



Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Ingeniería
Centro Interamericano de Recursos del Agua



Título de la Tesis:

“Simulación hidrodinámica de avenidas combinando modelos 1D y 2D. Caso de estudio río la Sierra”

Alumno:

Ing. Juan Antonio Morales Orozco

Director de Tesis

Dr. Carlos Díaz Delgado

Co-Director de Tesis

Dr. Humberto Salinas Tapia



Toluca, Edo. de México

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo económico otorgado para la realización de esta tesis para obtener el título de Maestro en Ciencias del Agua: Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), dentro del proyecto de investigación **3952/2015E “Modelación de eventos hidrológicos extremos a partir de precipitación estimada por percepción remota”**, en el marco de la convocatoria **“Proyectos de Desarrollo Científico para Atender Problemas Nacionales, 2014”**. Así como del proyecto **“Hidrología en Mauritania: Modelación de caudales a partir de precipitación estimada por imágenes de satélite”** Clave 4192/2016E.

Al Dr. Carlos Diaz Delgado y al Dr. Humberto Salinas Tapia, por su apoyo intelectual y moral para el avance y mejora del proyecto de tesis que se presenta.

A los Profesores que durante éstos años de estudio de maestría han sido una fuente abundante de conocimiento y motivación.

A los miembros integrantes del jurado, por sus acertadas recomendaciones y aportaciones:

Dr. Khalidou Mamadou Bâ

Dr. Juan Antonio García Aragón

Dr. Victor Hugo Guerra Cobián

A todo el personal administrativo de la Facultad de Ingeniería y del Centro Interamericano de Recursos del Agua por todo su apoyo y paciencia.

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo, resultado de años de trabajo y esfuerzo a todas las personas que de alguna manera han apoyado su desarrollo, bien con aporte de conocimiento, bien con apoyo moral que me han motivado a continuar.

A mi madre, que siempre tiene tiempo para darme ánimos y un jalón de orejas cuando es necesario. Y más que nada, que siempre ha confiado en mí, y en todos los proyectos que he emprendido.

A mi familia, siempre los tengo presentes.

A mis amigos, estén cerca o lejos, nunca me olvido de ustedes.

A Richard, Karen, Rebeca, Cata y Christian, que en el proceso de esta tesis han permitido que conserve la cordura.

A Daniela, mi genio loco personal.

A Aidé, que en resumen es la razón de hacer esta tesis.

Resumen

La correcta simulación de avenidas es una herramienta importante para analizar el impacto que un evento de precipitación puede tener sobre una zona. Sobre todo si dicha zona tiene actividad humana. Por lo tanto se requiere delimitar cuidadosamente la extensión de la zona afectada para determinar apropiadamente el alcance del impacto de las inundaciones sobre los asentamientos humanos.

La zona afectada se determina por medio de la estimación de la mancha de inundación, realizando simulaciones hidrodinámicas de avenidas, utilizando modelos de simulación con un componente de dirección (1D) o modelos con dos componentes de dirección (2D).

Los modelos de simulación 1D utilizan secciones transversales a lo largo del eje del río como unidades de cálculo, y resolviendo las ecuaciones de continuidad y de

Para tal labor, contamos con modelos de simulación en una dirección (1D) y dos direcciones (2D), cada uno con sus ventajas y desventajas. Los modelos 1D por un lado requieren una menor cantidad de datos y poco poder computacional para funcionar, por lo que requieren una menor cantidad de tiempo para proporcionar resultados. Los modelos 2D, por otro lado utilizan una mayor cantidad de datos y poder computacional, a cambio de poder modelar cambios en las direcciones del flujo que están fuera del alcance de los modelos 1D.

Existen situaciones en las que ambos modelos tienen poca o ninguna diferencia en sus resultados, principalmente cuando la avenida presenta una dirección de flujo predominante, es decir, cuando el flujo está confinado o bien, la dirección del flujo de la planicie de inundación es la misma que la del río principal, los resultados no varían sensiblemente entre ambos modelos y por tanto puede optarse por utilizar el modelo 1D sobre el 2D por su eficiencia computacional.

Si ambos modelos son combinados en un solo esquema de manera adecuada, es posible utilizar el modelo 1D en las zonas donde el flujo está confinado y el 2D en planicies de inundación con más de una dirección predominante, optimizando así los tiempos de computación.

Para que las simulaciones puedan llevarse a cabo, se requieren como datos mínimos a) datos batimétricos y b) datos de uso de suelo. Adicionalmente, para la simulación de eventos específicos, son necesarios c) datos hidrométricos d) datos fisiográficos de la cuenca.

Los datos batimétricos fueron obtenidos como parte del Continuo de Elevaciones Mexicano Versión 3 (CEM V.3).

Los datos batimétricos del CEM V.3 tienen una resolución de 15 m, aunque las elevaciones en cuerpos de aguas profundas no lograron ser registradas, debido a que en general, los levantamientos LiDAR no logran penetrar la superficie de agua a demasiada profundidad.

Es por esto que para la correcta simulación hidrodinámica, fue necesario determinar un fondo sintético para los cuerpos de agua que en el CEM V.3 se marcan como valores nulos. Utilizamos el método de Corum para determinar un fondo sintético que sea equivalente en cuanto funcionamiento hidráulico. El método de Corum para obtener lechos sintéticos de río requiere conocer la elevación del espejo de agua y el caudal relacionado con esta elevación. Se realizan simulaciones sucesivas en HEC-RAS usando el caudal conocido, restando en cada una la diferencia de la elevación del espejo de agua simulado y el espejo de agua conocido al fondo de las secciones del canal, hasta que la diferencia entre ambos sea menor que una tolerancia predeterminada (0.006 m, en el caso de la presente investigación).

Los caudales conocidos son los correspondientes a la salida de la cuenca. No es apropiado considerar estos caudales constantes a lo largo de todo el eje del río, de forma que es distribuido a lo largo del eje utilizando el modelo y software CEQUEau, por medio de estaciones ficticias. Después que se determina el caudal aportado por cada estación ficticia en un periodo de tiempo, se utiliza el software de HEC-RAS para determinar el tiempo de escurrimiento desde cada estación ficticia hacia la salida de la cuenca, las herramientas del Integrated Water Management son utilizadas para determinar las propiedades fisiográficas (área y tiempo de concentración nos serán indispensables) de cada subcuenca delimitada por las estaciones ficticias, y se usan estos datos para estimar un hidrograma sintético utilizando el método de la SCS.

Los resultados obtenidos verifican que un esquema combinado de simulación puede incrementar la velocidad de cálculo hasta por más de veinte veces, siguiendo las recomendaciones siguientes

1. El canal principal debe ser representado por un modelo 1D
2. Los tramos cuya aportación para un periodo de retorno máximo predefinido por el proyectista no presenten desbordamiento del canal principal, no necesitarán ser complementados por una malla 2D.
3. Las zonas de las planicies de inundación cuyo sentido de flujo sea el mismo que el del río principal, deben representarse por un modelo 1D.

4. Las zonas de la planicie de inundación cuyo sentido de flujo sea diferente al del eje principal del río deben ser discretizados por una malla 2D y unidos lateralmente al modelo 1D del canal principal.
5. Los meandros que para un periodo de retorno máximo predefinido por el proyectista no presenten desbordamientos que generen varias intersecciones de la mancha de inundación con el mismo eje del río, se representarán utilizando un modelo 1D cuidando que no exista traslape entre las secciones transversales. De otra manera, se sustituirá el tramo de río 1D por una malla 2D unida frontalmente aguas arriba y aguas abajo del meandro.
6. En zonas donde haya riesgo de ruptura de diques, es aconsejable unir lateralmente una malla 2D a las secciones transversales en las que se puede presentar la ruptura
7. Cuando existen canales adyacentes al río principal (naturales o artificiales) es recomendable modelar tales canales usando una malla 2D unida lateralmente al modelo 1D.
8. Cuando entre secciones transversales existan zonas que tiendan a fluir en sentido contrario al del río principal, se unirá lateralmente una malla 2D al modelo 1D para que el vector de dirección en esa zona pueda ser representado apropiadamente.
9. Las fronteras entre los modelos 1D y 2D deben tener un tamaño igual o menor al del pixel del DEM, por un lado para asegurar que la dirección del flujo en la transición de los modelos sea apropiada, y por otro lado para disminuir el número de iteraciones necesarias en la transferencia de flujo entre los modelos 1D y 2D. Puede modificarse el tamaño de la malla solo en la frontera mediante el uso de líneas de quiebre. Dado al uso de submalla que hace HEC-RAS en el modelo 2D, la mancha de inundación no muestra cambios sensibles

En cada caso en el que sea necesario emplear una malla 2D, debe tenerse en consideración que en cada iteración, todas las celdas presentan carga computacional, incluso si no hay flujo a través de ellas (celdas secas), por lo es deseable que las mallas no se extiendan innecesariamente. La mejor manera de determinar las zonas en las que es necesario realizar una combinación de modelos 1D y 2D, es realizar previamente una simulación puramente 1D, transitando los caudales correspondientes a un periodo de retorno considerado adecuado por el proyectista para verificar las posibles áreas de inundación.

Contenido

| | |
|--|-----|
| Notaciones utilizadas y unidades | xii |
| 1 Introducción..... | 1 |
| 1.1 Antecedentes | 3 |
| 1.2 Estado del arte..... | 4 |
| 1.3 Justificación..... | 8 |
| 1.4 Hipótesis..... | 9 |
| 1.5 Objetivos | 10 |
| 1.5.1 Objetivo general..... | 10 |
| 1.5.2 Objetivos específicos..... | 10 |
| 2 Marco teórico..... | 11 |
| 2.1 Modelo y software HEC-RAS (V. 5.x)..... | 11 |
| 2.2 Principios matemáticos de las simulaciones hidrodinámica de flujo | 16 |
| 2.2.1 Ecuaciones empleadas dentro de la simulación 1D de flujo estable | 16 |
| 2.2.2 Ecuaciones empleadas en la simulación 1D de flujo no estable..... | 17 |
| 2.2.3 Ecuaciones empleadas en la simulación 2D de flujo no estable..... | 18 |
| 2.3 Modelo CEQUEau | 20 |
| 2.4 Matlab | 21 |
| 2.5 Herramientas TopoToolBox..... | 23 |
| 2.6 Herramientas Integrated Water Management..... | 26 |
| 2.7 Método de obtención de batimetría sintética propuesto por Corum..... | 26 |
| 2.8 Métodos estadísticos para la evaluación de datos | 28 |
| 2.8.1 Calidad de las series de datos | 28 |
| 2.8.2 Análisis estadístico de los datos | 32 |
| 2.9 Hidrograma sintético de la SCS | 36 |
| 3 Materiales y métodos..... | 39 |
| 3.1 Recopilación de datos..... | 41 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.2 | Tratamiento de datos | 42 |
| 3.2.1 | Datos batimétricos..... | 42 |
| 3.2.2 | Datos hidrometeorológicos..... | 43 |
| 3.2.3 | Datos hidrométricos | 47 |
| 3.2.4 | Datos de uso de suelo | 48 |
| 3.3 | Generación de hidrogramas sintéticos por el método de la SCS distribuidos a lo largo del eje del río principal | 50 |
| 3.4 | Simulaciones iniciales..... | 54 |
| 3.4.1 | Simulación de caudales medios usando CEQUEau | 54 |
| 3.4.2 | Simulación hidrodinámica de avenidas en 1D usando HEC-RAS | 54 |
| 3.4.3 | Simulaciones hidrodinámicas de avenidas en 2D usando HEC-RAS | 57 |
| 3.5 | Comparación de los resultados de las simulaciones..... | 62 |
| 4 | Aplicación..... | 63 |
| 4.1 | Zona de estudio | 63 |
| 4.2 | Recopilación y tratamiento de información | 65 |
| 4.2.1 | Información batimétrica | 65 |
| 4.3 | Hidrogramas sintéticos por el método de la SCS..... | 92 |
| 4.4 | Simulaciones 1D | 113 |
| 4.5 | Simulaciones 2D | 120 |
| 4.6 | Comparación de resultados de las simulaciones 1D y 2D..... | 124 |
| 4.7 | Resultados de la combinación de modelos 1D y 2D | 128 |
| 5 | Conclusiones y recomendaciones..... | 136 |
| | Referencias bibliográficas..... | 140 |
| 6 | Anexos..... | 145 |
| 6.1 | Códigos fuente de las herramientas desarrolladas..... | 145 |
| 6.1.1 | IMPTIF..... | 145 |
| 6.1.2 | CALRIO..... | 145 |

| | | |
|--------|------------------------------------|-----|
| 6.1.3 | EXP2TIF | 147 |
| 6.1.4 | CLOSEGAP | 147 |
| 6.1.5 | CERRARSECCIONES | 149 |
| 6.1.6 | SECTRASLAPE..... | 152 |
| 6.1.7 | SECINT..... | 156 |
| 6.1.8 | SEXPUNTOS | 157 |
| 6.1.9 | VECUNI..... | 159 |
| 6.1.10 | MAPMANNING..... | 159 |
| 6.1.11 | TIRANTES..... | 160 |
| 6.1.12 | DIRECCIÓN | 161 |
| 6.1.13 | ESPBOOL | 162 |
| 6.1.14 | EXPORTGEO | 165 |
| 6.1.15 | BANYDIQ | 169 |
| 6.1.16 | SECCIONAR | 173 |
| 6.1.17 | EROSIONADOR | 176 |
| 6.1.18 | IMPORTAR DESDE HEC | 178 |
| 6.1.19 | PRUEBAS ESTADÍSTICAS | 191 |
| 6.1.20 | EXPORTAR A CEQUEAU..... | 204 |
| 6.1.21 | EXTHID..... | 209 |
| 6.2 | Estructura de archivos *.geo | 210 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| FIGURA 1-1 ESQUEMA DE VECTORES DE FLUJO RESULTANTES BAJO EL EMPLEO DE UN MODELO 1D DONDE EXISTE UN OBSTÁCULO. | 6 |
| FIGURA 2-1 MÉTODO DEL PASO ESTÁNDAR PARA LA SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE LA ENERGÍA PARA FLUJOS ESTABLES EN 1D... | 12 |
| FIGURA 2-2 ALGORITMO PARA SOLUCIONAR LAS ECUACIONES DE FLUJO NO ESTABLE (1D Y COMBINACIÓN 1D/2D) | 13 |
| FIGURA 2-3 EJEMPLO DE DATOS BATIMÉTRICOS DENTRO DE LA MALLA DE CÁLCULO PARA LA SIMULACIÓN 2D | 14 |
| FIGURA 2-4 ESQUEMA DE ELEMENTOS DE CÁLCULO 2D | 15 |
| FIGURA 2-5 ALGORITMO DE SIMULACIÓN FLUJO NO ESTABLE 2D | 15 |
| FIGURA 2-6 DIVISIÓN DE LA SECCIÓN TRASVERSAL PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD PONDERADA (VER ECUACIÓN 2-6) | 17 |
| FIGURA 2-7 IMPORTACIÓN DE GEOTIFF A MATLAB PARA EL USO EN TOPOTOOLBOX | 24 |
| FIGURA 2-8 ACUMULACIÓN DE UNIDADES DE FLUJO DENTRO DEL DEM (IMAGEN TOMADA DE SCHWANGHART Y KUHN, 2010) | 25 |
| FIGURA 2-9 ALGORITMO DE CORUM PARA OBTENER UN LECHO SINTÉTICO | 27 |
| FIGURA 2-10 DIAGRAMA ADIMENSIONAL DE LA SCS, ADAPTADO POR CHOW, (2000) DEL SOIL CONSERVATION SERVICE ENGINEERING HANDBOOK, 1972. | 37 |
| FIGURA 3-1 ESQUEMA DE MODELO COMBINADO 1D/2D | 39 |
| FIGURA 3-2 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN PROPUESTA | 40 |
| FIGURA 3-3 ALGORITMO PARA CAMBIAR LOS VALORES NULOS DEL DEM POR LOS CORRESPONDIENTES VALORES DE LA ELEVACIÓN DE LA SUPERFICIE DE AGUA AL MOMENTO DEL LEVANTAMIENTO LIDAR | 44 |
| FIGURA 3-4 FORMATO DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA DESDE CLICOM | 45 |
| FIGURA 3-5 FORMATO DE LOS ARCHIVOS DE DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS DE CEQUEAU | 45 |
| FIGURA 3-6 CARPETAS CON LOS DATOS OBTENIDOS DE CLICOM | 46 |
| FIGURA 3-7 ALGORITMO PARA TRANSFORMAR DATOS EN FORMATO CLICOM A FORMATO CEQUEAU | 46 |
| FIGURA 3-8 FORMATO DATOS DE CAUDALES DIARIOS OBTENIDOS DE BANDAS | 47 |
| FIGURA 3-9 ALGORITMO PARA CAMBIAR LOS DATOS DE FORMATO BANDAS A FORMATO CEQUEAU | 47 |
| FIGURA 3-10 ALGORITMO GENERAL PARA INCORPORAR LOS DATOS DE USO DE SUELO A LA SIMULACIÓN DE CAUDALES DE CEQUEAU | 49 |
| FIGURA 3-11 ALGORITMO GENERAL PARA PREPARAR LOS DATOS DE USO DE SUELO PARA SU INCORPORACIÓN AL MODELO DE SIMULACIÓN DE AVENIDAS 2D DE HEC-RAS | 49 |
| FIGURA 3-12 ALGORITMO GENERAL PARA PREPARAR LOS DATOS DE USO DE SUELO PARA SU INCORPORACIÓN AL MODELO DE SIMULACIÓN 1D DE HEC-RAS | 50 |
| FIGURA 3-13 EJEMPLO DE PROCESO DE OBTENCIÓN DE ÁREA DE APORTACIÓN EXCLUSIVA PARA UNA ESTACIÓN FICTICIA PARTICULAR (REF. UTM-15N) | 52 |
| FIGURA 3-14 ESQUEMA DE CÁLCULO DE HIDROGRAMAS SINTÉTICOS POR MÉTODO DE LA SCS CON REFERENCIA DE TIEMPO EN LA DESEMBOCADURA | 53 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 3-15 ALGORITMO PARA REALIZAR LAS SIMULACIONES HIDRODINÁMICAS INICIALES DE AVENIDAS EN 1D | 55 |
| FIGURA 3-16 INUNDACIÓN EN SECCIÓN CON CANALES ADYACENTES SIN PUNTOS DE DIQUE SEÑALADOS | 55 |
| FIGURA 3-17 A) DIQUES MAL COLOCADOS (POR INCLUIR LOS CANALES ADYACENTES) B) DIQUES BIEN COLOCADOS (POR AISLAR EL CANAL PRINCIPAL DE LOS ADYACENTES) C) DIQUES MAL COLOCADOS (POR NO CONSIDERAR LOS CANALES ADYACENTES EN SITUACIÓN DE INUNDACIÓN) D) DIQUES BIEN COLOCADO (POR CONSIDERAR LOS CANALES ADYACENTES EN SITUACIÓN DE INUNDACIÓN)..... | 56 |
| FIGURA 3-18 EJEMPLO DE MALLA 2D DEMASIADO AMPLIA RESPECTO A LA PLANICIE DE INUNDACIÓN ESPERADA | 60 |
| FIGURA 3-19 EJEMPLO DE MALLA 2D DEMASIADO PEQUEÑA RESPECTO A LA PLANICIE DE INUNDACIÓN ESPERADA..... | 60 |
| FIGURA 3-20 A) EJEMPLO DE PLANICIE DE INUNDACIÓN OBTENIDA CON UNA SIMULACIÓN 1D B) EJEMPLO DE PLANICIE DE INUNDACIÓN OBTENIDA CON UNA SIMULACIÓN 2D..... | 61 |
| FIGURA 3-21 LÍNEAS DE CF COLOCADAS EN LAS CELDAS PERTINENTES DE LA MALLA..... | 62 |
| FIGURA 4-1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO | 63 |
| FIGURA 4-2 ZONAS URBANAS Y CARRETERAS EN LA ZONA DE ESTUDIO | 65 |
| FIGURA 4-3 CUADRÍCULA DE CORRESPONDENCIA GEOGRÁFICA DE LAS CARTAS TOPOGRÁFICAS DISPONIBLES EN INEGI | 66 |
| FIGURA 4-4 RESOLUCIONES DEM DISPONIBLES..... | 67 |
| FIGURA 4-5 ACERCAMIENTO A LOS VALORES NULOS CORRESPONDIENTES A LOS DATOS FALTANTES DEL LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO | 68 |
| FIGURA 4-6 DIRECCIONES POSIBLES DEL SIGUIENTE PÍXEL DEL RÍO PRINCIPAL A PARTIR DEL PÍXEL ACTUAL (PA) | 70 |
| FIGURA 4-7 DIRECCIÓN DE SECCIONAMIENTO SEGÚN LA DIRECCIÓN DEL PÍXEL DEL EJE PRINCIPAL DEL RÍO..... | 70 |
| FIGURA 4-8 ALGORITMO DE EXTRACCIÓN DE DATOS DE LOS PÍXELES DEL EJE DEL RÍO | 70 |
| FIGURA 4-9 MÉTODO PARA CAMBIAR LOS VALORES NULOS POR LAS ELEVACIONES DE LOS ESPEJOS DE AGUA EN LAS SECCIONES TRANSVERSALES | 72 |
| FIGURA 4-10 EJEMPLOS DE RESULTADOS DE LA PRIMERA ITERACIÓN DE CIERRE DEL RÍO A) RESULTADOS EN TRAMOS RECTOS B) RESULTADOS EN MEANDROS | 72 |
| FIGURA 4-11 TRATAMIENTO DE LOS PÍXELES CON VALOR NULO QUE NO SE PROCESARON DENTRO DE LAS SECCIONES | 73 |
| FIGURA 4-12 RESULTADOS PRIMER ITERACIÓN DEL ESPEJO DE AGUA..... | 75 |
| FIGURA 4-13 ALGORITMO SECCIONADO SIN TRASLAPE Y SIN CORTAR ESPEJOS DE AGUA | 75 |
| FIGURA 4-14 SITUACIONES POSIBLES DEL ESPEJO DE AGUA DENTRO DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES | 76 |
| FIGURA 4-15 VENTANA DE CREACIÓN DE SUPERFICIES EN CIVIL3D..... | 80 |
| FIGURA 4-16 VENTANA DE IMPORTACIÓN DE PUNTOS HACIA LA SUPERFICIE TIN EN CIVIL3D | 81 |
| FIGURA 4-17 EJEMPLO DE SCRIPT DE CIVIL3D PARA IMPORTAR LÍNEAS | 81 |
| FIGURA 4-18 APLICACIÓN DE LAS LÍNEAS DE FRONTERA A LOS DATOS DE TRIANGULACIÓN TIN..... | 82 |
| FIGURA 4-19 APLICACIÓN DE LAS LÍNEAS DE LÍMITE A LOS DATOS DE TRIANGULACIÓN TIN | 83 |
| FIGURA 4-20 COMPARACIÓN DE LA PRIMERA ITERACIÓN DEL ESPEJO DE AGUA CON LA SEGUNDA | 84 |
| FIGURA 4-21 ELEVACIÓN DE LA SUPERFICIE DE AGUA EN LA DESEMBOCADURA | 85 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 4-22 IDEALIZACIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA DESEMBOCADURA | 86 |
| FIGURA 4-23 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CUENCA EN CEQUEA (ADAPTADA DE MERCADO, V., 2010) | 88 |
| FIGURA 4-24 POSICIÓN INICIAL DE LOS PUNTOS DE BANCO Y DIQUES | 91 |
| FIGURA 4-25 EJEMPLO DE SECCIÓN CON LECHO SINTÉTICO | 91 |
| FIGURA 4-26 HISTOGRAMA DE CAUDALES MÁXIMOS ANUALES DE LA ESTACIÓN 30016 | 93 |
| FIGURA 4-27 DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS OBSERVADOS EN COMPARACIÓN DE LOS VALORES ESPERADOS (PTE. 1) | 98 |
| FIGURA 4-28 DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS OBSERVADOS EN COMPARACIÓN DE LOS VALORES ESPERADOS (PTE. 2) | 99 |
| FIGURA 4-29 SUBCUENCAS POR ESTACIÓN FICTICIA..... | 103 |
| FIGURA 4-30 SUBCUENCA DE LA ESTACIÓN FICTICIA 8, CON DETALLE DEL RÍO PRINCIPAL DE LA SUBCUENCA Y DE LA CUENCA GENERAL | 109 |
| FIGURA 4-31 HIDROGRAMA SINTÉTICO DE LA ESTACIÓN FICTICIA 1, PARA $Tr=5$ AÑOS | 111 |
| FIGURA 4-32 HIDROGRAMAS POR ESTACIÓN FICTICIA Y SU CONVOLUCIÓN PARA $Tr=5$, CORRESPONDIENTES A UN DÍA DE PRECIPITACIÓN. | 111 |
| FIGURA 4-33 CONVOLUCIONES DE LOS HIDROGRAMAS DE LAS ESTACIONES FICTICIAS POR PERIODO DE RETORNO | 112 |
| FIGURA 4-34 EJEMPLO DE HIDROGRAMA PARA TORMENTAS AISLADAS OBSERVADAS..... | 113 |
| FIGURA 4-35 EJEMPLO DE ARCHIVO DE TEXTO PARA LA CONVERSIÓN DE LA MATRIZ DE CLAVES DE USO DE SUELO POR SU RESPECTIVO VALOR N | 114 |
| FIGURA 4-36 DISTRIBUCIÓN DE USO DE SUELO EN LA ZONA DE ESTUDIO | 116 |
| FIGURA 4-37 ESQUEMA DE LA ESTRUCTURACIÓN DE UN ARCHIVO *.GEO..... | 117 |
| FIGURA 4-38 SITUACIÓN DE LA SUPERFICIE DE AGUA PARA UN $Tr=100$ AÑOS PARA SIMULACIÓN EN MODELO 1D..... | 119 |
| FIGURA 4-39 ELEVACIONES DE LA SUPERFICIE DEL AGUA DETERMINADAS POR MODELACIÓN 1D EN LA DESEMBOCADURA DE LA CUENCA. | 120 |
| FIGURA 4-40 MALLADO SOBRE LA ZONA DE ESTUDIO | 121 |
| FIGURA 4-41 INGRESO DE INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA AL SISTEMA 2D | 122 |
| FIGURA 4-42 SITUACIÓN DE LA SUPERFICIE DE AGUA PARA UN $Tr=100$ AÑOS PARA SIMULACIÓN EN MODELO 2D..... | 123 |
| FIGURA 4-43 ELEVACIONES DE LA SUPERFICIE DEL AGUA DETERMINADAS POR MODELACIÓN 2D EN LA DESEMBOCADURA DE LA CUENCA POR PERIODO DE RETORNO. | 124 |
| FIGURA 4-44 CAUDAL A TRAVÉS DE LA DESEMBOCADURA DE LA CUENCA, CALCULADOS CON MODELOS 1D Y 2D PARA $Tr=5$ AÑOS | 124 |
| FIGURA 4-45 CAUDAL A TRAVÉS DE LA DESEMBOCADURA DE LA CUENCA, CALCULADOS CON MODELOS 1D Y 2D PARA $Tr=10$ AÑOS | 125 |
| FIGURA 4-46 CAUDAL A TRAVÉS DE LA DESEMBOCADURA DE LA CUENCA, CALCULADOS CON MODELOS 1D Y 2D PARA $Tr=20$ AÑOS | 125 |
| FIGURA 4-47 CAUDAL A TRAVÉS DE LA DESEMBOCADURA DE LA CUENCA, CALCULADOS CON MODELOS 1D Y 2D PARA $Tr=25$ AÑOS | 126 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 4-48 CAUDAL A TRAVÉS DE LA DESEMBOCADURA DE LA CUENCA, CALCULADOS CON MODELOS 1D Y 2D PARA $T_r=50$ AÑOS | 126 |
| FIGURA 4-49 CAUDAL A TRAVÉS DE LA DESEMBOCADURA DE LA CUENCA, CALCULADOS CON MODELOS 1D Y 2D PARA $T_r=100$ AÑOS..... | 127 |
| FIGURA 4-50 COMPARACIÓN DE LAS ELEVACIONES DEL ESPEJO DE AGUA EN EL EXUTORIO PARA MODELOS 1D Y 2D..... | 128 |
| FIGURA 4-51 EJEMPLO DE PLANICIE DE INUNDACIÓN DEBAJO DEL NIVEL DE DESBORDE DEL RÍO | 129 |
| FIGURA 4-52 ERROR EN LA SIMULACIÓN PARA TERRENOS CON GRANDES PLANICIES DE INUNDACIÓN POR DEBAJO DEL NIVEL DE DESBORDE DEL RÍO. A) PLANICIE DE INUNDACIÓN OBTENIDA POR SIMULACIÓN 1D B) PLANICIE DE INUNDACIÓN OBTENIDA POR SIMULACIÓN COMBINADA 1D/2D..... | 130 |
| FIGURA 4-53 MEANDROS Y CANALES ADYACENTES A) SIMULACIÓN 1D A.1) SECCIÓN CON DOS CANALES INUNDADOS A.2) SECCIÓN CON TRES CANALES INUNDADOS B) SIMULACIÓN 2D (SE UTILIZÓ EN LA SECCIÓN 62+675 UN $Q_p=1000$ M ³ /s) | 132 |
| FIGURA 4-54 DESBORDAMIENTO DE UNA SOLA SECCIÓN TRANSVERSAL A) MODELACIÓN 1D B) MODELACIÓN 2D | 133 |
| FIGURA 4-55 COMPARACIÓN DE INUNDACIONES PEQUEÑAS CON REINGRESO DE AGUA AL SISTEMA SIMULADOS CON MÉTODOS 1D Y 2D. A) SIMULACIÓN 1D B) SIMULACIÓN 2D | 134 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| TABLA 1-1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MODELADO 1D Y 2D (ADAPTADA DE PAREDES ET AL, 2014) | 5 |
| TABLA 2-1 VALORES TÍPICOS DE D (BRUNNER, G., 2016) | 19 |
| TABLA 2-2 VALORES TABULADOS DEL DIAGRAMA ADIMENSIONAL DE LA SCS..... | 38 |
| TABLA 3-1 DATOS REQUERIDOS POR CADA ACTIVIDAD DE LA INVESTIGACIÓN | 41 |
| TABLA 3-2 FUENTE DE OBTENCIÓN DE DATOS REQUERIDOS..... | 41 |
| TABLA 3-3 ELEMENTOS DE ENTRADA DE DATOS AL SISTEMA 1D DE SIMULACIÓN Y DATOS REQUERIDOS POR ÉSTOS | 58 |
| TABLA 3-4 PARÁMETROS PRINCIPALES PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE SIMULACIÓN | 59 |
| TABLA 4-1 PARÁMETROS FISOGRÁFICOS DE LA CUENCA DE LA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA PUEBLO NUEVO (30016)..... | 64 |
| TABLA 4-2 MARCADORES DE VALORES ANÓMALOS, DESDE AGUAS ABAJO HASTA AGUAS ARRIBA DE LA ZONA DE LA CUENCA | 68 |
| TABLA 4-3 VARIABLES USADAS EN EL CÓMPUTO DE LA BATIMETRÍA (PRIMER ITERACIÓN)..... | 70 |
| TABLA 4-4 VARIABLES USADOS EN EL CÓMPUTO DE LA BATIMETRÍA (SEGUNDA ITERACIÓN)..... | 78 |
| TABLA 4-5 EQUIVALENCIA DE CUADROS CEQUEAU EN COORDENADAS UTM Y CADENAMIENTO DEL EJE DEL RÍO | 89 |
| TABLA 4-6 DISTRIBUCIÓN DEL ESCURRIMIENTO DEL DÍA 02/01/2008 A LO LARGO DEL EJE..... | 90 |
| TABLA 4-7 CAUDALES MÁXIMOS ANUALES OBSERVADOS EN LA ESTACIÓN 30016 | 92 |
| TABLA 4-8 PROPIEDADES GENERALES DE LA SERIE DE CAUDALES MÁXIMOS ANUALES DE LA ESTACIÓN 30016 | 93 |

| | |
|--|-----|
| TABLA 4-9 RESULTADOS DE PRUEBAS DE CALIDAD SOBRE LA SERIE DE QMAX ANUALES DE LA ESTACIÓN 30016..... | 94 |
| TABLA 4-10 NÚMERO DE OBSERVACIONES POR RANGO | 94 |
| TABLA 4-11 PARÁMETROS DE LA MUESTRA DE QMAX ANUALES PARA LA DISTRIBUCIÓN GAMMA | 95 |
| TABLA 4-12 PARÁMETROS DE LA MUESTRA DE QMAX ANUALES PARA LA DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL | 95 |
| TABLA 4-13 PARÁMETROS DE LA MUESTRA DE QMAX ANUALES PARA LA DISTRIBUCIÓN PEARSON III | 95 |
| TABLA 4-14 PARÁMETROS DE LA MUESTRA DE QMAX ANUALES PARA LA DISTRIBUCIÓN LOGNORMAL..... | 95 |
| TABLA 4-15 PARÁMETROS MUESTRA DE QMAX ANUALES PARA LA DISTRIBUCIÓN LOGPEARSON III..... | 96 |
| TABLA 4-16 PARÁMETROS MUESTRA DE QMAX ANUALES PARA LA DISTRIBUCIÓN GUMBEL TIPO I | 96 |
| TABLA 4-17 COMPARACIÓN DE QMAX OBSERVADO CONTRA QMAX ESTIMADO POR DIFERENTES FUNCIONES DE AJUSTE | 97 |
| TABLA 4-18 VALORES $x_i - x_{i2}$ PARA LA PRUEBA DE EFICIENCIA DE AJUSTE POR RAÍZ DE ERROR CUADRÁTICO MEDIO | 100 |
| TABLA 4-19 VALORES $x_i - x_{i2}$ PARA LA PRUEBA DE EFICIENCIA DE AJUSTE POR RAÍZ DE ERROR CUADRÁTICO MEDIO | 101 |
| TABLA 4-20 APROXIMACIONES DE CAUDAL PARA DIFERENTES TIEMPOS DE RETORNO UTILIZANDO LA FUNCIÓN GAMMA COMO MODELO PROBABILÍSTICO DE AJUSTE | 102 |
| TABLA 4-21 CARACTERÍSTICAS DE LAS SUBCUENCAS CORRESPONDIENTES A LAS ESTACIONES FICTICIAS..... | 104 |
| TABLA 4-22 LÁMINA POR EXCESO DE PRECIPITACIÓN SOBRE LA CUENCA POR PERIODO DE RETORNO | 105 |
| TABLA 4-23 DISTRIBUCIÓN ACUMULADA DE LAS APORTACIONES DE LAS ESTACIONES FICTICIAS AL QMAX MEDIO DIARIO ESPERADO POR PERIODO DE RETORNO | 105 |
| TABLA 4-24 CAUDALES MEDIOS DIARIOS APORTADOS Y LÁMINA ESCURRIDA POR CADA ESTACIÓN FICTICIA POR PERIODO DE RETORNO (RESTANDO EL FLUJO BASE) (PTE. 1) | 106 |
| TABLA 4-25 CAUDALES MEDIOS DIARIOS APORTADOS Y LÁMINA ESCURRIDA POR CADA ESTACIÓN FICTICIA POR PERIODO DE RETORNO (RESTANDO EL FLUJO BASE) (PTE. 2) | 107 |
| TABLA 4-26 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN TOTAL PARA LAS ESTACIONES FICTICIAS | 108 |
| TABLA 4-27 FACTORES DE FORMA PARA EL HIDROGRAMA SINTÉTICO DE LA SCS POR ESTACIÓN FICTICIA | 109 |
| TABLA 4-28 HIDROGRAMA SINTÉTICO PARA UN $T_r=5$ AÑOS DE LA ESTACIÓN FICTICIA 1 | 110 |
| TABLA 4-29 CAUDALES PICO POR HIDROGRAMA COMPUESTO | 112 |
| TABLA 4-30 COEFICIENTES DE RUGOSIDAD DE MANNING PARA LAS CLAVES DE USO DE SUELO | 115 |
| TABLA 4-31 CAUDALES PICO (EN M^3/S) DISTRIBUIDOS POR ESTACIÓN FICTICIA Y PERIODO DE RETORNO | 118 |
| TABLA 4-32 DIFERENCIA DE FLUJO PROMEDIO EN LA DESEMBOCADURA ENTRE SIMULACIONES 1D Y 2D | 127 |
| TABLA 4-33 TIEMPOS DE PROCESAMIENTO DE LAS SIMULACIONES | 135 |

Nomenclatura

Notaciones utilizadas y unidades

| | |
|-------------------------------------|--|
| \overline{Q}_l | Entrada de flujo lateral promedio |
| \overline{S}_f | Fricción promedio entre las dos secciones |
| S_w^2 | Varianza para la prueba de Wald y Wolfowitz |
| \tilde{x}_w | Media para la prueba de Wald y Wolfowitz |
| $ V $ | Magnitud del vector de velocidad |
| m'_j | j-ésimo momento respecto al origen |
| u_* | Velocidad de corte |
| μ_y | Media de la transformada “y” de la muestra |
| σ_y | Desviación estándar de la transformada “y” de la muestra |
| $\psi_j: nm'_j$ | |
| A | Áreas de las secciones |
| a | Coefficientes de poderación de velocidad |
| a, b y c: | Parámetros de la ecuación de densidad de la distribución Gumbel tipo I |
| Ac: | Área de la cuenca, en Km ² |
| alp, blp y clp: | Parámetros de la función de densidad de la distribución log-Pearson III |
| ap, bp y cp: | Parámetros de la función de densidad de la distribución Pearson III |
| b | ancho del fondo de canal |
| c | Coefficiente de expansión o contracción |
| C | Coefficiente de Chézy |
| cf | Fricción del fondo del canal |
| Cs: | Coefficiente de asimetría |
| Csc: | Coefficiente de asimetría corregido |
| D | Constante empírica para viscosidad de remolino (Tabla 2-1) |
| dij: | Distancia entre los pixeles i y j |
| DY | Cambio en el tirante por encima del espejo de agua conocido |
| f | Parámetro de Coriolis |
| g | Aceleración de la gravedad |
| H | Elevación de la superficie de agua |
| hc | Pérdida de energía |
| L | Distancia ponderada de descarga entre secciones |
| n | coeficiente de rugosidad de Manning |
| Q | Caudal |
| Qc, Qf: | Flujo dentro de canal principal y la planicie de inundación, respectivamente |
| R | Es el radio hidráulico |
| RefX: | Coordenada X de referencia de la esquina inferior izquierda del DEM. |
| RefY: | Coordenada Y de referencia de la esquina inferior izquierda del DEM. |
| ResX: | Resolución del pixel de la imagen Geotiff original en la dirección X (m). |
| ResY: | Resolución del pixel de la imagen Geotiff original en la dirección Y (m). |
| S ₀ | Pendiente del canal |
| S _{fc} , S _{ff} : | Pendientes de fricción promedio del canal y de la planicie de inundación |
| Sij: | Gradiente de elevación entre los pixeles i y j |
| t | Es el tiempo de simulación |
| Tc: | Tiempo de concentración de la cuenca, en horas |
| Tp: | Tiempo de ocurrencia del caudal pico, en horas |

t_p : tiempo de retardo de escurrimiento, en horas
 t_r : Duración efectiva de la lluvia, en horas
 u, v Velocidades del flujo en las direcciones cartesianas del plano de la malla
 V Velocidades promedio (Gasto/Área)
 ν_t Coeficiente de viscosidad de torbellinos
 X, Y : Coordenada en X e Y del elemento de la matriz de matlab (Ver Figura 2-7).
 X_{UTM}, Y_{UTM} : Coordenadas X e Y en formato UTM
 Y Tirante del agua en la sección transversal
 Z Elevación en el fondo del canal principal
 Z_1 Pendiente de la margen izquierda
 Z_2 Pendiente de la margen derecha
 Z_i, Z_j : Elevación de los pixeles i y j, respectivamente
 β Coeficiente del momento tomado en cuenta para una distribución variante de la velocidad en canales irregulares
 Γ : Función gamma
 ΔA_c Cambio de área hidráulica dentro del canal principal
 ΔA_f Cambio de área hidráulica de la planicie de inundación
 Δx_c Longitud del canal principal entre dos secciones transversales
 Δx_e Distancia de flujo equivalente
 Δx_f La longitud de la planicie de inundación entre dos secciones transversales
 μ : Media de la muestra
 σ : Desviación estándar de la muestra

Acrónimos

| | |
|---------|--|
| DEM | Modelo de Elevación Digital, por sus siglas en inglés |
| LiDAR | Detección y medición de imágenes por laser, por sus siglas en inglés |
| CIRA | Centro Interamericano de Recursos del Agua |
| UAEM | Universidad Autónoma del Estado de México |
| CEM 3.0 | Continuo de Elevación Mexicano 3.0 |

1 Introducción

Paredes, Pedrozo y Mejía (2014) mencionan que a nivel global, la amenaza natural con mayor número de eventos incidentes en poblaciones humanas son las inundaciones. La tendencia en aumento de los eventos de inundación puede inferirse de las estadísticas del Consejo Internacional de la Cruz Roja, ya que en el último siglo (1919-2004) la Cruz Roja participó en 500 eventos de inundaciones a nivel mundial, mientras que en el periodo comprendido entre el año 2004-2014, participó en 1,752 eventos de inundación (Cannon y Schipper, 2014).

Tan solo en México, entre los años de 1980 a 1999 las inundaciones han causado alrededor de 10,000 muertes (Salas y Jimenez, 2004) y en términos económicos, en el año 2002 los daños por fenómenos hidrometeorológicos (inundaciones, lluvias y ciclones) ascienden a los 10,544 mdp, (Bitrán et al, 2002). Para el año 2014, esta cifra sube a 27,962 mdp, correspondiendo al 84.9% del total de daños por desastres (naturales y antrópicos) ocurridos en la república durante ese año (García, Méndez y Sánchez, 2015). Hay que señalar de cualquier forma que de ese total, 24,133 mdp en afectaciones fueron originados por el huracán Odile. En consecuencia, el conocimiento del comportamiento de éstos fenómenos es información poderosa e indispensable al momento de tomar decisiones acerca de las acciones a ejecutar para intentar controlarlas y/o mitigar sus efectos negativos.

De acuerdo con los datos que se tienen sobre el impacto económico de los fenómenos hidrometeorológicos ocurridos en México en los últimos quince años puede apreciarse una clara tendencia al alza (García, Méndez y Sánchez, 2015). Esto en el marco del cambio climático toma mayor importancia, Olcina (2008) menciona la incertidumbre que existe acerca de la evolución del comportamiento de las precipitaciones, puesto que los modelos actuales fallan en hacer predicciones a nivel global. Al respecto Fenoglio et al (2015) señalan que la pérdida de fiabilidad de los resultados de los modelos de pronóstico hidrológico, se limita a las series temporales de los fenómenos climatológicos. Por otro lado, Olcina (2008) menciona que debido a la incertidumbre climatológica, también pueden crearse nuevas zonas de riesgo, de forma que hay que considerar el concepto de “escenarios futuros de riesgo”.

Debido a los mencionados incrementos de eventos de inundaciones, así como en la incertidumbre creciente que se va incorporando a los modelos existentes, comprender la dinámica de inundación en zonas de posible impacto sobre comunidades humanas se ha vuelto imperativo. Para la reconstrucción

de los regímenes de inundación se tienen dos enfoques principales, la teledetección y el modelado hidrológico **(Gibbs, Clark y Taylor, 2015)**.

Los métodos de teledetección para determinar regímenes de inundación utilizan imágenes satelitales disponibles a lo largo del tiempo, teniendo como desventaja la baja disponibilidad temporal de éstas imágenes cuyo uso además está condicionado por la cobertura de nubes al momento de la toma de la imagen. Los modelos hidrológicos por otro lado requieren de datos de la región de interés como entrada. El modelo consiste en vincular el balance hídrico, los volúmenes de agua, topografía y la batimetría de la región de estudio **(Gibbs, Clark y Taylor, 2015)**.

Una vez que los parámetros del modelo de simulación hidrodinámica de la zona de interés han sido determinados, es posible realizar una modelación hidrodinámica que permita simular el alcance de una inundación en periodos de tiempo en los que no se tiene información geoespacial de la inundación **(Karim et al, 2011)** o en escenarios de predicción de eventos.

Actualmente, las simulaciones hidrodinámicas cuentan con modelos y herramientas en 1D, 2D y 3D **(Kuiry, Sen y Bates, 2010)**. Sin embargo, el análisis en tres dimensiones queda excluido del presente trabajo, puesto que lo que se pretende es determinar la mancha de inundación de una zona, y se considera que la relación entre la mejora en los resultados de modelado de la inundación y el aumento en los tiempos de cómputo y recolección de datos no es justificable para tal fin.

Los modelos 1D tienen como ventaja la velocidad de cálculo, pero dejan de lado algunos aspectos importantes de la variabilidad espacial, como la velocidad que es analizada en un sólo sentido **(Paredes, Pedrozo y Mejía, 2014)** y el tratamiento de los flujos de inundación es muy simplificada **(Kuiry, Sen y Bates, 2010)**.

El análisis en dos dimensiones, comparado con el análisis en una dimensión requiere de una elevada cantidad de información y poder de procesamiento, pero simula un comportamiento más fiel del flujo en un río a través del tiempo **(Morales, Petaccia y García, 2015)**.

Entre los modelos de simulación hidráulica de tránsito de avenidas se destaca el modelo HEC-RAS **(Brunner, 2016)**.

Hec-RAS es un software ampliamente usado a nivel mundial debido a que es gratuito y que cuenta con una amplia documentación de aplicaciones. **Corum (2015)**, utilizó el software de HEC-RAS para modelar diferentes ríos del Noroeste del Pacífico (Los ríos Green River, Skykomish River, Dungeness River en Whashington y Clark Fork entre Idaho y Montana, todos en Estados Unidos).

En algunas situaciones, donde el flujo permanece confinado al canal principal del río, los resultados de las simulaciones usando modelos 1D y 2D son similares en cuanto a la extensión de la inundación (**Werneret al, 2005, Paredes et al, 2014**). Cuando el flujo no está confinado, caso que se presenta durante el desbordamiento del canal de un río, los modelos de simulación hidrodinámica 2D ofrecen mejores resultados. Es por esto, que el análisis más eficiente sería uno que combine el modelado de flujo en 1D y 2D (**Morales, Petaccia y García, 2015**). De ahí, la importancia de desarrollar estrategias y diseñar criterios que permitan seccionar tramos de un río para que sean analizados con uno u otro modelo según corresponda. El presente proyecto de tesis busca proponer un conjunto de éstos criterios.

1.1 Antecedentes

Los modelos climatológicos han comenzado a perder fiabilidad en cuanto a los análisis probabilísticos de ocurrencia y magnitud de los eventos de precipitación debido, entre otras cosas, a que el cambio climático que se está presentando en el planeta afecta las características de estacionalidad de los datos hidroclimáticos que alimentan tales modelos (**Olcina, 2008**).

Entonces es posible señalar dos factores que aumentan la importancia de la simulación hidrodinámica sobre el área de estudio. Por un lado, la posibilidad de que los escenarios de riesgo cambien (**Olcina, 2008**) y por otro, que la vulnerabilidad debida a la batimetría de la zona varía muy lentamente en el tiempo (**Fenoglio et al, 2015**).

Así que una vez que el modelo hidrodinámico ha sido calibrado en una zona de interés, pueden simularse una gran cantidad de situaciones de flujo sobre ésta, ya sean simulaciones por evento (predicciones por periodo de retorno), simulaciones usando datos en tiempo real (percepción remota y/o estaciones de monitoreo automáticas) o incluso determinar indicadores que señalen el “umbral de inundación” sobre una zona de interés (**Gibbs, Clarke y Taylor, 2015**).

Con la simulación de éstos escenarios de riesgo por inundación, es posible tomar mejores decisiones sobre las medidas de prevención de inundaciones en zonas donde tradicionalmente éstos problemas se tenían controlados (**Fenoglio et al, 2015**). Cabe señalar que el esfuerzo y costos requeridos en las medidas de prevención y mitigación de inundaciones son demasiado elevados como para llevarse a cabo sin un estudio previo de costo-beneficio (**Baró et al, 2012**).

1.2 Estado del arte

Paredes et al (**2014**) determinaron en un estudio realizado con modelos de simulación de flujos 1D y 2D, que la tendencia de los resultados es que entre mayor sea el gasto pico y el área de inundación, las áreas de inundación estimadas por un modelo 2D son mayores que las de un modelo 1D. Para gastos pequeños, las áreas estimadas por el modelo 1D son mayores a las del modelo 2D.

Según Paredes et al (**2014**) los modelos presentan mayor certidumbre cuando el modelo se calibra con el gasto medio, así que entre mayor es la diferencia entre el gasto pico calibrado y el gasto pico simulado, los modelos pierden calidad. Igualmente este autor resume las ventajas y desventajas bajo el empleo de modelos de tránsito de avenidas de una o dos dimensiones (Ver Tabla 1-1)

Paredes, Pedrozo y Mejía (**2014**) recomiendan para los modelos 2D utilizar una densidad de datos elevada en los primeros 5 m respecto a la cota más baja de la llanura de inundación, de forma que el cauce establezca las direcciones del flujo adecuadas. Para los modelos 1D se recomienda reducir el intervalo entre secciones transversales, y tener especial cuidado al modelar las condiciones de frontera de los modelos de las propiedades físicas (modelos de elevación, modelos de uso de suelo, modelos de precipitaciones, etc.). También se hace notar que en casos donde los flujos bi-direccionales son limitados, los resultados de las simulaciones usando modelos 1D y 2D son similares.

Tabla 1-1 Ventajas y desventajas del modelado 1D y 2D (Adaptada de Paredes et al, 2014)

| <i>Modelos Hidrodinámicos</i> | | |
|--|--|--|
| Una dimensión (1D) | Resuelve las ecuaciones de Saint-Venant en un sentido (1D) por medio de una serie de secciones transversales del río y la llanura de inundación al flujo del río. | |
| | Ventajas | |
| | Capacidad del sistema de cómputo | <i>No necesita altos requerimientos de cómputo</i> |
| | Simulación de niveles y gastos del río | <i>Permiten una evaluación rápida de la distribución del nivel de agua y caudales del río</i> |
| | Desventajas | |
| Simulación de desbordamiento del río | <i>Son menos precisos para modelar el flujo de desbordamiento en ríos</i> | |
| Simulación de planicie o humedal con baja pendiente | <i>Son menos exactos para modelar planicies de inundación</i> | |
| Simulación de estuarios y flujos costeros | <i>Son inciertos para modelar estuarios y flujos costeros</i> | |
| Velocidad del flujo principal en el espacio | <i>No se obtiene un dato aceptable de la velocidad, porque sólo se tiene un sentido en la dirección del flujo (X) (Ver Figura 1-1)</i> | |
| Dos dimensiones (2D) | Resuelven las ecuaciones de aguas someras en 2D, en algunos casos con modelos de cierre de turbulencia. Es posible discretizar la llanura de inundación por medio de mallas regulares o adaptables (rectángulos y triángulos, respectivamente) | |
| | Ventajas | |
| | Simulación de desbordamiento del río | <i>Modela de manera adecuada un desbordamiento de río</i> |
| | Simulación de planicie o humedal con baja pendiente | <i>Modela de manera adecuada un flujo sobre una planicie o humedal con baja pendiente en el terreno</i> |
| | Simulación de estuarios y flujos costeros | <i>Se aplican con éxito en la modelación de estuarios y flujos costeros</i> |
| | Velocidad del flujo principal en el espacio | <i>La velocidad en un punto se considera aceptable, ya que es variable en cada dirección (X,Y) por ser un vector</i> |
| | Desventajas | |
| | Capacidad del sistema de cómputo | <i>Su aplicación está limitada por los altos requerimientos de datos, hardware y software</i> |
| | Simulación de niveles y gastos del río | <i>El tiempo que realiza una simulación de flujos o niveles de agua en un río es considerable</i> |

Una comparación de ambos modelos hecha por Cook (2008), identifica las siguientes diferencias significativas de resultados entre modelados efectuados bajo el empleo de modelos 1D y 2D.

- a) De acuerdo con las resoluciones de datos topográficos disponibles, para resoluciones mayores, los modelos 2D predicen áreas de inundación mayores, para resoluciones menores, los modelos 1D predicen áreas de inundación mayores.

- b) Los modelos 1D son más susceptibles al cambio de precisión en los datos. Los modelos 2D son menos susceptibles al cambio de precisión en la configuración de la malla que a los cambios en la precisión del DEM.
- c) Los modelos 1D interpolan los límites de la planicie de inundación entre cada par de secciones transversales de terreno que tiene disponible, lo que regularmente deriva en áreas de inundación discontinuas.
- d) Los modelos 1D utilizan el coeficiente de fricción n de Manning para la calibración del sistema de ecuaciones. Los modelos 2D utilizan el coeficiente de fricción n de Manning y el coeficiente de viscosidad de remolino para calibrar las ecuaciones del sistema.
- e) Los modelos 1D no tienen vectores afectados por la topografía del terreno, debido a que el análisis se hace únicamente en la dirección del eje del río, de forma que el modelo sólo calcula la magnitud de los vectores, pero la dirección y el sentido son definidos por la dirección del eje del río.

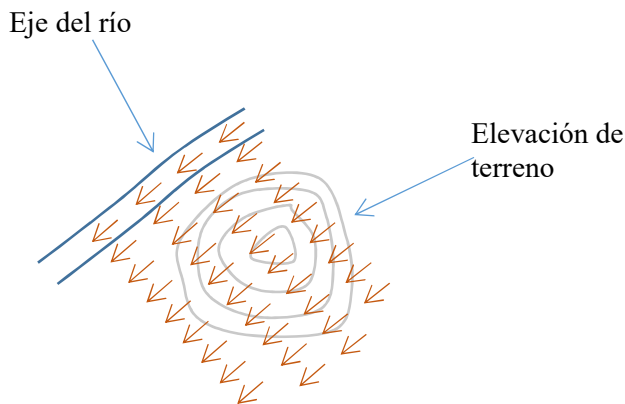


Figura 1-1 Esquema de vectores de flujo resultantes bajo el empleo de un modelo 1D donde existe un obstáculo.

De acuerdo con van Dijk et al (2014) los modelos 1D son suficientemente precisos para generar simulaciones de flujo urbano detallado, esto debido a que las calles son estructuras artificiales que tienen más en común con canales confinados que con el lecho natural de un río. De forma que modelar las calles como una red de flujo 1D resulta adecuado y computacionalmente más eficiente. Aunque en donde existen transiciones fuertes de pendiente, es mejor utilizar un modelo combinado 1D-2D.

Como explica Llamas (1993), los modelos tienen que ser calibrados con criterios deductivos o con observaciones anteriores de solicitaciones y respuestas. Paredes, Pedrozo y Mejía (2014) proponen calibrar los modelos hidrodinámicos de simulación de flujos utilizando el coeficiente de rugosidad de

Manning (n). Éstos autores señalan que para valores más elevados del coeficiente de rugosidad, se genera una mayor área afectada.

Bajo este principio, se comparan los resultados de la simulación hidrodinámica, que ha sido realizada utilizando los datos hidrométricos de un periodo en particular, con la llanura de inundación correspondiente a ese mismo periodo. Entonces, es posible afinar el coeficiente de rugosidad en cada elemento de análisis (secciones transversales para las simulaciones con modelos 1D, elementos de la malla para las simulaciones con modelos 2D) como parte del proceso de calibración (**Karim et al, 2011**).

La extensión de la planicie de inundación puede encontrarse utilizando imágenes satelitales infrarrojas LANDSAT, de las bandas térmicas 4, 5 y 7 (**Thomas, Kingsford y Hunter, 2010**), debido a la fuerte absorción del espectro infrarrojo por los cuerpos de agua, y la reflexión fuerte que existe de este espectro en la mayor parte de las coberturas de terreno (**Gibbs et al, 2015**).

Sin embargo, se ha demostrado que la mayor parte de la información requerida para la delimitación de inundaciones puede ser obtenida de bandas satelitales que detecten la reflexión infrarroja de rango medio (TM: 1.55–1.75 μm) del terreno natural, por lo que, con el fin de reducir tiempos y costos, las imágenes de la banda térmica 5 de LANDSAT ha sido elegida como criterio único para determinar la presencia de agua sobre el terreno (**Overton, 2005**).

Utilizando entonces las imágenes de la banda térmica 5 de LANDSAT, se considera un valor numérico de 25 (0-25) como umbral de diferenciación entre una celda inundada y una no inundada, y un valor numérico de 40 (25-40) para determinar si una celda está seca o húmeda (**Shaikh et al, 2010**).

La existencia de vegetación, cuando es predominante en la planicie de inundación, podría afectar los resultados de la reflexión infrarroja. Por esto es conveniente realizar una revisión adicional de los píxeles que han sido mapeados como secos. Gibbs et al (**2015**) proponen un método simple de corrección de mapeo de píxeles, consistente en analizar los píxeles mapeados como inundados y determinar su elevación promedio y la desviación estándar de esta elevación, para remapear los píxeles secos que tengan una elevación menor a ésta, y clasificarlos como píxeles mojados.

Una vez calibrado el modelo, necesita ser validado. Autores como Paredes et al (2014) y van Dijk et al (2014) utilizan una simulación enteramente realizada con modelos 2D para validar los modelos de simulación combinados.

Un problema constante en la simulación hidrodinámica es la falta de datos topográficos/batimétricos confiables, principalmente por las dificultades que supone que en general, las imágenes satelitales generalmente no proporcionan información del fondo de los cuerpos de agua.

Incluso en el levantamiento LiDAR (Laser Detection and Ranging), los cuerpos de agua regresan valores nulos. Es por esta razón que la información de los fondos de los cuerpos de agua deben ser completados. Algunos autores, como Coleman (2006) y Wang (2012) simularon los datos faltantes usando una combinación de sonares e interpolaciones ponderadas (tipo “vecino natural”).

Ambos métodos generan buenos resultados al reconstruir los datos batimétricos, pero requieren de un estudio por sonar independiente de los levantamientos LiDAR. Corum (2015) propone un método para crear una batimetría sintética, cuya metodología se aborda en *2.7 Método de obtención de batimetría sintética propuesto por Corum*.

1.3 Justificación

Un estudio confiable de la hidrodinámica de una inundación es requerido para un modelado adecuado de la mancha de inundación, de la que se desprende un análisis de potenciales afectaciones, daños y costos más eficiente sobre los centros de población y áreas productivas.

Los modelos unidimensionales y bidimensionales de análisis de flujo son herramientas poderosas para estudiar el desarrollo y características de una inundación dentro de una cuenca. Sin embargo, el uso de uno u otro tiene que ser reflexionado de acuerdo con el caso de estudio y disponibilidad de información para aprovechar las ventajas de cada modelo.

Se han descrito las ventajas y desventajas de cada tipo de modelo. De ahí se desprende la importancia de desarrollar estrategias y diseñar criterios que puedan ser fácilmente empleados durante el análisis del tránsito de avenidas y de inundaciones, para definir qué modelo o combinación de modelos es apropiada para optimizar los tiempos de cómputo a la vez que se logra la calidad del resultado.

Por combinación de modelos, debe entenderse que, para un mismo tramo de río, existirán subtramos que por sus características resulte más conveniente simular usando modelos 1D o 2D. Esto resulta en que, en un mismo tramo, coexistan simulaciones en serie, donde los datos de salida de una simulación, son los datos de entrada de otra. Tal intercambio de información se da a través de zonas denominadas fronteras, que son las líneas de unión entre subtramos con simulaciones de distinto modelo.

Si se busca además una automatización de este proceso, habrá que tomarse en cuenta las fronteras de éstos criterios para dividir la zona de estudio en segmentos independientes que tendrán que analizarse con un modelo en particular, y los cuales deben integrarse al final en un sólo análisis hidrodinámico.

Los resultados del análisis, particularmente la cartografía de la inundación, pueden ser exportados para utilizarse en otros análisis, tales como la estimación de costos.

Debe destacarse que el presente protocolo de tesis de Maestría en Ciencias del Agua forma parte del proyecto de investigación **“Modelación de eventos hidrológicos extremos a partir de precipitación estimada por percepción remota”** financiado por CONACyT, con clave UAEM: **3952/2015E** en el marco de la convocatoria **“Proyectos de Desarrollo Científico para Atender Problemas Nacionales, 2014”** (Bâ, K.M., Díaz-Delgado, C., Franco Plata, R., Gómez, M., Fonseca, C.R, Mastachi Loza, C.A., Torres Maya, A., Vilchis-Francés, A.Y.). Otro proyecto de investigación que complementa este proyecto es: Diseño de herramienta hidrológica como apoyo a los sistemas de alerta temprana ante inundaciones (López García, A., Díaz-Delgado, C., Bâ, K.M. y Gómez, M.). Igualmente, este trabajo forma parte del proyecto UAEM 4192/2016E “Hidrología en Mauritania: Modelación de caudales a partir de precipitación estimada por imágenes de satélite”.

1.4 Hipótesis

El desarrollo de estrategias y diseño de criterios enfocados a determinar tramos dentro de la zona de estudio cuyas características sean adecuadas para emplear sobre éstos una simulación hidrodinámica usando modelos 1D o 2D, utilizando el modelo y software HEC-RAS para las simulaciones permitirá que el resultado final de la simulación sobre la zona de estudio sea una combinación de simulaciones hidrodinámicas 1D y 2D, haciendo que la simulación general sea más certera que el de un análisis exclusivo en 1D y computacionalmente más eficiente que un análisis exclusivo 2D. Lo anterior facilitará su implementación para simular en tiempo cuasi-real el tránsito de una avenida en cuencas hidrológicas.

1.5 Objetivos

1.5.1 *Objetivo general*

Desarrollar un esquema de uso combinado de modelos de simulación hidrodinámica de flujo 1D y 2D para obtener resultados adecuados y computacionalmente más eficientes con respecto a un modelado únicamente 2D.

1.5.2 *Objetivos específicos*

- Obtener secciones transversales sintéticas en las áreas faltantes del modelo de elevación que no afecten los resultados de la simulación hidrodinámica.
- Simular el tránsito de avenidas con modelos 1D y 2D (HEC-RAS) para comparar los resultados en función de la calidad de los datos topo-batimétricos disponibles y características morfológicas del terreno inundable.
- Deducir estrategias de simulación hidrodinámica del tránsito de avenidas para definir en qué casos es más conveniente utilizar cada tipo de simulación.
- Deducir criterios de aplicación para el uso de cada tipo de modelo (1D y 2D) para simular el tránsito de avenida con la calidad adecuada.

2 Marco teórico

2.1 Modelo y software HEC-RAS (V. 5.x)

El modelo HEC-RAS (River Analysis System) apoyado en el software del mismo nombre, en su versión 5.0, es una herramienta de software de uso libre, que permite realizar simulaciones hidráulicas de flujo constante usando modelos 1D y de flujo no constante de agua usando modelos 1D, 2D y la combinación 1D-2D (Lluén, W., 2015, Brunner, G., 2016). y su desarrollo es por parte del *Hidrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineers*,

El **análisis de flujo estable** (1D) en una dirección tiene la finalidad de determinar la elevación del agua en flujos estables gradualmente variados. El principio básico del análisis de flujo estable dentro de este software es la resolución de la ecuación de la energía en una dirección. Las pérdidas son evaluadas de acuerdo con el coeficiente de fricción de Manning y coeficientes de expansión y contracción. Los saltos hidráulicos, las confluencias de ríos y el análisis de la hidráulica sobre estructuras hacen uso de la ecuación del momento. El software tiene capacidad de evaluar un canal o una red de canales naturales o artificiales (Brunner, G., 2016).

El procedimiento de análisis del flujo se da por el método de pasos estandar (ver Figura 2-1)

El **análisis de flujo no estable en 1D** se hace mediante el modelo UNET desarrollado por el Dr. Robert L. Barkau (Barkau, 1992), basando la simulación de flujo entre secciones en la resolución de las ecuaciones de continuidad de masa (Ecuación 2-8) y la de continuidad de momento (Ecuación 2-9), siguiendo el algoritmo descrito en la Figura 2-2

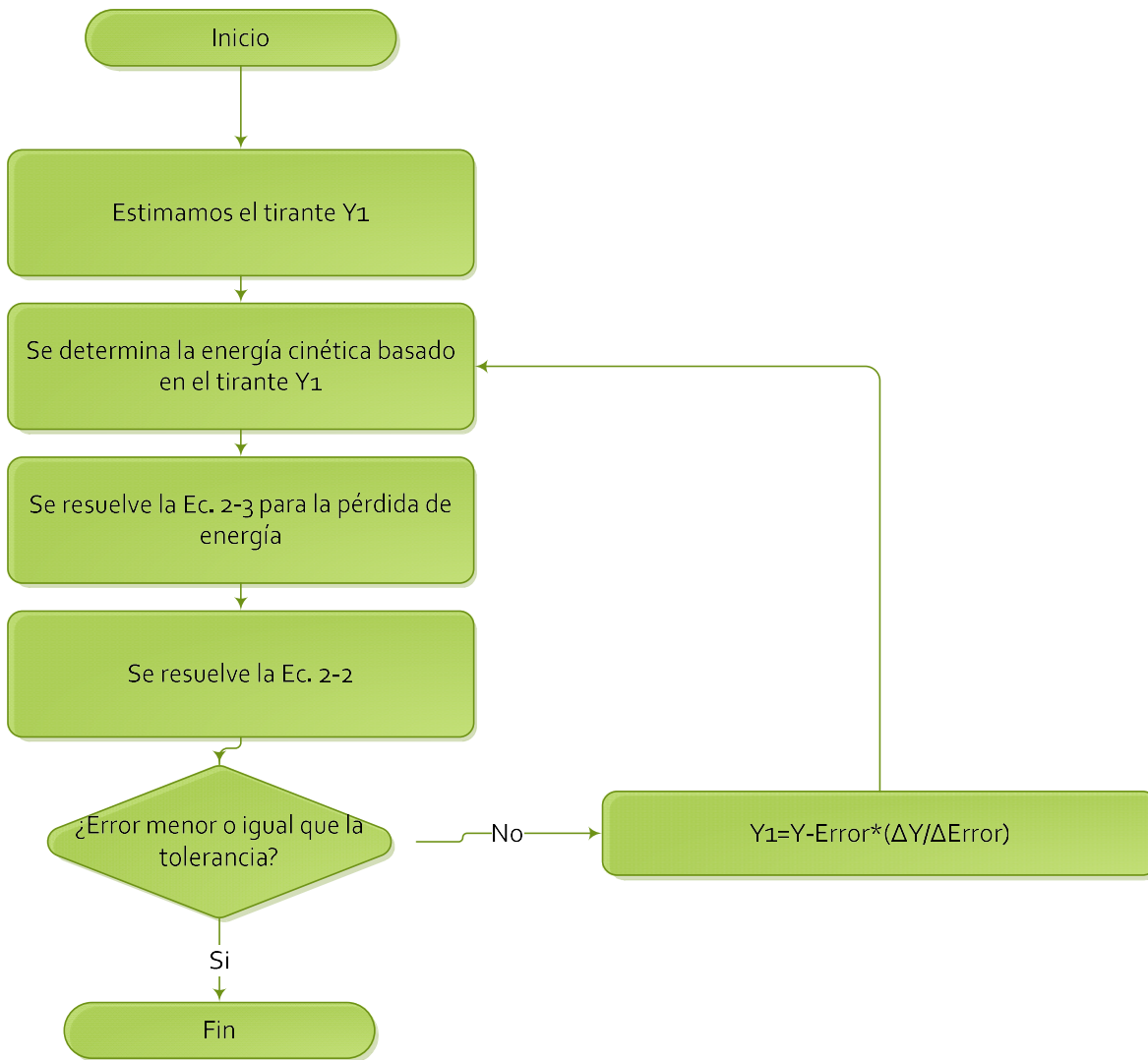


Figura 2-1 Método del paso estándar para la solución de la ecuación de la energía para flujos estables en 1D

Donde el valor de la corrección está dado por la Ecuación 2-1

$$Y_n = Y - \text{Error} * (\Delta Y / \Delta \text{Error})$$

Ecuación 2-1

Donde:

Y_n : El tirante de agua propuesto que se usará en la siguiente iteración

Y : El tirante de agua considerado en la iteración actual

Error: El error en el que se incurrió en la iteración actual al solucionar la **Ecuación 2-2**

ΔY : La diferencia entre el tirante de agua actual y el tirante de agua considerado en la iteración previa

ΔError : La diferencia entre el error considerado en la iteración actual y el considerado en la iteración previa

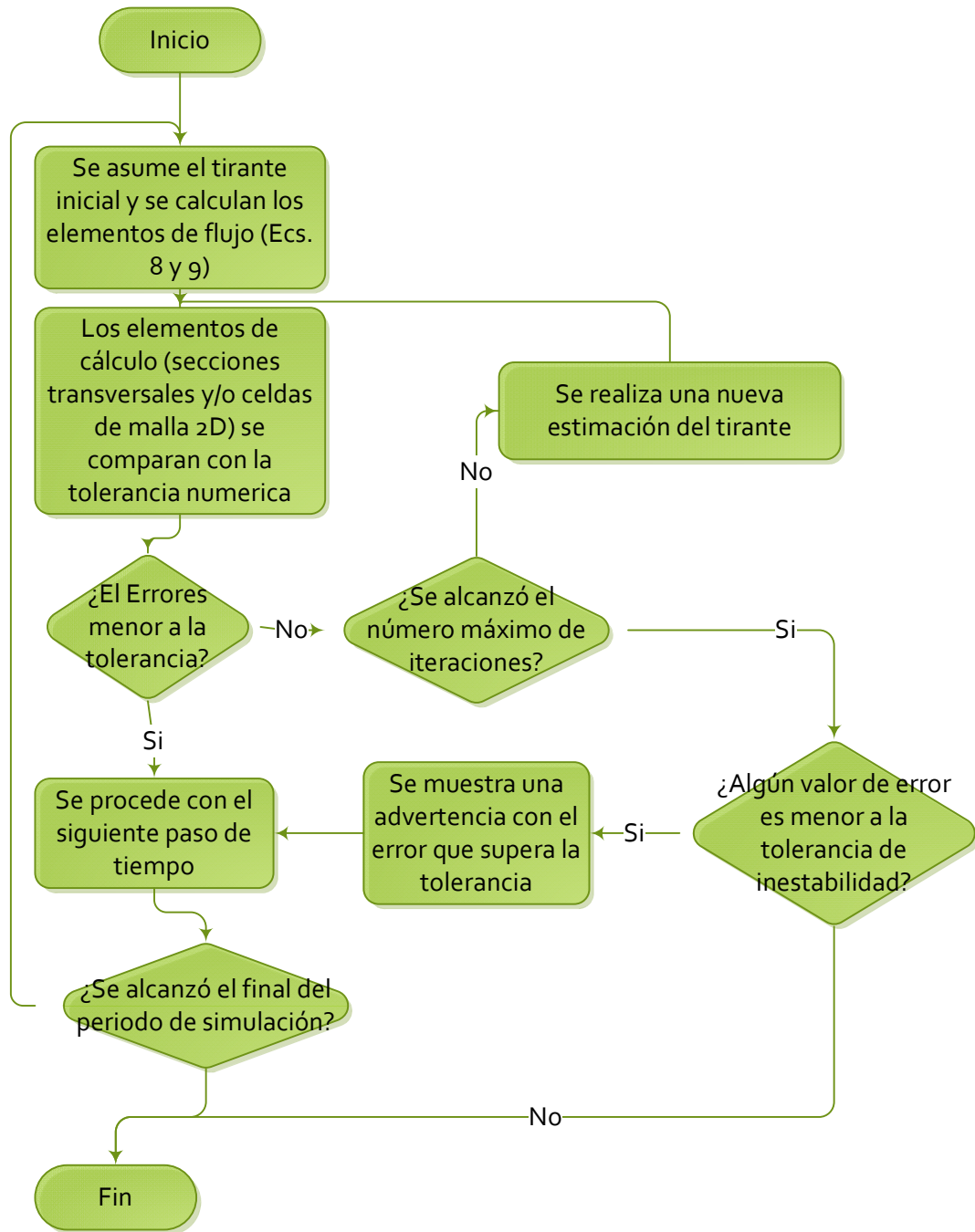


Figura 2-2 Algoritmo para solucionar las ecuaciones de flujo no estable (1D y combinación 1D/2D)

La simulación de flujos en 2D dentro del software de HEC-RAS (Disponible a partir de la versión 5.0) se realiza mediante la resolución de las ecuaciones de St. Venant en dos dimensiones (Brunner, G., 2016).

