



Defensas riberañas con gaviones y geosintéticos

Gerardo Fracassi



Gerardo Fracassi

Defensas riberañas con gaviones y geosintéticos

Fracassi, Gerardo (Traductor)

Defensas ribereñas con gaviones y geosintéticos/ Proteção de rios com soluções
Maccaferri. Traductor: Gerardo Fracassi. 1a. edición. Bogotá: Ediciones de la U, 2019.
336 p. ; 24 cm.

Incluye referencias bibliográficas e índice alfabético

ISBN 978-958-762-978-1 e-ISBN 978-958-762-979-8

1. Ingeniería 2. Hidráulica 3. Estabilización 4. Protección contra la erosión 5. Manejo de cursos
de aguas I. Tit.

627 cd 24 ed.

Edición original publicada por © Oficina de Textos (Brasil)

Edición en español autorizada a Ediciones de la U para todo el mundo.

Título original en portugués: Proteção de rios com soluções Maccaferri

Primera edición: Brasil, 2019

Edición Colombia: marzo de 2019

ISBN 978-958-762-978-1

© Maccaferri do Brasil, Av. José Benassi, 2601 - Fazenda Grande, Jundiaí
- SP, 13201-970, Brazil, tel. (11) 4525-5000

www.maccaferri.com.br e-mail: kfonseca@maccaferri.com

© Oficina de Textos, Rua Cubatão, 798 CEP 04013-003 São Paulo Brasil
tel. (11) 3085-7933

www.ofitexto.com.br e-mail: atend@ofitexto.com.br

© Del traductor: Gerardo Fracassi, E-mail: g.fracassi@maccaferri.com

© Ediciones de la U - Carrera 27 #27-43 - Tel. (+57-1) 3203510 - 3203499

www.edicionesdelau.com - E-mail: editor@edicionesdelau.com

Bogotá, Colombia

CARÁTULA: Malu Vallim

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN: Maria Lúcia Rigón

CORRECCIONES: Liliana Canossa

IMPRESIÓN: DGP Editores SAS

Calle 63 #70D-34, Pbx. (57+1) 7217756

Impreso y hecho en Colombia

Printed and made in Colombia

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su
tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier
medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro y otros
medios, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	5
1 HISTORIA DE LOS GAVIONES	7
1.1 Las primeras obras fluviales significativas	10
2 LA MORFOLOGÍA FLUVIAL	16
2.1 Clasificación de los cursos de agua.....	16
2.2 Equilibrio.....	28
2.3 Grados de libertad.....	30
2.4 Erosión.....	37
2.5 Transporte sólido.....	46
2.6 Datos necesarios para el diseño de obras fluviales	53
3 LAS INTERVENCIONES EN UN CURSO DE AGUA	59
3.1 Tipos y finalidades de las soluciones posibles	60
3.2 Tipo de soluciones.....	61
4 LAS SOLUCIONES USUALES Y SUS APLICACIONES	64
4.1 Tipo de soluciones.....	68
5 ESPIGONES	93
5.1 Características de los espigones	94
5.2 Dimensionamiento de los espigones	97
5.3 Espigones en gaviones.....	122
5.4 Espigones permeables construidos con troncos, mallas y cables de acero	123
6 BIOINGENIERÍA	125
6.1 Beneficios de la bioingeniería para el diseño.....	129
6.2 Consideraciones de diseño.....	130
6.3 Técnicas	131
6.4 Operaciones para la revegetación	152
6.5 Protección de las orillas mediante técnicas de ingeniería ambiental	158
6.6 Obras de consolidación de la orilla - protecciones del pie.....	159
6.7 Infraestructura verde	161
7 INVESTIGACIONES	183
7.1 Comportamiento de los colchones Reno®	183
7.2 Comportamiento ambiental de las obras en gaviones y colchones Reno® ..	211

8	MÉTODOS DE CÁLCULO	217
8.1	Dimensionamiento de los revestimientos	217
8.2	Dimensionamiento del revestimiento con relación al movimiento de las olas.....	248
8.3	Dimensionamiento de la sección transversal de los espigones.....	249
9	SUGERENCIAS PARA EL DISEÑO DE ALGUNOS TIPOS DE ESTRUCTURAS EN GAVIONES	251
9.1	Sección y relación altura/base	251
9.2	Estabilidad al vuelco, deslizamiento, presión en la base, presión en los distintos niveles	252
9.3	Fundación.....	252
9.4	Uso del geotextil	258
9.5	Durabilidad	259
9.6	Empotramiento	269
9.7	Contrafuertes y dentellones.....	270
9.8	Colocación en agua.....	272
9.9	Adaptación de los gaviones caja y colchones Reno® a la sección de la estructura.....	276
9.10	Tipo de piedras para rellenar los gaviones	277
9.11	Social	281
10	CASOS HISTÓRICOS	285
10.1	Río Los Antiguos (Argentina)	285
10.2	Río Jolencia (Bolivia).....	287
10.3	Santa Cruz (Bolivia).....	289
10.4	Río Pauto (Colombia)	291
10.5	Río Naranjal (Ecuador).....	294
10.6	Río Lempa (El Salvador).....	296
10.7	Río Little Wekiva (Seminole, Florida, Estados Unidos)	298
10.8	Río Cañete (Perú).....	300
10.9	Río Haina (República Dominicana)	301
10.10	Río Blanco (República Dominicana)	304
10.11	Río Inkongweni (Sudáfrica).....	306
10.12	Río Azul (Chubut, Argentina).....	307
10.13	Río Pescado (Salta, Argentina).....	309
10.14	Río Chimoré (Cochabamba, Bolivia).....	311
10.15	Río Bermejo (Tarija, Bolivia).....	313
10.16	Río Lempa (Usulután, El Salvador)	316
10.17	Río Paz (Ahuachapán, El Salvador)	318
10.18	Río Challuayacu (San Martín, Perú).....	320
10.19	Río Huayabamba (Huicungo, Perú).....	322
10.20	Río Huallaga (San Martín, Perú)	323
10.21	Río Huallaga (Picota, San Martín, Perú)	326
	ÍNDICE DE LOS SÍMBOLOS USADOS	329
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	333

INTRODUCCIÓN

Cuando niño, pasaba parte de mis vacaciones de verano en las montañas; lo que más disfrutaba no era tanto la magnífica vista de las alturas como los torrentes que bajaban de ellas burbujeantes y el ruido que producían. El mismo efecto lo tenían cursos de agua menores, los pequeños canales que los campesinos habían cavado para irrigar sus campos. Pasaba horas acompañando el recorrido del agua, saltando de una piedra a otra en el cauce de los torrentes, acompañando sus tortuosidades, observando las piedras más grandes, que habían sido transportadas en primavera durante el deshielo y que mostraban la fuerza del agua: me preguntaba cómo la misma agua que trasladaba rocas enormes podía transportar los diminutos granos de arena de las minúsculas playas que encontraba a veces en las márgenes. Nada era más divertido que colocar pequeños obstáculos y desviar la corriente hacia donde quería, o represarla; poder controlar una fuerza tan grande me daba una sensación al mismo tiempo de poder y de paz.

Este interés me encaminó, años después, hacia los estudios de Ingeniería Hidráulica, y el destino me llevó a trabajar en una empresa que me permitió continuar “jugando con el agua” en el campo, a cielo abierto. Así, pude volver a mirar, tocar, meter las manos en ella, algo que no hubiese podido hacer si me inclinaba por la hidráulica en tuberías, donde el objeto de estudio, el agua, está encerrada, oculta, lejos.

No fueron solamente mis estudios universitarios y mi trabajo en Maccaferri lo que me permitió aprender a trabajar en los ríos y con ellos, sino el haber podido capitalizar las experiencias de decenas de ingenieros que conocí en toda América Latina. Desde mi primer viaje a América Central, en los primeros años de la década de 1980, conseguí confrontar mis teorías con sus experiencias; una de las primeras preguntas que me hicieron fue sobre espigones y, más precisamente, cuándo debían éstos estar inclinados aguas arriba y cuándo aguas abajo. Mi respuesta estuvo basada en el sentido común, pero coincidió con sus experiencias de campo, lo cual me dio más confianza en mí mismo a la vez que me ayudó a aprender a interrogarme, a cuestionar lo que sabía y a comparar mis convicciones basadas en estudio con las observaciones fundadas en la práctica

mía y en la de otros. Algunas de las valiosas informaciones que recopilé en todos estos años forman parte de este manual.

Quiero agradecer a todos estos ingenieros que me ayudaron a enriquecer mi experiencia, lo cual fue muy provechoso para las decisiones que tuve que tomar posteriormente y que evitaron incurrir en demasiados errores en el transcurso de estos años.

