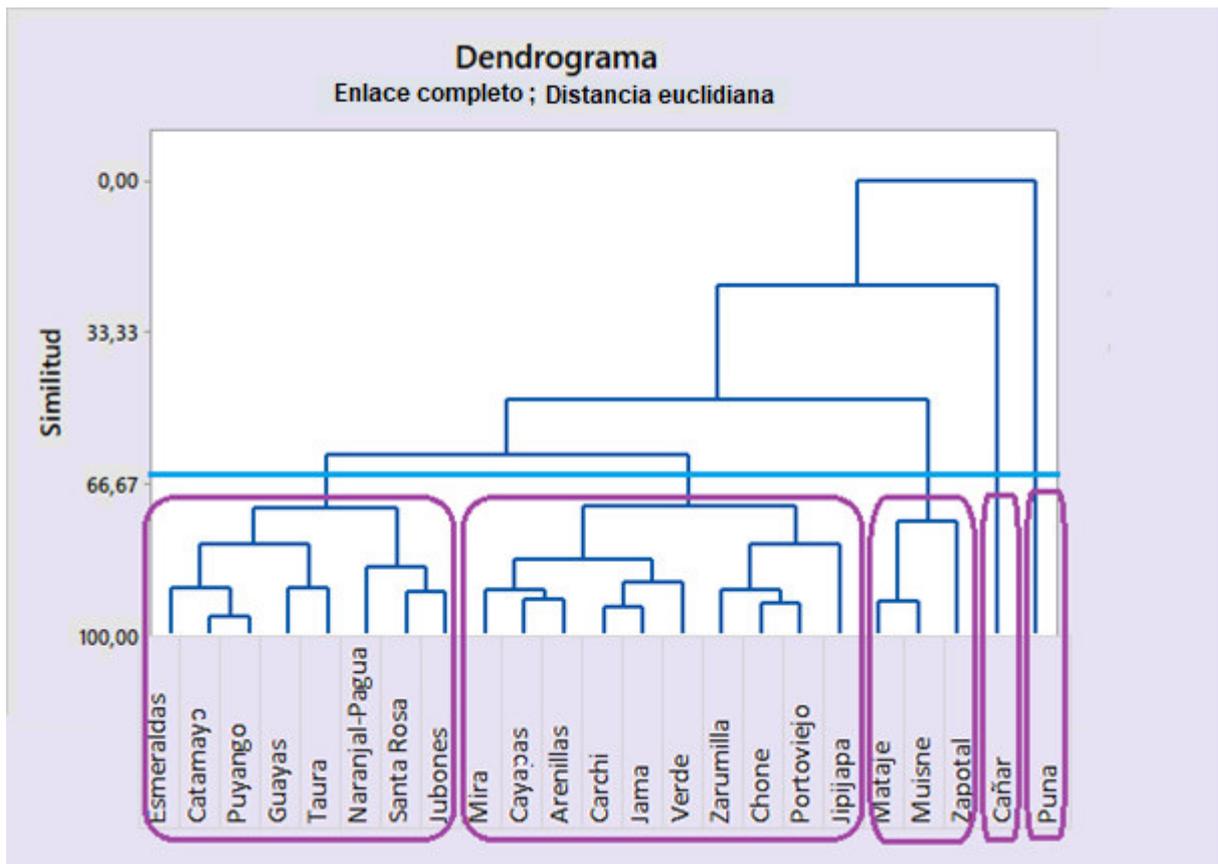


Figura 22: Análisis de conglomerados (dendrograma).

Fuente: Elaboración propia

La figura 22 muestra el resultado del dendrograma, para interpretar los resultados de este análisis se utilizó la “distancia euclidiana”⁷, en la que mientras menos distancia mantiene, más similitud existe entre los sistemas en tantos por ciento, se realizó un corte horizontal a una distancia euclidiana de 65%, formando cinco grupos.

⁷ La distancia euclidiana mide el parecido entre unidades que han sido evaluadas en un conjunto de variables métricas, viene dada por la ecuación $d_{ij} = \sqrt{\sum (X_{ik} - X_{jk})^2}$ (López, 2013). Al emplear este tipo de medida evitamos utilizar medidas distintas en las variables, obteniendo una distancia que no dependerá de las unidades de medida.

En el primer grupo se unen los sistemas hidrográficos de: Esmeraldas, Catamayo, Puyango, Guayas, Taura, Naranjal-Pagua, Santa Rosa y Jubones.

El segundo grupo se conformó de 10 sistemas: Mira, Cayapas, Arenillas, Carchi, Jama, Verde, Zarumilla, Chone, Portoviejo y Jipijapa. Este grupo mantiene el mayor número de sistemas.

En el tercer grupo se unieron 3 sistemas: Mataje Muisne y Zapotal.

El cuarto y quinto grupo mantienen un solo sistema: Cañar y Puná respectivamente.

4.1.2 Componentes principales.

El análisis de componentes principales se realizó como complemento al análisis clúster, para identificar qué factores afectan el agrupamiento de los sistemas, ya que el análisis clúster nos da una división natural.

Se buscó establecer los componentes principales que representen la mayor cantidad de variación entre los datos empleados para caracterizar los sistemas hidrográficos. El número mínimo de componentes se determinó mediante el criterio de Kaiser, este criterio cuando trabaja con correlaciones excluye los valores propios que no excedan la unidad (>1) (Carmona, 2014); obteniendo como resultado cuatro componentes principales que representan el 85,4% de varianza en las relaciones presentadas para los valores morfométricos, de caudal, precipitación y uso de suelos. (Ver tabla 11).

Tabla 11: Análisis de componentes principales.-

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
Valor propio	4,2501	2,6752	1,4460	1,0277	0,6037	0,4213	0,3324	0,1470	0,0694	0,0248	0,0025
Proporción	0,386	0,243	0,131	0,093	0,055	0,038	0,030	0,013	0,006	0,002	0,000
Acumulada	0,386	0,630	0,761	0,854	0,909	0,948	0,978	0,991	0,998	1,000	1,000

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 11 se observa que las cuatro primeras columnas cumplen el criterio de Kaiser, con una varianza acumulada de 0,854.

Otra manera de presentar la variabilidad de los componentes principales se muestra en la figura 23, en esta gráfica de sedimentación se puede observar los componentes que dan mayor representatividad a la varianza, y se establecen como los componentes propios de estudio, demostrando que desde el quinto componente el valor propio es menor a 1 y van formando un descenso casi lineal.

