

## EXAMEN DE **HIDROLOGÍA AVANZADA II** – 28 de julio de 2022

El examen escrito tiene una duración de 3 horas, dividida en dos partes:

- Parte 1: preguntas teóricas (20 minutos), no podrá consultarse ningún tipo de material.
- Parte 2: resolución de ejercicios (2h 30'), podrá utilizarse todo el material disponible y el software visto durante el curso.

Se deberá entregar:

- Documento (word o pdf) que describa el procedimiento de cálculo utilizado en la resolución de los ejercicios y presente claramente los resultados obtenidos, además de las discusiones/justificaciones que se soliciten.
- los archivos generados y utilizados para la resolución.

*Letra y Solución para Betelie*



**Preguntas Teóricas**

- 1) Describa las principales características y realice una comparación de los archivos vectoriales, matriciales (raster) y TIN.



- 2) ¿Cuáles son las principales consideraciones en el diseño hidráulico de grandes colectores? Mencione al menos 3 y describa los criterios principales de cada una.

### Ejercicio Práctico 1

A los efectos de evaluar el impacto del cambio de uso del suelo sobre el escurrimiento medio en la cuenca alta del río Yí, dados los archivos que se encuentran en la carpeta "Sarandi" se pide:

- a) Generar un proyecto en coordenadas WGS84-UTM21S denominado "Sarandi" e importar los siguientes archivos (todos los archivos deberán estar en el mismo sistema de coordenadas que el proyecto):
  - i. Cuenca.shp
  - ii. Forestacion.shp
  - iii. IsolineasETP.shp
  - iv. Pluviometros.shp
  - v. Suelos.shp
  
- b) Determinar el campo de precipitación en la cuenca para el mes de julio en base al método de los polígonos de Thiessen y calcular la precipitación media ponderada en la cuenca para dicho mes.

| Código | Nombre            | Precipitación Julio (mm/mes) |
|--------|-------------------|------------------------------|
| 2215   | Sarandi del Yi    | 127                          |
| 2073   | Cerro Chato       | 108                          |
| 1971   | Blanquillos       | 110                          |
| 1743   | Rincon de Pereira | 125                          |

- a) Generar un archivo raster con la distribución espacial de la evapotranspiración potencial (ETP) en la cuenca para el mes de julio a partir del mapa de isolíneas de ETP media mensual.

Coeficientes de variación mensual de la ETP

| Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago  | Sep  | Oct  | Nov  | Dic  |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1.88 | 1.56 | 1.37 | 0.88 | 0.58 | 0.36 | 0.37 | 0.47 | 0.61 | 0.94 | 1.25 | 1.72 |

- c) Elaborar una figura en formato JPG en donde pueda apreciarse la distribución espacial del agua disponible (AD) en la cuenca, incluyendo escala gráfica, norte y referencias.
- d) Determinar el volumen de escurrimiento en la cuenca en el mes de julio, en base a un balance hídrico mensual simplificado según la siguiente expresión:

$$Esc_i = P_i - ETP_i - H_{max} + H_{i-1}$$

asumiendo que  $H_{max}$  podrá considerarse igual al AD y que la humedad antecedente del suelo es del 75% del AD.

- e) Cuantificar el cambio en el volumen de escurrimiento en julio en la cuenca si ahora se tiene una zona con cobertura forestal (delimitada por el shape "Forestacion") y el resto de la superficie se mantiene cubierta con pasturas naturales.

Para ello considerar que el escurrimiento afectado por la forestación ( $Esc_{F_i}$ ) puede determinarse a través de la siguiente expresión:

$$Esc_{F_i} = 2,8 \cdot f \cdot Esc_{N_i}$$

Siendo:  $f$  el porcentaje de cobertura forestal de la cuenca y  $Esc_{N_i}$  el escurrimiento natural (correspondiente a pasturas) en el mes  $i$ .

