



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de la relación entre el detalle de la infraestructura urbana y la asignación de coeficientes de rugosidad en modelos hidráulicos bidimensionales**

Tesis para optar el Grado de  
Máster en Recursos Hídricos

**Juan Carlos González Flores**

Asesor(es):  
Dr. Ing. Jorge Demetrio Reyes Salazar

Piura, octubre de 2023



### Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Juan Carlos González Flores., egresado del Programa Académico/ programa de posgrado de Maestría en Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI 42659948

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor del trabajo final titulado:  
"Análisis de la relación entre el detalle de la infraestructura urbana y la asignación de coeficientes de rugosidad en modelos hidráulicos bidimensionales"  
El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis.<sup>1</sup> para optar el (Título profesional/Grado Académico<sup>2</sup>) de Grado de Maestro.
2. Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.
  - Haga clic o pulse aquí para escribir texto. \_\_\_\_\_, identificado con DNI N° Escribir número
  - Haga clic o pulse aquí para escribir texto. \_\_\_\_\_, identificado con DNI N° Escribir número
  - Haga clic o pulse aquí para escribir texto. \_\_\_\_\_, identificado con DNI N° Escribir número
  - Haga clic o pulse aquí para escribir texto. \_\_\_\_\_, identificado con DNI N° Escribir número
  - Haga clic o pulse aquí para escribir texto. \_\_\_\_\_, identificado con DNI N° Escribir número
3. La asesoría del trabajo estuvo a cargo de:
  - Jorge Demetrio Reyes Salazar \_\_\_\_\_, identificado con DNI N° 16477301
  - Haga clic o pulse aquí para escribir texto. \_\_\_\_\_, identificado con DNI N° Escribir número
4. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros o de ser el caso derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
5. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
6. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
7. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad de Piura.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: 02/10/2023

Firma del autor optante<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Indicar si es tesis, trabajo de investigación, trabajo académico o trabajo de suficiencia profesional.

<sup>2</sup> Grado de Bachiller, Título de profesional, Grado de Maestro o Grado de Doctor.

<sup>3</sup> Idéntica a DNI, no se admite digital salvo certificado.

## **Dedicatoria**

A mi Sra. Madre, Teresa Consuelo Flores Marzal, ya que sin su constante apoyo este trabajo no hubiera podido ser realizado.



## **Agradecimientos**

Agradezco a mi asesor, Doctor Jorge Reyes Salazar, por los lineamientos brindados para el desarrollo del presente trabajo.

Esta investigación ha sido financiada por el Proyecto Concytec- Banco Mundial "Mejoramiento y Ampliación de los Servicios del Sistema Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación Tecnológica" 8682-PE, a través de su unidad ejecutora ProCiencia [Contrato N°084-2018 FONDECYT-BM-IADT-MU] por el proyecto ePIURA: enfoque multidisciplinario para el Planeamiento y de la Infraestructura Urbana, mapeando el Riesgo Ambiental.



## Resumen

El estudio de inundaciones en zonas urbanas ha tomado relevancia con el desarrollo de modelos hidráulicos físicos y numéricos, requiriendo éstos últimos menos tiempo y recursos, persistiendo el reto de representar el catastro urbano y asignar los coeficientes de rugosidad adecuadamente. Así, se presenta una brecha en el nivel de precisión que puede alcanzarse en un modelo numérico en zonas urbanas; por lo que el presente estudio tiene como objetivo analizar la influencia de la asignación de coeficientes de rugosidad y su relación con la resolución del detalle asignado a la infraestructura urbana, en los resultados de modelos hidráulicos bidimensionales aplicados en el tramo urbano del río Piura. Para ello, se elaboró un modelo hidráulico bidimensional representando el máximo detalle catastral para el tramo urbano del río Piura (Detalle 1 – Línea base), calibrado usando mediciones del FEN 2017. Adicionalmente, se elaboraron dos mallas con menores niveles de detalle catastral (Detalle 2 y 3), las que fueron usadas para dos corridas adicionales usando los parámetros de calibración obtenidos con el Detalle 1. Con base en los resultados obtenidos se procedió a realizar dos modificaciones a los coeficientes de rugosidad asignados al Detalle 2 y 3. Se compararon los resultados modificando los coeficientes de rugosidad, con la línea base y con el Detalle 2 y 3 originales. Adicionalmente, el modelo se modificó incluyendo la infraestructura de protección propuesta para el río Piura, analizando su comportamiento bajo tres escenarios que consideran diferentes niveles de fondo del cauce. Como resultado, se observó que el nivel de detalle catastral no produjo variaciones significativas en los parámetros hidráulicos analizados para el cauce del río Piura. Para el área urbana se identificaron variaciones en las áreas de inundación, tirantes, velocidades y caudal específico en menor medida. Al modificar los coeficientes de rugosidad, no se logró replicar con el Detalle 2 y 3, los resultados obtenidos con el Detalle 1. La infraestructura de protección no resulta suficiente para evitar el desborde del río Piura. Finalmente, se concluye que el nivel de detalle catastral no resulta relevante para los resultados en el cauce principal, pero sí para el área de inundación urbana. Para lograr resultados representativos, se deben incrementar los valores del coeficiente de rugosidad cuando se asigne un menor detalle catastral al modelo, sin embargo, dicho incremento no es proporcional para todos los parámetros hidráulicos.

La implementación de la infraestructura de protección propuesta resulta en menores áreas de inundación, pero no elimina los desbordes del río Piura; existiendo puntos críticos (cruces de puentes) que deben estudiarse a mayor detalle y medidas complementarias que deben implementarse.

## Tabla de contenido

<b>Introducción</b> .....	<b>16</b>
<b>Capítulo 1: Marco conceptual</b> .....	<b>18</b>
1.1 Antecedentes .....	18
1.2 Objetivos .....	19
1.2.1 Objetivo general.....	19
1.2.2 Objetivos específicos .....	19
1.3 Justificación .....	19
1.4 Inundaciones en la ciudad de Piura .....	21
1.4.1 Impactos e inundaciones a causa del FEN 1982 – 1983 .....	22
1.4.2 Impactos e inundaciones a causa del FEN 1997 – 1998 .....	23
1.4.3 El Niño Costero 2017 .....	25
1.5 Modelos hidráulicos.....	28
1.5.1 Modelos físicos .....	28
1.5.2 Modelos numéricos o computacionales.....	28
<b>Capítulo 2: Estudios básicos y recopilación y procesamiento de información</b> .....	<b>33</b>
2.1 Área de estudio .....	33
2.1.1 Información general de la cuenca del río Piura .....	33
2.1.2 Características morfológicas del tramo en estudio .....	35
2.2 Topografía y batimetría.....	37
2.2.1 Procesamiento de la información topográfica .....	37

2.2.2	Procesamiento de la información batimétrica .....	38
2.2.3	Unificación de información topográfica y batimétrica .....	38
2.3	Información catastral de la ciudad de Piura .....	40
2.4	Hidrología .....	42
2.5	Mediciones realizadas durante el fenómeno El Niño Costero 2017 .....	43
<b>Capítulo 3: Desarrollo del modelo hidráulico .....</b>		<b>44</b>
3.1	Definición del programa computacional a ser empleado.....	44
3.2	Definición de la malla o grillado.....	44
3.2.1	Extensión y límites de la malla.....	44
3.2.2	Procesamiento de la información catastral.....	45
3.2.3	Detalle o densidad de la malla.....	48
3.2.4	Aplicación de puntos fijos o “hardpoints” .....	50
3.2.5	Niveles del detalle de la información catastral.....	52
3.2.6	Resultados.....	57
3.3	Elaboración de mapa detallado de coeficientes de rugosidad.....	57
3.4	Determinación de las condiciones de frontera.....	60
3.4.1	Condiciones de frontera aguas arriba.....	60
3.4.2	Condiciones de frontera aguas abajo .....	61
3.4.3	Condiciones de frontera para el resto de la malla.....	63
3.5	Calibración del modelo hidráulico .....	63
3.5.1	Iteración 1: Primer ajuste en las condiciones de frontera aguas abajo .....	64
3.5.2	Iteración 2: Primera modificación a los coeficientes de rugosidad.....	66
3.5.3	Iteración 3 y 4: Nuevo ajuste a las condiciones de frontera aguas abajo ...	67
3.5.4	Iteración 5: Segunda modificación a los coeficientes de rugosidad.....	69
3.5.5	Iteración 6: Modificación en el paso de tiempo computacional .....	70
3.5.6	Iteración 7: Corrección en la malla del modelo .....	72
<b>Capítulo 4: Estudio paramétrico de la resolución de la infraestructura urbana y asignación de coeficientes de rugosidad .....</b>		<b>74</b>

4.1	Perfil hidráulico del río Piura.....	74
4.2	Sección correspondiente al puente Cáceres.....	75
4.3	Sección correspondiente al puente Sánchez Cerro .....	77
4.4	Sección correspondiente al puente Bolognesi.....	78
4.5	Sección correspondiente al puente Grau .....	79
4.6	Análisis del área inundada .....	80
4.7	Análisis de parámetros hidráulicos en el área inundada .....	84
4.7.1	Tirante.....	92
4.7.2	Velocidad.....	93
4.7.3	Caudal específico.....	93
4.7.4	Análisis general.....	93
4.8	Análisis de tiempos computacionales.....	93
4.9	Modificación de los coeficientes de rugosidad.....	94
4.9.1	Análisis de resultados modificando los coeficientes de rugosidad .....	95
4.9.2	Comparación entre resultados sin y con modificación de coeficientes de rugosidad .....	102
4.9.3	Comparación de resultados con la línea base (Detalle 1) .....	106
<b>Capítulo 5: Análisis de beneficios de la implementación de infraestructura de protección</b>		<b>110</b>
5.1	Consideraciones para el análisis.....	110
5.1.1	Respecto del evento hidrológico analizado.....	110
5.1.2	Respecto de la infraestructura de protección .....	110
5.1.3	Respecto de los escenarios modelados .....	111
5.1.4	Respecto de los parámetros del modelo hidráulico .....	112
5.2	Análisis de los resultados del modelamiento hidráulico con infraestructura de protección .....	112
5.2.1	Perfil hidráulico del río Piura .....	112
5.2.2	Secciones transversales al cauce del río Piura.....	114
5.2.3	Áreas de inundación .....	118

<b>Conclusiones .....</b>	<b>124</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>128</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>131</b>
Anexo N° 1: Análisis de parámetros hidráulicos en el área inundada – Resultados obtenidos en las secciones analizadas.....	<b>131</b>



## Lista de tablas

Tabla N° 1: Referencia para la transformación de coordenadas reales a relativas .....	38
Tabla N° 2: Coordenadas correspondientes al área con información topográfica .....	39
Tabla N° 3: Hidrograma registrado en el río Piura para el evento del 27 de marzo de 2017 .....	42
Tabla N° 4: Niveles máximos alcanzados por el tirante en el río Piura durante El Niño Costero 2017.....	43
Tabla N° 5: Análisis realizado a las tres mallas desarrolladas .....	57
Tabla N° 6: Cálculos preliminares Cota vs Caudal.....	62
Tabla N° 7: Caudales y Cotas utilizados como condición de frontera aguas abajo.....	62
Tabla N° 8: Resultados iniciales del modelo hidráulico.....	64
Tabla N° 9: Cotas modificadas en condiciones de frontera aguas abajo para la Iteración 1 .....	65
Tabla N° 10: Resultados del modelo hidráulico – Iteración 1 .....	66
Tabla N° 11: Detalle de la primera modificación a los coeficientes de rugosidad – Cauce del río Piura .....	66
Tabla N° 12: Cotas modificadas en las condiciones de frontera aguas abajo para la Iteración 3 e Iteración 4 .....	67
Tabla N° 13: Resultados del modelo hidráulico – Iteración 3 .....	68
Tabla N° 14: Resultados del modelo hidráulico – Iteración 4 .....	69
Tabla N° 15: Modificación de los coeficientes de rugosidad para la Iteración 5 .....	69
Tabla N° 16: Resultados del modelo hidráulico – Iteración 5 .....	70
Tabla N° 17: Resultados del modelo hidráulico – Iteración 6 .....	71
Tabla N° 18: Resultados del modelo hidráulico – Iteración 7 .....	72
Tabla N° 19: Comparación de áreas inundadas.....	84
Tabla N° 20: Número de veces que cada nivel de detalle calculó el máximo valor para cada parámetro analizado .....	92
Tabla N° 21: Sumatoria de máximos valores calculados por cada nivel de detalle para cada parámetro analizado .....	92

Tabla N° 22: Promedios de máximos valores calculados por cada nivel de detalle para cada parámetro analizado .....	92
Tabla N° 23: Tiempos computacionales requeridos por cada nivel de detalle .....	94
Tabla N° 24: Modificación de los coeficientes de rugosidad.....	95
Tabla N° 25: Número de veces que cada nivel de detalle calculó el máximo valor para cada parámetro analizado, con modificación de coeficientes de rugosidad .....	98
Tabla N° 26: Sumatoria de máximos valores calculados por cada nivel de detalle para cada parámetro analizado, con modificación de coeficientes de rugosidad .....	98
Tabla N° 27: Promedios de máximos valores calculados por cada nivel de detalle para cada parámetro analizado, con modificación de coeficientes de rugosidad .....	98
Tabla N° 28: Comparación de áreas inundadas con modificación de coeficientes de rugosidad.....	101
Tabla N° 29: Rango de variación del tirante (m) al comparar las corridas sin y con modificación de coeficientes de rugosidad.....	105
Tabla N° 30: Rango de variación de la velocidad (m/s) al comparar las corridas sin y con modificación de coeficientes de rugosidad.....	105
Tabla N° 31: Rango de variación del caudal específico (m <sup>2</sup> /s) al comparar las corridas sin y con modificación de coeficientes de rugosidad .....	105
Tabla N° 32: Comparación de resultados con la línea base (Detalle 1) .....	107
Tabla N° 33: Variación entre los resultados de la línea base (Detalle 1) y los resultados modificando los coeficientes de rugosidad.....	107

## Lista de figuras

Figura N° 1: Inundación en el campus de la Universidad de Piura .....	23
Figura N° 2: Colapso del Puente Viejo .....	23
Figura N° 3: Inundación de la ciudad de Piura .....	25
Figura N° 4: Inundación de la ciudad de Piura a la altura del Puente Cáceres.....	27
Figura N° 5: Mapa de ubicación política de la cuenca del río Piura.....	34
Figura N° 6: Ubicación de la sub cuenca Bajo Piura .....	35
Figura N° 7: Tramo en estudio.....	36
Figura N° 8: Información topográfica utilizada.....	39
Figura N° 9: Información catastral de la ciudad de Piura para el tramo en estudio.....	41
Figura N° 10: Límites de la malla base y malla final del modelo.....	45
Figura N° 11: Grilla o malla generada para la representación del catastro.....	46
Figura N° 12: Grilla generada para la representación de la presa Los Ejidos .....	47
Figura N° 13: Grilla generada para la representación de los apoyos del Puente Cáceres.....	47
Figura N° 14: Grilla generada para la representación de los apoyos del Puente Bolognesi.....	48
Figura N° 15: Detalle del densidad de la malla .....	50
Figura N° 16: Puntos fijos utilizados en la malla .....	51
Figura N° 17: Malla Detalle 1 .....	53
Figura N° 18: Malla Detalle 2 .....	54
Figura N° 19: Malla Detalle 3 .....	55
Figura N° 20: Comparación del nivel de detalle catastral.....	56
Figura N° 21: Asignación de coeficientes de rugosidad .....	59
Figura N° 22: Comparación entre el hidrograma registrado durante el Niño Costero 2017 y el hidrograma utilizado en el modelo hidráulico.....	61
Figura N° 23: Comparación entre resultados de la Iteración 1 y e Iteración 2.....	67
Figura N° 24: Perfil del modelo hidráulico del río Piura – Iteración 5.....	70
Figura N° 25: Perfil del modelo hidráulico del río Piura – Iteración 6.....	71
Figura N° 26: Perfil del modelo hidráulico del río Piura – Iteración 7.....	73

Figura N° 27: Comparación de resultados entre Detalle 1, 2 y 3 – Perfil del río Piura .....	75
Figura N° 28: Comparación de resultados entre Detalle 1, 2 y 3 – Sección Cáceres.....	76
Figura N° 29: Comparación de resultados entre Detalle 1, 2 y 3 – Sección Sánchez Cerro.....	77
Figura N° 30: Comparación de resultados entre Detalle 1, 2 y 3 – Sección Bolognesi.....	78
Figura N° 31: Comparación de resultados entre Detalle 1, 2 y 3 – Sección Grau .....	79
Figura N° 32: Ubicación de zonas de análisis del área inundada .....	80
Figura N° 33: Análisis del área inundada en la Zona 1 .....	81
Figura N° 34: Análisis del área inundada en la Zona 2 .....	82
Figura N° 35: Análisis del área inundada en la Zona 3 .....	83
Figura N° 36: Ubicación de secciones para análisis de parámetros hidráulicos en el área inundada .	85
Figura N° 37: Detalle 1 – Ubicación de secciones 1, 2 y 3.....	86
Figura N° 38: Detalle 2 – Ubicación de secciones 4, 5, 6 y 7.....	86
Figura N° 39: Detalle 3 – Ubicación de secciones 8, 9 y 10.....	87
Figura N° 40: Detalle 4 – Ubicación de secciones 11, 12 y 13 .....	87
Figura N° 41: Detalle 5 – Ubicación de secciones 14, 15 y 16 .....	88
Figura N° 42: Detalle 5 – Ubicación de secciones 17, 18 y 19 .....	88
Figura N° 43: Esquema de ubicación de secciones para análisis de parámetros hidráulicos en el área inundada .....	89
Figura N° 44: Valores máximos calculados para los parámetros hidráulicos analizados por cada nivel de detalle .....	91
Figura N° 45: Valores máximos calculados para los parámetros hidráulicos analizados por cada nivel de detalle – Modificación 1 de coeficientes de rugosidad .....	96
Figura N° 46: Valores máximos calculados para los parámetros hidráulicos analizados por cada nivel de detalle – Modificación 2 de coeficientes de rugosidad .....	97
Figura N° 47: Comparación entre resultados – Corrida con coeficientes de rugosidad calibrados y Modificación 1.....	103
Figura N° 48: Comparación entre resultados – Corrida con coeficientes de rugosidad calibrados y Modificación 2.....	104
Figura N° 49: Comparación de resultados con la línea base (Detalle 1) .....	109

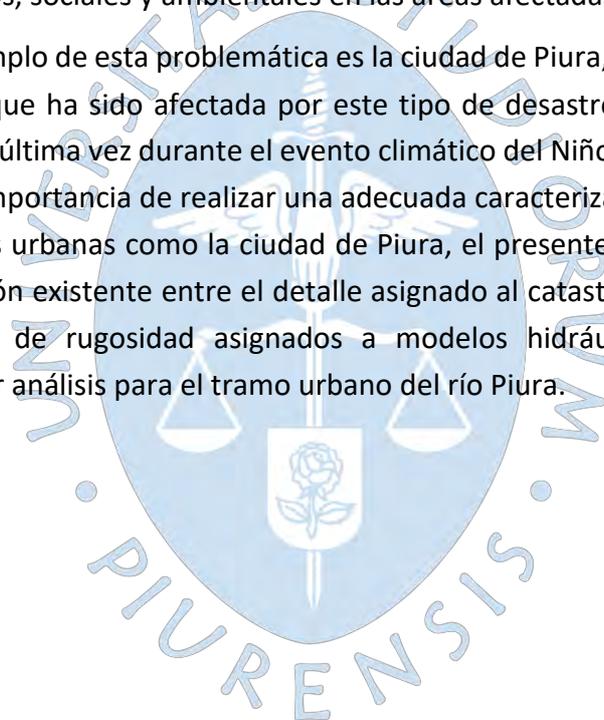
Figura N° 50: Perfil Hidráulico del río Piura con Infraestructura de Protección bajo los tres escenarios analizados .....	113
Figura N° 51: Sección 1 .....	115
Figura N° 52: Sección puente Cáceres .....	115
Figura N° 53: Sección 2 .....	116
Figura N° 54: Sección puente Sánchez Cerro .....	116
Figura N° 55: Sección 3 .....	117
Figura N° 56: Sección puente Bolognesi.....	117
Figura N° 57: Comparación entre áreas de inundación – Línea Base y Escenario 3 – Hidrograma FEN 2017 .....	120
Figura N° 58: Comparación entre áreas de inundación – Línea Base y Escenario 3 sin modificar – Hidrograma FEN 2017 e Hidrograma de diseño .....	121
Figura N° 59: Comparación de áreas inundadas para los escenarios modelados con infraestructura de protección.....	123



## Prefacio

El régimen de precipitación en las cuencas hidrográficas del Perú se caracteriza por una marcada estacionalidad, la que presenta una temporada seca y otra húmeda. La gran diferencia que existe entre los valores de precipitación para ambas temporadas ocasiona que gran cantidad de los cauces de los ríos que forman los valles costeros e interandinos estén sometidos a regímenes de caudales muy variables, pudiendo presentar flujos mínimos durante más de la mitad del año, y grandes avenidas durante el resto del año hidrológico. La ocurrencia de grandes avenidas, que se ven incrementadas por la ocurrencia del Fenómeno El Niño (principalmente en la costa norte peruana) y por el cambio climático, ocasionan el desborde de los cauces y la inundación de grandes áreas urbanas y productivas, afectando diversas unidades productoras de bienes y servicios y generando impactos económicos, sociales y ambientales en las áreas afectadas.

Un claro ejemplo de esta problemática es la ciudad de Piura, capital de la región del mismo nombre, la que ha sido afectada por este tipo de desastre natural en reiteradas ocasiones, siendo la última vez durante el evento climático del Niño Costero ocurrido en el año 2017. Dada la importancia de realizar una adecuada caracterización de los eventos de inundación en zonas urbanas como la ciudad de Piura, el presente trabajo de tesis busca determinar la relación existente entre el detalle asignado al catastro urbano y los valores de los coeficientes de rugosidad asignados a modelos hidráulicos bidimensionales, realizando un primer análisis para el tramo urbano del río Piura.



## Introducción

Conforme los avances tecnológicos se han dado en el campo de la ingeniería, han brindado mayores herramientas para las disciplinas de la hidrología y la hidráulica; es así que el estudio de inundaciones en zonas urbanas se ha desarrollado con notoriedad y ha tomado mayor relevancia, mediante el desarrollo de modelos hidráulicos físicos y de simulación numérica, brindando herramientas para una correcta toma de decisiones y adecuada planificación de la ocupación del territorio y el desarrollo de la infraestructura en ciudades susceptibles a estos eventos. Considerando la gran extensión de área que es necesaria analizar al momento de estudiar inundaciones en zonas urbanas, los modelos numéricos requieren de una menor inversión de tiempo y dinero respecto de los modelos físicos.

A pesar de permitir modelar áreas de extensión significativa, uno de los mayores retos que se presentan al usar modelos de simulación numérica, es lograr una adecuada representación de la infraestructura urbana existente. Para ello es necesario considerar la complejidad que presenta las características propias de una ciudad, lo que deberá reflejarse en un adecuado levantamiento topográfico del área urbana en estudio que incluya las calles, avenidas, aceras, manzanas, viviendas, centros comerciales, parques, zonas recreativas y demás áreas que podemos encontrar típicamente en áreas urbanas. Esta información es básica para asegurar que los resultados de un modelo hidráulico para zonas urbanas brinden información representativa, y puede ser obtenida mediante diferentes metodologías; sin embargo, el mayor reto se presenta en lograr reflejar el detalle obtenido a partir del levantamiento topográfico, en la grilla o malla del modelo hidráulico, considerando que éste detalle estará en función del tamaño o resolución de grilla elegida para el modelo.

Otro factor que representa un reto significativo es la asignación de coeficientes de rugosidad de Manning, tarea relacionada directamente con las características topográficas de la zona urbana, la cual presenta un alto grado de incertidumbre, dada la complejidad de asignar valores adecuados para cada infraestructura urbana identificada previamente en detalle. Además de ello, la asignación de los coeficientes de rugosidad debe considerar también, las características del suelo urbano, su variación respecto del caudal y el respectivo proceso de calibración del modelo.

Es así como persiste una brecha respecto del nivel de precisión que puede alcanzarse para la información básica que es ingresada a un modelo hidráulico bidimensional en zonas urbanas, la cual está constituida por el detalle con que se logre representar la infraestructura urbana en la grilla del modelo y por la consecuente asignación de coeficientes de rugosidad.

De lo expuesto, se evidencia la necesidad de analizar la influencia que ejerce el detalle asignado a la infraestructura urbana y la asignación de coeficientes de rugosidad, en los resultados de un modelo hidráulico bidimensional para zonas urbanas.



## Capítulo 1

### Marco conceptual

#### 1.1 Antecedentes

El régimen de precipitación en las cuencas hidrográficas del Perú se caracteriza por una marcada estacionalidad, la que presenta una temporada seca y otra húmeda. Según Lagos, Silva y Nickl (2005) “En la región de los Andes peruanos la precipitación es estacional, con lluvias fuertes durante los meses de verano del hemisferio sur (Diciembre –Marzo). Se observa una variabilidad estacional e interanual de las lluvias en la región andina con lluvias excesivas en algunos años y déficit de lluvias en otros años”. (p. 1).

La gran diferencia que existe entre los valores de precipitación para ambas temporadas ocasiona que gran cantidad de los cauces de los ríos que forman los valles costeros e interandinos estén sometidos a regímenes de caudales muy variables, pudiendo presentar flujos mínimos durante más de la mitad del año, y grandes avenidas durante el resto del año hidrológico. Apacla (2010) indica lo siguiente:

“Los ríos de la vertiente del Pacífico del país, se caracterizan por presentar una variabilidad estacional marcada, entre los meses de verano e invierno; siendo los meses de verano, período de avenidas, donde se presentan los mayores caudales de agua, mientras que, en períodos de invierno, período de estiaje, se presentan los menores caudales.” (p. 14)

La ocurrencia de grandes avenidas, que se ven incrementadas por la ocurrencia del Fenómeno El Niño (principalmente en la costa norte peruana) y por el cambio climático, ocasionan el desborde de los cauces y la inundación de grandes áreas urbanas y productivas, afectando diversas unidades productoras de bienes y servicios y generando impactos económicos, sociales y ambientales en las áreas afectadas. Vargas Curo (2018), afirma que “... el efecto de El Niño, así como los enormes contrastes geomorfológicos de nuestro territorio hacen mucho más frecuente la presencia de eventos extremos, provocando intensas lluvias e inundaciones las cuales se reflejan en impactos económicos y sociales negativos.” (p. 1).

Un claro ejemplo de esta problemática es la ciudad de Piura, capital de la región del mismo nombre, la que ha sido afectada por este tipo de desastre natural en reiteradas ocasiones, siendo la última vez durante el evento climático del Niño Costero ocurrido en el año 2017. El Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET (2017), indica lo siguiente respecto de los daños ocasionados a esta ciudad y región:

De todas estas regiones, Piura fue una de las más afectadas, se sintió el impacto de este evento principalmente en la población, sus viviendas, las vías de comunicación y también en su agricultura. Muchos distritos fueron afectados, sin embargo, los mayores

daños se produjeron a lo largo del valle del río Piura, donde la carga de volúmenes de agua sin ser mayores a los registrados en el evento el Niño 1997-1998, causaron inundación por desbordes en zonas residenciales y erosión de terrenos de cultivo; (...). (p. 17).

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Analizar la influencia de la asignación de coeficientes de rugosidad y su relación con la resolución del detalle asignado a la infraestructura urbana, en los resultados de modelos hidráulicos bidimensionales aplicados en el tramo urbano del río Piura.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Recopilar información necesaria para el desarrollo de un modelo hidráulico bidimensional para el tramo urbano del río Piura, entre la presa Los Ejidos y el Puente Grau.
- Determinar las condiciones de frontera para el modelo hidráulico bidimensional del tramo urbano del río Piura.
- Calibrar el modelo hidráulico de la zona urbana utilizando información histórica de eventos pasados.
- Analizar la sensibilidad respecto de la simplificación de las características urbanas y asignación de coeficientes de rugosidad y corroborar la obtención de resultados similares a los obtenidos mediante la calibración.
- Analizar los beneficios que tendría la implementación de infraestructura de protección contra inundaciones.

## **1.3 Justificación**

“La existencia de zonas urbanas, industriales, agropecuarias y vías de comunicación en zonas potencialmente inundables es una realidad cada vez más frecuente. Si los riesgos asociados a la interacción entre la acción humana y el medio hídrico no son controlados generan graves e incluso algunas veces irreversibles perjuicios.” (Murillo, Brufau, & García-Navarro, 2008). Desde el punto de vista económico, los costos asociados a la reconstrucción de zonas afectadas por inundaciones representan pérdidas significativas para el país. Analizando el evento de El Niño Costero del año 2017, a nivel nacional se destinaron S/ 2,498,945,465 a actividades relacionadas con la mitigación de los efectos de dicho fenómeno. Este presupuesto fue canalizado a través del Fondo para Intervenciones ante la ocurrencia de Desastres Naturales (FONDES) y S/ 744,758,725 fueron asignados a la región Piura (Ministerio de Economía y Finanzas, 2017)

Con la finalidad de realizar una correcta toma de decisiones ante futuros eventos de inundaciones en zonas urbanas y planificar adecuadamente la ocupación del territorio y el desarrollo de la infraestructura de Piura y demás ciudades susceptibles a estos eventos, es necesario realizar una caracterización de los mismos mediante el conocimiento de los tirantes alcanzados, velocidades producidas y la extensión de las áreas inundadas; información que puede ser obtenida mediante el desarrollo de modelos hidráulicos físicos o de simulación numérica. Los primeros vienen a ser una representación simplificada y a escala de la estructura o zona que se desea estudiar, y nos permiten realizar observaciones de los fenómenos que ocurren con el funcionamiento de las obras, confirmar los diseños propuestos e identificar efectos colaterales; mientras que “La modelización numérica de la hidrodinámica de ríos precisa del uso de teoría hidráulica del flujo en lámina libre y de los métodos numéricos para resolver las ecuaciones de conservación, ...” (Bladé, Cea, & Corestein, 2014). Considerando la gran extensión de área que es necesaria analizar al momento de estudiar inundaciones en zonas urbanas, los modelos numéricos requieren de una menor inversión de tiempo y dinero respecto de los modelos físicos.

A pesar de permitir modelar áreas de extensión significativa, uno de los mayores retos que se presentan al hacer uso de los modelos de simulación numérica, es lograr una adecuada representación de la infraestructura urbana existente. Para ello es necesario tener en cuenta la complejidad que presenta las características propias de una ciudad, lo que deberá verse reflejado en un adecuado levantamiento topográfico del área urbana en estudio, el cual considere el detalle de la infraestructura existente expuesta a inundaciones, como por ejemplo el trazo de las calles, avenidas, aceras, manzanas, viviendas, centros comerciales, parques, zonas recreativas y demás áreas que podemos encontrar típicamente en áreas urbanas. Esta información es básica para asegurar que los resultados de un modelo hidráulico para zonas urbanas brinden información representativa, y puede ser obtenida mediante diferentes metodologías; sin embargo, el mayor reto se presenta en lograr reflejar el detalle obtenido a partir del levantamiento topográfico, en la grilla o malla del modelo hidráulico, considerando que éste detalle estará en función del tamaño o resolución de grilla elegida para el modelo.

Adicionalmente, se requiere información correspondiente al caudal, a las condiciones de frontera del modelo, a la batimetría del cauce del río y al coeficiente de rugosidad. El caudal es resultado del respectivo estudio hidrológico, que es desarrollado aplicando metodologías estudiadas y probadas, basadas en el análisis de información de estaciones hidrométricas, meteorológicas y pluviométricas. Las condiciones de frontera del modelo pueden ser establecidas mediante la toma de información en campo y con base en información histórica. La información batimétrica del río en el tramo urbano en estudio puede ser obtenida mediante levantamientos batimétricos y topográficos, utilizando las

diferentes metodologías y tecnologías existentes, como por ejemplo drones, equipos ADCP, ecosondas, topografía convencional, etc. Sin embargo, la asignación de coeficientes de rugosidad de Manning, tarea relacionada directamente con las características topográficas de la zona urbana, presenta un mayor desafío.

La determinación de los coeficientes de rugosidad de Manning se mantiene como una tarea que presenta un alto grado de incertidumbre, dada la complejidad de asignar valores adecuados para cada infraestructura urbana identificada previamente en detalle. Además de ello, la asignación de los coeficientes de rugosidad debe considerar también, las características del suelo urbano, su variación respecto del caudal y el respectivo proceso de calibración del modelo.

Es así como persiste una brecha respecto del nivel de precisión que puede alcanzarse para la información básica que es ingresada a un modelo hidráulico bidimensional en zonas urbanas, la cual está constituida por el detalle con que se logre representar la infraestructura urbana en la grilla del modelo y por la consecuente asignación de coeficientes de rugosidad.

De lo expuesto, se concluye que gran parte de la información necesaria y factores que influyen en el desarrollo de modelos hidráulicos pueden ser estimados con una adecuada precisión; por el contrario, se evidencia la necesidad de analizar la influencia que ejerce el detalle asignado a la infraestructura urbana y la asignación de coeficientes de rugosidad, en los resultados de un modelo hidráulico bidimensional para zonas urbanas.

#### **1.4 Inundaciones en la ciudad de Piura**

Las inundaciones en la ciudad de Piura guardan una estrecha y directa relación con la ocurrencia del Fenómeno El Niño (FEN), siendo éste la causa de eventos extremos de precipitación que incrementan de manera exponencial los caudales del río Piura, los que superan la capacidad hidráulica de su cauce en varios tramos, tanto en el tramo urbano como en el Bajo Piura.

Se tiene conocimiento de impactos negativos originados por el desborde del río Piura y la subsecuente inundación de la ciudad de Piura desde el año 1578 (Cabello, 2021), siendo los años más recientes como 1982 – 1983, 1997 – 1998 y 2017; de los cuales se tiene un mejor registro, tanto de las características de los FEN, los caudales ocurridos, niveles alcanzados, erosión de fondo y riberas y daños generados.

Si bien es cierto que los principales impactos generados en la ciudad de Piura, han sido ocasionados por inundaciones cuyo desencadenante fue el FEN, se presentaron años en los cuales también ocurrió dicho desastre natural, sin haberse declarado la ocurrencia de un FEN; tal es el caso de los años 2001 y 2002, durante los cuales las avenidas del río Piura

produjeron inundaciones en el Bajo Piura en periodos de tiempo relativamente cortos pero cuyas pérdidas fueron cuantiosas e impidieron la planificación del desarrollo regional. Para el año 2001 se registraron caudales máximos entre 2144 y 2500 m<sup>3</sup>/s, con los cuales se inundó la parte baja del distrito de Cura Mori (Azurin Gonzáles, 2010); mientras que para el año 2002 se registraron caudales de entre 3642 y 3700 m<sup>3</sup>/s, volviéndose a inundar el mismo distrito y parte de la Carretera Panamericana, aislando a la ciudad de Piura (Azurin Gonzáles, 2010).

A continuación, se describen los principales eventos de inundación que ocurrieron los años 1982 – 1983, 1997 – 1998 y 2017 a causa del FEN:

#### **1.4.1 Impactos e inundaciones a causa del FEN 1982 – 1983**

El FEN ocurrido entre los años 1982 y 1983 tuvo una duración de aproximadamente seis meses, desde diciembre de 1982 hasta junio 1983. En estos años ya se encontraba operativa la estación del Puente Sánchez Cerro, ubicada en el tramo urbano del río Piura, en la cual se registró un volumen de 11 470 MMC de descarga del río durante los seis primeros meses de 1983. La avenida máxima fue de 3200 m<sup>3</sup>/s, el doble en comparación con la avenida máxima del año 1972, que fue de 1600 m<sup>3</sup>/s (Terrones, 2019).

Respecto de la precipitación, según el Dr. Ramón Mujica, investigador de la Universidad de Piura, se registró una lámina de 45 mm en tan sólo 45 minutos, valor que correspondía a la precipitación promedio anual antes del año 1983. La lámina total de precipitación acumulada en la estación Miraflores fue de 2273 mm (Terrones, 2019).

Las avenidas de 1983 desbordaron parcialmente el cauce del río e inundaron las áreas urbanas de Piura y Castilla, que aún contaban con ningún tipo de protección ribereña definitiva, tan sólo con diques provisionales de material suelto. El cauce del río Piura se ensanchó debido al proceso de erosión de orillas y socavación del fondo del cauce, derrumbando las orillas, destruyendo los diques de defensa existentes, vías de tránsito y los edificios ubicados en las mismas orillas del río. De este modo se aumentó naturalmente la capacidad hidráulica del cauce y se hizo posible el paso del caudal máximo de 3,200 m<sup>3</sup>/s, cambiando totalmente su topografía (Velasco Ocaña, 2002). Adicionalmente, se produjo la destrucción del aliviadero fijo de la presa Los Ejidos que se encontraba casi concluida (Maza Sócola, 2019).

En las siguientes figuras se muestran los efectos causados por este fenómeno en la ciudad de Piura por inundación y falla de puentes.

**Figura N° 1***Inundación en el campus de la Universidad de Piura**Nota: Universidad de Piura.***Figura N° 2***Colapso del Puente Viejo**Nota: Universidad de Piura.***1.4.2 Impactos e inundaciones a causa del FEN 1997 – 1998**

Con base en la experiencia del FEN ocurrido en los años 1982 – 1983, para el año 1997 se manejó cierto nivel de prevención, implementándose algunas medidas como ensanchamiento de cauces y defensas ribereñas, limpieza de drenajes, etc. Sin embargo, durante los primeros meses del año 1998, las máximas temperaturas superficiales del

Pacífico y los débiles vientos alisios abrieron paso a intensas lluvias que trajeron como consecuencia descargas de hasta 8750 MMC (Terrones, 2019). Este FEN tuvo una duración aproximada de 161 días (Velasco, 2002).

Durante el FEN de 1998 se registraron 1849 mm de lluvia acumulada que inundó grandes extensiones de la ciudad sin condiciones de drenaje natural e insuficiente capacidad de los drenes existentes. Los caudales registrados presentaron un crecimiento paulatino desde 1485 m<sup>3</sup>/s a inicios de enero hasta un pico máximo de 4424 m<sup>3</sup>/s a mediados de marzo (Velasco, 2002).

Los puentes Bolognesi y Viejo sufrieron daños en sus bases y fallaron por socavación. En cambio, el puente Cáceres soportó este fenómeno, a pesar de que, ante la ocurrencia del caudal máximo registrado en dicho año, no se tuvo un borde libre entre el tablero del puente y el nivel del río e incluso hubo un pequeño remanso de algunos centímetros aguas arriba. Sin embargo, cabe resaltar que este puente produce un cambio brusco del alineamiento del río, así como la reducción de su ancho, lo que tuvo un impacto negativo en la situación hidráulica en esta zona y consecuentemente propició la erosión local. De esta manera, se presentó la destrucción de viviendas en la margen derecha, inmediatamente aguas abajo del puente Cáceres (Velasco, 2002).

El Valle del bajo Piura se inundó tanto por desbordes, como por las intensas lluvias que cayeron. Por la margen derecha del río Piura, se produjeron inundaciones en la zona de la presa Los Ejidos y abajo del puente Bolognesi; provocando la destrucción de viviendas y graves daños económicos y materiales y la evacuación de sectores de la población, así como la destrucción parcial del sistema vial de transporte terrestre.

Respecto de las defensas ribereñas del tramo urbano, las tablestacas quedaron descubiertas y sin contrapeso en una altura de aproximadamente 2 metros, teniéndose como consecuencia la rotura de estas por exceso de carga en varias zonas de las márgenes izquierda y derecha en el tramo comprendido entre los puentes Cáceres, Sánchez Cerro y Bolognesi. Esto a su vez produjo la caída de las losas contiguas del revestimiento, quedándose el talud de la orilla expuesto a la erosión y socavación (Velasco, 2002).

Considerando que los caudales registrados durante el FEN 1997 – 1998 fueron mayores que los registrados durante el FEN 1982 – 1983, y que además sobrepasaron de manera significativa los caudales de diseño de la protección en la zona urbana y en la zona del Bajo Piura, era de esperarse tener como consecuencia la ocurrencia de daños mucho más significativos en la zona urbana; sin embargo, con base en investigaciones posteriores, se concluyó que la zona urbana estuvo sometida a fenómenos de erosión, mientras que aguas abajo (Bajo Piura) el fenómeno que prevaleció fue la sedimentación (Maza, 2019).

En la siguiente figura se muestran los efectos causados por este fenómeno en la ciudad de Piura por inundación.

### Figura N° 3

#### *Inundación de la ciudad de Piura*



Nota: Universidad de Piura.

#### **1.4.3 El Niño Costero 2017**

Durante el año 2015 existieron pronósticos que indicaban la ocurrencia de un FEN global de mayor magnitud al ocurrido en los años 1997 – 1998, ante lo cual se tomaron una serie de medidas preventivas en el río Piura, sin embargo, dicho fenómeno no ocurrió. Posteriormente, las condiciones climáticas empezaron a modificarse desde fines de diciembre del año 2016, dando origen a la ocurrencia de fuertes precipitaciones desde finales de enero de 2017. Como consecuencia, para finales de marzo del mismo año el río Piura ya presentaba altos caudales; extendiéndose este fenómeno hasta fines de mayo del 2017.

A pesar de tener una menor duración que los eventos de años anteriores, la velocidad a la que se calentaron las aguas de la costa de nuestro país fue mayor, por lo que se produjeron tormentas en la costa baja que dieron lugar a lluvias fuertes en zonas altas, ocasionando la activación de quebradas usualmente secas a lo largo de gran parte de la costa peruana; poniéndose en evidencia, además, la carencia de sistemas de drenaje adecuados para la ciudad de Piura.

Los desbordes provocaron la inundación de las ciudades de Piura y Castilla, así como de diversos pueblos del Bajo Piura en los distritos de Catacaos, Pedregal, Cura Mori, El Tallan, Bernal y Cristo Nos Valga (Córdova Elera, 2020). El desborde del río ocurrió debido a que el caudal de diseño de las obras de protección contra inundaciones fue superado por el caudal pico de 3468 m<sup>3</sup>/s registrado el día 27 de marzo. El nivel del agua sobrepasó la corona de los muros de encauzamiento en el tramo urbano; mientras que, en el Bajo Piura, donde los diques están diseñados para avenidas de hasta 1700 m<sup>3</sup>/s, se dieron dos situaciones: el nivel de agua sobrepasó la altura de las obras de protección, o éstas fallaron por socavación de las riberas. Por otra parte, la acumulación de sedimentos en la cuenca baja y la falta de mantenimiento del lecho tuvieron como consecuencia la reducción de la capacidad hidráulica del cauce y la disminución de su pendiente. Por ende, este hecho originó que el tránsito del flujo sea más lento y se presenten condiciones para mayor sedimentación (Córdova, 2020).