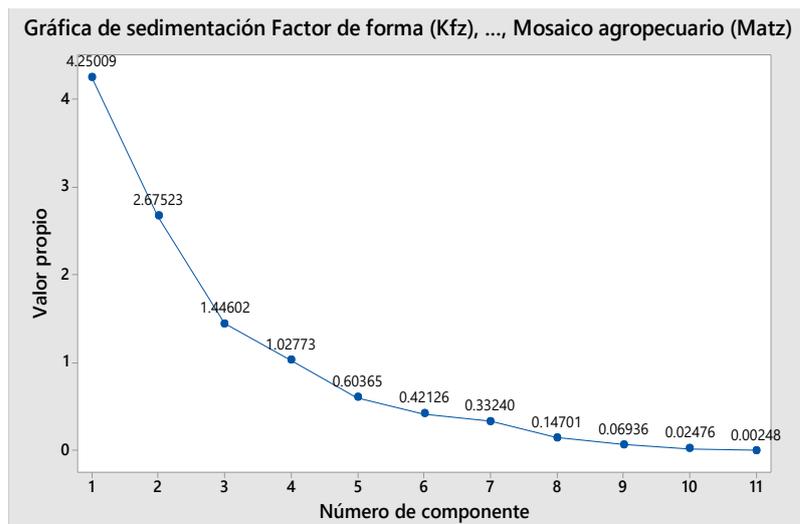


Figura 23: Gráfica de sedimentación de correlaciones.
Fuente: Elaboración propia

En la tabla 12 se presentan los valores de los cuatro componentes principales o vectores propios que resumen el sistema efectivamente para cada una de las once variables.

Tabla 12: Componentes que representan el 84,5% de variación en los datos de las cuencas hidrográficas.

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4
Factor de forma (Kfz)	0,061	0,578	0,146	-0,199
Relacion de enlongacion (Retz)	0,064	0,572	0,158	-0,239
Densidad de drenaje (Ddtz)	0,005	-0,121	0,728	-0,391
Coefficiente de compacidad (Kcz)	0,353	0,008	0,259	0,338
Coefficiente de rugosidad (Rdz)	0,209	-0,463	0,257	-0,038
Precipitación (Ptz)	0,290	0,251	-0,184	0,146
Caudal (Ctz)	0,430	0,078	0,242	0,241
Área poblada (Aptz)	0,285	-0,089	-0,373	-0,588
Bosque nativo (Btz)	0,411	-0,051	-0,233	0,040
Cultivos (CULTz)	0,402	-0,159	-0,067	-0,399
Mosaico agropecuario (Matz)	0,378	0,070	0,026	0,221

Fuente: Elaboración propia

En el análisis de las variables en la matriz de componentes principales se puede decir que los dos primeros componentes representan el 63% de varianza de los datos, esto se interpreta que los datos recogidos muestran una variación importante, ya que es mayor al 50% (para estos casos de estudio se recomienda que se represente el 90% de varianza de datos). Esto justifica el criterio de Kaiser al tomar cuatro componentes principales y aproximarse a lo recomendado (Carmona, Francesc., 2014).

En la tabla 12 se resume la afinidad positiva (es directamente proporcional) y negativa (es inversamente proporcional) de cada variable para cada uno de los cuatro componentes principales.

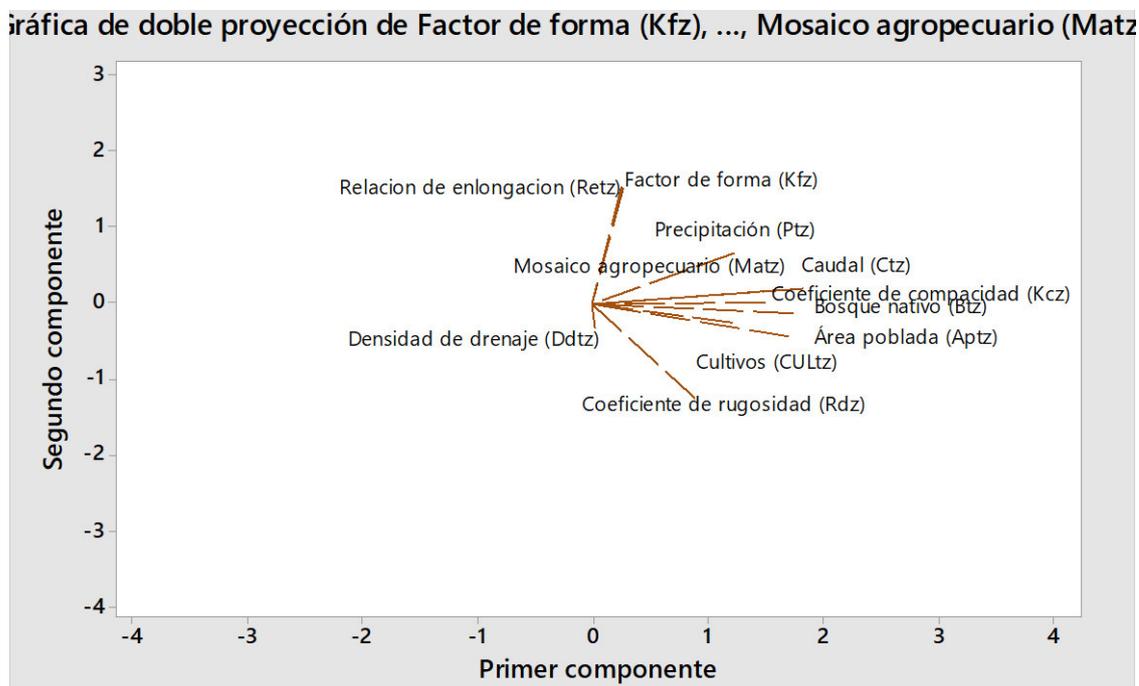


Figura 24: Distribución de las variables de las cuencas en relación con el primer y segundo componente.

Fuente: Elaboración propia

La figura 24 describe las relaciones entre las variables de los sistemas con respecto a los dos primeros componentes que describen hasta el 60% de la variabilidad del conjunto de datos analizado.

El primer componente principal, como se puede observar en la figura 25, relaciona positivamente el caudal, el bosque nativo y área de cultivos; esto quiere decir que el primer componente agrupa las cuencas según el valor de su caudal y el uso del suelo. Las cuencas representativas en este componente son: Esmeraldas, Guayas, Cayapas. Se puede observar que las variables que menos relación guardan son densidad de drenaje y relación de elongación.

