Geomorfología - 2023

FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE JUJUY

# Trabajo Práctico N° 5 – parte 2

Introducción al conocimiento de las geoformas de ambientes fluviales. Trazado y caracterización de la red de drenaje. Reconocimiento de los principales patrones de drenaje y su significado. Clasificación de la red de drenaje en función a los patrones que la rigen. Análisis de procesos y modelados fluviales. Percepción de geoformas y paisajes a través de sensores remotos. ***Fotointerpretación geomorfológica de una planicie aluvial. Sistemas meandriformes y anastomosados. Terrazas fluviales. Concepto, trazado y cálculo de parámetros de cuencas hidrográficas.***

Prof. Carla D. Santamans

# PLANICIES ALUVIALES

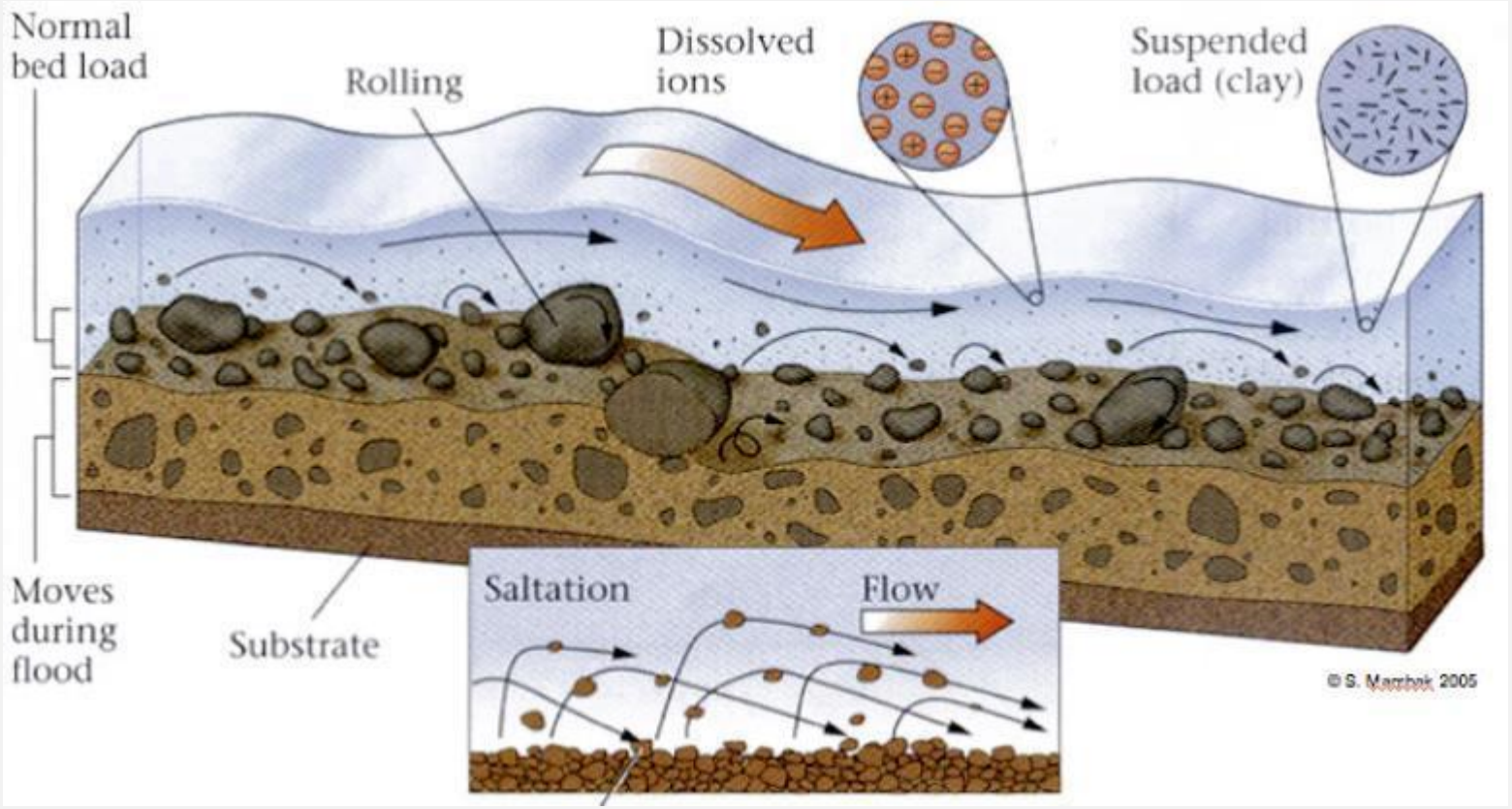
**Aluvión** (neutro del adjetivo latino alluvius, que significa lavado) es el término utilizado para designar los *sedimentos depositados por las aguas que fluyen en los valles y deltas de los ríos*. Los sedimentos aluviales se originan, en última instancia, de rocas preexistentes en la superficie terrestre (rocas epiclásticas). A continuación, estos sedimentos son transportados ladera abajo por la erosión en masa, el flujo de agua por tierra, el flujo del río y el flujo de la llanura de inundación, y se depositan en las zonas del valle del río donde el flujo de agua se desaceleró.

El aluvión se deposita en formas de terreno características (por ejemplo, *barras de canales, rellenos de canales, diques, divisiones de grietas, cuencas de inundación, abanicos y deltas*). Los sedimentos aluviales son normalmente *gravas, arenas, limos y arcillas estratificadas;* la textura y estratificación de los sedimentos están determinadas por el relieve asociado y el modo de deposición y posterior erosión.

Los aluviones se han depositado en la superficie de la Tierra desde que existen los ríos. Las características sedimentarias de los aluviones modernos se utilizan para interpretar el origen de los aluviones antiguos. El aluvión de los ríos y llanuras de inundación modernos suele ser terreno fértil desde el punto de vista agrícola y una fuente de agua subterránea, arena y grava. El aluvión antiguo suele contener recursos de importancia económica, como agua, gas, petróleo, carbón y minerales aluviales.

# Naturaleza del transporte y la deposición del aluvión

El flujo de agua en los canales aluviales y en las llanuras de inundación es turbulento. El flujo de agua turbulento hace que los sedimentos relativamente gruesos (arena y grava) sean transportados cerca del lecho sedimentario como carga del lecho, y sedimento de grano más fino (arena, limo y arcilla) sea transportado dentro del flujo como carga en suspensión.



**La deposición de material aluvional se produce principalmente debido a la disminución espacial (pero también temporal) de la velocidad del flujo de agua** (en realidad, la tensión de cizallamiento del lecho) **y la tasa de transporte de sedimentos**. Esta deposición se produce en una amplia gama de escalas espaciales en zonas de expansión y desaceleración del flujo, como los lados de sotavento de las formas del lecho, en el borde de los canales a medida que el agua se desplaza hacia la llanura de inundación, los canales abandonados, las zonas de hundimiento tectónico y donde el agua fluye hacia los lagos y el mar (formando deltas).

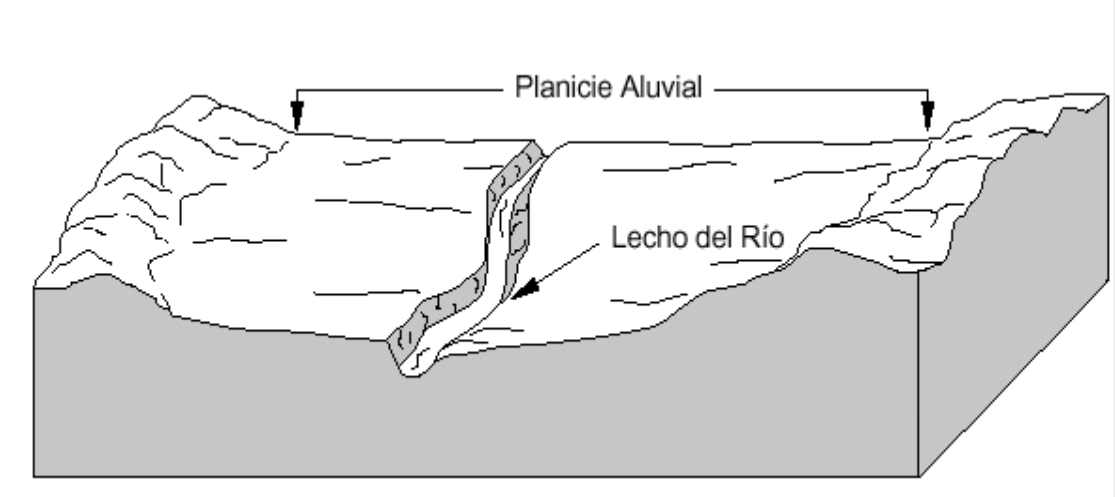
La mayor parte de la deposición se produce durante las crecidas, cuando la velocidad del flujo, el esfuerzo cortante del lecho y la tasa de transporte de sedimentos son grandes y tienen una gran capacidad de transporte. Si la tasa de transporte de sedimentos es grande, la disminución espacial de la tasa de transporte de sedimentos causará una tasa de deposición relativamente alta. Sin embargo, gran parte de los sedimentos depositados se vuelven a erosionar durante la misma crecida o las siguientes.

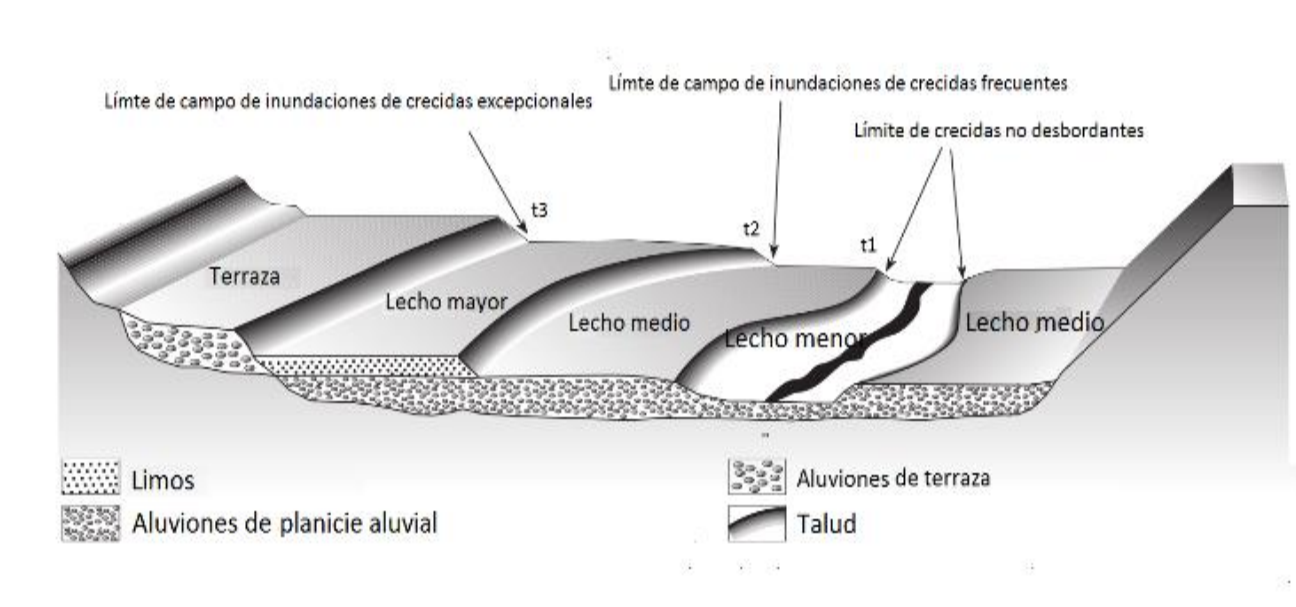
Los sedimentos más gruesos se depositan a partir de la carga del lecho en lugares donde la ***tensión de cizallamiento*** del lecho es grande (normalmente canales), mientras que los sedimentos de grano más fino se depositan a partir de la carga en suspensión (normalmente en canales abandonados, cuencas de inundación y lagos).Los sedimentos de tamaño intermedio se depositan a partir de la carga del lecho y de la carga en suspensión. Es habitual que el tamaño de los sedimentos del lecho del canal disminuya valle abajo, principalmente debido a la disminución aguas abajo de la pendiente del canal y la tensión de cizallamiento del lecho. También es común que el tamaño del sedimento del lecho disminuya lateralmente desde el canal hasta el borde distal de la llanura de inundación, también debido a la disminución de la tensión de cizallamiento del lecho.

# Geoformas aluviales

En este grupo se encuentran las ya estudiadas: barras (longitudinales, marginales, transversales), islas e isletas, abanicos aluviales, llanuras de inundación y las terrazas. Debemos sumar un nuevo concepto:

**Planicie Aluvial:** superficie amplia a manera de terraza acumulativa fluvial, o conjunto de terrazas y llanuras de inundación. Muchas llanuras amplias surgieron en la época en que las corrientes fluviales tenían mayor alimentación por los hielos/deshielos. Es decir que, en regiones de topografía atenuada, las llanuras de inundación adyacentes pueden fusionarse para formar llanuras (planicies) aluviales.