**Figura N° 4**

*Inundación de la ciudad de Piura a la altura del puente Cáceres*



*Nota: Walac Noticias*

## **1.5 Modelos hidráulicos**

El planteamiento, solución y estudio de los diferentes problemas hidráulicos que surgen a partir de la interacción de la naturaleza con las obras hechas por el hombre, recurre al uso de modelos hidráulicos, los que buscan idealizar o simplificar la compleja naturaleza y comportamiento del agua; simulando, con cierto grado de aproximación, los resultados que se esperarían respecto de la interacción antes mencionada.

Para el desarrollo de estos modelos se debe tener en cuenta la complejidad de los fenómenos hidráulicos, por lo que será necesario establecer las variables determinantes del fenómeno en estudio, las que deben ser consideradas de manera obligatoria en el respectivo análisis. De igual manera, se debe asegurar que exista similitud entre el modelo desarrollado y las condiciones naturales; por lo cual, el proceso de calibración toma especial relevancia, no debiéndose escatimar esfuerzos en su desarrollo.

Los modelos hidráulicos pueden ser físicos o numéricos. Es una práctica común iniciar el estudio de un problema hidráulico haciendo uso de modelos numéricos o computacionales, los que pueden, en función de la complejidad de los fenómenos específicamente estudiados, ser complementados con modelos físicos o técnicas experimentales.

### **1.5.1 Modelos físicos**

Para el estudio de inundaciones en zonas urbanas, el nivel de esfuerzo que requeriría la implementación de un modelo físico sería demasiado grande, y no necesariamente tendría como consecuencia un aporte significativo a los fines que podría tener dicho estudio. Por dicho motivo, y sin dejar de lado la importancia que tienen los modelos físicos en el estudio de otros casos o problemas de la hidráulica, el presente trabajo de tesis se enfoca en el desarrollo a detalle de los modelos numéricos.

### **1.5.2 Modelos numéricos o computacionales**

La evolución tecnológica que ha tenido lugar durante las últimas décadas ha permitido contar con las herramientas necesarias para el desarrollo de modelos hidráulicos computacionales que brindan resultados muy próximos a la realidad.

El nivel de detalle que se puede lograr con estos modelos es cada vez mayor debido a las mejores capacidades computacionales y técnicas con las que se cuenta para realizar levantamientos topográficos y batimétricos, lo que permite al usuario elegir el grado de complejidad final que presentará el modelo a ser desarrollado.

De esta manera, los modelos hidráulicos computacionales se han convertido en una adecuada y accesible herramienta que permite estimar la magnitud de las inundaciones en

áreas adyacentes a cauces de ríos, calculando alturas de lámina de agua, velocidades y direcciones de flujo, y áreas afectadas en las llanuras de inundación, teniendo en consideración el grado de detalle adecuado para reflejar las mínimas pendientes que pueden presentarse en el estudio de este tipo de problemas.

El estudio de inundaciones ha sido realizado mediante la aplicación de modelos hidráulicos computacionales unidimensionales y bidimensionales, habiendo ganado estos últimos mayor relevancia en los últimos años; sin embargo, los modelos unidimensionales continúan siendo utilizados, principalmente por sus menores requerimientos computacionales y por los buenos resultados que brindan en el cauce principal del río en estudio, a pesar de la menor precisión que brindan en las áreas inundables.

#### **1.5.2.1 Modelos hidráulicos unidimensionales**

Como se mencionó anteriormente, los modelos hidráulicos unidimensionales son ampliamente aplicados para resolver problemas en los que se requiere conocer adecuadamente el comportamiento hidráulico del cauce principal del río. Sin embargo, al momento de aplicar estos modelos, debemos tener en consideración las siguientes consideraciones y simplificaciones:

- Están basados en las ecuaciones de Jean Claude B. Saint-Venant (leyes de conservación de la masa y momento).
- El río es considerado como una línea, a lo largo de la cual se presentan una serie de puntos de análisis, los que corresponden a las secciones transversales.
- El nivel de detalle del modelo estará en función de la cantidad y proximidad de las secciones transversales, así como del detalle topográfico que se refleje en cada una de ellas.
- Se asume que el flujo del agua transcurre perpendicular al eje del río y a cada sección transversal.
- La cota del agua calculada es constante a lo ancho de cada sección.

Como consecuencia de los puntos antes mencionados, surgen los siguientes problemas en el empleo de modelos hidráulicos unidimensionales:

- Inadecuada representación del comportamiento hidráulico en el cauce cuando el eje del río presenta marcadas curvaturas.
- Deficiente caracterización del comportamiento de la inundación en las llanuras adyacentes al cauce del río.

Dada la finalidad del presente trabajo de investigación, el uso de modelos hidráulicos unidimensionales queda totalmente descartado, considerando que las llanuras

de inundación del río Piura presentan una alta complejidad en cuanto al detalle necesario para su caracterización, dado que en ellas se localiza el casco urbano de la ciudad de Piura.

### **1.5.2.2 Modelos Hidráulicos bidimensionales – Telemac 2D**

Como se mencionó anteriormente, considerando las limitaciones que presentan los modelos hidráulicos unidimensionales en el desarrollo de un adecuado estudio de inundaciones en zonas urbanas, viene tomando relevancia la aplicación de modelos hidráulicos en dos dimensiones, los que hacen uso de las ecuaciones de Navier-Stokes. Según Bladé, Cea y Corestein (2014) “En dos dimensiones el río ya no se discretiza como una línea con una serie de secciones transversales, sino como una malla formada por una serie de celdas poligonales que representan la topografía del cauce y llanuras de inundación. Dicha malla puede ser regular o irregular, estructurada o no estructurada” (p. 14).

Los modelos hidráulicos bidimensionales usan diferentes esquemas computacionales, teniéndose por ejemplo programas con esquemas de diferencias finitas, como Mike-21 y Sobek; esquemas de volúmenes finitos, como Iber, y modelos en elementos finitos como SMS (RMA2 y HVEL2D) y Telemac 2D.

El programa Telemac 2D fue desarrollado inicialmente por el Laboratorio Nacional de Hidráulica y Medio Ambiente de la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Junta de Electricidad Francesa (EDF R&D). Resuelve ecuaciones de flujo de superficie libre, presentando como principales resultados el tirante de agua y velocidad de flujo en cada nodo de la malla computacional. Este programa tiene la capacidad de representar fenómenos como fricción de lecho, efectos de la fuerza de Coriolis, efectos de la presión atmosférica, lluvia o evaporación; turbulencia, flujos críticos y supercríticos, transporte de sedimentos, influencia de estructuras y análisis de calidad de agua. Debido a dichas características, tiene un gran número de aplicaciones en el estudio de los ríos, tales como el diseño de estructuras, ruptura de presas, inundaciones, etc. Finalmente, Telemac 2D cumple con los procedimientos de aseguramiento de la calidad del EDF R&D para programas técnicos y científicos, los que permiten comprobar y verificar la calidad del programa en todas sus etapas de desarrollo.

Según (Gutiérrez de la Torre, 2016) “...en el entorno del modelo TELEMAC que fue inicialmente desarrollado por EDF en Francia, se ha constituido un consorcio integrado por diversos centros de investigación franceses (el propio EDF, el laboratorio de puertos CETMEF y la consultora Sogreah-Artelia), ingleses (HR Wallingford y el Laboratorio de Daresbury) y alemanes (el centro público BAW) que han puesto a disposición gratuita de los usuarios el modelo TELEMAC junto con otro modelo hidrodinámico (el MASCARET, desarrollado hace 20 años por EDF y CETMEF) en sus versiones 2D y 3D, junto con los

módulos para el transporte de sedimentos (SISYPHE), para la calidad de las aguas (DELWAQ) y otros en el ámbito portuario y costero (TOMAWAC y ARTEMIS).” (p. 101).

Además, Telemac 2D permite trabajar de la mano con programas de uso libre para la generación de la malla, establecimiento de condiciones de frontera, asignación de coeficientes de rugosidad y visualización de resultados. Para el presente caso se utilizó el programa BlueKenue, con el cual se tuvo flexibilidad en los siguientes puntos:

- Generación de la malla del modelo para los tres niveles de detalle catastral estudiados.
- Asignación de coeficientes de rugosidad y su posterior modificación para el estudio paramétrico desarrollado en el Capítulo 4.
- Procesamiento, visualización y análisis de resultados.

Existen experiencias previas en las cuales el Telemac 2D ha sido empleado en el estudio de inundaciones en zonas urbanas, teniéndose resultados consistentes con eventos reales usados para la calibración de los modelos. Tal es el caso de los trabajos de investigación que se citan a continuación:

- Se llevó a cabo la simulación hidrodinámica del río Mekong (Cambodia) utilizando Telemac 2D, con la finalidad de estudiar la factibilidad de pronosticar inundaciones con dicho programa. Los resultados fueron comparados con un evento de inundación real ocurrido en junio y noviembre de 2001, observándose que los resultados guardan consistencia con las evidencias obtenidas mediante imágenes satelitales (Vu, Nguyen, Chua, & Law, 2015).
- Se realizó la modelación hidráulica de zonas urbanas idealizadas usando Telemac 2D, analizando los efectos de diferentes disposiciones de edificaciones y resoluciones de mallas (Li Z. , y otros, 2019)
- Se desarrolló un modelo de simulación de inundación urbana, el cual fue calibrado con base en información registrada en dos eventos de precipitación. El modelo fue analizado bajo 12 diferentes escenarios de precipitación para realizar una evaluación de riesgos basada en parámetros como tirante de la inundación, velocidad del flujo, elevación del terreno, pendientes, etc. Se pudo elaborar el mapa de riesgos para el área inundada y cómo este varía en función de los diferentes escenarios de precipitación estudiados (Li, Liu, & Shao, 2022).

Finalmente, según Gutiérrez (2016), Telemac 2D cuenta con “... un potente club de usuarios que celebra seminarios, reuniones científicas y canaliza las inquietudes y sugerencias de usuarios de estos modelos. A todo ellos se puede acceder gratuitamente luego de crear una cuenta desde el sitio web <http://www.opentelemac.org/>.” (p. 101).

Considerando las características antes descritas y la interrelación que presenta con programas como el BlueKenue; se optó por utilizar el Telemac 2D como programa de modelación hidráulica en el presente trabajo de investigación.



## Capítulo 2

### Estudios básicos y recopilación y procesamiento de información

#### 2.1 Área de estudio

El área de estudio se ubica dentro de la cuenca del río Piura. Corresponde al tramo urbano de dicho río, específicamente a la zona comprendida desde aguas abajo de la Presa los Ejidos hasta el Puente Grau.

##### 2.1.1 Información general de la cuenca del río Piura

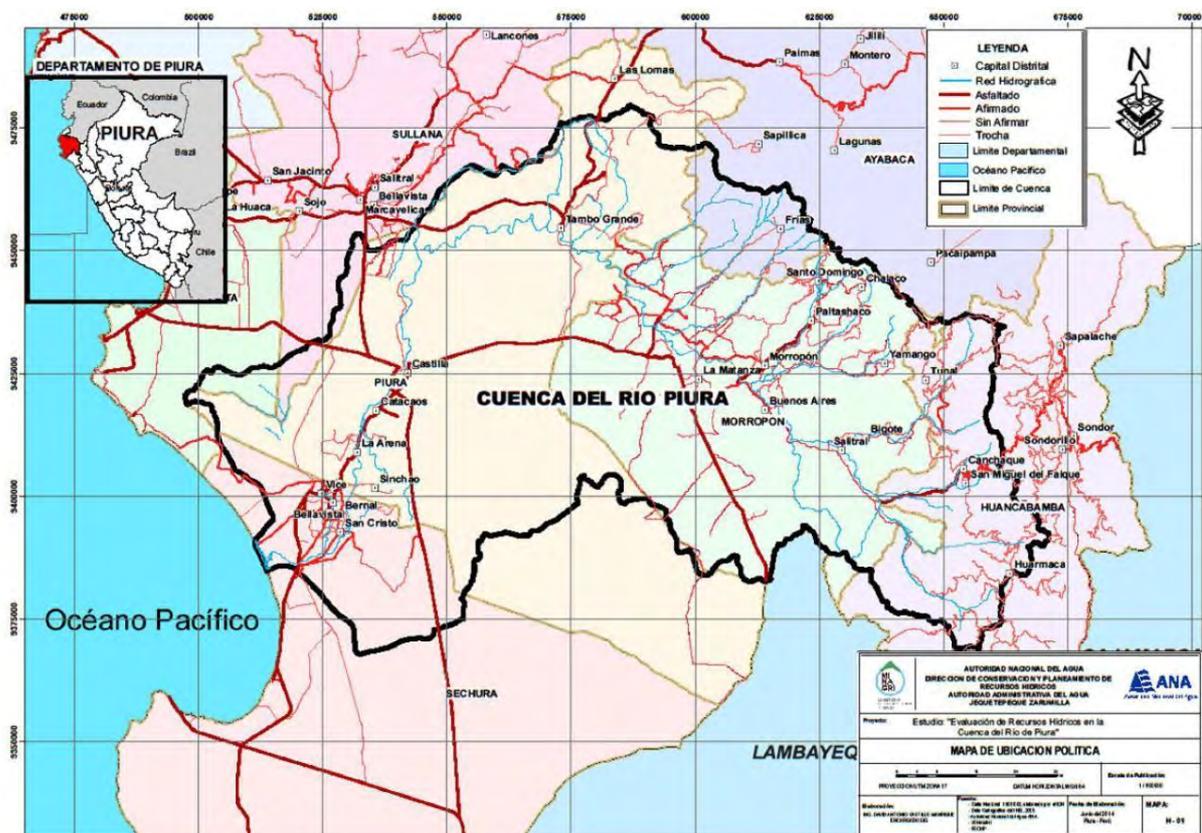
La cuenca del río Piura se encuentra ubicada en la vertiente del Pacífico y políticamente comprende a cinco provincias del departamento de Piura. Los recursos hídricos en el ámbito territorial de la cuenca del río Piura son gestionados por la ALA Alto Piura Huancabamba, la ALA Medio Bajo Piura y en menor proporción por la ALA San Lorenzo, todas ellas bajo la dirección de la Autoridad Administrativa del Agua - AAA Jequetepeque - Zarumilla. La cuenca presenta los siguientes límites:

- Por el Norte : Cuenca Chira.
- Por el Este : Cuenca Chamaya.
- Por el Sur : Cuenca Cascajal e Intercuenca 13779.
- Por el Oeste : Intercuenca 1379.

La cuenca del río Piura tiene un área total de 10 872,1 km<sup>2</sup>, un perímetro de 655,4 km y la altitud media de 464,9 m.s.n.m.. El cauce del río Piura tiene una longitud de recorrido de 243 km, una pendiente promedio de 0,8% y presenta descargas continuas durante todo el año. La Autoridad Nacional del Agua (2013) indica las siguientes características respecto del río Piura: "... es de régimen irregular, presenta un caudal medio mensual que varía entre 0,11 m<sup>3</sup>/s a 9,86 m<sup>3</sup>/s y un caudal medio anual de 27,85 m<sup>3</sup>/s. La oferta de agua asciende a 3 074,10 Hm<sup>3</sup> de la cual se aprovechan 2 751,16 Hm<sup>3</sup> al año. Los usos más significativos son agrícola, poblacional, acuícola e industrial. La demanda de usos está garantizada al 100 %." (p. 8).

Figura N° 5

Mapa de ubicación política de la cuenca del río Piura

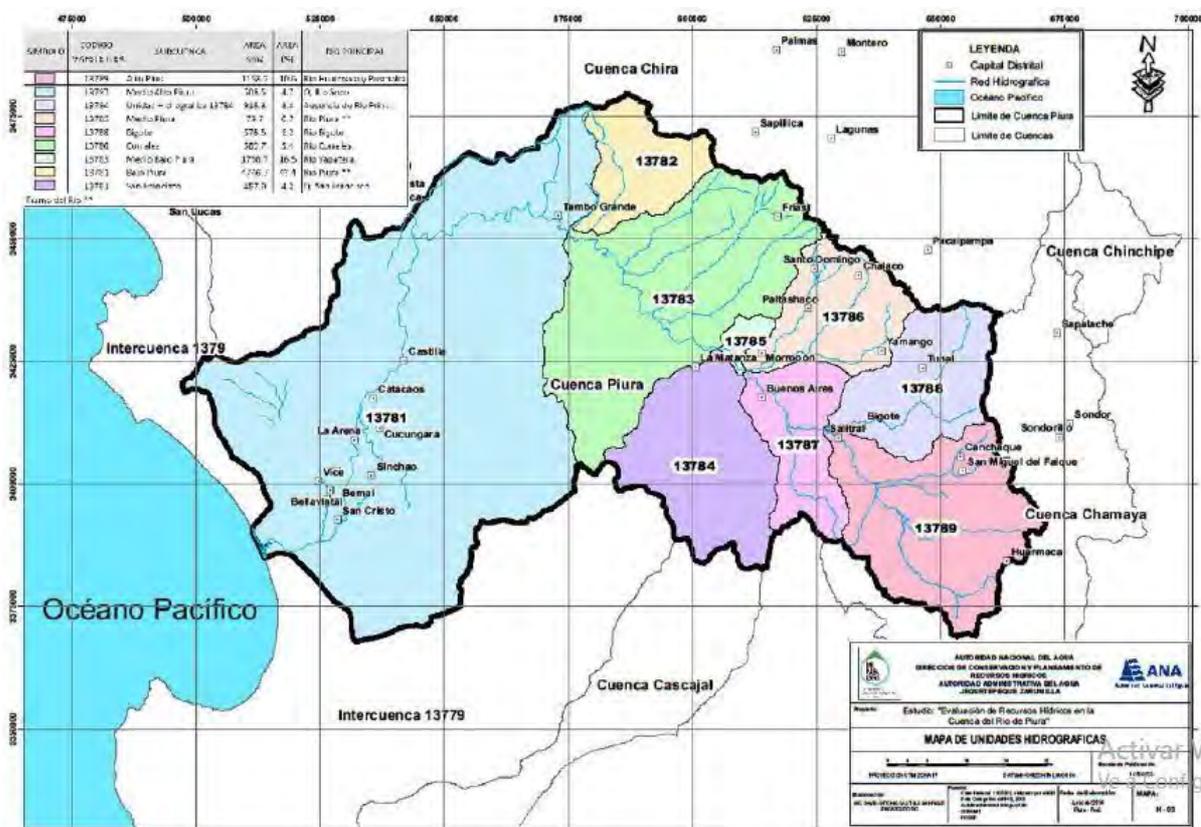


Nota: Autoridad Nacional del Agua

El tramo del río Piura en estudio se localiza en la subcuenca Bajo Piura, una de las nueve subcuencas que conforman la cuenca del río Piura; la cual abarca un área de 4721,5 Km<sup>2</sup>, y representa el 43,4% de la totalidad de la cuenca. Comprende a la parte baja de la cuenca extendida sobre los 0 m.s.n.m., presenta una altitud media de 92 m.s.n.m., una pendiente del 1% y un tramo de 145,2 km del río Piura.

Figura N° 6

Ubicación de la subcuenca Bajo Piura



Nota: Autoridad Nacional del Agua

### 2.1.2 Características morfológicas del tramo en estudio

En líneas generales, el tramo urbano del río Piura se caracteriza por un cauce que se encuentra canalizado, no teniendo libertad lateral; siendo el fondo su única forma de desarrollo. Aguas abajo de la zona urbana, hasta el Puente Independencia, el río forma un cauce principal el cual es limitado en algunas zonas por terrazas laterales, las cuales en su mayoría tienen desarrollo agrícola.

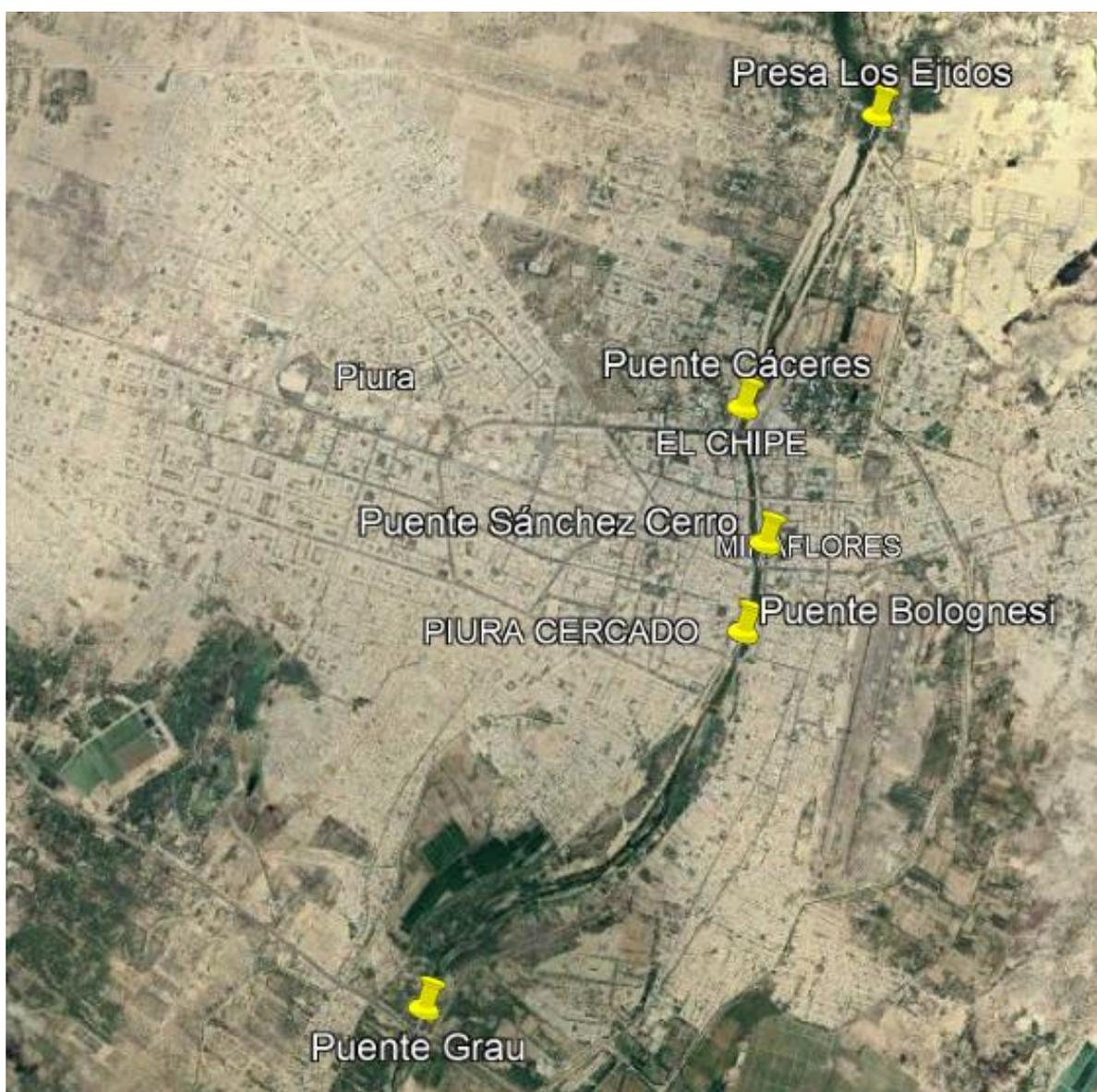
El tramo en estudio inicia en la presa Los Ejidos, la cual deriva aguas hacia el Bajo Piura a través del canal Biaggio Arbulu, y culmina en el Puente Grau. A lo largo de este tramo existen estructuras en cuya ubicación se cuenta con información correspondiente a niveles de agua registrados durante eventos pasados, los que nos servirán para realizar la respectiva calibración del modelo.

Este tramo tiene una longitud de aproximadamente 9.5 km, posee obras de protección contra inundaciones, y se puede describir como un cauce rectilíneo con ligeras variaciones en planta, esto debido a la presencia de formaciones de material arcillosos consolidado. En la actualidad ambas márgenes han sido ocupadas por zonas residenciales,

las cuales han provocado el estrechamiento del cauce. Cabe resaltar también que actualmente se vienen ejecutando obras de protección, específicamente entre La Presa Los Ejidos y el Puente Cáceres, cuya evaluación es parte de los objetivos del presente trabajo de investigación.

### Figura N° 7

*Tramo en estudio*



*Nota:* Google Earth

En promedio, la pendiente longitudinal del fondo del río es de 0,065 %, mientras que el ancho del cauce principal varía desde los 200 m al inicio del tramo (controlado por el vertedero fijo y el vertedero con compuertas de la represa Los Ejidos), pasando por 300 m en la zona aguas abajo de la presa, reduciéndose posteriormente a 180 m en la progresiva 2+000 aproximadamente. El ancho del cauce se limita a 130 – 140 m en la zona

aguas arriba del puente Cáceres, como consecuencia de la construcción de dicha infraestructura. Este ancho promedio se mantiene aproximadamente hasta la ubicación del Puente Bolognesi, luego de lo cual se produce un ligero ensanchamiento hasta llegar aproximadamente a los 180 m aguas arriba del Puente Grau.

## **2.2 Topografía y batimetría**

La topografía de la ciudad de Piura para las áreas localizadas en ambas márgenes del tramo del río en estudio fue obtenida de un levantamiento LIDAR desarrollado por la Autoridad Nacional del Agua a través del Proyecto de Modernización de la Gestión de los Recursos Hídricos. La información batimétrica fue obtenida de la misma fuente, extrayéndola de planos topográficos de curvas de nivel.

Esta información fue recopilada entre los meses de agosto y octubre del año 2015, fecha a ser tomada en cuenta al momento de definir el evento cuyos registros sean utilizados para realizar la calibración del modelo desarrollado.

A continuación, se presentan los principales detalles técnicos del levantamiento realizado:

- Proyecto Universal Transversa de Mercator – UTM.
- Origen: Ecuador y Meridiano Central de 75°W.
- Coeficiente de deformación lineal (K): 0,9996
- Datum vertical: Nivel medio del mar (mareógrafo).
- Datum horizontal: Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84)
- Vuelo LIDAR / Fotográfico a la altura de 1000m.
- Equipo LIDAR: Leica ALS70 HA
- Cámara fotográfica RGB: LEAF APTUS II – 80MPIXELS
- Cámara fotográfica NIR: TRIMBLE P45+ - 39MPIXELS
- Intervalo de curvas de nivel: 50 cm
- Sistema cuadrulado: UTM Zona 17S a cada 100 metros
- Resolución de píxel en el terreno: 20 cm

### **2.2.1 Procesamiento de la información topográfica**

La información topográfica correspondiente a ambas márgenes del río Piura (zona urbana) fue levantada mediante el uso de la tecnología LIDAR, por lo cual se utilizó información disponible en formato LAS. Según Cerrillo (2010):

LAS es un formato de archivo público que permite el intercambio de ficheros que contienen información de una nube de puntos tridimensional. El formato LAS es un archivo

binario que mantiene toda la información procedente del sistema LiDAR y conserva la misma según la propia naturaleza de los datos y del sistema de captura.

Mediante el uso del programa Global Mapper se realizó la depuración de los puntos obtenidos como resultado del vuelo LIDAR, eliminándose los que correspondían a vegetación (alta y baja), edificaciones, errores, y demás interferencias que pudieran modificar las verdaderas características topográficas del terreno. Se realizó una última depuración de la información topográfica mediante el uso del programa ArcGis, mediante el cual se eliminaron los puntos que se superponían con edificaciones correspondientes al catastro urbano de la ciudad de Piura.

### **2.2.2 Procesamiento de la información batimétrica**

Como se mencionó anteriormente, la información batimétrica fue obtenida directamente de planos de curvas de nivel desarrollados por la Autoridad Nacional del Agua a través del Proyecto de Modernización de la Gestión de los Recursos Hídricos. Dado que la información necesaria para la interpolación de la malla a ser generada para el modelo hidráulico corresponde a puntos con elevación, estos fueron generados a lo largo de las curvas de batimetría, utilizando el programa Civil 3D.

### **2.2.3 Unificación de información topográfica y batimétrica**

La unificación de la información topográfica y batimétrica fue llevada a cabo teniendo en consideración los requerimientos y formatos requeridos por el programa Bluekenue, utilizado para elaborar la malla del modelo hidráulico.

En primer lugar, se procedió con realizar la transformación de coordenadas reales a coordenadas relativas, dado que el Bluekenue sólo tiene capacidad para reconocer hasta ocho (08) dígitos en el sistema de coordenadas (incluyendo los decimales). Esta transformación se realizó bajo la siguiente referencia:

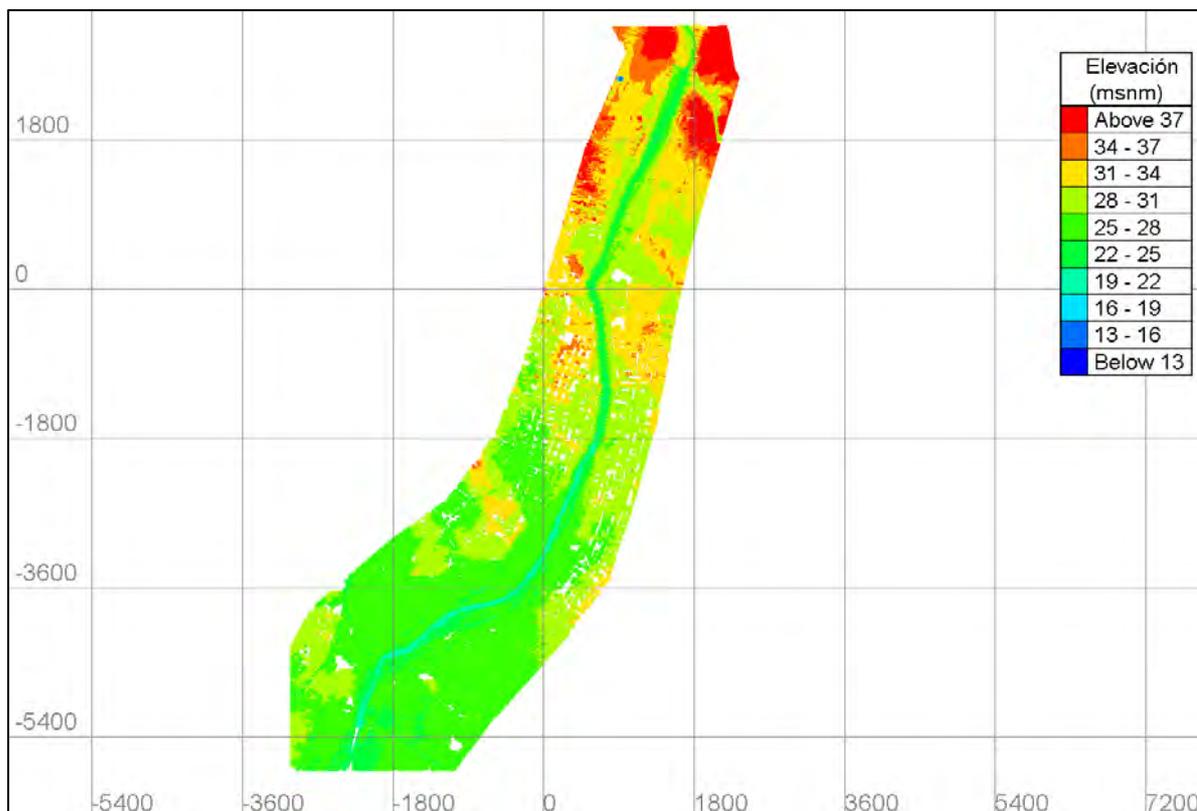
**Tabla N° 1**

*Referencia para la transformación de coordenadas reales a relativas*

	<b>Coordenadas reales</b>	<b>Coordenadas relativas</b>
<b>Este (m)</b>	540940.891	0.000
<b>Norte (m)</b>	9427069.142	0.000

*Nota:* Elaboración propia

Finalmente, se procedió con la transformación de la información al formato Point Sets (.xyz) para ser utilizados por el programa Bluekenue, que permitirá asignar a la malla base del modelo, las cotas propias de la superficie del terreno. En la siguiente figura se observa la totalidad de puntos topográficos utilizados:

**Figura N° 8***Información topográfica utilizada*

*Nota:* Elaboración propia

El área total para la que se cuenta con información topográfica está delimitada por las siguientes coordenadas:

**Tabla N° 2***Coordenadas relativas correspondientes al área con información topográfica*

Punto	Este (m)	Norte (m)
1	2251.109	2730.858
2	2192.109	3095.858
3	2169.109	3155.858
4	2168.109	3156.858
5	2164.109	3157.858
6	857.109	3157.858
7	844.109	3155.858
8	844.109	3153.858
9	847.109	3147.858
10	970.109	2931.858
11	994.953	2838.964
12	975.603	2755.114
13	527.938	1712.132

Punto	Este (m)	Norte (m)
14	257.450	808.857
15	18.645	10.000
16	-293.656	-1034.721
17	-576.607	-1765.129
18	-859.917	-2153.857
19	-1166.675	-2550.378
20	-1830.278	-3049.723
21	-2319.704	-3478.393
22	-2319.704	-3649.699
23	-2515.291	-3649.699
24	-2778.580	-3880.305
25	-3001.322	-4342.663
26	-3001.322	-4613.882
27	-1235.622	-5940.884
28	-1141.739	-5836.896
29	-777.870	-5355.015
30	39.275	-4390.193
31	284.735	-4134.916
32	755.042	-3458.849
33	1078.872	-2477.544

*Nota:* Elaboración propia

Se tiene una longitud de 9,974 metros a lo largo del eje del río Piura; hacia la margen izquierda, el ancho varía de 765 a 997 metros; mientras que, hacia la margen derecha, el ancho varía de 552 a 1,327 metros.

### 2.3 Información catastral de la ciudad de Piura

La información catastral correspondiente a la ciudad de Piura fue obtenida de COFOPRI. Esta información fue revisada y actualizada con base en imágenes satelitales propias del aplicativo de Geolocalización del programa Civil 3D. Se actualizó la información correspondiente a vías, calles y nuevas urbanizaciones. Esta información fue exportada a formato Shape (.shp), el cual puede ser importado por el programa Bluekenue. También se incorporó el detalle de la infraestructura existente en el cauce del río Piura:

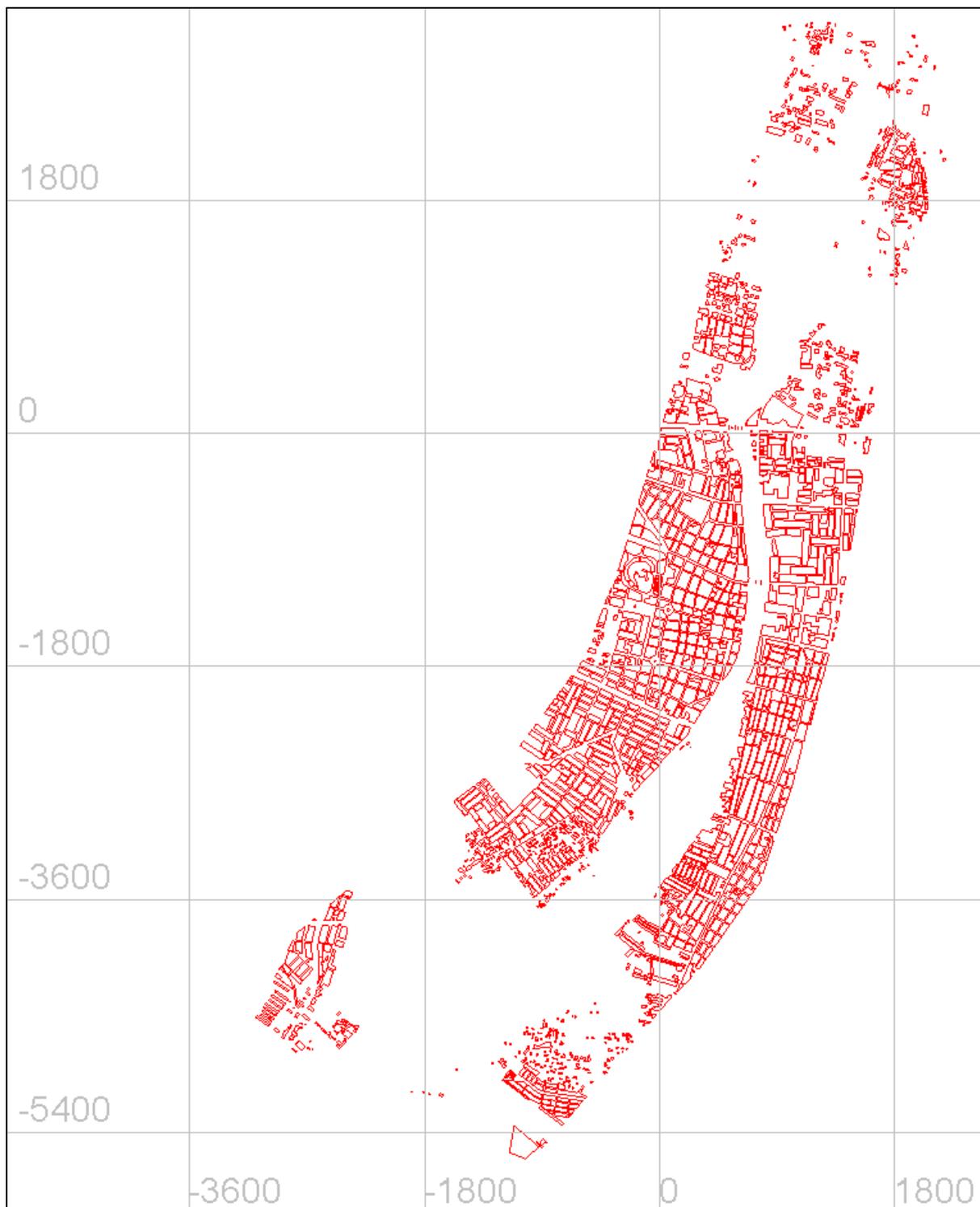
- Presa Los Ejidos
- Apoyos del puente Cáceres
- Apoyos del puente Sánchez Cerro

Cabe resaltar que esta información fue procesada para la misma área correspondiente al levantamiento topográfico LIDAR. Como se podrá observar en la siguiente figura, se buscó recopilar el mayor detalle posible, con la finalidad de contar con

información suficiente para poder realizar el posterior análisis de sensibilidad al realizar simplificaciones a diferentes niveles.

### Figura N° 9

*Información catastral de la ciudad de Piura para el tramo en estudio*



*Nota:* Elaboración propia

## 2.4 Hidrología

Esta información fue obtenida a partir de información hidrométrica registrada por el Proyecto Especial Chira Piura durante el evento del Niño Costero 2017 (Montero Torres, 2019)

Se utilizó el hidrograma correspondiente al evento ocurrido el 27 de marzo de 2017, con un detalle temporal de 2 horas, iniciándose el día 25 de marzo de 2017. En la siguiente tabla se muestra el detalle:

**Tabla N° 3**

*Hidrograma registrado en el río Piura para el evento del 27 de marzo de 2017*

Fecha	Hora	Tiempo acumulado (h)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
25/03/2017	2	2	971
	4	4	908
	6	6	908
	8	8	916
	10	10	1018
	12	12	1018
	14	14	948
	16	16	948
	18	18	979
	20	20	979
	22	22	979
	24	24	971
26/03/2017	2	26	1042
	4	28	1242
	6	30	1328
	8	32	1479
	10	34	1514
	12	36	1565
	14	38	1714
	16	40	1789
	18	42	1868
	20	44	1962
	22	46	2126
	24	48	2270
27/03/2017	2	50	2396
	4	52	2574
	6	54	2895
	8	56	3095
	10	58	3264
	12	60	3468

*Nota:* Proyecto Especial Chira Piura

## 2.5 Mediciones realizadas durante el fenómeno El Niño Costero 2017

La información correspondiente a mediciones realizadas durante el fenómeno de El Niño Costero del año 2017 resulta de suma importancia para los fines del presente trabajo de investigación. Considerando que la información topográfica y batimétrica corresponden al año 2015, este es el evento que servirá para realizar la calibración del modelo hidráulico; ya que entre el año 2015 y 2017 no se presentaron eventos de mayor relevancia que pudieran haber modificado las características morfológicas del cauce ni las cotas de fondo del canal principal; por lo que se estima que las características del cauce representan las condiciones existentes con las que ocurrió dicho evento.

La información disponible correspondiente a los niveles máximos alcanzados en los puentes ubicados en el tramo urbano del río Piura, durante el tránsito de la avenida máxima de El Niño Costero del año 2017, se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla N° 4**

*Niveles máximos alcanzados por el tirante en el río Piura durante El Niño Costero 2017*

Punto de interés	Cota alcanzada por el agua el 27/03/2017 (m.s.n.m.)
Presa Los Ejidos	33.55 (*)
Puente Cáceres	32.30
Puente Sánchez Cerro	30.74 (*)
Puente Bolognesi	29.70
Puente Grau	28.21 (*)
Puente Independencia	24.55

(\*) Valores estimados

Nota: Dr. Ing. Jorge Reyes Salazar

Respecto de la información detallada en la Tabla N° 4, la información considerada relevante para realizar la posterior calibración del modelo hidráulico corresponde a los niveles registrados en los puentes Cáceres, Sánchez Cerro, Bolognesi y Grau; por encontrarse dentro del tramo del río en estudio y teniendo en consideración lo indicado por Maza (2019):

Es preciso aclarar que el valor del nivel de agua inmediatamente después de la presa Los Ejidos, es influenciado por las condiciones hidráulicas de la poza disipadora de la presa. Los demás valores se justifican con la medida in situ de los niveles máximos de agua en los puentes Independencia, Bolognesi y Cáceres. Los niveles de agua correspondientes a la Presa Los Ejidos, puente Sánchez Cerro y puente Grau no han sido medidos de manera directa, pero han sido estimados de acuerdo con los datos disponibles de los niveles en los demás puentes. (p. 126)

## **Capítulo 3**

### **Desarrollo del modelo hidráulico**

#### **3.1 Definición del programa computacional a ser empleado**

Teniendo como base un previo conocimiento de las características del río a ser modelado y la definición de los objetivos del presente trabajo de investigación, se procedió a seleccionar el programa a ser utilizado para el desarrollo del modelo hidráulico. Se eligió el programa Telemac 2d, por tratarse de un programa de uso libre y que brinda gran flexibilidad para el desarrollo y conformación de la malla base para el modelo. Esta tarea es realizada mediante el uso del programa Bluekenue, que adicionalmente permite asignar las características topográficas, los respectivos coeficientes de rugosidad, condiciones de frontera, detalle de infraestructura hidráulica existente, etc.