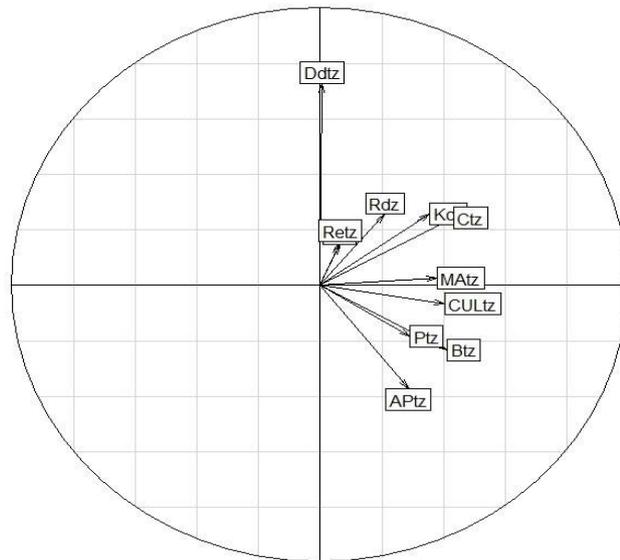


Figura 25: Comportamiento de variables en el primer componente principal.
Fuente: Elaboración propia

En el segundo componente principal se observa que existe una buena relación positiva entre el factor de forma y la relación de elongación, ya que su valor es mayor a 0,5; y una relación negativa de -0,463 con el coeficiente de rugosidad, este componente representa la morfometría del sistema. Se puede observar mayor dispersión de las variables (Figura 26).

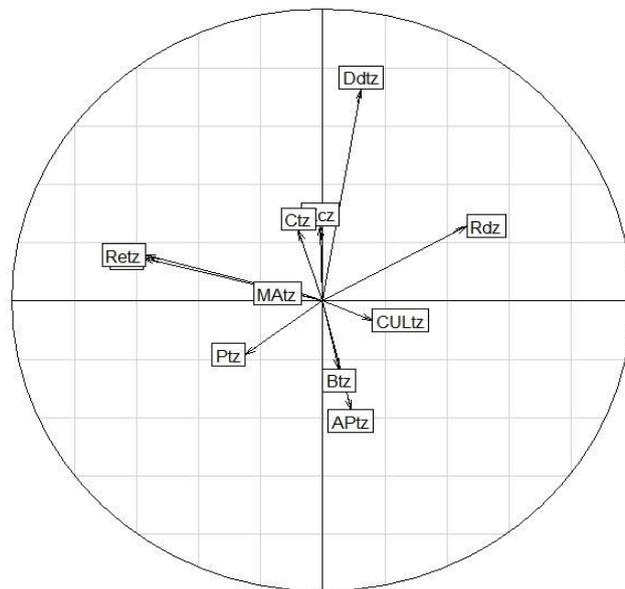


Figura 26: Comportamiento de variables en el segundo componente principal.
Fuente: Elaboración propia

El tercer componente principal se distingue en la figura 27, posee la relación más alta, directamente proporcional, a una variable morfométrica denominada densidad de drenaje (0,728), y una relación negativa (-0,373) con la población asentada. En esta sección la varianza de datos que se representa es del 13% por lo tanto los datos se muestran dispersos.

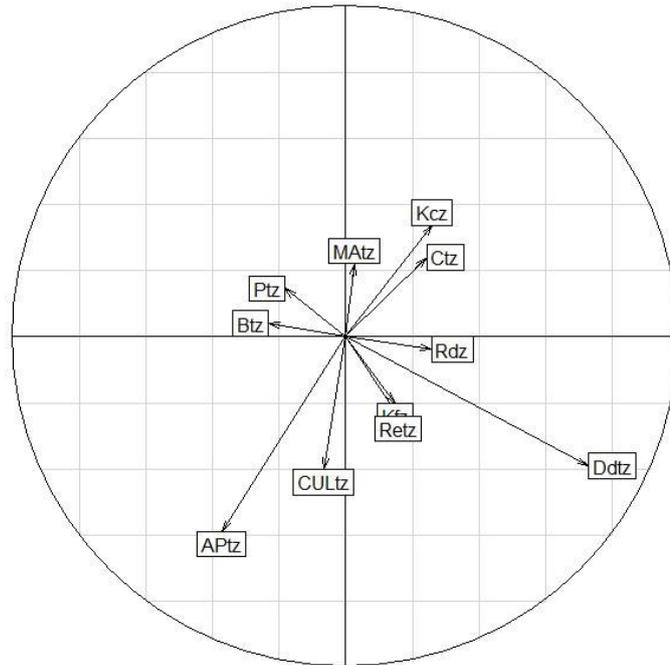


Figura 27: Comportamiento de variables en el tercer componente principal.
Fuente: Elaboración propia

En el cuarto componente principal se observa una fuerte relación negativa con el área poblada y de cultivos, haciendo referencia al uso de suelos; en menor medida se relaciona positivamente con el coeficiente de compacidad (valor morfométrico) y el caudal (Figura 28).

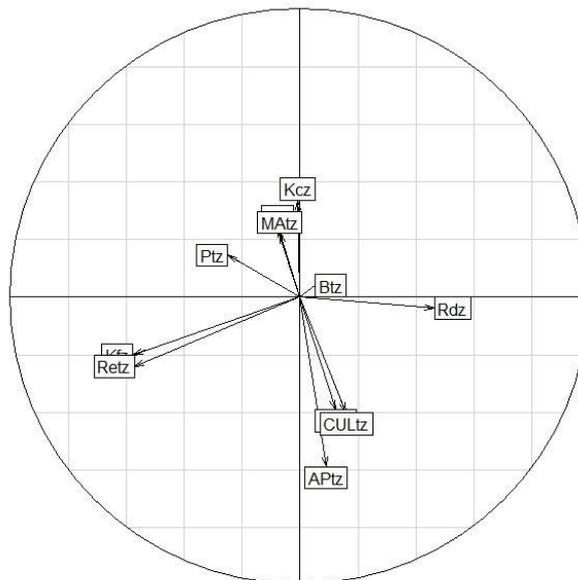


Figura 28: Comportamiento de variables en el cuarto componente principal.
Fuente: Elaboración propia

En la figura 29 se muestra la distribución de los sistemas teniendo como eje de abscisas el primer componente y como ordenadas el segundo.