De la misma forma, quiero agradecer la colaboración del Ing. Javier Herrera Hernández, de Maccaferri de Argentina, y del Ing. José Roberto Costa, de Maccaferri do Brasil, que me ayudaron en la recolección de las informaciones que usé para este texto y en su revisión.

La finalidad de esta publicación es divulgar las aplicaciones más usuales en el campo de la estabilización, regularización, protección contra la erosión y control de las inundaciones en los cursos de agua naturales y la manera de dimensionarlas.

Para estos fines, en general son usadas obras continuas, como muros de encauzamiento, diques longitudinales y revestimientos de las márgenes; pueden asimismo ser utilizadas obras discontinuas, tales como espigones, soleras y diques transversales.

Esta publicación está dedicada básicamente a las obras entendidas como protecciones directas de las márgenes erosionables cuya finalidad es la protección y estabilización de las márgenes, el control del trazado del río y la protección contra inundaciones.

En general, son usados revestimientos, muros de contención, diques longitudinales y espigones, que se diferencian por ejercer -los primeros- su función de protección, y son directamente colocados sobre las márgenes oportunamente perfiladas, siempre que estas sean geotécnicamente estables; los segundos cumplen al mismo tiempo la función de protección y -si las márgenes son geotécnicamente inestables- la de contención; los terceros crean una nueva margen alejada de aquella existente y los últimos protegen o recuperan márgenes erosionadas y, eventualmente, centralizan la corriente profundizando así la parte central del curso de agua.

HISTORIA DE LOS GAVIONES

El personaje principal de este libro será el gavión, por ser una de las estructuras más usadas en los cursos de agua desde hace miles de años.

La obra de gaviones más antigua de la que se tenga conocimiento fue encontrada en la antigua ciudad de Caral, en el valle del río Supe, ubicado al norte de Lima, en Perú. En las excavaciones para traer a la luz esta antigua ciudad fueron encontrados los restos de gaviones manufacturados en malla trenzada de fibra vegetal rellenos con piedras, llamados “shicras” (Fig. 1.1).

Estas ruinas son datadas en 2.627 a. C, época contemporánea a la civilización egipcia (las Pirámides de Egipto datan de 2.600-2.480 a.C.). Casualmente, se han encontrado menciones del uso de manufacturados similares a los gaviones modernos en el alto río Nilo, con la diferencia de en este caso fueron usados cestos de mimbre rellenos con piedras de pequeño tamaño en lugar de la malla de fibra vegetal trenzada.

El uso de piedras como material de relleno se justifica por el hecho de que el concepto del gavión es crear una estructura de elevado peso que pueda soportar la presión del agua. En aquella época, eran usadas pequeñas piedras porque, con la tecnología disponible en ese entonces, mover piedras pesadas era extremadamente complicado.

Hay también alusión al uso de gaviones en obras civiles en Europa durante la Edad Media y el Renacimiento, en la construcción de fundaciones de edificios. Su uso es mencionado asimismo en el siglo XIX, esta vez usados para crear defensivos militares (Fig. 1.2).

Fue en el invierno entre 1892 y 1893 que nació en Italia el gavión metálico, producido por una empresa local llamada Maccaferri Raffaele – Officina da Fabbro, cuando fue usado en la primera obra de gran porte la recuperación de la margen izquierda del río Reno en Casalecchio, cerca de la ciudad de Bolog-

na, Italia. A partir de esta obra empezó la difusión del gavión, hasta llegar a la primera patente, que se remonta a 1915 (Figs. 1.3 A-C). La utilización del gavión se difundió así a otros países y continentes. Las características que hacen a los

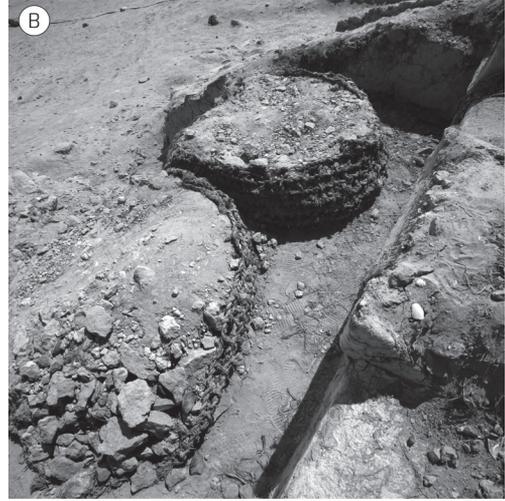


Fig. 1.1 (A) Red de fibras vegetales conteniendo piedras (shicras), (B) shicras del edificio de las cornisas, (C) arqueólogos y shicras
Fuente: Sitio arqueológico de Caral.



Fig. 1.2 Defensivos con gaviones de mimbre en Fort Sedgwick ("Fort Hell"), en Petersburg, Virginia (EE.UU.)
Fuente: <http://civilwartalk.com>.

CONFEDERAZIONE SVIZZERA

UFFICIO FEDERALE DELLA  PROPRIETÀ INTELLETTUALE

ESPOSIZIONE DELL' INVENZIONE

N° 68616 10 ottobre 1913, ore 5 p. Classe 5 a

BREVETTO PRINCIPALE

Gaetano MACCAFERRI, Zola Predosa (Italia).

Scatola di tessuto metallico per opere di difesa idraulica.

L'oggetto dell'invenzione consiste in una scatola di tessuto metallico, la quale è formata, sia per esempio in fabbrica o sul posto stesso ove si costruisce l'opera di difesa idraulica, con la piegatura delle parti d'un pezzo di tessuto metallico sagomato. La scatola è destinata a contenere una gettata di materiale lapideo o cementizio, e tale che un certo numero di queste scatole riunite fra loro possa costituire l'ossatura di un'opera di difesa idraulica. La scatola può essere munita di flangie o mancante del coprchio e di una parete, o del solo coprchio o di una sola parete, oppure la scatola può essere anche completa munita di un coprchio che si può chiudere quando nella scatola sia stata eseguita la gettata.

La forma della scatola può essere generalmente parallelepipedica, per altro, per sopprimere a certi bisogni, per esempio nelle curve di un manufatto, tale forma può variare, e si può sagomare il pezzo di tessuto metallico, in modo che la scatola resulti a forma di tronco di piramide o di altra figura geometrica.

Come si comprende facilmente, collocando le scatole ottenute, piegando ciascun pezzo di tessuto metallico, l'una accanto all'altra e l'una sopra all'altra, il fondo, o il coprchio, o una parete, o una flangia di una scatola può fare da coprchio o da fondo o da parete alla scatola vicina, e la continuità dell'ossatura dell'opera di difesa idraulica che si ottiene riempiendo le scatole di materiale lapideo o cementizio, può essere completa pure essendo eliminate le doppie pareti.

Le scatole così ottenute, quando risultano munite di flangie opportunamente disposte, possono essere anche collocate ad una certa distanza l'una dall'altra. Le rispettive flangie possono venire allora a racchiudere senz'altro un certo spazio nel quale può essere eseguita la gettata.

Quando occorre le pareti di ogni scatola possono essere legate fra loro lungo gli spigoli che si formano quando si eseguiscono le piegature del pezzo di tessuto metallico, e ciò per mezzo di legature di filo di ferro o simile, o, quando le parti del pezzo di tessuto metallico vengono ripiegate in fabbrica, quegli

Pubblicato il 1° aprile 1915



Fig. 1.3 Primera patente del gavión metálico (A), fotos históricas de Italia en 1910 (B) y 1923 (C), y en Etiopía en 1937 (D)

gaviones extremadamente adecuados para obras hidráulicas serán examinadas en detalle en el Cap. 4.

Al difundirse el concepto del gavión, la empresa Maccaferri fue perfeccionando sus características: cambió la forma de la malla (de cuadrada a hexagonal), la cantidad de revestimiento de zinc del alambre (de pocas decenas de gramos por m² de superficie del mismo hasta las actuales centenas de gramos) y la composición del revestimiento (de simple zinc a una aleación de zinc y aluminio); introdujo el revestimiento plástico y modificó la forma de la estructura, desarrollando el gavión caja, el colchón Reno® (así llamado en honor al río donde se hizo la primera obra con gavión metálico arriba mencionada), el gavión saco, el sistema

Terramesh® y Terramesh® Verde, etc.. De la misma forma, amplió su utilización descubriendo siempre nuevas aplicaciones. Paralelamente, para cerciorarse y poder garantizar las bondades de estas mejoras y desarrollos, a partir de la segunda mitad del siglo pasado ha venido realizando investigaciones junto con laboratorios y universidades de todo el mundo, como será mostrado en el Cap. 7.