El modelo de **análisis de flujo no estable en 2D** fue desarrollado dentro del HEC y basa la simulación en la solución de las ecuaciones de conservación de masa y momento (Ecs. 10 a 14) en dos dimensiones.

Los elementos de cálculo del flujo 2D son las celdas de la malla trazada en la zona de estudio. Una contribución importante del cálculo efectuado por el modelo 2D de HEC-RAS es el hecho de que además de utilizar éstas celdas, si se cuenta con una batimetría con mayor resolución, utilizará algunos de los datos de esta batimetría que estén dentro de la celda a modo de una “sub-malla” (Ver Figura 2-3) para mejorar los resultados de la simulación

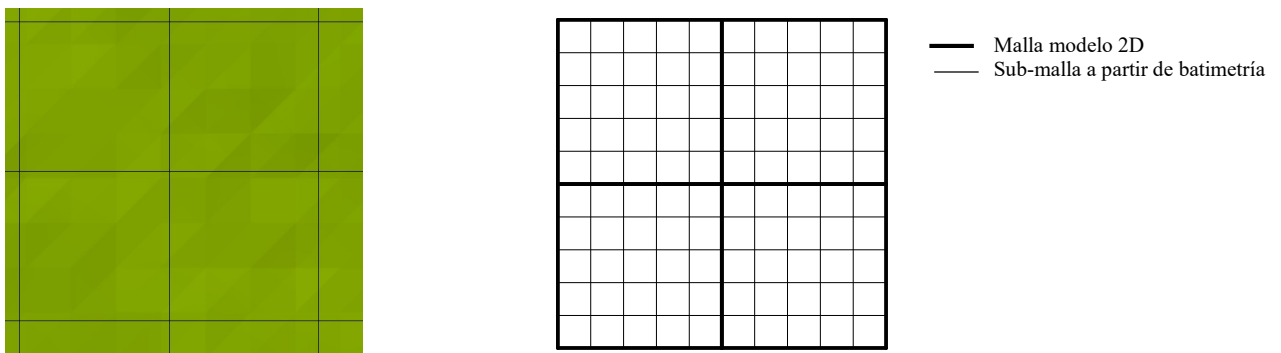
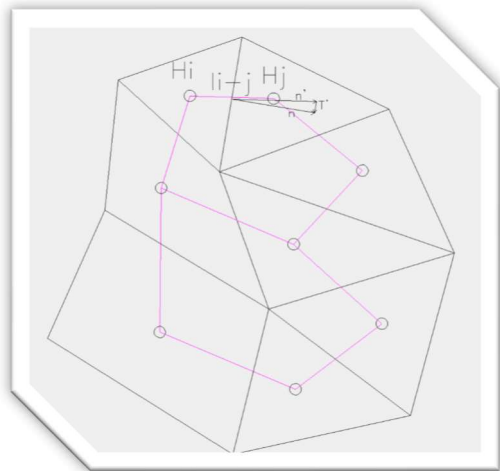


Figura 2-3 Ejemplo de datos batimétricos dentro de la malla de cálculo para la simulación 2D

Si bien esta sub-malla no es utilizada directamente como elemento de cálculo, algunos datos como la elevación y el coeficiente de fricción de manning se conservan para obtener un coeficiente de fricción compuesto y un área de canal mejores que con el simple uso de la malla 2D.

El cómputo de la simulación de la malla, se realiza creando “canales” entre los centroides de celdas con aristas contiguas de la malla y entre cada uno de éstos resolviendo las ecuaciones de continuidad de masa y momento (Ver Figura 2-4)



- Malla de cálculo 2D
- Canal entre centroides
- Centroides de celdas
- Hi Elevación en punto i
- Hj Elevación en punto j
- n Dirección del flujo inicial
- n' Dirección del flujo final
- T' Cambio de dirección del flujo

Figura 2-4 Esquema de elementos de cálculo 2D

El algoritmo de simulación para flujo no estable en dos direcciones (Ver Figura 2-5)

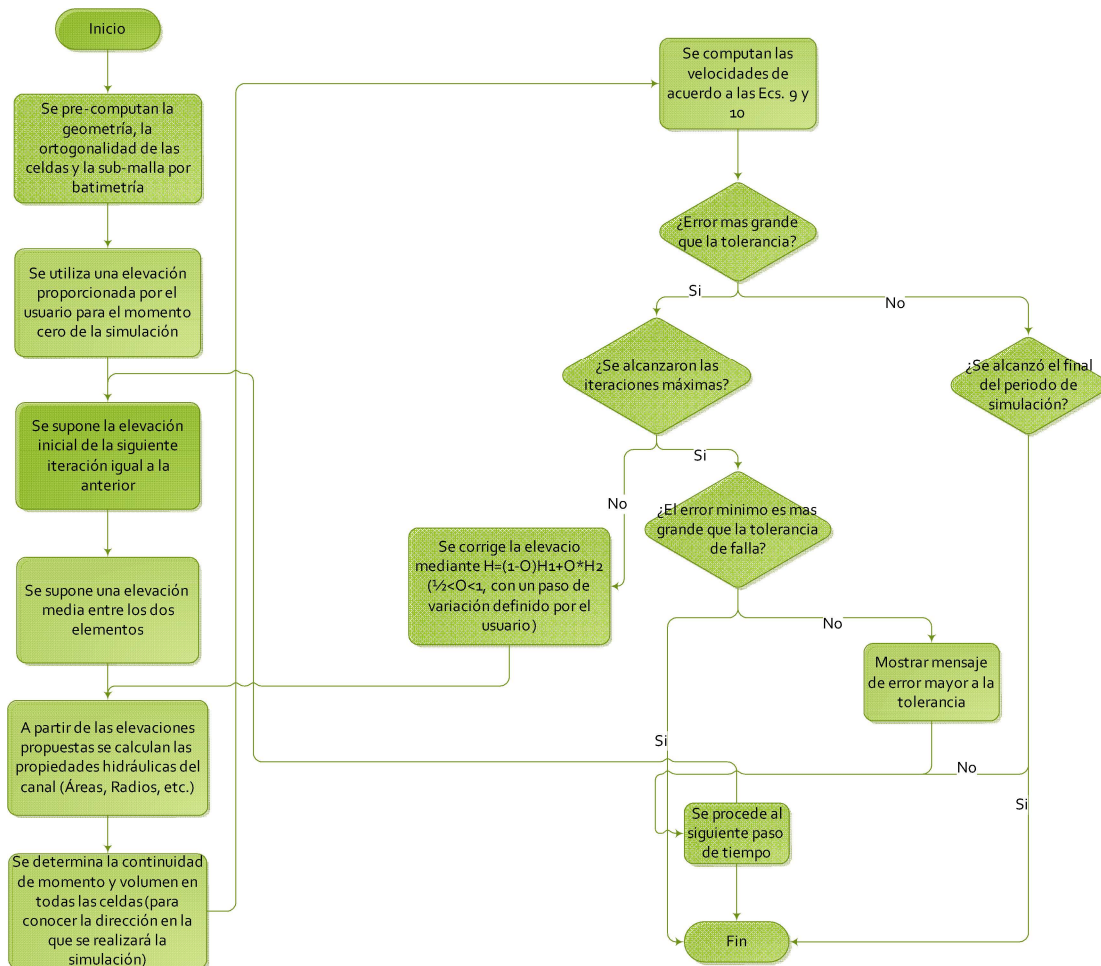


Figura 2-5 Algoritmo de simulación flujo no estable 2D

2.2 Principios matemáticos de las simulaciones hidrodinámica de flujo

Los modelos hidrodinámicos **unidimensionales** funcionan resolviendo las ecuaciones de onda dinámica, que corresponden a las ecuaciones de momento y de continuidad en una dirección (Timbe, 2011).

2.2.1 Ecuaciones empleadas dentro de la simulación 1D de flujo estable

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_c \quad \text{Ecuación 2-2}$$

$$h_c = L\bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad \text{Ecuación 2-3}$$

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad \text{Ecuación 2-4}$$

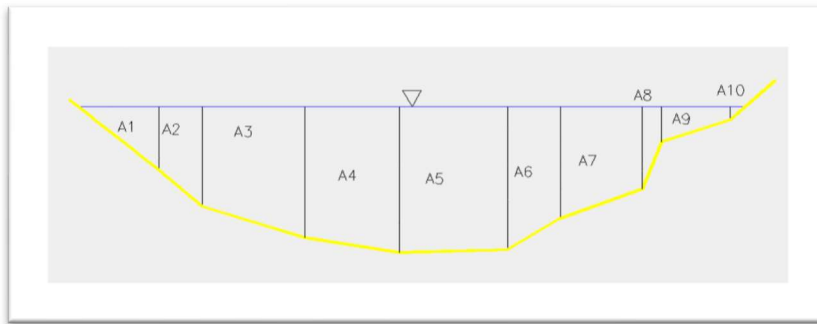
$$\bar{S}_f = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} \quad \text{Ecuación 2-5}$$

Donde:

- Z: Elevación en el fondo del canal principal
- Y: Tirante del agua en la sección transversal
- V: Velocidades promedio (Gasto/Área)
- a: coeficientes de ponderación de velocidad
- g: aceleración de la gravedad
- hc: pérdida de energía
- L: Distancia ponderada de descarga entre secciones
- c: coeficiente de expansión o contracción
- \bar{S}_f : Fricción promedio entre las dos secciones
- S_{f1}, S_{f2} : Pendiente de fricción en la sección inicial y final, respectivamente
- L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} : Distancias entre banco izquierdo, canal y banco derecho de las secciones en estudio, respectivamente
- $\bar{Q}_{lob}, \bar{Q}_{ch}, \bar{Q}_{rob}$: Promedio aritmético de los gastos entre secciones del banco izquierdo, canal y banco derecho, respectivamente

Para tener una mejor aproximación de los datos de cada sección, ésta es dividida en varias secciones, generalmente en cada punto del perímetro mojado (Ver Figura 2-6). Para obtener el coeficiente de

ponderación, determinamos la velocidad, el gasto y la carga por velocidad en cada una de las subdivisiones, y se emplea la ecuación 6.



A_n: Área de la división n de la sección transversal

— Fondo de la S.T.
— Espejo de agua

Figura 2-6 División de la sección transversal para determinar la velocidad ponderada (Ver Ecuación 2-6)

$$a = \frac{\left(\frac{Q_1 V_1^2}{2g} + \frac{Q_2 V_2^2}{2g} + \dots + \frac{Q_n V_n^2}{2g} \right)}{(Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n) * \bar{V}^2} \quad \text{Ecuación 2-6}$$

La Ecuación 2-7 describe la conservación de momento entre secciones transversales para el flujo estable.

$$\frac{Q_2^2 \beta_2}{g A_2} + A_2 \bar{Y}_2 + \frac{A_1 + A_2}{2} L S_0 - \frac{A_1 + A_2}{2} L \bar{S}_f = \frac{Q_1^2 \beta_1}{g A_1} + A_1 \bar{Y}_1 \quad \text{Ecuación 2-7}$$

Donde:

Q₁, Q₂: Caudales en las secciones 1 y 2

A₁, A₂: Áreas de las secciones 1 y 2, respectivamente

Y₁, Y₂: Tirantes en las secciones 1 y 2, respectivamente

L: Distancia entre las secciones 1 y 2 a lo largo del eje X

S₀: Pendiente del canal

S_f: Pendiente de la línea de energía

a: Coeficiente de ponderación de velocidad

β: Coeficiente del momento tomado en cuenta para una distribución variante de la velocidad en canales irregulares

2.2.2 Ecuaciones empleadas en la simulación 1D de flujo no estable

La simulación de flujo hidráulico no estable basa su solución en las ecuaciones de continuidad (conservación de masa) y de conservación de momento.

La Ecuación 2-8 describe la continuidad (conservación de masa en 1D).

$$\Delta Q + \frac{\Delta A_c}{\Delta t} \Delta x_c + \frac{\Delta A_f}{\Delta t} \Delta x_f + \frac{\Delta S}{\Delta t} \Delta x_f - \bar{Q}_l = 0 \quad \text{Ecuación 2-8}$$

Donde:

\bar{Q}_l : Entrada de flujo lateral promedio

ΔA_c : Cambio de área hidráulica dentro del canal principal

ΔA_f : Cambio de área hidráulica de la planicie de inundación

Δx_c : Longitud del canal principal entre dos secciones transversales

Δx_f : La longitud de la planicie de inundación entre dos secciones transversales

$$\frac{\Delta(Q_c \Delta x_c + Q_f \Delta x_f)}{\Delta t} + \Delta(\beta V Q) + g \bar{A} \Delta z + g \bar{A} \bar{S}_f \Delta x_e = 0 \quad \text{Ecuación 2-9}$$

$$\Delta x_e = \frac{g \bar{A}_c \bar{S}_{fc} \Delta x_c + g \bar{A}_f \bar{S}_{ff} \Delta x_f}{g \bar{A} \bar{S}_f} \quad \text{Ecuación 2-10}$$

Donde:

Q_c, Q_f : Flujo dentro de canal principal y la planicie de inundación, respectivamente

Δx_e : Distancia de flujo equivalente

S_{fc}, S_{ff} : Pendientes de fricción promedio del canal y de la planicie de inundación

2.2.3 Ecuaciones empleadas en la simulación 2D de flujo no estable

Para flujo no estable, la Ecuación 2-11 describe la conservación de momento en 2D para velocidad en sentido u, mientras que la Ecuación 2-12 describe la ecuación de momento en 2D para la velocidad en sentido v.

$$\frac{\delta u}{\delta t} + \frac{u \delta u}{\delta x} + \frac{v \delta u}{\delta y} = -\frac{g \delta H}{\delta x} + v_t \left(\frac{u \delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} \right) - c_f u + f v \quad \text{Ecuación 2-11}$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + \frac{u\delta v}{\delta x} + \frac{v\delta v}{dy} = -\frac{g\delta H}{\delta x} + v_t \left(\frac{u\delta^2 v}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta y^2} \right) - c_f v + fu \quad \text{Ecuación 2-12}$$

$$v_t = Dhu_* \quad \text{Ecuación 2-13}$$

$$u_* = \frac{ng^{1/2}}{R^{1/6}} |V| \quad \text{Ecuación 2-14}$$

$$c_f = \frac{g|V|}{C^2 R} \quad \text{Ecuación 2-15}$$

Donde

- u,v: Velocidades del flujo en las direcciones cartesianas del plano de la malla
- vt: Coeficiente de viscosidad de torbellinos
- f: Parámetro de Coriolis
- cf: Fricción del fondo del canal
- t: Es el tiempo de simulación
- H: Elevación de la superficie de agua
- R: Es el radio hidráulico
- u* : Velocidad de corte
- g: Aceleración de la gravedad
- |V| : Magnitud del vector de velocidad
- D: Constante empírica
- h: Tirante hidráulico
- C: Coeficiente de Chézy

D es una constante empírica que puede tomarse de la Tabla 2-1

Tabla 2-1 Valores típicos de D (**Brunner, G., 2016**).

| D | Intensidad de la turbulencia | Geometría |
|--------------------|------------------------------|---|
| 0.11 a 0.26 | Poca turbulencia | Canales rectos, superficie suave |
| 0.3 a 0.77 | Turbulencia moderada | Meandros suaves, irregularidades moderadas de la superficie |
| 2.0 a 5.0 | Turbulencia fuerte | Meandros pronunciados, superficie rugosa |

2.3 Modelo CEQUEau

El modelo hidrológico CEQUEAU fue desarrollado en el Instituto Nacional de la Investigación Científica-Agua (INRS-EAU, ahora INRS-ETE) de la Universidad de Québec, Canadá,

El modelo CEQUEAU, que es empleado para la simulación de escurrimiento dados los datos hidrometeorológicos obtenidos en tiempo real, es un modelo hidrofisiográfico capaz de simular caudales simultáneamente en tiempo y espacio (**CHARBONNEAU, 1977**).

Este modelo basa su funcionamiento en la discretización de la cuenca de estudio por medio de una cuadrícula, de la cual se obtendrá una síntesis del modelo de escurrimiento por medio de una subdivisión de esta cuadrícula. Luego se asignan estaciones meteorológicas y estaciones hidrométricas a los elementos de la cuadrícula correspondiente.

El proceso de generar la información requerida para el correcto funcionamiento del programa CEQUEAU, puede realizarse a mano, cuadriculando cartas topográficas e ingresando los datos de flujo al formato que requiere CEQUEAU, o bien, servirse del módulo Idrisi-CEQUEAU, para Idrisi, que automatiza el proceso de generación de archivos hidrofisiográficos para el análisis del modelo CEQUEAU, utilizando DEM (**Guerra-Cobián, 2007**).

El programa cuenta con dos funciones principales, la función de producción, que simula el flujo vertical del agua en el suelo, esquematizado por varios reservorios intercomunicados entre ellos y la segunda, llamada función de transferencia, enfocada en el escurrimiento usando factores de drenaje y factores fisiográficos de la cuenca (**Morín. y Paquet. , 2007**).

El modelo discretiza las características físicas de la cuenca en cuadros que a su vez pueden ser divididos hasta en 4 sub-cuadros (denominados A,B,C y D) y utilizando como datos de entrada la elevación del terreno (m) mediante un archivo que contenta la información fisiográfica del terreno, las precipitaciones (mm) de las estaciones climatológicas pertinentes cercanas a la cuenca de estudio, las temperaturas (°C) tomadas también de las estaciones climatológicas, y los caudales (m³/s) obtenidos de las estaciones hidrométricas cercanas la desembocadura (**Diaz., 2010**).

Dentro de los cuadros en los que se ha discretizado la zona de estudio también es necesario indicar el uso de suelo. Para CEQUEau esto se hace indicando para cada cuadro el porcentaje que contiene de los cuatro usos de suelo que puede diferenciar el programa:

1. Cuerpos de Agua
2. Bosques
3. Ciénegas
4. Otros

Como Morín y Paquet (2007) señalan, la calibración del modelo puede realizarse por prueba y error, o por optimización, utilizando el módulo que el programa incluye para tal fin. La calibración por prueba y error consiste en hacer variar los parámetros y ver el efecto que tienen tales modificaciones sobre el resultado de la simulación. Hay algunas prácticas que facilitan el proceso de calibración, tales como:

- Determinar valores constantes obtenidos de estudios externos al modelo
- Determinar valores constantes propios a las características hidrológicas y fisiográficas de la cuenca.

Si bien no existen reglas para los demás parámetros, la experiencia y la experimentación permiten realizar un buen ajuste.

Una vez que se han definido los datos fisiográficos y se ha calibrado el modelo CEQUEau, es posible posicionar estaciones ficticias, para las cuales de acuerdo a la interpolación combinada de datos fisiográficos y meteorológicos, pueden obtenerse estimaciones de gastos máximos diarios que corresponden a la posición de éstas estaciones ficticias.

2.4 Matlab

Matlab es un lenguaje de scripting científico, con un entorno de desarrollo integrado (un conjunto de editor de código fuente, un depurador, compilador y librerías para automatizar el desarrollo), que trabaja en lenguaje M (lenguaje propietario de Mathworks, empresa desarrolladora del software), teniendo Matlab la característica de contar con una amplia variedad de herramientas incluidas orientadas a matemáticas, pudiendo expandir su funcionalidad con paquetes de herramientas

adicionales (toolboxes), que por la naturaleza de MATLAB, vienen en forma de código fuente (Borrel., 2008).

Principalmente, el trabajo de datos en Matlab es por medio de vectores (incluso las matrices, no son sino vectores con formateo suficiente para poder ser utilizados como matrices, aunque como reminiscencia de su naturaleza vectorial, es posible acceder a los datos por medio de las coordenadas matriciales o bien, con la posición escalar de los elementos dentro del vector).

Como se ha mencionado, más herramientas pueden anexarse al acervo de funciones de Matlab por medio de las toolboxes, aunque la versión base del programa ya cuenta con una gran cantidad de éstas. De éstas, las principales que se utilizarán son las siguientes:

Geotiffread: Esta herramienta permite importar la matriz de datos de una imagen Geotiff, así como las etiquetas correspondientes a la información de referencia geoespacial de la imagen (Límites X e Y del DEM, Resoluciones en X e Y, etc.)

Geotiffinfo: Esta herramienta importa las etiquetas correspondientes a las propiedades de la imagen Geotiff (Resolución, Cantidad de Bits, tipo de compresión, nombres de las unidades, nombres de las referencias, etc.)

Geotiffwrite: Usando como datos de entrada la matriz de datos de elevaciones (Mat), el arreglo de propiedades de georreferencia (Ref), y la información de las propiedades de la imagen (Inf) puede escribir un archivo en formato Geotiff.

Textread: Crea una matriz de datos a partir de un archivo de texto, donde cada fila se delimita por los espacios en el archivo de texto y cada columna se delimita por un espaciador especificado por el usuario (regularmente, una coma, un espacio o un tabulador)

Fprintf: Escribe datos especificados por el usuario en una línea de un archivo de texto

Find: Dados parámetros de búsqueda, devuelve las coordenadas (vectoriales o matriciales) de todos los valores dentro de un vector o matriz que coincidan con los parámetros.

El conjunto de herramientas externas que es utilizado dentro de este proyecto es Topotoolbox (ver Herramientas Topotoolbox, pag. 23).

Las matrices bidimensionales de Matlab se numeran de izquierda a derecha (Eje X) y de arriba abajo (eje Y) (ver Figura 2-7 Importación de Geotiff a MATLAB para el uso en Topotoolbox Es importante tener en cuenta esta peculiaridad de que los valores en Y incrementan hacia abajo, puesto que en los archivos GeoTiff este valor se incrementa hacia arriba.

Es por esto, que para una coordenada en formato matricial (Y,X) cualquiera, su correspondiente coordenada (X_{UTM}, Y_{UTM}) puede obtenerse mediante la Ecuación 2-16, o bien, se puede estimar la coordenada matricial mas cercana (Y,X) a partir de coordenadas (X_{UTM}, Y_{UTM}) con la Ecuación 2-17.

$$f(Y, X) = (RefX + (X - 1) * ResX, RefY - (Y - 1) * ResY) \quad \text{Ecuación 2-16}$$

Ecuación 2-17

$$f(X_{UTM}, Y_{UTM}) = \left(\text{redondear} \left(\frac{Y_{UTM} - RefY}{ResY}, 0 \right), \text{redondear} \left(\frac{X_{UTM} - RefX}{ResX}, 0 \right) \right)$$

Donde:

- RefX: Coordenada X de referencia de la esquina inferior izquierda del DEM.
- RefY: Coordenada Y de referencia de la esquina inferior izquierda del DEM.
- ResX: Resolución del pixel de la imagen Geotiff original en la dirección X (m).
- ResY: Resolución del pixel de la imagen Geotiff original en la dirección Y (m).
- X,Y: Coordenada en X e Y del elemento de la matriz de matlab (Ver Figura 2-7).
- X_{UTM}, Y_{UTM} : Coordenadas X e Y en formato UTM

2.5 Herramientas TopoToolBox

Topotoolbox es un grupo de herramientas diseñadas sobre la plataforma de MATLAB, desarrolladas para el análisis numérico de flujo espacial y no espacialmente distribuido, sobre modelos numéricos de elevación.

Las herramientas que componen topotoolbox tienen capacidad de análisis de dirección de flujo, sedimentos, químicos y nutrientes.

En el presente trabajo, las herramientas utilizadas fueron las relacionadas con el análisis de dirección de flujo, acumulación de unidades de flujo y limpieza de valores anómalos que podrían generar ciclos (PitRemoval).

La importación de información geoespacial se hace por medio de archivos tipo Geotiff. Por medio de Matlab, la información de la matriz numérica de elevaciones es guardada dentro de una matriz, mientras que los datos geográficos son almacenados dentro de diferentes arreglos, para utilizarse posteriormente (Ver Figura 2-7)

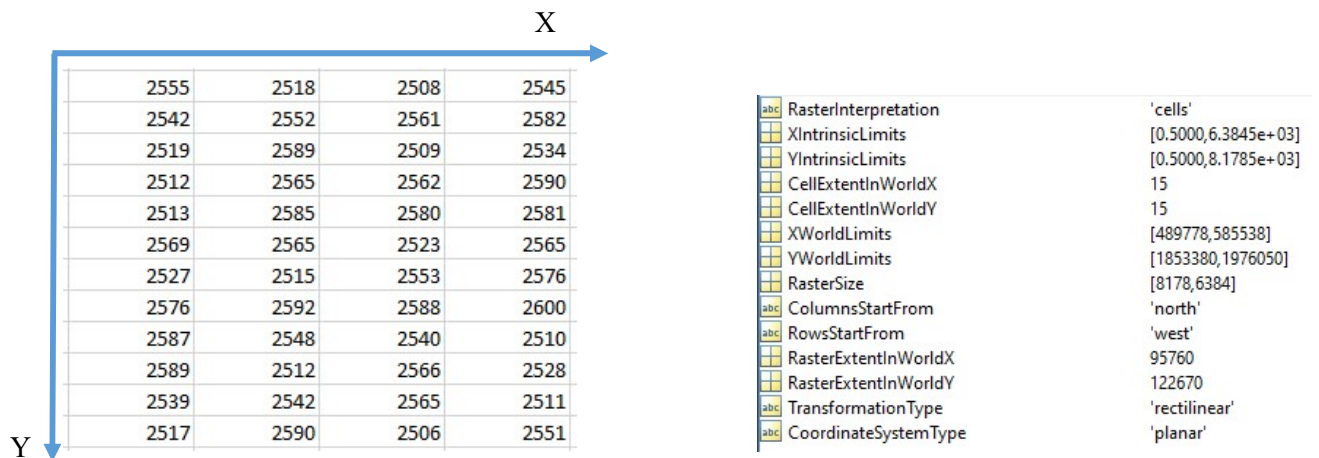


Figura 2-7 Importación de Geotiff a MATLAB para el uso en Topotoolbox

La dirección del flujo tradicionalmente es calculada desde un píxel a otro, calculando el gradiente de elevación (ver Ecuación 2-18) en los pixeles adyacentes y dirigiendo el flujo hacia el píxel adyacente que presente el mayor gradiente.

$$S_{ij} = \frac{Z_i - Z_j}{d_{ij}} \quad \text{Ecuación 2-18}$$

Donde:

- S_{ij}: Gradiente de elevación entre los pixeles i y j
- Z_i, Z_j: Elevación de los pixeles i y j, respectivamente
- d_{ij}: Distancia entre los pixeles i y j

Inicialmente, cada píxel tiene una unidad de flujo. Una vez que se ha calculado la dirección del flujo de un píxel a otro, la cantidad de unidades de flujo que se encuentren acumulados en el píxel inicial, se suman a la cantidad de unidades de flujo acumuladas en el píxel final (Ver Figura 2-8).

Sin embargo, según señalan **Schwanghart y Kuhn (2010)**, este método termina ignorando los flujos cruzados y propicia sobre concentraciones de flujo en las zonas bajas de la topografía. Es por esto por lo que en TopoToolBox se implementó un algoritmo de escurrimiento múltiple, donde para cada píxel se crea una matriz M, denominada matriz de transferencia, que señala la transferencia de unidades de flujo hacia hasta ocho píxeles adyacentes, proporcionalmente a la intensidad de la pendiente hacia tales píxeles.

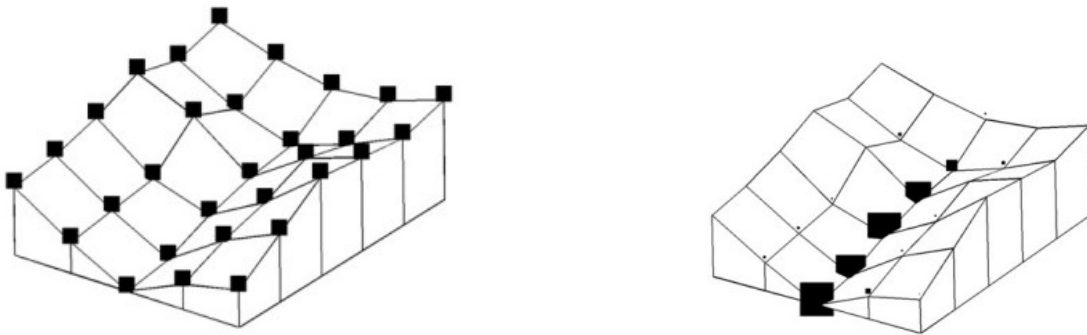


Figura 2-8 Acumulación de unidades de flujo dentro del DEM (Imagen tomada de Schwanghart y Kuhn, 2010)

Para mantener la continuidad de la transferencia de flujo a través de zonas planas (secciones del modelo de elevación en el que el gradiente de elevación es igual a cero), topotoolbox tiene dos algoritmos diferentes, Routeflats y Crossflats.

Ambos algoritmos comienzan las iteraciones identificando valores nulos (NaN) y agujeros (píxeles que no se encuentran en las orillas del DEM, que alrededor no tienen ningún píxel con una elevación igual o menor) para ser evitados durante el cálculo.

El algoritmo Routeflats consiste en delimitar el borde de la zona plana, siendo la “salida” del flujo la elevación más baja del borde, y luego determina las rutas dentro de la zona plana tomando como inicio los píxeles que transfieren su flujo a los píxeles que conforman el borde, y después se encuentra la ruta a lo largo de gradientes interpolados del borde, mejorando las rutas subsecuentes con cada ruta calculada.

El algoritmo Crossflats de igual manera delimita el borde de la zona plana, determinando la “salida” del flujo. Después, simplemente une cada entrada del flujo con la salida por medio de una línea recta.

2.6 Herramientas Integrated Water Management

“*Integrated Water Management*” son un conjunto de herramientas desarrollados en el CIRA sobre la plataforma de IDRISI.

Contemplan un amplio espectro de funciones sobre el manejo del agua. En particular, el presente trabajo hace uso de las herramientas que posee acerca de las propiedades hidrofisiográficas del terreno, particularmente, las propiedades de área de la cuenca, tiempo de concentración por el método de Kirpich y longitud del cauce principal.

2.7 Método de obtención de batimetría sintética propuesto por Corum

El levantamiento por medio de LiDAR no puede devolver datos, o devuelve datos insuficientes en cuerpos profundos de agua debido a la baja reflectancia (Schenk y Csatho, 2002). Además, los datos devueltos por el dispositivo LiDAR son puntos ubicados al azar sobre el terreno, por lo que no pueden ubicar correctamente las orillas y bordes del terreno en elementos como ríos, crestas o construcciones.

Es por eso que, en cuerpos de agua, como ríos, si solo se dispone de levantamientos por medio de LiDAR, es probable que éstas zonas no cuenten con cuerpos de agua.

Es por esto, que Corum (2015) propone un método para determinar una batimetría sintética si se conoce la elevación de la superficie de agua y el gasto correspondiente a tal elevación.

El método se resume con el algoritmo mostrado en la Figura 2-9.

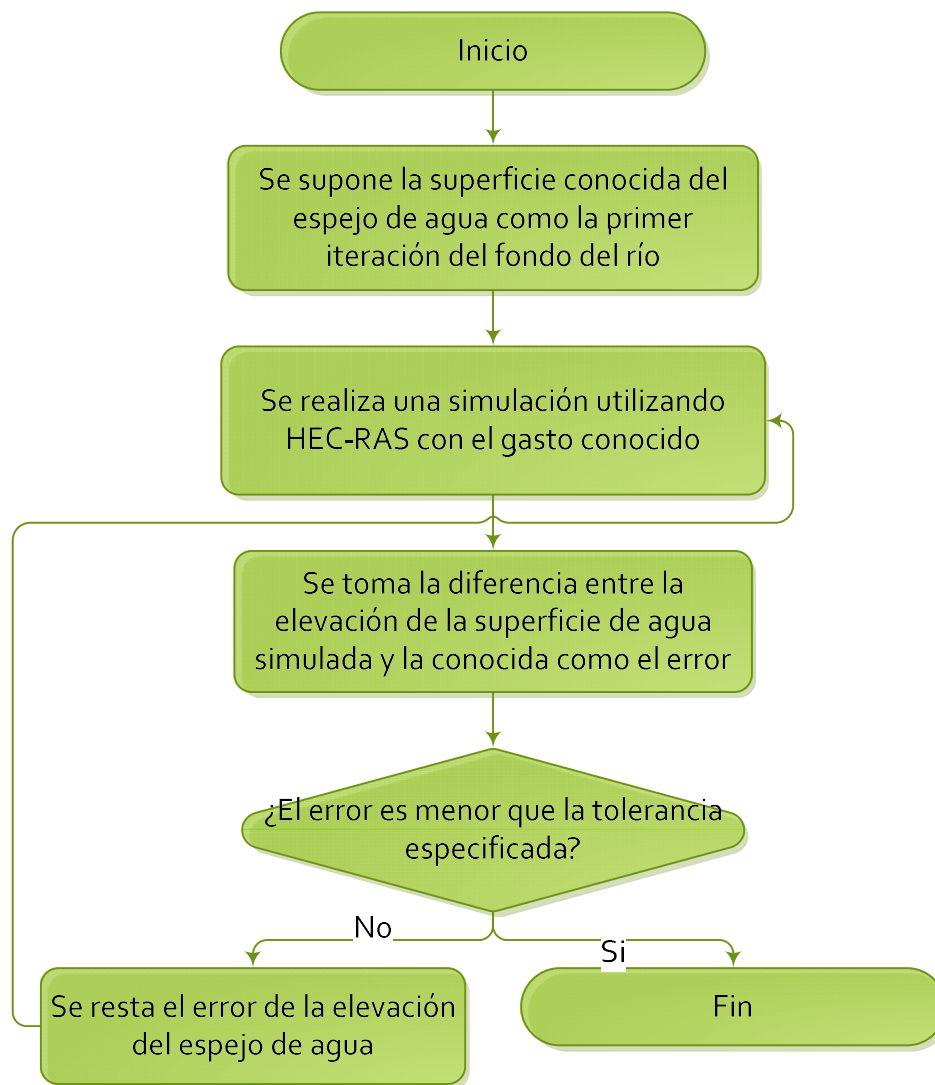


Figura 2-9 Algoritmo de Corum para obtener un lecho sintético

Aún queda el problema de la distribución del gasto conocido a lo largo del tramo, principalmente cuando una parte importante de la aportación del gasto proviene de canales adyacentes tributarios. En tales casos, puede elegirse entre aislar el flujo completo dentro del canal principal o elaborar un esquema con un tramo de río secundario conectado al principal (Corum, 2015).

En el presente trabajo, se eligió realizar la distribución del gasto conocido a lo largo del río, mediante la simulación de gasto en estaciones ficticias utilizando el modelo CEQUEau (ver Modelo CEQUEau, pág. 20) para obtener una estimación de los porcentajes del gasto conocido correspondientes a cada tramo del río (la discretización de éstos tramos está limitada por las restricciones de discretización

fisiográfica del software CEQUEau (ver Modelo CEQUEau, pag. 20)), lo cual incluye las aportaciones de los ríos tributarios.

2.8 Métodos estadísticos para la evaluación de datos

Tanto para la simulación de caudales usando CEQUEau (Pág. 20) como para el tránsito de avenidas utilizando HEC-RAS (Pag. 11,) es necesario realizar análisis estadísticos de los datos hidrometeorológicos e hidrométricos.

2.8.1 Calidad de las series de datos

Primeramente, para comprobar la calidad de las series de datos obtenidos se realizarán pruebas de aleatoriedad, de homogeneidad y de independencia.

2.8.1.1 Pruebas de aleatoriedad

Una muestra aleatoria, desde el punto de vista estadístico, es una en la que cada una de las muestras tiene la misma probabilidad de ser escogida. En hidrología, la aleatoriedad asegura que los datos son debidos a causas naturales (Cano, 2005).

La prueba de aleatoriedad empleada en la investigación es la prueba de **Hatanaca**. La prueba se realiza sobre un arreglo de observaciones de tamaño n ordenados cronológicamente (en el orden en que fueron muestreados).

Cada observación, se evalúa respecto a cada observación que le precede. Es decir, para cada elemento X_j , se evalúan los elementos X_1, X_2, \dots, X_{j-1} .

Comenzamos la iteración con los valores

$$N_s=0$$

$$N_i=0$$

Si el elemento X_j es el máximo dentro del grupo evaluado (es decir $X_j = \max(X_1, X_2, \dots, X_j)$) entonces se agrega una unidad al contador N_s ($N_s = N_s + 1$), si por el contrario es el mínimo (es decir $X_j = \min(X_1, X_2, \dots, X_j)$) se agrega un valor al contador N_i ($N_i = N_i + 1$). Si no nos encontramos en ninguno de estos dos casos, no se toma ninguna acción y se procede a evaluar el siguiente elemento.

Se repite el proceso hasta terminar con la serie, y después se obtiene el estadístico ε mediante la Ecuación 2-19.

$$\varepsilon = \frac{N_s - N_i}{2 * \ln(n) - 0.845} \quad \text{Ecuación 2-19}$$

Se supone que la muestra tiene una distribución Normal. Si se considera un valor de significancia α , entonces la muestra se considera aleatoria si se cumple

$$-Z_{\frac{\alpha}{2}} \leq \varepsilon \leq Z_{\frac{\alpha}{2}}$$

2.8.1.2 Prueba de Homogeneidad

Las pruebas de homogeneidad determinan indican si los datos probados pertenecen a una misma muestra. Particularmente, indica si es que los datos probados se desenvuelven alrededor de una misma media. Esto tiene significancia hidrológica principalmente debido a las modificaciones en el ciclo hidrológico que sufre una zona debido a la deforestación, la urbanización y el cambio climático. Es decir, si a lo largo del periodo en el que fueron tomados los datos, ha cambiado la tendencia de los datos (Por ejemplo, debido a la urbanización y deforestación de una cuenca, con unas décadas el escurrimiento esperado para un periodo de retorno puede aumentar drásticamente). De ser así, se podría llegar al caso en que datos más antiguos tengan que descartarse del análisis estadístico, dado que ya no son representativos para el ciclo hidrológico de la cuenca.

La prueba empleada en el estudio para determinar la homogeneidad de las muestras es la prueba de **iteración**.

La prueba de iteración se hace sobre una muestra de tamaño n , ordenada cronológicamente. Se determina la mediana de la muestra \tilde{x} y se hace la transformación siguiente.

Para cada X_j de la muestra,

si $X_j < \tilde{x}$, se señala con un 0.

Si $X_j > \tilde{x}$ se señala con un 1.

Entonces comenzamos con los contadores:

$N_{i0}=0$

$N_{i1}=0$

N_0 = Número de ceros señalados en la muestra

N_1 = Número de unos señalados en la muestra

Entonces, se hace un recorrido sobre el vector de 0's y 1's obtenidos de la muestra, en orden cronológico. Por cada cambio que haya de 0 a 1, se añade una unidad a N_{i1} ($N_{i1}=N_{i1}+1$), por cada cambio que haya de 1 a 0, se añade una unidad a N_{i0} ($N_{i0}=N_{i0}+1$). Se repite el proceso hasta terminar con la serie.

Se obtiene el estadístico de prueba de la Ecuación 2-20.

$$\varepsilon = \frac{(N_{i1} + N_{i0}) - \tilde{x}_w}{(S_w^2)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{Ecuación 2-20}$$

$$\tilde{x}_w = \frac{2N_0N_1}{n} + 1 \quad \text{Ecuación 2-21}$$

$$S_w^2 = \frac{2N_0N_1(2N_0N_1 - n)}{n^2(n - 1)} \quad \text{Ecuación 2-22}$$

Donde:

\tilde{x}_w : Mediana para la prueba de iteración

S_w^2 : Varianza para la prueba de iteración

Se considera que la prueba sigue una distribución Normal, por lo que para un nivel de significancia α , la muestra se considera homogénea si se cumple que

$$-Z_{\frac{\alpha}{2}} \leq \varepsilon \leq Z_{\frac{\alpha}{2}}$$

2.8.1.3 Prueba de independencia

Las pruebas de independencia tienen la función de verificar si las observaciones de la muestra no sufren de algún tipo de influencia. Es decir, si el valor de una observación es influenciado por el valor de observaciones anteriores.

La prueba empleada dentro de la investigación fue la de Wald y Wolfowitz (recopilada por Cano, 2005).

Para una muestra de tamaño n esta prueba considera la media y la varianza con los siguientes valores

$$\tilde{x}_w = \frac{\psi_1^2 - \psi_2}{n - 1} \quad \text{Ecuación 2-23}$$

$$S_w^2 = \frac{\psi_2^2 - \psi_4}{n - 1} + \frac{\psi_1^4 - 4\psi_1^2\psi_2 + 4\psi_1\psi_3 + \psi_2^2 - 2\psi_4}{(n - 1)(n - 2)} - \tilde{x}_w^2 \quad \text{Ecuación 2-25}$$

$$w = \sum_{i=1}^{n-1} x_i x_{i+1} + x_1 x_n \quad \text{Ecuación 2-24}$$

Donde

$$\psi_j: nm'_j$$

n : Tamaño de la muestra

m'_j : j -ésimo momento respecto al origen

\tilde{x}_w : Media para la prueba de Wald y Wolfowitz

S_w^2 : Varianza para la prueba de Wald y Wolfowitz

Entonces, el estadístico de prueba para la prueba de Wald y Wolfowitz está dado por la Ecuación 2-26.

$$\varepsilon = \frac{w - \tilde{x}_w}{(S_w^2)^{1/2}} \quad \text{Ecuación 2-26}$$

Se supone que la muestra tiene una distribución Normal. Si se considera un valor de significancia α , entonces la muestra se considera independiente si se cumple que

$$-Z_{\frac{\alpha}{2}} \leq \varepsilon \leq Z_{\frac{\alpha}{2}}$$

2.8.2 *Análisis estadístico de los datos*

Una vez que la calidad de los datos ha sido evaluada, se procede a realizar un análisis estadístico de los datos.

Para el análisis, se realizan diferentes ajustes probabilísticos, que después son comparados con los datos observados para determinar la bondad de ajuste que presenta cada función y elegir la que se apegue de mejor manera a los datos observados.

Las distribuciones empleadas en el estudio son: distribución Normal, distribución Gamma, Distribución Pearson III, distribución Gumbel tipo I, distribución log-Normal y distribución log-Pearson III.

García (2010) ofrece una recopilación de las principales distribuciones estadísticas empleadas en modelos hidrológicos, mismas que son listadas abajo.

La distribución de densidad de la función **Normal** está dada por la Ecuación 2-27

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{Ecuación 2-27}$$

Donde

σ : Desviación estándar de la muestra

μ : Media de la muestra

La distribución de densidad de la función **Gamma** está expresada por la Ecuación 2-29.

$$f(x) = \frac{(a^b x^{b-1} e^{-ax})}{\Gamma(b)} \quad \text{Ecuación 2-29}$$

$$a = \frac{\bar{x}}{S^2} \quad \text{Ecuación 2-28}$$

$$b = \frac{\overline{x^2}}{S^2} \quad \text{Ecuación 2-30}$$

Donde $\Gamma(b)$ es la **función Gamma** y está expresada por la Ecuación 2-31.

$$\Gamma(b) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{b-1} dt \quad \text{Ecuación 2-31}$$

La distribución de densidad de la función **Pearson III** está dada por la Ecuación 2-32.

$$f(x) = \frac{(|c|(x - ap)^{bp-1} e^{-ap(x-ap)})}{\Gamma(bp)} \quad \text{Ecuación 2-32}$$

$$ap = \bar{x} - \frac{2S}{C_{sc}} \quad \text{Ecuación 2-33}$$

$$bp = \frac{4}{C_{sc}^2} \quad \text{Ecuación 2-34}$$

$$cp = \frac{2}{SC_{sc}} \quad \text{Ecuación 2-35}$$

$$C_s = m_3/m_2^{3/2} \quad \text{Ecuación 2-36}$$

$$C_{sc} = \frac{C_s \sqrt{n(n-1)}}{n-2} \quad \text{Ecuación 2-37}$$

Donde:

$\Gamma(b)$: Es la función gamma, expresada por la Ecuación 2-31

Cs: Coeficiente de asimetría

Csc: Coeficiente de asimetría corregido

ap, bp y cp: Parámetros de la función de densidad de la distribución Pearson III

n: Tamaño de la muestra

La función de densidad de la distribución Gumbel Tipo I está dada por la ecuación Ecuación 2-38

$$f(x) = \frac{1}{b} e^{(-\frac{x-a}{b} - e^{-\frac{x-a}{b}})} \quad \text{Ecuación 2-38}$$

$$a = \bar{x} - 0.5772b \quad \text{Ecuación 2-39}$$

$$b = \frac{\sqrt{6}S}{\pi} \quad \text{Ecuación 2-40}$$

$$c = 2/SC_{sc} \quad \text{Ecuación 2-41}$$

Donde:

a, b y c: Parámetros de la ecuación de densidad de la distribución Gumbel tipo I

S: Desviación estándar

Csc: Coeficiente de asimetría corregido

La función de densidad de la distribución **log-Normal** está dada por la ecuación Ecuación 2-42

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{(y-\mu_y)^2}{2btp^2}}$$

Ecuación 2-42

Donde

$y=\ln(x)$

σ_y : Desviación estándar de la transformada “y” de la muestra

μ_y : Media de la transformada “y” de la muestra

La distribución de densidad de la función **log-Pearson III** está dada por la Ecuación 2-43.

$$f(x) = \frac{(|clp|(y - alp)^{btp-1} e^{-alp(y-alp)})}{\Gamma(btp)}$$

Ecuación 2-43

$$alp = \bar{y} - \frac{2S}{C_{sc}}$$

Ecuación 2-44

$$btp = \frac{4}{C_{sc}^2}$$

Ecuación 2-45

$$clp = \frac{2}{SC_{sc}}$$

Ecuación 2-46

$$C_s = m_3/m_2^{3/2}$$

Ecuación 2-47

$$C_{sc} = \frac{C_s \sqrt{n(n-1)}}{n-2}$$

Ecuación 2-48

Donde:

$$y=\log(x)$$

Cs: Coeficiente de asimetría de la transformación “y” de la muestra

Csc: Coeficiente de asimetría corregido de la transformación “y” de la muestra

alp, blp y clp: Parámetros de la función de densidad de la distribución log-Pearson III

n: Tamaño de la muestra

2.9 Hidrograma sintético de la SCS

Como menciona Campos, (2010)

“En el llamado método hidrometeorológico de estimación de crecientes, se transforma un hietograma de tormenta de diseño, que se genera para la cuenca, en un hidrograma de respuesta de ésta, mediante un modelo matemático que transforma la lluvia en escurrimiento. Este modelo de transferencia, en su forma más simple es el hidrograma unitario (H.U.), pero actualmente existen modelos de cuenca de eventos altamente sofisticados que requieren de calibración y validación antes de poder ser utilizados. “

Pero mientras que los hidrogramas unitarios aplican únicamente para la cuenca y el punto donde fueron medidos los caudales, los procedimientos de desarrollo de hidrogramas unitarios sintéticos permiten desarrollar hidrogramas unitarios para otros puntos en la corriente de la misma cuenca (Chow, 2000).

El **hidrograma unitario adimensional SCS**, es un H.U. sintético que puede ser estimado a partir del tiempo de ocurrencia del pico y el caudal pico (Chow, 2000), cuya relación puede apreciarse en la Ecuación 2-49

$$q_p = \frac{CAc}{T_p} \quad \text{Ecuación 2-49}$$

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p \quad \text{Ecuación 2-50}$$

$$t_p \cong 0.6T_c \quad \text{Ecuación 2-51}$$

$$tr = 0.133T_c$$

Ecuación 2-52

Donde:

qp: Caudal pico del hidrograma unitario expresado en m³/s

C: Constante adimensional de ajuste de unidades. 2.08 para el sistema internacional y 483.4 en el sistema inglés de unidades.

Ac: Área de la cuenca, en Km²

Tp: Tiempo de ocurrencia del caudal pico, en horas

tp: tiempo de retardo de escurrimiento, en horas

Tc: Tiempo de concentración de la cuenca, en horas

tr: Duración efectiva de la lluvia, en horas. La Ecuación 2-52 fue tomada de Methods y Rocky (2007) y mencionan que debe ser congruente con la tormenta de diseño y el hietograma de lluvia efectiva utilizados.

Una vez calculados los parámetros de forma, éstos son multiplicados por las coordenadas del hidrograma adimensional del SCS mostrado en la Figura 2-10 Diagrama adimensional de la SCS, adaptado por Chow, (2000) del Soil Conservation Service Engineering Handbook, 1972. tabulado en la Tabla 2-2.

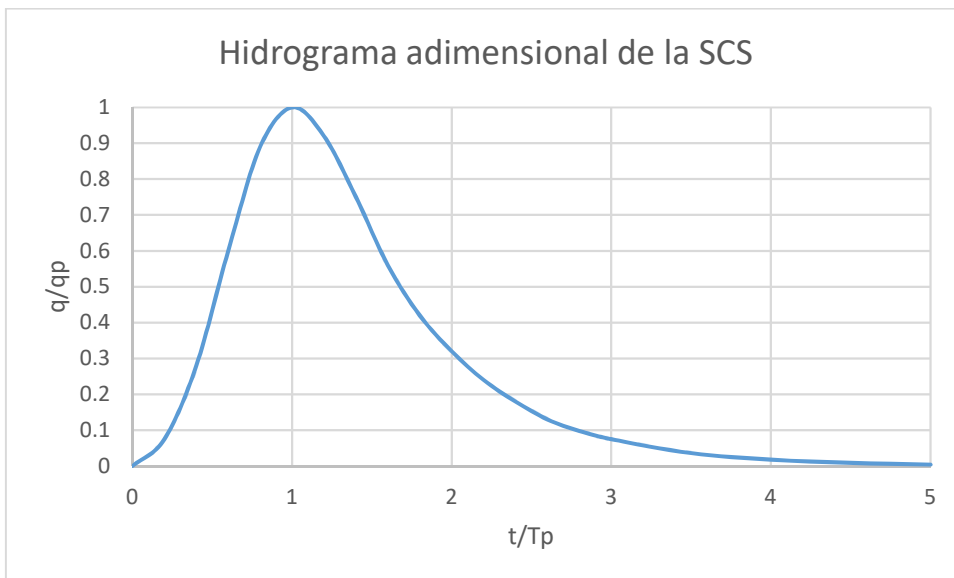


Figura 2-10 Diagrama adimensional de la SCS, adaptado por Chow, (2000) del Soil Conservation Service Engineering Handbook, 1972.

Tabla 2-2 Valores tabulados del diagrama adimensional de la SCS

| t/t_p | q/q_p |
|---------|---------|
| 0 | 0 |
| 0.2 | 0.075 |
| 0.4 | 0.28 |
| 0.6 | 0.6 |
| 0.8 | 0.89 |
| 1 | 1 |
| 1.2 | 0.92 |
| 1.4 | 0.75 |
| 1.6 | 0.56 |
| 1.8 | 0.42 |
| 2 | 0.32 |
| 2.2 | 0.24 |
| 2.4 | 0.18 |
| 2.6 | 0.13 |
| 2.8 | 0.098 |
| 3 | 0.075 |
| 3.5 | 0.036 |
| 4 | 0.018 |
| 4.5 | 0.009 |
| 5 | 0.004 |

Una vez que se ha obtenido el hidrograma unitario, para adaptarlo cualquier otro volumen, se multiplica el caudal pico unitario, qp (Ecuación 2-49) por la lámina correspondiente en centímetros.

3 Materiales y métodos

La presente investigación pretende determinar las situaciones en las que es apropiado utilizar secciones de modelo 1D y 2D, de forma que se obtenga un esquema combinado de simulación tan eficiente como se pueda (Ver Figura 3-1).

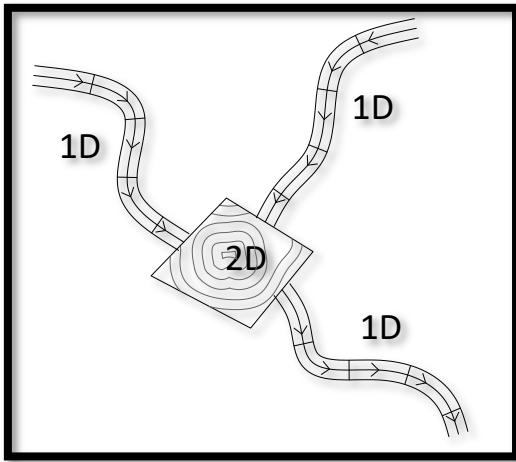


Figura 3-1 Esquema de modelo combinado 1D/2D

Para este fin, es necesario llevar a cabo un modelo de investigación que permita alcanzar los objetivos planteados (Ver Pág. 10). Es necesario entonces considerar dentro de tal metodología la investigación, los procesos de simulación y el desarrollo de herramientas informáticas necesarios para cumplir con éstos.

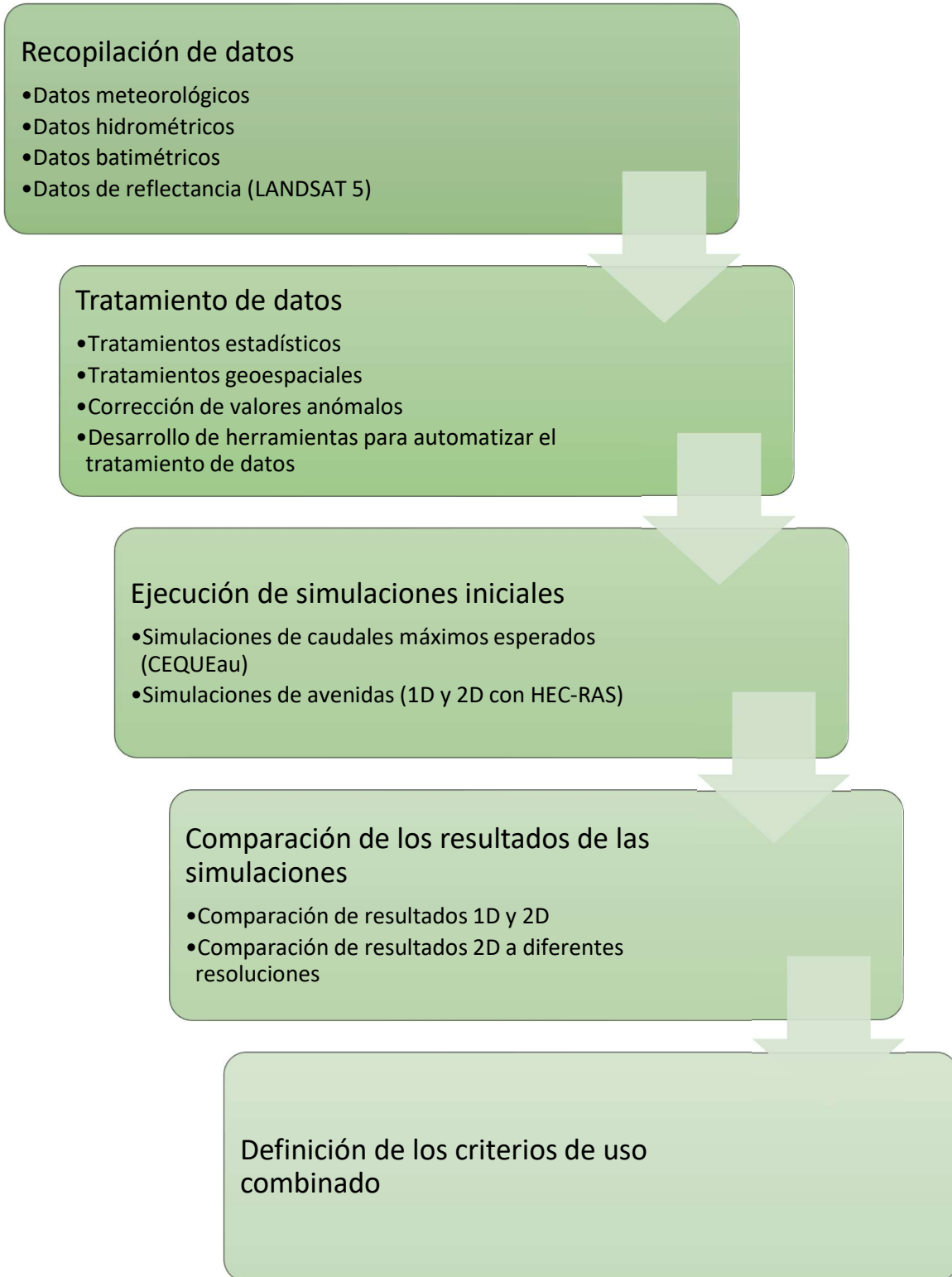


Figura 3-2 Metodología de investigación propuesta

3.1 Recopilación de datos

El primer paso de la investigación es el obtener datos correspondientes a la zona de estudio. De acuerdo a las actividades requeridas, se tiene un listado de datos requeridos y la fuente de estos datos, que se resumen en las Tablas 4 y 5.

Tabla 3-1 Datos requeridos por cada actividad de la investigación

| Actividad | Datos Requeridos |
|--|--|
| Delimitación de la cuenca de estudio | *Datos batimétricos de la zona de estudio |
| Simulación de caudales con CEQUEau | *Datos de caudales de estaciones hidrométricas *Datos hidrometeorológicos (precipitación, temperatura máxima y mínima) *Datos fisiográficos de la cuenca |
| Elaboración del lecho sintético del río | * Datos batimétricos de la zona * Datos de reflectancia de LANDSAT, banda 5 * Datos de uso de suelo de la zona * Registro de caudales de la estación hidrométrica correspondiente a la zona de estudio |
| Simulaciones hidrodinámicas 1D y 2D | * Datos batimétricos corregidos de la zona de estudio * Datos de uso de suelo de la zona de estudio * Datos estadísticos de los caudales de la estación hidrométrica correspondiente a la zona de estudio. |

Tabla 3-2 Fuente de obtención de datos requeridos

| Datos | Fuente |
|--|-------------------------|
| Datos batimétricos de la zona de estudio | INEGI |
| Datos de uso de suelo de la zona de estudio | CONABIO |
| Ubicaciones de las estaciones hidrométricas | CONABIO |
| Datos hidrométricos | BANDAS (CONAGUA) |
| Datos hidrometeorológicos | CLICOM |
| Datos de reflectancia térmica | EARTHEXPLORER (U.S.G.V) |

Los datos de **elevación de alta resolución** (LiDAR a cada 5 m) correspondientes a la zona de estudio, pueden ser obtenidos en la página de **INEGI**, en la sección de topografía.

Por su parte, las imágenes raster **de uso de suelo**, que serán utilizadas para indicar el coeficiente de fricción de Manning dentro de las simulaciones de flujo, pueden obtenerse de la página de **CONABIO** (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>).

La base de datos y el archivo vectorial con las **ubicaciones de las estaciones hidrométricas** fueron descargadas desde la página de **CONABIO** (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>).

Los **datos hidrométricos** para esta estación, pueden ser obtenidos de la página de **BANDAS** (ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas/Bases_Datos_Bandas).

Los datos **meteorológicos** para esta estación fueron descargados de la página de **CLICOM** (<http://clicom-mex.cicese.mx/>, en la pestaña descarga de datos).

Para la calibración del modelo, como se mencionó en la sección de antecedentes, es necesario el uso de las imágenes de la banda térmica 5 de LANDSAT. Estas imágenes es posible conseguirlas de la página **EARTEXPLORER** (www.earthexplorer.org).

3.2 Tratamiento de datos

Una vez obtenidos los datos necesarios para las actividades de la investigación (Ver Recopilación de datos, pág. 41), éstos serán sometidos a un proceso que garantice su calidad, que los ordene en el formato adecuado y que extraiga de éstos la información requerida para la investigación (Ver Herramientas Topotoolbox, Pag. 23, Método de elaboración de batimetría sintética de Corum, pág. 26 y Métodos estadísticos de evaluación de datos, Pag. 28).

3.2.1 Datos batimétricos

De acuerdo con lo que se aprecia en la Tabla 3-1 Datos requeridos por cada actividad de la investigación la primera actividad consiste en la delimitación de la cuenca de estudio, para lo que es necesaria la información batimétrica de la zona.

El tratamiento que recibirán los datos batimétricos obtenidos como se indica en la sección “**3.1 Recopilación de datos**”, consiste la remoción de datos que impidan el flujo hidráulico a través del DEM, que se consigue usando la herramienta TopoToolbox (2.5 Herramientas TopoToolbox, pág. 23), la delimitación de la cuenca y la extracción de los datos fisiográficos correspondientes de esta fueron conseguidos utilizando las herramientas Integrated Water Management.

Por otro lado, para generar el archivo DEM en un formato de datos fisiográficos que pueda utilizar CEQUEau, fue necesario el uso de las herramientas de Idrisi-CEQUEau.

Si bien es posible utilizar los datos batimétricos con correcciones relativamente pequeñas para su uso dentro de CEQUEau y la delimitación de la zona de estudio, para las simulaciones hidrodinámicas, es necesario además corregir el DEM generando un lecho sintético como se menciona en *Método de obtención de batimetría sintética propuesto por Corum*, Pág. 26.

Aunque para llevar a cabo este método, ha sido necesario primero pasar el DEM de datos batimétricos por un proceso de corrección de datos nulos, de forma que se cumpla con el requisito establecido por el método de Corum de establecer la superficie conocida del espejo de agua.

Dado que la superficie del espejo de agua es representada como valores nulos (Ver. Método de obtención de batimetría sintética propuesto por Corum, pág. 26), es necesario corregir el DEM de forma que los valores nulos representen el espejo de agua. En términos generales, el algoritmo de este proceso se resume en la Figura 3-3.

Como al mismo tiempo es un requisito y consecuencia de llevar a cabo el algoritmo descrito en la Figura 3-3, se crea un eje de río principal mediante el uso de las herramientas de TopoToolbox, que por su utilidad en otros procesos conservamos.

Una vez que la elevación de la superficie de agua inicial ha sido determinada, se sigue el algoritmo para la determinación del lecho sintético (Ver Figura 2-9 Algoritmo de Corum para obtener un lecho sintético).

3.2.2 Datos hidrometeorológicos

Los datos hidrometeorológicos, luego de ser obtenidos (Tabla 3-2) se someten a un análisis de calidad estadística, como se describe en *Métodos estadísticos para la evaluación de la calidad de los datos*, pág. 28.

Una vez que han sido evaluados y en su caso corregidos, los datos hidrometeorológicos (Temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación) son colocados en los formatos correspondientes para su análisis en CEQUEau.