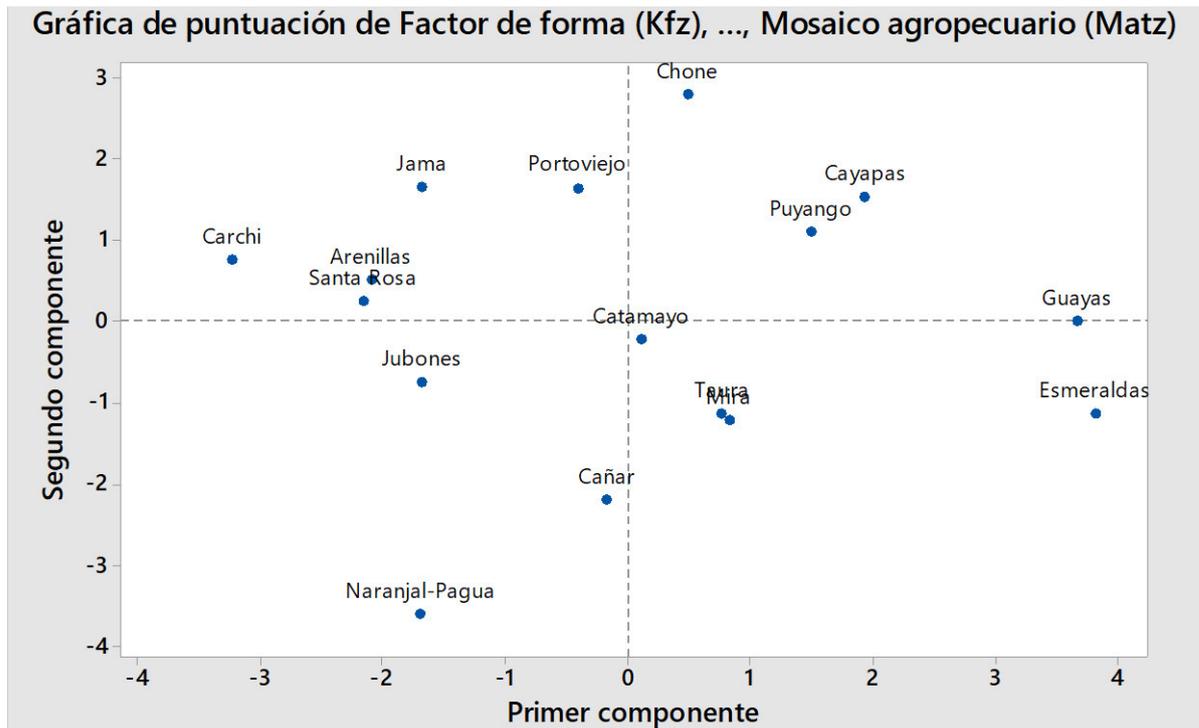


Figura 29: Componentes principales para la caracterización de las cuencas con vertientes al Pacífico.
Fuente: Elaboración propia

Se ejemplifica la relación que guardan los componentes con las características de las cuencas, por ejemplo, se conoce que para el presente estudio el primer componente principal se relaciona positivamente con el valor de los caudales, por lo que las cuencas mantienen mayor relación con respecto al valor antes mencionado. En la figura 29 se muestra con mayor importancia en el eje de las abscisas las cuencas de Guayas, Cayapas y Esmeraldas, cuyos caudales son los superiores en los datos de estudio. El segundo componente guarda afinidad con la forma de la cuenca (factor de elongación y coeficiente de forma) teniendo como valores máximos: Portoviejo y Jama. En la figura se puede afirmar esto, ya que su distribución es positiva en el cuadrante del segundo componente.

Estudios similares fueron realizados en países de Latinoamérica, la India y Europa, aunque muchos de los estudios no contemplan el análisis estadístico, si mantienen la morfometría; claro ejemplo de esto tenemos: "A study of morphometric evaluation of the Son basin, India using geospatial approach" donde se detalla las características morfométricas de las cuencas, el área total de la cuenca es 69,863 km², el grado de pendiente varía de <1,37° a >70,44°, la altura va de 49 a 1245 ms.n.m, también se obtuvieron parámetros como la relación de bifurcación, relación de relieve, densidad de drenaje, frecuencia de corriente, factor de forma, relación de circularidad, entre otros (Kumar Rai et al., 2017). El estudio está realizado en una sola cuenca, con división en subcuencas.

Otro estudio basado en características morfométricas de una cuenca es “Hydro-geomorphological characterization of Dhidhessa River Basin, Ethiopia” este estudio también presenta datos de características morfométricas como el área de la cuenca, la longitud, relación de degradado, número Melton Robustez, entre otros (Kabite & Gessesse, 2018).

El artículo “Morfometría de la cuenca del río Nazas-Rodeo en Durango, México, aplicando tecnología geoespacial” al igual que los estudios antes mencionados, no mantiene un análisis estadístico, analiza morfométricamente parámetros de forma, relieve y parámetros relativos a la red de drenaje, dando como una conclusión importante que por la forma de la curva hipsométrica la cuenca indica un grado de vejez importante (Salas-Aguilar, Pinedo-Álvarez, Viramontes-Olivas, Báez-González, & Quintana-Martínez, 2011), a diferencia de los estudios anteriores, en el trabajo expuesto a más de caracterizar los sistemas hídricos, se realizaron dos análisis estadísticos en los parámetros.

El primero un análisis clúster, que dio como resultado que los 23 sistemas se unieron formando cinco agrupaciones, mientras en el estudio “Caracterización morfométrica de la cuenca alta del arroyo Las Lajas, Córdoba: Un análisis estadístico” el análisis conformó dos agrupamientos cuya clasificación con respecto a las litologías dominantes es acertada entre el 63 y el 72% de los casos; mientras el tercio restante se consideró mal clasificado por lo que se supone que la agrupación no se encuentra enteramente controlada por la Falla las Lajas (Doffo & Bonorino, 2005).

Con respecto al segundo análisis estadístico denominado componentes principales el estudio arrojó que los cuatro primeros componentes representan el 85,4% de varianza en la matriz, se realizaron 11 componentes, las relaciones más fuertes describe el caudal de la zona con cobertura vegetal, la forma de la cuenca, la capacidad de drenaje y el coeficiente de compacidad en forma positiva, las relaciones negativas se dan en la población de la cuenca; mientras en el estudio “Análisis de la relación entre variables morfométricas y biofísicas en la estimación de características probabilísticas para la oferta hídrica superficial en Colombia” se obtuvieron 32 componentes, de los cuales los diez primeros representan el 83,29% de varianza, las relaciones más fuertes dadas por el análisis de componentes principales se presentan en relación al valor del caudal y el tamaño de la cuenca (Burbano-Girón et al., 2016).