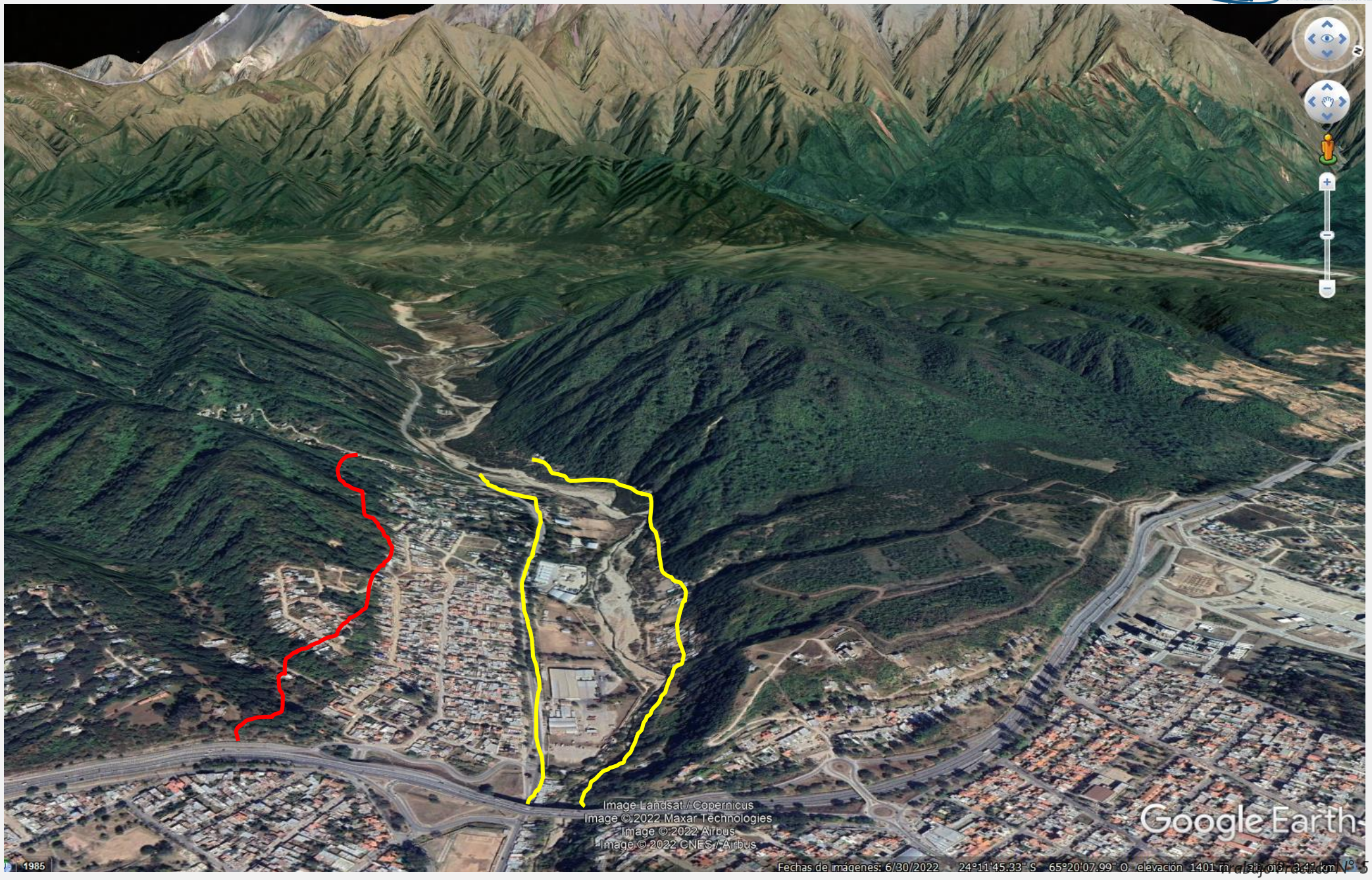


Los tonos de registro de la llanura aluvial en una fotografía aérea son variables, dependiendo tanto del área que está siendo examinada en la llanura aluvial y de la textura del material depositado. Generalmente, los tonos gris claros a gris oscuros se registran en las márgenes del río principal. Los tonos mas claros se observan en áreas asociadas con la de los albardones o diques naturales. Tonos oscuros son mas comunes en áreas donde ocurren rebalses de agua, depósitos de pantano, meandros abandonados.

Las llanuras aluviales de cursos múltiples son características de regiones semiáridas y áridas, donde las condiciones variables de alta descarga de los ríos con bancos fácilmente erodables, suministran abundante carga, que provoca la pérdida de la capacidad y competencia del río, causando la disminución de la velocidad del río y a consecuencia de ello, se deposita la carga transportada, desarrollando un drenaje trenzado asociado con un solo tipo de depósito, denominados ***bancos de arena o de gravas***. Los tonos fotográficos de registro son claros a gris claros, en especial para los bancos de arena o grava. Las áreas topográficamente mas bajas y pobremente drenadas, se registran en tonos mas oscuros. A diferencia de las llanuras de curso simple, la vegetación se halla ausente. En general el uso de tierras para fines de agricultura no son ideales, por las periódicas inundaciones torrenciales que afectan a estas llanuras. Las dimensiones de estas llanuras son mas pequeñas y estrechas comparadas con las de curso simple.

Tramo medio del río Xibi-Xibi.
En amarillo, se delimitó la extensión aproximada de la planicie aluvial.
La línea roja, indica el límite superior aproximado de un nivel de terraza fluvial/aluvial



**Deltas:** cuando los ríos desembocan en el mar o en un cuerpo de agua estancado, como lagos y lagunas, la carga transportada por el río es depositada en el cuerpo de agua, que bajo ciertas condiciones, da lugar a la formación de un delta. La formación de un delta, se halla en función de varias condiciones y factores, que dependen fundamentalmente de la interacción que existe entre las características de los componentes de la región interior del continente o zona de aporte de los sedimentos transportado por los ríos y las de la cuenca de recepción, que puede corresponder a un océano, lago o laguna.

Las ***llanuras deltaicas*** se caracterizan por cubrir áreas extensas con un relieve plano, construido por cursos de agua distributivos activos y abandonados, separados entre si por cuerpos de agua muy superficiales y depósitos aluviales/fluviales. Generalmente los ríos que corren sobre esta llanura son varios y adquieren un diseño dicotómico o distributivo, cuya carga transportada es suministrada al frente del delta. Sobre la llanura deltaica, además de los ríos distributivos, se hallan otros depósitos como llanuras aluviales, lagos, llanuras de inundación por mareas, pantanos, ciénegas y salinas, los que son extremadamente sensibles a las condiciones climáticas. Por lo tanto, de acuerdo a la condiciones climáticas, las llanuras deltaicas pueden presentar ciertos depósitos muy característicos para esas condiciones. Por ejemplo en climas áridos y semiáridos, la vegetación estará ausente, pero dominada por campos de dunas, depósitos eólicos, salinas. Por el contrario, en climas tropicales y subtropicales, desarrollaran una vegetación muy densa, pantanos de agua dulce, manglares, etc.

**Frente de delta** corresponde al área en la cual los ríos cargados de sedimentos desembocan en la cuenca receptora, donde son dispersados al tiempo que ellos interactúan con los procesos de dicha cuenca.

a
b

## Terrazas fluviales y aluviales: un poquito más de detalles…

Son superficies relativamente planas, horizontales o con inclinación suave, que se hallan ubicadas por encima de las márgenes y a lo largo del curso de un río. Corresponden a remanentes de antiguas llanuras aluviales y por lo tanto indican niveles anteriores de los pisos de una llanura de inundación o de un fondo de valle.

Como vimos previamente, existen varias causas para la formación de terrazas. Entre ellas que se hallan las relacionadas con la interrupción del ciclo geomórfico fluvial de un paisaje, debido al cual los ríos que lograron conseguir su perfil de equilibrio, o que se hallaban depositando gran cantidad de su carga sedimentaria, nuevamente empiezan a profundizar su valle. Este proceso denominado ***rejuvenecimiento*** ocasiona que un paisaje en cualquier etapa de su desarrollo sea interrumpido, sobre-imponiendo en él, los caracteres que corresponden al de un paisaje en estado de juventud. Las causas para que ocurra rejuvenecimiento son principalmente de carácter eustático o tectónico. Ambas causas, provocan un descenso altitudinal (en m s.n.m., en general asociado a cambios en las condiciones climáticas), que se traduce en el descenso del nivel de base de los ríos, acompañado de una erosión activa de sus cauces, hasta conseguir su ajuste al nuevo nivel de base.

Las **terrazas aluviales** se denominan así, por que la erosión fluvial ha actuado sobre la llanura aluvial, después que ella ha alcanzado espesores considerables de sedimentos, depositados durante un periodo en que transportaba carga excesiva (gravas, arenas, limos, arcillas). Luego de la acumulación de dicha carga en la llanura aluvial, se produce la profundización por la acción erosiva del río, desarrollando una terraza, que se halla íntegramente constituida por depósitos de origen aluvial.

Las **terrazas de erosión,** al contrario de las anteriores, ellas se hallan asociadas con aquellas llanuras aluviales, que tienen muy poco espesor o casi nada de depósitos aluviales, de manera que en ocasiones es posible apreciar la roca en la superficie de la terraza al observarla en las fotografías aéreas.

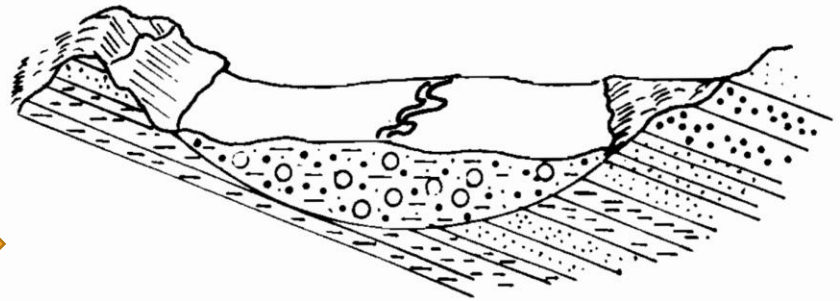
Cotton (1942) clasifica también a las terrazas en dos grupos:

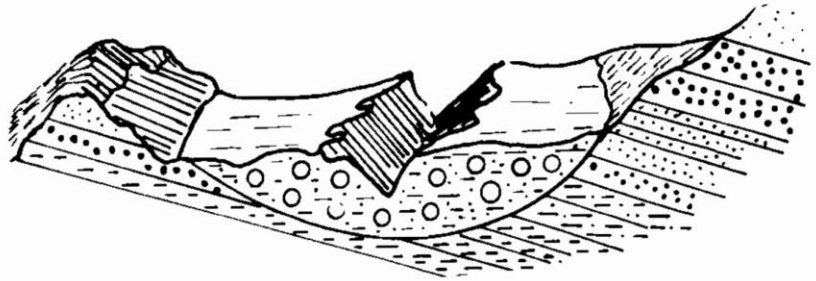
***a) Terrazas cíclicas*, *también denominadas terrazas pares o simétricas,*** se caracterizan por el desarrollo de terrazas ubicadas en ambas márgenes del río y a la misma elevación sobre el nivel del río. Sugieren períodos de rejuvenecimiento, en los cuales ha existido una etapa donde la erosión lateral del río predominaba sobre la profundización, la cual prácticamente se detenía.

***b) Terrazas acíclicas o terrazas impares o asimétricas,*** las cuales muestran el desarrollo de terrazas en las márgenes de un río, pero a niveles diferentes. El ascenso lento y continuo de la superficie, puede dar lugar a que la profundización y la erosión lateral del río se realice de manera continua, acompañada del desplazamiento del río de un margen al otro. Este efecto provoca que las terrazas se hallen a diferentes niveles en ambas laderas del río.

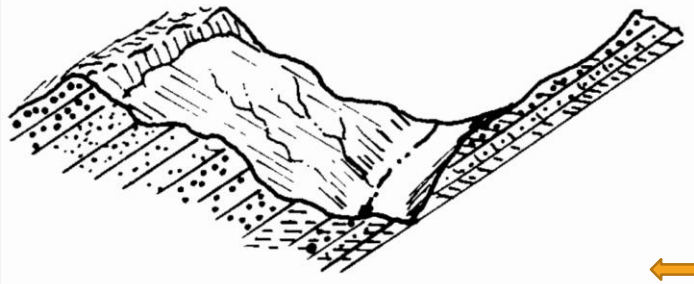
La identificación de los dos grupos de terrazas son criterios muy importantes que pueden ser utilizados como guías en la interpretación de la historia geológica de una región. El criterio básico utilizado para la identificación de terrazas, en las fotografías aéreas, es la forma, la cual es común para cualquiera de los diferentes tipos de terrazas, con ligeras diferencias en su expresión morfológica, en función de la textura del sedimento que predomina en la terraza.