#### **3.2 Definición de la malla o grillado**

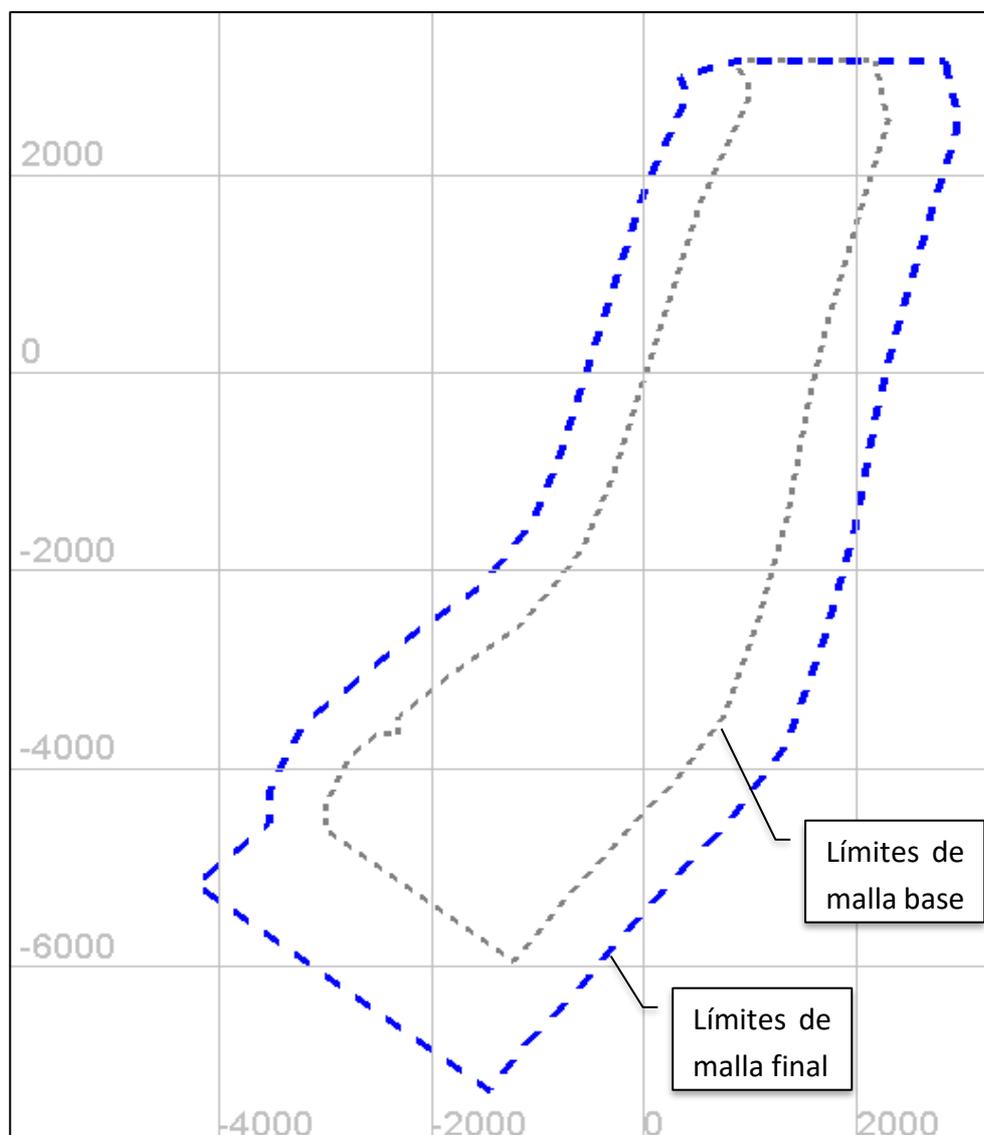
##### **3.2.1 Extensión y límites de la malla**

La malla base para el modelo hidráulico abarca la totalidad del área correspondiente al levantamiento topográfico, el cual está comprendida por las coordenadas detalladas en la Tabla N° 2.

Considerando que el área inundada durante el evento de El Niño Costero 2017 abarcó un área mayor que la delimitada por las coordenadas de la Tabla N° 2, el límite de la malla original podría resultar insuficiente para reflejar el verdadero comportamiento de la inundación en la zona urbana. Por este motivo, se adicionaron planicies libres de edificaciones en los límites este y oeste de la malla original del modelo, permitiendo un flujo libre del agua en lugar de límites cerrados. La extensión de las planicies adicionadas corresponde a 600 m.

De igual manera, aguas abajo del Puente Grau, se adicionó una planicie libre, respetando la forma y pendiente del cauce, de manera de contar con un primer tramo que permita la estabilización del modelo, asegurando así contar con resultados adecuados desde la primera estructura con información para realizar la calibración. La pendiente utilizada en este tramo adicional corresponde a la pendiente promedio de todo el tramo del río Piura en estudio, la que presenta un valor de 0.0003719 m/m, mientras que la extensión de este tramo corresponde a 1200 m.

Los límites de la malla final, incluyendo las planicies este, oeste y aguas abajo, se muestran en la Figura N° 10. Cabe resaltar que el análisis de resultados del modelo se realizará dentro de los límites de la malla base.

**Figura N° 10***Límites de la malla base y malla final del modelo*

*Nota:* Elaboración propia

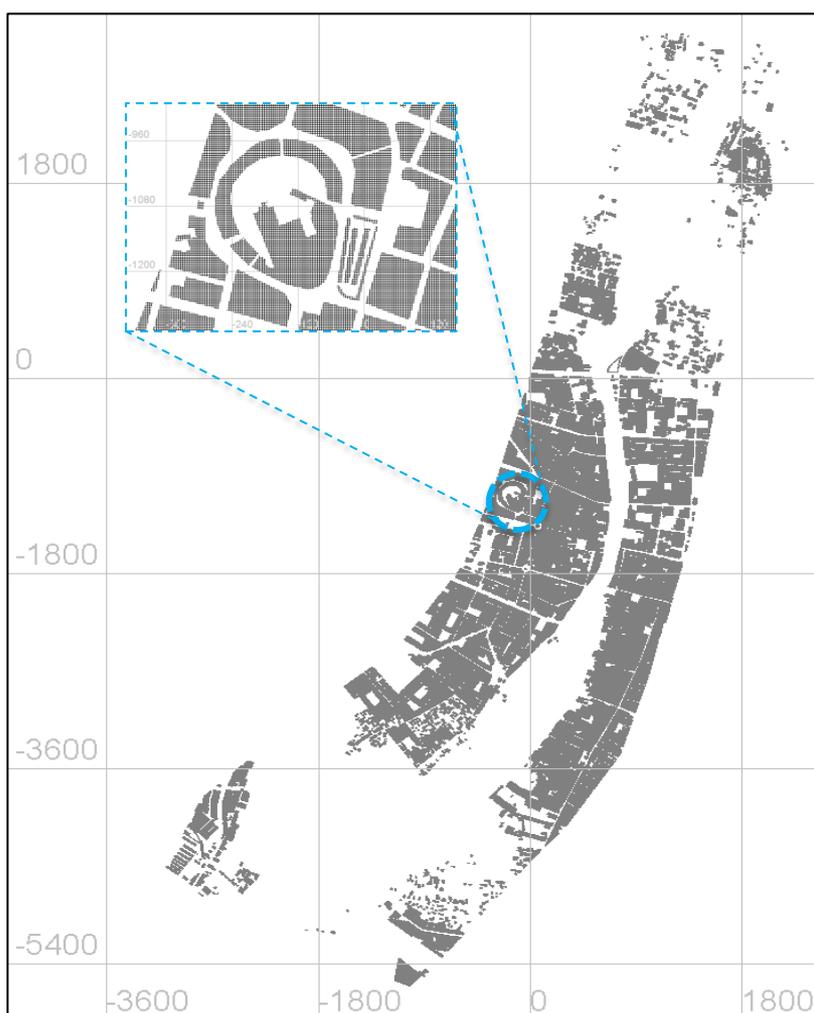
### **3.2.2 Procesamiento de la información catastral**

Los polígonos correspondientes a las edificaciones y manzanas de la ciudad de Piura fueron incluidos en la malla como “softlines” permitiendo así que éstos se amolden a las diferentes densidades asignadas. Finalmente, las manzanas y edificaciones son incorporadas al modelo asignando una cota elevada a los nodos que las conforman. Se desestimó el representar el catastro mediante vacíos con límites definidos como paredes, a través de los cuales no circula el flujo del agua, ya que se generaba una gran cantidad de nodos “overconstrained” (sin conexión interna a la malla), lo que producía errores en el modelo.

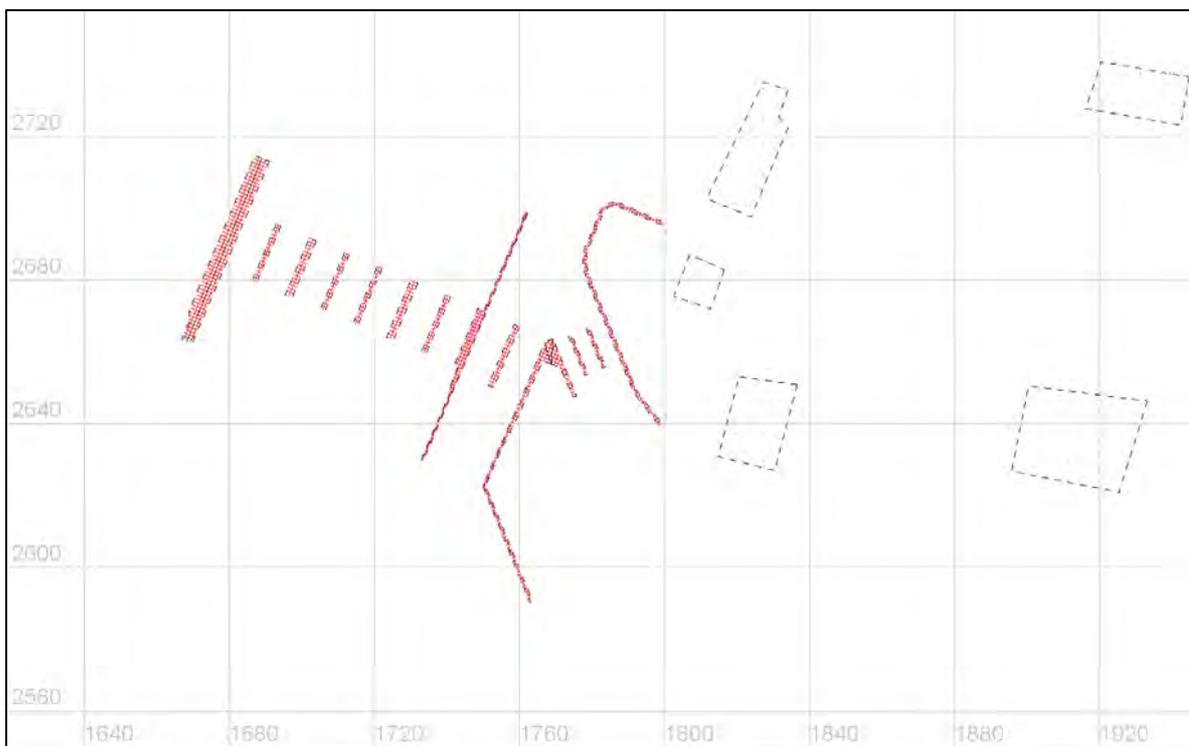
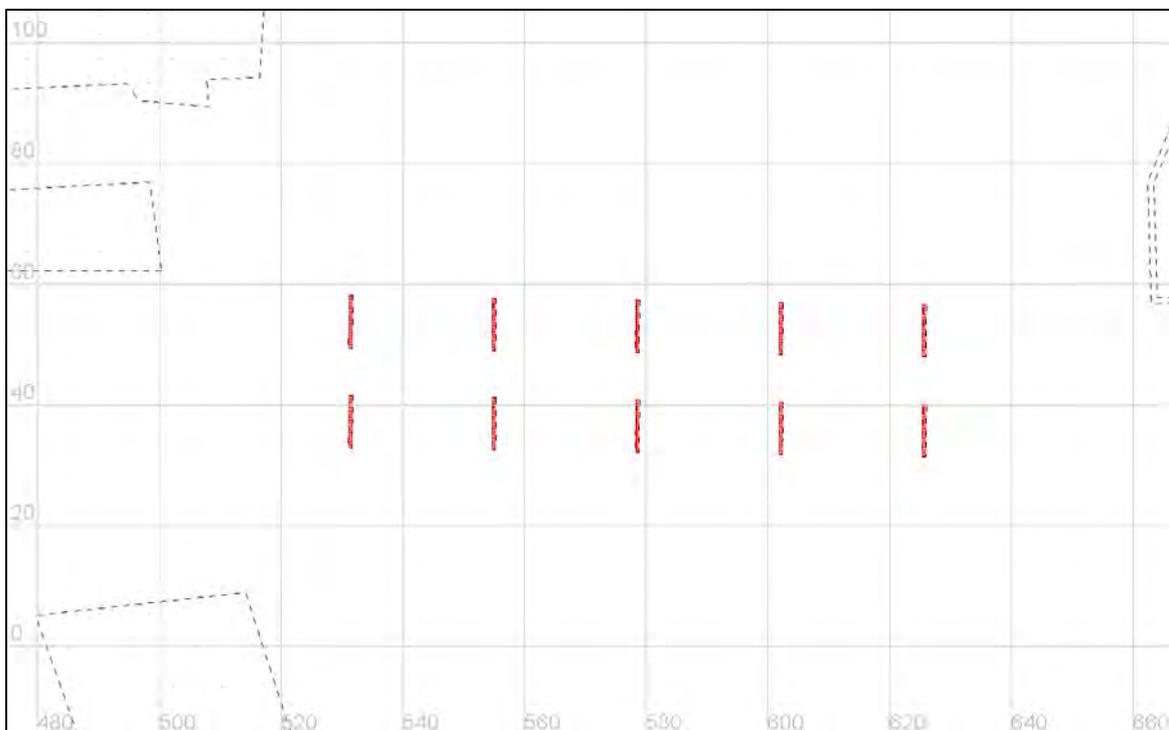
Con la finalidad de poder asignar de manera adecuada cotas elevadas al catastro, se generó una grilla o malla interior a los polígonos mostrados en la Figura N° 9, los que fueron utilizados en la generación de la malla como “softlines” (Figura N° 11). Finalmente, para representar las estructuras en el cauce del río, como la presa Los Ejidos y los apoyos de los puentes Cáceres y Bolognesi, se generaron grillas de líneas, las que también fueron utilizadas en la generación de la malla (Figura N° 10, Figura N° 11 y Figura N° 12).

### Figura N° 11

*Grilla o malla generada para la representación del catastro*

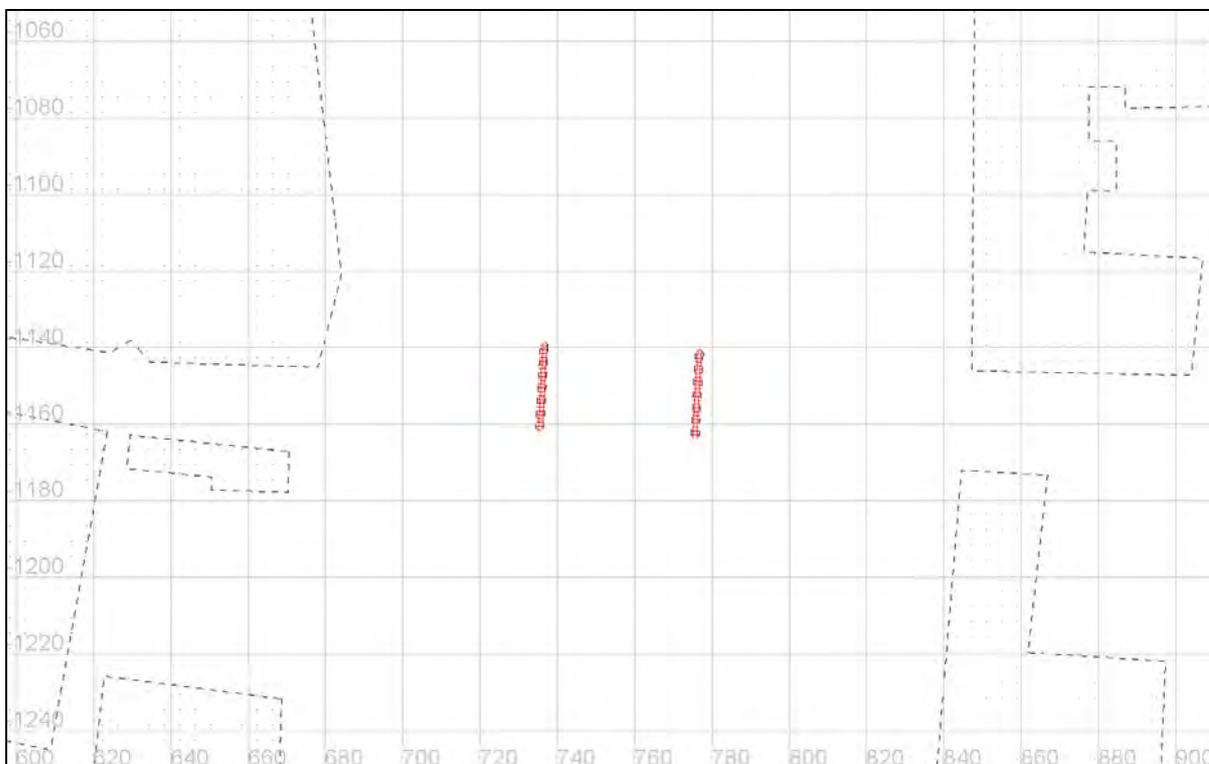


*Nota:* Elaboración propia

**Figura N° 12***Grilla generada para la representación de la presa Los Ejidos**Nota: Elaboración propia***Figura N° 13***Grilla generada para la representación de los apoyos del Puente Cáceres**Nota: Elaboración propia*

**Figura N° 14**

*Grilla generada para la representación de los apoyos del Puente Bolognesi*



*Nota:* Elaboración propia

### **3.2.3 Detalle o densidad de la malla**

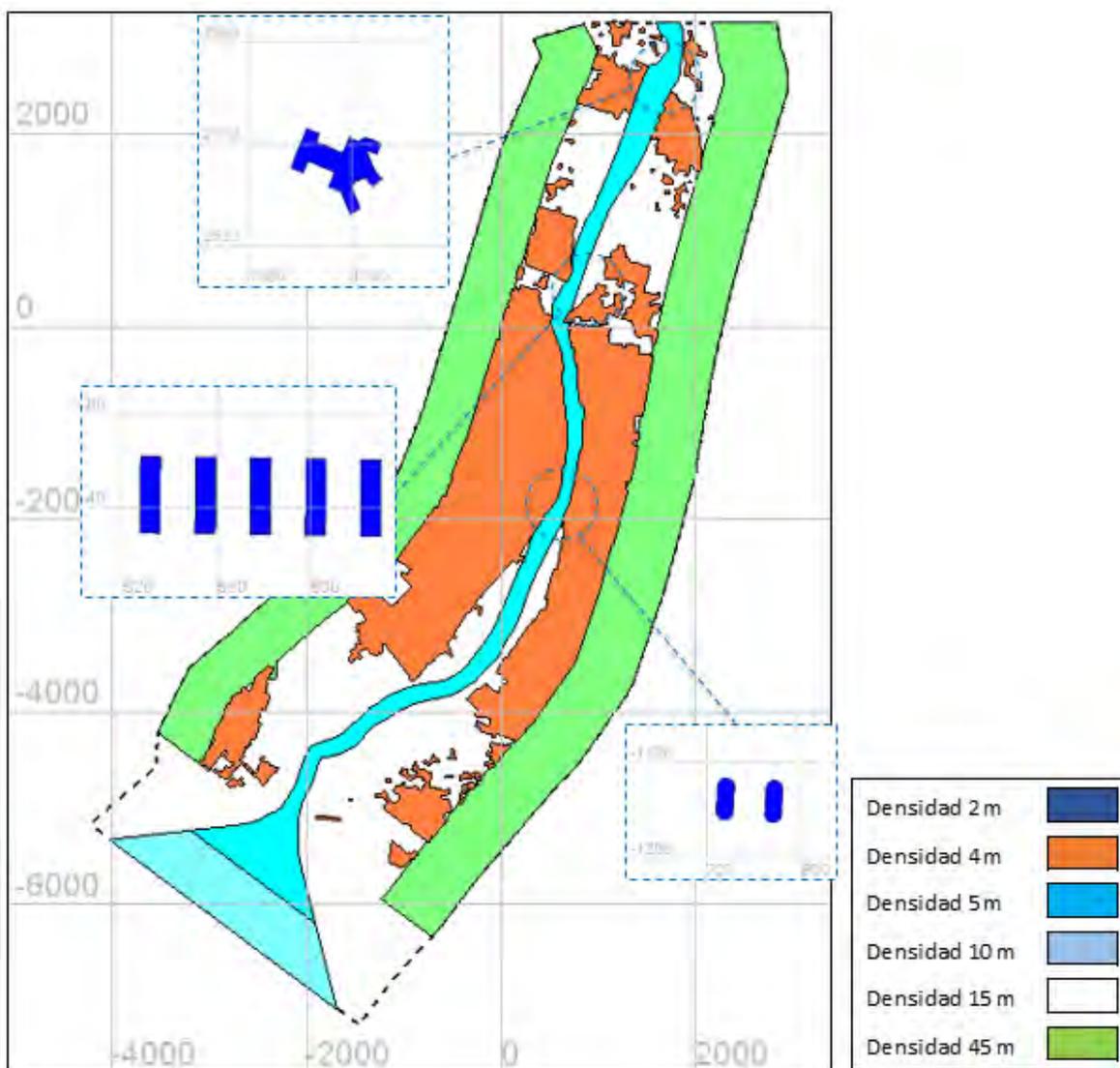
**El detalle o densidad de la malla fue definido considerando seis principales zonas que conforman el área de estudio, según se detalla a continuación. Ver figura 15.**

- Estructuras en el cauce del río, como la presa Los Ejidos y los apoyos de los puentes Cáceres y Bolognesi. Se definieron polígonos que incluyen a las estructuras antes mencionadas, a los cuales se les asignó una densidad de malla de 2 metros, con la finalidad de reflejar correctamente las estructuras.
- Zona urbana, con presencia de edificaciones, calles, avenidas y manzanas. Corresponde a las áreas con mayor presencia de polígonos en la Figura N° 9. Se definieron varios polígonos a los cuales se les asignó una densidad de malla de 4 metros con la finalidad de poder representar adecuadamente las vías y calles de menor ancho. En los modelos preliminares se identificó que, dado el tamaño del área de modelación, se debían considerar densidades de malla adecuadas para tener tiempos computacionales manejables. Por este motivo se buscó acotar las áreas con mayor densidad a las zonas con mayor presencia de información catastral detallada.

- Cauce de río, correspondiente al cauce del río Piura propiamente dicho. Se definió una sola área a la que se le asignó una densidad de malla de 5 metros. Cabe resaltar que, en la zona correspondiente a la planicie libre, ubicada aguas abajo del Puente Grau, el área de densidad de 5 metros se amplió de manera proporcional a un ancho mayor al del cauce del río Piura, con la finalidad de disminuir errores identificados en modelos preliminares y asegurar la estabilidad del modelo a partir de la zona de interés (aguas arriba del puente Grau).
- Tramo final de la planicie adicionada aguas abajo del Puente Grau. Se le asignó una densidad de malla de 10 metros con la finalidad de realizar una adecuada transición con la zona de interés el modelo (a partir del Puente Grau) y evitar elevados tiempos computacionales.
- Planicies este y oeste libres edificaciones adicionadas a la malla base. Se les asignó una densidad de malla de 45 metros para disminuir los tiempos computacionales del modelo, considerando además que la finalidad de estas áreas es permitir el flujo libre del agua fuera de la zona urbana estudiada y que no se realizarán mediciones significativas en estas zonas.
- Zona no urbanizada, con presencia de terrenos eriazos, campos de cultivo y edificaciones muy aisladas. Corresponde al área restante de la totalidad de la malla final que incluye a las planicies libres de edificaciones en los límites este y oeste del modelo, y la planicie libre, ubicada aguas abajo del Puente Grau. Se le asignó una densidad de malla de 15 metros por presentar menor detalle y requerir menos precisión al momento de desarrollar el modelo.

Figura N° 15

Detalle de la densidad de la malla



Nota: Elaboración propia

### 3.2.4 Aplicación de puntos fijos o "hardpoints"

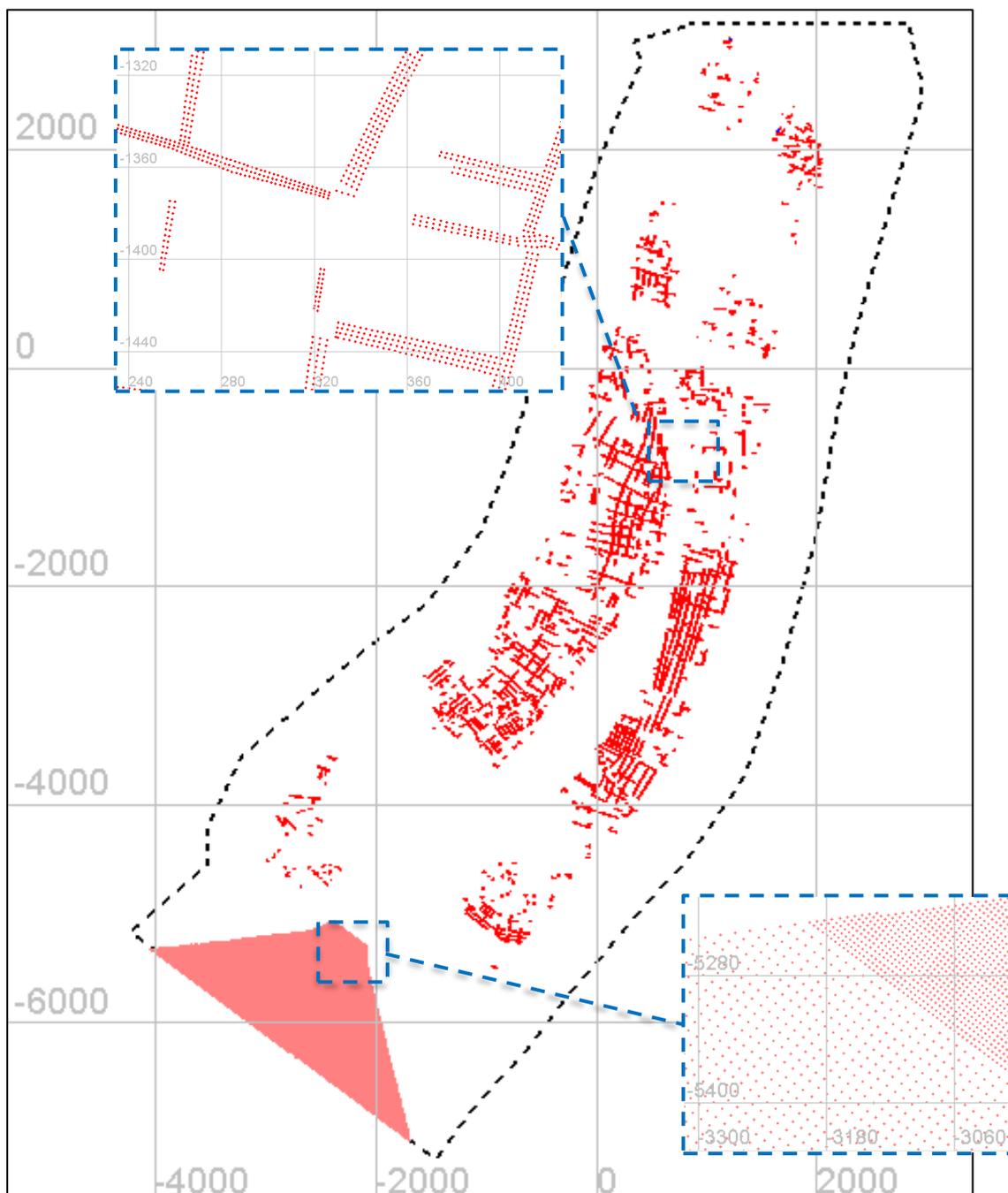
Con la finalidad de realizar posteriormente una adecuada interpolación de la malla con la información topográfica disponible, se adicionaron puntos fijos en los cuales se generan nodos de manera indistinta a la densidad de malla que se pueda haber asignado. Estos puntos fueron adicionados según el siguiente detalle:

- En zonas donde el ancho de calles y detalles catastrales es menor a 4 metros y por lo tanto no se generaban puntos de manera automática. La finalidad de estos puntos es poder contar al menos con dos nodos en cada calle de la zona urbana, para poder analizar con el adecuado detalle las velocidades y tirantes calculados.

- En la planicie adicionada aguas abajo del Puente Grau, con la finalidad de tener una malla uniforme que permita interpolar de manera adecuada las cotas generadas en el tramo de estabilización del modelo.

**Figura N° 16**

*Puntos fijos utilizados en la malla*



*Nota:* Elaboración propia

### **3.2.5 Niveles del detalle de la información catastral**

Dado que uno de los objetivos específicos del presente trabajo de investigación es el realizar un análisis de sensibilidad respecto de la simplificación de las características urbanas y asignación de coeficientes de rugosidad, resultó necesario desarrollar tres mallas en total, cuya principal diferencia consiste en la variación del detalle del catastro urbano de la ciudad de Piura. Las tres mallas fueron elaboradas considerando los criterios antes descritos, siendo la única diferencia el detalle aplicado en el procesamiento de la información catastral y la aplicación de puntos fijos para representar adecuadamente las calles con menos de tres nodos en su ancho. Cabe resaltar que el detalle de las estructuras existentes en el cauce del río es el mismo para las tres mallas generadas. La descripción de cada malla se presenta a continuación:

#### **3.2.5.1 Detalle 1**

La malla correspondiente al Detalle 1 representa el mayor detalle respecto del catastro urbano de la ciudad de Piura. En esta malla se han representado todas calles, avenidas, manzanas y demás estructuras existentes en el catastro. Ver Figura N° 17.

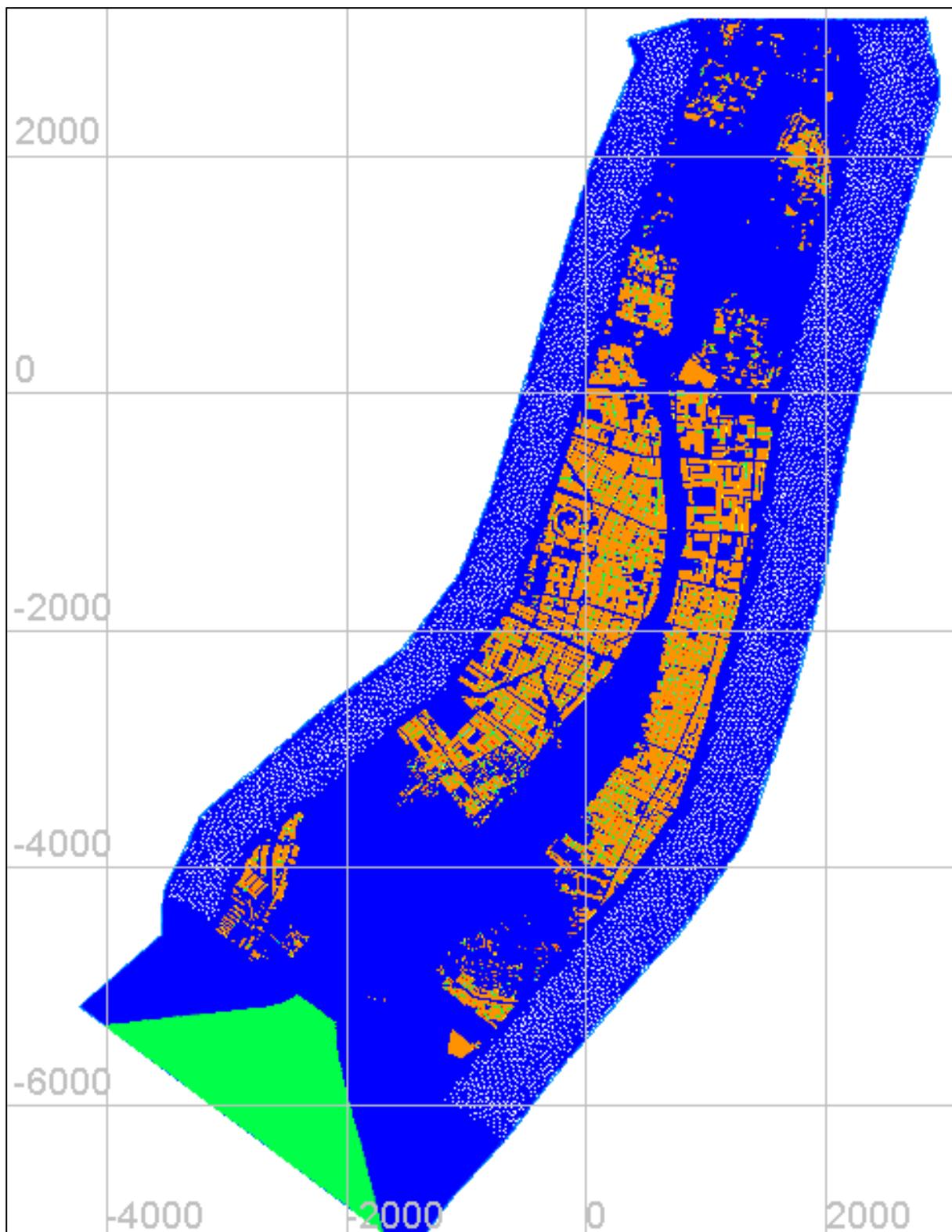
#### **3.2.5.2 Detalle 2**

La malla correspondiente al Detalle 2 representa un detalle intermedio respecto del catastro urbano de la ciudad de Piura. En esta malla se han unificado las manzanas representadas en el Detalle 1 en grupos de a 4, eliminando así cierta cantidad de calles y avenidas, priorizando la eliminación de calles de menor ancho antes que avenidas de mayor importancia. Ver Figura N° 18.

#### **3.2.5.3 Detalle 3**

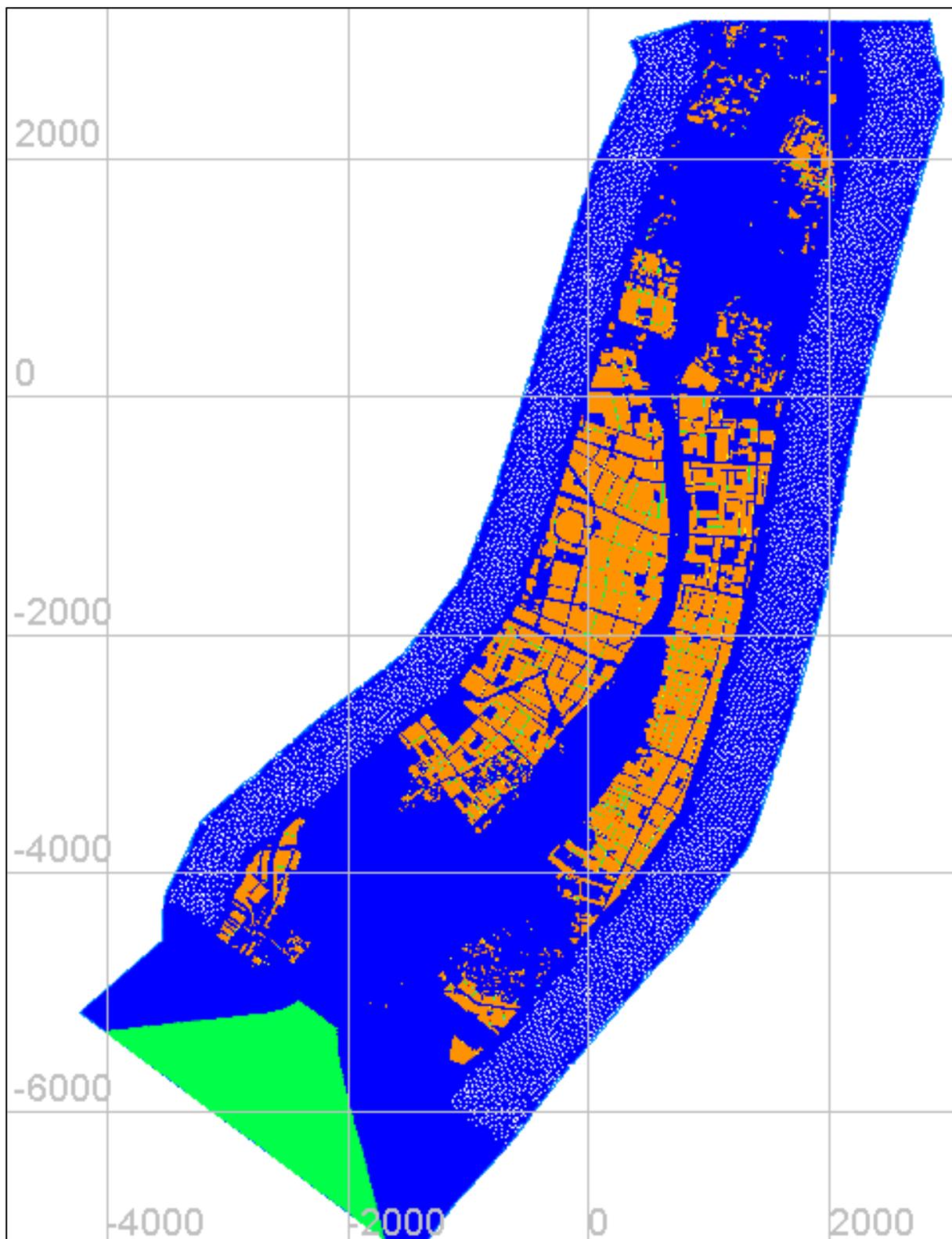
La malla correspondiente al Detalle 3 representa el menor detalle respecto del catastro urbano de la ciudad de Piura. En esta malla se han unificado las manzanas representadas en el Detalle 2 en grupos de a 4, eliminando así cierta cantidad adicional de calles y avenidas, incluyendo en la eliminación, calles o avenidas de cierta importancia. Ver Figura N° 19.