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES

El análisis clúster demostró que existe similitud entre los sistemas hidrográficos, lo cual fue posible mediante el análisis estadístico de los parámetros morfométricos, manteniendo precisión en los datos y eliminando subjetividad. Los sistemas hidrográficos conformaron cinco grupos: El primer grupo se formó de la unión de los sistemas Catamayo con Puyango, que a su vez se une con Esmeraldas, Guayas y Taura se unen a los tres sistemas anteriores; Santa Rosa y Jubones se unen con Naranjal.-Pagua uniéndose a los sistemas antes mencionados, formando estas ocho cuencas el primer agrupamiento. El segundo grupo se dio por la unión de 10 sistemas hidrográficos, los sistemas Cayapas y Arenillas se unen con Mira, Carchi y Jama estos se acoplan con Verde que a su vez se articulan con los sistemas anteriores los cuales se agrupa con las cuencas Chone, Portoviejo, Zarumilla y Jipijapa. El tercer grupo se dio por la unión de tres sistemas Mataje y Muisne con Zapotal. El cuarto y quinto grupo mantienen un solo sistema, Cañar y Puná respectivamente.

Al realizar el análisis de componentes principales de las 11 variables se encontró que los cuatro primeros componentes principales explican el 85% de las variables, entre las más importantes tenemos el uso de suelos, caudal, coeficiente de compacidad y la densidad de drenaje; por lo tanto, la información de estos componentes principales permite caracterizar los sistemas que guarden la mayor relación o ponderación en sus características.

Con los valores de los componentes principales se puede decir que el primer componente describe el caudal de la zona con la cobertura vegetal del mismo (bosques, cultivos). El segundo componente se afecta por las formas de la cuenca, la relación es negativa con la rugosidad del sitio. Dentro del tercer componente se agrupan las cuencas con mayor capacidad de drenaje; en las relaciones negativas se encuentra la población de la cuenca. En el último componente las relaciones fuertes son negativas, e intervienen las características de drenaje y población; las relaciones positivas son prescritas principalmente por el coeficiente de compacidad y el caudal de la zona de estudio.

Al caracterizar una cuenca, se debe estudiar en mayor medida estas variables, para este caso y en forma positiva: factor de forma y elongación, densidad de drenaje, área de cultivo y bosque nativo. Mientras que para las relaciones negativas se tiene: densidad de drenaje, población y rugosidad.

Los sistemas de Guayas, Esmeraldas, Catamayo, Puyango, Cayapas y Taura se relacionan al mantener valores de precipitación elevados; mientras Jama, Portoviejo, Arenillas, Santa Rosa, Jubones mantiene valores de precipitación entre 514 y 690 mm. Manteniendo cierta similitud con los resultados del dendrograma.

CAPÍTULO VI

6 RECOMENDACIONES

De los resultados de este trabajo se recomienda:

- Realizar la caracterización morfométrica en un Modelo Digital de Terreno de mayor precisión.
- Realizar el mismo análisis en cada una de los sistemas, analizando cuencas y microcuencas.
- Completar las series de precipitación y caudales antes de utilizarlas en el análisis de componentes principales.
- Para las áreas de uso de suelos, se recomienda ocupar el mapa de usos de suelos más reciente de la zona.
- Comprobar los resultados de la caracterización realizándola dos veces.
- Comprobar los resultados de los análisis estadísticos utilizando dos softwares.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aher, P. D., Adinarayana, J., & Gorantiwar., S. D. (2013). Prioritization of watersheds using multi-criteria evaluation through fuzzy analytical hierarchy process. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, 15(1), 11–18.
- Anaya, O. (2012). *Caracterización Morfométrica de la Cuenca Hidrográfica Chinchao, Distrito de Chinchao, Provincia Huanuco, Region Huanuco. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Retrieved from [http://www.unas.edu.pe/web/sites/default/files/web/archivos/actividades_academicas/CARACTERIZACION MORFOMETRICA DE LA CUENCA HIDROGRAFICA CHINCHAO, DISTRITO DE CHINCHAO, PROVINCIA DE HUANUCO,.pdf](http://www.unas.edu.pe/web/sites/default/files/web/archivos/actividades_academicas/CARACTERIZACION_MORFOMETRICA_DE_LA_CUENCA_HIDROGRAFICA_CHINCHAO,_DISTRITO_DE_CHINCHAO,_PROVINCIA_DE_HUANUCO,.pdf)*
- Anderson, T., & Darling, D. (1954). A test of goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association*, 49, 765–769.
- 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. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.291>
- Cabrera, J., & Eng, C. (n.d.). *Modelos Hidrológicos*.
- Cardoso, A., Dias, T., Carlos, H., Soares, B., & Pedro, C. (2006). CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DEBOSSAN, NOVA FRIBURGO, RJ1. *Redalyc*.
- Carmona, F. (2014). Un ejemplo de ACP paso a paso. Retrieved from <http://www.ub.edu/stat/docencia/Mates/ejemploACP.PDF>
- CEPAL. (2011). Diagnóstico de la estadísticas del agua en Ecuador. *Diagnostico de La Informacion Estadistica Del Agua*, 81. Retrieved from [http://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/archivos/download/Diagnostico de las Estadísticas del Agua Producto IIIc 2012-2.pdf](http://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/archivos/download/Diagnostico_de_las_Estadisticas_del_Agua_Producto_IIIc_2012-2.pdf)
- Chandrashekar, H., Lokesh, K. V., Sameena, M., roopa, J., & Ranganna, G. (2015). GIS – Based Morphometric Analysis of Two Reservoir Catchments of Arkavati River, Ramanagaram District, Karnataka. *Aquatic Procedia*, 4(lcwrcoe), 1345–1353.

<https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.175>

Chou, Y. M., Polansky, A. M., & Mason, R. L. (n.d.). Transforming non-normal data to normality in statistical process control. *Journal of Quality Technology*.

Consejo Nacional de Recursos Hídricos. (2002). *División Hidrográfica del Ecuador. Memoria técnica*. Retrieved from http://intranet.comunidadandina.org/Documentos/Reuniones/DTrabajo/SG_REG_EMAB_IX_dt_3_Ax2.pdf

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. *Investigación y Ciencia*, 23(64), 26–34. Retrieved from <http://www.investigacionyciencia.es/revistas/investigacion-y-ciencia/numero/429/el-futuro-de-la-energa-elica-8652>

De la Fuente Fernández, S. (2011). Análisis De Conglomerados. *Universidad Autónoma de Madrid*, 1(1), 55. Retrieved from <http://www.fuenterrebollo.com/Economicas/ECONOMETRIA/SEGMENTACION/CONGLOMERADOS/conglomerados.pdf>

Díaz, C., Mamado, K., Iturbe, A., Esteller, M., & Reyna, F. (1999). Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con la ayuda de SIG y MEDT: caso del curso alto del río Lerma, Estado de México. *Ciencia Ergo Sum*, 6(2), 124–134.

