

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN RECURSOS HÍDRICOS**



**“SIMILITUD HIDRÁULICA DE SISTEMAS HIDROLÓGICOS
ALTOANDINOS Y TRANSFERENCIA DE INFORMACIÓN
HIDROMETEOROLÓGICA”**

Presentada por:

SANTOS OSWALDO ORTIZ VERA

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE *DOCTORIS PHILOSOPHIAE*
EN RECURSOS HÍDRICOS**

Lima - Perú

2016

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN RECURSOS HÍDRICOS**

**“SIMILITUD HIDRÁULICA DE SISTEMAS HIDROLÓGICOS
ALTOANDINOS Y TRANSFERENCIA DE INFORMACIÓN
HIDROMETEOROLÓGICA”**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE

Doctoris Philosophiae (Ph.D.)

Presentada por:

SANTOS OSWALDO ORTIZ VERA

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Ph.D. Absalón Vásquez Villanueva
PRESIDENTE

Dr. Néstor Montalvo Aquíñigo
PATROCINADOR

Dr. Jesús Abel Mejía Marcacuzco
MIEMBRO

Ph.D. Eusebio Ingol Blanco
MIEMBRO

Dr. Napoleón Puño Lecarnaque
MIEMBRO EXTERNO

PRÓLOGO

Este trabajo se inspira en la ingeniería hidráulica de modelos físicos, la que proyectada al campo de la ingeniería hidrológica permite, en cierta medida, dar respuesta a la acentuada necesidad de falta de información hidrometeorológica- sobre todo en países en vías de desarrollo- en el afán de contribuir a resolver problemas hidráulicos de carácter social localizados allá en las remotas cuencas altoandinas. Comprendiendo que todo proyecto hidráulico cumple fines sociales abrigo la esperanza que, por la naturaleza adimensional de esta metodología, este modesto trabajo pronto encuentre acogida en un marco espacial mucho más amplio de futuras investigaciones relacionadas con la hidrología que coadyuve en la lucha contra la pobreza y a enfrentar los problemas de cambio climático global, incluyendo eventos extremos de fenómenos de El Niño.

DEDICATORIA

A mis hijos *Elizabeth* y *Oswaldo*, como testimonio de cariño imperecedero y ejemplo de entrega constante a la superación.

A la memoria de mis padres *Estela Vera Silva* y *Gonzalo Ortiz Yépez* (Q.D.G y E.P.D) por su amor, ejemplo de padres, orientación y entrega al trabajo.

A mí querido tío ***Víctor Vera Silva***, por sus sabias orientaciones, sin las cuales tal vez no hubiese conseguido los logros profesionales.

A mi estimado sobrino *Carlos Alberto Ortiz Mostacero* y a mi amigo *Francisco Vásquez Tapia* por su constante apoyo desinteresado.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de Cajamarca por haberme concedido la oportunidad de seguir por la senda de la superación profesional.

Al Doctor Néstor Montalvo Archiñigo, Patrocinador de este trabajo, por sus sabias orientaciones sin las cuales hubiese sido imposible lograr la meta propuesta.

A los Doctores, Jesús Abel Mejía Marcacuzco y Eusebio Ingol Blanco, miembros del Comité Consejero, por haberme brindado su apoyo, orientación y facilitación de conocimientos para la consecución de tan noble tarea.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Problema.	3
1.2. Justificación.	3
1.3. Alcances.	4
1.4. Objetivos.	4
1.4.1. Objetivo general.	4
1.4.2. Objetivos específicos.	5
1.5. Hipótesis.	5
II. REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1. Similitud Hidráulica y Morfometría Adimensional de Cuencas Hidrográficas.	6
2.1.1. Semejanza geométrica.	7
2.1.2. Semejanza Cinemática.	13
2.1.3. Semejanza dinámica.	17
2.2. Análisis Dimensional y Parámetros Adimensionales.	21
III. MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1. Área de Estudio.	24
3.2. Análisis dimensional y leyes físicas de los sistemas hidrológicos Altoandinos.	26
3.2.1. Parámetro adimensional de forma y semejanza geométrica.	28
3.2.2. Parámetro adimensional de escurrimiento instantáneo.	29
3.2.3. Parámetro adimensional de escurrimiento sostenido.	30
3.2.4. Parámetro adimensional orográfico y semejanza dinámica.	31
3.2.5. Parámetro adimensional de lluvia	31
3.3. Funciones de Transferencia de Información.	32
3.4. Parámetros adimensionales y similitud hidráulica de sistemas hidrológicos.	34
3.4.1. Índice de Gravelius y semejanza geométrica.	34
3.4.2. Relación de confluencias y semejanza cinemática.	35
3.4.3. Coeficiente orográfico y semejanza dinámica.	35
3.4.4. Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos.	36

3.5. Muestra hidrológica y tratamiento cartográfico.	36
3.6. Identificación de Sistemas Hidrológicos con Similitud Hidráulica	38
3.7. Transferencia de Información Hidrometeorológica	38
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1. Parámetros Morfométricos Adimensionales de Similitud Hidráulica y Características Muestrales.	41
4.1.1. Índice de Gravelius.	41
4.1.2. Relación de Confluencias Promedio.	42
4.1.3. Coeficiente orográfico.	43
4.2. Clasificación de Sistemas Hidrológicos por su Geometría.	47
4.2.1. Forma oval redonda.	47
4.2.2. Forma oval oblonga.	40
4.2.3. Forma oblonga alargada	53
4.3. Similitud Hidráulica de Sistemas Hidrológicos.	56
4.3.1. Similitud hidráulica de sistemas de forma oval redonda.	56
4.3.2. Similitud hidráulica de sistemas de forma oval oblonga.	56
4.3.3. Similitud hidráulica de sistemas de forma oblonga alargada.	66
4.4. Parámetros Adimensionales y Funciones de Transferencia de Información Hidrológica.	71
4.4.1. Parámetros adimensionales y leyes físicas de los sistemas Hidrológicos altoandinos.	71
4.4.2. Condición de similitud y funciones de transferencia.	79
4.4.3. Aplicaciones de las funciones de transferencia.	81
4.5. Discusión de resultados	84
V. CONCLUSIONES	85
VI. RECOMENDACIONES	89
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Esquema de modelos de formas de cuencas hidrográficas.	12
Figura 2: Esquema de jerarquización de una red de drenaje según Horton.	17
Figura 3: Ubicación de la región Cajamarca.	25
Figura 4: Forma de microcuencas oval redonda con semejanza geométrica.	48
Figura 5: Forma de microcuencas oval oblonga con semejanza geométrica.	51
Figura 6: Forma de microcuencas oblonga alargada con semejanza geométrica.	54
Figura 7: Microcuencas de forma oval oblonga con similitud hidráulica.	57
Figura 8: Microcuencas de forma oblonga alargada con similitud hidráulica.	67

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Formas geométricas de cuencas hidrográficas en base a rangos del coeficiente de Gravelius.	10
Tabla 2: Categorización de la red de drenaje de la cuenca de la figura 2, mediante el método de Horton (1932).	17
Tabla 3: Variables y dimensiones del fenómeno físico precipitación-escorrentía en microcuencas altoandinas.	27
Tabla 4: Intensidades máximas de precipitación-estación pluviométrica Weberbauer (2536 msnm), microcuenca río Mashcón.	40
Tabla 5: Índices de ramificación de redes de drenaje de microcuencas altoandinas región Cajamarca, para áreas menores a 600 Km ² , a escala 1/100 000.	42
Tabla 6: Potencial de degradación hídrica de microcuencas altoandinas región Cajamarca, para áreas menores de 600 Km ² , a escala 1/100 000.	43
Tabla 7: Parámetros adimensionales de similitud hidráulica de microcuencas altoandinas de la región Cajamarca.	46
Tabla 8: Grupo de microcuencas altoandinas de la forma oval redonda-G.A	49
Tabla 9: Grupo de microcuencas altoandinas de la forma oval oblonga-G.B	52
Tabla 10: Grupo de microcuencas altoandinas la forma oblonga alargada-G.C	55
Tabla 11: Microcuencas con similitud hidráulica de la forma oval oblonga-G.B1	58
Tabla 12: Microcuencas con similitud hidráulica de la forma oval oblonga-G.B1.1	60
Tabla 13: Microcuencas con similitud hidráulica de la forma oval oblonga-G.B1.2	61
Tabla 14: Microcuencas con similitud hidráulica de la forma oval oblonga-G.B1.3	62
Tabla 15: Microcuencas con similitud hidráulica de la forma oval oblonga-G.B2	64
Tabla 16: Microcuencas con similitud hidráulica de la forma oval oblonga-G.B3	65
Tabla 17: Microcuencas de la forma oblonga alargada con similitud hidráulica-G.C1	68
Tabla 18: Microcuencas de la forma oblonga alargada con similitud hidráulica-G.C2	69
Tabla 19: Microcuencas de la forma oblonga alargada con similitud hidráulica-G.C3	70
Tabla 20: Intensidades máximas de precipitación transferidas a la microcuenca río Jadibamba.	83

RESUMEN

Se observa en la naturaleza espacios geográficos similares que seguramente se han ido construyendo como consecuencia de una dinámica de acciones y respuestas recurrentes de fenómenos climáticos sobre sistemas geológicos parecidos durante miles de años. En toda esta dinámica, la acción del agua sin duda tiene que jugar un rol preponderante. El objeto de este trabajo fue el de encontrar las condiciones de similitud y la forma de cómo identificar los sistemas hidrológicos hidráulicamente semejantes, por analogía entre modelo y prototipo de la teoría de modelos hidráulicos de la mecánica de fluidos, cuyas propiedades adimensionales no sólo sirvan para transferir información hidrológica entre sistemas similares, sino también para inferir características de distribución ecológica y eco-sistémica en dichos espacios. Para ello, se realizó el análisis dimensional con las principales variables del fenómeno físico más importante precipitación-escorrentía, a efecto de agruparlas en parámetros o leyes adimensionales que expliquen mejor el control de dicho fenómeno y permita de esta manera identificar entre ellos los parámetros representativos de semejanza geométrica, cinemática y dinámica de los sistemas hidrológicos. Se encontró que los parámetros adimensionales *coeficiente de Gravelius*, *relación de confluencias* y *coeficiente orográfico*, son los parámetros referentes de la semejanza geométrica, cinemática y dinámica, respectivamente; hecho que también fue corroborado con los resultados de análisis morfométrico adimensional de cincuenta microcuencas altoandinas del departamento de Cajamarca. De otro lado, las leyes adimensionales y sus combinaciones se convirtieron en instrumentos sumamente valiosos para la formulación de las funciones de transferencia de información hidrológica desde sistemas hidrológicos con información (sistema de origen) hacia sistemas hidráulicamente similares sin información (sistema destino).

PALABRAS CLAVE: Sistemas hidrológicos altoandinos, similitud hidráulica, transferencia, información hidrometeorológica.

ABSTRACT

Similar geographical areas that have been built probably as a result of dynamic actions and responses recurring climatic phenomena on similar geological systems for thousands of years is observed in nature. In this dynamic, the action of water certainly has to play a major role. The purpose of this study was to find the conditions of similarity and how to identify hydraulically similar hydrological systems, by analogy between model and prototype models of hydraulic theory of fluid mechanics, whose dimensionless properties not only serve to hydrological data transfer between similar systems, but also to infer characteristics of ecological and eco-systemic distribution in such spaces. For this, the dimensional analysis of the main variables most important physical phenomenon rainfall-runoff, in order to group them into dimensionless parameters or laws that explain better control this phenomenon was performed and thus allow identifying each representative parameters geometry, kinematics and dynamics of water systems likeness. It was found that the dimensionless parameters Gravelius ratio, ratio of convergence and orographic factor are the parameters for the geometric, kinematic and dynamic similarity respectively; fact which was also corroborated by the results of morphometric analysis dimensionless fifty Andean department of Cajamarca watersheds. On the other hand, the dimensionless laws and their combinations became extremely valuable tools for the formulation of the transfer functions of hydrological information from hydrological information systems (source system) to hydraulically similar systems without information (target system).

KEY WORDS: Andean hydrological systems, hydraulic similarity, transfer, hydro meteorological information.

SIMILITUD HIDRÁULICA DE SISTEMAS HIDROLÓGICOS ALTOANDINOS Y TRANSFERENCIA DE INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

I. INTRODUCCIÓN

Generalmente, la información hidrometeorológica es muy escasa, pero aún más, la información hidrométrica y sedimentológica, hecho que dificulta en grado sumo, el planeamiento, diseño y operación de los proyectos de aprovechamiento hídrico; donde las mayores repercusiones lo sufren los países en vías de desarrollo. Situación que ha conducido a que muchos proyectos hidráulicos de gran inversión, como las grandes presas de regulación, terminen su vida útil prematuramente, ocasionando grandes económicas, (Jiménez, O. & Farías H., 2005; Rocha, 2006; ICOLD, 2008).

En el Perú, el problema se agudiza porque, además de la escasez de información de esorrentías en los cauces de las redes hidrográficas, la poca información pluviométrica disponible se registra en estaciones sin ningún criterio de distribución espacial sobre las cuencas, siendo las microcuencas hidrológicas altoandinas las más perjudicadas por ser las más alejadas del sistema hidrográfico, (Rocha, 2006).

Esta situación obliga a la búsqueda de metodologías sencillas, acorde con la realidad, que permitan generar información local, en cantidad y calidad, lo suficientemente aceptables para fines prácticos. Una de las alternativas de generación de información local, aún no aprovechada, es usando principios de similitud hidráulica entre sistemas hidrológicos altoandinos.

El estudio de similitud entre modelo y prototipo, con una adecuada operación de modelos a escala, ha hecho posible la construcción de grandes obras de ingeniería, las que han contribuido enormemente al desarrollo socioeconómico de los pueblos. Sin embargo, no obstante que el hombre es artífice de todo esto, no ha podido conseguir con exactitud una total similitud entre modelo y prototipo; pero aun así, los resultados del modelo, transferidos al prototipo, han sido suficientes para la solución de gran

cantidad de problemas en la práctica, (Streeter, et al., 1999; Sotelo Ávila, G., 1977; Franzini, J.B. & Finnemore, E.J., (1999); Rodríguez Díaz, H.A., 2001).

La ingeniería hidráulica de modelos físicos a escala reducida, fue motivo importante de inspiración para el desarrollo del presente trabajo, consistente en identificar en la propia naturaleza sistemas hidrológicos con similitud hidráulica, cuyas condiciones pueden aprovecharse para transferir información de un sistema a otro similar. En el maravilloso escenario de la naturaleza, a través de millones de años, ha sucedido algo parecido a lo que hoy hace el hombre artificialmente en materia de similitud; donde las acciones dinámicas naturales de causa-efecto recurrentes en sistemas de naturaleza intrínseca similar han ido construyéndose sistemas hidrológicos unos a imagen de otros.

El objeto de este trabajo es desarrollar una metodología que permita identificar sistemas hidrológicos similares, usando parámetros adimensionales como referentes de semejanza geométrica, cinemática y dinámica. Estos parámetros de semejanza y otros deducidos dimensionalmente de fenómenos físicos que tienen como escenario a la cuenca, mediante el principio de similitud hidráulica se convierten en funciones de transferencia de información hidrometeorológica entre sistemas hidrológicos similares, (Streeter V., et al, 1999; Vergara, M., 1993; Sotelo Ávila, G., 1977; Rodríguez Díaz, H. A., 2001).

La metodología limita su aplicación a sistemas hidrológicos altoandinos, donde la superficie receptora de eventos pluviométricos coincide con la superficie colectora, teniendo a la precipitación como variable más importante y única de entrada al sistema. Teniendo en cuenta estas particularidades, mediante un análisis dimensional, ha permitido obtener las leyes físicas que gobiernan los sistemas hidrológicos altoandinos y, que en conjunto, constituye el fundamento científico de la metodología.

No obstante que el área de estudio comprende una muestra de microcuencas altoandinas ubicadas en el ámbito territorial de la región Cajamarca, la naturaleza adimensional de esta metodología permite generalizar su aplicación a sistemas hidrológicos de otra región o inter-regiones subnacionales o internacionales, siempre y cuando cumplan las leyes físicas que gobiernan estos sistemas, (Streeter V., et al, 1999; Vergara, M., 1993; Sotelo Ávila, G., 1977; Rodríguez Díaz, H. A., 2001).

Los criterios de similitud hidráulica entre sistemas hidrológicos, no sólo puede resultar beneficioso para transferir información hidrometeorológica, sino además, se tiene la esperanza que sea de mucha utilidad en el manejo de cuencas hidrográficas piloto, motivo de réplica en otros sistemas similares, en el afán de afrontar problemas de cambio climático global y eventos extremos de fenómenos del Niño.

1.1. PROBLEMA

¿Cómo impacta la escasa o falta de información hidrológica en la región Cajamarca?

Dificulta el planeamiento y la gestión de los recursos hídricos, afectando también en gran medida el diseño, operación y mantenimiento de los proyectos hidráulicos (drenaje de carreteras, abastecimiento de agua potable, canales de riego, defensas rivereñas, pequeñas presas de regulación, pequeñas centrales hidroeléctricas, drenaje urbano de aguas pluviales, manejo de suelos, entre otros). Problema que es común en el Perú y en todos los países en vías de desarrollo.

¿Es posible la generación de información hidrológica empleando criterios de similitud hidráulica entre cuencas altoandinas?

La respuesta a esta interrogante es afirmativa, siempre y cuando los sistemas hidrológicos cumplan aproximadamente las condiciones de similitud hidráulica de manera similar que en la hidráulica de modelos físicos a escala reducida.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La metodología de transferencia de información hidrometeorológica entre sistemas hidrológicos hidráulicamente similares resuelve, en cierta medida, el problema de escasez o falta de información hidrometeorológica local, puesto de manifiesto al momento de desarrollar proyectos hidráulicos de carácter social en localidades rurales de sistemas hidrológicos altoandinos, como son: canales de regadío, drenaje de carreteras, drenaje urbano, defensas ribereñas, pequeñas presas de regulación, manejo de suelos, entre otros. Pues, la información más escasa pero de requerimiento frecuente, consiste en escorrentías e intensidades máximas de precipitación, cuya ausencia o

déficit puede ser cubierto transfiriendo información entre sistemas hidrológicos hidráulicamente similares, desde localidades muy distantes.

La información hidrometeorológica con mayor detalle y calidad, en tiempo y espacio, se encuentra casi siempre, por razones obvias, en localidades de fácil acceso muy lejanas, respecto a los lugares inaccesibles donde se desarrollan los proyectos. Esta metodología permite la transferencia de información de manera muy simple, comparada con cualquier otra, que a menudo requiere de abundantes registros de datos estratégicamente bien distribuidas en espacio y tiempo, que permita un análisis regional con resultados aceptables, lo cual muchas veces se torna imposible, repercutiendo además en la economía del proyecto.

En general, la similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos, no sólo resuelve problemas relacionados con proyectos hidráulicos, sino también puede emplearse en proyectos de desarrollo integral en los diferentes pisos ecológicos, cuyos modelos piloto pueden ser motivo de réplica en otros ámbitos similares, con el fin de afrontar problemas relacionados con el cambio climático global, el mismo que viene acentuándose en estos últimos tiempos.

1.3. ALCANCES

Dada la naturaleza adimensional de la metodología aquí propuesta, no sólo es aplicable a sistemas hidrológicos altoandinos de la región de estudio, sino también puede aplicarse a unidades hidrológicas de cualquier otra región o inter-regiones, subnacionales o internacionales, con tal que cumplan las leyes físicas que gobiernan los sistemas hidrológicos altoandinos.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología que permita identificar sistemas hidrológicos altoandinos con similitud hidráulica, cuyas condiciones permitan transferir o intercambiar información hidrometeorológica entre dichos sistemas, haciendo uso de las leyes físicas

de morfometría adimensional que las gobiernan; de manera similar a cómo se procede en la teoría de modelo y prototipo.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las leyes físicas que gobiernan los sistemas hidrológicos altoandinos, mediante análisis adimensional.
- Identificar los parámetros morfométricos adimensionales referentes de semejanza geométrica, cinemática y dinámica de los sistemas hidrológicos altoandinos.
- Definir cuantitativamente el grado de aproximación de la similitud hidráulica de los sistemas hidrológicos, fijando un límite para cada parámetro adimensional, lo suficientemente aceptable para fines prácticos.
- Identificar los sistemas hidrológicos hidráulicamente similares, con el grado de aproximación previamente establecido.
- Formular las funciones de transferencia de información hidrometeorológica entre sistemas hidrológicos altoandinos hidráulicamente similares.
- Determinar y explicar las características hidrológicas generales de las microcuencas altoandinas de la región Cajamarca, en base a los resultados del análisis morfométrico adimensional.

1.5. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

Existen en la región Cajamarca sistemas hidrológicos altoandinos hidráulicamente similares, con cierto grado de aproximación, cuyas condiciones pueden aprovecharse para transferir información hidrometeorológica entre dichos sistemas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Por analogía entre modelo y prototipo de la mecánica de fluidos, la similitud hidráulica de sistemas hidrológicos tiene su base científica en el análisis dimensional y semejanza dinámica. El análisis dimensional cubre un campo muy amplio de aplicaciones, desde la homogeneidad dimensional de ecuaciones que describen fenómenos físicos, hasta la agrupación de variables en parámetros adimensionales que, aplicados a modelos y prototipos, sirven para transferir características de variables entre dos o más sistemas similares, independientemente de su tamaño, (Sotelo Ávila, G., 1977; Vergara, N., 1993; Streeter, et al., 1999; Francini, J.B. & Finnemore, E. J., 1999; Rodríguez Díaz, H. A., 2001; Poter M. C. & Wiggert D.C., 2002).

Para la obtención de información de calidad, en estudios con modelos físicos, se requiere como condición que exista similitud dinámica entre modelo y prototipo. Para ello es conveniente que exista similitud geométrica exacta y geometría de patrón de flujo (campo de líneas de corriente) similar, requerimientos que en la práctica es algo imposible de alcanzar. Sin embargo, no obstante tales dificultades, los resultados aproximados han hecho posible la solución de grandes problemas de ingeniería que contribuyen al desarrollo de la humanidad, (Sotelo Ávila, G., 1977; Vergara, M., 1993; Streeter, et al., 1999; Franzini, J.B. & Finnemore, E. J., 1999; Rodríguez Díaz, H. A., 2001; Poter M. C. & Wiggert D.C. 2002).

2.1. SIMILITUD HIDRÁULICA Y MORFOMETRÍA ADIMENSIONAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

La importancia del estudio de semejanza radica en la estimación de las características de las variables de comportamiento del prototipo a partir de los resultados obtenidos sobre el modelo. Características que se transfieren desde el modelo a partir de los parámetros adimensionales representativos, para lo cual es conveniente que entre modelo y prototipo se cumplan ciertas condiciones de semejanza: geométrica, cinemática y dinámica. La tercera condición debe cumplirse, por añadidura, si las dos primeras se satisfacen enteramente, (Sotelo Ávila, G., 1977; Vergara, M., 1993; Streeter, et al., 1999; Francini, J.B. & Finnemore, E. J., 1999; Rodríguez Díaz, H. A., 2001; Poter M. C. & Wiggert D.C., 2002).

En lo que sigue de esta sección se hace mención a las condiciones de semejanza entre modelo y prototipo estudiados en mecánica de fluidos para luego, por analogía, hacerlas extensivas a la similitud de sistemas hidrológicos en hidrología. Se discuten aquí los parámetros adimensionales de hidrología más usados en estudios morfométricos para explicar el comportamiento hidráulico de sistemas hidrológicos, los mismos que serán corroborados por el análisis dimensional de variables y leyes físicas que gobiernan los sistemas hidrológicos altoandinos.