1.1 Las primeras obras fluviales significativas

A continuación, serán descritas dos de las primeras obras realizadas en Italia con gaviones metálicos producidos por la empresa Maccaferri, inventora del gavión actual. Entre los años 1893 y 1895, se realizó, como ya fue mencionado, la que constituyó indiscutiblemente la primera obra; la segunda, en 1951, fue una obra de emergencia que tuvo mucha repercusión en aquel entonces en todo el país.

1.1.1 El cierre de la margen del río Reno

El 1º de octubre de 1893, graves daños fueron provocados por las aguas del río Reno durante una crecida a lo largo de sus márgenes entre Casalecchio y Bologna.

La caída de un puente provocó la interrupción de la línea ferroviaria entre las ciudades de Bologna, Piacenza y San Felice (Fig. 1.4).

En las proximidades de la obra de toma de Casalecchio el agua derribó el dique de contención en la margen izquierda. El río cambió su curso dejando en seco la bocatoma del *Canale di Reno*. Por largos meses, todas las fábricas que usaban la energía hidráulica producida por el agua del canal de derivación tuvieron que interrumpir la producción, dejando sin trabajo a un gran número de obreros. La gran obra de cierre de la rotura fue realizada en los años 1894-1895 gracias a los gaviones Maccaferri.

La construcción de la obra empezó así que el río, al bajar, dejó en seco el cauce y el muro de cierre que había sido derribado, y duró varios meses. Las primeras intervenciones consistieron en la construcción de un espigón en la margen

izquierda y el cierre del dique (Fig. 1.5).

Las siguientes crecidas que se produjeron a lo largo del año destruyeron repetidas veces cuanto había sido construido dejando nuevamente la bocatoma en seco.

Fueron entonces reconstruidos, esta vez con gaviones, el espigón, la prolongación del dique existente que cerró la brecha y el muro de contención derribado. Las fotos de la época muestran la construcción, así como la fiesta de los trabajadores al final de



Fig. 1.4 *Puente destruido, provocando la interrupción de una línea ferroviaria en Italia*

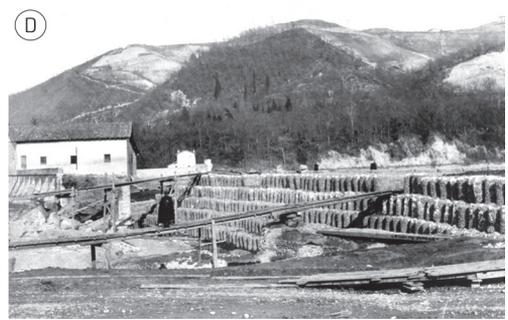
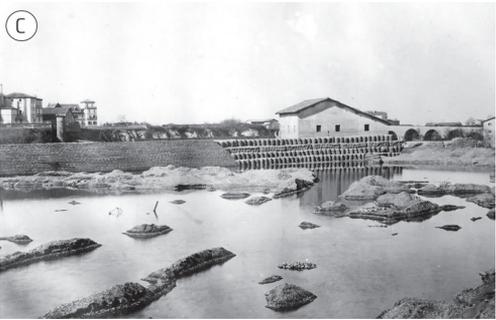
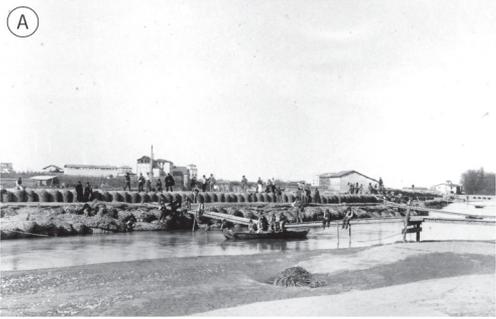


Fig. 1.5 (A) Espigón, (B) vista interna del espigón, (C) cierre de la brecha y (D) vista aguas abajo del dique



Fig. 1.6 (A) Obra durante la construcción y (B) almuerzo durante los festejos



Fig. 1.7 (A) La obra en 2005 y (B) detalle del gavión en el mismo año

la obra (Fig. 1.6). El mismo lugar es presentado en la Fig. 1.7, con un detalle de los gaviones que aún existen y están en buenas condiciones. Como se puede observar en las fotos, en ese entonces los gaviones eran muy diferentes de los usados actualmente: la galvanización del alambre era muy pobre, la forma de la malla era rectangular y el gavión era cilíndrico.

1.1.2 El cierre de la brecha del dique lateral del río Pò en Occhiobello

El río Pò, el más largo de Italia, corre en su delta confinado entre diques. En el mes de noviembre de 1951, una crecida excepcional rompió los diques longitudinales en tres puntos (Fig. 1.8) causando 84 víctimas y dejando más de 180.000 personas sin hogar.

La crecida del río en la región de Occhiobello, a tan solo unos 70 km de su desembocadura, fue particularmente intensa debido a una serie de eventos concomitantes:

- **Meteorológico:** la lluvia cayó en toda la cuenca y en ambos márgenes con una distribución espacio-temporal que hizo coincidir en el cauce principal el pico de crecida de los diferentes afluentes; el fuerte viento que soplaba del sudeste provocó un crecimiento de 20-30 cm del nivel en la margen izquierda, donde se sitúa el pueblo, con relación a la margen opuesta.
- **Topográficos:** la existencia de dos puentes contiguos, inmediatamente aguas abajo de esta área, que, debido al gran número de pilas y al consecuente estrechamiento del río, provocaron un remanso y el ulterior aumento del nivel del agua.
- **Astronómico:** la alta marea -de 1,51 msnm- del mar Adriático en la desembocadura del río Pò, que redujo la capacidad de desaguar en el mar y consecuentemente la velocidad del flujo.
- **Estructural:** en algunos trechos la altura del dique izquierdo era más baja que la que había sido prevista.
- **Temporal:** las tres brechas que se produjeron ese día fueron contemporáneas (en menos de media hora), lo cual no permitió que la reducción del nivel del agua provocado por la primera brecha evitara las otras dos.

El ancho total de las tres brechas fue de 736 m. El caudal que pasó por las tres aberturas fue calculado entre 6.000 y 9.500 m³/s, de un total del río estimado en ese momento en 12.800 m³/s.

Después de 15 días, y cuando el flujo era aún de 3.200 m³/s, pudieron comenzar los trabajos de cierre, que fueron realizados por tres empresas, una para cada brecha, y fueron concluidos después de 37 días. Fueron usados más de 100.000 m³ de piedras; las de gran tamaño fueron lanzadas sueltas, mientras que las más

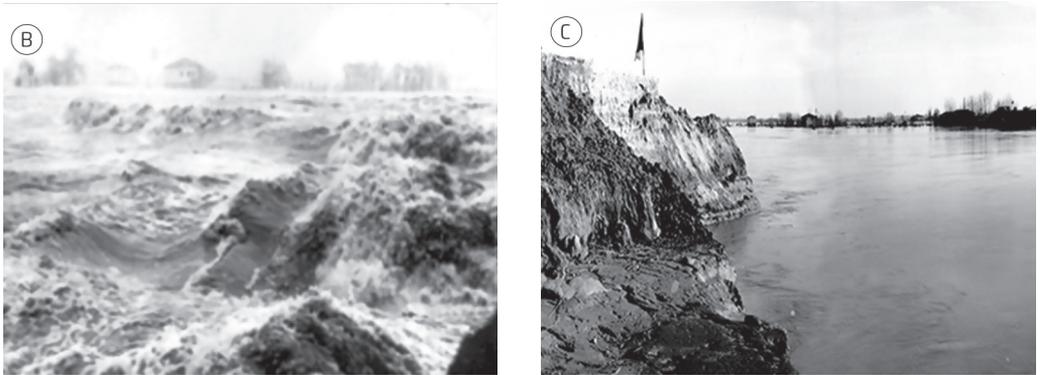
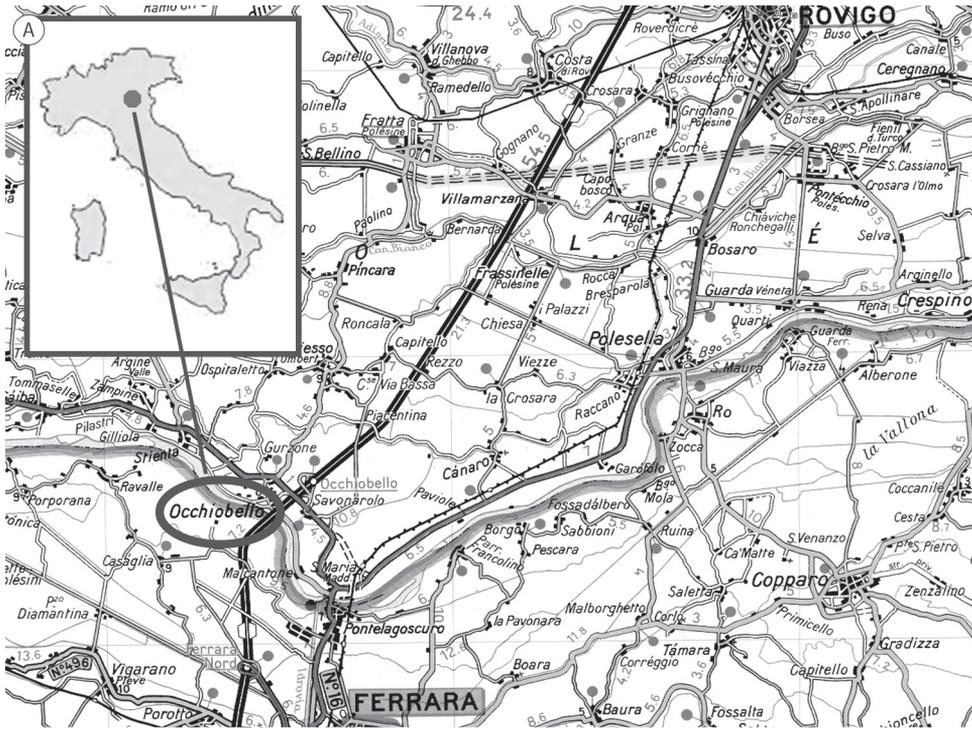