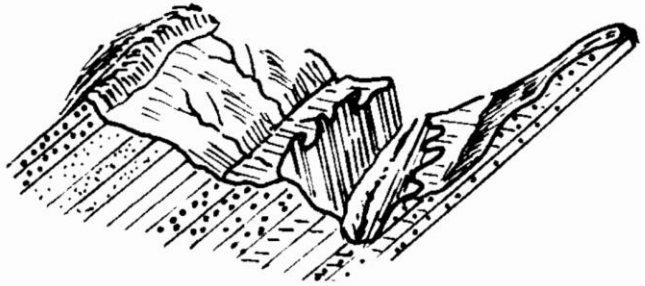
Terraza Aluvial →

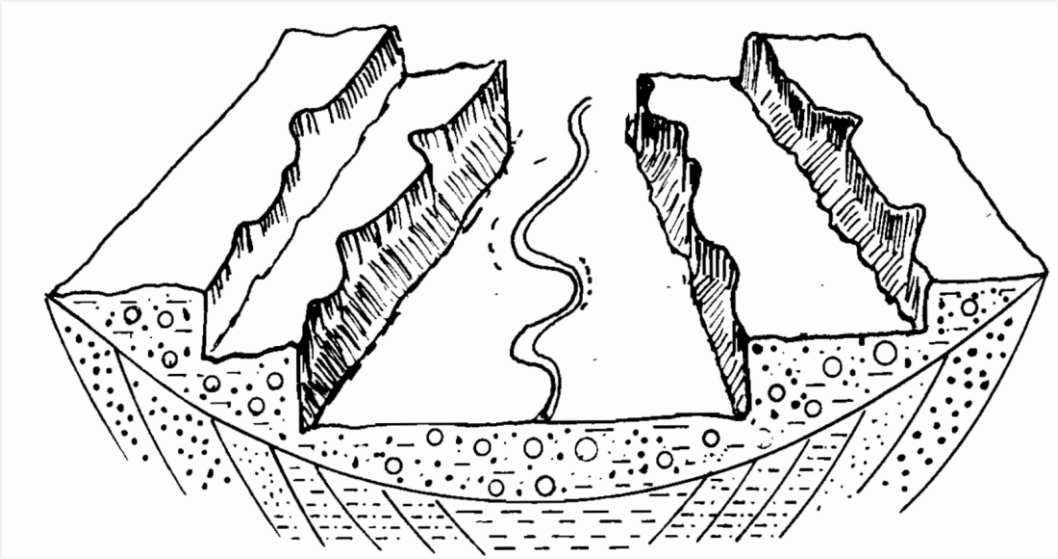




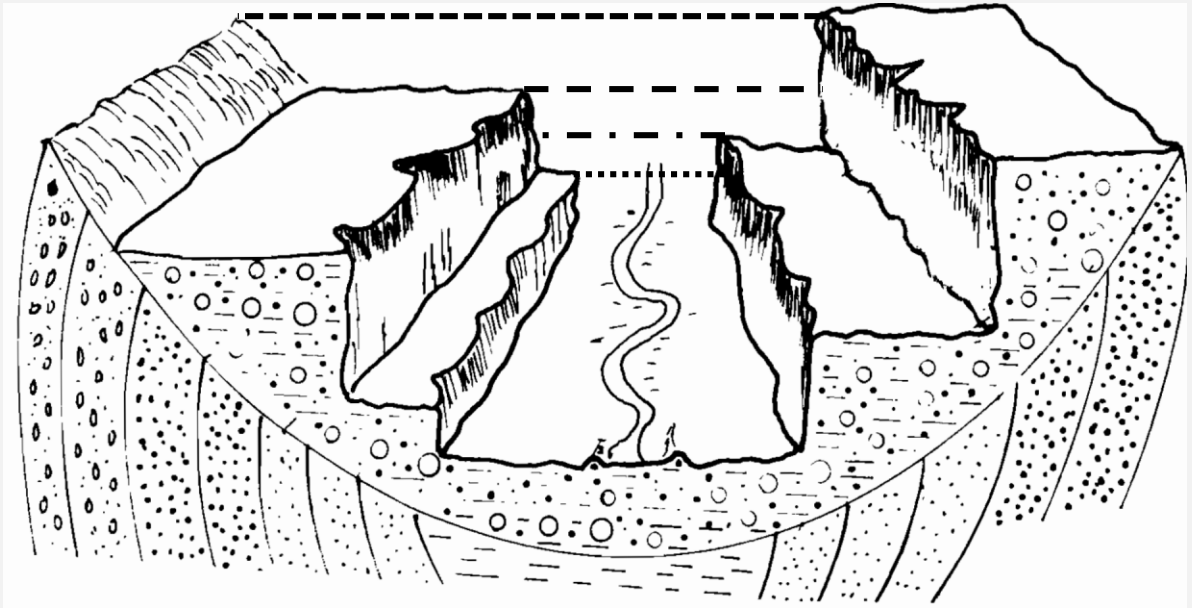
← Terraza Erosiva







Terrazas cíclicas/pares/simétricas



Terrazas acíclicas/impares/asimétricas

Una gran parte de la Geomorfología es la Geología estratigráfica (Leopold et at., 1964). Para correlacionar las terrazas es preciso realizar un estudio sedimentológico de detalle. Los suelos son horizontes indicadores de gran valor (Birkeland, 1984; Bull, 1997), pero hay que utilizarlos adecuadamente. El conjunto de las terrazas presenta una ***cronosecuencia*** de meteorización, suelos y terrazas.

Los cambios en las condiciones climáticas son un factor generador de terrazas, y además alteran los procesos edafogenéticos. Las nuevas condiciones pueden gradualmente borrar el carácter original del suelo, pero alguna evidencia de las mismas puede persistir. Así, por ejemplo, la presencia de caolinita en el suelo nos indica etapas húmedas, que pueden deducirse en depósitos y suelos de terraza en un clima árido. En el cambio contrario, de árido a húmedo, la montmorillonita da lugar a la caolinita y no podemos deducir este cambio climático.

La edad relativa de las superficies de las terrazas se estima utilizando el estado de desarrollo de paleosuelos y analizando el grado de degradación de los escarpes de la terraza (Bridge, 2003). La edad de una terraza se determina por restos paleontológicos y por datación absoluta de materia orgánica por $^{14}C$ (Macklin et al., 1994), arenas por OSL (luminiscencia óptimamente simulada) (Peña et al., 2004) y los clastos de la superficie de la terraza por isótopos cosmogónicos, como el ,$^{10}Be$ y $^{26}Al$ (Handcock et al., 1999).

Entre las ***características mas importantes que muestra la forma de las terrazas***, se mencionan a las siguientes:

- Presenta una superficie plana, ligeramente horizontal, que de acuerdo al tiempo de exposición a los efectos de meteorización, erosión y otros, así como las características texturales de los depósitos, puede cambiar a un relieve irregular, poco nivelado, con desarrollo de caras escarpes que miran al río. Si las caras o los escarpes son verticales, los depósitos de la terraza, serán en su mayoría de textura gruesa.

- Por el contrario, si la terraza se halla constituida por material fino, las caras o escarpes desarrollaran pendientes mas suaves.

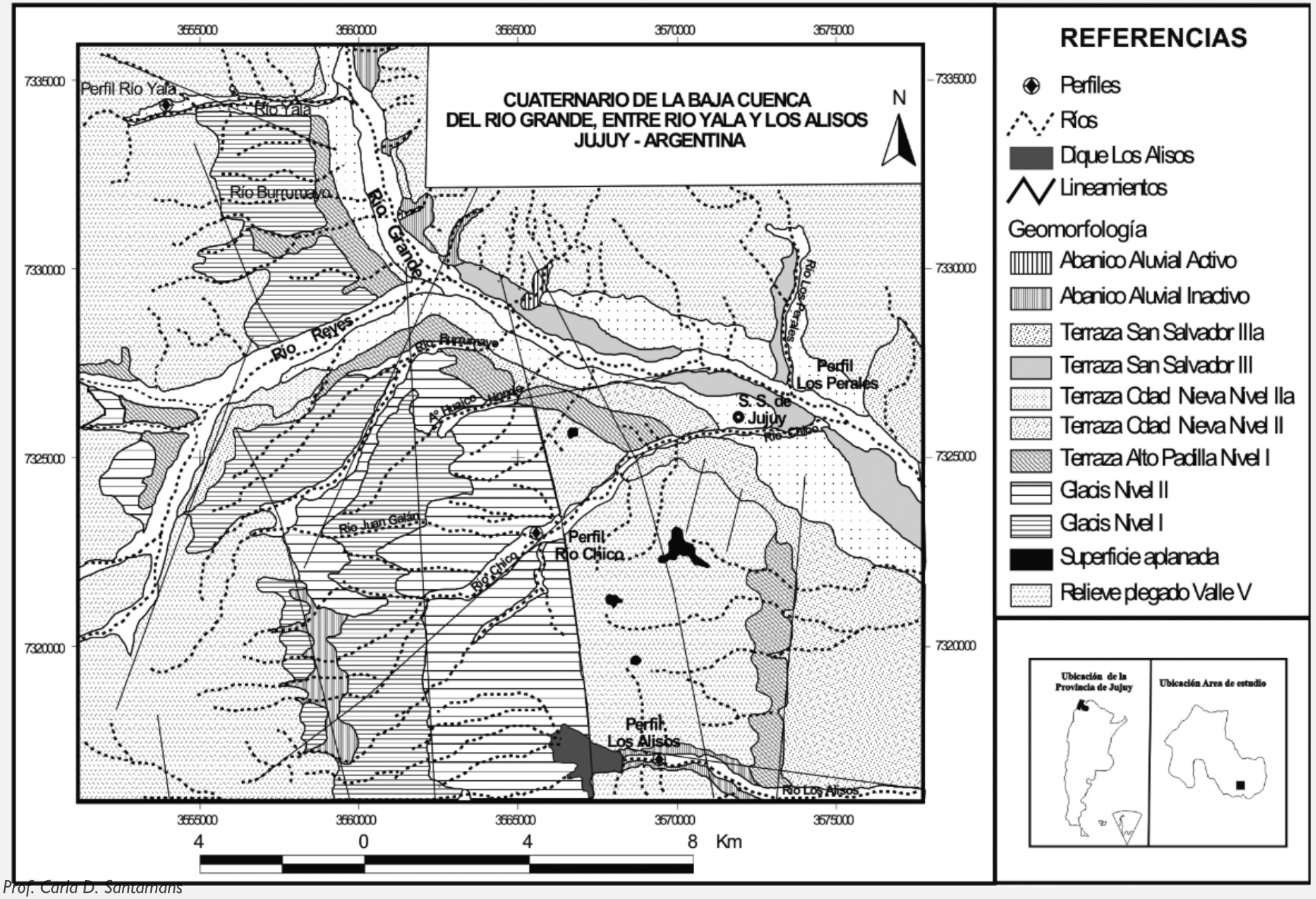
- Cuando se halla fuertemente erosionada, los remanentes generalmente ubicados a niveles mas altos que el río y la nueva llanura aluvial, se hallan distribuidos de manera irregular a lo largo del curso del río.

- Cuando la textura del material es fina, la superficie de la terraza es mas ondulada y disectada.

- Las terrazas con depósitos de textura gruesa, son menos disectadas.

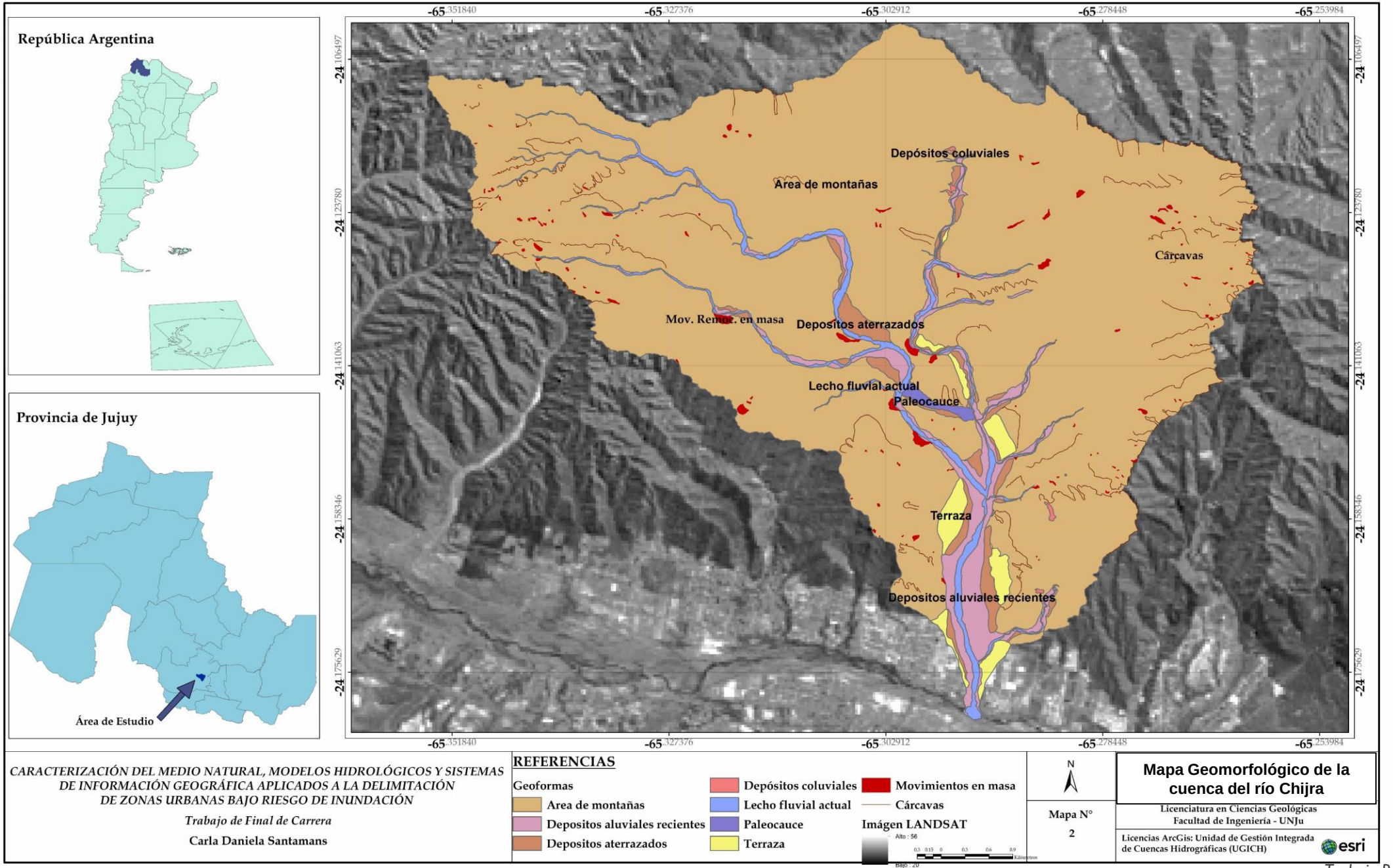
- Terrazas constituidas por grava y arena, generalmente se registran en tonos claros, mientras que las constituidas por arcillas, limo se registran en tonos mas obscuros.