2.1.1. SEMEJANZA GEOMÉTRICA

a. *Modelo y prototipo en mecánica de fluidos*

En la ingeniería hidráulica de modelos hidráulicos físicos, existe semejanza geométrica entre *modelo* y *prototipo* cuando ambos poseen una forma idéntica, lo cual se representa por una diferencia de tamaño, conocido como *factor de escala* de longitudes. Esta relación constante entre distancias homólogas, se representa mediante las ecuaciones (1). En algunas ocasiones, es imposible representar todas las características por un mismo factor de escala recurriéndose casi siempre a una *distorsión*, lo cual afecta negativamente a la similitud, (Sotelo Ávila, 1977; Vergara, M., 1993; Streeter, et al., 1999; Rodríguez Díaz, H.A., 2001; Poter M. C. & Wiggert D.C. 2002).

$$L_e = \frac{L_m}{L_p}; \quad L_e^2 = \frac{A_m}{A_p}; \quad L_e^3 = \frac{U_m}{U_p} \quad (1)$$

L_e = Factor de escala

L_m = Longitud homóloga del modelo

L_p = Longitud homóloga del prototipo

A_m = Área del modelo

A_p = Área del prototipo

U_m = Volumen del modelo

U_p = Volumen del prototipo

En muchos casos de modelos hidráulicos, cuando la magnitud de las dimensiones horizontales, predominan exageradamente sobre las verticales (ríos, canales), se adoptan dos escalas, una para las distancias horizontales y otra para las verticales; incluso, se puede adoptar una tercera para el tamaño de rugosidades, si éstas son importantes, (Sotelo Ávila, G., 1977; Vergara, M., 1993; Shames Irving, H., 1998; Streeter, et al., 1999; Franzini, J.B. & Finnemore, E. J., 1999; Rodríguez Díaz, H. A., 2001; Poter M. C. & Wiggert D.C. 2002).

b. Índice de Gravelius en sistemas hidrológicos

En lo referente a cuencas hidrográficas, los estudios se realizan sobre mapas cartográficos, los que son proyecciones de relieves del terreno de la cuenca sobre un plano horizontal, con lo cual queda reducido a una sola escala de dimensiones horizontales. Esto, desde ya, constituye una distorsión en la similitud de sistemas hidrológicos, que la hidrología tiene que asumir como costo en las estimaciones.

Diversos estudios morfométricos de cuencas, en diferentes épocas, consideran al ***índice de Gravelius*** como el parámetro adimensional de mejor referencia para explicar la geometría de la cuenca y su influencia en las características de la escorrentía superficial, (Gravelius, 1914; Horton, 1932; Roche, 1963; Strahler, 1964; Remenieras, 1971; Linsley et al., 1977; Hardí, 1985; López C. & Mintegui A. 1987; Chow et al., 1994; López C., 1998; Gaspari F. J, 2002; Askoa I.G., 2004; Docampo, B.G.et al., 2009; Gaspari F.J.et al., 2012).

Por estos antecedentes y naturaleza adimensional, se asumió en este trabajo que el índice de Gravelius (1914), constituye el ***factor de escala*** más adecuado para describir la geometría de la cuenca y, por tanto, como condición de similitud geométrica de los sistemas hidrológicos. Consecuentemente, se puede inferir que:

“Dos o más sistemas hidrológicos altoandinos son geoméricamente semejantes si tienen igual índice de Gravelius”.

El término “igual” debe entenderse aquí, que no tiene connotación matemática, sino simplemente el de una igualdad hidrológica, que al igual que en estadística se acepta con cierto grado de aproximación válida para fines prácticos.

El coeficiente de compacidad o *índice de Gravelius*, dado por la ecuación (2), se define como la *relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una cuenca teórica circular que tiene igual área que la cuenca* (Gravelius, 1914).

$$K_c = 0.28 \frac{P}{A^{1/2}} \quad (2)$$

K_c = Coeficiente de compacidad

P = Perímetro medido en el plano de la cuenca

A = Área de la cuenca, medida en el plano a escala.

En este parámetro adimensional, la línea limítrofe (divisoria de aguas o línea perimetral) define la forma y la amplitud superficial de la cuenca, tiene influencia sobre la esorrentía directa y, por tanto, en la marcha y geometría del hidrograma resultante de una precipitación, (López Cadenas de Llano & Mintegui Aguirre, 1987).

Valores del índice de Gravelius cercanos a la unidad (forma redondeada de la cuenca hidrográfica) dan origen a menores tiempos de concentración de la cuenca receptora-colectora, produciendo continuamente ondas de crecidas súbitas instantáneas mayores, creando condiciones de muy alta vulnerabilidad a las inundaciones, (López cadenas de Llano, 1998).

Una cuenca hidrográfica, desde el punto de vista de su geometría y funcionamiento como sistema dinámico, hidráulicamente puede caracterizarse por su *morfología*, naturaleza intrínseca, uso del suelo y cobertura vegetal, (Henaos, 1988; Mintegui Aguirre & López Unzú, 1990; Gaspari, 2002; Gaspari et al., 2009).

La forma geométrica de una cuenca hidrográfica, desde el punto de vista de su funcionamiento como sistema, tiene influencia directa en la transformación de la

precipitación en escurrimiento, hecho que facilita los estudios de semejanza, (López Cadenas de Llano, 1998).

Las propiedades morfométricas de cuencas hidrográficas proporcionan descripción física espacial importante, las que se ven reflejadas en las características hidráulicas de los flujos de escorrentía que tienen que ver con la producción hídrica, erosión y transporte de sedimentos y nutrientes a lo largo de los ecosistemas que las integran, (Gaspari, et al, 2012).

Teniendo en cuenta que la geometría de la cuenca afecta las características de la escorrentía directa o geometría del hidrograma de flujos efluentes, resulta conveniente definir las clases geométricas de cuencas en base a comportamientos de respuestas, con tal finalidad resulta interesante el criterio de clasificación basada en rangos del índice de Gravelius mostrado en la Tabla1, (Henaos, 1988).

A la luz de los antecedentes cada geometría de cuenca, propuesta en la Tabla 1, está ligada a cierto comportamiento de la escorrentía directa, lo cual generalmente se refleja también en la configuración de la red de drenaje, contribuyendo así en cierta medida a la semejanza cinemática, (Henaos, 1988; Mintegui Aguirre & López Unzú, 1990; Gaspari, 2002; Gaspari et al., 2009).

Tabla1: Formas geométricas de cuencas hidrográficas en base a rangos del índice de Gravelius.

Formas de sistemas hidrológicos con base en el coeficiente de Gravelius		
Clase de geometría	Rango de clase	Forma de cuenca
K_{c1}	$1 < K_C \leq 1.25$	Oval redonda
K_{c2}	$1.25 < K_C \leq 1.50$	Oval oblonga
K_{c3}	$1.50 < K_C \leq 1.75$	Oblonga alargada

Fuente: Henaos, (1988).

La clasificación geométrica de cuencas mediante el criterio de rangos del índice de Gravelius es una de las más relevantes y se adecúa mucho a la geometría de las cuencas de la región Cajamarca y, en general, a los sistemas hidrológicos altoandinos ubicados

en las tres vertientes de los sistemas hidrológicos peruanos: Titicaca, Pacífico y Atlántico.

La forma ***oval redonda*** ($1 < K_c \leq 1.25$) de una cuenca (parte **a** de la Figura 1), en general, se caracteriza por originar tiempos de concentración relativamente cortos, generando hidrogramas de salida de tipo leptikúrtico, donde las crecidas efluentes son muy súbitas y violentas, con altos riesgos de inundaciones ante tormentas extraordinarias. La excesiva capacidad de drenaje de estos sistemas va siempre acompañado de altos potenciales erosivos y de transporte de sedimentos, pérdidas de escorrentía directa muy altas y recesiones cortas, en perjuicio de la recarga de acuíferos; características que se acentúan a medida que el índice de Gravelius se aproxima al límite inferior de dicho rango, (Strahler, 1964; Gregory & Walling, 1973; Cooke & Doornkamp, 1974; Way, 1978; Morisawa, 1985; Henaos, 1988; Sala & Gay, 1981; Paton, 1988; Ward & Robinson, 2000; Cuesta, 2001; Delgadillo A. & Páez G., 2008).

La forma ***oval oblonga*** ($1.25 < K_c \leq 1.50$) de una cuenca (parte **b**, de la Figura 1), tiene un comportamiento hidráulico muy similar a la forma oval redonda, solo que las respuestas van siendo cada vez menos intensas, a medida que el índice de Gravelius se aproxima al límite superior del rango (1.50), en estos sistemas la peligrosidad de inundaciones frente a tormentas extraordinarias es menor que en la forma anterior, (Strahler, 1964; Gregory & Walling, 1973; Cooke & Doornkamp, 1974; Way, 1978; Morisawa, 1985; Henaos, 1988; Sala & Gay, 1981; Paton, 1988; Ward & Robinson, 2000; Cuesta, 2001; Delgadillo A. & Páez G., 2008).

La forma ***oblonga alargada*** ($1.50 < K_c \leq 1.75$) de una cuenca (parte **c** de la Figura 1), se caracteriza porque los tiempos de concentración son relativamente mayores que en las dos formas anteriores, generando hidrogramas de crecidas efluentes del tipo platikúrtico, con caudales más sostenidos y recesiones más prolongadas. A diferencia de los dos tipos de geometría anterior, esta forma ofrece mayores ventajas para la recarga de acuíferos y menores pérdidas por escorrentía directa; condiciones que van mejorando a medida que el índice de Gravelius se aproxima al límite superior del rango (1.75), también los riesgos por inundaciones ante tormentas extraordinarias son mucho menores, (Strahler, 1964; Gregory & Walling, 1973; Cooke & Doornkamp, 1974;

Way, 1978; Morisawa, 1985; Henaos, 1988; Sala & Gay, 1981; Paton, 1988; Ward & Robinson, 2000; Cuesta, 2001; Delgadillo A. & Páez G., 2008).

El esquema de la Fig.1 muestra, aproximadamente, los modelos geométricos de cuencas utilizando el criterio de rangos del índice de Gravelius de la Tabla.1, (Henaos, 1988).

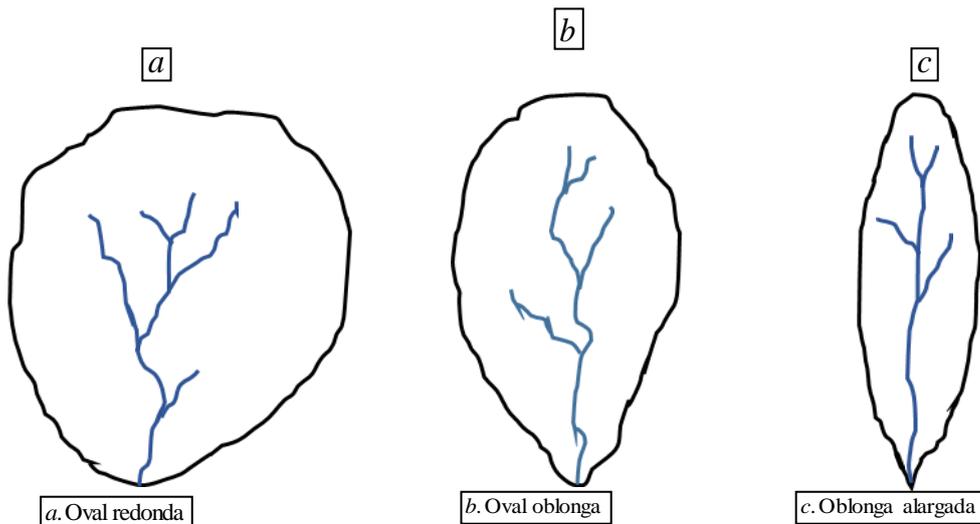


Figura1: Esquema de modelos de formas de cuenca según rangos del coeficiente de Gravelius.

¿Cómo, influye la forma de la cuenca en la escorrentía?

La forma de la cuenca influye mucho en la geometría del hidrograma de escorrentía directa, generando hidrogramas del tipo *leptikúrtico* - con crecidas súbitas y violentas- en *cuencas redondeadas* y, del tipo *platikúrtico*- con picos de crecidas de menor intensidad- en *cuencas alargadas*; como respuesta ante tormentas pluviométricas extraordinarias, (Strahler, 1964; Gregory & Walling, 1973; Cooke & Doornkamp, 1974; Way, 1978; Morisawa, 1985; Henaos, 1988; Sala & Gay, 1981; Paton, 1988; Ward & Robinson, 2000; Cuesta, 2001; Delgadillo A. & Páez G., 2008).

2.1.2. SEMEJANZA CINEMÁTICA

a. Modelo y prototipo en mecánica de fluidos

La similitud cinemática entre modelo y prototipo se consigue cuando la relación entre presiones dinámicas en puntos homólogos o correspondientes es una constante. Dicho en otras palabras, cuando la configuración de líneas de corriente o patrón de flujo es geoméricamente semejante. Condición que se expresa mediante las ecuaciones (3), (Sotelo Ávila, 1977; Vergara, M., 1993; Shames, Irving H., 1998; Streeter, et al., 1999; Rodríguez Díaz, H.A., 2001; Poter M. C. & Wiggert D.C., 2002).

$$V_e = \frac{V_m}{V_p} = \frac{L_m t_m^{-1}}{L_p t_p^{-1}} = L_e t_e^{-1}; \quad a_e = \frac{a_m}{a_p} = \frac{L_m t_m^{-2}}{L_p t_p^{-2}} = L_e t_e^{-2}; \quad Q_e = \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{L_m^3 t_m^{-1}}{L_p^3 t_p^{-1}} = L_e^3 t_e^{-1} \quad (3)$$

V_e = Escala de velocidades

V_m = Velocidad homóloga en el modelo

V_p = Velocidad homóloga en el prototipo

a_e = Escala de aceleraciones

Q_e = Escala de caudales

t_e = Escala de tiempos.

b. Relación de confluencias promedio en sistemas hidrológicos

A la luz de los resultados de diversos estudios morfométricos de cuencas, de una u otra manera, todos convergen en señalar que la geometría de la red hidrográfica está influenciada por la forma de la cuenca y ambas se reflejan en las características de la respuesta dinámica de flujos superficiales que implica transferencia de materia y energía, cuyo grado de eficiencia depende de la disposición espacial de la red de drenaje o patrón de flujo. La disposición o configuración espacial de la red de drenaje superficial se puede representar cuantitativamente mediante la razón o relación de confluencias promedio de la ecuación (4), (Strahler, 1964; Gregory & Walling, 1973; Cooke & Doornkamp, 1974; Smith D. & Stopp P. 1978; Way, 1978; Sala & Gay, 1981; Morisawa, 1985; Paton, 1988; Ward & Robinson, 2000; Cuesta, 2001; Askoa I.G.,

2004; Ibáñez S., et al., 2004; Delgadillo A. & Páez G., 2008; Docampo, B.G., et al., 2009; Gaspari F.J. 2012).

Cuanto más redonda es una cuenca, menor es el valor de la relación o razón de confluencias promedio (red de drenaje más ramificadas) y más pronunciada y súbita la onda de crecida (mayor riesgo de inundaciones) y; contrariamente, mientras más alargada es la cuenca mayor es la relación de confluencias (redes con menores ramificaciones), picos de crecidas más atenuados y prolongados y, por tanto, menores riesgos de inundaciones, (Strahler, 1964; Gregory & Walling, 1973; Cooke & Doornkamp, 1974; Smith D. & Stopp P. 1978; Way, 1978; Sala & Gay, 1981; Morisawa, 1985; Paton, 1988; Ward & Robinson, 2000; Cuesta, 2001; Askoa I.G., 2004; Ibáñez S., et al., 2004; Delgadillo A. & Páez G., 2008; Docampo, B.G., et al., 2009; Gaspari F.J. 2012).

El valor promedio de la relación de confluencias explica, en cierta medida, la configuración espacial de la red de drenaje y se refleja en la geometría del hidrograma de escurrentía, de modo muy similar a la geometría de la cuenca, (Chow et al., 1994).

El tiempo de concentración, juega papel importante en la geometría del hidrograma de escurrentía y depende de la forma de la cuenca y de la disposición espacial de la red de drenaje, (López Cadenas de Llano & Mintegui Aguirre, 1987; Chow et al., 1994; Gaspari et al., 2009).

Para explicar la geometría y dinámica de la red de drenaje, mediante la relación de confluencias promedio, se requiere jerarquizar la red de drenaje, desde los pequeños surcos hasta los ríos, donde confluyen unos en otros configurando el colector principal de toda la cuenca. La morfología de la red, densidad de drenaje y los órdenes jerárquicos alcanzados son parámetros fundamentales de estudio que dependen de los caracteres geomorfológicos y bióticos del sistema, (Askoa Ibizate, G. 2004).

El análisis de las características morfométricas y funcionales de una cuenca hidrográfica- a través de parámetros adimensionales de forma, relieve, y red de drenaje- es la base en la modelación hidrológica para determinar el movimiento y captación de aguas de lluvia, (Strahler, 1964; Gaspari et al., 2009).

Una vez categorizada la red de drenaje, la relación de confluencias promedio resulta de relacionar el número de cauces de cierto orden “i” y el número de cauces de orden inmediatamente superior “i+1” y promediando luego todos los valores parciales, tal como lo expresan las ecuaciones (4). Los valores de relación de confluencias promedio conducen al análisis interpretativo de la geometría de la red de drenaje y su respuesta dinámica ante tormentas pluviales extraordinarias, (Strahler, 1964; Gregory & Walling, 1973; Way, 1978; Gay, 1981; Sala & Gay, 1981; Morisawa, 1985; Paton, 1988; Sala & Gay, 1981; Ward & Robinson, 2000).

$$R_{ci} = \frac{N_i}{N_{i+1}}; \quad R_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1} R_{ci} \quad (4)$$

R_{ci} = Relación de confluencia parcial

N_i = Número de cursos de orden i

N_{i+1} = Número de cursos de orden inmediatamente superior

R_c = Relación de confluencias promedio

n = Número de relación de confluencias parciales calculadas.

De acuerdo a las leyes de categorización de la red de drenaje, el número de cauces es menor mientras mayor sea la categoría u orden, correspondiendo uno y sólo uno a la máxima categoría de la red, (Horton, 1932). De lo cual se desprende que la relación de confluencias, tanto valores parciales como el promedio, será siempre mayor que la unidad.

¿Cómo, influye la relación confluencias sobre la escorrentía?

Valores bajos de relación de confluencias promedio corresponden a cuencas muy bien drenadas, de forma redondeada y redes muy ramificadas; contrariamente, los altos valores de relación de confluencias corresponden a cuencas de forma alargada, de bajo drenaje y redes poco ramificadas, (Delgadillo, A. et al., 2004).

Del análisis anterior se puede establecer finalmente que el parámetro adimensional de **relación de confluencias promedio**, es el que mejor se acerca a la descripción de la

configuración espacial de la red de drenaje o patrón de flujo de la escorrentía superficial, y por tanto, constituye el mejor referente de semejanza cinemática. En consecuencia, se puede inferir que:

“Dos o más sistemas hidrológicos altoandinos son cinemáticamente semejantes si tienen igual relación de confluencias promedio”. Con la misma indicación del término “igual”, que para el caso de semejanza geométrica.

De este análisis se puede inferir también que, estando la geometría de la red de drenaje influenciada por la geometría de la cuenca, resulta muy conveniente en todo análisis regional agrupar primero las cuencas por su forma a fin de facilitar la identificación de sistemas hidrológicos hidráulicamente similares.

De otro lado, si el índice de Gravelius y la relación de confluencias impactan de manera similar sobre la geometría del hidrograma de escorrentía efluente, entonces se puede aseverar que, siendo la geometría de la cuenca el parámetro con mayor estabilidad, la geometría de la red de drenaje puede ir modificándose con el tiempo en su búsqueda de estabilidad o equilibrio; sobre todo, en lo concerniente a los cauces de menor jerarquía de las cuencas jóvenes, como son los sistemas hidrológicos altoandinos.

La Figura 2 y la Tabla 2 resumen el procedimiento a seguir para la categorización o jerarquización de cauces de una red de drenaje y estimación cuantitativa de relación de confluencias, parciales y promedio, empleando el método de Horton (1932).

La metodología de Horton (1932), a diferencia de otras, señala que al iniciar la categorización de una red en las confluencias más alejadas donde concurren dos cauces, sólo uno de ellos es de primera categoría (orden 1), mientras el otro es de segunda categoría (orden 2). El curso de primer orden o categoría queda determinado por el que haga mayor ángulo en el punto de confluencia, respecto del tramo siguiente. De allí en adelante, la regla general de categorización es similar al de otras metodologías, es decir, la confluencia de dos cauces de igual orden dan origen a otro de orden inmediatamente superior, mientras que la confluencia de dos cauces de diferente categoría dan origen a otro cauce con la categoría que ostenta el de mayor jerarquía. Una vez terminada la

categorización de toda la red de drenaje, el cauce que ostenta la mayor jerarquía viene a constituir el curso principal del sistema hidrológico y, por ende, la categoría la cuenca.

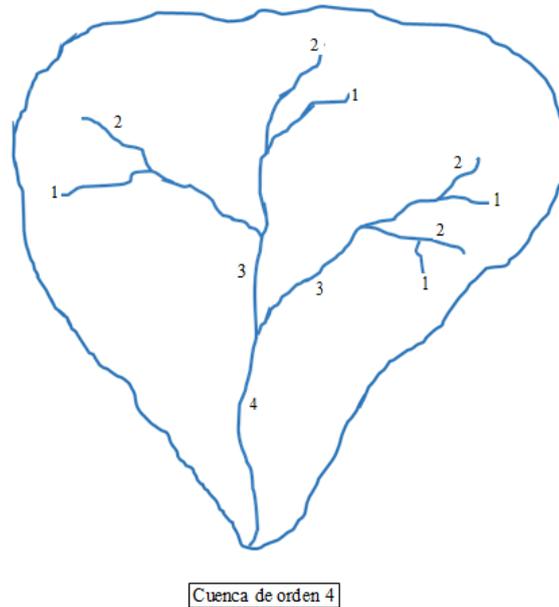


Figura 2: Esquema de la red de drenaje de una cuenca y jerarquización de cauces mediante el método de Horton.

Tabla 2: Categorización de la red de drenaje de la cuenca de la Figura 2 mediante el método de Horton (1932) y determinación de la relación de confluencias.

Categoría	Número de cauces	Relación de confluencias
1	4	1.00
2	4	2.00
3	2	2.00
4	1	-
PROMEDIO		1.67

2.1.3. SEMEJANZA DINÁMICA

a. Modelo y prototipo en mecánica de fluidos

La semejanza dinámica entre modelo y prototipo teóricamente se consigue por añadidura, luego de haberse cumplido enteramente las condiciones de semejanza geométrica y cinemática, y viene a ser la relación entre la fuerza de inercia en el modelo y su homóloga correspondiente en el prototipo, dada por el factor de escala de la ecuación (5), (Sotelo Ávila, G., 1977; Vergara, M., 1993; Shames Irving H., 1998;

Franzini, J.B. & Finnemore, E.J., 1999; Streeter, et al., 1999; Rodríguez Díaz, H.A., 2001).

$$F_e = \frac{F_m}{F_p} = \frac{M_m a_m}{M_p a_p} = \frac{\rho_m L_m^3 L_m t_m^{-2}}{\rho_p L_p^3 L_p t_p^{-2}} = \rho_e L_e^4 t_e^{-2} \quad (5)$$

F_e = Escala de Fuerzas

F_m = Fuerza homóloga en el modelo

F_p = Fuerza homóloga en el prototipo

ρ_e = Escala de densidades

Similarmente a lo expresado en la ecuación (5), relacionando la fuerza de inercia con cada una de las fuerzas predominantes en cada fenómeno físico particular de flujo, se obtienen todos los parámetros o números adimensionales que gobiernan cada fenómeno físico particular; tales como los números adimensionales de: **Reynolds, Euler, Froude, Cauchy, Weber, Mach, Strouhal, Prandtl, Brinkham, Grasshof**, entre otros, (Sotelo .Ávila, G. 1977; Vergara, M., 1993; Shames Irving, H. 1998; Streeter, et al., 1999; Franzini, J.B & Finnemore E.H., 1999; Rodríguez Díaz, H.A., 2001).

b. Coeficiente orográfico en sistemas hidrológicos

A diferencia de los parámetros adimensionales descriptores de la geometría de la cuenca y de la red de drenaje- índice de Gravelius y relación de confluencias promedio, respectivamente- muy utilizados en los diversos estudios morfométricos, no ha ocurrido lo mismo con el ***coeficiente orográfico***, no obstante ser uno de los parámetros adimensionales más importantes en sistemas hidrológicos altoandinos como descriptor de fuerzas gravitacionales de los flujos de escorrentía superficial, tal como lo corrobora una de las leyes que gobiernan los sistemas hidrológicos altoandinos, discutidas más adelante.