Doffo, N., & Bonorino, G. G. (2005). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del arroyo Las Lajas, Córdoba: Un análisis estadístico. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 60(1), 16–22.

Esri. (n.d.). ArcGIS for Desktop. Retrieved from <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/shapefiles/what-is-a-shapefile.htm>

F, L. C. de L., & JA, M. A. (1987). *Hidrología de superficie*. Madrid, España.

Ferreira, C. (1997). Zonificación agroclimática para implantación de sistemas agroforestales con eucaliptos, en Minas Gerais.

García, J. de la G., Serrano, B. N. M., & Cavazos, B. A. G. (n.d.). ANÁLISIS ESTADÍSTICO MULTIVARIANTE. In *ANÁLISIS ESTADÍSTICO MULTIVARIANTE* (pp. 395–478).

Gaspari, F. (2002). Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas. Aplicación de sistemas de información geográfica.

- Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, I., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *7mo Congreso de Medio Ambiente*, 1–25.
- Grohmann, C. H. (2004). Morphometric analysis in Geographic Information Systems: applications of free software GRASS and R star. *Computers and Geosciences*, *30*(10), 1055–1067.
- GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S. B. (1996). Geomorfologia e meio ambiente, 337–339.
- Heras. (1972). *Manual de hidrología: hidrología de las crecidas*.
- Horton, R. E. (1945). *Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology Geological Society of America Bulletin. U.S.A.*
- Kabite, G., & Gessesse, B. (2018). *Hydro-geomorphological characterization of Dhidhessa River Basin, Ethiopia. International Soil and Water Conservation Research*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.02.003>
- Kumar Rai, P., Narayan Mishra, V., & Mohan, K. (2017). A study of morphometric evaluation of the Son basin, India using geospatial approach. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *7*, 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.05.001>
- Lagos, I. J., & Vargas, J. A. (2003). Sistema de familias de distribuciones de Johnson, una alternativa para el manejo de datos no normales en cartas de control. *Revista Colombiana de Estadística*, *26*(1), 25–40.
- Lara, G., Aluviones, P. O. R., Estudio, C. D. E., Del, C., Agua, D. E. L., & Juan, S. A. N. (2016). Morfometría de cuencas como base en la evaluación de la susceptibilidad / peligrosidad por aluviones , caso de ..., *73*(October 2017), 513–519.
- López, A. M. (2013). Análisis de Conglomerados (Cluster analysis) Literatura relevante. Retrieved from <http://personal.us.es/analopez/ac.pdf>
- Lux, B. (2014). Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas. *Maestría En Energía y Ambiente*, *8*. Retrieved from [http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas.pdf](http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos_básicos_de_Morfometría_de_Cuencas_Hidrográficas.pdf)
- Matovelle, C. M. (n.d.). MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS Sistemas de información geográfica.
- Olaya, V. (2009). Sistemas de Información Geográfica libres y geodatos libres como

elementos de desarrollo. Olaya, Víctor. "Sistemas de Información Geográfica." *Cuadernos Internacionales de Tecnología Para El Desarrollo Humano.*, VIII, 6. Retrieved from https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/7584/08_TIG_05_victor.pdf

Rahaman, S. A., Ajeez, S. A., Aruchamy, S., & Jegankumar, R. (2015). Prioritization of Sub Watershed Based on Morphometric Characteristics Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process and Geographical Information System – A Study of Kallar Watershed, Tamil Nadu. *Aquatic Procedia*, 4(Icwrcoe), 1322–1330. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.172>

Reyes, A., Barroso, F., & Carvajal, Y. (2010). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas*. Calí. Colombia.

Salas-Aguilar, V., Pinedo-Álvarez, C., Viramontes-Olivas, O., Báez-González, A., & Quintana-Martínez, R. (2011). Morfometría de la cuenca del río Nazas- Rodeo en Durango, México, aplicando tecnología geoespacial. *Tecnociencia Chihuahua*, V(1), 34–42.

SENAGUA. (2009). *Delimitación y codificación de unidades geográficas del Ecuador*. Secretaría Nacional del Agua de Ecuador. Quito.

SENCIALES, J.M. y FERRE, E. (n.d.). Análisis morfométrico de la cuenca del río Benamargosa (provincia de Málaga), 1992.

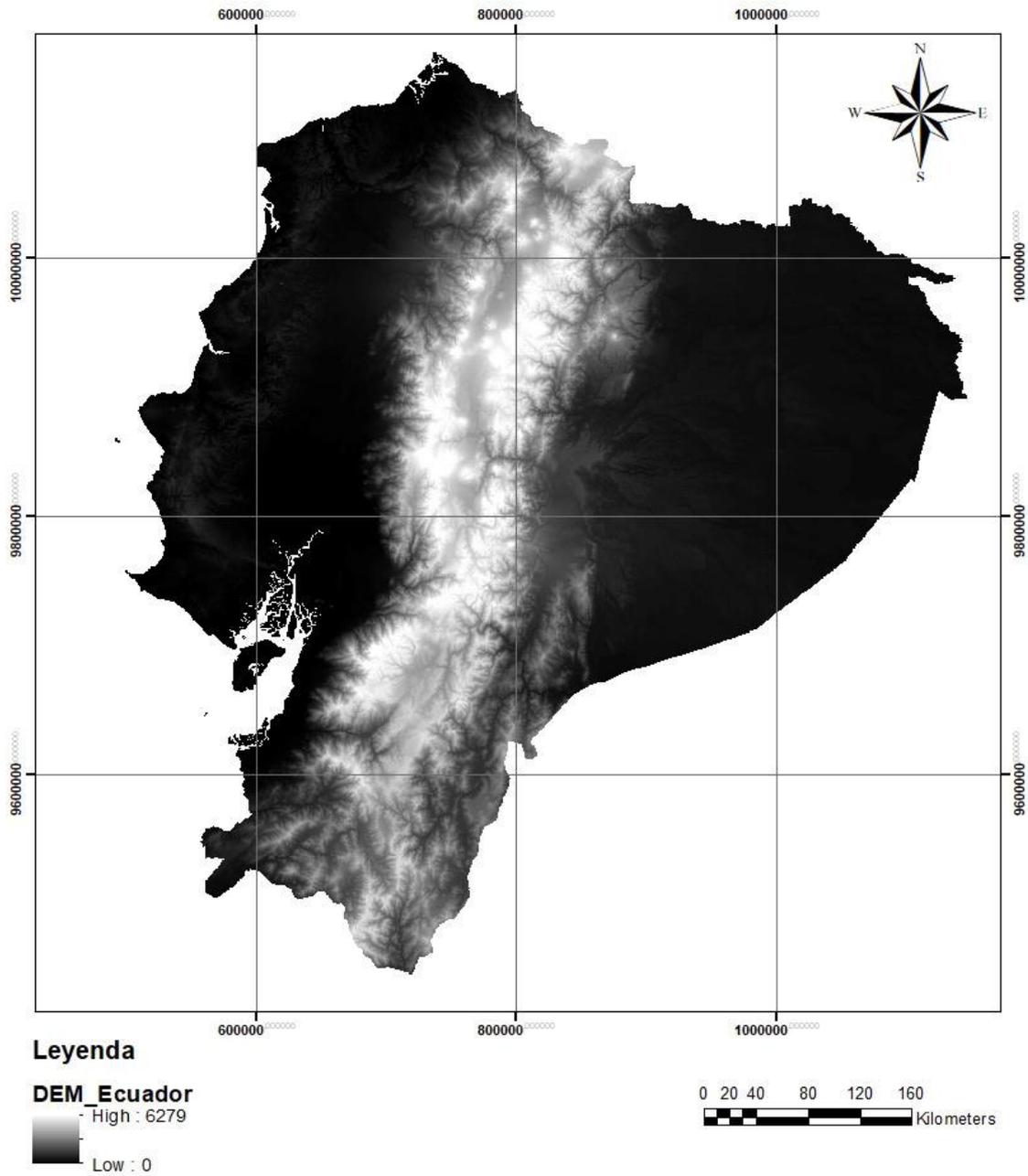
Singh, N. (1994). Remote sensing in the evaluation of morphohydrological characteristics of the drainage basin of Jojri catchment. *Annals of Arid Zone*, 33, 273–278.