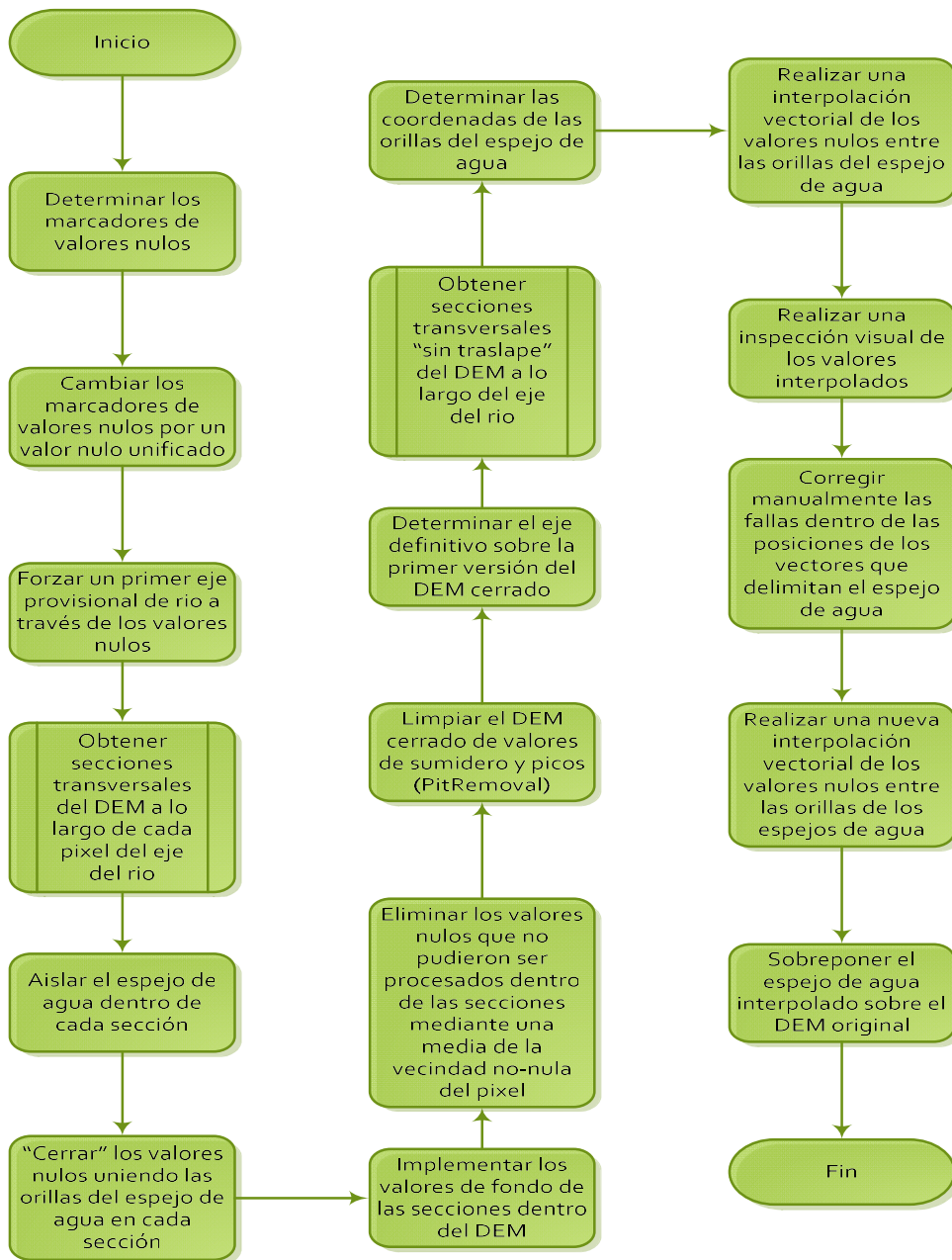


Figura 3-3 Algoritmo para cambiar los valores nulos del DEM por los correspondientes valores de la elevación de la superficie de agua al momento del levantamiento LiDAR

Desde la página de CLICOM (<http://clicom-mex.cicese.mx/>) la información de los datos hidrometeorológicos obtenidos para cada variable y estación vienen en un archivo separado con el formato que se muestra en la Figura 3-4. Mientras CEQUEau, para cada estación utiliza un solo

archivo para los datos hidrometeorológicos Temperatura máxima, Temperatura mínima y Precipitación, en el formato mostrado en la Figura 3-5.

| | Col. 1 | Col. 2 | Col. 3 | Col. 4 |
|--------|-----------------------|-----------------------|-------------|----------------|
| Fila 1 | Id: | valor_id | | |
| Fila 2 | Estación: | valor_nombre_est | | |
| Fila 3 | Posición: | valor_Norte | valor_Oeste | |
| Fila 4 | Variable | valor_Nombre_Variable | | |
| Fila 5 | Fecha Inicial: | valor_fecha_ini | | |
| Fila 6 | Fecha Final: | valor_fecha_final | | |
| Fila 7 | No Dato: | valor_NaN | | |
| Fila 8 | Mes | Día | Año | Datos |
| Fila 9 | dato_mes | dato_dia | dato_año | valor_variable |
| . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . |

Figura 3-4 Formato de la información obtenida desde CLICOM

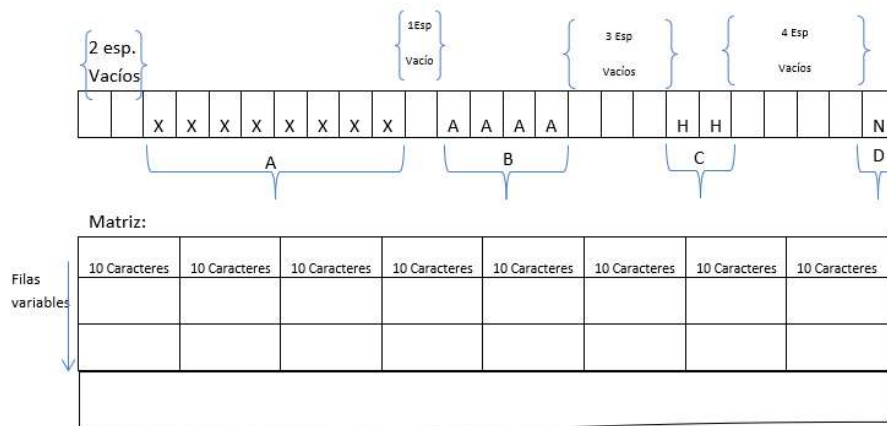


Figura 3-5 Formato de los archivos de datos hidrometeorológicos de CEQUEau

A: Nombre de la estación hidrométrica de donde se tomaron los datos

B: Año en que fueron tomados los datos

C: Intervalo en horas en las que se tomaron los datos. Determina el número de datos que tendrá la matriz. Acepta valores de 1, 2, 4, 6, 8, 12 y 24, donde 1 corresponde a valores de caudales horarios y 24 corresponde a valores de caudales diarios. Siempre se consideran 366 días por año.

D: Existencia de nieve en los datos meteorológicos. 0 para existencia y 1 para no existencia de nieve

Para obtener éstos archivos, se elaboró una herramienta que pide la dirección de una carpeta que contenga tres subcarpetas de nombres Pres, Tmax y Tmin (Ver Figura 3-6) que contengan los datos obtenidos desde CLICOM, y relacionados entre ellos con el nombre de la estación al que pertenecen (P.Ej. éstos tres datos obtenidos para la estación 7005, deben tener en cada carpeta, un nombre que inicie por 7005). Entonces los datos son entrelazados en un mismo archivo con formato de CEQUEau mediante el algoritmo mostrado en la Figura 3-7.

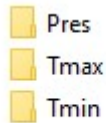


Figura 3-6 Carpetas con los datos obtenidos de CLICOM

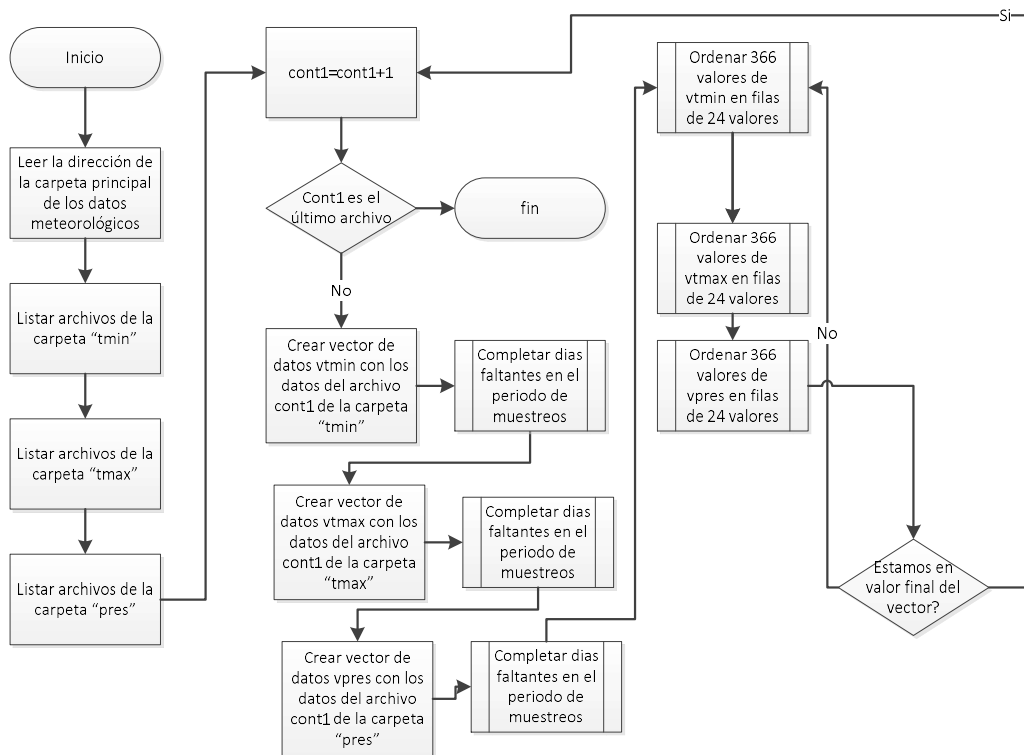


Figura 3-7 Algoritmo para transformar datos en formato CLICOM a formato CEQUEau

3.2.3 Datos hidrométricos

Los datos hidrométricos, luego de ser obtenidos (Tabla 3-2) se someten a un análisis de calidad estadística, como se describe en *Métodos estadísticos para la evaluación de la calidad de los datos*, pág. 28.

Por otro lado, los archivos en CEQUEau que contienen la información hidrométrica, tienen el mismo formato que se muestra en Figura 3-5, excepto que todos los datos de la matriz corresponden a los datos hidrométricos diarios, mientras que los datos hidrométricos diarios obtenidos de BANDAS tienen el formato mostrado en la Figura 3-8. Para colocar los datos de BANDAS en el formato de CEQUEau, se sigue el algoritmo mostrado en la figura

| Col. 1 | Col. 2 | Col.3 | Col.4 | ----- | Col. 33 |
|-----------|-----------|-------------------|-------------------|-------|--------------------|
| valor_año | Valor_mes | valor_caudal_dia1 | valor_caudal_dia2 | ----- | valor_caudal_dia31 |
| . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . |
| . | . | . | . | . | . |

Figura 3-8 Formato datos de caudales diarios obtenidos de BANDAS

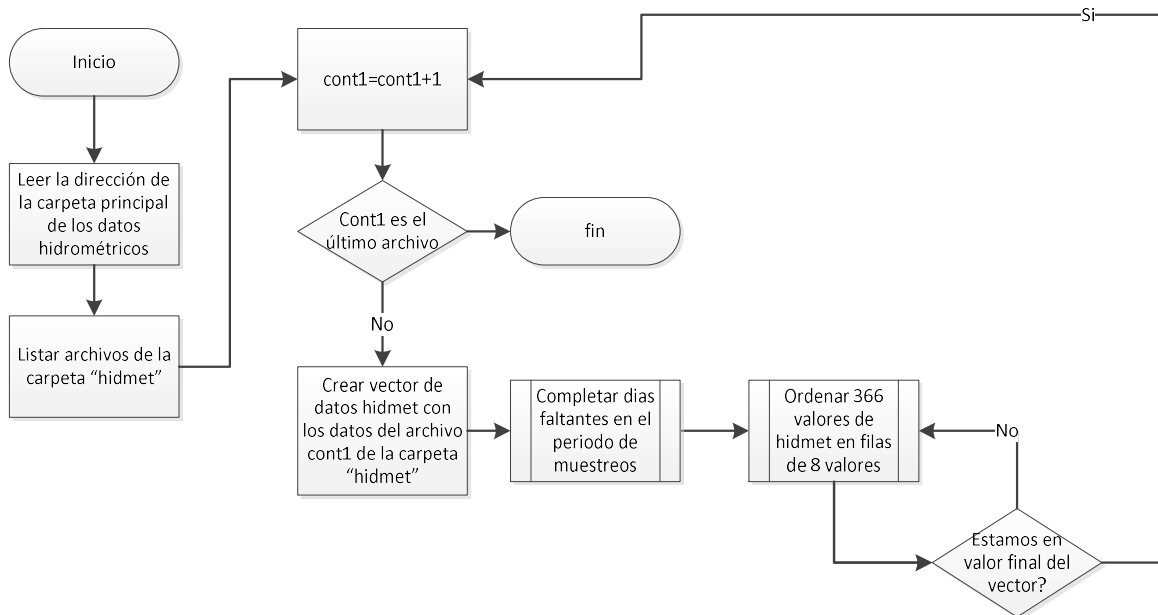


Figura 3-9 Algoritmo para cambiar los datos de formato BANDAS a formato CEQUEau

Además, para el análisis hidrométrico de avenidas, los datos hidrométricos máximos anuales son sometidos a un ajuste estadístico como se describe en *Análisis Estadístico de Datos*, pág. 32 para obtener los caudales picos esperados de acuerdo con un periodo de retorno.

3.2.4 Datos de uso de suelo

Los datos de uso de suelo (Ver 3.1 Recopilación de datos) son empleados tres procesos importantes dentro de la investigación.

1. En la creación del archivo de datos fisiográficos para usarse en CEQUEau (Ver 2.3 Modelo CEQUEau).
2. En la determinación del coeficiente de fricción de Manning para cada punto de las secciones transversales que se usarán en la simulación de avenidas en 1D usando HEC-RAS.
3. En la determinación del coeficiente de fricción de Manning sobre la zona de estudio, que podrán ser accedidos desde cada celda de la malla generada.

Los datos de uso de suelo obtenidos de CONABIO están en formato vectorial y abarcan toda la república mexicana, lo que hace necesario realizar una transformación de estos datos a formato ráster, recortar los datos a la zona de estudio y transformar los valores de las claves de uso de suelo a su correspondiente valores n de Manning. En general, el tratamiento que reciben los datos de uso de suelo para incorporarlos dentro de las diferentes simulaciones se describe en las Figuras 22, 23 y 24.

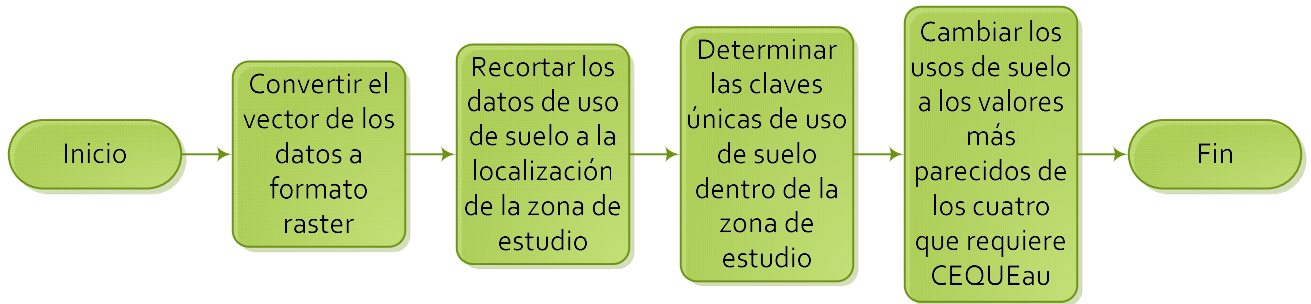


Figura 3-10 Algoritmo general para incorporar los datos de uso de suelo a la simulación de caudales de CEQUEau

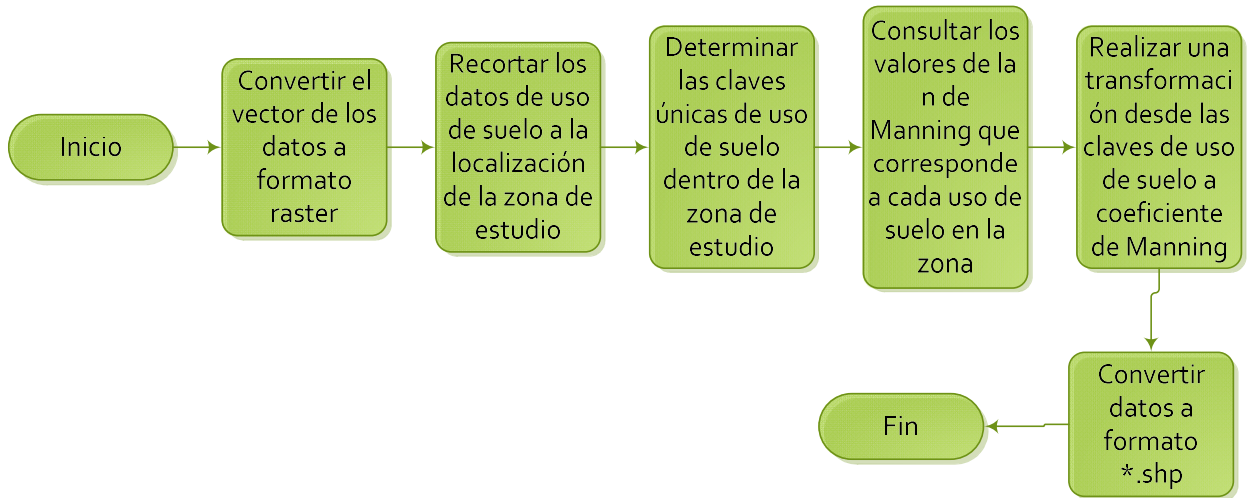


Figura 3-11 Algoritmo general para preparar los datos de uso de suelo para su incorporación al modelo de simulación de avenidas 2D de HEC-RAS

Como se ha mencionado en 2.1 *Modelo y software HEC-RAS (V. 5.x)*, mientras que para un modelo puramente 1D es posible realizar una simulación de flujo estable, donde el tiempo no es una variable y que permite conocer una llanura de inundación correspondiente a un caudal único (usualmente, el caudal pico de un evento de avenida, pues se corresponde con la llanura de inundación más desfavorable).

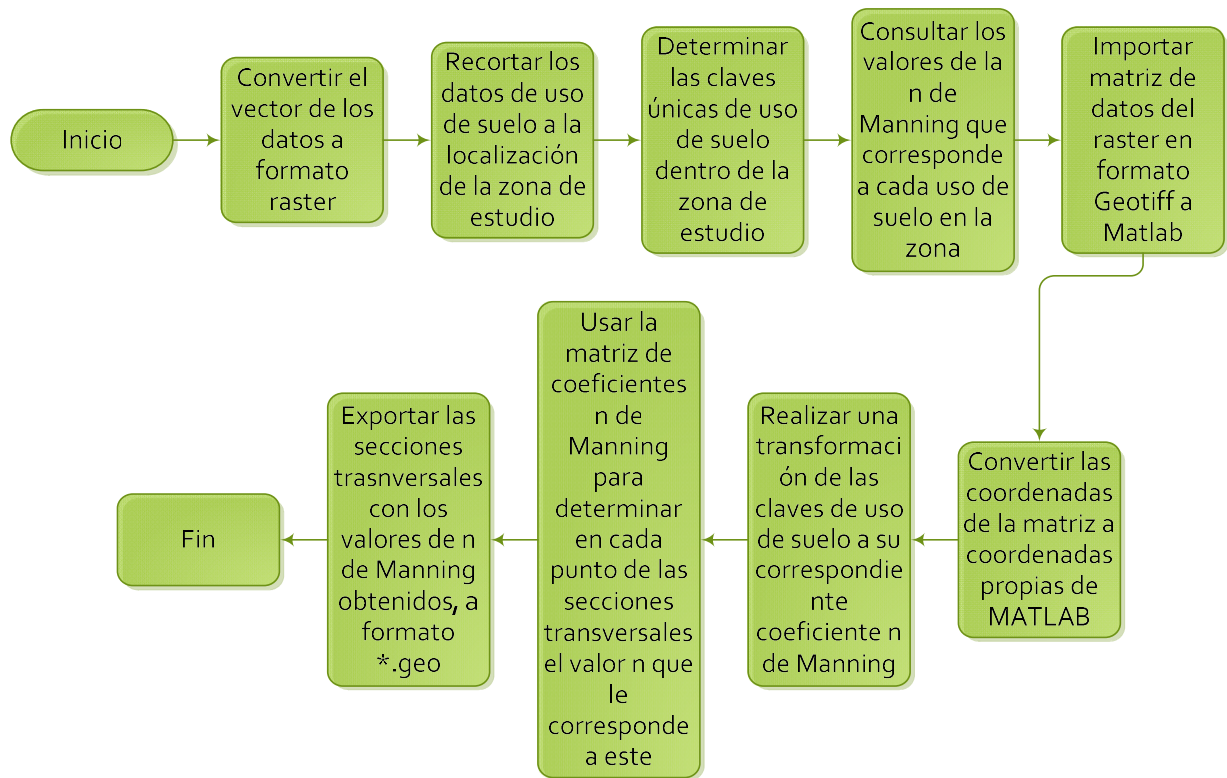


Figura 3-12 Algoritmo general para preparar los datos de uso de suelo para su incorporación al modelo de simulación 1D de HEC-RAS

3.3 Generación de hidrogramas sintéticos por el método de la SCS distribuidos a lo largo del eje del río principal

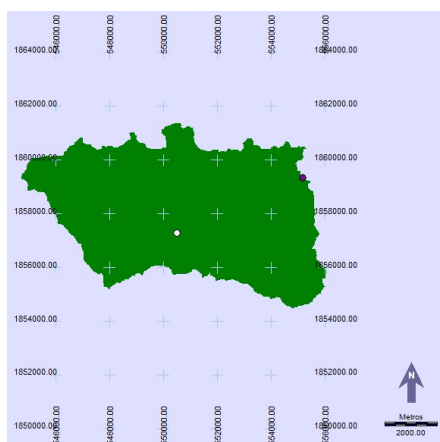
Sin embargo, tanto los modelos de simulación 2D, como en las simulaciones combinadas 1D/2D, es forzoso que sean simulaciones de flujo no estable, es por esto por lo que no basta con conocer el caudal pico del evento, sino que es necesario conocer el hidrograma correspondiente.

Los puntos donde se elaborarán hidrogramas sintéticos se distribuyen a lo largo del eje del río en las mismas posiciones que las estaciones ficticias que se simulan en CEQUEau (Ver **3.4.1 Simulación de caudales medios usando CEQUEau**).

El procedimiento que se utiliza para la elaboración de estos hidrogramas es el siguiente

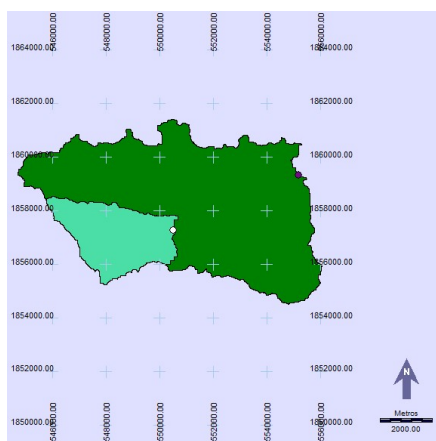
1. Se simulan los caudales medios en una serie de estaciones ficticias a lo largo del eje del río (Ver 3.4.1 Simulación de caudales medios usando CEQUEau).
2. De acuerdo con el estudio estadístico realizado sobre los datos hidrométricos (Ver 2.8.2 Análisis estadístico de los datos) se determinan los caudales para cada periodo de retorno.
3. Se buscan dentro de los resultados de las simulaciones de caudales medios realizadas con CEQUEau caudales totales (correspondientes a la estación hidrométrica en la desembocadura de la cuenca) similares al caudal de diseño para el periodo de retorno que se está utilizando.
4. Usando el registro de resultados obtenido en el punto anterior, determinar cuál es la distribución del gasto total (en porcentaje) que hay entre todas las estaciones ficticias.
5. Basados en los porcentajes del gasto total que corresponden a cada estación ficticia (como se enunció en el punto anterior), se divide el escurrimiento correspondiente al periodo de retorno entre los puntos que espacialmente corresponden a la ubicación de las estaciones ficticias utilizadas en CEQUEau. Se denominará en adelante estos puntos simplemente como *estaciones ficticias*, dado que sobre éstos se realizarán varios cálculos más.
6. Apoyados con las herramientas de Integrated Water Management (Ver 2.6 Herramientas Integrated Water Management), para cada estación ficticia se determina su área de aportación correspondiente (solo la propia de cada estación ficticia, no se usa el área de aportación acumulada hasta las estaciones ficticias, ver Figura 3-13) y los datos hidro-fisiográficos de éstas (área, tiempo de concentración, longitud del cauce principal, pendiente media, etc.).
7. Se realiza una simulación en HEC-RAS del gasto medio correspondiente al periodo de retorno utilizado, para determinar en cada sección del río principal (cada tramo entre dos estaciones ficticias) el tiempo de escurrimiento sobre este.
8. Con los datos obtenidos en los puntos 5, 6 y 7 de esta lista, se elaboran hidrogramas de acuerdo con lo establecido en **2.9 Hidrograma sintético de la SCS**.
9. Utilizando la desembocadura de la cuenca de estudio como marco de referencia de tiempo, se agrega a cada hidrograma obtenido en el punto anterior un tiempo de retraso, correspondiente a al tiempo de escurrimiento sobre el río principal desde la estación ficticia correspondiente, hasta la desembocadura de la cuenca de estudio (Ver Figura 3-14).

a) Área de aportación acumulada para la estación 2



- Estación 1
- Estación 2
- Área de aportación de estación 1
- Área de aportación de estación 2

b) Áreas de aportación de estaciones 1 y 2



c) Área de aportación exclusiva de la estación 2

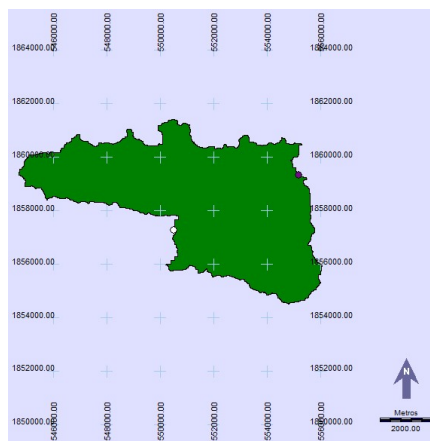


Figura 3-13 Ejemplo de proceso de obtención de área de aportación exclusiva para una estación ficticia particular (Ref. UTM-15N)

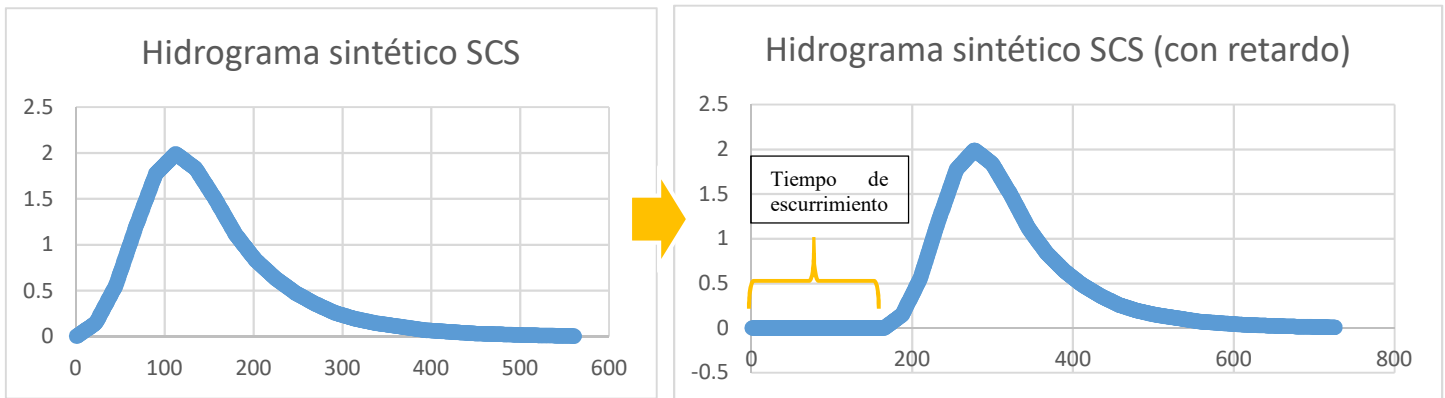
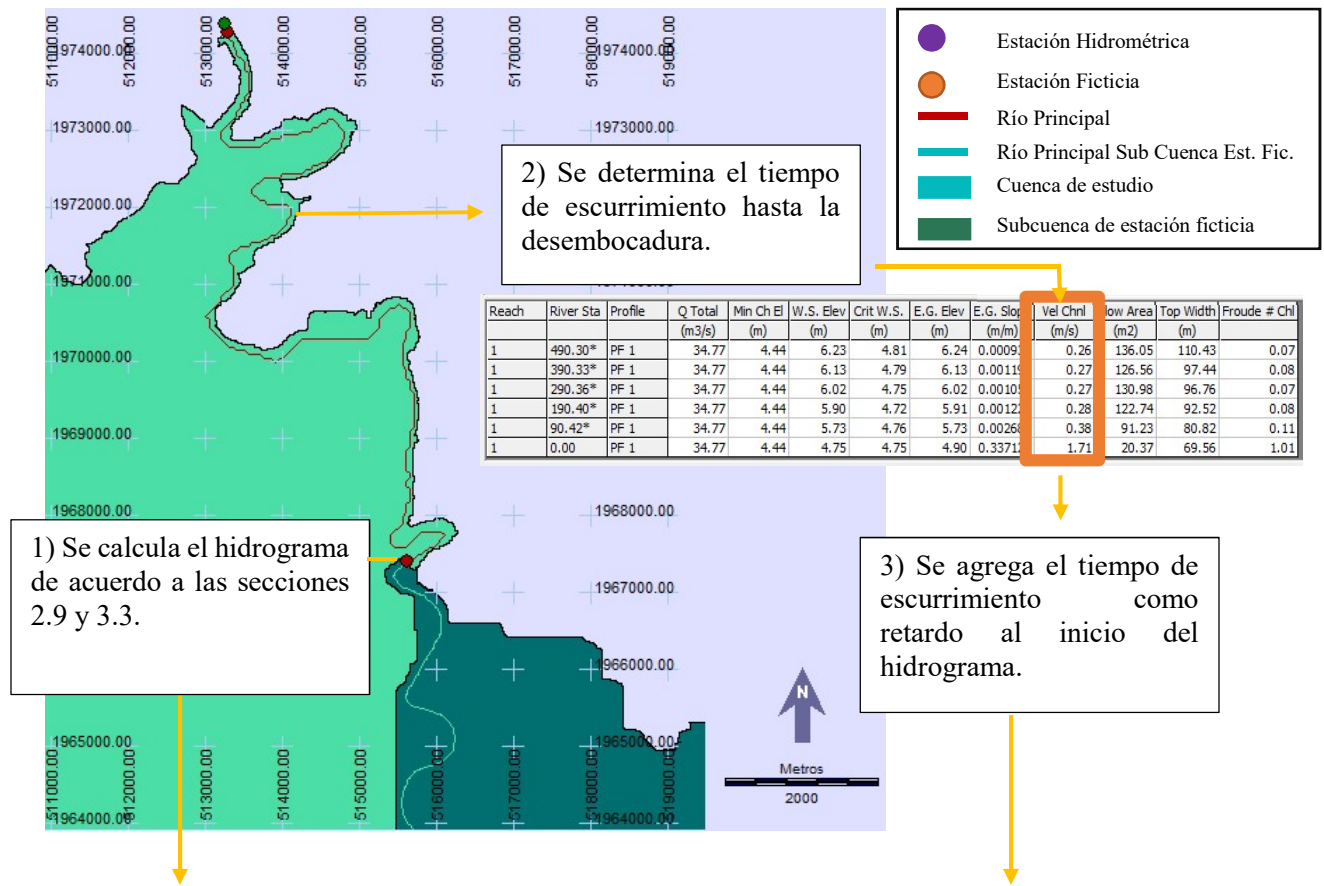


Figura 3-14 Esquema de cálculo de hidrogramas sintéticos por método de la SCS con referencia de tiempo en la desembocadura

3.4 Simulaciones iniciales

3.4.1 Simulación de caudales medios usando CEQUEau

De acuerdo con lo establecido en 3.2 *Tratamiento de datos*, una vez que la información ha sido revisada, corregida y convertida al formato adecuado, es posible hacer que el programa CEQUEau opere y nos permita realizar simulaciones sobre los caudales máximos.

Ya que CEQUEau tiene la capacidad de simular estaciones ficticias en cualquiera de los cuadros en que se ha discretizado el terreno (Morin y Paquet., 2007), se hace un contraste entre las direcciones generadas por IDIRIS-CEQUEau y el eje del río principal (ambos obtenidos como se describe en 3.2.1 *Datos batimétricos*), para determinar en qué cuadros de la discretización es factible colocar una estación ficticia.

Los resultados obtenidos de estas simulaciones servirán más adelante para determinar la distribución del gasto pico a lo largo del cauce principal, utilizando los porcentajes de gasto que en cada estación corresponden para situaciones similares de escurrimiento.

3.4.2 Simulación hidrodinámica de avenidas en 1D usando HEC-RAS

Las simulaciones iniciales en 1D utilizando HEC-RAS tienen por prerequisites los siguientes:

1. Haber obtenido una batimetría sintética que tenga un funcionamiento hidráulico equivalente al original (2.7 Método de obtención de batimetría sintética propuesto por Corum)
2. Haber realizado un ajuste estadístico de los caudales máximos, que serán los que se transitarán en la simulación 1D
3. Haber obtenido una simulación de caudales máximos en estaciones ficticias en CEQUEau, para determinar el comportamiento de la cuenca en cuanto a la distribución del caudal a lo largo de cauce principal.

Una vez que se tiene esta información, se procede conforme al algoritmo presentado en la Figura 3-15

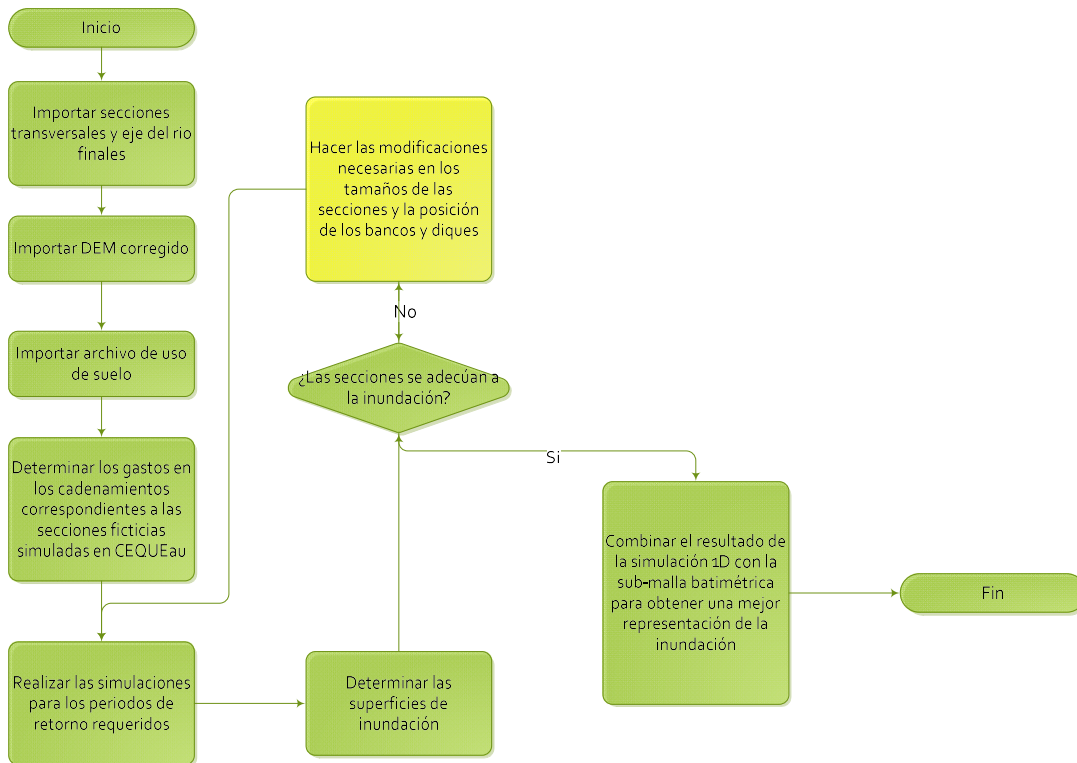


Figura 3-15 Algoritmo para realizar las simulaciones hidrodinámicas iniciales de avenidas en 1D

En la parte del proceso remarcada en la Figura 3-15, se menciona la modificación de tamaños, posición de puntos de banco y puntos de dique. En cuanto a esto debemos mencionar que en el modelo HEC-RAS (1D) existe una limitación de señalar solo un par de puntos para señalar los bancos y un par de puntos para señalar los diques (izquierda y derecha, en cada caso).

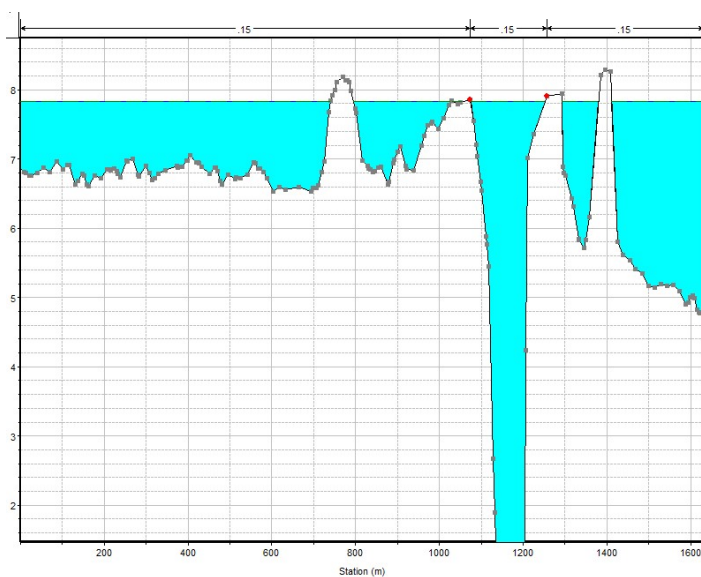


Figura 3-16 Inundación en sección con canales adyacentes sin puntos de dique señalados

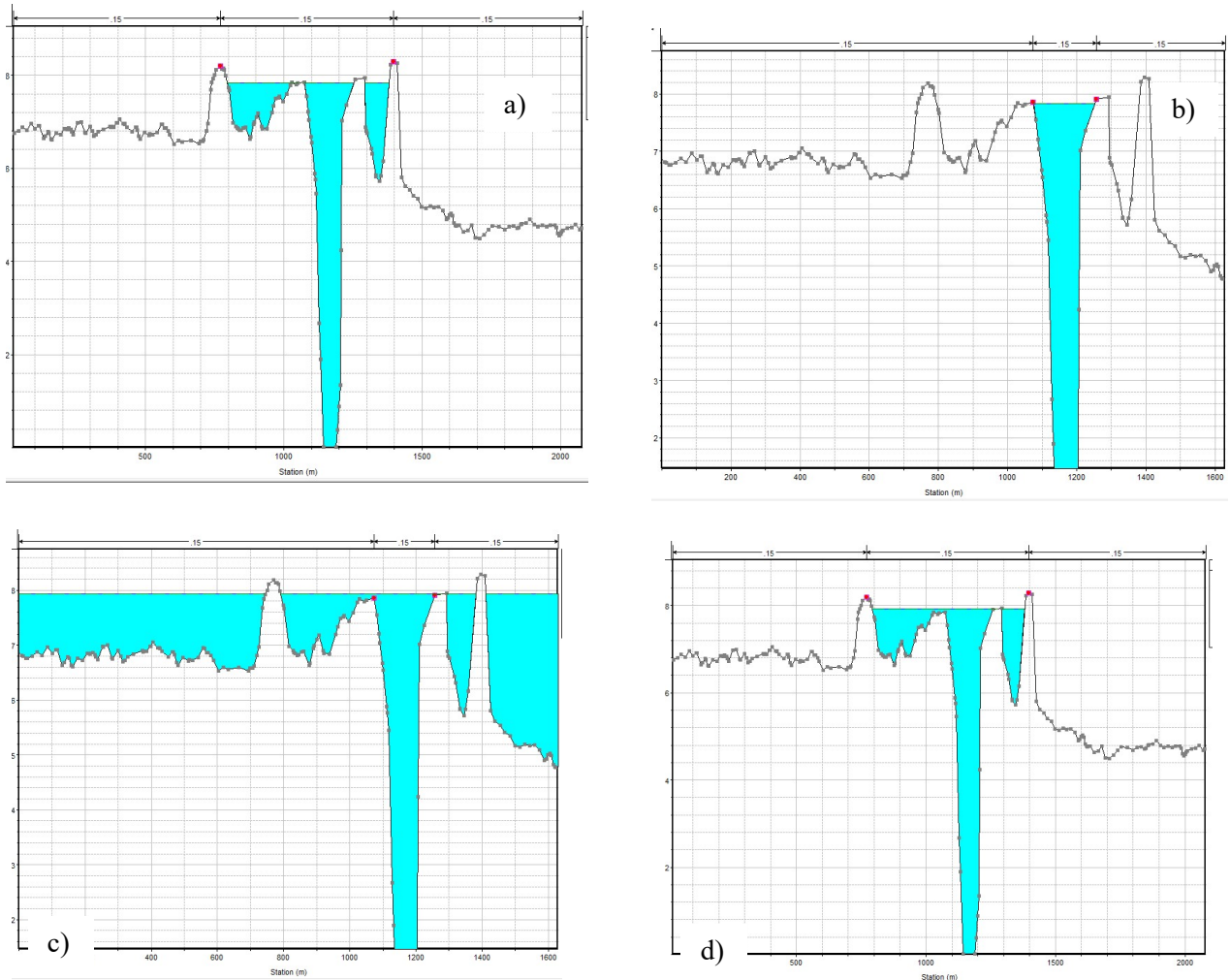


Figura 3-17 a) Diques mal colocados (por incluir los canales adyacentes) b) Diques bien colocados (por aislar el canal principal de los adyacentes) c) Diques mal colocados (por no considerar los canales adyacentes en situación de inundación) d) Diques bien colocado (por considerar los canales adyacentes en situación de inundación)

Cuando existen canales adyacentes al canal principal (ya sean naturales, artificiales, u estructuras como carreteras que debido a la resolución del DEM utilizado (Tamaño de pixel de 15 m, Ver **3.1 Recopilación de datos**) se ven reflejadas en la batimetría), es necesario señalar el canal principal por medio de puntos de bancos y de ser necesarios, puntos de dique. Esto se debe a que, si no son colocados, el software de HEC-RAS asignará flujo a todas las zonas de la sección que estén por debajo de la elevación de la superficie de agua (Ver Figura 3-16).

Los puntos de dique señalan coordenadas dentro de la sección, que indican que HEC-RAS no deberá distribuir flujo al resto de la sección mientras que la elevación de la superficie de agua no sobrepase la elevación de esos puntos.

Sin embargo, cuando hay varios canales inundados, es necesario delimitar con estos puntos el conjunto de canales que pueden ser afectados por la inundación. Así que, en tales zonas, puede ser necesario cambiar la ubicación de estos puntos para que las zonas inundadas sean representativas.

Como se aprecia en la Figura 3-17, para una misma sección, la posición adecuada de los puntos de dique puede variar con un cambio relativamente pequeño en el tirante.

La información de entrada de caudales al sistema se hace por medio de los hidrogramas sintéticos de la SCS (Ver 2.9 Hidrograma sintético de la SCS), ya sea con los caudales pico para el análisis 1D de flujo estable, o bien el hidrograma completo distribuido a lo largo del eje (Ver 3.3 Generación de hidrogramas sintéticos por el método de la SCS distribuidos a lo largo del eje del río principal) para el flujo no estable en 1D. Cada uno de estos datos es aplicado a las secciones transversales que le corresponde.

Todas las secciones transversales del proyecto son candidatas para recibir datos, sin embargo, la primera y la última sección son las únicas que los requieren obligatoriamente. En general, los elementos de entrada de datos y los datos que pueden y/o deben contener se resumen en la Tabla 3-3.

Finalmente, antes de realizar la simulación es importante determinar los parámetros que serán utilizados para la simulación (Ver Tabla 3-4).

3.4.3 *Simulaciones hidrodinámicas de avenidas en 2D usando HEC-RAS*

Como se puede apreciar en el algoritmo general que utiliza HEC-RAS para llevar a cabo las simulaciones de avenidas en 2D (Ver Figura 2-5) para determinar el sentido del flujo de una celda a otra, el programa calcula la continuidad de momento y de volumen en *todos* los elementos de cálculo (celdas).

Esto ocasiona que, si se proyecta una malla demasiado amplia sobre el área de estudio, es probable que se eleve innecesariamente la cantidad de operaciones matemáticas para cada paso de tiempo, pues aún si las celdas no llegan a contener volumen de agua (Ver Figura 3-18), de cualquier forma tienen que ser evaluados en ese paso del algoritmo.

Tabla 3-3 Elementos de entrada de datos al sistema 1D de simulación y datos requeridos por éstos

| Simulación | Elemento de Entrada | Datos de entrada |
|---------------------|--|--|
| Flujo estable 1D | Primera sección (Aguas arriba) | <p>Flujo inicial de escurrimiento (m³/s)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Elevación de superficie de agua conocida - Profundidad crítica - Pendiente línea de energía - Curva de aforo |
| | Última sección (Aguas abajo) | <ul style="list-style-type: none"> - Elevación de superficie de agua conocida - Profundidad crítica - Pendiente línea de energía - Curva de aforo |
| | Sección de cambio de flujo (opcional, Intermedio) | <p>Nuevo gasto que se empleará a partir de esta sección hasta una nueva sección de cambio de flujo o hasta el final del tramo del río (en dirección aguas abajo, m³/s)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Elevación de superficie de agua conocida - Profundidad crítica - Pendiente línea de energía - Curva de aforo |
| Flujo no estable 1D | Primera sección (Aguas arriba) | <ul style="list-style-type: none"> - Hidrograma de nivel de agua - Hidrograma de caudal - Hidrograma nivel/caudal |
| | Última sección (aguas abajo) | <ul style="list-style-type: none"> - Hidrograma de nivel de agua - Hidrograma de caudal - Hidrograma nivel/caudal - Curvas de aforo - Pendiente de la línea de energía |
| | Sección de condiciones de frontera internas (Intermedio) | <ul style="list-style-type: none"> - Hidrograma de entrada de flujo lateral - Hidrograma de entrada de flujo lateral distribuido - Hidrograma de elevación de flujo subterráneo - Hidrograma nivel/caudal de condiciones internas |

| | |
|--|---|
| | Entrada obligatoria |
| | Dato obligatorio si se señaló una entrada |
| | Obligatorio ingresar uno de los datos listados si se señala una entrada |

Tabla 3-4 Parámetros principales para los diferentes tipos de simulación

| Tipo de simulación | Parámetro | Opciones |
|----------------------------|------------------------------------|---|
| Flujo estable 1D | Régimen de flujo | -Subcrítico -Crítico -Combinado |
| | Intervalo de cómputo | - Se puede elegir entre 0.1 segundo a 1 día |
| Flujo no estable 1D | Periodo de simulación | - Fecha y hora de inicio de la simulación - Fecha y hora de fin de la simulación |
| | Pasos de calentamiento | 1 a 100,000 |
| | Máximo número de iteraciones | 0 a 40 |
| | Tolerancias | Elevación S.A.: 0 a 0.06 m Tol. Aborto: 0 a 30 m |
| | Régimen combinado | -Usar o no usar -Umbral para eliminar los términos de aceleración (0 a 1) -Reductor de número de Froude m (1 a 128) |
| | Número máximo de iteraciones 1D/2D | 0 a 20 (0 indica que no habrá iteraciones entre los modelos 1D y 2D) |
| Flujo no estable 2D | Intervalo de cómputo | - Se puede elegir entre 0.1 segundo a 1 día |
| | Periodo de simulación | - Fecha y hora de inicio de la simulación - Fecha y hora de fin de la simulación |
| | Pasos de calentamiento | 1 a 100,000 |
| | Iteraciones máximas | >1 |
| | Ecuaciones por emplear | -Onda de difusión -Momento completo |
| | Momento de condiciones iniciales | 0 a tiempo máximo que se tenga en los datos introducidos |



Figura 3-18 Ejemplo de malla 2D demasiado amplia respecto a la planicie de inundación esperada

Por otro lado, una malla demasiado pequeña podría no llegar a cubrir la totalidad de la inundación (Ver Figura 3-19).



Figura 3-19 Ejemplo de malla 2D demasiado pequeña respecto a la planicie de inundación esperada

Por esa razón, es deseable contar con una simulación de avenidas en 1D previa al establecimiento del área de terreno que será cubierta con una malla para la simulación 2D, para determinar las zonas en condición de inundación y la extensión de ésta (Ver Figura 3-20).

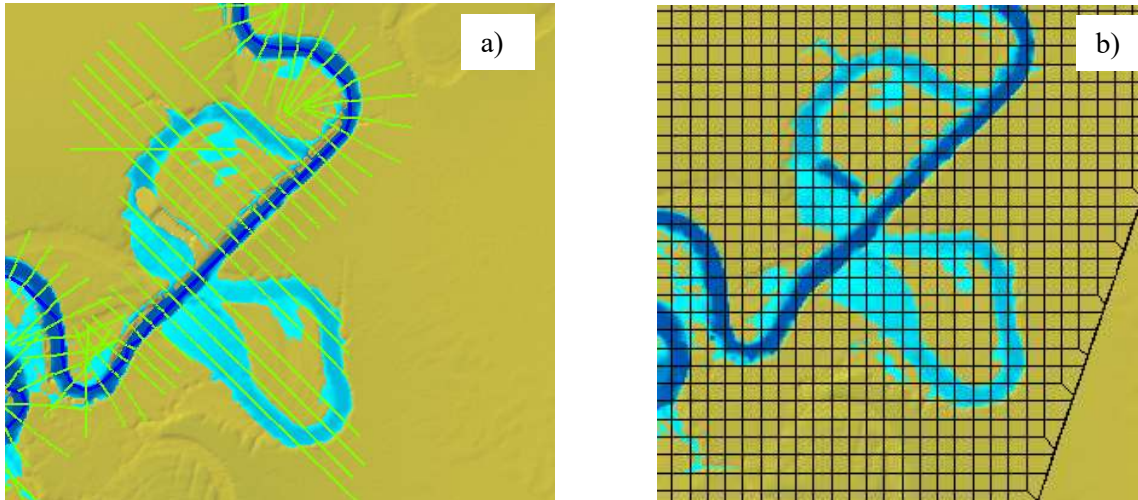


Figura 3-20 a) Ejemplo de planicie de inundación obtenida con una simulación 1D b) Ejemplo de planicie de inundación obtenida con una simulación 2D

Una vez que se ha elegido el contorno que debe llevar la malla (auxiliados por los resultados de las simulaciones 1D previas), el tamaño de celda y parámetros como el coeficiente de Manning, lo que prosigue es el ingreso de los datos de flujo dentro de la malla.

Los datos son introducidos a la malla por medio de líneas de Condiciones de Frontera (CF, Boundary Conditions Line) colocadas a lo largo de las celdas que deben ser afectadas (Ver Figura 3-21). Éstos datos corresponden a los hidrogramas sintéticos calculados por el método del diagrama adimensional de la SCS, que fueron obtenidos de acuerdo a lo discutido en **2.9 Hidrograma sintético de la SCS** y **3.3 Generación de hidrogramas sintéticos por el método de la SCS**



Figura 3-21 Líneas de CF colocadas en las celdas pertinentes de la malla

Finalmente, antes de realizar la simulación es importante determinar los parámetros que serán utilizados para la simulación (Ver Tabla 3-4).

3.5 Comparación de los resultados de las simulaciones

Una vez realizadas las simulaciones, la capa de resultados de tirante hidráulico en cada celda se exporta a formato geotiff. Como se mencionó en **2.4 Matlab**, los archivos en dicho formato pueden ser importados a manera de matrices dentro de Matlab.

Ya que éstas matrices representan las manchas de inundación, una comparación entre ellas es posible mediante el simple proceso de encontrar el valor absoluto de la resta de ambas matrices.

El archivo geotiff correspondiente a los tirantes de la mancha de inundación que se obtiene a partir de HEC-RAS marca los pixeles “secos” como valores nulos (NaN). Así que también es posible encontrar zonas que en una de las matrices de inundación contiene celdas mojadas que corresponden a celdas secas en la otra, señalando las partes de la matriz donde hay diferencia en el área que abarca la mancha de inundación.

4 Aplicación

4.1 Zona de estudio

Para la presente investigación, se utilizará el río La Sierra como caso de estudio, en la cuenca correspondiente a la estación hidrométrica “Pueblo Nuevo”, en el estado de Tabasco, mientras que la cuenca está distribuida entre los estados de Tabasco y Oaxaca (Ver

Figura 4-1)

Esta estación se encuentra en las coordenadas geográficas, Long. -92.879, Lat. 17.854, con número de identificación de estación hidrométrica a nivel nacional 30016.

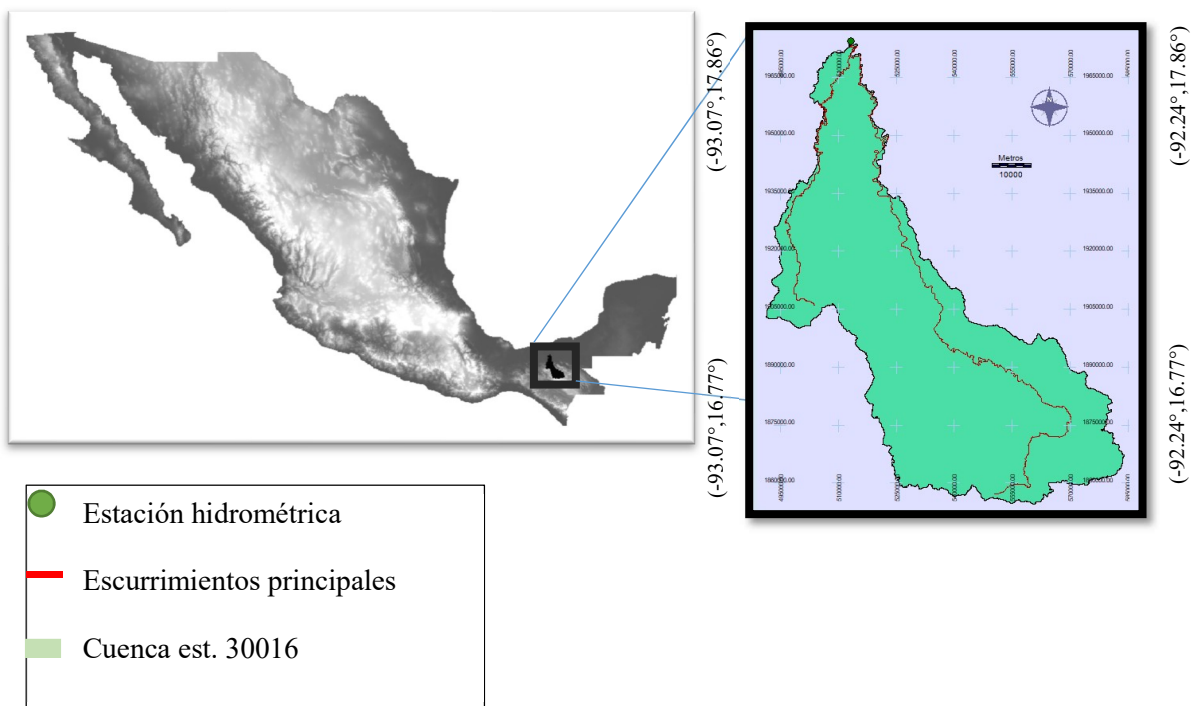


Figura 4-1 Ubicación de la zona de estudio

La cuenca del Río la Sierra está ubicada entre las longitudes -93.07° E y -92.24° E, y las latitudes 16.77° N y 17.86° N.

Las propiedades fisiográficas correspondientes a la cuenca en estudio fueron obtenidas con las herramientas “Integrated Water Management” (Ver 2.6 Herramientas Integrated Water Management) a partir de la información que se detalla en 3.2.1 Datos batimétricos y se resumen en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Parámetros fisiográficos de la cuenca de la estación Hidrométrica Pueblo Nuevo (30016)

| Parámetro | Valor |
|--|--------------------------|
| Tiempo de Concentración (Kirpich) | 28.18 hrs |
| Área | 4,366.13 km ² |
| Perímetro | 610 km |
| Pendiente media | 1.99% |
| Lon. Cauce Principal | 244.04 km |

En la zona de estudio se encuentran las comunidades de: Pueblo Nuevo de las raíces, La Agraria, La Huasteca, Hueso de Puerco, Nuevo Progreso, San Antonio, Puyacatengo, Payacatengo, El Perú, Ceibita, Morelia, Tacotalpa, Teapa, Las Nieves, Graciano Sánchez, Tapijulapa, Solosuchiapa, La Gloria, Francisco I. Madero, San Lorenzo, Amatlán, Oxolotán, Ixhuatan, Chapayal Grande, Tapilula, Rayón, Zacatonal de Juárez, Los Naranjos, Huitiupan, Simojovel, Carmen Zacatal, El Bosque, San Pedro Nishtalucum, Zizim, Pueblo Nuevo Sitalá, Esquipulas, Tzajalá, Sitalá, Guaquitepec, San Juan Cancuc, Larrainzar, Chalchihuitán, San Cayetano, Larrainzar, Tenejapa, Tenango, Pantheló, la mayor parte de éstas teniendo menos de 2 Km², y en general tienen distribuciones amplias entre unas y otra (Ver Figura 4-2).

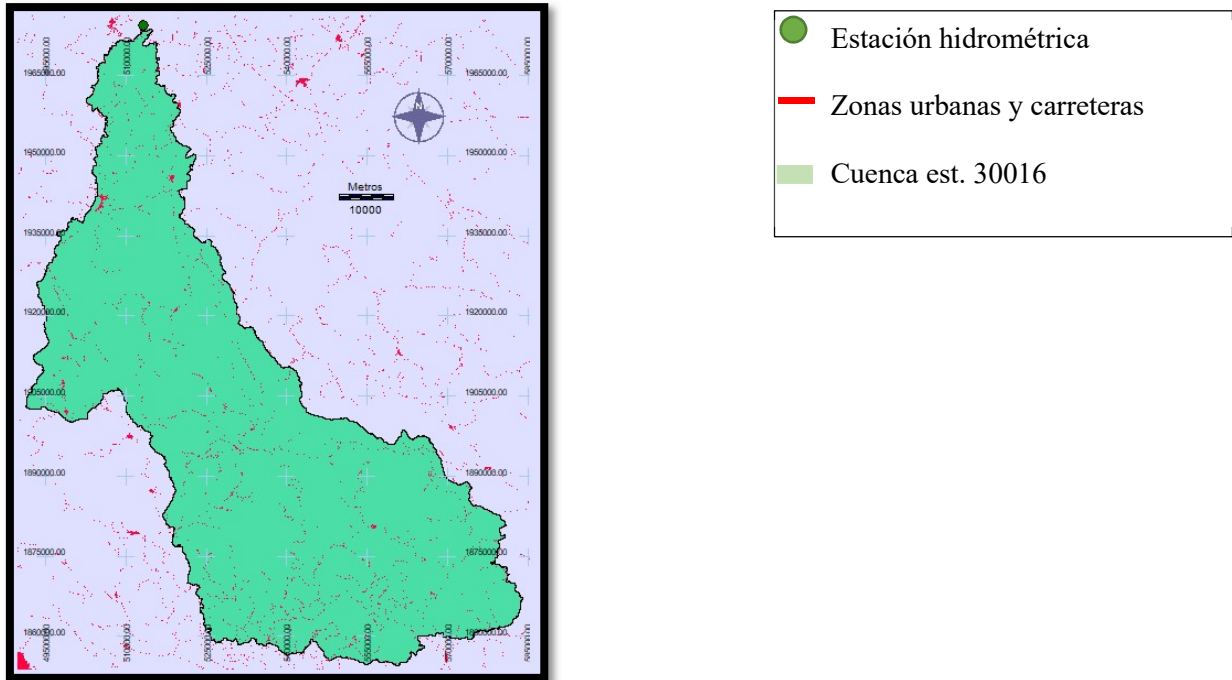


Figura 4-2 Zonas urbanas y carreteras en la zona de estudio

4.2 Recopilación y tratamiento de información

4.2.1 Información batimétrica

La información batimétrica, como se menciona en **3.2.1 Datos batimétricos**, se obtiene desde la página de INEGI.

En este proyecto se utilizan las cartas **E15D11, E15D21, E15D31, E15D41, E15D51, E15D12, E15D22, E15D32, E15D42 y E15D52** (cada una con su subdivisión A1-A4, B1-B4, C1-C4, D1-D4) con una resolución de 1:10,000 (Ver Figura 4-3). Se hace notar, sin embargo, para la zona de estudio, solo se cuenta con datos de alta resolución para las cartas **E15D11, E15D12, E15D21 y E15D22**. Para el resto de la zona de estudio, se cuenta con una resolución de pixel de 15 m (Ver Figura 4-4), que fue obtenida del **CEM** (Continuo de Elevación Mexicano) V.3.0 proveniente de la misma página de INEGI.

| | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | e15b61 | e15b62 | e15b63 | e15b64 | e15b65 |
| e15a79 | e15b71 | e15b72 | e15b73 | e15b74 | e15b75 |
| e15a89 | e15b81 | e15b82 | e15b83 | e15b84 | e15b85 |
| e15c19 | e15d11 | e15d12 | e15d13 | e15d14 | e15d15 |
| e15c29 | e15d21 | e15d22 | e15d23 | e15d24 | e15d25 |
| e15c39 | e15d31 | e15d32 | e15d33 | e15d34 | e15d35 |
| e15c49 | e15d41 | e15d42 | e15d43 | e15d44 | e15d45 |
| e15c59 | e15d51 | e15d52 | e15d53 | e15d54 | e15d55 |
| e15c69 | e15d61 | e15d62 | e15d63 | e15d64 | e15d65 |
| e15c79 | e15d71 | e15d72 | e15d73 | e15d74 | e15d75 |

Figura 4-3 Cuadrícula de correspondencia geográfica de las cartas topográficas disponibles en INEGI

Se decidió unir los datos disponibles, conservando la resolución de 15x15 m.

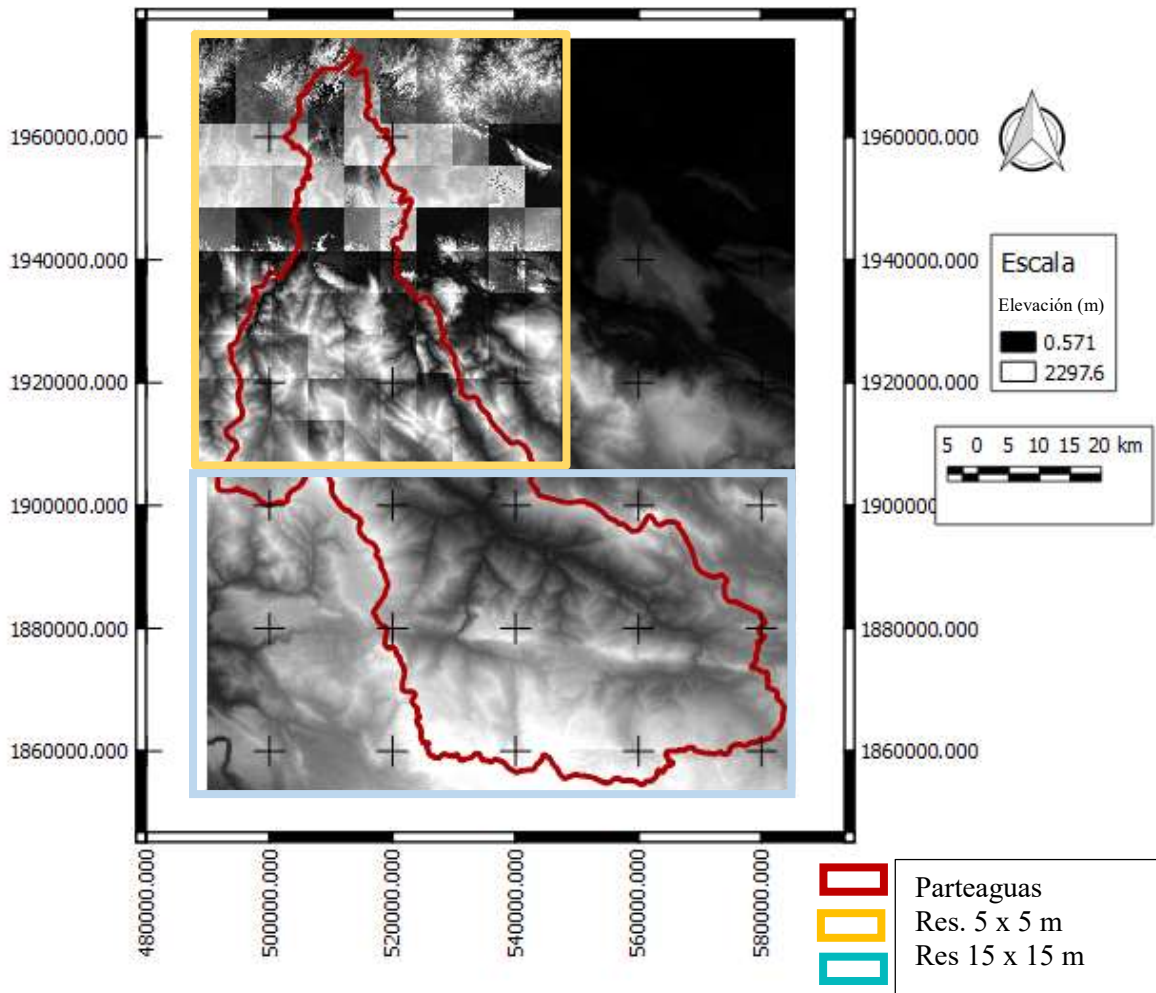


Figura 4-4 Resoluciones DEM disponibles

Por las limitaciones que tiene el método de levantamiento LiDAR, que se han mencionado en 2.7 *Método de obtención de batimetría sintética propuesto por Corum*, en los cuerpos de agua no hay retorno de datos batimétricos. Éstos valores son señalados con un marcador de valores nulos. Sin embargo, cada carta batimétrica unida para formar la totalidad del terreno de estudio tiene su propio marcador de valores nulos (regularmente un valor que no aparece dentro de la carta), cuyo valor puede ser un valor legítimo en otra de las cartas.

Es por esto que la delimitación de valores nulos se tiene que hacer carta por carta, para después unirse en una sola discontinuidad completa a lo largo del modelo de elevación completo usado en la zona (Ver Tabla 4-2 y Figura 4-5).

Tabla 4-2 Marcadores de valores anómalos, desde aguas abajo hasta aguas arriba de la zona de la cuenca

| Marcadores de valores anómalos |
|--------------------------------|
| -8 |
| 6 |
| 151 |
| 197 |
| 213 |
| 399 |
| 440 |
| 444-49 |
| 452 |
| 490 |
| 525 |

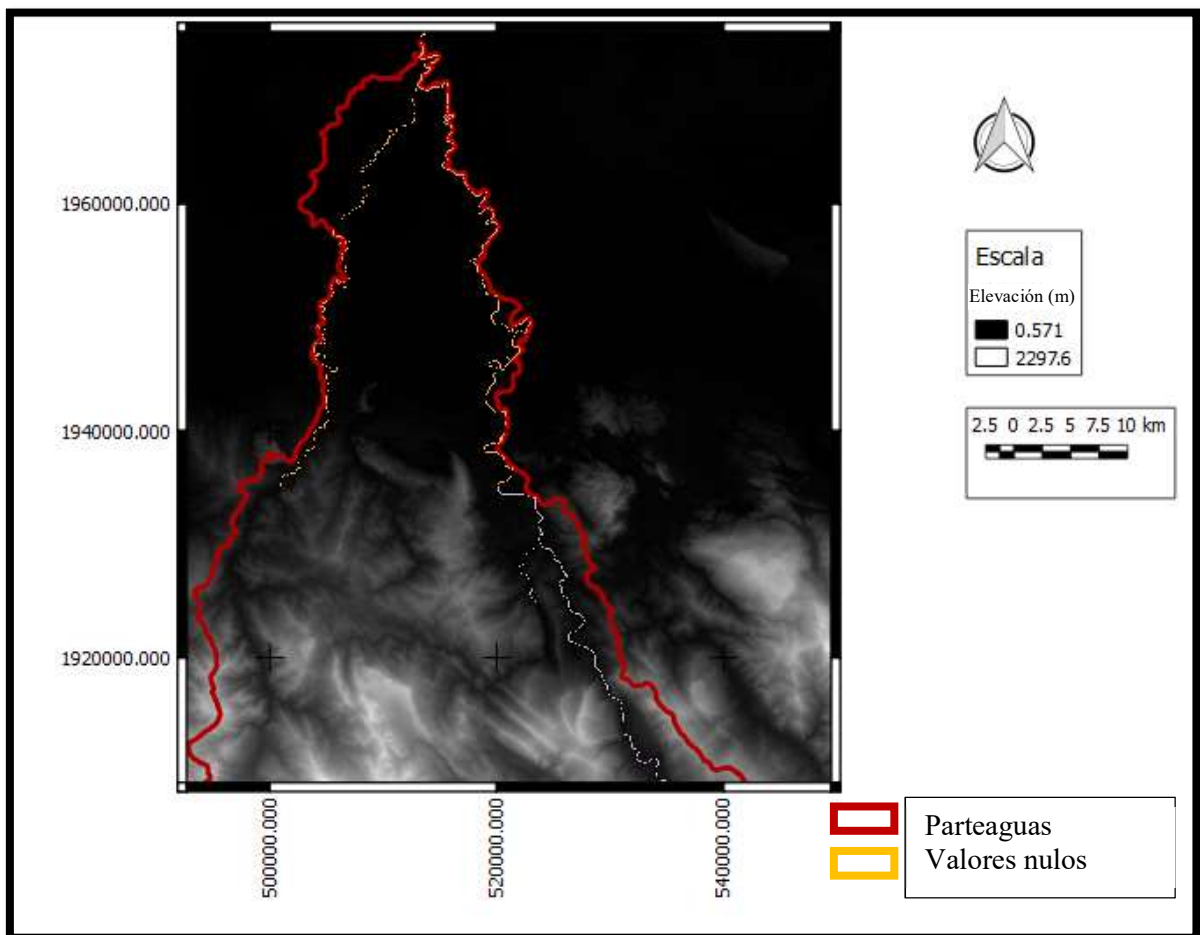


Figura 4-5 Acercamiento a los valores nulos correspondientes a los datos faltantes del levantamiento batimétrico

Una vez que han sido detectados los valores nulos de todas las cartas, se unifica el valor numérico para datos faltantes con el valor de **-10** (Puede realizarse tal operación desde algún SIG o matricialmente utilizando MATLAB. Por facilidad de uso, se utilizó IDRISI).