El coeficiente orográfico es el resultado de relacionar el cuadrado de la altitud media y la proyección del área de la cuenca sobre un plano horizontal, expresada mediante la ecuación (7). Parámetro adimensional asociado con la capacidad o potencial de erosión

hídrica y de transporte de sedimentos de los sistemas hidrológicos altoandinos, tal como se aprecia en la ecuación (6), la misma que involucra a las componentes adimensionales de pluviosidad y factor de relieve de la cuenca (coeficiente orográfico), como las variables más importantes de pérdida de suelos, (Henaos, 1988).

$$q_s = 2.65 \log (P/P_*) + 0.46 \log (C_o - 1.56) \quad (6)$$

q_s = tasa potencial de pérdida de suelo, $t \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$

P = promedio pluviométrico multianual, mm

P_* = precipitación máxima del mes, mm

C_o = coeficiente orográfico, adimensional, expresado en porcentaje (%).

Se considera aquí, por razones obvias, que el **coeficiente orográfico** constituye el parámetro adimensional de relieve más importante que controla el potencial o poder degradante de los sistemas hidrológicos y todo lo relacionado con la dinámica de los flujos superficiales gravitacionales inmersos en la transferencia de materia y energía. Visto de este modo, el coeficiente orográfico no sólo resulta útil en la evaluación de pérdida de suelo, sino también en la evaluación de potenciales hidroenergéticos disponibles en los sistemas hidrológicos.

$$C_o = \frac{H^2}{A} \quad (7)$$

C_o = Coeficiente orográfico

H = Altitud media, m.s.n.m.

A = Área proyectada sobre un plano horizontal.

¿Cómo, influye el coeficiente orográfico en la degradación de la cuenca?

Los mayores valores del coeficiente orográfico corresponden a cuencas de mayor pendiente (menor área proyectada), ubicadas en zonas montañosas a mayor altitud sobre el nivel del mar, y por tanto, sometidas a mayores potenciales de degradación (pérdida de suelos) y flujos con alta capacidad de transporte de sedimentos (Henaos, 1988). La

bondad de estas cuencas es la de ofrecer grandes saltos hidráulicos para la generación de energía hidráulica, pero en contraposición con los bajos caudales de aporte por tratarse cursos superiores cercanos a cabeceras de cuenca.

La altitud media (H) elevada al cuadrado, en la expresión del coeficiente orográfico (ecuación 6), convierte a este parámetro en muy sensible frente a la propagación de errores, por lo que es aconsejable que la altitud media se estime mediante metodologías de mayor aproximación posible, tal como el método de momentos estáticos que expresado por el teorema de Varignon de la ecuación (8), (Henaos, 1988; Ven Te Chow, 1993; Aparicio M., 1997).

La aproximación será mayor mientras mayor sea el número de áreas parciales, entre curvas a nivel, en que quede dividida el área total de la cuenca.

$$H = \frac{1}{A} \sum_A \Delta A_i \times h_i \quad (8)$$

H = Altitud media, msnm

A = Área de la cuenca (proyectada)

ΔA_i = Área parcial entre curvas de nivel consecutivas

h_i = Promedio de las cotas de las curvas de nivel que limitan las áreas parciales.

De este análisis, se puede inferir que:

“Dos o más sistemas hidrológicos son similares, dinámicamente, si tienen igual coeficiente orográfico”. Con la misma indicación del término “igual” que para los casos de semejanza geométrica y cinemática.

En general, el nivel de aproximación de la similitud hidráulica de los sistemas hidrológicos deberá estar acorde con los fines que persigue el estudio. Con la finalidad de evitar mayores errores, todas las variables involucradas en los parámetros adimensionales de similitud de sistemas hidrológicos deberán determinarse a partir de planos, a la misma escala, a efecto de evitar **distorsiones**. Además, el tamaño de escala debe ser compatible con el tamaño de las unidades hidrológicas investigadas.

2.2. ANÁLISIS DIMENSIONAL Y PARÁMETROS ADIMENSIONALES

El análisis dimensional constituye la base científica para construir, experimentar y transferir características de variables del modelo al prototipo; procedimiento que requiere de una adecuada planificación si se desea llegar a resultados aceptables en cuanto a calidad de información, costo y tiempo. El análisis dimensional es una etapa previa a todo este proceso, donde la selección de variables principales del fenómeno que se estudia y su agrupamiento en parámetros adimensionales, conducen a la definición de las leyes físicas que gobiernan el modelo y prototipo, (Sotelo Ávila, G., 1977; Vergara, M., 1993; Streeter, et al. 2000; Franzini, J.B & Finnemore E.H., 1999; Rodríguez Díaz, H.A., 2001).

Obviamente, la construcción y experimentación del modelo serán exitosas en la medida que el investigador sea capaz de conseguir un máximo de aproximación de similitud hidráulica entre modelo y prototipo con los recursos y equipos disponibles. En lo que respecta a sistemas hidrológicos, todo el trabajo lo realiza a escala natural la propia naturaleza, a través de millones de años, mediante procesos dinámicos de acciones y respuestas permanentemente recurrentes.

Teorema PI de Vaschy – Buckingham

Este teorema, base fundamental del análisis dimensional, se puede resumir en lo siguiente: *“si en un determinado fenómeno físico intervienen “n” variables principales en las que, en conjunto, contienen “d” dimensiones fundamentales, con todas ellas se pueden formar (n-d) parámetros adimensionales”*. Para ello, cada parámetro adimensional se forma con el producto de un número “d” de variables repetidas en todos los parámetros, elevada cada una a cierta potencia incógnita diferente; se acompaña a cada producto con cada una de las variables que quedan, elevada a la primera potencia. Las variables usadas como repetidas en cada PI deberán seleccionarse, de tal manera que sean independientes y tengan diferente dimensión, (Streeter, et al. 2000; Franzini, J.B. & Finnemore, E.H., 1999; Rodríguez Díaz, H.A., 2001).

Suponiendo que el fenómeno físico a estudiar involucra un conjunto de “**n**” variables principales, en cuyo grupo están presentes tres magnitudes fundamentales-por ejemplo, fuerza, longitud, tiempo. Entonces, en concordancia con el teorema PI de Vaschy-Buckingham, se escogen tres variables ($d = 3$) que se repiten en los productos de todos los PI (V_1, V_2, V_3); las que bajo las condiciones y supuestos señalados anteriormente, se pueden denotar las expresiones funcionales siguientes:

$$\pi_1 = V_1^{x_1} V_2^{y_1} V_3^{z_1} V_4$$

$$\pi_2 = V_1^{x_2} V_2^{y_2} V_3^{z_2} V_5$$

$$\pi_3 = V_1^{x_3} V_2^{y_3} V_3^{z_3} V_6$$

.....

.....

.....

$$\pi_{n-d} = V_1^{x_{n-d}} V_2^{y_{n-d}} V_3^{z_{n-d}} V_n$$

El símbolo π del primer miembro de cada ecuación simplemente es un símbolo que denota que es un número sin dimensiones y nada tiene que ver con la constante matemática con la que estamos familiarizados.

Cada parámetro π se determina reemplazando cada variable por sus dimensiones y calculando luego el valor de cada exponente, mediante el sistema de ecuaciones simultáneas resultante para el conjunto de exponentes, de tal manera que cada parámetro sea adimensional, lo que equivale a igualar cero cada exponente, (Streeter, et al. 2000; Franzini, J.B & Finnemore E.H., 1999; Rodríguez Díaz, H.A., 2001).

Si todas las variables que intervienen en un fenómeno físico son importantes, entonces todas ellas se pueden agrupar formando una función, o lo que es lo mismo se puede formar una función con todos los parámetros adimensionales, de la manera siguiente:

$$f(V_1, V_2, V_3, \dots, V_n) = 0$$

$$\phi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-d}) = 0$$

Consecuentemente, en concordancia con lo antes discutido, el teorema PI de Vaschy - Buckingham puede denotarse de una manera más general mediante la ecuación (9).

$$G_i = V_i \prod_{j=d-n+1}^{j=n} V_j^{a_{ij}} \quad i = 1, \dots, n-d \quad (9)$$

Donde, G_i representa a cada grupo o parámetro adimensional; mientras que a_{ij} , se determina de tal modo que cada grupo sea adimensional (Franzini, J.B & Finnemore E.H., 1999; Rodríguez Díaz, H.A., 2001).

III. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDIO

Comprende una muestra de cincuenta microcuencas altoandinas, ubicadas todas en territorio de sierra de la región Cajamarca, en el norte de Perú, donde la topografía es totalmente abrupta e irregular, cuyos relieves escarpados y estrechos valles interandinos, dan lugar a una gran variedad de pisos ecológicos, con una biodiversidad impresionante propia de cada microclima. Todas las unidades hidrológicas estudiadas se desarrollan por encima de los 1500 msnm, donde las temperaturas medias anuales oscilan entre los 8°C (zonas más altas) y los 19°C (zonas bajas) y precipitaciones medias anuales que varían entre 400 a 1500 mm/año, dependiendo de la ubicación. Históricamente, se sabe que muchas de las microcuencas serranas, reguladas mediante pequeñas presas, fueron base fundamental del desarrollo agrícola en el ámbito de los valles interandinos, que sirvió de sustento a importantes poblaciones de culturas pre incaicas.

El departamento de Cajamarca, situado en la zona norte de Perú, tiene una superficie de 33 318 Km², que representa el 2.6 por ciento del territorio nacional. Limita, por el Norte con la república del Ecuador, por el Este con el departamento de Amazonas, por el Sur con el departamento La Libertad y por el Oeste con los departamentos de Lambayeque y Piura. Políticamente, el departamento de Cajamarca está dividido en 13 provincias y 127 distritos, con su capital la ciudad de Cajamarca. La población del departamento asciende a 1 507 486 habitantes (INEI), donde las actividades económicas que más destacan son la minería y la agrícola-pecuaria.

El territorio del departamento de Cajamarca comprende dos regiones naturales, sierra y selva, con amplio predominio de la región de la sierra en aproximadamente 85 por ciento. Se desarrolla entre los 300 y 4 200 msnm, con un relieve muy accidentado, debido a que el territorio departamental es atravesado de Sur a Norte por la cordillera occidental de los Andes. El clima del departamento es muy variado, muy frío en las alturas andinas, templado en los valles interandinos y cálido en las quebradas y márgenes del río Marañón.

La muestra, conformada por cincuenta microcuencas altoandinas, hace un área total aproximada de 10 326 Km², que representa el 31 por ciento del área total de departamento; que es lo suficientemente representativa de la hidrología altoandina regional.

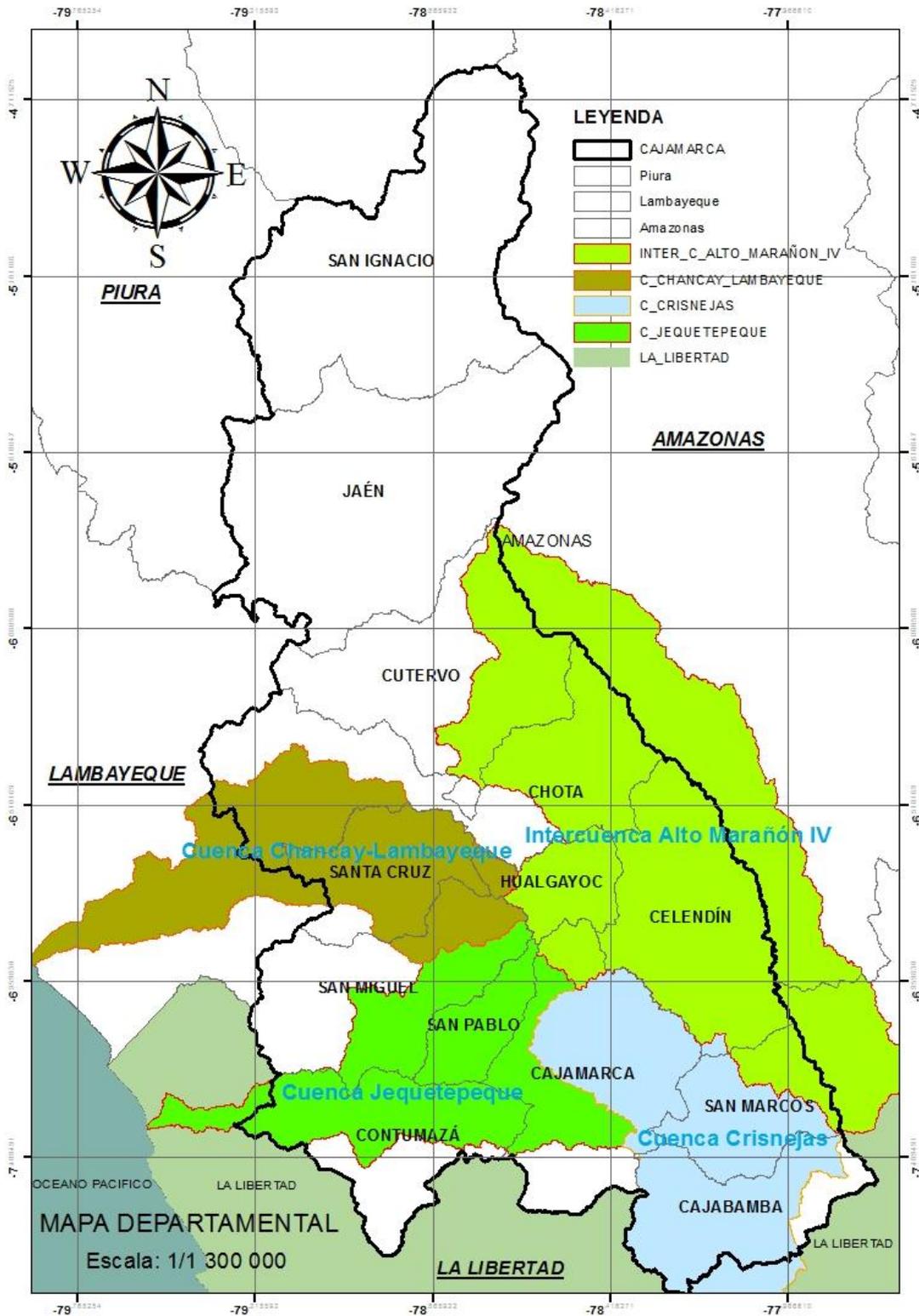


Figura 3: Ubicación de la región Cajamarca

3.2. ANÁLISIS DIMENSIONAL Y LEYES FÍSICAS DE LOS SISTEMAS HIDROLÓGICOS ALTOANDINOS

El fenómeno físico de mayor relevancia que tiene lugar en las microcuenca altoandinas es el de precipitación-escorrentía, variables causa y efecto, respectivamente. La primera variable dependiente de factores climatológicos y la segunda de la naturaleza intrínseca de cada sistema hidrológico, (Chow, V.T.; Maidment, L.W. & Mays, L.W., 1993; Maidmen, D.R., 1993; Aparicio F.J., 1997).

En vías de simplificación consideran en este estudio las hipótesis siguientes:

- i. La precipitación pluviométrica es la única variable de entrada al sistema, con distribución espacial y temporal sobre la cuenca.
- ii. El área receptora de precipitaciones coincide con el área colectora de la cuenca y se cuantifica por la superficie proyectada sobre un plano horizontal.
- iii. La evapotranspiración real es despreciable, hipótesis justificable por cuanto el tiempo de duración de cada tormenta es relativamente pequeño.
- iv. El flujo de escorrentía comprende a las componentes de escorrentía directa o superficial y subterránea o flujo base. Pues, durante las crecidas el flujo base es muy pequeño comparado con la magnitud de la escorrentía directa.

Bajo tales consideraciones, las variables principales involucradas en este fenómeno y sus dimensiones correspondientes dimensiones se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Variables y dimensiones del fenómeno precipitación-escorrentía en microcuencas altoandinas.

Variables principales del fenómeno físico precipitación – escorrentía	
Variable	Dimensión
1. Precipitación pluvial: P	LT^{-1}
2. Intensidad de precipitación pluvial: I	LT^{-1}
3. Periodo de duración de la lluvia: t	T
4. Proyección del área receptora colectora: A	L^2
5. Desnivel sobre el nivel del mar: H	L
6. Caudal de escurrimiento: Q	L^3T^{-1}
7. Perímetro de la cuenca: p	L

Las variables de esta Tabla se agruparon en parámetros adimensionales, mediante la aplicación del teorema PI de Vaschy- Buckingham, producto del lo cual resultaron las leyes físicas que rigen los sistemas hidrológicos altoandinos, las mismas que están representadas por los parámetros adimensionales de las ecuaciones 10, 11, 12, 13 y 14. El conjunto de estas ecuaciones constituye la base científica en la que se sustenta la metodología de identificación de similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos.

$$\pi_1 = \frac{Q}{AP} \quad (10)$$

$$\pi_2 = \frac{H}{\sqrt{A}} \quad (11)$$

$$\pi_3 = \frac{I * t}{H} \quad (12)$$

$$\pi_4 = \frac{Q}{I * A} \quad (13)$$

$$\pi_5 = \frac{p}{\sqrt{A}} \quad (14)$$

π = Parámetro adimensional

Q = Caudal de escurrimiento (superficial más subterráneo)

A = Proyección del área receptora colectora sobre un plano horizontal

P = Precipitación pluviométrica

- H = Altitud media sobre el nivel del mar
 I = Intensidad de precipitación
 t = Periodo de duración de intensidad de precipitación
 p = Perímetro de la cuenca.

3.2.1. PARÁMETRO ADIMENSIONAL DE FORMA Y SEMEJANZA GEOMÉTRICA

Hallazgo 1:

El parámetro adimensional de la ecuación (14) es descriptor de la geometría de la cuenca hidrográfica, lo cual se verifica porque al multiplicar ambos miembros de dicha expresión por 0.28, resulta otro parámetro adimensional conocido como coeficiente de compacidad o *índice de Gravelius* ($Kc = 0.28 * \pi_s$), discutido ampliamente en la sección anterior la influencia que ejerce sobre la geometría de la cuenca y la configuración espacial de la red de drenaje, todo lo cual repercute de en la geometría del hidrograma del flujo efluente, como respuesta ante tormentas extraordinarias.

3.2.2. PARÁMETRO ADIMENSIONAL DE ESCURRIMIENTO INSTANTÁNEO

Hallazgo 2:

El parámetro adimensional de la ecuación (13), describe la geometría del hidrograma de la esorrentía directa instantánea, donde el primer miembro de dicha ecuación viene a constituir el coeficiente de esorrentía C ($\pi_4 = C$) del vetusto *método Racional* dado por la ecuación (15); metodología sencilla, para generar descargas máximas de esorrentía directa (picos de hidrogramas) a partir de datos de precipitación. Método muy usado hasta hoy, pudiendo competir con cualquier otro método sofisticado, si se usa correctamente bajo todas sus consideraciones.

$$Q_{\max} = CIA \quad (15)$$

Q_{\max} = Caudal máximo de esorrentía directa (pico del hidrograma)

C = Coeficiente de esorrentía

I = Intensidad de precipitación, para el tiempo de concentración de la cuenca,

A = área receptora-colectora proyectada sobre un plano horizontal.

A diferencia de concepciones de épocas pasadas, la estimación del coeficiente de esorrentía C , además del estado actual de la naturaleza del sistema, puede incluir, además, los efectos de la geometría de la cuenca y la capacidad de almacenamiento momentáneo. De otro lado, la intensidad de precipitación debe obtenerse a partir de un análisis de frecuencias de registros pluviográficos históricos de tormentas anuales más críticas, para diferentes probabilidades y periodos de duración estándar. Incluso, los avances tecnológicos de hoy sustituyen la información pluviográfica por información pluviométrica de alta resolución al minuto, que corrige la grosera y clásica información pluviométrica de 24 horas, totalmente inadecuada para esta metodología de flujo instantáneo, y peor aún si la intensidad de precipitación no se transforma para el tiempo de concentración de la cuenca receptora-colectora.

3.2.3. PARÁMETRO ADIMENSIONAL DE ESCURRIMIENTO SOSTENIDO

Hallazgo 3:

El parámetro adimensional de la ecuación (10), a diferencia del parámetro de escorrentía instantánea, describe el flujo de escurrimiento más sostenido en el tiempo (periodos más largos), donde la escorrentía Q involucra tanto a la componente de escorrentía directa como a la componente subterránea o flujo base, tal como sucede por ejemplo con los caudales promedio multianuales de una cuenca. Asumiendo un coeficiente de escorrentía K ($K = \pi_1 < 1$), que incluya las pérdidas por evapotranspiración real y el contenido de humedad del suelo, la expresión (10) toma la forma de la primera ecuación (16). O lo que es lo mismo asumiendo que P es *precipitación efectiva*, para lo cual entonces el coeficiente K es equivalente a la unidad ($K = \pi_1 = 1$), y la expresión (10) toma la forma de la segunda ecuación (16).

$$Q = K A P \quad ; \quad Q = A P_{ef} \quad (16)$$

Q = Caudal promedio en el periodo considerado

A = Área de la cuenca receptora-colectora de precipitaciones

P = Precipitación total en el periodo de balance

P_{ef} = *Precipitación efectiva* en el periodo de balance, ($K=1$).

K = Coeficiente de escorrentía, ($K < 1$).

El término “*precipitación efectiva*” implica sólo la fracción de la precipitación total que da origen a la suma de componentes de flujo base y escorrentía directa, para lo cual hay que descontar la fracción de precipitación total que se transforma en evapotranspiración real y en humedad del suelo. El periodo de balance hidrológico de mayor uso práctico es el multianual o mensual multianual.

La segunda de las expresiones (16), en su forma diferencial, es muy usada en modelos hidrológicos distribuidos (modelo Temez) para la generación de escorrentía promedio multianual a partir de datos de precipitación. Información que puede ser muy útil en diseño hidrológico de presas de regulación multianual.

3.2.4. PARÁMETRO ADIMENSIONAL OROGRÁFICO Y SEMEJANZA DINÁMICA

Hallazgo 4:

El parámetro adimensional de la ecuación (11), describe los potenciales de fuerzas gravitacionales de los flujos superficiales, que pueden ser útiles en generación de energía hidráulica o perjudicial tratándose de procesos de degradación hídrica de la cuenca. Elevando al cuadrado ambos miembros de dicha ecuación resulta el parámetro adimensional de relieve más importante conocido como *coeficiente orográfico* C_o ($\pi_2^2 = C_o$), también discutido en la sección anterior.

3.2.5. PARÁMETRO ADIMENSIONAL DE LLUVIA

Hallazgo 5:

El parámetro adimensional de la ecuación (12), describe las características más importantes de la precipitación pluvial como variable de entrada al sistema hidrológico; donde se observa claramente las propiedades de distribución espacial y temporal de dicha variable. Donde las tormentas de mayores intensidades de precipitación ocurren en periodos de tiempo muy cortos y a mayores altitudes y viceversa, muy característico de los sistemas hidrológicos altoandinos.

El indicativo de este parámetro de que la precipitación aumenta con la altitud y la correlación estadística aceptable entre ambas variables (prueba de T del coeficiente de correlación) es muy bien aprovechada en un análisis regional para generación de información láminas de precipitación en sistemas hidrológicos altoandinos.

Además este parámetro adimensional es muy importante para transferir información de intensidades de precipitación y alimentar al método Racional en la generación de escurrientías máximas en sistemas hidrológicos altoandinos similares. Además, de facilitar la conversión de intensidades a cualquier periodo de duración, como el que corresponde al tiempo de concentración de la cuenca en el uso del método Racional.

Pues, el uso de los parámetros adimensionales de las ecuaciones (12) y ((13) se complementan en la generación de hidrogramas de máximas escorrentías efluentes.

3.3. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE INFORMACIÓN

Todos los parámetros adimensionales determinados en el proceso de análisis dimensional, incluyendo sus combinaciones, se convierten en funciones de transferencia, al aplicar el principio de similitud hidráulica entre sistemas hidrológicos.

Las combinaciones de parámetros adimensionales, a las que se hace referencia, se realizan en virtud de tener parámetros adimensionales con la mayor cantidad posible de variables de fácil acceso, a efecto de mejorar la calidad de los datos transferidos.

