

ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA
DEL RÍO LUCRE

*Andrés Choquehuanca Huanca**

* Master of Sciece. Profesor Principal de la Facultad de Ing. Geológica y Geografía de la Universidad nacional San Antonio Abad, Cusco.

RESUMEN

Este artículo muestra de manera sintética los diferentes parámetros utilizados para identificar cuencas hidrográficas. Se toma como estudio de caso a la microcuenca del Río Lucre, Cusco, y allí se analizan diferentes indicadores utilizados por los geógrafos físicos en sus intentos de llegar a una sistematización teórica sobre el estudio de cuencas.

ABSTRACT

This paper shows a synthesis of the different strategies used to identify hydrographic basins. The area selected is the micro-basin of the Río Lucre, Cusco. The analysing technics applied there are morphometric analysis, drainage, and length.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo bajo el título de “Análisis Morfométrico de la Cuenca del Río Lucre”, constituye un ensayo de aplicación de la morfometría fluvial al estudio de un caso típico de una cuenca hidrográfica pequeña, que apenas cuenta con 103 km² de área, ubicada en la Provincia de Quispicanchis del Departamento del Cusco, integrante de la Cuenca Hidrográfica del Río Watanay. El objetivo del presente trabajo es demostrar cómo una cuenca hidrográfica es organizada y sujeta a diferentes leyes naturales similares a las de otros fenómenos de la naturaleza.

Para el estudio y análisis de la mencionada cuenca se ha utilizado la carta geográfica del IGN a la escala 1:100,000 hoja 29-S Cusco, considerando para su análisis los canales fluviales mayores a 1000 m de longitud. Espero que la presente investigación que es la primera aproximación, sirva de modelo para realizar estudios de morfometría en otras cuencas hidrográficas del Perú.