Fig. 1.8 (A) Localización del río Pò, (B) una de las brechas durante la crecida y (C) luego de la crecida

chicas, que debido al menor peso habrían sido llevadas por la corriente, fueron usadas para llenar los gaviones saco cuyo peso unitario superaba la tonelada (Fig. 1.9). Una vez cerradas las brechas y terminada la emergencia, fue realizado el coronamiento, esta vez usando gaviones tipo caja (Fig. 1.10). En total, fueron usados más de 350.000 m³ de gaviones. Desde entonces, los diques cumplen cabalmente su función protegiendo los poblados y terrenos aledaños (Fig. 1.11).

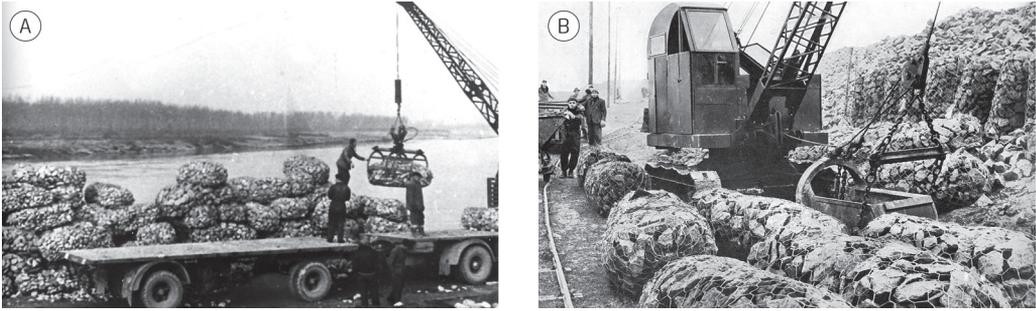


Fig. 1.9 (A) Transporte de los gaviones saco y (B) gaviones saco usados para el cierre de las brechas

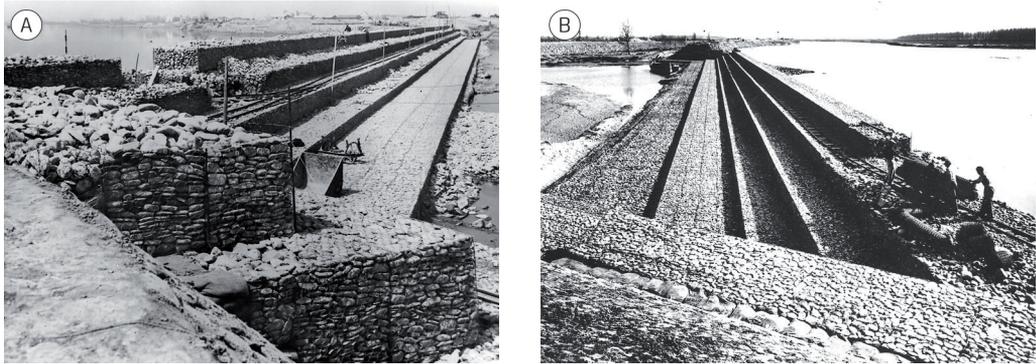


Fig. 1.10 (A) Terminado el cierre con los gaviones saco y (B) la sobreelevación con gaviones caja

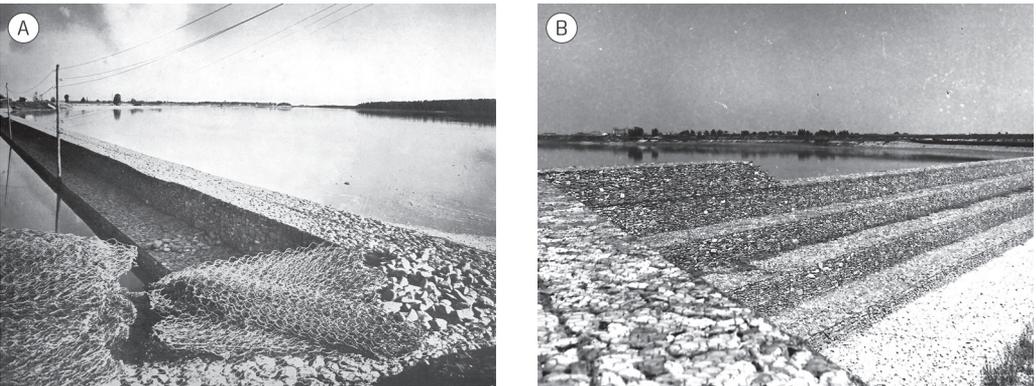


Fig. 1.11 (A-B) Obra en fase de conclusión



Fig. 1.11 (cont.) (C-D) Después de 3 años y 7 años respectivamente; (E-F) obra después de muchos años

2

LA MORFOLOGÍA FLUVIAL

La morfología fluvial es estudiada en la rama de la hidráulica fluvial que investiga la formación, evolución y estabilización de los cursos de agua naturales, considerando además su configuración en planta, sus secciones transversales, su pendiente y sus características en general.

Usualmente, las informaciones usadas para desarrollar teorías de cálculo para el estudio de estos aspectos corresponden, en su gran mayoría, a canales ideales rectos, con secciones transversales y caudal constantes; por el contrario, la realidad nos confronta con ríos cuyas características se alejan significativamente de estas informaciones, por lo cual es necesario interpretarlas a partir de las diferencias entre la teoría y el caso examinado.

Es entonces importante identificar la situación del río en examen clasificándolo según su edad, el desarrollo del cauce, el material que lo constituye, la constancia de la escorrentía, la conformación del cauce, la forma en planta y la geometría del mismo.

2.1 Clasificación de los cursos de agua

2.1.1 Según la edad

- **Ríos jóvenes:** esta fase se concentra en la parte superior, aguas arriba; en general está ubicada en una región montañosa, con pendientes longitudinales altas y secciones transversales encajonadas en “V”, gran número de caídas y rápidos (en general ríos de montaña o torrentes). El río es muy irregular y, habitualmente, está en fase de erosión, en especial en el fondo. La granulometría del material que constituye el fondo varía, por lo general, de fina a gruesa, con desvío estándar $\sigma > 3$.
- **Ríos maduros:** esta segunda fase se verifica generalmente en su parte central, en valles amplios, y su pendiente longitudinal es relativamente baja. La topografía es más plana y los perfiles longitudinales graduales sin caídas o rápidos, en equilibrio dinámico.

- Ríos viejos o seniles: en esta última etapa, en el tramo final, el río corre en valles amplios cuyo ancho es 15 a 20 veces el ancho del cauce y presenta un gran potencial para la sedimentación en el fondo. La pendiente longitudinal es muy baja. La erosión se verifica especialmente en las márgenes. Pueden presentar diques naturales a lo largo de las orillas y zonas pantanosas en los alrededores. La topografía de los valles es plana por representar la sedimentación tendiendo al achatamiento. La granulometría del material que constituye el fondo es en general uniforme, con $\sigma < 3$.

2.1.2 Según el desarrollo del estado del cauce

En general, los cursos de agua naturales pueden ser divididos en tres partes.

- La parte alta de la cuenca, o curso superior, es caracterizada por:
 - ⌘ Alta pendiente y velocidades elevadas
 - ⌘ Sedimentos bien graduados desde arcillas hasta grandes bloques
 - ⌘ Fuerte tendencia erosiva, valle encajonado y cauce rectilíneo
 - ⌘ Gran variación de las descargas líquidas y sólidas
 - ⌘ Aguas limpias durante la época seca y turbias en la época de lluvias
 - ⌘ Intenso transporte de detritos con variadas dimensiones (*debris flow*)
- La parte media de la cuenca, o curso medio, es caracterizada por:
 - ⌘ Media pendiente y velocidades medias menores que en el tramo alto
 - ⌘ Sinuosidad moderada
 - ⌘ Excavación de las márgenes
 - ⌘ Mayores caudales, menores velocidades y formación de bancos o islas
 - ⌘ Presencia de niveles de base
 - ⌘ Formación de cono de deyección en el caso de valle ancho
 - ⌘ Menor intensidad de lluvias
 - ⌘ Área de transferencia de sedimentos
- La parte baja de la cuenca, o curso inferior, es caracterizada por:
 - ⌘ Baja pendiente longitudinal y baja velocidad
 - ⌘ Reducida acción erosiva, limitada por la proximidad altimétrica del nivel de base

Según Lojtin, los cursos de agua se pueden dividir en lo que se refiere al desarrollo del estado del cauce (Tab. 2.1).

Tab. 2.1 Clasificación de un curso de agua propuesta por Lojtin

Tipo de cauce	d_m/S_o	Fr
Alta montaña	> 10	> 1
Montaña	> 7	0,7 a 1
Faldas de montaña	> 6	0,45 a 0,7
Intermedio	> 5	0,2 a 0,45
Planicie (cauce arenoso)		
Río caudaloso	> 2	0,14 a 0,44
Río poco caudaloso	> 1	0,44 a 0,55

donde:

d_m = diámetro medio de las partículas constituyentes del fondo (m);

S_o = pendiente hidráulica (m/m);

Fr = número de Froude.

2.1.3 Según el material constituyente del cauce

En función del material que constituye el cauce, los cursos de agua se pueden dividir en:

- *Cohesivos*: el material que constituye el cauce es predominantemente arcilloso.
- *No cohesivos*: el cauce es constituido por material suelto. Dependiendo del tamaño del material, puede ser clasificado como:
 - ≈ *Material grueso*: bolones y cantos rodados con $d_m > 64$ mm.
 - ≈ *Material medio*: grava y arenas con $64 \text{ mm} > d_m > 2$ mm.
 - ≈ *Material fino*: arenas con $2 \text{ mm} > d_m > 0,062$ mm.
- *Acorazados*: debido a la granulometría del fondo extendida ($\sigma > 3$), puede ocurrir el arrastre de los granos menores. Las partículas restantes mayores forman entonces una capa protectora o coraza en la parte superior y protegen las partículas menores por debajo evitando su acarreo.
- *Bien graduados o con granulometría extendida*: la granulometría del fondo es extendida ($\sigma > 3$), con gran variedad de tamaños.
- *Mal graduados o con granulometría uniforme*: la granulometría del fondo es más pareja ($\sigma < 3$), siguiendo una distribución lognormal o logarítmica.

2.1.4 Según la constancia de la escorrentía

En función de la constancia de la escorrentía, los cursos de agua se pueden dividir en:

- *Perennes*: el agua corre todo el tiempo, el agua subterránea alimenta constantemente el río y la capa freática no desciende nunca debajo del fondo del cauce.
- *Intermitentes*: el agua corre solamente en la estación lluviosa y el cauce se seca durante el período seco. La capa freática se mantiene por arriba del nivel del fondo del cauce en la estación lluviosa. Durante el período seco el río se mantiene seco a menos que ocurran fuertes lluvias.
- *Efímeros*: la escorrentía está presente solamente durante o inmediatamente después de las lluvias. La capa freática queda siempre por debajo de la cota del fondo del cauce, por lo tanto el curso de agua no es alimentado por las aguas subterráneas.

2.1.5 Según la conformación del cauce

En función de la conformación del cauce pueden ser divididos en:

- *Aluviales*: son aquellos cuyos cauces son formados por materiales granulares transportados por el propio río en el pasado geológico.
- *Rocosos*: en estos ríos el cauce es conformado por material rocoso, en general poco erosionable, y tiende a controlar las características del canal.
- *Torrenciales*: son caracterizados por pendientes de entre 1,5% y 6%, mientras que la pendiente de los torrentes es superior al 6%.

2.1.6 Según el trazado

En función de la conformación de la forma en planta de su cauce pueden ser divididos en:

- **Rectos:** poseen una sinuosidad muy baja en una distancia por lo general inferior a 10 veces el ancho medio de los mismos (Fig. 2.1). El fondo del cauce puede ser sinuoso con partes más profundas (pozos) alternadas con partes menos profundas donde la corriente tiene mayor velocidad. El flujo y los modelos deposicionales son similares a los de los cauces meándricos. Pueden mudar su posición debido a acrecimiento lateral. Las erosiones se localizan en correspondencia con los pozos y las sedimentaciones ocurren en playones y barras en los lados del canal. Los cauces rectos en general no son comunes y existen sólo en distancias cortas; es probable encontrar tramos rectos de longitud notable en caso de que el curso de agua siga la traza de una falla muy definida.
- **Trenzados o entrelazados:** son caracterizados por corrientes que tienen grandes fluctuaciones en el flujo y en la carga de sedimentos, y se encuentran en general en las partes planas del río; es la morfología fluvial típica, que corresponde en general a un cauce muy ancho, compuesto por una multiplicidad de cauces menores entrelazados o trenzados que forman islas sumergibles (Fig. 2.2). Los cauces menores son inestables en el sentido de que durante una avenida pueden fácilmente desplazarse y formar nuevos cauces. El entrelazamiento inicia después de una avenida, al bajar el nivel del agua, con la formación de barras sumergidas. Tales barras desvían las aguas a su alrededor y se convierten en zonas estables dentro del cauce. En los ríos intermitentes, que después de las avenidas descargan grandes volúmenes de sedimentos y tienen sus canales obstruidos, las barras pueden cambiar su

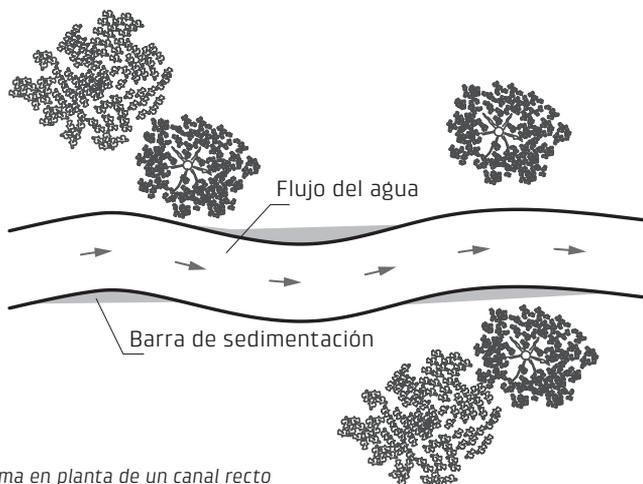


Fig. 2.1 Forma en planta de un canal recto

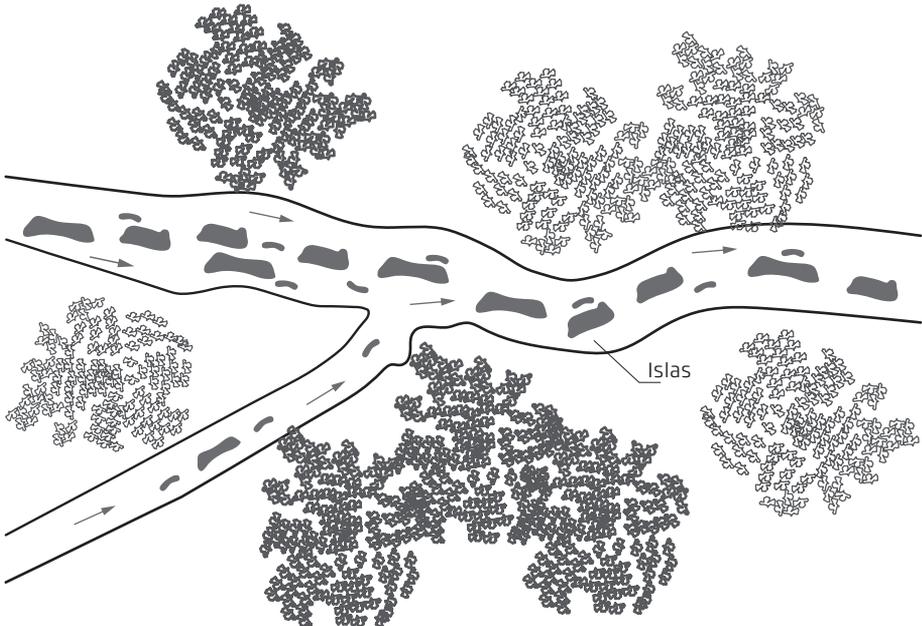


Fig. 2.2 Forma en planta de un canal trenzado

posición durante las avenidas al ser cortadas por nuevos cauces. Al producirse una reducción gradual en la velocidad del flujo, se inicia la sedimentación y se forman las islas con una gradación de abajo hacia arriba (material más grueso en la base y más fino hacia el tope). En los ríos perennes las barras también crecen por recrecimiento y llegan a ser semipermanentes, aunque pueden cambiar su forma durante una avenida grande.

- **Meandriformes o meándricos:** un río se puede definir como meándrico cuando su sinuosidad es mayor que 1,5, definiendo la sinuosidad (S) como la relación entre la longitud del cauce principal (L_r) y la del valle que drena (L_v); consecuentemente debe ser $S = L_r/L_v > 1,5$ (Fig. 2.3). Para algunos autores existe cierta relación entre el ancho de un cauce y la longitud del meandro, y entre el ancho del cauce y el radio de curvatura. La sinuosidad es característica de la parte plana del río, de baja pendiente. Tienen moderada carga de sedimentos y fluctuaciones moderadas en la descarga. Es la morfología fluvial que corresponde a un cauce sinuoso o con curvas acentuadas (meandros). El cauce es único, pero forma curvas y es acompañado por una asimetría en las secciones transversales, ya que la cota del fondo es más baja junto a la orilla cóncava (externa) y más baja junto a la orilla convexa (interna). La velocidad de la corriente es mayor a lo largo del talweg, donde es también mayor el transporte de sedimentos, especialmente el de material más grueso. Poseen depresiones o pozos bien definidos y barras de sedimentos unidas por rápidas. El transporte más activo de sedimentos ocurre duran-

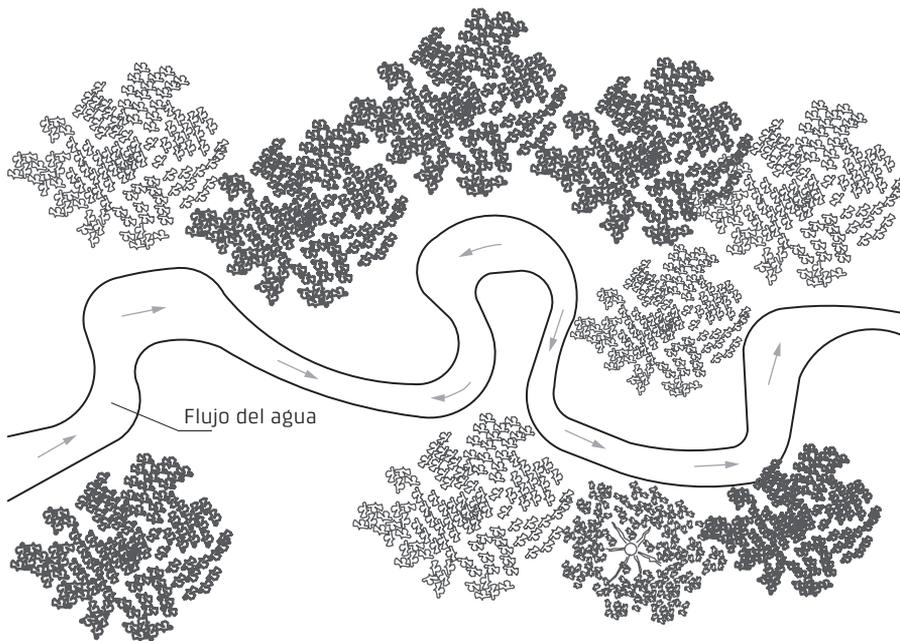


Fig. 2.3 Forma en planta de un canal meándrico

te las avenidas cuando también se producen las mayores erosiones en los márgenes. Las barras del meandro se desarrollan en las zonas internas de los mismos, al disminuir la crecida del río. Dichas barras son más conocidas como barras de punta y constituyen la principal característica de la sedimentación fluvial. Los mecanismos de creación de los meandros no son muy conocidos; la mayoría de los autores considera que el movimiento helicoidal del flujo es el factor más importante en el proceso de sedimentación en los meandros.

Características del cauce meándrico

- La sinuosidad de un río es una tendencia natural para alcanzar el menor trabajo en curva en terrenos no consolidados y de baja granulometría.
- Normalmente los tramos rectilíneos tienen longitudes máximas de diez veces el ancho del cauce.
- El esquema de flujo es típico en el meandro (Fig. 2.4).
- Por tendencia, el cauce puede desplazarse en cualquier posición posible dentro del valle a menos que un obstáculo lo impida.
- La sección es asimétrica y más profunda en el eje de la curva.
- La sección es simétrica y más rasa en la inflexión.
- La tendencia es de erosión en la parte cóncava y deposición en la parte convexa del meandro.

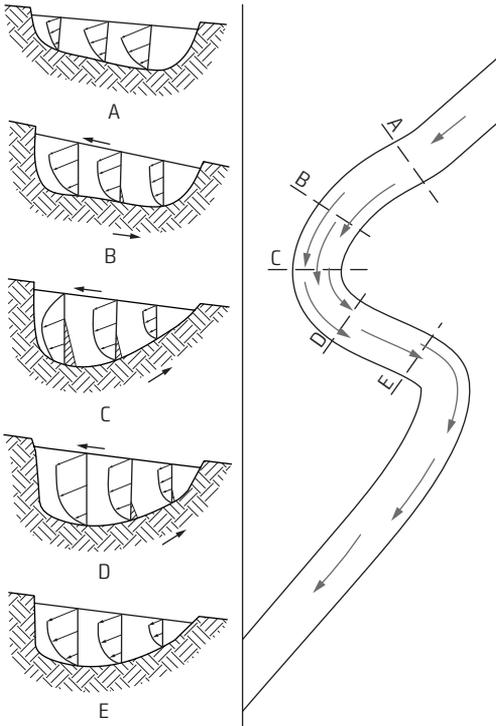


Fig. 2.4 Esquema del flujo en un meandro

- La corriente divaga continuamente de una margen hacia la otra.
- La formación de corrientes transversales, más acentuadas en los ápices de las curvas debido a la acción centrífuga, produce la elevación del nivel de agua, quedando así el nivel del agua más alto hacia la margen cóncava que hacia la convexa.
- Según Grashof, la sobreelevación D_z es dada por la ecuación:

$$D_z = 2,3 \frac{V^2}{g} \left(\frac{R_{conc}}{R_{conv}} \right) \quad (2.1)$$

donde:

V = velocidad media del flujo en la curva;

R_{conc} = radio de curvatura de la margen cóncava;

R_{conv} = radio de curvatura de la margen convexa.

- Si el río es muy ancho en el medio de la sección se conforma una barra.
- El meandro evoluciona (Fig. 2.5).

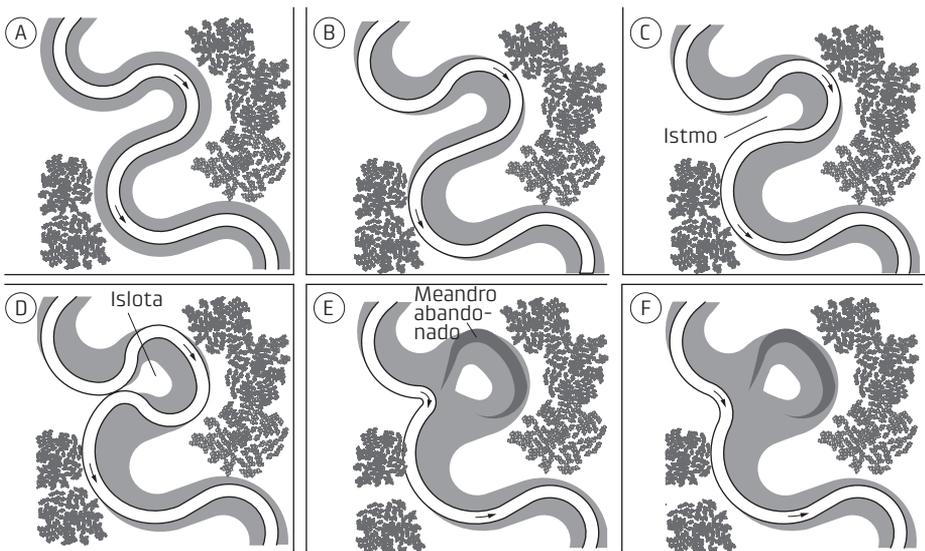


Fig. 2.5 Evolución del meandro

- L.B. Leopold y M.G. Wolman (1957-1960) sugirieron las siguientes relaciones empíricas:

$$\lambda = 11B^{1,01} \quad (2.2)$$

$$b^* = 2,7B^{1,1} \quad (2.3)$$

$$\lambda = 32,9Q^{0,55} \quad (2.4)$$

donde:

λ = longitud de onda del meandro;

b^* = ancho del meandro;

B = ancho del cauce;

Q = caudal dominante.