Las combinaciones se realizan aplicando las propiedades elementales de las igualdades de tal manera que no se alteren y el resultado sea siempre otro parámetro adimensional. Por ejemplo, multiplicando miembro a miembro las ecuaciones (10) y (11), resulta el parámetro adimensional (π_{12}) de la ecuación (17). Este nuevo parámetro (Oswald) mejora la función de transferencia de escorrentías al incluir las escalas de precipitación y de altitudes sobre el nivel del mar, información de mayor disponibilidad en las cuencas hidrográficas.

$$\pi_{12} = \frac{QH}{A^{3/2}P} \quad (17)$$

Si a esta nueva función adimensional se aplica el principio de similitud hidráulica entre dos sistemas hidrológicos, cuenca de origen y cuenca destino, se convierte en la función de transferencia de la igualdad (18).

$$\frac{Q_o H_o}{A_o^{3/2} P_o} = \frac{Q_d H_d}{A_d^{3/2} P_d} \quad (18)$$

Donde los subíndices de las variables del primer y segundo miembro de esta ecuación corresponden a los sistemas hidrológicos de origen y destino, respectivamente. Despejando la variable de escorrentía para el sistema hidrológico destino, se tiene la ecuación de transferencia (19) o su equivalente (20), expresada en forma de escalas.

$$Q_d = \left(\frac{H_o}{H_d}\right) \left(\frac{P_d}{P_o}\right) \left(\frac{A_d}{A_o}\right)^{3/2} Q_o \quad (19)$$

$$Q_d = H_e^{-1} P_e A_e^{3/2} Q_o \quad (20)$$

H_e = Escala de altitudes

P_e = Escala de precipitaciones

A_e = Escala de áreas

Q_o = Caudal de la cuenca de origen

Q_d = Caudal en la cuenca destino.

Otro tipo de información generalmente no disponible en localidades muy alejadas, son los datos relativos a intensidades de máximas tormentas pluviométricas, información muy importante en proyectos de drenaje en general (drenaje de carreteras, drenaje urbano de aguas pluviales, defensas rivereñas, presas de regulación, canales de riego, centrales hidroeléctricas, prevención de inundaciones, etc.). Esta información puede transferirse haciendo uso del parámetro adimensional dado por la ecuación (12), la misma que aplicada a dos sistemas similares (cuenca de origen y cuenca destino), toma la forma representada por la ecuación (21), o su equivalente (22), expresada en forma de escalas.

$$\frac{I_o t_o}{H_o} = \frac{I_d t_d}{H_d} \quad (21)$$

$$I_d = \left(\frac{H_d}{H_o}\right) \left(\frac{t_o}{t_d}\right) I_o = H_e t_e^{-1} I_o \quad (22)$$

I_d = Intensidad de precipitación en la cuenca destino

I_o = Intensidad de precipitación en la cuenca de origen

t_e = Escala de periodos de duración

H_e = Escala de altitudes.

Donde, también los subíndices de las variables del primer miembro de la ecuación (21) corresponden al sistema hidrológico de origen mientras que las del segundo al sistema destino. El destino siempre está referido a la localidad de la unidad hidrológica sin información.

La función de transferencia (21) permite la generación de intensidades de precipitación, en la localidad sin información, conociendo las altitudes locales y los periodos de duración de interés. Tratándose del método Racional, el periodo de duración de interés es el tiempo de concentración del área receptora-colectora.

De manera similar, puede procederse para la transferencia de cualquier otra variable de interés, a partir del parámetro adimensional que la contenga.

3.4. PARÁMETROS ADIMENSIONALES Y SIMILITUD HIDRÁULICA DE SISTEMAS HIDROLÓGICOS

En esta parte, por analogía con la ingeniería hidráulica de modelos físicos a escala, se definieron los parámetros hidrológicos adimensionales *coeficiente de Gravelius*, *relación de confluencias* y *coeficiente orográfico* como garantía de semejanza hidráulica entre sistemas hidrológicos, bajo niveles de aproximación aceptables desde el punto de vista práctico.

3.4.1. ÍNDICE DE GRAVELIUS Y SEMEJANZA GEOMÉTRICA

Los antecedentes de estudios morfométricos de cuencas discutidos en el capítulo anterior, corroborado con la ecuación (14) referente a leyes físicas de los sistemas hidrológicos altoandinos del presente capítulo, demuestran la consistencia de este parámetro adimensional, no sólo como descriptor indiscutible de la forma geométrica de la cuenca, sino también por la influencia que ejerce sobre la configuración espacial de la red de drenaje. Razones prácticas y fundamento científico suficientes como para optar por el *índice de Gravelius* (ecuación 2) como parámetro de escala de *semejanza geométrica* de los sistemas hidrológicos.

Condición de semejanza geométrica: “*dos o más sistemas hidrológicos altoandinos son semejantes geométricamente si tienen igual índice de Gravelius*”, al grado de aproximación previamente adoptado.

3.4.2. RELACIÓN DE CONFLUENCIAS Y SEMEJANZA CINEMÁTICA

Similarmente a lo manifestado para el índice de Gravelius, se considera aquí al parámetro adimensional *relación de confluencias promedio* como el de mayor relevancia para describir la configuración espacial de la red de drenaje o geometría del patrón de flujo superficial (ecuación 4) y, por tanto, representativo de la *semejanza cinemática* entre sistemas hidrológicos. Parámetro con mayor efecto de escala que el anterior, detalle que se tuvo en consideración para efectos de fijar el límite de aproximación de la semejanza.

Condición de semejanza cinemática: “*dos o más sistemas hidrológicos altoandinos son semejantes cinemáticamente si tienen igual relación de confluencias promedio*”, al grado de aproximación previamente adoptado.

3.4.3. COEFICIENTE OROGRÁFICO Y SEMEJANZA DINÁMICA

Los estudios morfométricos como razones prácticas discutidas en el capítulo anterior, corroborado con el fundamento de una de las leyes físicas estudiados en el presente capítulo (ecuación 11), también constituyeron al sustento de haber considerado al parámetro adimensional *coeficiente orográfico* (ecuación 7) como el descriptor de relieve más importante y referente indiscutible de la *semejanza dinámica*. Parámetro donde el efecto de escala es mayor que en los dos parámetros de semejanza anteriores por la sensibilidad que representa el cuadrado de la altitud media (ecuación 8), lo que se tuvo en consideración al momento de definir el límite de aproximación de la semejanza.

Condición de semejanza dinámica: “*dos o más sistemas hidrológicos son semejantes dinámicamente si tienen igual coeficiente orográfico*”, al grado de aproximación previamente adoptado.

3.4.4. SIMILITUD HIDRÁULICA DE SISTEMAS HIDROLÓGICOS

Bajo las consideraciones anteriores, “*dos o más sistemas hidrológicos altoandinos son hidráulicamente similares si cumplen simultáneamente las tres condiciones de semejanza: geométrica, cinemática y dinámica*”, al grado de aproximación previamente definido para cada parámetro de semejanza.

En este trabajo, el grado de aproximación de similitud hidráulica para fines prácticos se ha fijado como límites máximos del *coeficiente de variación* de 0.05, 0.20 y 0.30, para el índice de Gravelius, relación de confluencias promedio y coeficiente orográfico, respectivamente.

3.5. MUESTRA HIDROLÓGICA Y TRATAMIENTO CARTOGRÁFICO

Se seleccionó una muestra conformada por cincuenta unidades hidrológicas altoandinas de la región Cajamarca-Perú (Tabla 5), en las vertientes del Pacífico y Atlántico, de tal manera que se desarrollen por encima de los 1 500 msnm para garantizar que las áreas receptora y colectora sean coincidentes y, además, con gran amplitud de tamaños (50 a 700 Km²), para observar que el tamaño no tiene influencia en el análisis morfométrico adimensional. En conjunto la muestra hace un área total aproximada de 10 326 Km², que representa aproximadamente el 40% de la superficie de la sierra del departamento, lo cual es muy significativo en cuanto a representatividad regional de la muestra.

Es de destacar que, si bien el ámbito del presente estudio se limita a la región Cajamarca, la metodología por su naturaleza adimensional puede aplicarse a cualquier otra región o inter-regiones subnacionales o internacionales, con la condición que cumplan las leyes físicas que gobiernan los sistemas hidrológicos altoandinos.

Con la finalidad de controlar, errores y costos en el análisis morfométrico del presente estudio se ha establecido el protocolo siguiente:

- Utilización de mapas cartográficos a la misma escala, 1/100 000.
- Microcuencas desarrolladas por encima de los 1 500 msnm.

- Mapas cartográficos preparados por una misma institución, (IGN, Perú), como garantía que se hayan usado los mismos criterios y procedimientos para su elaboración.
- Delimitación de cuenca basada en el principio de la red de flujo, considerando que la línea divisoria de aguas es teóricamente una línea neutral de flujo, cuyo campo cumple la ecuación (23) de Laplace en 2D, (Sotelo Ávila, G., 1977; Vergara, M., 1993; Streeter, et al. 2000; Franzini, J.B & Finnemore E.H., 1999; Rodríguez Díaz, H.A., 2001).

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = 0 \quad (23)$$

ψ = Potencial hidráulico

x, y = Coordenadas cartesianas.

En este caso, la red de flujo del campo está conformada por la familia de líneas de energía equipotenciales dadas por las curvas de nivel del relieve del terreno y la familia de líneas de corriente o de flujo de escorrentía superficial, cuyo campo se extiende a la totalidad de la superficie de la cuenca.

- Procesamiento de información cartográfica y estimación de variables de los parámetros de semejanza empleando las mismas metodologías, para cada caso (área, perímetro, categorización de la red hidrográfica, altitud media, etc.). Se utilizó como herramienta para todo este proceso el software ArcGIS 10.3.
- Estimación de la altitud media, sobre el nivel del mar, mediante el método de momentos estáticos de Varignon de la ecuación (8).
- Jerarquización de la red hidrográfica siguiendo el criterio de Horton descrito en el esquema de la Fig. 2 y Tabla 2 de la sección anterior.

3.6. IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS HIDROLÓGICOS CON SIMILITUD HIDRÁULICA

El protocolo establecido para el reconocimiento de unidades hidrológicas altoandinas con similitud hidráulica, se resume en las siguientes actividades:

- i) Estimación de parámetros morfométricos adimensionales de similitud hidráulica: índice de Gravelius, relación de confluencias, y coeficiente orográfico.
- ii) Agrupación de microcuencas por su geometría, utilizando el criterio de rangos del índice de Gravelius de la Tabla 2.
- iii) Estimación del estadístico de discrepancia, dado por el coeficiente de variación, para cada parámetro de semejanza.
- iv) Se excluyen de cada grupo geométrico las unidades hidrológicas de mayor discrepancia, hasta que el coeficiente de variación para cada parámetro de similitud hidráulica, no exceda el límite máximo previamente definido. Desde luego, las unidades hidrológicas descartadas pueden ir a conformar otro(s) grupo de microcuencas similares.
- v) Las unidades hidrológicas que quedan, luego del paso precedente, son microcuencas hidráulicamente similares.

3.7. TRANSFERENCIA DE INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

Sistema hidrológico con información de tormentas máximas

Para ilustrar la aplicación de transferencia de información mediante esta metodología se tomó como sistema origen la **microcuenca río Mashcón** (Tabla 9), en cuya cercanía de su cuenca baja se ubica la estación pluviométrica **Weberbauer** (07° 10' S, 78° 30' W; altitud, 2536 msnm) del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, SENAMIH-

Perú, en las inmediaciones del campus universitario de la Universidad Nacional de Cajamarca. Estación que hasta hace muy poco tiempo, única en su género a nivel regional con registro de información pluviográfica.

El análisis de frecuencias de tormentas máximas anuales de cincuenta años de registro y el ajuste de datos al modelo de variable extrema **Gumbel**, permitió modelar y simular las intensidades de máximas tormentas anuales, algunos de cuyos resultados se presentan en la Tabla 4, (Aparicio, F.J., 1997; Monsalve, G., 1995). No se incluye aquí el procedimiento de este análisis por no ser objeto del presente estudio, sino el de simplemente transferir la información.

Sistema hidrológico sin información de máximas tormentas

Se seleccionó a priori la **microcuenca del río Jadibamba** (altitud media, 3218 msnm), pero pudo haber sido cualquier otra del mismo grupo geométrico de similitud hidráulica que la cuenca origen (ver Tabla 9). Esta cuenca, así como otras de la región de estudio, carece de información de máximas tormentas, muy importante para cualquier proyecto de drenaje superficial y obras de captación (drenaje de carreteras, drenaje pluvial urbano, defensas ribereñas, presas de regulación, canales de riego, centrales hidroeléctricas, captaciones de aguas de lluvia, prevención de inundaciones, etc., etc.).

Los datos pueden transferirse a cualquier punto de interés del sistema hidrológico destino; sin embargo, no existiendo preferencia particular se optó, para efectos de la ilustración, el punto correspondiente a la altitud media de la cuenca destino (3 218 msnm).

La transferencia de información se realiza mediante funciones de transferencia que resultan de aplicar el principio de similitud hidráulica a los parámetros adimensionales que gobiernan los sistemas hidrológicos altoandinos (ecuaciones: 10, 11, 12, 13 y 14) o sus combinaciones (ecuación 17), según se requiera. Para el caso materia de la presente ilustración se utilizó la ecuación 22.

Tabla 4: Intensidades máximas de precipitación – estación pluviométrica Weberbauer (altitud 2536 msnm), microcuenca río Mashcón.

N	J (%)	Tr (Años)	Intensidades máximas (mm/h)				
			5 min	10 min	30 min	60 min	120 min
	00	∞	-	-	-	-	-
5	1	498.0	156.9	109.6	58.9	36.3	23.8
	2	248.0	147.0	103.2	55.4	34.1	22.2
	5	98.0	133.7	94.7	50.8	31.1	20.0
	10	48.0	123.4	88.2	47.2	28.7	18.4
	15	31.3	117.2	84.2	45.0	27.4	17.3
	20	22.9	112.7	81.3	43.4	26.3	16.6
	25	17.9	109.1	79.0	42.2	25.5	16.0
	30	14.5	106.0	77.0	41.1	24.8	15.5
	40	10.3	100.9	73.8	39.3	23.6	14.7
	50	7.7	96.4	71.0	37.8	22.7	13.9
	60	6.0	92.6	68.5	36.4	21.8	13.3
	70	4.7	88.7	66.0	35.1	20.1	12.7
	80	3.6	84.3	63.2	33.5	19.9	12.0
90	2.7	79.3	60.0	31.8	18.8	11.1	
100	1.0	-	-	-	-	-	
	00	∞	-	-	-	-	-
10	1	995.5	165.5	115.9	62.4	38.6	25.5
	2	495.4	156.8	109.5	58.9	36.3	23.8
	5	195.5	143.6	101.0	54.2	33.3	21.6
	10	95.4	133.3	94.5	50.6	31.0	20.0
	15	62.0	127.1	90.5	48.5	29.6	19.0
	20	45.3	122.6	87.6	46.9	28.6	18.2
	25	35.3	119.0	85.3	45.6	27.7	17.6
	30	28.5	115.8	83.3	44.6	27.0	17.1
	40	20.1	110.8	80.1	42.8	25.9	16.3
	50	14.9	106.4	77.3	41.2	24.9	15.6
	60	11.4	102.4	74.7	39.8	24.0	14.9
	70	8.8	98.5	72.2	38.5	23.1	14.3
	80	6.7	94.3	69.6	37.0	22.2	13.6
90	4.9	89.4	66.4	25.3	21.1	12.8	
100	1.0	-	-	-	-	-	
	00						-
25	1	2488.0	179.9	124.2	66.9	41.5	27.6
	2	1238.0	169.9	117.9	63.4	39.3	26.0
	5	487.9	156.6	109.4	58.8	36.3	23.8
	10	237.8	146.4	102.8	55.2	33.9	22.1
	15	154.3	140.2	98.9	53.1	32.5	21.1
	20	112.5	135.6	96.0	51.5	31.5	20.4
	25	87.4	132.0	93.7	50.2	30.7	19.8
	30	70.6	129.0	91.7	49.1	30.0	19.3
	40	49.4	123.8	88.4	47.3	28.8	18.4
	50	36.6	119.5	85.7	45.8	27.9	17.7
	60	27.8	115.5	83.1	44.4	27.0	17.6
	70	21.3	111.6	80.6	43.1	26.1	16.4
	80	16.0	107.4	78.0	41.6	25.1	15.7
90	11.4	102.4	74.7	39.8	24.0	14.9	
100	1.0	-	-	-	-	-	

N, es periodo de años consecutivos. J, incertidumbre. Tr, tiempo de retorno.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS ADIMENSIONALES DE SIMILITUD HIDRÁULICA Y CARACTERÍSTICAS MUESTRALES

El estudio morfométrico mediante estimadores adimensionales relacionados con la similitud hidráulica de sistemas hidrológicos - índice de Gravelius, relación de confluencias y coeficiente orográfico- reporta que se trata de una muestra hidrológica muy heterogénea, cuya variabilidad se refleja en el comportamiento del indicador estadístico dado por el *coeficiente de variación* de cada parámetro de semejanza, presentados en la Tabla 7.

4.1.1. ÍNDICE DE GRAVELIUS

La media aritmética del índice de Gravelius (1.474), posesionada entre los límites de rango geométrico intermedio ($1.25 \leq K_c \leq 1.50$), muy cerca del límite superior, pone en evidencia la supremacía numérica de unidades hidrológicas de la forma **oval oblonga**, seguida por las unidades hidrológicas la forma **oval alargada** y **oval redonda**, en ese orden en cuanto a número. Aspecto que se verifica cuando se agrupa o clasifica las microcuencas atendiendo a su geometría, según criterio de rangos del índice de Gravelius, tal como se aprecia en las Tablas 8, 9 y 10, de clasificación geométrica.

De otro lado se aprecia que el coeficiente de variación del índice de Gravelius (0.082) es mucho menor que el correspondiente a los otros dos parámetros, seguido por el de relación de confluencias promedio (0.282) y del coeficiente orográfico (0.646). De lo cual se desprende que la forma geométrica de la cuenca tiene mayor incidencia en la configuración de la red de drenaje (relación de confluencias) y en menor proporción sobre los factores de relieve (coeficiente orográfico); y por tanto, un gran peso o influencia sobre la similitud hidráulica.

Se aprecia también que los valores del índice de Gravelius son independientes del tamaño de cuenca, lo cual justifica como factor de escala más adecuado para la semejanza geométrica. Esto, unido al criterio de clasificación de cuencas, basado en la

propiedad de circularidad de Gravelius, la hace más atractivo para las formas geométricas de los sistemas hidrológicos de la región en estudio.

4.1.2 RELACIÓN DE CONFLUENCIAS PROMEDIO

En cuanto a la relación de confluencias, se observa que los valores son independientes del tamaño de la configuración espacial de la red de drenaje y sólo dependientes de la geometría del patrón de flujo, característica que lo convierte como un buen referente de la semejanza cinemática.

Los menores valores de relación de confluencias corresponden a redes de drenaje con mayores ramificaciones y, contrariamente, los mayores valores están asociados a redes de drenaje menos ramificadas. Esta particularidad permite inferir que el número de orden de una cuenca no necesariamente es indicador de semejanza cinemática entre sistemas hidrológicos.

Los valores de relación de confluencias promedio obtenidos de la muestra regional y consideraciones de campo, ha permitido establecer rangos de índices de ramificación para las redes de drenaje de los sistemas hidrológicos, que se muestran la Tabla 5. Generalmente, los menores valores de relación de confluencias (mayores bifurcaciones) están asociadas a las formas redondeadas, mientras que los mayores valores (menos bifurcaciones) a las formas alargadas.

Tabla 5: Índice de ramificación de la red de drenaje de microcuencas altoandinas de la región Cajamarca, para áreas menores a 600 Km², escala 1/100 000.

Índice de ramificación de la red de drenaje	Valores de relación de confluencias promedio, Rc
Muy alto	1 < Rc ≤ 3
Alto	3 < Rc ≤ 4
Moderado	4 < Rc ≤ 5
Bajo	Rc > 5

En concordancia con esta Tabla, el 84 por ciento de unidades hidrológicas de la muestra tienen índices de ramificación entre alto y muy alto, características de cuencas muy bien drenadas, altamente vulnerables a la erosión hídrica y excesiva capacidad de transporte

de sedimentos. Características estas que generalmente están asociadas a la forma oval redonda y oval oblonga.

4.1.3. COEFICIENTE OROGRÁFICO

Los valores del coeficiente orográfico son bastante sensibles a la ubicación y relieve de una microcuenca, correspondiendo a las unidades hidrológicas ubicadas en zonas montañosas de cabecera los mayores valores, respecto a las ubicadas en zonas más bajas. Si a ello se agrega que la precipitación pluviométrica es mayor a mayor altitud sobre el nivel del mar, se infiere que los sistemas hidrológicos con mayor coeficiente orográfico son las más vulnerables a la degradación hídrica.

Se observa que las microcuencas de cabecera son las que tienen mayores valores de coeficiente orográfico, independiente de su ubicación en la vertiente-Atlántico o Pacífico-con lo cual queda claro que los sistemas hidrológicos vecinos de ambas vertientes tienen una mayor tendencia de semejanza dinámica.

Los valores del coeficiente orográfico obtenidos de la muestra y consideraciones de campo, ha permitido establecer rangos potenciales de degradación hídrica para las microcuencas de la región de estudio, según se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6: Potencial de degradación hídrica de microcuencas altoandinas de la región Cajamarca, para menores de 600 Km², escala 1/100 000.

Potencial de erosión hídrica	Coficiente orográfico, Co (%)
Baja	Co <1
Moderada	1 < Co ≤ 4
Alta	4 < Co ≤ 10
Muy alta	Co > 10

En concordancia con esta Tabla, los resultados de la muestra dan cuenta que el 64 por ciento de unidades hidrológicas tienen potenciales de degradación entre alta y muy alta, lo cual es indicador que se trata de una región con microcuencas muy vulnerables a la degradación hídrica, particularidad que la torna de muy desfavorable para proyectos de

regulación de cuencas mediante grandes presas, sobre todo en cuencas con escasa cobertura vegetal como es el caso de sistemas de la vertiente del Pacífico.

Tabla 7: Parámetros adimensionales de similitud hidráulica de cuencas hidrográficas altoandinas de la región Cajamarca.

Microcuenca	Área A (Km ²)	Perímetro P (Km)	Altitud H(msnm)	Número de orden O	Coefficiente Gravelius K _C	Relación de Confluencias R _C	Coefficiente orográfico C _O (%)	Cuenca	Vertiente
01. Río Asunción	83.57	42.17	2 984	3	1.29	1.44	10.65	Jequetepeque	Pacífico
02. Río Azufre	77.03	47.19	3 657	3	1.50	2.11	17.36	Crisnejas	Atlántico
03. Río Bichota	113.78	50.14	3 080	3	1.32	4.83	8.34	Crisnejas	Atlántico
04. Qda. Cachachi	82.34	52.39	3 222	3	1.62	1.83	12.61	Crisnejas	Atlántico
05. Qda. Caracmaca	82.44	44.09	3 393	3	1.36	3.75	13.98	Crisnejas	Atlántico
06. Río Cañad	250.86	87.99	2 655	3	1.56	5.30	2.81	Chancay	Pacífico
07. Río Cirato	136.37	56.86	2 276	3	1.36	3.80	3.80	Chancay	Pacífico
08. Río Contumazá	185.17	81.41	2 446	4	1.68	4.80	3.23	Jequetepeque	Pacífico
09. Río Cospán	239.67	81.93	2 803	4	1.48	2.83	3.28	Chicama	Pacífico
10. Río Chanta	97.17	51.77	2 620	3	1.47	3.50	7.06	Jequetepeque	Pacífico
11. Río Charat	62.48	41.00	2 805	3	1.45	2.50	12.59	Chicama	Pacífico
12. Qda. Chausís	209.32	73.65	2 177	4	1.42	2.70	2.26	Jequetepeque	Pacífico
13. Río Chetillano	177.79	67.08	2 790	4	1.41	2.89	4.38	Jequetepeque	Pacífico
14. Río Chilca	83.98	51.82	3 372	3	1.58	2.83	13.54	Crisnejas	Atlántico
15. Río Chin Chin	99.38	48.43	3 328	3	1.36	3.50	11.14	Chicama	Pacífico
16. Río El Choro	67.15	43.91	2 316	3	1.50	1.50	7.99	Chancay	Pacífico
17. Río Grande	117.58	60.60	3 680	3	1.56	3.33	11.52	Crisnejas	Atlántico
18. Río Grande	210.53	72.22	3 320	4	1.39	2.64	5.24	Chicama	Pacífico
19. Río Huambayoco	173.35	66.05	2 286	4	1.40	2.92	3.01	Chancay	Pacífico
20. Río Huaranchal	115.96	52.49	2 934	3	1.36	3.50	7.42	Chicama	Pacífico
21. Río Huayro	195.50	79.76	3 668	4	1.61	2.83	6.88	Crisnejas	Atlántico
22. Qda. Huertas	100.89	54.32	2 389	3	1.51	3.75	5.66	Jequetepeque	Pacífico
23. Río Jadibamba	258.81	81.44	3 218	3	1.42	3.83	4.00	Alto Marañón	Atlántico
24. Río Juana Ríos	400.80	107.76	1 825	3	1.51	3.33	0.83	Chancay	Pacífico
25. Qda. Lanla	148.69	69.91	3 479	3	1.60	2.00	8.14	Crisnejas	Atlántico

Tabla 7: Continuación.....

