

CAPÍTULO 5

Análisis de resultados

5. Análisis de resultados

Una vez que se ha realizado la calibración y validación de un modelo numérico bidimensional, es práctica común utilizarlo para generar escenarios extremos de operación. A partir de los resultados numéricos, se pueden evaluar posibles consecuencias en la zona baja o llanura de inundación, lo que permite el desarrollo de planes para manejar o mitigar los riesgos asociados. Sin embargo, esta labor es altamente complicada, debido a la alta no-linealidad de la respuesta de los sistemas hidráulicos ante variaciones del clima (ej. gastos, precipitaciones) y las diferentes escalas espaciales involucradas (metros a kilómetros).

Por otra parte, estudios recientes han señalado la importancia de la evaluación de la incertidumbre asociada tanto a los datos históricos, como a la discretización y resultados de cualquier modelo numérico (Asselman et al., 2009). En consecuencia, diversos investigadores han puntualizado la necesidad de revisar la incertidumbre relacionada con la estimación de los parámetros en un modelo numérico (ej. calibración y discretización espacial Lamb y Kay, 2004 o Reeve et al., 2010; condiciones de frontera Pappenberg et al., 2006; valores de rugosidad Mason et al., 2003). En particular, se buscan respuestas respecto a la variabilidad de un posible resultado numérico, si se cambian ciertos parámetros empíricos en el modelo (ej. rugosidad) o se utiliza información topográfica de diferente resolución (ej. MDEs de 10 o 20m).

En nuestro país no existen estudios abocados a la evaluación de la incertidumbre en los resultados provenientes de herramientas numéricas calibradas, sea el modelo uni o bidimensional. Por tanto, este capítulo presenta la evaluación de incertidumbre en los resultados provenientes de un modelo numérico bidimensional validado en el capítulo anterior. Se otorga un énfasis en las diferencias observadas en la determinación del área de inundación asociada a un evento extraordinario en la zona baja del río Tonalá, límite natural entre los estados de Tabasco y Veracruz. Adicionalmente, se estudia el empleo de diferente resolución en la discretización espacial de la región (tamaño de la malla), distintos valores de rugosidad en el cauce y llanura de inundación y se observan los efectos que estos tienen sobre el cálculo de las variables hidrodinámicas clave, como son gastos en el río y área inundada.

Estos resultados forman parte de los estudios integrales realizados por el equipo de procesos costeros del “Plan Hídrico Integral de Tabasco – Tercera Etapa”, abocada, entre otras cosas, a evaluar los efectos del tránsito de avenidas extraordinarias hacia las desembocaduras de los ríos principales en el estado.

5.1 Discretización espacial de la zona de estudio

Un primer paso en la definición de un modelo numérico bidimensional, consiste en la definición de la malla que representa la zona de estudio. En general, no existen reglas en la construcción de mallas para la representación de flujos de inundación, por lo que la definición de la representación numérica de una región depende en gran medida de la experiencia del modelador y el tipo de problema que se aborda. Así la resolución de malla en un modelo numérico hidráulico representa el único parámetro sin rangos de valores óptimos límites definidos.

Los estudios sobre los efectos de la resolución espacial que se han llevado a cabo en materia de hidrología e hidráulica (ej. Bathurst, 1986; Farajalla y Vieux, 1955; Bruneau et al, 1955; Bates et al, 1966) demuestran la sensibilidad de respuesta. Si bien podemos suponer que una resolución más alta nos proporciona mejores resultados, se llega a comprobar que esto no siempre es así.

Debido a la heterogeneidad de los sistemas naturales (ej. ríos, estuarios, playas, lagunas, etc), existe la tendencia de asumir que un aumento en el número de elementos (ej. mayor resolución en la malla) mejora el realismo de predicción del modelo, tal y como fue señalado por Farajalla y Vieux (1995). En este trabajo se define la resolución de malla como el tamaño del elemento de cálculo o celda y siempre se hace en referencia a la escala del terreno (en metros cuadrados). Se entiende entonces que el aumento en la resolución de la malla o cuadrícula dará lugar a un incremento en el número de elementos (celdas) y viceversa. La hipótesis de que la capacidad predictiva del modelo aumenta a medida que la resolución de malla mejora se deriva de tres pensamientos:

1. Estabilidad de la solución dado que el espaciado de malla tiende a aproximarse a la realidad.
2. La capacidad de los modelos de alta resolución para facilitar la parametrización, y por lo tanto crear un código más realista (Beven, 1989).
3. Correspondencia más estrecha entre la medición de campo y las escalas del modelo (Bathurst y Wicks, 1991).

Hasta la fecha se han realizado un número limitado de trabajos que tengan por objetivo evaluar estos argumentos (ej. Hardy et al., 2003).

Cabe señalar que no hay reglas para la construcción de mallas, por lo que incluso con los mejores conocimientos disponibles en cuanto a escalas de longitud, no permitirían definir la malla óptima. Cada discretización podría dar una respuesta satisfactoria a un problema definido (de muchos otros a los que no podría). Esto entra en contraste con los parámetros de calibración, como son: la rugosidad, la batimetría del río y los datos topográficos de la llanura de inundación.

Esta sección presenta un análisis exhaustivo de los efectos en la variación de los resultados hidrodinámicos (ej. gastos en el río) al utilizar mallas de diferente resolución. Para ello se utilizó un modelo numérico bidimensional que resuelve las ecuaciones de aguas someras, conocido como MIKE 21, introducido en el capítulo anterior.

5.2 Diferentes Mallas.

Con el propósito de estudiar el efecto de mallas de diferente resolución en los resultados provenientes del modelo numérico, se generaron siete mallas distintas que representan al cauce de la parte baja del río Tonalá hasta su desembocadura, incluyendo el estuario anexo a la desembocadura (ver Figura 5.1).

La Figura 5.1, presenta la división del dominio en cuatro sub regiones: río Tonalá, laguna río costado, laguna Pozos y pozos Tonalá. Esta división se propuso con la intención de hacer más eficiente la solución numérica del problema (ej. menos tiempo de cómputo) por lo que a cada una se le asignó una resolución diferente. Por ejemplo, se definió que a la sección identificada como río Tonalá, se le otorgaría la mayor resolución en todos los casos, dado que es a través de esta región que se realiza el tránsito principal del gasto hacia el Golfo de México. Cabe señalar que en este caso, sólo se hace énfasis en la reproducción de condiciones normales de operación, por lo que no se considera la inundación alrededor del cauce. Las condiciones de frontera utilizadas son las mismas en todos los experimentos numéricos a saber, nivel medio del mar (marea astronómica) y gasto medidos durante la campaña de campo ($Q \sim 800 \text{m}^3/\text{s}$).

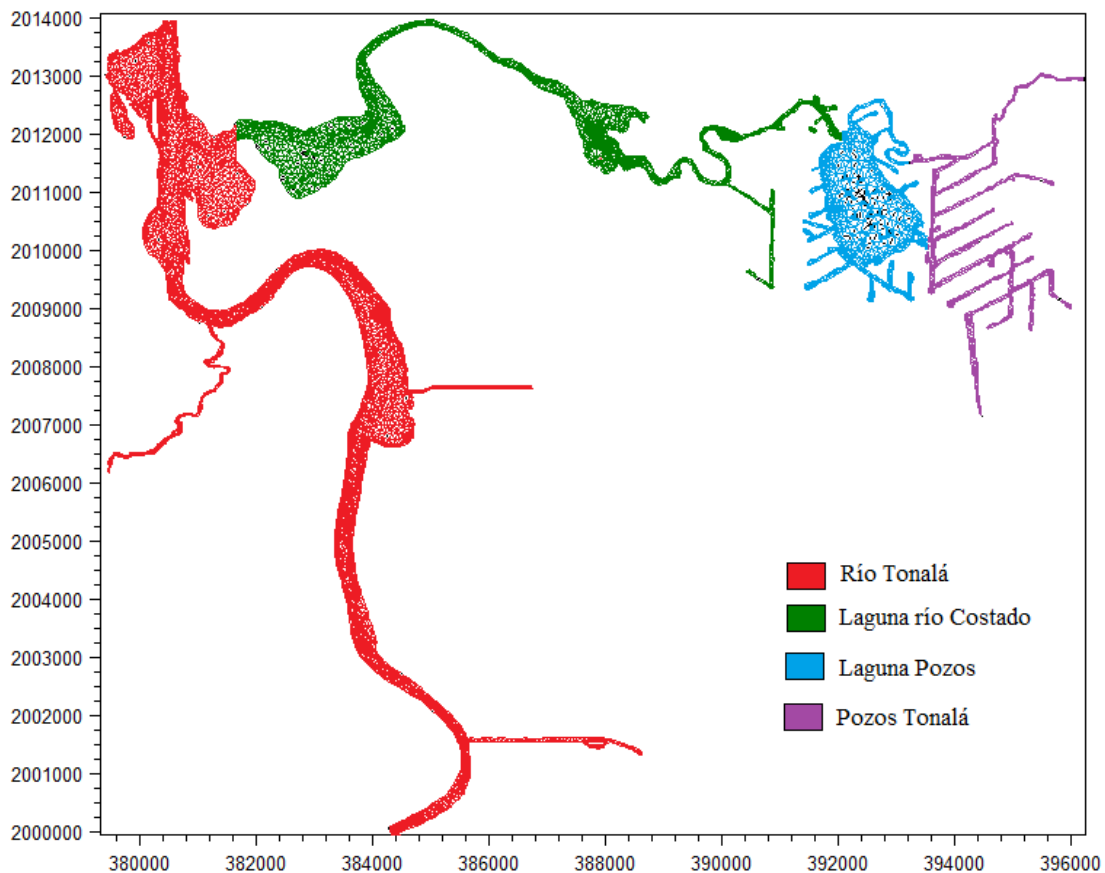


Figura 5.1 Secciones del Cauce.

La Tabla 5.1 presenta las siete mallas generadas para la obtención de resultados en función del área máxima permisible para cada elemento triangular que compone las diferentes subregiones definidas. Así, la malla 4 representa la discretización del dominio con la mayor resolución escogida, identificada por los 22,428 nodos que la componen, mientras que la malla 7 considera la malla de menor resolución (elementos más grandes) con sólo 9,874 nodos.

Q_{medido}	Malla 1	Malla 2	Malla 3	Malla 4	Malla 5	Malla 6	Malla 7
Río Tonalá	1600 (40*40)	1225 (35*35)	900 (30*30)	625 (25*25)	2500 (50*50)	3600 (60*60)	6400 (80*80)
Laguna río Costado	2500 (50*50)	2025 (45*45)	1600 (40*40)	1225 (35*35)	3600 (60*60)	4900 (70*70)	8100 (90*90)
Laguna Pozos	6400 (80*80)	5625 (75*75)	4900 (70*70)	4225 (65*65)	8100 (90*90)	10000 (100*100)	14400 (120*120)
Pozos Tonalá	4900 (70*70)	4225 (65*65)	3600 (60*60)	3025 (55*55)	6400 (80*80)	8100 (90*90)	12100 (110*110)
N° de Nodos	13,365	15,146	17,826	22,428	11,498	10,594	9,874

Tabla 5.1 Área de Elemento de Malla para cada sección del cauce.

Con el propósito de mostrar de forma gráfica las diferentes resoluciones seleccionadas, la Figura 5.2 presenta un acercamiento a la zona de la desembocadura para todas las mallas, en la que es evidente que la malla 7 contiene los elementos de mayor tamaño.

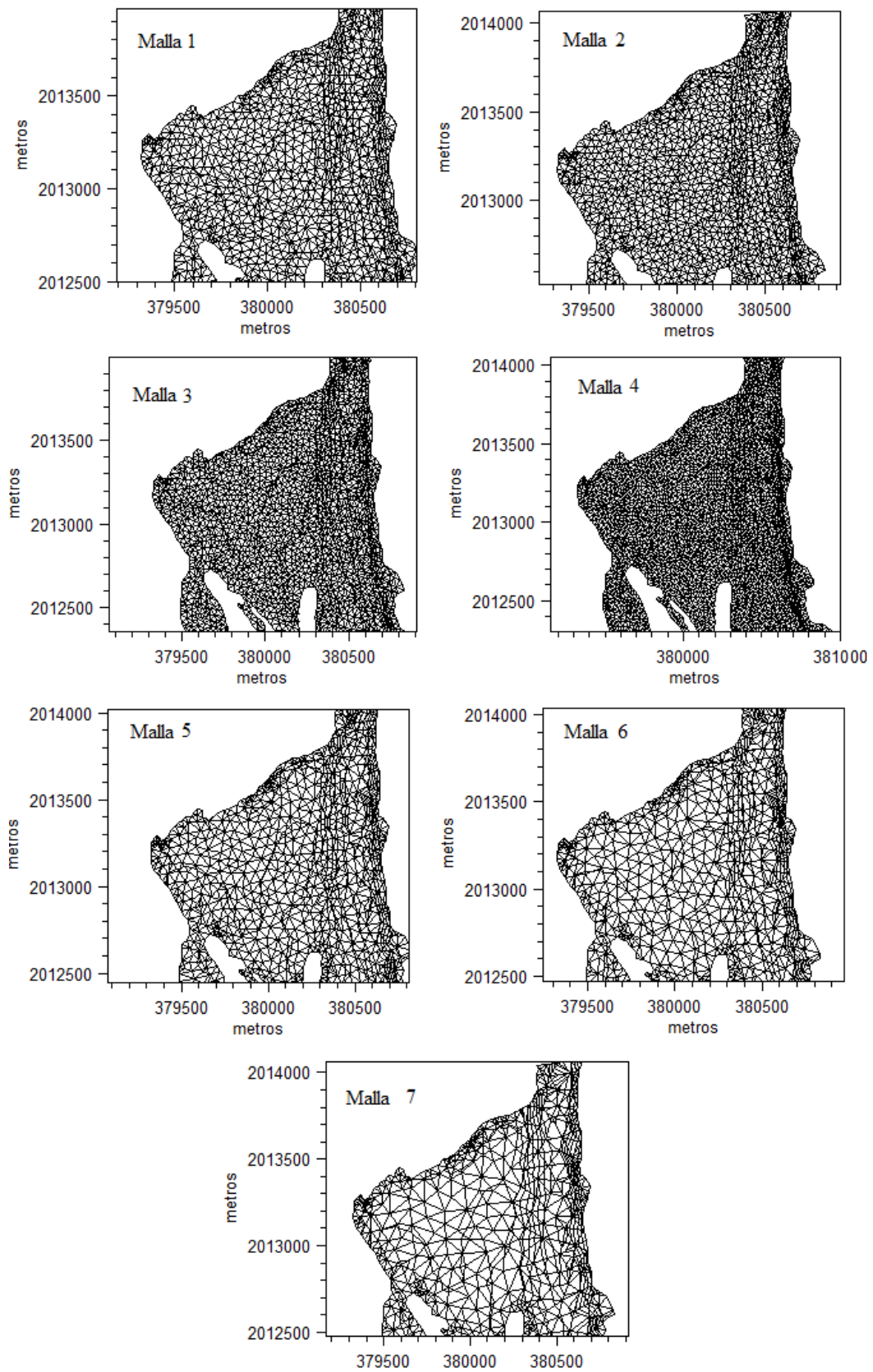


Figura 5.2 Visualización de Mallas en la desembocadura del río Tonalá.

La comparación de las diferentes mallas se realizó por medio de los resultados numéricos obtenidos respecto al gasto en dos secciones clave del río Tonalá. Una representada por la descarga en la desembocadura, para su comparación con los datos de la campaña de campo (referencia a la realidad) y una curva de gasto en una sección intermedia del cauce lejos de las condiciones de frontera. La Figura 5.3 presenta un mapa con la localización de ambas secciones transversales en el río.

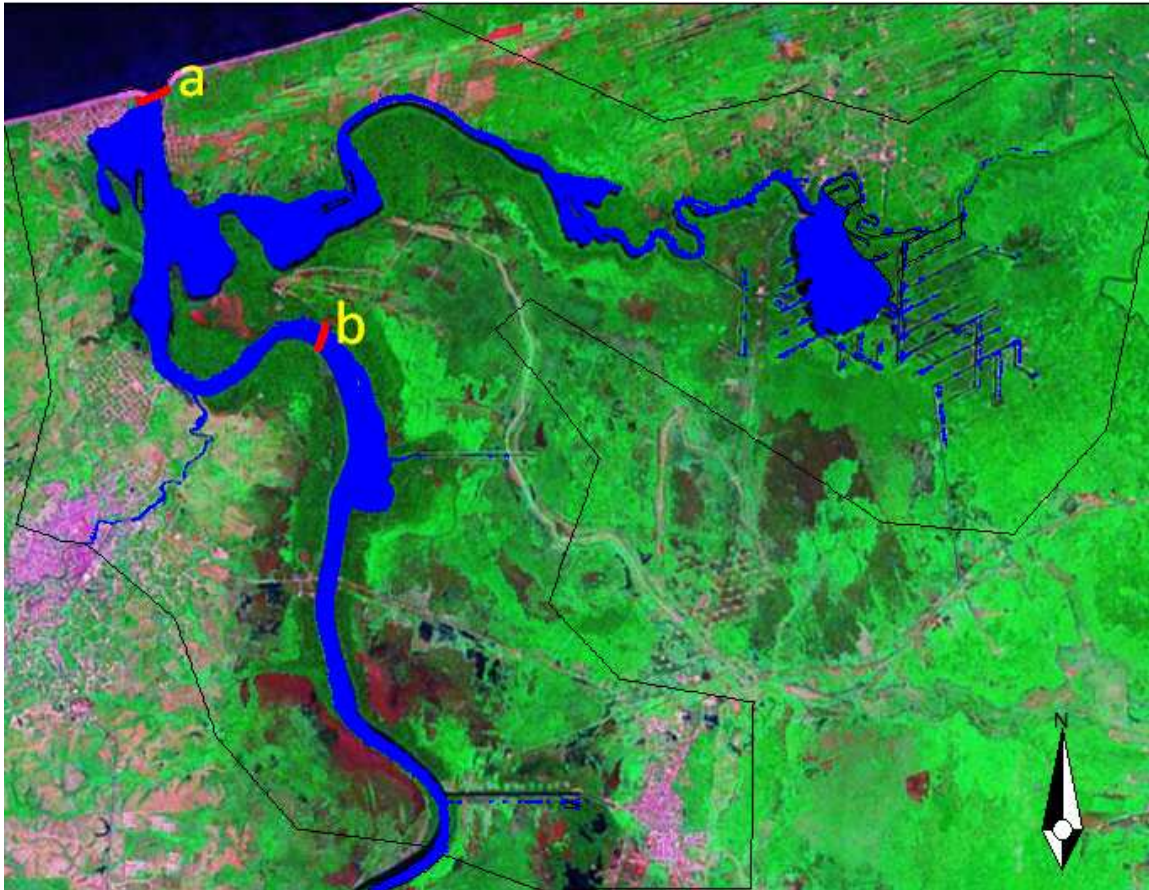


Figura 5.3 Secciones transversales en el río Tonalá. a) desembocadura del río, b) sección intermedia.

5.1.1 Hidrograma en la desembocadura del río

Los resultados del hidrograma en la desembocadura, indican una pequeña variabilidad en los resultados obtenidos con el modelo numérico. La Figura 5.4 presenta el resumen de resultados para cada malla, en conjunto con los datos obtenidos durante la campaña de campo (línea con puntos). Se aprecia que si se tiene una alta resolución espacial (mallas 3 y 4) el volumen del flujo disminuye, mientras que para el resto de casos (mallas 1, 2, 5, 6 y 7) se observa un gasto comparable en el orden de magnitud obtenido. La agrupación de los resultados para estas 5 mallas indica que es probable que la resolución óptima se encuentre cercana a alguno de estos casos, ya que todas ellas se aproximan a los datos medidos en campo. Sin embargo, dada la dispersión observada en los datos de campo no es muy evidente cual de las mallas está haciendo una mejor labor en la reproducción de las condiciones medidas.

En este caso, no es tan evidente cual de las mallas se aproxima con mayor precisión a los datos medidos. Esto se debe a la alta variabilidad de las mediciones. A pesar de ello, se puede concluir que este segundo grupo de discretizaciones, produce resultados sensatos respecto a las mediciones.

En este caso y para la simulación de las condiciones hidrodinámicas en el cauce del río Tonalá, se puede afirmar que la malla óptima corresponde a la número 1, dado que se aproxima a los valores del gasto medido (haciendo una buena representación de la realidad) sin sobre representar la región de estudio.

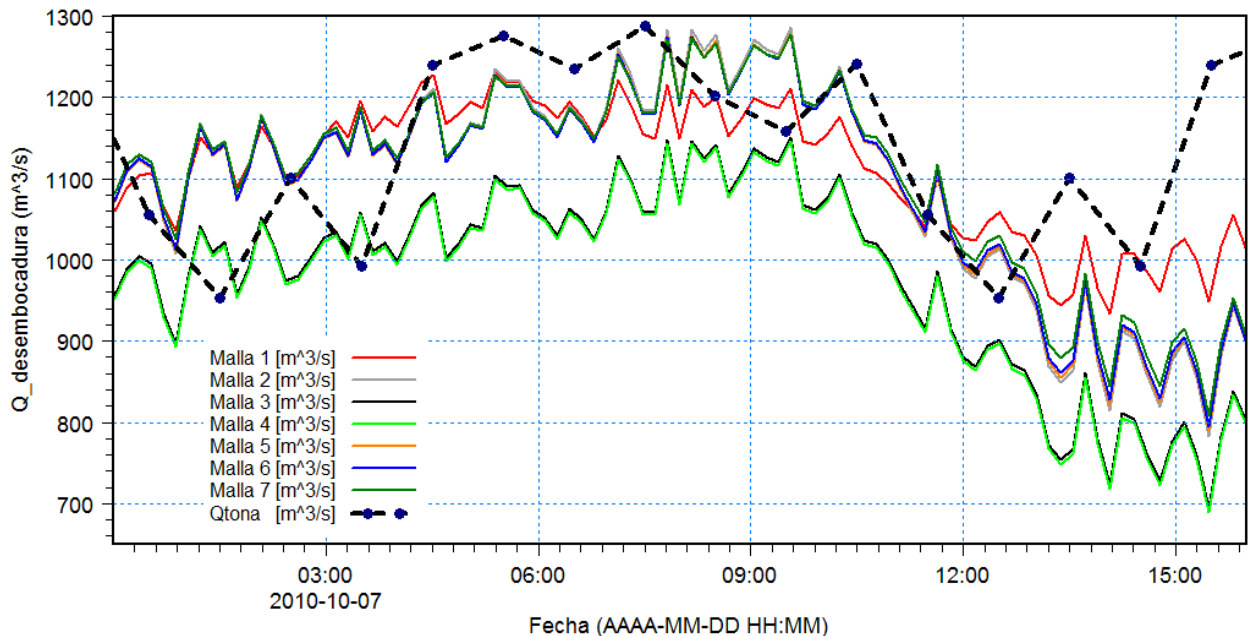


Figura 5.4 Hidrograma en desembocadura río Tonalá.

Está claro que no siempre la mejora en las predicciones del modelo se da cuando disminuye el tamaño del elemento (modelo de alta resolución) para la representación de las características hidráulicas. El modelo ha demostrado que produce resultados que son razonablemente sensibles a la resolución de malla. Por ello es conveniente hacer un proceso de calibración que pueda garantizar que la malla a utilizar es óptima para el modelado numérico.

Para la simulación del río Tonalá, el modelo numérico señaló que la malla óptima resulta ser la número uno, ya que los resultados se aproximan a los valores del gasto medido, se comprueba también que no necesariamente la malla con mayor resolución (mas número de elementos) es la que más se acerca a la realidad.

5.1.2 Hidrograma intermedio en el cauce

Para evaluar de mejor manera la operación de las distintas mallas seleccionadas, se considera la comparación de los resultados numéricos en una sección intermedia del cauce del río Tonalá (alejada de las condiciones de frontera).

La Figura 5.5 presenta los resultados obtenidos para el gasto determinado en esta sección transversal. Las curvas de gasto en la figura indican que los efectos de resolución de malla en este punto, no modifica la solución del problema. De hecho, la variación de los resultados numéricos entre todas las mallas seleccionadas es mínima, en consecuencia, se puede afirmar que la resolución de la malla no altera los resultados en la parte intermedia del cauce lejos de las condiciones de frontera.

Estos resultados, en combinación con los resultados de gasto en la desembocadura, confirman la selección de la malla número 1 como la malla óptima para la reproducción de escenarios en el cauce del río.

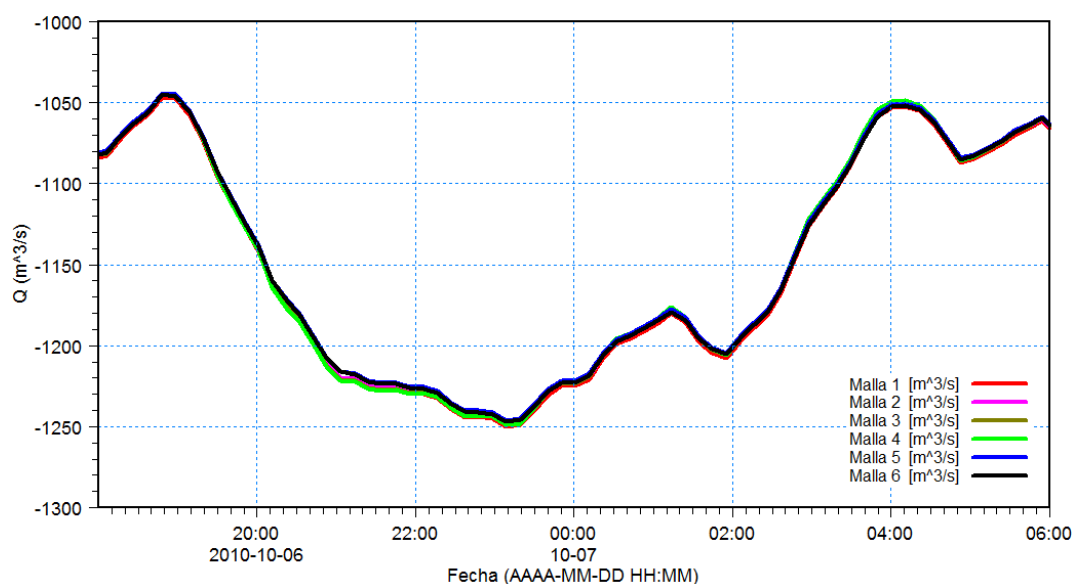


Figura 5.5 Hidrograma en el río Tonalá

Con base a los hidrogramas anteriores podemos dar por hecho que la malla óptima para el cauce en el río Tonalá es la número uno. Este resultado es dado por el hidrograma en la desembocadura visto que el hidrograma intermedio no muestra diferencia en los resultados con la variación de la resolución de malla.

5.3 Diferentes Rugosidades en el cauce

Una vez definida la resolución de malla, un parámetro a analizar es la rugosidad de Manning, esta se utiliza como una herramienta de calibración en el modelo de ahí que recibe el nombre de parámetro de calibración. En este trabajo se observó como el cambio en el Número de Manning, M , afecta directamente los resultados.

Al igual que para la definición de mallas se usó como referencia dos hidrogramas uno en la desembocadura en el río Tonalá y otro en un punto intermedio a las condiciones de frontera.

En la siguiente tabla se muestran las diferentes rugosidades usadas para la calibración del modelo, dadas por la M de Manning.

Malla 1	M1	M2	M3	M4	M5
	$m^{1/3}/s$	$m^{1/3}/s$	$m^{1/3}/s$	$m^{1/3}/s$	$m^{1/3}/s$
Cauce	32.00	22.00	27.00	37.00	47.00

Tabla 5.2 Rugosidades utilizadas en el cauce para su calibración.

5.2.1 Hidrogramas de resultados

De acuerdo con la física del problema, se espera que a mayor rugosidad en el cauce o canal, menor velocidad y gasto en la sección.

La Figura 5.6 ilustra los resultados para el hidrograma en la desembocadura del río, donde se indica que, precisamente, a menor rugosidad mayor gasto en la sección. Especialmente en aquellos momentos de tiempo en los que el río y marea astronómica trabajan de forma conjunta (cerca de los máximos). Sin embargo, en aquellos periodos de tiempo en los que el nivel medio del mar (pleamar) trabaja en contra del río, el gasto estimado en la sección transversal disminuye de acuerdo a la rugosidad utilizada. Esta aparente contradicción se debe a que las condiciones en esta desembocadura están determinadas principalmente por las condiciones de frontera y no tanto por la rugosidad del cauce. Así, cuando ambos forzamientos actúan en concierto (bajamar y gasto en el río), se observa claramente el efecto de la rugosidad en el gasto de la sección, no siendo este el caso en la condición de operación opuesta.

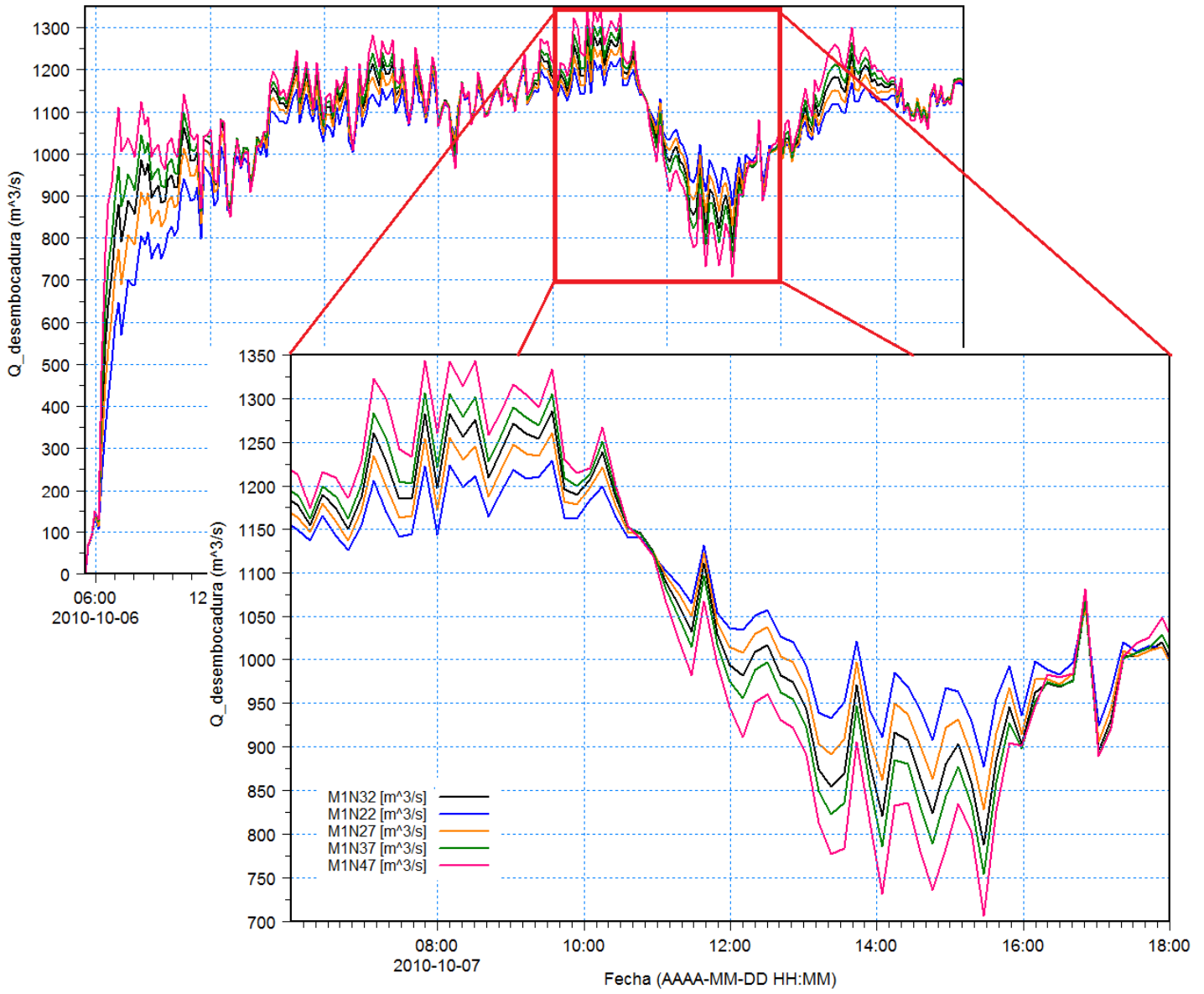


Figura 5.6 Hidrograma en la desembocadura con variación en la rugosidad

Lo anterior se comprueba en la Figura 5.7, que presenta los gastos en una sección transversal del río, ubicada en una zona intermedia del cauce, lejos de las condiciones de frontera. En esta figura se observa que todas las curvas de gasto se comportan de forma similar en función de la rugosidad seleccionada. Verificando que lejos de la condición de marea astronómica, la rugosidad tiene un claro efecto sobre los valores de gasto calculados. Las diferencias que se observan entre el gasto mínimo y máximos encontrados para las diferentes rugosidades, nos permite concluir que efectivamente este parámetro es crucial para la correcta estimación de las condiciones de flujo en un río. A partir de estos resultados, se elige la rugosidad de $M=32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ en el cauce para el resto de los experimentos numéricos que serán realizados referentes a la obtención de un área de inundación obtenida por el forzamiento de escenarios extremos de operación en el río.

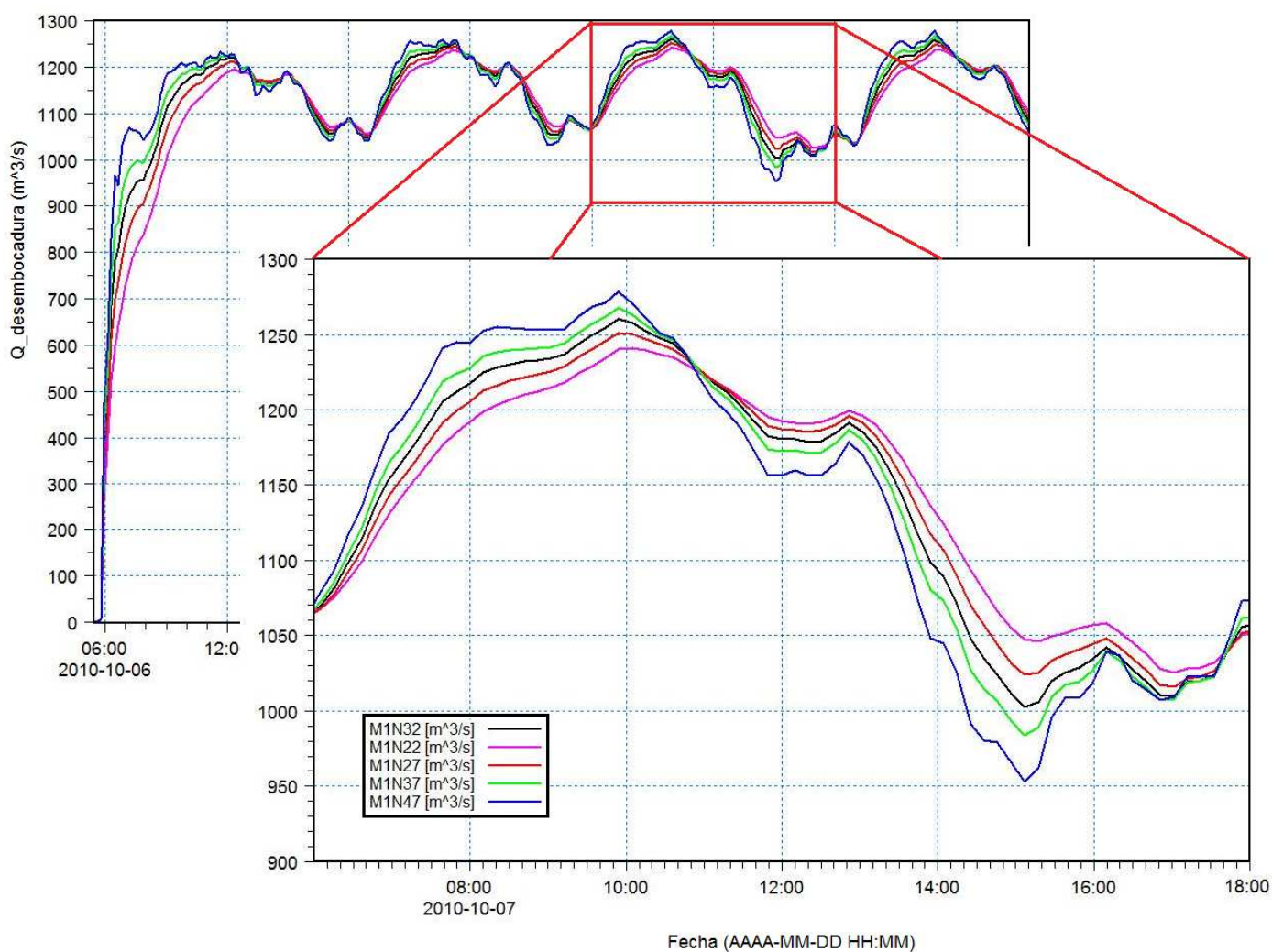


Figura 5.7 Hidrograma intermedio con variación de rugosidad.

5.4 Diferentes rugosidades en la Llanura de inundación.

Además de las condiciones hidrodinámicas, gasto y velocidades, la rugosidad seleccionada en la evaluación de flujos de inundación es un parámetro crucial para la correcta estimación del área inundada en una zona. Con el propósito de evaluar el efecto de este parámetro (rugosidad) en la estimación de un mapa de inundación, se utiliza el modelo numérico para transitar una avenida extraordinaria en el río ($Q=1300\text{m}^3/\text{s}$), con diferentes rugosidades en la llanura de inundación.

Diferentes investigadores han señalado la importancia de considerar incluso diferentes rugosidades en la llanura, en función de los datos de elevación de terreno o de la vegetación que cubre la zona. En esta tesis, se hace el experimento considerando un valor de rugosidad uniforme en el cauce y otro en la llanura de inundación. En el entendido de que la representación de la rugosidad con dos valores (cauce y llanura) es más apegada a las condiciones naturales de un flujo de inundación. Físicamente es justificable utilizar una rugosidad mayor en la llanura de inundación que en el cauce, pero con el objetivo de evaluar los efectos de este parámetro en la determinación de un área inundada, se toman diversos valores de rugosidad en la llanura y cauce tal y como se informa en la Tabla 5.3.

Para ello, se generó una segunda malla con los datos de elevación disponibles (ej. LIDAR) y asignando la misma resolución espacial en todos los experimentos numéricos que se presentan. La Figura 5.9 presenta la malla utilizada, con las secciones de llanura de inundación incluidas en este estudio.

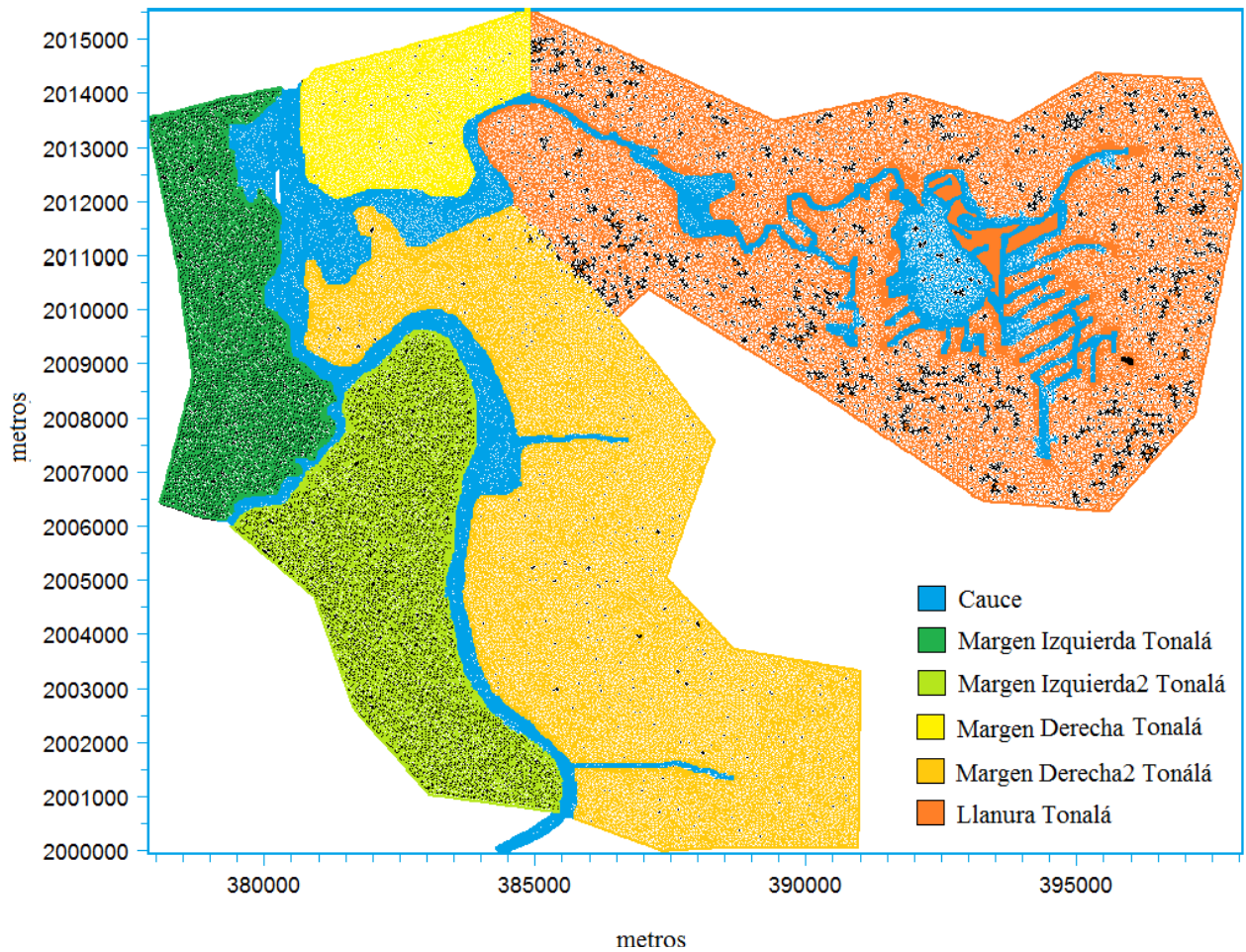


Figura 5.8 Secciones de la llanura de inundación

Rugosidades-Llanura	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	$m^{1/3}/s$	$m^{1/3}/s$	$m^{1/3}/s$	$m^{1/3}/s$	$m^{1/3}/s$	$m^{1/3}/s$	$m^{1/3}/s$
Cauce	32	32	32	32	32	32	32
Margen Izq. - Tonalá	19	24	32	37	42	47	52
Margen Izq2 - Tonalá	19	24	32	37	42	47	52
Margen Der2 - Tonalá	19	24	32	37	42	47	52
Llanura-Tonalá	19	24	32	37	42	47	52
Margen Der - Tonalá	19	24	32	37	42	47	52

Tabla 5.3 Rugosidades en la llanura

Con el objetivo de proporcionar evidencia del tipo de mapas de rugosidad que se generaron para cada uno de los casos simulados en este trabajo, las Figuras 5.9 y 5.10 presentan la distribución espacial de los coeficientes de rugosidad para los casos C2 y C5 de la Tabla 5.3. En ambos casos, es evidente la diferencia de rugosidades entre el cauce del río y la llanura de inundación aledaña.

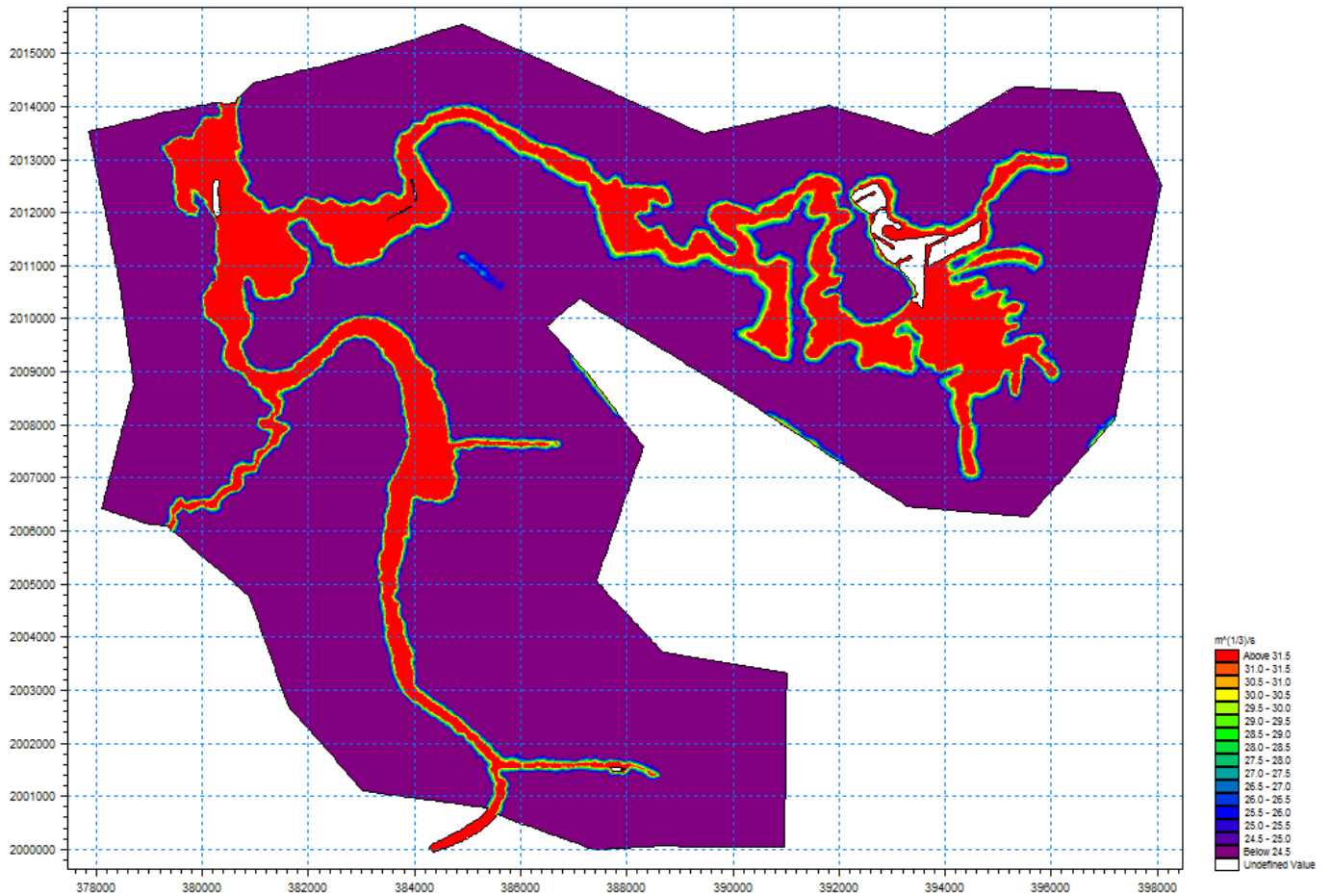


Figura 5.9 Rugosidad en la llanura C2

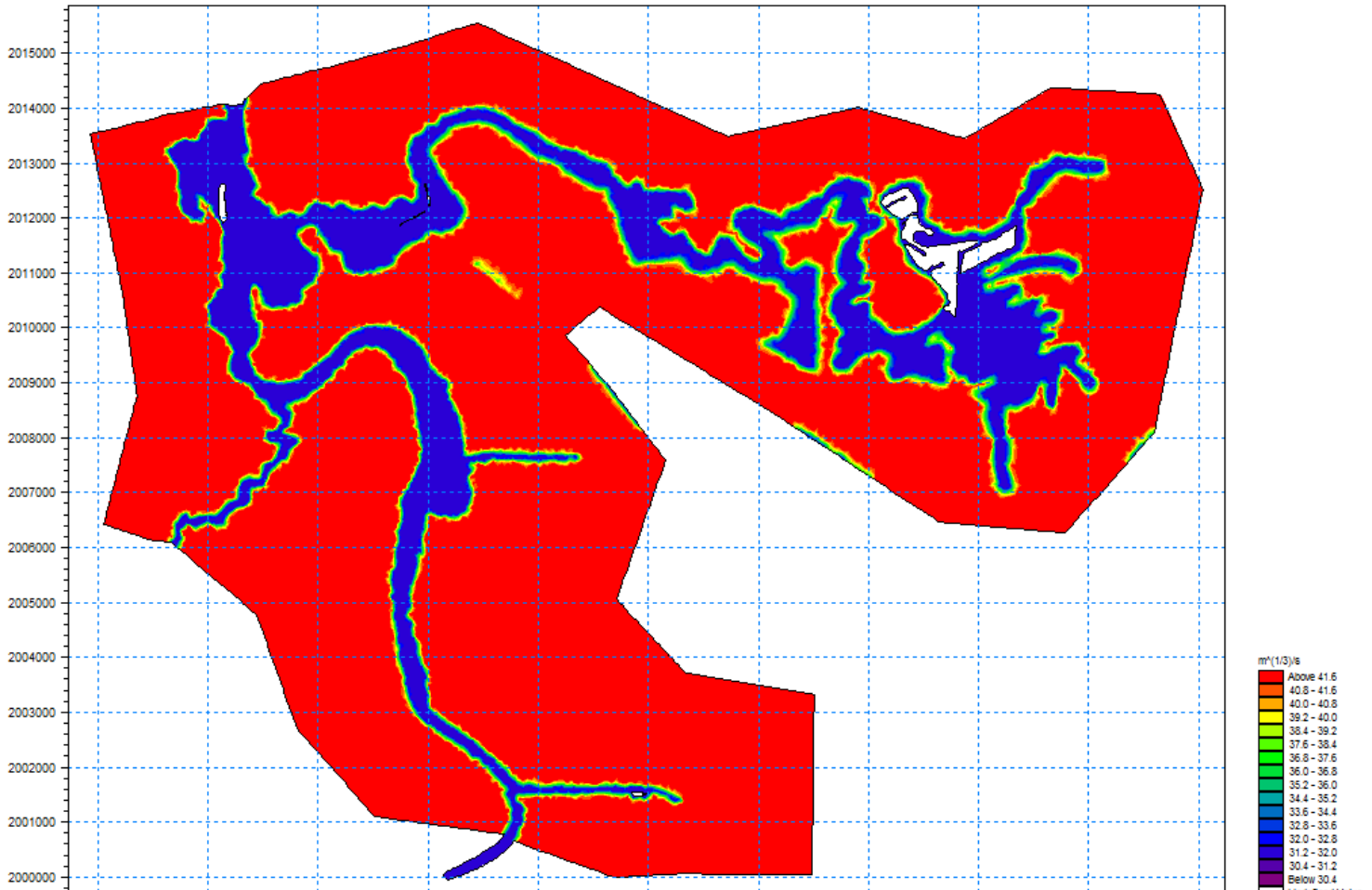


Figura 5.10 Rugosidad en la llanura C2

Para determinar el efecto de la rugosidad en los resultados de un mapa de inundación generado por el modelo numérico calibrado (malla y rugosidad de cauce seleccionada) se simuló el gasto extraordinario en el río para todas las condiciones de rugosidad en la llanura. La Figura 5.11 presenta los resultados de área inundada para cada uno de los casos ejecutados. En un primer vistazo, es difícil encontrar diferencias entre los mapas de inundación generados, pero si se observa con detenimiento (círculo rojo), es posible observar una región del dominio que está sujeta a mayor inundación cuando existe menos rugosidad en la llanura.

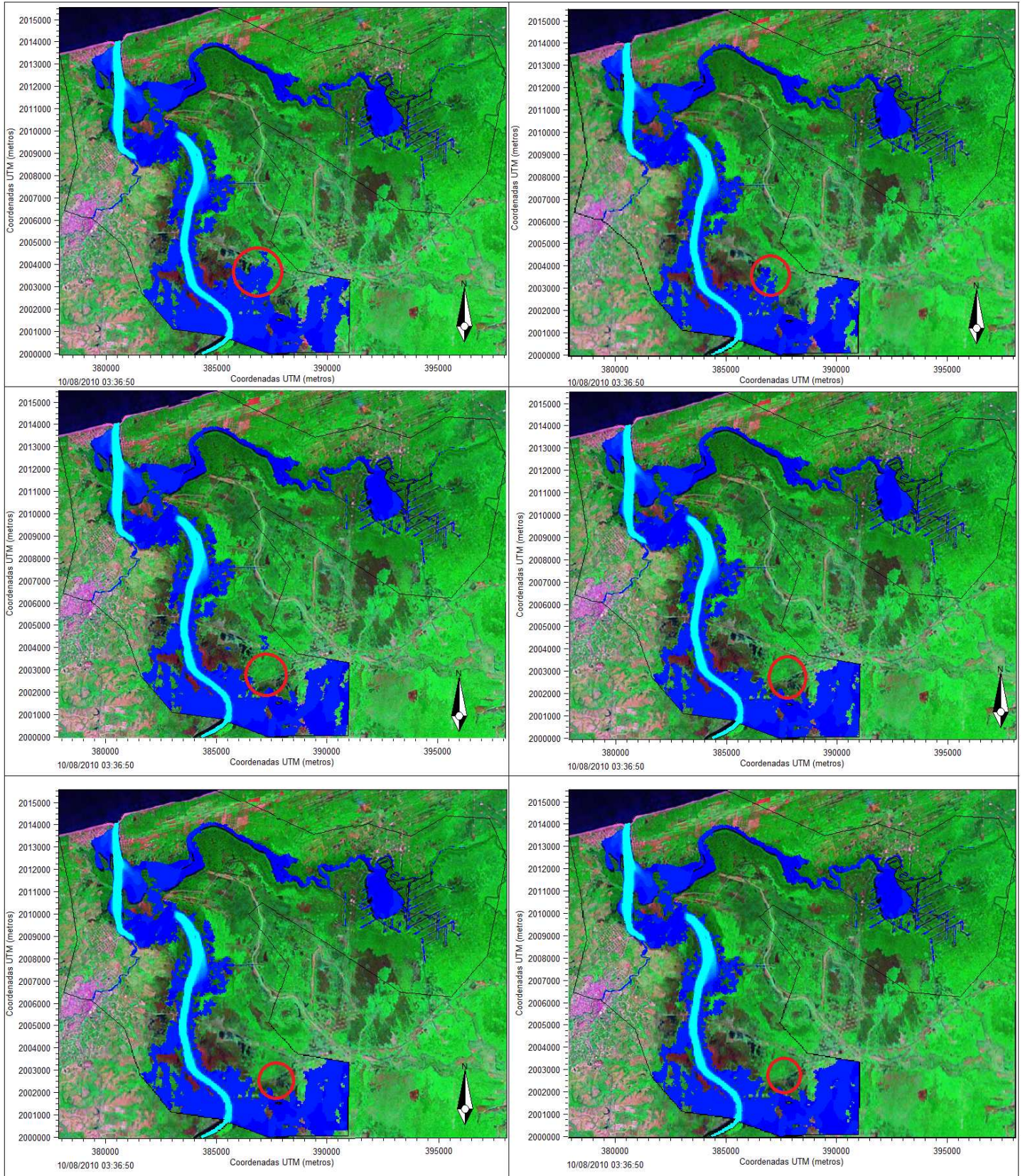


Figura 5.11 Diferentes inundaciones en la llanura, con el efecto a diferentes rugosidades (de menor a mayor rugosidad).

Con el propósito de cuantificar el área de inundación en cada escenario, se digitalizaron los resultados de estos mapas para así poder estimar un número de metros cuadrados. Para ello se utilizó el programa de cómputo AutoCAD, escalando el dominio de cálculo y trazando polígonos de inundación que son sumados para proveer un área inundada resultante. La Figura 5.12 presenta un ejemplo de la digitalización realizada para el cálculo de dichas áreas.

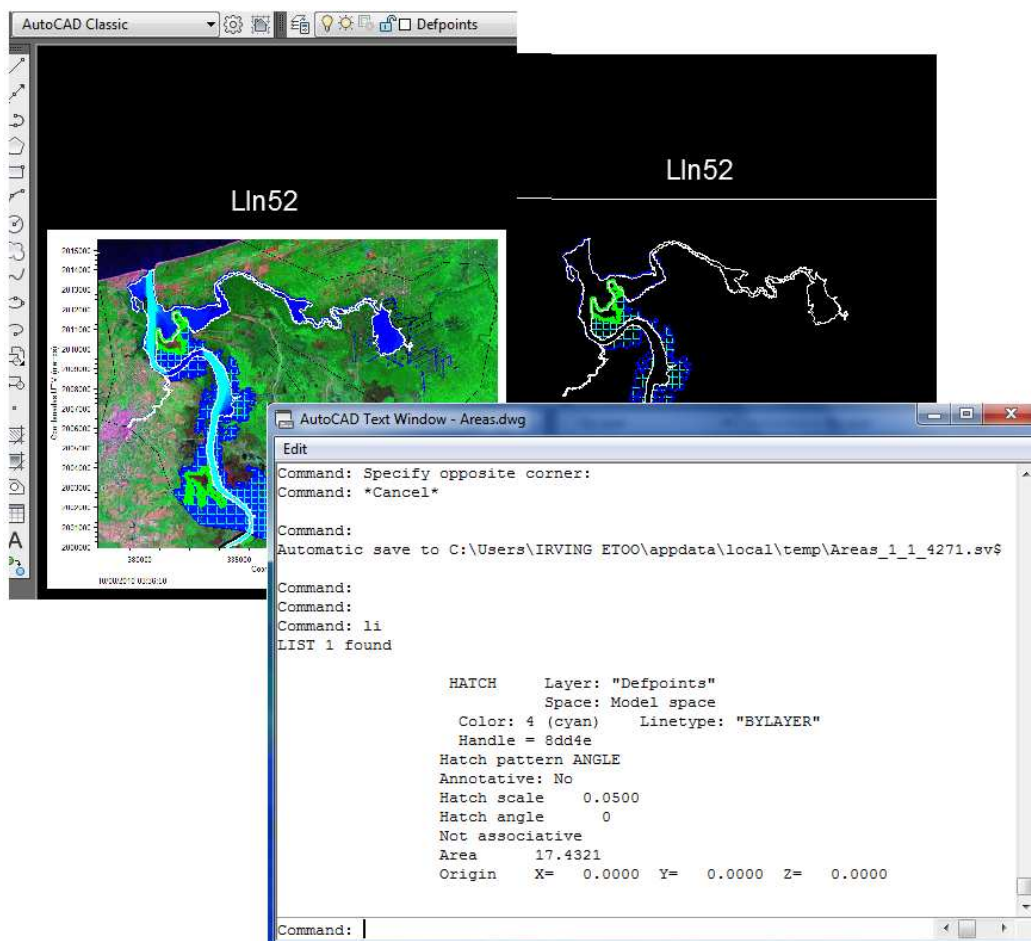


Figura 5.12 Ejemplo de la obtención del área de inundación mediante la digitalización y escala de los resultados de inundación con el programa AUTOCAD.

Este procesamiento de los mapas de inundación, fue realizado para todos los casos simulados. Así, el área inundada pudo ser asociada a un valor de M de Manning en la llanura de inundación, el resumen de resultados obtenidos se presenta en la Tabla 5.4.

En una primera inspección de la magnitud del área inundada bajo todos los escenarios, no se percibieron cambios significativos en los resultados. Sin embargo la los resultados presentados en la tabla indican una diferencia de aproximadamente 3, 200,000 m² entre los casos extremos. Este resultado es significativo, ya que indica la importancia de una correcta caracterización de la rugosidad en la llanura cuando se simulan escenarios de inundación en ríos. Es posible que si se sobrestima el valor de la rugosidad en la llanura, esto tenga consecuencias considerables en la predicción de una inundación ante el mismo evento (menos inundación).

Esto es importante dado que este tipo de resultados, son los que utilizan administradores y manejadores de riesgos asociados a las inundaciones, en las etapas de prevención y manejo de desastres naturales. Una mejor descripción de las consecuencias asociadas a fenómenos hidrometeorológicos extremos abre la puerta a una mejor gestión de los riesgos asociados a estos eventos.

M (manning) m ^{1/3} /s	Área m ²
19	29,836,000
24	28,381,500
32	27,899,000
37	27,181,300
42	27,034,700
47	26,629,200
52	26,675,600

Tabla 5.4 Área inundada a diferentes rugosidades

Para completar la información de la Tabla 5.4, la Figura 5.12 presenta de forma gráfica la variación del área inundada, respecto a la rugosidad seleccionada para la llanura de inundación (a menor M mayor rugosidad y viceversa). Claramente, se observa que a medida que la rugosidad aumenta, el área inundada disminuye. Por otra parte se observa que para rugosidades M en el rango de 17 y 37 el área inundada que se estimó con el modelo, no sufre cambios significativos, hasta que se consideran rugosidades menores que en el cauce ($M_{\text{cauce}}=32$) del río.

A medida que aumenta la rugosidad, la magnitud de las inundaciones se disminuye. Con ello se comprueba la efectividad del modelo a diferentes rugosidades, ya que mostro lo esperado a más rugosidad menos inundación

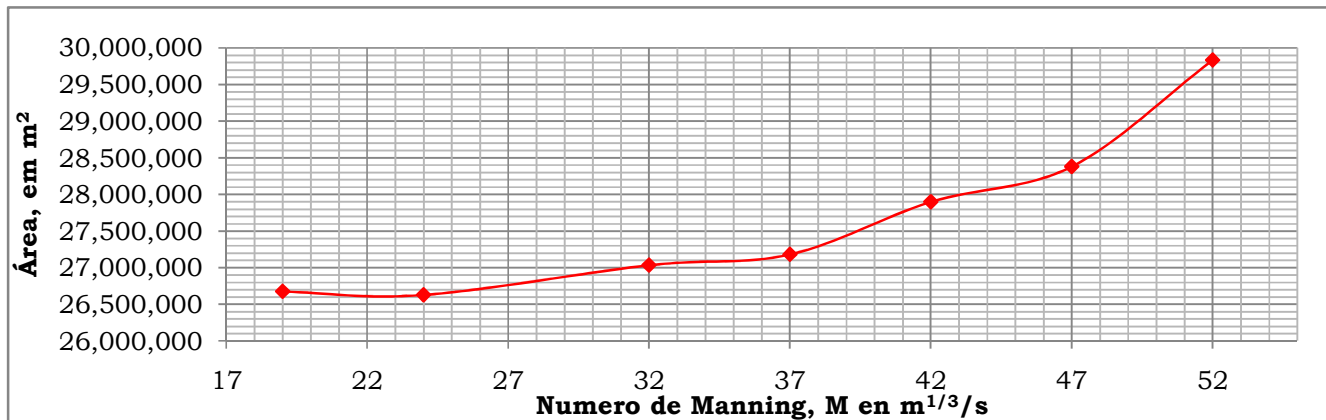


Figura 5.13 Gráfico, relación del área inundada contra el número de Manning.