*Nota: Se recomienda utilizar un tamaño de celda de 90x90 m para los archivos raster.*

## **Ejercicio Práctico 2**

La zona que se describe en el proyecto del archivo MVD\_SE.inp ubicada en la zona sureste de Montevideo (470, 6140 km coordenadas Gauss-Kruger) presenta problemas de inundación frecuentes.

a) Analice el funcionamiento del sistema para dos tormentas de diseño de recurrencia 10 años:

- 1- (T1) Intensidad uniforme en el tiempo, duración 20 minutos
- 2- (T2) Tormenta de diseño propuesta por la IM (Tormenta\_MVD.csv)

Para ambas tormentas reportar:

- i) nodos inundados o en carga, tiempos de inundación en esos nodos, conducciones en carga, tiempo durante el que se supera el flujo normal en la conducción.
- ii) Caudal pico y volumen escurrido en la descarga

En función de lo anterior justifique cuál de las dos tormentas genera la situación más crítica en el sistema y seleccione esa tormenta de aquí en adelante.

*Nota: Considere que el intervalo de tiempo del pluviómetro es 5 minutos en ambas tormentas.*

b) El escurrimiento de la subcuenca 1 (SC\_1) ingresa al primer nodo (N\_1) por 3 bocas de tormenta (BT) ubicadas sobre conducciones independientes e idénticas, del tipo cordón cuneta con las siguientes características: ancho al eje de calzada 6m,  $S_o = 1.1\%$ ,  $S_w = 6\%$ ,  $S_x = 2.5\%$ ,  $W = 60\text{cm}$  y  $n = 0.016$ .

- i) Estime el ancho de inundación máximo en dichas conducciones, asumiendo que el caudal se reparte en forma equitativa entre ellas.
- ii) Calcule la longitud necesaria de BT para captar el 100% del caudal máximo de cada conducción.



- c) Se diseña un tanque de laminación (T\_SE), con las siguientes características:
- Sección uniforme de  $1200 \text{ m}^2$ , altura útil (max. depth) de 3m
  - Ubicación en paralelo al conducto C\_5 de la red.
  - Cota de fondo (invert elev.)= Cota de fondo del nodo N\_8.
  - Ingreso desde N\_5: Vertedero transversal (sideflow weir); sin compuerta, altura del vertedero= 0.5m; Longitud= 10m; cota de vertido=0.5m; Coef. Descarga= 3.5.
  - Descarga hacia N\_8: Orificio circular de fondo (bottom) sin compuerta; diámetro= 0.6m; Coef. Descarga= 0.61.
- i) Evalúe los efectos de esta implementación comparando el funcionamiento del sistema con el de la situación sin tanque evaluada en a)
- ii) Redimensione la superficie del tanque para que el tiempo durante el que se supera el flujo normal, no supere los 5 minutos en ninguna conducción.

## EXAMEN DE HIDROLOGÍA AVANZADA II – 28 de Julio 2022

### Pregunta Teórica 1

*Describe las principales características y realice una comparación de los archivos vectoriales, matriciales (raster) y TIN.*

Archivo Vectorial: es un archivo que contiene un conjunto de elementos geométricos (punto, línea, polígono) que representan elementos reales sobre la superficie terrestre. Cada archivo vectorial está compuesto de un solo tipo de primitivas gráficas y representa un conjunto homogéneo de datos geográficos. Resultan adecuados para representar elementos geométricos discretos con fronteras bien definidas. Tiene una estructura de datos compacta, generando archivos poco voluminosos, aunque compleja. Permite la generación de topología.

Archivo Raster: es un archivo matricial compuesto por una grilla continua de celdas que representan una porción de la superficie terrestre. En cada celda se almacena un valor que representa un parámetro del mundo real. Resultan muy adecuados para representar elementos geográficos continuos, difusos o de variación espacial progresiva. Tiene una estructura de datos poco compacta, generando archivos grandes de datos, no obstante, tiene una estructura sencilla de almacenamiento. Permite realizar operaciones matriciales de forma simple y muy potente.

Archivo TIN: es una red irregular de triángulos no superpuestos que representa la morfología de superficies. El archivo está compuesto por vértices (puntos de los triángulos) y bordes (lados de los triángulos), que siguen la morfología de los elementos que se quieren representar sin perder la posición original. Resultan muy adecuados para representar elementos geográficos continuos con fuerte variación espacial. Una ventaja significativa de estos archivos es que son capaces de densificar la cantidad y tamaño de los triángulos conforme se tiene mayor gradiente del parámetro o variable que se esté representando. Tiene una estructura poco compacta de datos y es limitada la capacidad de operar con estos archivos. En base a estos archivos es posible generar archivos matriciales.

## **Pregunta Teórica 2**

Las principales consideraciones en el diseño hidráulico de grandes colectores son:

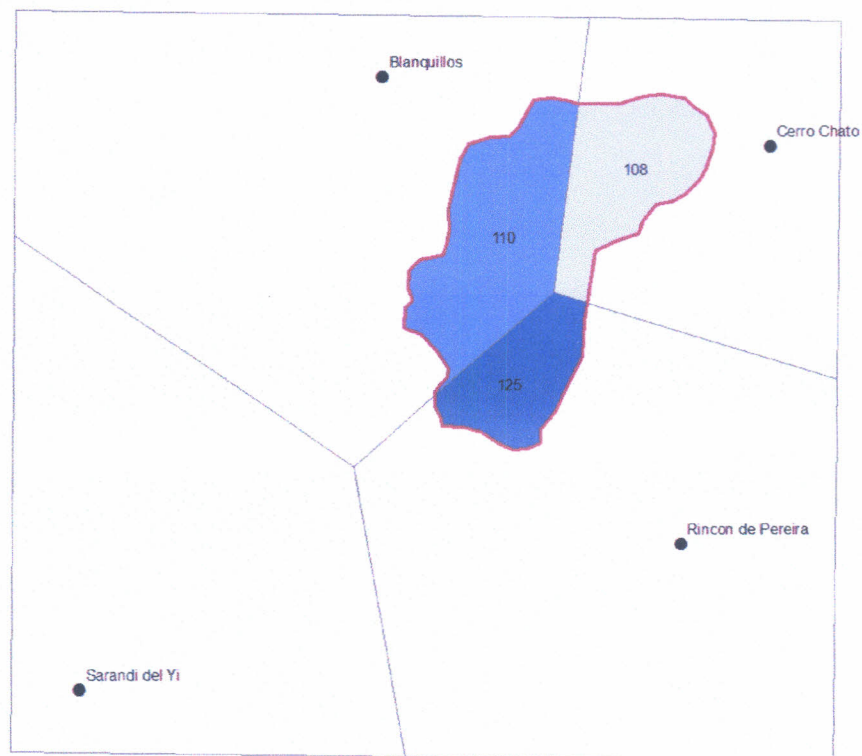
1. Tensión tractiva: mínimas por autolimpieza, Tensión tractiva media  $\geq 1.5$  Pa al menos una vez por día. Las máximas para evitar erosión no son de aplicación habitual para el diseño de colectores de gran diámetros, sino que generalmente se limita por velocidad
2. Velocidades límite:
  - a. Mínimas por autolimpieza: 1 m/s para caudal de proyecto (orden de magnitud, ver proyecto a proyecto).
  - b. Máximas para evitar erosión: Cavitación (en obra: cuidar juntas, solera etc.), Abrasión del agua: Gómez Valentín:  $V_{max} = 6$  m/s si cumple baja cantidad y tamaño sólidos, Hormigón de sacrificio en solera, Funcionamiento esporádico e Inspección y limpieza. Davis y Sorensen: Agua limpia  $V_{max} = 12$  m/s, Agua con sedimentos  $V_{max} = 3$  m/s. IMontevideo  $V_{max}=4.5$  m/s.
3. Pendientes
  - a. Máximas: Se limitan para cumplir criterios de velocidad máxima permitida u otros criterios de diseño.
  - b. Mínimas: Se limitan para cumplir diferentes criterios de diseño, habitualmente los colectores de gran diámetro no presentan mayores problemas al respecto. Es muy importante tener en cuenta el procedimiento constructivo para limitar la pendiente mínima, para que la misma sea construible. Colectores contruidos con procedimientos constructivos "normales" habitualmente permiten una pendiente mínima de 3 por mil (0,003)
4. Pérdidas de energía
  - a. Distribuídas: Resistencia al flujo ( Manning,  $n=0.013-0.017$ )
  - b. Localizadas: expansiones, contracciones o cualquier alteración en el flujo lineal.
5. Resguardos o borde libre para caudal proyecto
6. Análisis de posible entrada en carga

### Ejercicio Práctico 1

- a) Se genera un proyecto de ArcMap y se le asigna en las Propiedades del Marco de Datos (*Layers/Properties*) el sistema de coordenadas pedido. Luego se importan todos los archivos, verificando previamente que tengan el sistema de coordenadas correcto (es necesario proyectar el archivo "Pluviometros" ya que originalmente están en GCS-WGS 1984).

b) Campo de precipitación en julio

Se agrega un campo (Julio) al shape "Pluviometros" y se asignan los valores de precipitación seleccionando cada pluviómetro. Se construyen los polígonos de Thiessen mediante la herramienta "*Create Thiessen Polygons*", se intersectan con el contorno de la cuenca (*Clip*) y se calcula el área de influencia de cada pluviómetro. Para calcular la precipitación media en la cuenca se hace una suma ponderada por el área: **112,7 mm**.



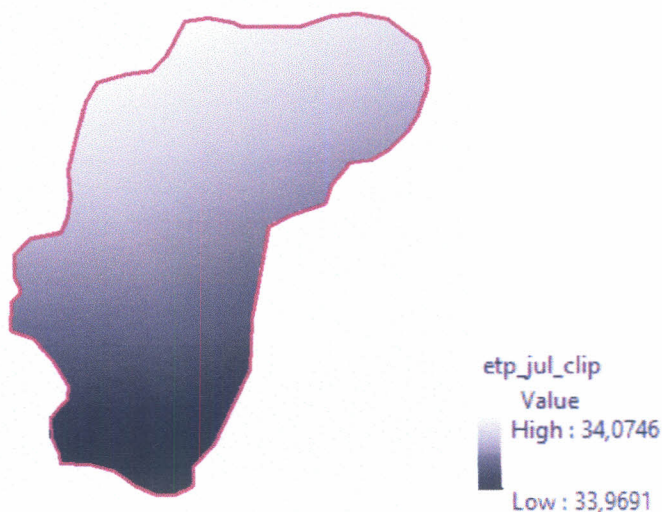
| Código | Nombre            | Area (km <sup>2</sup> ) | Fraccion | Julio (mm) |
|--------|-------------------|-------------------------|----------|------------|
| 2215   | Sarandi del Yi    | 0,0                     | 0,00     | 127        |
| 2073   | Cerro Chato       | 33,0                    | 0,31     | 108        |
| 1971   | Blanquillos       | 48,3                    | 0,46     | 110        |
| 1743   | Rincon de Pereira | 23,6                    | 0,23     | 125        |

c) Distribución espacial de ETP

Se genera un tin a partir del shape IsolineasETP (*Create tin*), seleccionando como campo "CONTOUR" y softline. Se genera un raster ("ETP") a partir de dicho tin (*Tin to raster*), seleccionando un tamaño de celda de 90 m.

Se genera un raster de ETP\_Julio =  $0,37 * ETP$  con el *Raster Calculator*.

Se hace un *Clip (Data Management)* de dicho raster con el contorno de la cuenca.

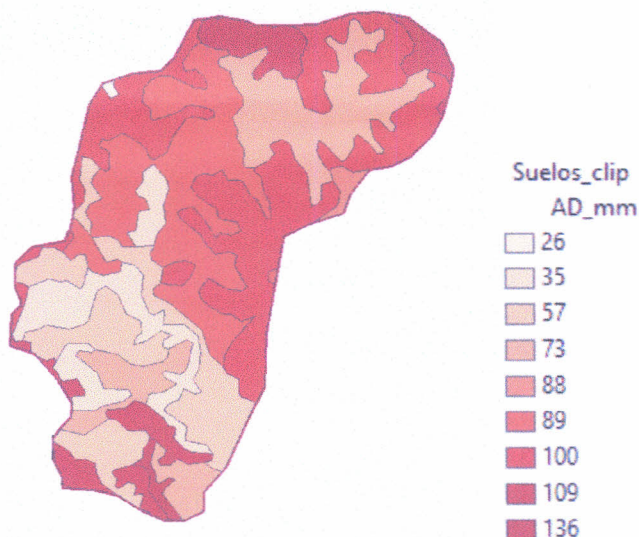


d) Figura con la distribución del AD en la cuenca

Se hace un *Clip (Analysis)* del shape de Suelos con el contorno de la cuenca. En las propiedades del shape, se selecciona la visualización por categorías según el campo AD\_mm (*Simbology/Categories*).

Se cambia la visualización al Layout del mapa, en las propiedades de impresión (Botón derecho -> "Page and Print Setup") se define algún tamaño adecuado para enmarcar el Data Frame. Se prenden sólo los shapes que se quieren mostrar

y se les da el formato y color deseado. Luego, se modifica la posición y el tamaño del Data Frame (ya sea a mano en el mapa o en las propiedades). Desde el menú "Insert", se agrega la escala gráfica, las referencias y el Norte. En las propiedades de dichos elementos se cambia el formato, etc. En el menú "File" se selecciona "Export Map" y se selecciona la extensión JPG.



#### e) Volumen de escurrimiento

Se transforma el shape de SuelosClip (ThiessenClip) en raster, utilizando la herramienta *Feature to Raster*, seleccionando el campo de AD\_mm (Julio). Se selecciona el tamaño de celda de 90 m.

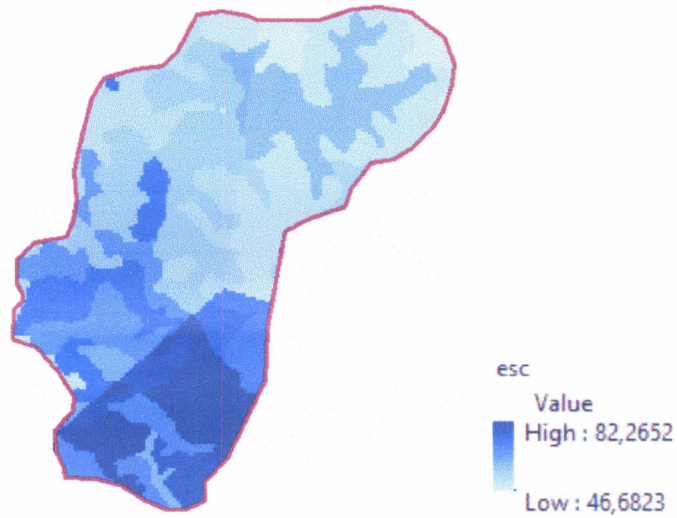
Se genera un raster de  $AD_{inicial} = 0,75 * AD$  con el *Raster Calculator*.

Se genera un raster de  $Esc = P - ETP - AD + AD_{inicial}$  con el *Raster Calculator*.

Luego se consulta el promedio de Esc en las propiedades del raster y se multiplica por el área de la cuenca para calcular el volumen de escorrentía, o bien se calcula la suma del Esc (*Zonal Statistics*) y se multiplica por el tamaño de la celda.

$$Vesc = EscMedia * Acuenca = (58,5 \text{ mm}) * (105 \text{ Km}^2) / 1000$$

$$Vesc = 6,14 \text{ Hm}^3$$



f) Cambio en el volumen de escurrimiento

$$Esc_{Fi} = 2,8 \cdot f \cdot Esc_{Ni}$$

$$Esc_{Fi} = 2,8 \cdot \left(\frac{31,8}{105}\right) \cdot 6,14 = 5,21 \text{ Hm}^3$$

$$\Delta Esc = \left(\frac{5,21 - 6,14}{6,14}\right) = -15\%$$

## Ejercicio Práctico 2

a) Para la tormenta de intensidad constante ( $I_{max}$ ) y duración 20 min:

$P(3,10, \text{Montevideo}) = 89 \text{ mm}$ ,  $I_{max}(Tr=10, d=20\text{min}) = 100.4 \text{ mm/h}$

Se implementan las dos tormentas en el modelo SWMM como *Time Series*, se agrega un *Rain Gage* (pluviómetro) con *Rain Format = Intensity*, paso temporal de 5 minutos (igual al paso temporal usado en las *Time Series*) y se asocia este pluviómetro a cada subcuenca.

Se corre el modelo con las opciones ya implementadas y se obtienen los resultados requeridos en los dos escenarios:

i)

Tormenta Uniforme- T1

No se generan nodos inundados, ni en carga. Los conductos que entran en carga son:

Topic: Conduit Surge Click a column header to sort the column.

| Conduit | Hours Both Ends Full | Hours Upstream Full | Hours Dnstream Full | Hours Above Normal Flow | Hours Capacity Limited |
|---------|----------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|
| C_4     | 0.01                 | 0.01                | 0.17                | 0.01                    | 0.01                   |
| C_5     | 0.17                 | 0.17                | 0.23                | 0.25                    | 0.17                   |
| C_8     | 0.01                 | 0.01                | 0.01                | 0.30                    | 0.01                   |

Tormenta IM- T2

Durante el evento 5 nodos entran en carga en el sistema, siendo los más comprometidos N\_5, N\_4 y N\_8

34/39

Topic: **Node Surge** Click a column header to sort the column.

| Node | Type     | Hours Surcharged | Max Height Above Crown Meters | Min Depth Below Rim Meters |
|------|----------|------------------|-------------------------------|----------------------------|
| N_3  | JUNCTION | 0.01             | 0.304                         | 0.626                      |
| N_4  | JUNCTION | 0.07             | 0.910                         | 0.440                      |
| N_5  | JUNCTION | 0.10             | 0.000                         | 0.000                      |
| N_6  | JUNCTION | 0.01             | 0.000                         | 0.000                      |
| N_8  | JUNCTION | 0.04             | 0.102                         | 1.078                      |

Topic: **Node Flooding** Click a column header to sort the column.

| Node | Hours Flooded | Maximum Rate CMS | Day of Maximum Flooding | Hour of Maximum Flooding | Total Flood Volume 10 <sup>6</sup> ltr | Maximum Poned Depth Meters |
|------|---------------|------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------------------|----------------------------|
| N_5  | 0.10          | 2.684            | 0                       | 01:05                    | 0.566                                  | 0.000                      |
| N_6  | 0.01          | 0.096            | 0                       | 01:05                    | 0.001                                  | 0.000                      |

Topic: **Conduit Surge** Click a column header to sort the column.

| Conduit | Hours Both Ends Full | Hours Upstream Full | Hours Dnstream Full | Hours Above Normal Flow | Hours Capacity Limited |
|---------|----------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|
| C_1     | 0.01                 | 0.01                | 0.04                | 0.01                    | 0.01                   |
| C_2     | 0.01                 | 0.01                | 0.01                | 0.03                    | 0.01                   |
| C_3     | 0.01                 | 0.01                | 0.07                | 0.01                    | 0.01                   |
| C_4     | 0.11                 | 0.11                | 0.21                | 0.01                    | 0.01                   |
| C_5     | 0.21                 | 0.21                | 0.22                | 0.22                    | 0.21                   |
| C_6     | 0.01                 | 0.01                | 0.10                | 0.01                    | 0.01                   |
| C_8     | 0.01                 | 0.04                | 0.01                | 0.24                    | 0.01                   |

ii)

| Tormenta | Qmax (m <sup>3</sup> /s) | Volumen escurrido (m <sup>3</sup> ) |
|----------|--------------------------|-------------------------------------|
| T1       | 5.35                     | 0.708                               |
| T2       | 6.36                     | 1.62 x10 <sup>4</sup>               |

8/5/22

Se puede observar que la tormenta IM genera mayor volumen de escorrentía y más nodos y conductos comprometidos en el sistema.

a) Para la tormenta IM\_Tr10 los caudales máximos generados en las subcuencas son:

| Summary Results                                                      |                 |                |               |                |                  |                |                 |                                  |                 |              |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|---------------|----------------|------------------|----------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|--------------|
| Topic: Subcatchment Runoff Click a column header to sort the column. |                 |                |               |                |                  |                |                 |                                  |                 |              |
| Subcatchment                                                         | Total Precip mm | Total Runon mm | Total Evap mm | Total Infil mm | Imperv Runoff mm | Perv Runoff mm | Total Runoff mm | Total Runoff 10 <sup>6</sup> ltr | Peak Runoff CMS | Runoff Coeff |
| SC1                                                                  | 81.92           | 0.00           | 0.00          | 30.62          | 29.93            | 19.29          | 49.22           | 2.29                             | 1.19            | 0.601        |
| SC2                                                                  | 81.92           | 0.00           | 0.00          | 24.79          | 39.62            | 15.95          | 55.58           | 3.53                             | 2.02            | 0.678        |
| SC3                                                                  | 81.92           | 0.00           | 0.00          | 26.73          | 36.22            | 16.98          | 53.19           | 4.12                             | 2.22            | 0.649        |
| SC4                                                                  | 81.92           | 0.00           | 0.00          | 21.39          | 45.33            | 14.20          | 59.54           | 3.10                             | 1.93            | 0.727        |
| SC5                                                                  | 81.92           | 0.00           | 0.00          | 30.62          | 29.97            | 18.94          | 48.91           | 2.03                             | 1.02            | 0.597        |
| SC6                                                                  | 81.92           | 0.00           | 0.00          | 27.71          | 34.86            | 17.89          | 52.75           | 1.85                             | 1.05            | 0.644        |

b) A cada CC le corresponde 1/3 de esa caudal, por lo tanto conduce un caudal máximo de 397 l/s, y con las características definidas se genera en esas conducciones el siguiente ancho de inundación:

Curb and Gutter Analysis

Gutter

Longitudinal Slope of Road: 0.011 (m/m)

Cross-slope of Pavement: 0.060 (m/m)

☒ Define Cross-slope of Gutter: 0.025 (m/m)

Manning's Roughness: 0.016

Gutter Width: 0.600 (m)

Enter one of the following:

☒ Design Flow: 0.397 (cms)

☐ Width of Spread: 3.003 (m)

Compute unknown

Gutter Depression: -21.000 (mm)

Area of Flow: 0.264 (m<sup>2</sup>)

Eo (Gutter Flow to Total Flow): 0.421

Depth at Curb: 159.196 (mm)

10/30

- i. La longitud  $L_T$ , o largo requerido para interceptar todo el flujo que escurre por el cordón cuneta (m), puede estimarse según:

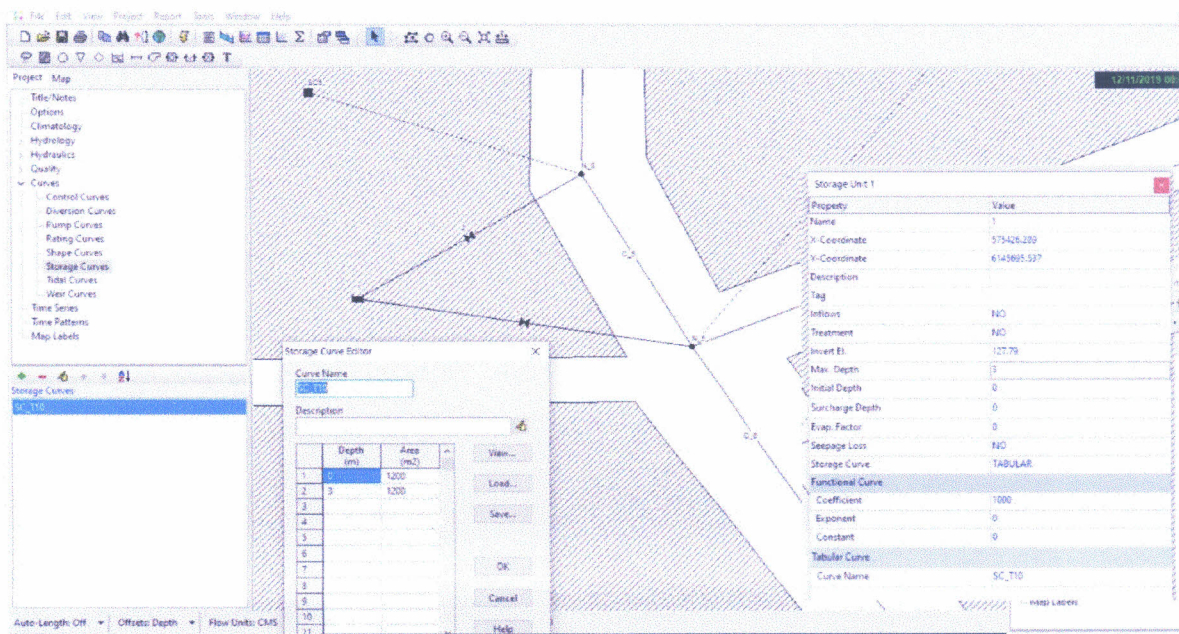
$$L_T = 0.817 \cdot Q^{0.42} \cdot S_o^{0.3} \cdot \left( \frac{1}{n \cdot (S_x + (S_w - S_x) \cdot E_o)} \right)^{0.6}$$

Donde  $E_o$  es la eficiencia calculada en la parte anterior: 0.421.

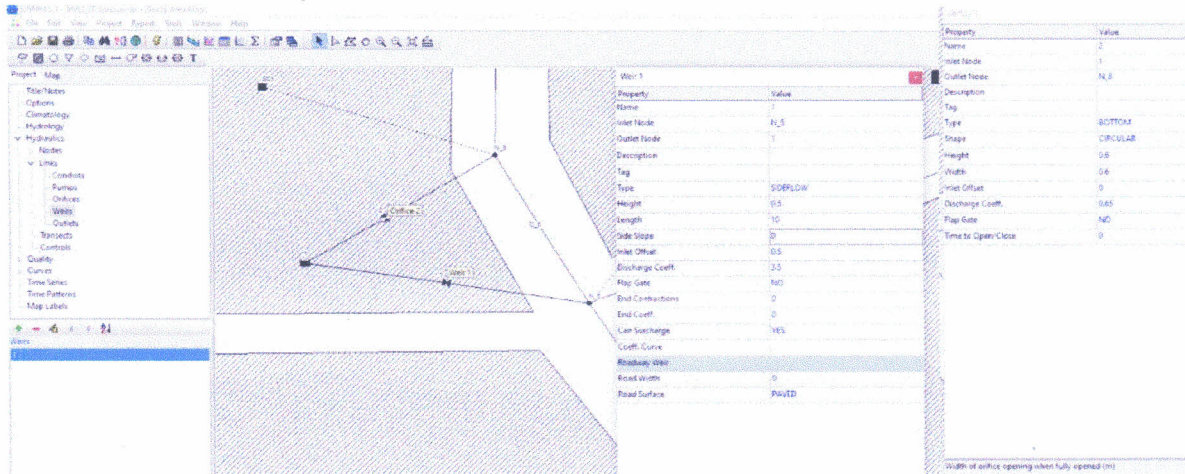
$L_T = 11.9\text{m}$

- c) En las figuras se muestran las distintas componentes implementadas en SWMM para la representación del Tanque y demás elementos:

Tanque y curva de almacenamiento:



### Vertedero de entrada y Orificio de salida:



- i) La implementación del tanque reduce el caudal circulante por las conducciones aguas abajo del N\_5, genera que ningún nodo se inunde y que los conductos en carga se reduzcan a 3:

Topic: **Conduit Surchage** Click a column header to sort the column.

| Conduit | Hours Both Ends Full | Hours Upstream Full | Hours Dnstream Full | Hours Above Normal Flow | Hours Capacity Limited |
|---------|----------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|
| C_1     | 0.01                 | 0.01                | 0.04                | 0.01                    | 0.01                   |
| C_2     | 0.01                 | 0.01                | 0.01                | 0.03                    | 0.01                   |
| C_8     | 0.01                 | 0.01                | 0.01                | 0.20                    | 0.01                   |

En la salida del sistema:

Topic: **Outfall Loading** Click a column header to sort the column.

| Outfall Node | Flow Freq. Pcnt. | Avg. Flow CMS | Max. Flow CMS | Total Volume 10 <sup>6</sup> ltr |
|--------------|------------------|---------------|---------------|----------------------------------|
| O_11         | 96.65            | 1.801         | 5.408         | 16.130                           |

En comparación con la situación sin tanque, el caudal a la salida se reduce en un 15%

- ii) En la curva de almacenamiento asociada al Tanque se varía la superficie hasta que se llega al tiempo máximo admitido de 5 minutos (0.08h):

| Superficie del Tanque (m2) | 1200                            | 1800 | 2500 | 3000 | 2800 |
|----------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|
| Conduit                    | Tiempo excede caudal normal (h) |      |      |      |      |
| C_1                        | 0.01                            | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| C_2                        | 0.03                            | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| C_8                        | 0.2                             | 0.16 | 0.09 | 0.07 | 0.08 |