Microcuenca	Área A (Km ²)	Perímetro P (Km)	Altitud H(msnm)	Número de orden O	Coefficiente Gravelius K _C	Relación de Confluencias R _C	Coefficiente orográfico C _O (%)	Cuenca	Vertiente
26. Río Llantén	279.48	83.89	3 378	4	1.41	3.53	4.08	Chancay	Pacífico
27. Río Llaucán	622.67	110.96	3 484	4	1.24	4.01	1.95	Alto Marañón	Atlántico
28. Río Maichil	345.70	101.52	2 441	4	1.53	2.56	1.72	Chancay	Pacífico
29. Río Mashcón	667.44	137.21	3 533	4	1.49	3.67	1.87	Crisnejas	Atlántico
30. Río Mirilis	187.28	56.72	2 903	4	1.16	3.02	4.50	Alto Marañón	Atlántico
31. Río Molino	123.13	58.10	2 903	4	1.47	3.09	6.84	Alto Marañón	Atlántico
32. Río Montemayo	245.95	93.63	2 682	4	1.67	2.98	2.92	Chancay	Pacífico
33. Río Muyoc	215.88	86.17	3 254	4	1.64	2.89	4.90	Crisnejas	Atlántico
34. Río Namora	457.62	115.44	3 302	4	1.51	4.25	2.38	Crisnejas	Atlántico
35. Río Ochape	214.52	77.22	2 472	3	1.48	4.67	2.85	Chicama	Pacífico
36. Río Pallac	238.21	81.63	2 363	4	1.48	2.93	2.34	Jequetepeque	Pacífico
37. Río Porcón	155.71	72.10	3 487	4	1.62	2.55	7.81	Crisnejas	Atlántico
38. Qda. Quinuas	90.43	49.42	2 974	3	1.46	2.33	9.78	Jequetepeque	Pacífico
39. Río Quirripango	341.52	86.06	2 274	4	1.30	3.24	1.51	Chicama	Pacífico
40. Río Rejo	218.80	90.77	3 665	4	1.72	3.33	6.14	Jequetepeque	Pacífico
41. Río San Jorge	581.41	119.26	3 038	4	1.38	4.38	1.59	Chicama	Pacífico
42. Río San Juan	139.71	60.88	3 301	4	1.44	2.83	7.80	Jequetepeque	Pacífico
43. Río San Juan	123.63	57.31	3 155	3	1.44	2.75	8.05	Chancay	Pacífico
44. Río San Pablo	180.46	69.24	2 505	3	1.44	2.47	3.48	Jequetepeque	Pacífico
45. Qda. Shitalmalca	119.29	59.98	3 173	4	1.54	2.58	8.44	Crisnejas	Atlántico
46. Río Trapiche	359.39	97.87	2 818	4	1.45	3.53	2.21	Alto Marañón	Atlántico
47. Río Tumbadén	303.55	96.88	3 521	4	1.56	3.62	4.08	Jequetepeque	Pacífico
48. Río Yamobamba	273.18	90.52	3 609	3	1.53	5.56	4.77	Crisnejas	Atlántico
49. Qda. Yamulán	53.83	34.17	2 704	3	1.30	1.67	13.58	Jequetepeque	Pacífico
50. Qda. Yanahuanga	205.99	88.39	3 277	3	1.72	3.93	5.21	Jequetepeque	Pacífico
PROMEDIO	206.528				1.474	3.212	6.171		
DESVEST					0.121	0.905	3.987		
COEFVAR					0.082	0.282	0.646		

¿Cómo, influye la geometría de la cuenca en la configuración de la red de drenaje?

El coeficiente de variación del parámetro relación de confluencias promedio (0.282), más próximo al del índice Gravelius (0.082), evidencia que efectivamente la geometría de la cuenca tiene cierta influencia en la configuración espacial de la red de drenaje o patrón de flujo superficial, tal como se discutió anteriormente.

4.2. CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS HIDROLÓGICOS POR SU GEOMETRÍA

La clasificación geométrica de la muestra hidrológica atendiendo a los rangos del índice de Gravelius dio como resultado dos unidades hidrológicas de la forma **oval redonda** (4%), veintiocho de la forma **oval oblonga** (56%) y veinte de la forma **oblonga alargada** (40%). Con lo cual se verifica la inferencia que se hizo al discutir la tendencia estadística de la muestra.

4.2.1. FORMA OVAL REDONDA ($1 < K_c \leq 1.25$)

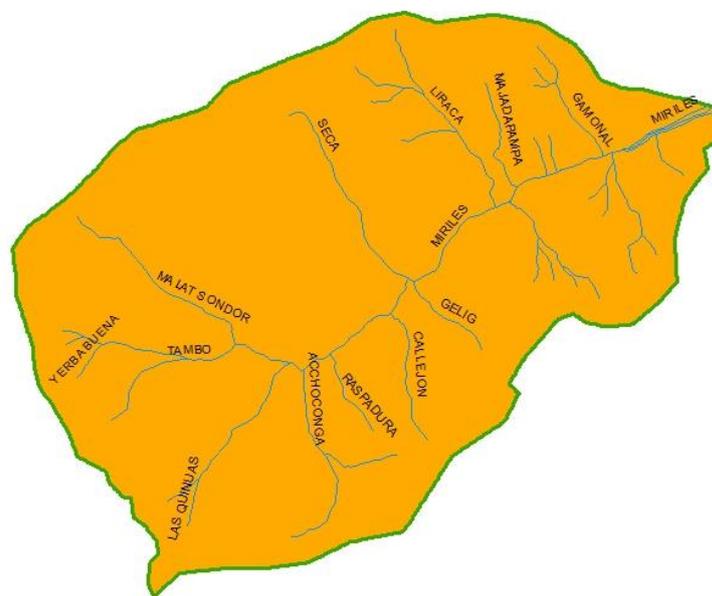
Este grupo (Tabla 8), escasamente conformado por dos microcuencas (4%), se caracteriza por tener tiempos de concentración relativamente cortos, generando hidrogramas de escurrimiento efluente del tipo leptikúrtico, donde las crecidas son muy súbitas y violentas, con altos riesgos de inundaciones ante tormentas extraordinarias.

¿Cómo, influye la forma de cuenca oval redonda en la configuración de la red de drenaje superficial?

La estrepitosa caída del coeficiente de variación del índice de Gravelius (0.048), respecto del correspondiente a la muestra (0.282), arrastrando consigo también la caída de los coeficientes de variación de relación de confluencias y coeficiente orográfico, vuelve a poner en evidencia la influencia que ejerce la geometría de la cuenca sobre la configuración de la red de drenaje (relación de confluencias) y en menor grado sobre los factores de relieve (coeficiente orográfico).

La caída del coeficiente de variación del índice de Gravelius, por debajo del cinco por ciento, también demuestra la solidez del criterio de clasificación en este rango de geometría.

Microcuenca río Llaucán ($K_c = 1.24$)



Microcuenca río Mirilis ($K_c = 1.16$)

Figura 4: Forma de microcuencas oval redonda con semejanza geométrica.

Tabla 8: Grupo de microcuencas altoandinas de la forma oval redonda ($1 < K_C \leq 1.25$)-G.A

Microcuenca	Área A (Km ²)	Perímetro P (Km)	Altitud H(msnm)	Número de orden O	Coefficiente Gravelius K _C	Relación de Confluencias R _C	Coefficiente orográfico C _O (%)	Cuenca	Vertiente
01. Río Llaucán	622.67	110.96	3 484	4	1.24	4.01	1.95	Alto Maraón	Atlántico
02. Río Mirilis	187.28	56.72	2 903	4	1.16	3.02	4.50	Alto Maraón	Atlántico
PROMEDIO DESVEST COEFVAR					1.200 0.057 0.048	3.515 0.700 0.199	3.225 1.803 0.559		

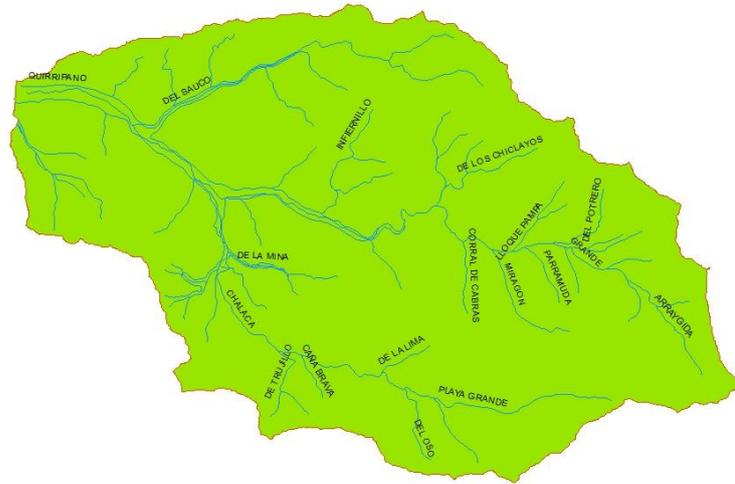
4.2.2. FORMA OVAL OBLONGA ($1.25 < K_c \leq 1.50$)

Este grupo de microcuencas (Tabla 9), lo conforman veintiocho unidades que representa el 56 por ciento del total de la muestra. Las características hidrológicas de respuesta, ante tormentas extraordinarias, son parecidas al del grupo oval redonda pero ligeramente menos intensas. Este grupo es el de mayor importancia por cuanto es la forma geométrica de sistemas hidrológicos con mayor presencia en la muestra de la región de estudio.

¿Cómo, influye la forma de cuenca oval oblonga en la configuración de la red de drenaje superficial?

De manera similar al grupo anterior, la caída estrepitosa del coeficiente de variación del índice de Gravelius (0.044) con respecto al de la muestra (0.082), llevando consigo también la caída del mismo estadístico, pero en menor grado, de los parámetros de relación de confluencias y coeficiente orográfico, no sólo demuestra la influencia de esta geometría sobre la configuración espacial de la red de drenaje (relación de confluencias promedio) y en menor magnitud en los factores de relieve (coeficiente orográfico); sino también la consistencia del criterio de clasificación geométrica mediante esta metodología (rangos del índice de Gravelius).

Microcuenca río Quirripano ($K_c = 1.30$)



Microcuenca Qda. Yamulán ($K_c = 1.30$)

Figura 5: Forma de microcuencas oval oblonga con semejanza geométrica.

Tabla 9: Grupo de microcuencas altoandinas de la forma oval oblonga ($1.25 < K_c \leq 1.50$)-G.B

Microcuenca	Área A (Km ²)	Perímetro P (Km)	Altitud H(msnm)	Número de orden O	Coefficiente Gravelius K _c	Relación de Confluencias R _c	Coefficiente orográfico C _o (%)	Cuenca	Vertiente
01. Río Asunción	83.57	42.17	2 984	3	1.29	1.44	10.65	Jequetepeque	Pacífico
02. Río Bichota	113.78	50.14	3 080	3	1.32	4.83	8.34	Crisnejas	Atlántico
03. Qda. Caracmaca	82.44	44.09	3 393	3	1.36	3.75	13.98	Crisnejas	Atlántico
04. Río Cirato	136.37	56.86	2 276	3	1.36	3.80	3.80	Chancay	Pacífico
05. Río Cospán	239.67	81.93	2 803	4	1.48	2.83	3.28	Chicama	Pacífico
06. Río Chanta	97.17	51.77	2 620	3	1.47	3.50	7.06	Jequetepeque	Pacífico
07. Río Charat	62.48	41.00	2 805	3	1.45	2.50	12.59	Chicama	Pacífico
08. Qda. Chausís	209.32	73.65	2 177	4	1.42	2.70	2.26	Jequetepeque	Pacífico
09. Río Chetillano	177.79	67.08	2 790	4	1.41	2.89	4.38	Jequetepeque	Pacífico
10. Río Chin Chin	99.38	48.43	3 328	3	1.36	3.50	11.14	Chicama	Pacífico
11. Qda. El Choro	67.15	43.91	2 316	3	1.50	1.50	7.99	Chancay	Pacífico
12. Río Grande	210.53	72.22	3 320	4	1.39	2.64	5.24	Chicama	Pacífico
13. Río Huambayoco	173.35	66.05	2 286	4	1.40	2.92	3.01	Chancay	Pacífico
14. Río Huaranchal	115.96	52.49	2 934	3	1.36	3.50	7.42	Chicama	Pacífico
15. Río Jadibamba	258.81	81.44	3 218	3	1.42	3.83	4.00	Alto Marañón	Atlántico
16. Río Llantén	279.48	83.89	3 378	4	1.41	3.53	4.08	Chancay	Pacífico
17. Río Mashcón	667.44	137.21	3 533	4	1.49	3.67	1.87	Crisnejas	Atlántico
18. Río Molino	123.13	58.10	2 903	4	1.47	3.09	6.84	Alto Marañón	Atlántico
19. Río Ochape	214.52	77.22	2 472	3	1.48	4.67	2.85	Chicama	Pacífico
20. Río Pallac	238.21	81.63	2 363	4	1.48	2.93	2.34	Jequetepeque	Pacífico
21. Qda. Quinuas	90.43	49.42	2 974	3	1.46	2.33	9.78	Jequetepeque	Pacífico
22. Río Quirripaño	341.52	86.06	2 274	4	1.30	3.24	1.51	Chicama	Pacífico
23. Río San Jorge	581.41	119.26	3 038	4	1.38	4.38	1.59	Chicama	Pacífico
24. Río San Juan	139.71	60.88	3 301	4	1.44	2.83	7.80	Jequetepeque	Pacífico
25. Río San Juan	123.63	57.31	3 155	3	1.44	2.75	8.05	Chancay	Pacífico
26. Río San Pablo	180.46	69.24	2 505	3	1.44	2.47	3.48	Jequetepeque	Pacífico
27. Río Trapiche	359.39	97.87	2 818	4	1.45	3.53	2.21	Alto Marañón	Atlántico
28. Qda. Yamulán	53.83	34.17	2 704	3	1.30	1.67	13.58	Jequetepeque	Pacífico
PROMEDIO					1.412	3.115	6.111		
DESVEST					0.062	0.843	3.820		
COEFVAR					0.044	0.271	0.625		

4.2.3. FORMA OBLONGA ALARGADA ($1.50 < K_c \leq 1.75$)

Este grupo de microcuencas (Tabla 10) conformado por veinte unidades hidrológicas, que representa el 40 por ciento del total de la muestra, se caracteriza por tener tiempos de concentración relativamente mayores que en los dos formas anteriores, generando hidrogramas de crecidas efluentes del tipo platicúrtico, con caudales más sostenidos y recesiones más duraderas. A diferencia de los dos grupos geométricos anteriores, en este caso las condiciones para la recarga de acuíferos mejoran sustancialmente y las pérdidas por escorrentía directa disminuyen. Los riesgos por inundaciones, ante tormentas extraordinarias, son mucho menores que en los dos casos anteriores.

¿Cómo, influye la geometría oblonga alargada en la configuración del patrón de flujo superficial?

Similarmente a lo ocurrido en los dos grupos geométricos anteriores, la estrepitosa caída del coeficiente de variación (0.043) del índice de Gravelius, respecto del correspondiente valor muestral (0.082), también verifica la solidez del criterio de clasificación en este rango del coeficiente de Gravelius. Sin embargo, el mismo estadístico correspondiente a la relación de confluencias ($0.313 > 0.282$) y coeficiente orográfico ($0.666 > 0.646$), están ligeramente por encima de los correspondientes valores muestrales, lo cual implica que este tipo de geometría de cuenca no tiene mayor incidencia en la configuración espacial de la red de drenaje (relación de confluencias promedio) y menos aún en los factores de relieve (coeficiente orográfico).

Es de resaltar que, en los tres grupos de clasificación geométrica, el coeficiente de variación del índice de Gravelius se mantiene siempre por debajo de 0.050, aspecto que demuestra la consistencia del criterio de clasificación geométrica mediante rangos del índice de Gravelius.

La forma oval redonda y oval oblonga, la primera en mayor grado, tienen marcada influencia en la configuración espacial de la red de drenaje y en menor escala sobre los factores de relieve, todo lo cual impacta favorablemente en la similitud hidráulica de los

sistemas hidrológicos altoandinos. Contrariamente, al comportamiento de la forma oblonga alargada que no tiene mayor influencia.

Microcuenca río Rejo ($K_c = 1.72$)



Microcuenca Qda. Yanahuanca ($K_c = 1.72$)

Figura 6: Forma de microcuencas oblonga alargada con semejanza geométrica.

Tabla 10: Grupo de microcuencas altoandinas de la forma oblonga alargada ($1.50 < K_c \leq 1.75$)-G.C

Microcuenca	Área A (Km ²)	Perímetro P (Km)	Altitud H(msnm)	Número de orden O	Coefficiente Gravelius K _C	Relación de Confluencias R _C	Coefficiente orográfico C _O (%)	Cuenca	Vertiente
01. Río Azufre	77.03	47.19	3 657	3	1.52	2.11	17.36	Crisnejas	Atlántico
02. Qda. Cachachi	82.34	52.39	3 222	3	1.62	1.83	12.61	Crisnejas	Atlántico
03. Río Cañad	250.86	87.99	2 655	3	1.56	5.30	2.81	Chancay	Pacífico
04. Río Contumazá	185.17	81.41	2 446	4	1.68	4.80	3.23	Jequetepeque	Pacífico
05. Río Chilca	83.98	51.82	3 372	3	1.58	2.83	13.54	Crisnejas	Atlántico
06. Río Grande	117.58	60.60	3 680	3	1.56	3.33	11.52	Crinejas	Atlántico
07. Río Huayro	195.50	79.76	3 668	4	1.61	2.83	6.88	Crisnejas	Atlántico
08. Qda. Huertas	100.89	54.32	2 389	3	1.51	3.75	5.66	Jequetepeque	Pacífico
09. Río Juana Ríos	400.80	107.76	1 825	3	1.51	3.33	0.83	Chancay	Pacífico
10. Qda. Lanla	148.69	69.91	3 479	3	1.60	2.00	8.14	Crisnejas	Atlántico
11. Río Maichil	345.70	101.52	2 441	4	1.53	2.56	1.72	Chancay	Pacífico
12. Río Montemayo	245.95	93.63	2 682	4	1.67	2.98	2.92	Chancay	Pacífico
13. Río Muyoc	215.88	86.17	3 254	4	1.64	2.89	4.90	Crisnejas	Atlántico
14. Río Namora	457.62	115.44	3 302	4	1.51	4.25	2.38	Crisnejas	Atlántico
15. Río Porcón	155.71	72.10	3 487	4	1.62	2.55	7.81	Crisnejas	Atlántico
16. Río Rejo	218.80	90.77	3 665	4	1.72	3.33	6.14	Jequetepeque	Pacífico
17. Qda. Shitalmalca	119.29	59.98	3 173	4	1.54	2.58	8.44	Crisnejas	Atlántico
18. Río Tumbadén	303.55	96.88	3 521	4	1.56	3.62	4.08	Jequetepeque	Pacífico
19. Río Yamobamba	273.18	90.52	3 609	3	1.53	5.56	4.77	Crisnejas	Atlántico
20. Qda. Yanahuanca	205.99	88.39	3 277	3	1.72	3.93	5.21	Jequetepeque	Pacífico
PROMEDIO DESVEST COEFVAR					1.590 0.069 0.043	3.318 1.040 0.313	6.548 4.361 0.666		

¿Cómo, influye la forma geométrica de la cuenca en la similitud hidráulica?

La forma de cuenca **oval redonda** y **oval oblonga**, la primera en mayor grado, tienen una marcada influencia sobre la configuración espacial de la red de drenaje superficial y en menor escala sobre los factores de relieve y, por tanto, en la similitud hidráulica. Mientras que en la forma oblonga alargada, esta influencia no se percibe.

4.3. SIMILITUD HIDRÁULICA DE SISTEMAS HIDROLÓGICOS

En cada uno de los tres grupos de clasificación geométrica de microcuencas (Tablas 8, 9, 10) se identificaron, por descarte, las unidades hidrológicas con similitud hidráulica aproximada, teniendo en consideración el límite de error preestablecido para cada uno de los parámetros de semejanza, medida mediante el coeficiente de variación.

4.3.1. SIMILITUD HIDRÁULICA DE SISTEMAS DE FORMA OVAL REDONDA

En este escaso grupo de microcuencas (Tabla 8), de apenas dos unidades hidrológicas, no se encontró similitud hidráulica entre ellas, pues no obstante de cumplir los límites de tolerancia para el índice de Gravelius (coeficiente de variación, 0.048) y relación de confluencias (coeficiente de variación, 0.199), el desborde presentado en el coeficiente de variación del coeficiente orográfico (0.559), trunca de plano la similitud hidráulica.

4.3.2. SIMILITUD HIDRÁULICA DE SISTEMAS DE FORMA OVAL OBLONGA

¿Con qué frecuencia se presenta la similitud hidráulica en los sistemas hidrológicos de la forma oval oblonga?

En este grupo de microcuencas (Tabla 11), de geometría más recurrente en la muestra, se encontraron trece unidades con similitud hidráulica que representa el 46.4 por ciento del total de este grupo y el 26 por ciento del total de la muestra. Es el grupo con mayor presencia de similitud hidráulica en la muestra regional.

Micro cuenca río Pallac ($K_c = 1.48$)



Microcuenca río Ochape ($K_c = 1.48$)

Figura 7: Microcuencas de forma oval oblonga con similitud hidráulica.

Tabla 11: Microcuencas con similitud hidráulica de la forma oval oblonga ($1.25 < K_C \leq 1.50$)- G.B1

Microcuenca	Área A (Km ²)	Perímetro P (Km)	Altitud H(msnm)	Número de orden O	Coefficiente Gravelius K _C	Relación de Confluencias R _C	Coefficiente orográfico C _O (%)	Cuenca	Vertiente
01. Río Cospán	239.67	81.93	2 803	4	1.48	2.83	3.28	Chicama	Pacífico
02. Río Cirato	136.37	56.86	2 276	3	1.36	3.80	3.80	Chancay	Pacífico
03. Qda. Chausís	209.32	73.65	2 177	4	1.42	2.70	2.26	Jequetepeque	Pacífico
04. Río Chetillano	177.79	67.08	2 790	4	1.41	2.89	4.38	Jequetepeque	Pacífico
05. Río Huambayoco	173.35	66.05	2 286	4	1.40	2.92	3.01	Chancay	Pacífico
06. Río Jadibamba	258.81	81.44	3 218	3	1.42	3.83	4.00	Alto Marañón	Atlántico
07. Río Llantén	279.48	83.89	3 378	4	1.41	3.53	4.08	Chancay	Pacífico
08. Río Masheón	667.44	137.21	3 533	4	1.49	3.67	1.87	Crisnejas	Atlántico
09. Río Ochape	214.52	77.22	2 472	3	1.48	4.67	2.85	Chicama	Pacífico
10. Río Pallac	238.21	81.63	2 363	4	1.48	2.93	2.34	Jequetepeque	Pacífico
11. Río San Jorge	581.41	119.26	3 038	4	1.38	4.38	1.59	Chicama	Pacífico
12. Río San Pablo	180.46	69.24	2 505	3	1.44	2.47	3.48	Jequetepeque	Pacífico
13. Río Trapiche	359.39	97.87	2 818	4	1.45	3.53	2.21	Alto Marañón	Atlántico
PROMEDIO DESVEST COEFVAR					1.432 0.042 0.029	3.396 0.672 0.198	3.012 0.909 0.302		

A manera de ilustración de cómo mejorar la calidad de la similitud hidráulica, por descarte de las unidades más discrepantes, se pueden ir reduciendo los límites de error tal como se observa en los resultados mostrados en las Tablas.12, 13 y 14.