- Las terrazas ubicadas en niveles mas altos, corresponden a las mas antiguas.




Alcalde, J., Solís, N., Kulemeyer, J., 2008. Secuencias Sedimentarias Cuaternarias de la Cordillera Oriental, Provincia de Jujuy. Relat. del XVII Congr. Geol. Argentino 335–341.

Es fundamental la utilización de diferentes herramientas para la identificación detallada de las geoformas en un área urbana. Por ej. curvas de nivel, MDE, pendientes, etc.; pero principalmente, un trabajo de campo meticuloso


República Argentina
Provincia de Jujuy
Área de Estudio
-65.351840
-65.327376
-65.302912
-65.278448
-65.253984
-24.106497
-24.123780
-24.141063
-24.158346
-24.175629
Depósitos coluviales
Área de montañas
Cárcavas
Mov. Remat. en masa
Depositos aterrazados
Lecho fluvial actual
Paleocauce
Terraza
Depositos aluviales recientes
CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO NATURAL, MODELOS HIDROLÓGICOS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA APLICADOS A LA DELIMITACIÓN DE ZONAS URBANAS BAJO RIESGO DE INUNDACIÓN
Trabajo de Final de Carrera
Carla Daniela Santamans
REFERENCIAS
Geoformas
Area de montañas
Depositos aluviales recientes
Depositos aterrazados
Depósitos coluviales
Lecho fluvial actual
Paleocauce
Terraza
Movimientos en masa
Cárcavas
Imágen LANDSAT
Alto : 56
Bajo : 20
N
Mapa N°
2
Mapa Geomorfológico de la cuenca del río Chijra
Licenciatura en Ciencias Geológicas
Facultad de Ingeniería - UNJu
Licencias ArcGis: Unidad de Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas (UGICH)
esri

# CUENCA HIDROGRÁFICA

Se define como **cuenca hidrográfica** a la ***superficie de terreno cuya escorrentía superficial y subterránea fluye en su totalidad a través de una serie de corrientes, ríos y eventualmente lagos hacia el mar por una única desembocadura, estuario o delta, aportando a los mismos agua y sedimento, y la cual se halla delimitada por una divisoria de aguas, dorsal o interfluvio. La cuenca hidrográfica como unidad de gestión del recurso se considera indivisible.***

Cada cuenca a su vez se divide en **subcuencas**, definiéndose éstas como la superficie de terreno cuya escorrentía superficial fluye en su totalidad a través de una serie de corrientes, ríos y, eventualmente, lagos hacia un determinado punto de un curso de agua (generalmente un lago o una confluencia de ríos). También podrían definirse las **microcuencas, es decir,** toda área en la que su drenaje va a dar al cauce principal de una subcuenca (i.e. decir, que una subcuenca está dividida en varias microcuencas).

La cuenca de drenaje (o hidrográfica) difiere de la cuenca depositacional o cuenca sedimentaria, las cuales son áreas donde existe una acumulación neta de sedimentos.

Toda cuenca debe ser entendida y estudiada como un **sistema**, dado que *incluye ecosistemas terrestres (selvas, bosques, matorrales, pastizales, manglares, entre otros), ecosistemas acuáticos (ríos, lagos, humedales, etc.) y sistemas urbanos (pueblos, ciudades, y demás emplazamientos antrópicos*), y sus límites se establecen por el parteaguas desde donde escurre el agua que se precipita en el territorio delimitado por éste, hasta un punto de salida.

Todas las áreas con drenaje superficial se dividen en **exorreicas o endorreicas**, dependiendo de si los canales drenan hacia el mar o lo hacen hacia una cuenca de drenaje interior.
Por otro lado, en función del balance hidrológico agua de lluvia / evapotranspiración, los sistemas fluviales pueden ser perennes (balance positivo) o efímeros (balance negativo).

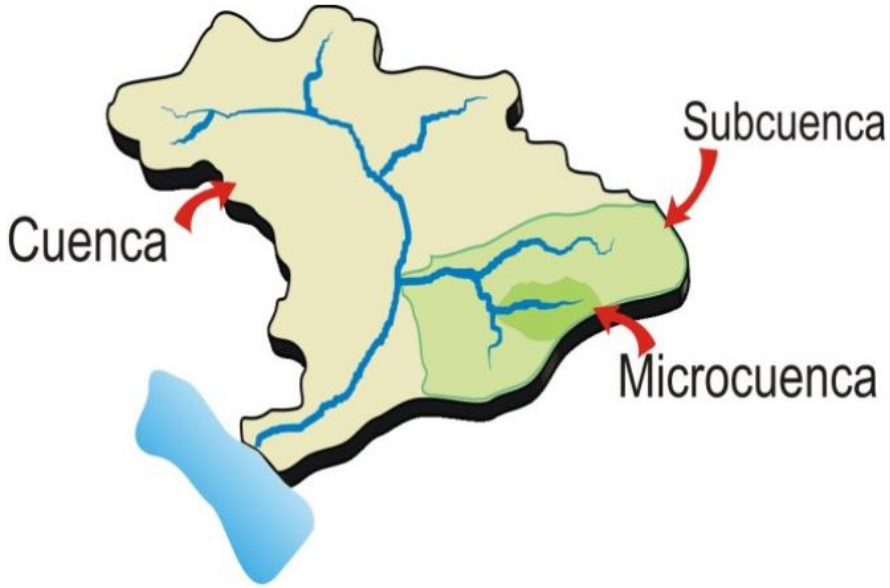
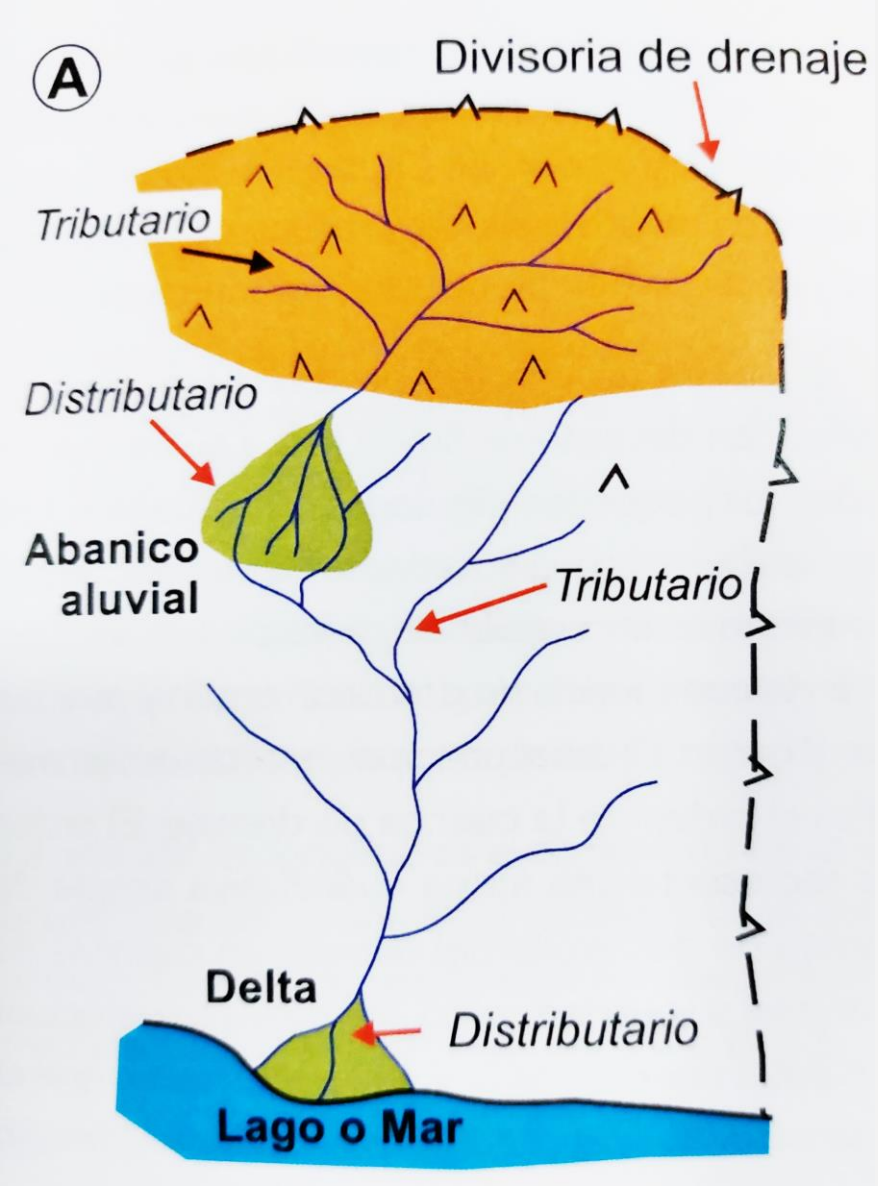



***Figura 4.1.*** *Cuenca, subcuenca y microcuenca*
*Fuente: Adaptado por Casaverde, 2011.*

Las **cuencas exorreicas** desembocan en el océano y presentan un patrón tributario donde los canales se incrementan en dirección aguas abajo, debido al mayor aporte de los afluentes tributarios, siendo las cuencas con mayor área y tamaño a nivel global.




*Paredes, J. 2022. Sistemas Fluviales. Organización, evolución e importancia económica. Servicop - AGA.*

Las **cuencas endorreicas** no tienen conexión con los océanos, de forma tal que el agua que ingresa a la cuenca se evapora o infiltra hacia los acuíferos. Se hallan muy influenciadas por variaciones topográficas de los bordes de la cuenca y la tectónica intra-cuencal. Además, el clima cobra especial relevancia ya que según los estadios húmedos/secos, determinará si el relleno de la cuenca será por sedimentación eólica, fluvial, o lacustre.

Todo análisis de cuencas debe tener en consideración 3 zonas fundamentales:

* ***Cuenca alta***: corresponde generalmente a las áreas montañosas o cabeceras de los cerros, limitadas en su parte superior por las divisorias de aguas.

* ***Cuenca media***: donde se juntan las aguas recogidas en las partes altas y en donde el río principal mantiene un cauce definido.

* ***Cuenca baja o zonas transicionales***: donde el río desemboca a ríos mayores o a zonas bajas tales como estuarios y humedales.

Esta división por zonas resulta útil en el análisis del comportamiento de los diferentes componentes del balance hídrico, sino que también apoya en la delimitación de las zonas funcionales de la cuenca.

| | Zona Alta | Zona Media | Zona Baja |
|---|---|---|---|
| | Montaña y Colinas | Valle Aluvial | Delta |
| Procesos Dominantes | Erosión | Transporte | Sedimento |
| Influencia | Lito/Relieve | Erosión-Sedimentación | Fluvio-Marina |

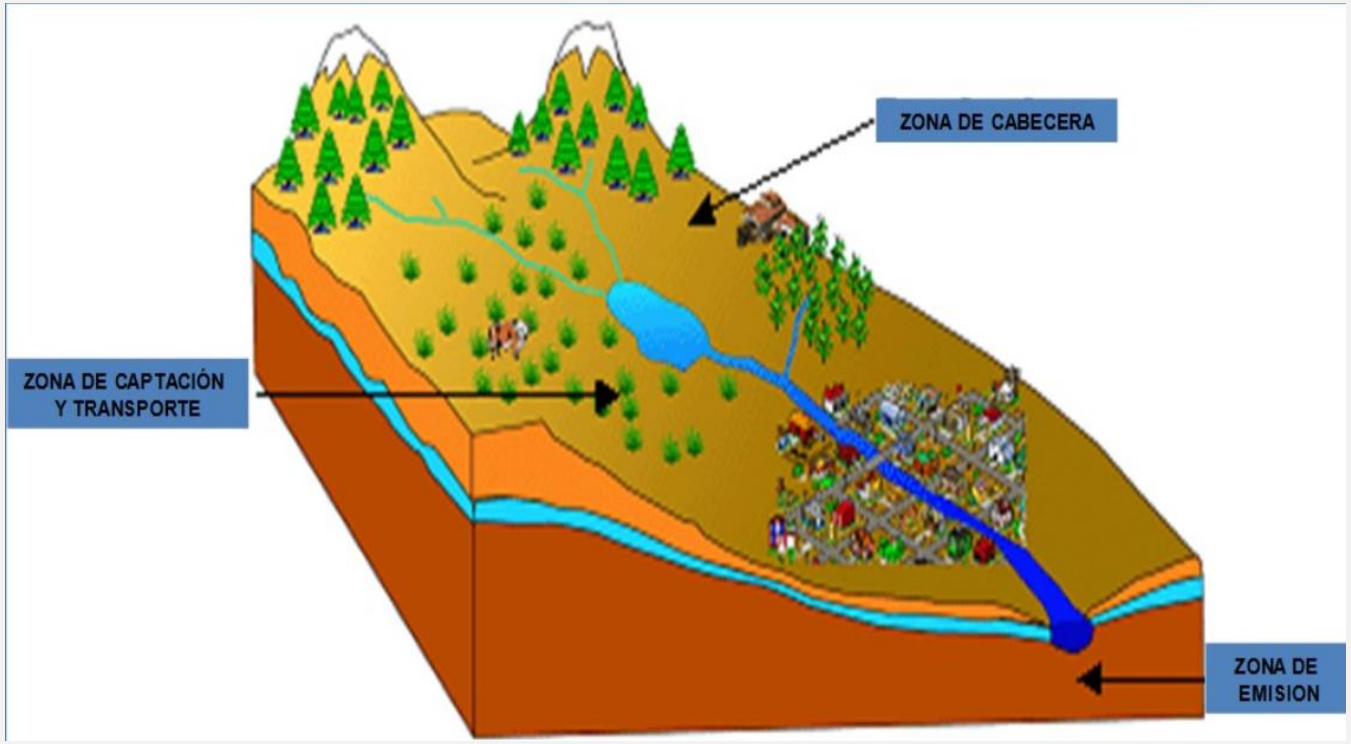
Llanura aluvial extendida seguida de un cono o abanico aluvial

Fluvial / fluvial

Dicha delimitación de una cuenca se encuentra directamente relacionada con las respectivas 3 zonas:

* ***Zona de Cabecera***: es la zona donde nacen las corrientes hidrológicas, por ende se localizan en las partes más altas de la cuenca. "Envuelve" la cuenca, y por su función, principalmente de captación de agua, presentan la mayor fragilidad hidrológica.

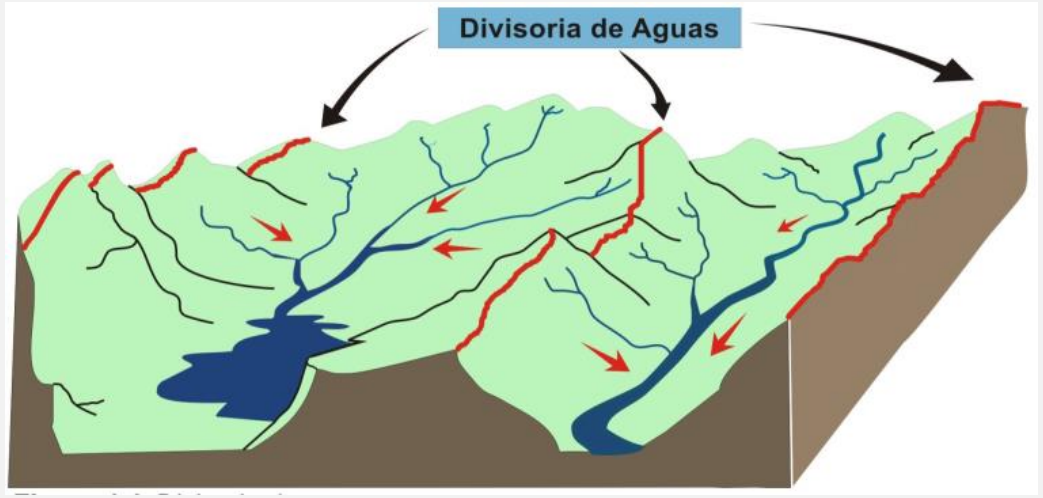
* ***Zona de Captación – Transporte***: es la porción de la cuenca que en principio se encarga de captar la mayor parte del agua que entra al sistema, así como de transportar el agua proveniente de la zona de cabecera. Esta zona puede considerarse como de mezcla ya que en ella confluyen masas de agua con diferentes características físico-químicas, puesto que provienen de distintos puntos de la cuenca.




* ***Zona de Emisión***: se caracteriza por ser la zona que emite hacia una corriente más caudalosa generada por el agua proveniente de las otras dos zonas funcionales.

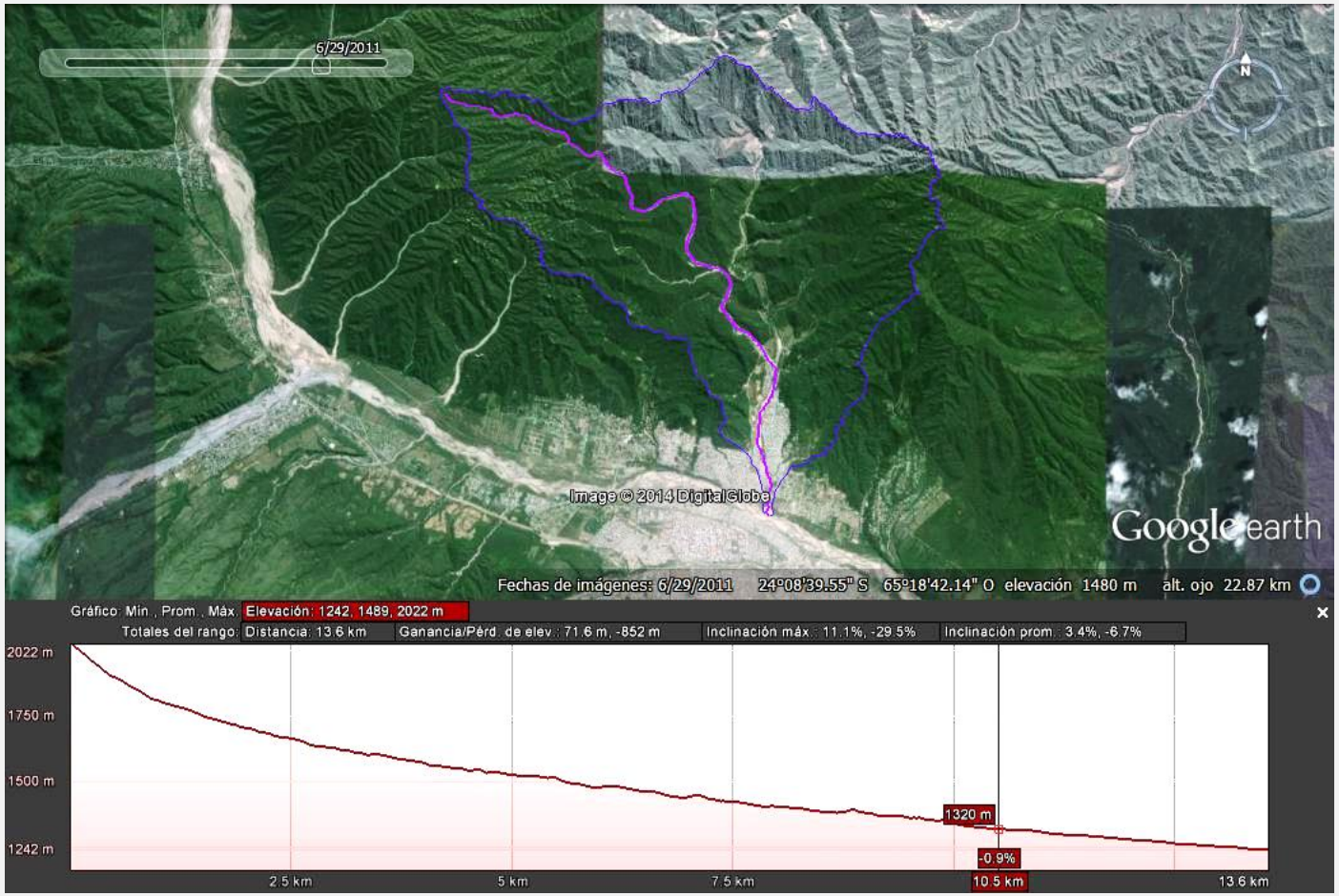
Otros conceptos a tener en cuenta…

- ***Divisoria de aguas:*** la divisoria de aguas es una línea imaginaria que delimita la cuenca hidrográfica. Una divisoria de aguas marca el límite entre cuenca hidrográficas y las cuencas vecinas. El agua precipitada a cada lado de la divisoria desemboca generalmente en ríos distintos. También se denomina "parteaguas".
- ***Río principal:*** el río principal suele ser definido como el curso con mayor caudal de agua (medio o máximo) o bien con ***mayor longitud***. Tanto el concepto de río principal como el nacimiento del río son arbitrarios, como también lo es la distinción entre el río principal y afluente. Sin embargo, la mayoría de cuencas de drenaje presentan un río principal bien definido desde la desembocadura hasta cerca de la divisoria de aguas. El río principal tiene un curso, que es la distancia entre su naciente y su desembocadura.




*Fuente: http://recuperapatzcuaro.com/lacuenca.php#, adaptado por Casaverde (2011).*

*Fuente: https://www.ecologiaverde.com/partes-del-rio-y-sus-caracteristicas-3263.html*




Río principal de la cuenca Chijra y su perfil de elevación. *Fuente: C. D. Santamans (2014).*

- ***Afluentes:*** corresponde a un curso de agua, también llamado tributario, que desemboca en otro río más importante con el cual se une en un lugar llamado *confluencia*. En principio, de dos ríos que se unen es considerado como afluente aquel de menor importancia (por su caudal, su longitud o la superficie de su cuenca).

- ***Efluentes:*** lo contrario de un afluente es un efluente o distributario, es decir, una derivación (natural o artificial) que se desprende fuera de la corriente principal de un río mayor a través de otro menor. Los de origen natural se encuentran en su mayoría en los deltas fluviales o abanicos aluviales. Son más frecuentes los efluentes de "origen artificial", es decir, de una derivación, acequia o canal que se utiliza con fines de regadío o de abastecimiento de agua en regiones relativamente alejadas del río principal.

# CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA

La caracterización de una cuenca se inicia con la delimitación de su territorio, la forma, tamaño o área, pendiente media y pendiente del cauce principal, red de drenaje, etc. Algunos de estos "parámetros geomorfológicos o morfométricos" sirven de base para identificar la vulnerabilidad y considerar peligros a los desastres.

## Delimitación de una cuenca

La delimitación de una cuenca se puede hacer a partir de fotografías aéreas o imágenes satelitales, sin embargo, lo mas común es utilizando los mapas topográficos. Consiste en trazar la línea divisoria de aguas y que se ubica en las partes mas altas dividiendo el curso de la escorrentía hacia una u otra cuenca.

### *¿Cómo se traza la línea divisoria de una cuenca?*

Una forma practica y sencilla para trazar la línea divisoria de una cuenca es seguir los siguientes consejos:

- Se definen la red de drenaje partiendo desde el cauce principal, luego los tributarios principales, y así sucesivamente hasta definir todas las corrientes de agua (tanto efímeras como permanentes).

- Se ubican los puntos altos que están definidos por las curvas de nivel en el plano (estas curvas son líneas que indican la elevación de los lugares por donde pasan y cuya elevación será igual al valor de la curva).

- La línea divisoria debe pasar por los puntos altos definidos cortando ortogonalmente las curvas de nivel.

- En cualquier punto del terreno la línea divisoria debe ser el punto de mayor altitud excepto cerros o puntos altos que se encuentran dentro de la cuenca.

- La línea divisoria nunca debe cortar un río, quebrada o arroyo, a excepción que exista trasvase de cuenca.

Una vez establecida la línea divisoria de la cuenca, se puede conocer mediante métodos sencillos, su área, que es de mucha importancia al hacer estimaciones de volúmenes y caudales precipitados, el perímetro de la cuenca, la forma de ésta, etc.

## Parámetros Morfométricos

Una cuenca hidrográfica, ya sea en su geometría como en los procesos que en ella se desarrollan, conforma una unidad y por lo tanto es posible expresar numéricamente los distintos elementos y propiedades geométricas que permiten comprender su evolución y dinámica. Asimismo, la obtención de parámetros morfométricos junto con su correlación con otros atributos de las cuencas, permite conocer y evaluar el funcionamiento así como también realizar proyecciones y tendencias vinculadas a la hidrología, la erosión y la sedimentación (Racca, 2007).

El término **morfometría** fue definido por Strahler (1974) como "*la medida de la forma, o geometría de cualquier cuerpo natural*", quien considera a la cuenca como un *sistema geométrico plano, estudiado con el fin de cuantificar la evolución y evaluar su estado erosivo*. La ***morfometría fluvial*** hace referencia a la "*medición de las propiedades geométricas de la superficie sólida de un sistema de erosión fluvial*", es decir que se estudian diversas variables (parámetros) morfométricas que caracterizan la forma de una cuenca de drenaje.

Los parámetros morfométricos que pueden ser analizados en las cuencas hidrográficas son múltiples y variados, pero éstos dependerán de la profundidad de la investigación y, por lo tanto, de la calidad de los resultados que se deseen obtener. En este último aspecto cabe resaltar la importancia de la escala del mapa que se toma como base, o bien la resolución de la imagen satelital a emplear.

Strahler (1964) realizó una distinción entre los aspectos lineales de los sistemas del cauce, los superficiales de la cuenca de drenaje y los referidos al relieve tanto de la cuenca como de los canales.

# 1) Parámetros morfométricos de caracterización de cuencas hidrográficas

| PARÁMETRO | FÓRMULA/ SÍMBOLO |
|---|---|
| Altura Máxima | $Z_{máx}$ |
| Altura Mínima | $Z_{mín}$ |
| Altura Media | $Z_{med}$ |
| Amplitud del Relieve | $DZ = Z_{máx} - Z_{mín}$ |
| Perímetro | P |
| Área | A |
| Largo Del Eje Longitudinal | $E_M$ |
| Largo Del Eje Transversal | $E_m$ |
| Longitud Máxima | $L_m$ |
| Ancho Máximo de la Cuenca (Perpendicular a $L_M$) | $a_M$ |
| Ancho Medio | $a_m = A/E_M$ |
| Pendiente Máxima | $Pend_{máx}$ |
| Pendiente Mínima | $Pend_{mín}$ |

## 1.1. Amplitud de relieve de la cuenca

Corresponde a la diferencia de cota dada entre el punto más alto y el más bajo de la cuenca. La variación altitudinal tiene relación directa con la presencia de vegetación y con la distribución térmica y pluvial, según las condiciones ambientales. Ambas variables (temperatura y precipitación) condicionan el régimen de escurrimiento característico de una región. Fuentes Junco (2004) en un informe del análisis morfométrico que realizó en Tancítaro (México), señaló las siguientes clases de desniveles altitudinales, que se tomarán como referencia:

| Rangos de Altitudes | Clases Altitudinales |
|---|---|
| 600 – 1200 | Bajo |
| 1221 - 1841 | Mediano |
| 1842 - 2462 | Alto |

## 1.2 Curva Hipsométrica

Definida por Strahler (1952), esta representación permite establecer cómo se distribuye, desde arriba hacia abajo, la masa de una cuenca. Los puntos que definen la curva hipsométrica se obtienen al representar en el eje vertical las distintas cotas de la cuenca en función de la cota máxima de la misma, y en el eje de las abscisas, las áreas que se hallan por encima de las alturas respectivas referidas a la superficie total de la cuenca. En general, se ha observado que las variaciones de las curvas hipsométricas, tanto respecto de las teóricas como por la presencia de más de un punto de inflexión, se relacionan con cuencas con fuertes controles tectónicos o litológicos, no necesariamente vinculados a la edad de las mismas.

## 1.3. Área y Perímetro de la Cuenca

El **área** es uno de los parámetros de mayor importancia para caracterizar hidrológica y geomorfológicamente una cuenca. Se define como la *proyección horizontal de la superficie de drenaje total de un sistema de escorrentía, dirigido directa o indirectamente a un cauce natural principal*.

La importancia de este parámetro se encuentra en los siguientes puntos:

- Los cálculos de los modelos hidrológicos suelen emplearlo con mucha frecuencia.
- Comparativamente, para regiones hidrológicas similares, las cuencas de mayor tamaño suelen tener un mayor caudal medio.
- Los caudales extremos (máximo y mínimo) poseen una relación inversa con el área de las cuencas.

| Tamaño de la Cuenca (Km²) | Descripción |
|---|---|
| < 25 - 250 | Pequeña |
| 250 – 500 | Intermedia pequeña |
| 500 – 2.500 | Intermedia grande |
| 2.500 – 5.000 | Grande |
| > 5.000 | Muy grande |

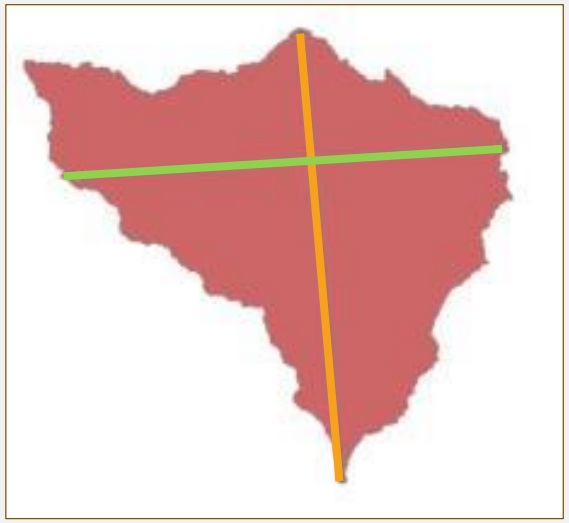
Clasificación del tamaño de cuencas. *Fuente: (Campos, 1992) en Santillán et al., (sf).*

El **perímetro,** junto con el área, es el que da configuración a la forma de la cuenca. Éste, al igual que el área, es de gran utilidad por formar parte del cálculo de otros parámetros.

## 1.4. Ejes Mayores y Longitudes de la Cuenca

La variedad de criterios para determinar estos parámetros por los distintos investigadores, es muy amplia, encontrándose dificultoso hallar coincidencias tanto en la denominación como en la metodología de medición. Por este motivo, aquí vamos a seguir un criterio particular que implica las dimensiones que se describen a continuación.

**1.4.1. Eje Longitudinal de la Cuenca:** consiste en el *largo de la línea recta que atraviesa la cuenca partiendo del punto de salida de su cauce principal.* En la figura a continuación se lo observa en posición casi vertical, con ligera inclinación hacia la izquierda., en color anaranjado Muchos autores definen a este eje haciéndolo coincidir con el cauce principal de la cuenca, pero suele ser conveniente diferenciarlos.



**1.4.2. Eje Transversal de la Cuenca:** se trata de la línea transversal al eje longitudinal de la cuenca. En la figura se aprecia al eje transversal en posición casi horizontal, apuntando levemente hacia arriba, en color verde.

**1.4.3. Longitud Máxima:** esta longitud *se corresponde con la longitud del cauce principal de la cuenca*. Luego se detallarán las implicaciones de su definición y medición. Horton (1945) definió la longitud de la cuenca como la distancia entre la desembocadura de la misma y la intersección de la prolongación aguas arriba del cauce principal con la divisoria de aguas; en tanto que Schumm (1956) considera que la ***longitud está mejor definida como la distancia entre la desembocadura de la cuenca y el punto más alejado de su divisoria***. El concepto de Horton se ajusta al punto 1.4.1, y refleja la forma general de la cuenca en sí, sin intervención hidrológica o hidráulica, por lo que su uso en los cálculos morfométricos es nulo. La definición de Schumm es la mas empleada para los cálculos que intervienen en la determinación de parámetros vinculados la relación forma-hidrología-hidráulica de una cuenca.

**1.4.4. Ancho de la Cuenca:** a lo largo de la bibliografía existen diferentes puntos de vista para la determinación de este parámetro. Por ello, para cuencas con formas irregulares, es conveniente calcular un ***ancho medio ($a_m$)*** y un ***ancho máximo de la cuenca ($a_M$)***. El primero se obtiene mediante la siguiente fórmula: $a_m = \frac{A}{E_M}$

Donde A es el área de la cuenca y $E_M$ la longitud del eje mayor de la misma.

*El ancho máximo ($a_M$) se obtiene a partir de la recta perpendicular a aquella línea recta que representa la máxima longitud de la cuenca, es decir el cauce principal*. Estas magnitudes son desestimadas por algunos autores, restándole importancia, dado que consideran que no posee una formulación muy adecuada de cálculo (Romero Díaz *et al.*, 1987). Por sí solos, éstas variables no permiten llegar a muchas conclusiones pero, son de gran utilidad en la determinación de los parámetros de forma e hidrológicos de la cuenca.

## 2. Pendientes

Heras (1972) define a la pendiente media de la cuenca como la media ponderada de todas las pendientes correspondientes a áreas elementales en las cuales es posible considerar constante la máxima pendiente. Si bien existen variadas expresiones y metodologías que permiten su determinación, a lo largo de la bibliografía se ha observado que el método comúnmente empleado está basado en el área entre curvas de nivel con el empleo de la siguiente fórmula:

$$Pend_{med} = \frac{D \times L}{A}$$

En donde: ***D*** es el intervalo entre curvas de nivel; ***L*** la longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca; y ***A*** es el área de la cuenca.

## 3. Características Generales del Cauce Principal

En este punto se agrupan mediciones generales realizadas sobre el cauce principal de una cuenca hidrográfica, las cuales son de gran utilidad en la determinación de otros parámetros morfométricos. Las más importantes son la longitud y la pendiente media. Las variables generales de un cauce principal se resumen en la tabla siguiente:

| PARÁMETRO | FÓRMULA/SÍMBOLO |
|---|---|
| Longitud Total | L |
| Longitud en Línea Recta | l |
| Altura Máxima | $H_{máx}$ |
| Altura Mínima | $H_{mín}$ |
| Altura Media | $H_{med}$ |
| Amplitud de Relieve del Cauce | $DH = H_{máx} - H_{mín}$ |
| Pendiente Máxima | $S_{máx}$ |
| Pendiente Mínima | $S_{mín}$ |
| Pendiente Media | $S_{med} = DH/L$ |
| Pendiente Media * | $S_{med} = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}}}\right]^2$ |
| Pendiente Mediana | $S_m$ |

## 3.1. Longitud del Cauce Principal

Es la medida del escurrimiento principal de la cuenca, medido desde el punto más alejado cercano a zona de cabecera hasta la salida de la misma (Schumm, 1956). Este parámetro posee gran importancia para la determinación del tiempo de concentración y de otros índices. Además, como se mencionó arriba, esta magnitud también es considerada como la longitud máxima de la cuenca.

## 3.2. Perfil de Elevaciones

En líneas generales, el curso principal de un sistema de drenaje muestra cambios sistemáticos de la pendiente, anchura y profundidad del cauce y la velocidad media del flujo, cuando se lo recorre río abajo hacia las cotas menores. Así, los cambios de gradiente pueden ser examinados al representarse el perfil longitudinal del río, en el cual, en la escala horizontal se representa la distancia, mientras que en el eje vertical se simboliza la altura sobre el nivel del mar.

El perfil típico es cóncavo hacia arriba y el gradiente se aplana tanto más gradualmente cuanto mayor es la proximidad a la desembocadura del río; además suele presentar reducciones bruscas de gradiente allí donde entra un gran afluente, mientras que en la parte del curso alto suelen existir diversas irregularidades, como rápidos y cascadas (Strahler, 1952).
Este perfil también permite inferir, de forma generalizada, la respuesta hidrológica de la cuenca según la precipitación que se desarrolle en ella. En otras palabras, permite evaluar el tiempo de concentración. A grandes rasgos, se puede decir que aquellas cuencas cuyo cauce principal posea pendientes elevadas, el caudal punta suele ser más elevado.

## 3.3. Pendiente Media del Cauce Principal

La pendiente de un tramo de un río ha sido definida como *la relación entre los extremos del tramo y su distancia horizontal.* Dado que cada tramo del río presenta una pendiente con valor propio, la pendiente del cauce principal representa la magnitud media de los tramos que conformen la corriente. Esto significa que *mientras mayor sea el número de tramos definidos a lo largo del cauce principal, su pendiente media será más cercana a la pendiente real.* La fórmula básica para hallar la pendiente media es la siguiente: $S = \frac{\Delta H}{L \times 1000} = \frac{H_{máx} - H_{mín}}{L \times 1000}$

Donde *S* es la pendiente media del cauce principal (expresada en m/m); $\Delta H$ la diferencia de cota del mismo; y *L*, su longitud en kilómetros.

Taylor y Schwarz consideran que el río puede estar formado por una serie de tramos ya sea de igual longitud o de longitud variable. Cuando se trata de tramos de longitud variable, la pendiente media del cauce se estima con expresión que sigue: $S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}}+\frac{l_2}{\sqrt{S_2}}+\cdots\frac{l_n}{\sqrt{S_n}}}\right]^2$

Dónde: *S* representa a la pendiente media del cauce; *L*, la longitud total del río; $l_n$ es la longitud del tramo *n*; $S_n$ es la pendiente del tramo *n*.

## 4. Parámetros e Índices de Forma (cuencas)

En este punto se agrupan aquellas variables morfométricas que permiten estudiar y analizar la forma de una cuenca y, por lo tanto, su comportamiento ante eventos torrenciales. Analizar la forma de la cuenca tiene importancia dado que ésta influye en gran medida en la escorrentía y en cómo se comportan los caudales que generan.

En la Tabla siguiente se indican las fórmulas para el cálculo de las distintas variables morfométricas referidas a la forma de la cuenca.

| PARÁMETRO | SÍMBOLO | FÓRMULA | UNIDADES |
|---|---|---|---|
| Índice de Compacidad (Gravelius) | Kc | 0,282 (P/SA) | - |
| Factor de Circularidad (Miller) | Rc | $4\pi$ A / $P^2$ | - |
| Coeficiente de Forma (Horton) | Kf | A / $L^2$ | - |
| Alejamiento Medio | $\alpha$ | L / SA | - |
| Coeficiente de Masividad | $C_M$ | $Z_{med}$ / A | m/km$^2$ |
| Índice de Alargamiento | I$\alpha$ | $L_M$ / $\alpha_M$ | - |
| Razón de Elongación (Schumm) | Re | 1,129 $A^{0,5}$ / L | - |
| Tiempo de Concentración Promedio | Tc | $\sum Tc_i/5$ | hs |
| Tiempo de Concentración según California | tc | $0,952 \left(\frac{L^3}{\Delta H}\right)^{0,385}$ | hs |

## 4.1. Índice de Compacidad (Kc)

El índice de compacidad (Kc) de Gravelius (1914) compara el perímetro de una cuenca con la circunferencia de un círculo cuya superficie es igual a la de dicha cuenca, y se lo calcula mediante la siguiente expresión:

$$Kc = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde *P* es el perímetro de la cuenca (km) y *A* su área (km$^2$).

Se emplea para comparar la forma de la cuenca con la de otras formas "ideales".

A igualdad de área, el círculo es la figura de menor perímetro y por lo tanto, Kc nunca será menor a 1.

En base al estudio de numerosas cuencas, se sabe que cuanto más cercano esté el índice a la unidad la cuenca tiene forma más circular, y mientas más se aleje de 1, la forma será más irregular en relación con el círculo. En función de su valor, se han establecido las siguientes clases de compacidad.

| Rangos de Kc | Clases de Compacidad |
|---|---|
| 1 – 1,25 | Redonda a oval redonda. |
| 1,25 – 1,50 | De oval redonda a oval oblonga. |
| 1,50 – 1,75 | De oval oblonga a rectangular oblonga. |

Clases de valores de compacidad. *Fuente: Fuentes Junco, 2004*.

La proximidad de Kc a la unidad se vincula con la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de agua de escurrimiento. Por lo tanto, a menor Kc, la concentración de agua será mayor. Esto se explica porque mientras más redonda sea la cuenca, la onda de crecida tarda más tiempo en llegar a la salida de misma, pero al mismo tiempo el caudal punta será mayor (González de Matauco, 2004)]

## 4.2. Factor de Circularidad (Rc)

El índice de circularidad de Miller (1953) compara el área de la cuenca con el área de un círculo, cuya circunferencia es igual al perímetro de la cuenca; en otras palabras, es lo contrario al índice de compacidad de Gravelius. Se lo determina mediante la fórmula: $Rc = \frac{4\pi A}{P^2}$, en la cual $A$ representa el área de la cuenca (en km$^2$) y $P$ su perímetro (en km). Los valores (adimensionales) de Rc oscilan entre 0 y 1, de manera tal que la unidad corresponde a una cuenca de forma circular; valores cercanos a 1 se traducen como cuencas ensanchadas, mientras que los próximos a 0, en cuencas alargadas.

## 4.3. Coeficiente de Forma ($K_f$)

Formulado por Gravelius, este índice puede estimarse a partir de la relación entre el ancho promedio de área de captación y la longitud de la cuenca, la cual se mide desde la desembocadura hasta el punto más alejado de ella (Fuentes Junco, 2004). Como el ancho promedio se calcula mediante el cociente entre el área (en $km^2$) y la longitud de la cuenca (en km), la fórmula se resume en la siguiente expresión: $K_f = \frac{A}{L^2}$

A diferencia de los parámetros anteriores, *este factor relaciona la forma de la cuenca con la de un cuadrado*, de modo que un $K_f = 1$ correspondería a una cuenca (imaginaria) de forma cuadrada. *Si el valor es superior a 1, señala el grado de achatamiento de la cuenca o bien el de un río principal corto y, por ende, con tendencia a concentrar el escurrimiento favoreciendo la generación de grandes crecidas*.

En un informe de Fuente Junco (2004), se han empleado una serie de rangos de Kf para describir las clases de forma de una cuenca, la cual se muestra a continuación:

| RANGOS DE $K_F$ | CLASES DE FORMA |
|---|---|
| 0,01 – 0,18 | Muy poco achatada |
| 0,18 – 0,36 | Ligeramente achatada |
| 0,36 – 0,54 | Moderadamente achatada |

Clases de forma de una cuenca según su coeficiente de forma. *Fuente: Fuentes Junco (2004).*

Este índice también ha sido definido por Horton, quien ha señalado que sus valores varían entre 0 y π. Así, la interpretación que le da a los valores es la Tabla siguiente:

| VALORES APROXIMADOS (Kf) | FORMA DE LA CUENCA |
|---|---|
| < 0,22 | Muy alargada |
| 0,22 – 0,30 | Alargada |
| 0,30 – 0,37 | Ligeramente alargada |
| 0,37 – 0,45 | Ni alargada ni ensanchada |
| 0,45 – 0,60 | Ligeramente ensanchada |
| 0,60 – 0,80 | Ensanchada |
| 0,80 – 1,20 | Muy ensanchada |
| > 1,20 | Rodeando el desagüe |

Valores interpretativos del factor de Forma, según Horton. *Fuente: Delgadillo Santander et al. (sf).*

## 4.4. Alejamiento Medio (α)

Esta variable morfométrica se vincula con el recorrido del cauce más largo desde la periferia a la salida de la cuenca, con respecto a la longitud del lado de un cuadrado de área equivalente. Se define mediante la relación:

$$\alpha = L/\sqrt{A}$$

En la cual, L es la longitud del cauce principal (km) y A el área de la cuenca ($km^2$).

En el caso de una cuenca de planta cuadrada, si la longitud de su cauce principal fuese igual a la de una de las aristas, entonces $\alpha = 1$; pero si se desarrollara según la diagonal $\alpha = 1{,}41$. Sintéticamente, las interpretaciones de sus valores se expresan en la tabla de la diapositiva siguiente. La cercanía del valor encontrado luego de aplicar la fórmula, respecto a los de dicha tabla, brindará una estimación de la forma de cuenca. Pero a lo largo del análisis de varias cuencas, autores han llegado a la conclusión de que *mientras más elevado sea este índice, más alargada será la cuenca.*

| VALORES DEL ALEJAMIENTO MEDIO | FORMA DE LA CUENCA |
|---|---|
| $\sqrt{2} = 1,414$ | Cuadrada |
| 1,128 | Circular |
| 1,596 | Semicircular, con la salida en un extremo del diámetro. |
| 0,798 | Semicircular, con la salida en el centro del diámetro. |

Forma de la cuenca según los valores del índice de alejamiento medio. *Fuente: Docampo, et al., (1989).*

La regla general es que *los coeficientes Kc y α estén correlacionados de forma directamente proporcional* (Docampo, et al., 1989), es decir que las magnitudes de circularidad verifiquen las encontradas para el alargamiento de la cuenca. Pero se ha encontrado que esto *sólo se cumple en el caso de las cuencas de formas regulares, no así en las irregulares.*

## 4.5. Índice de Alargamiento (Iα)

Horton estableció esta variable para relacionar la longitud máxima encontrada en la cuenca, medida en el sentido del río principal, y su ancho máximo, calculado en forma perpendicular a él (ambos medidos en línea recta). La fórmula empleada es: $I_{\alpha} = \frac{l}{a_M}$

Donde L es la longitud máxima (km), es decir la longitud del cauce principal, y $\alpha_M$ el ancho máximo (perpendicular al anterior, en km).

Se ha establecido que cuando este índice sobrepasa en gran medida la unidad, lo más probable es que se trate de cuencas alargadas, en cambio cuando es próximo a 1 la red de drenaje de la cuenca en cuestión tendría forma de abanico, con un probable río principal corto. En este sentido, las formas probables de las cuencas según el índice de alargamiento se observan en la tabla que sigue:

| Rangos del Índice de Alargamiento | Clases de Formas de Alargamiento |
|---|---|
| 0 – 1,4 | Poco alargada |
| 1,5 – 2,8 | Moderadamente alargada |
| 2,9 – 4,2 | Muy alargada |

Clases de valores de alargamiento de una cuenca. *Fuente: Fuentes Junco (2004)*

## 4.6. Coeficiente de Masividad ($C_M$)

El coeficiente de masividad ($C_M$) permite evaluar que tan montañosa es una cuenca. Se define como la relación entre la elevación media de la cuenca (en metros) y su superficie (expresada en km$^2$): $C_M = \frac{Z_{med}}{A}$

Expresión en la cual $Z_{med}$ es la altura media de la cuenca (m) y $A$ la superficie (km$^2$). Las clases de masividad de una cuenca se aprecian en la siguiente tabla:

| Rangos de $C_m$ | Clases de Masividad |
|---|---|
| 0 – 35 | Muy montañosa |
| 35 – 70 | Montañosa |
| 70 - 105 | Moderadamente montañosa |

Masividad de una cuenca según el valor de $C_M$. *Fuente: Fuentes Junco (2004).*

## 4.7. Razón de Elongación (Re)

Índice establecido por Schumm (1956), definido como la relación entre el diámetro de un círculo con la misma área de la cuenca y la longitud máxima de la misma, la cual se mide de acuerdo al criterio del autor, quien considera a ésta como la distancia que existe entre el punto de salida de la cuenca y el más alejado de su divisoria.

Como ya se ha mencionado, la definición de la magnitud del cauce principal suele ser muy subjetiva y variable de autor a autor. Es en este sentido que en diferentes publicaciones (Breña Puyol, *et al.*, *s.f.*; Díaz *et al.*, 1999; etc.), se observó que la longitud empleada para éste cálculo, suele ser medida como una "*línea recta trazada desde la desembocadura del cauce principal, hasta el límite extremo del parteaguas y de manera paralela al río principal*".

La fórmula del cálculo de la elongación de uso más frecuente es la definida por Schumm, debido a que es la que posee mejor correlación con la hidrología de la cuenca, y que se muestra a continuación:

$$Re = \frac{D}{L} = 1{,}128\ \frac{\sqrt{A}}{L}$$

Donde *D* es el diámetro del círculo mencionado; *A*, el área de la cuenca ($km^2$) y *L* la longitud máxima de ella (km).

Magnitudes de *Re menores a 1, se interpretan como cuencas de formas alargadas, y mientras más pequeño sea Re, más alargada será la cuenca. Contrariamente, aquellos valores de Re próximos a la unidad, implicarán formas redondeadas* (González de Matauco, 2004).

Summerfield (1991), a partir de estudios de múltiples cuencas, concluyó su posible relieve a partir del valor de Re:

| Valores de Re | Relieve de la Cuenca |
|---|---|
| ≈ 1,0 | Cuenca plana |
| 0,6 ≤ Re ≤ 0,8 | Relieve pronunciado |

Relieve de una cuenca según los valores de la razón de elongación, propuesto por Summerfield (1991). *Fuente: Breña Puyol, et al., (sf).*

Por otra parte, *las cuencas con mayor elongación tardan más tiempo en concentrar la escorrentía debido a la mayor longitud que suele presentar su cauce principal, con lo cual, una vez concentradas las aguas la brusquedad de las crecidas es mayor y, por ende, más alto el riesgo de inundaciones* (Sala et al., 1981).

## 4.8. Tiempo de Concentración (Tc)

Si bien esta no es una variable que permita inferir directamente la forma de la cuenca, está íntimamente ligada a ella y depende, entre otras cosas, de la tipología de su relieve.

Suele ser también llamado ***"tiempo de respuesta o de equilibrio"***, pero la definición más frecuente que se le asigna al *tiempo de concentración es el tiempo que tarda una partícula de agua caída en el punto de la cuenca más distante de la salida de la misma, hasta alcanzar esta última región*. Hay autores que afirman que esto no sucede realmente en el terreno, debido a que pueden existir algunos puntos en la cuenca a partir de los cuales el agua caída demore más en llegar al desagüe (siendo este el más alejado). Un concepto más claro es el propuesto por Llamas (1993), quien lo define como: ***"tiempo requerido para que, durante un aguacero uniforme, se alcance el estado estacionario; es decir, el tiempo necesario para que toda la cuenca contribuya eficazmente a la generación de flujo en el desagüe"***. Esta variable no es constante en una misma cuenca, puesto que depende también de las características de la precipitación que la genere.

Debido a que el concepto de tiempo de concentración posee una base física vinculando la morfología y geometría de la cuenca, existen numerosas fórmulas para calcularlo propuestas por muchos autores. Por este motivo, para estimar un valor que represente de mejor manera a una cuenca, suele recomendarse hallar un valor medio del mismo calculado en base a los determinados por varias ecuaciones empíricas, siendo apropiado la inclusión de al menos cinco estimaciones distintas (Vélez et al., 2010).

A continuación se exponen distintos métodos empíricos para la determinación del tiempo de concentración de una cuenca, con un par de ellas que mostraron mejor ajuste para cuencas montañosas (negrita):

***Fórmula de California:*** $\boldsymbol{Tc = 0,952 \left(\frac{L^3}{\Delta H}\right)^{0,385}}$

*Fórmula propuesta por Témez:* $Tc = 0,3 \left(\frac{L}{J^{0,25}}\right)^{0,76}$ *dónde* $J = \frac{\Delta H}{L*100}$

*Fórmula propuesta por Ven Te Chow:* $Tc = 0,274 \left(\frac{L}{J^{0,5}}\right)^{0,64}$

***Fórmula propuesta por U. S. Corps of Engineers:*** $\boldsymbol{Tc = 0,28 \left(\frac{L}{J^{0,25}}\right)^{0,76}}$

*Fórmula propuesta por Passini:* $Tc = \frac{0,108\ (A*L)^{1/3}}{J^{0,5}}$

En las cuales, *Tc* es el tiempo de concentración en horas; *L* la longitud del cauce principal, expresada en km; *J*, la pendiente media de dicho recorrido (en m/m); *ΔH* la diferencia de cota entre los puntos que definen a L (en metros); y *A*, el área de la cuenca (en $km^2$).

# 5. Variables Vinculadas a la Red de Drenaje

Abarca a las variables morfométricas vinculadas a la red de drenaje que se emplean para la caracterización del medio natural de una cuenca hidrográfica y el potencial posterior análisis de su respuesta hidrológica.
En la tabla a continuación (izquierda), se muestran los parámetros más empleados, vinculados a la red total de una cuenca que sirven de base para la determinación de otros índices o parámetros vinculados a la red de drenaje (tabla derecha).

| PARÁMETRO | SÍMBOLO |
|---|---|
| Número de orden (Strahler) | $\Omega$ |
| Número total de cursos | $N_{CT}$ |
| Longitud total de los cursos | $L_{CT}$ |
| Longitud media de los cursos | $L_{CM}$ |

Parámetros generales de la red de drenaje

| PARÁMETRO | SÍMBOLO | FÓRMULA | UNIDADES |
|---|---|---|---|
| Relación de bifurcación | Rb | $N_u$ / $N_{u+1}$ | - |
| Densidad de drenaje | Dd | $nL_u$ /A | km / km$^2$ |
| Constante de mantenimiento del canal | Cc | I / dd | km$^2$ / km |
| Relación de longitud | $R_l$ | $L_u$ / $L_{u-1}$ | - |
| Frecuencia de cauces | Fc | N° cauces / A | Cauce/km$^2$ |
| Coeficiente de torrencialidad | Ct | N° cursos$_1$ / A | Cauce$_1$/km$^2$ |
| Longitud media de los ríos | Lx | $l_x$ /$N_x$ | - |
| Coeficiente de almacenamiento hídrico | $R_{HO}$ | Lx / Rb | - |
| Parámetro ρ | ρ | Rl / Rb | - |

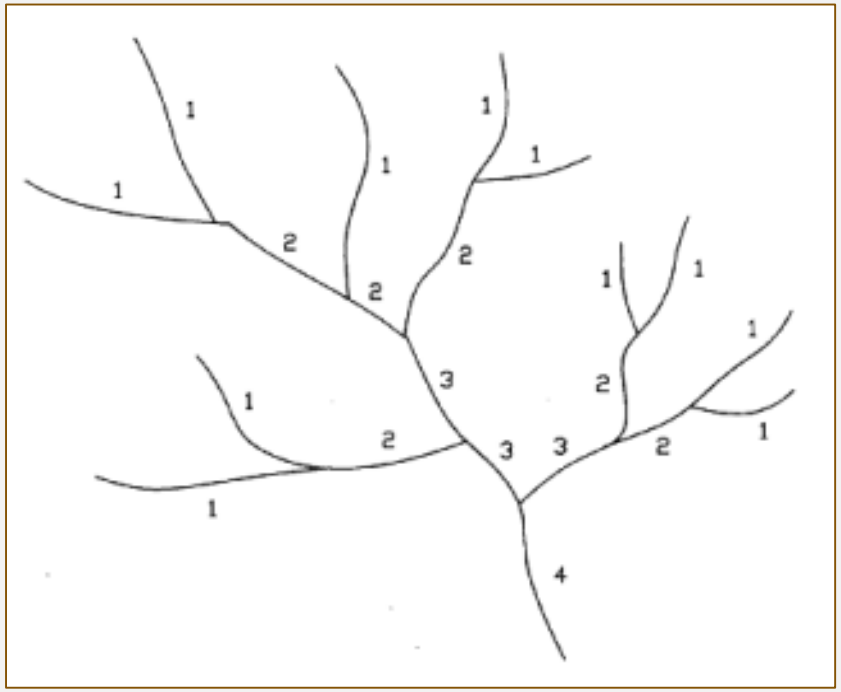
Índices / Parámetros vinculados a la red de drenaje de una cuenca

## 5.1. Número de Orden (Ω)

Los métodos existentes para jerarquizar una red de drenaje son diversos, pudiéndose citar: Horton (1945), ***Strahler (1964),*** Scheidergger (1965) y Shreve (1966). El criterio propuesto por Horton para la jerarquización de arroyos fue modificado por Strahler y, dado que éste último es el más sencillo de vincular con los demás parámetros e índices morfométricos, es el más empleado para la determinación del número de orden, criterio que se explica a continuación (***Strahler, 1964)***.

La jerarquización busca subdividir los diferentes cursos de agua que integran el sistema de drenaje superficial, en segmentos de cauce clasificándolos según su orden de importancia. La metodología de asignación de valores numéricos a los órdenes sigue las siguientes pautas:

- El valor 1, se designa para aquellos cursos que conforman las nacientes de la red; en general son los más pequeños y sólo suelen transportar agua en épocas estivales.
- Cuando dos cursos de orden 1 confluyen, significa que la red de drenaje incrementa su magnitud, por lo cual desde el lugar de unión se le concede el valor 2 al cauce resultante, hacia aguas abajo.
- A su vez, al reunirse dos arroyos de orden 2 el sistema de drenaje vuelve a incrementar su magnitud, por lo que desde ese punto es asignado el valor 3, procediendo así sucesivamente hasta completar la clasificación de la red de drenaje.
- Cuando un curso de orden bajo afluye a otro de orden superior, el cauce resultante sostiene el mayor de los valores de los dos órdenes involucrados, hacia aguas abajo.
- El mayor orden de la cuenca corresponde al orden del cauce principal.



Jerarquización de una red de canales según Strahler (1964). *Fuente: http://dc384.4shared.com/doc/W9-FIxhT/preview.html*

El Instituto Nacional de Estadísticas de México (INE, 2004) en uno de sus trabajos, propuso una clasificación en clases de órdenes, según rangos de sus valores (tabla abajo). Por otro lado, Horton estableció que, en condiciones iguales en relación al área, clima y sustrato, *a mayor orden de la cuenca, más alto será su grado de desarrollo fluvial y estará mejor definida.* Asimismo, *un mayor orden podría indicar la presencia de controles estructurales en el relieve, mayor posibilidad de erosión, o bien, que la cuenca pueda ser más antigua (en determinados tipos de relieve*, Fuentes Junco, 2004).

| Rangos de órdenes | Clases |
|---|---|
| [1 a 2] | Bajo |
| (2 a 4] | Medio |
| (4 a 6] | Alto |

Clases de orden de corriente. *Fuente: INE (2004), en Santillán et al., (s.f.)*

El parámetro de mayor importancia para el cálculo de las demás variables morfométricas, es el número de orden de Strahler.

## 5.2. Relación de Bifurcación (Rb)

Variable establecida por Horton (1945), que se define como *la relación entre el número de segmentos de corriente de un orden dado, "$N_u$", y el número de tramos del orden inmediatamente superior, "$N_{u+1}$"* (Breña Puyol, *et al.*, 2006), como puede apreciarse en la siguiente expresión: $Rb = \frac{N_u}{N_{u+1}}$

Se trata de un parámetro que ***define el grado de ramificación de la red de drenaje***, según cita Racca, (2010). Sánchez (1991) interpreta que esta relación *establece la mayor o menor rapidez de las ondas de crecida, estableciendo de cierto modo, el grado de peligrosidad de inundación de la cuenca*. Rb aumenta a medida que se incrementa el número de arroyos que confluyan en forma directa en los colectores, sin generar cursos de orden superior. Por lo cual, valores bajos se vinculan con redes muy ramificadas (elevado número de orden), lo cual influye de forma directa en eventos de precipitaciones potentes y las ondas de crecida rápidas que estas pueden generar.

Horton (*óp. cit.*) señala que relación de bifurcación suele variar desde magnitudes cercanas a 2, para cuencas de poco gradiente, hasta valores de 3 – 4 para aquellas montañosas o fuertemente disectadas. Ampliando esta interpretación Romero Díaz *et al.*, (1987) citan la interpretación que se observa en el cuadro siguiente:

| Valores de Rb | Relieve de la cuenca |
|---|---|
| ≈ 2 | Escaso relieve. |
| 3 ≤ Rb ≤ 5 | Cuencas de montaña, en las cuales las estructuras geológicas no tienen gran influencia en la forma del drenaje. Generalmente formadas sobre rocas homogéneas. |
| Rb ≥ 5 y princip. Rb ≥ 10 | Cuencas estrechas y alargadas, con predominio de control estructural. Alternancia de afloramientos rocosos contrastantes. |

Algunos autores han vinculado los valores de Rb con la redondez de la cuenca y por tanto con Re (razón de elongación), estableciendo una relación inversa entre ambos parámetros. En este sentido, bajos índices de Rb suelen representar cuencas redondeadas manifestando un riesgo de inundación debido a la veloz concentración de las aguas de escorrentía (Romero Díaz *et al*., 1987).

Pero para que la relación de bifurcación permita deducir la amenaza de potenciales crecidas en una cuenca, se necesita calcular la Rb promedio. Ciertos investigadores hacen uso de la media aritmética, mientras que otros determinan la media geométrica, pero los valores calculados por ambos métodos no suelen tener grandes diferencias entre ellos. La media geométrica de una serie de "i" valores de Rb consecutivos, se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$Rb = \sqrt[i]{R_{b.1} \times R_{b.2} \times R_{b.3} \times \cdots \times R_{b.i}}$$

## 5.3. Densidad de Drenaje (Dd)

El cociente entre la longitud total de todos los segmentos de corriente y la superficie de la cuenca, define la densidad de drenaje y constituye una medida de disección (Horton, 1932). Se representa por la expresión: $Dd = \frac{L_{CT}}{A} = \frac{\sum l_u}{A}$; en la cual $L_{CT}$ es la longitud total de todos los canales de agua, en km; *lu*, la longitud de cada curso (km), y *A*, el área de la cuenca en km$^2$.

Al igual que en el caso anterior, a partir de numerosas investigaciones diferentes autores han podido interpretar y vincular esta variable morfométrica con variadas características que reflejan el comportamiento de una cuenca hidrográfica. Seguidamente, se citan algunas de ellas:

- Jones, (1997) asegura que es una propiedad importante, dado que c*ontrola la eficiencia del drenaje*, mientras que Senciales, (1999) la considera ***indicativa del estado erosivo de la cuenca***. En relación a esto, Guerra et al., (óp. cit.) interpreta en su trabajo que *altos valores de Dd indicarían una elevada escorrentía, por lo cual se vincula indirectamente con la infiltración, la litología y la cubierta vegetal*; es decir que una baja Dd caracteriza a terrenos permeables.

- Strahler, (1974) aclara que rocas duras como el granito, gneiss, arenisca o cuarcitas, tendrán tendencia a generar densidades de drenaje bajas, dado que la erosión fluvial es más dificultosa. En cambio, en litologías blandas como margas y arcillas, se puede generar suficiente escorrentía como para provocar la erosión de los cauces. En otro sentido, materiales de alta permeabilidad (arenas, gravas) favorecen la infiltración por lo que las Dd también serán pequeñas. Además el autor *vincula este parámetro con el clima de la cuenca al afirmar que "una roca débil producirá mucha menos densidad de drenaje en un clima húmedo, donde una espesa cobertura vegetal protege el material subyacente, que en una región árida, donde no existe dicha cobertura*".

- Breña Puyol et al., (2006) aportan valores de referencia para la interpretación de la densidad de drenaje: ***altas Dd, superiores a 500 km/km²***, pueden ser consecuencia de la combinación de *litología muy erosionable con un régimen de precipitación elevado*; ***valores inferiores a 5 km/km²***, indicarían una *mayor resistencia litológica o un escaso régimen pluviométrico, por lo que las erosiones serían poco importantes*. Asimismo, Chorley et al., (1967) toman de referencia magnitudes menores a 10 para regiones en las que escurrimiento subterráneo supera al superficial (por ejemplo terrenos kársticos, o con arena suelta y densa vegetación); y valores superiores a 100, que indicarían terrenos arcillosos impermeables (badlands), carentes de vegetación.

Lo cierto es que cada autor propone índices de referencia de densidades de drenaje, según su criterio. Además existe el inconveniente de la dispersión de los resultados hallados mediante los diferentes métodos y distintas escalas de trabajo.

En síntesis y en función de los puntos anteriores, se puede decir que la densidad de drenaje es una variable morfométrica indicativa del modo de respuesta de una cuenca hidrográfica ante un aguacero, de manera que mientras más elevado sea su valor, las aguas de escorrentía superficial se mueven más rápido, por lo que el flujo en el cauce supera al de las laderas, disminuyendo el tiempo de concentración (o tiempo de respuesta de la cuenca) y elevando el pico de crecida, como resultado de la menor infiltración.

## 5.5. Relación de Longitud ($R_l$)

Definida también por Horton como la *ley de las longitudes de corriente*, este índice se expresa mediante la relación que sigue: $R_l = \frac{L_u}{L_{u-1}}$

En la cual, $R_l$ en la relación de longitud (adimensional); $L_u$, la longitud media de segmentos de orden *"u"* (en kilómetros); $L_{u-1}$, la longitud media de segmentos de orden inmediatamente inferior al anterior, es decir *"u-1"* (en kilómetros).

La modalidad típica para obtener un valor representativo de toda una cuenca, consiste en hallar la relación de longitud para cada número de orden y calcular la media aritmética, de forma similar a la relación de bifurcación.

Autores manifiestan que el valor típico de esta variable es 2, con un rango que varía desde 1,5 a 3,5. En este sentido, Campo *et al.*, (2011) cita a Senciales (1999) para referirse a índices $R_l$ mayores a 3, implican una concentración paulatina de caudales a lo largo del río principal; en cambio, $R_l$ menores a 3, refleja una mayor energía concentrada bruscamente (Sala *et al.*, 1981).

## 5.7. Coeficiente de Torrencialidad (Ct)

El coeficiente de torrencialidad es *la razón entre el número total de cursos de primer orden y el área de la cuenca*, cuya expresión es: $Ct = \frac{N_1}{A}$

En donde *Ct* es el coeficiente de torrencialidad; $N_1$, el número de cursos de orden 1; *A*, el área de la cuenca, en km$^2$.

***Es un indicador de la erodabilidad de una región, muy relacionado con los procesos de erosión lineal y con la capacidad de descarga de una cuenca***. Debido a que, por lo general, los cursos de primer orden son de génesis erosiva (erosión en surcos y en cárcavas), *altos valores indican elevada susceptibilidad a la erosión, menos tiempo de llegada al pico de creciente y alta torrencialidad*.

## 5.8. Parámetro ρ

Propuesto por Horton (1945) se define como el cociente entre las relaciones de longitudes y de bifurcación: $\rho = \frac{R_l}{Rb}$. La importancia de esta variable se vincula con la estimación de la capacidad de almacenamiento hídrico en la red, lo que implica comprender y estudiar las intensidades de los picos de crecidas. Si ρ es elevado, puede interpretarse que la longitud superior de los cursos de mayor orden habilita a una mayor capacidad de almacenamiento hídrico durante las avenidas, lo cual amortiza los efectos de las descargas grandes; por el contrario, bajos índices se traducen en una mayor brusquedad del caudal punta en la salida de la cuenca (Racca, 2010).