Villón, M. (2002). *Hidrología*.

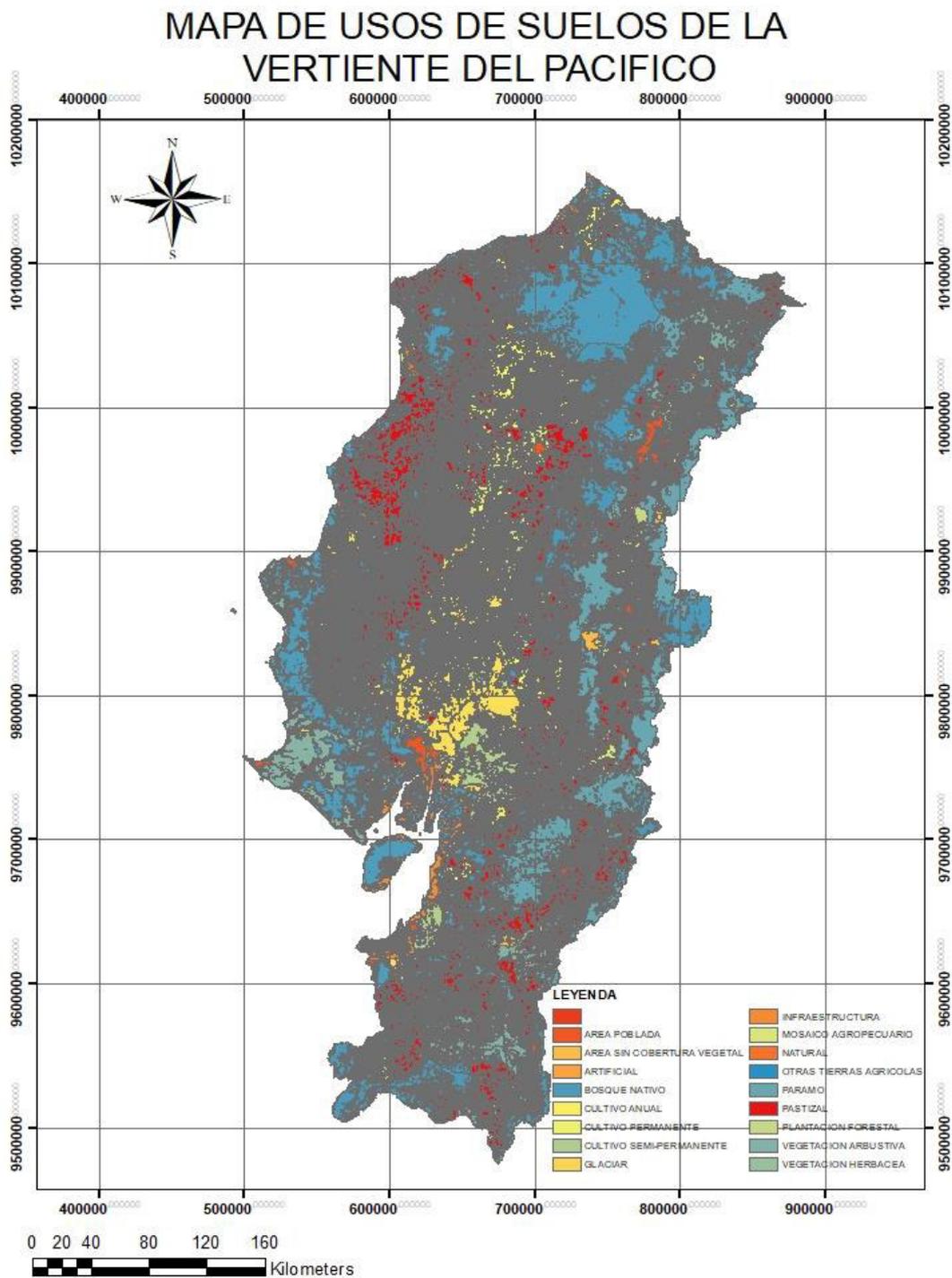
8 ANEXOS

Anexo 1: MDT de Ecuador (30*30m)

Modelo Digital de Terreno del Ecuador



Anexo 2: Mapa de uso de suelos de la vertiente del Pacífico.



Anexo 3: Características morfométricas de los sistemas hidrográficos.

Nombre de la microcuenca	Propiedades de superficie								Características de la red hídrica			
	Área (km ²)	Perímetro (km)	Cota máxima (msnm)	Cota mínima (msnm)	Centroide X (m)	Centroide Y (m)	Centroide Z (msnm)	Pendiente promedio	Longitud del cauce principal	Orden de la red hídrica	Longitud total de la red hídrica	Pendiente promedio de la red hídrica
Esmeraldas	21621,34	1363,51	5804	19	725571,8862	9997828,294	2480,002142	5,019340279	345,591	9	46333,3822	1,000016998
Guayas	32121,93	1453,37	4974	1	659997,0687	9848689,696	1693,071195	5,061575348	304,277	9	102024,5047	1,000585833
Cañar	2443,17	451,62	4474	1	699737,5804	9712221,78	2452,256768	8,590753817	122,836	7	16356,8717	1,153482687
Catamayo	7170,99	719,48	3774	160	644451,4985	9533399,271	2004,359437	19,07752851	192,126	8	14748,8242	1,000969668
Puyango	3628,87	520,32	3911	200	624701,4936	9574074,063	1938,751208	18,05816591	106,610	7	7401,2911	1,721944312
Mira	6511,04	591,79	4861	60	819363,9591	10071630,82	2536,852885	31,66734462	203,812	8	13448,9837	1,83793804
Cayapas	6311,55	608,80	3475,6	0	739315,977	10092642,24	1359,759	20,79923561	133,407	8	17129,7889	1,228848765
Taura	2372,75	411,78	3230	1	672171,9444	9738879,906	970	6,916245594	114,262	7	8231,6149	1,054466938
Naranjal-Pagua	3364,83	343,26	4390	0	655386,1229	9677090,726	1757,156661	5,660371261	789,287	7	9396,8097	1,013694324
Santa Rosa	1048,86	191,90	3509,875	0	628148,5656	9619041,408	1161,063098	7,025698819	56,979	6	2921,3433	1,053662433
Arenillas	649,20	190,90	2191	0	619012,544	9602646,358	813,498	13,26987337	48,305	7	1599,0064	1,329425843
Zarumilla	791,77	203,94	1190	0	598874,157	9597728,079	446,905419	8,592858308	32,137	6	2083,7667	1,101519256
Carchi	362,71	120,19	4663	2760	854939,9675	10084315,45	3549,504334	13,50109995	37,495	5	758,1749	1,306958114
Mataje	232,54	175,03	520	1	758660,9485	10138497,16	200,031214	9,590301802	28,0943	5	477,1424	1,237642536
Verde	1876,31	333,72	618	0	684334,3875	10095640,15	242,301529	12,98517098	82,2205	7	3741,4219	1,196307196
Muisne	3066,90	600,55	777	0	619467,9176	10040132,27	295,406757	6,355929823	77,249	6	6435,4715	1,017761239
Jama	2227,59	320,83	671,5	1	587801,9745	9962329,469	262,901269	9,36615437	80,4547	7	4752,5755	1,072615033
Chone	2653,35	408,06	638	1	595489,0108	9915389,873	316,020337	14,63705602	75,6434	8	8083,5604	1,042068911
Portoviejo	2400,61	360,20	567	1	570630,2392	9889865,334	243,229642	10,78138706	77,3729	7	6213,5251	1,102494482
Jipijapa	2672,50	370,92	800	0	533293,4856	9848107,835	303,353745	5,022200274	45,5193	6	5817,8908	1,000005326
Zapotal	5641,82	789,33	831	0	562767,4669	9750230,574	302,017078	5,006060323	63,5934	7	15898,9997	1,000038339
Puná	868,03	276,72	59	0	599904,1958	9685012,951	17,069492	5,031431257	13,4745	4	2515,5007	1,000084947
Jubones	4235,61	368,97	4119	3	680200,502	9627609,852	2666,892	5,075597585	152,457	8	8882,6288	1,000959752

Anexo 4: Tabla de datos para el análisis de componentes principales.

Nombre de los sistemas	DATOS ACP										
	Kf	Re	Dd	Kc	Rd	Precipitación	Caudal	A. Poblada	Bosque	Cultivo	M. Agropecuario
Esmeraldas	0,18103303	0,47994118	2,1429465	2,59642528	12396,9455	1544,750	900,693	552,6401	5284,1092	2985,1036	3110,6576
Guayas	0,34694724	0,66441712	3,1761632	2,2705636	15795,0596	1496,475	241,197	408,3855	4004,4135	12238,1927	3466,0603
Cañar	0,16192061	0,45389998	6,69494142	2,55833888	29946,473	529,925	53,854	6,1499	353,4569	322,5669	68,4487
Catamayo	0,19427057	0,4971788	2,05673393	2,37894762	7433,03643	1316,000	13,486	14,6394	1120,0652	379,2571	56,6956
Puyango	0,31928258	0,63737747	2,0395595	2,41849808	7568,8053	1511,467	81,963	23,3663	2428,3219	561,4432	152,2430
Mira	0,15674408	0,44658556	2,06556472	2,0535298	9916,77622	682,475	11,604	42,2746	2256,2438	774,6221	582,2204
Cayapas	0,35463252	0,67173562	2,71403981	2,14567751	9432,91678	3256,267	1306,522	5,9904	5079,9390	398,7121	238,5676
Taura	0,18173909	0,48087619	3,46922963	2,36699934	11202,1425	1355,975	37,463	24,5142	393,6067	1317,0870	65,4623
Naranjal-Pagua	0,00540124	0,08290023	2,79265512	1,65691607	12259,756	514,075	4,491	18,3793	838,5053	826,2340	6,4389
Santa Rosa	0,32306479	0,64114154	2,78524447	1,65910278	9775,85993	684,875	2,893	23,2211	268,7614	295,0263	6,1108
Arenillas	0,2782229	0,59498435	2,46304958	2,0978955	5396,54163	514,925	11,157	5,2591	145,0310	108,8096	337,9619
Carchi	0,25799183	0,57294387	2,09032797	1,76711727	3977,89413	1192,625	1,370	9,1764	0,2719	38,8742	26,6497
Jama	0,34413797	0,66172173	2,13350462	1,90330651	1430,51485	613,925	16,401	6,2178	471,6130	114,3056	60,2055
Chone	0,46371629	0,76813097	3,0465496	2,2181423	1940,6521	961,850	54,528	30,1657	408,4702	496,9083	157,0230
Portoviejo	0,40100006	0,7143011	2,5883075	2,05842512	1464,98205	579,375	8,984	55,3931	819,3352	617,8018	46,7210
Jubones	0,18223074	0,4815262	2,0971289	1,58743551	8631,78257	597,725	3,653	37,1057	446,8827	195,4471	95,6114



**PERMISO DEL AUTOR DE TESIS PARA SUBIR AL REPOSITORIO
INSTITUCIONAL**

Yo, **Andrea Estefanía Córdova Andrade** portador(a) de la cédula de ciudadanía N° 010572444-7. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“Análisis morfométrico de los sistemas hidrográficos que conforman la vertiente del Pacífico del Ecuador geográfico”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 25 de febrero de 2019

F:
Andrea Estefanía Córdova Andrade
C.I. 010572444-7