Como se aprecia, el costo de la mejora de similitud es la “pérdida” de las unidades hidrológicas descartadas; desde luego dichas unidades pueden ir a conformar otros grupos con similitud hidráulica, en razón de su compatibilidad con los errores máximos permisibles preestablecidos para cada uno de los parámetros de similitud.

Se observa que de las trece unidades con similitud hidráulica aproximada con que contaba en la Tabla 11, se han reducido a tan sólo cinco unidades de la Tabla 14, con una significativa mejora en aproximación de la similitud hidráulica.

¿Con qué, frecuencia se presenta la similitud hidráulica en los sistemas hidrológicos de la forma oval oblonga?

La similitud hidráulica en esta clase de geometría está distribuida en tres grupos, un primer grupo conformado por trece unidades hidrológicas (Tabla 11), un segundo grupo con seis unidades (Tabla 15) y un tercero con tres unidades (Tabla 16); lo cual hace un total de veintiún microcuencas, que representa el 75% del número total de esta clase geométrica y el 42% del total de la muestra.

Es el grupo geométrico con mayor presencia de similitud hidráulica en la muestra de la región de estudio; sin embargo, existe un número de siete microcuencas que no mostraron identidad de similitud entre sí, menos aún con la de los otros tres grupos; lo cual representa el 25 por ciento del total de esta clase geométrica y 14 por ciento del total de la muestra regional.

Tabla 12: Microcuencas con similitud hidráulica de la forma oval oblonga ($1.25 < K_c \leq 1.50$)-G. B1.1

Microcuenca	Área A (Km ²)	Perímetro P (Km)	Altitud H(msnm)	Número de orden O	Coefficiente Gravelius K _C	Relación de Confluencias R _C	Coefficiente orográfico C _O (%)	Cuenca	Vertiente
01. Río Cospán	239.67	81.93	2 803	4	1.48	2.83	3.28	Chicama	Pacífico
02. Río Cirato	136.37	56.86	2 276	3	1.36	3.80	3.80	Chancay	Pacífico
03. Qda. Chausís	209.32	73.65	2 177	4	1.42	2.70	2.26	Jequetepeque	Pacífico
04. Río Huambayoco	173.35	66.05	2 286	4	1.40	2.92	3.01	Chancay	Pacífico
05. Río Jadibamba	258.81	81.44	3 218	3	1.42	3.83	4.00	Alto Marañón	Atlántico
06. Río Llantén	279.48	83.89	3 378	4	1.41	3.53	4.08	Chancay	Pacífico
07. Río Pallac	238.21	81.63	2 363	4	1.48	2.93	2.34	Jequetepeque	Pacífico
08. Río San Pablo	180.46	69.24	2 505	3	1.44	2.47	3.48	Jequetepeque	Pacífico
09. Río Trapiche	359.39	97.87	2 818	4	1.45	3.53	2.21	Alto Marañón	Atlántico
PROMEDIO DESVEST COEFVAR					1.429 0.038 0.027	3.171 0.505 0.159	3.162 0.749 0.237		

Tabla 13: Microcuencas con similitud hidráulica de la forma oval oblonga ($1.25 < K_c \leq 1.50$)-G.B1.2

Microcuenca	Área A (Km ²)	Perímetro P (Km)	Altitud H(msnm)	Número de orden O	Coficiente Gravelius K _c	Relación de Confluencias R _c	Coficiente orográfico C _o (%)	Cuenca	Vertiente
01. Río Cospán	239.67	81.93	2 803	4	1.48	2.83	3.28	Chicama	Pacífico
02. Qda. Chausís	209.32	73.65	2 177	4	1.42	2.70	2.26	Jequetepeque	Pacífico
03. Río Huambayoco	173.35	66.05	2 286	4	1.40	2.92	3.01	Chancay	Pacífico
04. Río Pallac	238.21	81.63	2 363	4	1.48	2.93	2.34	Jequetepeque	Pacífico
05. Río San Pablo	180.46	69.24	2 505	3	1.44	2.47	3.48	Jequetepeque	Pacífico
06. Río Trapiche	359.39	97.87	2 818	4	1.45	3.53	2.21	Alto Marañón	Atlántico
PROMEDIO					1.445	2.900	2.763		
DESVEST					0.032	0.354	0.562		
COEFVAR					0.022	0.122	0.203		

Tabla14: Microcuencas con similitud hidráulica de la forma oval oblonga ($1.25 < K_c \leq 1.50$)-G.B1.3

Microcuenca	Área A (Km ²)	Perímetro P (Km)	Altitud H(msnm)	Número de orden O	Coefficiente Gravelius K _C	Relación de Confluencias R _C	Coefficiente orográfico C _O (%)	Cuenca	Vertiente
01. Río Cospán	239.67	81.93	2 803	4	1.48	2.83	3.28	Chicama	Pacífico
02. Qda. Chausís	209.32	73.65	2 177	4	1.42	2.70	2.26	Jequetepeque	Pacífico
03. Río Huambayoco	173.35	66.05	2 286	4	1.40	2.92	3.01	Chancay	Pacífico
04. Río Pallac	238.21	81.63	2 363	4	1.48	2.93	2.34	Jequetepeque	Pacífico
05. Río Trapiche	359.39	97.87	2 818	4	1.45	3.53	2.21	Alto Marañón	Atlántico
PROMEDIO					1.446	2.982	2.620		
DESVEST					0.036	0.320	0.491		
COEFVAR					0.025	0.107	0.187		

Otros grupos de microcuencas de la misma forma geométrica (oval oblonga) con similitud hidráulica son mostradas en las Tablas 15 y 16, incluso con una mayor aproximación que las del primer grupo (Tabla 11). Conjunto de microcuencas que han sido descartadas del grupo primigenio en razón de su mayor discrepancia en el coeficiente orográfico.

Tabla15: Microcuencas con similitud hidráulica de la forma oval oblonga ($1.25 < K_C \leq 1.50$)-G.B2

Microcuenca	Área A (Km ²)	Perímetro P (Km)	Altitud H(msnm)	Número de orden O	Coefficiente Gravelius K _C	Relación de Confluencias R _C	Coefficiente orográfico C _O (%)	Cuenca	Vertiente
01. Río Chanta	97.17	51.77	2 620	3	1.47	3.50	7.06	Jequetepeque	Pacífico
02. Río Grande	210.53	72.22	3 320	4	1.39	2.64	5.24	Chicama	Pacífico
03. Río Huaranchal	115.96	52.49	2 934	3	1.36	3.50	7.42	Chicama	Pacífico
04. Río Molino	123.13	58.10	2 903	4	1.47	3.09	6.84	Alto Marañón	Atlántico
05. Río San Juan	139.71	60.88	3 301	4	1.44	2.83	7.80	Jequetepeque	Pacífico
06. Río San Juan	123.67	57.31	3 155	3	1.44	2.75	8.05	Chancay	Pacífico
PROMEDIO					1.428	3.052	7.068		
DESVEST					0.044	0.378	1.000		
COEFVAR					0.031	0.124	0.141		

Tabla 16: Microcuencas con similitud hidráulica de la forma oval oblonga ($1.25 < K_c \leq 1.50$)-G.B3

Microcuenca	Área A (Km ²)	Perímetro P (Km)	Altitud H(msnm)	Número de orden O	Coefficiente Gravelius K _C	Relación de Confluencias R _C	Coefficiente orográfico C _O (%)	Cuenca	Vertiente
01. Río Caracmaca	82.36	44.09	3 393	3	1.36	3.75	13.98	Crisnejas	Atlántico
02. Río Charat	62.48	41.00	2 805	3	1.45	2.50	12.59	Chicama	Pacífico
03. Río Chin Chin	99.38	48.43	3 328	3	1.36	3.50	11.14	Chicama	Pacífico
PROMEDIO					1.390	3.250	12.570		
DESVEST					0.052	0.661	1.420		
COEFVAR					0.037	0.203	0.113		

4.3.3. SIMILITUD HIDRÁULICA DE SISTEMAS DE FORMA OBLONGA ALARGADA

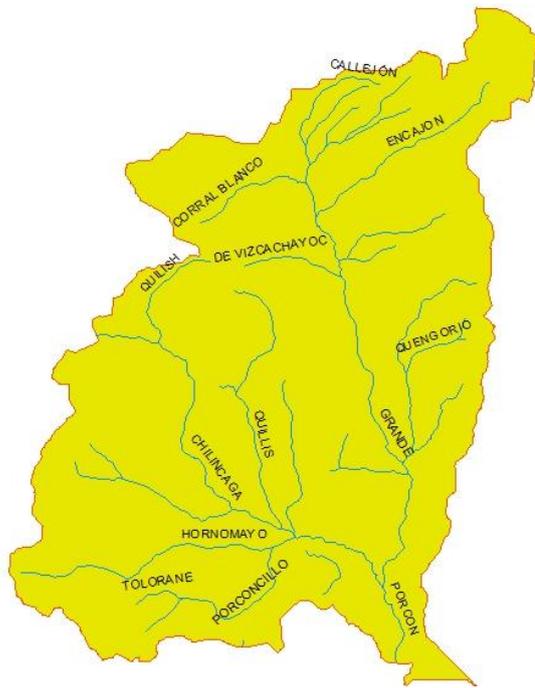
¿Con qué, frecuencia se presenta la similitud hidráulica en los sistemas hidrológicos de la forma oblonga alargada?

La similitud hidráulica de las microcuencas de esta geometría está distribuida también, al igual que la forma anterior, en tres grupos: un primer grupo de cuatro unidades hidrológicas (Tabla 17), un segundo de seis unidades (Tabla 18) y un tercero de dos unidades (Tabla 19); haciendo un total de doce microcuencas, que representa el 60 por ciento del número total de este grupo geométrico y el 24 por ciento del número total de la muestra regional.

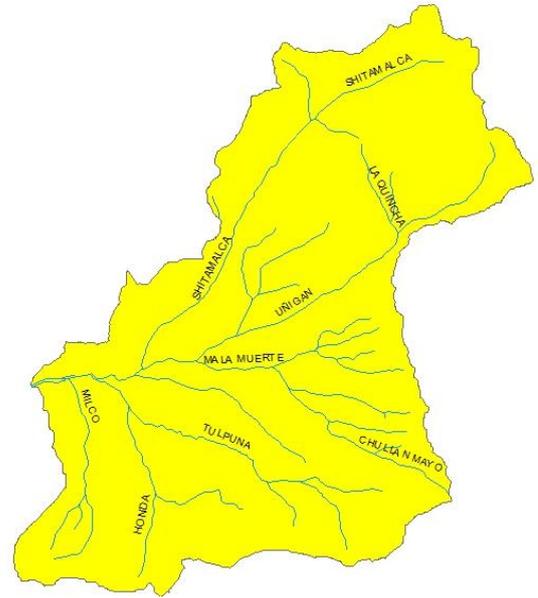
También queda un grupo de ocho microcuencas que no tuvieron identidad de similitud con ninguno de los tres grupos ni consigo mismas, lo que representa el 40 por ciento del número total de esta clase geométrica y 16 por ciento del total de la muestra regional.

No obstante una menor tendencia de similitud hidráulica en esta clase geométrica, los grupos presentan una mayor aproximación de la similitud (menor coeficiente de variación), con excepción de las unidades hidrológicas de la Tabla 9, donde existe un ligero desborde del estadístico de la relación confluencias promedio.

Casi siempre la división en grupos de similitud hidráulica, en cualquier forma geométrica, ocurre por la mayor discrepancia del coeficiente orográfico, esto es, en la similitud dinámica.



Microcuenca río Porcón ($K_c = 1.62$)



Microcuenca Qda. Shitamalca ($K_c = 1.54$)

Figura 8: Microcuencas de forma oblonga alargada con similitud hidráulica.

Tabla17: Microcuencas hidrográficas de forma oblonga alargada con similitud hidráulica ($1.50 < K_c \leq 1.75$)-G.C1

Microcuenca	Área A (Km ²)	Perímetro P (Km)	Altitud H(msnm)	Número de orden O	Coefficiente Gravelius K _C	Relación de Confluencias R _C	Coefficiente orográfico C _O (%)	Cuenca	Vertiente
01. Río Cañad	250.86	87.99	2 655	3	1.56	5.30	2.81	Chancay	Pacífico
02. Río Contumazá	185.17	81.41	2 446	4	1.68	4.80	3.23	Jequetepeque	Pacífico
03. Río Montemayo	245.95	93.63	2 682	4	1.67	2.98	2.92	Chancay	Pacífico
04. Río Namora	457.62	115.44	3 302	4	1.51	4.25	2.38	Crisnejas	Atlántico
PROMEDIO					1.605	4.332	2.835		
DESVEST					0.083	0.998	0.352		
COEFVAR					0.052	0.230	0.124		

Tabla 18: Microcuencas de la forma oblonga alargada con similitud hidráulica ($1.50 < K_C \leq 1.75$)-G.C2

Microcuenca	Área A (Km ²)	Perímetro P (Km)	Altitud H(msnm)	Número de orden O	Coefficiente Gravelius K _C	Relación de Confluencias R _C	Coefficiente orográfico C _O (%)	Cuenca	Vertiente
01. Río Huayro	195.50	79.76	3 668	4	1.61	2.83	6.88	Crisnejas	Atlántico
02. Qda. Huertas	100.89	54.32	2 389	3	1.51	3.75	5.66	Jequetepeque	Pacífico
03. Río Porcón	155.71	72.10	3 487	4	1.62	2.55	7.81	Crisnejas	Atlántico
04. Río Rejo	218.80	90.77	3 665	4	1.72	3.33	6.14	Jequetepeque	Pacífico
05. Qda. Shitamalca	119.29	59.98	3 173	4	1.54	2.58	8.44	Crisnejas	Atlántico
06. Qda. Yanahuanca	205.99	88.39	3 277	3	1.72	3.93	5.21	Jequetepeque	Pacífico
PROMEDIO DESVEST COEFVAR					1.620 0.088 0.054	3.162 0.598 0.189	6.690 1.258 0.188		

Tabla 19: Microcuencas de forma oblonga alargada con similitud hidráulica ($1.50 < K_c \leq 1.75$)-G.C3

Microcuenca	Área A (Km ²)	Perímetro P (Km)	Altitud H(msnm)	Número de orden O	Coefficiente Gravelius K _C	Relación de Confluencias R _C	Coefficiente orográfico C _O (%)	Cuenca	Vertiente
01. Río Chilca	83.51	51.82	3 392	3	1.58	2.83	13.54	Crisnejas	Atlántico
02. Río Grande	117.58	60.60	3 380	3	1.56	3.33	11.52	Crisnejas	Atlántico
PROMEDIO					1.570	3.080	12.530		
DESVEST					0.014	0.354	1.428		
COEFVAR					0.009	0.115	0.114		

4.4. PARÁMETROS ADIMENSIONALES Y FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA

Mediante el análisis dimensional de variables involucradas en el fenómeno físico precipitación-escorrentía de los sistemas hidrológicos altoandinos se definieron los parámetros adimensionales que las gobiernan; identificándose dentro de ello los parámetros de similitud hidráulica y derivándose las funciones de transferencia correspondientes.

4.4.1. PARÁMETROS ADIMENSIONALES Y LEYES FÍSICAS DE LOS SISTEMAS HIDROLÓGICOS ALTOANDINOS

El producto al que se llega, luego del proceso del análisis dimensional de variables del fenómeno precipitación-escorrentía de los sistemas hidrológicos altoandinos, son las cinco leyes físicas que las gobiernan, representadas por los grupos adimensionales siguientes:

$$\pi_1 = \frac{Q}{AP} \quad (10)$$

$$\pi_2 = \frac{H}{\sqrt{A}} \quad (11)$$

$$\pi_3 = \frac{I * t}{H} \quad (12)$$

$$\pi_4 = \frac{Q}{I * A} \quad (13)$$

$$\pi_5 = \frac{p}{\sqrt{A}} \quad (14)$$

π = Parámetro adimensional

Q = Caudal de escurrimiento (superficial más subterráneo)

A = Proyección del área receptora colectora sobre un plano horizontal

P = Precipitación pluviométrica

H = Altitud media sobre el nivel del mar

I = Intensidad de precipitación

t = Periodo de duración de intensidad de precipitación

p = Perímetro de la cuenca.

En estas expresiones se observa que el área proyectada de la cuenca aparece en todos los grupos adimensionales, excepto en el parámetro adimensional de la ecuación (12), lo que demuestra la importancia de esta variable y su total independencia de la precipitación pluviométrica.

Mediante este conjunto de parámetros adimensionales se explica toda la dinámica hidráulica de los sistemas hidrológicos altoandinos y, por la estrecha relación que tiene el agua con el entorno, explica también de forma mediata la distribución y desarrollo del medio biótico en dichos sistemas. Con toda razón, en este trabajo, a todo el grupo de parámetros se ha denominado como “*leyes físicas de los sistemas hidrológicos altoandinos*”.

Se analizó y se interpretó cada grupo adimensional, asignando un nombre o denominación a cada parámetro en función a la particularidad descriptiva que representa, tal como queda resumido en los párrafos siguientes, en el mismo orden de presentación.

➤ **Parámetro adimensional de flujo sostenido**

$$\pi_1 = \frac{Q}{AP} \quad (10)$$

Este parámetro es válido para balances hidrológicos en periodos relativamente largos, pudiendo ser periodos diarios, mensuales, anuales o estacionales. Si las pérdidas son pequeñas (periodos diarios, por ejemplo), pueden introducirse en un coeficiente de escorrentía menor que la unidad ($K < 1$), para lo cual la ecuación anterior adopta la forma primera de las igualdades (16).

$$Q = K A P \quad ; \quad Q = A P_{ef} \quad (16)$$

Q= Caudal promedio en el periodo considerado

A= Área de la cuenca receptora-colectora de precipitaciones

P = Precipitación total en el periodo de balance

P_{ef} = **Precipitación efectiva** en el periodo de balance, ($K=1$).

K= Coeficiente de escorrentía, ($K < 1$).

Si las pérdidas son importantes, se introduce en el balance el término “*precipitación efectiva*”, con respecto a la escorrentía, lo que implica obviamente incluir en el balance las componentes de evapotranspiración real y humedad del suelo, situación en la que el coeficiente de escorrentía toma el valor unidad ($K=1$) y la expresión adopta la forma segunda de las ecuaciones (16).

Este parámetro es particularmente de suma importancia por su utilidad práctica en balances hidrológicos de muchos modelos, incluyendo los modelos distribuidos, para lo cual esta función se expresa en su forma diferencial.

El parámetro adimensional de flujo sostenido explica que un sistema hidrológico dispondrá de mayor cantidad de recurso hídrico, mientras mayor sea la precipitación pluviométrica y mayor también el área receptora de precipitaciones. Parámetro que a su vez se convierte en una de las funciones más importantes de transferencia de información de flujos promedio entre sistemas hidrológicos hidráulicamente similares.

➤ **Parámetro adimensional de relieve**

$$\pi_2 = \frac{H}{\sqrt{A}} \quad (11)$$

Este parámetro adimensional explica indirectamente el potencial de los flujos de escurrimiento y la capacidad de erosión hídrica de los sistemas hidrológicos. Como se aprecia, tales potenciales serán mayores mientras más inclinado o escarpado sea el relieve del sistema (mínima área proyectada) y mayor altitud, y viceversa. Por esta razón, este parámetro es muy útil para la evaluación del potencial de erosividad hídrica y de transporte de sedimentos de los sistemas hidrológicos altoandinos, así como para la determinación de potenciales de generación de energía hidroeléctrica, en razón del tamaño de los saltos hidráulicos.

Los andes peruanos del pacífico norte de Perú tienen la particularidad de albergar a las microcuencas más escarpadas en las mayores altitudes, por lo que los potenciales de degradación hídrica son excesivamente altos, con escorrentía directa muy abundante y

saltos hidráulicos de mayor magnitud. Todo ello muy favorable a la degradación hídrica, pero en contraposición con los bajos caudales de flujo sostenido (flujo base).

El parámetro de relieve tiene especial importancia porque de él se deriva el parámetro adimensional conocido como *coeficiente orográfico* (ecuación 7), al elevar al cuadrado ambos miembros de dicha ecuación (ecuación 11), que no es más que otra forma de presentación de la ecuación (11), parámetro adimensional muy importante en la ingeniería hidrológica superficial, muy utilizado en estudios de análisis morfométrico de sistemas hidrológicos.

$$C_o = \frac{H^2}{A} \quad (7)$$

C_o = Coeficiente orográfico

H = Altitud media, m.s.n.m.

A = Área proyectada sobre un plano horizontal.

Por la singularidad que encierra el parámetro de relieve, al incluir indirectamente las fuerzas gravitacionales de flujo superficial, justifica plenamente el hecho de haber considerado al *coeficiente orográfico* como el parámetro referente de *semejanza dinámica* entre sistemas hidrológicos altoandinos.

El parámetro adimensional resultante (Oswald) de la combinación de los parámetros adimensionales de *flujo sostenido* y de *relieve*, al multiplicar miembro a miembro dichas expresiones (ecuación 17), explica mejor la dinámica de flujo sostenido.

$$\pi_{12} = \frac{QH}{A^{3/2}P} \quad (17)$$

Este parámetro explica que la disponibilidad del recurso hídrico en los sistemas altoandinos es mayor mientras mayores sean los valores de la precipitación y el área receptora y a menor la altitud. Esto es que, el caudal va incrementándose hacia aguas abajo en el curso principal.

➤ **Parámetro adimensional de lluvia**

$$\pi_3 = \frac{I * t}{H} \quad (12)$$

Este parámetro describe las características espaciales y temporales de cada tormenta pluviométrica, como variable de entrada importante a los sistemas hidrológicos altoandinos. Se observa que las mayores intensidades de precipitación se dan en menores intervalos de tiempo y a mayores altitudes, y viceversa. Esta variabilidad espacial y temporal de la precipitación resulta de mucho interés, no sólo para el emplazamiento y distribución de estaciones pluviométricas en los sistemas hidrológicos altoandinos, sino también en la selección de tormentas críticas y análisis de frecuencias de tormentas extraordinarias en estudios de máximas escorrentías, muy en especial, en la prevención de desastres en fenómenos del Niño.

El hecho de mostrar en este parámetro que la precipitación es función de la altitud en cuencas altoandinas y crece al crecer la altitud, ha sido muy bien aprovechado por la hidrología estadística de análisis regional para generar información de precipitación, previa prueba de verificación estadística de correlación de variables.

El *número adimensional de lluvia* se complementa mucho con el *número de flujo instantáneo* para la generación de escorrentías instantáneas acorde con las características de cada tormenta y características de los sistemas hidrológico similares. Propiedad que puede muy bien aprovecharse en estudios de escorrentías extraordinarias (fenómenos del Niño) y en el diseño de proyectos de drenaje en general (drenaje de carreteras, diseño de puentes, drenaje urbano, defensas rivereñas, sistemas de regulación de cuencas, canales de riego, obras de toma, obras de conservación de suelos, prevención de inundaciones etc.).

Como se aprecia en el parámetro adimensional de lluvia, la intensidad de precipitación durante la ocurrencia de una tormenta siempre se asocia a un intervalo de tiempo, correspondiendo los mayores valores para intervalos de tiempo menores, y viceversa.