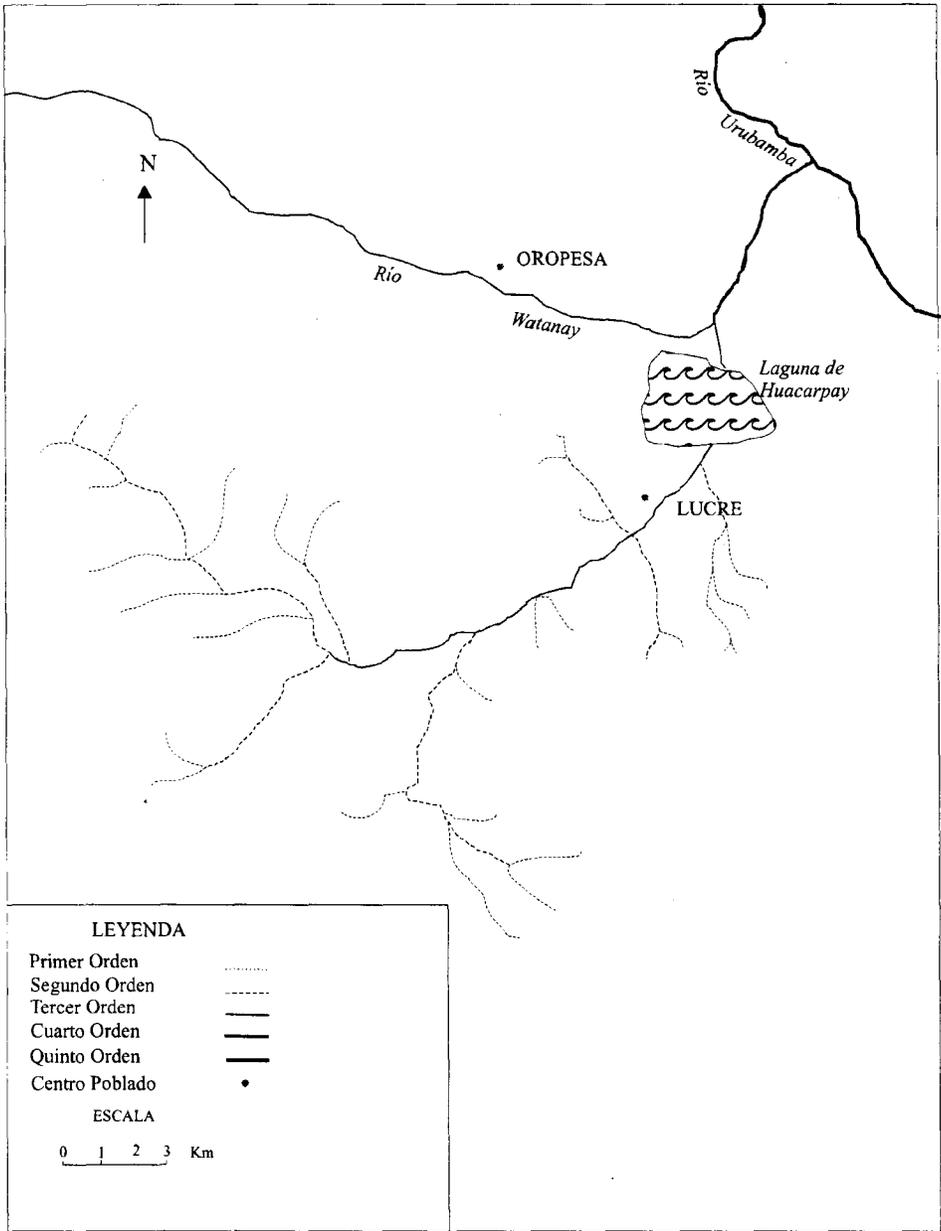
1. GENERALIDADES

1.1 *Cuenca del Río Lucre*

Se encuentra localizada al SE. de la cuenca hidrográfica del río Watanay, abarcando los distritos de Lucre y Oropeza de la Provincia de Quispincanchis del Departamento del Cusco. Sus coordenadas geográficas son: 13°37'09"S y 13°44'17" S y 71°41'40"W y 71°50'33" W. En términos altitudinales, cubre un territorio que va desde los 4489 m (Señal Pantapuncu) en el cerro Condorsayaña hasta los 3072 (Huacarpay); por tanto cubre los pisos ecológicos de Queswa, Transición, y Puna de Olarte y Dollfus; Queswa, Suni y Puna de Pulgar Vidal.

Se llama Cuenca del Río Lucre, por ser el Río Lucre, el de mayor jerarquía, el colector común de los torrentes de este sistema de drenaje que pasa por la localidad de Lucre, capital del distrito del mismo nombre, a 3086 m de altitud. La superficie total de la cuenca asciende a 103 km², que representan el 20.5 % del área total de la cuenca del río Watanay.

Aparentemente tiene forma triangular invertida, con la base hacia el norte, y los lados hacia SE y SW y con vértice en el lugar denominado Condorsayaña, donde se encuentra la señal de Pantapuncu que es la elevación más alta de la cuenca. Sus límites están dados por el Norte con la cuenca del río Watanay, del que la separa la cadena de montañas denominadas genéricamente cerros de Sayhua, Torioc, Sinchijonernioc, Joricalla y Corihuayrachina; por el Sur con la cuenca del río Paruro, separada por las elevaciones de Condorsayaña, Luichos y Campanayoc; por el Este con la cuenca del Río Marijó (Andahuaylillas), afluente del río Urubamba, separada por las elevaciones de Pucacasa, Combayoc y Sayhua. Finalmente por el Oeste con la cuenca del Río Choco que forma el río Watanay, separada por las elevaciones de Patococha, Chaquicocha y Toctobamba.



2. RIO LUCRE

Se origina en los riachuelos de Pacramayo al pie del cerro Toctohuampa a 4,050 m de altitud, a 13°37'58" S y 71°49'39" W. Su recorrido total es de 16 km y se pueden identificar tres sectores:

- a) **Curso Superior**, que corresponde a la parte alta del río, desde su origen hasta la afluencia del río Cullumayo. Recorre por encima de 3500 m de altitud payllelo al río Watanay de WNW a ESE. Tiene 6 km de longitud, formando una estrecha quebrada.
- b) **Curso Medio**; que comprende desde la confluencia del río Cullumayo hasta la localidad de Lucre. Recorre 7 kms de SW a NE formando un estrecho valle en forma de V.
- c) **Curso Bajo**; que recorre desde la localidad de Lucre hasta su desembocadura en el río Watanay, formando parte de un valle que gradualmente se ensancha en Huacarpay, confundándose con la Laguna del mismo nombre. Tiene aproximadamente 3 km de longitud. En un recorrido con dirección S a N.

Este río es alimentado por 10 afluentes por la margen izquierda y 12 por la margen derecha de primero y segundo orden. Los más importantes son:

Por la margen izquierda: los ríos: Cantorán y Perajarán.

Por la margen derecha: los ríos: Sinhuarán, Yutujasamayo, Cullumayo y Ullpo.

3. ANÁLISIS MORFOMÉTRICO

3.1 *Variables morfométricas básicas*

- a. **Modelo de Red de drenaje.** El patrón o modelo de drenaje fluvial es consecuencia del tipo de rocas que forman el relieve de la cuenca hidrográfica. De los diversos tipos de modelo de drenaje identificados, corresponde a la cuenca del río Lucre el tipo dendrítico que es una ramificación común y casi normal, efecto de la resistencia uniforme de las rocas a la erosión y también al posible contacto litológico.
- b. **Jerarquía Fluvial.** En base a la carta de 1:100,000, y a la metodología empleada por Horton y modificado por Strahler, se han identificado en total 44 cauces fluviales, jerarquizados hasta cauces de tercer orden; por consiguiente Lucre corresponde también a una cuenca del mismo orden (Tercer orden) y la Cuenca del Río Watanay al cuarto orden, conforme se observa en el siguiente cuadro:

Cuadro N° 1
ORDEN Y NÚMERO DE LA CUENCA DEL RÍO LUCRE

Orden	Número
1°	36
2°	7
3°	1
Total	44

Jerarquizando los cauces fluviales por márgenes se tiene el Cuadro N° 2.

Cuadro N° 2
JERARQUIZACIÓN DE LOS TORRENTES SEGÚN SU UBICACIÓN

Orden	Margen Derecha	Cauce Principal	Margen Izquierda	Total
1°	21	1	14	36
2°	4	1	2	7
3°	–	1	–	1
Total	25	3	16	44

Este cuadro nos indica que el mayor número de cauces o segmentos fluviales corresponde a la margen derecha, aunque no necesariamente la mayor densidad.

- c) **Area.** La cuenca tiene 103 km², determinado mediante el método de cuadrícula.
- d) **Perímetro.** tiene 46 km determinado mediante el curvímetro.

3.3 *Parámetros relativos a la forma de la cuenca*

A simple vista esta cuenca parece tener la forma triangular; sin embargo los geomorfólogos han establecido pautas para determinar la forma de las cuencas hidrográficas, aplicando fórmulas o relaciones matemáticas, particularmente para tipificar su grado de evolución. Según estas relaciones matemáticas cuando los índices se aproximan a la unidad (1), la cuenca hidrográfica muestra su avanzado grado de evolución.

La forma de la cuenca es importante, porque permite conocer el tiempo de concentración de la precipitación desde su caída hasta la salida dentro de sus límites. Existen varios parámetros, entre los que podemos mencionar:

- a) **Coefficiente de Compacidad (Kc)**. Llamado también Índice de Gravelius o simplemente Índice de Forma, que representa la relación entre el perímetro de la cuenca hidrográfica con una circunferencia de área igual a la de la cuenca hidrográfica considerada para su análisis. Para obtener este índice se emplea la siguiente fórmula:

$$Kc = P / C \text{ en donde:}$$

Kc = coeficiente de compacidad o índice de Gravelius

P = perímetro de la cuenca

C = Área del círculo igual a la de la cuenca estudiada

A su vez el área del círculo se obtiene empleando la fórmula:

$$A = 2rR \quad C = 2 \sqrt{A}$$

$$Kc = P/2 \sqrt{A}$$

$$Kc = 46 \text{ Km} / \sqrt{1416 * 103 \text{ km}^2}$$

$$Kc = 1.279$$

- b) **Factor Forma (Kf)**. Representa la relación entre la anchura media y la longitud total de la cuenca. La longitud de la cuenca (L) es obtenida siguiendo el curso del río principal o más largo desde la desembocadura hasta la cabecera más distante de la cuenca hidrográfica. La anchura media se obtiene dividiendo el área por la longitud de la cuenca. Este factor fue utilizado por primera vez por Horton (1932), por lo que se le conoce como índice de Horton.

$$Kf = A / L^2$$

$$Kf = 103 / 15.5^2$$

$$Kf = 0.429$$

- c) **Índice de circularidad (C)**. Llamado también circularidad de la cuenca. Se ha ideado para las cuencas hidrográficas evolucionadas. Fue introducido por Miller (1953) y se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$C = A/Ac$; en donde: C = circularidad, A = Área de la cuenca,
Ac = Área del círculo del mismo perímetro de la cuenca considerada.

Para obtener C luego de despejar la fórmula se utiliza la siguiente ecuación:

$$C = A/(P^2/4r)$$

$$C = 103/(2116/12.566)$$

$$C = 0.612$$

- d) **Indice de Gregory y Walling.** Relaciona área con perímetro utilizando la fórmula siguiente:

$$I_c = 4rA/P^2 \text{ en donde:}$$

I_c = índice de circularidad

r = radio

A = Área

P = perímetro

$$I_c = 4 \times 3.1415 \times 103/2116$$

$$I_c = 0.612$$

- e) **Indice de Circularidad de Schumm.** En 1956, Schumm propuso la relación entre el perímetro o circunferencia del supuesto círculo de la misma área de la cuenca estudiada y el perímetro de la cuenca. Para hallarla se utiliza la fórmula siguiente:

$$C = P_c/P.$$

Para aplicar directamente, luego de despejar la fórmula se utiliza la ecuación:

$$C = \sqrt{(4r^2A/P^2r)}$$

$$C = \sqrt{(4066.28/6647.61)}$$

$$C = \sqrt{0.612}$$

$$C = 0.78$$

- f) **Relación de elongación.** Considerando a Schumm, la prolongación de la cuenca relaciona el diámetro del círculo de la cuenca con la longitud de la misma, utilizando la relación matemática siguiente:

$$Re = 2\sqrt{A/r}$$

$$Re = 2\sqrt{103/3.1416}$$

$$Re = 11.45/15.5 = 0.74$$

- g) **Indice de Chorley, Malm y Pogorzelski (1957).** Relaciona la longitud de la cuenca y el área de la misma, utilizando las relaciones siguientes:

$$K = L^2/4A.$$

$$K = 15.5^2/4 \times 103$$

$$K = 240.25/412$$

$$K = 0.583$$

3.4. *Parámetros relacionadas con el drenaje*

a) **Longitud de la cuenca (L).** Es el mayor diámetro que existe en una cuenca hidrográfica, que generalmente es la distancia entre el nacimiento y la desembocadura del canal principal. Según Christofolletti (1970:113-114) existen los siguientes criterios para determinar la longitud de la cuenca hidrográfica:

- La mayor distancia en línea recta entre la desembocadura y determinado punto situado a lo largo del perímetro de la cuenca.
- La equidistancia entre la desembocadura y determinado punto del perímetro de la cuenca.
- La distancia entre la desembocadura y el punto más alto de la cuenca
- La distancia a lo largo del canal principal.

En el caso de la Cuenca del río Lucre ninguno de los criterios señalados por este autor se ajusta, porque la mayor distancia está entre dos puntos del perímetro de la cuenca que está fuera de la desembocadura. Esta distancia mide 15.5 km que representan justamente los extremos más occidental (Quinsacruz) y más oriental (Pucacasa) de la cuenca.

b) **Índice entre la longitud y el área de la cuenca (Ico).** Se define como la relación entre el diámetro de la cuenca y el área de la misma.

Esta relación sirve también para determinar la forma de la cuenca hidrográfica. Su valor cuando fuere próximo a la unidad (1.0) revela la forma semejante al cuadrado, cuando fuere inferior a dicha cifra tendrá forma más ancha que larga y cuando fuere superior a la unidad tendrá forma alargada. Tiene importancia según menciona Christofolletti (1974: 115) “para describir e interpretar tanto la forma como el proceso de ensanchamiento o alargamiento de la cuenca hidrográfica”. Se expresa por la siguiente fórmula:

$$Ico = Dc/\sqrt{A}$$

Ico = índice de relación entre longitud y área

Dc = diámetro o longitud de la cuenca

\sqrt{A} = raíz cuadrada del área de la cuenca

$$Ico = 15.5 \text{ km} / \sqrt{103 \text{ km}^2} = 15.5/10.14889$$

$$Ico = 1.53$$

La forma de la cuenca es alargada, porque el resultado es superior a la unidad.

- c) **Densidad hidrográfica o densidad de ríos (Dr)**. Se define como la “relación que existe entre el número de cauces o cursos de agua y el área de la cuenca hidrográfica”. Chorley & Schumm & Sugden (1984:315) lo definen como el “número de segmentos de canales de todos los órdenes por unidad de área”. Fue utilizado por primera vez por Horton (1945) como la frecuencia de ríos (The Stream frequency). Se calcula utilizando la fórmula:

$Dr = N/A$ en donde:

Dr = densidad hidrográfica,

N = número de cauces fluviales de todos los órdenes

A = área de la cuenca en km^2

$$Dr = 44/103 \text{ km}^2 = 0.43.$$

El resultado nos indica 0.43 ríos por cada km^2 de área. próxima a un canal fluvial por 2 km^2 .

- d) **Densidad de segmentos (Fs)**. Es la relación entre el número de cursos de agua de primer orden y el área de la cuenca. Fue establecido por Strahler y es similar a la densidad de ríos. Tiene importancia para determinar la capacidad de erosión de la cuenca, por lo que se llama también *Coficiente de Torrencialidad* (Ct). Se expresa por la relación:

$$Fs = Nu/A$$

$$Fs = 36/103 \text{ km}^2 = 0.349$$

- e) **Densidad de drenaje (Dd)**. Representa la relación entre la longitud total de los cursos de agua y la superficie de la cuenca. Fue definido por primera vez por Horton (1945) y posteriormente por Strahler. Este último estableció las escalas de densidades siguientes:

Densidad baja menor a 7.5,

Densidad media de 7.5 a 10.0

Densidad alta mayor a 10.0.