Tales valores nulos dentro de la batimetría son un faltante crítico dentro de las simulaciones debido representan justamente las áreas principales de simulación. Es por esto, que de acuerdo con el método de Corum (2.7 Método de obtención de batimetría sintética propuesto por Corum) se debe obtener un lecho sintético equivalente para poder realizar sobre éstas las simulaciones.

El primer paso de dicho método es conocer la elevación del espejo de agua. Para lograr esto se siguió el algoritmo descrito en la Figura 3-3.

Para “cerrar” el DEM, sustituyendo los valores nulos por las elevaciones del espejo de agua al momento del levantamiento, se inició importando los archivos Geotiff del DEM y de uso de suelo haciendo uso de la herramienta IMPTIF (Ver 6.1.1 IMPTIF) dentro de MATLAB.

Haciendo uso de las herramientas TopoToolBox obtenemos un eje del río principal temporal ya que en esta etapa del proceso de “cierre” del DEM solo necesitamos un eje continuo que esté dentro de los valores nulos. En el caso de estudio no fue necesario, pero podría forzarse al eje a pasar dentro de los valores nulos señalando los valores nulos como un número más negativo (hemos mencionado que se utiliza el valor de -10 para señalar los valores nulos, pero nada impide usar -9999 o cualquier otro valor mientras que sea lo suficientemente más bajo que la elevación del terreno).

En general, el proceso de obtención del eje del río se realiza mediante una función elaborada para tal propósito denominada CALRIO (Ver 6.1.2 CALRIO), que sigue el algoritmo descrito en la Figura 4-8.

La dirección de cada pixel del río, que se menciona en la Figura 4-8, se obtiene mediante una función elaborada para tal propósito denominada DIRECCION (Ver 6.1.12 DIRECCIÓN), que obtiene las coordenadas de uno de los pixeles del eje del río principal (Arreglo RÍO, variable RIOCAL, Ver Tabla 4-3) y del pixel siguiente y determina su dirección (Ver Figura 4-6).

| | | |
|---|----|---|
| 8 | 1 | 2 |
| 7 | PA | 3 |
| 6 | 5 | 4 |

Figura 4-6 Direcciones posibles del siguiente píxel del río principal a partir del píxel actual (PA)

Se procede entonces para cada píxel del eje principal del río a obtener una sección transversal, que tendrá un ángulo acorde a las direcciones obtenidas de los píxeles (Ver Figura 4-7) usando la función SECCIONAR (Ver 6.1.16 SECCIONAR). Procedemos a crear una matriz que contenga los datos de las secciones transversales obtenidas de cada píxel (Arreglo RÍO, variable SECRIO, Ver Tabla 4-3)

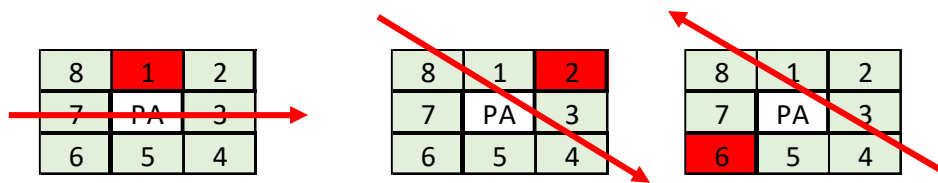


Figura 4-7 Dirección de seccionamiento según la dirección del píxel del eje principal del río

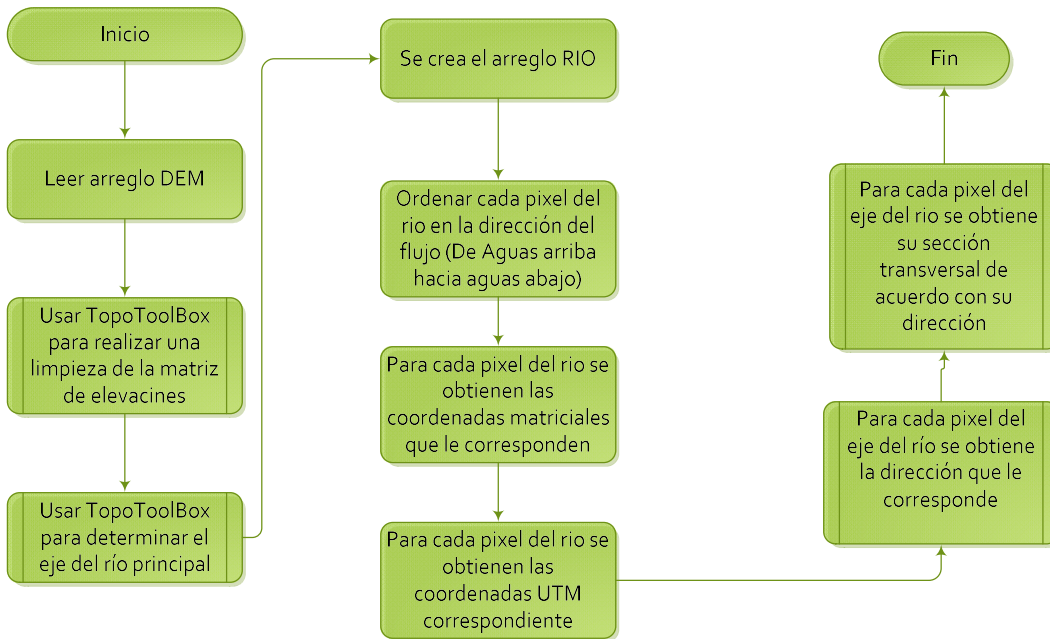


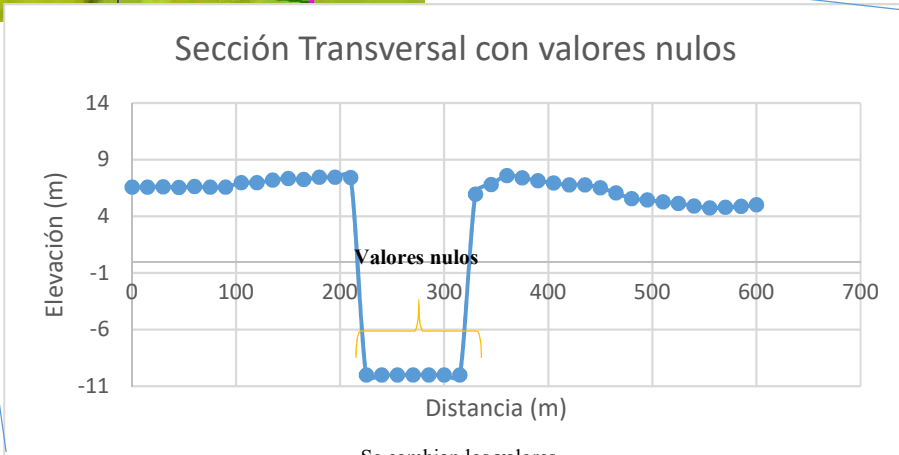
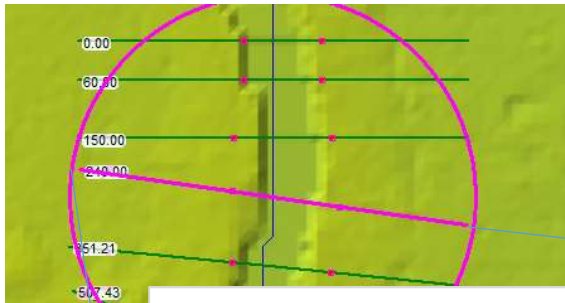
Figura 4-8 Algoritmo de extracción de datos de los píxeles del eje del río

Tabla 4-3 Variables usadas en el cómputo de la batimetría (Primer iteración)

| Variable o arreglo | Variables dentro del arreglo | Descripción |
|--------------------|------------------------------|---|
| DEM | MAT | Matriz con los valores numéricos de las elevaciones |

| | | |
|------------|--------------|---|
| | REF | Arreglo con las referencias geográficas del archivo Geo TIFF que se importó |
| | INFO | Arreglo con las características de la imagen Geotiff que se importó |
| | MATPR | Es la matriz MAT que ha sido sujeta a un proceso de limpieza de valores anómalos con la herramienta TopoToolBox. |
| | SECERRADO | Matriz de secciones transversales con el espejo de agua sustituyendo los valores nulos (Ver Figura 4-9) |
| | DEMCERRADO | La matriz de elevaciones con la primera iteración del espejo de agua implementado |
| | DEMCERRADOPR | La matriz DEMCERRADO que ha sido sujeta a un proceso de limpieza de valores anómalos con la herramienta TopoToolBox |
| RÍO | DFLUJO | Matriz de datos de dimensiones correspondientes a la matriz del DEM que contiene las unidades de flujo en los píxeles del río principal y 0 en los demás píxeles (Ver Figura 2-8) |
| | RIOPRIN | Matriz de datos de dimensiones correspondientes a la matriz del DEM que tiene valores de 1 en los píxeles del río principal y 0 en los demás píxeles |
| | RIOCAL | Matriz con número de filas igual al número de píxeles en el río principal, con datos de coordenadas, direcciones, y jerarquía de cada píxel |
| | SECRIO | Contiene los datos de las secciones transversales de cada píxel tomadas conforme a la dirección de éste. |

La primera iteración del espejo de agua se realiza uniendo los valores válidos que limitan los valores nulos de cada sección transversal. Ya que es posible que los valores en las orillas sean diferentes, se toma el menor de los dos (Ver Figura 4-9). Sin embargo, no se puede tomar los resultados de este proceso como el espejo definitivo, principalmente porque, aunque los resultados son buenos en tramos rectos, en los meandros debido a la curvatura existen píxeles que no pueden ser incluidos dentro de las secciones, lo que genera agujeros (Ver Figura 4-10).



Se cambian los valores
nulos por la menor de las
elevaciones de las orillas
del espejo de agua

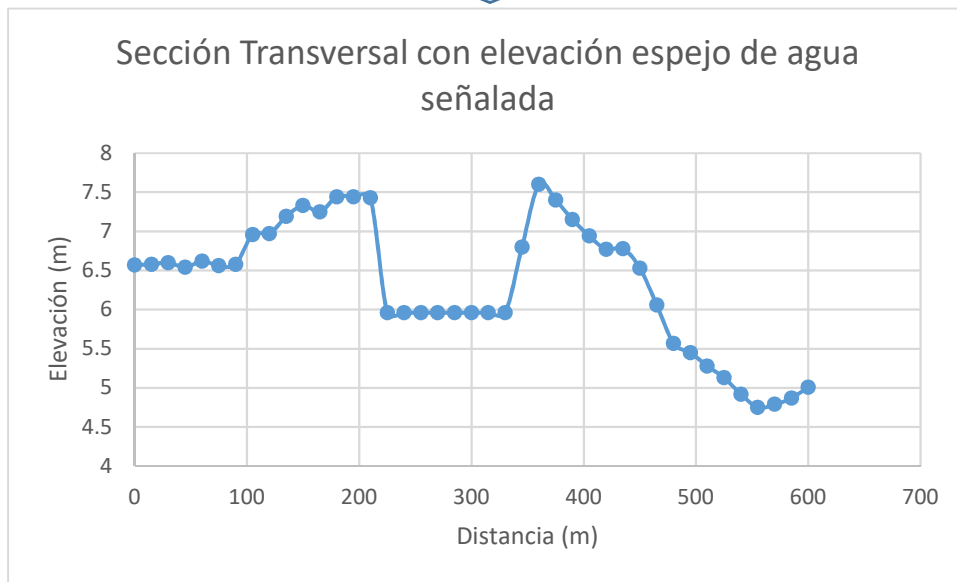
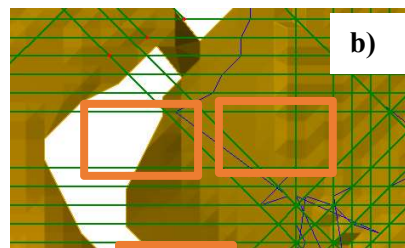
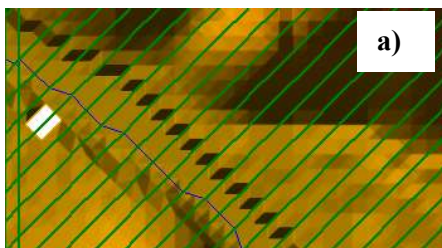


Figura 4-9 Método para cambiar los valores nulos por las elevaciones de los espejos de agua en las secciones transversales



Píxeles que no pueden ser procesados dentro de las secciones

Para completar los resultados de la primera iteración del espejo de agua, los valores nulos que aún queden dentro de la matriz son procesados como el promedio de los pixeles adyacentes no-nulos (Ver Figura 4-11). Si el elemento está rodeado de elementos nulos se ignora y se sigue con el siguiente. Se itera hasta que no haya más valores nulos en la matriz de elevaciones.

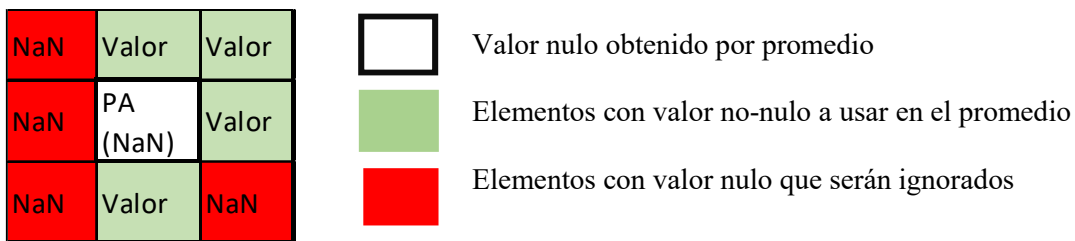


Figura 4-11 Tratamiento de los píxeles con valor nulo que no se procesaron dentro de las secciones

Puede apreciarse en la Figura 4-12, que mientras en los tramos más rectos del río y curvas suaves de los meandros los resultados son buenos, en los meandros más pronunciados comienzan a notarse los efectos del tratamiento descrito en la Figura 4-11 y se muestran discontinuidades en el fondo del río.

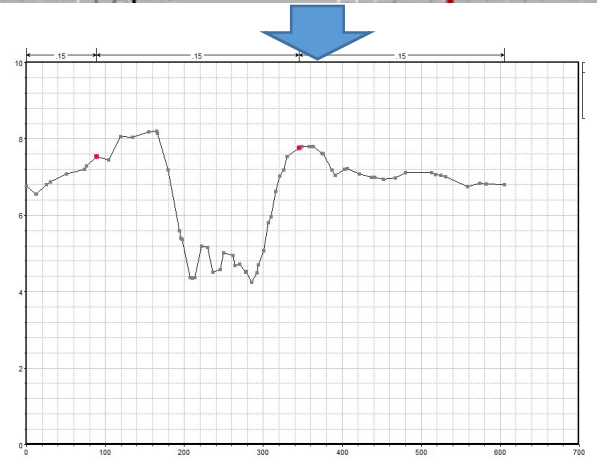
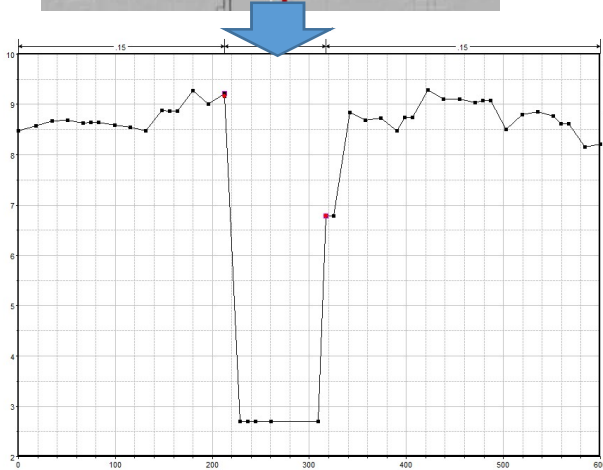
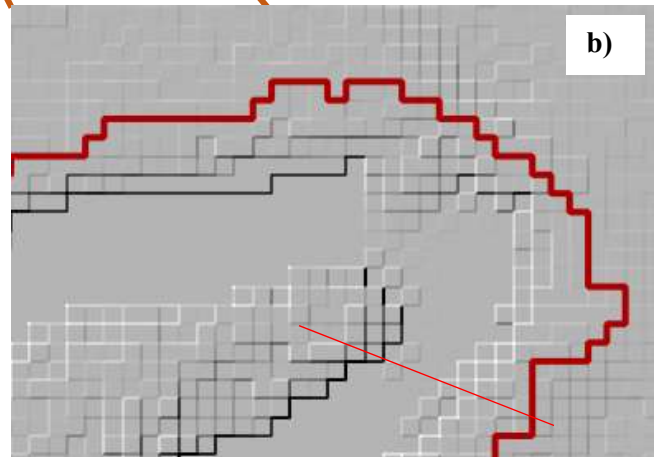
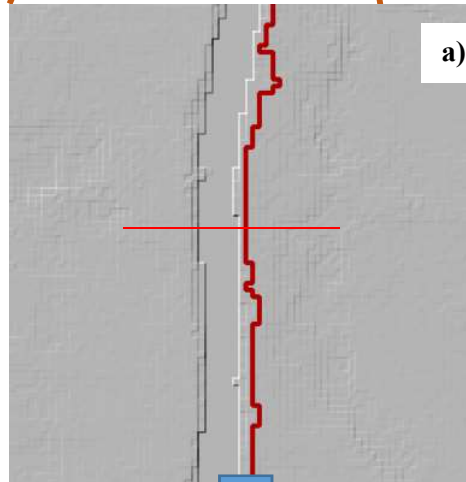
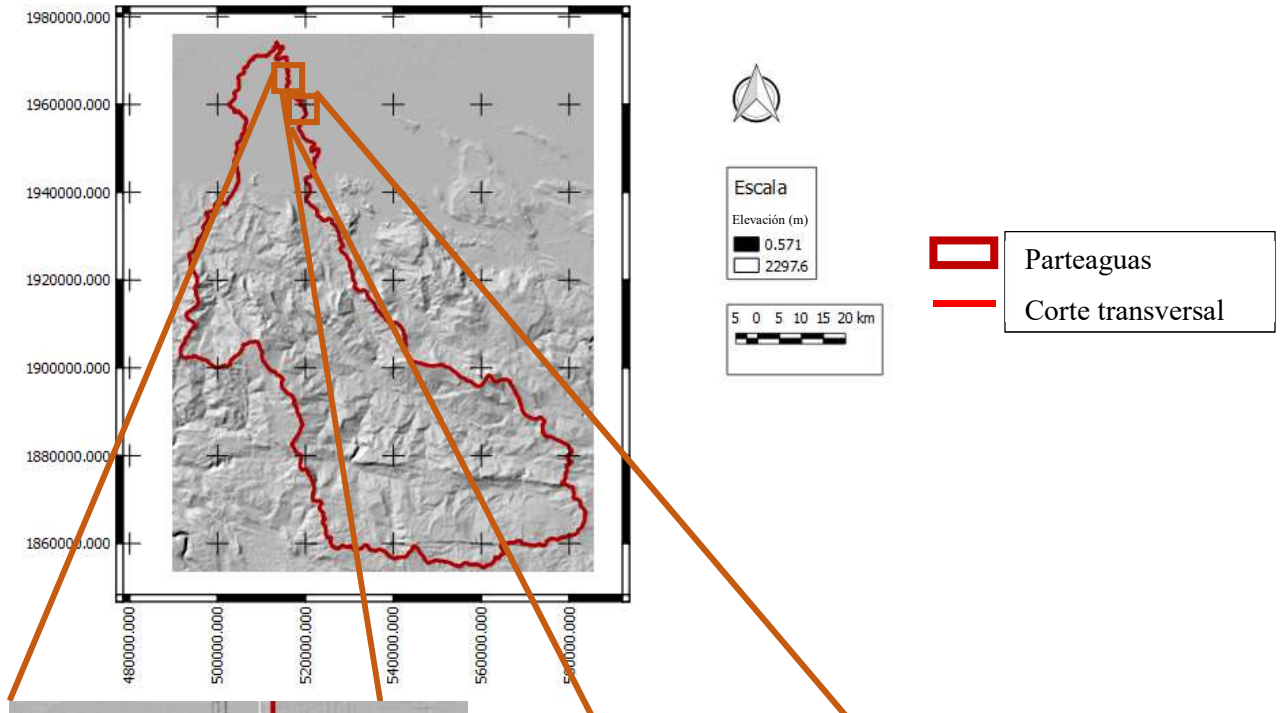


Figura 4-12 Resultados primer iteración del espejo de agua

Para la segunda iteración del espejo de agua, tomamos el espejo obtenido en la primera iteración y se repite el proceso de limpieza de valores anómalos y trazado del eje del río principal con TopoToolBox. El trazado de este eje de río mejor concebido podría considerarse la función principal de haber obtenido la primera iteración del espejo del río y se usará por el resto del proceso, así que será llamado eje definitivo.

Sobre el eje definitivo se realiza un nuevo seccionamiento sobre la matriz de elevaciones original (Arreglo DEM, variable MAT, Ver Tabla 4-3), aunque en esta ocasión no se realizará pixel por pixel porque queremos evitar que las secciones se traslapen unas con otras.

Este seccionamiento es un paso previo para la interpolación vectorial, por lo que las secciones que se obtendrán necesitan ser tan pequeñas como se pueda y que abarquen la totalidad del espejo de agua y que estén tan juntas como se pueda sin que se traslapen entre ellas, el algoritmo se detalla en la Figura 4-13.

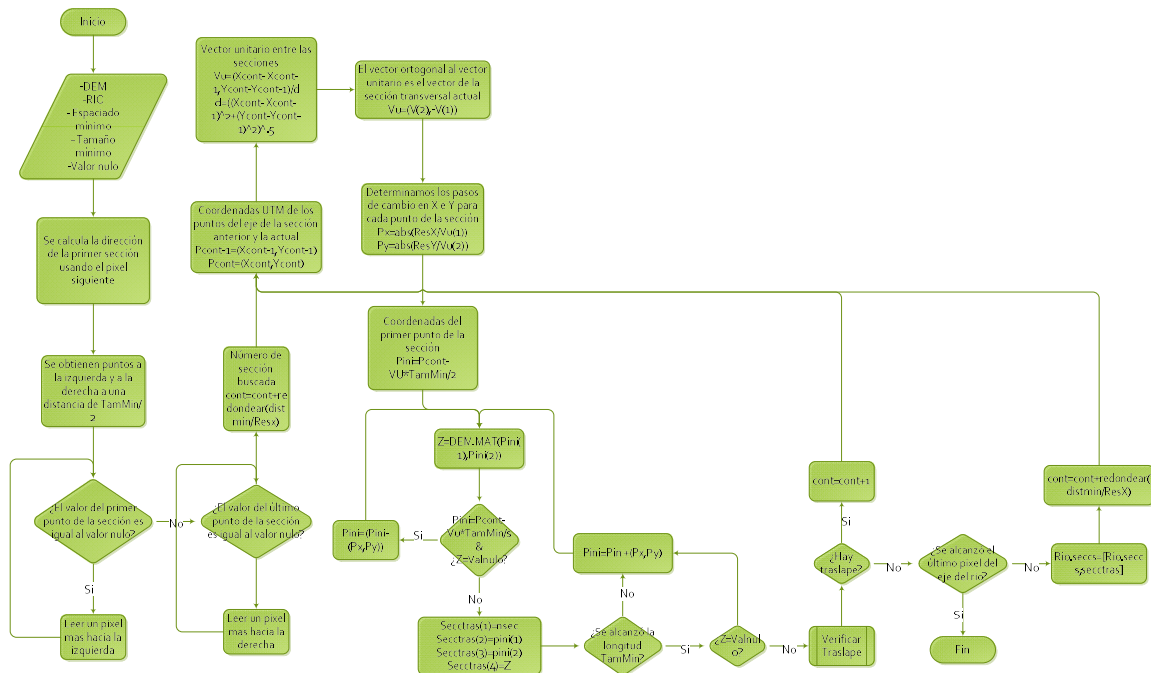


Figura 4-13 Algoritmo seccionado sin traslape y sin cortar espejos de agua

Se hace notar que a diferencia del método descrito en la Figura 4-7, que se realiza en su totalidad en coordenadas matriciales, puesto que al hacerse pixel por pixel solo existen 8 posibles direcciones y cada punto de la sección corresponde a un pixel de la matriz numérica del DEM, este método requiere

obtener los puntos de la sección a través de la pendiente del vector unitario, lo que se hace en coordenadas UTM, que después pueden transformarse a coordenadas matriciales (Ver ecuaciones Ecuación 2-16 y Ecuación 2-17).

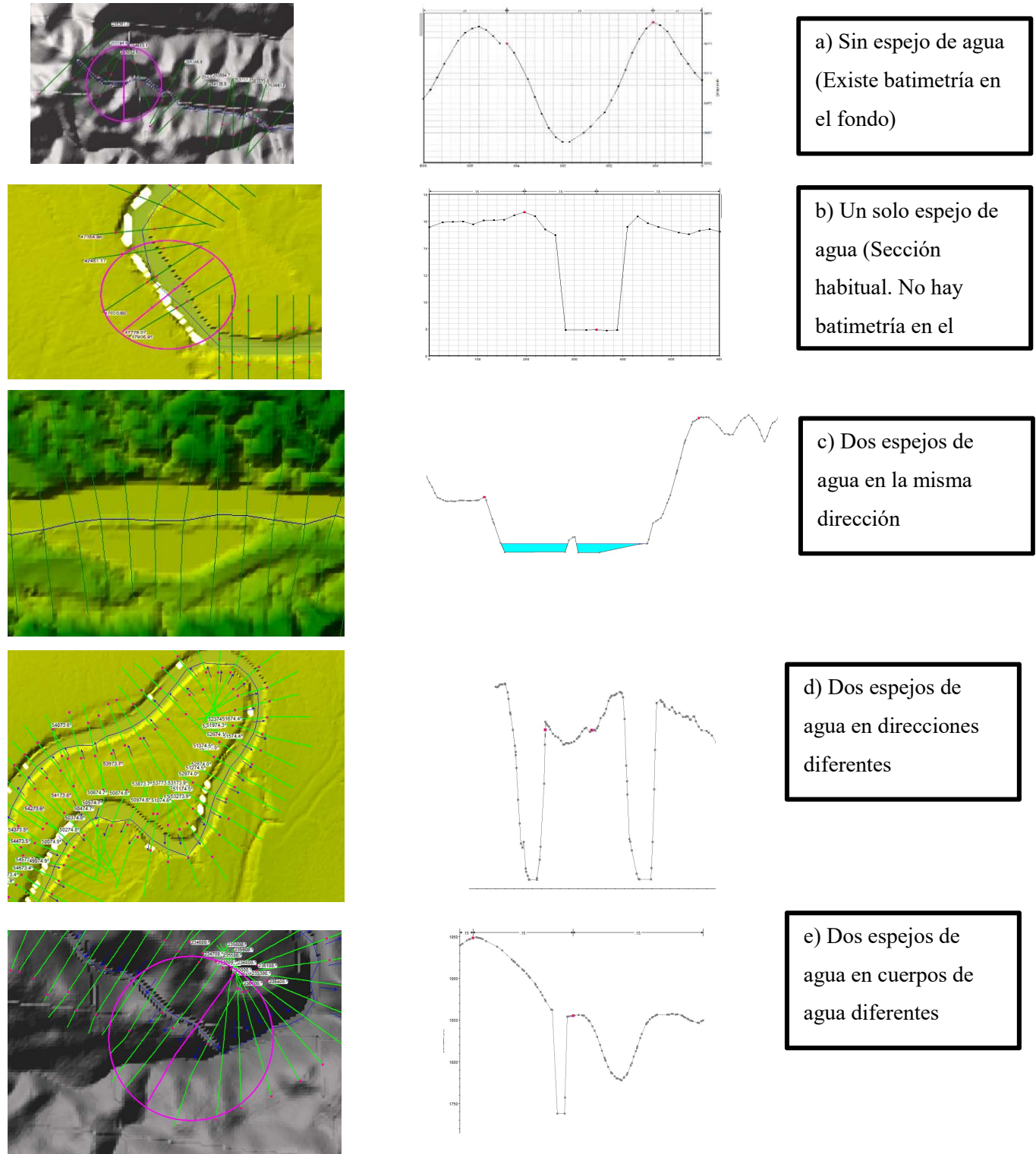


Figura 4-14 Situaciones posibles del espejo de agua dentro de las secciones transversales

Una vez que se han obtenido estas secciones, se procede a sustituir los valores nulos de las secciones con el menor de los valores de elevación de las orillas del espejo de agua (Ver Figura 4-9)

Ahora bien, en cuanto al espejo de agua dentro de una sección pueden presentarse cinco situaciones (Ver Figura 4-14). Que la sección no contenga espejo de agua (como en las zonas altas, donde el tirante es somero y el levantamiento LiDAR alcanzó a muestrear el fondo), que contenga un espejo de agua, que contenga más de un espejo de agua que tengan el mismo sentido de flujo (Islas dentro del río), que contenga más de un espejo de agua que tengan diferente sentido de flujo (La sección interseca más de una vez el eje del río) o que contenga más de un espejo de agua y que pertenezcan a cuerpos de agua diferentes (Canales adyacentes).

Existe gran importancia en el hecho de diferenciar cada caso, puesto que se podría incurrir en errores tales como nivelar en igualdad de condiciones dos espejos de agua en una sección que no tienen el mismo flujo o no pertenecen al mismo cuerpo, o bien, ignorar uno de los dos lados del mismo espejo de agua dividido por una isla fluvial.

Se desarrolló una herramienta que permite identificar estos casos y delimitar el espejo de agua principal (aún si está separado, se considera uno) dentro de una sección transversal, denominada ESPBOOL (Ver 6.1.13 ESPBOOL)

Esta herramienta primeramente crea una lista de las secciones que no fueron omitidas por distancia mínima o por traslape (Segundo seccionamiento sin traslape, algoritmo mostrado en la Figura 4-13, Arreglo SECCESPEJO, variable LISTSECCTRASLA), después, a partir de la matriz de secciones transversales creada por ese mismo algoritmo, se crea un vector a partir de la columna de elevaciones, en el que las filas correspondientes a valores nulos se marcan con un 1 y todas las demás se marcan con un 0.

Por cada elemento de la lista de secciones mencionada, se aíslan las filas de datos de secciones transversales que le corresponden dentro de la matriz (SECCSESPEJO.SECCSNULAS, Ver Tabla 4-4) después se cuentan los “Inicios de espejos de agua” todos los valores que su elemento actual sea 1 y el anterior 0 y se cuentan los “Finales de espejos de agua”, todos los valores que su elemento actual sea 0 y el anterior 1. El número de espejos de agua dentro de la sección se toma como el mayor de estos dos.

Si no hay espejos de agua (Figura 4-14, a), no se realiza ninguna acción y se continúa a la siguiente sección de la lista SECCSESPEJO.LISTSECCTRASLA, en el caso de haber un espejo de agua (Figura 4-14,b), se copia la información del vector booleano SECCSESPEJO.SECCSNULAS en la columna del espejo principal.

Si hay más de un espejo de agua, se realiza una búsqueda de colisiones con el eje del río. Si hay más de una colisión (Figura 4-14,d) , se toma como espejo principal únicamente el espejo más cercano al píxel del eje en la sección transversal. Si sólo hay una colisión, se buscan valores nulos (indicadores de espejo de agua) hacia arriba y hacia abajo del píxel del eje del río en la sección transversal. Los espejos que se alejan más de la tolerancia ingresada por el usuario no se consideran parte del mismo cuerpo de agua (Figura 4-14, e), de los restantes se copia su información booleana dentro del vector booleano (SECCSESPEJO.SECCSNULAS, Tabla 4-4) del espejo principal (Figura 4-14, c).

Tabla 4-4 Variables usados en el cómputo de la batimetría (Segunda iteración)

| Variable o arreglo | Variables dentro del arreglo | Descripción |
|--------------------|------------------------------|---|
| SECCSESPEJO | SECCSNULAS | Matriz que contiene cuatro columnas, el identificador de secciones, el vector de elevaciones de las secciones transversales, el vector booleano de datos nulos y el vector booleano del espejo principal |
| | LISTSECCTRALA | Lista de los píxeles del eje principal (Nombrados por su jerarquía dentro del flujo del río, aguas arriba es 1, y aumenta hacia aguas abajo) a partir de los que se obtuvieron secciones transversales de manera que se respeta una distancia mínima entre ellos y evita que haya traslape entre secciones |
| | SUPAGUACONO | Vector que contiene las elevaciones del espejo de agua de la primera iteración, obtenida buscando las coordenadas de cada punto de las secciones dentro de la matriz DEM.DEMCERRADO (Ver Tabla 4-3) |
| | SECCSTRASLA | Matriz de secciones transversales que respetan una distancia mínima sobre el eje definitivo del río, y que evitan que las secciones se traslapen. Contiene el Indicador de sección, Coordenadas Matriciales, Coordenadas UTM (Incluyendo elevación), distancia entre puntos de la sección, Separadores de banco izquierdo, derecho y canal principal, Coeficiente n de Manning para cada punto de la sección, Coeficiente de Manning compuesto para bancos y canal. |

Cuando se ha obtenido el vector booleano del espejo principal, se procede a obtener las coordenadas UTM (Almacenadas en SECCSESPEJO.SECCSTRASLA, Tabla 4-4, solo se procede a ubicar el valor correspondiente) correspondientes a las orillas izquierda y derecha y las coordenadas UTM de

los píxeles adyacentes a las mismas orillas (por cuestiones de referencia y frontera, al momento de sobreponer el fondo de interpolación sobre la matriz numérica del DEM).

A partir de esta información (las coordenadas de las orillas de los espejos de agua) es posible realizar una interpolación por métodos vectoriales (Usando redes triangulares irregulares, TIN). Sin embargo, automatizar este tipo de interpolaciones puede dar resultados inesperados, debido principalmente a que, dependiendo de las condiciones del terreno y los datos, los algoritmos de interpolación pueden dar mejores o peores resultados.

Al respecto, Jay Lee (2007) comenta:

“El objetivo de convertir DEM’s a TIN’s es obtener el menor número de puntos de elevación como sea posible mientras se obtenga la mayor cantidad de información que se pueda acerca de las estructuras topográficas. Desafortunadamente, es usualmente imposible alcanzar ambas metas simultáneamente. Ya sea que más información estructural sea representada por más puntos de elevación o que una red más pequeña provea una representación estructural más generalizada. Cuando se convierten DEM’s a TIN’s, este intercambio tiene que llevarse a cabo, encontrando un punto intermedio, pero ya que éste difiere entre un método y otro y entre un tipo de superficie y otra, experimentos de prueba y error son usualmente necesarios para obtener mejores resultados”

En el presente trabajo se pudo constatar esa afirmación y es por esto que, en este paso, fue necesario complementar la inspección y corrección de datos (mediante el arreglo de las fronteras) manualmente. Para tal propósito, se importaron los datos vectoriales de las orillas del espejo de agua al programa CIVIL3D y se ajustó la triangulación del TIN por medio de fronteras y límites.

Por un lado las líneas de frontera (Boundary lines), que son polígonos cerrados, limitan la triangulación al interior de este polígono (Ver Figura 4-18), mientras que las líneas de límite (Breaklines) indican que los vértices de los triángulos no deben cruzar a través de ellas (Ver Figura 4-19), es decir, evitan que un punto correspondiente al terreno genere un vértice con un punto correspondiente al espejo de agua.

Las líneas de frontera evitan que secciones cercanas, pero no continuas, interpolen entre ellas. Las líneas límite ayudan a corregir la pérdida de información debido a la discretización de las curvas.

La importación de los puntos hacia CIVIL3D se hace en coordenadas (X,Y,Z). El procedimiento de importación de coordenadas es como sigue:

1. Se crea una nueva superficie (Figura 4-15)
 - a. Se va a la pestaña inicio
 - b. Menú superficies
 - c. Crear nueva superficie
 - d. Se le da un nombre a la superficie y se acepta

2. Se agregan los puntos XYZ almacenados en un archivo de texto (Figura 4-16)
 - a. Pestaña modificar
 - b. Botón superficie
 - c. Menú agregar datos
 - d. Archivos de puntos
 - e. Seleccionamos el archivo de puntos
 - f. Se elige el formato Este, Norte, Z
 - g. Se acepta

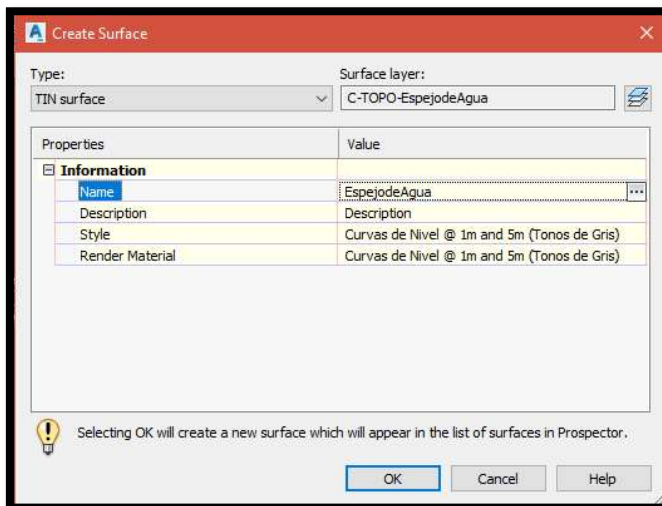


Figura 4-15 Ventana de creación de superficies en CIVIL3D

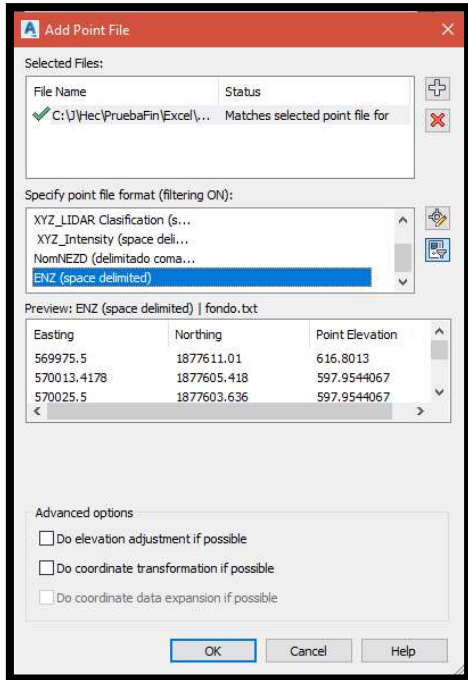


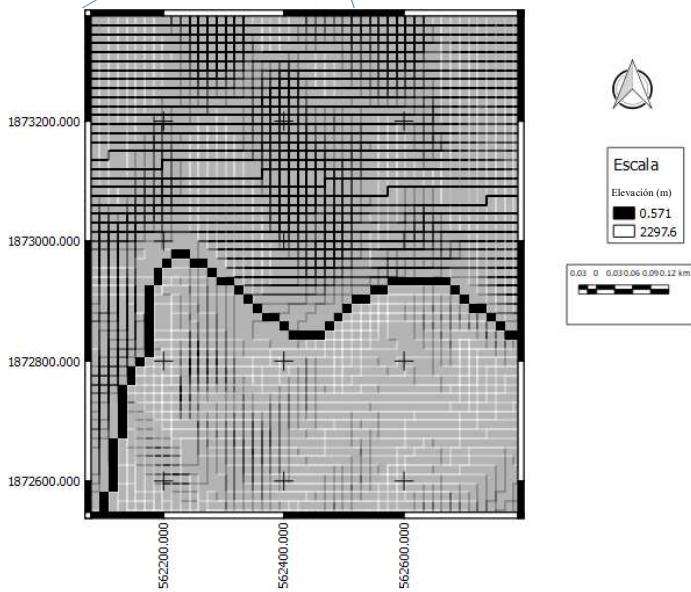
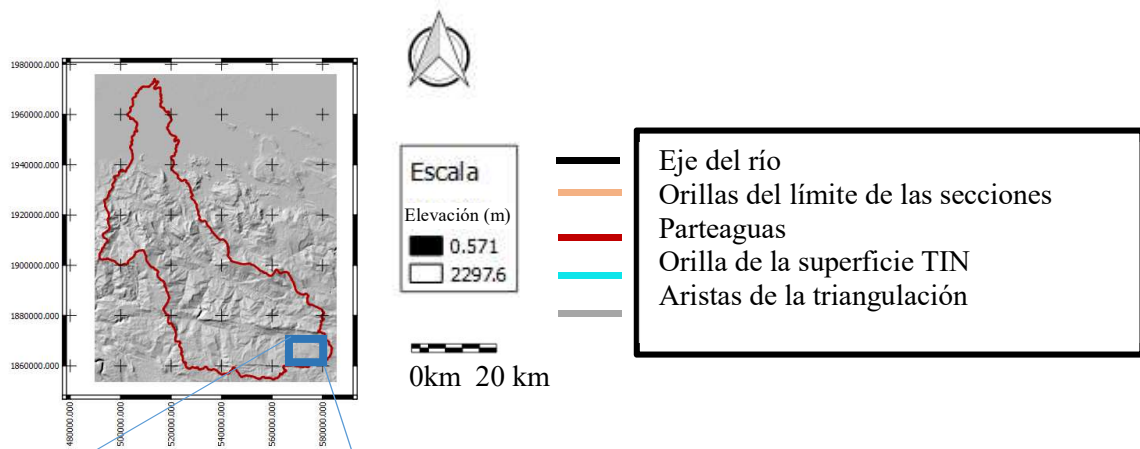
Figura 4-16 Ventana de importación de puntos hacia la superficie TIN en CIVIL3D

Se procede a la importación de las líneas de frontera y las líneas de límite de los espejos de agua.

Ya que dentro del programa estos elementos deben ingresarse como líneas, se ha creado un *script* de AutoCAD que importe las coordenadas. Es por esto, que se crearon archivos *.scr con la instrucción *_pline* y las coordenadas de los vértices de las líneas en orden (Ver Figura 4-17). Para terminar con la importación de las líneas, se ejecuta el script correspondiente a cada una (consola *run script* de CIVIL3D).

```
_pline 1045.0839382,1068.420735
1086.9540916,1188.9776808
1166.8585862,1252.230735
1171.5642485,1366.6321406
1355.118551,1398.2209886
```

Figura 4-17 Ejemplo de script de CIVIL3D para importar líneas



a) Triangulación antes de señalar las líneas de frontera

b) Triangulación después de señalar las líneas de frontera

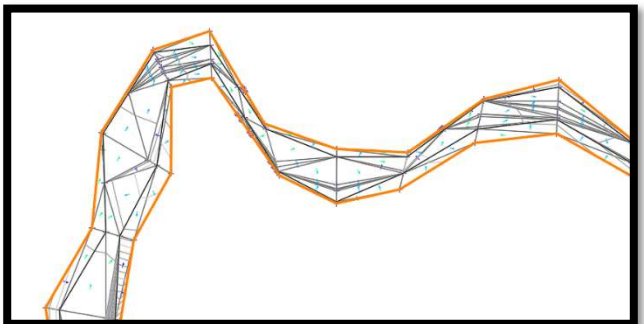
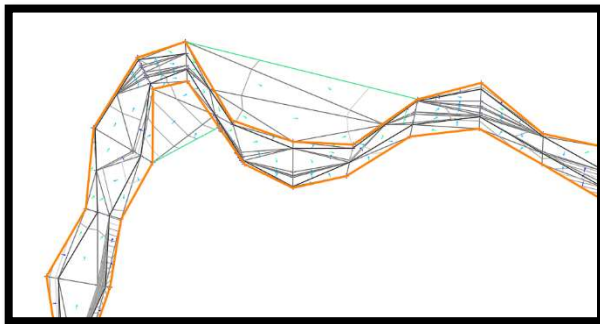
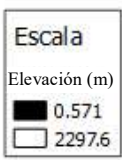
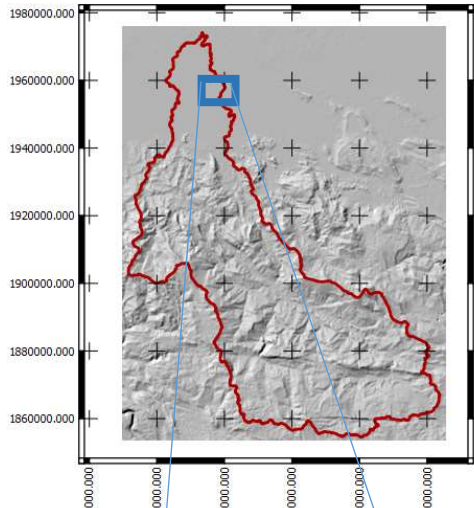
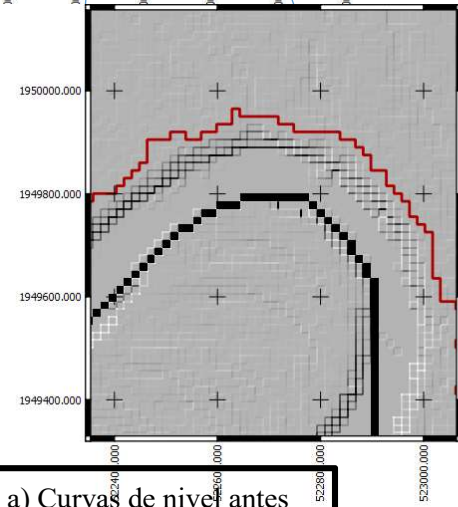
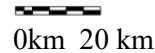


Figura 4-18 Aplicación de las líneas de frontera a los datos de triangulación TIN



- Eje del Río
- Orillas del límite de las secciones
- Parteaguas
- Orilla de la superficie TIN
- Curvas de nivel



a) Curvas de nivel antes de señalar las líneas de límite

b) Curvas de nivel después de señalar las líneas de límite

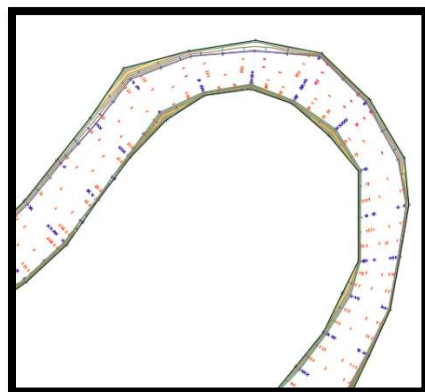
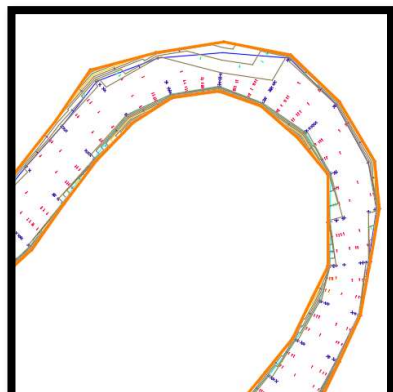


Figura 4-19 Aplicación de las líneas de límite a los datos de triangulación TIN

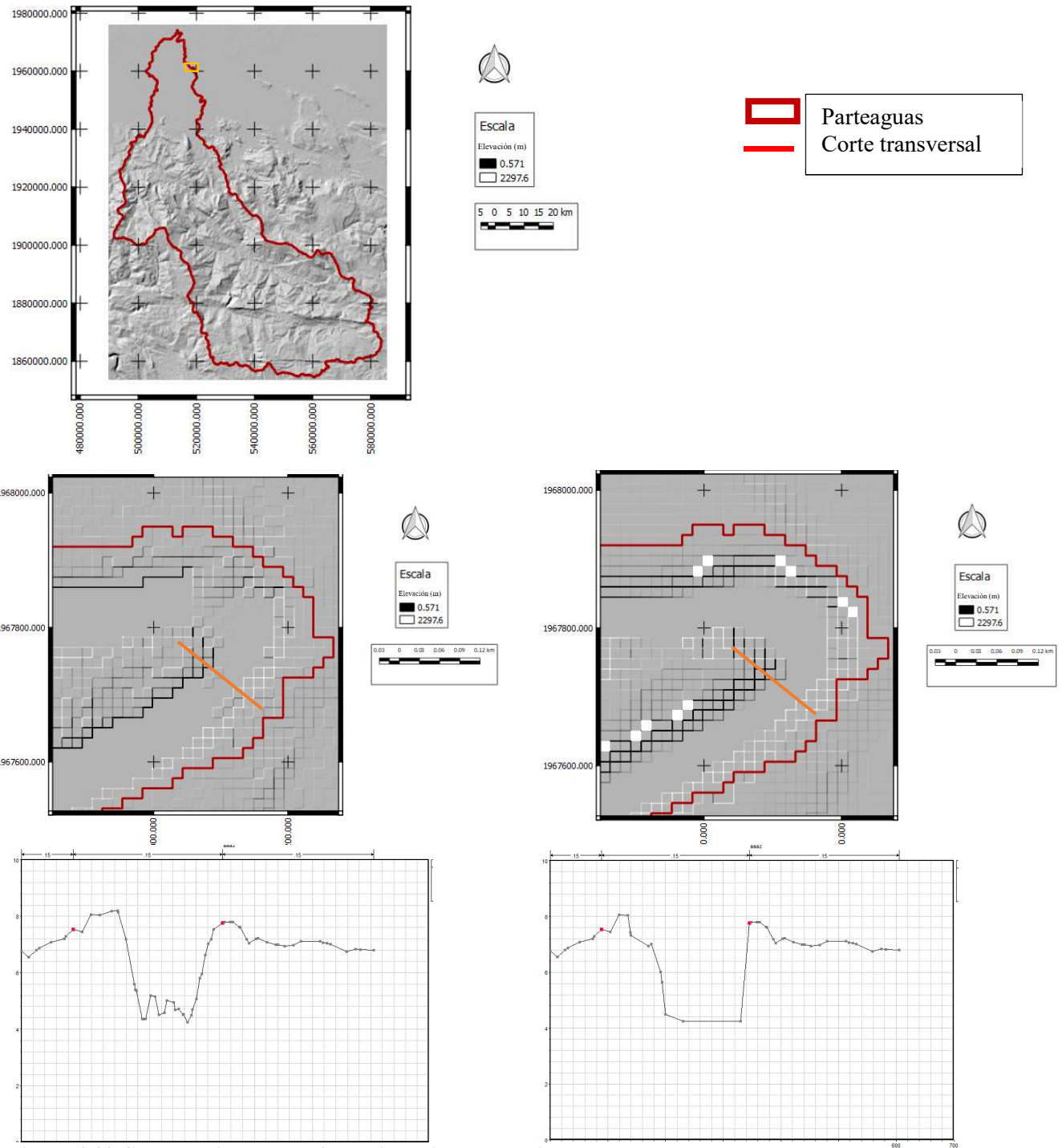


Figura 4-20 Comparación de la primera iteración del espejo de agua con la segunda

Finalmente, la información de la malla TIN que ha sido corregida es incorporada dentro de la matriz de datos numéricos dentro de MATLAB, el cual se exporta como un DEM usando la función EXP2TIFF (Ver 6.1.3) . Los datos obtenidos para el espejo de agua se consideran adecuados para seguir adelante con el proceso de elaboración de lecho sintético (Ver Figura 4-20).

El método de Corum para determinar un lecho sintético requiere de dos elementos a) La elevación del espejo de agua y b) El caudal que causó que existiera ese espejo de agua.

Con la elevación del espejo de agua, el caudal se determina a partir de los metadatos de las cartas batimétricas. Los registros del limnógrafo en la estación 30016 (Contenido en el mismo archivo de caudales que se obtuvo de BANDAS, CONAGUA, Ver *Tabla 3-2 Fuente de obtención de datos requeridos*).

De acuerdo con los metadatos que acompañan las cartas batimétricas obtenidas de INEGI, la mayor parte de la exploración LiDAR fue realizada en el año 2008 (Solamente las cartas E15D11 y E15D12 fueron levantadas el año 2007). Sin embargo, no se cuenta con una fecha exacta del levantamiento, por lo que se deberá que determinarla.

De acuerdo con la elevación del espejo de agua que ha sido determinada, en la desembocadura se tiene una elevación de 5.52 m (Figura 4-21).

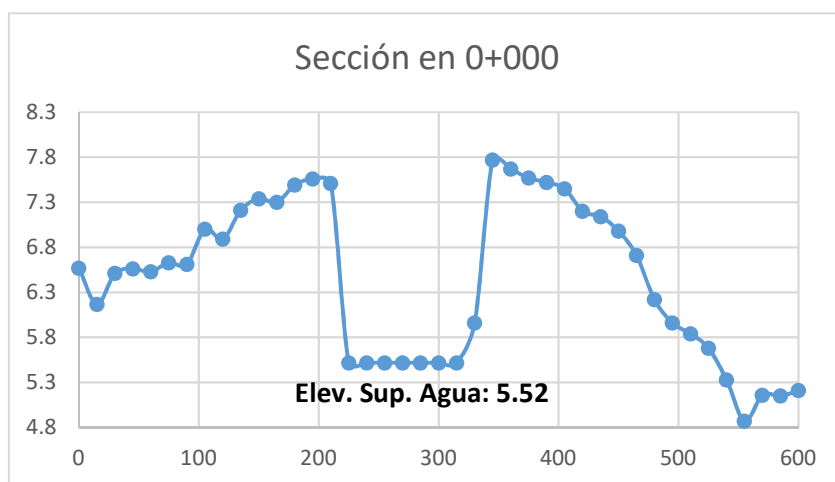


Figura 4-21 Elevación de la superficie de agua en la desembocadura

De acuerdo con las mediciones del limnógrafo en la estación 30016 para el año 2008 y dado que tampoco se conoce la elevación del fondo en la sección, se recurrió al encuentro de una solución geométrica y funcional (se considera adecuado usar este año en los registros, dado que no hay datos de escala del limnógrafo para esa estación en el año 2007, porque la mayor parte del levantamiento

ocurrió en el 2008 y porque el periodo es lo suficientemente cercano como para que no sea probable que hayan existido grandes cambios en el caudal).

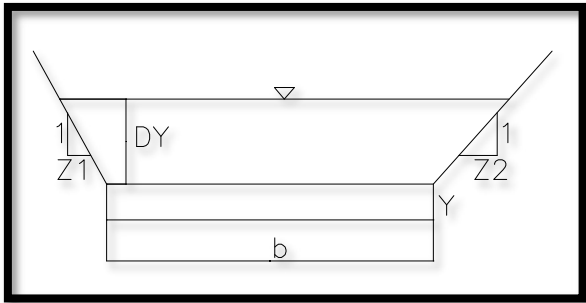


Figura 4-22 Idealización de la sección transversal en la desembocadura

De la Figura 4-22 se deducen las propiedades geométricas de la sección mojada con las ecuaciones Ecuación 4-1 y Ecuación 4-2, combinada con la ecuación de Manning en la para determinar el caudal.

$$A = Y * b + \frac{\Delta Y^2 (Z1 + Z2)}{2} \quad \text{Ecuación 4-1}$$

$$P = b + 2 * Y + Y * ((1 + Z1^2)^{.5} + (1 + Z2^2)^{.5}) \quad \text{Ecuación 4-2}$$

$$Q = \frac{1}{n} \sqrt{S} \left(\frac{A^5}{P^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 4-3}$$

Donde:

- A: Área en la sección en la desembocadura
- P: Perímetro mojado
- Q: Caudal en la desembocadura
- b: ancho del fondo de canal
- Y: Profundidad del canal hasta el espejo de agua conocido
- DY: Cambio en el tirante por encima del espejo de agua conocido

Z1: Pendiente de la margen izquierda
Z2: Pendiente de la margen derecha
S: Pendiente del canal
n: coeficiente de rugosidad de Manning

Los datos que obtenemos por medición directa son:

Z1=12.93 m/m
Z2= 3.30 m/m
b = 98.56 m
S=0.000022

Como coeficiente de Manning, tomamos el sugerido por Chow (1994) para canales dragados rectos y uniformes (por las imágenes satelitales se puede ver que, ya que hay comunidades en esa zona, el canal del río ha sido alterado).

$n=0.02$

Ahora, dentro del archivo de información hidrométrica obtenido desde CONABIO se encuentran curvas elevación-gasto.

Para cada valor de elevación se hace una aproximación del gasto mediante la, usando el valor de la lectura como elevación “Y” y la diferencia con la lectura siguiente como DY. Se compara el valor del gasto calculado con el gasto medido para cada tirante, y se toma el valor que logre una mejor aproximación con el gasto de avenida.

El resultado obtenido determina que el caudal con mejor aproximación es de

$Q=523.969 \text{ m}^3/\text{s}$.

De la curva de aforo correspondiente al primer tercio del año (Transición), es decir, del registro de lecturas del limnógrafo podemos determinar que la fecha en que se tiene este caudal es el 2 de enero del 2008.

De la simulación realizada en CEQUEau, utilizando los parámetros de calibración utilizados por Mercado, V. (2010) se obtiene la distribución del gasto dentro del eje del río para la fecha antes encontrada (Ver Tabla 4-6), que de acuerdo con la distribución espacial de los cuadros de CEQUEau

(Figura 4-23) y al cadenamamiento sobre el eje del río correspondiente (Ver Tablas Tabla 4-5 y Tabla 4-6)

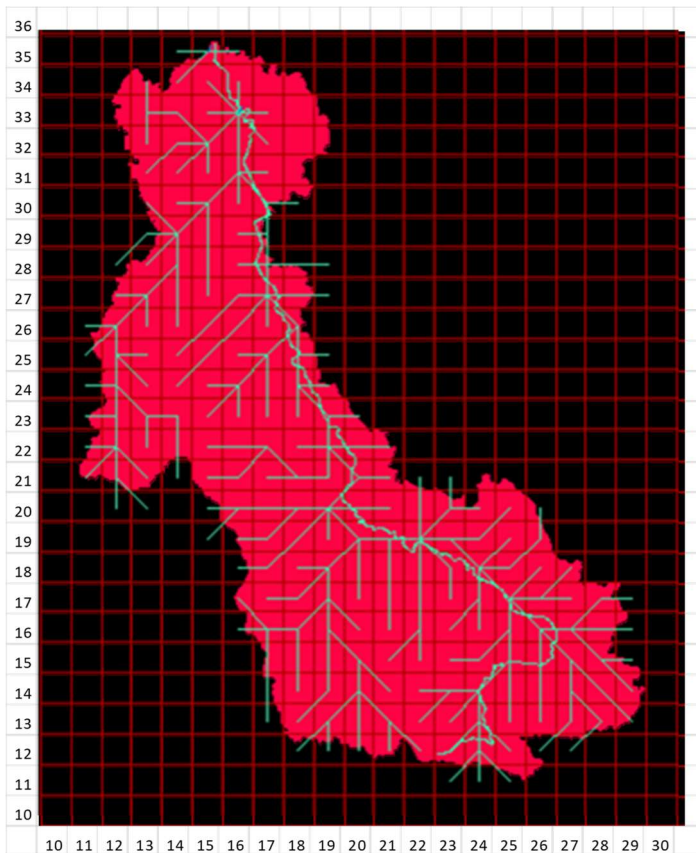


Figura 4-23 Distribución Espacial de la cuenca en CEQUEA (Adaptada de Mercado, V., 2010)

Los valores mostrados en las Tabla 4-6 son los valores de las estaciones y los caudales que se distribuirán en ellas. El proceso de encontrar el lecho sintético corresponde a un lecho “erosionado” dado a la naturaleza del proceso de ir bajando el nivel del espejo principal la diferencia entre el tirante observado y el calculado.

Antes de comenzar con las simulaciones necesarias para la elaboración del lecho sintético, es necesario colocar los puntos de bancos y diques. Como se ha mencionado antes, en **3.4.2 Simulación hidrodinámica de avenidas en 1D usando HEC-RAS**, la adecuada colocación de éstos puntos puede causar enormes diferencias en los resultados.

Se elaboró una herramienta denominada BANYDIQS (6.1.15 BANYDIQ) que se encarga de hacer una primera sugerencia de la posición de los puntos de bancos y diques (al final, aún se recomienda hacer una inspección visual de los resultados para detectar si existen errores en el posicionamiento).

Tabla 4-5 Equivalencia de cuadros CEQUEau en coordenadas UTM y cadenamiento del eje del río

| Iniciales | X | 485000 | Y | 1845000 | |
|-----------|----|--------|--------|---------|--------------|
| UTM15 | | | | | |
| | X | Y | X | Y | Cadenamiento |
| 23 12 A | 23 | 12 | 550000 | 1855000 | 244+621.31 |
| 24 12 A | 24 | 12 | 555000 | 1855000 | 237+898.71 |
| 24 13 C | 24 | 13 | 555000 | 1860000 | 231+026.54 |
| 24 14 B | 24 | 14 | 555000 | 1865000 | 224+363.31 |
| 25 15 D | 25 | 15 | 560000 | 1870000 | 215+546.74 |
| 25 17 A | 25 | 17 | 560000 | 1880000 | 188+647.09 |
| 24 18 A | 24 | 18 | 555000 | 1885000 | 179+055.74 |
| 23 19 D | 23 | 19 | 550000 | 1890000 | 167+729.79 |
| 22 19 D | 22 | 19 | 545000 | 1890000 | 157+827.08 |
| 21 19 A | 21 | 19 | 540000 | 1890000 | 147+485.55 |
| 20 21 A | 20 | 21 | 535000 | 1900000 | 127+334.94 |
| 19 23 A | 19 | 23 | 530000 | 1910000 | 113+312.82 |
| 18 24 B | 18 | 24 | 525000 | 1915000 | 104+918.12 |
| 18 25 A | 18 | 25 | 525000 | 1920000 | 98+712.97 |
| 17 27 A | 17 | 27 | 520000 | 1930000 | 82+791.77 |
| 17 28 A | 17 | 28 | 520000 | 1935000 | 73+830.53 |
| 17 29 D | 17 | 29 | 520000 | 1940000 | 68+267.11 |
| 17 30 A | 17 | 30 | 520000 | 1945000 | 55+340.06 |
| 16 34 D | 16 | 34 | 515000 | 1965000 | 17+262.23 |
| 15 35 B | 15 | 35 | 510000 | 1970000 | 6+693.05 |

Para este posicionamiento inicial, se aplica una media móvil de tamaño definido por el usuario para suavizar los datos de la sección y evitar que pequeñas protuberancias obliguen al programa a declararlas un punto de banco o dique. Sobre esa información de elevaciones suavizadas, se determina el punto que corresponde al eje del río y se busca hacia la izquierda y la derecha valores máximos, señalando un valor máximo cuando el valor evaluado sea mayor que el valor siguiente y el anterior.

Para el fin del erosionado, se elaboró una herramienta que con el fin de ejecutar el proceso de Corum para obtener lechos sintéticos. La herramienta EROSIONADOR que hace uso de otra herramienta desarrollada denominada TIRANTES (Ver 6.1.11 TIRANTES). TIRANTES ejecuta una simulación

en HEC-RAS y lee las elevaciones de los fondos y la superficie de agua, para determinar el tirante en cada sección.

Como indica el algoritmo descrito en la Figura 2-9, la diferencia entre la superficie calculada y la observada se considera como el error que deberá erosionarse de la elevación del lecho (Ver Figura 4-25).

El proceso se repite hasta que la superficie de agua calculada coincida con la superficie de agua conocida. En este caso, se consideró un umbral de error de 0.006 m (Ya que es el mismo umbral de error que tiene HEC-RAS para tirantes).

Tabla 4-6 Distribución del escurrimiento del día 02/01/2008 a lo largo del eje

| No. Est. Ficticia | Sección | %Esc. Acum. | % Esc | Q (m ³ /s) |
|-------------------|------------|-------------|-------|-----------------------|
| 1 | 244+621.31 | 0.009 | 0.009 | 4.695 |
| 2 | 237+898.71 | 0.020 | 0.011 | 10.262 |
| 3 | 231+026.54 | 0.027 | 0.007 | 14.059 |
| 4 | 224+363.31 | 0.048 | 0.021 | 25.180 |
| 5 | 215+546.74 | 0.048 | 0.000 | 25.277 |
| 6 | 188+647.09 | 0.100 | 0.052 | 52.413 |
| 7 | 179+055.74 | 0.140 | 0.040 | 73.182 |
| 8 | 167+729.79 | 0.184 | 0.045 | 96.590 |
| 9 | 157+827.08 | 0.216 | 0.032 | 113.275 |
| 10 | 147+485.55 | 0.228 | 0.012 | 119.688 |
| 11 | 127+334.94 | 0.467 | 0.238 | 244.604 |
| 12 | 113+312.82 | 0.596 | 0.129 | 312.135 |
| 13 | 104+918.12 | 0.645 | 0.050 | 338.167 |
| 14 | 98+712.97 | 0.711 | 0.066 | 372.588 |
| 15 | 82+791.77 | 0.736 | 0.025 | 385.470 |
| 16 | 73+830.53 | 0.737 | 0.001 | 386.219 |
| 17 | 68+267.11 | 0.739 | 0.002 | 387.348 |
| 18 | 55+340.06 | 0.744 | 0.004 | 389.691 |
| 19 | 17+262.23 | 0.747 | 0.003 | 391.148 |
| 20 | 6+693.05 | 1 | 0.253 | 523.969 |

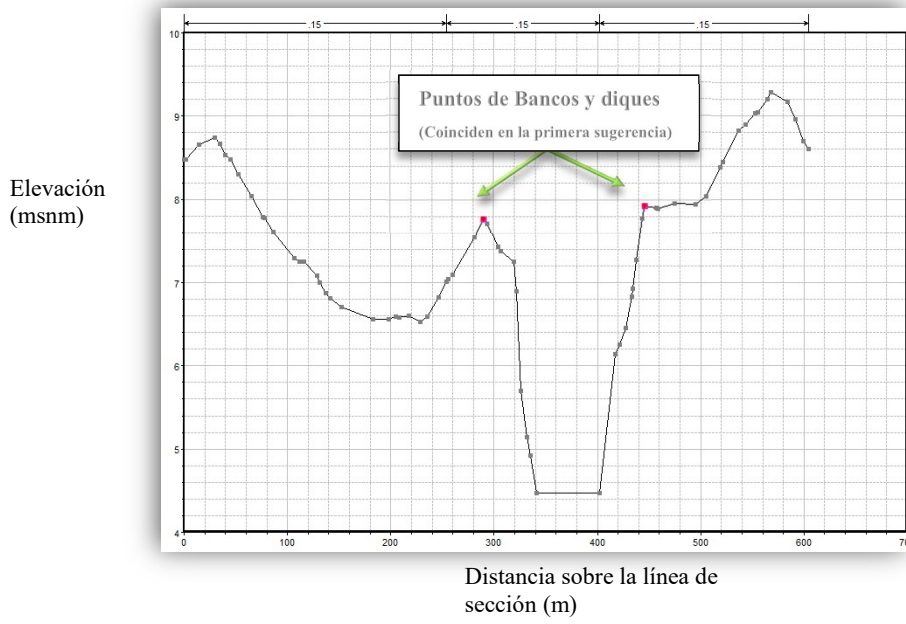


Figura 4-24 Posición inicial de los puntos de banco y diques

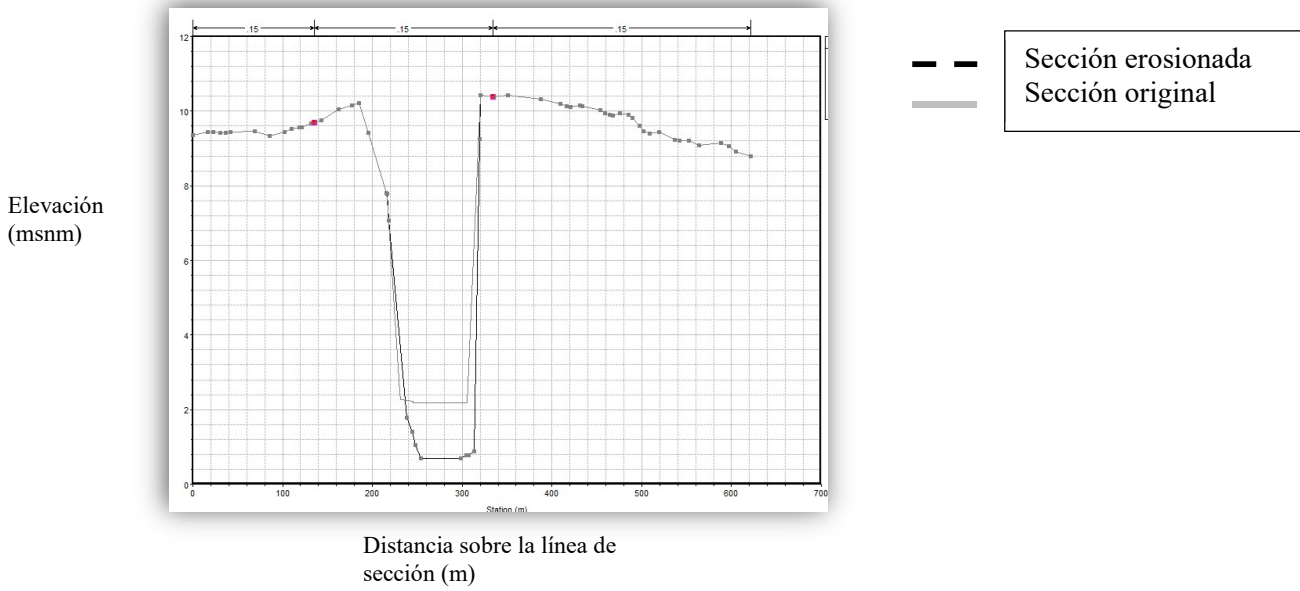


Figura 4-25 Ejemplo de sección con lecho sintético

4.3 Hidrogramas sintéticos por el método de la SCS

Como se mencionó en 3.3 *Generación de hidrogramas sintéticos por el método de la SCS distribuidos a lo largo del eje del río principal*, para el análisis de flujo no estable es necesario contar con hidrogramas distribuidos a lo largo del eje.

Se procede primeramente a realizar un análisis estadístico de los datos obtenidos para la estación 30016, con los procedimientos que se indican en 2.8.2 *Análisis estadístico de los datos*.

Tabla 4-7 Caudales máximos anuales observados en la estación 30016

| Año | Q. Max. Obs. (m ³ /s) | Año | Q. Max. Obs. (m ³ /s) | Año | Q. Max. Obs. (m ³ /s) |
|------|----------------------------------|------|----------------------------------|------|----------------------------------|
| 1948 | 795 | 1973 | 900.5 | 2001 | 883.541 |
| 1949 | 747 | 1974 | 831 | 2002 | 754.096 |
| 1950 | 708 | 1975 | 868 | 2003 | 885.898 |
| 1951 | 739 | 1976 | 820 | 2006 | 717.113 |
| 1952 | 889 | 1977 | 857 | 2008 | 979.891 |
| 1953 | 767 | 1978 | 922 | 2012 | 990.747 |
| 1954 | 744 | 1979 | 904 | 2013 | 884.867 |
| 1955 | 788 | 1980 | 906 | 2014 | 1100.8 |
| 1956 | 737 | 1981 | 950 | | |
| 1957 | 750 | 1982 | 890 | | |
| 1958 | 805 | 1983 | 696 | | |
| 1959 | 750 | 1984 | 881 | | |
| 1960 | 771 | 1985 | 677 | | |
| 1961 | 929 | 1986 | 888.125 | | |
| 1962 | 932 | 1989 | 988.571 | | |
| 1963 | 889 | 1991 | 718.5 | | |
| 1964 | 960 | 1992 | 1021 | | |
| 1965 | 834.9 | 1993 | 723 | | |
| 1966 | 842 | 1994 | 692.5 | | |
| 1967 | 922.4 | 1995 | 837.596 | | |
| 1968 | 920 | 1996 | 865.505 | | |
| 1969 | 907.333 | 1997 | 840.06 | | |
| 1970 | 874 | 1998 | 831.799 | | |
| 1971 | 944 | 1999 | 894.868 | | |
| 1972 | 806 | 2000 | 787.116 | | |

Los caudales máximos anuales correspondientes se resumen en la Tabla 4-7. La serie tiene las propiedades señaladas en Tabla 4-8y el histograma se presenta en la Figura 4-26

Tabla 4-8 Propiedades generales de la serie de caudales máximos anuales de la estación 30016

| Datos Generales | | | |
|------------------------|--------|--------|----------|
| Longitud | 58 | | |
| Q1 (m ³ /s) | 768 | RCI | 139.000 |
| Q2 (m ³ /s) | 862.5 | LimInf | 559.500 |
| Q3 (m ³ /s) | 907.00 | LimSup | 1115.499 |
| Media | 847.22 | | |
| Desv. Est. | 92.57 | | |
| Coef.Var. | 0.11 | | |
| Coef. Asim. Fisher | 0.15 | | |
| Curtosis | 2.53 | | |

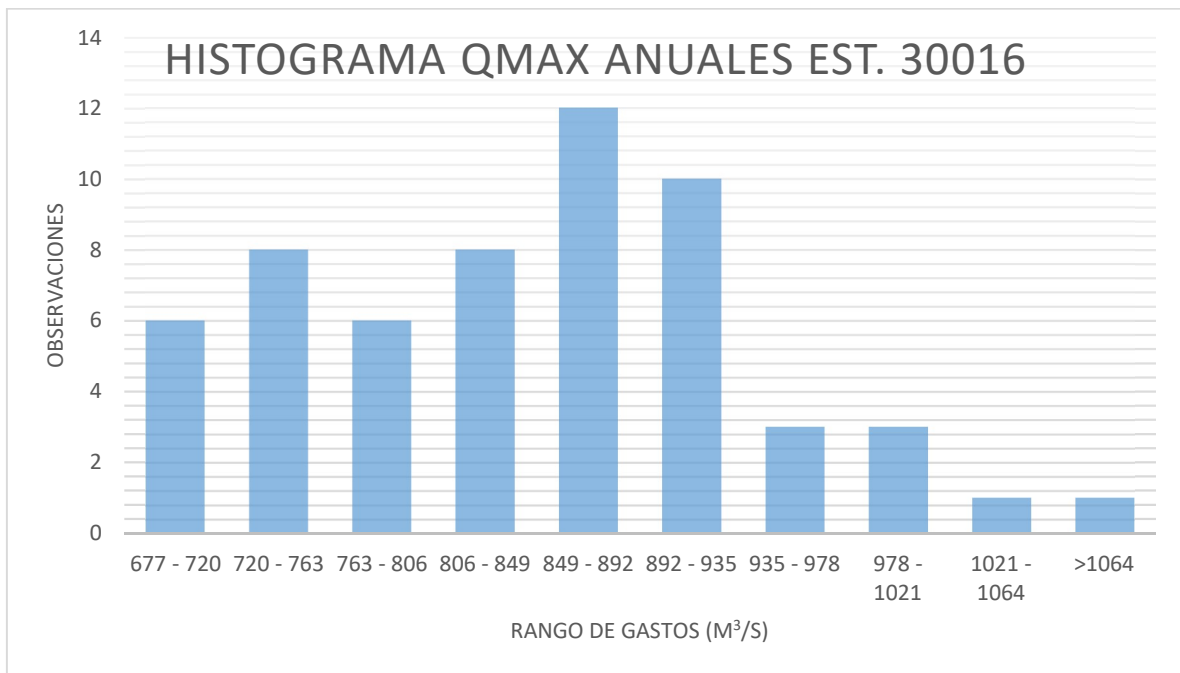


Figura 4-26 Histograma de caudales máximos anuales de la estación 30016

Las pruebas de calidad de los datos (aleatoriedad, homogeneidad e independencia) descritas en **2.8.1 Calidad de las series de datos**, fueron realizada sobre la serie y se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 4-9.

La serie de datos no mostró valores anómalos y pasó las pruebas de calidad, por lo que no se realizarán cambios adicionales sobre esta serie de datos cronológica.

Tabla 4-9 Resultados de pruebas de calidad sobre la serie de Qmax anuales de la estación 30016

| Prueba | Hatanaca | Prueba | Iteración | Prueba | Wald y Wolfowitz |
|-----------|--|-----------|--|-----------|---|
| Alfa | 5 | Alfa | 5 | Alfa | 5 |
| Ns | 4 | Ni0 | 8 | W | 41662279.857 |
| Ni | 2 | Ni1 | 8 | Xw | 41622713.155 |
| w | 2 | N0 | 27 | Sw^2 | 3991357503.250 |
| e | 0.304 | N1 | 14 | e | 0.626 |
| Media | 20.806 | Xw | 19.439 | Za/2 | 1.960 |
| Sigma | 7.866 | S2w | 8.039 | Resultado | La prueba se considera independiente |
| Za/2 | 1.960 | w | 16.000 | | |
| Resultado | La muestra se considera aleatoria | e | -1.213 | | |
| | | Za/2 | 1.960 | | |
| | | Resultado | | | |
| | | | La muestra se considera homogénea | | |
| | | | | | |

Las pruebas de ajuste descritas en **2.8.2 Análisis estadístico de los datos**, se realizan sobre la serie de Qmax anuales (Tabla 4-7), con los siguientes resultados

La serie se dividió en diez rangos, con límite inferior 677 y un tamaño de rango de 43, obteniendo la Tabla 4-10 con las observaciones por rango para la elaboración del histograma.

Tabla 4-10 Número de observaciones por rango

| Rango (m3/s) | N. Obs. |
|--------------|---------|
| 677 - 720 | 6 |
| 720 - 763 | 8 |
| 763 - 806 | 6 |
| 806 - 849 | 8 |
| 849 - 892 | 12 |
| 892 - 935 | 10 |
| 935 - 978 | 3 |
| 978 - 1021 | 3 |
| 1021 - 1064 | 1 |
| >1064 | 1 |

Los parámetros obtenidos para las pruebas de ajuste tabulan de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a la Tabla 4-16

Tabla 4-11 Parámetros de la muestra de Qmax anuales para la distribución Gamma

| Variable | Valor |
|-----------|--------|
| λ | 0.099 |
| U | 83.760 |
| | |
| α | 83.760 |
| β | 10.115 |

Tabla 4-12 Parámetros de la muestra de Qmax anuales para la distribución Exponencial

| Variable | Valor |
|-----------|--------|
| λ | 0.0012 |

Tabla 4-13 Parámetros de la muestra de Qmax anuales para la distribución Pearson III

| Variable | Valor |
|-----------|------------|
| μ_3 | 116647.605 |
| C.As.Fish | 0.147 |
| α | 6.806 |
| β | 185.000 |
| λ | 0.147 |
| E | -411.889 |
| Xgog | -411.889 |

Tabla 4-14 Parámetros de la muestra de Qmax anuales para la distribución LogNormal

| Variable | Valor |
|----------|--------|
| Media | 2.9254 |
| Varianza | 0.0023 |
| Desv.Est | 0.0476 |
| n | 58 |

Tabla 4-15 Parámetros muestra de Qmax anuales para la distribución LogPearson III

| Variable | Valor |
|-----------------|--------------|
| μ_3 | 116647.605 |
| C.As.Fish | 0.147 |
| α | 6.806 |
| β | 185.000 |
| λ | 0.147 |
| E | -411.889 |
| Xgog | -411.889 |

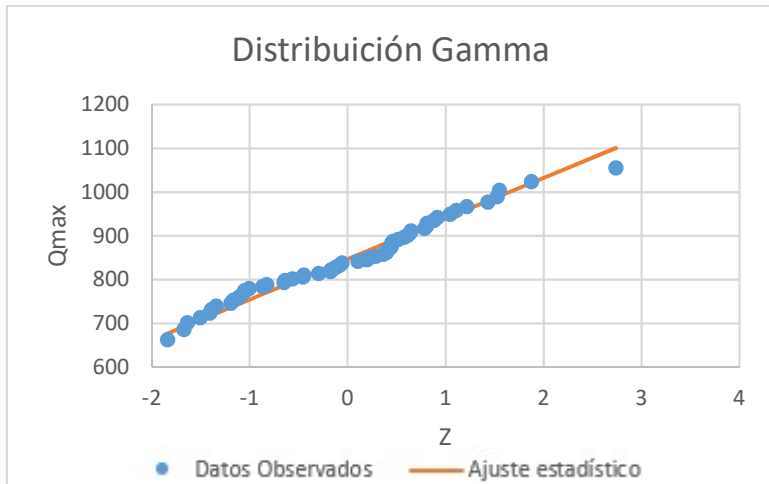
Tabla 4-16 Parámetros muestra de Qmax anuales para la distribución Gumbel Tipo I

| Variable | Valor |
|-----------------|--------------|
| a | 805.558 |
| b | 72.178 |

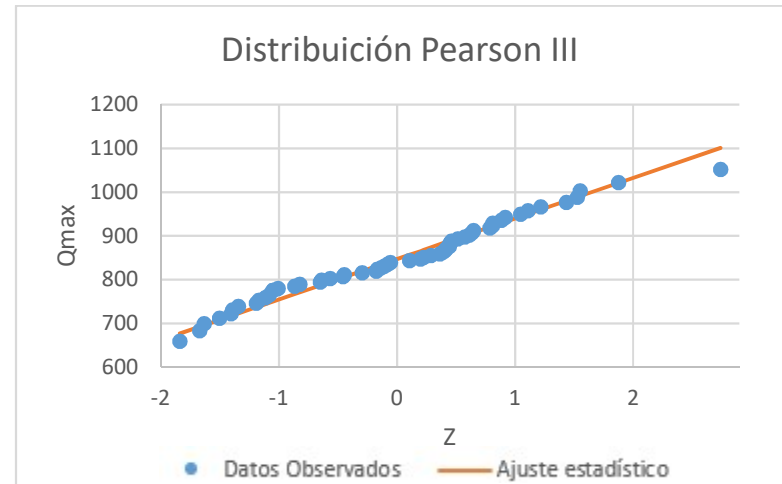
Los datos generales de la muestra que requieren algunas de las distribuciones pueden verse en la Tabla 4-8.

Tabla 4-17 Comparación de Qmax observado contra Qmax estimado por diferentes funciones de ajuste

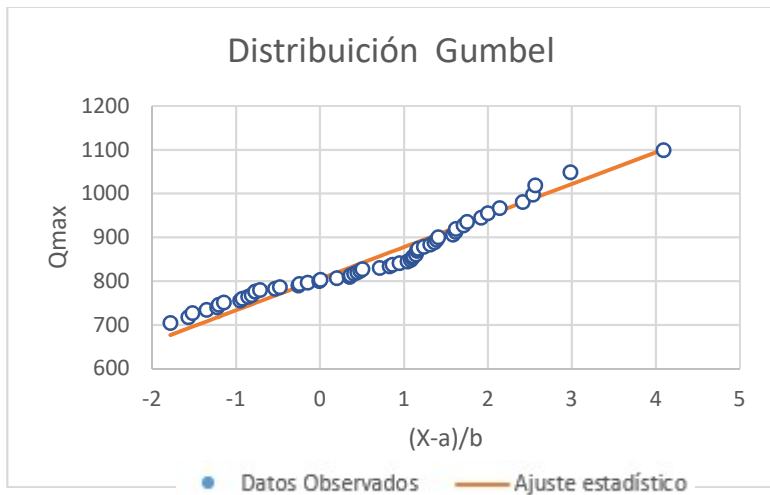
| Qmax Obs. | ProbEx | D. Gamma | D. Exp | D. Pearson III | D. Gumbel I | D. LogNorm | D. LogPear. III |
|-----------|--------|----------|---------|----------------|-------------|------------|-----------------|
| 677.00 | 0.0169 | 662.80 | 14.48 | 658.86 | 704.11 | 667.42 | 671.21 |
| 692.50 | 0.0339 | 686.22 | 29.22 | 683.54 | 717.56 | 689.36 | 691.98 |
| 696.00 | 0.0508 | 701.58 | 44.21 | 699.61 | 726.77 | 703.85 | 705.78 |
| 708.00 | 0.0678 | 713.42 | 59.48 | 711.95 | 734.10 | 715.08 | 716.52 |
| 717.11 | 0.0847 | 723.25 | 75.02 | 722.15 | 740.35 | 724.44 | 725.50 |
| 718.50 | 0.1017 | 731.77 | 90.86 | 730.97 | 745.89 | 732.58 | 733.34 |
| 723.00 | 0.1186 | 739.36 | 107.00 | 738.81 | 750.93 | 739.86 | 740.36 |
| 737.00 | 0.1356 | 746.27 | 123.45 | 745.93 | 755.60 | 746.50 | 746.78 |
| 739.00 | 0.1525 | 752.64 | 140.23 | 752.48 | 759.98 | 752.64 | 752.73 |
| 744.00 | 0.1695 | 758.60 | 157.34 | 758.59 | 764.14 | 758.39 | 758.32 |
| 747.00 | 0.1864 | 764.21 | 174.81 | 764.34 | 768.13 | 763.83 | 763.60 |
| 750.00 | 0.2203 | 774.63 | 210.87 | 774.99 | 775.69 | 773.95 | 773.47 |
| 750.00 | 0.2203 | 774.63 | 210.87 | 774.99 | 775.69 | 773.95 | 773.47 |
| 754.10 | 0.2373 | 779.52 | 229.49 | 779.98 | 779.32 | 778.72 | 778.13 |
| 767.00 | 0.2542 | 784.25 | 248.53 | 784.79 | 782.86 | 783.33 | 782.64 |
| 771.00 | 0.2712 | 788.83 | 268.01 | 789.45 | 786.35 | 787.81 | 787.03 |
| 787.12 | 0.2881 | 793.28 | 287.94 | 793.98 | 789.78 | 792.17 | 791.32 |
| 788.00 | 0.3051 | 797.64 | 308.36 | 798.39 | 793.18 | 796.44 | 795.51 |
| 795.00 | 0.3220 | 801.90 | 329.28 | 802.71 | 796.54 | 800.63 | 799.63 |
| 805.00 | 0.3390 | 806.08 | 350.73 | 806.94 | 799.88 | 804.75 | 803.69 |
| 806.00 | 0.3559 | 810.20 | 372.74 | 811.10 | 803.21 | 808.81 | 807.70 |
| 820.00 | 0.3729 | 814.26 | 395.33 | 815.21 | 806.54 | 812.82 | 811.66 |
| 831.00 | 0.3898 | 818.28 | 418.54 | 819.26 | 809.87 | 816.80 | 815.60 |
| 831.80 | 0.4068 | 822.26 | 442.41 | 823.27 | 813.20 | 820.74 | 819.50 |
| 834.90 | 0.4237 | 826.21 | 466.97 | 827.25 | 816.56 | 824.66 | 823.39 |
| 837.60 | 0.4407 | 830.14 | 492.26 | 831.20 | 819.93 | 828.57 | 827.28 |
| 840.06 | 0.4576 | 834.06 | 518.33 | 835.14 | 823.33 | 832.47 | 831.15 |
| 842.00 | 0.4746 | 837.97 | 545.23 | 839.06 | 826.77 | 836.38 | 835.04 |
| 857.00 | 0.4915 | 841.89 | 573.01 | 842.99 | 830.25 | 840.29 | 838.94 |
| 865.51 | 0.5085 | 845.81 | 601.73 | 846.92 | 833.78 | 844.21 | 842.85 |
| 868.00 | 0.5254 | 849.75 | 631.46 | 850.86 | 837.37 | 848.16 | 846.80 |
| 874.00 | 0.5424 | 853.72 | 662.27 | 854.82 | 841.02 | 852.13 | 850.78 |
| 881.00 | 0.5593 | 857.71 | 694.25 | 858.80 | 844.75 | 856.15 | 854.80 |
| 883.54 | 0.5763 | 861.74 | 727.47 | 862.82 | 848.55 | 860.20 | 858.87 |
| 884.87 | 0.5932 | 865.82 | 762.06 | 866.89 | 852.45 | 864.31 | 863.00 |
| 885.90 | 0.6102 | 869.95 | 798.12 | 871.00 | 856.46 | 868.49 | 867.19 |
| 888.13 | 0.6271 | 874.15 | 835.78 | 875.17 | 860.58 | 872.73 | 871.47 |
| 889.00 | 0.6610 | 882.78 | 916.53 | 883.74 | 869.22 | 881.49 | 880.30 |
| 889.00 | 0.6610 | 882.78 | 916.53 | 883.74 | 869.22 | 881.49 | 880.30 |
| 890.00 | 0.6780 | 887.24 | 959.98 | 888.16 | 873.77 | 886.02 | 884.89 |
| 894.87 | 0.6949 | 891.82 | 1005.79 | 892.69 | 878.51 | 890.68 | 889.60 |
| 900.50 | 0.7119 | 896.52 | 1054.22 | 897.34 | 883.45 | 895.48 | 894.47 |
| 904.00 | 0.7288 | 901.37 | 1105.58 | 902.13 | 888.63 | 900.44 | 899.51 |
| 906.00 | 0.7458 | 906.40 | 1160.26 | 907.09 | 894.08 | 905.59 | 904.75 |
| 907.33 | 0.7627 | 911.62 | 1218.71 | 912.24 | 899.83 | 910.95 | 910.21 |
| 920.00 | 0.7797 | 917.08 | 1281.49 | 917.61 | 905.94 | 916.57 | 915.94 |
| 922.00 | 0.7966 | 922.80 | 1349.31 | 923.23 | 912.46 | 922.47 | 921.98 |
| 922.40 | 0.8136 | 928.85 | 1423.03 | 929.17 | 919.47 | 928.71 | 928.38 |
| 929.00 | 0.8305 | 935.27 | 1503.77 | 935.46 | 927.07 | 935.37 | 935.21 |
| 932.00 | 0.8475 | 942.15 | 1593.04 | 942.19 | 935.38 | 942.51 | 942.56 |
| 944.00 | 0.8644 | 949.59 | 1692.83 | 949.47 | 944.58 | 950.27 | 950.56 |
| 950.00 | 0.8814 | 957.75 | 1805.96 | 957.43 | 954.90 | 958.80 | 959.37 |
| 960.00 | 0.8983 | 966.84 | 1936.56 | 966.27 | 966.70 | 968.33 | 969.25 |
| 979.89 | 0.9153 | 977.17 | 2091.02 | 976.31 | 980.53 | 979.21 | 980.57 |
| 988.57 | 0.9322 | 989.29 | 2280.07 | 988.06 | 997.29 | 992.02 | 993.94 |
| 990.75 | 0.9492 | 1004.17 | 2523.80 | 1002.44 | 1018.70 | 1007.85 | 1010.53 |
| 1021.00 | 0.9661 | 1023.95 | 2867.32 | 1021.49 | 1048.59 | 1029.03 | 1032.86 |
| 1100.80 | 0.9831 | 1055.22 | 3454.57 | 1051.45 | 1099.25 | 1062.86 | 1068.82 |



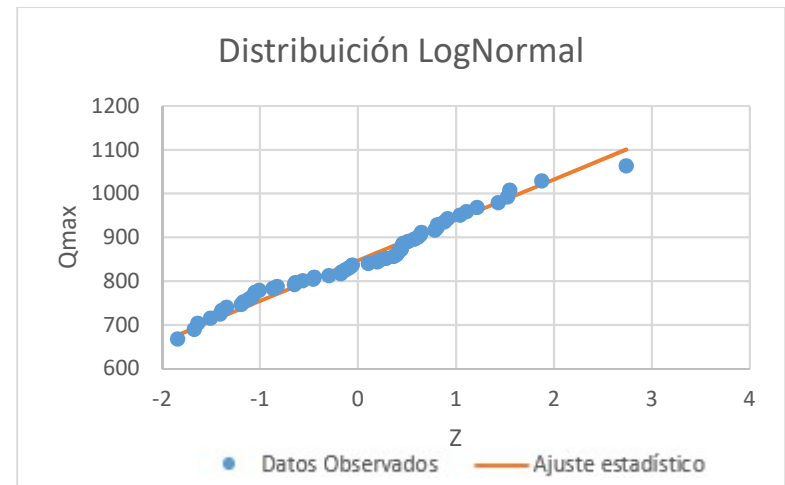
1)



2)



3)



4)

Figura 4-27 Distribución de los datos observados en comparación de los valores esperados (Pte. 1)

5)

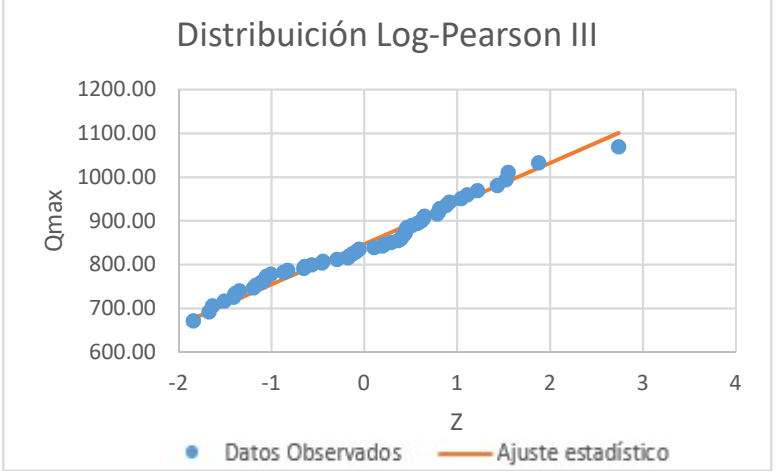


Figura 4-28 Distribución de los datos observados en comparación de los valores esperados (Pte. 2)

A continuación, se procede a realizar una prueba de eficiencia de ajuste por medio de la Raíz del error cuadrático (Ecuación 4-4).

$$RECM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}$$

Ecuación 4-4

Donde:

RECM: Raíz del error cuadrático medio

n: número de elementos de la muestra

x_i : Valor i observado

\hat{x}_i : Valor i esperado

Tabla 4-18 Valores $(x_i - \hat{x}_i)^2$ para la prueba de eficiencia de ajuste por raíz de error cuadrático medio

| Normal | Gamma | Exp | P. III | Gum. I | Log Norm | Log P.III |
|--------|--------|-----------|--------|--------|----------|-----------|
| 683.85 | 201.63 | 438929.13 | 329.08 | 735.12 | 91.72 | 33.55 |
| 205.90 | 39.38 | 439943.86 | 80.27 | 628.07 | 9.84 | 0.27 |
| 0.09 | 31.16 | 424826.58 | 13.06 | 946.91 | 61.67 | 95.73 |
| 1.13 | 29.37 | 420580.25 | 15.59 | 681.33 | 50.13 | 72.62 |
| 8.57 | 37.63 | 412278.08 | 25.39 | 539.94 | 53.67 | 70.39 |
| 120.40 | 175.98 | 393931.35 | 155.49 | 750.14 | 198.24 | 220.13 |
| 219.61 | 267.64 | 379457.85 | 249.99 | 779.98 | 284.24 | 301.37 |
| 69.89 | 85.87 | 376443.76 | 79.68 | 345.86 | 90.23 | 95.64 |
| 176.33 | 186.10 | 358529.05 | 181.75 | 440.27 | 186.14 | 188.60 |
| 216.23 | 213.03 | 344166.23 | 212.91 | 405.81 | 207.21 | 204.96 |
| 314.35 | 296.07 | 327398.84 | 300.67 | 446.41 | 283.18 | 275.56 |
| 667.82 | 606.56 | 290661.63 | 624.58 | 659.96 | 573.62 | 550.79 |
| 667.82 | 606.56 | 290661.63 | 624.58 | 659.96 | 573.62 | 550.79 |
| 725.22 | 646.50 | 275210.91 | 670.10 | 636.03 | 606.24 | 577.54 |
| 361.37 | 297.47 | 268811.18 | 316.62 | 251.64 | 266.66 | 244.66 |
| 392.92 | 317.84 | 253001.83 | 340.49 | 235.54 | 282.53 | 257.01 |
| 70.07 | 38.06 | 249174.06 | 47.10 | 7.10 | 25.59 | 17.65 |
| 144.57 | 92.85 | 230055.94 | 108.01 | 26.78 | 71.29 | 56.45 |
| 89.30 | 47.56 | 216896.43 | 59.44 | 2.37 | 31.71 | 21.48 |
| 14.29 | 1.16 | 206362.75 | 3.77 | 26.18 | 0.06 | 1.71 |
| 49.39 | 17.61 | 187718.33 | 26.06 | 7.76 | 7.89 | 2.89 |
| 7.81 | 32.96 | 180345.35 | 22.98 | 181.18 | 51.53 | 69.48 |
| 93.67 | 161.91 | 170121.55 | 137.87 | 446.57 | 201.76 | 237.28 |
| 41.11 | 91.06 | 151624.59 | 72.77 | 345.75 | 122.31 | 151.19 |
| 30.12 | 75.54 | 135374.11 | 58.57 | 336.47 | 104.81 | 132.39 |
| 17.58 | 55.58 | 119257.09 | 40.91 | 312.04 | 81.45 | 106.52 |
| 7.24 | 36.00 | 103510.10 | 24.24 | 279.74 | 57.57 | 79.30 |

Tabla 4-19 Valores $(x_i - \hat{x}_i)^2$ para la prueba de eficiencia de ajuste por raíz de error cuadrático medio

| Normal | Gamma | Exp | P. III | Gum. I | Log Norm | Log P.III |
|---------|---------|------------|---------|---------|----------|-----------|
| 0.47 | 16.21 | 88073.47 | 8.62 | 231.85 | 31.64 | 48.44 |
| 138.00 | 228.32 | 80651.21 | 196.34 | 715.35 | 279.39 | 326.26 |
| 266.31 | 387.74 | 69577.00 | 345.51 | 1006.21 | 453.49 | 513.06 |
| 221.33 | 332.93 | 55950.92 | 293.85 | 938.13 | 393.77 | 449.53 |
| 286.62 | 411.43 | 44828.79 | 367.96 | 1087.50 | 478.19 | 539.36 |
| 398.57 | 542.44 | 34876.97 | 492.67 | 1314.24 | 617.76 | 686.66 |
| 342.78 | 475.23 | 24356.66 | 429.19 | 1224.04 | 544.67 | 608.85 |
| 250.14 | 362.82 | 15081.56 | 323.29 | 1050.60 | 422.43 | 478.38 |
| 163.35 | 254.26 | 7705.45 | 221.95 | 866.78 | 303.12 | 349.90 |
| 118.61 | 195.29 | 2740.24 | 167.74 | 758.99 | 236.89 | 277.44 |
| 11.16 | 38.64 | 757.70 | 27.64 | 391.43 | 56.42 | 75.65 |
| 11.16 | 38.64 | 757.70 | 27.64 | 391.43 | 56.42 | 75.65 |
| 0.00 | 7.60 | 4897.62 | 3.38 | 263.40 | 15.82 | 26.14 |
| 0.20 | 9.31 | 12303.65 | 4.75 | 267.64 | 17.53 | 27.71 |
| 2.40 | 15.84 | 23628.47 | 9.98 | 290.62 | 25.19 | 36.33 |
| 0.15 | 6.89 | 40633.65 | 3.48 | 236.20 | 12.65 | 20.14 |
| 5.90 | 0.16 | 64646.20 | 1.19 | 142.16 | 0.17 | 1.56 |
| 36.97 | 18.42 | 96954.56 | 24.08 | 56.30 | 13.12 | 8.31 |
| 1.97 | 8.53 | 130677.91 | 5.72 | 197.76 | 11.79 | 16.46 |
| 4.06 | 0.65 | 182591.89 | 1.52 | 91.01 | 0.22 | 0.00 |
| 53.42 | 41.55 | 250625.85 | 45.77 | 8.57 | 39.85 | 35.71 |
| 45.35 | 39.28 | 330365.25 | 41.72 | 3.72 | 40.53 | 38.51 |
| 103.22 | 102.98 | 436970.66 | 103.89 | 11.45 | 110.55 | 111.49 |
| 25.80 | 31.30 | 560739.84 | 29.91 | 0.34 | 39.34 | 43.01 |
| 43.82 | 60.12 | 732660.72 | 55.17 | 24.05 | 77.43 | 87.86 |
| 24.66 | 46.77 | 953660.60 | 39.34 | 44.96 | 69.35 | 85.57 |
| 30.18 | 7.39 | 1234611.74 | 12.80 | 0.41 | 0.47 | 0.45 |
| 10.22 | 0.52 | 1667978.42 | 0.26 | 75.98 | 11.93 | 28.84 |
| 63.73 | 180.18 | 2350261.39 | 136.72 | 781.11 | 292.43 | 391.29 |
| 22.20 | 8.71 | 3408901.73 | 0.24 | 761.48 | 64.51 | 140.66 |
| 3273.05 | 2077.91 | 5540227.95 | 2435.20 | 2.40 | 1439.46 | 1022.70 |
| | | | | | | |
| RECM: | | | | | | |
| 13.99 | 13.54 | 670.74 | 13.57 | 20.49 | 13.60 | 13.88 |

Podemos apreciar que varias de la mayoría de las pruebas tienen resultados similares, sin embargo, la función Gamma fue la que en general tuvo un mejor desempeño, así que esta función es seleccionada, y los resultados pueden verse en la Tabla 4-20.

Tabla 4-20 Aproximaciones de caudal para diferentes tiempos de retorno utilizando la función Gamma como modelo probabilístico de ajuste

| Prob. De Ex. | Tr (años) | Qmax Esp. (m³/s) |
|---------------------|------------------|--|
| 0.0001 | 1.0001 | 545.32 |
| 0.0005 | 1.0005 | 575.29 |
| 0.001 | 1.0010 | 589.68 |
| 0.005 | 1.0050 | 627.77 |
| 0.01 | 1.0101 | 646.84 |
| 0.02 | 1.0204 | 668.12 |
| 0.05 | 1.0526 | 700.92 |
| 0.1 | 1.1111 | 730.96 |
| 0.2 | 1.2500 | 768.49 |
| 0.3 | 1.4286 | 796.34 |
| 0.5 | 2.0000 | 843.85 |
| 0.7 | 3.3333 | 893.21 |
| 0.8 | 5 | 923.98 |
| 0.9 | 10 | 967.81 |
| 0.95 | 20 | 1005.02 |
| 0.96 | 25 | 1016.03 |
| 0.98 | 50 | 1048.00 |
| 0.99 | 100 | 1077.32 |
| 0.995 | 200 | 1104.61 |
| 0.999 | 1000 | 1162.31 |
| 0.9995 | 2000 | 1185.29 |
| 0.9999 | 10000 | 1235.44 |

Ahora bien, como se mencionó en *3.3 Generación de hidrogramas sintéticos por el método de la SCS distribuidos a lo largo del eje del río principal*, el proceso de creación de hidrogramas sintéticos que puedan ser simulados dentro de HEC-RAS implica conocer datos de las subcuencas que le corresponden a cada estación ficticia. Utilizando las herramientas Integrated Water Management y las coordenadas mencionadas en la Tabla 4-5 se determinó el área tributaria de que corresponde a

cada estación ficticia (Ver Figura 3-13) junto con sus principales atributos, mismos que se resumen en la Tabla 4-21.

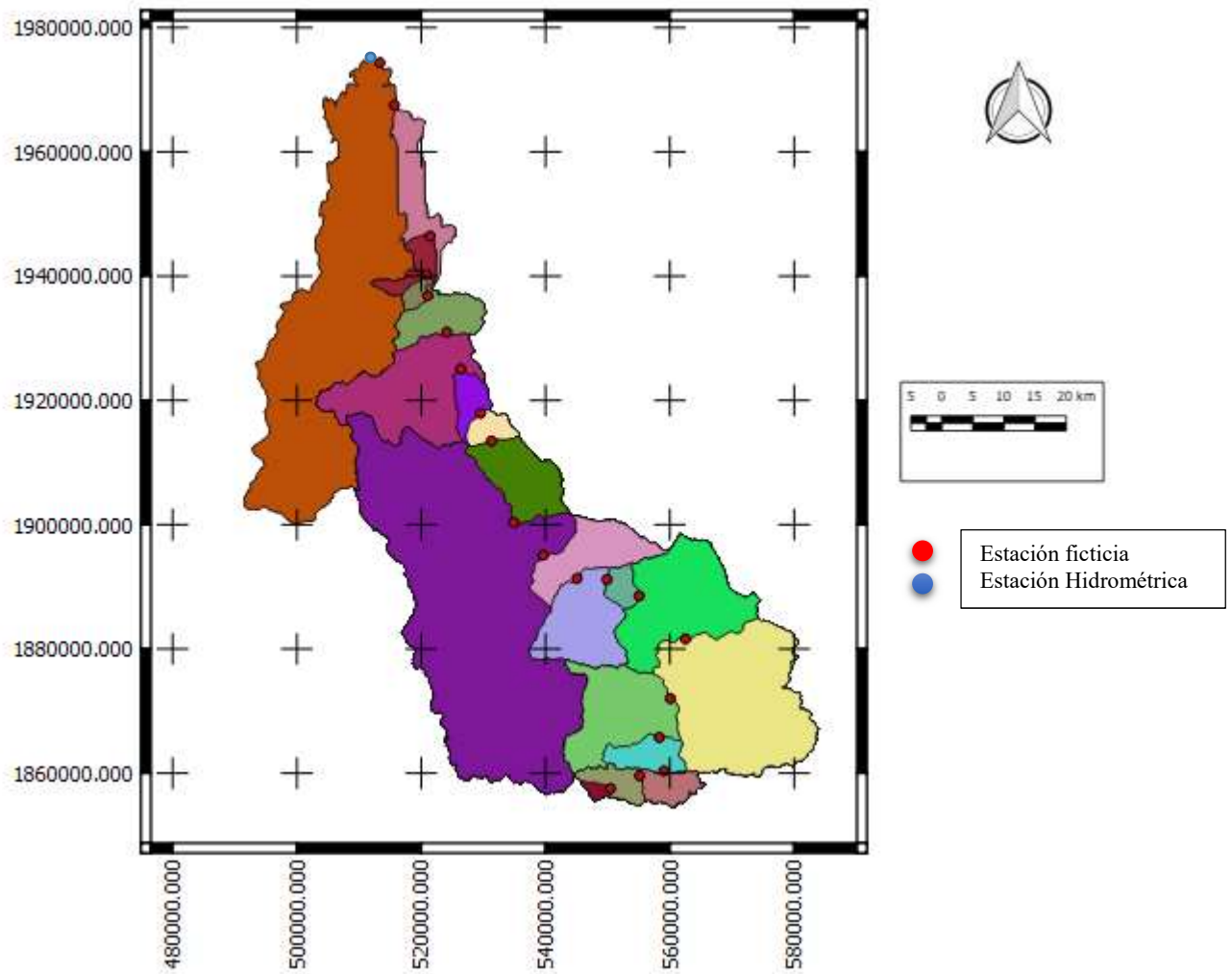


Figura 4-29 Subcuencas por estación ficticia

Tabla 4-21 Características de las subcuencas correspondientes a las estaciones ficticias

| PARÁMETRO | SUBCUENCA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Área (km ²) | 9.27 | 39.55 | 43.52 | 57.31 | 202.22 | 469.32 | 276.89 | 28.79 | 28.79 | 131.02 | 1247.36 | 129.28 | 31.92 | 40.77 | 266.41 | 84.91 | 16.06 | 40.23 | 102.24 | 978.41 |
| Perímetro (km) | 18.93 | 49.08 | 45.36 | 54.3 | 108.66 | 144.15 | 117.81 | 31.5 | 31.5 | 87.3 | 308.7 | 72.93 | 32.19 | 42.09 | 135.87 | 69.75 | 26.91 | 58.71 | 100.26 | 330.78 |
| Elevación media de la cuenca (msnm) | 2399.43 | 2260.39 | 2110.35 | 1878.74 | 1656.18 | 1273.47 | 1104.49 | 620.45 | 620.45 | 984.63 | 1337.75 | 740.2 | 751.85 | 394.94 | 586.41 | 273.85 | 96.68 | 34.02 | 14.17 | 450.04 |
| Pendiente media de la cuenca (°) | 19.6 | 20.33 | 18.73 | 16.57 | 18.77 | 17.38 | 20.1 | 22.45 | 22.45 | 19.73 | 20.56 | 21.09 | 26.69 | 21.33 | 22.36 | 20.17 | 9.67 | 3.9 | 1.02 | 14.13 |
| Pendiente media de la cuenca (%) | 38.06 | 39.55 | 36.66 | 31.53 | 35.78 | 32.97 | 38.67 | 46.63 | 46.63 | 37.58 | 58.64 | 41.82 | 54.52 | 42.46 | 44.27 | 40.23 | 19.07 | 7.38 | 1.84 | 28.11 |
| Coefficiente de compacidad | 1.75 | 2.2 | 1.94 | 2.02 | 2.15 | 1.88 | 2 | 1.66 | 1.66 | 2.15 | 2.46 | 1.81 | 1.61 | 1.86 | 2.35 | 2.13 | 1.89 | 2.61 | 2.8 | 2.98 |
| Relación de circularidad | 0.32 | 0.21 | 0.27 | 0.24 | 0.22 | 0.28 | 0.25 | 0.36 | 0.36 | 0.22 | 0.16 | 0.31 | 0.39 | 0.29 | 0.18 | 0.22 | 0.28 | 0.15 | 0.13 | 0.11 |
| Relación hipsométrica | 0.95 | 2.2 | 0.84 | 0.83 | 1.49 | 1.21 | 1.55 | 1.57 | 1.57 | 1.52 | 1.35 | 1.62 | 1.36 | 3.46 | 2.17 | -1 | 11.64 | -1 | 0.14 | -1 |
| Longitud del eje del río principal (km) | 5.74 | 13.54 | 10.44 | 12.34 | 27.17 | 41.88 | 36.2 | 9.96 | 9.96 | 23.99 | 66.73 | 21.06 | 9.96 | 14.95 | 47.2 | 18.72 | 9.52 | 22.01 | 39.96 | 124.99 |
| Longitud directa del río principal (km) | 4.71 | 10.07 | 4.31 | 9.27 | 17.31 | 23.32 | 13.07 | 5.8 | 5.8 | 17.67 | 41.76 | 15.69 | 6.54 | 11.74 | 22.11 | 9.61 | 6.42 | 10.94 | 21.86 | 68.92 |
| Coefficiente de sinuosidad hidráulico | 1.22 | 1.35 | 2.42 | 1.33 | 1.57 | 1.8 | 2.77 | 1.72 | 1.72 | 1.36 | 1.6 | 1.34 | 1.52 | 1.27 | 2.14 | 1.95 | 1.48 | 2.01 | 1.83 | 1.81 |
| Elevación máxima del río principal (msnm) | 2608 | 2714 | 2334.87 | 2199.31 | 2397.53 | 1630 | 1598 | 234.25 | 234.25 | 1711 | 2372 | 1177 | 1264 | 1471 | 1244 | 791 | 384.54 | 65 | -6.06 | 1294 |
| Elevación mínima del río principal (msnm) | 2134 | 1978 | 1521 | 1328.97 | 834 | 452.92 | 234.25 | 234.11 | 234.11 | 211.99 | 196.72 | 44.05 | 43.72 | 13.39 | 7.36 | -6.06 | 5.85 | -6.06 | -6.48 | -7.24 |
| Pendiente de media del río principal (%) | 11.63 | 7.69 | 11.21 | 9.74 | 8.39 | 4.09 | 5.47 | 0 | 0 | 8.88 | 5.12 | 7.21 | 15.82 | 13.75 | 3.91 | 5.9 | 4.88 | 0.51 | 0 | 1.6 |
| Tiempo de concentración de Kirpich (h) | 0.66 | 1.51 | 1.07 | 1.27 | 2.52 | 4.63 | 3.7 | 28.59 | 28.59 | 2.22 | 6.26 | 2.12 | 0.87 | 1.3 | 5.22 | 2.12 | 1.29 | 6.49 | 93.21 | 15.75 |
| Tiempo de concentración de California Highways and public works (h) | 0.67 | 1.51 | 1.08 | 1.28 | 2.53 | 4.66 | 3.72 | 28.75 | 28.75 | 2.23 | 6.3 | 2.14 | 0.87 | 1.3 | 5.25 | 2.13 | 1.3 | 6.53 | 93.71 | 15.84 |

Tabla 4-22 Lámina por exceso de precipitación sobre la cuenca por periodo de retorno

| Caudal Base | 124 M³/s | | | | |
|--------------------|----------------------------|----------------|-----------------------|-------------------|-------------------|
| T (años)r | Q (m³/s) | Q-Qbase | Vol. Esc. (m3) | Lámina (m) | Lámina(mm) |
| 5 | 923.9849 | 799.9849 | 69118697.9362 | 0.0158 | 15.8307 |
| 10 | 967.8091 | 843.8091 | 72905103.3783 | 0.0167 | 16.6979 |
| 20 | 1005.0160 | 881.0160 | 76119781.5127 | 0.0174 | 17.4342 |
| 25 | 1016.0288 | 892.0288 | 77071288.6668 | 0.0177 | 17.6521 |
| 50 | 1048.0026 | 924.0026 | 79833824.8049 | 0.0183 | 18.2848 |
| 100 | 1077.3192 | 953.3192 | 82366779.8069 | 0.0189 | 18.8649 |

Como se menciona en 3.4.1 *Simulación de caudales medios usando CEQUEau*, de la simulación de caudales realizada con CEQUEau se calcularon a lo largo del eje del río estaciones ficticias para estimar la forma en que el escurrimiento por exceso de precipitación de distribuye dentro de la cuenca. Utilizado los resultados de tal simulación, buscamos valores que se asemejen a los gastos máximos medios estimados, y se encuentran las distribuciones más apegadas posibles a los periodos de retorno considerados y promediando estas, se obtiene una distribución única (Ver Tabla 4-23) para el rango de escurrimiento considerado (Ver Tabla 4-22).

Tabla 4-23 Distribución acumulada de las aportaciones de las estaciones ficticias al Qmax medio diario esperado por periodo de retorno

| No. Est. Fic. | Tr | | | | | | Promedio |
|----------------------|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------|
| | 5 | 10 | 20 | 25 | 50 | 100 | |
| | %Qmax acumulado | | | | | | |
| 1 | 0.34% | 0.52% | 0.33% | 0.41% | 0.37% | 0.46% | 0.42% |
| 2 | 0.67% | 1.19% | 0.65% | 0.99% | 0.99% | 1.07% | 0.98% |
| 3 | 0.87% | 1.71% | 0.85% | 1.42% | 1.53% | 1.48% | 1.40% |
| 4 | 2.65% | 3.99% | 2.70% | 3.46% | 3.62% | 3.76% | 3.51% |
| 5 | 2.82% | 4.48% | 2.92% | 3.86% | 4.11% | 3.99% | 3.87% |
| 6 | 4.58% | 8.03% | 4.95% | 6.77% | 8.01% | 6.93% | 6.94% |
| 7 | 6.76% | 10.43% | 7.28% | 8.80% | 10.62% | 9.19% | 9.26% |
| 8 | 9.09% | 13.50% | 9.81% | 11.09% | 13.70% | 11.95% | 12.01% |
| 9 | 10.89% | 16.04% | 11.80% | 12.87% | 16.12% | 14.11% | 14.19% |
| 10 | 11.49% | 17.46% | 12.59% | 13.76% | 17.36% | 15.14% | 15.26% |
| 11 | 26.17% | 37.47% | 28.44% | 28.84% | 37.27% | 37.89% | 33.98% |
| 12 | 33.99% | 50.08% | 37.01% | 37.17% | 48.39% | 47.62% | 44.05% |
| 13 | 36.66% | 53.91% | 39.94% | 39.63% | 51.97% | 49.99% | 47.09% |
| 14 | 43.96% | 62.64% | 47.76% | 45.22% | 60.24% | 55.76% | 54.32% |
| 15 | 50.87% | 71.24% | 55.44% | 52.12% | 64.92% | 59.44% | 60.63% |
| 16 | 52.95% | 74.65% | 57.89% | 55.07% | 65.29% | 60.93% | 62.77% |
| 17 | 54.76% | 77.69% | 59.96% | 57.30% | 65.76% | 62.39% | 64.62% |
| 18 | 55.93% | 79.70% | 61.32% | 58.62% | 66.30% | 62.99% | 65.79% |
| 19 | 61.76% | 89.34% | 67.91% | 66.01% | 66.48% | 67.51% | 71.45% |
| 20 | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |

Para cada una de las estaciones ficticias se calcula el caudal que aporta al caudal total, ya que ese es el caudal con el que serán construidos sus hidrogramas. Por cuestiones de simulación, el caudal base

no se tomó en cuenta (porque debe ser ingresado por separado en los datos). Por esto, los caudales considerados fueron los que se muestran en la columna 3 de la Tabla 4-22 y su distribución se tabula en la Tabla 4-24.

Tabla 4-24 Caudales medios diarios aportados y lámina escurrida por cada estación ficticia por periodo de retorno (Restando el flujo base) (Pte. 1)

| Est Fic | Tr=5 | | Tr=10 | | Tr=20 | |
|---------|-----------------------|----------|-----------------------|----------|-----------------------|----------|
| | Q (m ³ /s) | Lam (mm) | Q (m ³ /s) | Lam (mm) | Q (m ³ /s) | Lam (mm) |
| 1 | 3.86 | 3.60 | 4.05 | 3.77 | 4.20 | 3.92 |
| 2 | 5.17 | 1.13 | 5.42 | 1.18 | 5.63 | 1.23 |
| 3 | 3.88 | 0.77 | 4.06 | 0.81 | 4.22 | 0.84 |
| 4 | 19.48 | 2.94 | 20.40 | 3.08 | 21.19 | 3.19 |
| 5 | 3.38 | 0.14 | 3.54 | 0.15 | 3.68 | 0.16 |
| 6 | 28.33 | 0.52 | 29.67 | 0.55 | 30.81 | 0.57 |
| 7 | 21.49 | 0.67 | 22.51 | 0.70 | 23.38 | 0.73 |
| 8 | 25.37 | 7.61 | 26.58 | 7.98 | 27.60 | 8.28 |
| 9 | 20.12 | 6.04 | 21.08 | 6.33 | 21.89 | 6.57 |
| 10 | 9.92 | 0.65 | 10.39 | 0.69 | 10.79 | 0.71 |
| 11 | 172.97 | 1.20 | 181.17 | 1.25 | 188.14 | 1.30 |
| 12 | 93.06 | 6.22 | 97.48 | 6.51 | 101.23 | 6.77 |
| 13 | 28.03 | 7.59 | 29.36 | 7.95 | 30.49 | 8.25 |
| 14 | 66.86 | 14.17 | 70.03 | 14.84 | 72.72 | 15.41 |
| 15 | 58.28 | 1.89 | 61.05 | 1.98 | 63.40 | 2.06 |
| 16 | 19.72 | 2.01 | 20.65 | 2.10 | 21.45 | 2.18 |
| 17 | 17.13 | 9.22 | 17.94 | 9.65 | 18.63 | 10.02 |
| 18 | 10.77 | 2.31 | 11.28 | 2.42 | 11.72 | 2.52 |
| 19 | 52.33 | 4.42 | 54.82 | 4.63 | 56.92 | 4.81 |
| 20 | 263.80 | 2.33 | 276.31 | 2.44 | 286.93 | 2.53 |

Como se mencionó en **3.3 Generación de hidrogramas sintéticos por el método de la SCS distribuidos a lo largo del eje del río principal**, el marco de referencia de tiempo debe ser considerado en la desembocadura. Por tanto, se debe que determinar en qué momento “comienza” la aportación de cada estación ficticia, que como se explica en ese mismo capítulo es necesario conocer tanto el tiempo de concentración local de cada subcuena, así como el tiempo de escurrimiento sobre el río principal. Tales valores (obtenidos apoyándonos con el programa HEC-RAS) se tabulan en la Tabla 4-26. Este tiempo de concentración total para cada subcuena es el tiempo que tarda esa subcuena en su totalidad en aportar caudal a la desembocadura de la cuenca.

Tabla 4-25 Caudales medios diarios aportados y lámina escurrida por cada estación ficticia por periodo de retorno (Restando el flujo base) (Pte. 2)

| Est. Fic | Tr=25 | | Tr=50 | | Tr=100 | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Q (m3/s) | Lam (mm) | Q (m3/s) | Lam (mm) | Q (m3/s) | Lam (mm) |
| 1 | 4.25 | 3.96 | 4.38 | 4.08 | 4.50 | 4.20 |
| 2 | 5.69 | 1.24 | 5.87 | 1.28 | 6.03 | 1.32 |
| 3 | 4.27 | 0.85 | 4.40 | 0.87 | 4.52 | 0.90 |
| 4 | 21.42 | 3.23 | 22.09 | 3.33 | 22.71 | 3.42 |
| 5 | 3.72 | 0.16 | 3.84 | 0.16 | 3.94 | 0.17 |
| 6 | 31.15 | 0.57 | 32.13 | 0.59 | 33.03 | 0.61 |
| 7 | 23.63 | 0.74 | 24.38 | 0.76 | 25.06 | 0.78 |
| 8 | 27.90 | 8.37 | 28.78 | 8.64 | 29.58 | 8.88 |
| 9 | 22.13 | 6.64 | 22.83 | 6.85 | 23.46 | 7.04 |
| 10 | 10.91 | 0.72 | 11.26 | 0.74 | 11.57 | 0.76 |
| 11 | 190.20 | 1.32 | 196.19 | 1.36 | 201.67 | 1.40 |
| 12 | 102.33 | 6.84 | 105.55 | 7.05 | 108.51 | 7.25 |
| 13 | 30.83 | 8.34 | 31.80 | 8.61 | 32.69 | 8.85 |
| 14 | 73.52 | 15.58 | 75.83 | 16.07 | 77.95 | 16.52 |
| 15 | 64.09 | 2.08 | 66.11 | 2.14 | 67.96 | 2.20 |
| 16 | 21.68 | 2.21 | 22.36 | 2.28 | 22.99 | 2.34 |
| 17 | 18.84 | 10.13 | 19.43 | 10.45 | 19.97 | 10.75 |
| 18 | 11.85 | 2.54 | 12.22 | 2.62 | 12.56 | 2.70 |
| 19 | 57.55 | 4.86 | 59.36 | 5.02 | 61.02 | 5.16 |
| 20 | 290.08 | 2.56 | 299.20 | 2.64 | 307.57 | 2.72 |

En algunas de las subcuencas se presentaron casos especiales en los que el río principal de la subcuenca es el fragmento del río principal de la cuenca general (se puede ver el ejemplo de esto en la Figura 4-30). Para estos casos la fórmula de Kirpich arroja valores desproporcionados (Pueden verificarse en la Tabla 4-21) así que se optó por no utilizarlos y utilizar el tiempo de escurrimiento del tramo del río principal.

Ahora, utilizando las fórmulas descritas en **2.9 Hidrograma sintético de la SCS**, se estiman para cada estación ficticia los valores de T_p y q_p .

Tabla 4-26 Tiempo de concentración total para las estaciones ficticias

| No. Est. Fic. | Tc local (Hrs.) | T esc. (Hrs.) | TcTotal |
|---------------|-----------------|---------------|------------|
| 1 | 0.66 | 27.375 | 28.0350933 |
| 2 | 1.51 | 27.080 | 28.5904618 |
| 3 | 1.07 | 26.775 | 27.8447025 |
| 4 | 1.27 | 26.591 | 27.8605968 |
| 5 | 2.52 | 25.655 | 28.1746864 |
| 6 | 4.63 | 23.528 | 28.1584386 |
| 7 | 3.7 | 22.671 | 26.3708182 |
| 8 | 0.65 | 22.020 | 22.6700066 |
| 9 | 2.35 | 20.566 | 22.9157204 |
| 10 | 2.22 | 19.862 | 22.0815264 |
| 11 | 6.26 | 18.034 | 24.2935835 |
| 12 | 2.12 | 16.558 | 18.6778335 |
| 13 | 0.87 | 16.176 | 17.0461618 |
| 14 | 1.3 | 15.249 | 16.5492359 |
| 15 | 5.22 | 13.243 | 18.4629309 |
| 16 | 2.12 | 11.758 | 13.8778086 |
| 17 | 1.29 | 11.300 | 12.5901766 |
| 18 | 6.49 | 7.796 | 14.2859654 |
| 19 | 6.116 | 1.680 | 7.7959238 |
| 20 | 15.75 | 0.000 | 15.75 |

Calculado con la fórmula de Manning

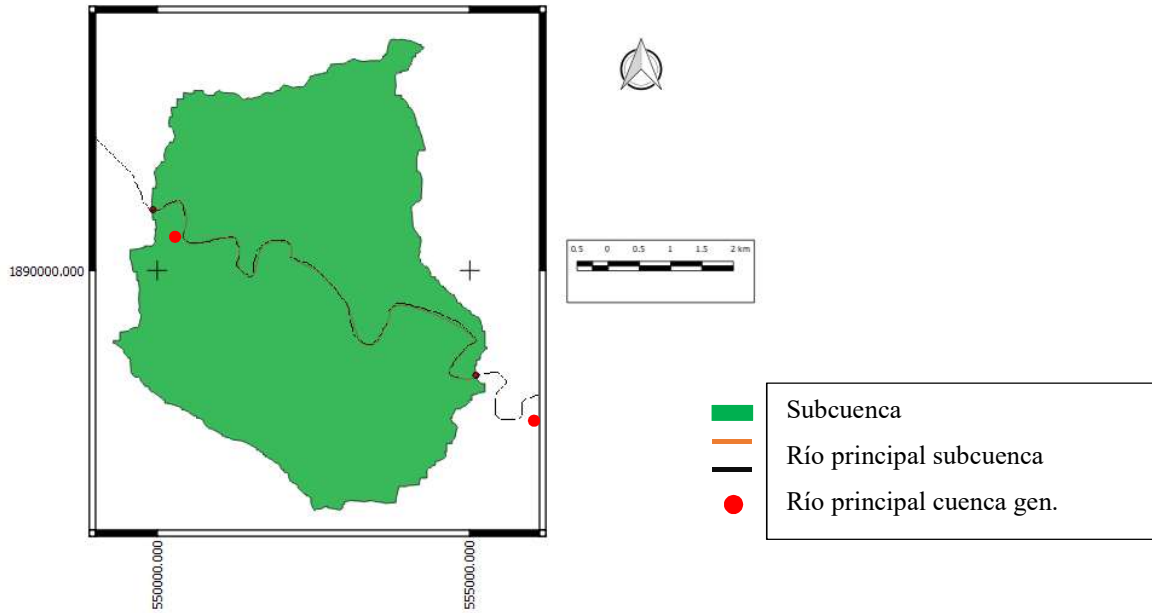


Figura 4-30 Subcuenca de la estación ficticia 8, con detalle del río principal de la subcuenca y de la cuenca general

Tabla 4-27 Factores de forma para el hidrograma sintético de la SCS por estación ficticia

| No. Est. Fic. | Tp | qp |
|---------------|--------|---------|
| 1 | 18.696 | 1.027 |
| 2 | 19.029 | 4.323 |
| 3 | 18.582 | 4.871 |
| 4 | 18.592 | 6.412 |
| 5 | 18.780 | 22.397 |
| 6 | 18.770 | 52.007 |
| 7 | 17.698 | 32.543 |
| 8 | 15.477 | 3.869 |
| 9 | 15.625 | 22.008 |
| 10 | 15.124 | 18.019 |
| 11 | 16.451 | 157.708 |
| 12 | 13.082 | 20.555 |
| 13 | 12.103 | 5.486 |
| 14 | 11.805 | 7.184 |
| 15 | 12.953 | 42.829 |
| 16 | 10.202 | 17.312 |
| 17 | 9.429 | 3.543 |
| 18 | 10.447 | 8.010 |
| 19 | 6.553 | 32.454 |
| 20 | 11.325 | 179.697 |

Con éstos datos es posible determinar el hidrograma de las subcuencas, considerando un escurrimiento esta hasta la desembocadura (es decir, el hidrograma producido por la subcuenca, si se midiera en la desembocadura), en su marco de tiempo local (Un ejemplo es el tabulado en Tabla 4-28 y mostrado en la Figura 4-31) . Como paso final, se modifica el marco de referencia de tiempo al de la desembocadura, haciendo que el escurrimiento comience con un retraso igual al tiempo de escurrimiento desde la estación ficticia hasta la desembocadura, que puede verse en la Tabla 4-26.

Tabla 4-28 Hidrograma sintético para un Tr=5 años de la estación ficticia 1

| Tp (hrs) | Q (m³/s) |
|------------------|-----------------------------|
| 0.00 | 0.00 |
| 3.74 | 0.20 |
| 7.48 | 0.73 |
| 11.22 | 1.57 |
| 14.96 | 2.33 |
| 18.70 | 2.61 |
| 22.44 | 2.40 |
| 26.17 | 1.96 |
| 29.91 | 1.46 |
| 33.65 | 1.10 |
| 37.39 | 0.84 |
| 41.13 | 0.63 |
| 44.87 | 0.47 |
| 48.61 | 0.34 |
| 52.35 | 0.26 |
| 56.09 | 0.20 |
| 65.44 | 0.09 |
| 74.78 | 0.05 |
| 84.13 | 0.02 |
| 93.48 | 0.01 |

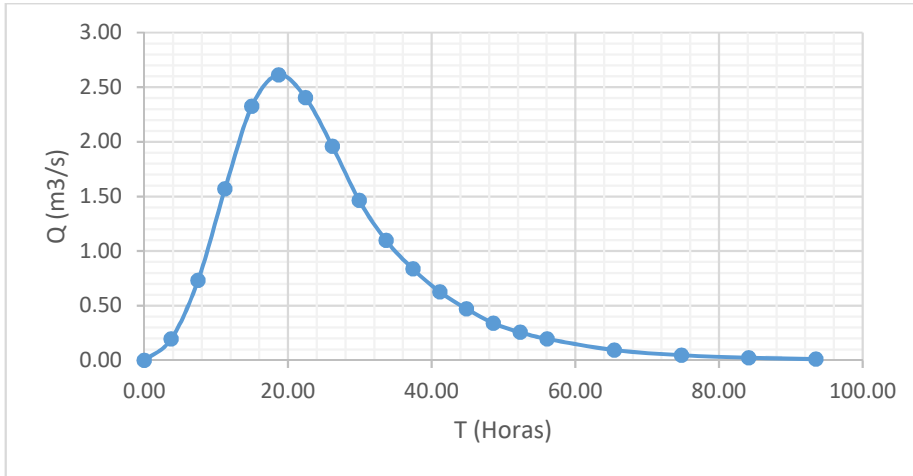
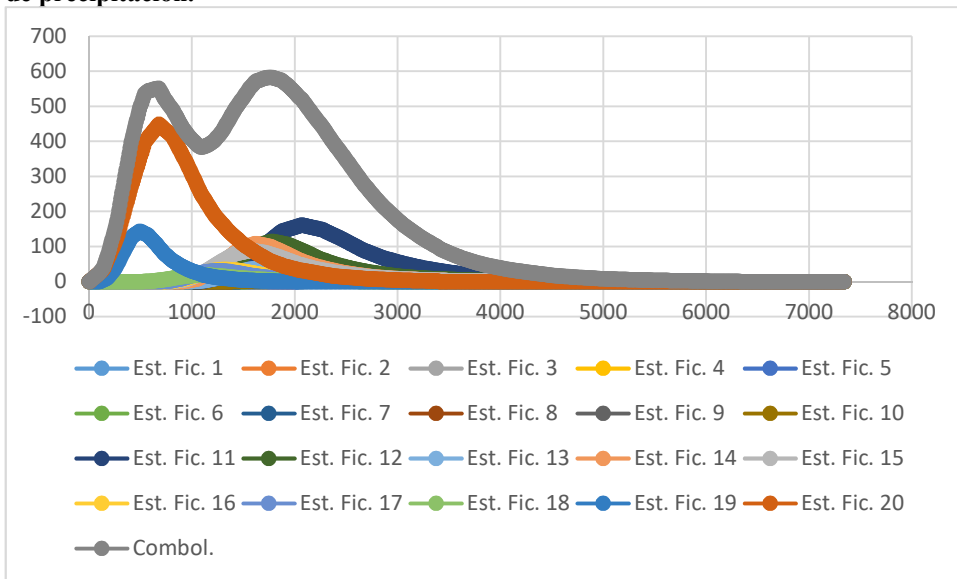


Figura 4-31 Hidrograma sintético de la estación ficticia 1, para Tr=5 años

Una vez determinados para cada estación, para realizar la convolución (dado que tienen pasos de tiempo que no empatan) se elaboró la herramienta EXTHID (Ver 6.1.21 EXTHID), que cambia el paso de tiempo de los hidrogramas interpolando linealmente para que puedan unirse con facilidad (Ver Figura 4-32).

Figura 4-32 Hidrogramas por estación ficticia y su convolución para Tr=5, correspondientes a un día de precipitación.



Se repite este proceso para los periodos de retorno considerados, y se obtienen los hidrogramas por convolución que se muestran en la Figura 4-33.

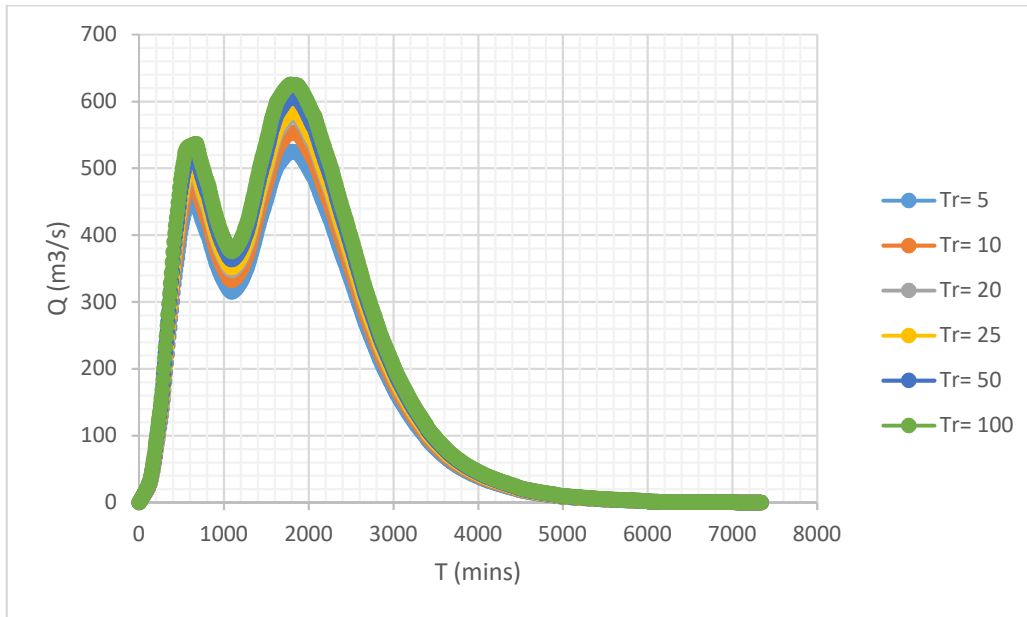


Figura 4-33 Convoluciones de los hidrogramas de las estaciones ficticias por periodo de retorno

Analizando los datos de las convoluciones, determinamos los caudales pico para cada uno de los periodos de retorno, que se enlistan en la Tabla 4-29. En el análisis de la gráfica de caudales instantáneos se observa que en tormentas aisladas, el comportamiento de la cuenca es similar al de los hidrogramas mostrados en la Figura 4-33, un ejemplo de esto puede verse en la Figura 4-34.

Tabla 4-29 Caudales pico por hidrograma compuesto

| T (años)r | Qpico (m3/s) |
|-----------|-----------------|
| 5 | 525.01 |
| 10 | 553.81 |
| 20 | 578.21 |
| 25 | 585.41 |
| 50 | 606.33 |
| 100 | 625.67 |

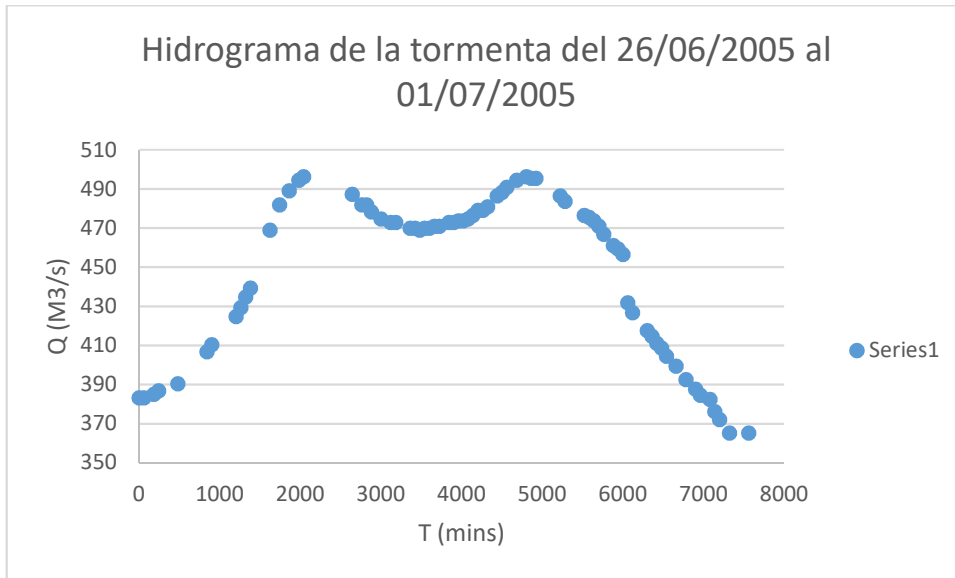


Figura 4-34 Ejemplo de hidrograma para tormentas aisladas observadas

4.4 Simulaciones 1D

Las simulaciones 1D se realizan conforme a lo establecido en **3.4.2 Simulación hidrodinámica de avenidas en 1D usando HEC-RAS**.

Para esto, necesitamos obtener secciones transversales acordes a la zona de estudio. Para esto, nos servimos de las herramientas elaboradas MAPMANNING, SECTRASLAPE y EXPGEO (Ver 6.1.10 MAPMANNING, 6.1.6 SECTRASLAPE, 6.1.14 EXPORTGEO)

MAPMANNING, sirve para importar un ráster de uso de suelo y cambiar las claves de uso de suelo por el valor del coeficiente n de Manning que les corresponde, tomando éstos datos de un archivo de texto proporcionado al programa (en una columna el valor de la clave, en la segunda el valor del valor de n, separados por un tabulador, Figura 4-35). Se escogió este formato porque es el estándar al copiar y pegar desde Excel) y referenciando cada coordenada matricial con su respectivo rango de coordenadas UTM (Ver los diagramas de flujo de la Figura 3-10 a la Figura 3-12).



Figura 4-35 Ejemplo de archivo de texto para la conversión de la matriz de claves de uso de suelo por su respectivo valor n

SECTRASLAPE sirve para seccionar a lo largo del eje del río proporcionando un espaciado mínimo entre secciones y la longitud de éstas, verificando que no existan colisiones entre secciones, y agregando datos a la matriz de secciones como el coeficiente de Manning, la posición de los puntos de bancos y diques, y las coordenadas en formato HEC-RAS.

EXPGeo sirve para exportar los datos de las secciones transversales a un formato *.GEO como lo requiere HEC-RAS. Para realizar la conversión del ráster de uso de suelo a n de Manning, se utilizan los valores medios propuestos por Manning (1994) y empatados con las claves de uso de suelo usados (los datos fueron obtenidos de CONABIO, como se mencionó en **3.2.4 Datos de uso de suelo**, optando por la capa denominada “Cobertura del suelo de México a 30 metros, 2010”, que se puede ver en la Figura 4-36), mostrados en la Tabla 4-30.

Tabla 4-30 Coeficientes de rugosidad de Manning para las claves de uso de suelo

| Clave | Descripción | n | Fuente* |
|-------|--|-------|---------|
| 1 | Bosque de coníferas templado o subpolar | 0.1 | D-2.d.4 |
| 2 | Bosque de coníferas (taiga) subpolar | 0.1 | D-2.d.4 |
| 3 | Bosque de latifoliadas perennifolio tropical o subtropical | 0.1 | D-2.d.4 |
| 4 | Bosque de latifoliadas caducifolio tropical o subtropical | 0.1 | D-2.d.4 |
| 5 | Bosque de latifoliadas caducifolio templado o subpolar | 0.1 | D-2.d.4 |
| 6 | Bosque mixto | 0.1 | D-2.d.4 |
| 7 | Matorral tropical o subtropical | 0.07 | D-2.c.4 |
| 8 | Matorral templado o subpolar | 0.07 | D-2.c.4 |
| 9 | Pastizal tropical o subtropical | 0.035 | D-2.a.2 |
| 10 | Pastizal templado o subpolar | 0.035 | D-2.a.2 |
| 11 | Matorral con líquenes y musgos subpolar o polar | 0.05 | D-2.c.2 |
| 12 | Pastizal con líquenes y musgos subpolar o polar | 0.035 | D-2.a.2 |
| 13 | Suelo desnudo con líquenes y musgos subpolar o polar | 0.04 | D-3.a |
| 14 | Humedal | 0.08 | C.e.1 |
| 15 | Suelo agrícola | 0.04 | D-2.b.3 |
| 16 | Suelo desnudo | 0.04 | D-2.c.2 |
| 17 | Asentamiento humano | 0.016 | B-2.i.2 |
| 18 | Cuerpo de agua | 0.035 | D-3.b |
| 19 | Nieve y hielo | 0.01 | A-2.b |

* Sección de la tabla 5.6 de Chow (1994) de la que se tomó el valor *n*.

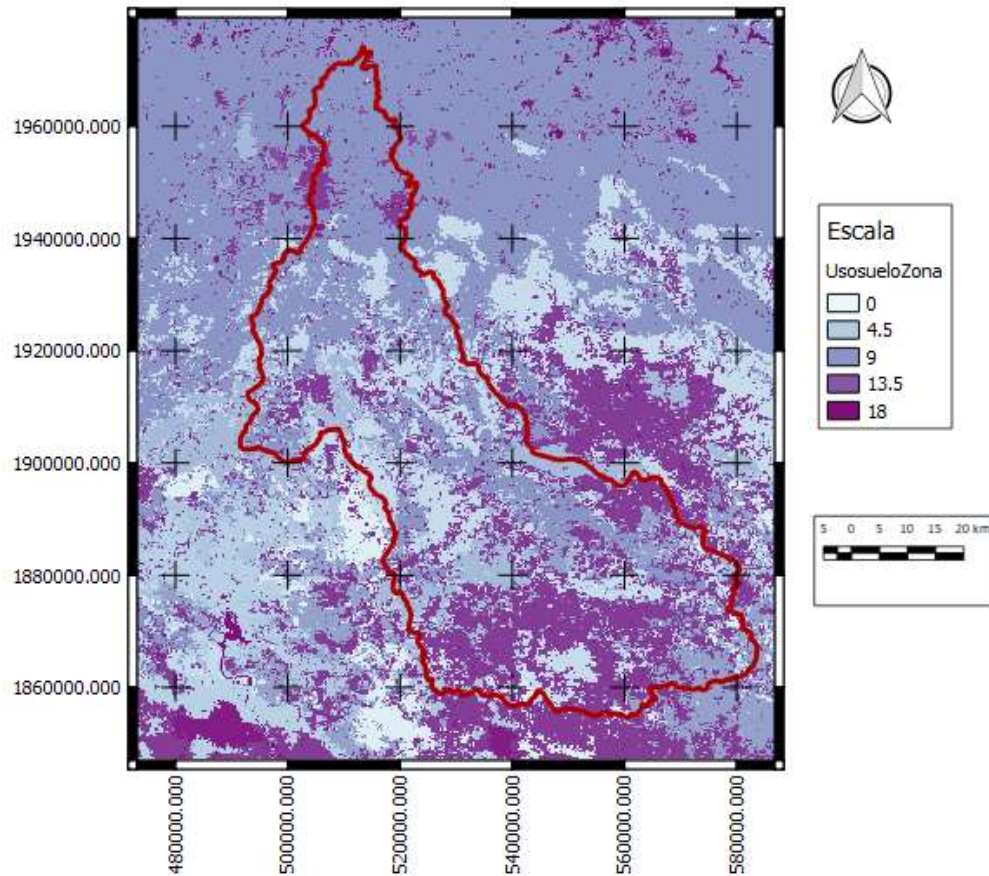


Figura 4-36 Distribución de uso de suelo en la zona de estudio

La función SECTRASLAPE usa el algoritmo descrito en la Figura 4-13 al mismo tiempo en las matrices de elevación y de uso de suelo, de forma que, para cada coordenada matricial, tenemos un valor de elevación y uno de n de Manning. Además, hace uso de la función BANYDIQS, para determinar los puntos de banco y dique, de forma que de los puntos que tenemos para cada sección, podamos diferenciar cuales pertenecen al canal principal y cuales a los bancos. Esto es con el fin de determinar el coeficiente n de Manning compuesto para cada una de estas secciones, usando cada punto de la sección como una subdivisión, dentro de la Ecuación 4-5.

$$n_c = \frac{\sum_{i=1}^N P_i n_i^{1.5^{2/3}}}{P} \quad \text{Ecuación 4-5}$$

Donde:

n_c : coeficiente de Manning compuesto

N : número de subdivisiones de cada sección del río

- Pi: Perímetro mojado para la subdivisión i de la sección
ni: Coeficiente n de Manning para la subdivisión i de la sección
P: Perímetro mojado total de la sección del río

Para la función EXPGEO, exportamos los datos calculados y obtenidos para cada sección a un archivo de texto que tiene la estructura mostrada en la Figura 4-37. La estructura detallada de los archivos puntos geo puede verse en el Anexo 6.2 Estructura de archivos *.geo)

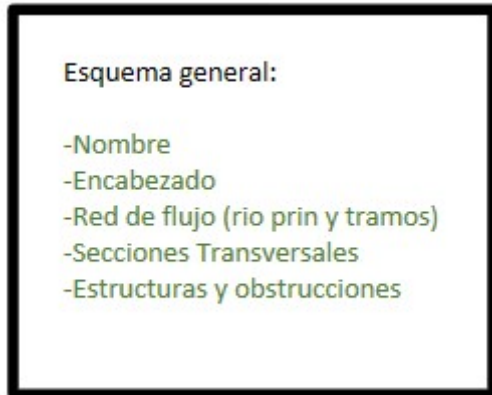


Figura 4-37 Esquema de la estructuración de un archivo *.geo

El archivo *.geo puede importarse directamente a HEC-RAS mediante la opción: importar formato GIS.

En cuanto a los caudales a transitar son los obtenidos por el método de la SCS, mostrados en la Tabla 4-29, son divididos de acuerdo a la distribución señalada en la Tabla 4-23 y se agrega a cada uno el caudal base. Pueden verse en la Tabla 4-31 la distribución empleada para la simulación 1D.

Tabla 4-31 Caudales pico (en m³/s) distribuidos por estación ficticia y periodo de retorno

| No. Est. Fic. | Tr=5 años | Tr=10 años | Tr=20 años | Tr=25 años | Tr=50 años | Tr=100 años |
|---------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| 1 | 127.22 | 127.37 | 127.56 | 127.56 | 127.75 | 127.80 |
| 2 | 131.51 | 131.87 | 132.13 | 132.26 | 132.65 | 132.85 |
| 3 | 134.67 | 135.24 | 135.73 | 135.86 | 136.31 | 136.69 |
| 4 | 150.76 | 152.29 | 153.55 | 153.92 | 154.97 | 155.95 |
| 5 | 153.59 | 155.15 | 156.56 | 156.88 | 158.09 | 159.21 |
| 6 | 175.63 | 178.43 | 180.82 | 181.55 | 183.62 | 185.45 |
| 7 | 192.65 | 196.38 | 199.59 | 200.58 | 203.31 | 205.85 |
| 8 | 213.80 | 218.62 | 222.86 | 224.10 | 227.65 | 230.90 |
| 9 | 229.82 | 235.59 | 240.47 | 241.99 | 246.18 | 250.03 |
| 10 | 237.65 | 243.84 | 249.13 | 250.75 | 255.22 | 259.41 |
| 11 | 383.09 | 397.30 | 409.37 | 412.88 | 423.29 | 432.77 |
| 12 | 460.86 | 479.36 | 495.06 | 499.67 | 513.13 | 525.43 |
| 13 | 484.06 | 503.77 | 520.51 | 525.44 | 539.88 | 553.09 |
| 14 | 535.91 | 558.52 | 577.68 | 583.31 | 599.76 | 614.92 |
| 15 | 585.80 | 611.14 | 632.62 | 638.93 | 657.46 | 674.37 |
| 16 | 596.81 | 622.70 | 644.67 | 651.18 | 670.19 | 687.42 |
| 17 | 604.59 | 630.96 | 653.30 | 659.89 | 679.06 | 696.74 |
| 18 | 608.29 | 634.84 | 657.36 | 663.99 | 683.34 | 701.15 |
| 19 | 609.40 | 636.01 | 658.59 | 665.24 | 684.61 | 702.48 |
| 20 | 649.01 | 677.81 | 702.21 | 709.41 | 730.33 | 749.67 |

Los resultados obtenidos demuestran que para el escurrimiento calculado para un periodo de retorno de hasta cien años (Ver Tabla 4-31) no existe desbordamiento importante en el canal del río (Ver Figura 4-38).

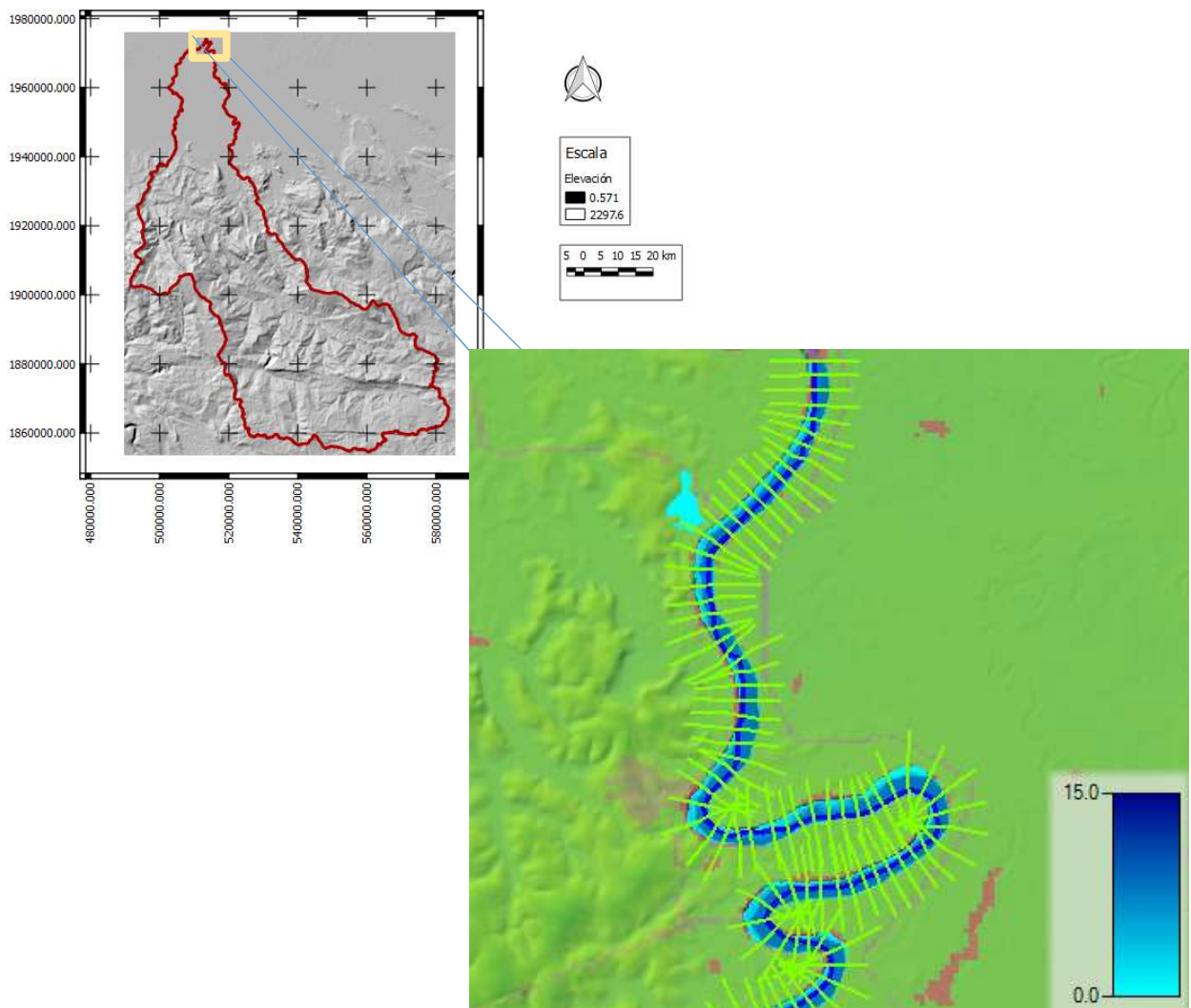


Figura 4-38 Situación de la superficie de agua para un $Tr=100$ años para simulación en modelo 1D

Ya que en tal caso no resulta relevante comparar la extensión de la planicie de inundación entre los métodos 1D y 2D de simulación, determinamos las elevaciones de la superficie de agua en la desembocadura de la cuenca (Ver Figura 4-39) a través del tiempo para poder llevar a cabo la comparación respecto al modelo 2D.

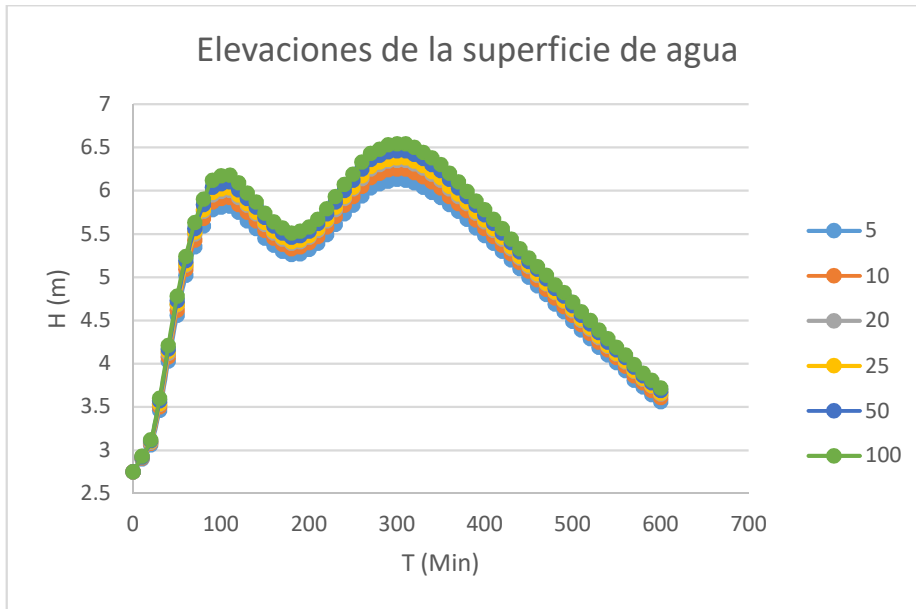


Figura 4-39 Elevaciones de la superficie del agua determinadas por modelación 1D en la desembocadura de la cuenca.

4.5 Simulaciones 2D

Para las simulaciones 2D es necesario realizar un mallado sobre la superficie de estudio (Ver

Figura 4-40). El procedimiento para el trazado de esta malla puede realizarse manualmente, por medio de coordenadas o por una combinación de ambas.

Es recomendable usar la simulación 1D inicial como punto de referencia, para evitar los problemas que se ilustra en la Figura 3-18 y la Figura 3-19 al dimensionar inadecuadamente la malla. De esta forma, en las secciones donde el río no es susceptible a inundaciones, la malla puede ser más estrecha, apegándose al cauce del río. Mientras que, en zonas con zonas de inundación, el área de la malla debe ampliarse.

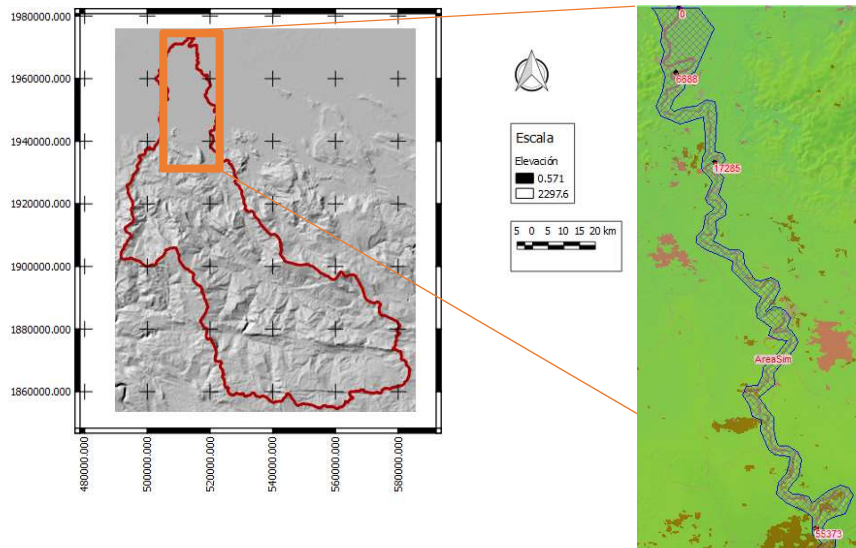


Figura 4-40 Mallado sobre la zona de estudio

Es necesario de igual forma importar los datos de uso de suelo, procesados de acuerdo con el algoritmo descrito en la Figura 3-11 con los valores de la Tabla 4-30, con los datos que han sido determinados para este propósito en *4.4 Simulaciones 1D*.

Los datos son ingresados dentro del sistema 2D mediante celdas en la malla 2D, como se describe en *3.4.3 Simulaciones hidrodinámicas de avenidas en 2D usando HEC-RAS* (Ver Figura 4-41) , ingresando los hidrogramas para cada estación ficticia y periodo de retorno que fueron calculados de acuerdo con *4.3 Hidrogramas sintéticos por el método de la SCS* (Ver Figura 4-32).

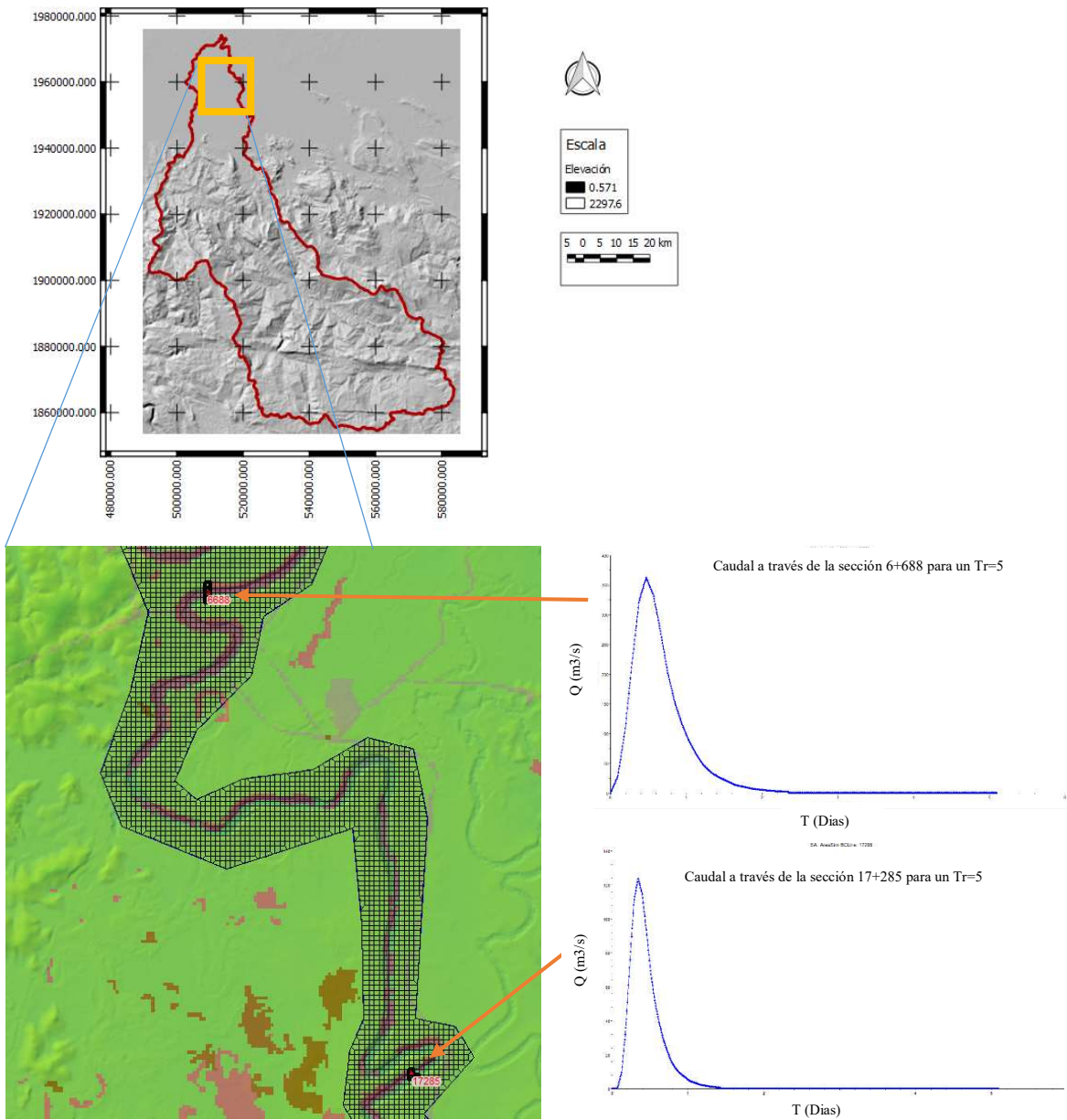


Figura 4-41 Ingreso de información hidrométrica al sistema 2D

Los datos de la elevación de la superficie del agua en la desembocadura de la cuenca se grafican en la Figura 4-43.

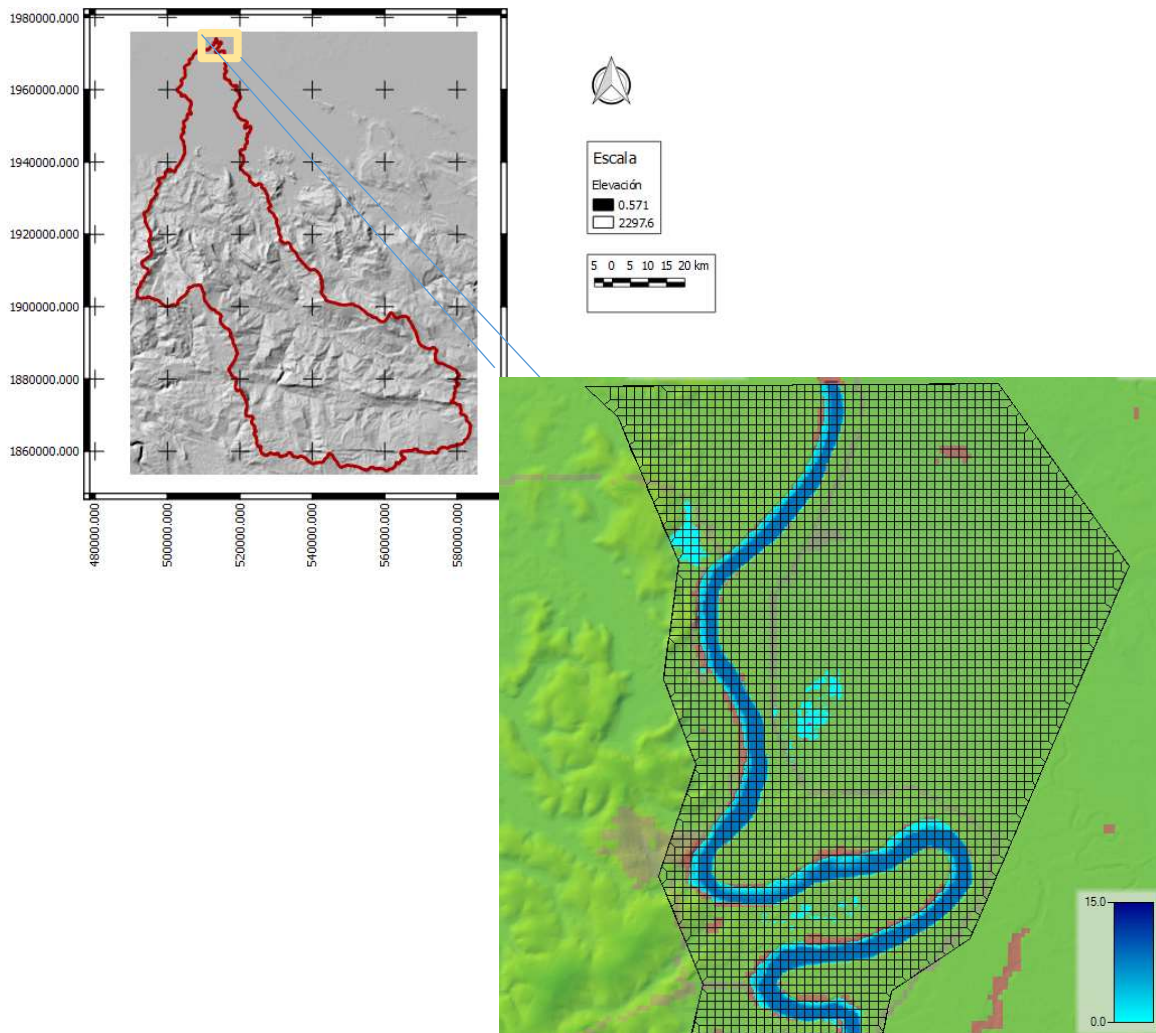


Figura 4-42 Situación de la superficie de agua para un $Tr=100$ años para simulación en modelo 2D

Los resultados obtenidos demuestran que para el escurrimiento calculado para un periodo de retorno de hasta cien años (Ver Tabla 4-31) no existe desbordamiento importante en el canal del río (Ver **Figura 4-42**).

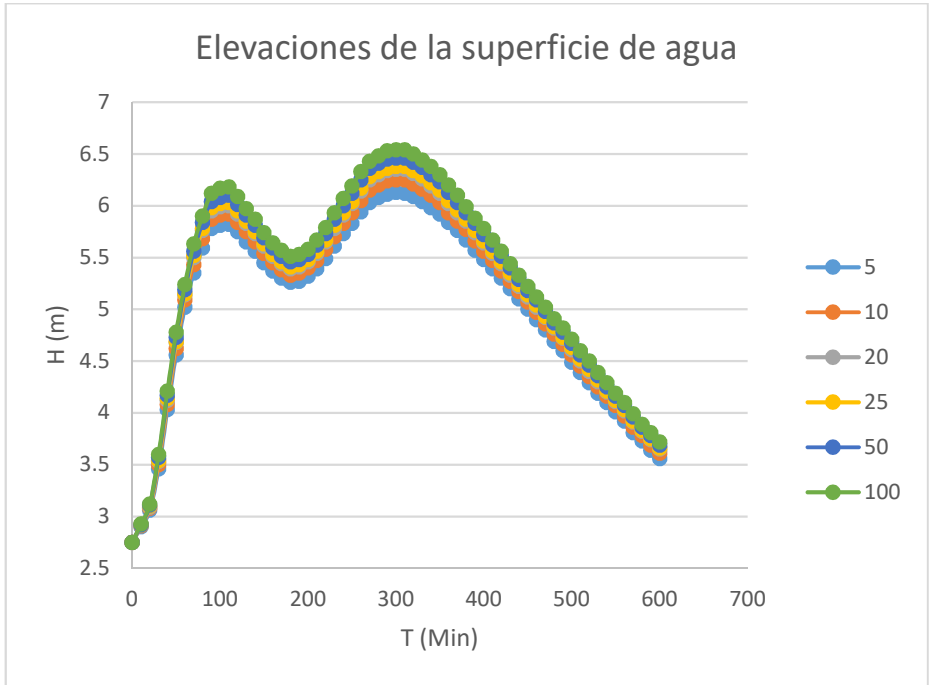


Figura 4-43 Elevaciones de la superficie del agua determinadas por modelación 2D en la desembocadura de la cuenca por periodo de retorno.

4.6 Comparación de resultados de las simulaciones 1D y 2D

Comparando los flujos y las elevaciones entre las simulaciones 1D y 2D obtenemos la Figura 4-44

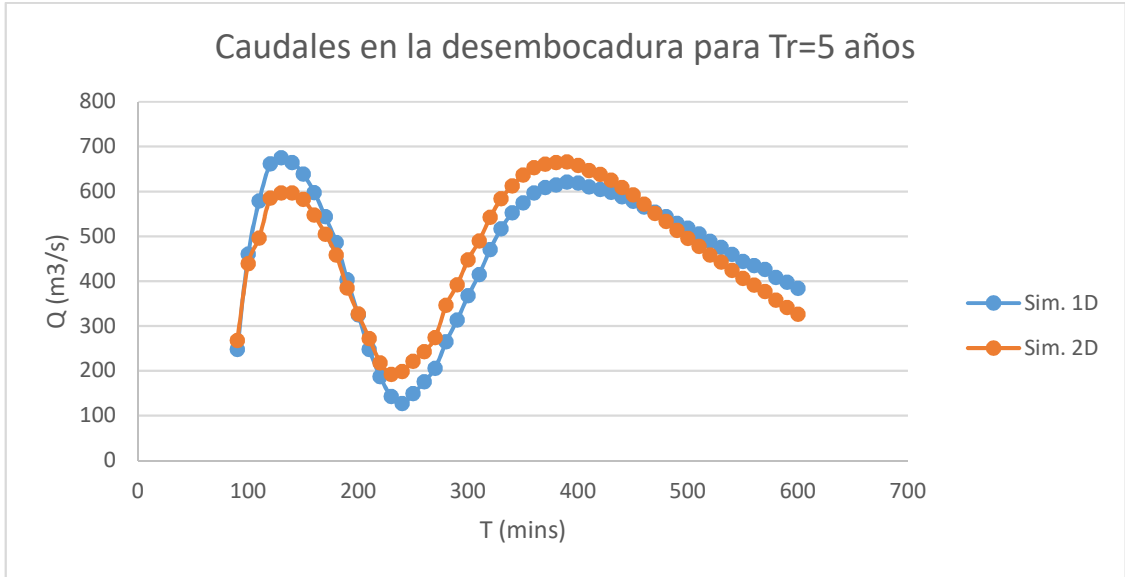


Figura 4-44 Caudal a través de la desembocadura de la cuenca, calculados con modelos 1D y 2D para $Tr=5$ años

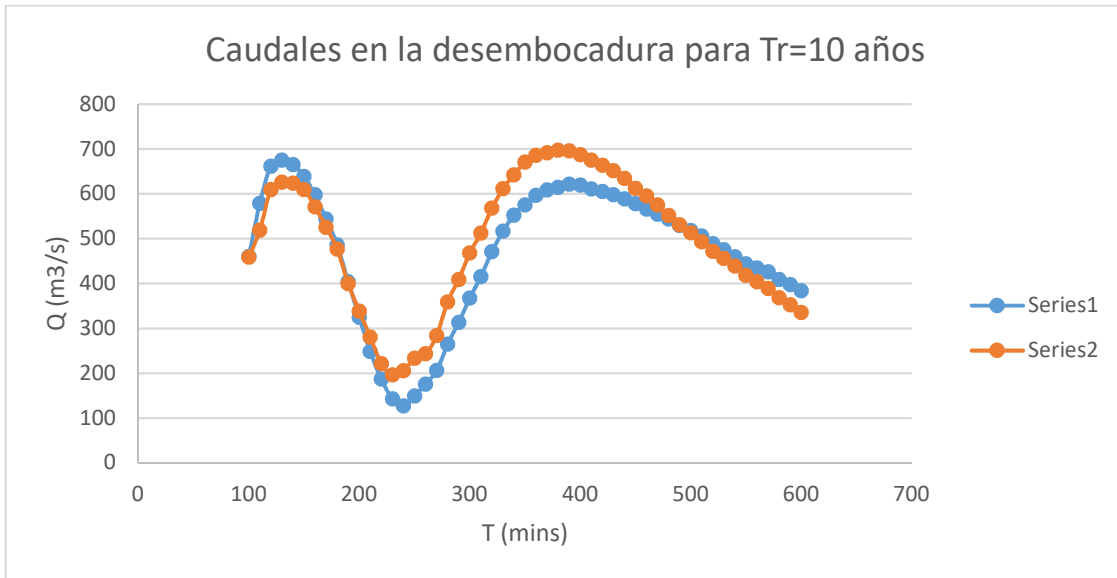


Figura 4-45 Caudal a través de la desembocadura de la cuenca, calculados con modelos 1D y 2D para **Tr=10 años**

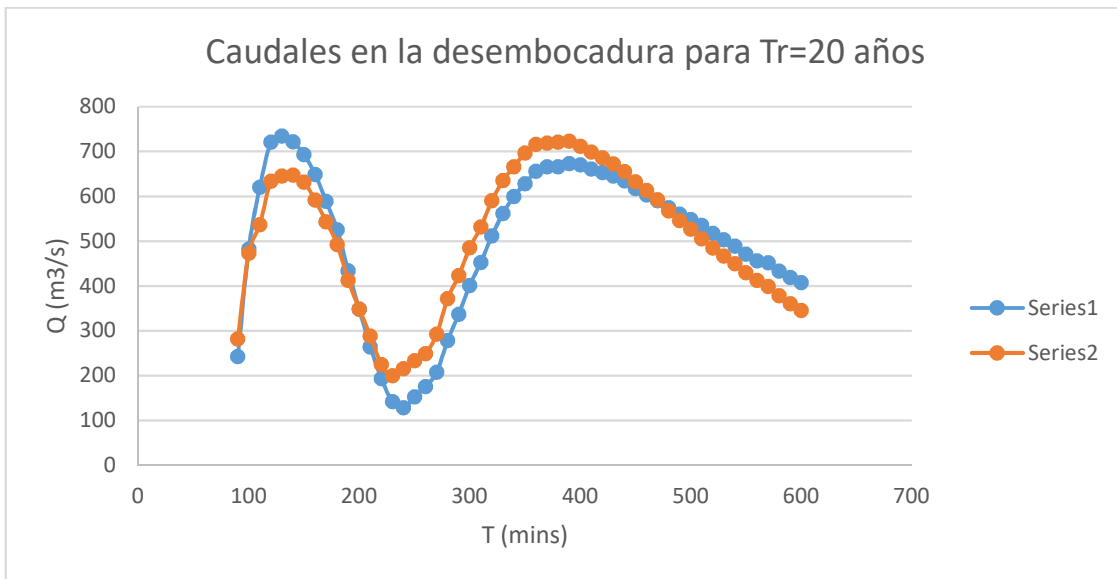


Figura 4-46 Caudal a través de la desembocadura de la cuenca, calculados con modelos 1D y 2D para **Tr=20 años**

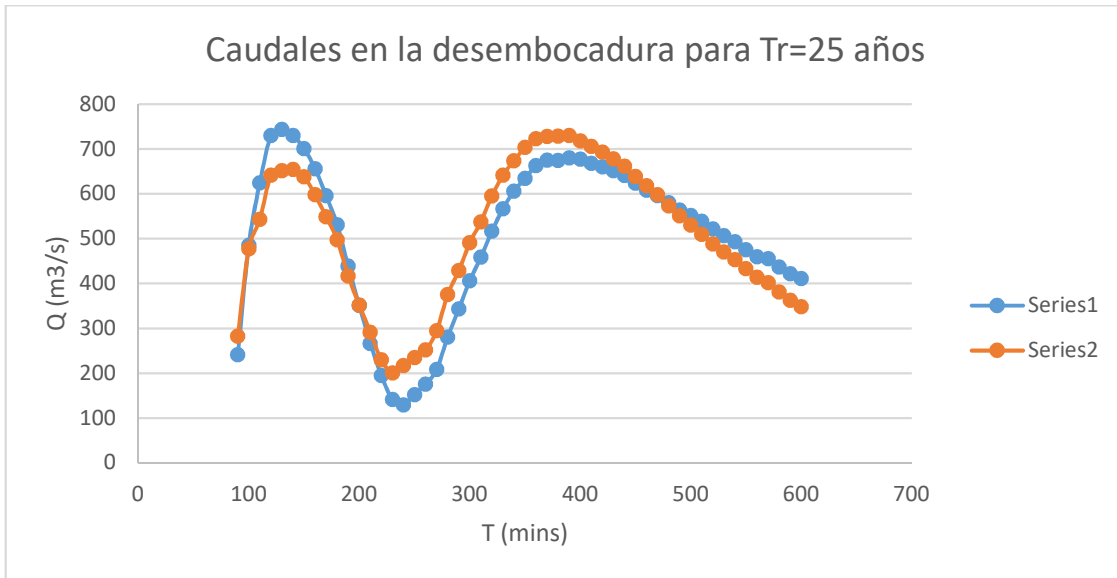


Figura 4-47 Caudal a través de la desembocadura de la cuenca, calculados con modelos 1D y 2D para **Tr=25 años**

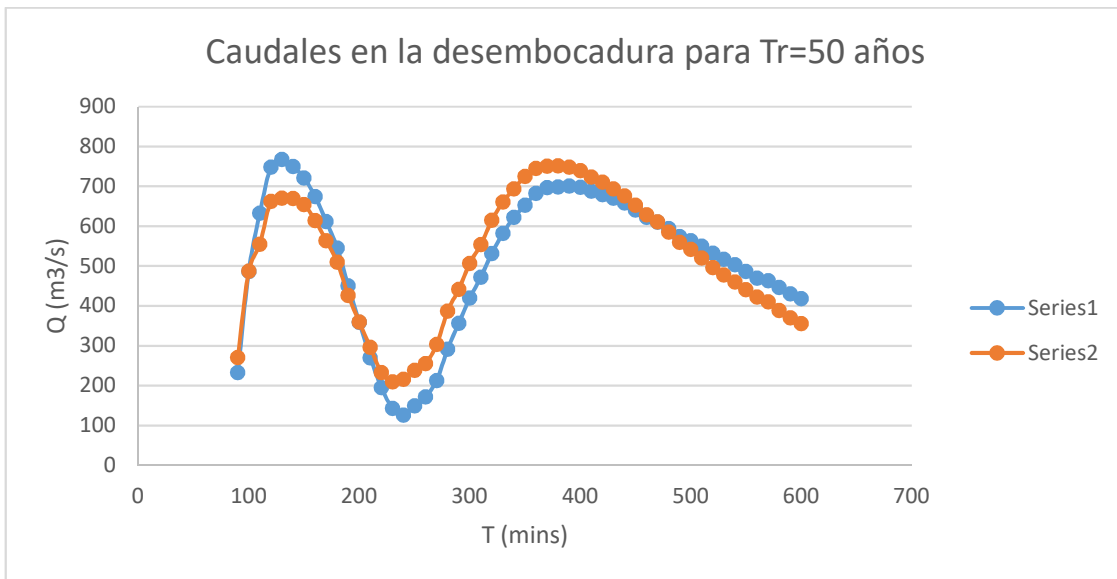


Figura 4-48 Caudal a través de la desembocadura de la cuenca, calculados con modelos 1D y 2D para **Tr=50 años**

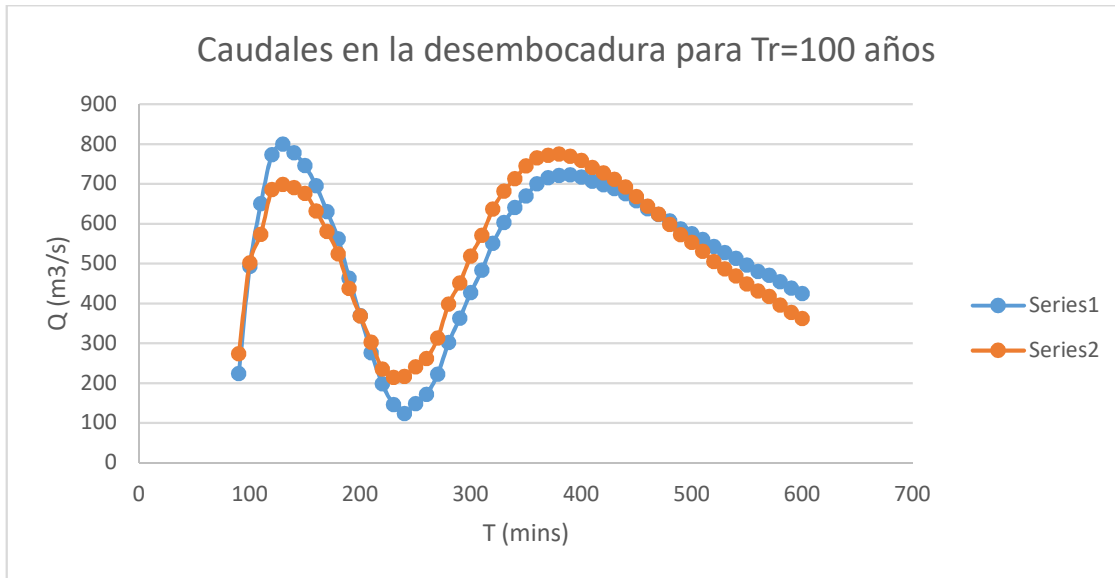


Figura 4-49 Caudal a través de la desembocadura de la cuenca, calculados con modelos 1D y 2D para $Tr=100$ años

Realizando un análisis por mínimos cuadrados, se determina que la diferencia en flujo calculado entre la simulación 1D y 2D para cada periodo de retorno y se tabula en la Tabla 4-32.

Tabla 4-32 Diferencia de flujo promedio en la desembocadura entre simulaciones 1D y 2D

| Tr (años) | Error (m³/s) |
|-----------|--------------|
| 5 | 6.08 |
| 10 | 6.93 |
| 20 | 6.70 |
| 25 | 6.78 |
| 50 | 6.99 |
| 100 | 7.22 |

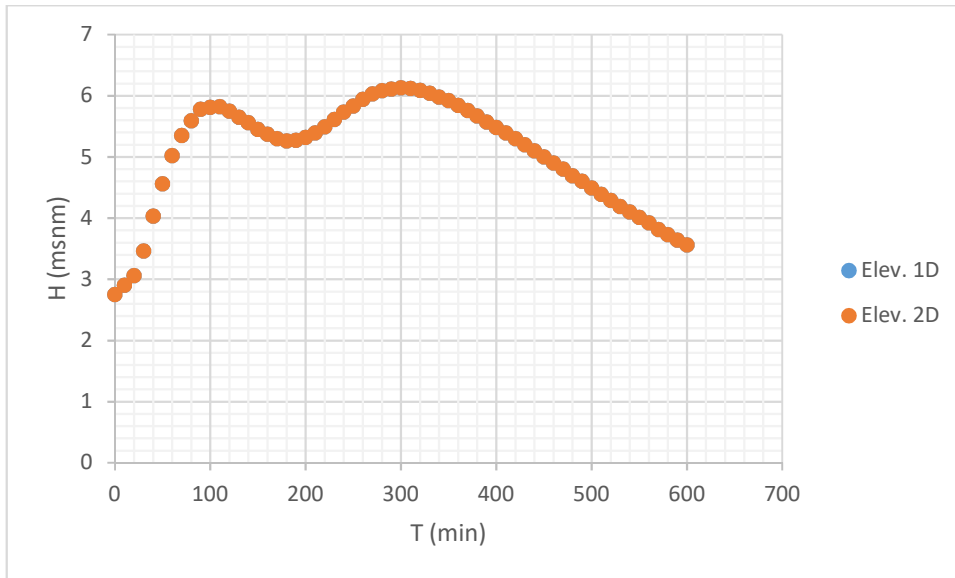


Figura 4-50 Comparación de las elevaciones del espejo de agua en el exutorio para modelos 1D y 2D

Por otro lado, la diferencia en los niveles calculados entre los modelos 1D y 2D en el exutorio a través del tiempo es de 0 m, como puede apreciarse en la Figura 4-50.

Dados los resultados obtenidos y mostrados en la Tabla 4-32 y Figura 4-50, se considera que las simulaciones en 1D y 2D proporcionan resultados equiparables, lo que señala que la elección de datos para los sistemas fue apropiada.

4.7 Resultados de la combinación de modelos 1D y 2D

Ya que, como puede apreciarse en las figura Figura 4-38 y Figura 4-42, con los caudales considerados dentro de los periodos de retorno en estudio no produjo desbordamientos considerables, que permitan analizar el comportamiento de las simulaciones usando esquemas combinados 1D/2, se optó por provocar desbordamientos en secciones determinadas del río aumentando el caudal específicamente para observar el comportamiento de la combinación de modelos 1D/2D.

Dados los resultados obtenidos para simulaciones 1D y 2D sin que exista un desbordamiento del cauce principal, no existe una diferencia sensible en los resultados de las elevaciones de superficie del agua entre uno y otro, por lo que es más conveniente utilizar una simulación 1D.

Una vez que el agua comienza a extenderse más allá del canal principal, debe considerarse la complementación del modelo mediante una malla 2D. En particular, los casos en los que la dirección del agua de la planicie de inundación se aparta considerablemente de la dirección del eje del río.

Un análisis en 1D no es factible en zonas del río donde la planicie de inundación tiene un nivel por debajo del nivel de desborde del río (Ver Figura 4-51). Concretamente, se debe a que en tal caso, la dirección del agua no se ajusta a la dirección del eje del río. En la figura Figura 4-52 se aprecia un ejemplo de esto (en este caso, se generó el desbordamiento usando un hidrograma correspondiente a $T_r=100$ años, pero aumentando el caudal base de $124 \text{ m}^3/\text{s}$ a $500 \text{ m}^3/\text{s}$).

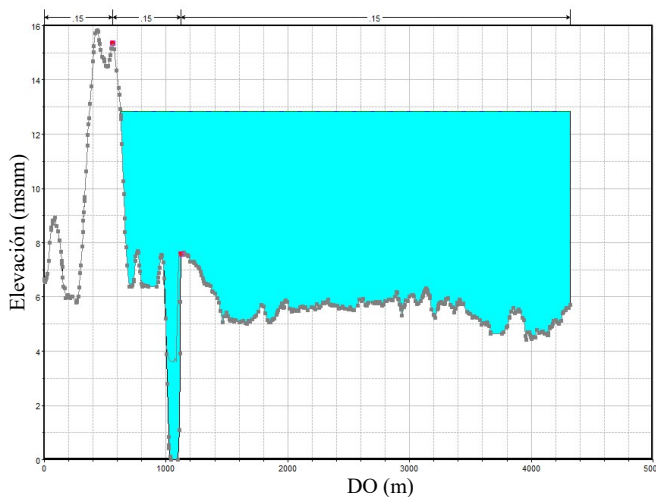


Figura 4-51 Ejemplo de planicie de inundación debajo del nivel de desborde del río

Esto se debe a que, en estas situaciones, HEC-RAS 1D tiene la limitación de no contemplar un “desborde parcial” del volumen del río. Es decir, si existen canales adyacentes con un nivel menor al del principal, al desbordarse el río, el programa nivelará el nivel del agua y todos los canales adyacentes tendrán el mismo nivel de superficie de agua. Esto, además, es fuente de inestabilidades en el sistema, debido al brusco cambio de volumen en las secciones, lo que hace que la solución oscile y termine por hacer fallar el modelo.

En tales casos, es indispensable complementar el modelo 1D con una malla 2D unida de forma lateral, de manera que el exceso de volumen sea distribuido de manera adecuada al terreno adyacente.

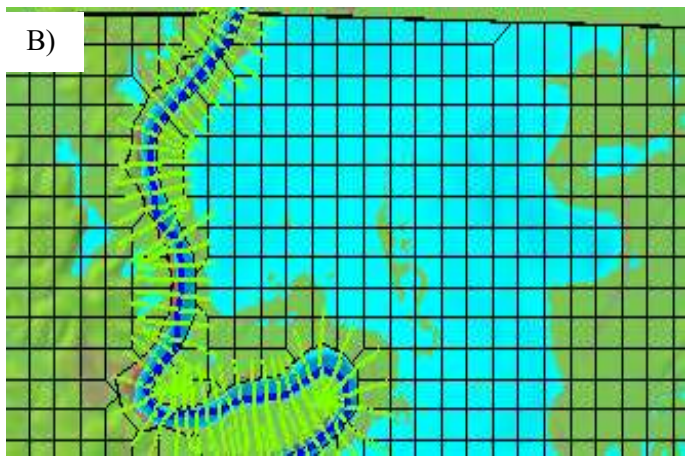
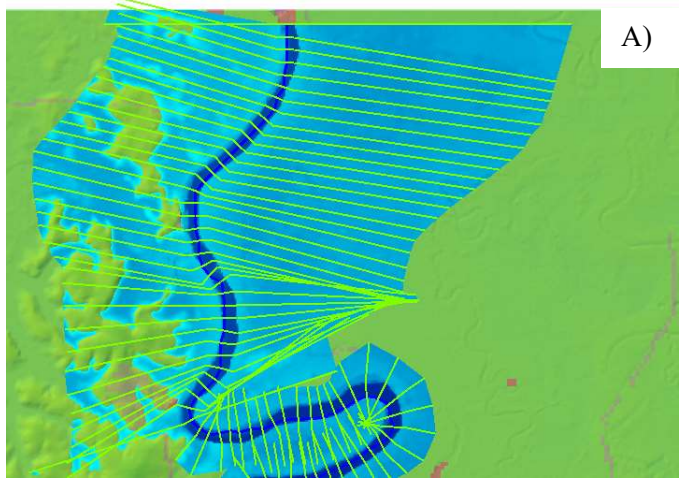
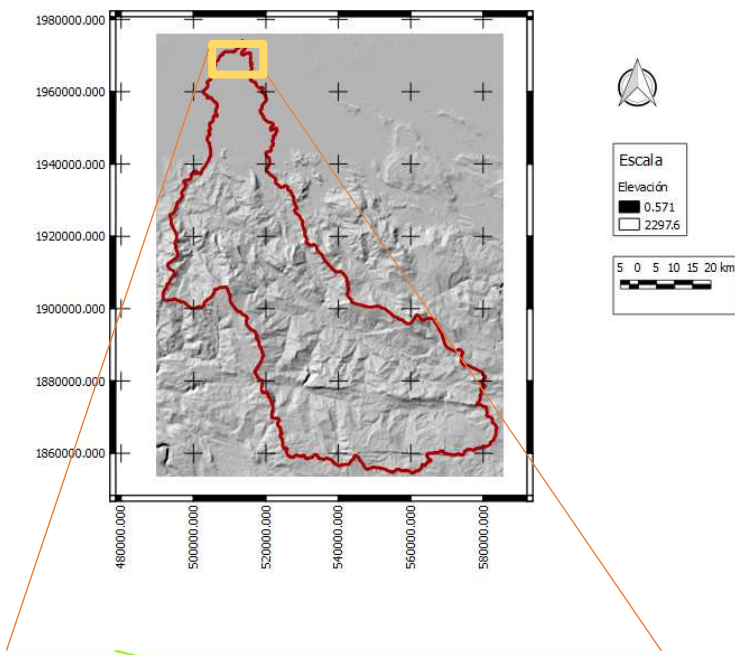


Figura 4-52 Error en la simulación para terrenos con grandes planicies de inundación por debajo del nivel de desborde del río. A) Planicie de inundación obtenida por simulación 1D B) Planicie de inundación obtenida por simulación combinada 1D/2D.

Los modelos 1D también presentan problemas de modelado cuando dentro de una misma sección tiene más de un canal, sea por la existencia de canales adyacentes al canal principal o bien, por la existencia de meandros que causen que una sección intercepte dos veces con el eje del río.

El problema de los canales adyacentes puede resolverse moviendo los puntos de dique dentro de la sección a lugares apropiados, lo que permite que la simulación se corresponda con la realidad. Sin embargo, esto implica que, para cada caudal simulado, sea necesario revisar individualmente cada sección transversal para determinar si la posición de tales puntos es la correcta (Ver Figura 4-53 A.1) y A.2), debe determinarse y señalar manualmente que canales deben estar inundados), lo que en ríos donde exista una gran cantidad de secciones transversales, este sea un trabajo extremadamente laborioso, propenso a error humano y en algunas situaciones, ni siquiera exista una posición de estos puntos que permita modelar apropiadamente estos eventos.

Es por esto, que una simulación combinada, utilizando una unión frontal se considera la opción más pertinente en estos casos (Ver Figura 4-53 B)).

En casos donde una sola sección transversal es propensa a presentar desbordamiento (sin que esto afecte las demás secciones, ver Figura 4-54 A)), los modelos 1D fallan en el modelado correcto de las consecuencias de este desbordamiento puntual, principalmente porque no puede representar el vector de velocidad en sentido diferente al que tiene el eje del río en ese punto. En estos casos, es pertinente realizar una combinación 1D/2D de unión lateral que permita conocer la extensión de la inundación provocada (Ver Figura 4-54 B))

Un problema especial al que se menciona inmediatamente arriba es cuando el flujo reingresa al sistema en una dirección diferente a la del eje del río principal. Esto es porque si bien las secciones claramente deberían ser afectadas por el desbordamiento, pero no se refleja (Ver Figura 4-55 A), A.1) y A.2)) dado que en una misma sección no puede haber flujo en dos direcciones. Este problema, al menos en tramos rectos, es posible de solucionar modificando el tamaño de las secciones y verificando la posición de los puntos de dique (Ver Figura 4-55 A.3) y A.4)). Sin embargo, ya se mencionaron los inconvenientes de usar este método en tramos largo o con rutas de flujo más complejas. Es por esto por lo que es preferible utilizar una unión frontal de modelos 1D/2D para modelar mecánicas de flujo complejas (Ver Figura 4-55 B)).

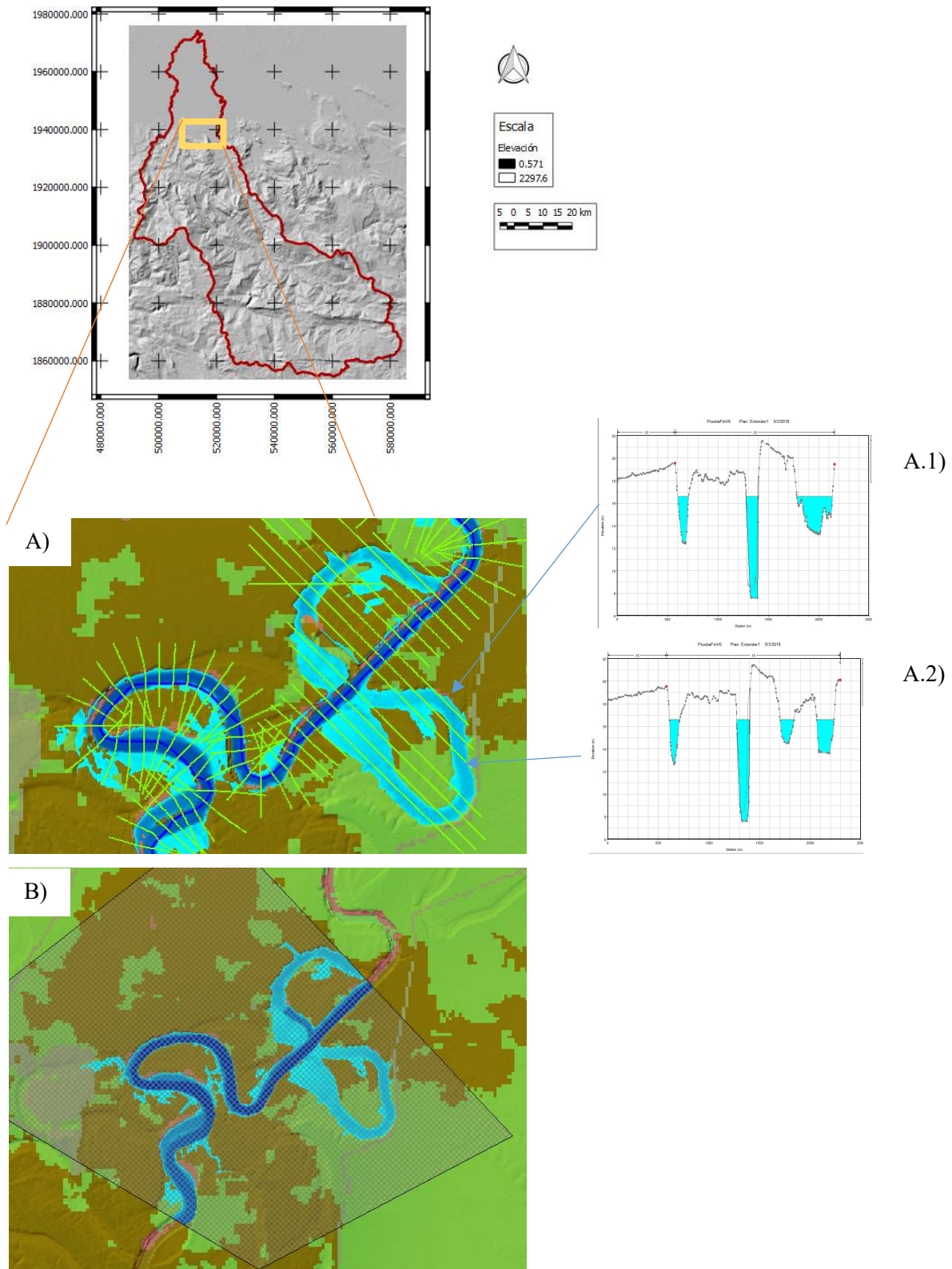


Figura 4-53 Meandros y canales adyacentes A) Simulación 1D A.1) Sección con dos canales inundados A.2) Sección con tres canales inundados B) Simulación 2D (Se utilizó en la sección 62+675 un $Q_p=1000$ m³/s)

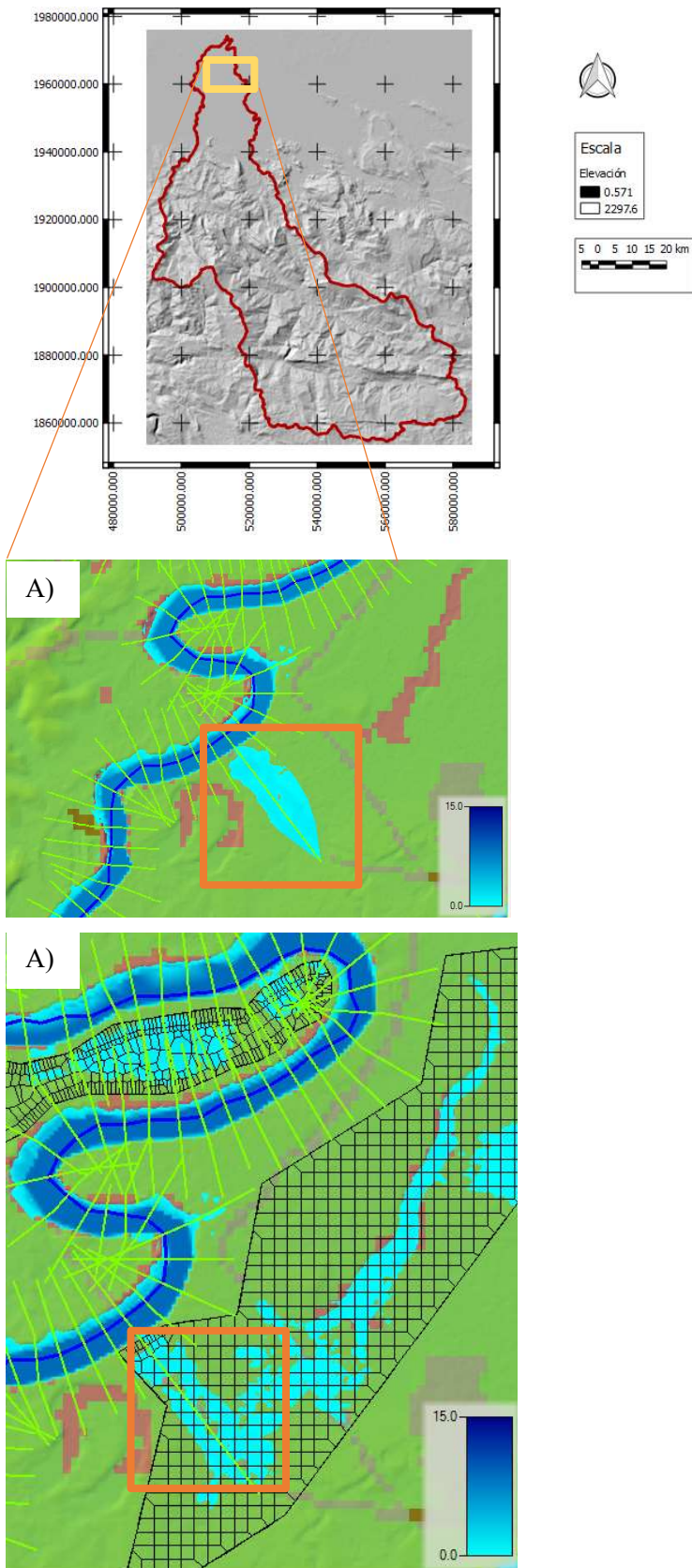


Figura 4-54 Desbordamiento de una sola sección transversal A) Modelación 1D B) Modelación 2D

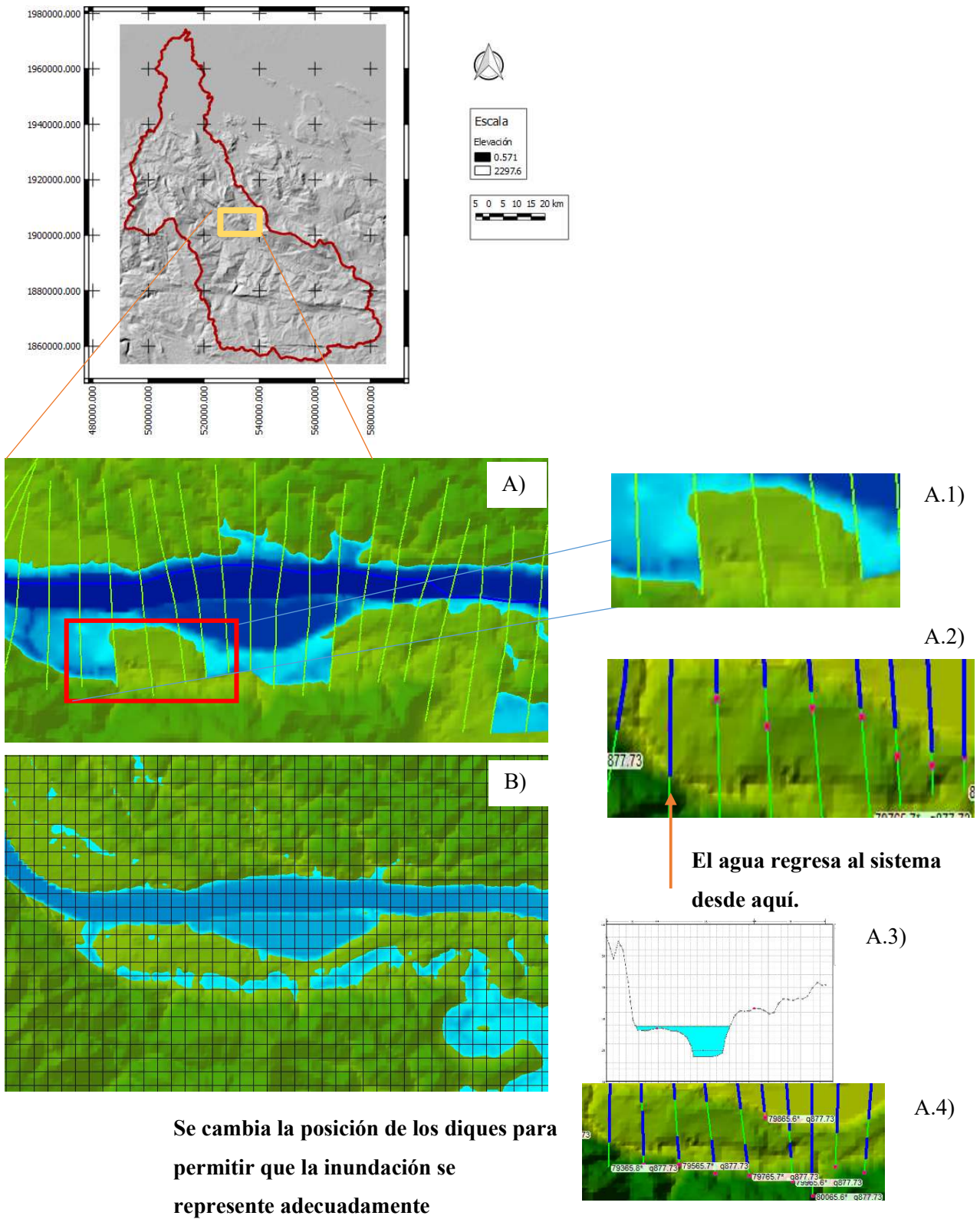


Figura 4-55 Comparación de inundaciones pequeñas con reingreso de agua al sistema simulados con métodos 1D y 2D. A) Simulación 1D B) Simulación 2D

En general, de las simulaciones realizadas en 1D, 2D y 1D/2D, los tiempos de simulación observados para el proyecto se resumen en la Tabla 4-33.

Tabla 4-33 Tiempos de procesamiento de las simulaciones

| | |
|---|-----------------|
| Condiciones de las simulaciones: | |
| Longitud del cauce principal: | 244.04 Km |
| Tamaño de la malla 2D: | 50 m |
| Tamaño de la malla 2D en la frontera: | 15 m |
| Paso de tiempo: | 1 s |
| Tiempo de procesamiento por simulación: | |
| Simulación 2D: | 120-180 minutos |
| Simulación 1D (Flujo no estable): | 5-15 minutos |
| Simulación 1D (Flujo estable): | 0.1 minutos |
| Simulación 1D/2D: | 15-25 minutos |

5 Conclusiones y recomendaciones

Los datos faltantes correspondientes a los cuerpos de agua profundos encontrados en el DEM obtenido desde INEGI fueron sustituidos satisfactoriamente por un lecho sintético por medio de secciones hidráulicamente equivalentes a las originales utilizando el método de Corum. Se determinó que la mejor manera para implementar el método de Corum consiste en encontrar el espejo de agua mediante un algoritmo que combine interpolaciones vectoriales con los datos matriciales del DEM.

Las simulaciones (1D, 2D y 1D/2D) fueron realizadas utilizando el DEM obtenido desde INEGI, complementado con el lecho sintético determinado por el método de Corum, distribuyendo los caudales obtenidos mediante un análisis estadístico a lo largo del río apoyándonos en las simulaciones de estaciones ficticias obtenidas mediante el modelo y software CEQUEau, y obteniendo los hidrogramas correspondientes a tales estaciones ficticias utilizando el método de la SCS, que a su vez fue complementado con tiempos de escurrimiento hasta la desembocadura determinados con ayuda del software HEC-RAS (Módulo de flujo 1D estable) para determinar la velocidad de escurrimiento en cada tramo del río. Las elevaciones sobre el nivel del mar del espejo de agua obtenido en las simulaciones en la desembocadura fueron comparadas con los datos observados para la estación 30016 (Curvas de aforo) para calibrar el coeficiente de Manning en el lecho del río y se determinó que las diferencias entre las elevaciones de espejo de agua esperadas y observadas fueron menores a 0.006 m, que empleamos como umbral de tolerancia por lo que se concluye que los datos empleados (Batimétricos, uso de suelo y distribución de caudales) fueron adecuados para las simulaciones.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la respuesta básica a que modelo de simulación es más conveniente utilizar es que los modelos 1D son recomendables cuando el todo el flujo dentro de un tramo tenga la misma dirección que el eje del río, los modelos 2D resultan más convenientes cuando en un tramo se presentan canales adyacentes, flujos importantes en sentidos diferentes al del eje del río y sistemas complejos de salida y reingreso de flujo al canal principal.

Se evaluó el desempeño de las simulaciones usando modelos 1D, 2D y la combinación de estos, para determinar la manera más eficiente de emplearlos.

En el caso particular del presente estudio el uso de un esquema combinado de simulación 1D/2D de flujo no estable probó poder realizar la simulación hasta seis veces en comparación con una simulación únicamente en 2D.

Una aproximación de los tiempos de proceso requeridos para cada tipo de simulación en el transcurso de esta investigación, se exponen en la Tabla 4-33.

Es importante contar con una batimetría adecuada para la simulación de avenidas, y en los lugares donde no se cuenta con esta, la creación de una batimetría sintética que sea hidráulicamente equivalente a la original es una actividad crucial para la simulación. Este puede probar ser un proceso complicado y laborioso, pero en *3.2.1 Datos batimétricos*, se detalla un proceso que en el presente trabajo proporcionó resultados confiables.

Las simulaciones 1D y 2D se realizaron de acuerdo a lo expuesto en *4.4 Simulaciones 1D* y *4.5 Simulaciones 2D*. Cuando se utiliza un modelo combinado 1D/2D es importante trazar adecuadamente la frontera entre ambos sistemas. Incluso si se utiliza un tamaño de cuadro grande en la malla 2D, es importante que en las zonas de los bancos el tamaño de cuadro no exceda por mucho el tamaño de celda del DEM.

En resumen, se aconseja complementar el modelo de simulación 1D con una malla 2D en los siguientes casos:

- Cuando existen canales adyacentes y paralelos al eje del río.
- Cuando la planicie de inundación adyacente tiene una elevación mejor al fondo del río.
- En meandros cerrados se recomienda una combinación frontal de modelos 1D y 2D.
- En zonas donde existen brechas de diques aisladas
- En zonas donde el flujo del agua desbordada cambia fuertemente de dirección respecto al eje del río principal.
- En zonas donde el agua abandona el sistema en un segmento del río y después debe reingresar al sistema.

Los resultados obtenidos verifican que un esquema combinado de simulación puede incrementar la velocidad de cálculo por más de veinte veces, siguiendo las recomendaciones siguientes

- El canal principal debe ser representado por un modelo 1D
- Los tramos cuya aportación para un periodo de retorno máximo predefinido por el proyectista no presenten desbordamiento del canal principal, no necesitarán ser complementados por una malla 2D.
- Las zonas de las planicies de inundación cuyo sentido de flujo sea el mismo que el del río principal, deben representarse por un modelo 1D.
- Las zonas de la planicie de inundación cuyo sentido de flujo sea diferente al del eje principal del río deben ser discretizados por una malla 2D y unidos lateralmente al modelo 1D del canal principal.
- Los meandros que para un periodo de retorno máximo predefinido por el proyectista no presenten desbordamientos que generen varias intersecciones de la mancha de inundación con el mismo eje del río, se representarán utilizando un modelo 1D cuidando que no exista traslape entre las secciones transversales. De otra manera, se sustituirá el tramo de río 1D por una malla 2D unida frontalmente aguas arriba y aguas abajo del meandro.
- En zonas donde haya riesgo de ruptura de diques, es aconsejable unir lateralmente una malla 2D a las secciones transversales en las que se puede presentar la ruptura
- Cuando existen canales adyacentes al río principal (naturales o artificiales) es recomendable modelar tales canales usando una malla 2D unida lateralmente al modelo 1D.
- Cuando entre secciones transversales existan zonas que tiendan a fluir en sentido contrario al del río principal, se unirá lateralmente una malla 2D al modelo 1D para que el vector de dirección en esa zona pueda ser representado apropiadamente.
- Las fronteras entre los modelos 1D y 2D deben tener un tamaño igual o menor al del pixel del DEM, por un lado para asegurar que la dirección del flujo en la transición de los modelos sea apropiada, y por otro lado para disminuir el número de iteraciones necesarias en la transferencia de flujo entre los modelos 1D y 2D. Puede modificarse el tamaño de la malla solo en la frontera mediante el uso de líneas de quiebre. Dado al uso de submalla que hace HEC-RAS en el modelo 2D, la mancha de inundación no muestra cambios sensibles

En cada caso en el que sea necesario emplear una malla 2D, debe tenerse en consideración que en cada iteración, todas las celdas presentan carga computacional, incluso si no hay flujo a través de ellas (celdas secas), por lo es deseable que las mallas no se extiendan innecesariamente. La mejor manera de determinar las zonas en las que es necesario realizar una combinación de modelos 1D y

2D, es realizar previamente una simulación puramente 1D, transitando los caudales correspondientes a un periodo de retorno considerado adecuado por el proyectista para verificar las posibles áreas de inundación.

Es importante señalar que dentro de la simulación existen diversos factores que pueden conducir a una inestabilidad general del sistema que, al ser un proceso global, vuelve difícil la tarea de encontrar el punto exacto en que se produce la inestabilidad. Algunos de los factores comunes con que dentro de la investigación que conducen hacia una inestabilidad de en el modelo son los siguientes.

- Presencia de saltos hidráulicos. En general, no es deseable que entre una sección transversal y otra exista un desnivel de más de cinco metros. Cuando se presenta este caso, es conveniente agregar secciones intermedias para evitar desniveles tan grandes. También es aconsejable verificar que no se hayan presentado errores en la batimetría y que el canal principal esté correctamente limitado por puntos de bancos y en su caso, puntos de dique.
- Cambios bruscos del área mojada de la sección transversal. Esto puede ocurrir por una variedad de factores, desde tamaño insuficiente de la sección transversal, mal posicionamiento de ellos puntos de diques.
- Mala elección de los valores del coeficiente n de Manning.
- Cambio brusco del ancho del canal entre dos secciones. Es conveniente agregar secciones intermedias cuando se presenten estos casos.

Como nota adicional sobre la detección de errores que conducen a la inestabilidad del sistema, puede ser más eficiente comenzar con un modelo en blanco y agregar poco a poco los elementos de cálculo (unas cuantas secciones a la vez, agregar una por una las estructuras laterales, probar con mallas pequeñas e ir incrementando el tramo que abarcan) y realizar simulaciones cada vez que se agreguen elementos hasta determinar exactamente que donde se produce la falla.

Referencias bibliográficas

- Barkau, R.L (1992): “*UNET, One-Dimensional Unsteady Flow Through a full network of open channels, Computer Program*”. St. Louis, MO. US Army Corps of Engineers, Manual de Usuario.
- Barnard, T, Kuch, A., Thompson, G., Mudaliar, S. y Philips, Brett.(2007): “*Evolution of an Integrated 1D/2D Modeling Package for Urban Drainage*”. Contemporary Modeling of Urban Water Systems, Monograph 15.
- Baró-Suárez, J, et al (2012): “*Metodología para la valoración económica de daños potenciales tangibles directos por inundación*”. Universidad Autónoma del Estado de México, Edo. De México, México.
- Bitrán, D., et al, (2003), “*Impacto Socioeconómico de los principales desastres Ocurridos en la República Mexicana en el año 2002*”. CENAPRED, Coordinación de Investigación, Riesgos Hidrometeorológicos - Ingeniería Estructural y Geotécnica y Estudios Sociales y Económicos, México.
- Bladé, E. et al: “*Desarrollo de un modelo de simulación de flujo en ríos. Convenios de colaboración CEDEX – UPC – UdC*”. Universitat Politècnica de Catalunya, Universidade da Coruña, CEDEX
- Bladé, E., (2005): “*Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones*”. Universitat Politècnica De Catalunya Departament D’enginyeria Hidràulica, Marítima I Ambiental Escola Tècnica Superior D’enginyers De Camins Canals I Ports, Barcelona.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E., Dolz, J., Coll, A. (2014). "Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos". Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol.30(1) pp.1-10
- Borrel i Nogueras, G (2008): “Introducción informal a Matlab y Octave”. Recuperado de <http://webserver.dmt.upm.es/media/files/cursomo.pdf>
- Brunner, G. (2016): “*HEC-RAS. River Analysis System, 2D Modeling User’s Manual Versión 5.0*”. US Army Corps of Engineers ,Manual de Usuario.
- Brunner, G. (2016): “*HEC-RAS. River Analysis System, Reference Manual*”. US Army Corps of Engineers , Manual de Referencias.
- Brunner, G.(2016). “*HEC-RAS. River Analysis System, User’s Manual Versión 5.0*”. US Army Corps of Engineers ,Manual de Usuario.

- Brunner, G., (2014): “*Combined 1D and 2D Modeling with HEC-RAS*”. Manual de Usuario
- Brunner, G., Warner, J., Wolfe, B., Piper, S., y Marston, L (2016): “*HEC-RAS. River Analysis System, Applications Guide*”. US Army Corps of Engineers Guía de Aplicaciones.
- Cannon, T. y Schipper, L. (2014): “*World Disasters Report, 2014. Focus on culture and risk*”. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, Lyon, Francia.
- Charbonneau, R., Fortin, Jp. y Morin, G. (1977): “*THE CEQUEAU MODEL: DESCRIPTION AND EXAMPLES OF ITS USE IN PROBLEMS RELATED TO WATER RESOURCE MANAGEMENT/Le modèle CEQUEAU: description et exemples d'utilisation dans le cadre de problèmes reliés l'aménagement*”, Hydrological Sciences Bulletin, 22:1, 193-202, DOI.
- Coleman, J. (2006): “*Holes in the ocean: Filling data voids in bathymetric lidar, a case study in dry tortugas national park, Florida*”. Tesis de Maestría en Ciencias, B.S., The University of Georgia, 2006
- Coll, A., Ribó, R., Pasenau, M., Escolano, E., Perez, J.Suit., Melendo, A. y Monros, A. (2014): “*GiD v. 12 Reference Manual*”. CINME.
- Coll, A., Ribó, R., Pasenau, M., Escolano, E., Perez, J.Suit., Melendo, A. y Monros, A. (2014): “*GiD v. 12. User Manual*”. CINME
- Cook, A. (2008): “*Comparison of one-dimensional HEC-RAS with two-dimensional FESWMS model in flood inundation mapping*”. Purdue University, West Lafayette, Indiana
- Corum, Zachary P. (2015): “*synthetic bathymetry method development, validation and application to five pacific northwest rivers*”. Joint Federal Interagency Conference, Abril, 2015.
- Díaz, V. (2010): “*Diseño Geomático del modelo Hidrológico CEQUEAU para cuencas no controladas*”. (Tesis de Maestría en Ciencias del Agua), Centro Interamericano de Recursos del Agua, Toluca, México.
- Díaz-Delgado, C., Gómez-Albores, M., Hernández-Perez, J.(2012): “*Modelado Hidrológico-Hidráulico de Inundaciones con Estimación de Daños Directos Tangibles*”. XXII Congreso Nacional de Hidráulica, Acapulco, Gro., México.
- Díaz-Delgado, C., Gaytán, J. (2014): “*Flood risk assessment in humanitarian logistics process design*”. Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), F.I. Universidad Autónoma del Estado de México, Edo. de México, México, Vol. 12, Octubre 2014, pp. 976-984.
- Fenoglio, E. et al (2015): “*Inundaciones Urbanas y Cambio Climático. Recomendaciones para la Gestión*”. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Buenos Aires, Argentina.
- García, N., Mendez, K. y Sánchez, S. (2015): “*Impacto Socioeconómico de los Desastres en México durante el año 2014 (Resumen ejecutivo)*”. CENAPRED, D.F., México.

- Gibbs, M., Clarke, K. y Taylor, B. (2015): “*Linking spatial inundation indicators and hydrological modelling to improve assessment of inundation extent*”. Ecological Indicators.
- Guerra-Cobian, V. (2007). “*Análisis del efecto de discretización espacial en el modelado de cuencas hdrológicas utilizando el modelo distribuido CECUEAU-ONU*”. Tesis de doctorado. Centro Interamericano de Recursos del Agua de la UAEMéx. 231 p.
- Guerra-Cobian, V., Bâ, K., Quentin, E., (2013): “*Efecto de la discretización Espacial sobre las Simulaciones de Caudal con el Modelo distribuido CEQUEAU*”. Tecnología y Ciencias del Agua, Vol. IV, núm. 5, pp. 33-53.
- Hartnack, J., Madsen, H. y Tornfeldt, J. (2005): “*Data Assimilation in a combined 1D-2D Flood Model*”. Proceedings of the International Conference “Innovation, Advances and Implementation of Flood Forecasting Technology”, Norway, 17-19 Octubre 2005.
- Karim, F., Petheram, C., Marvanek, S., Ticehurst, C., Wallace, J. y Gouweleeuw, B. (2001): “*The use of hydrodynamic modelling and remote sensing to estimate floodplain inundation and flood discharge in a large tropical catchment*”. 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia, 12–16 December 2011.
- Kuiry, S., Sen, D y Bates, P. (2010): “*Coupled 1D-Quasi-2D Flood Inundation Model with Unstructured Grids*”. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 136, No. 8, pp. 493-506
- Lee, J (1991): “*Comparison of existing methos for building triangular irregular network, models of terrain from grid digital elevation models*”. International Journal of Geographical Information Systems, 5:3, 267-285.
- Llamas, J.(1993): “*Hidrología General*”. Universidad del País Vasco
- Lluén, W. (2015): “*Aplicacion de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para cálculos bidimensionales del flujo de agua en ríos* “. Escola de Camins, ,UPC BARCELONATECH, Tesis de Máster en Ingeniería Civil
- Morales-Hernández, M., Petaccia, G., García-Navarro, P. (2014): “*Conservative 1D-2D coupled numerical strategies applied to river flooding*”. Informatics, Networking and Intelligent Computing: Proceedings of the 2014 International Conference on Informatics, Networking and Intelligent Computing, November 2014, Shenzhen, China, pp. 605-613
- Morales-Hernández, M., Petaccia, G., García-Navarro, P. (2015): “*Conservative 1D-2D coupled numerical strategies applied to river flooding: The Tiber (Rome)*”. Applied Mathematical Modelling, No. 40, pp. 2087-2105.
- Morin, G., Paquet, P. (2007): “*Modèle hydrologique CEQUEAU*”. INRS-ETE, rapport de recherche no R000926, 458p.

- Olcina, J. (2008): “*Prevención de Riesgos: Cambio Climático, Sequías e Inundaciones*”. (Panel científico-técnico de seguimiento de la política del agua). Zaragoza : Fundación Nueva Cultura del Agua.
- Overton, I. (2005): “*Modelling floodplain inundation on a regulated river: integrating gis, remote sensing and hydrological models*”. River Research and Applications No. 21, pp. 991-1001.
- Paredes, P., Pedrozo, A., y Mejía, P., (2014): “*Evaluación de Modelos Numéricos 1D y 2D para Predecir Inundaciones*”. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, Jalisco, México.
- Powell, S., Jakeman, A. y Croke., B (2014): “*Can NDVI response indicate the effective flood extent in macrophyte dominated floodplain wetlands?*”. Ecological Indicators.
- Salas, M. A. y Jimenez, M. (2004): “*Inundaciones*”. CENAPRED, Serie Fascículos, 1ra edición, Octubre 2004.
- Schenk, A y Shan, J (2002): “Fusion of LiDAR data Aerial imagery, for mor complete Surface descriptions. International Archives of Photogrametry, Remote Sensing and Spatial information sciences
- Scleiss et al (2013): “*A conservative strategy to couple 1D and 2D models for shallow wáter flow simulation*”. Computers and fluids, Vol. 81, 26-44
- Shaikh, M., Green, D. y Cross, H. (2001): “A remote sensing approach to determine environmental flows for wetlands of the Lower Darling River, New South Wales, Australia”. International Journal of Remote Sensing, Vol. 22, No. 9, pp. 1737-1751, Nov. 2010.
- Shwanghart, W. y Kuhn, N. (2010): “TopoToolBox: A set of Matlab functions for topographic analisis”. Enviromental Modelling & software, Vol. 25, pp. 770-781
- Thomas, R., Kingsford, R., Lu, Y., y Hunter, S. (2010): “*Landsat mapping of annual inundation (1979–2006) of the Macquarie Marshes in semi-arid Australia*”. International Journal of Remote Sensing, Vol. 32, No. 16, pp. 4545-4569, Agosto 2011.
- Timbe, L. (2011): “*Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones*”. Revista MASKANA, Vol.2, Núm. 1, pp. 91-98.
- van Dijk, E., van der Meulen, J., Kluck, J. y Straatman, J (2014): “*Comparing modelling techniques for analysing urban pluvial flooding*”. Water Science and Technology, Vol., 69, Num. 2, pp. 305-311
- Ven Te, C. (1994): “*Hidráulica de canales abiertos*”. Santa Fe de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill
- Ven Te, C. (1994): “*Hidrología Aplicada*”. Santa Fe de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.

- Wang, R. y Ateljevich, E. (2012): "*Methodology for Flow and Salinity Estimates in the Sacramento-San Joaquin Delta and Suisun Marsh*". California Department of Water Resources, 33rd Annual Progress Report, Junio, 2012.
- Werner, M., Blazkova, S. y Petr, J. (2005): "*Spatially distributed observations in constraining inundation modelling uncertainties*". *Hidrological Processes*, Vol. 19, pp. 3081-3096, Mayo del 2005.
- Cano, A., (2005): "*Solución Informática para el análisis de frecuencia de eventos máximos hidrológicos*". Tesis de licenciatura en ingeniería en computación, Estado de México, Universidad Autónoma del Estado de México, 2005.

6 Anexos

6.1 Códigos fuente de las herramientas desarrolladas

6.1.1 *IMPTIF*

```
function dem = imptif()
%Esta función importa un archivo tiff desde la interfaz de usuario y
%devuelve la matriz de datos del archivo, los datos de referencia y la
%información de la imagen, que se utilizarán después para poder exportar
la
%matriz de vuelta a una imagen TIFF
[archivo directorio]=uigetfile('*.tif');

    dir2=[directorio '\\' archivo];
    [A, R]=geotiffread(dir2);
    info=geotiffinfo(dir2);
%Nota: la matriz correspondiente al archivo giff siempre se importa "de
%cabeza", así que antes de manejarla, necesita llevarse a cabo una
%"vuelta". Aparentemente, esta función de "flip" no está en versiones
%anteriores de matlab, así que debo considerar cambiar el comando para
%hacerla retro compatible
Mat=flip(A);
Ref=R;
Infor=info;
dem.mat=Mat;
dem.ref=Ref;
dem.info=Infor;
end
```

6.1.2 *CALRIO*

```
function [rio dem]=calrio(dem)
%Esta función genera una estructura con varios valores concernientes al
rio principal, utilizando la herramienta "topotoolbox"

%usando la herramienta topotoolbox determinamos el rio principal
addpath(genpath('topotoolbox-master'));
addpath(genpath('Mapping toolbox2'));

%Aquí creo un par de matrices que lean lo del dem
%[Adem, Rdem]=geotiffread('DEMCOMPv2.tif');
%infoDEM=geotiffinfo('DEMCOMPv2.tif');

%Coordenadas de la esquina inferior izquierda del DEM
Yref=dem.ref.YWorldLimits(1);
Xref=dem.ref.XWorldLimits(1);

%Resolución del DEM
Yres=dem.ref.CellExtentInWorldY;
Xres=dem.ref.CellExtentInWorldX;

%Coordenadas X de los pixeles del DEM
X=zeros(dem.ref.RasterSize(1),dem.ref.RasterSize(2));
for a=1:dem.ref.RasterSize(2)
    X(1,a)=Xref+a*Xres;
end
```

```

for a=2:dem.ref.RasterSize(1)
    X(a,:)=X(1,:);
end
%Coordenadas Y de los pixeles del DEM
Y=zeros(dem.ref.RasterSize(1),dem.ref.RasterSize(2));
for a=1:dem.ref.RasterSize(1)
    Y(a,1)=Yref+a*Yres;
end

for a=2:dem.ref.RasterSize(2)
    Y(:,a)=Y(:,1);
end
    DEM = GRIDObj(X,Y,dem.mat);
    DEM.name='DEM';
    DEM.zunit='m';
    DEM.xyunit='m';

FD = FLOWObj(DEM,'preprocess','carve');
S = STREAMObj(FD,'minarea',100);
D=flowdistance(FD,'upstream');
MaxDisFlo=find(D.Z==max(max(D.Z)));
[IX,distance]=flowpathextract(FD,MaxDisFlo(1));
RP=zeros(dem.ref.RasterSize(1),dem.ref.RasterSize(2));
RP(IX)=distance;

%Creamos una matriz con el "pitremoval implementado"
matpr=imposemin(S,DEM,0.00001);
dem.matpr=matpr.Z;

%distancia de flujo
rio.dflujo=RP;
%RioPrincipal
rioprin=RP;
rioprin(rioprin>0)=1;
rio.rioprin=rioprin;

%Determinamos la jerarquía de cada pixel del rio principal
a=unique(rio.dflujo);
b=rio.rioprin;
a(1)=[];

for cont=1:length(a)
    tic
    [Y X]=find(rio.dflujo==a(cont));
    DIRIO(cont,1)=Y;
    DIRIO(cont,2)=X;
    DIRIO(cont,3)=cont;
    toc*(length(a)-cont)/60
end
rio.riocal=DIRIO;
%Determinamos la dirección de cada pixel del rio principal
for cont=1:(size(DIRIO,1)-1)

```

```

        DIRIO(cont,4)=direccion(DIRIO,cont);

end

%DIRIO=[DIRIO,direcc];
rio.riocal=DIRIO;
%para el ultimo pixel, dejamos la dirección del rio tal como venía del
%pixel anterior (porque no tenemos un pixel "siguiente" para determinar
la
%dirección
rio.riocal(length(rio.riocal),4)=rio.riocal(length(rio.riocal)-1,4);
%Colocamos las secciones del rio de acuerdo a la dirección de cada pixel
rio.seccrio=seccionar(dem,rio,20);
rmpath(genpath('topotoolbox-master'))
rmpath(genpath('Mapping toolbox2'))

```

6.1.3 EXP2TIF

```

function g=exp2tif(A,R,info)
%Esta función exporta una imagen TIFF previamente cargada con impttif
[archivo ruta] = uiputfile('*.tif');
A=flip(A);
geotiffwrite([ruta
archivo],A,R,'GeoKeyDirectoryTag',info.GeoTIFFTags.GeoKeyDirectoryTag,'Ti
ffTags',struct('Compression',Tiff.Compression.None,'PhotometricInterpreta
tion',Tiff.Photometric.MinIsBlack,'RowsPerStrip',1));

```

6.1.4 CLOSEGAP

```

function [rio dem] = closegap(dem,rio,valnulo);
%Este closegap funciona directamente desde las secciones obtenidas

%Encontramos los valores iniciales que tienen un valor nulo
tic
cont=1;
seccs=rio.seccrio;
seccs2=rio.seccrio;

%Quitamos los valores iguales a cero dentro de la matriz
y=find(seccs2(:,1)==0);
seccs2(y,:)=[];

demcerrado=flip(dem.mat);
[filas,cols]=size(demcerrado);

dem = cerrarsecciones(dem,rio,valnulo);
secerrado=dem.secerrado;

%cerramos la primer iteración del filtrado del dem
for cont2=1:(length(secerrado))
    if secerrado(cont2,6)>0 & secerrado(cont2,5)>0

demcerrado(secerrado(cont2,6),secerrado(cont2,5))=secerrado(cont2,4);
end

```

```

end

[y x]=find(demcerrado==valnulo);

while length(y)>9
    for cont=1:length(y)
        if y(cont)-1>0 & x(cont)-1>0 & y(cont)+1<=filas & x(cont)+1<=cols
            sub=demcerrado([y(cont)-1:y(cont)+1],[x(cont)-1:x(cont)+1]);
            sub(sub==valnulo)=NaN;
            med=nanmean(nanmean(sub));
            if med~=NaN
                demcerrado(y(cont),x(cont))=med;
            end
        end
    end
    [y x]=find(demcerrado==valnulo);
    length(y)
end
dem.demcerrado=demcerrado;
dem.secerrado=secerrado;
dem2=dem;
dem2.mat=dem.demcerrado;

%realizamos un pitremoval al DEM que ya ha sido cerrado
[demcerradoprp demcerradoprp]=calrio(dem2);
rio.demcerradoprp=flip(demcerradoprp.rioprin);
dem.demcerradoprp=flip(demcerradoprp.matpr);
%Agregamos la distancia entre secciones a la matriz "rio.riocal"
secerrado=dem.secerrado;
riocal=rio.riocal;
    cont=1;
    y=find(secerrado(:,5)==riocal(cont,2) &
secerrado(:,6)==riocal(cont,1)&secerrado(:,1)==cont);
    riocal(cont,5)=secerrado(y,2);
    riocal(cont,6)=secerrado(y,3);
    riocal(cont,7)=0;
    largo=min((max(max(secerrado(:,1))))),length(riocal));
%Para la última sección
cont=largo;

y=find(secerrado(:,5)==riocal(cont,2)&secerrado(:,6)==riocal(cont,1)&sece
rrado(:,1)==cont);
    riocal(cont,5)=secerrado(y,2);
    riocal(cont,6)=secerrado(y,3);
    %para el resto de las secciones
for cont=(largo-1):-1:1

y=find(secerrado(:,5)==riocal(cont,2)&secerrado(:,6)==riocal(cont,1)&sece
rrado(:,1)==cont);
    riocal(cont,5)=secerrado(y,2);
    riocal(cont,6)=secerrado(y,3);
    riocal(cont,7)=((riocal(cont,5)-riocal(cont+1,5))^2+(riocal(cont,6)-
riocal(cont+1,6))^2)^.5;
end

```



```

rio.riocal=riocal;
%Colocamos las elevaciones de las secciones cerradas dentro de la matriz
%del rio calibrado
for cont=1:length(rio.riocal)
    yelev=find(dem.secerrado(:,5)==rio.riocal(cont,2) &
dem.secerrado(:,6)==rio.riocal(cont,1));
    rio.riocal(cont,8)=dem.secerrado(min(yelev),4);
end
%Entonces el formato de la matriz quedará:
%Ymatlab,Xmatlab,No.Sección,Dirección del pixel,Xreal,Yreal,Z,

%Finalmente, obtenemos las secciones transversales del rio una vez que ha
% sido cerrado

toc

```

6.1.5 CERRARSECCIONES

```

function dem = cerrarsecciones(dem,rio,valnulo);

cont=1;
seccs=rio.seccrio;
seccs2=rio.seccrio;

%Quitamos los valores iguales a cero dentro de las matrices
y=find(seccs2(:,1)==0);
seccs2(y,:)=[];
y=find(seccs(:,1)==0);
seccs(y,:)=[];

while cont<=length(seccs);
    %Buscamos valores nulos
    while seccs(cont,4)~=valnulo
        if cont+1<=length(seccs)
            cont=cont+1;
        else
            break
        end
    end
end

if cont+1>length(seccs)
    break
end
%Determinamos la sección a la que pertenece el valor nulo
seccion=seccs(cont,1);

y=find(seccs(:,1)==seccion);
cont4=1;
cont5=1;
inicio=[];
fin=[];

```

```

y2=length(find(seccs(y,4)==valnulo));

for cont2=1:length(y)

    if y(cont2)+1<=length(seccs)
        if seccs(y(cont2),4)~=valnulo & seccs(y(cont2)+1,4)==valnulo
& seccs(y(cont2),1)==seccion & seccs(y(cont2)+1,1)==seccion
            inicio(cont4)=seccs(y(cont2),4);
            cont4=cont4+1;

        end

        if seccs(y(cont2),4)~=valnulo & seccs(y(cont2)-1,4)==valnulo
& seccs(y(cont2),1)==seccion & seccs(y(cont2)-1,1)==seccion
            fin(cont5)=seccs(y(cont2),4);
            cont5=cont5+1;

        end
    end
end

%determinamos la elevación del espejo de agua como el valor mínimo de
las
%márgenes, y sustituimos cone ste valor los valores nulos de la
sección
%Estoy utilizando dos matrices, una que cambia y la otra que
permanece como
%la original, para prevenir el caso de las secciones que se
traslapan, y
%así se cambia el valor con el mínimo

try
if isempty(inicio)==0 || isempty(fin)==0
    if isempty(inicio)==1
        inicio=99999;
    end
    if isempty(fin)==1
        fin=99999;
    end
    elevesp=min(min(inicio),min(fin));
    for cont2=1:length(y)
        if seccs(y(cont2),4)==valnulo
            seccs2(y(cont2),4)=elevesp;

        end
    end
end
catch
    %cont+cont2
    Y
    seccion
    inicio
    fin
end

```

```

        cont=cont+y2;

end

%Quitamos los valores iguales a cero dentro de la matriz
y=find(seccs2(:,1)==0);
seccs2(y,:)=[];
secerrado=seccs2;

y=seccs2(:,6);
x=seccs2(:,5);

%Creamos una matriz booleana que incluya los valores nulos
seccbool=rio.seccrio;
%Quitamos los valores vacíos de la matriz
y=find(seccbool(:,1)==0);
seccbool(y,:)=[];

seccbool(seccbool(:,4)~=valnulo,4)=0;
seccbool(seccbool(:,4)==valnulo,4)=1;

%creamos una matriz que solo contenga valores anómalos en las elevaciones
seccanom=secerrado;
seccanom(:,4)=seccbool(:,4).*secerrado(:,4);

%Determinamos cuales de estas secciones tienen valores nulos
y=find(seccanom(:,4)~=0);
y=seccanom(y,1);
y=unique(y);
seccsvalnul=y;
%Emparejamos la sección con el valor que se le colocó al valor nulo en
esa
%sección
for contbis=1:length(seccsvalnul)

seccsvalnul(contbis,2)=max(unique(seccanom(find(seccanom(:,1)==seccsvalnul
1(contbis)),4)));
end

%Corregimos los valores de forma que siempre desciendan los valores
%aseguramos que el final del rio siempre será el punto más bajo
minimo=min(seccsvalnul(:,2));
if seccsvalnul(length(seccsvalnul),2)>minimo
    seccsvalnul(length(seccsvalnul),2)=minimo-
length(find(seccsvalnul==minimo)).*0.01;
end
for contbis=1:(length(seccsvalnul)-1)
    cont2bis=1;
    while seccsvalnul(contbis,2)<seccsvalnul(contbis+cont2bis,2)
        cont2bis=cont2bis+1;
        if cont2bis+contbis>length(seccsvalnul)
            break

```

```

        end
    end
    if cont2bis+contbis<=length(seccsvalnul)
        fin=seccsvalnul(contbis+cont2bis,2);
        dif=(fin-seccsvalnul(contbis,2));
        grad=dif/cont2bis;
        for cont3bis=1:cont2bis

seccsvalnul(contbis+cont3bis,2)=seccsvalnul(contbis,2)+grad*cont3bis;
        end
    end
end

%Colocamos los nuevos valores dentro de las secciones booleanas
for contbis=1:length(seccsvalnul)
    y=find(seccanom(:,1)==seccsvalnul(contbis,1));
    seccanom(find(seccanom(y,4)~=0)+y(2)-2,4)=seccsvalnul(contbis,2);
end
%colocamos los nuevos valores dentro de las secciones definitivas
for contbis=1:length(seccanom)
    if seccanom(contbis,4)~=0
        secerrado(contbis,4)=seccanom(contbis,4);
    end
end
dem.secerrado=secerrado;

```

6.1.6 SECCTRASLAPE

```

function seccs=secctraslape(dem,rio,tam,esp,usosuelo)

%Esta función se encarga de crear una matriz con los datos de las
secciones
%transversales a intervalos cerrados, evitando que existan traslapes
entre
%ellas, espaciándolas de forma que esto no ocurra

%Dem: Matriz numérica del Dem. Obtenida al importar Rio: Matriz con los
%datos calibrados del rio principal
%

%Determinamos el factor "nu", que usaremos mas adelante para determinar
el
%número máximo de secciones que pueden ser afectadas
nu=ceil(tam/(2*esp));

%Comenzamos agregando la primer sección a la matriz de secciones (la
primer
%sección será obligatoria)

seccs.secs=dem.secerrado(find(dem.secerrado(:,1)==rio.riocalint(1,3)),:);

%ahora, agregamos la siguiente sección obtenida por distancia, y
%verificamos que no haya traslapes. Si los hay, buscamos el siguiente
pixel

```

```

%y hacemos la verificación de nuevo, hasta que no existan traslapos

%Empezamos las iteraciones colocando la primera sección como punto 1
p1=[rio.riocalint(1,5),rio.riocalint(1,6),1];

%En esta parte de aquí, irá el bucle que lo haga para todas las
secciones,
%para fines de prueba, lo haré para un solo par de puntos.
cont=1;
while (cont+1)<=size(rio.riocalint,1)

    %El punto 2 tiene el formato X,Y,Nom Sección. Esta es la sección
    %correspondiente a la sección cerrada en este punto

p2=[rio.riocalint(cont+1,5),rio.riocalint(cont+1,6),rio.riocalint(cont+1,
3)];

    %Este marcador determina si la sección tiene o no colisiones
    coli=1;
    cont2=1;
    while coli==1

        %Determinamos la sección para el el punto 2
        secact=secxpuntos(dem,p1,p2,tam);

        %Probamos si hay intersecciones con la nueva sección
        pruebasec=[seccs.secs;flip(secact.coor)];
        %Determinamos si hay inersecciones en esta sección
        tras=traslapxsec(pruebasec,dem,rio,nu,p2(3));
        ys=find(tras.ncoli(:,1)==p2(3));
        if isempty(ys)==1
            coli=0;
            p1=p2;
            %determinamos cual es la sección cerrada siguiente (por si
            %acaso, alguna sección avanzó hasta invadir la siguiente
            %sección cerrada
            secsig=1;

            while p2(3)>rio.riocalint(secsig,3)
                if secsig+1<=size(rio.riocalint,1)
                    secsig=secsig+1;
                else
                    secsig=secsig+1;
                    break
                end
            end

        else

p2=[rio.riocal(p2(3)+cont2,5),rio.riocal(p2(3)+cont2,6),rio.riocal(p2(3)+
cont2,3)];
            cont2=cont2+1;
        end
    end

```

```

    end
    seccs.secs=pruebasec;
    cont=seccsig;
end

seccs=seccs.secs;

%-----
cmanning=mapmanning(usosuelo);
for cont=1:size(seccs,1)
    seccs(cont,7)=cmanning(seccs(cont,6),seccs(cont,5));
end

%Listamos las secciones únicas
listasec=unique(seccs(:,1));
%Obtenemos los datos de las ubicaciones de los bancos de cada sección
bancos=banydiqx(dem,rio,seccs);

for cont=1:size(listasec,1)
    %Vamos trabajando sección por sección
    y=find(seccs(:,1)==listasec(cont));
    %Encontramos en que punto se encuentran los bancos
    bi=find(seccs(:,2)==bancos.biz(cont,2) &
seccs(:,3)==bancos.biz(cont,3));
    bd=find(seccs(:,2)==bancos.bder(cont,2) &
seccs(:,3)==bancos.bder(cont,3));
    %Colocamos las claves a cada parte de la sección: 1 banco izq 2
    %canal principal 3 banco derecho
    if bi~=y(1)
        for cont2=y(1):bi
            seccs(cont2,8)=1;
        end
    else
        seccs(bi,8)=2;
    end
    for cont2=bi+1:bd-1
        seccs(cont2,8)=2;
    end
    if bd~=y(end)
        for cont2=bd:y(end)
            seccs(cont2,8)=3;
        end
    else
        seccs(bd,8)=2;
    end

    %Determinamos las dimensiones de cada una de las líneas de la sección
    %(excepto la última, porque es la distancia hacia el punto siguiente
    for cont2=1:size(y,1)-1
        d=((seccs(y(cont2),2)-seccs(y(cont2)+1,2))^2+(seccs(y(cont2),3)-
seccs(y(cont2)+1,3))^2+(seccs(y(cont2),4)-seccs(y(cont2)+1,4))^2)^.5;
        seccs(y(cont2),9)=d;
    end
end

```

```

end
%Ahora se determina para cada sección el coeficiente de rugosidad
%compuesta, con la fórmula 6.17 de Chow Hidráulica de Canales Abiertos
for cont=1:size(listasec,1)
    %Vamos trabajando sección por sección
    y=find(seccs(:,1)==listasec(cont));
    %Encontramos los valores correspondientes a cada sección del río
    yi=find(seccs(y,8)==1);
    ycp=find(seccs(y,8)==2);
    yd=find(seccs(y,8)==3);
    %Iniciamos/Reinicializamos el Perímetro Mojado Total
    pmt=0;
    sum=0;
    %Determinamos los valores de los coeficientes de Manning compuestos
    for cont2=1:size(yi,1)
        %Perímetro Mojado Parcial
        pmp=seccs(yi(cont2),9);
        %Coeficiente de rgosidad de cada sección
        np=seccs(yi(cont2),7);
        %La suma de los coeficeinte ajustadas está dada por
        sum=sum+pmp*(np^(3/2));
        %Perímetro mojado total
        pmt=pmt+pmp;
    end
    ncbiz=(sum/pmt)^(2/3);

    %Iniciamos/Reinicializamos el Perímetro Mojado Total
    pmt=0;
    sum=0;
    %Determinamos los valores de los coeficientes de Manning compuestos
    for cont2=1:size(ycp,1)
        %Perímetro Mojado Parcial
        pmp=seccs(ycp(cont2),9);
        %Coeficiente de rgosidad de cada sección
        np=seccs(ycp(cont2),7);
        %La suma de los coeficeinte ajustadas está dada por
        sum=sum+pmp*(np^(3/2));
        %Perímetro mojado total
        pmt=pmt+pmp;
    end
    nccp=(sum/pmt)^(2/3);

    %Iniciamos/Reinicializamos el Perímetro Mojado Total
    pmt=0;
    sum=0;
    %Determinamos los valores de los coeficientes de Manning compuestos
    for cont2=1:size(yd,1)
        %Perímetro Mojado Parcial
        pmp=seccs(yd(cont2),9);
        %Coeficiente de rugosidad de cada sección
        np=seccs(yd(cont2),7);
        %La suma de los coeficiente ajustadas está dada por
        sum=sum+pmp*(np^(3/2));
        %Perímetro mojado total
        pmt=pmt+pmp;
    end
end

```

```

ncbder=(sum/pmt)^(2/3);
seccs(y(1),10)=ncbiz;
seccs(y(1),11)=nccp;
seccs(y(1),12)=ncbder;
end

```

6.1.7 SECINT

```

function [rio dem]=secint(rio,dem,int);
%Esta función limpia las secciones para que solo queden las secciones
%pertenecientes a un intervalo y a una distancia determinada una de la
otra
%determinamos cuales son las secciones que serán buscadas dentro del
%intervalo (las mas cercanas al intervalo buscado)

dist=unique(rio.dflujo);
dist=(max(max(dist))-dist);
dist=sort(dist);
dist(1)=[];

%determinamos cuantas secciones al intervalo correspondiente se
utilizaran
%dentro del rio

nsec=floor((dist(end)-dist(1))/int);
%Ingresamos el primer valor del intervalo
secinte(1)=0;
for cont=1:nsec;
    secinte(cont+1,1)=int*cont;
end

%encontramos los valores de las secciones con la distancia mas apegada a
%las cuantificadas por el intervalo

for cont=1:nsec
    a=abs(dist-secinte(cont,1));
    secinte(cont,2)= find(a==min(min(a)));
end
rio.dflujoint=secinte;
%Ahora, las secciones a los intervalos fijos las colocamos dentro de una
%matriz independiente dentro del objeto del dem

y=find(dem.secerrado(:,1)==secinte(1,2));
secerradoint=dem.secerrado(y,:);

for cont=2:nsec
    y=find(dem.secerrado(:,1)==secinte(cont,2));
    secerradoint=[secerradoint;dem.secerrado(y,:)];
end
dem.secerradoint=secerradoint;

%Ahora, realizamos el mismo recorte sobre el eje calibrado del rio

```



```

%principal, donde quitamos los pixeles innecesarios

y=find(rio.riocal(:,3)==secinte(1,2));
riocalint=rio.riocal(y,:);

for cont=2:nsec
    y=find(rio.riocal(:,3)==secinte(cont,2));
    riocalint=[riocalint;rio.riocal(y,:)];
end
%Modificamos las longitudes de los tramos en cada pixel del rio
for cont=1:length(riocalint)-1
    riocalint(cont,7)=int;
end

rio.riocalint=riocalint;

```

6.1.8 SECXPUNTOS

```

function sec=secxpuntos(dem,p1,p2,tam)

%V1. Se establece el funcionamiento básico de la función: a partir de dos
%puntos, se determina la dirección, y en el punto 2 se traza una
secciones
%perpendicular a la dirección P1P2 de tamaño tam. Se pide que el punto 2
%tenga formato (X,Y,Número), donde Numero se refiere a la jerarquía del
%pixel analizado, de acuerdo a lo generado por la función "calrio".

%V1.2. Se arregla la matriz para que sea compatible con las secciones que
%genera la función "seccionar" y por lo tanto, compatible con el resto
%de las funciones creadas.
%Esta función obtiene en el punto 2 (p2) una sección transversal
%perpendicular a la dirección p1,p2.

%determinamos la dirección entre los dos puntos

%d=[(p1(1)-p2(1))/abs(p1(1)-p2(1)),(p1(2)-p2(2))/abs(p1(2)-p2(2))]
%El vector unitario de dirección entre las secciones está definido por:
d=[(p1(1)-p2(1)),(p1(2)-p2(2))]/((p1(1)-p2(1))^2+(p1(2)-p2(2))^2)^.5);
d(isnan(d))=0;
dem.mat=flip(dem.mat);
%por lo que el vector unitario de dirección
di=[d(2),-d(1)];
%determinamos donde se necesitan obtener puntos sobre la sección
    %esquina inferior izquierda
    Xref=dem.ref.XWorldLimits(1);
    Yref=dem.ref.YWorldLimits(1);
    %Resoluciones en m
    ResX=dem.ref.CellExtentInWorldX;
    ResY=dem.ref.CellExtentInWorldY;

    %Número de filas y columnas
    nfilas=size(dem.mat,1);

```

```

ncolum=size(dem.mat,2);
%esquina superior izquierda (Para las referencias en formato Matlab)
Xml=Xref;
Yml=Yref+ResY*nfilas;

%Probando, encontramos las orillas de la sección
%Coordenadas de el extremo 1
coop1.utm=[(tam/2)*di(1)+p2(1),(tam/2)*di(2)+p2(2)];
coop2.utm=[(-tam/2)*di(1)+p2(1),(-tam/2)*di(2)+p2(2)];
coop1.ml=[floor((coop1.utm(1)-Xref)/ResX),nfilas-floor((coop1.utm(2)-
Yref)/ResY)];
coop2.ml=[floor((coop2.utm(1)-Xref)/ResX),nfilas-floor((coop2.utm(2)-
Yref)/ResY)];

%Seleccionamos los puntos que se utilizarán por cambio en X
cont=1;
px=-tam/2;
% while abs(px)<=tam/2
%   %las distancias de la sección p2
%   px=px+ResX/di(1);
%   sec.coor(cont,1)=(px/2)*di(1)+p2(1);
%   sec.coor(cont,2)=(px/2)*di(2)+p2(2);
%   sec.coor(cont,3)=floor((sec.coor(cont,1)-Xref)/ResX);
%   sec.coor(cont,4)=nfilas-floor((sec.coor(cont,2)-Yref)/ResY);
%   sec.coor(cont,5)=dem.mat(sec.coor(cont,4),sec.coor(cont,3));
%   cont=cont+1;
% end
cont=1;
while abs(px)<=tam/2
    %px=px+ResX/di(1);
    px=px+abs(ResX/di(1));
    dist(cont)=px;
    cont=cont+1;
end
%dist(cont-1)=[];
py=-tam/2;
while abs(py)<=tam/2
    %py=py+ResY/di(2);
    py=py+abs(ResY/di(2));
    dist(cont)=py;
    cont=cont+1;
end
%dist(cont-1)=[];
%Forzamos al centro a aparecer listado entre los puntos de la sección
dist(cont)=0;
dist=round(dist,5);
dist=unique(dist);
dist=sort(dist);
dist(dist>tam/2)=[];
dist(dist<-tam/2)=[];
for cont=1:length(dist)
    sec.coor(cont,1)=(dist(cont))*di(1)+p2(1);
    sec.coor(cont,2)=(dist(cont))*di(2)+p2(2);
    sec.coor(cont,3)=floor((sec.coor(cont,1)-Xref)/ResX);
    sec.coor(cont,4)=nfilas-floor((sec.coor(cont,2)-Yref)/ResY);
    sec.coor(cont,5)=dem.mat(sec.coor(cont,4),sec.coor(cont,3));
end

```

```

end
cont=cont+1;
% % sec.coor(1,1)=coop1.utm(1);
% % sec.coor(1,2)=coop1.utm(2);
% % sec.coor(1,3)=coop1.ml(1);
% % sec.coor(1,4)=coop2.ml(2);
% % sec.coor(1,5)=dem.mat(sec.coor(1,4),sec.coor(1,3))
% sec.coor(cont,1)=coop2.utm(1);
% sec.coor(cont,2)=coop2.utm(2);
% sec.coor(cont,3)=coop2.ml(1);
% sec.coor(cont,4)=coop2.ml(2);
% sec.coor(cont,5)=dem.mat(sec.coor(cont,4),sec.coor(cont,3))
a=[0,0,0,0,0];
sec.coor=[a;sec.coor];
%Agregamos los valores de las "puntas"
sec.coor(cont,1)=coop1.utm(1);
sec.coor(cont,2)=coop1.utm(2);
sec.coor(cont,3)=coop1.ml(1);
sec.coor(cont,4)=coop1.ml(2);
sec.coor(cont,5)=dem.mat(sec.coor(cont,4),sec.coor(cont,3));
sec.coor(1,1)=coop2.utm(1);
sec.coor(1,2)=coop2.utm(2);
sec.coor(1,3)=coop2.ml(1);
sec.coor(1,4)=coop2.ml(2);
sec.coor(1,5)=dem.mat(sec.coor(1,4),sec.coor(1,3));
sec2=sec;
sec.coor(:,1)=p2(3);
sec.coor(:,2)=sec2.coor(:,1);
sec.coor(:,3)=sec2.coor(:,2);
sec.coor(:,4)=sec2.coor(:,5);
sec.coor(:,5)=sec2.coor(:,3);
sec.coor(:,6)=sec2.coor(:,4);

```

6.1.9 VECUNI

```

function vec=vecuni(p1,p2)

%Obtiene el vector unitario entre dos puntos. La dirección es p1->p2

d=[(p1(1)-p2(1)),(p1(2)-p2(2))]/(((p1(1)-p2(1))^2+(p1(2)-p2(2))^2)^.5);
%Consideramos la situación en que hay vectores horizontales o verticales,
%por lo que las pendientes son infinias
d(isnan(d))=0;

vec=[d(2),-d(1)];

```

6.1.10 MAPMANNING

```

function manning=mapmanning(usosuelo)

%Esta función convierte los mapas de uso de suelo en mapas de
coeficientes

```

```

%de Manning. Se necesita dar la ubicación de un archivo txt que tenga en
la
%primera columna la clave de uso de suelo y en la segunda el coeficiente
de
%Manning que le corresponda, separados por tabulador (de esta manera
pueden
%copiarse esas columnas desde excel

```

```

[archivo directorio]=uigetfile('*.txt','Seleccionar archivo C Manning');

dir2=[directorio '\\' archivo];

manning=textread(dir2, '', 'delimiter', ' ', 'emptyvalue', NaN);

for cont=1:size(manning,1)
    tic;
    manning(cont,2)
    usosuelo.mat(find(usosuelo.mat==manning(cont,1)))=manning(cont,2);
    toc;
    tminus='Tiempo restante mapa de C manning: '
    tminus= (size(manning,1)-cont)*toc/60
end
manning=flip(usosuelo.mat);

```

6.1.11 TIRANTES

```

function [A]=erosionarsteady()
%Esta función ejecuta una simulación en el programa HEC RAS y devuelve
las elevaciones del fondo, de la superficie del agua y el tirante.
h=actxserver('RAS500.HECRASCONTROLLER');
[archivo directorio]=uigetfile('*.prj');
ras_file=[directorio '\\' archivo];
h.Project_Open(ras_file);
h.ShowRas;
h.Compute_ShowComputationWindow;
h.CurrentPlanFile;
h.Compute_CurrentPlan(0,0);
h.Compute_Complete();
z9 = 'error message';
ns1=h.Schematic_XSCount
V=zeros(ns1,2);
for cont=1:ns1
    ws=h.Output_NodeOutput(1, 1, cont, 0, 1, 2);
    fondocanal=h.Output_NodeOutput(1, 1, cont, 0, 1, 5);
    tirante=ws-fondocanal;
    V(cont,1)=cont;
    V(cont,2)=fondocanal;
    V(cont,3)=ws;
    V(cont,4)=tirante;
end
A=V;
h.Project_Save; %Saves the project
h.Compute_HideComputationWindow;
h.QuitRas;
delete(h);

```

6.1.12 DIRECCIÓN

```
function dir = direccion(dirrio,secc)

%Esta función arroja la dirección del río en un pixel dado ( 1 N, 2NE,
3E,
%4SE,5S,6SO,7O,8NO)
%Como entradas necesita la matriz de sección del río calibrada del río y
el
%número de sección (número ordinal)

%variables temporales para las pruebas
%secc=2
%fin de las variables de prueba

%las coordenadas del punto actual y del siguiente
Y=dirrio(find(dirrio(:,3)==secc),1);
X=dirrio(find(dirrio(:,3)==secc),2);

Ydespues=dirrio(find(dirrio(:,3)==secc+1),1);
Xdespues=dirrio(find(dirrio(:,3)==secc+1),2);

%Determinamos las posiciones relativas entre uno y otro punto
N=Ydespues-Y;
E=Xdespues-X;

%Arriba del punto actual
%Norte
if and(E==0,N==-1)
    dir=1;
end
%Noreste
if and(E==1,N==-1)
    dir=2;
end
%NorOeste
if and(E==-1,N==-1)
    dir=8;
end

%En el mismo valor de Norte del punto actual
%Oeste
if and(E==-1,N==0)
    dir=7;
end
%Este
if and(E==1,N==0)
    dir=3;
end

%En el valor al sur del punto actual
%SurOeste
if and(E==-1,N==1)
    dir=6;
end
```

```

%Sur
if and(E==0,N==1)
    dir=5;
end
%SurEste
if and(E==1,N==1)
    dir=4;
end

```

6.1.13 ESPBOOL

```

function seccsnulas = espbool(rio,seccsespejo,vn);

%Obtenemos una sección booleana mas completa, dado que la otra es
%susceptible a contener espejos de agua se áreas del rio que no le
%corresponden.

%Agregamos la columna que servira para delimitar el espejo principal
seccsespejo.seccsnulas(:,7)=zeros;
%Avanzamos de sección en sección

for cont=1:size(seccsespejo.seccsnulas,1)
    tic
    y=find(seccsespejo.seccsnulas(:,1)==cont);

    %Contamos cuantos cuerpos de agua separados hay en una misma sección
    cont2=0;
    cont3=0;
    for cont4=1:size(y,1);
        %contamos los "inicios"
        try
            if seccsespejo.seccsnulas(y(cont4),4)==0 &&
seccsespejo.seccsnulas(y(cont4)+1,4)==1
                cont2=cont2+1;
            end
            %Contamos los finales
            if seccsespejo.seccsnulas(y(cont4),4)==1 &&
seccsespejo.seccsnulas(y(cont4)+1,4)==0
                cont3=cont3+1;
            end
            %El número de espejos queda como el mayor de estos números
            nesp=max(cont2,cont3);
        catch
            y(cont4)
        end
    end

    %Si no existen espejos (nesp==0) saltamos el procedimiento y vamos a
la
%siguiente sección. Si existe un espejo (nesp==1), la información del
%espejo de agua de la columna 4 es la del espejo principal (solo hay
%uno). Si existe mas de un espejo de agua (nesp>1) procedemos a
%determinar cual es el principal
    if nesp>0
        if nesp>1

```

```

%Determinamos cual es el espejo principal
%Para esto, suponemos como principal el espejo que está unido
al rio
%principal
yrp=rio.riocal(cont,1);
xrp=rio.riocal(cont,2);
%Encontramos el punto dentro de las secciones que corresponde
a las
%coordenadas del rio principal para la sección
yrypse=find(seccsespejo.seccsnulas(y,5)==xrp &
seccsespejo.seccsnulas(y,6)==yryp)+y(1)-1;

%Verificamos que el eje del rio pase sobre el espejo
if seccsespejo.seccsnulas(yrypse,4)==1
    %Buscamos hacia abajo el final del espejo
    cont2=0;
    yfin=[];
    while yrypse+cont2<=y(end)

        if seccsespejo.seccsnulas(yrypse+cont2,4)==0
            yfin=yrypse+cont2-1;
            break
        end
        cont2=cont2+1;
    end
    %Buscamos hacia arriba
    cont2=0;
    while yrypse+cont2>=y(1)
        if seccsespejo.seccsnulas(yrypse+cont2,4)==0
            yini=yrypse+cont2+1;
            break
        end
        cont2=cont2-1;
    end
else
    %Estamos en el caso en que el eje del rio no se encuentre
    %en un espejo de agua

    %Buscamos el espejo mas cercano hacia abajo
    cont2=1;
    while yrypse+cont2<=y(end)
        cont2=cont2+1
        if seccsespejo.seccsnulas(yrypse+cont2,4)==1
            break
        end
        if yrypse+cont2==y(end) &
seccsespejo.seccsnulas(yrypse+cont2,4)==0
            cont2=9999999;
        end
    end
    %Buscamos el espejo mas cercano hacia arriba
    cont3=-1;
    while yrypse+cont3>=y(1)
        cont3=cont3-1
        if seccsespejo.seccsnulas(yrypse+cont3,4)==1
            break

```

```

        end
        if yrpse+cont2==y(1) &
seccsespejo.seccsnulas (yrpse+cont3,4)==0
            cont3=9999999;
        end
    end

    if abs (cont3)<cont2
        yfin=yrpse+cont3+1;
        cont2=cont3;
        while yrpse+cont2>=y(1)
            if seccsespejo.seccsnulas (yrpse+cont2,4)==0
                yini=yrpse+cont2+1;
                break
            end
            cont2=cont2-1;
        end
    else
        yini=yrpse+cont2-1;
        cont2=cont2;
        while yrpse+cont2<=y(end)
            if seccsespejo.seccsnulas (yrpse+cont2,4)==0
                yfin=yrpse+cont2-1;
                break
            end
            cont2=cont2+1;
        end
    end
    end
    end
    %Columna 7, se usará para determinar el error
    yep=[yini:yfin];
    seccsespejo.seccsnulas (yep,7)=seccsespejo.seccsnulas (yep,4) ;
    %Buscamos el número de intersecciones que tiene la sección con
    %el eje principal
    %Reseteamos el contador de colisiones
    col=0;
    for cont2=1:size (y,1)

ybus=find(seccsespejo.seccsnulas (y(cont2),5)==rio.riocal (:,2) &
seccsespejo.seccsnulas (y(cont2),6)==rio.riocal (:,1));
        if isempty(ybus)==0
            col=col+1;
        end
    end
    if col>1
        seccsespejo.seccsnulas (y,8)=seccsespejo.seccsnulas (y,7) ;
    else
        seccsespejo.seccsnulas (y,8)=seccsespejo.seccsnulas (y,4) ;
    end
end

else
    %Si solo existe un espejo, copiamos la información de la
sección
    %nula a las columnas 7 y 8
    seccsespejo.seccsnulas (y,7)=seccsespejo.seccsnulas (y,4) ;
    seccsespejo.seccsnulas (y,8)=seccsespejo.seccsnulas (y,4) ;
end

```



```

        end
        %Si no hay espejos, saltamos a la siguiente sección sin hacer nada
        end
        toc*(size(seccsespejo.seccsnulas,1)-cont)/60

end
seccsnulas=seccsespejo;

```

6.1.14 EXPORTGEO

```

function exportgeo5(dem,rio,seccs,usosuelo)
%V2.En esta versión agrego soporte para los tramos en intervalos
regulares
%V3.En esta versión agrego las posiciones de los diques y la detección de
%V4. Se cambia el nombre a exportgeo2 para mantener intacta la función
%original y se hacen los cambios requeridos para que sea compatible con
las
%secciones espaciadas para evitar traslape que se utilizaron en la
función
%secctraslape
%V.5. Se agrega la compatibilidad para el coeficiente de Manning

%Determinamos cuales son los coeficientes de Manning que corresponden en
%cada punto de las secciones
cmanning=mapmanning(usosuelo);
for cont=1:size(seccs,1)
    seccs(cont,7)=cmanning(seccs(cont,6),seccs(cont,5));
end
%de "máximos" para posicionar los bancos.
dem.secerradoint=seccs;
rio.dflujoint=unique(seccs(:,1));
rio.riocalint=rio.riocal(rio.dflujoint,:);

%Determinamos de nuevo las distancias entre las secciones
for cont=1:size(rio.dflujoint,1)

rio.dflujoint(cont,2)=rio.dflujo(rio.riocalint(cont,1),rio.riocalint(cont
,2));
end
tem=rio.dflujoint;
rio.dflujoint(:,1)=tem(:,2);
rio.dflujoint(:,2)=tem(:,1);
%assignin('base','dflujo',rio.dflujoint)
%-----
dist=rio.dflujoint(:,1);

%ahora, como la distancia debe estar medida a partir de aguas abajo, lo
%invertimos
dist=max(max(dist))-dist;
for cont=1:size(rio.dflujoint,1)-1
    dist(cont)=dist(cont)-dist(cont+1);
end
%dist=dist';
rio.riocalint(:,7)=dist(:);

```

```

%-----

[archivo ruta] = uiputfile('*.geo');

%Calculamos la posición de los bancos y diques
%Cambiamos la función respecto a
bancos=bandydiqx(dem,rio,seccs);

%Datos que deberá ingresar el usuario:
nr='LaSierra';
%Número Tramos
nt='1';
%Nombre del tramo(s)
nomt='1';
%unidades usados
unidades='Meters';

%Seleccionamos el nombre y ubicación del archivo
fileID = fopen([ruta archivo], 'w');
%IMPRIMIMOS LOS ENCABEZADOS
fprintf(fileID, '%1s\r\n', nr);
%Esta es la línea para espacios
fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'BEGIN HEADER:');
fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');
fprintf(fileID, '%1s %1s\r\n', 'NUMBER OF REACHES:', nt);
fprintf(fileID, '%1s %1d\r\n', 'NUMBER OF CROSS-SECTIONS:', length(seccs));
fprintf(fileID, '%1s %1s\r\n', 'UNITS:', unidades);
fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'END HEADER:');
fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');
%IMPRIMIMOS LOS PUNTOS DE LA RED DE DRENAJE
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'BEGIN STREAM NETWORK:');
formato = 'Endpoint: %1.2f, %1.2f, %1.6f, %1d\r\n';
%dlmwrite([ruta archivo], rio.riocal, '-
append', 'newline', 'pc', 'precision', 12)
x=rio.riocalint(:,5)';
y=rio.riocalint(:,6)';
z=rio.riocalint(:,8)';

nsecc=rio.riocalint(:,3)';
A=[x;y;z;nsecc];
fprintf(fileID, formato, A);
fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');
%Datos del tramo
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'REACH:');
fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');
fprintf(fileID, '%1s %1s\r\n', 'STREAM ID:', nr);
fprintf(fileID, '%1s %1s\r\n', 'REACH ID:', nomt);
fprintf(fileID, '%1s %1d\r\n', 'FROM POINT', 1);
fprintf(fileID, '%1s %1d\r\n', 'TO POINT:', length(rio.riocalint));
fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');
%Colocamos los datos de la línea central del tramo
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'CENTERLINE:');
%colocamos las distancias al origen de las secciones
dist=rio.dflujoint(:,1);

```

```

%ahora, como la distancia debe estar medida a partir de aguas abajo, lo
%invertimos
dist=max(max(dist))-dist;
dist=dist';
%dist(1)=[];
x2=rio.riocal(:,5)';
y2=rio.riocal(:,6)';
z2=rio.riocal(:,8)';
x2(end)=[];
y2(end)=[];
z2(end)=[];
dist2=unique(rio.dflujo);
dist2(1)=[];
dist2=dist2-dist2(1);
dist2=max(max(dist2))-dist2;
dist2=dist2';
dist2(end)=[];
assignin('base', 'dflujo', dist2);
assignin('base', 'x', x2);
assignin('base', 'y', y2);
assignin('base', 'z', z2);
A=[x2;y2;z2;dist2];
assignin('base', 'A', A);
formato = '%1.2f, %1.2f, %1.6f, %1.2f\r\n';
fprintf(fileID, formato, A);
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'END:');
fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'END STREAM NETWORK:');
fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');
%COLOCAMOS LOS DATOS DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'BEGIN CROSS-SECTIONS:');
fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');
formato = '%1.9f, %1.8f, %1.14f\r\n';
for cont=1:length(rio.dflujoint)
    y=find(dem.secerradoint(:,1)==rio.dflujoint(cont,2));
    fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');
    fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'CROSS-SECTION:');
    fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');
    fprintf(fileID, '%1s %1s\r\n', 'STREAM ID:', nr);
    fprintf(fileID, '%1s %1s\r\n', 'REACH ID:', nomt);
    fprintf(fileID, '%1s %1.2f\r\n', 'STATION:', dist(cont));
    fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'NODE NAME:');
    %Colocamos los bancos

    distsec=[bancos.biz(cont,5),bancos.bder(cont,5)];

    fprintf(fileID, '%1s %1.3f, %1.3f\r\n', 'BANK POSITIONS:', distsec);
    if cont<max(max(dem.secerradoint(:,1)))
        fprintf(fileID, '%1s %1.2f, %1.2f, %1.2f\r\n', 'REACH LENGTHS:', ...
            bancos.biz(cont,8), rio.riocalint(cont,7), bancos.bder(cont,8));

%rio.riocalint(cont,7), rio.riocalint(cont,7), rio.riocalint(cont,7));
    end
%Inicia coeficiente de rugosidad de Manning-----

```

```

%Un espacio para separar de la sección anterior
fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');
%Se imprime el encabezado de la sección
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'NVALUES:');
%Continuamos en la siguiente línea
fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');
>Listamos los valores de los coeficientes compuestos por sección
%Las columnas 10, 11 y 12, en la primer fila de la sección, de la
tabla
%'secciones' contienen los valores del coeficiente de Manning
compuesto
%para la sección
ycoefm=find(secCs(:,11)~=0);
%Creamos una tabla que contenga: No.Secc,Coef.Man.Banco.Iz,
%Coef.Canal Prin y Coef. Manning Banco Der
coefman=secCs(ycoefm, [1;10;11;12]);
%Determinamos si existe el canal del banco izquierdo. Si existe, lo
%imprimimos junto con el canal principal. En caso de no existir, solo
%se imprime el canal principal (en ubicación "0", ya que sería desde
el
%principio
if isnan(coefman(cont,2))==0
    fprintf(fileID, '%1s, %1.3f\r\n', '0.00', coefman(cont,2));
    fprintf(fileID, '%1.7f,
%1.3f\r\n', bancos.biz(cont,5), coefman(cont,3));
else
    fprintf(fileID, '%1s, %1.3f\r\n', '0.00', coefman(cont,3));
end
%Verificamos que exista el canal derecho. De ser el caso, lo
imprimimos
if isnan(coefman(cont,4))==0
    fprintf(fileID, '%1.7f,
%1.3f\r\n', bancos.bder(cont,5), coefman(cont,4));
end

%Termina coeficiente de rugosidad de Manning-----

fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');
%Agregamos las posiciones de los diques
diqizq=[1,bancos.biz(cont,5),bancos.biz(cont,4)];
diqder=[2,bancos.bder(cont,5),bancos.bder(cont,4)];

fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'LEVEE POSITIONS:');
fprintf(fileID, '%1.0f, %1.7f, %1.5f\r\n', diqizq);
fprintf(fileID, '%1.0f, %1.7f, %1.5f\r\n', diqder);

fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'CUT LINE:');
coord=[dem.secerradoint(y(1),2);dem.secerradoint(y(1),3)];
fprintf(fileID, '%1.9f, %1.8f\r\n', coord);
coord=[rio.riocalint(cont,5);rio.riocalint(cont,6)];
fprintf(fileID, '%1.9f, %1.8f\r\n', coord);
coord=[dem.secerradoint(y(end),2);dem.secerradoint(y(end),3)];
fprintf(fileID, '%1.9f, %1.8f\r\n', coord);
fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');

```

```

fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'SURFACE LINE:');

A=[dem.secerradoint(y,2)';dem.secerradoint(y,3)';dem.secerradoint(y,4)'];
fprintf(fileID, formato, A);
fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'END:');
fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');

end
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'END CROSS-SECTIONS:');
fprintf(fileID, '%0s\r\n', '');
%Comenzamos las líneas de los diques-----
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'BEGIN LEVEES:');
%Dique izquierdo
fprintf(fileID, '%1s %1s\r\n', 'LEVEE ID:', '1');
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'SURFACE LINE:');
diqs=bancos.biz(:, [2:4]);
fprintf(fileID, '%1.8f %1.8f
%1.8f\r\n', [diqs(:,1)';diqs(:,2)';diqs(:,3)']);
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'END:');
%Dique derecho
fprintf(fileID, '%1s %1s\r\n', 'LEVEE ID:', '2');
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'SURFACE LINE:');
diqs=bancos.bder(:, [2:4]);
fprintf(fileID, '%1.8f %1.8f
%1.8f\r\n', [diqs(:,1)';diqs(:,2)';diqs(:,3)']);
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'END:');
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'END LEVEES:');
%termina línea de los diques-----
fclose(fileID);

```

6.1.15 BANYDIQ

```

function bancos = banydiqx(dem, rio, secCs)
%Esta función regresa los datos que se necesitan para posicionar los
bancos
%izquierdo y derecho al lado del eje de rio, así como datos necesarios
para
%colocar ahí los diques que evitan que el flujo salga del canal principal
%sin antes sobrepasar el nivel del canal
%V.X Se agrega la compatibilidad para las secciones espaciadas con
%sectraslape
%V.X2 Se agregan las coordenadas del centroide del banco

%Esta variable la utilizo dependiendo si se le proporciono o no una
matriz
%de secciones independientes o no a la función
cont3=1;
clutch=2;
if isempty(secCs)==0
    dem.secerradoint=secCs;

```

```

    rio.dflujoint=unique(secCs(:,1));
    rio.riocalint=rio.riocal(rio.dflujoint,:);
    clutch=1;
end
%
for cont=1:length(rio.dflujoint)

    %encontramos las coordendas y de la matriz (el ordinal de los
elementos
    %de arriba hacia abajo) que corresponden a la sección en cuestión
    y=find(dem.secerradoint(:,1)==rio.dflujoint(cont,clutch));

    %Las coordenadas del eje
    Xeje=rio.riocalint(cont,5);
    Yeje=rio.riocalint(cont,6);

    %Determinamos la longitud de la sección
    lonsec=((dem.secerradoint(y(1),2)-
dem.secerradoint(y(end),2))^2+(dem.secerradoint(y(1),3)-
dem.secerradoint(y(end),3))^2)^.5;
    %encontramos el valor Y que corresponde al centro del rio dentro de
la
    %matriz de secciones
    y2=min(find(dem.secerradoint(y,2)==Xeje &
dem.secerradoint(y,3)==Yeje)+min(min(y))-1);

    %encontramos el primer máximo a la izquierda por el método de la
parábola
    max=0;
    cont2=1;
    while max==0
        if y2-cont2-2>=y(1)
            p1=dem.secerradoint(y2-cont2,4);
            p2=dem.secerradoint(y2-cont2-1,4);
            p3=dem.secerradoint(y2-cont2-2,4);
        else
            max=y2-cont2-1;
        end
        if p2>=p3 & p2>p1
            max=y2-cont2-1;
        end
        p1=0;
        p2=0;
        p3=0;
        cont2=cont2+1;
    end
    %Colocamos los datos del banco izquierdo encontrado en una matriz
    %Colocamos primero la sección a la que pertenece el banco
    bancos.biz(cont,1)=dem.secerradoint(y(1));
    cont
    %Colocamos las tres coordenadas del banco, x,y,z

    bancos.biz(cont,2)=dem.secerradoint(max,2);
    bancos.biz(cont,3)=dem.secerradoint(max,3);
    bancos.biz(cont,4)=dem.secerradoint(max,4);

```

```

%colocamos el porcentaje que le corresponde en cuanto a la longitud
de
%la sección
Xiz=bancos.biz(cont,2);
Yiz=bancos.biz(cont,3);
diz=((Xeje-Xiz)^2+(Yeje-Yiz)^2)^0.5;

if diz>301
    bancos.biz(cont,1)
    Xiz
    Yiz
    diz
    y2-cont2-2
    max
end
bancos.biz(cont,5)=(lonsec/2-diz)/lonsec;

%-----
%Encontramos el primer máximo a la derecha
max=0;
cont2=1;
while max==0
    if y2+cont2+2<=y(end)
        p1=dem.secerradoint(y2+cont2,4);
        p2=dem.secerradoint(y2+cont2+1,4);
        p3=dem.secerradoint(y2+cont2+2,4);
    else
        max=y2+cont2+1;
    end
    if p2>=p3 & p2>p1
        max=y2+cont2+1;
    end
    cont2=cont2+1;
end
%Colocamos los datos del banco izquierdo encontrado en una matriz
%Colocamos primero la sección a la que pertenece el banco
bancos.bder(cont,1)=dem.secerradoint(y(1));
%Colocamos las tres coordenadas del banco, x,y,z

bancos.bder(cont,2)=dem.secerradoint(max,2);
bancos.bder(cont,3)=dem.secerradoint(max,3);
bancos.bder(cont,4)=dem.secerradoint(max,4);
%colocamos el porcentaje que le corresponde en cuanto a la longitud
de
%la sección
Xder=bancos.bder(cont,2);
Yder=bancos.bder(cont,3);
dder=((Xeje-Xder)^2+(Yeje-Yder)^2)^0.5;
bancos.bder(cont,5)=(lonsec/2+dder)/lonsec;

end
%Encontramos las coordenadas de los tercios centrales
try
for cont=1:size(bancos.biz,1)

```

```

    %bancos.biz(cont,6)=(bancos.biz(cont,1)-
bancos.biz(cont+1,1))^2+(bancos.biz(cont,2)-bancos.biz(cont+1,2))^2)^.5;
    %bancos.bder(cont,6)=(bancos.bder(cont,1)-
bancos.bder(cont+1,1))^2+(bancos.bder(cont,2)-
bancos.bder(cont+1,2))^2)^.5;

    ys=find(seccs(:,1)==bancos.biz(cont,1));
    if bancos.biz(cont,5)~=0
        xini=seccs(ys(1),2);
        yini=seccs(ys(1),3);
        %la distancia del centroide
        dci=(2/3)*((xini-bancos.biz(cont,2))^2+(yini-
bancos.biz(cont,3))^2)^.5;
        %El vector de dirección
        iiz=-1*[(xini-bancos.biz(cont,2));(yini-
bancos.biz(cont,3))]/abs(((xini-bancos.biz(cont,2))^2+(yini-
bancos.biz(cont,3))^2)^.5);
        xci=xini+iiz(1)*dci;
        yci=yini+iiz(2)*dci;
    else
        %Las coordenadas del centroide
        xci=bancos.biz(cont,2);
        yci=bancos.biz(cont,3);

    end

    if bancos.bder(cont,5)~=1
        xfin=seccs(ys(end),2);
        yfin=seccs(ys(end),3);
        dcd=(1/3)*((xfin-bancos.bder(cont,2))^2+(yfin-
bancos.bder(cont,3))^2)^.5;
        ider=[(xfin-bancos.bder(cont,2));(yfin-
bancos.bder(cont,3))]/abs(((xfin-bancos.bder(cont,2))^2+(yfin-
bancos.bder(cont,3))^2)^.5);
        xcd=bancos.bder(cont,2)+ider(1)*dcd;
        ycd=bancos.bder(cont,3)+ider(2)*dcd;

    else
        xcd=bancos.bder(cont,2);
        ycd=bancos.bder(cont,3);
    end

    bancos.biz(cont,6)=xci;
    bancos.biz(cont,7)=yci;
    bancos.bder(cont,6)=xcd;
    bancos.bder(cont,7)=ycd;

end
catch
    cont
end
%Determinamos las distancias entre los bancos
for cont=1:size(bancos.biz,1)-1
    bancos.biz(cont,8)=(bancos.biz(cont,6)-
bancos.biz(cont+1,6))^2+(bancos.biz(cont,7)-bancos.biz(cont+1,7))^2)^.5;
    bancos.bder(cont,8)=(bancos.bder(cont,6)-
bancos.bder(cont+1,6))^2+(bancos.bder(cont,7)-
bancos.bder(cont+1,7))^2)^.5;

```


end

6.1.16 SECCIONAR

```
function V = seccionar(dem,rio,d)
%Obtengo las secciones transversales a partir de un punto
%Los datos de entrada serán: Coordenadas X e Y del punto
%Dirección de la sección
%Coordenadas de Referencia
%Resolución en m de los pixeles
%Tamaño de la sección (en pixeles, por ahora)
%Matriz del dem

%Dirección de la sección, donde 1 es horizontal, y gira en sentido de las
%manecillas del reloj alrededor del punto inicial
matdem=flip(dem.mat);
[filas,cols]=size(matdem);
V2=zeros(1,6);

    %Variables de prueba
    %Coordenadas de Referencia
    %esquina inferior izquierda
    Xref=dem.ref.XWorldLimits(1);
    Yref=dem.ref.YWorldLimits(1);
    %Resoluciones en m
    ResX=dem.ref.CellExtentInWorldX;
    ResY=dem.ref.CellExtentInWorldY;
    %cont=2
for cont2=1:(length(rio.riocal))
    direc=rio.riocal(cont2,4);
    %direccion=2;

        %Coordenadas del pixel por filas y columnas (Izquierda a derecha, de
arriba
    %a abajo)
    %X=1000;
    %Y=1083;
    %find(drio(:,3)==cont2)

    %Estas son las coordenadas en formato matlab del centro de la sección
    X=rio.riocal(cont2,2);
    Y=rio.riocal(cont2,1);

    %Fin variables de prueba
    %
    %Número de filas y columnas
    nfilas=size(dem.mat,1);
    ncolumn=size(dem.mat,2);
    %esquina superior izquierda (Para las referencias en formato Matlab)
    Xml=Xref;
    Yml=Yref+ResY*nfilas;

    %Coordenadas del pixel reales
    Xr=Xml+X*ResX;
```

```

Yr=Yml-Y*ResY;

%Señalamos cuantos pixeles debe medir la sección en cada dirección
tam=d;

%Seleccionamos que dirección tiene la tangente( 1 N, 2NE, 3E,
%4SE,5S,6SO,7O,8NO)

cont3=1;
V=zeros(tam*2+1,6);
switch direc
  case {1,5}
    for cont=1:(tam*2+1)
      if X-tam-1+cont>0 & X-tam-1+cont<=cols
        %El número de la sección
        V(cont3,1)=cont2;
        %La coordenada en X
        V(cont3,2)=Xr-ResX*(tam+1-cont);
        %La Coordenada en Y
        V(cont3,3)=Yr;
        %El valor de la sección
        V(cont3,4)=matdem(Y,X-tam-1+cont);
        %Las coordenadas dentro de la matriz de la sección
        V(cont3,5)=(V(cont3,2)-Xml)/ResX;
        V(cont3,6)=(Yml-V(cont3,3))/ResY;
        cont3=cont3+1;
      end
    end

  case {2,6}
    for cont=1:(tam*2+1)
      if Y+tam+1-cont>0 & Y+tam+1-cont<=filas
        if X+tam+1-cont>0 & X+tam+1-cont<=cols
          %El número de la sección
          V(cont3,1)=cont2;
          %La coordenada en X
          V(cont3,2)=Xr+ResX*(tam+1-cont);
          %La Coordenada en Y
          V(cont3,3)=Yr-ResY*(tam+1-cont);
          %El valor de la sección

          V(cont3,4)=matdem(Y+tam+1-cont,X+tam+1-cont);
          %V(cont,4)=M(Y+tam+1-cont,X-tam-1+cont);
          %Las coordenadas dentro de la matriz de la sección
          V(cont3,5)=(V(cont3,2)-Xml)/ResX;
          V(cont3,6)=(Yml-V(cont3,3))/ResY;
          cont3=cont3+1;
        end
      end

    end

  case {3,7}

```

```

for cont=1:(tam*2+1)
    if Y-tam-1+cont>0 & Y-tam-1+cont<=filas
        %El número de la sección
        V(cont3,1)=cont2;
        %La coordenada en X
        V(cont3,2)=Xr;
        %La Coordenada en Y
        V(cont3,3)=Yr+ResY*(tam+1-cont);
        %El valor de la sección
        V(cont3,4)=matdem(Y-tam-1+cont,X);
        V(cont3,5)=(V(cont3,2)-Xm1)/ResX;
        V(cont3,6)=(Ym1-V(cont3,3))/ResY;
        cont3=cont3+1;
    end
    %Las coordenadas dentro de la matriz de la sección

end
case {4,8}
for cont=1:(tam*2+1)
    if Y-tam-1+cont>0 & Y-tam-1+cont<=filas
        if X+tam+1-cont>0 & X+tam+1-cont<=cols
            %El número de la sección
            V(cont3,1)=cont2;
            %La coordenada en X
            V(cont3,2)=Xr+ResX*(tam+1-cont);
            %La Coordenada en Y
            V(cont3,3)=Yr+ResY*(tam+1-cont);
            %El valor de la sección
            V(cont3,5)=(V(cont3,2)-Xm1)/ResX;
            V(cont3,6)=(Ym1-V(cont3,3))/ResY;
            V(cont3,4)=matdem(Y-tam-1+cont,X+tam+1-cont);
            cont3=cont3+1;
        end
    end
    %Las coordenadas dentro de la matriz de la sección

end

end

V2=[V2;V];
end
% V(1,1)='Sección';
% V(1,2)='X';
% V(1,3)='Y';
% V(1,4)='Z';
V=V2;
for cont=1:10
    beep
    pause(1)
end
%Guardamos en un archivo la matriz con:
%dlmwrite('seccion.txt',a,'newline','pc','precision',12)

```

6.1.17 EROSIONADOR

```
function [seccs p
dem4]=erosionador (dem,dem2,rio2,tam,esp,vn,usosuelo,tirantes)

%Esta función "erosiona" el tirante del agua de secciones

%Dem: El archivo del dem original importado a matlab
%Rio: La matriz de rio calibrado del dem que ya fue cerrado
%Tam: Tamaño de la sección en metros (debe coincidir con el tamaño de
%      sección usado para seccionar el dem previo final listo para simular
%Esp: el espaciado deseable entre secciones (se modificara para evitar
%      traslapes)
%vn: El criterio de valor nulo que usa el dem original
%usosuelo: El objeto de estructura con los datos del dem de uso de suelo
%(el prorama internamente hace referencia al usosuelo.mat)
%Tirantes: Es la matriz de datos sobre la elevación de superficie del agua
%obtenidos de la simulación
%determinamos los valores correspondientes al espejo de agua dentro de
las
%secciones.

%Obtenemos el tamaño de resolución de los pixeles (asumimos pixeles
%cuadrados)

tp=dem2.info.PixelScale(1);
%Determinamos cuantos pixeles corresponden al tamaño seleccionado
%(Observando que la función seccionar pide como dato el número de pixeles
%a cada lado del eje)
d=ceil(tam/(2*tp));

seccnulas=seccionar(dem,rio2,d);
%Dejamos los valores de elevaciones como booleano según pertenece o no al
%espejo de agua
nulo=seccnulas(:,4);
nulo(nulo~=vn)=0;
nulo(nulo==vn)=1;
seccnulas(:,4)=nulo;

%Obtenemos las secciones del dem cerrado (antes de hacer el pitremoval)
dem3=dem2;
dem3.mat=flip(dem3.demcerrado);
seccspejo=seccionar(dem3,rio2,d);

%Hacemos una lista de las secciones utilizadas en la simulación (las que
no
%generan traslape)
seccstraslape=secctraslape(dem2,rio2,tam,esp,usosuelo);
%Hacemos la lista de las secciones usadas en HEC
nseccstras=unique(seccstraslape(:,1));
nseccstras(nseccstras==0)=[];
%Determinamos cuantas secciones hay dentro del rio
nseccrio=rio2.riocal(end,3);
```

```

%Quitamos los renglones en blanco dentro de las matrices de secciones
y=find(seccsespejo(:,1)==0);
seccsespejo(y,:)=[];

y=find(seccnulas(:,1)==0);
seccnulas(y,:)=[];

% assignin('base', 'secespejo',seccsespejo);
% assignin('base', 'seccnulas',seccnulas);
% assignin('base', 'seccstraslape',seccstraslape);
%Creamos suna matriz de superficies de agua para todas las secciones (por
%ahora, solo tenemos en las secciones que no se traslapan
p=[];
ws=[];
for cont=1:size(tirantes,1)
    try
        if cont+1>size(tirantes,1)
            ysnu=find(seccnulas(:,1)>=nseccstras(cont));
        else
            ysnu=find(seccnulas(:,1)>=nseccstras(cont) &
seccnulas(:,1)<nseccstras(cont+1));
        end

        %Determinamos la superficie del agua en la sección booleana
        ws=[ws;seccnulas(ysnu,4)*tirantes(cont,3)];
    catch
    end
end

for cont=1:nseccrio
    try

        ysnu=find(seccsespejo(:,1)==cont);
        p(ysnu,1)=ysnu;
        esp=seccsespejo(ysnu,4).*seccnulas(ysnu,4);
        p(ysnu,2)=esp;
        tir=ws(ysnu)-esp;
        p(ysnu,3)=tir;
        tirm=max(tir);
        tir=tirm*seccnulas(ysnu,4);
        p(ysnu,4)=tir;

        seccsespejo([ysnu(1):ysnu(end)],4)=(seccsespejo([ysnu(1):ysnu(end)],4)-
tir);
    catch
        cont
    end
end
p(:,5)=ws;
%Las secciones erosionadas
seccs.seccer=seccsespejo;
dem3=dem;
%rio3=rio2;
[rio3 dem3]=closegap2b(dem3,rio2,-10,seccs.seccer);
dem4=dem3;

```

```
dem4.mat=flip(dem4.demcerrado);
%Las secciones erosionadas sin traslape
seccts.secctraslape=secctraslape(dem4,rio2,600,100,usosuelo);
%El espejo de agua conocido original
```

6.1.18 IMPORTAR DESDE HEC

Estas son un grupo de herramientas programadas en visual basic que se encargan de procesar datos a partir de los archivos *.geo de HEC-RAS, para transformar los puntos de las secciones en coordenadas

Sub coordenadassecciones()

'Extrae las coordenadas de las Cutlines de las secciones

Dim fd As Office.FileDialog

Dim myFile As String, text As String, textline As String, posLat As Integer, posLong As Integer

Set fd = Application.FileDialog(msoFileDialogFilePicker)

With fd

```
.AllowMultiSelect = False
.Title = "Importar Coordenadas Secciones HEC-RAS"
.Filters.Clear
.Filters.Add "Archivos .geo", "*.g??"
If .Show = True Then
    archivo = .SelectedItem(1)
```

End If

End With

'Abrimos el archivo

Open archivo For Input As #1

cont = 1

cont3 = 0

Do Until EOF(1)

Line Input #1, textline

If Mid(textline, 1, 15) = "XS GIS Cut Line" Then

Line Input #1, textline

Do While Mid(textline, 1, 1) <> "N"

'Dividimos la linea de texto en partes de 16 dígitos

puntos = Round(Len(textline) / 16, 0)

For cont2 = 1 To puntos

Range("b1").Item(cont, cont2 + cont3) = Mid(textline, 1 + (cont2 - 1) * 16, 16)

Next

'Range("a1").Item(cont, 1) = textline

```

        'cont = cont + 1
        Line Input #1, textline
        cont3 = cont3 + cont2 - 1
    Loop

    Range("a1").Item(cont, 1) = cont
    cont3 = 0
    cont = cont + 1

End If
text = text & textline
Loop

Close #1
'posLat = InStr(text, "XS GIS Cut")

End Sub

Sub puntossecciones()

'Obtiene los datos Distancia-Elevación de la sección

Dim fd As Office.FileDialog
Dim myFile As String, text As String, textline As String, posLat As Integer, posLong As Integer

    Set fd = Application.FileDialog(msoFileDialogFilePicker)

    With fd

        .AllowMultiSelect = False
        .Title = "Importar Coordenadas Secciones HEC-RAS"
        .Filters.Clear
        .Filters.Add "Archivos .geo", "*.g??"
        If .Show = True Then
            archivo = .SelectedItem(1)

        End If
    End With

'Abrimos el archivo
Open archivo For Input As #1

cont = 1
cont3 = 0
Do Until EOF(1)
    Line Input #1, textline
    If Mid(textline, 1, 9) = "#Sta/Elev" Then

```

```

Line Input #1, textline

Do While Mid(textline, 1, 1) <> "#"
'Dividimos la linea de texto en partes de 16 dígitos
puntos = Round(Len(textline) / 8, 0)
For cont2 = 1 To puntos
    Range("b1").Item(cont, cont2 + cont3) = Mid(textline, 1 + (cont2 - 1) * 8, 8)
Next
'Colocamos las distancias y los vectores unitarios

'Range("a1").Item(cont, 1) = textline
'cont = cont + 1
Line Input #1, textline
cont3 = cont3 + cont2 - 1
Loop
Range("a1").Item(cont, 1) = cont
cont3 = 0
cont = cont + 1

End If
text = text & textline
Loop

Close #1

'Ahora, no todas las secciones comienzan desde cero, es por esto vamos a arreglar las secciones de
forma que las distancias sean relativas al inicio
cont = 1
Do While Range("b1").Item(cont, 1) <> ""
    ini = Range("b1").Item(cont, 1)
    cont2 = 1
    If ini <> 0 Then
        Do While Range("b1").Item(cont, cont2) <> ""
            Range("b1").Item(cont, cont2) = Range("b1").Item(cont, cont2) - ini

            cont2 = cont2 + 2
        Loop
    End If
    cont = cont + 1
Loop

End Sub

Sub distancias()
'Colocamos las distancias, emparejadas con los vectores unitarios
cont = 1
Do While Worksheets(1).Range("a1").Item(cont, 1) <> ""
    'Colocamos el número de la sección

```



```

Range("a1").Item(cont, 1) = Worksheets(1).Range("a1").Item(cont, 1)
'Colocamos las parejas "distancia-vector" (vector tiene dos coordenadas
cont2 = 2
cont3 = 2
With Worksheets(1).Range("a1")
  Do While .Item(cont, cont2 + 2) <> ""
    dist = ((.Item(cont, cont2) - .Item(cont, cont2 + 2)) ^ 2 + (.Item(cont, cont2 + 1) - .Item(cont,
cont2 + 3)) ^ 2) ^ 0.5
    Range("a1").Item(cont, cont3) = dist
    'ALgunos puntos están repetidos, así que tomamos en cuenta el caso en que la distancia sea
cero
    If dist = 0 Then

      Range("a1").Item(cont, cont3 + 1) = 0
      Range("a1").Item(cont, cont3 + 2) = 0
    Else

      Range("a1").Item(cont, cont3 + 1) = -(.Item(cont, cont2) - .Item(cont, cont2 + 2)) / dist
      Range("a1").Item(cont, cont3 + 2) = -(.Item(cont, cont2 + 1) - .Item(cont, cont2 + 3)) /
dist
    End If
    cont2 = cont2 + 2
    cont3 = cont3 + 3
  Loop
  cont3 = 5
  Do While Range("a1").Item(cont, cont3) <> ""
    Range("a1").Item(cont, cont3) = Range("a1").Item(cont, cont3 - 3) + Range("a1").Item(cont,
cont3)
    cont3 = cont3 + 3
  Loop
End With
cont = cont + 1
Loop
End Sub
Sub coordenadas()
'finalmente, deterinamos las coordenadas de cada punto de las secciones
cont = 1
cont4 = 1

With Worksheets(2).Range("a1")
  Do While .Item(cont, 1) <> ""
    cont2 = 2

    Do While .Item(cont, cont2) <> ""
      d = .Item(cont, cont2)
      d2 = d
      h = .Item(cont, cont2 + 1)
      cont3 = 2

      'Do While (d > Round(Worksheets(3).Range("a1").Item(cont, cont3), 3) &
Round(Worksheets(3).Range("a1").Item(cont, cont3), 3) <> 0)

```

```

Do While (d > Round(Worksheets(3).Range("a1").Item(cont, cont3), 3))
    cont3 = cont3 + 3
    If Worksheets(3).Range("a1").Item(cont, cont3) = "" Then
        Exit Do
    End If

```

Loop

```

xini = Worksheets(1).Range("a1").Item(cont, 2 * (cont3 + 1) / 3)
yini = Worksheets(1).Range("a1").Item(cont, 2 * (cont3 + 1) / 3 + 1)
If cont3 > 2 Then d = d - Worksheets(3).Range("a1").Item(cont, (cont3 - 3))
x = Worksheets(3).Range("a1").Item(cont, cont3 + 1) * d + xini
y = Worksheets(3).Range("a1").Item(cont, cont3 + 2) * d + yini

```

```

Range("a1").Item(cont4, 1) = cont
Range("a1").Item(cont4, 2) = x
Range("a1").Item(cont4, 3) = y
Range("a1").Item(cont4, 4) = h
Range("a1").Item(cont4, 5) = d2
cont4 = cont4 + 1
cont2 = cont2 + 2

```

Loop

```
'cont4 = cont4 + 1
```

```
cont = cont + 1
```

Loop

End With

End Sub

Sub suavizar()

'Ya que hay una gran cantidad de picos falsos, trataremos de suavizar un poco las secciones de forma que se reduzca la detección de márgenes falsas

'Elegimos el nivel de suavizado (cuantas secciones se van a utilizar en el promedio

```
Worksheets(5).Activate
```

```
n = 5
```

```
cont = 1
```

```
cont4 = 1
```

'Determinamos las dimensiones

```
Dim ndatossec As Long
```

```
Dim nsec As Long
```

```
With Worksheets(2).Range("a1")
```

```
nsec = .Item(1, 1).Cells(Rows.Count, 1).End(xlUp).Row
```

```
'Do While .Item(cont, 1) <> ""
```

```
For cont = 1 To nsec
```

```
    ndatossec = .Item(cont, 1).Cells(1, Columns.Count).End(xlToLeft).Column
```

```
    cont2 = 3
```

'Sacamos el promedio de los datos en los que es posible (antes del final de la media

```
For cont2 = 3 To (ndatossec - n * 2) Step 2
```

```
'Do While .Item(cont, cont2) <> ""
```

```

    valor = 0
    For cont3 = 0 To (n - 1) * 2 Step 2
        valor = valor + .Item(cont, cont2 + cont3)
    Next
    valor = valor / n
    Range("a1").Item(cont, 1) = .Item(cont, 1)
    Range("a1").Item(cont, cont2 - 1) = .Item(cont, cont2 - 1)
    'Range("a1").Item(cont, (cont2 - 1) / 2 + 1) = valor
    Range("a1").Item(cont, cont2) = valor
    'cont2 = cont2 + 2
Next
'Obtenemos los promedios restantes

For cont2 = (ndatossec - n * 2) + 2 To ndatossec Step 2
    valor = 0
    For cont3 = 0 To (ndatossec - cont2) * 2 Step 2
        valor = valor + .Item(cont, cont2 + cont3)
    Next
    valor = valor / ((ndatossec - cont2) / 2 + 1)

    'Range("a1").Item(cont, (cont2 - 1) / 2 + 1) = valor
    Range("a1").Item(cont, cont2 - 1) = .Item(cont, cont2 - 1)
    Range("a1").Item(cont, cont2) = valor
Next

'Loop
'cont = cont + 1
Next
'Loop

End With
End Sub
Sub centro()
Worksheets(6).Activate
'Encontramos a que distancia (dentro de la sección) en la que se encuentra el centro
cont = 1
Range("e:e").Clear
With Worksheets(1).Range("a1")

    Dim ndatossec As Long

    Do While .Item(cont, 1) <> ""
        ndatossec = .Item(cont, 1).Cells(1, Columns.Count).End(xlToLeft).Column
        npuntos = (ndatossec - 1) / 2 - 1
        If npuntos Mod 2 = 0 Then
            dist = 0

```

```

    For cont2 = 1 To npuntos Step 2
        dist = dist + ((.Item(cont, 1 + cont2) - .Item(cont, 3 + cont2)) ^ 2 + (.Item(cont, 2 +
cont2) - .Item(cont, 4 + cont2)) ^ 2) ^ 0.5
    Next
    Range("a1").Item(cont, 1) = .Item(cont, 1)
    Range("a1").Item(cont, 2) = dist
    Range("a1").Item(cont, 3) = .Item(cont, npuntos + 2)
    Range("a1").Item(cont, 4) = .Item(cont, npuntos + 3)
Else
    'Hacemos dos corridas, una hacia adelante y una hacia atrás, comprobando cual funciona

    'Atrás
    npuntos = npuntos - 1
    dist = 0
    For cont2 = 1 To npuntos Step 2
        dist = dist + ((.Item(cont, 1 + cont2) - .Item(cont, 3 + cont2)) ^ 2 + (.Item(cont, 2 +
cont2) - .Item(cont, 4 + cont2)) ^ 2) ^ 0.5
    Next

    Range("a1").Item(cont, 1) = .Item(cont, 1)
    Range("a1").Item(cont, 2) = dist
    Range("a1").Item(cont, 3) = .Item(cont, npuntos + 2)
    Range("a1").Item(cont, 4) = .Item(cont, npuntos + 3)
    If (WorksheetFunction.RoundDown(Range("i1").Item(cont, 1), 0) = 0 And
WorksheetFunction.RoundDown(Range("i1").Item(cont, 2), 0) = 0) Then Range("a1").Item(cont, 5)
= 1

    'Adelante. Solo sustituimos si no dio resultados adecuados en a corrida pasada
    If Not Range("a1").Item(cont, 5) = 1 Then
        npuntos = npuntos + 2
        dist = 0
        For cont2 = 1 To npuntos Step 2
            dist = dist + ((.Item(cont, 1 + cont2) - .Item(cont, 3 + cont2)) ^ 2 + (.Item(cont, 2 +
cont2) - .Item(cont, 4 + cont2)) ^ 2) ^ 0.5
        Next

        Range("a1").Item(cont, 1) = .Item(cont, 1)
        Range("a1").Item(cont, 2) = dist
        Range("a1").Item(cont, 3) = .Item(cont, npuntos + 2)
        Range("a1").Item(cont, 4) = .Item(cont, npuntos + 3)
    End If

End If
    cont = cont + 1
Loop
End With

End Sub
Sub centro2()
'Ya que dentro de el archivo de secciones no hay pistas de cual corresponde al centro

```

'Decido importar directamente otro archivo con las coordenadas de los centros
'Que fueron obtenidas a partir de hec ras->shp->idrasi->xyz (vaya proceso...)

'Abrir archivo-----

Dim fd As Office.FileDialog

Dim myFile As String, text As String, textline As String, posLat As Integer, posLong As Integer

Set fd = Application.FileDialog(msoFileDialogFilePicker)

With fd

.AllowMultiSelect = False

.Title = "Importar Coordenadas Secciones HEC-RAS"

.Filters.Clear

.Filters.Add "Archivos .geo", "*.geo"

If .Show = True Then

 archivo = .SelectedItems(1)

End If

End With

'Abrimos el archivo

Open archivo For Input As #1

'Abrir archivo fin-----

'Importamos los valores-----

cont = 1

Do Until EOF(1)

 Line Input #1, textline

 Range("a1").Item(cont, 1) = cont

 valor = InStr(1, textline, " ")

 Range("a1").Item(cont, 2) = Mid(textline, 1, valor)

 valor2 = InStr(valor + 1, textline, " ")

 Range("a1").Item(cont, 3) = Mid(textline, valor, (valor2 - valor))

 'valor = InStr(1, textline, " ")

 'Range("a1").Item(cont, 2) = Mid(textline, 1, valor)

 'valor2 = InStr(valor, textline, " ")

 'Range("a1").Item(cont, 3) = Mid(textline, valor, valor2)

 cont = cont + 1

Loop

```

'Importar valores-----
'Cerramos el archivo
Close #1

End Sub

Sub diques()
'Encontramos la posición inicial de los diques

cont = 1
With Worksheets(5).Range("a1")
  Do While .Item(cont, 1) <> ""

    'Encontramos la longitud de la sección
    Dim ndatossec As Long
    ndatossec = .Item(cont, 1).Cells(1, Columns.Count).End(xlToLeft).Column
    lonsec = .Item(cont, ndatossec - 1)
    cont2 = 2
    cent = Worksheets(6).Range("a1").Item(cont, 2)

    'Encontramos el centro de la sección
    Do While .Item(cont, cont2) <> "" And .Item(cont, cont2) <= lonsec / 2

      cont2 = cont2 + 2
    Loop
    cont2 = cont2 - 2

    'Buscamos las márgenes del rio
    'Izquierda
    cont3 = cont2 - 1
    'Verificamos que no se exeda la cantidad de datos disponibles
    Do While cont3 >= 5
      If .Item(cont, cont3 - 2) <= .Item(cont, cont3) And .Item(cont, cont3 + 2) <= .Item(cont,
cont3) Then
        Exit Do
      End If
      cont3 = cont3 - 2

    Loop
    biz = cont3
    'Derecha
    cont3 = cont2 + 1
    Do While cont3 <= (ndatossec - 2)

      If .Item(cont, cont3 - 2) <= .Item(cont, cont3) And .Item(cont, cont3 + 2) <= .Item(cont,
cont3) Then
        Exit Do

```

```

End If

cont3 = cont3 + 2
Loop

bder = cont3
'Ahora, colocamos los valores de las secciones originales

Range("a1").Item(cont, 1) = Worksheets(2).Range("a1").Item(cont, 1)
Range("a1").Item(cont, 2) = Worksheets(2).Range("a1").Item(cont, biz - 1)
Range("a1").Item(cont, 3) = Worksheets(2).Range("a1").Item(cont, biz)
Range("a1").Item(cont, 4) = Worksheets(2).Range("a1").Item(cont, bder - 1)
Range("a1").Item(cont, 5) = Worksheets(2).Range("a1").Item(cont, bder)

cont = cont + 1

Loop
End With
End Sub

Sub diques2()
'Encontramos la posición inicial de los diques. Mejora en esta versión que el centro es encontrado
dentro de la sección y no deducido a la mitad de esta

Worksheets(7).Activate
cont = 1
With Worksheets(5).Range("a1")
Do While .Item(cont, 1) <> ""
If cont = 10 Then
a = 1
End If

'Encontramos la longitud de la sección
Dim ndatossec As Long
ndatossec = .Item(cont, 1).Cells(1, Columns.Count).End(xlToLeft).Column
lonsec = .Item(cont, ndatossec - 1)
cont2 = 2
cent = Worksheets(6).Range("a1").Item(cont, 2)

'Encontramos el centro de la sección
Do While .Item(cont, cont2) <> "" And .Item(cont, cont2) <= cent

cont2 = cont2 + 2
Loop
cont2 = cont2 - 2

'Buscamos los márgenes del río
'Izquierda
cont3 = cont2 - 1

```

```

'Verificamos que no se exeda la cantidad de datos disponibles
Do While cont3 >= 5
    If .Item(cont, cont3 - 2) <= .Item(cont, cont3) And .Item(cont, cont3 + 2) <= .Item(cont,
cont3) Then
        Exit Do
    End If
    cont3 = cont3 - 2

Loop
If cont3 < 5 Then biz = 3 Else biz = cont3

'biz = cont3
'Derecha
cont3 = cont2 + 1
Do While cont3 <= (ndatossec - 2)

    If .Item(cont, cont3 - 2) <= .Item(cont, cont3) And .Item(cont, cont3 + 2) <= .Item(cont,
cont3) Then
        Exit Do
    End If

    cont3 = cont3 + 2
Loop

If cont3 > (ndatossec - 2) Then bder = ndatossec Else bder = cont3
'Ahora, colocamos los valores de las secciones originales

Range("a1").Item(cont, 1) = Worksheets(2).Range("a1").Item(cont, 1)
Range("a1").Item(cont, 2) = Worksheets(2).Range("a1").Item(cont, biz - 1)
Range("a1").Item(cont, 3) = Worksheets(2).Range("a1").Item(cont, biz)
Range("a1").Item(cont, 4) = Worksheets(2).Range("a1").Item(cont, bder - 1)
Range("a1").Item(cont, 5) = Worksheets(2).Range("a1").Item(cont, bder)

cont = cont + 1

Loop
End With
End Sub

```

```

Sub perfiltra()
'Esta función quita los picos del eje
cont = 1
Do While Range("b2").Item(cont + 1, 1) <> ""
    p1 = Range("b2").Item(cont, 1)
    p2 = Range("b2").Item(cont + 1, 1)

    If p1 < p2 Then
        cont2 = 1
        'Encontramos el siguiente valor menor

```



```

Do While p1 < p2
    cont2 = cont2 + 1
    p2 = Range("b2").Item(cont + cont2, 1)
Loop
'Corregimos todos los valores entre las secciones correctas
Range("d2").Item(cont, 1) = p1
dif = p1 - p2
inc = dif / cont2
cont4 = 1
For cont3 = cont + 1 To cont + cont2

    Range("d2").Item(cont3, 1) = p1 - inc * cont4
    Range("d2").Item(cont3, 2) = "Corregida"
    cont4 = cont4 + 1
Next
Range("d2").Item(cont3 - 1, 2) = ""
cont = cont + cont2 - 1
Else
    Range("d2").Item(cont, 1) = p1
End If

cont = cont + 1
Loop
End Sub

Sub nombres()
'Obtenemos los nombres de las secciones
Dim fd As Office.FileDialog
Dim myFile As String, text As String, textline As String, posLat As Integer, posLong As Integer

Set fd = Application.FileDialog(msoFileDialogFilePicker)

With fd

    .AllowMultiSelect = False
    .Title = "Importar Coordenadas Secciones HEC-RAS"
    .Filters.Clear
    .Filters.Add "Archivos .geo", "*.g??"
    If .Show = True Then
        archivo = .SelectedItem(1)

    End If
End With

'Abrimos el archivo
Open archivo For Input As #1
cont = 1
cont2 = 0

'Do Until EOF(1)

```

```

' Line Input #1, textline
' cont2 = cont2 + 1
'Loop
'Range("c1") = cont2
'cont2 = 0

textline = ""
Do Until EOF(1)
  Line Input #1, textline
  If Mid(textline, 1, 14) = "Type RM Length" Then

    inicial = InStr(1, textline, ",")
    fin = InStr(inicial + 1, textline, ",")
    nombre = Mid(textline, inicial + 1, (fin - inicial - 1))

    Range("a1").Item(cont, 1) = nombre

    cont = cont + 1

  End If
  cont2 = cont2 + 1
  Range("b1") = cont2
  'text = text & textline
Loop

Close #1

End Sub

Sub coordiques()
'Agregamos las coordenadas a los diques
Worksheets(7).Activate

cont = 1
cont2 = 1
Do While Range("a1").Item(cont, 1) <> ""
  iz = Range("a1").Item(cont, 2)
  der = Range("a1").Item(cont, 4)
  'cont2 = 1
  Do While Worksheets(4).Range("a1").Item(cont2, 1) <> cont &
Worksheets(4).Range("a1").Item(cont2, 1) <> ""
    cont2 = cont2 + 1
  Loop
  Do While Worksheets(4).Range("a1").Item(cont2, 5) <> "" And
Worksheets(4).Range("a1").Item(cont2, 1) = Range("a1").Item(cont, 1) And
Worksheets(4).Range("a1").Item(cont2, 5) < iz
    cont2 = cont2 + 1
  Loop

```

```

Range("g1").Item(cont, 1) = Worksheets(4).Range("a1").Item(cont2, 2)
Range("g1").Item(cont, 2) = Worksheets(4).Range("a1").Item(cont2, 3)

```

```

    cont = cont + 1
Loop

```

```

End Sub

```

6.1.19 PRUEBAS ESTADÍSTICAS

Conjunto de funciones programadas en visual basic que ejecutan las pruebas estadísticas requeridas en el proyecto

```

Sub hatanaca()
'Realiza la prueba de hatanaca para los datos seleccionados
'quitamos los valores de la columna de resultados
Range("f1:f100000").Clear
Range("i3:j16").Clear
Range("f1") = "Prueba de Hatanaca"
With Range("i3")
    .Item(1, 1) = "Ns"
    .Item(2, 1) = "Ni"
    .Item(3, 1) = "w"
    .Item(4, 1) = "e"
    .Item(5, 1) = "Media"
    .Item(6, 1) = "Sigma"
    .Item(7, 1) = "Za/2"
    .Item(8, 1) = "Resultado"
End With
cont1 = 1
Ns = 0
Ni = 0
Set a = Range("d2")
Set b = a

Do While Range("d2").Item(cont1 + 1, 1) <> ""

xj = Range("d2").Item(cont1 + 1, 1)
'Set a = Range("d2")
'Set b = a

'For c = 1 To cont1
' Set b = Union(b, a.Offset(c, 0))

```

```

Next
rango = "d2:d" & cont1 + 2
Set b = Range(rango)

If xj = WorksheetFunction.Max(b) Then
    Range("d2").Item(cont1 + 1, 3) = "S"
    Ns = Ns + 1
ElseIf xj = WorksheetFunction.Min(b) Then
    Range("d2").Item(cont1 + 1, 3) = "i"
    Ni = Ni + 1
End If

cont1 = cont1 + 1
Loop

w = Ns - Ni
e = w / (2 * WorksheetFunction.Ln(cont1) - 0.845)
med = WorksheetFunction.Average(b)
desv = WorksheetFunction.StDev_S(b)
Z = Abs(WorksheetFunction.Norm_S_Inv(1 - Range("j2") / 200))

Range("j3") = Ns
Range("j4") = Ni
Range("j5") = w
Range("j6") = e
Range("j7") = med
Range("j8") = desv
Range("j9") = Z

'damos un veredicto
If (-Z <= e And e <= Z) Then
    Range("j10") = "La muestra se considera aleatoria"
Else
    Range("j10") = "La muestra no se considera aleatoria"

End If

End Sub

Sub waldywolf()
'Prueba de wald y wolfowitz
'limpiamos la prueba anterior
Range("f1:f100000").Clear
Range("i3:j16").Clear
Range("f1") = "Prueba de Wald y Wolfowitz"
With Range("i3")

```

```

.Item(1, 1) = "R"
.Item(2, 1) = "Rachas+"
.Item(3, 1) = "Rachas-"
.Item(4, 1) = "medk"
.Item(5, 1) = "Vark"
.Item(6, 1) = "Z"
.Item(7, 1) = "Z crit"
.Item(8, 1) = "Resultado"
End With

```

```

cont = 1
Do While Range("d2").Item(cont, 1) <> ""
    cont = cont + 1
Loop

```

```

rango = "d2:d" & cont
Set b = Range(rango)

```

```

mediana = WorksheetFunction.Median(b)

```

```

cont1 = 1

```

```

Do While Range("d2").Item(cont1, 1) <> ""

```

```

If Range("d2").Item(cont1, 1) > mediana Then
    Range("d2").Item(cont1, 3) = "+"

```

```

Else
    Range("d2").Item(cont1, 3) = "-"
End If

```

```

cont1 = cont1 + 1
Loop
n = cont1
nmas = 0
nmenos = 0

```

```

cont1 = 1

```

```

'contamos el número de rachas

```

```

'rachas +

```

```

Do While Range("f2").Item(cont1, 1) <> ""

```

```

If Range("f2").Item(cont1, 1) = "+" Then
    nmas = nmas + 1

```

```

Do While (Range("f2").Item(cont1, 1) = "+" And Range("f2").Item(cont1, 1) <> "")
    cont1 = cont1 + 1
Loop

```

```

End If

    cont1 = cont1 + 1
Loop

cont1 = 1
'rachas -
Do While Range("f2").Item(cont1, 1) <> ""

    If Range("f2").Item(cont1, 1) = "-" Then
        nmenos = nmenos + 1

        Do While (Range("f2").Item(cont1, 1) = "-" And Range("f2").Item(cont1, 1) <> "")
            cont1 = cont1 + 1
        Loop

    End If

    cont1 = cont1 + 1
Loop

alfa = Range("j2")
r = nmas + nmenos
medk = (2 * nmas * nmenos) / r + 1
vark = (2 * nmas * nmenos * (2 * nmas * nmenos - nmas - nmenos)) / (((nmas + nmenos) ^ 2) *
(nmas + nmenos - 1))
ze = (r - medk + 0.5) / (vark ^ 0.5)
zcrit = WorksheetFunction.Norm_S_Inv(1 - alfa / 200)

Range("j3") = r
Range("j4") = nmas
Range("j5") = nmenos
Range("j6") = medk
Range("j7") = vark
Range("j8") = ze
Range("j9") = zcrit

If zcrit >= ze Then
    Range("j10") = "Pasa"
Else
    Range("j10") = "No pasa"
End If

End Sub

```

```
Sub testiter()  
'realiza el test de iteración para homogeneidad
```

```
Range("f1:f100000").Clear  
Range("i3:j16").Clear  
Range("f1") = "Prueba de Iteración"  
With Range("i3")  
    .Item(1, 1) = "Ni0"  
    .Item(2, 1) = "Ni1"  
    .Item(3, 1) = "N0"  
    .Item(4, 1) = "N1"  
    .Item(5, 1) = "Xw"  
    .Item(6, 1) = "S2w"  
    .Item(7, 1) = "w"  
    .Item(8, 1) = "e"  
    .Item(9, 1) = "Za/2"  
    .Item(10, 1) = "Resultado"  
End With
```

```
cont = 1  
Do While Range("d2").Item(cont, 1) <> ""  
    cont = cont + 1  
Loop  
rango = "d2:d" & cont  
Set b = Range(rango)
```

```
med = WorksheetFunction.Average(b)
```

```
n = cont - 1  
'recomenzamos el conteo, porque el primer bucle era para determinar la media  
cont1 = 1
```

```
ceros = 0  
unos = 0
```

```
'Hacemos la conversión de la serie (0 y 1's)
```

```
Do While Range("d2").Item(cont1, 1) <> ""  
  
    If Range("d2").Item(cont1, 1) < med Then  
  
        ceros = ceros + 1  
        Range("d2").Item(cont1, 3) = 0  
    Else  
        unos = unos + 1  
        Range("d2").Item(cont1, 3) = 1  
    End If  
  
    cont1 = cont1 + 1
```

Loop

Range("j5") = ceros

Range("j6") = unos

'Calculamos las iteraciones

'Iteraciones de 0

cont1 = 1

ni0 = 0

ni1 = 0

Do While Range("f2").Item(cont1, 1) <> ""

If Range("f2").Item(cont1, 1) = 0 Then

ni0 = ni0 + 1

Do While (Range("f2").Item(cont1, 1) = 0 And Range("f2").Item(cont1, 1) <> "")

cont1 = cont1 + 1

Loop

End If

cont1 = cont1 + 1

Loop

Range("j3") = ni0

'iteraciones de 1

cont1 = 1

Do While Range("f2").Item(cont1, 1) <> ""

If Range("f2").Item(cont1, 1) = 1 Then

ni1 = ni1 + 1

Do While (Range("f2").Item(cont1, 1) = 1 And Range("f2").Item(cont1, 1) <> "")

cont1 = cont1 + 1

Loop

End If

cont1 = cont1 + 1

Loop

Range("j4") = ni1


```
alfa = Range("j2")
```

```
Xw = (2 * ceros * unos) / n + 1
```

```
s2w = ((2 * ceros * unos) * (2 * ceros * unos - n)) / (n ^ 2 * (n - 1))
```

```
w = ni0 + ni1
```

```
e = (w - Xw) / (s2w ^ 0.5)
```

```
Z = Abs(WorksheetFunction.Norm_S_Inv(1 - alfa / 200))
```

```
Range("j7") = Xw
```

```
Range("j8") = s2w
```

```
Range("j9") = w
```

```
Range("j10") = e
```

```
Range("j11") = Z
```

```
If (-Z <= e And e <= Z) Then
```

```
    Range("j12") = "La muestra se considera homogénea"
```

```
Else
```

```
    Range("j12") = "La muestra no se considera homogénea"
```

```
End If
```

```
End Sub
```

```
Sub mannwitney()
```

```
'Ejecuta una prueba de mann Witney
```

```
Range("f1:f100000").Clear
```

```
Range("i3:j16").Clear
```

```
Range("f1") = "Prueba de Mann Witney"
```

```
With Range("i3")
```

```
    .Item(1, 1) = "n1"
```

```
    .Item(2, 1) = "n2"
```

```
    .Item(3, 1) = "R1"
```

```
    .Item(4, 1) = "R2"
```

```
    .Item(5, 1) = "U1"
```

```
    .Item(6, 1) = "U2"
```

```
    .Item(7, 1) = "U"
```

```
    .Item(8, 1) = "med"
```

```
    .Item(9, 1) = "Var"
```

```
    .Item(10, 1) = "Desv"
```

```
    .Item(11, 1) = "Z"
```

```
    .Item(12, 1) = "Ucrit"
```

```
    .Item(13, 1) = "p"
```

```
    .Item(14, 1) = "Resultado"
```

```
End With
```

```
cont = 1
```

```

Do While Range("d2").Item(cont, 1) <> ""
    cont = cont + 1
Loop

rango = "d2:d" & cont
Set b = Range(rango)
'Colocamos el orden original

cont1 = 1

'Ordenamos los valores

Do While Range("d2").Item(cont1, 1) <> ""

    Range("f2").Item(cont1, 1) = WorksheetFunction.Rank(Range("d2").Item(cont1, 1), b, 1)
    cont1 = cont1 + 1
Loop

n = cont1
'determinamos si son pares o impares el número de datos
'0 par, 1 impar

If WorksheetFunction.Even(n) Then
    par = 0
    n1 = n / 2
Else
    par = 1
    n1 = (n - 1) / 2
End If

n2 = n - n1

For cont1 = 1 To n1
    r1 = Range("e2").Item(cont1, 1) + r1
Next

For cont1 = n1 + 1 To n
    r2 = Range("e2").Item(cont1, 1) + r2
Next

u1 = n1 * n2 + (n1 * (n1 + 1) / 2) - r1
u2 = n1 * n2 + (n2 * (n2 + 1) / 2) - r2

alfa = Range("j2")
u = WorksheetFunction.Min(u1, u2)
med = n1 * n2 / 2
vari = med * (n1 + n2 + 1) / 6
desv = vari ^ 0.5
ze = (Abs(u - med) - 0.5) / desv

ucrit = med + desv * WorksheetFunction.Norm_S_Inv(alfa / 100) - 0.5

```

```
p = WorksheetFunction.NormSDist(ze)
```

```
Range("j3") = n1  
Range("j4") = n2  
Range("j5") = r1  
Range("j6") = r2  
Range("j7") = u1  
Range("j8") = u2  
Range("j9") = u  
Range("j10") = med  
Range("j11") = vari  
Range("j12") = desv  
Range("j13") = ze  
Range("j14") = ucrit  
Range("j15") = p
```

```
If p <= alfa / 100 Then  
    Range("j16") = "Cumple"  
Else  
    Range("j16") = "No cumple"  
End If
```

```
End Sub
```

```
Sub waldywolf2()
```

```
'Esta prueba viene descrita en la tesis AFA, no concuerda con la que encontré en la bibliografía,  
pero la utilizaré
```

```
Range("f1:f100000").Clear  
Range("i3:j16").Clear  
Range("f1") = "Prueba de Wald y Wolfowitz"  
With Range("i3")  
    .Item(1, 1) = "W"  
    .Item(2, 1) = "Xw"  
    .Item(3, 1) = "Sw^2"  
    .Item(4, 1) = "e"  
    .Item(5, 1) = "Za/2"  
    .Item(6, 1) = "Resultado"  
End With
```

```
cont = 1  
With Range("d2")  
    Do While .Item(cont, 1) <> ""  
        sumw = sumw + .Item(cont, 1) * .Item(cont + 1, 1)  
        t1 = t1 + .Item(cont, 1)
```

```

t2 = t2 + .Item(cont, 1) ^ 2
t3 = t3 + .Item(cont, 1) ^ 3
t4 = t4 + .Item(cont, 1) ^ 4
cont = cont + 1
Loop
cont = cont - 1
w = sumw + .Item(cont, 1) * .Item(1, 1)
Xw = (t1 ^ 2 - t2) / (cont - 1)
sw2 = (t2 ^ 2 - t4) / (cont - 1) + (t1 ^ 4 - 4 * t1 ^ 2 * t2 + 4 * t1 * t3 + t2 ^ 2 - 2 * t4) / ((cont - 1) *
(cont - 2)) - Xw ^ 2
e = (w - Xw) / (sw2 ^ 0.5)
alfa = Range("j2")
Z = Abs(WorksheetFunction.Norm_S_Inv(1 - alfa / 200))
Range("j3") = w
Range("j4") = Xw
Range("j5") = sw2
Range("j6") = e
Range("j7") = Z
If e > -Z And e < Z Then
    Range("j8") = "La prueba se condiera independiente"
Else
    Range("j8") = "La prueba no se considera independiente"
End If

```

End With

End Sub

Sub corror()

'ejecuta una prueba de correlación ordenada

Range("f1:f100000").Clear

Range("i3:j16").Clear

Range("f1") = "Correlación Ordenada"

With Range("i3")

.Item(1, 1) = "n"

.Item(2, 1) = "rs"

.Item(3, 1) = "t"

.Item(4, 1) = "tcrit"

.Item(5, 1) = "Resultado"

End With

cont = 1

Do While Range("d2").Item(cont, 1) <> ""

cont = cont + 1

Loop

rango = "d2:d" & cont

```

Set b = Range(rango)

cont1 = 1

Do While Range("d2").Item(cont1, 1) <> ""
    i = cont1
    ri = WorksheetFunction.Rank(Range("d2").Item(cont1, 1), b, 0)
    Range("e2").Item(cont1, 1) = i
    Range("e2").Item(cont1, 2) = ri
    'la diferencia al cuadrado está dada por:
    dicua = (ri - i) ^ 2
    'la suma de las diferencias al cuadrado se da por:
    sumdicua = sumdicua + dicua
    cont1 = cont1 + 1
Loop

alfa = Range("j2")
n = cont1
rs = 1 - (6 / (n * (n ^ 2 - 1))) * sumdicua
t = (((rs ^ 2) * (n - 2)) / (1 - rs ^ 2)) ^ 0.5
tcrit = WorksheetFunction.T_Inv(1 - alfa / 100, n - 2)

Range("j3") = n
Range("j4") = rs
Range("j5") = t
Range("j6") = tcrit

'determinamos el resultado del test
If tcrit >= t Then
    Range("j7") = "Pasa"
Else
    Range("j8") = "No pasa"
End If

End Sub

Sub testinv()
'realiza una prueba de inversión a los datos

Range("f1:f100000").Clear
Range("i3:j16").Clear
Range("f1") = "Test de Inversión"
With Range("i3")
    .Item(1, 1) = "SumInv"
    .Item(2, 1) = "InvCrit"
    .Item(3, 1) = "Resultados"

End With

```

```

cont = 1
  Do While Range("d2").Item(cont, 1) <> ""
    cont = cont + 1
  Loop

```

```

rango = "d2:d" & cont
Set b = Range(rango)

```

```

cont1 = 1
cont2 = 1
inv = 0
suminv = 0
Do While Range("d2").Item(cont2 + 1, 1) <> ""
  Do While Range("d2").Item(cont1 + 1, 1) <> ""

    If Range("d2").Item(cont2, 1) > Range("d2").Item(cont1 + 1, 1) Then
      inv = inv + 1

    End If

```

```

    cont1 = cont1 + 1
  Loop
  Range("d2").Item(cont2, 2) = inv
  suminv = suminv + inv
  inv = 0
  cont2 = cont2 + 1
  cont1 = cont2
Loop
n = cont1
alfa = Range("j2")
invcrit = ((n - 1) * n / 2) / 1.7
Range("j3") = suminv
Range("j4") = invcrit

```

```

'establecer resultado
If invcrit >= suminv Then
  Range("j5") = "Datos independientes"
Else
  Range("j5") = "Datos dependientes"
End If

```

```

End Sub

```

```

Sub geary()
'hace un test de normalidad de geary
Range("f1:f100000").Clear
Range("i3:j16").Clear
Range("f1") = "Prueba Geary"
With Range("i3")
    .Item(1, 1) = "aj"
    .Item(2, 1) = "Z"
    .Item(3, 1) = "p"
    .Item(4, 1) = "Resultado"
End With

cont = 1
Do While Range("d2").Item(cont, 1) <> ""
    cont = cont + 1
Loop

rango = "d2:d" & cont
Set b = Range(rango)

n = cont - 1
med = WorksheetFunction.Average(b)
cont1 = 1

Do While Range("d2").Item(cont1, 1) <> ""
    x = Range("d2").Item(cont1, 1)
    suma = suma + Abs(x - med)
    suma2 = suma2 + Abs((x - med) ^ 2)
    cont1 = cont1 + 1

Loop

s1 = (suma / n)
s2 = (suma2 / n) ^ 0.5

mu = ((WorksheetFunction.Pi() / 2) ^ 0.5) * (s1 / s2)
Z = (mu - 1) / (0.2661 / (n ^ 0.5))
p = WorksheetFunction.Norm_S_Dist(Z, True) * 2

Range("j3") = mu
Range("j4") = Z
Range("j5") = p

If p > mu Then
    Range("j6") = "Se considera normal la muestra"
Else
    Range("j6") = "La muestra no se consdiera normal"
End If

End Sub

```

6.1.20 EXPORTAR A CEQUEAU

Un conjunto de herramientas que prepara los datos hidrometeorológicos y los exporta a formato legible para CEQUEau

```
Imports Excel = Microsoft.Office.Interop.Excel
```

```
Module completardiasfaltantes
```

```
Function compserie2(dir, vnulo) As ArrayList
```

```
'La función de esta aplicación es la de llenar los valores faltantes de algún  
año
```

```
'colocamos una salida en caso de error
```

```
On Error GoTo er
```

```
'Declaramos las variables. Incluyo un controlador de excel
```

```
Dim exapp As New Excel.Application
```

```
Dim ws As Excel.Worksheet
```

```
Dim wb As Excel.Workbook
```

```
'guardamos las direcciones
```

```
Dim dirtxt As String
```

```
Dim txtnom As String
```

```
'declaramos algunas variables
```

```
'año inicial y final
```

```
Dim añoini, año-fin As Integer
```

```
'fechas inicial, que se guarda y actual
```

```
Dim fechaini, fechag, fechac As Date
```

```
'el arreglo que guarda los valores de las precipitaciones en orden
```

```
Dim precipitación As New ArrayList
```

```
'los contadores a utilizar
```

```
Dim cont, cont2 As Integer
```

```
'uso algunas variables para la línea de texto
```

```
Dim a As String
```

```
'Aquí daré una dirección fija, en el programa real, será una variable
```

```
'dir = "C:\Users\Hidding\Box Sync\Box
```

```
Sync\Maestría\Tesis\Programas\Matlab\Pruebas.xlsx"
```

```
'guardamos el archivo de texto en la misma dirección que el archivo
```

```
dirtxt = System.IO.Path.GetDirectoryName(dir)
```

```
'propongo un nombre para el archivo de texto
```

```
txtnom = "prueba.txt"
```



```

wb = exapp.Workbooks.Open(dir)
ws = wb.Worksheets(1)

'determinamos cual es el año inicial
añoini = ws.Range("c9").Value

'contamos cuantos valores tiene el archivo
cont = 1
cont2 = 1

fechaini = CDate(1 & "/" & 1 & "/" & añoini)
fechag = fechaini

While Not ws.Range("a9").Item(cont, 1).value = Nothing

    With ws.Range("a9")
        fechac = CDate(.Item(cont, 2).value & "/" & .Item(cont, 1).value &
"/" & .Item(cont, 3).value)
        End With

        'llenamos de valores vacios hasta encontrar una fecha con valores
While (fechag.AddDays(cont2 - 1) < fechac)
    precipitacion.Add(vnulo)
    'fechag.AddDays(1)
    cont2 = cont2 + 1
End While

If IsNumeric(ws.Range("a9").Item(cont, 4).value) Then

    a = Math.Round((ws.Range("a9").Item(cont, 4).value * 10), 0)
    'a = (ws.Range("a9").Item(cont, 4).value * 10)
    a = a.ToString
    'completamos la línea con los caracteres faltantes para 5.
    Select Case a.Length
        Case 0
            a = "    "
        Case 1
            a = "  " & a
        Case 2
            a = "   " & a
        Case 3
            a = "    " & a
        Case 4
            a = "     " & a
    End Select

    precipitación.Add(a)
Else
    precipitación.Add(vnulo)
End If

fechag.AddDays(1)
cont2 = cont2 + 1

```

```

        cont = cont + 1
    End While

    'Determinamos el año en el que termina la serie
    añoфин = ws.Range("a9").Item(cont - 1, 3).value

    'llenamos los días faltantes en la parte final de la serie
    'fechag = fechac
    fechac = CDate(31 & "/" & 12 & "/" & añoфин)
    While (fechag.AddDays(cont2 - 1) <= fechac)
        precipitacion.Add(vnulo)
        'fechag.AddDays(1)
        cont2 = cont2 + 1
    End While

    'Cada año debe tener 366 días, sea o no bisiestro. Aquí completamos
    'los años no bisiestros con un valorextra
    Dim numaños As Integer
    Dim cont3 As Integer
    numaños = añoфин - añoинi

    For cont3 = 0 To numaños
        If Not (fechaini.AddYears(cont3).Year Mod 4) = 0 Then
            precipitacion.Insert(59 + 366 * cont3, vnulo)
        End If
    Next

    'agregaré a cada vector "metadatos" el valor 0 corresponderá al año inicial
    'el valor 1 al año final, el valor 2 a la estación, el valor 3 al intervalo
    'de horas (por ahora, lo dejo fijo en 24), el 4 como existencia de nieve

    precipitacion.Insert(0, añoинi)
    precipitacion.Insert(1, añoфин)
    'colocamos el nombre de la estación a 8 caracteres
    Dim estacion As String

    estacion = ws.Range("B2").Text
    estacion = estacion.Replace(" ", "")

    If estacion.Length > 8 Then
        estacion = estacion.Substring(0, 8)
    Else
        Dim faltantes As Integer
        faltantes = 8 - estacion.Length
        For cont = 1 To faltantes
            estacion = estacion & "x"
        Next
    End If

    precipitacion.Insert(2, estacion)
    'intervalo de horas
    precipitacion.Insert(3, 24)
    'precencia de nieve (1 es ausencia)
    precipitacion.Insert(4, 1)
    'verificar este valor

```

```

precipitacion.Insert(5, 0)

'escribimos el arreglo en un archivo
'Comprobamos que el archivo no exista, para crearlo

'dirtxt = dirtxt & "\" & txtnom

'cerramos los archivos y salimos de la aplicación
wb.Close()
exapp.Quit()

'Se regresa el valor de la matriz obtenida
compserie2 = precipitacion

'salimos de la función, para evitar que se ejecute la sección de manejo de
errores del código
'MsgBox("Operacion Finalizada")
Exit Function
er:
wb.Close()
exapp.Quit()
MsgBox("ocurrio un error")

End Function

Function agrupar(tmin, tmax, pres) As ArrayList
Dim cont, cont1, cont2 As Integer
Dim ordenar As New ArrayList
Dim cadena As String
Dim añomin, añomax As Integer
cadena = ""
'creo una variable para ordenar los datos en una matriz de 24x15 y una celda
adicional de 6
'verifico que las series comiencen y terminen en los mismos años

If Not (tmin(0) = tmax(0) And tmin(0) = pres(0)) Then

'MsgBox("Las periodos de las series no coinciden, se completarán con
datos nulos")

añomin = Math.Min(Math.Min(tmin(0), tmax(0)), pres(0))
añomax = Math.Max(Math.Max(tmin(1), tmax(1)), pres(1))

'completamos la serie de tmin
For cont = 0 To (tmin(0) - añomin)
Next

```

```

End If

'comienzo en el valor 6, porque del 0 al 5 son metadatos
cont = 6

While cont < tmin.Count

    'agregamos el encabezado
    ' If cont Mod 366 = 0 Then
    cadena = " " & tmin.item(2) & " " & (tmin.item(0) + (cont - 6) / 366) &
" " & tmin.item(3) & " " & tmin.item(4) & (" ") & tmin.item(5)
ordenar.Add(cadena)
cadena = ""
    'End If

For cont1 = 1 To 366
    For cont2 = 1 To 24
        If (cont1 <= 366 And cont < tmax.Count) Then
            cadena = cadena & tmax.Item(cont)
            cont1 = cont1 + 1
            cont = cont + 1
        End If
    Next
ordenar.Add(cadena)
cadena = ""
cont1 = cont1 - 1
Next

'agregamos el bloque de un año para precipitación

cont = cont - 366
'Agregamos el bloque de un año para temperatura mínima
For cont1 = 1 To 366
    For cont2 = 1 To 24
        If (cont1 <= 366 And cont < tmin.Count) Then
            cadena = cadena & tmin.Item(cont)
            cont1 = cont1 + 1
            cont = cont + 1
        End If
    Next
ordenar.Add(cadena)
cadena = ""
cont1 = cont1 - 1
Next

'agregamos el bloque de un año para temperatura máxima
cont = cont - 366

For cont1 = 1 To 366
    For cont2 = 1 To 24
        If (cont1 <= 366 And cont < pres.Count) Then
            cadena = cadena & pres.Item(cont)
            cont1 = cont1 + 1
            cont = cont + 1
        End If
    Next
Next

```

```

        ordenar.Add(cadena)
        cadena = ""
        cont1 = cont1 - 1
    Next

    End While
    'regresamos el valor que obtuvimos.
    agrupar = ordenar

End Function

End Module

```

6.1.21 EXTHID

```

Sub exthid()
'Cambiamos el paso del hidrograma para poder compararlo
'ps es el paso de tiempo en minutos
Range("AT:CJ").Clear
ps = 10
cont = 1
cont2 = 1
cont4 = 1
cont5 = 0

Do While Range("a1").Item(1, 1 + cont5) <> ""
tini = Range("a1").Item(1, 1 + cont5) * 60
'Range("d1").Item(1, 1 + cont5) = tini
    cont = 1
    cont2 = 1
    cont4 = 1
    Do While Range("a2").Item(cont, 1 + cont5) <> ""
        tprin = Range("a2").Item(cont - 1, 1 + cont5)
        tfin = Range("a2").Item(cont, 1 + cont5)
        qprin = Range("b2").Item(cont - 1, 1 + cont5)
        qfin = Range("b2").Item(cont, 1 + cont5)
        If tprin = tfin Then
            paso = 0
        Else
            paso = (qprin - qfin) / (60 * (tprin - tfin))
        End If
        cont3 = 1
        Do While Range("a2").Item(cont, 1 + cont5) * 60 >= tini + cont4 * ps
            Range("d2").Item(cont2, 43 + cont5) = tini + cont4 * ps
            Range("e2").Item(cont2, 43 + cont5) = qprin + paso * (tini + cont4 * ps - tprin * 60)
            cont2 = cont2 + 1
            cont3 = cont3 + 1
            cont4 = cont4 + 1
        Loop
    Loop

```

```

Range("d2").Item(cont2, 43 + cont5) = Range("a2").Item(cont, 1 + cont5) * 60
Range("e2").Item(cont2, 43 + cont5) = qfin
cont2 = cont2 + 1
cont = cont + 1
Loop
cont5 = cont5 + 2
Loop
'Call desconvol
Call Quitar2
End Sub

```

6.2 Estructura de archivos *.geo

Los archivos *.geo son archivos de texto en un formato en el que HEC-RAS pueda importar toda la información necesaria para un proyecto determinada. Ya que se están colocando los datos calculados en este formato, se detalla cual es la estructura de tal archivo

Nombre del rio

%-----Comienzan encabezados-----%

BEGIN HEADER:

NUMBER OF REACHES: NÚMERO DE TRAMOS
NUMBER OF CROSS-SECTIONS: NÚMERO DE SECCIONES
UNITS: Meters

END HEADER:

%-----Terminan encabezados-----%

%-----Comienza red de drenaje-----%

BEGIN STREAM NETWORK

%Una matriz de los datos del rio principal con el formato:

BEGIN STREAM NETWORK:
Endpoint: X, Y, Z, No.Sección
[-----]

REACH:

STREAM ID: Nombre tramo
REACH ID: Nombre del Rio
FROM POINT: Punto Inicial del tramo
TO POINT: Punto Final del tramo

CENTERLINE:

%Una Matriz de los datos del tramo (el eje del tramo)

X, Y, Z, Distancia al inicio
[-----]

END:

END STREAM NETWORK:

%-----Termina re de drenaje-----%

%-----Comienzan secciones transversales-----%

BEGIN CROSS-SECTIONS:

CROSS-SECTION:

STREAM ID: Nombre del rio

REACH ID: Nombre del tramo

STATION: Nombre Estación (podría ser la distancia)

BANK POSITIONS: posición del banco izquierdo (en % respecto a la long. Tot. De la secc.), posición del banco derecho (%)

REACH LENGTHS: DBI,DC,DBD (distancia hacia la siguiente sección en formato: Banco izquierdo,Canal, Banco derecho)

%%%%%%%%%

Se colocan las posiciones de los diques, para evitar que el agua salga del canal principal sin rebasar los bancos primero

Para esto, se necesitan tres datos:

Num_grupo_dique, posición del dique en %, elevación del dique.

El grupo de dique se define más adelante en el archivo, por medio de coordenadas X,Y,Z ordenadas, que trazan una línea tridimensional que delimita el dique. En nuestro caso, hemos usado dos de estos grupos, uno para la margen izquierda, y el otro para la derecha, en líneas continuas por todo lo largo del rio

Posición del dique se define en una fracción decimal, donde 0 es el inicio de la sección y 1 es el final de esta.

La elevación del dique se hace coincidir con la del terreno natural en este caso.

%%%%%%%%%

LEVEE POSITIONS:

%datos de ejemplo

1, 0.1750000, 361.00000
2, 0.9750000, 461.00000

%Se marcan los valores de la línea del canal, en formato:

%X, Y

%Orilla Izquierda

%Fondo Canal

%Orilla Derecha

CUT LINE:

X, Y

X, Y

X, Y

%Se marcan los puntos de las secciones en formato X, Y, Z

SURFACE LINE:

X, Y, Z

[-----se repite para cada punto de la sección-----]

END:

[-----se repite para cada sección---]

END CROSS-SECTIONS:

%-----Terminan Secciones transversales-----%

%-----Comienzan Diques-----%

BEGIN LEVEES:

LEVEE ID: Número de identificación del grupo de puntos de la línea que traza el dique.

SURFACE LINE:

%Se coloca cada punto de la línea del dique

X,Y,Z

[-----se repite para cada punto del dique ----]

END:

[-----Se repite para cada dique-----]

END LEVEES:

%-----Terminan Diques-----%