Ley muy utilizada para convertir intensidades de precipitación a periodos de duración estándar internacionales (5 minutos, 10 minutos, 30 minutos, 60 minutos, 120 minutos, etc.), con fines de comparación. Parámetro que, además, constituye base fundamental de la función de transferencia de intensidades de precipitación en cuencas altoandinas similares.

➤ **Parámetro adimensional de flujo instantáneo**

$$\pi_4 = \frac{Q}{I * A} \quad (13)$$

Este parámetro explica que la escorrentía instantánea es mayor mientras mayor es la intensidad de precipitación y mayor el área receptora. Viene a constituir una de las leyes físicas más importantes de los sistemas hidrológicos altoandinos y de gran trascendencia en la ingeniería hidrológica superficial, por cuanto este parámetro da origen al método más antiguo que se conoce en la historia de generación de escorrentías instantáneas a partir de datos de precipitación; como es el famoso *método Racional* (ecuación 15), que no obstante lo vetusto de su origen aún tiene plena vigencia y compite con cualquier otra metodología sofisticada, si se usa correctamente. Este ingenioso método consiste en suponer que, bajo una tormenta, el caudal puede seguir creciendo hasta el límite de alcanzar el pico del hidrograma efluente, siempre y cuando la intensidad de precipitación dure por lo menos el tiempo de concentración de la cuenca receptora-colectora. Hecho que condiciona a que la intensidad de precipitación tenga que convertirse o adecuarse al periodo de duración equivalente al tiempo de concentración de la cuenca, aspecto muchas veces incomprendido en su aplicación.

$$Q_{\max} = CIA \quad (15)$$

Q_{\max} = Caudal máximo de escorrentía directa (pico del hidrograma)

C = Coeficiente de escorrentía

I = Intensidad de precipitación, para el tiempo de concentración de la cuenca,

A = área receptora-colectora proyectada sobre un plano horizontal.

Se puede afirmar que el *método Racional* va mejorando con el desarrollo tecnológico y científico, lo cual repercute en la mejora de la calidad de los resultados. Con el desarrollo tecnológico, porque la aproximación en la estimación de la intensidad de precipitación ha ido mejorando a lo largo del tiempo; partiendo desde datos pluviométricos, pluviográficos y hasta información pluviométrica de alta resolución, al minuto y en tiempo real, de hoy. Y en cuanto a lo científico, porque el descubrimiento de la influencia de otros factores, permite un mejor ajuste del coeficiente de escorrentía, pues actualmente se sabe que este coeficiente no sólo depende de la naturaleza y estado actual del sistema, sino también depende del parámetro de forma (coeficiente de Gravelius) y de la capacidad de almacenamiento instantáneo del sistema (relación de confluencias promedio).

Para un mismo estado actual de un sistema hidrológico, el valor del coeficiente de escorrentía (parámetro adimensional de flujo instantáneo) es tanto mayor mientras menor sea el índice de Gravelius (forma redondeada) y menor relación de confluencias promedio (mayor ramificación de la red de drenaje) y viceversa.

De este análisis se desprende que el *método Racional* es exclusivo para flujo instantáneo (se deriva del parámetro de flujo instantáneo) derivado de cierta tormenta y, por tanto, la información de precipitación en periodos largos (día, mes, año), por ser resultado de varias tormentas y aun cuando fuera de una misma tormenta, de nada vale en esta metodología. El parámetro de flujo instantáneo describe la evolución de la escorrentía efluente a lo largo de una tormenta, mientras que el método racional sólo identifica el pico del hidrograma de escorrentía efluente.

Teóricamente, con información de alta resolución de entradas y salidas en un sistema hidrológico, la combinación de los parámetros adimensionales de lluvia y de flujo instantáneo podría resultar de muy atractiva para la formulación de *hidrogramas unitarios adimensionales*, lo que facilitaría el cálculo predictivo de las escorrentías máximas extraordinarias en cada sistema. Esto no constituye un caso práctico, sobre todo en países en vías de desarrollo, donde a lo sumo se alcanza a construir hidrogramas adimensionales sintéticos, recurriendo a metodologías empíricas en base a morfometría cartográfica.

➤ **Parámetro adimensional de forma**

$$\pi_5 = \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (14)$$

Este parámetro describe, de manera más adecuada, la forma geométrica del sistema hidrológico, la misma que tiene influencia en la geometría del hidrograma de esorrentía efluente y en la configuración espacial de la red de drenaje, tal como se ha discutido y verificado en este trabajo.

Este parámetro adimensional también tiene especial importancia por cuanto da origen a otro parámetro adimensional muy conocido bajo el nombre de *índice de Gravelius* (ecuación 2), que es otra forma de presentación de la ecuación (14), como resultado de multiplicar ambos miembros de dicha ecuación por el factor 0.28.

$$K_c = 0.28 \frac{P}{A^{1/2}} \quad (2)$$

K_c = Coeficiente de compacidad

p = Perímetro medido en el plano de la cuenca

A = Área de la cuenca, medida en el plano a escala.

Por la importancia y relevancia en la dinámica hidráulica de los sistemas hidrológicos, el índice de Gravelius ha sido identificado en este estudio como el parámetro adimensional de mayor representatividad y mejor referente de la *semejanza geométrica* entre sistemas hidrológicos altoandinos. Además, los rangos de variabilidad de este parámetro han servido de base para la clasificación geométrica más importante de los sistemas hidrológicos, también usada en este trabajo.

Dado, a que el índice de Gravelius también influye en la geometría o configuración espacial de la red de drenaje superficial, lo cual se refleja en el parámetro adimensional de *relación de confluencias promedio*, no ha sido difícil considerar a este último parámetro como el mejor referente de *semejanza cinemática* entre sistemas hidrológicos.

4.4.2. CONDICIÓN DE SIMILITUD Y FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

Teóricamente, la similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos se alcanza cuando se cumplen simultáneamente las condiciones de semejanza geométrica, cinemática y dinámica. Bajo tales condiciones, los parámetros o números adimensionales del fenómeno físico estudiado son iguales así mismos en todos los sistemas hidrológicos con similitud hidráulica, independientemente de su tamaño. De cuyas igualdades resultan las diferentes funciones de transferencia correspondientes.

Las funciones de transferencia se convierten en herramientas muy útiles para transferir información hidrológica desde localidades con información hacia localidades carentes de ella, respecto a cierta variable de interés y en cuencas hidráulicamente similares.

Las variables de mayor utilidad práctica, casi siempre son muy escasas, en cuyo rubro se encuentran los datos referidos a flujos de escorrentías y los de tormentas pluviométricas. Por lo que, las funciones de transferencia de mayor utilidad, son las que a continuación se presentan.

- **Función de transferencia de escorrentías promedio**

$$Q_d = H_e^{-1} P_e A_e^{3/2} Q_o \quad (20)$$

H_e = Escala de altitudes

P_e = Escala de precipitaciones

A_e = Escala de áreas

Q_o = Caudal promedio de la cuenca de origen

Q_d = Caudal promedio en la cuenca destino.

Como es obvio, la calidad de información transferida depende de la calidad de información de la estación de origen. Pueden ser datos promedio, mensuales, anuales u otros. La información puede estar procesada o no, pero se prefiere siempre transferir el producto con el objeto de evitar la propagación de mayores errores. Por esta razón, si hubiere necesidad de modelamientos, conviene realizarlo antes de la transferencia.

La información con que se cuenta más frecuentemente es casi siempre la de precipitaciones, por esta razón es que en la función de transferencia aparece el factor de escala correspondiente, de no ser el caso, esta variable también hay que transferirla previamente. Pues, el resto de información es fácilmente accesible porque proviene de la cartografía.

Los datos transferidos jamás reemplazan a los datos “vírgenes”, pero son de mucha utilidad para solucionar problemas en la práctica de la ingeniería hidráulica.

Note que esta función de transferencia proviene del parámetro adimensional (Oswald), que es el resultado de combinar el *parámetro adimensional de flujo sostenido* y el *parámetro adimensional de relieve*, por lo que esta función sólo es válida para transferencia de flujos sostenidos, más no para flujos máximos instantáneos. Los flujos máximos de avenidas pueden ser transferidos mediante la función de transferencia que proviene del *parámetro adimensional de flujo instantáneo* (ecuación 13), vale decir del empleo del método Racional.

- **Función de transferencia de escorrentías instantáneas**

La función de transferencia de caudales máximos entre sistemas hidrológicos similares debe proceder del parámetro adimensional de flujo instantáneo (ecuación 13), de la que se deriva la ecuación (23):

$$Q_{d \max} = \left(\frac{I_d}{I_o}\right)\left(\frac{A_d}{A_o}\right) Q_{o \max} = I_e \times A_e \times Q_{o \max} \quad (23)$$

Donde los subíndices “o” y “d”, como en todas la expresiones de transferencia, a los sistemas hidrológicos de origen y destino, respectivamente.

En este caso, usando el criterio del método racional, la escala de intensidades es la razón entre intensidades referidas al tiempo de concentración de cada sistema hidrológico correspondiente. Pues, no podría ser de otra manera, puesto que se trata de flujos pico de cada hidrograma, correspondientes a las cuencas destino y de origen. Cuando no se conocen las intensidades en alguna de las cuencas hay que transferirlas previamente mediante la ecuación (22). Si además, el caudal no se conoce en ambas cuencas, hay que generarlo mediante el método Racional con sólo transferir la intensidad.

- **Función de transferencia de intensidades de precipitación**

$$I_d = \left(\frac{H_d}{H_o}\right) \left(\frac{t_o}{t_d}\right) I_o = H_e \times t_e^{-1} \times I_o \quad (22)$$

I_d = Intensidad de precipitación en la cuenca destino

I_o = Intensidad de precipitación en la cuenca de origen

t_e = Escala de periodos de duración

H_e = Escala de altitudes.

Ecuación válida para transferencia de información de intensidades de precipitación para cualquier periodo de duración y frecuencia. Igualmente, que para el caso de escorrentías, se prefiere transferir el producto del análisis de frecuencias de tormentas y de modelamientos previos.

4.4.3. APLICACIONES DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA

- **Sistema hidrológico de origen con información de tormentas máximas**

La simulación del modelo probabilístico Gumbel, calibrado mediante técnicas estadísticas de mejor ajuste, permitió la generación de información con la más diversa gama de probabilidades de ocurrencia, algunos de estos resultados se presentan en la Tabla 4. Información que corresponde a la ubicación de la estación pluviométrica Weberbauer, en la cuenca baja del sistema hidrológico río Mashcón (2 536 msnm). El procedimiento de la modelación y simulación del modelo probabilístico no se presenta aquí por cuanto no es objetivo del presente estudio, sino el de simplemente transferir información desde un sistema hidrológico de origen a otro destino similar.

- **Sistema hidrológico destino sin información de tormentas máximas**

Teniendo como información de partida los datos de la Tabla 4 de la estación origen Weberbauer (2 536 msnm) en las inmediaciones de la cuenca baja del río Mashcón y la altitud media de la microcuenca destino río Jadibamba (3 218 msnm); mediante la aplicación de la función de transferencia de la ecuación (22), considerando que los periodos de duración estándar de las intensidades se mantienen (escala tiempos, $t_e = 1$), y que la escala de altitudes es $H_e = 1.27$, se obtuvieron los datos transferidos de la Tabla 20.

En general, la información de intensidades correspondientes a máximas tormentas es muy escasa, pero a su vez muy útil para generar escorrentías máximas en microcuencas sin datos hidrométricos de máximas avenidas. Esta metodología resuelve, de manera sencilla, el problema en cuencas con similitud hidráulica.

La selección de la variable de diseño (Tablas 4 y 20)-donde existe una gama muy amplia de opciones en cuanto a periodos de vida útil (N), incertidumbre (J), tiempos de retorno (T_r) y periodo de duración, acorde con el tiempo de concentración de la superficie receptora-colectora- permite adecuarla a la naturaleza e importancia de cualquier proyecto hidráulico. Una vez transferidas las intensidades, utilizando otra de las leyes de los sistemas hidrológicos altoandinos dada por el parámetro adimensional de la ecuación 13, de donde se deriva método Racional, permite convertir o transformar la intensidad de precipitación en escorrentía máxima.

Tabla 20: Intensidades máximas de precipitación transferidas a la microcuenca del río Jadibamba (altitud media 3218 msnm).

N	J (%)	Tr (Años)	INTENSIDADES MÁXIMAS (mm/h)				
			5 min	10 min	30 min	60 min	120 min
	00	∞	-	-	-	-	-
5	1	498.0	199.3	139.2	74.8	46.1	30.2
	2	248.0	186.7	131.1	70.4	43.3	28.2
	5	98.0	169.8	120.3	64.5	39.5	25.4
	10	48.0	156.7	112.0	59.9	36.4	23.4
	15	31.3	148.8	106.9	57.2	34.8	22.0
	20	22.9	143.1	103.2	55.1	33.4	21.1
	25	17.9	138.6	100.3	53.6	32.4	20.3
	30	14.5	134.6	97.8	52.2	31.5	19.7
	40	10.3	128.1	93.7	49.9	30.0	18.7
	50	7.7	122.4	90.2	48.0	28.8	17.7
	60	6.0	117.6	87.0	46.2	27.7	17.0
	70	4.7	112.6	83.8	44.6	25.5	16.1
	80	3.6	106.9	80.3	42.5	25.3	15.2
90	2.7	100.7	76.2	40.4	23.9	14.1	
100	1.0	-	-	-	-	-	
	00	∞	-	-	-	-	-
10	1	995.5	210.2	147.2	79.2	49.0	32.4
	2	495.4	199.1	139.1	74.8	46.1	30.2
	5	195.5	182.4	128.3	68.8	42.3	27.4
	10	95.4	169.3	120.0	64.3	39.4	25.4
	15	62.0	161.4	114.9	61.6	37.6	24.1
	20	45.3	155.7	111.3	59.6	36.3	23.1
	25	35.3	151.1	108.3	57.9	35.2	22.4
	30	28.5	147.1	105.8	56.6	34.3	21.7
	40	20.1	140.7	101.7	54.4	32.9	20.7
	50	14.9	135.1	98.2	52.3	31.6	19.8
	60	11.4	130.0	94.9	50.5	30.5	18.9
	70	8.8	125.1	91.7	48.9	29.3	18.2
	80	6.7	119.8	88.4	47.0	28.2	17.3
90	4.9	113.5	84.3	32.1	26.8	16.3	
100	1.0	-	-	-	-	-	
	00						-
25	1	2488.0	228.5	157.7	85.0	52.7	35.0
	2	1238.0	215.8	149.7	80.5	49.9	33.0
	5	487.9	198.9	138.9	74.7	46.1	30.2
	10	237.8	185.9	130.6	70.1	43.0	28.1
	15	154.3	178.0	125.6	67.4	41.3	26.8
	20	112.5	172.2	121.9	65.4	40.0	25.9
	25	87.4	167.6	119.0	63.8	39.0	25.1
	30	70.6	163.8	116.5	62.4	38.1	24.5
	40	49.4	157.2	112.3	60.1	36.6	23.4
	50	36.6	151.8	108.8	58.2	35.4	22.5
	60	27.8	146.7	105.5	56.4	34.3	22.4
	70	21.3	141.7	102.4	54.7	33.1	20.8
	80	16.0	136.4	99.1	52.8	31.9	19.9
90	11.4	130.0	94.9	50.5	30.5	18.9	
100	1.0	-	-	-	-	-	

N, es periodo de años consecutivos. J, incertidumbre. T_r, tiempo de retorno.

4.5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS ADIMENSIONALES DE SIMILITUD HIDRÁULICA Y CARACTERÍSTICAS MUESTRALES

Los valores de los parámetros adimensionales de similitud hidráulica son independientes del tamaño de la cuenca, propiedad muy importante y base fundamental para la formulación de las funciones de transferencia de información hidrológica.

La media aritmética del coeficiente de Gravelius (1.474), posesionada muy cerca del límite superior del rango de clase geométrica K_{c2} (Tabla1), es una clara evidencia del predominio de la forma oval-oblonga en la muestra regional, forma de cuenca muy frágil a la erosión hídrica frente a eventos pluviométricos extraordinarios.

Cuando la muestra es agrupada por su forma geométrica de acuerdo a los rangos del coeficiente de Gravelius (Tabla1), el coeficiente de variación cae estrepitosamente respecto a los valores muestrales, pero con mayor incidencia en el índice de Gravelius. Hecho que demuestra no solamente la solidez del criterio de clasificación geométrica, sino también que la forma de la cuenca tiene un gran peso en la similitud hidráulica de los sistemas hidrológicos.

SIMILITUD HIDRÁULICA DE SISTEMAS HIDROLÓGICOS Y LEYES FÍSICAS QUE GOBIERNAN

Los parámetros adimensionales referentes de la semejanza geométrica, cinemática y dinámica de los sistemas hidrológicos; dados por el *coeficiente de Gravelius*, *relación de confluencias* y *coeficiente orográfico*, tienen sustento científico en las leyes físicas adimensionales del fenómeno precipitación-escorrentía (ecuaciones 10, 11, 12,13 y 14).

El parámetro adimensional del que deriva el famoso método Racional (ecuación 13) muestra que esta metodología no tiene restricciones respecto al tamaño de la cuenca, tal como se suele limitar en algunos tratados.

V. CONCLUSIONES

Identificar las leyes físicas que gobiernan los sistemas hidrológicos altoandinos mediante análisis dimensional.

- Las leyes físicas que gobiernan los sistemas hidrológicos altoandinos, bajo el fenómeno precipitación-escorrentía, están dadas por el conjunto de cinco parámetros adimensionales mostrados (ecuaciones 10 a la 14), lo cual constituye la base científica de la metodología aquí estudiada. Conjunto de leyes físicas que describen toda la dinámica hidráulica de los sistemas hidrológicos.

$$\pi_1 = \frac{Q}{AP} \quad (10)$$

$$\pi_2 = \frac{H}{\sqrt{A}} \quad (11)$$

$$\pi_3 = \frac{I * t}{H} \quad (12)$$

$$\pi_4 = \frac{Q}{I * A} \quad (13)$$

$$\pi_5 = \frac{p}{\sqrt{A}} \quad (14)$$

π = Parámetro adimensional

Q = Caudal de escurrimiento (superficial más subterráneo)

A = Proyección del área receptora colectora sobre un plano horizontal

P = Precipitación pluviométrica

H = Altitud media sobre el nivel del mar

I = Intensidad de precipitación

t = Periodo de duración de intensidad de precipitación

p = Perímetro de la cuenca.

Identificar los parámetros morfométricos adimensionales referentes de semejanza geométrica, cinemática y dinámica de los sistemas hidrológicos altoandinos.

- La triada de parámetros adimensionales, sobre el que descansa la similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos, está conformado por el índice de Gravelius, relación confluencias y coeficiente orográfico, como referentes de semejanza geométrica, cinemática y dinámica, respectivamente; bajo niveles de aproximación establecidos.

Definir cuantitativamente el grado de aproximación de la similitud hidráulica de los sistemas hidrológicos, fijando un límite para cada parámetro adimensional lo suficientemente aceptable para fines prácticos.

- Los niveles de aproximación de similitud hidráulica aceptables para fines prácticos, medidos mediante el estadístico *coeficiente de variación*, pueden tomarse como máximos referenciales los valores de 0.05, 0.20 y 0.30, para el índice de Gravelius, relación de confluencias y coeficiente orográfico, respectivamente. Sin embargo, este aspecto queda a criterio del investigador.
- Se encontró que en la región Cajamarca existen sistemas hidrológicos con similitud hidráulica aproximada, con mayor frecuencia en los sistemas de forma oval oblonga (26%), seguido por los de la forma oblonga alargada (24%). Por la naturaleza adimensional de esta metodología, la similitud hidráulica de sistemas hidrológicos puede hacerse extensivo a sistemas altoandinos interregionales subnacionales o internacionales.
- En general, se encontró que la geometría oval de la cuenca tiene una marcada incidencia en la configuración espacial de la red de drenaje y en menor grado en los factores de relieve y, por ende, en la similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos. Puede decirse entonces, metafóricamente, que la forma de cuenca es el espejo en el que se mira el flujo de escorrentía que viaja a través de la red de drenaje superficial.
- Los parámetros adimensionales de similitud hidráulica, identificados en este trabajo, son el producto del análisis dimensional de variables del fenómeno precipitación-escorrentía y forman parte de las leyes físicas que gobiernan los sistemas

hidrológicos altoandinos; por tanto, la justificación como referentes de semejanza tiene fundamento científico.

- La metodología aquí desarrollada, por su naturaleza adimensional, tiene alcances fuera de la región estudiada, pudiendo aplicarse a cualquier región del país o inter regiones, subnacionales o internacionales, mientras se cumplan las leyes físicas que gobiernan los sistemas hidrológicos altoandinos.
- Los estudios de regionalización morfométrica adimensional no sólo pueden contribuir, en gran medida, a la solución de problemas de escasez de información hidrometeorológica en microcuencas altoandinas; sino también en la réplica de experiencias de manejo integral de cuencas piloto en otros sistemas hidrológicos similares, que coadyuve a enfrentar fenómenos de cambio climático global y eventos extremos de fenómenos del Niño.

Formular las funciones de transferencia de información hidrometeorológica entre sistemas hidrológicos altoandinos hidráulicamente similares.

- El intercambio de información hidrometeorológica entre sistemas hidrológicos similares, mediante parámetros adimensionales de transferencia, es un procedimiento sencillo a diferencia de otras metodologías de análisis regional, las que requieren de mucha información distribuida en el espacio y tiempo para conseguir resultados aceptables.
- La calidad de la información transferida está supeditada, como en cualquier otra metodología de generación de datos hidrológicos, a la calidad de información de la estación de origen. Ningún dato transferido puede reemplazar al dato “virgen”; sin embargo, puede ser de mucha utilidad en la solución de muchos problemas en la práctica.

Determinar y explicar las características hidrológicas generales de las microcuencas altoandinas de la región Cajamarca, en base a los resultados del análisis morfométrico adimensional.

- El presente estudio de morfometría adimensional, a nivel de muestra de la región Cajamarca, reporta un alto predominio de sistemas hidrológicos muy vulnerables a la erosión hídrica (60%), reflejado en una excesiva capacidad de drenaje superficial y de transporte de sedimentos, lo cual se traduce en altos riesgos de peligrosidad de inundaciones, ante eventos de tormentas pluviométricas extraordinarias, acrecentándose con la presencia de eventos extremos de fenómenos del Niño. Sistemas que están concentrados mayoritariamente en la vertiente del Pacífico (79%).

- Este modesto trabajo, puede constituir una perspectiva para el inicio de una visión adimensional de la hidrología morfométrica superficial que ayude a explicar mejor el comportamiento hidráulico de los sistemas hidrológicos de alta montaña y, junto a ello, la distribución y desarrollo del medio biótico con el en que el agua interactúa, en un contexto de sustentabilidad. Pues, las leyes adimensionales de los sistemas hidrológicos explican mejor tales características.

- No quepa la menor duda que este nuevo enfoque de *morfometría adimensional de semejanza hidráulica de sistemas hidrológicos* constituye un aporte importante para la ciencia hidrológica superficial, no solamente porque resuelve en parte la escasez de información hidrológica mediante técnicas sencillas de transferencia, sino también porque ayuda a explicar mejor los fenómenos físicos y permite realizar inferencias acerca de la distribución de flora y fauna en espacios geográficos similares.