Por su parte los autores Villela S.M. y Mattos A. (1992:43) establecieron de manera cualitativa que las cuencas con Dd menor a 0.5 km/km^2 representan cuencas con drenaje pobre y con índices mayores a 3.5 km/km^2 representan cuencas excepcionalmente bien drenadas. Para calcular se aplica la fórmula:

$$Dd = Lt/A$$

$$Dd = 96 \text{ km}/103 \text{ km}^2 = 0.93 \text{ km de canal por cada km}^2 \text{ de área.}$$

Se trata de una densidad baja según la escala de Strahler y medianamente drenada según Villeda y Mattos.

- f) **Textura topográfica (Tt).** Llamada también textura de superficie, que expresa el grado de entallamiento o disecación de la superficie de la cuenca por acción fluvial. Conforme a Smith K.G. (1950) mencionado por Christofolletti (1986-87: 3) se emplea la siguiente ecuación:

$$\text{Log Tt} = 0.22 + 1.11 \log. Dd$$

Más tarde Freitas (1952) enunció la fórmula anterior con mayor precisión mediante la fórmula:

$$\log Tt = 0.219649 + 1.115 \log Dd.$$

Aplicando la fórmula respectiva tenemos:

$$\text{Log Tt} = 0.22 + 1.11 \log 0.92 = 0.18$$

- g) **Coefficiente de manutención (Cm).** Tiene la finalidad de proporcionar el área mínima necesaria para mantener un metro de canal permanente. Se expresa m^2/m utilizando la fórmula siguiente:

$$Cm = 1 \times 1000/Dd$$

$$Cm = 1000/0.92 = 1086.9$$

El resultado indica que requiere en la cuenca del río Lucre 1,086.9 m^2 de área para mantener un metro de canal permanente.

- h) **Extensión del Percurso superficial. (Eps).** Representa la distancia media que deben recorrer las aguas pluviales (lluvia) desde el interfluvio hasta el canal de agua permanente. Tiene cierta semejanza con el coeficiente de manutención que indica el área mínima para la existencia de un río permanente. Fue enunciado por primera vez por Horton (1945) y aplicado por Gandolfi y Christofolletti. Se expresa por la siguiente fórmula:

$$Eps = 1/2Dd$$

$$Eps = 1/2(0.92) = 0.543 \text{ km}$$

El resultado nos enseña que las aguas de lluvia en la cuenca del río Lucre tienen que recorrer una distancia media de 543 m ó 0.543 km antes de llegar al río permanente.

- j) **Relación de bifurcación (Rb).** Llamada también grado de ramificación de los cursos de agua. Representa la relación o proporción existente entre el número de canales de un orden dado y los del orden inmediatamente superior. Esta relación es generalmente constante en todos los órdenes de cursos de agua. Fue expresado por primera vez por Horton (1945). En base a este parámetro él enunció la “ley del número de canales fluviales”. Se expresa mediante la relación matemática siguiente:

$Rb = Nu/Nu + 1$; en donde:

Rb = Relación de bifurcación

Nu = número de cursos de agua de una orden dada

Nu + 1 = número de cursos de agua de orden inmediatamente superior.

Aplicando la fórmula tenemos el Cuadro N° 3.

Cuadro N° 3
RELACIÓN DE BIFURCACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO LUCRE

Orden	Número (N)	Relación	Rb
1°	36	–	–
2°	7	1°/2°	5.14
3°	1	2°/3°	7.00

El resultado nos enseña que, cada río de segundo orden se ramifica en más de 5 ríos de primer orden y, cada río de tercer se ramifica en 7 ríos de segundo orden. No es una ramificación o bifurcación constante

- i) **Relación ponderada de bifurcación (Rpb).** Representa el valor medio encontrado a través de una relación de valores de Rb y el número de canales englobados en cada cálculo. Esta variable fue propuesta por Strahler (1953) y Schumm (1956) con la finalidad de encontrar un índice de bifurcación más representativo. El producto resulta del cociente entre el producto y el número de cursos de agua englobados (Nce), como aparece en el Cuadro N° 4

Cuadro N° 4
RELACIÓN PONDERADA DE BIFURCACIÓN DE LA CUENCA DEL LUCRE

Orden	Número	Rb	Nce	Producto
1°	36	—	—	—
2°	7	5.14	43	221.02
3°	1	7.00	8	56.00
Total	44	—	51	277.02

$$Rpb = 277.02/51=5.43$$

- j) **Longitud del Río principal.** El río Lucre tiene 16 km de longitud y es el de mayor jerarquía y colector común de las aguas de la cuenca. Su longitud principal es distinta de la longitud de la cuenca. Tiene importancia para determinar la gradiente del canal y por consiguiente la velocidad de desplazamiento de las aguas en la cuenca.
- k) **Longitud total de los ríos. (Lt).** Está dada por la suma de longitudes de los cursos de aguas de distintas órdenes. Este parámetro asciende a 96.0 km. Para mayor objetividad se muestra el cuadro N° 5.

Cuadro N° 5
LONGITUD DE LOS TORRENTES DEL RÍO LUCRE

Orden	Número	Longitud (km)
1°	36	65.1
2°	07	20.9
3°	01	09.0
Total	44	96.0

Las longitudes totales de los ríos por márgenes resultan 49.1km para la margen derecha, 31.2 km para la margen izquierda y 16.0 al canal principal

- l) **Longitud media de los ríos (Lm).** Se obtiene relacionando la longitud total con el número de cauces fluviales de acuerdo a su jerarquía. Este parámetro aumenta conforme incrementa el orden. Tiene importancia para determinar la ley de la longitud de los cursos de agua.

El cuadro siguiente muestra los valores del parámetro de L_m 1,8 km para los ríos de primer orden, el 3,0 km para los segundo orden y 9.0 km para canal de tercer orden.

Cuadro N° 6
RELACIÓN DE BIFURCACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO LUCRE

Orden	Lt (km)	Número	Lm (km)
1°	65.1	36	1.8
2°	20.9	07	3.0
3°	09.0	01	9.0

- m) **Relación entre longitud media de ríos (R_{lm})**. El proceso de obtención es similar a la relación de bifurcación. Se define como la “relación que existe entre la longitud media de canales fluviales de un orden determinado y la longitud media de canales de orden inmediatamente superior”.

Fue estudiada por primera vez por Horton y en base a este parámetro el autor enunció la “ley de la longitud media de canales fluviales”. El parámetro resultante según Strahler se triplica cada vez que aumenta el orden. Para calcularlo se utiliza la fórmula siguiente:

$R_{Lm} = L_{mu} / L_{m(u-1)}$ que resulta en el Cuadro N° 7.

Cuadro N° 7
RELACIÓN ENTRE LA LONGITUD MEDIA DE LOS RÍOS DE LA CUENCA DEL LUCRE

Orden	Lm (km)	Relación	R _{lm}
1°	1.8	–	–
2°	3.0	2°/1°	1.67
3°	9.0	3°/2°	3.00

3.5 Parámetros relacionados con el relieve de la cuenca

- a) **Amplitud altimétrica máxima de la cuenca (H)**. Este parámetro está representado por la distancia vertical entre altitud máxima y la altitud más baja que se presenta en la cuenca. Esto es la diferencia vertical entre el punto más alto y el punto más bajo. El punto más alto constituye la señal de Pantapuncu

(4489 m), localizada en el extremo meridional de la cuenca; mientras el punto más bajo se encuentra en la desembocadura del Lucre en el Watanay al S de la laguna de Huacarpay, a 3072 m. Por tanto la amplitud altimétrica máxima es 1417 m.

- b) **Relación de Relieve (Rr).** Es la relación que existe entre la amplitud altimétrica máxima (Hm) y la mayor longitud de la cuenca medida en la desembocadura del río principal. Christofolletti (1970: 21) la considera como la “relación existente entre el relieve total de una cuenca (diferencia de altitud entre el punto más alto y el punto más bajo de la cuenca hidrográfica) y la mayor extensión de la referida cuenca, medida paralelamente a la principal línea de drenaje”. Se aclara que la mayor longitud de la cuenca del Lucre se encuentra entre dos extremos (occidental y oriental), de modo que no se relaciona con la desembocadura del río principal, entonces no se toma cuenta este parámetro. Para calcularlo en condiciones normales se utiliza la fórmula:

$Rr = Hm/Lc$ en donde:

Hm = amplitud altimétrica o topográfica máxima

Lc = longitud de la cuenca.

Debido a múltiples problemas referentes a la longitud de la cuenca, se aconseja utilizar el diámetro geométrico de la cuenca. Por su parte Maxwell (1960) para evitar problemas referentes a la longitud de la cuenca aconseja utilizar la fórmula siguiente:

$$Rr = Hm \cdot 100/P$$

Aplicando la fórmula tenemos:

$$Rr = 1417 \times 100/46 \text{ km}$$

Aplicando la fórmula de Melton tenemos:

$$Rr = Hm/A$$

$$Rr = Hm/103$$

$$Rr = 1417/10.15$$

$$Rr = 139.6$$

- c) **Índice de Rugosidad (Ir).** Resulta del producto entre la amplitud altimétrica máxima y la densidad de drenaje conforme a la fórmula siguiente:

$$Ir = Hm \cdot Dd$$

$$I_r = 1417 \times 0.92 = 1303.64$$

- d) **Índice de disecación (Id)**. Se define como el producto de la amplitud topográfica (hm) por la raíz cuadrada de la densidad de segmentos (Fs) considerando la ordenación de Strahler representado por la fórmula:

$$Id = 1417 \times \sqrt{Fs}$$

$$Id = 1417 \times \sqrt{0.346}$$

$$Id = 833.5$$

- f) **Simetría topográfica (St)**. Es la semejanza que existe entre la amplitud topográfica de áreas localizadas en ambos márgenes del río principal. Para calcular se utiliza la fórmula

$$St = 100 \cdot H_{mi} / (H_{mi} + H_{md})$$

$$H_{mi} = 4489\text{m} - 3072 = 1417 \text{ m}$$

$$H_{md} = 4244\text{m} - 3072 = 1172 \text{ m}$$

El punto más alto en el margen derecha es la señal de Pantapuncu (4489 m); mientras en el margen izquierda es el Cerro Joricalla (4244 m). Aplicando la fórmula:

$$St = 100 \times 1417 / (1417 + 1172) = 54.7$$

- g) **Amplitud altimétrica total de los ríos (Htc)**. La amplitud altimétrica de los ríos, se llama también declive o pendiente de ríos. Está representada por la diferencia altimétrica que existe entre la altitud de origen y la altitud de desembocadura de los cursos de agua. La amplitud altimétrica total está representada por la suma de altitudes altimétricas de todos los cauces fluviales según su orden, conforme aparece en el cuadro N° 8

Cuadro N° 8

AMPLITUD ALTIMÉTRICA DE LOS RÍOS DE LA CUENCA DEL LUCRE

Orden	Hmte (m)
1°	12.940
2°	2.040
3°	330
Total	15.310

- h) **Amplitud altimétrica media de ríos (Hmc).** Resulta del cociente o relación entre amplitud altimétrica total o la declividad total (dt) y el número de los cursos fluviales. Sus valores conforme a la teoría disminuyen a medida que aumenta el orden. El valor más alto corresponde a los cauces de primer orden y el más bajo a los cauces de orden superior. Veamos el cuadro siguiente

Cuadro N° 9
RELACIÓN DE BIFURCACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO LUCRE

Orden	Hmte	Número	Hmme (m)
1°	12.940	36	359.4
2°	2.040	7	291.4
3°	330	1	330.0

- i) **Gradiente de cauces fluviales (Gc).** Representa la relación entre la amplitud altimétrica máxima del canal o canales fluviales y la longitud del canal o canales fluviales, conforme a la siguiente fórmula:

$$Gc = Dm/Lc.$$

Nosotros emplearemos en lugar de la fórmula anterior la relación siguiente:

$Gc = V/H$ en donde:

Gc = gradiente de canales

V (vertical) representa la medida vertical en metros, que reemplaza a la amplitud altimétrica; mientras H , (horizontal) es la medida horizontal en km en reemplazo de la longitud del canal fluvial.

Strahler (1984:534) define la declividad o gradiente con el nombre de pendiente de los ríos “como la razón entre el desnivel vertical y la distancia horizontal, medidos desde el extremo superior al inferior de un único segmento de cauce de un orden dado”. El resultado se obtiene en porcentajes y en ángulos. Si fuere en porcentaje se emplea la formula siguiente:

$$Gc = 1417.100/H$$

Cuadro N° 10
GRADIENTE DE CAUCES FLUVIALES

Orden	V (m)	H (km)	Valor de Gradiente	% de Gradiente	Angulos de Gradiente
1°	12.940	65.1	0.198771121	19.877	11°14'31"
2°	2.040	20.9	0.097607655	9.760	5°34'30"
3°	330	9.0	0.036666666	3.666	2°5'59"

3. ANÁLISIS TOPOLÓGICO DEL DRENAJE

El estudio topológico de las redes de drenaje, se refiere a la manera como están articulados los canales; es decir está relacionado con la manera por la cual varios canales se encuentran conectados sin tomar en cuenta cualquier medida de longitud, área u orientación. Los estudios iniciales fueron hechos por Horton (1945), posteriormente ahondados por Schumm, Strahler, Melton y Shreve (1966).

Para el análisis topológico de las redes de drenaje es necesario recordar el concepto de “**ligamentos o conexiones**”, que son trechos de canales fluviales a lo largo de los cuales no ocurre ninguna unión. Este concepto es distinto del concepto de “**segmento fluvial**, término utilizado para la jerarquía u ordenación de los ríos y se utiliza para designar el trecho o porción de un río donde el orden asignado permanece el mismo.

Existen dos clases de ligamentos: Ligamento exterior que está representado por todos los cursos de agua de primer orden y ligamento interior representado por todos los canales de órdenes superiores, menos el del primer orden, (segundo, tercero, cuarto orden, etc). El ligamento exterior es igual al número de fuentes o nacientes (n), mientras que el ligamento interior es igual a n-1.

La operación para determinar los ligamentos se inicia en la desembocadura, luego se sigue a la izquierda contando de trecho en trecho, colocando el dígito “0” para el ligamento interno y el dígito “1” para el ligamento externo. Esto es seguir en el conteo en sentido de las agujas del reloj de modo que se forman las combinaciones binarias.

Christofoletti (1980: 123) nos enseña una regla para determinar los ligamentos. Esta es la siguiente: “comenzar en la desembocadura y atravesar la red siguiente siempre por la izquierda en cada unión y revertiendo en dirección de cada nacimiento: un cero (0) será escrito cuando atraviesa un ligamento exterior

y por primera vez, y uno (1) será escrito cuando el ligamento fuere por la primera vez. Nada debe ser escrito cuando los ligamentos fueran atravesados por segunda vez (cuando se camina en dirección de la desembocadura). Cualquier combinación binaria para las redes fluviales deberá comenzar siempre con cero y terminar con disposición consecutiva de por lo menos con dos dígitos (1)”

Las combinaciones binarias, sirven para comparar redes iguales y redes diferentes. Cuando tienen la misma combinación binaria son redes topológicamente idénticas, y cuando tienen distinta combinación binaria se trata de redes topológicamente distintas o diferentes.

Aplicando el análisis topológico a la cuenca del Río Lucre tenemos: ligamentos externo = N y ligamentos internos = N-1.

N = 44, que significa que existen 44 ligamentos externos
N-1 = 43 que existen 43 ligamentos internos. Total 87 ligamentos

4. LEYES DE COMPOSICIÓN DE DRENAJE

Las Leyes de Composición de drenaje, constituyen el aporte más valioso de la geografía cuantitativa y teórica, cuyo inicio se debió a los estudios de Horton (1845), quien se interesó por las interacciones de los eventos (morfometría) considerando que el sistema de drenaje puede ser dividido en sus componentes de orden diferente teniendo importancia dinámica (Chorley y Hagget 1970: 122) y enunció las leyes de composición de drenaje de las cuencas hidrográficas, como son: “Ley del Número de los Cauces Fluviales”, “Ley de la Longitud de los Cauces Fluviales”, “Ley de los Declives medios de los Cauces Fluviales”. A estas tres leyes, posteriormente fueron agregadas la “Ley de Areas Medias de las Cuencas” por Schumm y Strahler, y la “Ley de la Constancia de la Amplitud de los Cauces” por Christofolletti y Machado (1977). Finalmente Hagget habla de la “Ley de Carga Fluvial”, con el nombre de “Ley de flujos del Itinerario”.

- a) **Ley del Número de cauces fluviales.** Para obtener y formular la ley del número de ríos es menester conocer dos parámetros: número de ríos y relación de bifurcación. Basado en la relación de bifurcación, Horton formuló la ley del número de cauces fluviales en la siguiente forma: “El número de corrientes fluviales de ordenes sucesivamente inferiores de una cuenca dada, tiende a formar una progresión geométrica, que comienza con el único segmento o cauce de orden más elevado y crece según una relación constante de bifurcación”

La fórmula es la siguiente: $R_b = N_u/N_u + 1$

Cuadro N° 10
NÚMERO DE CAUCES FLUVIALES

Orden	Número	Relación	Rb
1°	36	—	—
2°	7	1°/2°	5.14
3°	1	2°/3°	7.0

Los dos valores de R_b no son constantes, sino diferentes, por tanto se trata de una cuenca no bien organizada.

- b) **Ley de la longitud de los cauces fluviales.** Para determinar esta ley, es necesario previamente conocer tres parámetros: longitud total de los ríos (L_t), Longitud media de los ríos (L_m) y Relación de longitud media de los ríos (R_{Lc}). Estos parámetros ya fueron determinados. La Relación de Longitud media de los canales fluviales es un parámetro similar a la Relación de Bifurcación, que representa la relación o cociente existente entre longitud media de cauces de un orden dado, con la longitud media de cauces de orden inmediatamente inferior.

Basado en la relación anterior Horton (1945) enunció la ley en la siguiente forma: “La longitud media acumulada de canales de órdenes sucesivas, tiende a formar una progresión geométrica, cuyo primer término es la longitud media de canales de primer orden y tienen por razón una relación de longitud constante”

Para aplicar esta ley a las cuencas hidrográficas se utiliza la fórmula siguiente:

$R_{Lm} = L_{mc}/L_{m(c-1)}$ que para la Cuenca del Río Lucre es como sigue:

Cuadro N° 11
LONGITUD DE CAUCES FLUVIALES

Orden	L_t (Km)	L_m (Km)	Relación	R_{Lm}
1°	65.1	1.8	—	—
2°	20.9	3.0	3.0/1.8	1.67
3°	09.0	9.0	9.0/3.0	3.00