Características planialtimétricas de los cursos de agua de llanura aluvial

Leyes de Fargue

Derivan de estudios realizados a finales del siglo XIX e inicios del siglo XX en la llanura aluvial del río Garonne (Francia) con las siguientes características:

- Ancho medio de 100 a 150 m.
- Caudal medio de 275 m³/s y máximo de 4.450 m³/s.
- Meandros suaves con amplitudes de entre 150 m y 200 m.

Fargue enunció una serie de leyes empíricas verificadas como válidas para meandros regulares y que guían la implantación de obras de mejoramiento fluvial en las siguientes condiciones:

- El cauce del curso de agua está compuesto solamente por curvas.
- Las curvas se extienden a partir de puntos de inflexión (curvatura nula; tramos con curvaturas opuestas) o de surflexión (tramos de curvaturas diversas en el mismo sentido) hasta la siguiente.
- A cada punto de inflexión o surflexión corresponde una solera, punto de mínima profundidad.
- A cada vértice, punto de máxima curvatura, corresponde una fosa (punto de máxima profundidad relativa).

Las leyes de Fargue pueden así ser enunciadas:

1. *Ley del talweg*: la línea de máxima profundidad (talweg) a lo largo del curso de agua tiende a aproximarse a la margen cóncava y el material allí excavado es depositado en la margen convexa (Fig. 2.6).

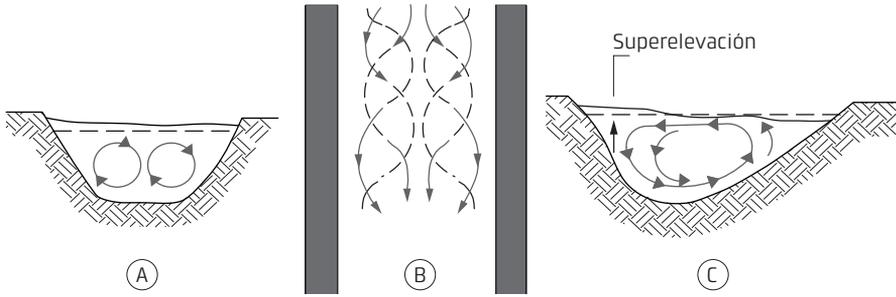


Fig. 2.6 Sección transversal del cauce en un meandro: (A) desarrollo de la corriente en una sección transversal media, (B) movimiento helicoidal del agua y (C) desarrollo de la corriente en una sección transversal asimétrica

2. Ley del desplazamiento: las profundidades máximas de las fosas en la margen cóncava y mínimas en las inflexiones corresponden a los vértices de las curvas e inflexiones, respectivamente, y son desplazadas ligeramente aguas abajo (aproximadamente $0,25B$) por efecto de la inercia (Fig. 2.7).
3. Ley de la fosa o del fondo: la profundidad del agua es tanto mayor cuanto mayor sea la curvatura en el talweg correspondiente (mayor efecto erosivo) (Fig. 2.8).

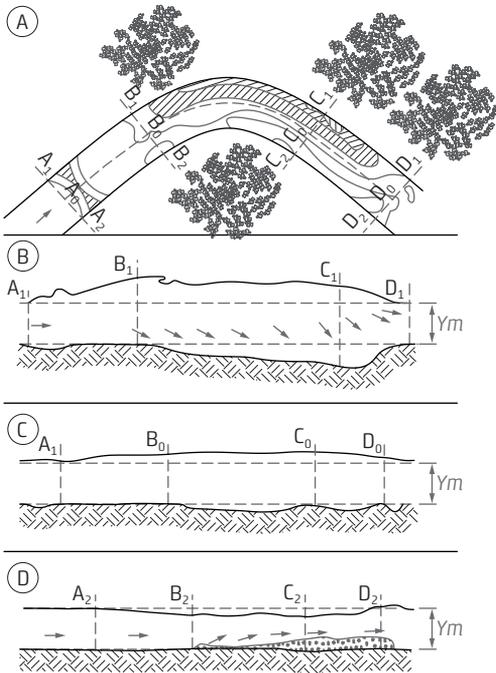


Fig. 2.7 Vista en planta (A) y secciones longitudinales de la margen izquierda (B), de la sección media (C) y de la margen derecha (D) del cauce en un meandro

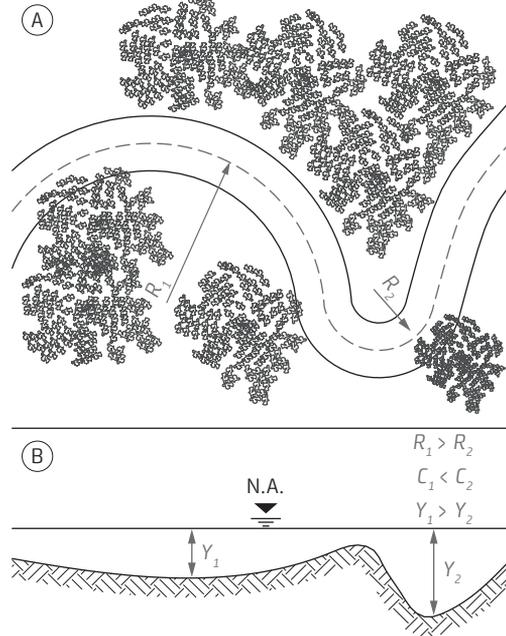


Fig. 2.8 Relación entre profundidad y curvatura en el talweg: (A) planta y (B) perfil

4. *Ley del desarrollo*: las leyes tienen validez para las curvas de desarrollo medio del curso de agua, es decir, ni muy largas ni muy cortas en relación con el ancho del canal ($3B < R_{talw} < 6B$ y $5B < \lambda < 11B$).
5. *Ley del ángulo*: en curvas con igual desarrollo de longitud del talweg, la profundidad media es mayor cuanto mayor es el ángulo externo de las tangentes (mayor efecto erosivo) (Fig. 2.9).

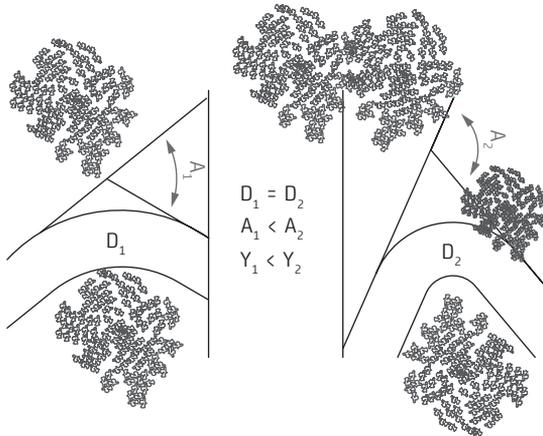


Fig. 2.9 Relación entre profundidad y radio externo

6. *Ley de la continuidad*: el perfil del fondo es regular cuando la curvatura varía continuamente y, como consecuencia, cualquier cambio brusco de la curvatura produce la reducción brusca de la profundidad (Fig. 2.10).
7. *Ley de la pendiente del fondo*: la variación de la curvatura es proporcional a la variación de la pendiente del fondo (Fig. 2.11).

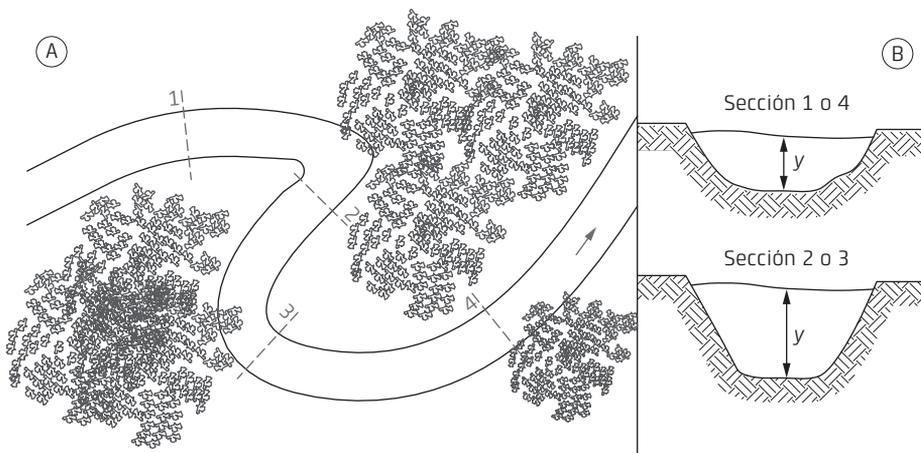


Fig. 2.10 Relación entre perfil del fondo y radio de la curva: (A) planta y (B) sección transversal

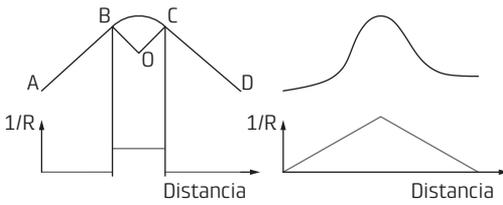


Fig. 2.11 Relación entre curvatura y pendiente longitudinal

En la Tabla 2.1 aparece un resumen de las principales características de los ríos para diferentes patrones de cauces.

Tabla 2.1 Principales características de los ríos para diferentes patrones de cauce

	Ancho uniforme – canal sinuoso	Barras de punta – canal sinuoso	Canales trenzados con barras de punta	Canales trenzados con barras de punta e islas - canales de drenaje
Forma del hidrograma	Las pendientes de las ramas ascendentes y descendentes del hidrograma son más empinadas que para los canales sinuosos con barras y más llanas que para los canales trenzados. Los canales que se alimentan con aguas subterráneas tienen curvas planas	La tasa de cambio de las pendientes de las ramas ascendentes y descendentes del hidrograma son menores que para los canales sinuosos de ancho uniforme y para los canales trenzados con barras de punta	Las ramas ascendentes y descendentes del hidrograma son muy empinadas, debido a la baja sinuosidad. Pendiente pronunciada y llanura de inundación angosta	La duración del pico del hidrograma es larga. Si el trenzado está asociado con pendientes pronunciadas, la tasa de ascenso y descenso del hidrograma puede ser empinada
Llanura de inundación	El canal puede formarse en una llanura de inundación ancha o angosta	Con este tipo de canal va siempre asociada una llanura de inundación ancha	Generalmente la llanura de inundación es angosta	La llanura de inundación puede ser angosta, si la pendiente del canal es empinada, y ancha si la pendiente es baja
Sinuosidad	Baja ($S < 1,5$), moderada ($1,5 < S < 2,0$) o alta ($S > 2$)	Moderada ($1,5 < S < 2,0$) o alta ($S > 2$)	Baja ($S < 1,5$) o moderada ($1,5 < S < 2,0$)	Baja ($S < 1,5$)
Forma de la vegetación	Se presenta un cinturón angosto de vegetación densa a lo largo de ambos márgenes del canal. El crecimiento de la vegetación, principalmente en el lado interior de las curvas del canal, está asociado con la alta sinuosidad	En la llanura de inundación se puede presentar una vegetación que va desde desestimable hasta muy densa	Cuando los canales tienen pendientes empinadas, el crecimiento de la vegetación es normalmente desestimable a lo largo de ambos márgenes del canal	La forma de vegetación que se encuentra es, generalmente, o bien densa a lo largo de las áreas de flujo o bien inexistente en zonas áridas

Tabla 2.1 (continuación)

	Ancho uniforme – canal sinuoso	Barras de punta – canal sinuoso	Canales trenzados con barras de punta	Canales trenzados con barras de punta e islas – canales de drenaje
Altura de las márgenes	Los bancos están formados por material cohesivo y resistente a la erosión. La altura de los bancos va desde baja hasta alta	Las márgenes son relativamente menos cohesivas que para el caso de canales sinuosos de ancho uniforme. Las alturas de las márgenes son de moderadas a altas	Las márgenes son menos cohesivas y pueden ser de bajas a moderadamente altas	Las márgenes son generalmente bajas y no cohesivas
Cauces antiguos (madreviejas)	Generalmente no se forman, a menos que la sinuosidad sea muy grande	Generalmente forman lagos en herradura (madreviejas)	El canal no forma madreviejas	No es de esperar la presencia de madre-viejas. No se forman los diques naturales
Formación de diques naturales	Las márgenes moderadas o altas están comúnmente asociadas con diques naturales	Comúnmente se presentan diques naturales en el lado cóncavo de las curvas	No se forman diques naturales por la acción del canal	No se forman diques naturales
Volutas de meandros	Las volutas concéntricas y regulares están asociadas con una alta sinuosidad. Los canales de baja sinuosidad están acompañados de volutas poco desarrolladas	Volutas de meandros regulares, concéntricas, y poco separadas están asociadas a este tipo de canal	Las volutas de meandros están ausentes o poco desarrolladas	Las volutas de meandros están casi siempre ausentes o muy pobremente desarrolladas
Trenzado	Trenzado ausente	Trenzado ausente	Trenzado de barras sencillas	Trenzado de barras o islas múltiples
Modo de transporte	Los sedimentos son transportados principalmente en suspensión y están constituidos tanto por el material de fondo como por los sedimentos lavados de llanuras de inundación	Los sedimentos son transportados en forma suspendida	El sedimento es transportado principalmente como carga de fondo	Si las pendientes son pronunciadas, el modo de transporte de sedimentos es similar al caso de los canales trenzados con barras de punta. Si las pendientes son suaves, el sedimento es transportado en forma suspendida.

En la Tabla 2.2 es presentada la clasificación de cauces aluviales según S.A. Schumm. Esta clasificación está fundamentalmente basada en la carga de sedimentos porque determina la estabilidad del cauce, el perfil y la sinuosidad.

Para la tabla de clasificación de cauces aluviales según Schumm, se definen tres clases de cauces: estables, con erosión y con depósito, y se establecen posteriormente tres subclases con base en el modo predominante del transporte de sedimentos, carga de fondo, carga mixta y carga en suspensión.

Tabla 2.2 Clasificación de cauces aluviales según Schumm, con relación a la carga de sedimentos y modo de transporte

Modo de transporte de sedimentos	M (%)	C ^x (%)	Estabilidad del cauce		
			Estable	En sedimentación (exceso de carga)	En erosión (deficiencia de carga)
Suspendida, carga del 85% al 100%	100	< 3	Relación ancho/profundidad < 7 $S > 2,1$ Pendiente del canal: moderada	La mayor sedimentación en los márgenes causa estrechamiento del cauce; la sedimentación en el fondo es menor al comienzo del proceso	Predomina la erosión en el fondo del lecho; el ensanche del cauce es menor al comienzo del proceso
Carga mixta, carga suspendida del 65% al 85%; carga de fondo del 15% al 35%.	30	3-11	25 > Relación ancho/profundidad > 7 $1,5 < S < 2,1$ Pendiente del canal: moderada	Al comienzo, mayor sedimentación en los márgenes y avanzado el proceso, en el lecho	Comienza por erosión del fondo, seguida por una ampliación del cauce
Carga de fondo, del 35% al 70%	0	> 11	Relación ancho/profundidad > 25 $1,0 < S < 1,5$	Sedimentación en el lecho y formación de islas	Poca erosión del fondo; predomina ensanchamiento del canal

donde:

M = porcentaje de limo/arcilla en el perímetro del cauce;

C^x = relación entre la carga de fondo y la carga total;

S = sinuosidad.

2.2 Equilibrio

El río es un organismo en continua evolución; raramente se encuentra en equilibrio. Es entonces necesario, antes de diseñar una intervención en su cauce, analizar su situación morfológica, su conformación, su evolución o estabilidad para poder tener un cuadro confiable de la situación y poder así tomar las decisiones correctas. En general, la finalidad de las obras realizadas en el cauce de un río puede ser la estabilización o el retorno al equilibrio, pero mucho más frecuentemente es la protección de un sector de la margen. En todos los casos, una vez definida la situación actual del curso de agua, será inicialmente necesario verificar cualitativamente las consecuencias que tendrá la intervención. Posteriormente, una vez identificadas las características de los materiales constituyentes del cauce (fondo y orillas) las consecuencias deberán ser cuantificadas. A continuación deberán ser definidos los grados de libertad del río y sus ecuaciones.