VI. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios regionalización morfométrica adimensional de similitud de sistemas hidrológicos altoandinos en otros ámbitos regionales subnacionales e internacionales, que permitan comparaciones y contribuyan a mejorar las metodologías y procedimientos aplicados en este modesto trabajo.
- Teniendo en cuenta que la similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos debe incluir necesariamente aspectos intrínsecos a la naturaleza de cada sistema (suelos y geología) y de su entorno (clima, biodiversidad, etc.), se sugiere realizar estudios de verificación en sistemas identificados como hidráulicamente similares.
- El predominio, en la vertiente del Pacífico norte de Perú, de cuencas altamente vulnerables y frágiles a la erosión hídrica y alta capacidad de transporte de sedimentos, sugiere evitar la regulación de cuencas mediante grandes presas, pues la colmatación prematura por la excesiva celeridad de la sedimentación no las hace atractivas económicamente.
- Como contrapartida a la fragilidad y alta vulnerabilidad de los sistemas hidrológicos altoandinos de la región Cajamarca, en cuyas entrañas albergan ingentes yacimientos de minerales, los proyectos extractivos de estos recursos naturales tienen que ser amigables con el medio ambiente, para lo cual se requieren políticas de Estado y legislación adecuada, donde se contemple el *pago por servicios ambientales hídricos* (PSAH), que permita poner en práctica compensaciones ambientales, basadas en forestaciones intensivas y pequeños sistemas de regulación de microcuencas altoandinas.
- Tener en cuenta la influencia de la pendiente y la densidad de drenaje en futuras investigaciones.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrahams, A. D. & Ponczynsky, J.J., (1984). Drainage density in relation to precipitation intensity in the U.S.A. *Journal of Hydrology*, n°75, pp. 383-388.
- Álvarez, O.; Hotait, S. & Sustaita R., (2011). Identificación de Regiones Hidrográficas Homogéneas Mediante Análisis Multivariado. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de México, México.
- Antigüedad, I. & Cruz Santillán, J., (1980). Estudio morfométrico de la cuenca del río Arratia (Viscaya). *Boletín de la Real Sociedad Geográfica* 66: 31-52.
- Antigüedad, I., (1982). Análisis de la red de drenaje en la interpretación estructural. Aplicación en la cuenca Nervión-Ibaizabal (Bizkaia-Araba). *Lurralde*, n° 5, pp. 35-45.
- Aparicio, F. J., (1997). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Edit. Limusa S.A., España, 303 pp.
- Askoa Ibizate, G. (2004). Análisis Morfométrico de la Cuenca y de la Red de Drenaje del Río Zadorra y sus Afluentes Aplicado a la Peligrosidad de Crecidas. *Boletín de la A.G.E* n° 38-2004, pp. 311-329. Universidad del País Vasco.
- Aseginolaza, C. et al. (1988). *Vegetación de la Comunidad Autónoma del País Vasco*. Vitoria, vice consejería de Medio Ambiente, Gobierno Vasco, 361 pp.
- Aseginolaza, C. et al. (1990). *Mapa de la Comunidad Autónoma del País Vasco*, 1:25 000. Vitoria-Gasteiz, Departamento de Urbanismo, Vivienda y Medio Ambiente, vice consejería de Medio Ambiente.
- Banco Mundial, (2010). *World development Indicators database*. Datos de 2008 (Disponible en: <http://databank.worldbank.org/ddp/home.do?Step=12&id=4&CON=2>).
- Beltrán, P. R., (1991). *Introducción a la Mecánica de Fluidos*. Bogotá. McGraw Hill Uniandes, 346 p.
- Bell, F., (1999). *Geological hazards. Their assessment, avoidance and mitigation*. E & FN SPON. An Inprint of Routledge. London and New York. 648 pp.
- Castillo, V. & González, S., (1986). Caracterización morfológica de los paisajes fluviales madrileños. *Papeles de Geografía Física*, n° 11, pp. 53-62.
- Cooke, R. U. & Doornkamp, J.C., (1974). *Geomorphology in Environmental Management*. Oxford University Press, 413 pp.
- Cruz Santillán, J. & Sáenz, F., (1980). Análisis cuantitativo de la red de drenaje de la cuenca del río Nervión. *Kovie (Ser. Ciencias Naturales)* 10: 39-52.

- Cruz Santillán, J. & Tamés, P., (1983). Análisis cuantitativo de la red de drenaje de la Cuenca del río Deba. Lurralde, n° 6, pp. 95-117.
- Cuesta, M. J., (2001). Dinámica erosiva de los Paisajes de la cuenca del río Guadajoz (Córdoba y Jaén). Córdoba, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba, 226 pp.
- Chow, V. T., Maidment D. R. & Mays L. W., (1993). Hidrología Aplicada. Ediciones McGraw-Hill, Santa Fe de Bogotá, Colombia: 580 pp.
- Chorley, R. J., (1969). The Drainage as the fundamental geomorphic unit. In Chorley R.J. (Ed.): Introduction to Physical Hydrology, London, Methuen, pp. 37-59.
- Davies, Jaime A. (2005). Mechanisms of morphogenesis. Amsterdam; Boston: Elsevier Academic Press.
- Day D. G. (1978). Drainage density changes during rainfall. Earth Surface processes n° 3, pp.319-326.
- Delgadillo, A.; Ferrer C. & Laffaille, J., (2004). Caserío La González-Urbanización Villa Libertad: un estudio de amenazas múltiples y vulnerabilidad en la cuenca media del río Chama (Andes Venezolanos). Memorias del V Congreso Venezolano de Geografía. 1-14 Mérida-Venezuela. (29 de Noviembre-3 de Diciembre). (CD-ROM; Trabajo N° 17: Tema III Geomorfología. Amenazas Naturales y Riesgos Ambientales).
- Delgadillo, A. & Páez, G., (2008). Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo por crecidas. EN: Ferrer C y Dugarte M. (Editores). Plan de desarrollo urbano del municipio Antonio Pinto Salinas bajo el enfoque de gestión de riesgo. Caracterización de la cuenca del valle de Mocotíes. Mérida. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)-Fundación para la Prevención de Riesgos del estado Mérida (FUNDAPRIS). Inédito.
- Docampo, B.G.; De Bikeña, E.; Rico, E. & Rallo, A., (2009). Morfometría de las Cuencas de la Red Hidrográfica (País Vasco, España), Facultad de Ciencias, Universidad del País Vasco, España.
- Domínguez, C., (2001). Modelo Matemático para la Formulación de Escenarios de Escorrentía ante Posibles Variantes del Cambio Climático, Bogotá, Colombia.
- Eastman JR. (2006). User Manual Idrisi Andes. Clark University. Disponible en <http://www.clarklabs.org>
- Edward, J. & Frederick, K., (1999). Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física. Universidad Autónoma de Madrid; Ed. Pearson Prentice Hall.

- Eraso, A., (1983). Estudio morfométrico de las cuencas de los ríos Butrón, Oca, Lea y Artibay (Bizkaia). Lurralde, n° 6, pp. 35-80.
- Eraso, A. & Antigüedad, I., (1984). Estudio de la transformación precipitación-aportación en relación con los parámetros de las cuencas hidrográficas. Aplicación a cuatro cuencas de Bizkaia. Lurralde, n° 7, pp.173-195.
- fedeta.org/web_publicaciones/web_hidrored/hidrored_2004_01.pdf
- FAO, (2003). Situación de los Bosques del Mundo 2003. Roma, Italia.
- FAO, (2001). Evaluación de Recursos Forestales Mundiales 2000-informe principal. Estudio FAO: Montes Núm. 140. Roma, Italia. (Disponible en: www.fao.org/forestry/site/7949/en/).
- FAO, (2000). Textos Fundamentales de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Vols. I y II-ed. 2000. Roma, Italy. (Disponible también en: www.fao.org/documents/docrep/003/x8700e/x8700e00.htm).
- FAO, (1996). Cambio Climático, bosques y ordenación forestal. Una visión de conjunto; FAO, Roma 1996.
- FAO, (2002). Evaluación de recursos forestales mundiales 2000. Informe principal; FAO, Roma 2002.
- Fernández Larrañaga, B., (1998). Introducción a la Mecánica de Fluidos, 2ª Ed. México. Alfaomega. 339 p www.alfaomega.com.mx
- Franzini, J. B. & Finnemore, E. J., (1999). Mecánica de Fluidos con Aplicaciones en Ingeniería. 9ª Ed. Madrid. McGraw Hill. 503 p.
- García Rosell, L. & Vega De Pedro, R., (1982). Caracterización e índices paramétricos de la red de drenaje de Sierra Nevada (España meridional). Tecniterrae S-235, pp. 22-29.
- García Rodríguez, J. A; Puerto Martín, A. & Rodríguez González, R., (1984). Aplicación de un Método sencillo de análisis hidrográfico al estudio ecológico del paisaje y la erosión en un área montañosa del centro-oeste ibérico. Studia Oecológica, 5: 301-322 pp.
- G. Simarro; L. Teixeira & A. H. Cardoso, (2007). Flow intensity parameter in pier scour experiments. Journal of Hydraulic Engineering, 133 (11): 1261-1264.
- G. Simarro & J. P. Martín-Vide, (2004). Exponential expression for time evolution in local scour. Journal of Hydraulic Research, 42 (6): 663-665.
- García de Bicuña, B. A; Basaguren, M. & Orive E., (1987). Características físico-químicas de las aguas superficiales de los principales ríos de Bizkaia. Actas del IV Congreso Español de Limnología: 165-177 pp.

- Gaspari, F. J.; Rodríguez, A.M.; Senisterra, G. E.; Denegri, G.; Delgado, M. I. & Besteiro, S., (2012). Caracterización Morfométrica de la Cuenca de la Cuenca Alta del Rio Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. VII Congreso de Medio Ambiente AUGM, 22al 24 de Mayo de 2012.UNLP. La Plata, Argentina.
- Gaspari, F.J.; Senisterra, G. E; Delgado, M. I.; Rodriguez Vergarías, A. & Besteiro, S., (2009). Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. Editorial Autores, 1 ed, La Plata, Argentina: 321 p
- Gaspari, F. J., (2002). Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas. Aplicación de sistemas de información geográfica. Huelva. España. Ediciones cooperativas. Buenos Aires: 179 p.
- Grgeory, K. J. & Ovenden, J. C., (1979). Drainage network volumes and precipitation in Britain. Trans. Inst. Br.Gogr., New Ser. 4, 1-11.
- Gregory, K. J. & Walling, D. E., (1973). Drainage basin form and processes. A geomorphological approach. London. Amold, 472 pp.
- Gravelius, H. (1914). Flsskunde. Goschen Verlagshan dlug Berlin, I. (1985): Morphometry of Drainage Bassins. Amterdam, Elsevier.
- Guevara, E. & Cartaya, H., (1991). Hidrología: una introducción a la ciencia hidrológica aplicada. Universidad de Carabobo. Valencia-Venezuela. 358 p.
- Gutiérrez Elorza M. (2008). Geomorfología. Ed. Pearson Prentice Hall.
- Hansen, M. C.; Stehman, S.V. & Potapov, P. V., (2010). Quantification of global gross forest cover loss. Proceedings of the National Academy of Sciences, 107 (19): 8650-8655. (Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0912668107>).
- Henaos, J. E. (1988). Introducción al manejo de cuencas hidrográficas. Universidad Santo Tomás. Centro de enseñanza desescolarizada. Bogotá: 396 p.
- Hernández Rodriguez, J., (1996). Problemas de Mecánica de Fluidos, máquinas hidráulicas. Madrid, Universidad Nacional de Educación a Distancia, 300 p.
- Hornberger, G., (1998). Elements of Physical Hidrology. Johns Hopkins University Press.
- Horton, R. E., (1932). Drainage Basin characteristics. Transactions of the American Geophysical Union. 13, pp 350-361.
- Homberger, G., (1998). Elements of Physical Hydrology. Johns Hopkins University Press.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophisical approach to quantitative morphology. Geological Society of America Bulletin v. 56, pp.275-370.

Holmgren, P. & Persson, R., (2002). Evolution and prospects of global forest assessments. *Unasylva* 210: 3-9. (Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/005/y4001e/y4001e02.htm>).

Hynes H. B. N., (1970). *Ecology of running waters*. University Press. Liverpool, 55 pp.

Ibañez, S.; Moreno H. & Gisbert J., (2009). *Morfología de las Cuencas Hidrográficas*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Valencia.

Ibañez, S.; Moreno H. & Gisbert, J., (2005). *Morfología de las Cuencas Hidrográficas*, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural: ruinet.upv.es/bitstream/...

Ibisate, A., (2004). *Las crecidas fluviales en el Zadorra: procesos, riesgos y propuestas de ordenación*. Tesis doctoral, 630 p. + anexo cartográfico (inédito).

ICOLD. (2008). International Commission of Large Dams, ICOLD: <http://www.icoldcigb.net/>
<http://www.dams.org>

IPCC, Grupo de Trabajo I, (2001). Tercer Informe de Evaluación, Cambio Climático 2001, La base Científica; IPCC, Paris 2001.

IPCC, Grupo de Trabajo II, (2001). Tercer Informe de Evaluación, Cambio Climático 2001, Impactos, adaptación y vulnerabilidad; IPCC, Paris 2001.

IPCC, Grupo de Trabajo III, (2001). Escenarios de Emisiones, 2001; Informe Especial del IPCC, Paris 2001.

IPCC, Grupo de Trabajo III, (2001). Tercer Informe de Evaluación, Cambio Climático 2001, Mitigación; IPCC, Paris 2001.

IPCC, (1997); Introducción a los Cambios Climáticos simples utilizados en el utilizados en el II Informe de Evaluación del IPCC; documento Técnico II del IPCC; IPCC, Paris 1997.

IPCC, (1997). Directrices del IPCC para los inventarios de gases efecto invernadero, versión revisada 1996: Libro de Trabajo; IPCC, Paris 1997.

Jardi, M. (1985). Forma de una Cuenca de drenaje. Análisis de la variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, Barcelona, n° XIX, pp.41-68.

Jiménez, J. & Martínez Lóopez, J., (1988). Distribución y composición específica de la macrofauna del río Jucar. *Limnetic* 4: 9-18.

Jiménez, O. & Farías, H., (2005). Problemática de la Sedimentación del embalse Valdesia, República Dominicana, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de la República Dominicana (INDRHI). Santo Domingo, República Dominicana.

- Jones, J. A. A., (1997). *Global hidrology: processes, resources and environmental management*. London, Addison-Wesley, 399 pp.
- Kirpich, Z. P., (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10 (6): 362 pp.
- Llamas, J., (1993). *Hidrología General: principios y aplicaciones*. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. España: 365 pp.
- Liggett, J. A. & Caughey, D. A., (1998). *Fluid Mechanics, an interactive text*. USA. American Society of Civil Engineers, CD rom www.pubs.asce.org
- Linsley R.; Kohler, M. & Paulhus, J., (1977). *Hidrología para ingenieros*. Mc Graw-Hill. New York. 386 p.
- Longhurst, Alan R. (2007). *Ecological geography of the sea*. Burlington, MA, USA: Academic Press.
- López Bermúdez, F. et al. (1988). *Geometría de cuencas fluviales: las redes de drenaje del alto Guadalentín*. Madrid ICONA, Proyecto LUCDEME, 229 pp.
- López Bermúdez, F. & Romero Díaz, M. A., (1989). Relación entre escorrentías superficiales y características físicas y ambientales (Alto Guadalquivir). En Gil Olcina A. & Morales Gil A. (coord.). *Avenidas fluviales e inundaciones en la cuenca del Mediterráneo*. Alicante, Instituto Universitario de Geografía de la Universidad de Alicante. Caja de Ahorros del Mediterráneo, pp. 171-183.
- López Cadenas de Llano, F. & Mintegui Aguirre, J. A., (1987). *Hidrología de superficie*. Editorial Salazar. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid: 22p
- López Cadenas de Llano, F. (1998). *Restauración Hidrológica Forestal de Cuencas y Control de la Erosión*. Ingeniería Medioambiental, TRANGSATEC, Ministerio de Medio Ambiente. Editorial Mundi Prensa. España: 945 p.
- López Cadenas de Llano, F., (1994). *Restauración Hidrológica Forestal de Cuencas y Control de la Erosión*. Ed. TRAGSA, MUNDI-PRENSA.
- Luque J. A; Paoloni, J. D. & Bonorino G. A., (1979). *Estudio geológico e hidrogeológico de la cuenca del Río Sauce Grande*. Publicación interna del Departamento de Ciencias Agrarias y de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional del Sur, Serie Hidrología, 3: 64 p.
- Maidment, D. R., (1993). *Handbook of Hydrology*. McGraw Hill.
- Madduma Bandara, C. M., (1974): Drainage density and effective precipitation. *Journal of Hydrology*, n° 21, pp. 187-190.

- Martínez, J., (1986). Características morfométricas de la red de drenaje de algunas cuencas de la sierra de los Álamos (Moratalla, Murcia). *Papeles de Geografía Física*, n° 11, pp. 45-51.
- Melton, M. A., (1957): And Analysis of the Relation among Elements of Climate, Surface properties and geomorphology. Tech. Rep. N° 11, Dep. of Geology, Columbia University, New York.
- Miller, V. C., (1953): A quantitative geomorphic study drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. Office of Naval Research, Geographical Branch, Project NR 389-042, Technical Report, 3, Columbia University.
- Mintegui Aguirre, J. A. & López Unzué, F., (1990). *La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco: 306p.
- Monsalve, G., (1995). Hidrología en la Ingeniería. Santafé de Bogotá, escuela Colombiana de Ingeniería.
- Morizawa, M. E. (1968): *Streams: their dynamics and morphology*, New York, McGraw-Hill, 175 pp.
- Morizawa, M. E., (1985): *Rivers: forms and process*. London, Logman, 222 pp.
- Palao A., (1987). Caracterización morfométrica de la Cuenca catalana del río Segre (Lérida, NE España). *Actas de IV Congreso Español de Limnología*: 147-154.
- Patton, P. C., (1988). Drainage basin morphometry and floods. In Baker, V.R. Kochel, R.C. & Patton, P. C., (Eds.). *Flood geomorphology*, New York, Wiley, pp. 51- 64.
- Pérez Cueva, A. J., (1988). *Geomorfología del sector ibérico valenciano-entre los ríos Mijares y Turia- Valencia*, Dpto. de Geografía. Universidad de Valencia, 217 pp.
- Pérez J., (1979). *Fundamentos del ciclo hidrológico*. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Departamento de Meteorología e Hidrología. Caracas. Venezuela. 01-38.
- Pijush K. Kandu & Ira, M. Cohen (2008). *Fluids Mechanics; with contributions by P.S. Ayyaswamy and H.H. Hu*. Amsterdam; Boston: Academic Press.
- PNUMA, (2007). *Perspectivas del Medio Ambiente Mundial (GEO-4): medio ambiente y desarrollo* (Disponible en: <http://www.unep.org/geo4/media/>).
- Pooter, M. C. & Wiggert D. C. (2002). *Mecánica de Fluidos*, 3ª Ed. México, Thomson, 769 p. <http://www.thomsonlearning.com.mx>
- Racca, J. M. G., (2007). Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología* 77 (1-2): 31-38.

- Raghunath, H.M., (2006). Hydrology. New Age International. 477 pp.
- Rallo A. (Dir.,1992): Caracterización hidrobiológica de la red fluvial de Alava y Gipuzkoa. Victoria-Gasteiz, Gobierno Vasco, 511 pp.
- Raynall R., (1970). Geomorphologie et vocation des sols dans le pays du basin occidental de la Mediterranée. Ann. Univ. Bucaresti Geogr: 21-33.
- Ray Linsley, (1977). Hidrología para Ingenieros. Santafé de Bogotá, McGraw-Hill.
- Remenieras, G. (1974). Tratado de hidrología aplicada. Editores Técnicos Asociados. Barcelona. 515 pp.
- Rocha A., (2006). Problemática de la Sedimentación de Embalses en el Aprovechamiento de los Ríos Peruanos, Aplicada al Embalse de Poechos. I Congreso Internacional de Hidráulica, Saneamiento y Medio Ambiente. Instituto de la Construcción y Gerencia (ICG), Lima, Perú: <http://www.imefen.uni.edu.pe>
- Roche M., (1963). Hydrologie de surface. Gauthier-Villars. Paris, 430 pp.
- Rodríguez Díaz, H. A., (2001). Hidráulica Experimental, 1ª Ed. Santafé de Bogotá Centro Editorial, Escuela Colombiana de Ingeniería, 337 p. www.escuelaing.edu.co
- Romero, M. A. & López Bermúdez, F., (1987). Morfometría de redes fluviales: revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al Alto Guadalquivir. Papeles de Geografía Física, n° 12, pp. 47-62.
- Roselló, V. M., (1985). Los barrancos de la plataforma oriental de Palma de Mallorca. Actas del IX Coloquio AGE, 13 p.
- Ruiz J., (2001). Hidrología; evolución y visión sistémica, la morfometría de cuencas como aplicación. UNELLEZ. Barinas- Venezuela. 238 p.
- Ruiz Urrestarazu, E., (1982). La transición climática del Cantábrico Oriental al valle medio del Ebro. Victoria-Gasteiz, Diputación Foral de Álava, 650 pp.
- Sala M. & Gay R., (1985). Algunos datos morfométricos de la cuenca del Isábena. Notes de geografía Física n° 4, pp. 41-65.
- Sánchez Fabre, M., (1990). Caracterización Morfométrica de la cuenca del río Ebrón. (Provincia de Teruel y Rincón de Ademuz). I Reunión Nacional de Geomorfología, Teruel, pp. 509-520.
- Shames Irving, H., (1998). Mecánica de Fluidos, 3ª Ed. Santafé de Bogotá. McGraw Hill, 825 p.
- Shaw, E. M.; K. J. Beven; N. A. Cappell & R. Lamb, (2011). Hydrology in Practice. Chapman and Hall, 543 pp.
- Singh, V.P. (1992). Elementary Hydrology. Prentice Hall, 973 pp.

Scheidegger, A. E., (1965). The algebra of stream-order numbers. United States Geological Survey Professional Paper 525.B, 187 pp.

Schumm, S. A., (1956). The evolution of drainage systems and slopes in badlands at pearth. Amboy, New Hersey. Bulletin of the Geological Society of America, n° 67, pp. 597-646.

Shaw, E.M.; K.J. Beven; N.A. Capell & R. Lamb, (2011); Hydrology in Practice. Chapman and Hall, 543 pp.

Senciales, J. M. & Ferre, E., (1992). Análisis morfométrico de la cuenca del río Benamargosa (Provincia de Málaga), En López Bermúdez, F., Conesa, C. & Romero, M.A. (Eds.): *Estudios de Geomorfología en España*. Actas de la II Reñión Nacional de Gemorfología, Murcia. S.E.G., pp. 365-375.

Senciales, J. M., (1998). El análisis morfológico de la cuencas fluviales aplicados al estudio hidrográfico. *Norva*, n° X, pp. 155-183.

Senciales, J. M., (2005). El Análisis Morfológico de las Cuencas Fluviales Aplicado al Estudio Hidrográfico, Departamento de Geografía. Universidad de Málaga: dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/109746.pdf

Smith D. & Stopp P., (1978). The river basin. An introduction to the study of hydrology. Cambridge University Press. Londres- Inglaterra. 120 p.

Sparks B. W., (1072). Geomorphology. Longman Group. Ltd. London. 530 pp.

Sotelo Ávila. G., (1977). Hidráulica General. Vol I, Fundamentos, México Limusa, 551p.

Strahler A., (1989). Geografía Física. Ed. Omega.

Strahler A., (1952). Hysometric (area-altitude) analisys of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, (63): 923-938.

Strahler A., (1957). Quantitative analysis of watershed Geomorphology. *Transactions American Geophysical Union*, 38 (6): 913-925.

Strahler A. N., (1977). Geografía física. Ed. Omega. Barcelona. 767pp.

Strahler, A., (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. En: Chow V (ed.). *Handbook of Hydrology*. Mc Graw-Hill. New Yord-USA. Mc Graw-Hill.

Streeter V. L.; Wylie E. B. & Betford, K. W., (1999). *Mecánica de Fluidos*, 9ª Ed. Santafé de Bogotá. McGraw Hill Internacional, S.A., 740 p. www.mhhe.com

Tar buck J. & Lutgens F., (1999). *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física*. Ed. Prentice Hall Iberia.

www.kalipedia.com

<http://upcocommons.upc.edu/revistas/bitstream/2099/1/article4.pdf>: Caracterización de Cuencas Hidrográficas.

Vergara M., (1993). “*Técnicas de Modelación en Hidráulica*”, Ediciones Alfa omega.

Viessman W. & G. L. Lewis, (2003). Introduction to Hydrology. Pearson Education Inc., 5^a Ed. 612 pp.

Wanielista, M., (1997). Hydrology and Water Quality Control, 2^a edition. Ed. Wiley.

Ward A.D. & S.W. Timble, (2004). Environmental Hydrology. CRC Lewis, 2^a Ed., 475 pp.

www.medellin.unal.edu.co/hidrosig, HidroSIG, Escuela de Ciencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellin.