



SEMINARIO DE HIDRÁULICA DE PUENTES

Facultad de Ingeniería, Departamento de Hidráulica

21 de Octubre – Clase 3: Herramientas Actuales y Ejemplo



Ing. Adolfo Guitelman
Ing. Agustín Rigou



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

- INTRODUCCIÓN
 - Proyecto del Puente A° Morales
- HIDROLOGIA
 - Cuenca A° Morales
 - Precipitación-Hietograma-Hidrograma
 - QGIS: herramienta General
- HIDRAULICA
 - Presentación del HEC RAS
 - Elaboración del modelo (Carga de Datos - Coeficiente de Manning - Condiciones de Borde)
 - Resultados (Calibración - Perfiles – Velocidades – Mapas)
- EROSION
 - Contracción
 - Local en Pilas
 - Local en Estribos



Puente Sobre Arroyo Morales

El arroyo Morales es un curso de agua natural de llanura, que forma parte de la red hidrográfica del sur del Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA). Desemboca en el río Matanza-Riachuelo. Su cuenca se encuentra parcialmente urbanizada, con zonas de uso mixto (residencial, industrial y espacios verdes).

Características principales

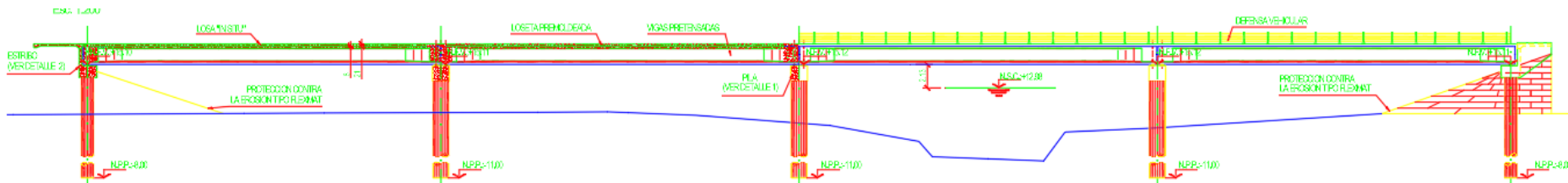
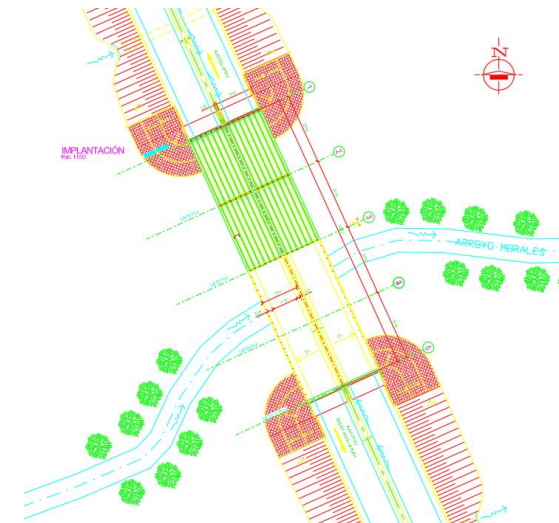
- Tipo de curso: Arroyo de llanura ($i=0.3\%-0.6\%$), con cauce sinuoso, pendiente suave y sección variable
- Régimen hidrológico: Pluvial. Su escurrimiento se activa principalmente por eventos de lluvia, con caudales bajos en condiciones normales y picos significativos durante tormentas.
- Área de la cuenca: 480km^2



Puente Sobre Arroyo Morales

- Ubicación: Au. Pres. Perón
- Luz: 120m
- Luz parcial entre pilas: 30m

- Pilas: 6 pilas circulares en fila
- Cruce: Perpendicular al Arroyo
- Fundación Pilotes: -11,00mts

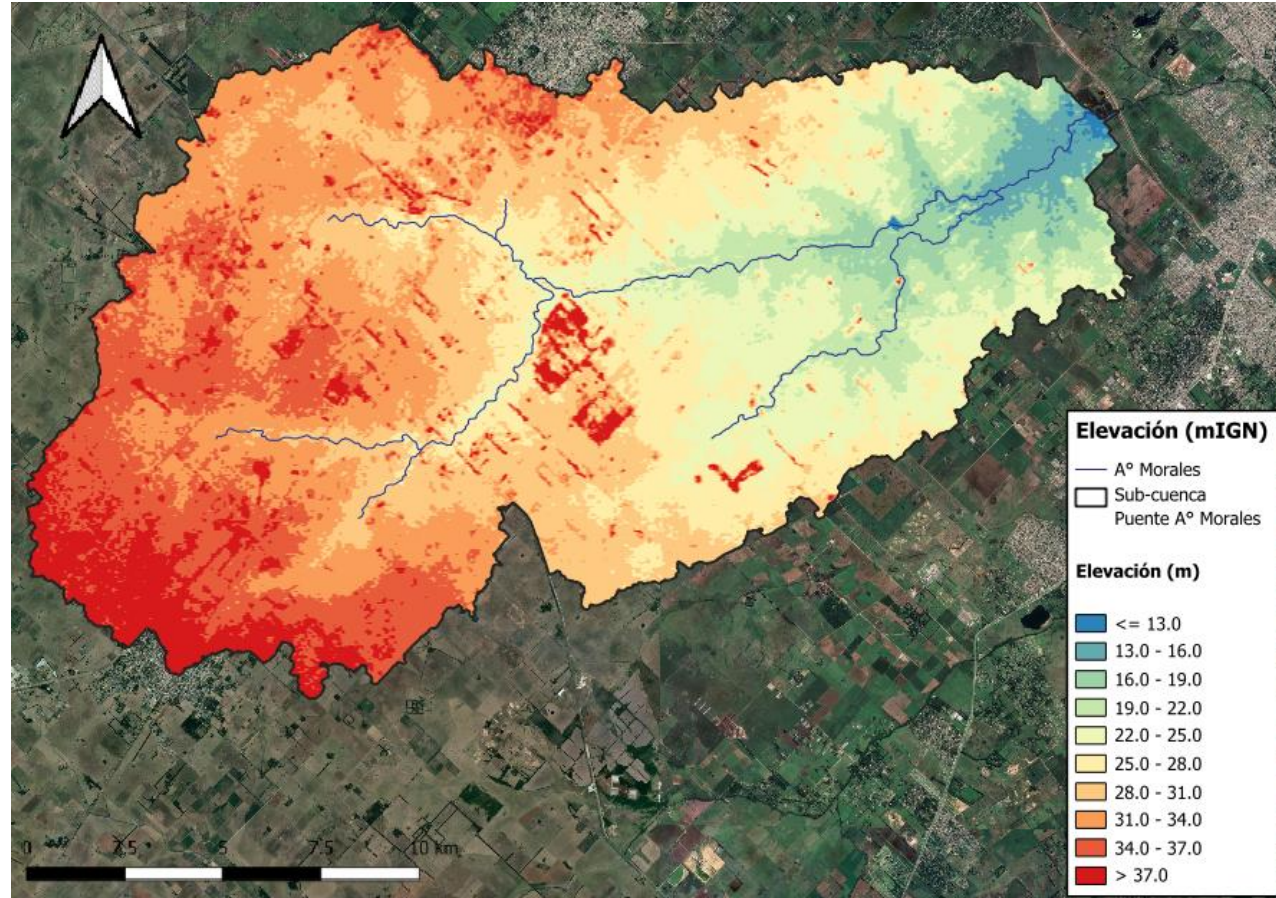


Información Base

- Topografía
- Batimetría
- Registro de precipitación / IDF

Disponible

- MDT IGN 5m/30m
- Registros de Precipitación EZEIZA
- Hidrograma de Estudios Previos





Análisis Hidrológico con QGIS

QGIS es un software libre y de código abierto para SIG. Permite trabajar con cartografía, topografía, uso del suelo, datos climáticos, etc. Es una herramienta clave para el **preprocesamiento geoespacial** de datos en estudios hidrológicos, y se puede usar para:

- Delimitación automática de **cuencas y subcuencas hidrográficas**.
- Generación de redes de **drenaje superficial**.
- Análisis de **pendientes, direcciones, acumulaciones de flujo**.
- Extracción de **perfiles topográficos** y líneas de flujo.
- Cálculo de **parámetros morfométricos** (longitud del cauce, pendiente media, forma de cuenca, tiempo de concentración).
- Preparación de capas de insumo para modelos como **HEC-HMS, SWMM, HEC-RAS**, etc.
- Integración de información climática, uso del suelo y curvas CN para estimar escorrentía.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

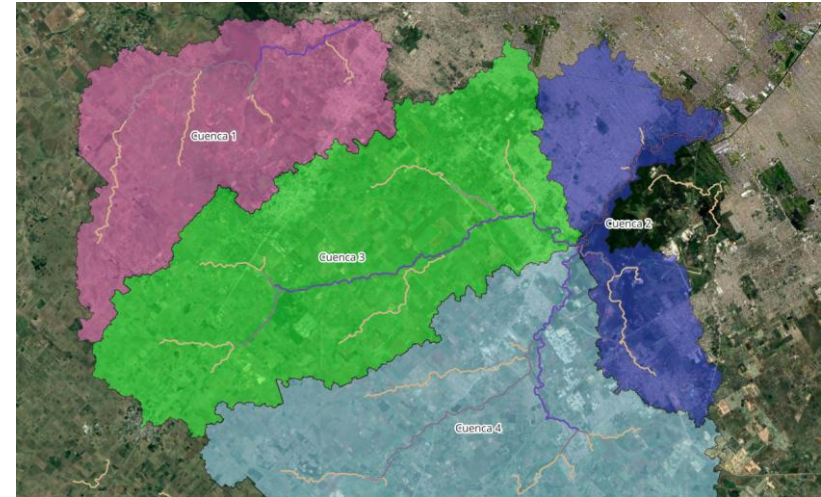
Complementos de QGIS

Motor	¿Para qué se usa?
SAGA GIS	Procesamiento de MDE: dirección de flujo, acumulación, redes de drenaje, delimitación de cuencas, mapas de pendiente, etc.
GRASS GIS	Herramientas avanzadas para análisis de cuencas, hidrología, erosión, suelos y manejo de grandes datasets ráster. Complementa a SAGA.

Herramienta	¿Para qué sirve?
Profile Tool	Extrae perfiles topográficos (elevación vs. distancia) a lo largo de líneas trazadas sobre un MDE. Muy útil para visualizar el relieve.
Watershed (SAGA o GRASS)	Delimita cuencas hidrográficas a partir de un MDE y un punto de salida. Genera la superficie de contribución (área drenante).
ArcGeek Calculator	Calculadora de geoprocésamiento para realizar análisis ráster personalizados, como combinaciones de capas, álgebra de mapas, etc.

Funciones

- Delimitación de cuencas y subcuencas
- Microcuencas de drenaje
- Cauces principales y secundarios
- Dirección del flujo
- Análisis morfológico de la cuenca:
- Longitud de cauce, Delta H, Tiempos de concentración etc.



Parameter	Value	Unit	Interpretation
Basin Area (A)	456.26	km ²	Medium-sized ...
Perimeter (P)	168.19	km	Basin perimeter
Basin Length (Lb)	48.4	km	Basin length
Basin Width (B)	9.43	km	Basin width
Relief (H)	60.88	m	Low relief, indic...
Mean Elevation	26.95	m a.s.l.	Average elevati...
Minimum Eleva...	2.45	m a.s.l.	Minimum eleva...
Maximum Eleva...	63.33	m a.s.l.	Maximum eleva...





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Fuente de Datos con Modelos Digitales de Elevación

Fuente	Nombre del MDE	Resolución	Enlace oficial
NASA / USGS	SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)	30 m / 90 m	https://earthexplorer.usgs.gov
JAXA	ALOS World 3D (AW3D30)	30 m	https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/
ESA	Copernicus DEM (GLO-30, GLO-90)	30 m / 90 m	https://spacedata.copernicus.eu (requiere cuenta gratuita)
NASA / METI	ASTER GDEM	30 m	https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp
Google Earth Engine / ESRS	Incluye SRTM, ASTER, etc.	Variable (~30 m)	https://earthengine.google.com
OpenTopography	MDEs globales y LIDAR	Variable (1 m a 30 m)	https://opentopography.org
ViewFinderPanoramas	Complemento SRTM en zonas de montaña	90 m (mejorado)	http://viewfinderpanoramas.org/dem3.html



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Fuente de Datos con Modelos Digitales de Elevación en Argentina

Institución	Producto	Resolución	Enlace oficial
IGN Argentina	MDE y MDT, cartas topográficas, curvas de nivel	5 m–30 m	ign.gob.ar – Datos Geoespaciales
IDERA	Repositorio federal de datos espaciales	Variable	idera.gob.ar
INA	MDE / Batimetría y capas hidrológicas	Variable	ina.gob.ar – Datos Hidrológicos



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

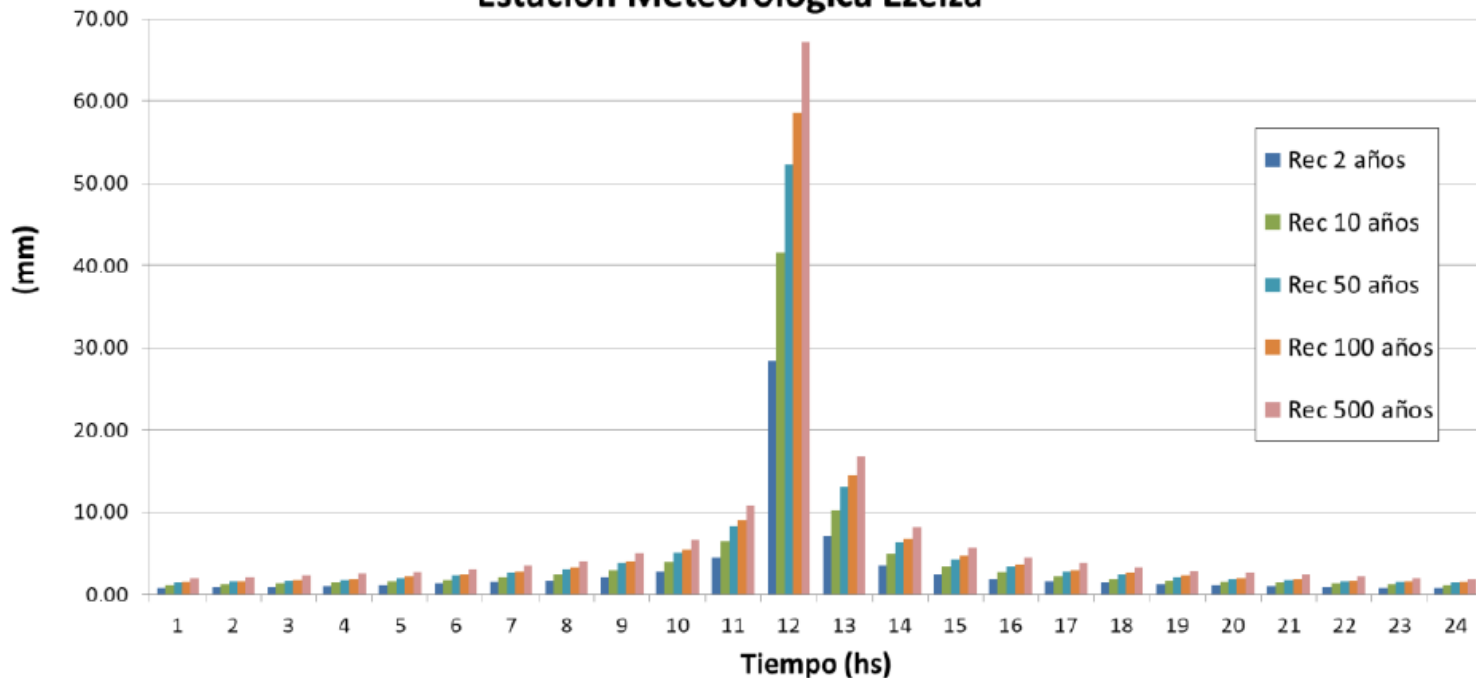
SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Cuenca Arroyo Morales

- Estación Ezeiza y Villa Ortuzar
- Periodo de duración : 24/36 /48/72 hs
- Periodo de Diseño: 10/25/50/100/200/500 años
- Método de Bloques Alternos

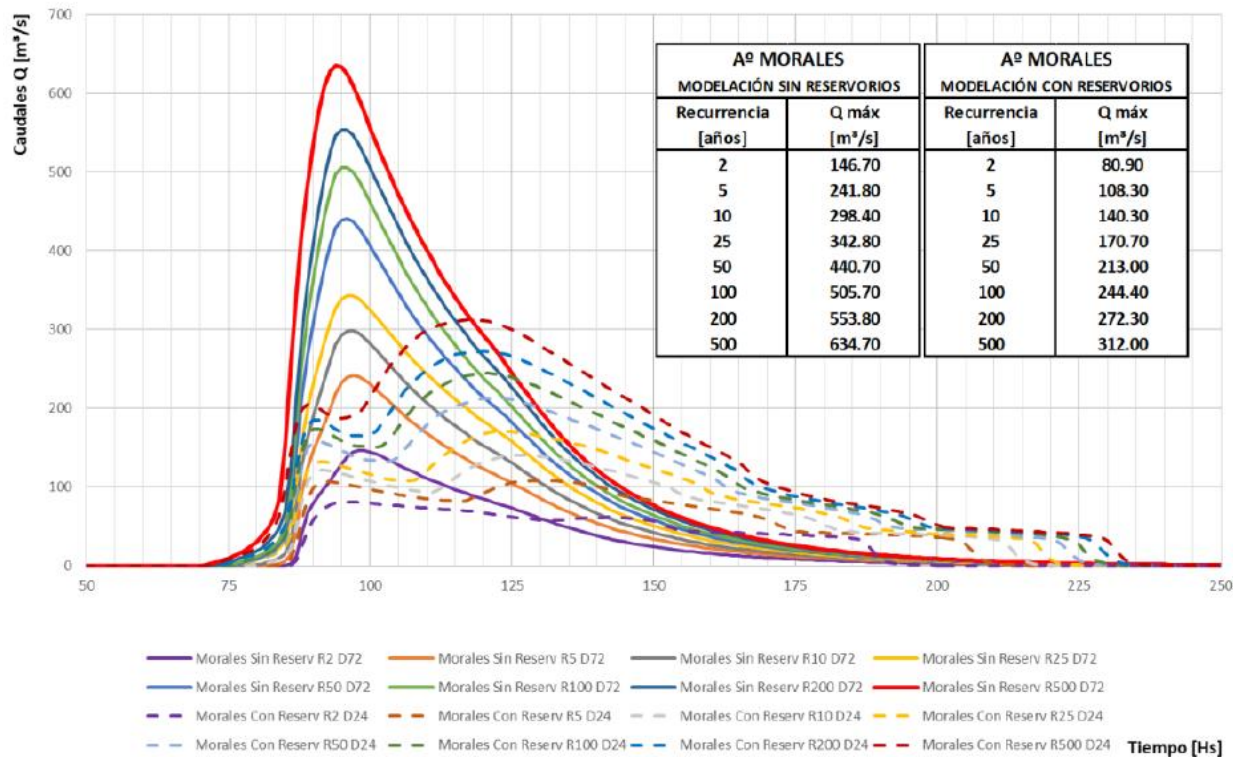
Hietogramas de diseño - Tormenta Sintética 24 hs
Estación Meteorológica Ezeiza



Cuenca Arroyo Morales

- Periodo de Diseño: 10/25/50/100/200/500 años
- Software HEC HMS
- Hidrograma Unitario de Clark
- Abstracciones : SCS
- Parámetros Principales: Tc, CN

Hidrogramas de Salida Cuenca Morales- Precipitaciones de D72 hs





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Estudio Hidráulico

Régimen Natural del Río sin el puente

- Tirante y líneas de energía
- Planicie de inundación
- Velocidades en la zona de emplazamiento
- Caudales de desborde
- Régimen normal vs crecida de diseño
- Erosión generalizada

Modificación del Cauce con el puente

- Nivel líquido y remanso
- Contracción de la sección
- Nueva planicie de inundación y zonas de afectación
- Variación en el perfil de velocidades
- Caudales de Sobrepasso del puente
- Riesgos de erosión en puente

Modelación en HEC RAS

- Introducción
- Capacidades (1D, 2D, calidad, erosión, RAS Mapper)
- Ecuaciones
- Carga de Datos
- Calibración
- Escenarios de simulación
- Resultados



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

HEC RAS

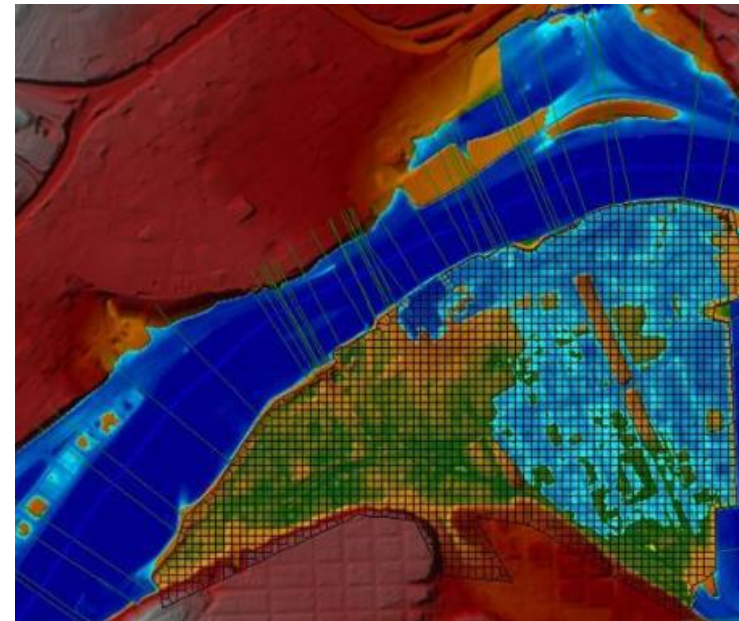
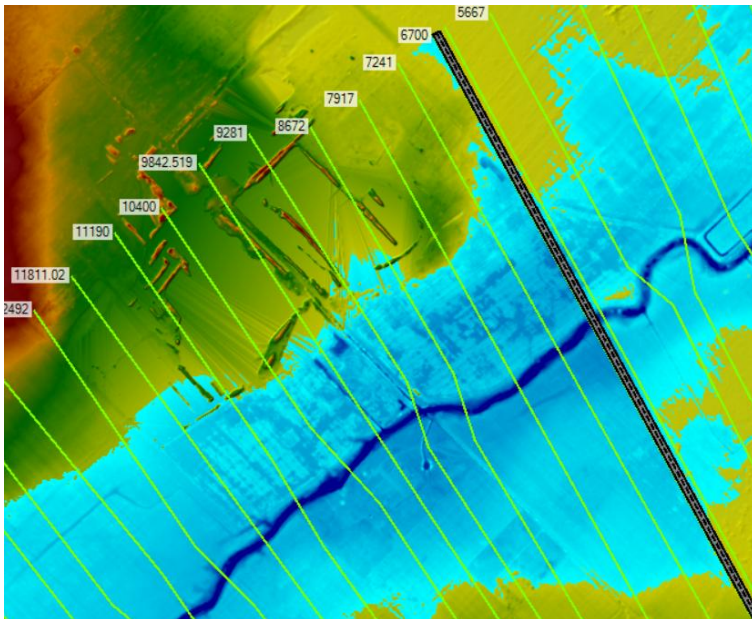
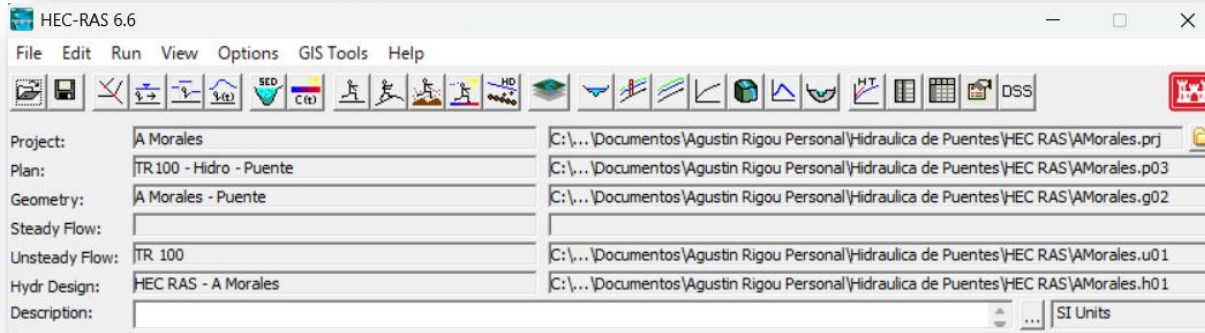
Army Corps of Engineers para la modelación hidráulica de cauces naturales y artificiales. Está diseñado para simular el flujo del agua en ríos, arroyos, canales y estructuras hidráulicas asociadas como puentes, alcantarillas y diques.

Permite realizar análisis tanto en **una dimensión (1D)** como en **dos dimensiones (2D)**:

- Flujo permanente y no permanente (transitorio) (1D y 2D)
- Comportamiento de estructuras hidráulicas (puentes, compuertas, alcantarillas) (1D y 2D)
- Transporte de Sedimentos (1D)
- Modelos de Calidad de Agua (1D)
- Evaluación de erosión en puentes (1D)
- Modelo Hidrológico lluvia-caudal (2D)
- Conductos Pluviales (nuevo)

RAS Mapper para la visualización espacial de resultados sobre modelos digitales del terreno (MDE/DEM), permitiendo trabajar de forma integrada con GIS (Sistemas de Información Geográfica).

HEC RAS



HEC RAS

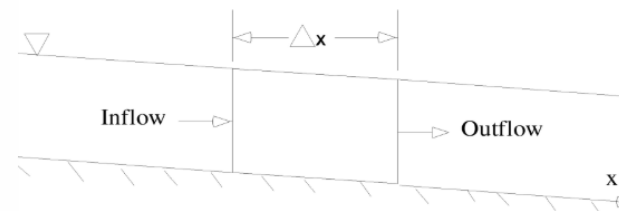
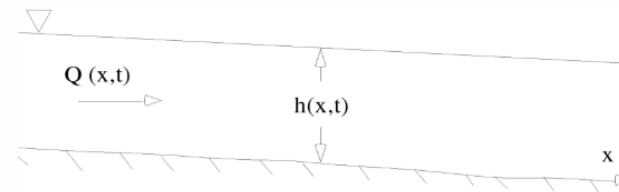
Cantidad de Movimiento: La conservación de momento para un volumen de control establece que la tasa neta de momento que ingresa al volumen (*flujo de momento*) más la suma de todas las fuerzas externas que actúan sobre dicho volumen es igual a la tasa de acumulación de momento. El flujo de momento es la masa de fluido multiplicada por el vector velocidad en la dirección del flujo.

Se considerarán tres fuerzas:

- **Presión**
- **Gravedad**
- **Fuerza de fricción.**

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(QV)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z_s}{\partial x} + S_f \right) = 0$$

Continuidad:
$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_t$$





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

HEC RAS

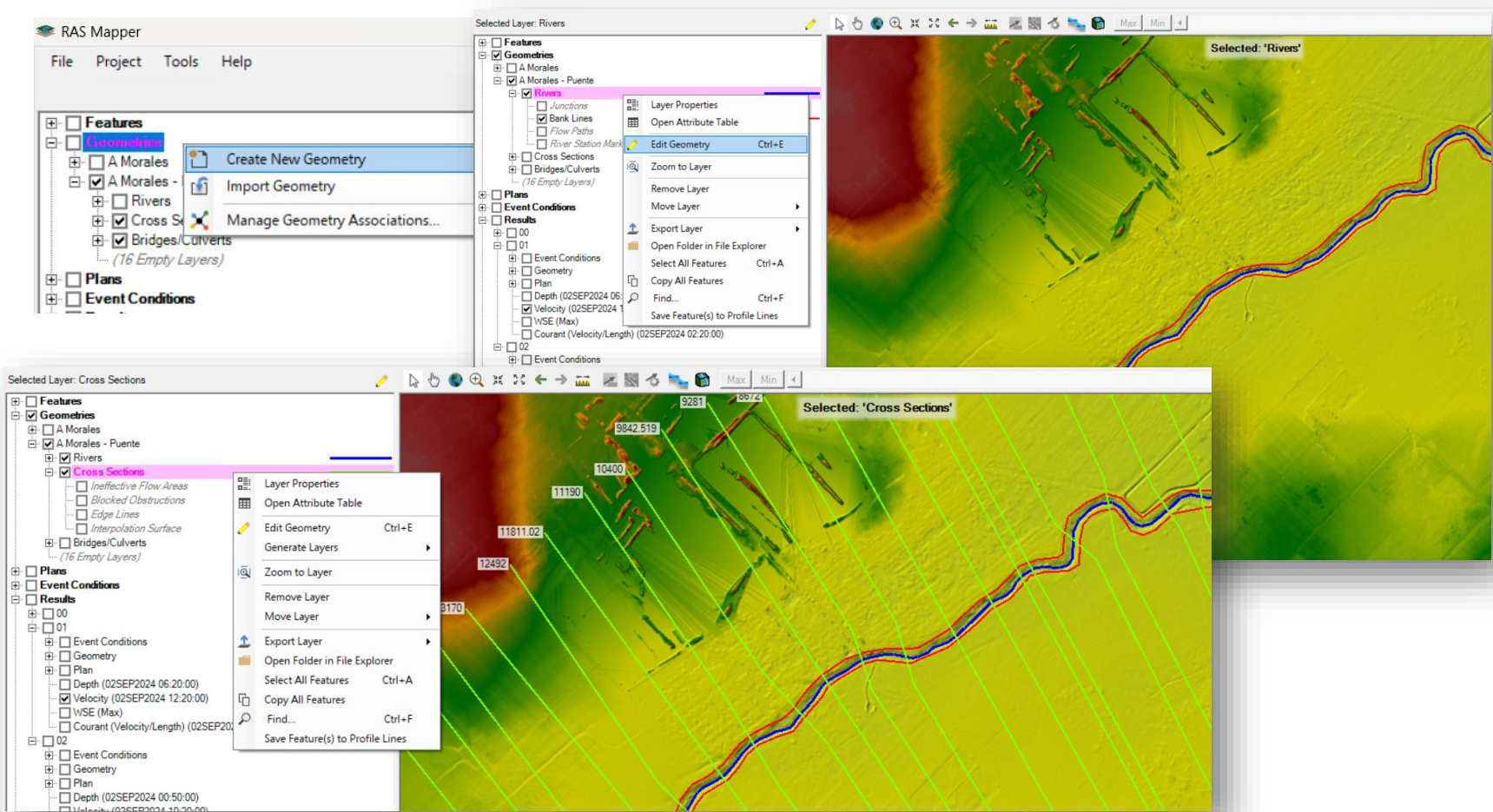
The image displays the HEC RAS Mapper software interface. The main window shows a topographic map with a river network. A 'Set Projection' dialog box is open, showing the 'Input Terrain Files' section with one file selected: 'mtd_1m_115-335-06.tif'. The 'Output Terrain File' section shows the filename 'C:\...Documentos\Agustin Rigou Personal\Hidraulica de Puentes\HEC RAS\Terrain\Terrain (1).hdf'. The 'RAS Mapper Options' dialog box is also open, showing the 'Coordinate Reference System' section with the following definition:

```
PROJCS["WGS_1984_Web_Mercator_Auxiliary_Sphere",GEOGCS["GCS_WGS_1984",DATUM["D_WGS_1984",SPHEROID["WGS_1984",6378137.0,298.257223563]],PRIMEM["Greenwich",0.0],UNIT["Degree",0.0174532925199433]],PROJECTION["Mercator_Auxiliary_Sphere"],PARAMETERS["Scale_Factor=1",False]]
```

The 'RAS Mapper' main window shows a project named 'A Morales - Puente'. The 'Features' list includes 'Rivers', 'Cross Sections', and 'Bridges/Culverts'. The 'Plans' list includes 'Depth (02SEP2024 06:20:00)', 'Velocity (02SEP2024 12:20:00)', and 'WSE (Max)'. The 'Map Layers' list includes 'Terrain', 'Terrain Modificado', and 'Modificaciones'. The 'RAS Mapper Options' dialog box is open, showing the 'Coordinate Reference System' section with the following definition:

HEC RAS

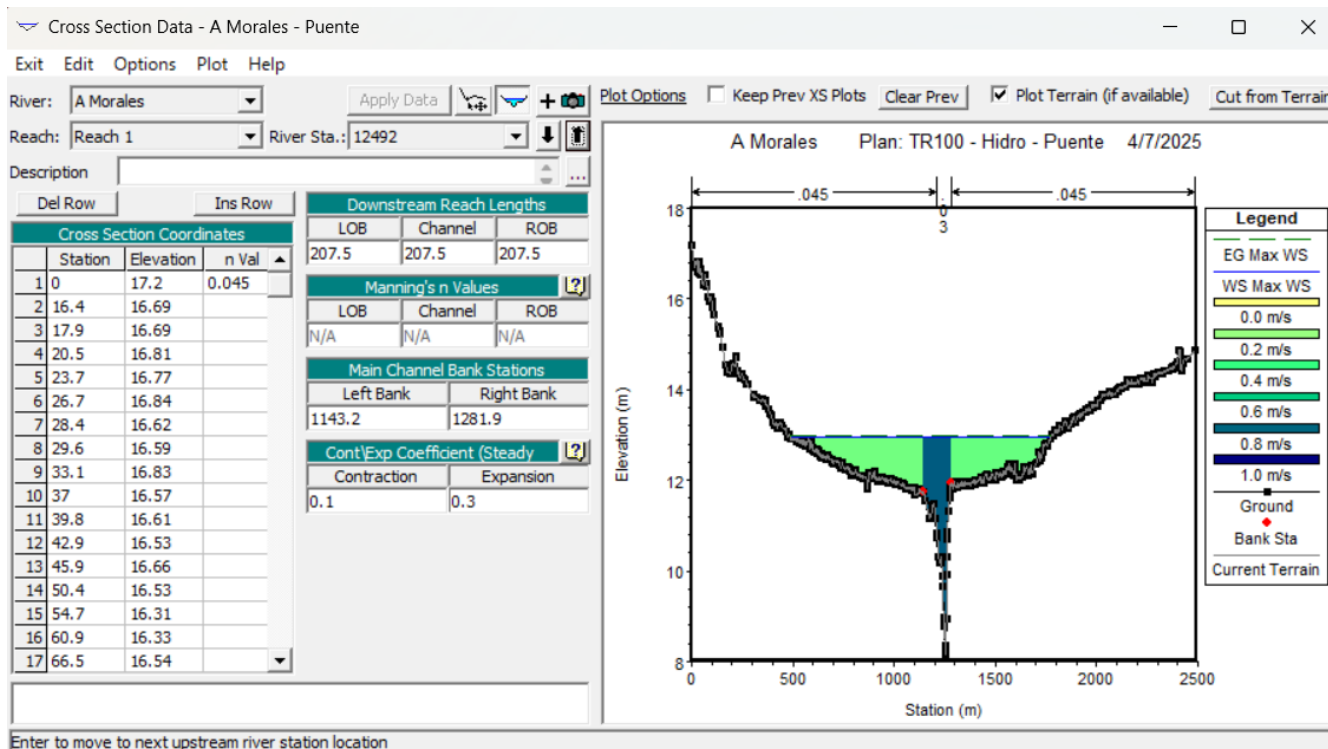
Crear la geometría del río a partir del terreno



HEC RAS

Cargar Geometría al HEC RAS y terminar de modificar desde ahí:

- Definición del Manning
- Datos del Puente





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

HEC RAS

Coeficiente de Manning

Tabla 5-6. Valores del coeficiente de rugosidad n (continuación)
(las cifras en **negritas** son los valores generalmente recomendados para el diseño)

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
C. Excavado o dragado			
a. En tierra, recto y uniforme			
1. Limpio, recientemente terminado	0.016	0.018	0.020
2. Limpio, después de exposición a la intemperie	0.018	0.022	0.025
3. Con gravas, sección uniforme, limpio	0.022	0.025	0.030
4. Con pastos cortos, algunas malezas	0.022	0.027	0.033
b. En tierra, serpenteante y lento			
1. Sin vegetación	0.023	0.025	0.030
2. Pastos, algunas malezas	0.025	0.030	0.033
3. Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos	0.030	0.035	0.040
4. Fondo en tierra con lados en piedra	0.028	0.030	0.035
5. Fondo pedregoso y bancas con malezas	0.025	0.035	0.040
6. Fondo en cantos rodados y lados limpios	0.030	0.040	0.050
c. Excavado con pala o dragado			
1. Sin vegetación	0.025	0.028	0.033
2. Matorrales ligeros en las bancas	0.035	0.050	0.060
d. Cortes en roca			
1. Lisos y uniformes	0.025	0.035	0.040
2. Afilados e irregulares	0.035	0.040	0.050
e. Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar			
1. Malezas densas, tan altas como la profundidad de flujo	0.050	0.080	0.120
2. Fondo limpio, matorrales en los lados	0.040	0.050	0.080
3. Igual, nivel máximo de flujo	0.045	0.070	0.110
4. Matorrales densos, nivel alto	0.080	0.100	0.140

Ven Te Chow
Valor básico del
valor de
rugosidad con
posibilidad de
agregar factores
de corrección



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

HEC RAS

Coeficiente de Manning

Factores de corrección

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m$$

- n_b : valor base según el material de fondo para un canal recto y uniforme
- n_1 : factor de corrección por el efecto de las irregularidades en el canal
- n_2 : factor de corrección según la irregularidad en la sección transversal y su tamaño
- n_3 : factor de corrección por obstrucciones
- n_4 : factor de corrección por vegetación y las condiciones del flujo.
- m : factor de corrección por meandros

Channel conditions		n value adjustment ¹	Example
Degree of irregularity (n_1)	Smooth	0.000	Compares to the smoothest channel attainable in a given bed material.
	Minor	0.001–0.005	Compares to carefully dredged channels in good condition but having slightly eroded or scoured side slopes.
	Moderate	0.006–0.010	Compares to dredged channels having moderate to considerable bed roughness and moderately sloughed or eroded side slopes.
	Severe	0.011–0.020	Badly sloughed or scalloped banks of natural streams; badly eroded or sloughed sides of canals or drainage channels; unshaped, jagged, and irregular surfaces of channels in rock.
Variation in channel cross section (n_2)	Gradual	0.000	Size and shape of channel cross sections change gradually.
	Alternating occasionally	0.001–0.005	Large and small cross sections alternate occasionally, or the main flow occasionally shifts from side to side owing to changes in cross-sectional shape.
	Alternating frequently	0.010–0.015	Large and small cross sections alternate frequently, or the main flow frequently shifts from side to side owing to changes in cross-sectional shape.
Effect of obstruction (n_3)	Negligible	0.000–0.004	A few scattered obstructions, which include debris deposits, stumps, exposed roots, logs, piers, or isolated boulders, that occupy less than 5 percent of the cross-sectional area.
	Minor	0.005–0.015	Obstructions occupy less than 15 percent of the cross-sectional area, and the spacing between obstructions is such that the sphere of influence around one obstruction does not extend to the sphere of influence around another obstruction. Smaller adjustments are used for curved smooth-surfaced objects than are used for sharp-edged angular objects.
	Appreciable	0.020–0.030	Obstructions occupy from 15 to 50 percent of the cross-sectional area, or the space between obstructions is small enough to cause the effects of several obstructions to be additive, thereby blocking an equivalent part of a cross section.
	Severe	0.040–0.050	Obstructions occupy more than 50 percent of the cross-sectional area, or the space between obstructions is small enough to cause turbulence across most of the cross section.
Amount of vegetation (n_4)	Small	0.002–0.010	Dense growths of flexible turf grass, such as Bermuda, or weeds growing where the average depth of flow is at least two times the height of the vegetation; supple tree seedlings such as willow, cottonwood, arrowweed, or saltcedar growing where the average depth of flow is at least three times the height of the vegetation.
	Medium	0.010–0.025	Turf grass growing where the average depth of flow is from one to two times the height of the vegetation; moderately dense stemmy grass, weeds, or tree seedlings growing where the average depth of flow is from two to three times the height of the vegetation; brushy, moderately dense vegetation, similar to 1- to 2-year-old willow trees in the dormant season, growing along the banks, and no significant vegetation is evident along the channel bottoms where the hydraulic radius exceeds 2 ft.
	Large	0.025–0.050	Turf grass growing where the average depth of flow is about equal to the height of the vegetation; 8- to 10-year-old willow or cottonwood trees intergrown with some weeds and brush (none of the vegetation in foliage) where the hydraulic radius exceeds 2 ft; bushy willows about 1 year old intergrown with some weeds along side slopes (all vegetation in full foliage), and no significant vegetation exists along channel bottoms where the hydraulic radius is greater than 2 ft.
	Very large	0.050–0.100	Turf grass growing where the average depth of flow is less than half the height of the vegetation; bushy willow trees about 1 year old intergrown with weeds along side slopes (all vegetation in full foliage), or dense cattails growing along channel bottom; trees intergrown with weeds and brush (all vegetation in full foliage).
Degree of meandering ² (m)	Minor	1.00	Ratio of the channel length to valley length is 1.0 to 1.2.
	Appreciable	1.15	Ratio of the channel length to valley length is 1.2 to 1.5.
	Severe	1.30	Ratio of the channel length to valley length is greater than 1.5.



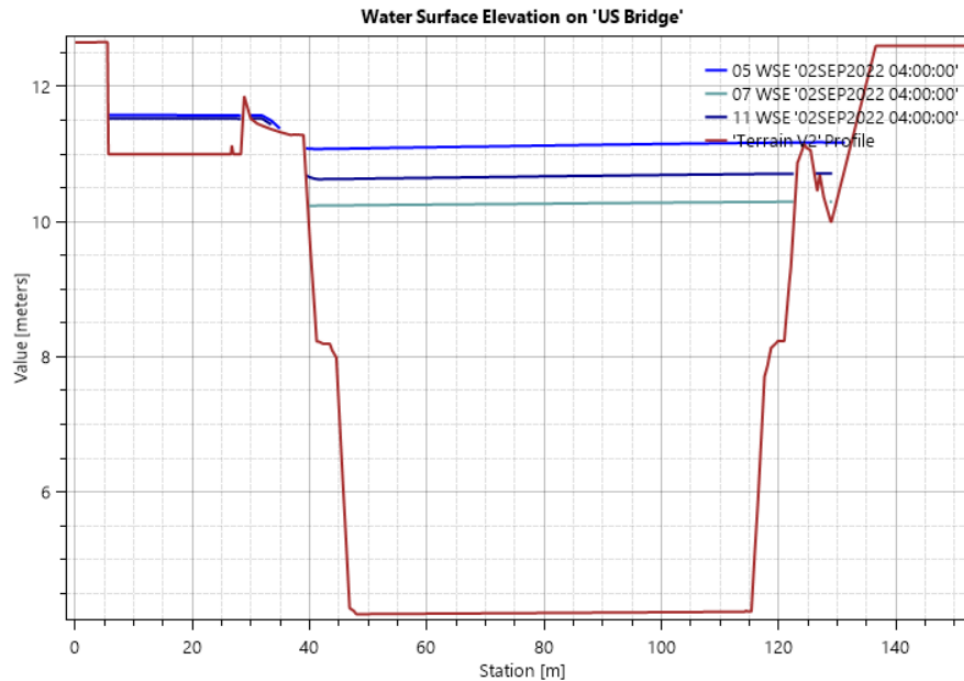
Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

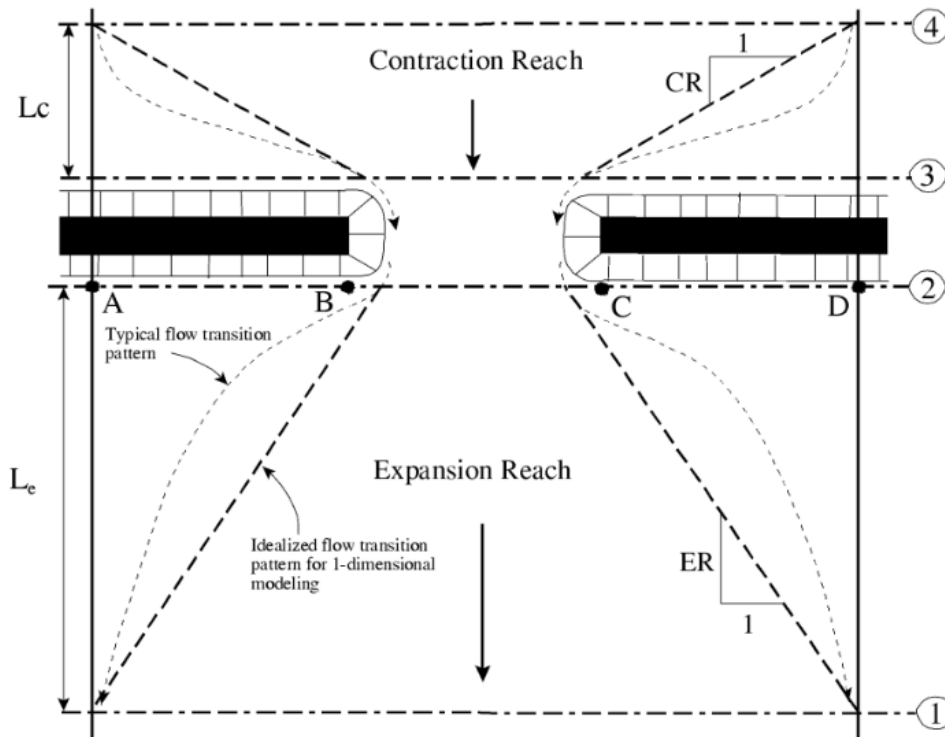
HIDRAULICA DE PUENTES

Análisis de sensibilidad del Coeficiente de Manning

Variable	n +25% (Simulación 05)	n (Simulación 11)	n -25% (Simulación 07)
h máx	11.16	10.70	10.29
V máx	3.72	3.98	4.20



Modelación del Puente

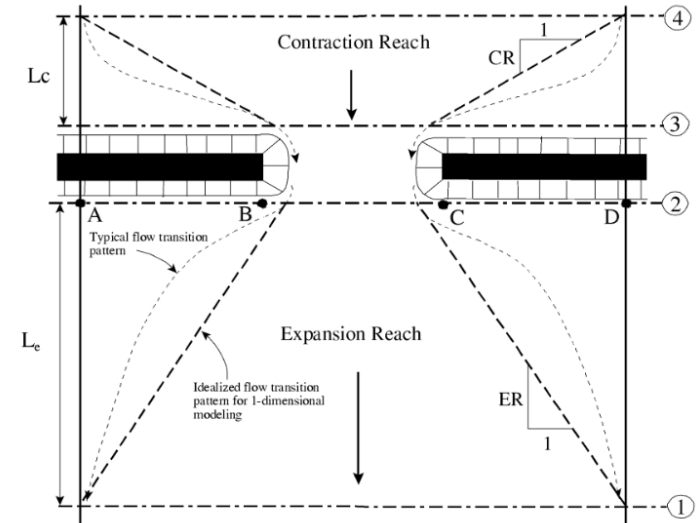


HEC-RAS calcula las pérdidas de energía causadas por estructuras como puentes y alcantarillas en tres partes.

1. Pérdidas inmediatamente **aguas abajo** de la estructura, donde generalmente se produce una expansión del flujo.
2. Pérdidas **en la estructura** misma, las cuales pueden modelarse mediante varios métodos diferentes.
3. Pérdidas inmediatamente **aguas arriba** de la estructura, donde el flujo generalmente se contrae para atravesar la abertura.

Modelación del Puente

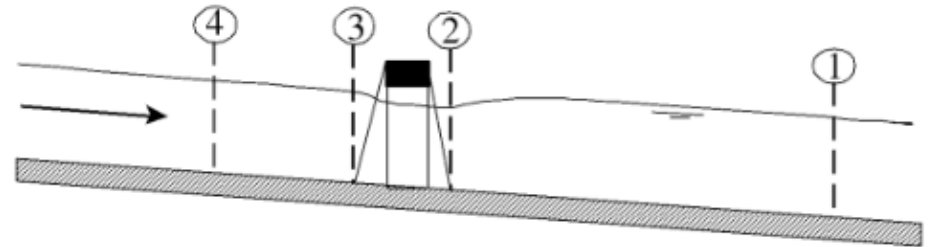
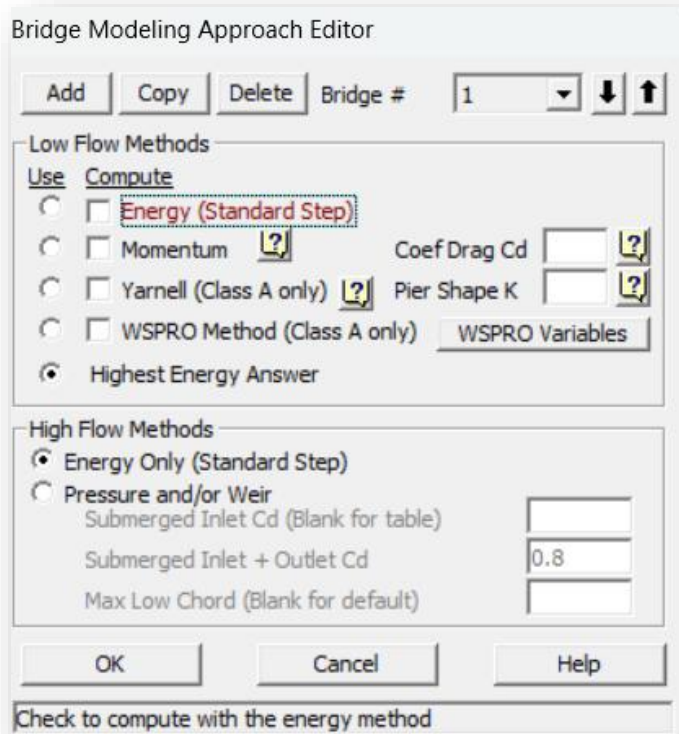
- ◆ **Sección 1** – Aguas abajo (flujo expandido):
 - Se ubica suficientemente alejada del puente, donde el flujo ya no está afectado por la estructura.
 - Refleja condiciones normales del cauce.
 - Se utiliza para calcular **pérdidas por expansión**.
 - Debe estimarse L_e (longitud de expansión).
- ◆ **Sección 2** – Justo aguas abajo del puente:
 - Ubicada cerca del pie del terraplén aguas abajo.
 - Representa el terreno natural justo antes del puente.
 - No debe colocarse justo contra la boca del puente.
 - Se usa para calcular **pérdidas locales** y conectar con la sección interna.
- ◆ **Sección 3** – Justo aguas arriba del puente:
 - Ubicada cerca del pie del terraplén aguas arriba.
 - Representa la zona donde inicia la contracción del flujo.
 - Se vincula con la sección interna para calcular **pérdidas de entrada**.
 - No debe colocarse pegada al tablero.
- ◆ **Sección 4** – Aguas arriba (flujo uniforme):
 - Ubicada más alejada aguas arriba, donde el flujo está plenamente desarrollado.
 - Representa el flujo en régimen permanente, sin influencia del puente.
 - Se utiliza para calcular **pérdidas por contracción**.
 - Debe estimarse L_c (longitud de contracción).



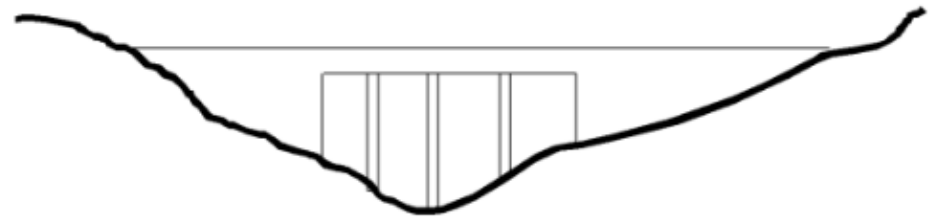


Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica SEMINARIO 2025 HIDRAULICA DE PUENTES

Modelación del Puente



A. Channel Profile and cross section locations



B. Bridge cross section on natural ground



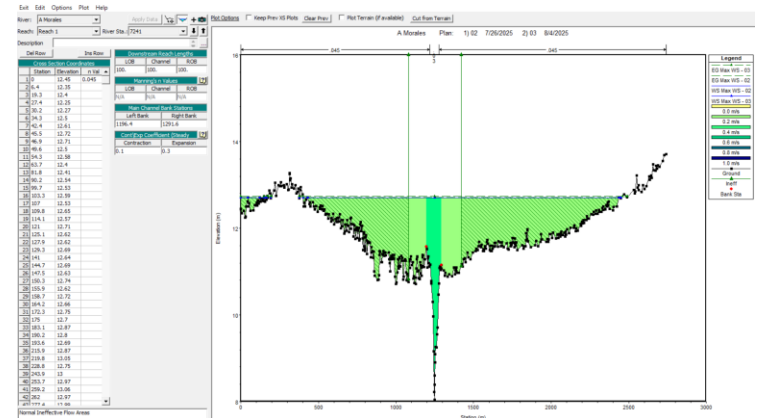
C. Portion of cross sections 2 & 3 that is ineffective for low flow

Puntos de Estancamiento

En **HEC-RAS 1D**, las *Ineffective Flow Areas* (IFAs) se utilizan para representar zonas dentro de la sección transversal donde el agua puede estar presente pero **no contribuye significativamente al flujo**.

Estas áreas suelen corresponder a sectores inundados con velocidades muy bajas o regiones detrás de taludes, estribos o diques donde se forman remolinos y el flujo no es perpendicular a la sección.

CONTRACCIÓN 1:1
EXPANSIÓN 1:2



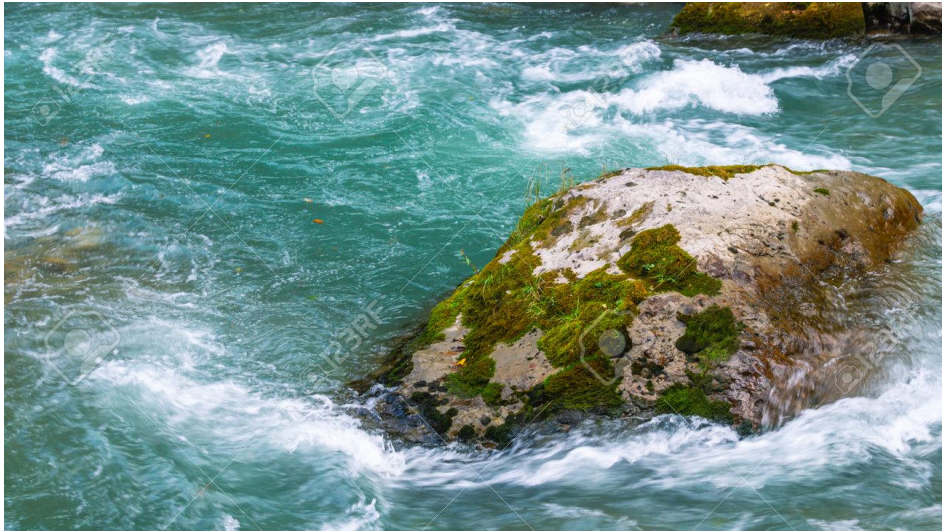


Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Puntos de Estancamiento





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Métodos de Aproximación del Punte

1. Energy Equation (método de energía): basa directamente en la **ecuación unidimensional de conservación de energía** (también llamada *energy equation* o *Bernoulli extendida*), aplicada entre una sección aguas arriba y otra aguas abajo del puente, incorporando términos de pérdidas por fricción y por cambios de velocidad debido a variaciones de sección, ajustada para pérdidas por **contracción, expansión y fricción**.

- No considera específicamente las pérdidas por forma de pilares o estribos.
- Es el método más genérico y aplicable a una amplia gama de configuraciones de puente, especialmente donde las pérdidas por fricción dominan.

$$Z_1 + Y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + Y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_L$$



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Métodos de Aproximación del Punte

2. Momentum Method (balance de momento): basado en la ecuación unidimensional de conservación de momento aplicada al tramo del puente, combinada con términos adicionales para representar las pérdidas por fricción y por arrastre de pilares.

- Incluye pérdidas por fricción y los cambios de geometría a través del puente.
- También pérdidas por arrastre en los pilares (drag), cuyo coeficiente (C_n) debe especificarse según la forma del pilar (círculo, elipse, cuadrado, etc.).
- Una desventaja del método de momento es que la fuerza del peso se calcula con una pendiente media del lecho a lo largo del puente; el cálculo de esta pendiente del lecho puede ser muy difícil en secciones naturales.
- Funciona bien cuando los pilares son una fuente importante de pérdida de energía.
- En la versión HEC RAS 6.7 hay una versión mejorada y superadora.

$$\sum F_x = \rho Q \left(\frac{V_2}{gA_2} - \frac{V_1}{gA_1} \right)$$

$$\frac{\gamma Q}{g} (V_2 - V_1) = (P_1 - P_2)A_m + \gamma A_m (z_1 - z_2) - F_f - F_d$$



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Métodos de Aproximación del Punte

3. Yarnell Equation: Método **empírico**, derivado de cerca de 2.600 pruebas de laboratorio con diversos flujos, formas y condiciones.

- Sólo válida para canales trapezoidales (sin llanuras de inundación) y cuando los **pilares son el principal obstáculo**. No considera estribos ni geometría compleja.
- Fuerte sensibilidad a tres parámetros: coeficiente de forma del pilar (K), área obstruida por pilares (α) y energía cinética del flujo (ω).
- Solo aplicable a flujo completamente subcrítico (**Class A low flow**).

$$\frac{V_2}{V_1} = C_0 \left(\frac{b}{B} \right)^m \left(\frac{h}{H} \right)^n$$
$$h_L = K \left(\frac{b}{B} \right)^m \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Métodos de Aproximación del Punte

4. FHWA WSPRO Method: Basado en el programa WSPRO (Water Surface Profile). Es una aproximación basada en la ecuación de energía, igual que el método estándar de energía de HEC-RAS, pero incorpora ajustes empíricos derivados de estudios de campo y laboratorio hechos por la FHWA.

- Especialmente diseñada para cruces que estrechan llanuras de inundación ribereñas vegetadas.
- Usa una ecuación de expansión con un coeficiente C derivado empíricamente.
- Ideal cuando las llanuras laterales y su vegetación generan pérdidas considerables. También limitado al flujo **subcrítico**.

$$Z_1 + Y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + Y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_L$$

$$h_e = C \cdot \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$$



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

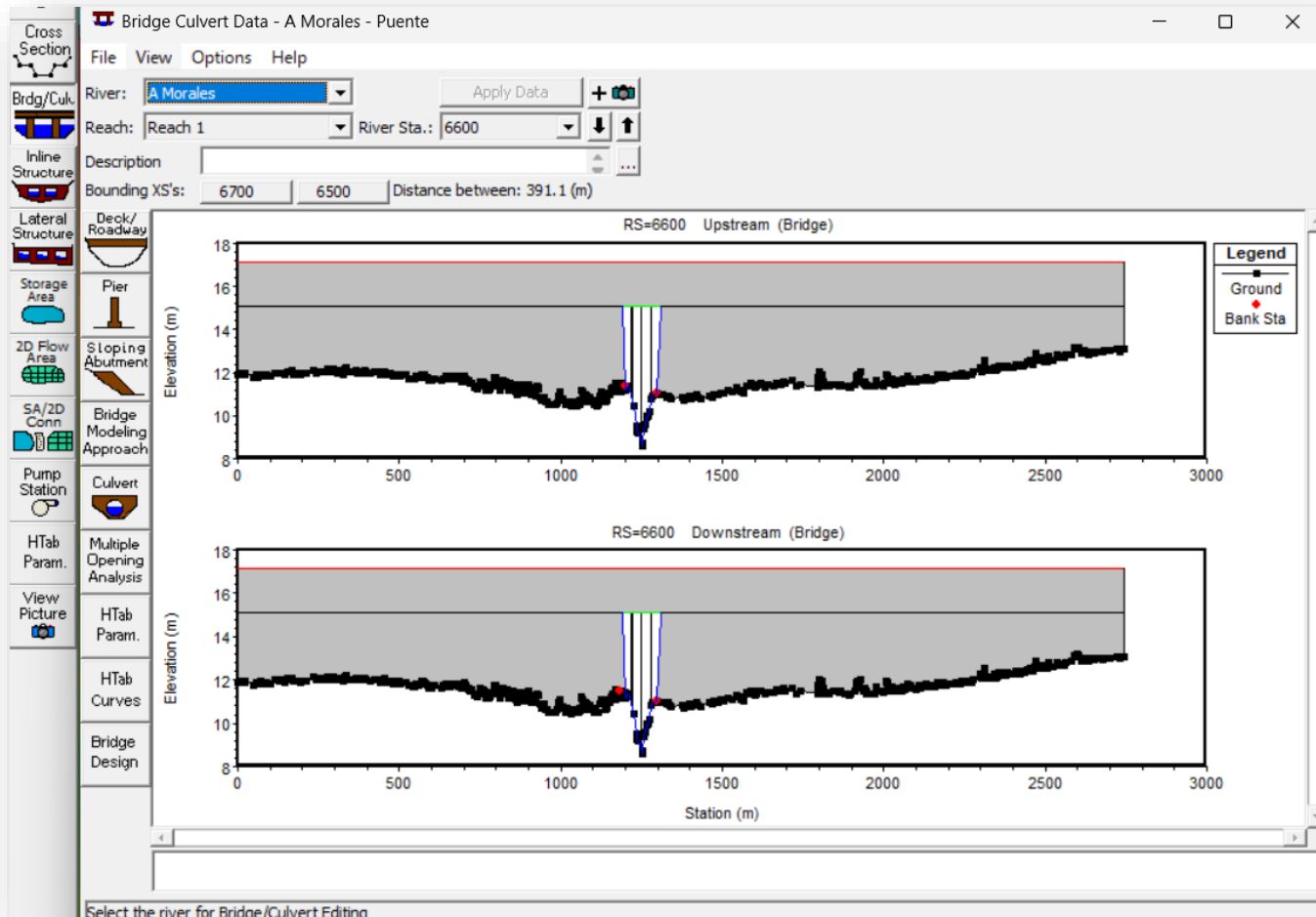
SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Métodos de Aproximación del Punte

Escenario hidráulico	Métodos recomendados
Pérdidas debidas principalmente a fricción y contracción/expansión (con pilares pequeños)	Energy , también Momentum o WSPRO si hay estructura leve en pilares.
Las pérdidas por pilares y las pérdidas por fricción son ambas predominantes	Momentum (general), Energy WSPRO también son aplicables
Puentes donde las Pilas sean el factor dominante en las pérdidas de energía	Momentum
Flujo completamente subcrítico sin geometría compleja	Yarnell o WSPRO .
Flujo subcrítico en llanuras vegetadas	WSPRO .
Flujo supercrítico o transiciones hidráulicas	Energy o Momentum , que son aplicables en ambos regímenes. Yarnell y WSPRO no son adecuados

Geometría del Puente





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

CONDICIONES DE BORDE

- Caudal/Hidrograma de entrada
- Condiciones de salida (tirante, pendier

Unsteady Flow Data - TR 100

File Options Help

Description:

Boundary Conditions | Initial Conditions | Meteorological Data | Observed Data

Boundary Condition Types

Stage Hydrograph	Flow Hydrograph	Stage/Flow Hydr.	Rating Curve
Normal Depth	Lateral Inflow Hydr.	Uniform Lateral Inflow	Groundwater Interflow
T.S. Gate Openings	Elev Controlled Gates	Navigation Dams	IB Stage/Flow
Rules	Precipitation		

Add Boundary Condition Location

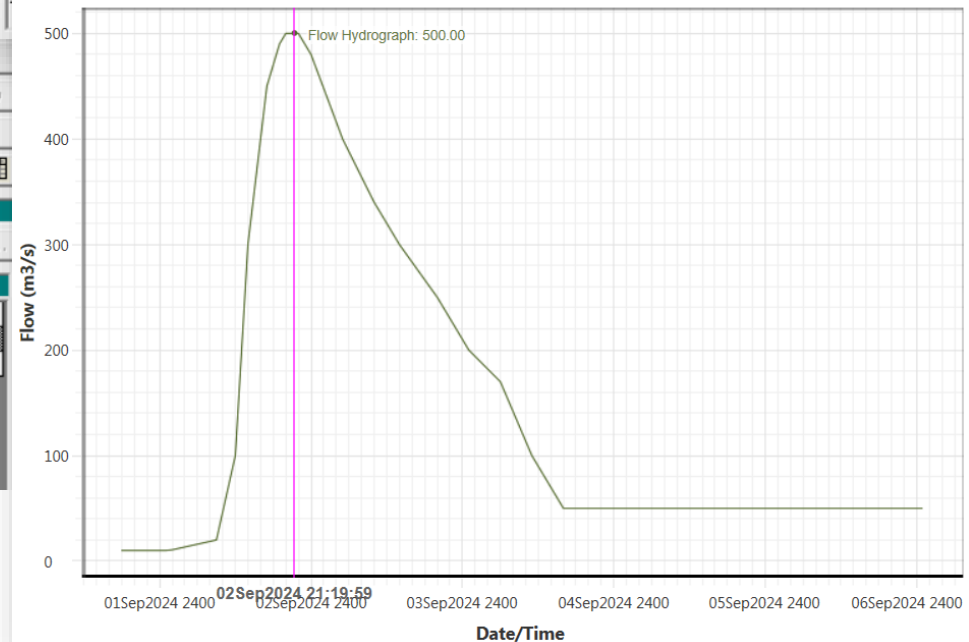
Add RS ... Add SA/2D Flow Area ... Add Conn ... Add Pump Sta ... Add Pipe Node ...

Select Location in table then select Boundary Condition Type

River	Reach	RS	Boundary Condition
1 A Morales	Reach 1	15092	Flow Hydrograph
2 A Morales	Reach 1	656.1679	Normal Depth

Hydrograph Data			
	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m3/s)
1	01sept2024 1800	0:00:00	0
2	01sept2024 1900	1:00:00	1.333
3	01sept2024 2000	2:00:00	2.667
4	01sept2024 2100	3:00:00	4
5	01sept2024 2200	4:00:00	5.333
6	01sept2024 2300	5:00:00	6.667
7	01sept2024 2400	6:00:00	8

River: A Morales Reach: Reach 1 RS: 15092





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

SIMULACIÓN

$$\text{Courant} = \frac{V \cdot \Delta t}{\Delta x}$$

- V = velocidad del flujo
- Δt = tamaño del paso de tiempo
- Δx = tamaño celda/distancia entre secciones



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

CALIBRACIÓN

Ajustar parámetros del modelo (Manning n, coeficientes de pérdidas, condiciones de borde) para que los resultados simulados reproduzcan lo más fielmente posible las condiciones medidas en campo.

Datos necesarios

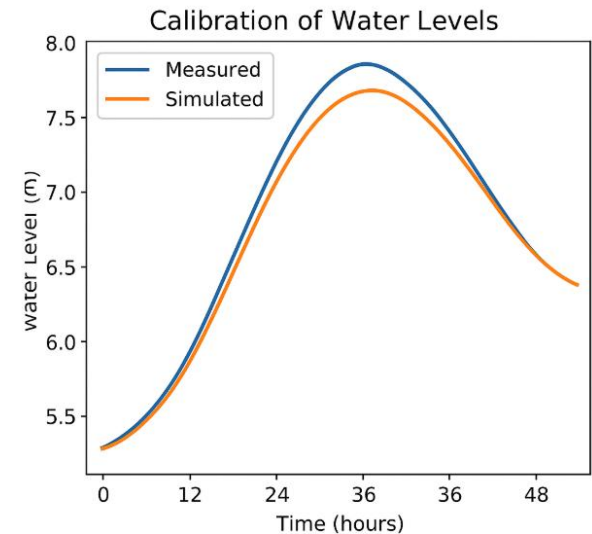
- Aforos / Caudales
- Niveles de agua (limnógrafos, marcas de crecida).
- Velocidades puntuales (ADCP, molinete).
- Registros fotográficos o de campo.

Parámetros a ajustar

- Coefficiente de rugosidad (Manning n)** en cauce y planicie de inundación.
- Coeficientes de contracción/expansión en estructuras.
- Distribución de flujos en secciones.
- Condiciones iniciales y de borde.

Índice de Willmot

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$



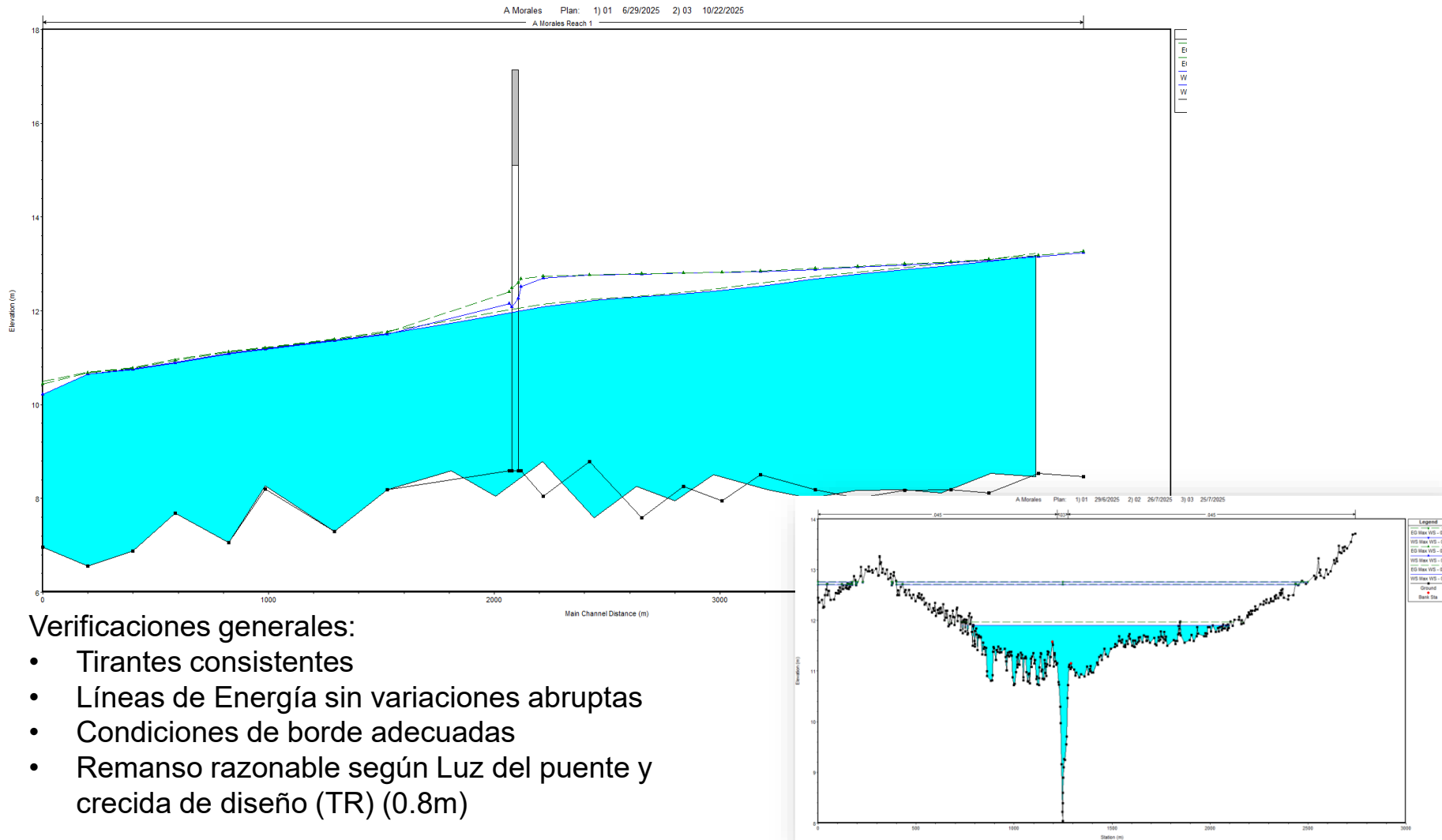


Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

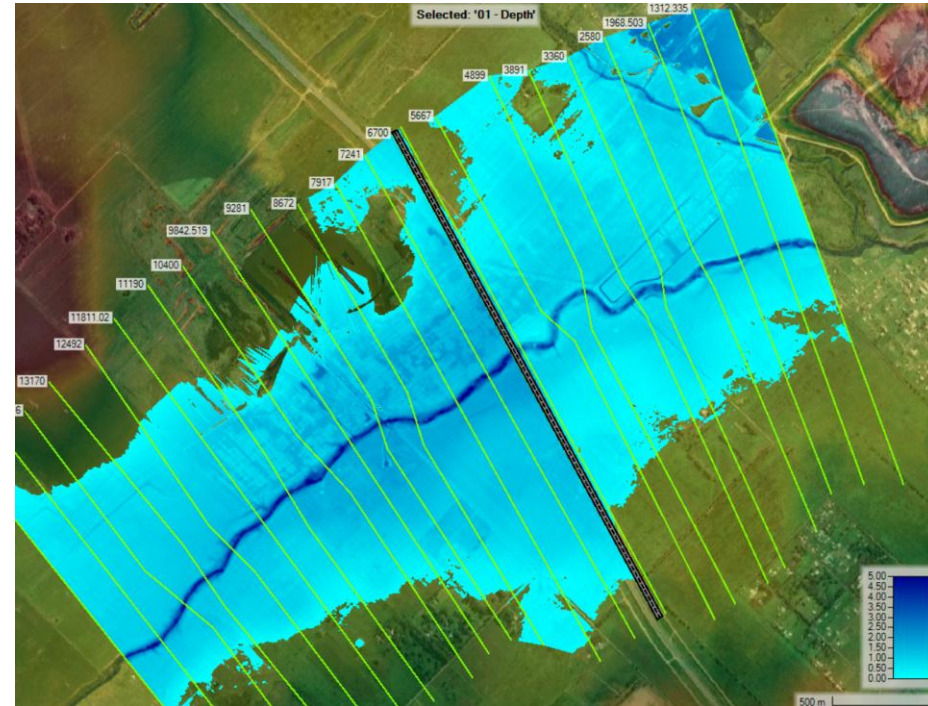
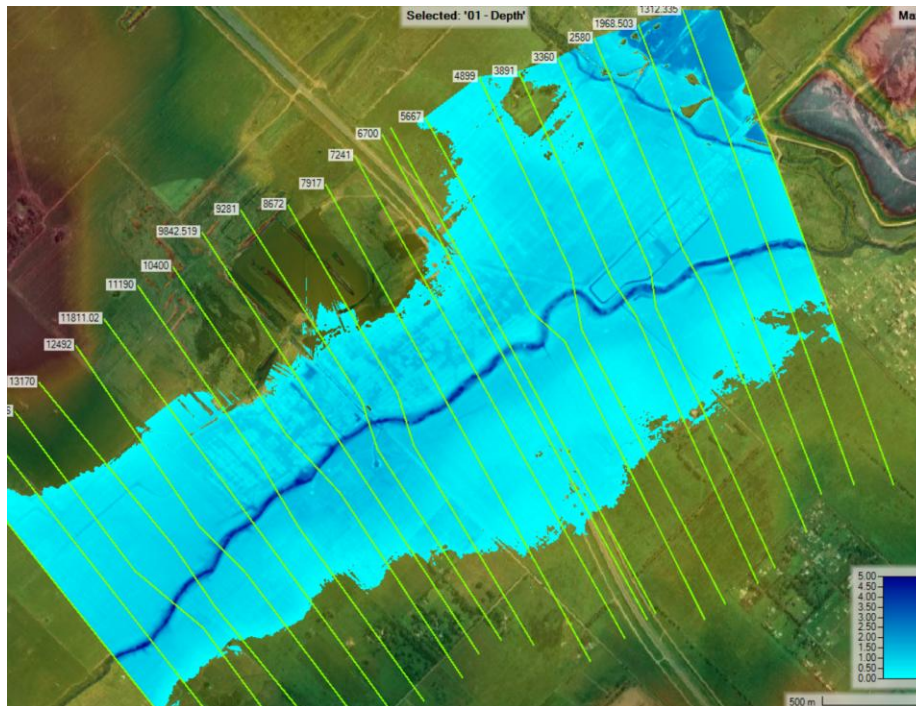
RESULTADOS – Nivel de Agua



RESULTADOS – Nivel de Agua

Verificaciones generales:

- Planicie de inundación
- Zonas de anegamiento y flujo efectivo
- Modificación de inundación con el puente





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

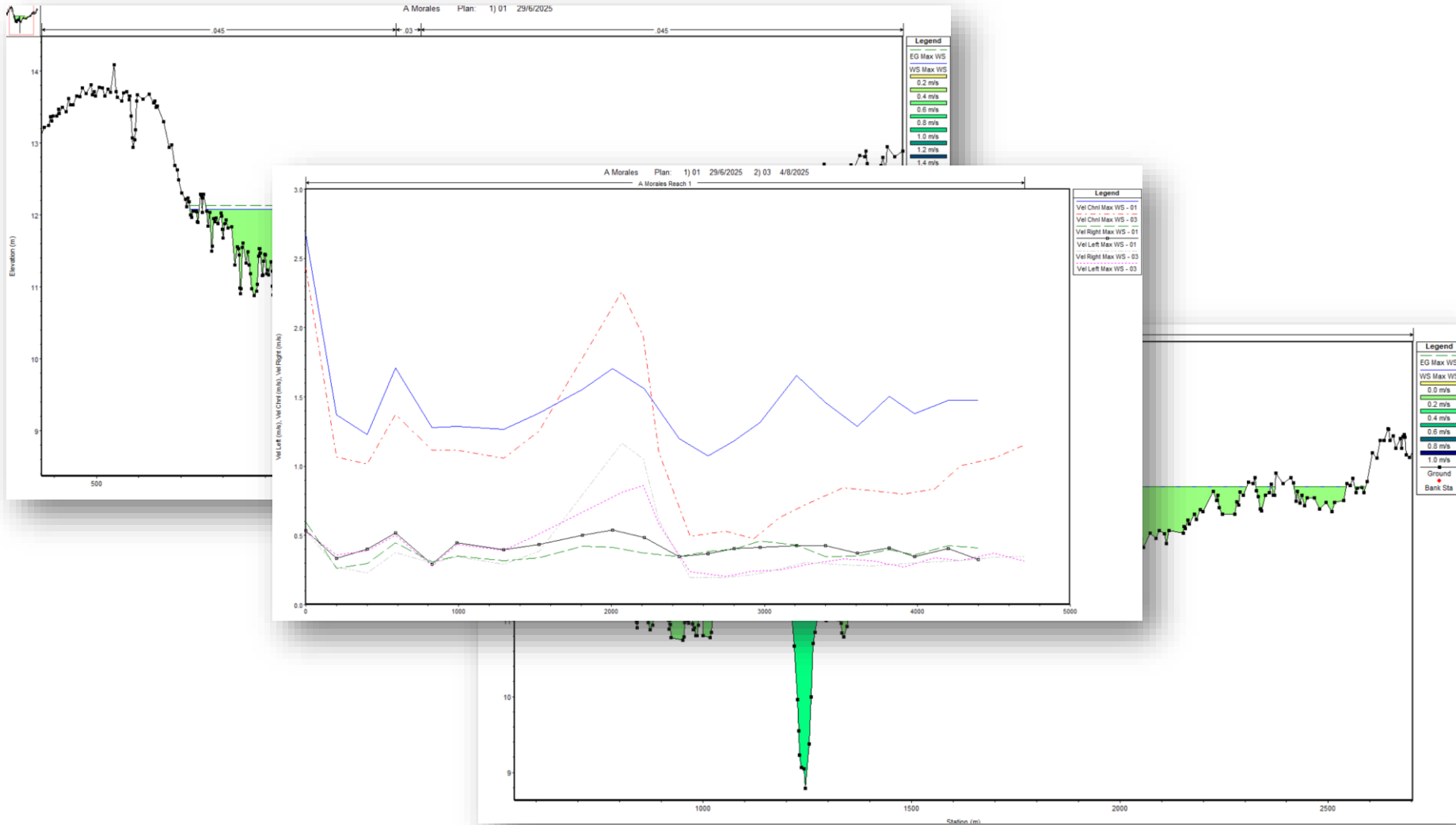
RESULTADOS – Perfil de Velocidades



Tirante



Velocidad



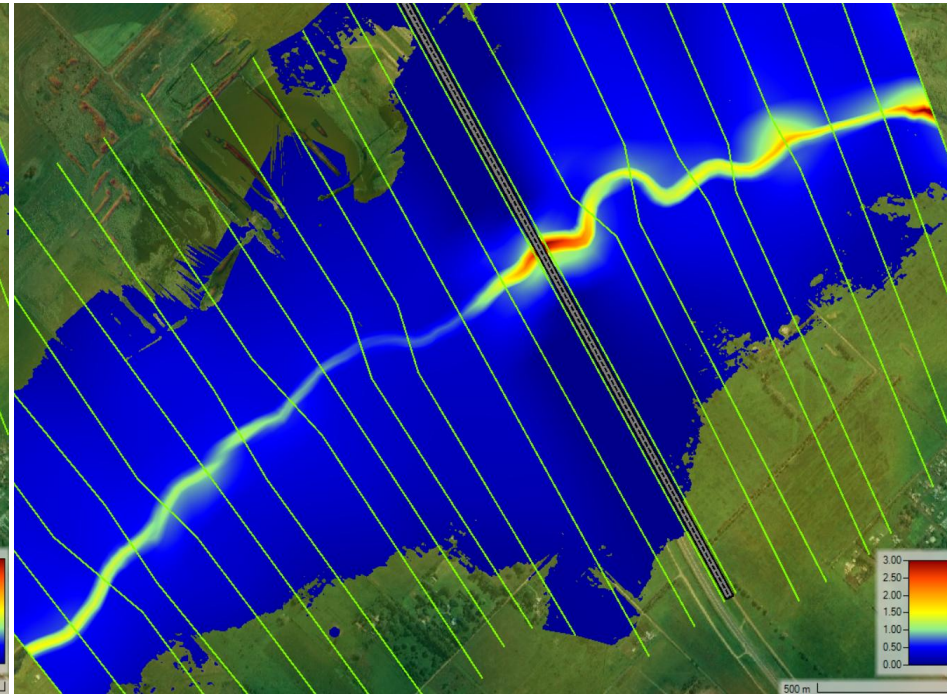
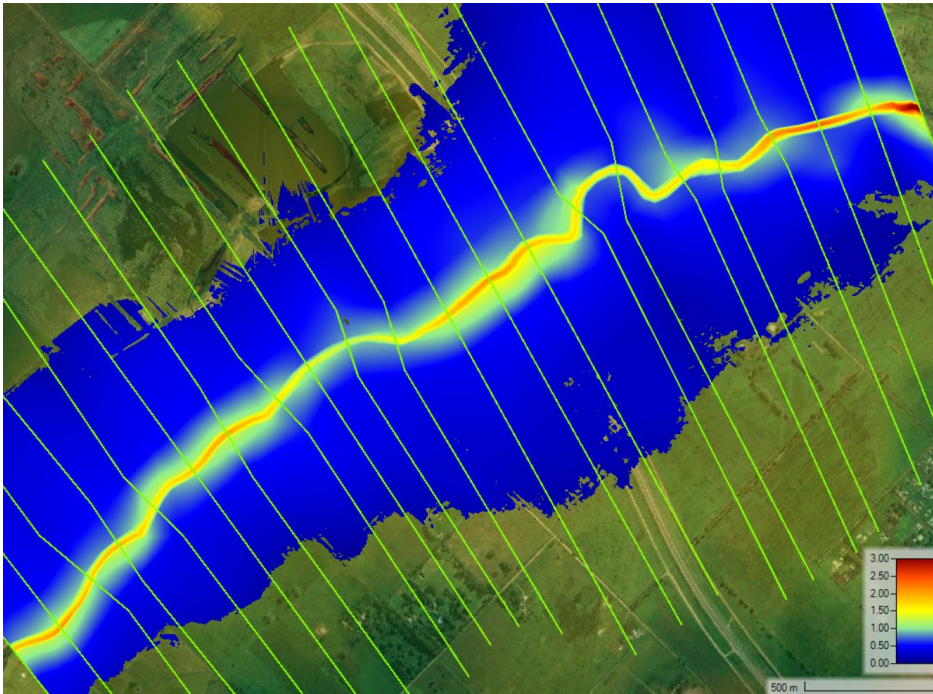


Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

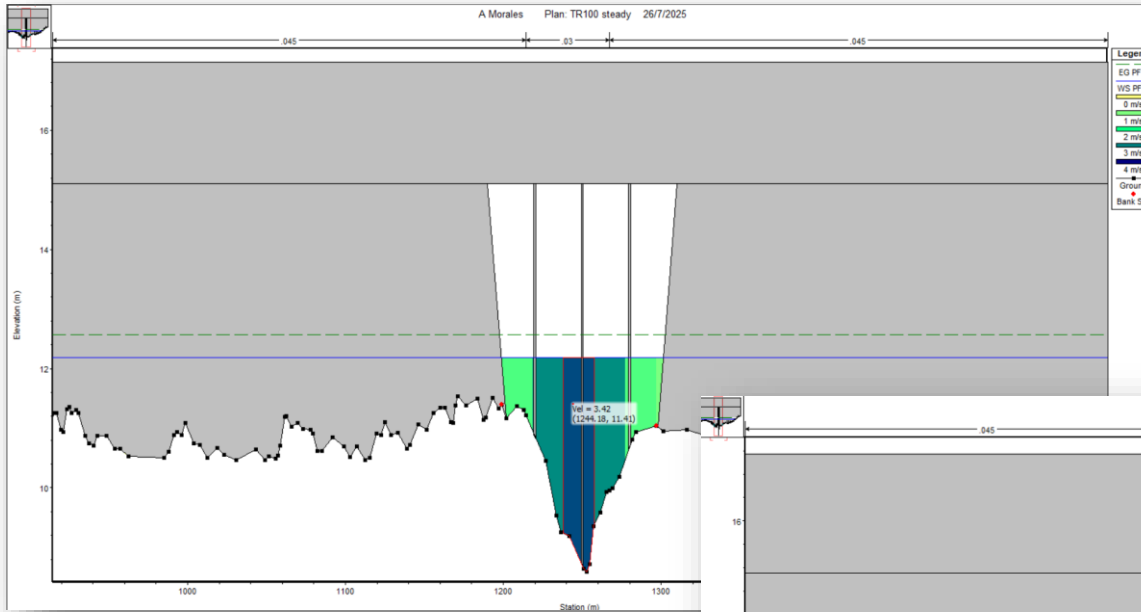
SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

RESULTADOS – Perfil de Velocidades

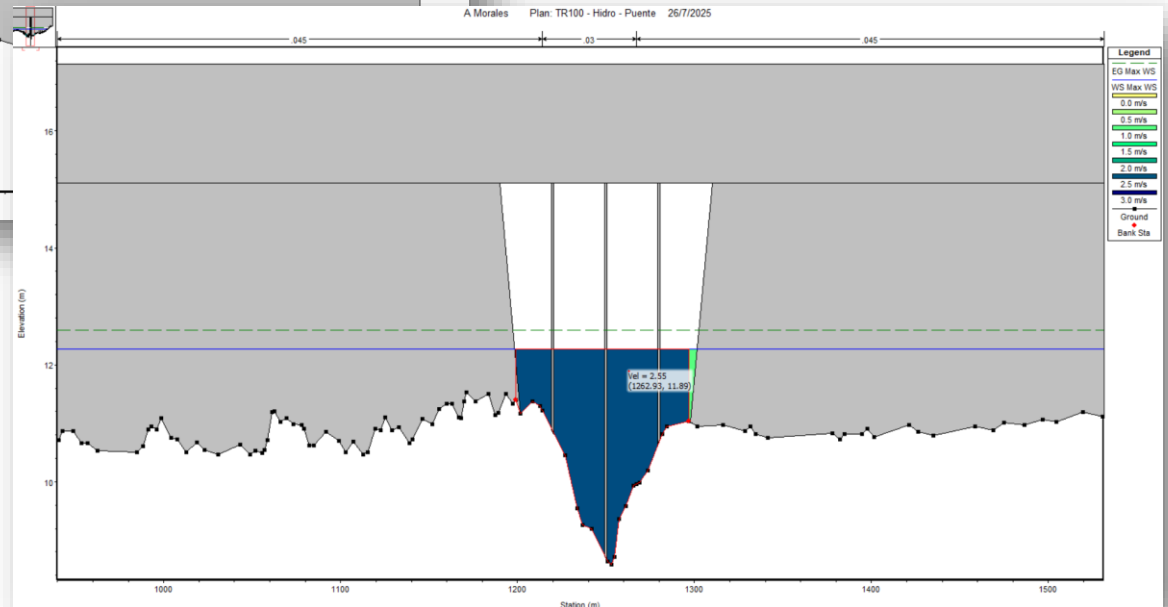


RESULTADOS – Perfil de Velocidades



Steady Vs Unsteady

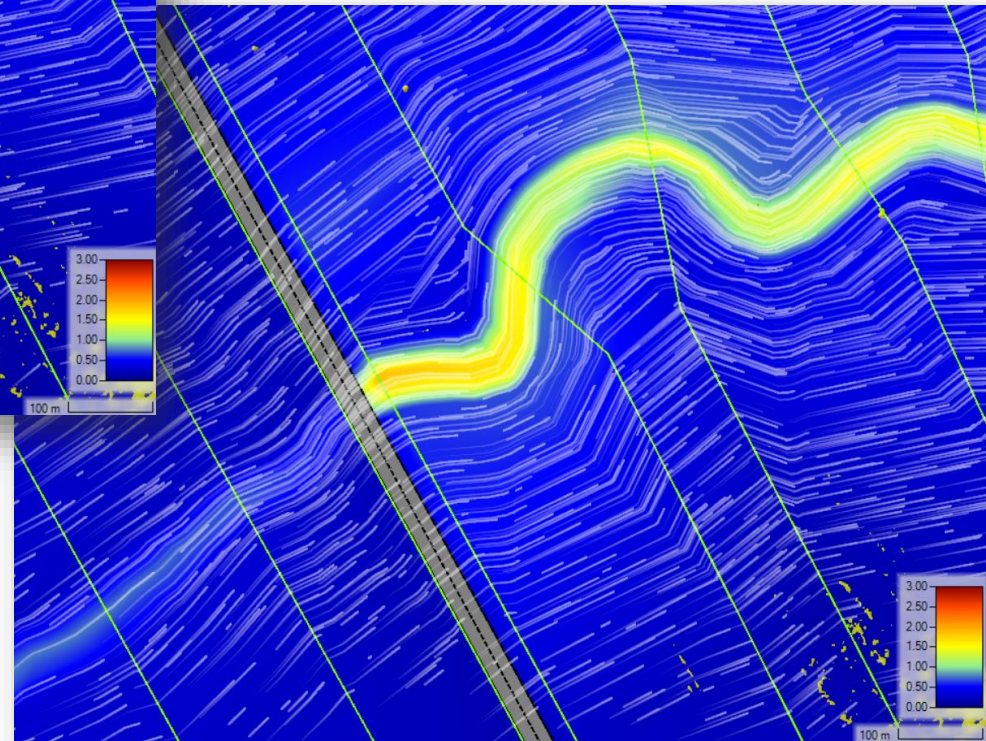
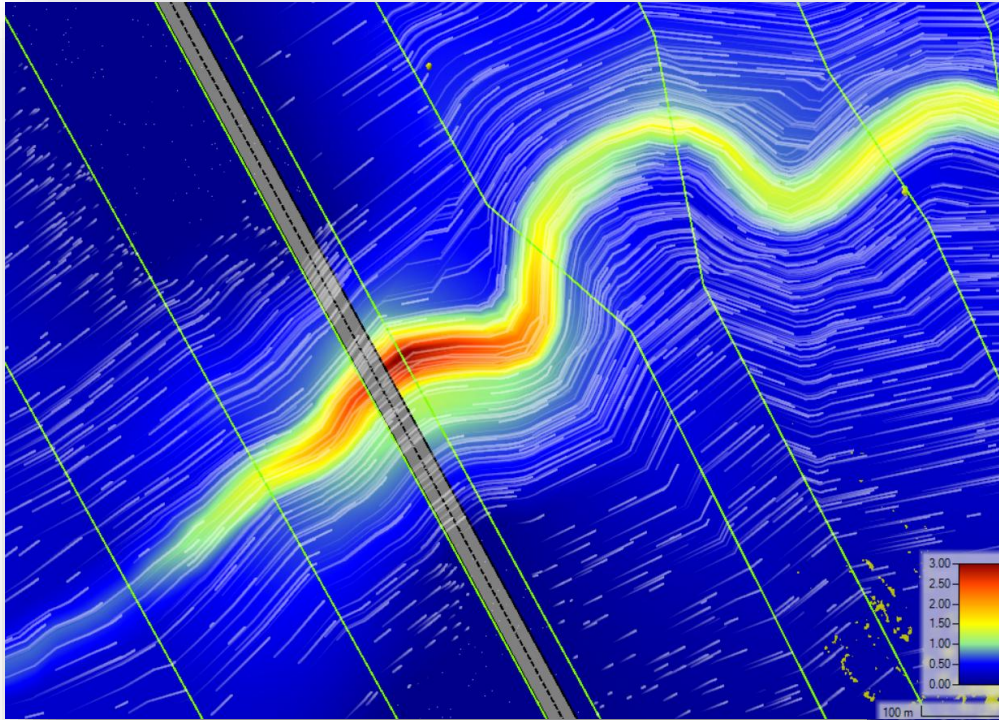
- Diferencia en el tirante de 8cm
- Discretización de perfil de velocidades transversales





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica SEMINARIO 2025 HIDRAULICA DE PUENTES

RESULTADOS – Con y sin zonas de Estancamiento



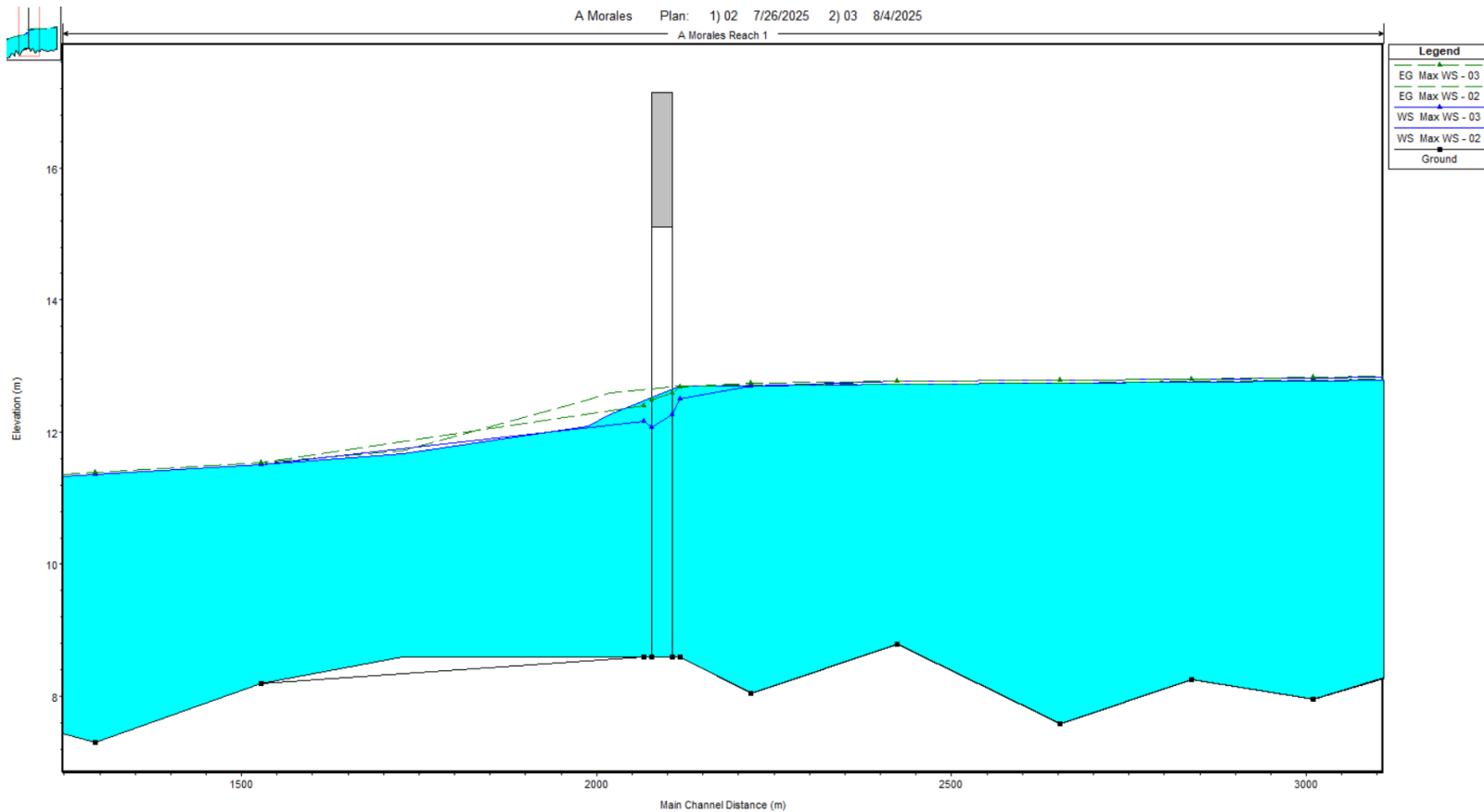


Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

RESULTADOS – Con y sin zonas de Estancamiento





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EROSION EN PUENTES

Estimación de erosión en el puente:

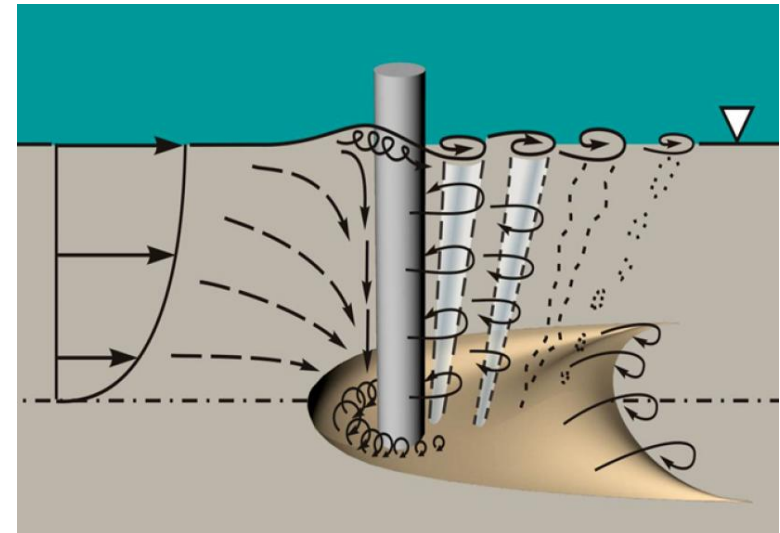
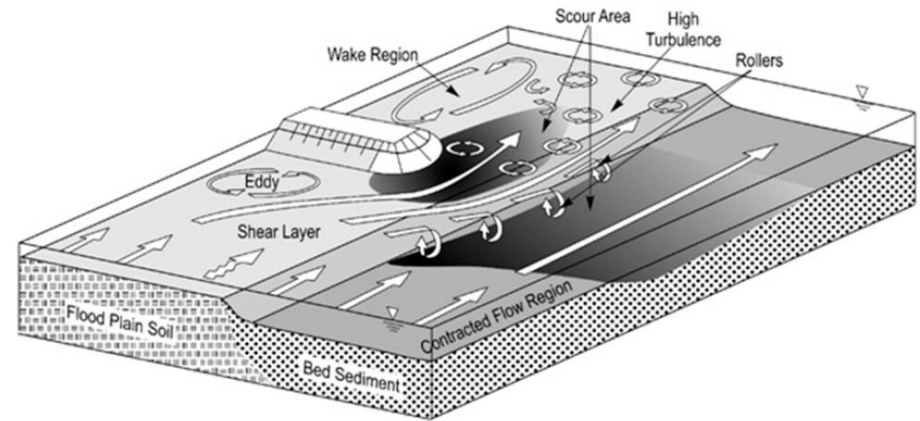
- Contracción
- Localizada en Pilas
- Localizada en Estribos

Herramientas de Cálculo:

- HEC RAS
- Hydraulic Toolbox
- Manual

Métodos de estimación:

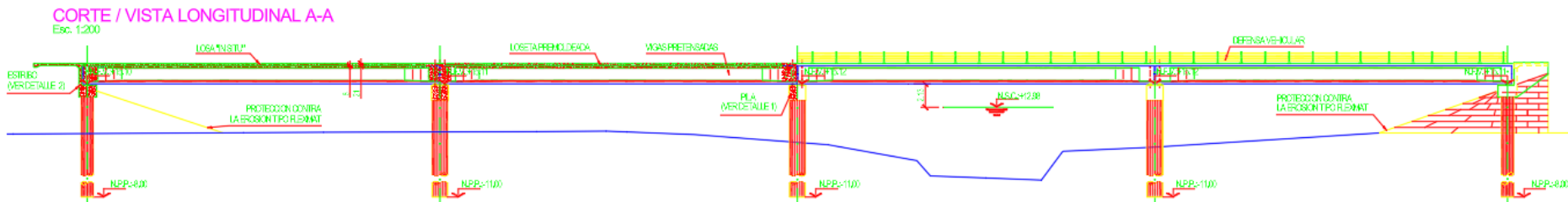
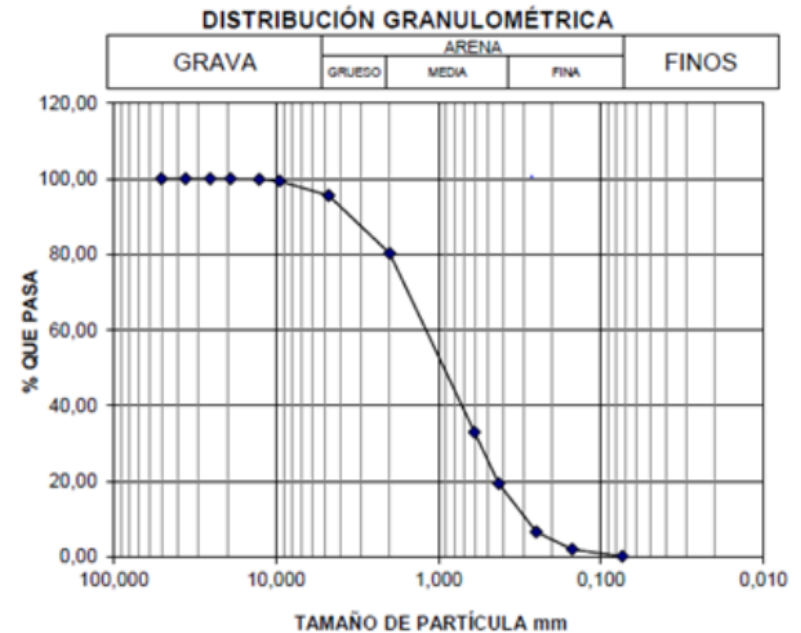
- Ecuaciones convencionales
- HEC 18
- NCHRP



EROSION EN PUENTES

Parámetros de entrada:

- Suelo: Arena mal graduada $D_{50}=1.0\text{mm}$
- $TR_{100}=500\text{m}^3/\text{s}$
- Luz Punte=120m
- Pilas circulares $D=1.3\text{m}$
- Estribos de material 1V:3H





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

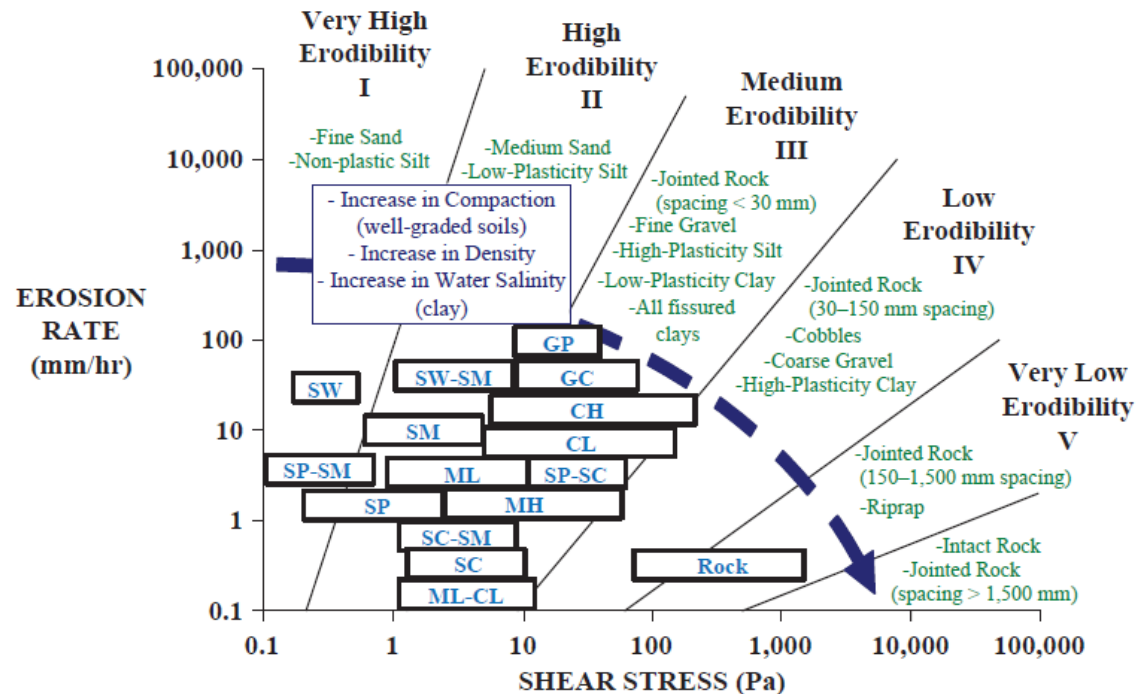
HIDRAULICA DE PUENTES

EROSION EN PUENTES - Contracción

La erosión por contracción se produce por el aumento en la capacidad de arrastre de sólidos que adquiere una corriente cuando su velocidad aumenta por efecto de una reducción del área hidráulica en el cauce.

$$\tau_0 = \gamma RS$$

- τ_0 : tensión de corte sobre el fondo (en Pa o N/m²)
- γ : peso específico del agua (≈ 9800 N/m³)
- R: radio hidráulico (m) ($\approx h$)
- S: pendiente de energía (adimensional)





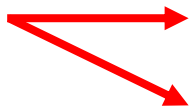
Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EROSION EN PUENTES - Contracción

Evaluación inicial



Luz del Puente



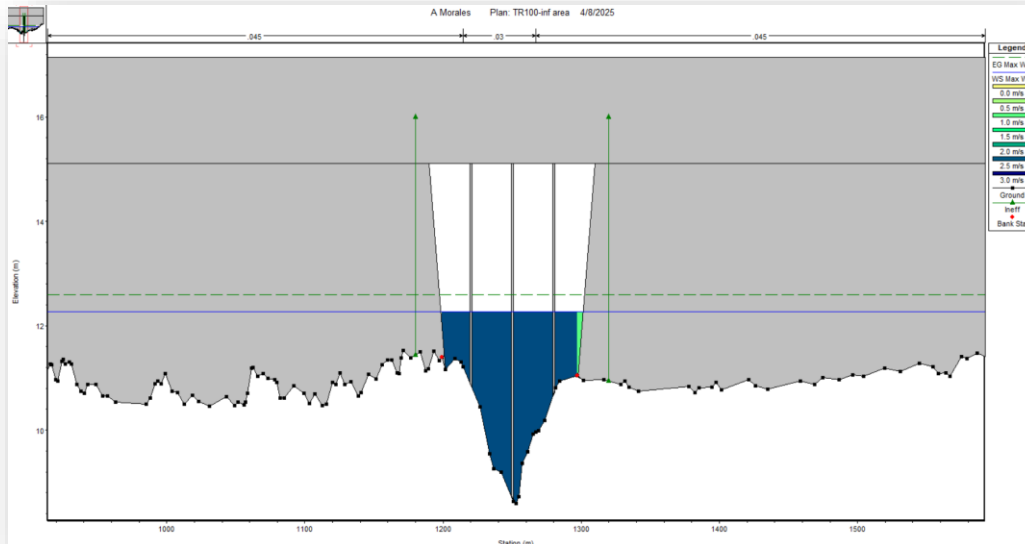
$$\text{Charlton } L > 5.074\sqrt{Q}$$

$$Q=500\text{m}^3/\text{s}$$
$$L>113.5\text{m}$$

Velocidad del Escurrimiento



$$\text{Vel} < 3\text{m/s} \quad 2.5\text{m/s}$$



- $Q_{\text{max}}=500\text{m}^3/\text{s} \rightarrow L>113.5\text{m}$
- $V_{\text{max}} \rightarrow 2.5\text{m/s}$



Luz del puente adecuada



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EROSION EN PUENTES - Contracción

Aguas Claras ($V < V_c$): ocurre cuando el flujo aguas arriba de la sección de estudio no transporta material del fondo o el material transportado es en suspensión (generalmente para material grueso, ríos de baja pendiente durante caudales bajos o zonas protegidas)

Lecho Movil (o vivo) ($V > V_c$): ocurre cuando hay transporte de material del fondo en la sección aguas arriba (generalmente material de menor tamaño y durante crecidas)

$$V_c = K_u y^{1/6} D^{1/3}$$

Y: tirante promedio aguas arriba (m)

D: diámetro de la partícula (m) (recomendado D50)

Ku: 6.19 para sistema métrico internacional

Plan: 03 A Morales Reach 1 RS: 7241 Profile: Max WS					
	Element	Left OB	Channel	Right OB	
E.G. Elev (m)	12.74				
Vel Head (m)	0.04	0.045	0.032	0.045	
W.S. Elev (m)	12.70	100.00	100.00	100.00	
Crit W.S. (m)		186.16	224.00	220.36	
E.G. Slope (m/m)	0.000366	807.42	224.00	1098.90	
Q Total (m ³ /s)	488.76	108.15	246.30	134.32	
Top Width (m)	2198.89	953.97	95.20	1149.72	
Vel Total (m/s)	0.78	Avg. Vel. (m/s)	0.58	1.10	0.61
Max Ch Dpth (m)	4.66	Hydr. Depth (m)	1.60	2.35	1.72
Conv. Total (m ³ /s)	25540.9	Conv. (m ³ /s)	5651.3	12870.4	7019.1
Length Wtd. (m)	100.00	Wetted Per. (m)	116.60	95.73	128.41
Min Ch El (m)	8.04	Shear (N/m ²)	5.73	8.40	6.16
Alpha	1.31	Stream Power (N/m s)	3.33	9.24	3.76
Frcn Loss (m)	0.08	Cum Volume (1000 m ³)	1217.07	403.88	711.81
C & E Loss (m)		Cum SA (1000 m ²)	2122.13	248.29	1488.82

Errors, Warnings and Notes

- Warning: Divided flow computed for this cross-section.
- Warning: The cross-section end points had to be extended vertically for the computed water surface.
- Warning: The conveyance ratio (upstream conveyance divided by downstream conveyance) is less than 0.7 or greater than 1.4. This may indicate the need for additional cross sections.

$$V_c = 6.19 * 2.36^{1/6} * 0.001^{1/3} = 0.71m/s$$

$$V_{ch} = 1.10m/s$$



Lecho Movil



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

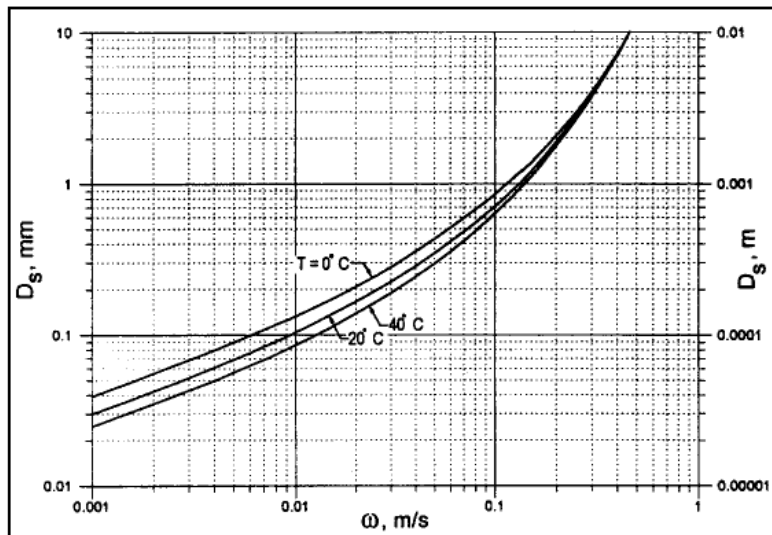
SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EROSION EN PUENTES - Contracción

HEC 18 propone una fórmula basada en el método de Laursen (1960) para el caso de Lecho Movil.

$$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{6/7} \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^{k_1}$$



Donde:

- Y2: tirante erosionado en el cauce principal (m)
- Y1: tirante aguas arriba en el cauce principal (m)
- Q1: caudal que transporta sedimentos aguas arriba (m³/s)
- Q2: caudal total en la sección contraída (m³/s)
- W1: ancho del cauce principal donde hay transporte de sedimentos (m)
- W2: ancho de la sección contraída menos el ancho de la pilas (m)
- K1: se determina de la Tabla
- V*: velocidad de corte (= (gy1 S1)^{1/2}) (m/s)
- g: aceleración de la gravedad
- S1: pendiente de energía del cauce principal (m/m)
- T: velocidad de sedimentación de la partícula

V*/T	k ₁	Mode of Bed Material Transport
<0.50	0.59	Mostly contact bed material discharge
0.50 to 2.0	0.64	Some suspended bed material discharge
>2.0	0.69	Mostly suspended bed material discharge



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

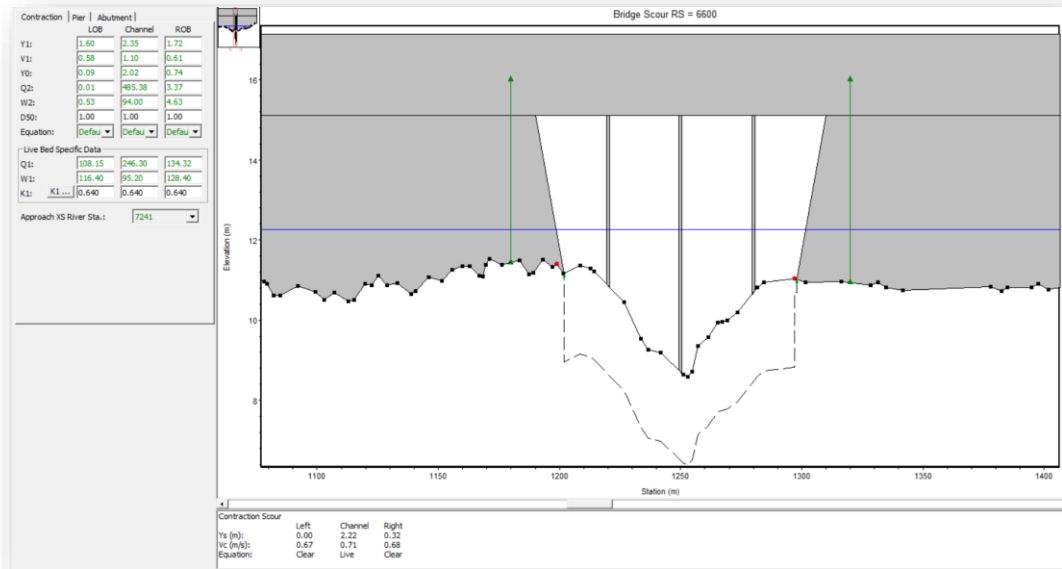
SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EROSION EN PUENTES - Contracción

$$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{6/7} \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^{k_1}$$

Y1	2.35	m
V1	1.1	m/s
g	9.81	m/s ²
D50	1	mm
n	0.03	
Q	500	m ³ /s
W	94	m
Q1	246	m ³ /s
W1	95.2	m
S	0.0004	
S (Manning)	0.0003	
V*	0.092	m/s
T	0.0015	m/s
V*/T	61.24	
K1	0.64	
HEC 18 (Live Bed) (Y2)	4.35	m
HEC 18 (Live Bed) (Ys)	2.00	m



Contraction Scour

	Left	Channel	Right
Ys (m):	0.00	2.22	0.32
Vc (m/s):	0.67	0.71	0.68
Equation:	Clear	Live	Clear



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

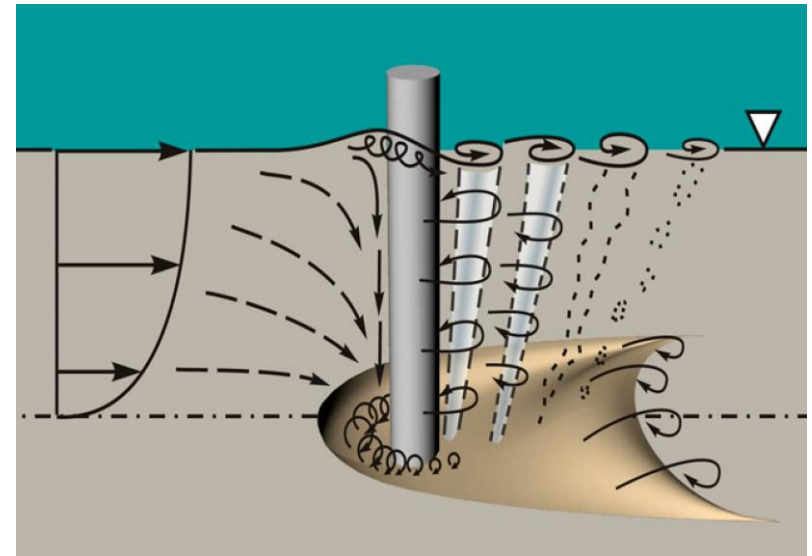
EROSION EN PUENTES – Localizada en Pilas

El rasgo dominante del escurrimiento cerca de una pila es la presencia de una estructura de remolinos que se desarrolla alrededor de la misma. Estos vórtices son el mecanismo básico de la erosión local.

- Vórtice en herradura.
- Vórtice de Estela.
- Vórtices de Extremo.

Calculo de erosión Localizada en Pilas:

- Breusers, Nicollet y Shen
- HEC 18 - CSU Equation
- Sheppard y Melville Modificada (NCHRP)





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EROSION EN PUENTES – Localizada en Pilas

Breusers, Nicollet y Shen \longrightarrow
$$\frac{h_s}{b} = \Phi_1 \left(\frac{U}{U_c} \right) \left[2 \operatorname{tgh} \left(\frac{h_o}{b} \right) \right] \Phi_2 K_\alpha$$

HEC 18 - CSU Equation \longrightarrow
$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0 K_1 K_2 K_3 \left(\frac{a}{y_1} \right)^{0.65} Fr_1^{0.43}$$

$$\frac{y_s}{a^*} = 2.5 f_1 f_2 f_3 \quad \text{for } 0.4 \leq \frac{V_1}{V_c} < 1.0$$

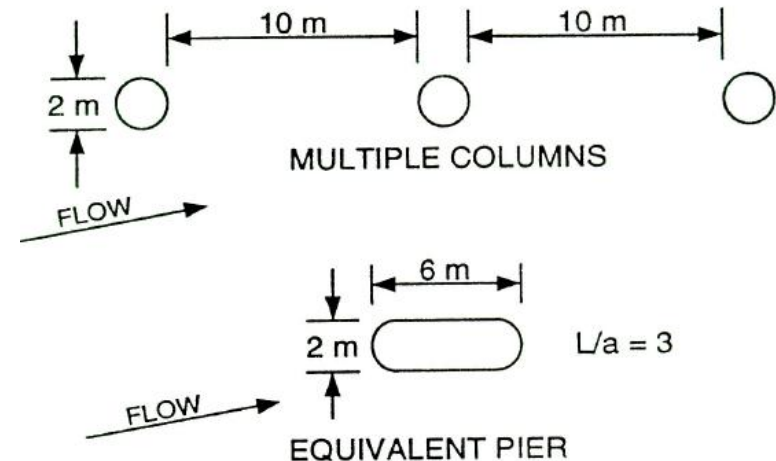
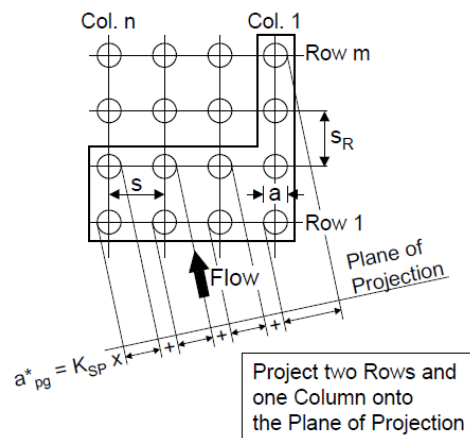
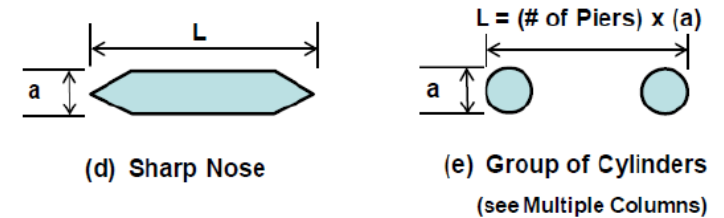
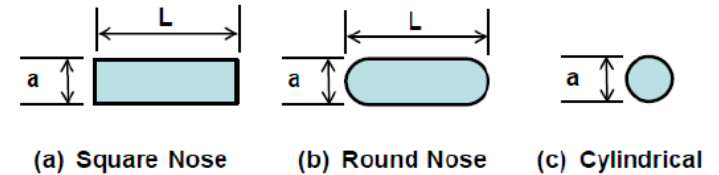
Sheppard y Melville
Modificada (NCHRP) \longrightarrow

$$\frac{y_s}{a^*} = f_1 \left[2.2 \left(\frac{\frac{V_1}{V_c} - 1}{\frac{V_{lp}}{V_c} - 1} \right) + 2.5 f_3 \left(\frac{\frac{V_{lp}}{V_c} - \frac{V_1}{V_c}}{\frac{V_{lp}}{V_c} - 1} \right) \right] \quad \text{for } 1.0 \leq \frac{V_1}{V_c} \leq \frac{V_{lp}}{V_c}$$

EROSION EN PUENTES – Localizada en Pilas

Parámetros principales comunes a todas las formulas:

- Tirante
- Velocidad del flujo
- Ancho de pila
- Angulo de ataque del flujo
- Factor de forma
- D50 (no todas)





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EROSION EN PUENTES – Localizada en Pilas

Breusers, Nicollet y Shen

$$\frac{h_s}{b} = \Phi_1 \left(\frac{U}{U_c} \right) \left[2 \operatorname{tgh} \left(\frac{h_o}{b} \right) \right] \Phi_2 K_\alpha$$

- Φ_1 es una función de la relación U/U_c y vale:
 - $\Phi_1 (U/U_c) = 0$;si $U/U_c \leq 0,5$
 - $\Phi_1 (U/U_c) = 2.U/U_c - 1$;si $0,5 \leq U/U_c \leq 1$
 - $\Phi_1 (U/U_c) = 1$;si $U/U_c > 1$ (crecida)
- Φ_2 es un coeficiente que depende de la forma de la pila, y vale:
 - $\Phi_2 = 1,00$ para pilas circulares o redondeadas.
 - $\Phi_2 = 1,30$ para pilas rectangulares.
 - $\Phi_2 = 0,75$ para pilas de forma hidrodinámica.
- K_α se obtiene directamente de la figura siguiente, en función del ángulo de ataque α y la relación L/b (siendo L la dimensión más larga de la sección de la pila):

y1	3.81
B pila	1.3
θ_1	1
θ_2	1
Kalfa	1
Ys	2.59



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EROSION EN PUENTES – Localizada en Pilas

HEC 18 - CSU Equation
$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0 K_1 K_2 K_3 \left(\frac{a}{y_1} \right)^{0.65} Fr_1^{0.43}$$

- Y_s = tirante erosionado (m)
- Y_1 = tirante aguas arriba de la pila (m)
- K_1 = Factor de Corrección por forma de la pila
- K_2 = Factos de corrección por ángulo del flujo
- K_3 = Factor de corrección por lecho del río
- a = ancho pila (m)
- L = largo de pila (m)
- Fr = número de Froude
- V_1 = velocidad del flujo aguas arriba de la pila (m/s)

Correction Factor, K_1 , for Pier Nose Shape.	
Shape of Pier Nose	K_1
(a) Square nose	1.1
(b) Round nose	1.0
(c) Circular cylinder	1.0
(d) Group of cylinders	1.0
(e) Sharp nose	0.9

$$K_2 = \left(\cos \theta + \frac{L}{a} \sin \theta \right)^{0.65}$$

Increase in Equilibrium Pier Scour Depths, K_3 , for Bed Condition.		
Bed Condition	Dune Height ft	K_3
Clear-Water Scour	N/A	1.1
Plane bed and Antidune flow	N/A	1.1
Small Dunes	$10 > H \geq 2$	1.1
Medium Dunes	$30 > H \geq 10$	1.2 to 1.1
Large Dunes	$H \geq 30$	1.3

y_1	3.81	m
V_1	1.94	m/s
B pila	1.3	m
K_1	1.00	
K_2	1.0	
K_3	1.1	
Fr	0.32	
HEC 18 (y_s)	2.54	m



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EROSION EN PUENTES – Localizada en Pilas

Sheppard y Melville Modificada (NCHRP)

$$\frac{y_s}{a^*} = 2.5f_1f_2f_3 \quad \text{for } 0.4 \leq \frac{V_1}{V_c} < 1.0$$

$$\frac{y_s}{a^*} = f_1 \left[2.2 \left(\frac{\frac{V_1}{V_c} - 1}{\frac{V_{lp}}{V_c} - 1} \right) + 2.5f_3 \left(\frac{\frac{V_{lp}}{V_c} - \frac{V_1}{V_c}}{\frac{V_{lp}}{V_c} - 1} \right) \right] \quad \text{for } 1.0 \leq \frac{V_1}{V_c} \leq \frac{V_{lp}}{V_c}$$

$$\frac{y_s}{a^*} = 2.2f_1 \quad \text{for } \frac{V_1}{V_c} > \frac{V_{lp}}{V_c}$$

$$f_1 = \tanh \left[\left(\frac{y_1}{a^*} \right)^{0.4} \right]$$

$$f_2 = \left\{ 1 - 1.2 \left[\ln \left(\frac{V_1}{V_c} \right) \right]^2 \right\}$$

$$f_3 = \frac{\left(\frac{a^*}{D_{50}} \right)^{1.13}}{10.6 + 0.4 \left(\frac{a^*}{D_{50}} \right)^{1.33}}$$

$$V_{lp} = 5V_c \text{ or } 0.6\sqrt{gy_1} \quad (\text{whichever is greater})$$

$$V_c = 5.75u_c^* \log \left(5.53 \frac{y_1}{D_{50}} \right)$$

$$u_c^* = K_u (0.0377 + 0.041D_{50}^{1.4}) \quad \text{for } 0.1 \text{ mm} < D_{50} < 1 \text{ mm}$$

$$u_c^* = K_u (0.1D_{50}^{0.5} - 0.0213/D_{50}) \quad \text{for } 1 \text{ mm} < D_{50} < 100 \text{ mm}$$

Donde:

- a^* : ancho efectivo de pila (ancho proyectado = a x factor de forma ($k=1$ para circular))
- Y_1 : tirante inicial (m)
- V_1 : velocidad del flujo (m/s)
- V_c : Velocidad crítica (m/s)
- K_u : 0.3048 para unidades S.I.
- D_{50} : para cálculo de u_c D_{50} en (mm); para cálculo de V_c D_{50} en (m).

a^* (m)	1.30
K_u	0.30
u^*c	0.02
V_c (m/s)	0.60
V_{lp}	3.67
V_1/V_c	3.25
V_{lp}/V_c	6.15
a^*/D_{50}	1300.000
f_1	0.91
f_3	0.59
NCHRP (Y_s) (m)	2.13



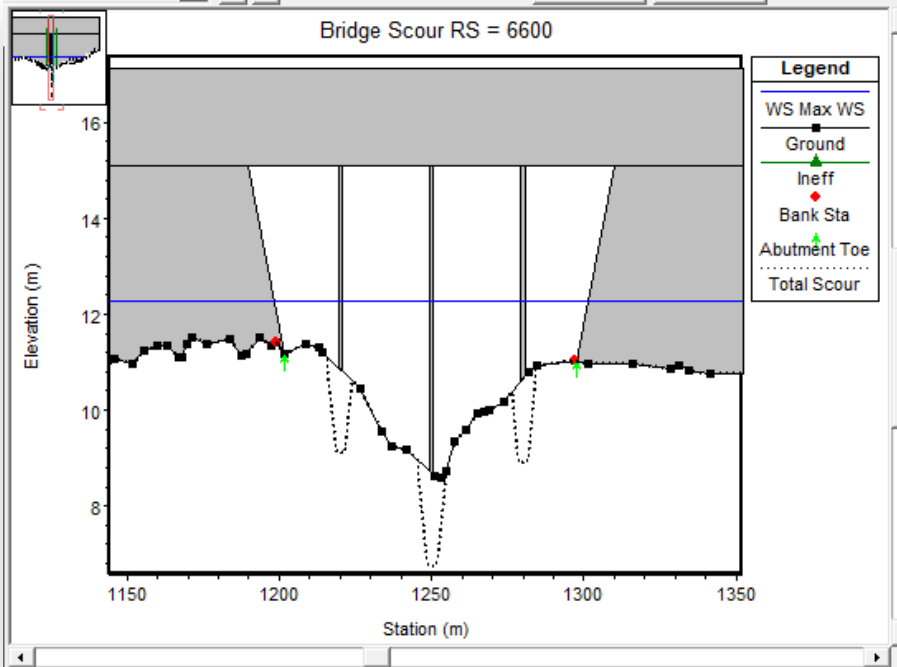
Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EROSION EN PUENTES – Localizada en Pilas

HEC RAS



Pier Scour

#1 (CL = 1220)	Ys (m):	2.27
#2 (CL = 1250)	Ys (m):	2.54
#3 (CL = 1280)	Ys (m):	2.30

Breusers Niccolette y Shen	2.59	m
Sheppard y Melville Mod. (NCHRP)	2.13	m
HEC 18	2.54	m



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EROSION EN PUENTES – Localizada en Estribos

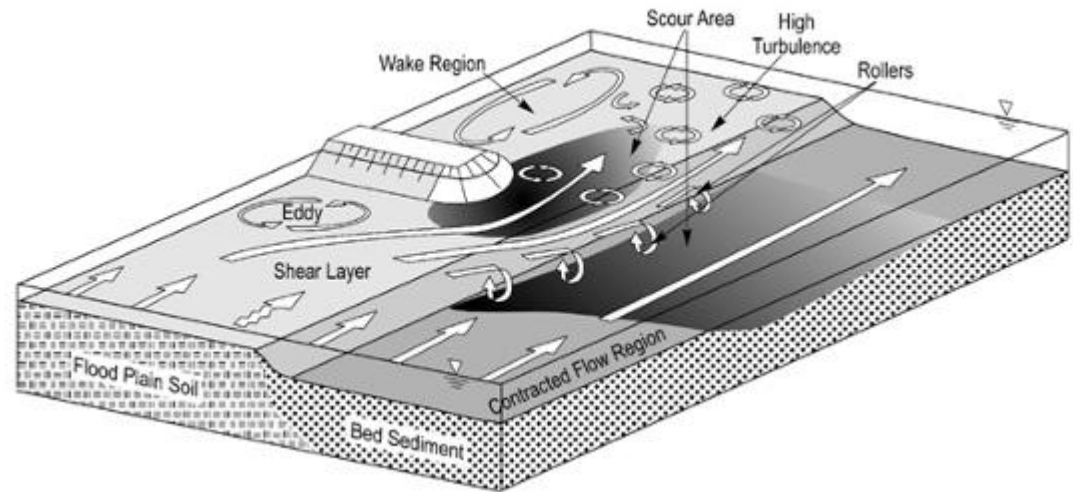
Tal como en el caso de las pilas del puente, el lecho fluvial sufre en las proximidades de los estribos una erosión local atribuible a los vórtices que se generan debido a los cambios de dirección de las líneas de corriente en la contracción. Desde un punto de vista teórico, éste es un complejo problema tridimensional en fondo móvil.

MÉTODOS DE CÁLCULO

Para proceder a analizar el problema, se sigue la misma metodología que la empleada en el caso de pilas

Formulaciones típicas:

- Artamonov
- Laursen
- Froehlich (HEC18)
- Hire (HEC18)
- NCHRP





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EROSION EN PUENTES – Localizada en Estribos

Método de Laursen

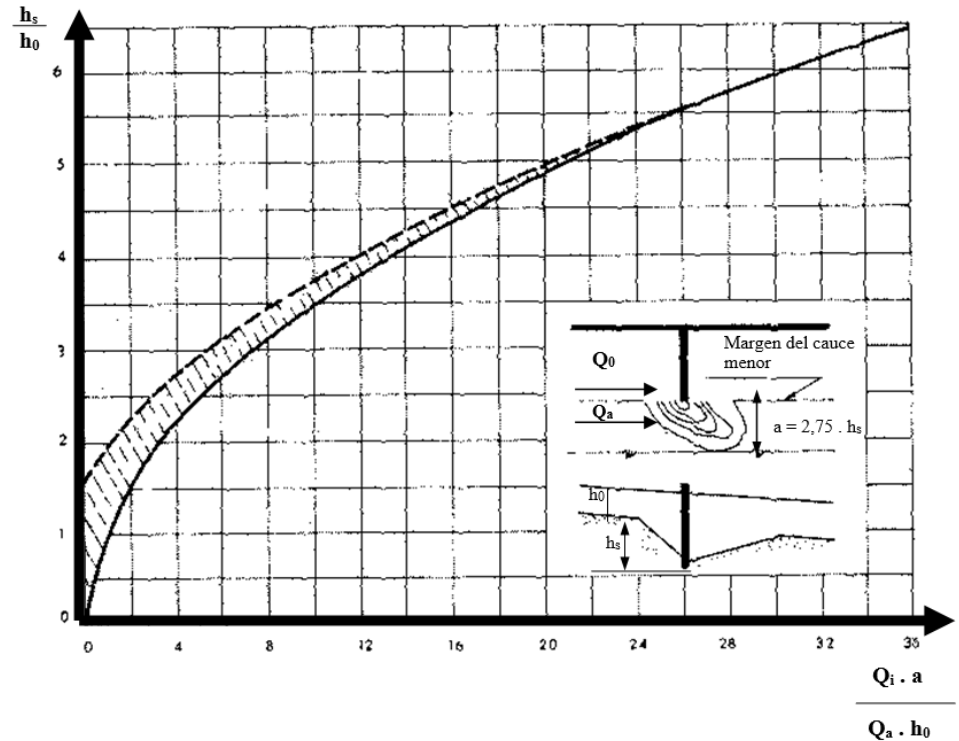
Estribo en la planicie de Inundación

$$\frac{h_s}{h_0} = f\left(\frac{Q_i \cdot a}{Q_a \cdot h_0}\right)$$

a = ancho de la socavación (con un valor de $2.75 h_s$ según el autor)

Q_a = gasto que corresponde a la franja de ancho " a ".

Q_i = gasto interceptado por el estribo en el cauce de inundación.





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

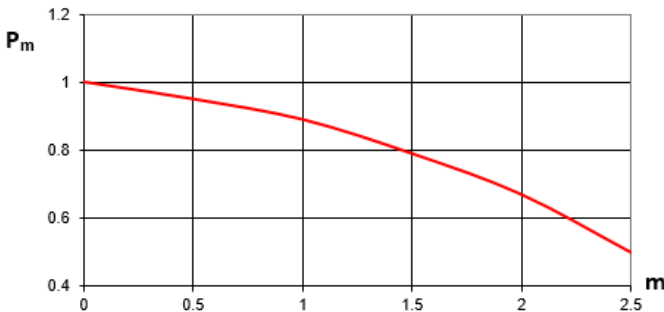
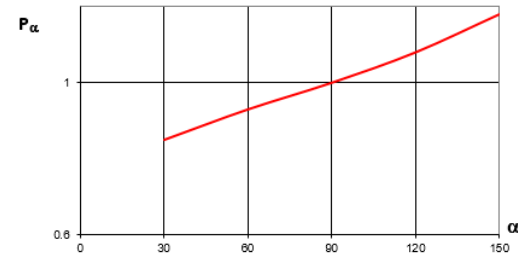
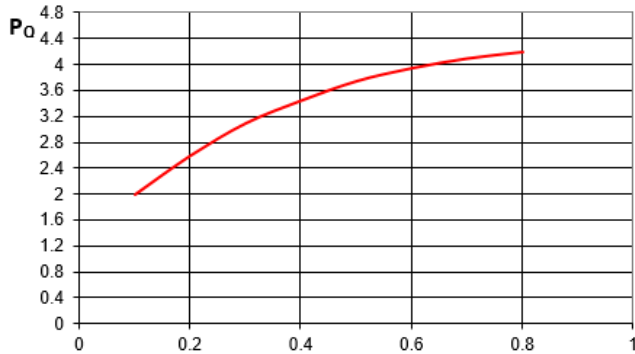
HIDRAULICA DE PUENTES

EROSION EN PUENTES – Localizada en Estribos

ARTAMONOV

$$\frac{(h_s + h_0)}{h_0} = P_q \cdot P_m \cdot P_\alpha$$

- P_q = coeficiente que depende de $Q1/Q$.
- P_m = depende del talud del estribo
- P_α = depende el ángulo de incidencia



Artamonov			
Estribo Margen Izquierda		Estribo Margen Derecha	
h_0	1.62 m	h_0	1.72 m
Q_e	115.28 m ³ /s	Q_e	134.32 m ³ /s
$Q\%$	0.231	$Q\%$	0.269
m	0	m	0
α	60	α	120
P_q	2.8	P_q	3
P_m	0.61	P_m	0.61
P_α	1	P_α	1
H_s	1.15 m	H_s	1.43 m



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

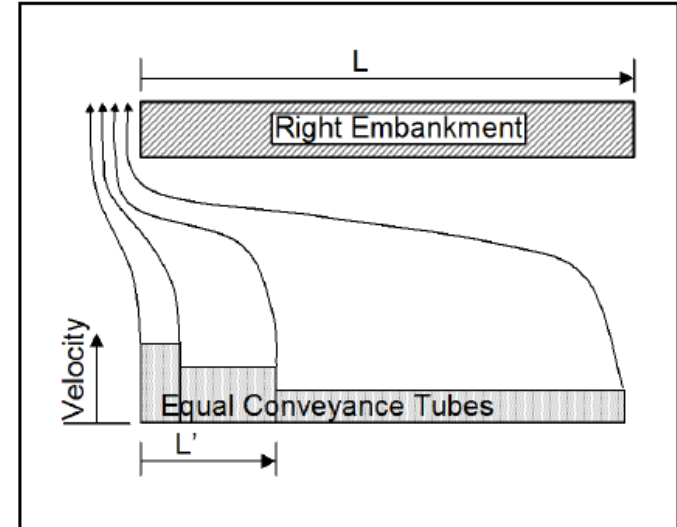
SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EROSION EN PUENTES – Localizada en Estribos

FROEHLICH
$$\frac{y_s}{y_a} = 2.27 K_1 K_2 \left(\frac{L'}{y_a} \right)^{0.43} Fr^{0.61} + 1$$

- K1: coeficiente de la forma del estribo (Tabla 10)
- K2: coeficiente por ángulo de ataque
 $K2 = (\theta/90)^{0.13}$ ($\theta < 90^\circ$ apunta aguas abajo, $\theta > 90^\circ$ apunta aguas arriba)
- L': longitud del flujo interrumpida por el estribo
- Ae: sección en la aproximación obstruida por el estribo
- Fr: número de Froude del flujo aguas arriba del estribo $(V_e / (g \cdot y_a))^{1/2}$
- Qe: caudal obstruido por el estribo
- Ve: Q_e / A_e
- Ya: tirante promedio (A_e / L)
- L: longitud del estribo normal al flujo

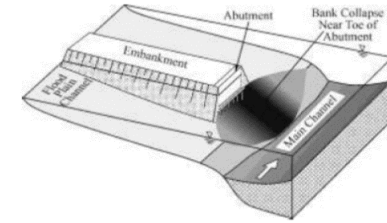


Froelich					
Estribo Margen Izquierda			Estribo Margen Derecha		
K1	0.55		K1	0.55	
K2	1.00		K2	1.00	
L'	120.00	m	L'	128.00	m
Ya	1.62	m	Ya	1.72	m
Ae	192.00	m ²	Ae	220.00	m ²
Qe	115.00	m ³ /s	Qe	134.00	m ³ /s
Ve	0.60	m/s	Ve	0.61	m/s
Fr e	0.15		Fr e	0.15	
Ys	3.50	m	Ys	3.49	m

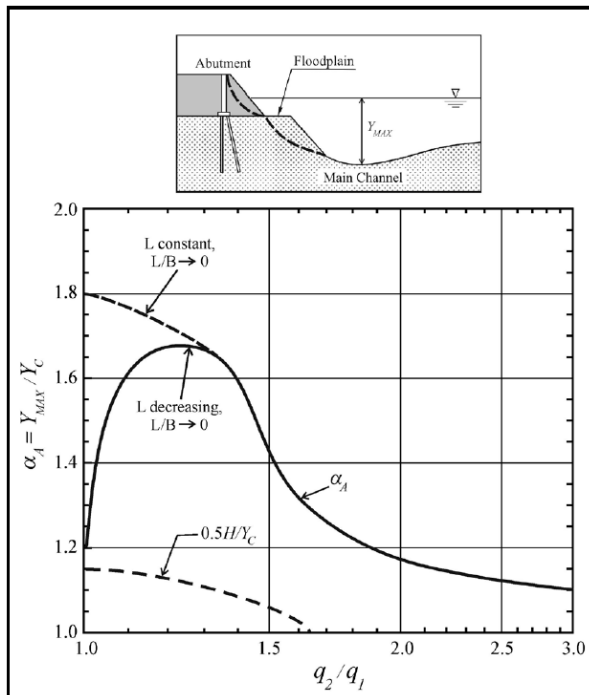
EROSION EN PUENTES – Localizada en Estribos

NCHRP 24-20 Abutment Scour Approach

La ecuación brindada por la NCHRP, se trata de una estimación para la erosión TOTAL producida en el estribo, no debe incluirse a la erosión por contracción



(a)

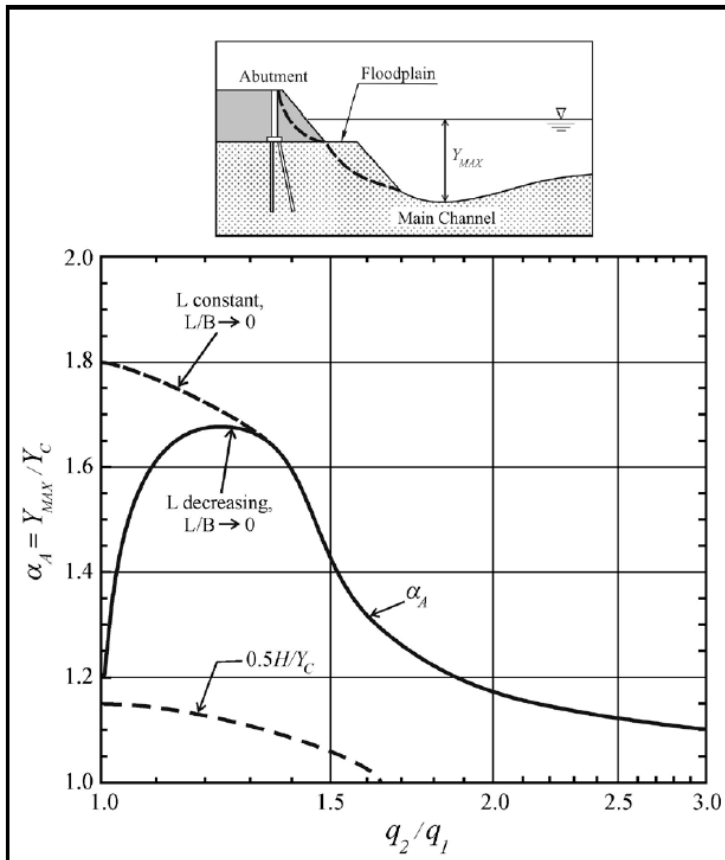


$$y_c = y_1 \left(\frac{q_{2c}}{q_1} \right)^{8/7} \quad Y_{\max} = \alpha_A Y_c$$

- Y_1 : tirante aguas arriba (m)
- q_1 : caudal unitario (m^2/s)
- q_{2c} : caudal unitario en la sección contraída para flujo no uniforme (m^2/s)
- Y_{\max} : tirante máximo resultante de la erosión en el estribo
- Y_c : tirante inicial incluyendo la erosión por contracción (live bed or clear water)
- α_A : factor de amplificación para “live-bed”

EROSION EN PUENTES – Localizada en Estribos

NCHRP 24-20 Abutment Scour Approach



Cross Section Output					
File Type Options Help					
River:	A Morales	Profile:	Max WS		
Reach:	Reach 1	RS:	7917	Plan:	03
Plan: 03 A Morales Reach 1 RS: 7917 Profile: Max WS					
Element		Left OB	Channel	Right OB	
E.G. Elev (m)	12.77				
Vel Head (m)	0.01	0.045	0.033	0.045	
W.S. Elev (m)	12.77	206.10	206.10	206.10	
Crit W.S. (m)					
E.G. Slope (m/m)	0.000088				
Q Total (m3/s)	488.81	154.88	141.44	192.49	
Top Width (m)	2052.15	722.62	136.60	1192.93	
Vel Total (m/s)	0.25	0.24	0.49	0.20	
Max Chl Dpth (m)	3.98	0.91	2.10	0.82	
Conv. Total (m3/s)	52074.0	16499.6	15067.7	20506.7	
Length Wtd. (m)	206.10	723.68	136.88	1193.06	
Min Ch El (m)	8.79	0.78	1.81	0.71	
Alpha	1.59	0.18	0.89	0.14	
Frctn Loss (m)	0.05	1367.72	456.57	925.69	
C & E Loss (m)		2294.90	272.18	1730.23	

NCHRP	
Y1	2.1 m
W canal	95 m
W (sin pilas)	91.1 m
Q1	141 m3/s
Q2	500 m3/s
q1	1.48 m2/s
q2c	5.49 m2/s
q2c/q1	3.70
Yc	7.21 m
alpha A	1.15
Ymax	8.29 m
Ys	5.94 m

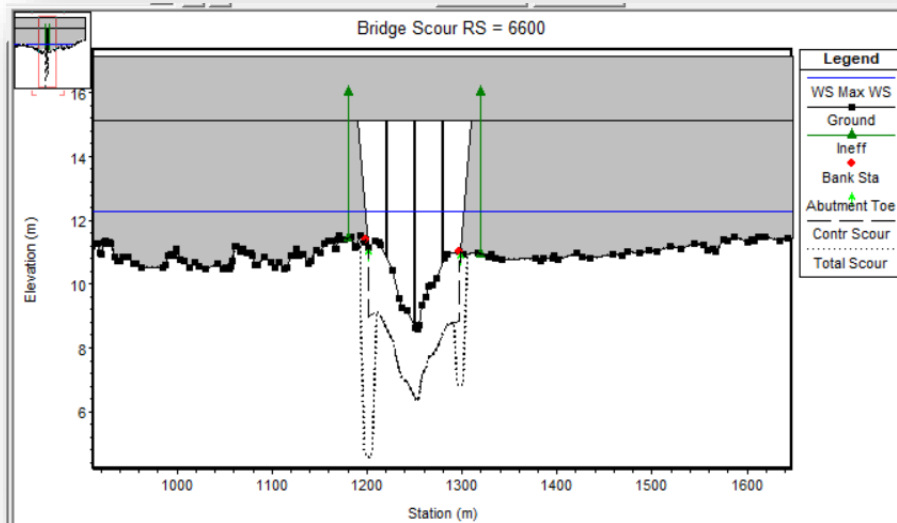


Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EROSION EN PUENTES – Localizada en Estribos



	Izquierda	Derecha
NCHRP (Estribos+ Contracción)	5.94	
Froehlich	1.88	1.77
Artamonov	1.15	1.43
<i>*Erosión por contracción 2m aprox</i>		

Contraction Scour			
	Left	Channel	Right
Ys (m):	0.00	2.22	0.32
Vc (m/s):	0.67	0.71	0.68
Equation:	Clear	Live	Clear
	Left	Right	
Abutment Ys (m):	4.39	3.89	
Froude #:	0.53	0.27	
Equation:	HIRE	HIRE	