**Figura N° 17**  
*Malla Detalle 1*



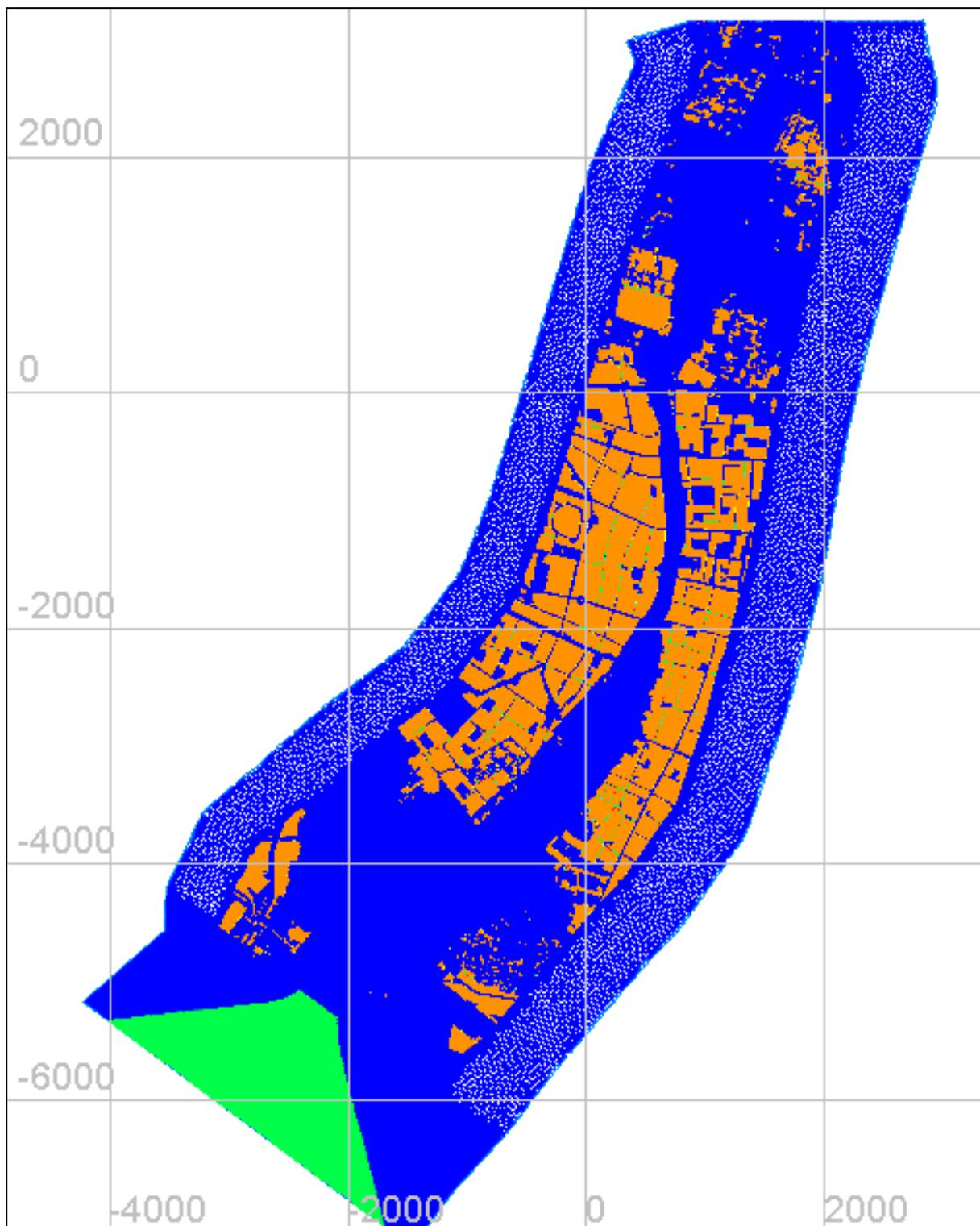
*Nota:* Elaboración propia

**Figura N° 18**  
*Malla Detalle 2*

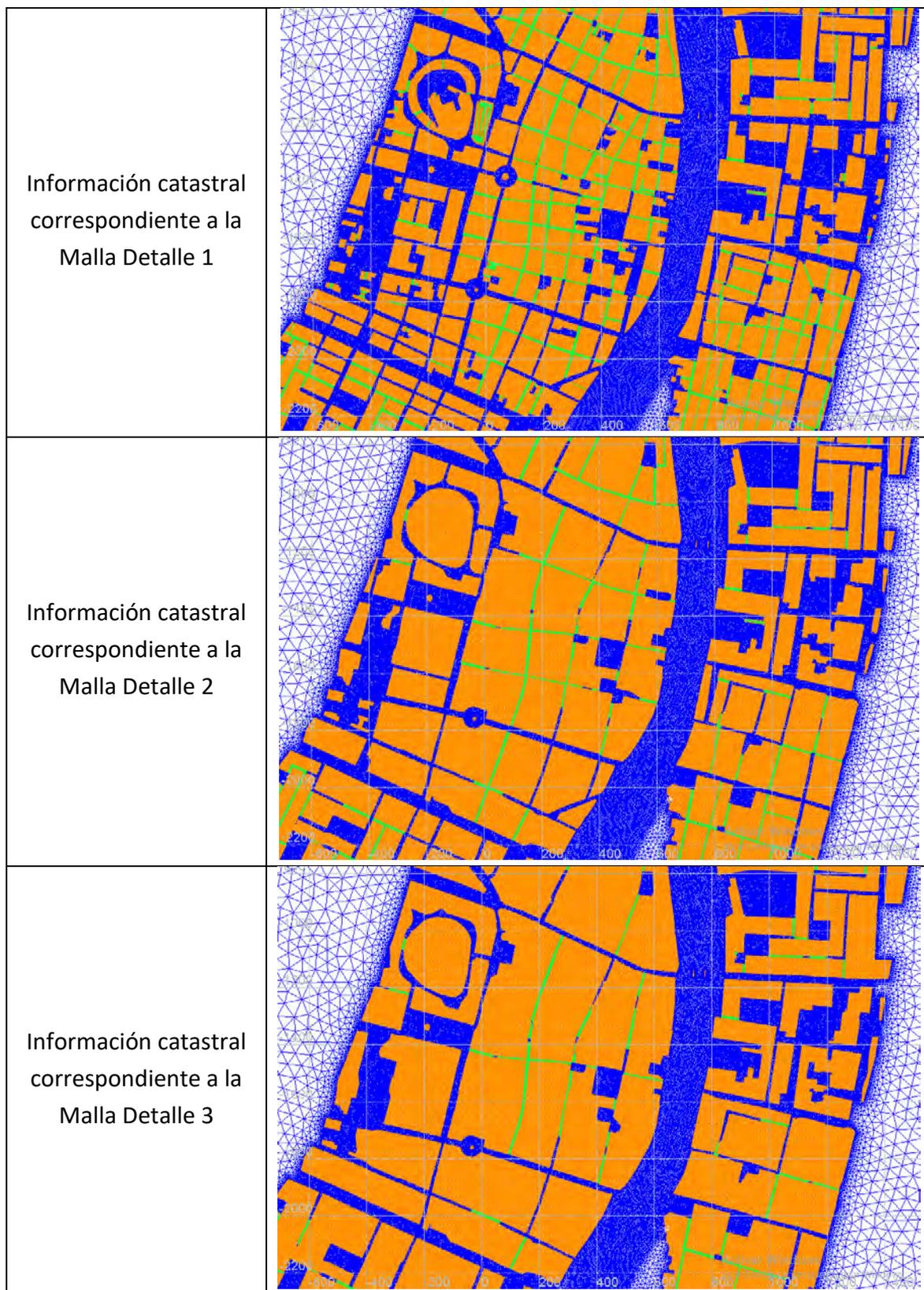


*Nota:* Elaboración propia

**Figura N° 19**  
*Malla Detalle 3*



*Nota:* Elaboración propia

**Figura N° 20***Comparación del nivel de detalle catastral**Nota:* Elaboración propia

### 3.2.6 Resultados

El análisis realizado por el programa Bluekenue respecto de las mallas desarrolladas, nos brinda los siguientes resultados:

**Tabla N° 5**

*Análisis realizado a las tres mallas desarrolladas*

<b>Malla Detalle 1</b>	<b>Malla Detalle 2</b>	<b>Malla Detalle 3</b>
NodeCount: 860772 Edge Nodes: 1487 Interior Nodes: 859285	NodeCount: 806201 Edge Nodes: 1484 Interior Nodes: 804717	NodeCount: 781542 Edge Nodes: 1484 Interior Nodes: 780058
Edge Node Connectivity: Minimum number of neighbours: 2 Maximum number of neighbours: 7 < 4 neighbours: 209 4-6 neighbours: 1277 7-8 neighbours: 1	Edge Node Connectivity: Minimum number of neighbours: 2 Maximum number of neighbours: 8 < 4 neighbours: 211 4-6 neighbours: 1270 7-8 neighbours: 3	Edge Node Connectivity: Minimum number of neighbours: 2 Maximum number of neighbours: 8 < 4 neighbours: 207 4-6 neighbours: 1274 7-8 neighbours: 3
Interior Node Connectivity: Minimum number of neighbours: 3 Maximum number of neighbours: 12 = 3 neighbours: 68 = 4 neighbours: 18558 5-7 neighbours: 821648 8-10 neighbours: 19001 11 + neighbours: 10	Interior Node Connectivity: Minimum number of neighbours: 3 Maximum number of neighbours: 11 = 3 neighbours: 54 = 4 neighbours: 16158 5-7 neighbours: 771188 8-10 neighbours: 17304 11 + neighbours: 13	Interior Node Connectivity: Minimum number of neighbours: 3 Maximum number of neighbours: 12 = 3 neighbours: 47 = 4 neighbours: 13437 5-7 neighbours: 752078 8-10 neighbours: 14484 11 + neighbours: 12
ElementCount: 1720055 Interior Elements: 1718571 Normal Edge Elements: 1481 Over constrained Elements: 3	ElementCount: 1610916 Interior Elements: 1609435 Normal Edge Elements: 1478 Over constrained Elements: 3	ElementCount: 1561598 Interior Elements: 1560117 Normal Edge Elements: 1478 Over constrained Elements: 3

*Nota:* Elaboración propia

### 3.3 Elaboración de mapa detallado de coeficientes de rugosidad

Según (Chow, 2004) los factores que ejercen mayor influencia sobre el valor del coeficiente de rugosidad están interrelacionados entre sí, por lo que se debe realizar un análisis integral de los mismos. Estos factores son los siguientes:

- Rugosidad superficial
- Vegetación
- Irregularidad del canal
- Alineamiento del canal
- Sedimentación y socavación
- Obstrucción

- Tamaño y forma del canal
- Nivel y caudal
- Cambio estacional
- Material en suspensión y carga de lecho

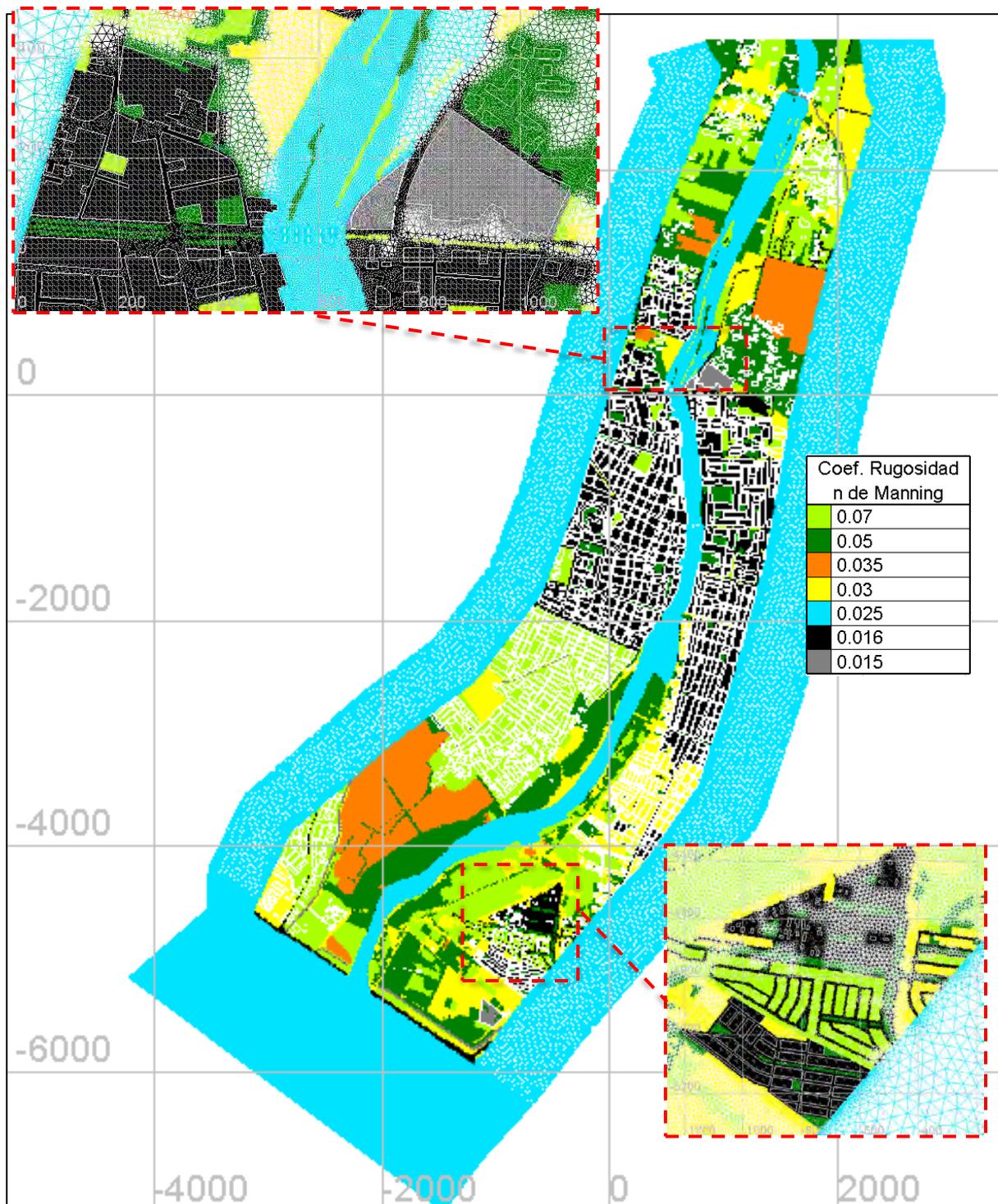
Muchos de estos factores son aplicables principalmente al canal o cauce principal, para nuestro caso, el río Piura. Sin embargo, considerando que el objetivo del presente trabajo de investigación es comparar los resultados en el área urbana inundada, se optó por utilizar los valores propuestos por el mismo Ven Te Chow en una tabla de valores comunes para la determinación del coeficiente de rugosidad, específicamente para el caso específico de planicies de inundación.

Los coeficientes de rugosidad de Manning fueron mapeados haciendo uso de la galería de imágenes satelitales disponibles en el aplicativo de Geolocalización del programa Civil 3D. Toda el área a ser modelada fue sectorizada según sus características, asignándose los siguientes coeficientes de rugosidad en función de la cobertura de cada sector, los cuales fueron definidos con base en las tablas propuestas por Ven Te Chow (2004):

- Arboles = 0.05
- Arbustos = 0.07
- Asfalto = 0.016
- Cauce = 0.025
- Concreto = 0.015
- Cultivo = 0.035
- Eriazo = 0.03

Estos son los valores iniciales propuestos para el modelo hidráulico, los cuales serán revisados, corregidos y validados durante el proceso de calibración de este. Cabe resaltar que, para las planicies libres de edificaciones en los límites este y oeste de la malla original del modelo, y para la planicie libre aguas abajo del Puente Grau; se asignó un valor inicial de 0.025, correspondiente a la rugosidad elegida para el cauce del río Piura, con la finalidad de facilitar la salida del flujo a través de éstas áreas.

Figura N° 21

*Asignación de coeficientes de rugosidad**Nota:* Elaboración propia

### 3.4 Determinación de las condiciones de frontera

Para completar el modelo numérico es necesario definir las condiciones de frontera, tanto para los límites aguas arriba y aguas abajo del modelo, y para los demás límites de la malla generada. A continuación, se detallan los criterios considerados e información utilizada para la determinación de las condiciones de frontera, las cuales han sido objeto de ajuste con la finalidad de lograr una adecuada calibración del modelo:

#### 3.4.1 Condiciones de frontera aguas arriba

Para las condiciones de frontera aguas arriba se eligió la siguiente opción: límite abierto con caudal definido (open boundary with prescribed Q). La definición del caudal se realizó con base en el hidrograma detallado en el numeral 3.4 Hidrología (ver Tabla N° 3), el cual fue registrado en el río Piura para el evento del 27 de marzo de 2017.

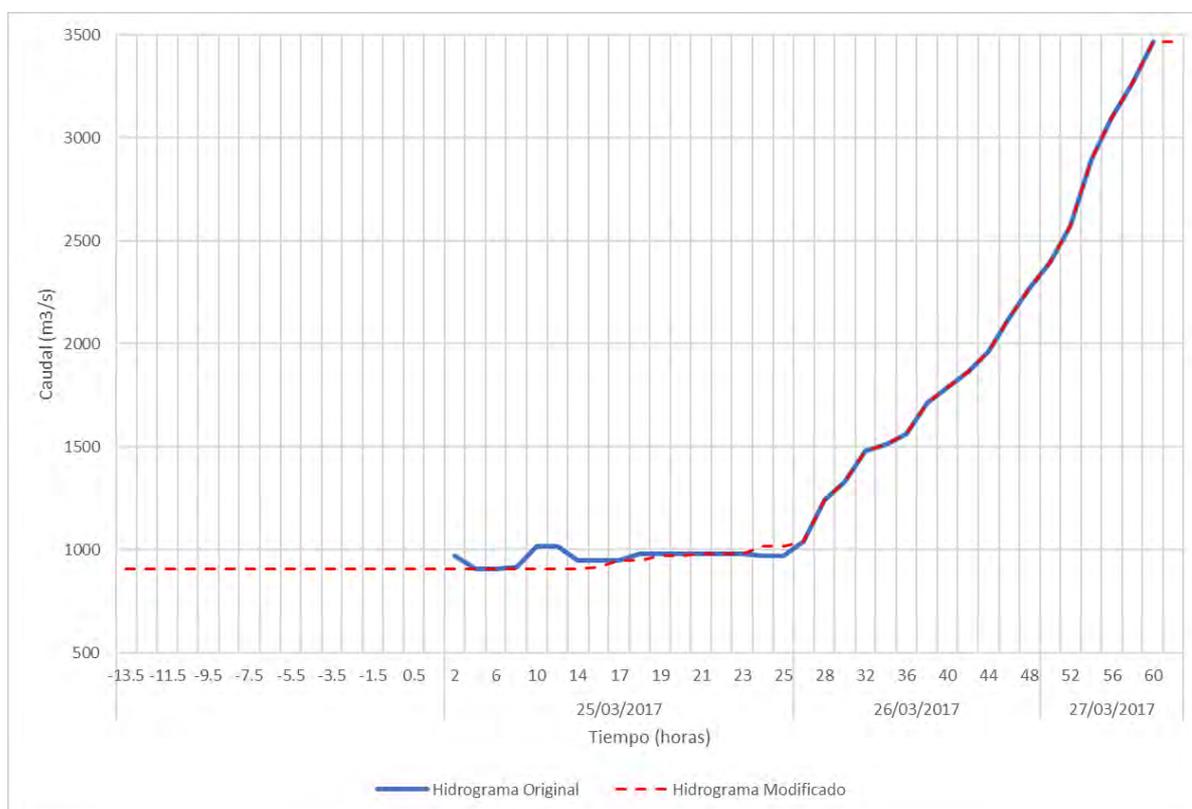
Este hidrograma se caracteriza por presentar incrementos y decrementos en los valores de caudal durante el inicio de este, hecho que puede generar inestabilidad en el modelo hidráulico, por lo que se optó por modificarlo, de manera tal que el caudal sólo incremente con el tiempo. Adicionalmente, el hidrograma original fue extendido según el siguiente detalle:

- Al inicio del hidrograma, se agregaron 13.5 horas para las cuales se consideró el caudal mínimo registrado en el hidrograma original ( $908 \text{ m}^3/\text{s}$ ).
- Al final del hidrograma, se agregó aproximadamente 01 hora adicional, manteniendo el caudal pico registrado de  $3468 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Considerando que en el presente trabajo de investigación se busca analizar los efectos del caudal pico registrado durante el evento del Niño Costero del año 2017, resulta de relevancia asegurar que el modelo hidráulico presente condiciones estables en el momento de la ocurrencia de dicho pico, por lo que finalmente se utilizó el hidrograma modificado que se detalla en la siguiente figura:

**Figura N° 22**

*Comparación entre el hidrograma registrado durante el Niño Costero 2017 y el hidrograma utilizado en el modelo hidráulico*



*Nota:* Elaboración propia

### **3.4.2 Condiciones de frontera aguas abajo**

Para las condiciones de frontera aguas abajo se eligió la siguiente opción: límite abierto con cota definida (open boundary with prescribed H). La definición de la cota de agua se realizó mediante un cálculo preliminar del caudal que podría esperarse en función de la geometría del cauce. Para ello, se obtuvo la sección topográfica del río Piura a la altura del Puente Grau y sobre ella se calculó el área hidráulica resultante para diferentes cotas de nivel de agua. Con la ayuda del programa H-Canales, haciendo uso del módulo de “Cálculo del caudal en una sección natural con rugosidad constante”, se estimaron los caudales correspondientes para cada una de las cotas de nivel de agua, para las cuales se calculó la respectiva área hidráulica. El cálculo fue realizado considerando dos coeficientes de rugosidad: 0.03 y 0.035; optándose finalmente por el valor de 0.03 por brindar resultados más cercanos a los observados. En la siguiente tabla se muestran los resultados de los cálculos preliminares realizados:

Considerando que la malla del modelo hidráulico fue extendida hacia aguas abajo, utilizando para ello la pendiente media de todo el tramo en estudio, las cotas para las cuales se realizó el cálculo preliminar del caudal también fueron corregidas con base en la pendiente media. De esta manera, se restó un valor de 0.787808641 m a las cotas iniciales. En la siguiente tabla resumen se muestran los valores de caudales calculados preliminarmente, cotas originales y cotas corregidas:

**Tabla N° 6***Cálculos preliminares cota vs caudal*

Caudal m <sup>3</sup> /s	Cota m.s.n.m.	Cota corregida m.s.n.m.
6678.65	29	28.21219136
3944.58	28	27.21219136
1835.43	27	26.21219136
623.734	26	25.21219136
256.881	25	24.21219136
149.228	24	23.21219136
84.3607	23	22.21219136
38.401	22	21.21219136
10.9127	21	20.21219136
0.3564	20	19.21219136

*Nota:* Elaboración propia

Finalmente, interpolando los valores obtenidos en la curva caudal vs cota corregida, se calcularon las cotas correspondientes a los caudales registrados en el hidrograma del evento El Niño Costero 2017, las que fueron utilizadas inicialmente como condición de frontera en el modelo hidráulico:

**Tabla N° 7***Caudales y cotas utilizados como condición de frontera aguas abajo*

Caudal m <sup>3</sup> /s	Cota m.s.n.m.	Diferencia de elevación m	Cota para planicie aguas abajo m.s.n.m.
971	26.29	0.79	25.50
908	26.23	0.79	25.45
908	26.23	0.79	25.45
916	26.24	0.79	25.45
1018	26.33	0.79	25.54
1018	26.33	0.79	25.54
948	26.27	0.79	25.48
948	26.27	0.79	25.48
979	26.29	0.79	25.51
979	26.29	0.79	25.51
979	26.29	0.79	25.51

Caudal m <sup>3</sup> /s	Cota m.s.n.m.	Diferencia de elevación m	Cota para planicie aguas abajo m.s.n.m.
971	26.29	0.79	25.50
1042	26.35	0.79	25.56
1242	26.51	0.79	25.72
1328	26.58	0.79	25.79
1479	26.71	0.79	25.92
1514	26.73	0.79	25.95
1565	26.78	0.79	25.99
1714	26.90	0.79	26.11
1789	26.96	0.79	26.17
1868	27.02	0.79	26.23
1962	27.06	0.79	26.27
2126	27.14	0.79	26.35
2270	27.21	0.79	26.42
2396	27.27	0.79	26.48
2574	27.35	0.79	26.56
2895	27.50	0.79	26.71
3095	27.60	0.79	26.81
3264	27.68	0.79	26.89
3468	27.77	0.79	26.99
3944.58	28.00	0.79	27.21

Nota: Elaboración propia

### **3.4.3 Condiciones de frontera para el resto de la malla**

Las condiciones de frontera para el resto de la malla fueron consideradas como límites cerrados (close boundary – Wall), dado que bajo dicha configuración no se registraron inconsistencias al momento de correr el modelo hidráulico. Dado que la malla del modelo fue extendida para los límites este y oeste, se logrará representar de manera adecuada el flujo del agua fuera de la zona urbana detallada, a pesar de contar con límites cerrados en estas zonas.

### **3.5 Calibración del modelo hidráulico**

La calibración del modelo hidráulico fue realizada con base en dos parámetros principales: las condiciones de frontera aguas abajo y el coeficiente de rugosidad del cauce principal. Las condiciones iniciales del modelo, con base en las cuales se inició el proceso de calibración consistieron en las explicadas líneas arriba en los numerales 3.3 y 3.4.2.

La finalidad de la calibración del modelo hidráulico es obtener resultados similares a las condiciones observadas durante la ocurrencia del fenómeno del Niño Costero 2017, para lo cual se cuenta con información de los niveles de agua máximos alcanzados en

diferentes puentes ubicados a lo largo del tramo urbano del río Piura. Ver numeral 2.5 y Tabla N° 4.

Cabe resaltar que la calibración del modelo se realizará comparando los niveles de agua observados y modelados, para los puentes Cáceres, Sánchez Cerro, Bolognesi y Grau, comparando de manera sólo referencial los valores en la presa Los Ejidos, ya que esta estructura se considera el límite aguas arriba del modelo y se localiza aguas arriba del tramo urbano, es decir, fuera del área de interés para el presente estudio.

Los resultados iniciales de la primera corrida del modelo hidráulico brindaron los siguientes resultados:

**Tabla N° 8**

*Resultados iniciales del modelo hidráulico*

Sección	Distancia al outlet (m)	Cota observada (m.s.n.m.)	Cota Modelada (m.s.n.m.)	Diferencia (m)	% de error
Ejidos	9480	33.55	36.7000	3.15	9.389
Cáceres	6600	32.3	33.1800	0.88	2.724
Sánchez Cerro	5390	30.74	31.1200	0.38	1.236
Bolognesi	4560	29.7	29.1400	-0.56	-1.886
Grau	0	28.21	26.2800	-1.93	-6.842

*Nota:* Elaboración propia

Como se puede observar, los valores de cota modelada difieren de los valores de cota observada, presentándose la mayor diferencia relevante en el puente Grau con aproximadamente 2 m de diferencia. Se observa también que las cotas modeladas son mayores que las observadas desde el puente Sánchez Cerro hacia aguas arriba, mientras que hacia aguas abajo, las cotas modeladas son menores que las observadas. Con base en estos valores iniciales se procedió con el proceso de calibración, según se detalla a continuación:

### **3.5.1 Iteración 1: Primer ajuste en las condiciones de frontera aguas abajo**

Luego de evidenciar que los niveles de agua modelados para los puentes Bolognesi y principalmente Grau (parte final del modelo, ubicada aguas abajo), resultan inferiores a los observados, se realizó una primera iteración modificando las cotas correspondientes a los caudales calculados preliminarmente, según se detalla en la siguiente tabla:

**Tabla N° 9***Cotas modificadas en condiciones de frontera aguas abajo para la iteración 1*

Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Condiciones iniciales		Iteración 1	
	Diferencia de elevación (m)	Cota para planicie aguas abajo (m.s.n.m.)	Diferencia de elevación (m)	Cota para planicie aguas abajo (m.s.n.m.)
971.000	0.79	25.45	0.3	25.99
908.000	0.79	25.45	0.3	25.94
908.000	0.79	25.45	0.3	25.94
916.000	0.79	25.45	0.3	25.94
1018.000	0.79	25.54	0.3	26.03
1018.000	0.79	25.54	0.3	26.03
948.000	0.79	25.48	0.3	25.97
948.000	0.79	25.48	0.3	25.97
979.000	0.79	25.51	0.3	25.99
979.000	0.79	25.51	0.3	25.99
979.000	0.79	25.51	0.3	25.99
971.000	0.79	25.50	0.3	25.99
1042.000	0.79	25.56	0.3	26.05
1242.000	0.79	25.72	0.3	26.21
1328.000	0.79	25.79	0.3	26.28
1479.000	0.79	25.92	0.3	26.41
1514.000	0.79	25.95	0.3	26.44
1565.000	0.79	25.999	0.3	26.48
1714.000	0.79	26.11	0.3	26.60
1789.000	0.79	26.17	0.3	26.66
1868.000	0.79	26.23	0.3	26.72
1962.000	0.79	26.27	0.3	26.76
2126.000	0.79	26.35	0.3	26.84
2270.000	0.79	26.42	0.3	26.91
2396.000	0.79	26.48	0.3	26.97
2574.000	0.79	26.56	0.3	27.05
2895.000	0.79	26.72	0.3	27.20
3095.000	0.79	26.81	0.3	27.30
3264.000	0.79	26.89	0.3	27.38
3468.000	0.79	26.99	0.3	27.47
3944.579	0.79	27.21	0.3	27.70

*Nota:* Elaboración propia

Con la modificación de las condiciones de frontera aguas abajo se logró mejorar el ajuste entre las cotas de agua modeladas y las cotas de agua observadas durante El Niño Costero 2017 para los puentes Bolognesi y Grau, sin embargo, no se logró un ajuste

adecuado. Los resultados de esta primera iteración realizada con la modificación de las condiciones de frontera aguas abajo se detallada en la siguiente tabla:

**Tabla N° 10**

*Resultados del modelo hidráulico – Iteración 1*

Sección	Distancia al outlet (m)	Cota observada (m.s.n.m.)	Cota Modelada (m.s.n.m.)	Diferencia (m)	% de error
Ejidos	9480	33.55	35.28	1.73	5.15
Cáceres	6600	32.3	33.95	1.65	5.09
Sánchez Cerro	5390	30.74	32.22	1.48	4.83
Bolognesi	4560	29.7	29.70	0.00	0.00
Grau	0	28.21	27.35	-0.86	-3.05

*Nota:* Elaboración propia

### **3.5.2 Iteración 2: Primera modificación a los coeficientes de rugosidad**

Luego de realizada la primera iteración, se procedió a modificar el coeficiente de rugosidad asignado al cauce del río, asignando mayores valores al tramo ubicado aguas abajo. De esta manera, se asignó un valor de 0.05 al tramo adicionado aguas abajo del puente Grau, se mantuvo el valor de 0.025 desde aguas arriba del puente Grau hasta aguas abajo del puente Bolognesi, y se disminuyó el valor hasta 0.02 desde aguas arriba del puente Bolognesi hasta el inicio del modelo. El detalle se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla N° 11**

*Detalle de la primera modificación a los coeficientes de rugosidad – Cauce del río Piura*

Ubicación		Coefficiente de rugosidad
Aguas arriba	Los Ejidos	0.020
Aguas abajo		0.020
Aguas arriba	Puente Cáceres	0.020
Aguas abajo		0.020
Aguas arriba	Puente Sánchez Cerro	0.020
Aguas abajo		0.020
Aguas arriba	Puente Bolognesi	0.020
Aguas abajo		0.025
Tramo Intermedio		0.250
Aguas arriba	Puente Grau	0.025
Aguas abajo		0.050
Aguas abajo		0.050

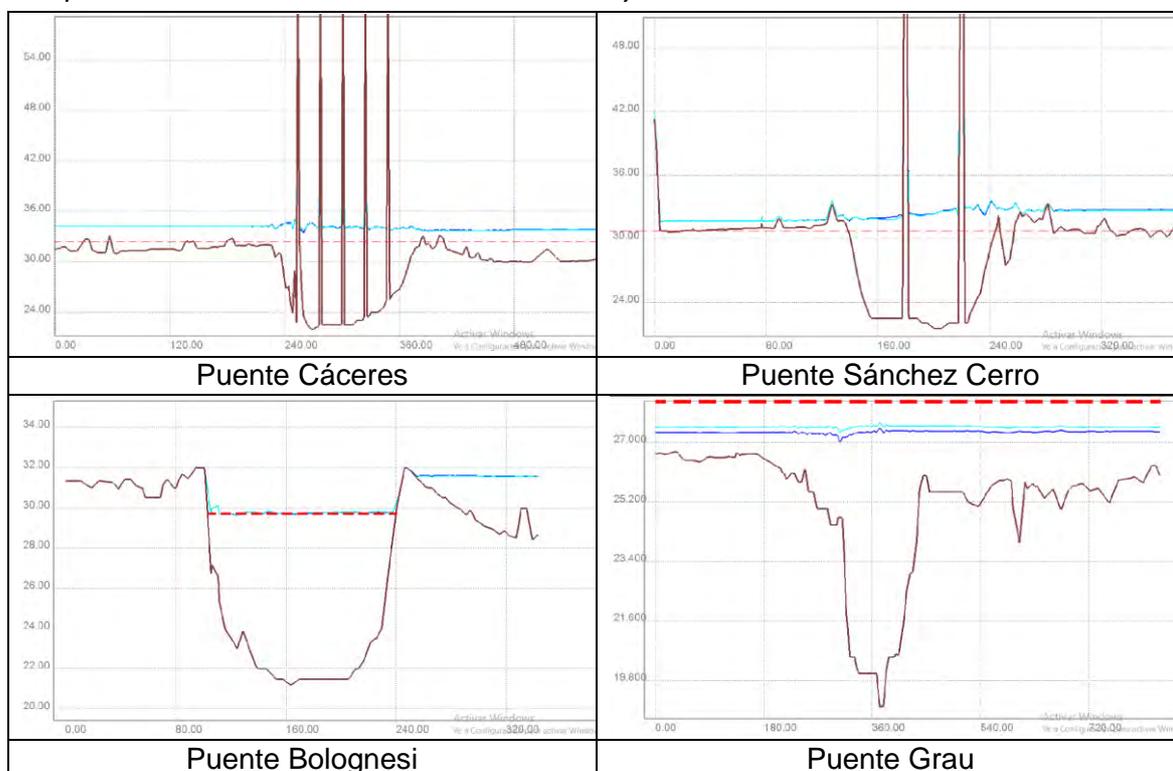
*Nota:* Elaboración propia

La variación de los niveles de agua en los puntos de calibración no fue significativa luego de la modificación de los coeficientes de rugosidad del cauce, según se puede apreciar en la siguiente figura, en la cual se representa de color azul los resultados de la

iteración 1, de color celeste los resultados de la iteración 2 y como una línea roja segmentada la cota observada durante el evento de El Niño Costero 2017:

**Figura N° 23**

*Comparación entre resultados de la iteración 1 y la iteración 2*



*Nota:* Elaboración propia

### 3.5.3 Iteración 3 y 4: Nuevo ajuste a las condiciones de frontera aguas abajo

Dado que la modificación a los coeficientes de rugosidad del cauce no tuvo como consecuencia variaciones significativas en los resultados, se procedió a realizar una segunda modificación a las condiciones de frontera aguas abajo. La curva cota vs caudal asignada a la salida del modelo fue modificada dos veces según se detalla en la siguiente tabla:

**Tabla N° 12**

*Cotas modificadas en las condiciones de frontera aguas abajo para la iteración 3 e iteración 4*

Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Iteración 3		Iteración 4	
	Diferencia de elevación (m)	Cota para planicie aguas abajo (m.s.n.m.)	Diferencia de elevación (m)	Cota para planicie aguas abajo (m.s.n.m.)
971.00	0.45	26.78	0.70	26.98
908.00	0.45	26.73	0.70	26.93
908.00	0.45	26.73	0.70	26.93
916.00	0.45	26.74	0.70	26.94

Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Iteración 3		Iteración 4	
	Diferencia de elevación (m)	Cota para planicie aguas abajo (m.s.n.m.)	Diferencia de elevación (m)	Cota para planicie aguas abajo (m.s.n.m.)
1018.00	0.45	26.82	0.70	27.02
1018.00	0.45	26.82	0.70	27.02
948.00	0.45	26.77	0.70	26.97
948.00	0.45	26.77	0.70	26.97
979.00	0.45	26.79	0.70	26.99
979.00	0.45	26.79	0.70	26.99
979.00	0.45	26.79	0.70	26.99
971.00	0.45	26.78	0.70	26.98
1042.00	0.45	26.84	0.70	27.04
1242.00	0.45	27.01	0.70	27.21
1328.00	0.45	27.08	0.70	27.28
1479.00	0.45	27.20	0.70	27.40
1514.00	0.45	27.23	0.70	27.43
1565.0	0.45	27.27	0.70	27.47
1714.00	0.45	27.40	0.70	27.60
1789.00	0.45	27.46	0.70	27.66
1868.00	0.45	27.51	0.70	27.71
1962.00	0.45	27.56	0.70	27.76
2126.00	0.45	27.64	0.70	27.84
2270.00	0.45	27.70	0.70	27.90
2396.00	0.45	27.76	0.70	27.96
2574.00	0.45	27.85	0.70	28.05
2895.00	0.45	28.00	0.70	28.20
3095.00	0.45	28.10	0.70	28.30
3264.00	0.45	28.18	0.70	28.38
3468.00	0.45	28.27	0.70	28.47
3944.58	0.45	28.50	0.70	28.70

Nota: Elaboración propia

Con la modificación de las condiciones de frontera aguas abajo se logró ajustar las cotas de agua modeladas y las cotas de agua observadas durante el Niño Costero 2017 para los puentes Bolognesi y Grau, sin embargo, no se logró un ajuste adecuado para los puentes ubicados aguas arriba en el modelo.

### Tabla N° 13

Resultados del modelo hidráulico – Iteración 3

Sección	Distancia al outlet (m)	Cota observada (m.s.n.m.)	Cota Modelada (m.s.n.m.)	Diferencia (m)	% de error
Ejidos	9480	33.55	35.28	1.73	5.15
Cáceres	6600	32.3	33.95	1.65	5.09
Sánchez Cerro	5390	30.74	32.22	1.48	4.82

Sección	Distancia al outlet (m)	Cota observada (m.s.n.m.)	Cota Modelada (m.s.n.m.)	Diferencia (m)	% de error
Bolognesi	4560	29.7	29.82	0.12	0.39
Grau	0	28.21	28.07	-0.14	-0.49

Nota: Elaboración propia

**Tabla N° 14**

*Resultados del modelo hidráulico – Iteración 4*

Sección	Distancia al outlet (m)	Cota observada (m.s.n.m.)	Cota Modelada (m.s.n.m.)	Diferencia (m)	% de error
Ejidos	9480	33.55	35.28	1.73	5.15
Cáceres	6600	32.3	33.95	1.65	5.09
Sánchez Cerro	5390	30.74	32.22	1.48	4.82
Bolognesi	4560	29.7	29.83	0.13	0.45
Grau	0	28.21	28.21	0.00	0.00

Nota: Elaboración propia

### **3.5.4 Iteración 5: Segunda modificación a los coeficientes de rugosidad**

Considerando que las condiciones de frontera aguas abajo fueron modificadas de manera que las cotas observadas en los puentes Grau y Bolognesi resulten similares a las cotas modeladas, se optó por no modificar más este parámetro. Es así como se procede a realizar una segunda modificación a los coeficientes de rugosidad, pero no sólo a los asignados al cauce del río Piura, sino a los asignados a la totalidad del modelo. De esta manera se optó por afectar los coeficientes de rugosidad por un factor de 0.8 teniéndose así los siguientes valores modificados:

**Tabla N° 15**

*Modificación de los coeficientes de rugosidad para la iteración 5*

Detalle	Coficiente de rugosidad original	Coficiente de rugosidad modificado
Arboles	0.05	0.04
Arbustos	0.07	0.056
Asfalto	0.016	0.0128
Cauce	0.05	0.05
Cauce	0.025	0.025
Cauce	0.02	0.016
Concreto	0.015	0.012
Cultivo	0.035	0.028
Eriazo	0.03	0.024

Nota: Elaboración propia

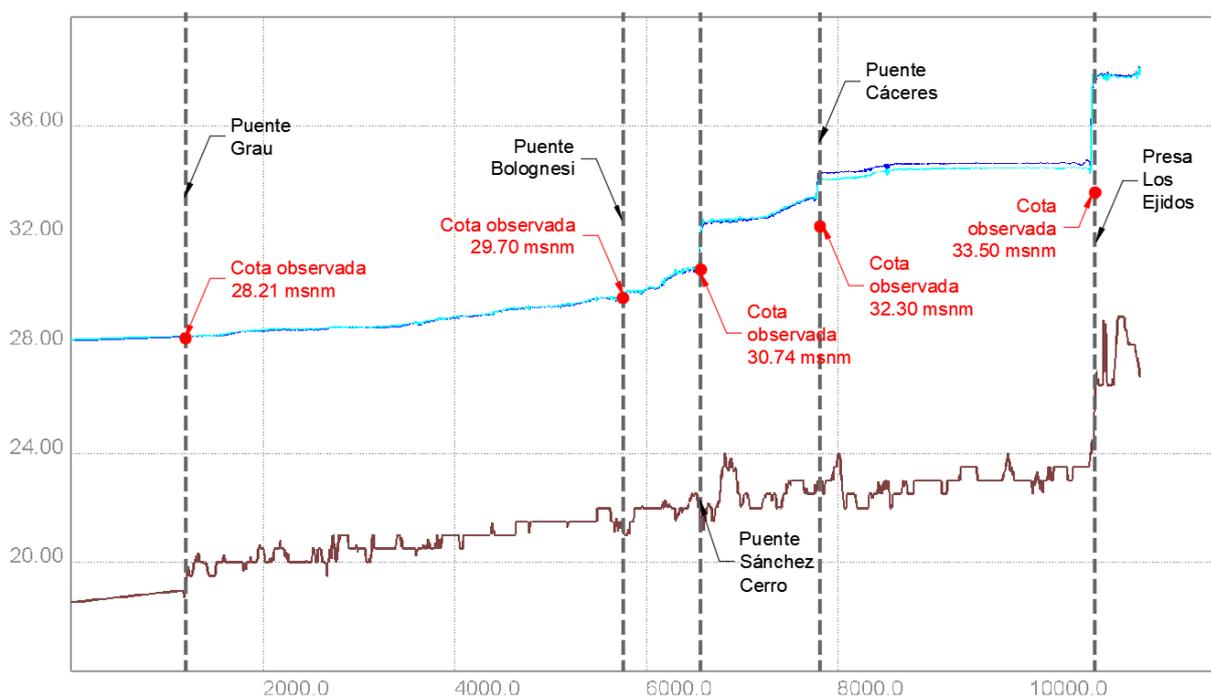
Con la segunda modificación a los coeficientes de rugosidad se mantuvieron las cotas de agua modeladas para los puentes Bolognesi y Grau, y se mejoró el ajuste para los puentes Sánchez Cerro y Cáceres:

**Tabla N° 16***Resultados del modelo hidráulico – Iteración 5*

Sección	Distancia al outlet (m)	Cota observada (m.s.n.m.)	Cota Modelada (m.s.n.m.)	Diferencia (m)	% de error
Ejidos	9480	33.55	35.28	1.73	5.15
Cáceres	6600	32.3	33.55	1.25	3.86
Sánchez Cerro	5390	30.74	31.01	0.27	0.88
Bolognesi	4560	29.7	29.77	0.07	0.24
Grau	0	28.21	28.21	0.00	0.00

Nota: Elaboración propia

En la siguiente figura se observa el perfil hidráulico del río Piura para la iteración 5 en color celeste, mientras que en color azul se muestran los resultados de la iteración anterior:

**Figura N° 24***Perfil del modelo hidráulico del río Piura – Iteración 5*

Nota: Elaboración propia

### 3.5.5 Iteración 6: Modificación en el paso de tiempo computacional

Seguidamente, se procedió a realizar un ajuste en el parámetro correspondiente al tiempo computacional para la corrida del modelo. Las corridas previas fueron realizadas considerando un tiempo computacional de 0.1 segundos. Considerando que las cotas modeladas son muy cercanas a las cotas observadas, se procedió con modificar el tiempo

computacional a 0.05 segundos, con la finalidad de realizar un ajuste final a los resultados del modelo. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla N° 17**

*Resultados del modelo hidráulico – Iteración 6*

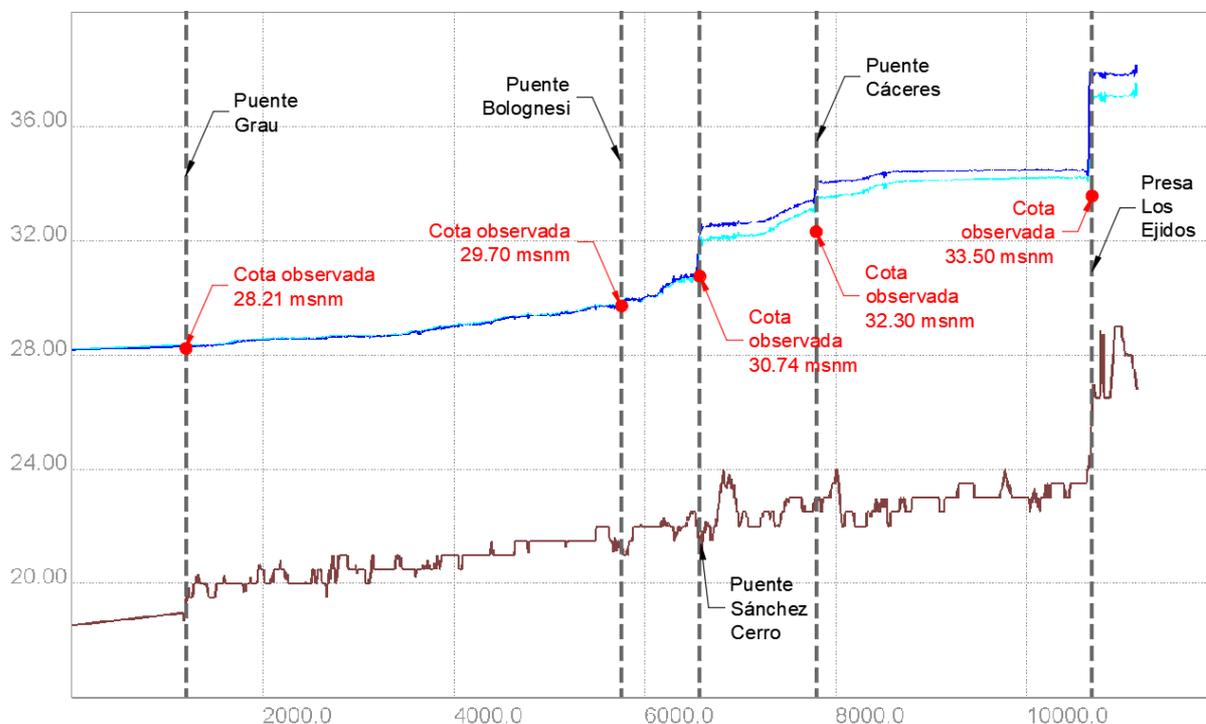
Sección	Distancia al outlet (m)	Cota observada (m.s.n.m.)	Cota Modelada (m.s.n.m.)	Diferencia (m)	% de error
Ejidos	9480	33.55	34.52	0.97	2.88
Cáceres	6600	32.3	33.04	0.74	2.29
Sánchez Cerro	5390	30.74	30.88	0.14	0.46
Bolognesi	4560	29.7	29.77	0.07	0.24
Grau	0	28.21	28.21	0.00	-0.01

*Nota:* Elaboración propia

Se puede observar que la influencia del cambio del tiempo computacional se vio reflejada a partir del puente Sánchez Cerro (línea de color celeste), dado que las cotas modeladas de los puentes Grau y Bolognesi se encuentran bajo la influencia, principalmente, de las condiciones de frontera aguas abajo. Al verificar los porcentajes de error obtenidos en cada uno de los puntos de calibración, podemos observar que éstos se encuentran por debajo del 3%.

**Figura N° 25**

*Perfil del modelo hidráulico del río Piura – Iteración 6*



*Nota:* Elaboración propia

### 3.5.6 Iteración 7: Corrección en la malla del modelo

Finalmente, dado que la cota modelada para el puente Cáceres presenta un porcentaje de error mayor al 2%, se procedió a revisar las cotas de los nodos de la malla para el tramo entre dicho puente y el puente Sánchez Cerro. Luego de dicha revisión, las cotas de algunos nodos fueron corregidas, dado que la interpolación realizada calculó cotas muy elevadas para dichos nodos. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla N° 18**

*Resultados del modelo hidráulico – Iteración 7*

Sección	Distancia al outlet (m)	Cota observada (m.s.n.m.)	Cota Modelada (m.s.n.m.)	Diferencia (m)	% de error
Los Ejidos	9480	33.55	34.45	0.90	2.68
Cáceres	6600	32.3	32.78	0.48	1.49
Sánchez Cerro	5390	30.74	30.88	0.14	0.46
Bolognesi	4560	29.7	29.77	0.07	0.24
Grau	0	28.21	28.21	0.00	-0.01

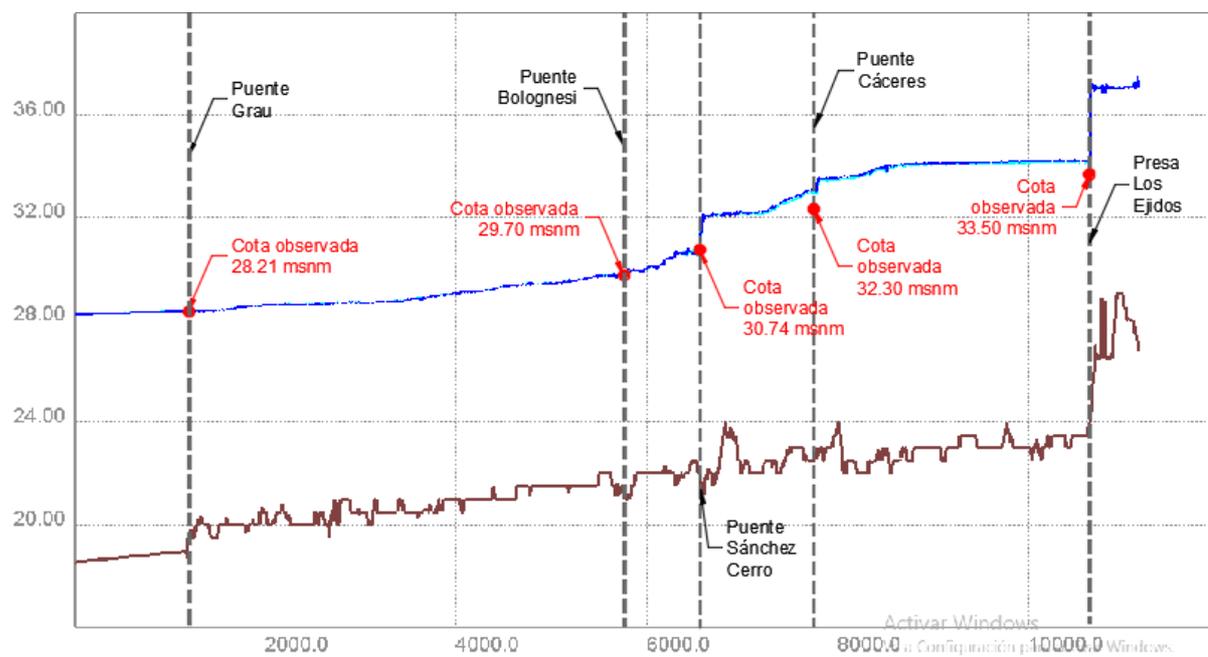
*Nota:* Elaboración propia

Se puede observar que la corrección de la malla en el tramo en mención se vio reflejada principalmente en el puente Cáceres, teniéndose sólo una diferencia de 0.48 metros entre la cota modelada y la cota observada. Al verificar los porcentajes de error obtenidos en cada uno de los puntos de calibración para el tramo de interés (entre los puentes Cáceres y Grau), podemos observar que éstos se encuentran por debajo del 2%; por lo tanto, las cotas obtenidas luego de realizada la iteración 7 se consideran representativas de lo ocurrido durante el Fenómeno de El Niño Costero 2017.

En la siguiente figura se puede observar el perfil hidráulico del río Piura, en el cual se comparan las iteraciones 6 y 7 (línea azul y celeste respectivamente) con las cotas observadas durante el fenómeno de El Niño Costero 2017:

Figura N° 26

Perfil del modelo hidráulico del río Piura – Iteración 7



Nota: Elaboración propia

## Capítulo 4

### Estudio paramétrico de la resolución de la infraestructura urbana y asignación de coeficientes de rugosidad

Una vez calibrado el modelo hidráulico haciendo uso de la malla correspondiente al Detalle 1 (ver numeral 3.2.5.1), se procedió a realizar corridas adicionales usando las mallas correspondientes al Detalle 2 y Detalle 3 (ver numeral 3.2.5.2 y numeral 3.2.5.3); con la finalidad de verificar la sensibilidad de los resultados a la variación del detalle catastral considerado en cada malla (ver numeral 3.2.5). A continuación, se presentan los resultados obtenidos con el Detalle 1, Detalle 2 y Detalle 3, los cuales fueron analizados de la siguiente manera:

- Se analizó el perfil hidráulico del río Piura, considerando los parámetros de tirante, velocidad y caudal específico.
- Se analizaron las secciones transversales correspondientes a los puentes Cáceres, Sánchez Cerro, Bolognesi y Grau; considerando los parámetros de tirante, velocidad y caudal específico.
- Se comparó el área inundada, identificando zonas específicas en las cuales se detectó variación entre los tres niveles de detalle. Así mismo se analizó la magnitud de toda el área inundada.
- Se analizaron diferentes secciones en el área inundada, considerando los parámetros de tirante, velocidad y caudal específico.
- Se compararon los tiempos computacionales que fueron requeridos para culminar los modelos cada uno de los niveles de detalle.

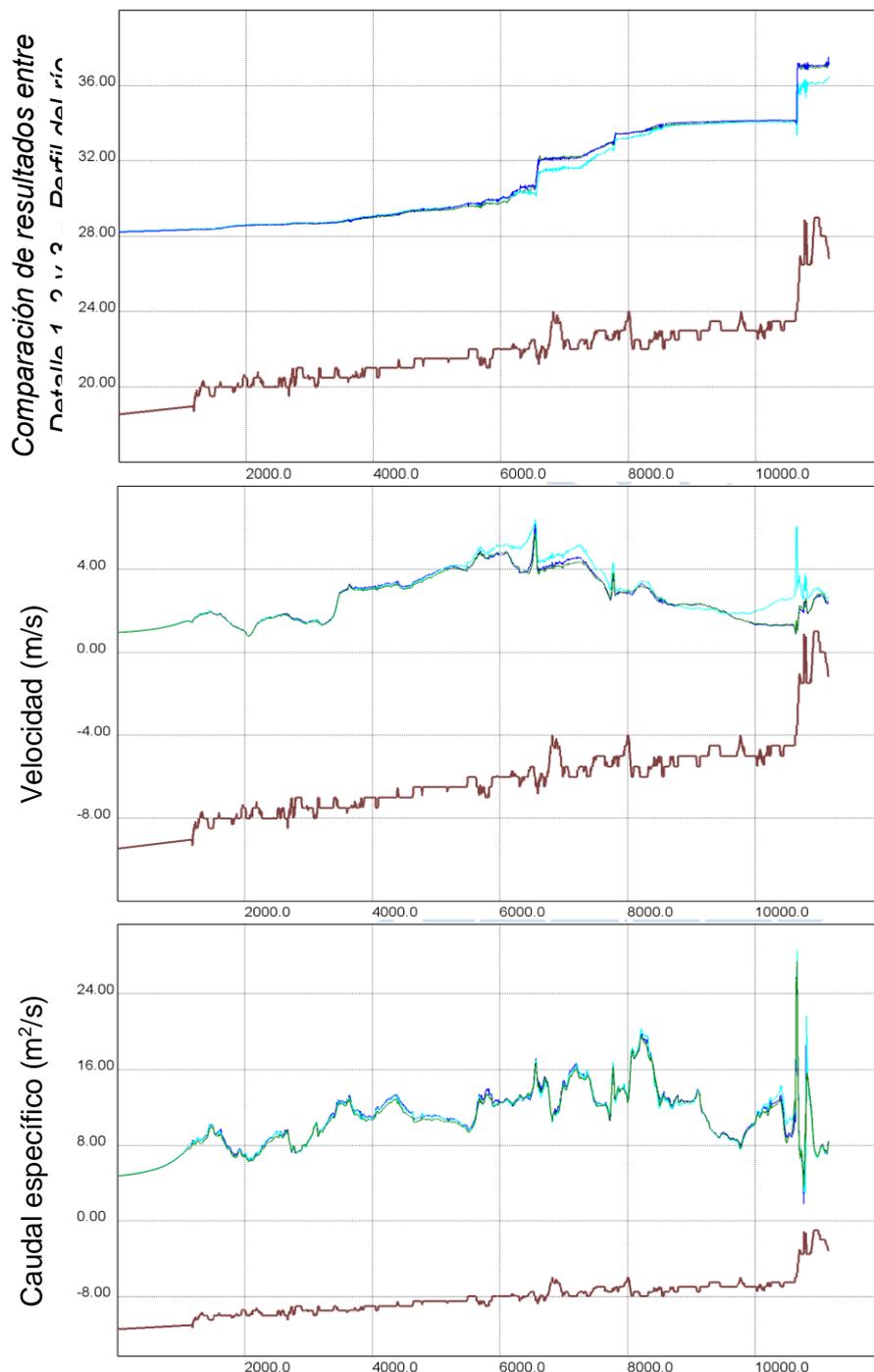
Cabe resaltar que, en adelante se deberá considerar el siguiente código de colores para la correcta lectura de las gráficas presentadas:

- Marrón: Cauce del río
- Azul: Resultados correspondientes al Detalle 1
- Celeste: Resultados correspondientes al Detalle 2
- Verde: Resultados correspondientes al Detalle 3

#### 4.1 Perfil hidráulico del río Piura

En el perfil del río Piura se evidencia que las mayores diferencias ocurren en el tramo comprendido entre el puente Bolognesi y el puente Cáceres. En la siguiente figura se muestran los resultados de los principales parámetros hidráulicos:

Figura N° 27



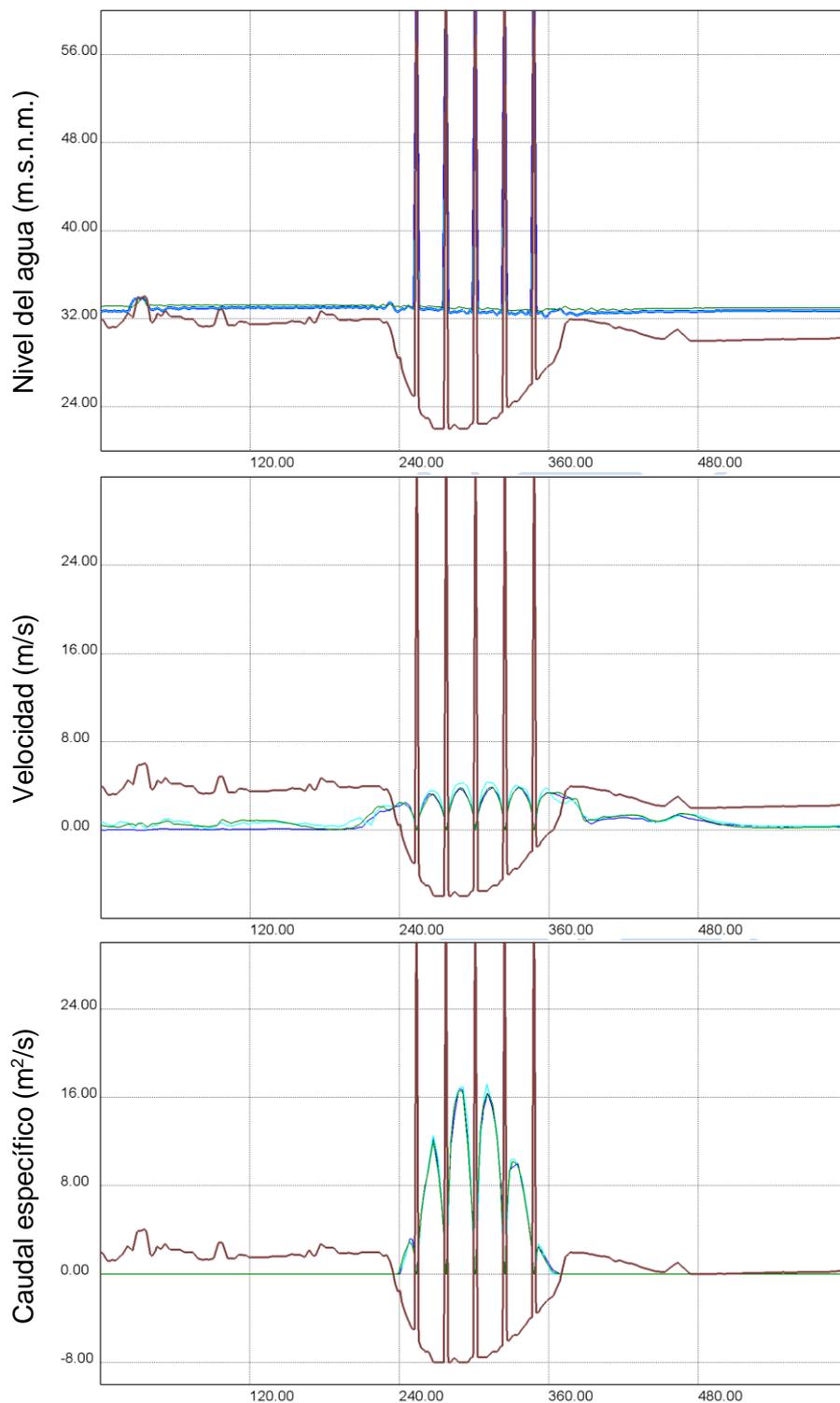
Nota: Elaboración propia

Entre los puentes Bolognesi y Sánchez Cerro se evidencia que las cotas disminuyen de manera proporcional al nivel de detalle, sin embargo, entre los puentes Sánchez Cerro y Cáceres, las cotas obtenidas para el Detalle 1 y Detalle 3 son muy similares

Los resultados correspondientes al Detalle 2 presentan mayores velocidades entre los puentes Bolognesi y Cáceres

Los valores de caudal específico presentan resultados muy similares para los tres niveles de detalle, entre los puentes Grau y Cáceres, y aguas arriba de este último

#### 4.2 Sección correspondiente al puente Cáceres

**Figura N° 28***Comparación de resultados entre Detalle 1, 2 y 3 – Sección Cáceres*

Las cotas modelas en el puente Cáceres presentan valores muy similares para los tres niveles de detalle. El nivel de detalle 3 presenta valores ligeramente superiores.

Los resultados correspondientes al Detalle 2 presentan velocidades ligeramente superiores en el cauce principal.

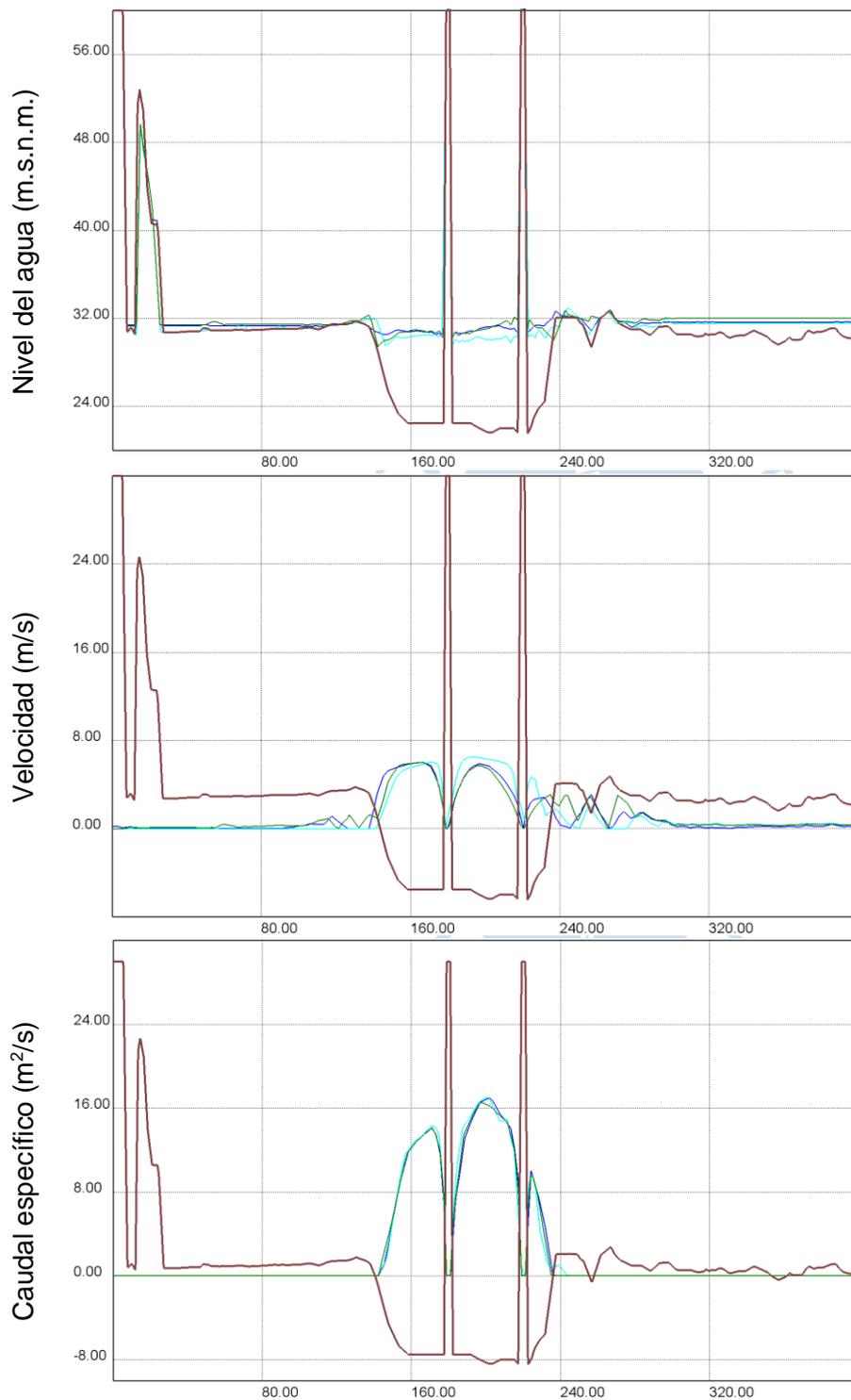
Los valores de caudal específico presentan resultados muy similares para los tres niveles de detalle.

Nota: Elaboración propia

### 4.3 Sección correspondiente al puente Sánchez Cerro

Figura N° 29

Comparación de resultados entre Detalle 1, 2 y 3 – Sección Sánchez Cerro



Las cotas modelas en el puente Sánchez Cerro presentan valores similares para los tres niveles de detalle. El nivel de detalle 2 presenta valores ligeramente menores.

Los resultados correspondientes al Detalle 2 presentan velocidades ligeramente mayores en el cauce principal, entre los dos apoyos del puente.

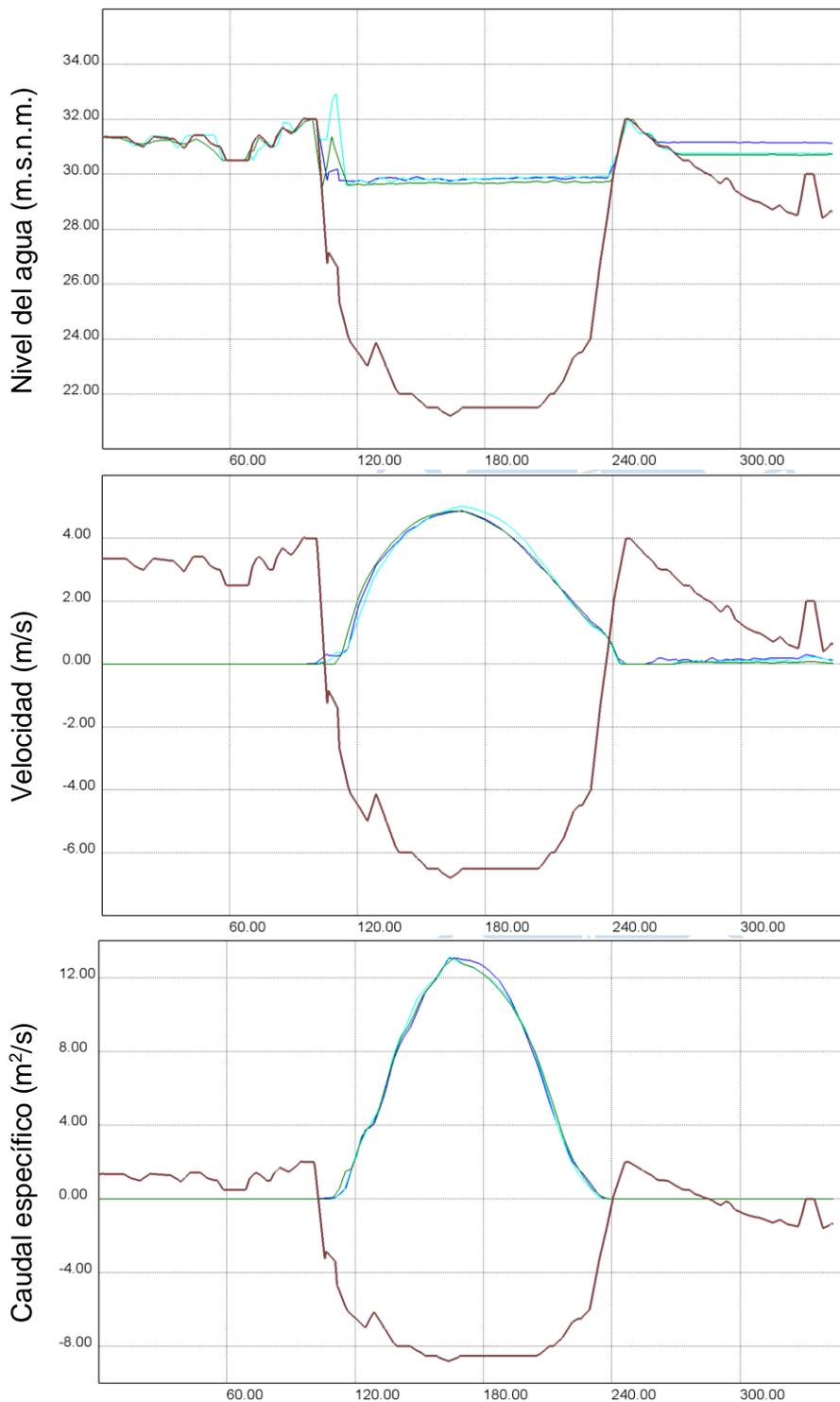
Los valores de caudal específico presentan resultados muy similares para los tres niveles de detalle.

Nota: Elaboración propia

**4.4 Sección correspondiente al puente Bolognesi**

**Figura N° 30**

*Comparación de resultados entre Detalle 1, 2 y 3 – Sección Bolognesi*



El nivel de Detalle 1 y 2 presentan resultados muy similares, mientras que los resultados del Detalle 3 presentan niveles de agua ligeramente inferiores. En la margen izquierda se observa una mayor diferencia en los resultados.

Se presenta un ligero incremento en los valores de velocidad para el Detalle 2.

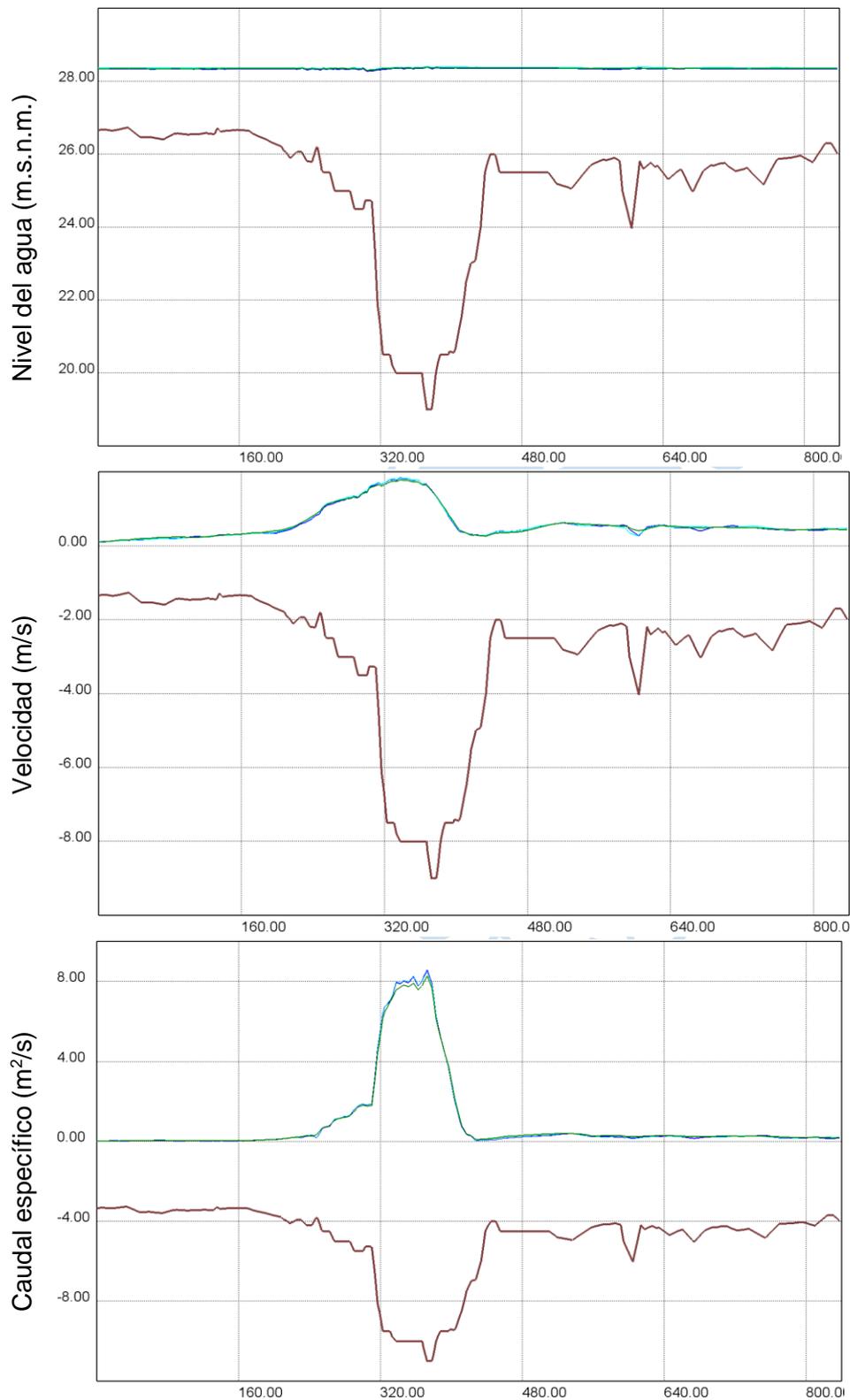
Los valores de caudal específico presentan resultados muy similares para los tres niveles de detalle.

*Nota:* Elaboración propia

#### 4.5 Sección correspondiente al puente Grau

Figura N° 31

Comparación de resultados entre Detalle 1, 2 y 3 – Sección Grau



Los niveles de agua modelados presentan resultados muy similares para los tres niveles de detalle.

Las velocidades modeladas presentan resultados muy similares para los tres niveles de detalle.

Los valores de caudal específico presentan resultados muy similares para los tres niveles de detalle.

Nota: Elaboración propia

#### 4.6 Análisis del área inundada

En las siguientes figuras se muestran los resultados de la inundación obtenida con el Detalle 1, 2 y 3. Cabe resaltar que el análisis del área inundada se llevará a cabo sólo en las zonas urbanas, más no en las planicies adicionales al este, oeste y aguas abajo.

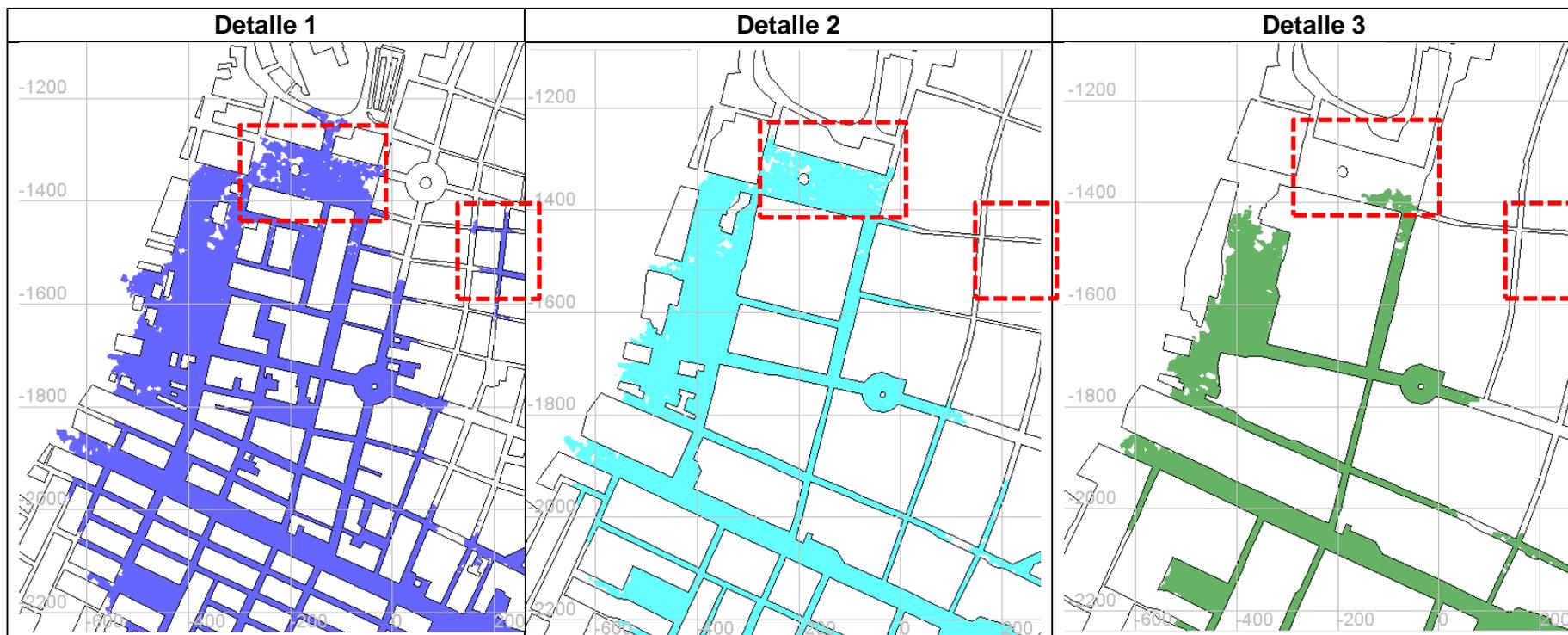
**Figura N° 32**

*Ubicación de zonas de análisis del área inundada*



*Nota:* Elaboración propia

Figura N° 33

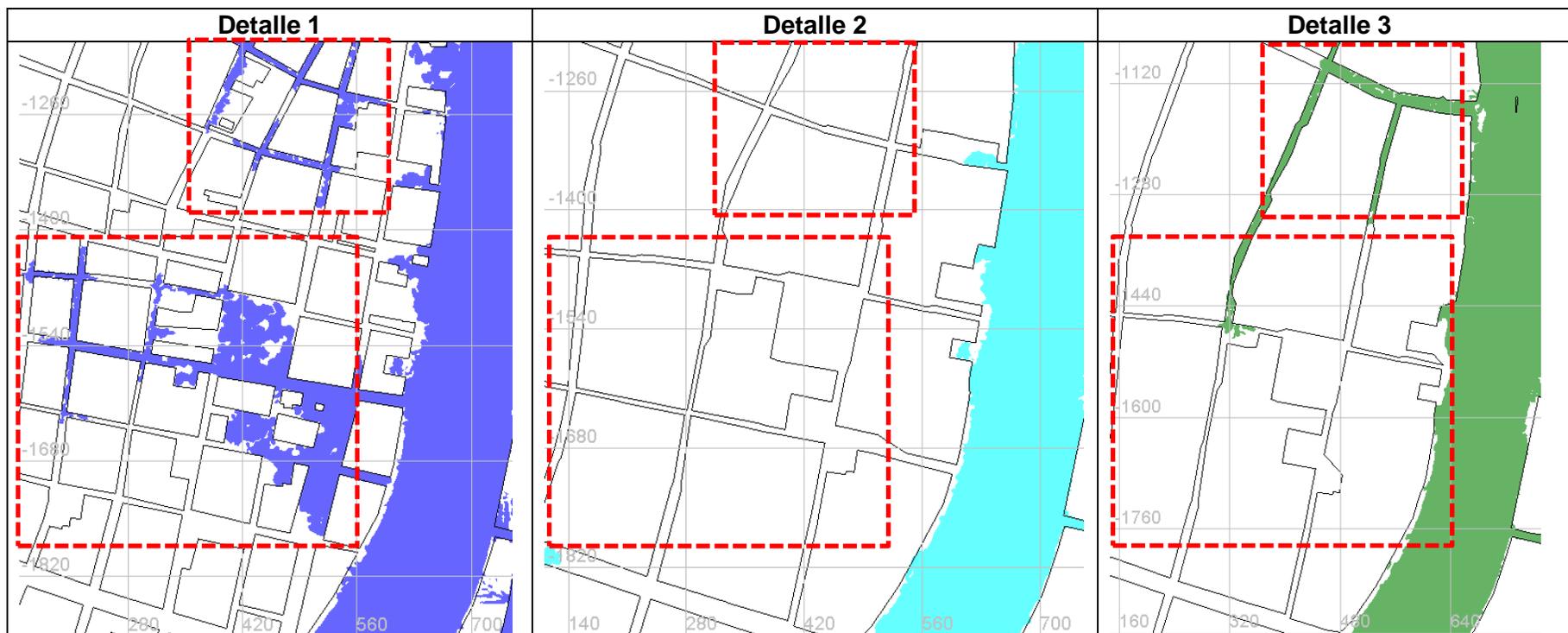
*Análisis del área inundada en la zona 1*

En los recuadros rojos se marcan las áreas de inundación en las cuales se identifica una diferencia significativa entre los tres niveles de detalle modelados. Se observa que el área de inundación que se tuvo como resultado del modelo correspondiente al Detalle 1 fue más extensa que el área del Detalle 2 y 3. Así mismo, el área de inundación correspondiente al Detalle 2 también fue mayor que el área correspondiente al Detalle 3.

*Nota:* Elaboración propia

Figura N° 34

Análisis del área inundada en la zona 2

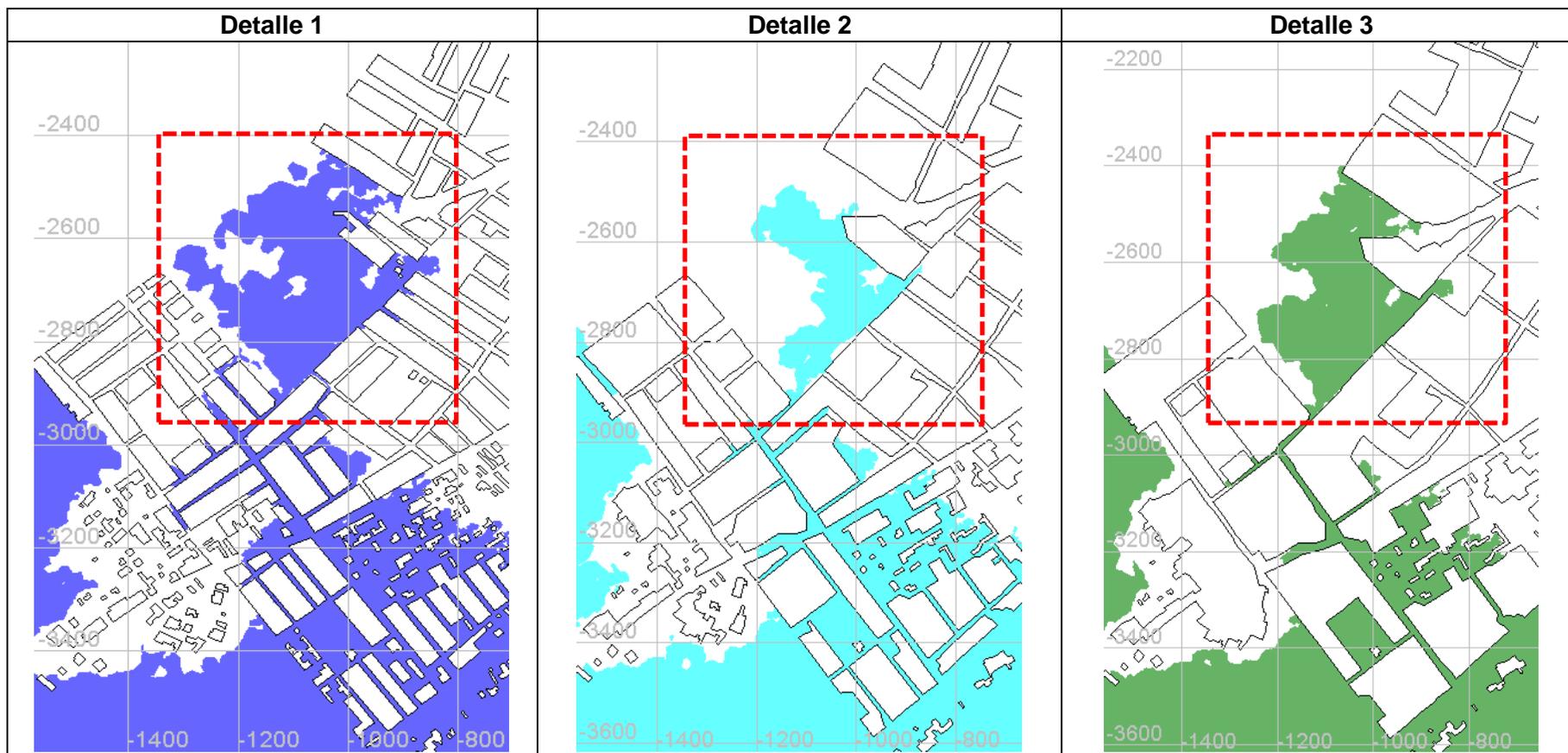


En los recuadros rojos se marcan las áreas de inundación en las cuales se identifica una diferencia significativa entre los tres niveles de detalle modelados. Se observa que el área de inundación que se tuvo como resultado del modelo correspondiente al Detalle 1 fue más extensa que el área del Detalle 2 y 3. Así mismo, el área de inundación correspondiente al Detalle 3 también fue mayor que el área correspondiente al Detalle 2.

Nota: Elaboración propia

Figura N° 35

Análisis del área inundada en la zona 3



En el recuadro rojo se marca el área de inundación en la que se identifica una diferencia significativa entre los tres niveles de detalle modelados. El área de inundación que se tuvo como resultado del modelo correspondiente al Detalle 1 fue más extensa que el área del Detalle 2 y 3. Así mismo, el área de inundación correspondiente al Detalle 3 también fue mayor que el área correspondiente al Detalle 2.

Nota: Elaboración propia

Luego de analizar áreas específicas en las cuales se identificó una notoria diferencia en el área de inundación, se evidenció que el nivel de Detalle 1 siempre calculó una mayor área de inundación; sin embargo, los niveles de Detalle 2 y 3 no presentaron una relación directa respecto del área de inundación. Por tal motivo, se procedió a realizar el cálculo total del área de inundación en toda la extensión de la malla del modelo (sin considerar las planicies adicionadas al este, oeste y aguas abajo). Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla N° 19**

*Comparación de áreas inundadas*

<b>Nivel de detalle catastral</b>	<b>Área inundada (ha)</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Variación</b>
Detalle 1	1,022.29	100%	-
Detalle 2	977.37	95.6%	4.4%
Detalle 3	952.01	93.1%	6.9%

*Nota:* Elaboración propia

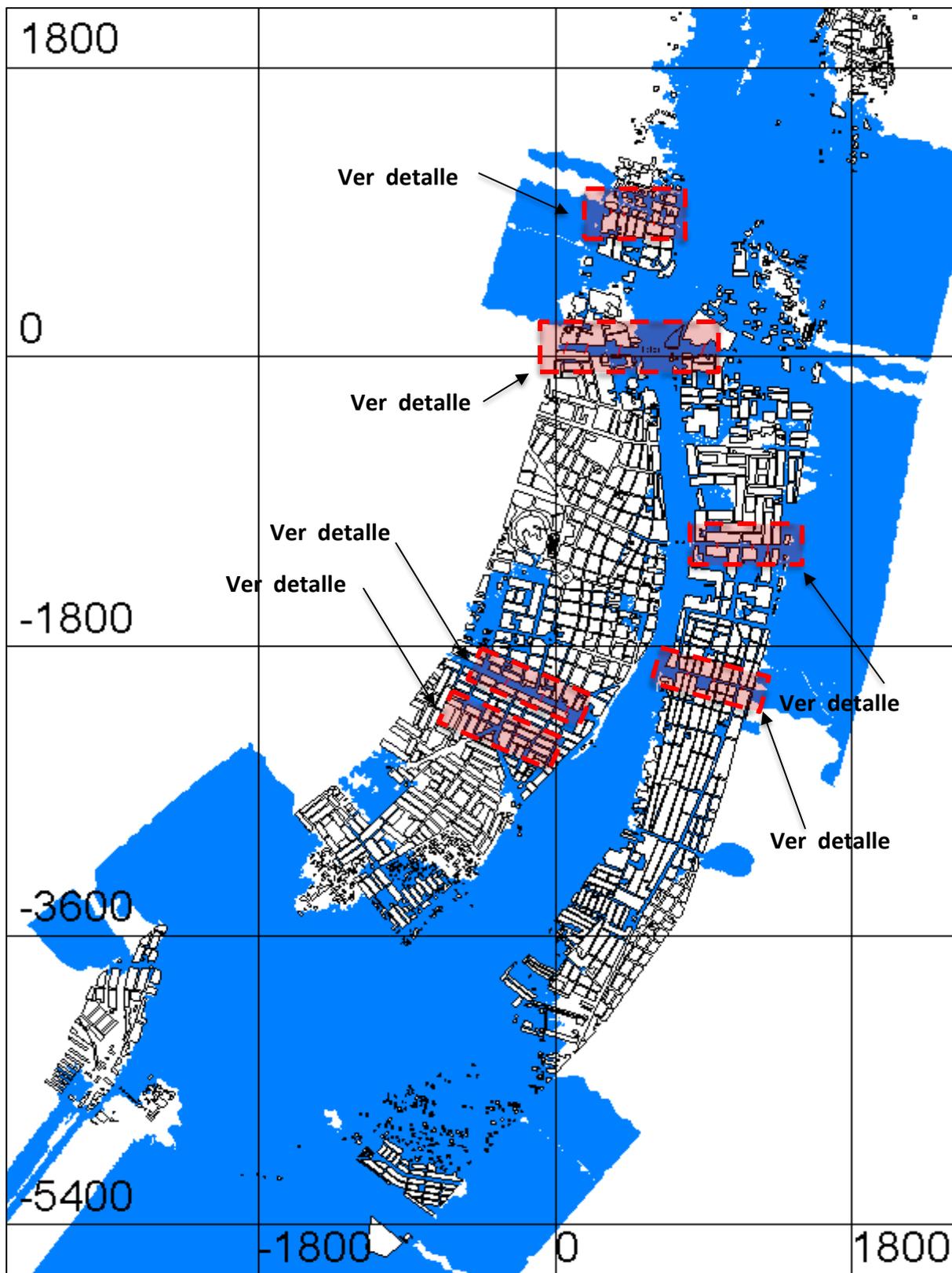
Luego de analizar la totalidad del área inundada, se evidencia una relación directamente proporcional entre el nivel de detalle asignado al catastro urbano y el área de inundación, presentándose la mayor área para el Detalle 1 y la menor área inundada para el Detalle 3. Cabe resaltar que la variación del área inundada fue de un 4.4% entre el Detalle 1 y el Detalle 2, y de 6.9% entre el Detalle 1 y el Detalle 3; en ambos casos variaciones menores al 10%.

#### **4.7 Análisis de parámetros hidráulicos en el área inundada**

Los parámetros hidráulicos seleccionados para ser analizados en el área inundada son el tirante o profundidad de agua, la velocidad y el caudal específico. Para analizar dichos parámetros se establecieron un total de 19 secciones ubicadas en vías o calles que presentaron una similar área de inundación para los tres niveles de detalle. Dichas vías o calles son las principales en la zona urbana de Piura, ya que a pesar de la simplificación del catastro urbano en el Detalle 2 y Detalle 3, éstas no fueron eliminadas. Adicionalmente, la mayoría de las secciones coinciden con las vías que cruzan por los principales puentes previamente analizados. En las siguientes figuras se detalla la ubicación de las 19 secciones previamente mencionadas:

Figura N° 36

Ubicación de secciones para análisis de parámetros hidráulicos en el área inundada



Nota: Elaboración propia

**Figura N° 37**

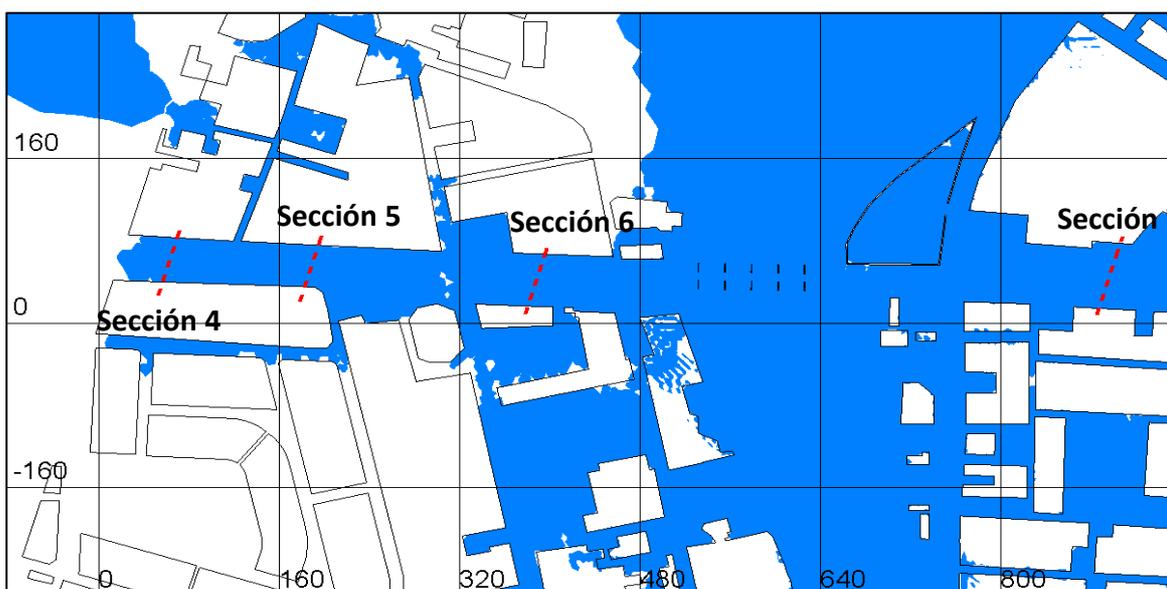
*Detalle 1 – Ubicación de secciones 1, 2 y 3*



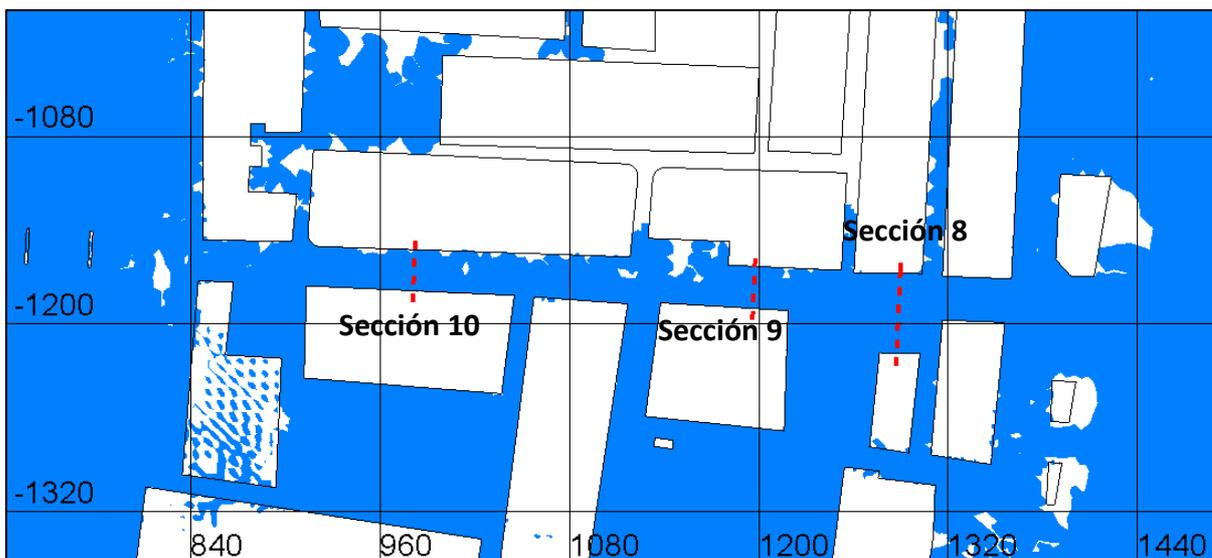
Nota: Elaboración propia

**Figura N° 38**

*Detalle 2 – Ubicación de secciones 4, 5, 6 y 7*

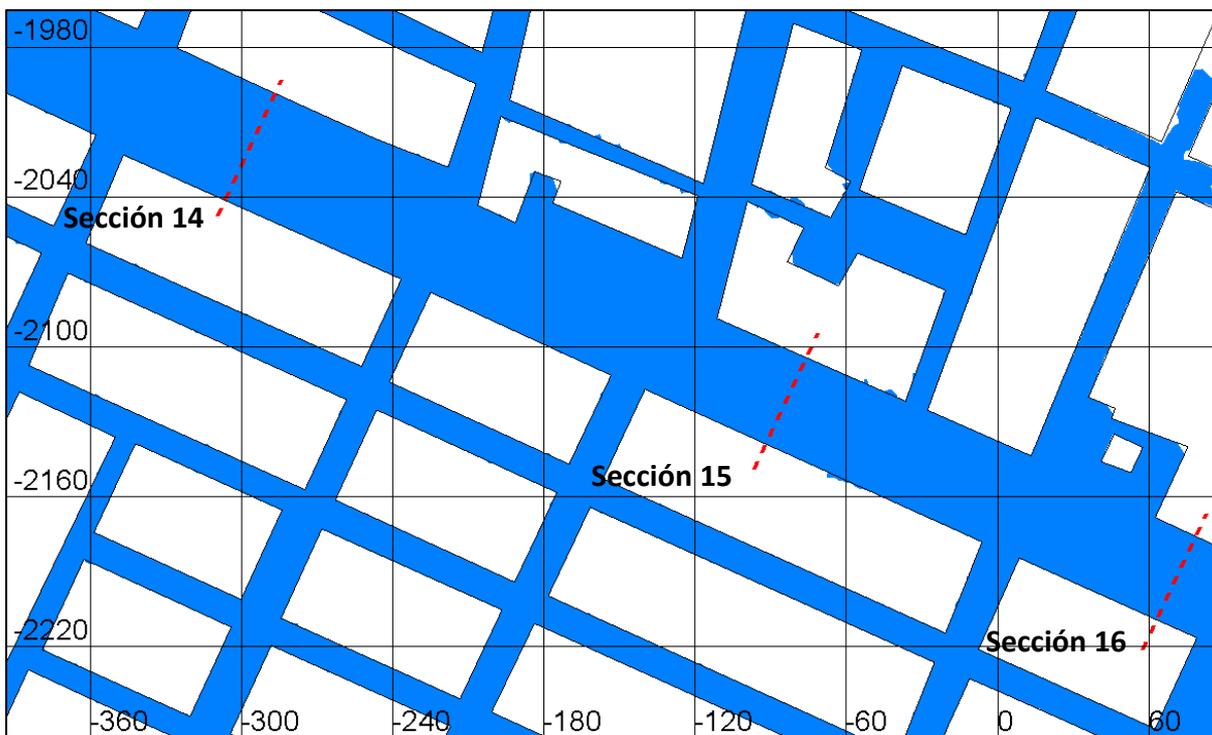


Nota: Elaboración propia

**Figura N° 39***Detalle 3 – Ubicación de secciones 8, 9 y 10**Nota: Elaboración propia***Figura N° 40***Detalle 4 – Ubicación de secciones 11, 12 y 13**Nota: Elaboración propia*

**Figura N° 41**

*Detalle 5 – Ubicación de secciones 14, 15 y 16*



*Nota: Elaboración propia*

**Figura N° 42**

*Detalle 5 – Ubicación de secciones 17, 18 y 19*

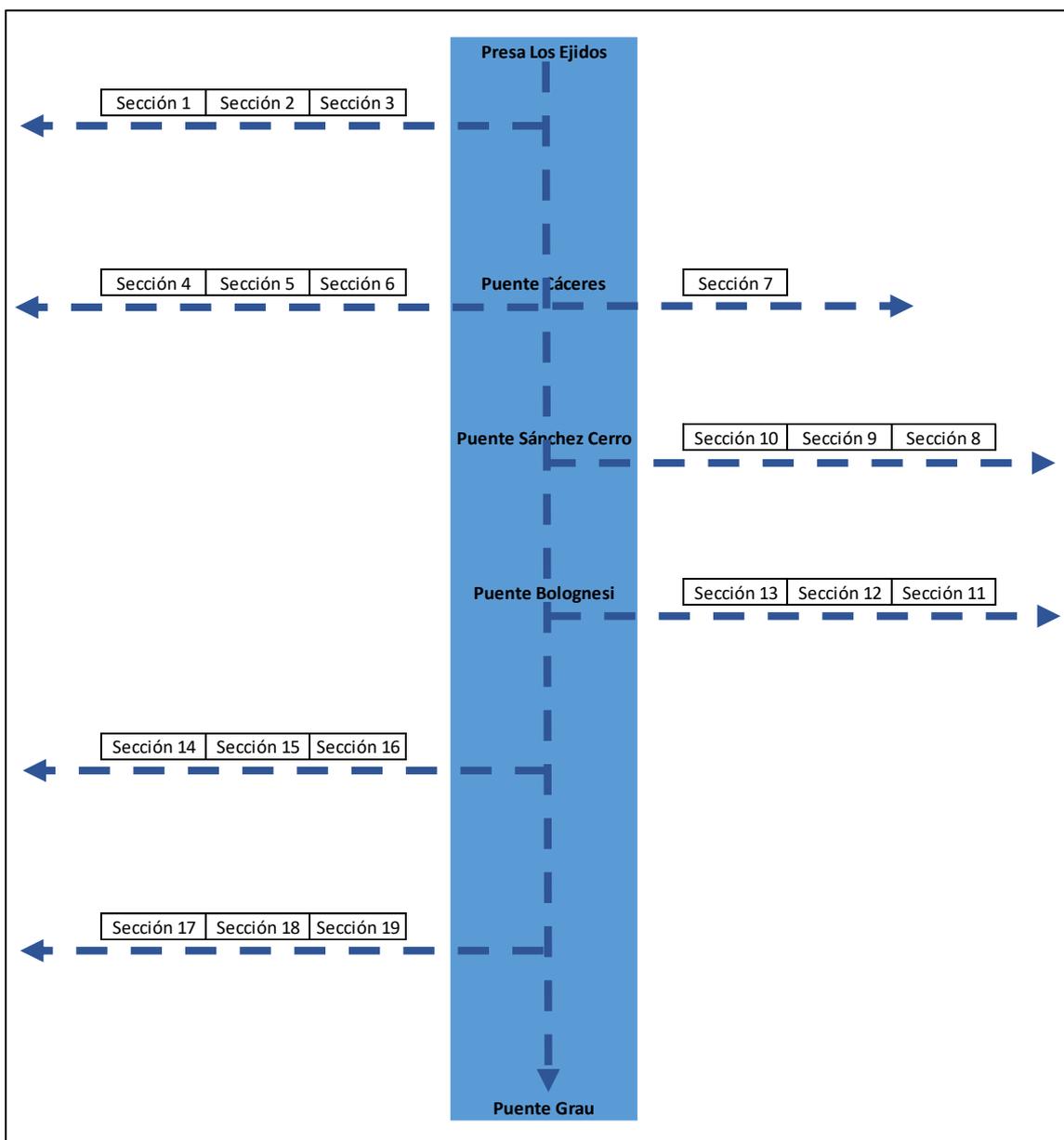


*Nota: Elaboración propia*

Adicionalmente se presenta el siguiente esquema con la finalidad de facilitar la ubicación e identificación de las secciones analizadas en el área inundada de la ciudad de Piura:

**Figura N° 43**

*Esquema de ubicación de secciones para análisis de parámetros hidráulicos en el área inundada*



*Nota:* Elaboración propia

En la siguiente figura se muestra un resumen de los máximos valores calculados para cada uno de los parámetros hidráulicos analizados, en cada una de las 19 secciones establecidas y para cada uno de los niveles de detalle de resolución de la infraestructura urbana. Los máximos valores calculados para cada parámetro han sido resaltados, con la

finalidad de facilitar el análisis de la información. El detalle y discusión de los resultados obtenidos en cada una de las secciones analizadas se presenta en el Anexo N° 1.



Figura N° 44

Valores máximos calculados para los parámetros hidráulicos analizados por cada nivel de detalle

AGUAS ARRIBA												
	Sección 1			Sección 2			Sección 3					
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3			
Tirante (m)	1.16	0.89	0.93	1.87	1.93	1.87	2.81	2.70	2.69			
Velocidad (m/s)	0.94	1.45	0.61	0.34	0.29	0.21	0.18	0.33	0.10			
Caudal específico (m2/s)	0.86	1.25	0.53	0.70	0.56	0.40	0.50	0.88	0.26			
	Sección 4			Sección 5			Sección 6					
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3			
Tirante (m)	2.07	1.09	1.71	1.99	1.13	1.70	2.23	1.82	2.01			
Velocidad (m/s)	0.04	1.27	0.84	0.02	1.56	0.93	0.08	0.68	0.83			
Caudal específico (m2/s)	0.07	1.19	1.40	0.03	1.70	1.58	0.16	1.04	1.46			
R I O P I U R A												
	Sección 7			Sección 10			Sección 9			Sección 8		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3
Tirante (m)	2.79	2.45	2.71	1.65	1.85	2.00	1.28	1.25	1.49	1.09	1.08	1.32
Velocidad (m/s)	0.70	0.71	0.59	0.44	0.52	0.53	0.50	0.44	0.73	2.07	1.99	1.79
Caudal específico (m2/s)	1.79	1.61	1.49	0.72	0.80	1.02	0.64	0.56	0.93	1.84	1.57	2.20
	Sección 13			Sección 12			Sección 11					
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3			
Tirante (m)	3.04	2.64	2.47	2.18	2.07	1.70	2.07	1.56	1.67			
Velocidad (m/s)	0.50	0.38	0.43	0.65	0.91	1.25	0.42	0.21	0.64			
Caudal específico (m2/s)	1.50	1.00	1.07	1.20	1.14	1.50	0.67	0.24	0.80			
	Sección 14			Sección 15			Sección 16					
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3			
Tirante (m)	2.87	3.00	2.47	2.30	2.34	1.85	1.84	1.95	1.41			
Velocidad (m/s)	0.14	0.16	0.06	0.28	0.18	0.21	0.29	0.25	0.24			
Caudal específico (m2/s)	0.36	0.42	0.11	0.58	0.42	0.38	0.52	0.48	0.34			
	Sección 17			Sección 18			Sección 19					
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3			
Tirante (m)	1.44	1.59	1.10	1.53	1.54	1.20	1.85	1.90	1.61			
Velocidad (m/s)	0.03	0.06	0.09	0.42	0.26	0.38	0.61	0.74	1.10			
Caudal específico (m2/s)	0.04	0.10	0.08	0.48	0.31	0.39	0.95	1.18	1.63			
AGUAS ABAJO												

Nota: Elaboración propia

En las siguientes tablas se presenta el resumen la cantidad de veces que cada nivel de detalle calculó el máximo valor para cada uno de los parámetros hidráulicos analizados, así como la sumatoria y el promedio de todos los máximos valores calculados:

#### **Tabla N° 20**

*Número de veces que cada nivel de detalle calculó el máximo valor para cada parámetro analizado*

<b>Parámetro</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>
Tirante	9	7	3
Velocidad	6	6	7
Caudal específico	6	5	8

*Nota:* Elaboración propia

#### **Tabla N° 21**

*Sumatoria de máximos valores calculados por cada nivel de detalle para cada parámetro analizado*

<b>Parámetro</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>
Tirante (m)	38.05	34.78	33.93
Velocidad (m/s)	8.65	12.40	11.54
Caudal específico (m <sup>2</sup> /s)	13.63	16.46	17.58

*Nota:* Elaboración propia

#### **Tabla N° 22**

*Promedios de máximos valores calculados por cada nivel de detalle para cada parámetro analizado*

<b>Parámetro</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>
Tirante (m)	2.00	1.83	1.79
Velocidad (m/s)	0.46	0.65	0.61
Caudal específico (m <sup>2</sup> /s)	0.72	0.87	0.93

*Nota:* Elaboración propia

#### **4.7.1 Tirante**

Los máximos valores del tirante fueron calculados en su mayoría por el Detalle 1 (9 veces), seguido del Detalle 2 (7 veces), siendo el nivel de Detalle 3 el que menos veces calculó los máximos valores del tirante (3 veces). Respecto de la sumatoria de los máximos valores calculados para el tirante, el Detalle 1 brindó el mayor valor (38), seguido del Detalle 2 (34.78) y presentando el menor valor el Detalle 3 (33.93). Cabe resaltar que la diferencia entre la sumatoria de máximos valores de tirante para los tres niveles de detalle no presenta una diferencia significativa. Finalmente, respecto de los valores promedio, el Detalle 1 calculó el máximo valor promedio (2.00), seguido del Detalle 2 (1.83) y finalmente el Detalle 3 (1.79).

#### **4.7.2 Velocidad**

Los máximos valores de la velocidad fueron calculados en su mayoría por el Detalle 3 (7 veces), seguido del Detalle 1 y Detalle 2 en la misma cantidad de veces (6 veces cada uno). Sin embargo, la sumatoria de los máximos valores de velocidad calculados con el Detalle 2 brindó el mayor valor (12.40) seguido del Detalle 3 (11.54) y presentando el menor valor el Detalle 1 (8.65). Cabe resaltar que la diferencia entre la sumatoria de máximos valores de velocidad para los niveles de Detalle 2 y 3 fue menor, mientras que, respecto del Detalle 1, se presentó una mayor diferencia. Finalmente, respecto de los valores promedio, el Detalle 2 calculó el mayor valor de velocidad (0.65), seguido del Detalle 3 (0.61) y finalmente el Detalle 1 (0.46).

#### **4.7.3 Caudal específico**

Los máximos valores del caudal específico fueron calculados en su mayoría por el Detalle 3 (8 veces), seguido del Detalle 1 (6 veces), siendo el nivel de Detalle 2 el que menos veces calculó los máximos valores de caudal específico (5 veces). Así mismo, la sumatoria de los máximos valores de caudal específico calculados con el Detalle 3 brindó el mayor valor (17.58) seguido del Detalle 2 (16.46) y presentando el menor valor el Detalle 1 (13.63). Cabe resaltar que la diferencia entre la sumatoria de máximos valores de caudal específico para los niveles de Detalle 2 y 3 fue menor, mientras que, respecto del Detalle 1, se presentó una mayor diferencia. Finalmente, respecto de los valores promedio, el Detalle 3 calculó el mayor valor de caudal específico (0.93), seguido del Detalle 2 (0.87) y finalmente el Detalle 1 (0.72).

#### **4.7.4 Análisis general**

De manera general, se evidencia que los niveles de Detalle 2 y 3 tienden a calcular valores de velocidad y caudal específico mayores que el nivel de Detalle 1. Éste último sólo calculó mayores valores para el parámetro del tirante, respecto de los niveles de Detalle 2 y 3.

#### **4.8 Análisis de tiempos computacionales**

El tiempo total necesario para correr el modelo hidráulico consiste en la suma de dos corridas, que se detallan a continuación:

- La primera corrida se realizó considerando un caudal constante de 908 l/s, correspondiente al valor inicial del hidrograma registrado el año 2017 durante el evento de El Niño Costero (condiciones de frontera aguas arriba). Así mismo, para las condiciones de frontera aguas abajo, se consideró la cota calculada de manera preliminar con H-Canales para el caudal de 908 l/s. Ver numeral 3.4.2 Condiciones de frontera aguas abajo.

- La segunda corrida se realizó teniendo como base los resultados de la primera corrida y se procedió a ejecutar el modelo considerando el hidrograma detallado en el numeral 2.4 Hidrología. Así mismo, para las condiciones de frontera aguas abajo se consideró la información detallada en la Tabla N° 7.

Los tiempos necesarios para correr el modelo hidráulico para cada uno de los tres niveles de detalle se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla N° 23**

*Tiempos computacionales requeridos por cada nivel de detalle*

Descripción	Días	Horas	Minutos	Segundos	Tiempo total en segundos		Nodos	Elementos
Detalle 1 - 1ra corrida	0	18	59	4	68344	152954	86084 2	1720198
Detalle 1 - 2da corrida	0	23	30	10	84610			
Detalle 2 - 1ra corrida	1	4	28	19	102499	247076	80622 6	1610966
Detalle 2 - 2da corrida	1	16	9	37	144577			
Detalle 3 - 1ra corrida	1	9	10	13	119413	270159	78152 5	1561564
Detalle 3 - 2da corrida	1	17	52	26	150746			

*Nota:* Elaboración propia

Se puede observar que el Detalle 3 presentó el mayor tiempo computacional, seguido del Detalle 2 y finalmente, el Detalle 1 presentó el menor tiempo computacional de los tres; es decir, conforme el nivel de detalle disminuyó, los tiempos computacionales incrementaron.

#### 4.9 Modificación de los coeficientes de rugosidad

Luego de analizados los resultados obtenidos para los tres niveles de detalle, se procedió con modificar los coeficientes de rugosidad de los materiales asignados en el numeral 3.5.4. Dado que el Detalle 2 y Detalle 3 tuvieron como resultados mayores valores de velocidad y de caudal específico, y menores valores de tirante; se modificaron los coeficientes de rugosidad según el siguiente detalle:

- Modificación 1: Incremento en un 10% y 20% para el Detalle 2 y Detalle 3 respectivamente.
- Modificación 2: Incremento en un 30% y 40% para el Detalle 2 y Detalle 3 respectivamente.

Cabe resaltar que no se realizarán cambios a los coeficientes de rugosidad asignados al Detalle 1, ya que éste será la línea base de comparación para analizar los resultados

modificando los coeficientes de rugosidad. En la siguiente tabla se presenta el detalle de las modificaciones realizadas a los coeficientes de rugosidad:

**Tabla N° 24**

*Modificación de los coeficientes de rugosidad*

Materia l	Coef. de rugosidad calibrados Detalle 1	Modificación 1		Modificación 2	
		Coef. de rugosidad Detalle 2	Coef. de rugosidad Detalle 3	Coef. de rugosidad Detalle 2	Coef. de rugosidad Detalle 3
Arboles	0.04	0.044	0.048	0.052	0.056
Arbustos	0.056	0.0616	0.0672	0.0728	0.0784
Asfalto	0.0128	0.01408	0.01536	0.01664	0.01792
Cauce	0.05	0.055	0.06	0.065	0.07
Cauce	0.025	0.0275	0.03	0.0325	0.035
Cauce	0.016	0.0176	0.0192	0.0208	0.0224
Concreto	0.012	0.0132	0.0144	0.0156	0.0168
Cultivo	0.028	0.0308	0.0336	0.0364	0.0392
Eriazo	0.024	0.0264	0.0288	0.0312	0.0336

*Nota:* Elaboración propia

#### **4.9.1 Análisis de resultados modificando los coeficientes de rugosidad**

El análisis de los resultados de las corridas luego de haber modificado los coeficientes de rugosidad asignados al Detalle 2 y Detalle 3, se centran en los parámetros hidráulicos del área inundada, los que se obtienen de las 19 secciones descritas previamente en el numeral 4.7.

Al igual que con el análisis inicial, en la Figura N° 45 y la Figura N° 46 se muestra un resumen de los máximos valores calculados para cada uno de los parámetros hidráulicos analizados, en cada una de las 19 secciones establecidas y para cada uno de los niveles de detalle de resolución de la infraestructura urbana. Los máximos valores calculados para cada parámetro han sido resaltados, con la finalidad de facilitar el análisis de la información. Cabe resaltar que los resultados del Detalle 1 son los mismos, ya que para este nivel de detalle no se modificaron los coeficientes de rugosidad.

En la Tabla N° 25, *Nota:* Elaboración propia

Tabla N° 26 y *Nota:* Elaboración propia

Tabla N° 27 se presenta el resumen la cantidad de veces que cada nivel de detalle calculó el máximo valor para cada uno de los parámetros hidráulicos analizados, así como la sumatoria de todos los máximos valores calculados, y su promedio.

Figura N° 45

Valores máximos calculados para los parámetros hidráulicos analizados por cada nivel de detalle – Modificación 1 de coeficientes de rugosidad

AGUAS ARRIBA													
	Sección 1			Sección 2			Sección 3			R I O P U R A			
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3				
Tirante (m)	1.16	0.92	1.00	1.87	1.94	1.94	2.81	2.70	2.78				
Velocidad (m/s)	0.94	1.47	0.62	0.34	0.30	0.30	0.18	0.35	0.16				
Caudal específico (m2/s)	0.87	1.26	0.57	0.64	0.59	0.54	0.51	0.93	0.43				
	Sección 4			Sección 5			Sección 6				Sección 7		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3		D1	D2	D3
Tirante (m)	2.07	1.13	1.82	1.99	1.17	1.82	2.23	1.85	2.08		2.79	2.48	2.76
Velocidad (m/s)	0.04	1.27	0.76	0.02	1.48	0.81	0.08	0.68	0.74		0.70	0.68	0.52
Caudal específico (m2/s)	0.07	1.28	1.34	0.03	1.69	1.47	0.16	1.05	1.36		1.80	1.58	1.35
	Sección 10			Sección 9			Sección 8						
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3				
Tirante (m)	1.65	1.86	2.04	1.28	1.26	1.50	1.09	1.09	1.33				
Velocidad (m/s)	0.44	0.56	0.40	0.50	0.44	0.66	2.07	1.94	1.69				
Caudal específico (m2/s)	0.73	0.87	0.79	0.63	0.55	0.83	1.85	1.55	2.11				
	Sección 13			Sección 12			Sección 11						
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3				
Tirante (m)	3.04	2.65	2.51	2.18	2.08	1.74	2.07	1.65	1.69				
Velocidad (m/s)	0.50	0.40	0.44	0.65	0.91	1.23	0.42	0.13	0.57				
Caudal específico (m2/s)	1.51	1.04	1.09	1.21	1.14	1.54	0.67	0.18	0.70				
	Sección 14			Sección 15			Sección 16						
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3				
Tirante (m)	2.87	3.11	2.80	2.30	2.48	2.21	1.84	2.12	1.76				
Velocidad (m/s)	0.14	0.11	0.02	0.28	0.16	0.20	0.29	0.29	0.20				
Caudal específico (m2/s)	0.36	0.31	0.05	0.58	0.37	0.42	0.52	0.60	0.35				
	Sección 17			Sección 18			Sección 19						
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3				
Tirante (m)	1.44	1.74	1.47	1.53	1.59	1.52	1.85	2.03	1.88				
Velocidad (m/s)	0.03	0.04	0.09	0.42	0.24	0.28	0.61	0.68	1.05				
Caudal específico (m2/s)	0.04	0.08	0.12	0.48	0.32	0.38	0.94	1.16	1.84				
AGUAS ABAJO													

Nota: Elaboración propia

Figura N° 46

Valores máximos calculados para los parámetros hidráulicos analizados por cada nivel de detalle – Modificación 2 de coeficientes de rugosidad

AGUAS ARRIBA										R I O P I U R A									
Sección 1			Sección 2			Sección 3			Sección 7										
D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1		D2	D3							
Tirante (m)	1.16	1.03	<b>1.29</b>	1.87	2.05	<b>2.24</b>	2.81	2.86	<b>3.07</b>		2.79	2.65	<b>2.93</b>						
Velocidad (m/s)	0.94	<b>1.42</b>	0.61	0.34	<b>0.41</b>	0.33	0.18	<b>0.28</b>	0.18		<b>0.70</b>	0.60	0.39						
Caudal específico (m2/s)	0.87	<b>1.37</b>	0.68	0.64	<b>0.83</b>	0.69	0.51	<b>0.80</b>	0.47		<b>1.80</b>	1.48	1.09						
Sección 4			Sección 5			Sección 6			Sección 10			Sección 9			Sección 8				
D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1		D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3	
Tirante (m)	2.07	1.44	<b>2.13</b>	1.99	1.46	<b>2.11</b>	2.23	2.01	<b>2.30</b>		1.65	2.04	<b>2.11</b>	1.28	1.45	<b>1.56</b>	1.09	1.28	<b>1.40</b>
Velocidad (m/s)	0.04	<b>1.02</b>	0.43	0.02	<b>1.17</b>	0.46	0.08	<b>0.72</b>	0.48		0.44	<b>0.61</b>	0.32	0.50	0.43	<b>0.64</b>	<b>2.07</b>	1.72	1.62
Caudal específico (m2/s)	0.07	<b>1.39</b>	0.91	0.03	<b>1.69</b>	0.96	0.16	<b>1.25</b>	0.98		0.73	<b>1.07</b>	0.66	0.63	0.62	<b>0.83</b>	1.85	1.66	<b>2.12</b>
Sección 13			Sección 12			Sección 11			Sección 14			Sección 15			Sección 16				
D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1		D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3	
Tirante (m)	<b>3.04</b>	2.80	2.64	<b>2.18</b>	1.89	1.89	<b>2.07</b>	1.72	1.79		2.87	<b>3.45</b>	3.23	2.30	<b>2.75</b>	2.62	1.84	<b>2.41</b>	2.21
Velocidad (m/s)	<b>0.50</b>	0.44	0.48	0.65	0.85	<b>1.18</b>	0.42	0.29	<b>0.54</b>		0.14	<b>0.18</b>	0.02	<b>0.28</b>	0.22	0.25	0.29	<b>0.35</b>	0.28
Caudal específico (m2/s)	<b>1.51</b>	1.24	1.26	1.21	1.18	<b>1.64</b>	0.67	0.34	<b>0.69</b>		0.36	<b>0.55</b>	0.08	0.58	0.60	<b>0.61</b>	0.52	<b>0.83</b>	0.58
Sección 17			Sección 18			Sección 19													
D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3											
Tirante (m)	1.44	<b>2.02</b>	1.87	1.53	<b>2.06</b>	1.72	1.85	<b>2.28</b>	2.15										
Velocidad (m/s)	0.03	0.04	<b>0.12</b>	<b>0.42</b>	0.25	0.20	0.61	0.58	<b>0.85</b>										
Caudal específico (m2/s)	0.04	0.09	<b>0.21</b>	0.48	<b>0.51</b>	0.34	0.94	1.14	<b>1.72</b>										
AGUAS ABAJO																			

Nota: Elaboración propia

**Tabla N° 25**

*Número de veces que cada nivel de detalle calculó el máximo valor para cada parámetro analizado, con modificación de coeficientes de rugosidad*

Parámetro	Coeficientes de rugosidad calibrados			Modificación 1			Modificación 2		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3
Tirante (m)	9	7	3	9	6	4	3	6	10
Velocidad (m/s)	6	6	7	8	5	6	5	9	5
Caudal específico (m <sup>2</sup> /s)	6	5	8	6	5	8	2	10	7

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla N° 26**

*Sumatoria de máximos valores calculados por cada nivel de detalle para cada parámetro analizado, con modificación de coeficientes de rugosidad*

Parámetro	Coeficientes de rugosidad calibrados			Modificación 1			Modificación 2		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3
Tirante (m)	38.0 5	34.7 8	33.9 3	38.0 5	35.8 5	36.6 5	38.0 5	39.6 6	41.2 7
Velocidad (m/s)	8.65	12.4 0	11.5 4	8.65	12.1 2	10.7 5	8.65	11.5 9	9.37
Caudal específico (m <sup>2</sup> /s)	13.6 0	16.4 6	17.5 8	13.6 0	16.5 6	17.2 9	13.6 0	18.6 5	16.5 3

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla N° 27**

*Promedios de máximos valores calculados por cada nivel de detalle para cada parámetro analizado, con modificación de coeficientes de rugosidad*

Parámetro	Coeficientes de rugosidad calibrados			Modificación 1			Modificación 2		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3
Tirante (m)	2.00	1.83	1.79	2.00	1.89	1.93	2.00	2.09	2.17
Velocidad (m/s)	0.46	0.65	0.61	0.46	0.64	0.57	0.46	0.61	0.49
Caudal específico (m <sup>2</sup> /s)	0.72	0.87	0.93	0.72	0.87	0.91	0.72	0.98	0.87

*Nota:* Elaboración propia

#### **4.9.1.1 Tirante**

Para la Modificación 1, los máximos valores del tirante continuaron siendo calculados en su mayoría por el Detalle 1 (9 veces), seguido del Detalle 2 (6 veces), siendo el nivel de Detalle 3 el que menos veces calculó los máximos valores del tirante (4 veces). Sin embargo, para la Modificación 2, los máximos valores de tirante fueron calculados por el Detalle 3 (10 veces), seguido del Detalle 2 (6 veces), siendo el Detalle 1 el que menos veces calculó los máximos valores del tirante (3 veces).

De manera similar, para la Modificación 1, la sumatoria de los máximos valores de tirante calculados con el Detalle 1 brindó el mayor valor (38 m), seguido del Detalle 3 (36.65 m) y presentando el menor valor el Detalle 2 (35.85 m). Cabe resaltar que la diferencia entre la sumatoria de máximos valores de tirante para los tres niveles de detalle no presenta una diferencia significativa. Sin embargo, para la Modificación 2, la sumatoria de los máximos valores de tirante calculados por el Detalle 3 brindó el mayor valor (41.27 m), seguido del Detalle 2 (39.66 m), pasando el Detalle 1 a presentar el menor valor (38 m).

Finalmente, respecto de los valores promedio, para la Modificación 1 el Detalle 1 calculó el máximo valor promedio (2.00 m), seguido del Detalle 3 (1.93 m) y finalmente el Detalle 2 (1.89 m). Para la Modificación 2, el Detalle 3 calculó el máximo valor promedio (2.17 m), seguido del Detalle 2 (2.09 m) y finalmente el Detalle 1 (2.00 m).

Al comparar los resultados de las corridas modificando los coeficientes de rugosidad para el Detalle 2 y Detalle 3, con las corridas sin modificación del coeficiente de rugosidad; podemos ver que para la Modificación 1, el Detalle 1 continúa calculando mayores valores de tirante; el Detalle 3 pasó a segundo lugar, calculando mayores valores que el Detalle 2, sólo en magnitud, mas no en cantidad. Sin embargo, para la Modificación 2, los resultados se invirtieron, siendo el Detalle 3 el que mayores valores calcula, seguido del Detalle 2 y quedando en último lugar el Detalle 1.

#### **4.9.1.2 Velocidad**

Para la Modificación 1, los máximos valores de la velocidad fueron calculados en su mayoría por el Detalle 1 (8 veces), seguido del Detalle 3 (6 veces) y finalmente el Detalle 2 (5 veces). Sin embargo, para la Modificación 2, los máximos valores de la velocidad fueron calculados en su mayoría por el Detalle 2, mientras que el Detalle 1 y Detalle 3 lo hicieron en 5 veces cada uno.

Por otra parte, para la Modificación 1, el mayor valor de la sumatoria de los máximos valores de velocidad fue calculado con el Detalle 2 (12.12 m/s) seguido del Detalle 3 (10.75 m/s) y el Detalle 1 presentó el menor valor (8.65 m/s). Respecto de la Modificación 2, el orden se mantuvo, el mayor valor de la sumatoria de los máximos valores de velocidad fue calculado con el Detalle 2 (11.59 m/s) seguido del Detalle 3 (9.37 m/s) y el Detalle 1 presentó el menor valor (8.65 m/s)

Finalmente, respecto de los valores promedio, para la Modificación 1, el Detalle 2 calculó el máximo valor promedio (0.64 m/s), seguido del Detalle 3 (0.57 m/s) y finalmente el Detalle 1 (0.46 m/s). De manera similar, para la Modificación 2, el Detalle 2 calculó el máximo valor promedio (0.61 m/s), seguido del Detalle 3 (0.49 m/s) y finalmente el Detalle 1 (0.46 m/s).

Al comparar los resultados de las corridas modificando los coeficientes de rugosidad para el Detalle 2 y Detalle 3, con las corridas sin modificación del coeficiente de rugosidad; podemos ver que para la Modificación 1, el Detalle 1 pasó a calcular mayores valores de velocidad en cantidad de oportunidades. Sin embargo, el Detalle 2 continúa calculando mayores valores en magnitud, seguido del Detalle 3. Respecto de la Modificación 2, el Detalle 2 calculó mayores valores de velocidad en cantidad y magnitud, seguido del Detalle 3, pasando a último lugar el Detalle 1. Cabe resaltar que la Modificación 1 calculó mayores valores de velocidad en general que la Modificación 2.

#### **4.9.1.3 Caudal específico**

Para la Modificación 1, los máximos valores del caudal específico fueron calculados en su mayoría por el Detalle 3 (8 veces), seguido del Detalle 1 (6 veces), siendo el nivel de Detalle 2 el que menos veces calculó los máximos valores de caudal específico (5 veces). Sin embargo, respecto de la Modificación 2, los máximos valores del caudal específico fueron calculados en su mayoría por el Detalle 2 (10 veces), seguido del Detalle 3 (7 veces), siendo el nivel de Detalle 1 el que menos veces calculó los máximos valores de caudal específico (2 veces).

Por otra parte, para la Modificación 1 la sumatoria de los máximos valores de caudal específico calculados con el Detalle 3 brindó el mayor valor ( $17.29 \text{ m}^2/\text{s}$ ) seguido del Detalle 2 ( $16.56 \text{ m}^2/\text{s}$ ) y presentando el menor valor el Detalle 1 ( $13.60 \text{ m}^2/\text{s}$ ). Cabe resaltar que la diferencia entre la sumatoria de máximos valores de caudal específico para los niveles de Detalle 2 y 3 fue menor, mientras que, respecto del Detalle 1, se presentó una mayor diferencia. Para la Modificación 2, el Detalle 2 calculó el mayor valor ( $18.65 \text{ m}^2/\text{s}$ ), seguido del Detalle 3 ( $16.53 \text{ m}^2/\text{s}$ ).

Finalmente, respecto de los valores promedio, para la Modificación 1, el Detalle 3 calculó el máximo valor promedio ( $0.91 \text{ m}^2/\text{s}$ ), seguido del Detalle 2 ( $0.87 \text{ m}^2/\text{s}$ ) y finalmente el Detalle 1 ( $0.72 \text{ m}^2/\text{s}$ ). Para la Modificación 2, el Detalle 2 calculó el máximo valor promedio ( $0.98 \text{ m}^2/\text{s}$ ), seguido del Detalle 3 ( $0.87 \text{ m}^2/\text{s}$ ) y finalmente el Detalle 1 ( $0.72 \text{ m}^2/\text{s}$ ).

Al comparar los resultados de las corridas con la Modificación 1 para el Detalle 2 y Detalle 3, con las corridas sin modificación del coeficiente de rugosidad; podemos ver que no hubo una modificación significativa para el presente parámetro hidráulico, manteniéndose valores muy similares entre los resultados de ambas corridas. Sin embargo, la diferencia se incrementó para las corridas con la Modificación 2.

#### 4.9.1.4 Área inundada

Se procedió a realizar el cálculo total del área de inundación en toda la extensión de la malla del modelo (sin considerar las planicies adicionadas al este, oeste y aguas abajo). Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla N° 28**

*Comparación de áreas inundadas con modificación de coeficientes de rugosidad*

Nivel de detalle catastral	Base			Modificación 1			Modificación 2		
	Área inundada (m <sup>2</sup> )	%	Δ	Área inundada (m <sup>2</sup> )	%	Δ	Área inundada (m <sup>2</sup> )	%	Δ
Detalle 1	10,222,858.84	100%	-	10,222,858.84	100%	-	10,222,858.84	100%	-
Detalle 2	9,773,748.73	95.6%	4.4%	9,836,225.17	96.2%	3.8%	9,993,881.67	97.8%	2.2%
Detalle 3	9,520,095.86	93.1%	6.9%	9,620,100.96	94.1%	5.9%	9,774,132.16	95.6%	4.4%

Nota: Elaboración propia

Luego de analizar la totalidad del área inundada, se observa que, con las modificaciones al coeficiente de rugosidad, las áreas inundadas calculadas con el Detalle 2 y Detalle 3 mantienen menores valores que el Detalle 1. A mayor nivel de detalle, se tiene como resultado una mayor área inundada. A pesar de que con las modificaciones los coeficientes de rugosidad se incrementaron, los menores niveles de detalle no lograron igualar la magnitud del área inundada calculada por el Detalle 1. Se puede apreciar que el nivel de detalle catastral tiene una mayor influencia sobre el área inundada que los coeficientes de rugosidad, es así como, el Detalle 2 con incremento del 10% de coeficiente de rugosidad (Modificación 1) calculó una mayor área inundada que el Detalle 3 con incremento del 40% de coeficiente de rugosidad (Modificación 2).

#### 4.9.1.5 Análisis general

De manera general, se evidencia que la Modificación 1 de los coeficientes de rugosidad para el Detalle 2 y Detalle 3 no generó diferencias significativas en los resultados. Los valores de tirante tendieron a incrementarse y los de velocidad a disminuir, mientras que el caudal específico sufrió aún menos variación. Por otra parte, la Modificación 2 tuvo como consecuencia un mayor incremento en los valores de tirante, mientras que los valores de velocidad continuaron reduciéndose, pero en una menor proporción.

Con la Modificación 1, los valores de tirante no se incrementaron lo suficiente como para igualar los valores calculados por el Detalle 1, mientras que con la Modificación 2, los valores se incrementaron demasiado, sobrepasando los calculados por el Detalle 1.

Con la Modificación 1, los valores de velocidad no se redujeron lo suficiente como para igualar los valores calculados por el Detalle 1; de manera similar ocurrió con la

Modificación 2, a pesar de que los valores de velocidad se redujeron un poco más que con la Modificación 1.

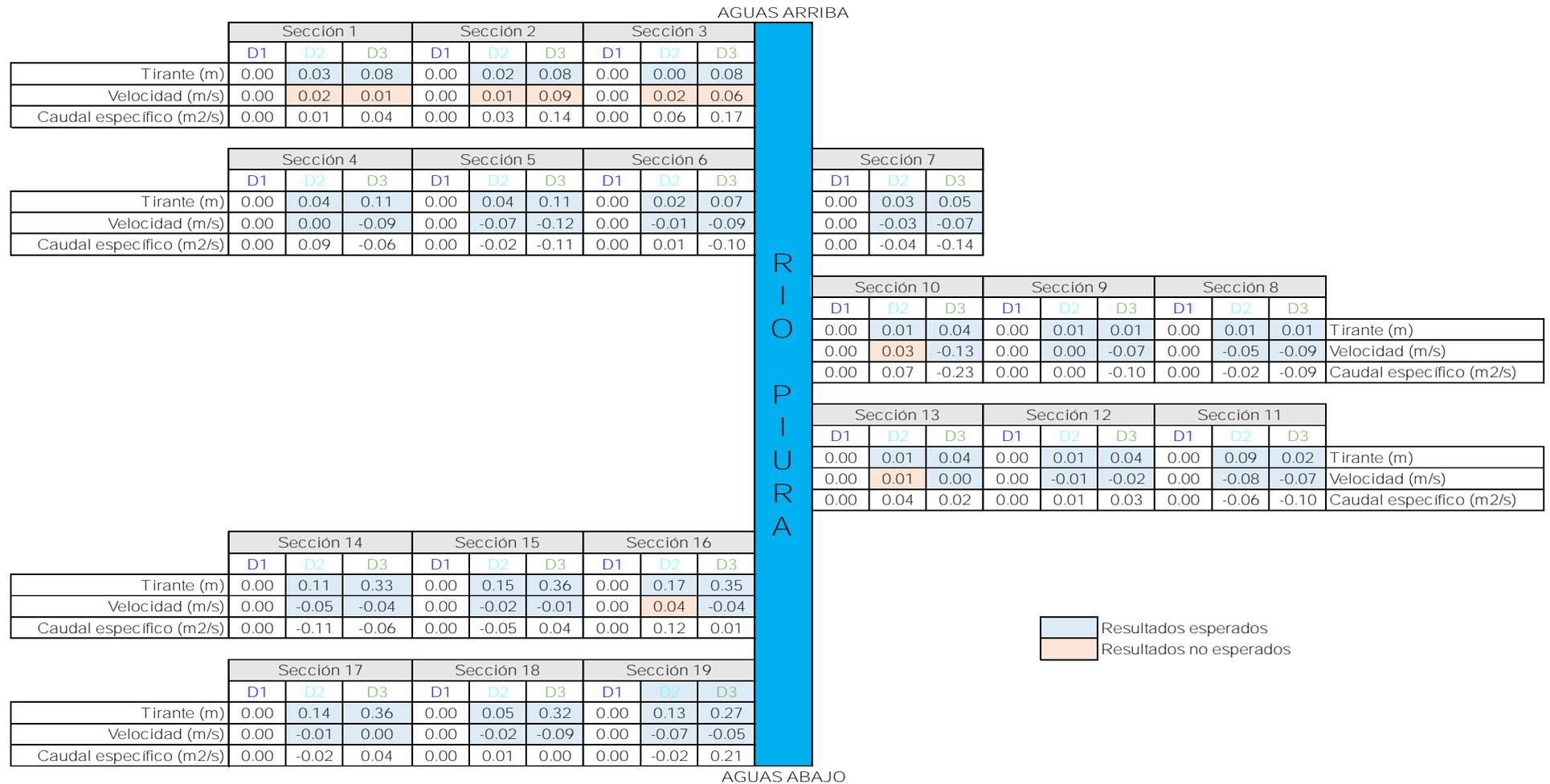
#### **4.9.2 Comparación entre resultados sin y con modificación de coeficientes de rugosidad**

Con la finalidad de realizar un análisis a mayor detalle, se compararon los resultados de las corridas sin y con modificación de coeficientes de rugosidad, para los tres parámetros estudiados. La corrida inicial sin modificación de coeficientes de rugosidad (coeficientes de Manning calibrados) fue comparada con las corridas con la Modificación 1 y Modificación 2. Esta comparación se realizó para el mismo nivel de detalle; es decir, se compararon los resultados obtenidos para el Detalle 2 sin modificar los coeficientes de rugosidad, con los resultados obtenidos para el Detalle 2 modificando los coeficientes de rugosidad. De igual manera se procedió con el Detalle 3. Cabe resaltar que para el Detalle 1 no hay diferencia (todos los valores son cero) dado que para dicho nivel de detalle no se modificaron los coeficientes de rugosidad.



**Figura N° 47**

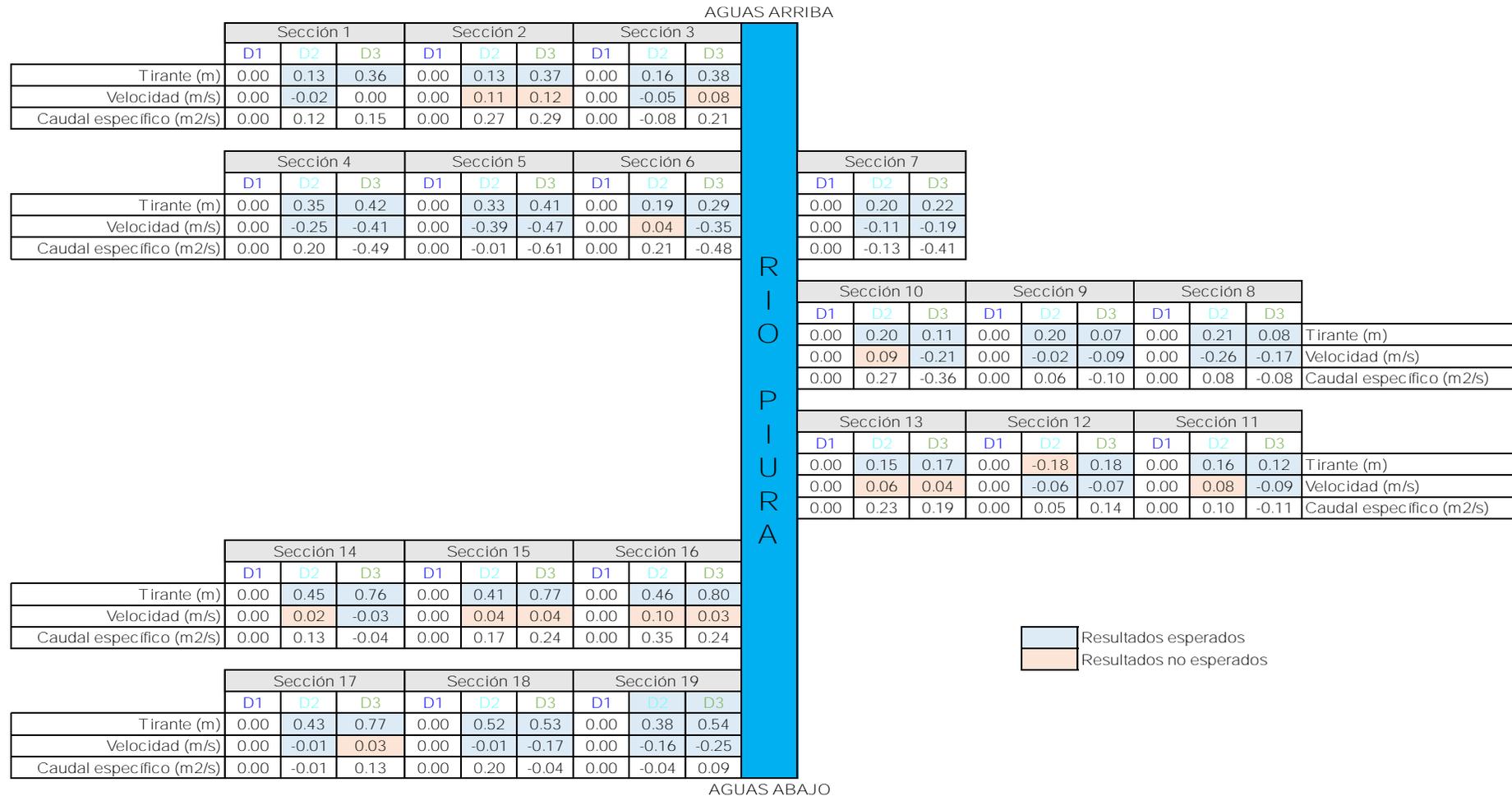
*Comparación entre resultados – Corrida con coeficientes de rugosidad calibrados y Modificación 1*



*Nota:* Elaboración propia

**Figura N° 48**

*Comparación entre resultados – Corrida con coeficientes de rugosidad calibrados y Modificación 2*



Nota: Elaboración propia

Dado que la modificación de los coeficientes de rugosidad consistió en incrementar sus valores para el Detalle 2 y Detalle 3, en un 10%, 20%, 30% y 40%; los resultados esperados serían el incremento de los valores de tirante y la disminución de los valores de velocidad. En la Figura N° 47 y Figura N° 48 se ha resaltado de celeste los resultados que cumplieron con lo esperado, mientras que se ha resaltado de rosado los resultados que tuvieron un comportamiento inverso. Podemos observar que sólo se tuvieron resultados distintos a los esperados para el parámetro de velocidad (para la Modificación 1, en 9 de 19 secciones; mientras que para la Modificación 2, en 14 de 19 secciones), con lo cual se evidencia que la rugosidad de forma (nivel de detalle del catastro urbano) tiene una mayor incidencia sobre la velocidad que la rugosidad de los materiales (coeficientes de Manning asignados).

En las siguientes tablas se presenta un resumen de la comparación entre los resultados de ambas corridas (sin y con modificación de coeficientes de rugosidad):

**Tabla N° 29**

*Rango de variación del tirante (m) al comparar las corridas sin y con modificación de coeficientes de rugosidad*

Nivel de detalle	Modificación 1			Modificación 2		
	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo
D2	0.00	0.06	0.07	0.07	0.26	0.52
D3	0.01	0.14	0.36	0.07	0.39	0.80

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla N° 30**

*Rango de variación de la velocidad (m/s) al comparar las corridas sin y con modificación de coeficientes de rugosidad*

Nivel de detalle	Modificación 1			Modificación 2		
	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo
D2	0.00	-0.02	-0.08	-0.01	-0.06	-0.39
D3	0.00	-0.04	-0.09	0.00	-0.11	-0.47

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla N° 31**

*Rango de variación del caudal específico ( $m^2/s$ ) al comparar las corridas sin y con modificación de coeficientes de rugosidad*

Nivel de detalle	Modificación 1			Modificación 2		
	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo
D2	0.00	0.01	0.12	-0.01	0.11	0.35
D3	0.00	-0.02	-0.23	-0.04	-0.05	-0.61

*Nota:* Elaboración propia

Podemos observar que la variación del tirante fue positiva en todos los casos. Como era de esperarse el Detalle 3 fue el que mayor variación presentó para la Modificación 2, con un valor máximo de 0.80 m. A mayor variación del coeficiente de rugosidad, se presentó mayor variación en el tirante, indistintamente del nivel de detalle del catastro urbano asignado.

Respecto de la velocidad, la variación fue negativa, presentándose mayores diferencias para el Detalle 3 el cual fue sujeto de mayores variaciones en los coeficientes de rugosidad. Se tuvo una variación máxima de -0.47 m/s para la Modificación 2. Como se indicó previamente, hubo casos en los cuales la variación de la velocidad fue inversa a lo esperado.

Finalmente, el parámetro menos afectado fue el caudal específico, con valores promedio que van desde 0.01 a 0.11 m<sup>2</sup>/s.

#### **4.9.3 Comparación de resultados con la línea base (Detalle 1)**

El siguiente análisis consistió en verificar si la modificación de los coeficientes de rugosidad ocasionó que los resultados del Detalle 2 y Detalle 3 se aproximen más a los resultados obtenidos con el Detalle 1 (línea base).

En la Figura N° 49 se muestra la diferencia entre los resultados obtenidos por los niveles de detalle 2 y 3, y la línea base (Detalle 1); para las dos modificaciones del coeficiente de rugosidad. Las siguientes consideraciones deben tomarse en cuenta para una correcta lectura de los resultados:

- Base: corresponde a la corrida original sin modificar los coeficientes de rugosidad.
- M1: corresponde a la corrida modificando los coeficientes de rugosidad para el Detalle 2 y Detalle 3 en un 10% y 20% respectivamente.
- M2: corresponde a la corrida modificando los coeficientes de rugosidad para el Detalle 2 y Detalle 3 en un 30% y 40% respectivamente.
- Los valores negativos indican que los resultados obtenidos son menores que los calculados por el Detalle 1.
- Los valores positivos indican que los resultados obtenidos son mayores que los calculados por el Detalle 1.
- Los valores resaltados de celeste indican que, al modificarse los coeficientes de rugosidad, los resultados se aproximaron más a los calculados por el Detalle 1.
- Los valores resaltados de rosado indican que, al modificarse los coeficientes de rugosidad, los resultados se diferenciaron más de los calculados por el Detalle 1.

En las siguientes tablas se muestra un resumen de los resultados, indicando la cantidad de veces que la modificación de los coeficientes de rugosidad tuvo como

consecuencia que los resultados del Detalle 2 y Detalle 3 se aproximen más a los del Detalle 1:

**Tabla N° 32**

*Comparación de resultados con la línea base (Detalle 1)*

Corrida	Nivel de Detalle	Tirante		Velocidad		Caudal específico	
		# de veces que la diferencia disminuyó	# de veces que la diferencia aumentó	# de veces que la diferencia disminuyó	# de veces que la diferencia aumentó	# de veces que la diferencia disminuyó	# de veces que la diferencia aumentó
M1	D2	11	8	9	10	9	10
	D3	15	4	14	5	13	6
M2	D2	8	11	10	9	11	8
	D3	11	8	12	7	13	6

*Nota:* Elaboración propia

Cuantitativamente, podemos observar que, con el incremento de los coeficientes de rugosidad, los valores de tirante se acercaron a los resultados obtenidos con la línea base, con excepción del Detalle 2 de la Modificación 2. Para la velocidad la tendencia se mantuvo, con excepción del Detalle 2 de la Modificación 1. Finalmente, para el caudal específico, la tendencia también se mantuvo, con excepción del Detalle 2 de la Modificación 1

**Tabla N° 33**

*Variación entre los resultados de la línea base (Detalle 1) y los resultados modificando los coeficientes de rugosidad*

Sección	Modificación 1						Modificación 2					
	Tirante (m)		Velocidad (m/s)		Caudal específico (m <sup>2</sup> /s)		Tirante (m)		Velocidad (m/s)		Caudal específico (m <sup>2</sup> /s)	
	D2	D3	D2	D3	D2	D3	D2	D3	D2	D3	D2	D3
Sección 1	-0.24	-0.15	0.52	-0.32	0.39	-0.29	-0.13	0.13	0.48	-0.34	0.51	-0.18
Sección 2	0.08	0.08	-0.04	-0.04	-0.05	-0.10	0.19	0.37	0.06	-0.01	0.19	0.06
Sección 3	-0.11	-0.04	0.16	-0.02	0.42	-0.08	0.05	0.26	0.10	0.00	0.29	-0.03
Sección 4	-0.94	-0.25	1.23	0.72	1.21	1.27	-0.63	0.06	0.99	0.39	1.32	0.84
Sección 5	-0.82	-0.17	1.47	0.79	1.66	1.44	-0.53	0.12	1.15	0.44	1.66	0.93
Sección 6	-0.38	-0.14	0.60	0.67	0.89	1.20	-0.21	0.08	0.64	0.40	1.08	0.82
Sección 7	-0.31	-0.03	-0.02	-0.18	-0.23	-0.45	-0.14	-0.31	-0.10	-0.31	-0.32	-0.71
Sección 8	0.00	0.24	-0.13	-0.38	-0.30	0.26	0.19	0.31	-0.35	-0.46	-0.19	0.27
Sección 9	-0.02	0.22	-0.06	0.16	-0.08	0.20	0.17	0.28	-0.07	0.14	-0.02	0.20
Sección 10	0.20	0.38	0.11	-0.04	0.14	0.06	0.39	0.46	0.17	-0.12	0.34	-0.07
Sección 11	-0.42	-0.37	-0.29	0.14	-0.49	0.03	-0.35	-0.28	-0.13	0.12	-0.32	0.02

Sección	Modificación 1						Modificación 2					
	Tirante (m)		Velocidad (m/s)		Caudal específico (m <sup>2</sup> /s)		Tirante (m)		Velocidad (m/s)		Caudal específico (m <sup>2</sup> /s)	
	D2	D3	D2	D3	D2	D3	D2	D3	D2	D3	D2	D3
Sección 12	-0.11	-0.44	0.25	0.58	-0.06	0.33	-0.30	-0.30	0.20	0.53	-0.02	0.43
Sección 13	-0.39	-0.53	-0.10	-0.06	-0.47	-0.42	-0.24	-0.39	-0.05	-0.02	-0.27	-0.25
Sección 14	0.24	-0.07	-0.03	-0.12	-0.04	-0.31	0.58	0.36	0.04	-0.12	0.19	-0.28
Sección 15	0.19	-0.09	-0.12	-0.08	-0.21	-0.16	0.45	0.33	-0.05	-0.03	0.01	0.03
Sección 16	0.28	-0.08	0.00	-0.08	0.08	-0.17	0.57	0.37	0.06	-0.01	0.31	0.06
Sección 17	0.30	0.03	0.01	0.06	0.04	0.08	0.58	0.44	0.01	0.09	0.05	0.17
Sección 18	0.06	-0.01	-0.16	-0.10	-0.16	-0.10	0.53	0.19	-0.18	-0.22	0.03	-0.14
Sección 19	0.19	0.03	0.22	0.89	0.22	0.89	0.44	0.30	-0.03	0.24	0.20	0.77
<b>Sum.</b>	<b>-2.20</b>	<b>-1.40</b>	<b>3.64</b>	<b>2.59</b>	<b>2.96</b>	<b>3.69</b>	<b>1.61</b>	<b>2.78</b>	<b>2.94</b>	<b>0.72</b>	<b>5.05</b>	<b>2.93</b>
<b>Prom.</b>	<b>-0.12</b>	<b>-0.07</b>	<b>0.19</b>	<b>0.14</b>	<b>0.16</b>	<b>0.19</b>	<b>0.08</b>	<b>0.15</b>	<b>0.15</b>	<b>0.04</b>	<b>0.27</b>	<b>0.15</b>

Nota: Elaboración propia

Para el parámetro del tirante, las corridas de la Modificación 1 presentaron variaciones menores que la Modificación 2; así mismo, los valores calculados con la Modificación 1 fueron menores que los calculados por el Detalle 1, mientras que las corridas de la Modificación 2 presentaron valores mayores que el Detalle 1. La modificación del coeficiente de rugosidad que brindó resultados más cercanos al Detalle 1 fue el Detalle 3 de la Modificación 1, con una variación promedio de -0.07 m.

Respecto de la velocidad, las corridas de la Modificación 1 presentaron variaciones mayores que la Modificación 2: así mismo, tanto las corridas de la Modificación 1 como de la Modificación 2 presentaron valores mayores que el Detalle 1. La modificación del coeficiente de rugosidad que brindó resultados más cercanos al Detalle 1 fue el Detalle 3 de la Modificación 2, con una variación promedio de 0.04 m/s.

Finalmente, para el caso del caudal específico, las corridas de la Modificación 1 presentaron variaciones menores que la Modificación 2; así mismo, tanto las corridas de la Modificación 1 como de la Modificación 2 presentaron valores mayores que el Detalle 1. La modificación del coeficiente de rugosidad que brindó resultados más cercanos al Detalle 1 fue el Detalle 3 de la Modificación 2, con una variación promedio de 0.15 m<sup>2</sup>/s. Cabe resaltar que hubo coincidencia en la modificación del coeficiente de rugosidad que brindó resultados más cercanos al Detalle 1 para los parámetros de velocidad y caudal específicos, sin embargo, para el caso del tirante, ésta fue distinta.

Figura N° 49

Comparación de resultados con la línea base (Detalle 1)

		Sección 1			Sección 2			Sección 3					
		D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3			
Tirante (m)	Base	-0.27	-0.23		Base	0.06	0.00	Base	-0.11	-0.12			
	M1	-0.24	-0.15		M1	0.08	0.08	M1	-0.11	-0.04			
	M2	-0.13	0.13		M2	0.19	0.37	M2	0.05	0.26			
Velocidad (m/s)	Base	0.50	-0.33		Base	-0.05	-0.13	Base	0.15	-0.08			
	M1	0.52	-0.32		M1	-0.04	-0.04	M1	0.16	-0.02			
	M2	0.48	-0.34		M2	0.06	-0.01	M2	0.10	0.00			
Caudal específico (m2/s)	Base	0.38	-0.33		Base	-0.08	-0.24	Base	0.37	-0.25			
	M1	0.39	-0.29		M1	-0.05	-0.10	M1	0.42	-0.08			
	M2	0.51	-0.18		M2	0.19	0.06	M2	0.29	-0.03			
R I O P I U R A													
		Sección 4			Sección 5			Sección 6			Sección 7		
		D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3
Tirante (m)	Base	-0.98	-0.36		Base	-0.86	-0.29	Base	-0.41	-0.21	Base	-0.34	-0.08
	M1	-0.94	-0.25		M1	-0.82	-0.17	M1	-0.38	-0.14	M1	-0.31	-0.03
	M2	-0.63	0.06		M2	-0.53	0.12	M2	-0.21	0.08	M2	-0.14	-0.31
Velocidad (m/s)	Base	1.24	0.80		Base	1.54	0.91	Base	0.60	0.75	Base	0.01	-0.11
	M1	1.23	0.72		M1	1.47	0.79	M1	0.60	0.67	M1	-0.02	-0.18
	M2	0.99	0.39		M2	1.15	0.44	M2	0.64	0.40	M2	-0.10	-0.31
Caudal específico (m2/s)	Base	1.12	1.33		Base	1.67	1.54	Base	0.87	1.30	Base	-0.19	-0.31
	M1	1.21	1.27		M1	1.66	1.44	M1	0.89	1.20	M1	-0.23	-0.45
	M2	1.32	0.84		M2	1.66	0.93	M2	1.08	0.82	M2	-0.32	-0.71
R I O P I U R A													
		Sección 10			Sección 9			Sección 8					
		D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3			
Tirante (m)	Base	0.19	0.34		Base	-0.02	0.21	Base	-0.02	0.23			
	M1	0.20	0.38		M1	-0.02	0.22	M1	0.00	0.24			
	M2	0.39	0.46		M2	0.17	0.28	M2	0.19	0.31			
Velocidad (m/s)	Base	0.08	0.09		Base	-0.05	0.23	Base	-0.09	-0.29			
	M1	0.11	-0.04		M1	-0.06	0.16	M1	-0.13	-0.38			
	M2	0.17	-0.12		M2	-0.07	0.14	M2	-0.35	-0.46			
Caudal específico (m2/s)	Base	0.07	0.29		Base	-0.08	0.29	Base	-0.28	0.35			
	M1	0.14	0.06		M1	-0.08	0.20	M1	-0.30	0.26			
	M2	0.34	-0.07		M2	-0.02	0.20	M2	-0.19	0.27			
R I O P I U R A													
		Sección 13			Sección 12			Sección 11					
		D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3			
Tirante (m)	Base	-0.39	-0.56		Base	-0.11	-0.48	Base	-0.51	-0.40			
	M1	-0.39	-0.53		M1	-0.11	-0.44	M1	-0.42	-0.37			
	M2	-0.24	-0.39		M2	-0.30	-0.30	M2	-0.35	-0.28			
Velocidad (m/s)	Base	-0.12	-0.06		Base	0.26	0.60	Base	-0.21	0.21			
	M1	-0.10	-0.06		M1	0.25	0.58	M1	-0.29	0.14			
	M2	-0.05	-0.02		M2	0.20	0.53	M2	-0.13	0.12			
Caudal específico (m2/s)	Base	-0.51	-0.44		Base	-0.07	0.29	Base	-0.43	0.13			
	M1	-0.47	-0.42		M1	-0.06	0.33	M1	-0.49	0.03			
	M2	-0.27	-0.25		M2	-0.02	0.43	M2	-0.32	0.02			
R I O P I U R A													
		Sección 14			Sección 15			Sección 16					
		D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3			
Tirante (m)	Base	0.13	-0.40		Base	0.04	-0.45	Base	0.11	-0.43			
	M1	0.24	-0.07		M1	0.19	-0.09	M1	0.28	-0.08			
	M2	0.58	-0.36		M2	0.45	0.33	M2	0.57	0.37			
Velocidad (m/s)	Base	0.02	-0.08		Base	-0.09	-0.07	Base	-0.04	0.53			
	M1	-0.03	-0.12		M1	-0.12	-0.08	M1	0.00	-0.08			
	M2	0.04	-0.12		M2	-0.05	-0.03	M2	0.06	-0.01			
Caudal específico (m2/s)	Base	0.06	-0.25		Base	-0.16	-0.21	Base	-0.04	-0.18			
	M1	-0.04	-0.31		M1	-0.21	-0.16	M1	0.08	-0.17			
	M2	0.19	-0.28		M2	0.01	0.03	M2	0.31	0.06			
R I O P I U R A													
		Sección 17			Sección 18			Sección 19					
		D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3			
Tirante (m)	Base	0.16	-0.33		Base	0.01	-0.33	Base	0.05	-0.23			
	M1	0.30	0.03		M1	0.06	-0.01	M1	0.19	0.03			
	M2	0.58	-0.44		M2	0.53	0.19	M2	0.44	0.30			
Velocidad (m/s)	Base	0.03	0.06		Base	-0.16	-0.05	Base	0.13	0.49			
	M1	0.01	0.06		M1	-0.19	-0.14	M1	0.06	0.44			
	M2	0.01	0.09		M2	-0.18	-0.22	M2	-0.03	0.24			
Caudal específico (m2/s)	Base	0.06	0.04		Base	-0.17	-0.09	Base	0.24	0.69			
	M1	0.04	0.08		M1	-0.16	-0.10	M1	0.22	0.89			
	M2	0.05	0.17		M2	0.03	-0.14	M2	0.20	0.77			

AGUAS ABAJO

Nota: Elaboración propia

## Capítulo 5

### Análisis de beneficios de la implementación de infraestructura de protección

#### 5.1 Consideraciones para el análisis

A continuación, se detallan las principales consideraciones tomadas en cuenta para realizar el análisis de los beneficios de la implementación de infraestructura de protección:

##### 5.1.1 *Respecto del evento hidrológico analizado*

El evento hidrológico analizado corresponde al calculado para el diseño de las obras de protección, el cual considero un periodo de retorno de 100 años con un caudal de 4676 m<sup>3</sup>/s.

##### 5.1.2 *Respecto de la infraestructura de protección*

El análisis fue realizado tomando como base el diseño de obras de protección propuesto por los siguientes proyectos:

###### 5.1.2.1 *Proyecto 1*

- Nombre: MEJORAMIENTO DEL SERVICIO DE PROTECCION CONTRA INUNDACIONES DE LAS CIUDADES DE PIURA Y CASTILLA, MARGEN DERECHA E IZQUIERDA DEL RIO PIURA EN EL TRAMO: REPRESA LOS EJIDOS AL PUENTE CACERES, DISTRITOS PIURA Y CASTILLA, DE LA PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE PIURA.
- Caudal de diseño: 4676 m<sup>3</sup>/s, correspondiente a un periodo de retorno de 100 años.
- Descripción: El Proyecto 1 considera los siguientes componentes:
  - Encauzamiento del río: Según el Consorcio Los Ejidos (2018) “La longitud del río Piura en el tramo en estudio es de aproximadamente 2.90 km con una Pendiente promedio longitudinal del fondo del cauce de 0,35%, sin embargo, el diseño del encauzamiento aumenta está pendiente a 0.50% para mejorar la capacidad de descarga del río (Cota 22,0 Los Ejidos y 20,60 en la progresiva 2+800 a la altura del puente Cáceres). La longitud del encauzamiento es de aproximadamente 2.90 kilómetros. El encauzamiento del proyecto ha planteado la alineación del río en el centro del cauce y la descolmatación (extracción del material fuera del cauce) del volumen de sedimentos depositado en el tramo de estudio. La limpieza del cauce le da una mayor facilidad al río para desaguar los caudales de avenidas. El volumen a descolmatar del Río es de aproximadamente 800 000 m<sup>3</sup>.” (p.4).
  - Protección de Ribera: Según el Consorcio Los Ejidos (2018) “... se ha planteado la construcción de un dique de tierra protegiendo la cara húmeda con un sistema multicomponente de confinamiento geocelular flexible relleno con

concreto y con la colocación de tablestacas de anclaje en la parte inferior del dique y un bordillo de una altura de un metro en la corona del mismo.” (p.4).

### **5.1.2.2 Proyecto 2**

- Nombre: MEJORAMIENTO Y AMPLIACIÓN DEL SERVICIO DE PROTECCIÓN CONTRA INUNDACIONES DE LAS CIUDADES DE PIURA Y CASTILLA, ENTRE EL PUENTE CACERES Y EL FUTURO PUENTE INTEGRACIÓN DE LA MARGEN DERECHA PROG. 2+665 HASTA PROG 5+432 Y LA MARGEN IZQUIERDA PROG 2+540 HASTA PROG 5+370, DISTRITOS DE PIURA Y CASTILLA, PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE PIURA.
- Caudal de diseño: 4600 m<sup>3</sup>/s, correspondiente a un periodo de retorno de 100 años.
- Descripción: Según el Consorcio Protección Piura y Castilla (2018) “Por haber resistido más de 35 años, el Sistema Único con el accesorio antisocavante, se opta continuar con la PROTECCIÓN CON SISTEMA TAPETE-CABLE CONCRETO. Esta solución considerada como óptima se propone también para los sectores donde actualmente no existe protección de defensas ribereñas, vale decir la margen izquierda de los sectores I y II usando de la misma tecnología de ejecución de las obras de protección de los tramos con tablestacas, losas inclinadas de concreto, colchón antisocavante tapete-cable concreto. Cabe comentar en caso se encuentre suelos firmes, confinados, se perfilará el suelo para darle la sección hidráulica y colocar los elementos de revestimientos para disminuir la rugosidad del revestimiento.” (p.29). Adicionalmente, el Consorcio Protección Piura y Castilla (2018) indica que “En el subtramo V, se ha propuesto aplicar una defensa ribereña con rocas en ambas márgenes, con un colchón antisocavante tipo colchón Reno e=0.30 m, que soporta el paso de las avenidas máximas (4600 m<sup>3</sup>/s) y las socavaciones, al estar la capacidad portante de 2.1 Kg/cm<sup>2</sup> á 3.0 Kg/cm<sup>2</sup>.” (p.29).
- Cabe resaltar que el Consorcio Protección Piura y Castilla indica que, para un adecuado funcionamiento de la solución planteada, se debe ejecutar el encauzamiento del río considerado en el Proyecto 1.

### **5.1.3 Respecto de los escenarios modelados**

Se han considerado tres diferentes escenarios para analizar los beneficios de la implementación de infraestructura de protección, cuya diferencia se encuentra en la cota de fondo asumida para el cauce, la cual ha sido determinada para la sección correspondiente al puente Cáceres. Las cotas de fondo aguas arriba y aguas abajo del puente Cáceres fueron modificadas para mantener la pendiente de fondo original. A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de los escenarios:

### **5.1.3.1 Escenario 1**

Considera el fondo del cauce del río Piura en la cota 16 m.s.n.m. para la sección del puente Cáceres, con libre salida o desembocadura al mar. Representa las condiciones que se tuvieron en el FEN del año 1998.

### **5.1.3.2 Escenario 2**

Considera el fondo del cauce del río Piura en la cota 20.8 m.s.n.m. para la sección del puente Cáceres. Representa las condiciones que se tuvieron en FEN 2017 durante la ocurrencia del hidrograma.

### **5.1.3.3 Escenario 3**

Considera el fondo del cauce del río Piura en la cota 22 m.s.n.m. para la sección del puente Cáceres, sin libre salida o desembocadura al mar. Es el escenario más cercano a las condiciones del cauce antes de la ocurrencia del FEN 2017. Las cotas de fondo del cauce son muy similares a las simuladas en el modelo calibrado correspondiente a la Línea Base descrita en el Capítulo 4.

### **5.1.4 Respetto de los parámetros del modelo hidráulico**

Los parámetros utilizados para el modelo hidráulico considerando la implementación de infraestructura de protección fueron los correspondientes al modelo hidráulico calibrado. Sin embargo, dado que la cota del fondo del cauce del río Piura fue modificada para cada uno de los tres escenarios modelados, las condiciones de frontera aguas abajo también tuvieron que modificarse. La modificación consistió en acondicionar la curva cota vs caudal, guardando relación con la modificación de la cota de fondo para cada escenario.

## **5.2 Análisis de los resultados del modelamiento hidráulico con infraestructura de protección**

### **5.2.1 Perfil hidráulico del río Piura**

Con la finalidad de identificar el comportamiento de la infraestructura de protección bajo los tres escenarios modelados, se procedió a analizar en primer lugar perfil hidráulico del río Piura, para lo cual se superpuso la siguiente información:

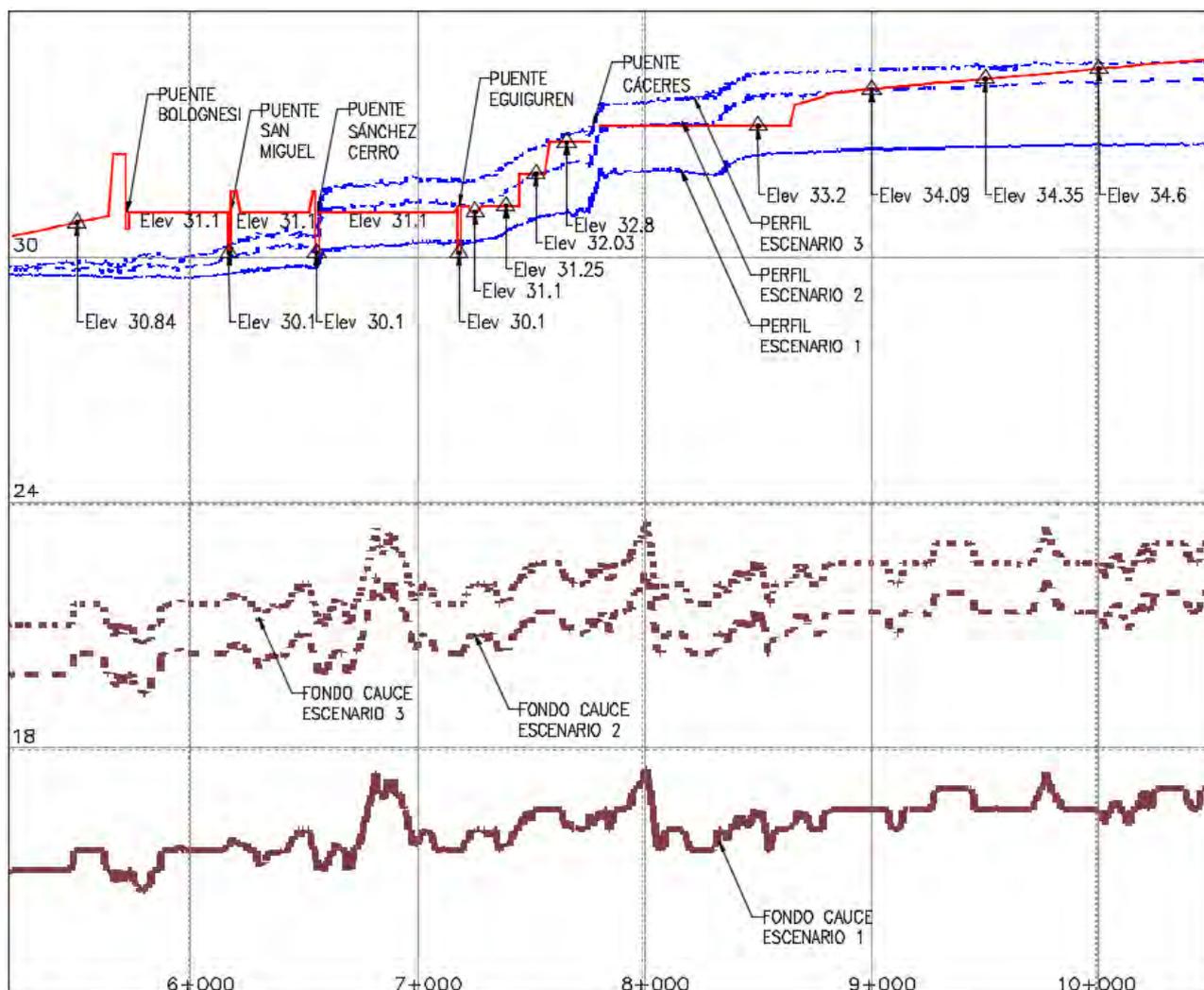
- Cota de las coronas propuestas para la infraestructura de protección.
- Ubicación de los puentes Cáceres, Eguiguren, Sánchez Cerro, San Miguel y Bolognesi.
- Fondo del cauce del río Piura para los tres escenarios analizados.
- Perfil del espejo de agua calculado por el modelo hidráulico para los tres escenarios analizados.

En la

Figura N° 50 se presenta dicho perfil, en el cual se pueden apreciar los tramos en los cuales el nivel de agua modelado se encuentra por encima o por debajo de las cotas de la corona de la infraestructura de protección.

### Figura N° 50

*Perfil hidráulico del río Piura con infraestructura de protección bajo los tres escenarios analizados*



Nota: Elaboración propia

A continuación, se presenta el análisis de los resultados respecto de la elevación propuesta para la corona de la infraestructura de protección:

- Para el Escenario 1: La cota de corona propuesta en el diseño resulta suficiente en la totalidad de la longitud de la infraestructura de protección. Sólo se detectan dos puntos

vulnerables en los cuales ocurriría el desbordamiento, los que corresponden a los puentes Eguiguren y Sánchez Cerro.

- Para el Escenario 2: La cota de corona propuesta en el diseño resulta suficiente para un primer tramo, delimitado hasta el punto en el cual la corona alcanza la cota 34.09 m.s.n.m.. Desde dicho punto hasta el cruce con el puente Cáceres, la cota propuesta se encuentra por debajo del nivel de agua modelado; siendo ésta insuficiente para evitar el desbordamiento del río. Desde el puente Cáceres hasta el punto en el cual la corona alcanza la elevación 32.03 m.s.n.m., la cota propuesta en el diseño resulta suficiente, encontrándose por encima del nivel de agua modelado. Desde dicho punto hasta el cruce con el puente Sánchez Cerro, la cota propuesta se encuentra nuevamente por debajo del nivel de agua modelado, resultando insuficiente para evitar el desbordamiento. Finalmente, desde el cruce con el puente Sánchez Cerro hasta el final de la infraestructura de protección diseñada, la cota propuesta en el diseño resulta suficiente, encontrándose por encima del nivel de agua modelado.
- Para el Escenario 3: La cota de corona propuesta en el diseño se encuentra por debajo del nivel de agua modelado prácticamente el inicio de la infraestructura de protección, hasta el cruce con el puente Sánchez Cerro, siendo ésta insuficiente para evitar el desbordamiento del río. Finalmente, desde el cruce con el puente Sánchez Cerro hasta el final de la infraestructura de protección diseñada, la cota propuesta en el diseño resulta suficiente, encontrándose por encima del nivel de agua modelado.

### **5.2.2 Secciones transversales al cauce del río Piura**

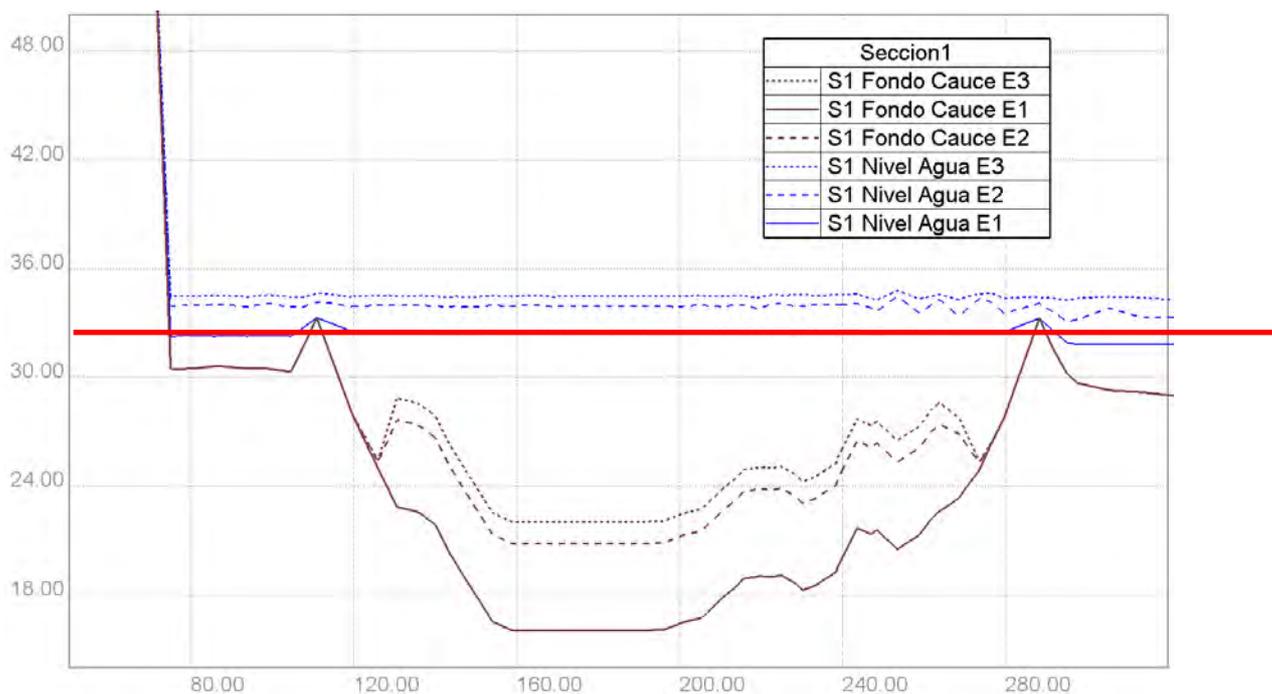
Con la finalidad de realizar un mayor análisis sobre los resultados obtenidos del perfil hidráulico del río Piura, se procedió a generar secciones transversales en los tramos críticos identificados. A continuación, se describen las secciones analizadas:

- Sección 1: Ubicada en la progresiva 8+500, aguas arriba del puente Cáceres. Se verifica que para el Escenario 1 la cota de corona propuesta en el diseño resulta suficiente, evitándose el desborde; pero para el caso de los Escenarios 2 y 3, la cota de corona propuesta en el diseño se encuentra por debajo del nivel de agua modelado, siendo ésta insuficiente para evitar el desbordamiento del río.
- Sección puente Cáceres: Se verifica que para el Escenario 1 se evita el desborde; pero para el caso de los Escenarios 2 y 3, ocurre el desbordamiento del río.
- Sección 2: Ubicada en la progresiva 7+000, entre el puente Cáceres y el puente Sánchez Cerro. Se verifica que para el Escenario 1 la cota de corona propuesta en el diseño resulta suficiente, evitándose el desborde; pero para el caso de los Escenarios 2 y 3, la cota de corona propuesta en el diseño se encuentra por debajo del nivel de agua modelado, siendo ésta insuficiente para evitar el desbordamiento del río.

- Sección puente Sánchez Cerro: Se verifica que se evita el desborde para los tres escenarios.
- Sección 3: Se verifica que se evita el desborde para los tres escenarios.
- Sección puente Bolognesi: Se verifica que se evita el desborde para los tres escenarios.

**Figura N° 51**

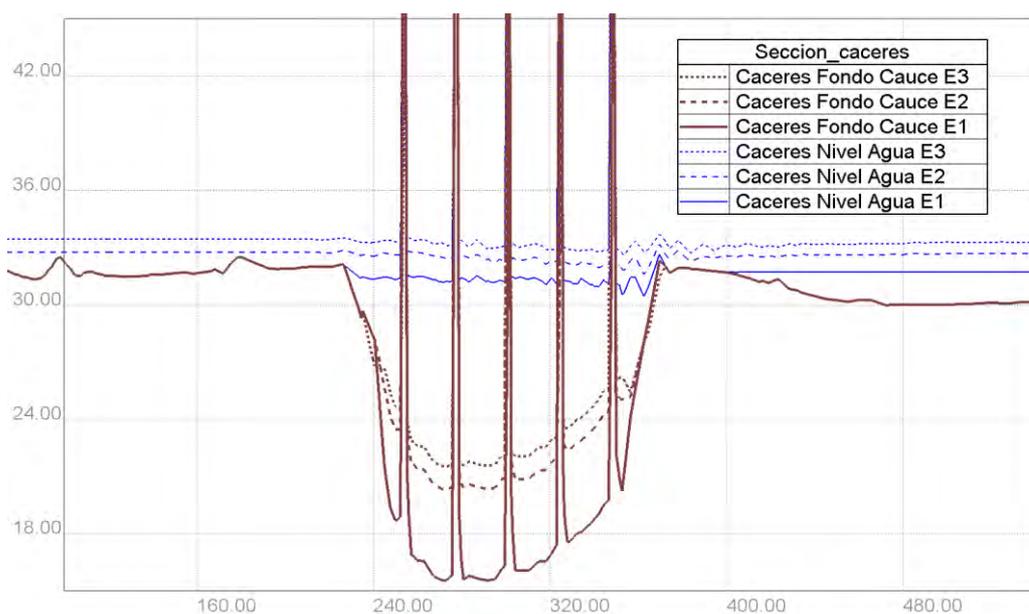
*Sección 1 con infraestructura de protección bajo los tres escenarios analizados*



*Nota: Elaboración propia*

**Figura N° 52**

*Sección puente Cáceres con infraestructura de protección bajo los tres escenarios analizados*

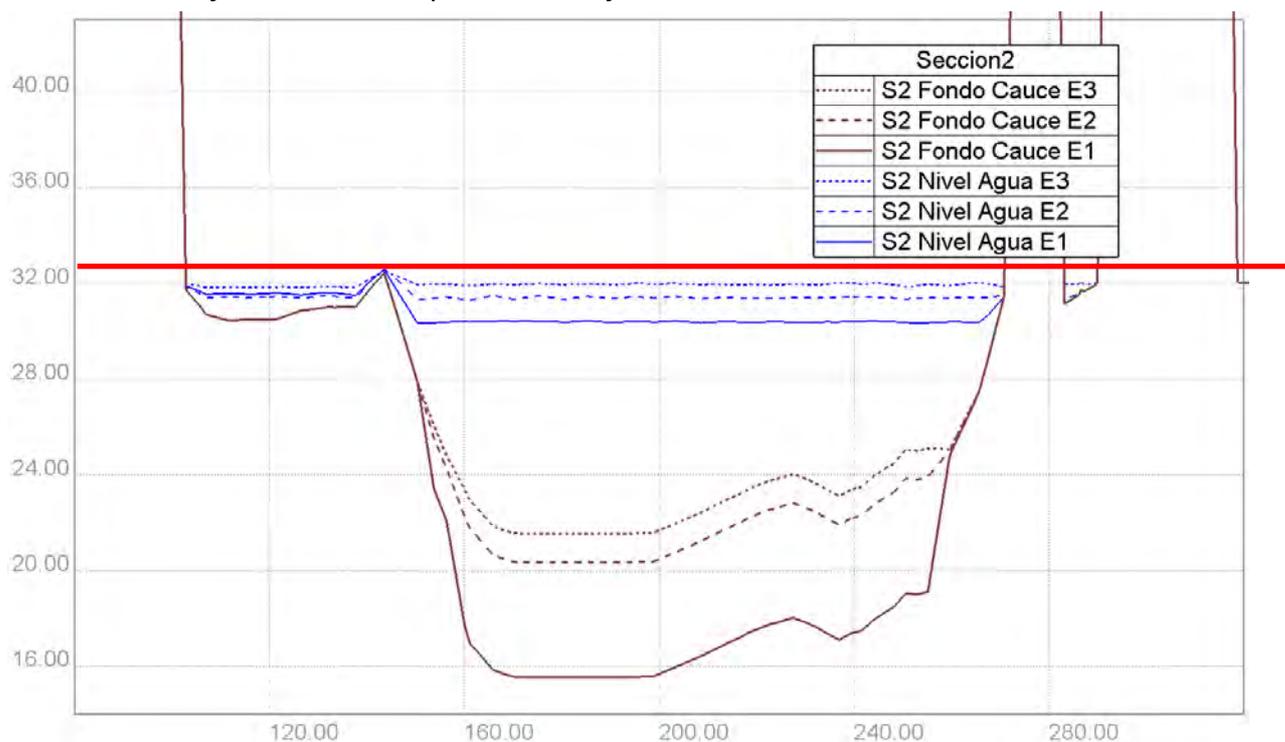


Nota:

Elaboración propia

**Figura N° 53**

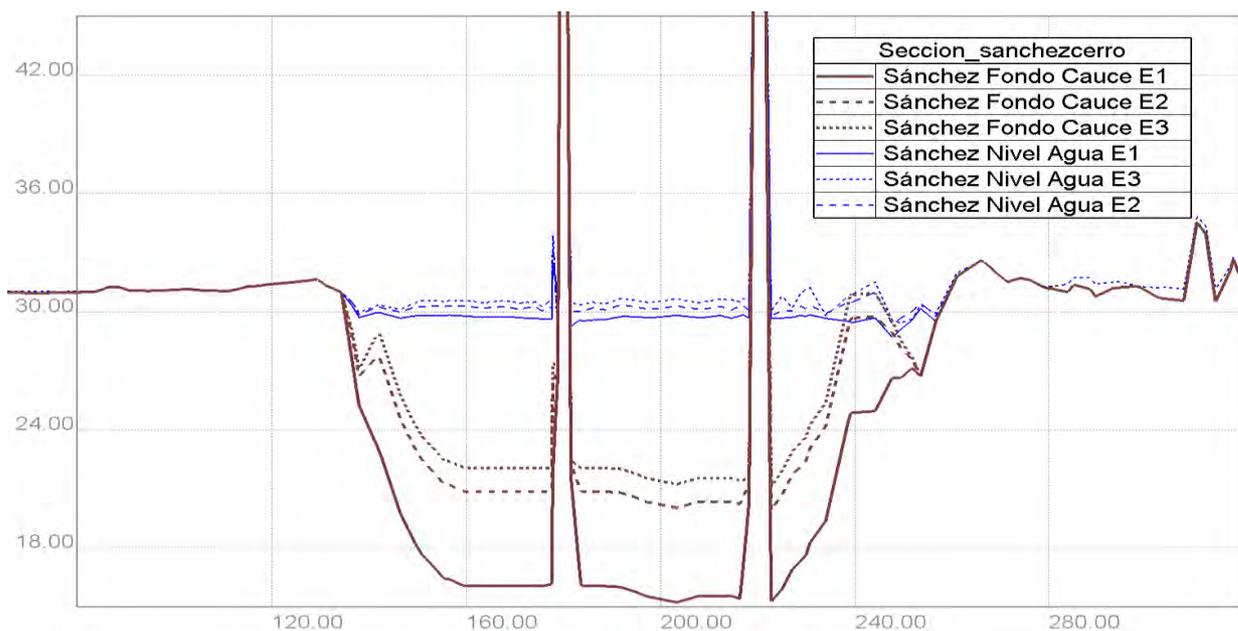
*Sección 2 con infraestructura de protección bajo los tres escenarios analizados*



Nota: Elaboración propia

**Figura N° 54**

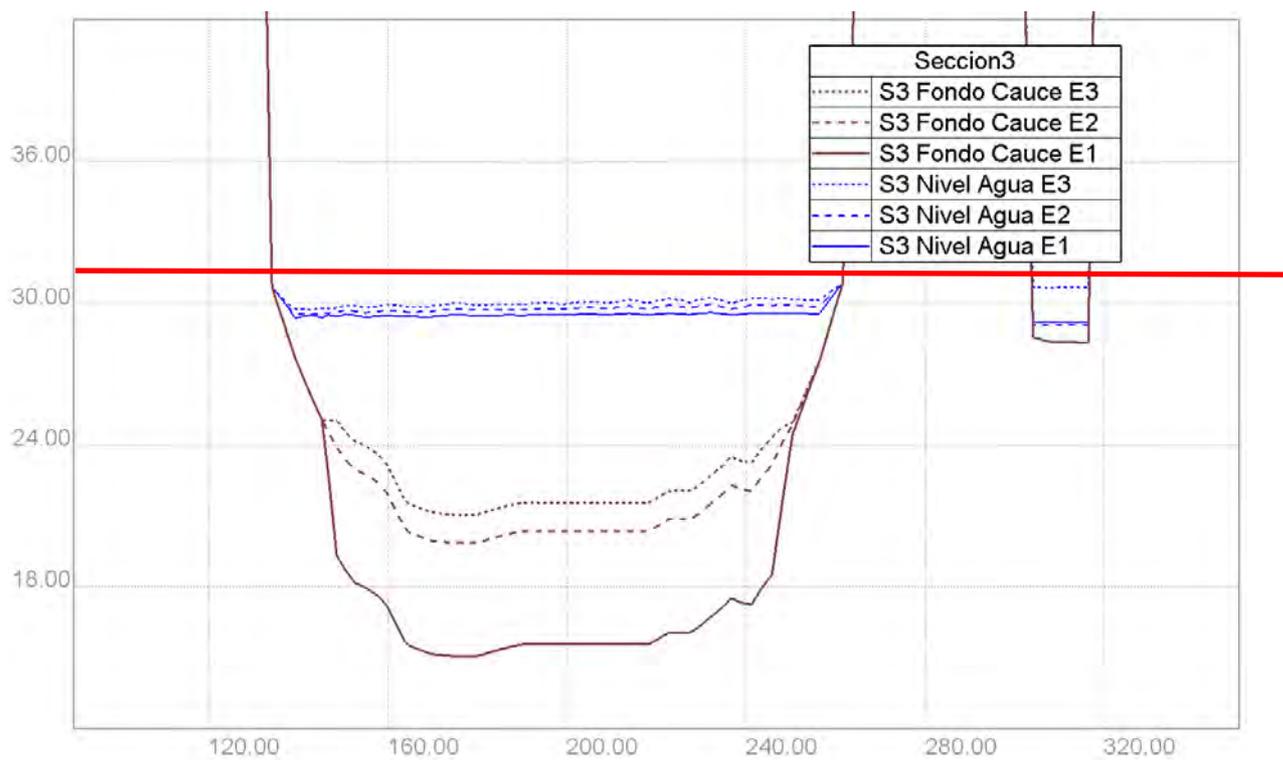
*Sección puente Sánchez Cerro con infraestructura de protección bajo los tres escenarios analizados*



Nota: Elaboración propia

**Figura N° 55**

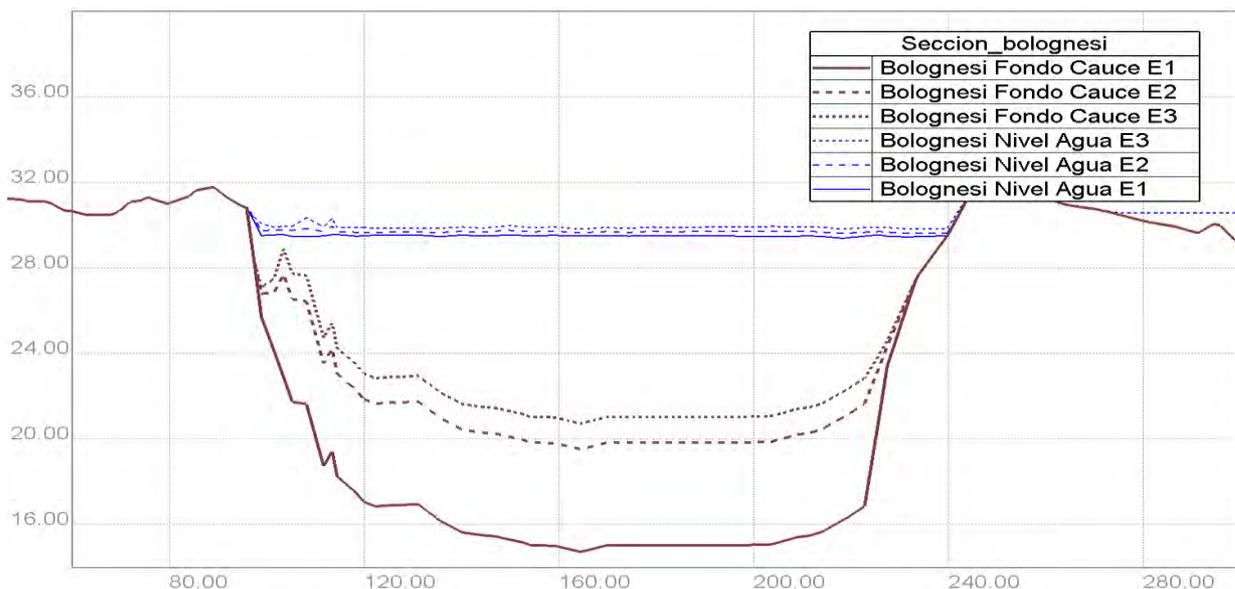
*Sección 3 con infraestructura de protección bajo los tres escenarios analizados*



Nota: Elaboración propia

**Figura N° 56**

*Sección puente Bolognesi con infraestructura de protección bajo los tres escenarios analizados*



*Nota:* Elaboración propia

Con el análisis de las secciones transversales se verifica que existen tramos en los cuales la cota propuesta en el diseño de las obras de protección resulta insuficiente para contener el caudal de diseño dentro del cauce principal, para determinados escenarios. Adicionalmente, se verifica que los puentes, con excepción del puente Bolognesi, son puntos vulnerables por donde se generaría el desborde, incluso a pesar de que la cota de las defensas sea mayor que el nivel del agua modelado.

Considerando esta situación, la sola implementación de infraestructura de protección resulta insuficiente para evitar el desborde del río Piura y la consecuente inundación del área urbana, por lo que se deben considerar medidas adicionales complementarias, como reservorios de regulación que permitan disminuir los caudales pico de los hidrogramas y el asegurar la desembocadura del río Piura al Océano Pacífico.

### **5.2.3 Áreas de inundación**

Para realizar el análisis del efecto que tiene la infraestructura de protección propuesta sobre el área de inundación, se procedió a realizar dos comparaciones:

#### **5.2.3.1 Comparación entre los resultados de línea base y el Escenario 3**

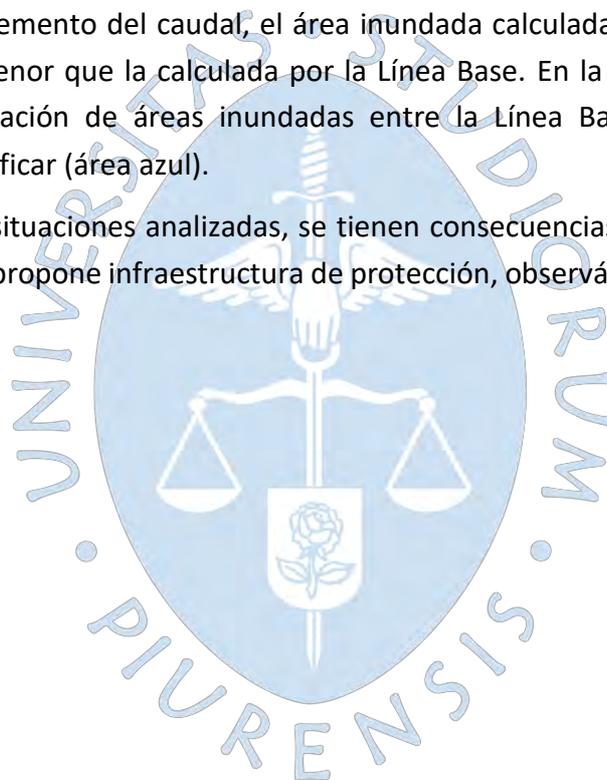
Se realizó la comparación entre las áreas de inundación calculadas por el modelo calibrado sin estructuras de protección (línea base) y el Escenario 3. Se realiza la comparación entre estos dos modelos dado que son los que presentan menor diferencia entre la cota de fondo de cauce (sólo 0.45 m de diferencia).

Dado que la Línea Base fue modelada con el hidrograma ocurrido en el FEN 2017 (caudal pico de  $3468 \text{ m}^3/\text{s}$ ), se realizó una corrida adicional del Escenario 3 bajo las mismas condiciones, de manera de realizar una comparación adecuada.

En la Figura N° 59 se puede observar la comparación de áreas inundadas entre la Línea Base (área celeste) y el Escenario 3 (área azul). Se puede observar que la implementación de infraestructura de protección (Escenario 3) tiene como consecuencia la disminución de las áreas inundadas, pero no se consigue evitar por completo dicha situación.

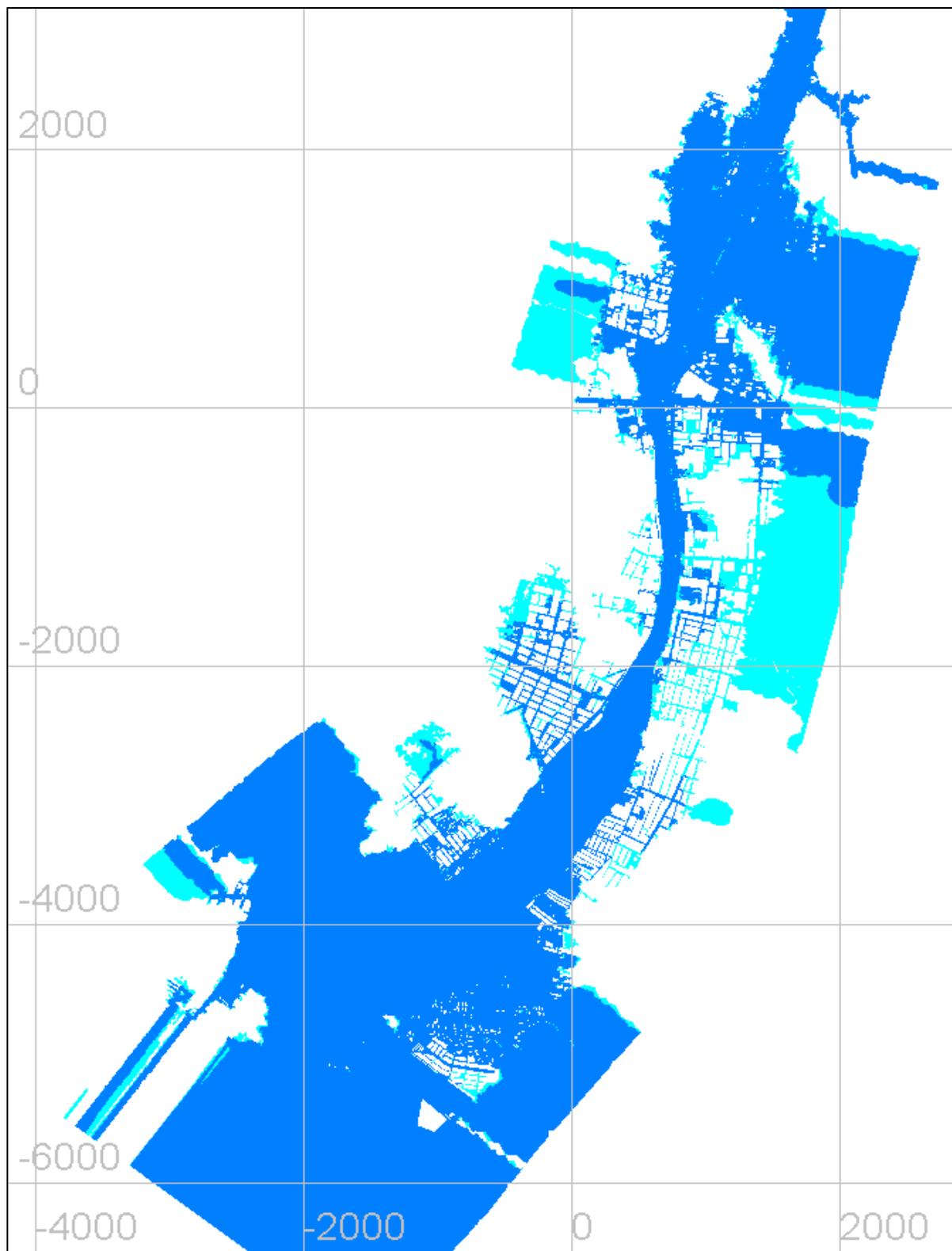
Adicionalmente, se realizó la comparación entre la Línea Base (caudal pico de  $3468 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y el Escenario 3 sin modificar (caudal pico de  $4676 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Se evidenció que, a pesar del significativo incremento del caudal, el área inundada calculada por el Escenario 3 sin modificar resultó menor que la calculada por la Línea Base. En la Figura N° 58 se puede observar la comparación de áreas inundadas entre la Línea Base (área celeste) y el Escenario 3 sin modificar (área azul).

Para ambas situaciones analizadas, se tienen consecuencias positivas aguas abajo del tramo donde se propone infraestructura de protección, observándose una disminución en el área inundada.



**Figura N° 57**

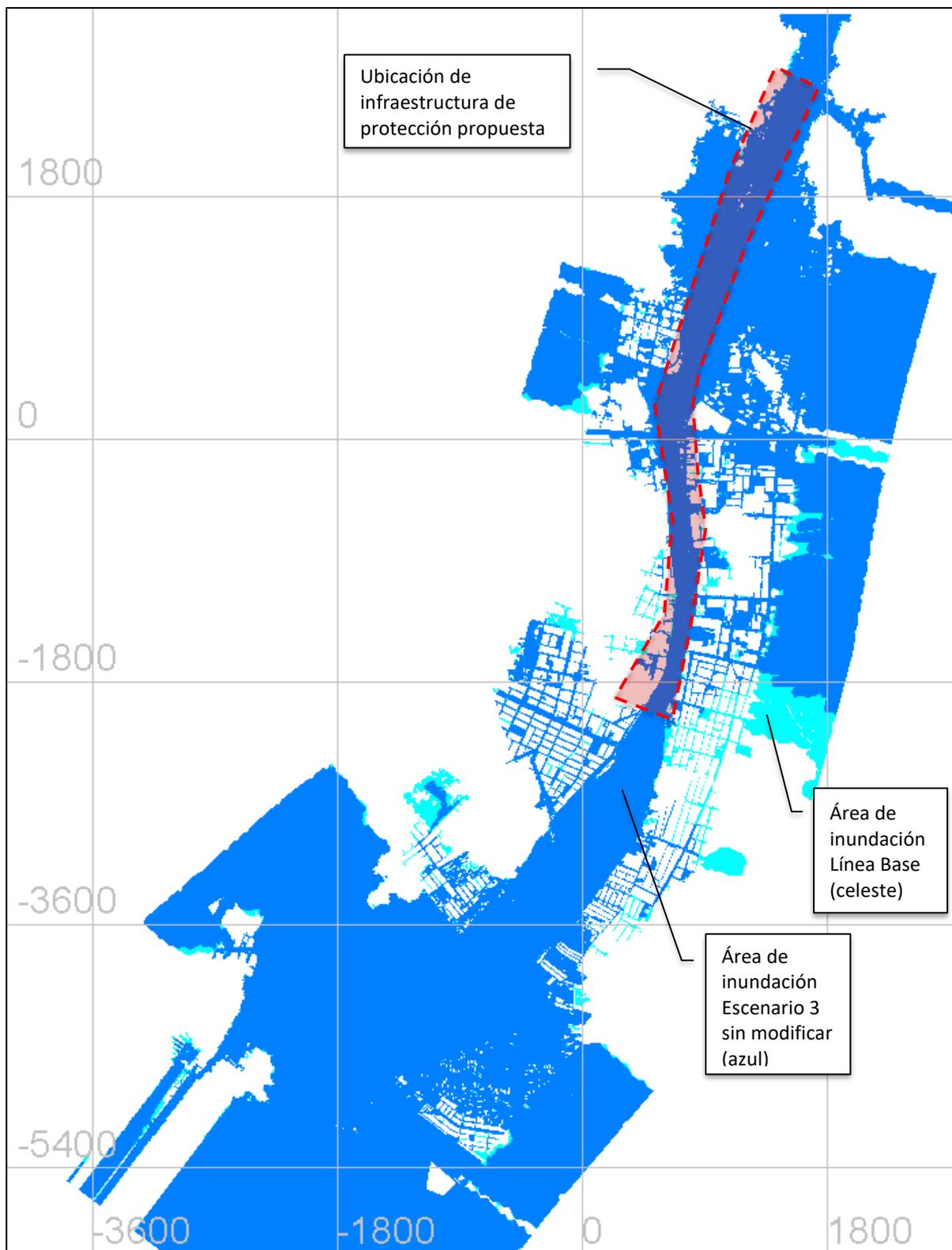
*Comparación entre áreas de inundación – Línea Base y Escenario 3 – Hidrograma FEN 2017*



*Nota:* Elaboración propia

**Figura N° 58**

Comparación entre áreas de inundación – Línea Base y Escenario 3 sin modificar –  
Hidrograma FEN 2017 e Hidrograma de diseño



Nota: Elaboración propia

### **5.2.3.2 Comparación entre los tres escenarios modelados**

Se realizó la comparación entre las áreas inundadas calculadas por cada escenario modelado. Esta comparación se realizó utilizando los resultados obtenidos de los modelos considerando el hidrograma de diseño de la infraestructura de protección, el cual presenta un caudal pico de 4676 m<sup>3</sup>/s. En la Figura N° 59 se realiza dicha comparación.

Tal y como se evidenció al analizar el perfil hidráulico del río Piura y las secciones transversales, observamos que el Escenario 1 es el que menor impacto presenta (menor área inundada). Sin bien en los análisis anteriores se evidenciaba que la cota de corona propuesta en el diseño resultaba suficiente para evitar el desborde en la mayor parte de la longitud propuesta para la protección, se corrobora que la inundación del área urbana persiste, pudiendo ocurrir el desborde del río en los cruces de los puentes.

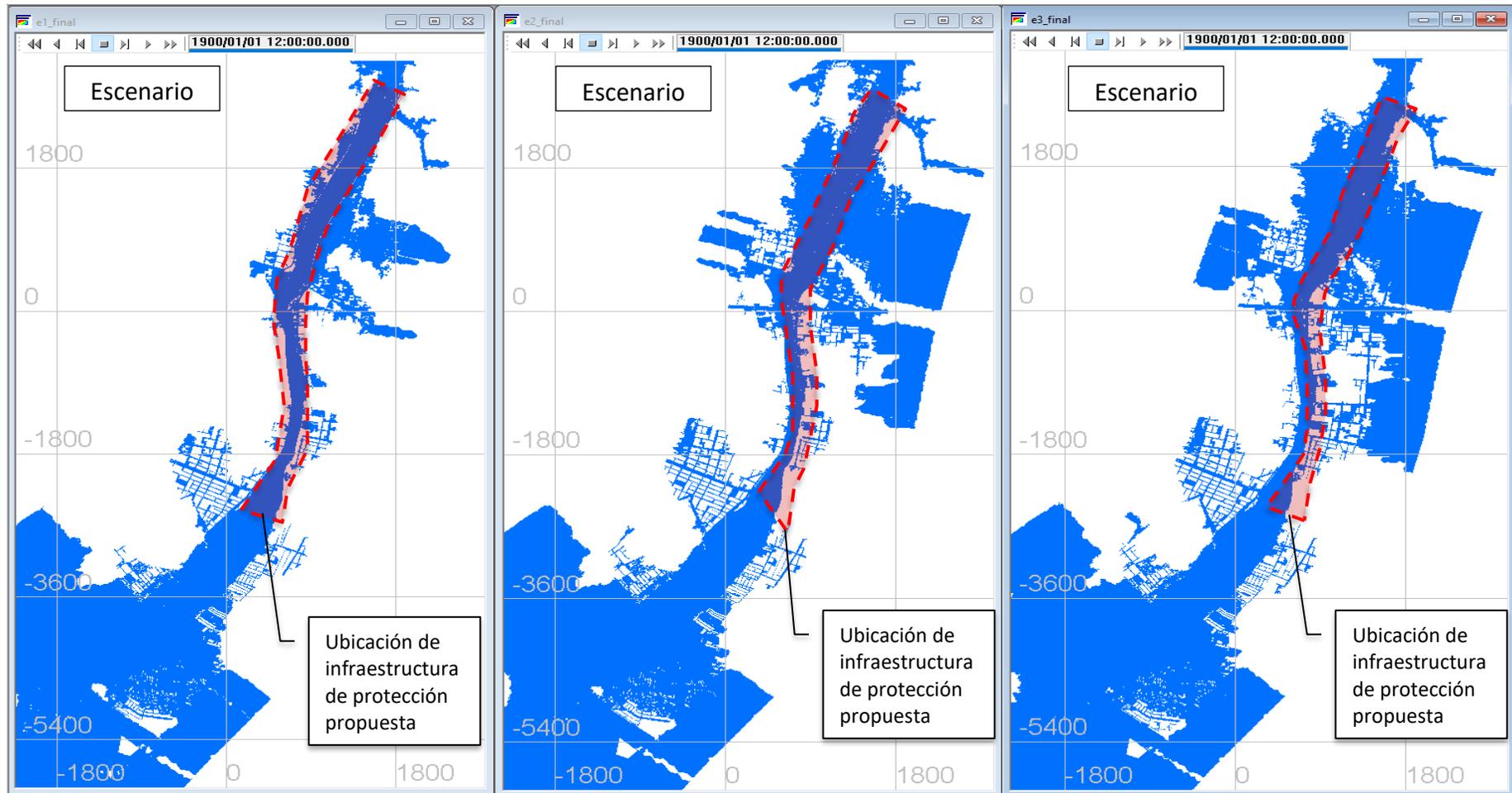
Para el Escenario 2 se evidencia que el desborde ocurre desde aguas arriba del cruce con el puente Cáceres, siendo este también un punto donde ocurre el desborde del río. Al igual que para el Escenario 1, las áreas inundadas se reducen significativamente desde el cruce con el puente Sánchez Cerro hacia aguas abajo, hasta el fin del tramo con infraestructura de protección propuesta.

Para el Escenario 3 se evidencia que la inundación de la zona urbana ocurre de inicio a fin del tramo con infraestructura de protección propuesta, disminuyendo desde el cruce con el puente Sánchez Cerro hacia aguas abajo. Como se ha indicado anteriormente, la infraestructura de protección logra reducir las áreas de inundación respecto de la situación de línea base (sin infraestructura de protección). Éste resulta ser el escenario más crítico, en el cual se produce una mayor área inundada y en consecuencia mayores impactos.

Cabe resaltar que aguas abajo del fin del tramo donde se propone infraestructura de protección, no se presenta una diferencia significativa entre las áreas de inundación para cada uno de los escenarios analizados.

Figura N° 59

Comparación de áreas inundadas para los escenarios modelados con infraestructura de protección



Nota: Elaboración propia

## Conclusiones

### Discusión de resultados

#### ***Respecto de los resultados del modelo hidráulico calibrado***

- Respecto de las condiciones hidráulicas en el cauce del río Piura, las principales variaciones entre los diferentes niveles de detalle catastral se dieron para los parámetros de tirante y velocidad; sin embargo, estas variaciones no fueron significativas. Para el caso del tirante, las variaciones máximas se encuentran en el orden de 0.60 m; mientras que, para la velocidad, las variaciones máximas se encuentran en el orden de 0.30 m/s.
- Respecto de las condiciones hidráulicas en el cauce del río Piura, el parámetro correspondiente al caudal específico fue el que menor diferencias presentó para los resultados de los tres modelos con diferentes niveles de detalle catastral; teniéndose diferencias máximas del orden de 0.30 m<sup>3</sup>/s.m.
- El Detalle 2 y Detalle 3 tienden a calcular valores de velocidad y caudal específico mayores que el Detalle 1. Éste último sólo calculó mayores valores para el parámetro del tirante.
- Se identificaron zonas específicas en las cuales se evidencian diferentes áreas inundadas para los distintos niveles de detalle catastral, sin embargo, estas diferencias no se reflejan en toda el área modelada.
- El área de inundación es mayor para los resultados obtenidos con el Detalle 1. Las áreas de inundación para el Detalle 2 y 3 tienden a disminuir de manera directamente proporcional al nivel de detalle catastral.
- El Detalle 3 presentó el mayor tiempo computacional, seguido del Detalle 2 y finalmente, el Detalle 1 presentó el menor tiempo computacional de los tres; es decir, conforme el nivel de detalle disminuyó, los tiempos computacionales incrementaron.

#### ***Respecto de los resultados del modelo hidráulico modificando los coeficientes de rugosidad***

- Al incrementar los valores del coeficiente de rugosidad en el Detalle 2 y Detalle 3, y comparar estos resultados con los de los modelos calibrados, los valores de tirante se incrementaron, mientras que los valores de velocidad tendieron a reducirse, pero no en todos los casos; por su parte, el caudal específico fue el parámetro que sufrió menores variaciones en sus resultados.
- Al modificar los coeficientes de rugosidad no se logró equiparar los resultados del Detalle 2 y Detalle 3 con los resultados de la línea base (Detalle 1). Adicionalmente, no

hubo algún escenario que logre la mejor aproximación a la línea base en todos los parámetros hidráulicos.

- Las áreas inundadas calculadas con el Detalle 2 y Detalle 3 mantienen menores valores que el Detalle 1. A mayor nivel de detalle, se tiene como resultado una mayor área inundada. A pesar de que con las modificaciones los coeficientes de rugosidad se incrementaron, los menores niveles de detalle no lograron igualar la magnitud del área inundada calculada por el Detalle 1.

***Respecto de los beneficios de implementar infraestructura de protección contra inundaciones***

- Para el Escenario 1, la cota de corona propuesta en el diseño de la infraestructura de protección resulta suficiente en toda la longitud planteada. Sin embargo, para el Escenario 2 y Escenario 3, esta situación cambia; presentándose tramos en los cuales la cota propuesta en el diseño resulta insuficiente, encontrándose por debajo del nivel de agua modelado. Para los tres escenarios se presentan puntos críticos como los cruces de los puentes.
- Las áreas inundadas calculadas por todos los escenarios analizados considerando la implementación de infraestructura de protección, resultan menores que el área de inundación calculada por el modelo de línea base.

**Conclusiones**

***Respecto de los resultados del modelo hidráulico calibrado***

- Para el cauce del río, en el tramo comprendido entre el puente Grau y el puente Cáceres, se presentan resultados muy similares debido a que predomina la influencia directa de las condiciones de frontera aguas abajo del modelo. Si bien es cierto se evidencia que los parámetros de tirante y velocidad presentan variaciones ligeramente superiores que el caudal específico, se concluye que en general, las variaciones identificadas en todos los parámetros hidráulicos no son realmente significativas. La influencia de detalle catastral asignado al modelo no resulta relevante respecto de los parámetros hidráulicos modelados para el cauce principal del río.
- El detalle catastral asignado al modelo hidráulico presenta una mayor influencia en las áreas de inundación de las zonas urbanas, habiéndose identificado lugares específicos donde se puede apreciar la diferencia en la extensión del área inundada. A mayor detalle catastral asignado al modelo, se presenta una mayor área de inundación como resultado.

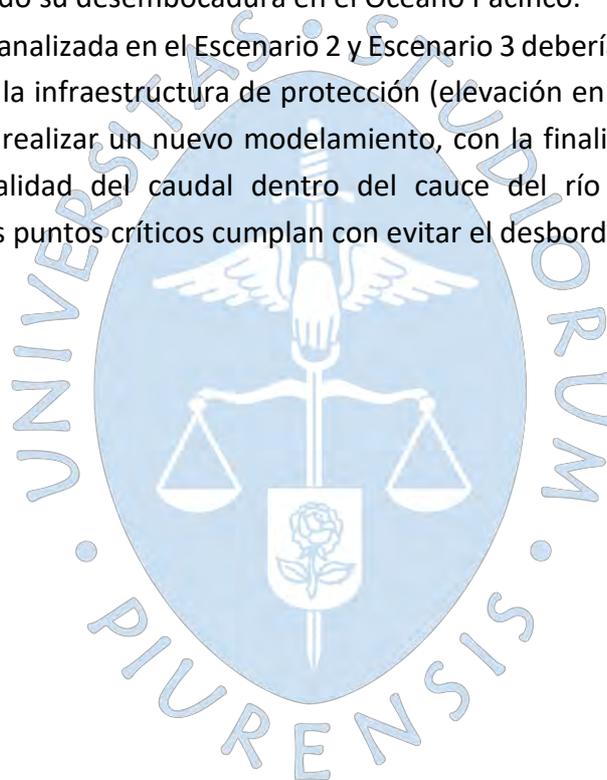
***Respecto de los resultados del modelo hidráulico modificando los coeficientes de rugosidad***

- Se puede apreciar que el nivel de detalle catastral tiene una mayor influencia sobre el área inundada que los coeficientes de rugosidad, dado que a pesar de modificar este parámetro hasta en un 40%, no se logró igualar el área inundada de la línea base; es decir, prima la rugosidad de forma sobre la rugosidad del material.
- Los coeficientes de rugosidad deberían incrementarse entre un 20% y 30% para lograr que el Detalle 2 y Detalle 3 calculen valores de tirante similares a la línea base. Si se realizan incrementos superiores, los valores de tirante sobrepasan los calculados por la línea base.
- Los coeficientes de rugosidad deberían incrementarse en más del 40% para lograr que el Detalle 2 y Detalle 3 calculen valores de velocidad similares a la línea base. Si se realizan incrementos inferiores, los valores de velocidad sobrepasan los calculados por la línea base. Sin embargo, la variación de la velocidad, al modificar los coeficientes de rugosidad, no siempre sigue el patrón esperado (a mayor rugosidad, menos velocidad). Esto evidencia que la rugosidad de forma ejerce mayor influencia que la rugosidad del material, sobre el parámetro de la velocidad.
- Se observa que los incrementos sugeridos para los valores de los coeficientes de rugosidad, con la finalidad de equiparar los resultados de tirante y velocidad calculados con el Detalle 2 y Detalle 3, con los resultados de línea base; resultan contradictorios, dado que para el tirante no se recomienda realizar un incremento mayor al 20%, y sin embargo para la velocidad se recomiendan incrementos superiores al 40%.
- La asignación de coeficientes de rugosidad no influye en la misma proporción en el tirante y en la velocidad, siendo el primer parámetro el que mayor sensibilidad presenta.
- Los modelos hidráulicos para zonas urbanas que representen el mayor detalle posible del catastro urbano, brindarán resultados más precisos que los modelos que lo simplifiquen. Esta simplificación no logra compensarse con la modificación de los coeficientes de rugosidad asignados a los materiales.

***Respecto de los beneficios de implementar infraestructura de protección contra inundaciones***

- La implementación de la infraestructura de protección propuesta trae como consecuencia la disminución de las áreas de inundación, pero no elimina la ocurrencia de desbordes del río Piura.

- Se han identificado puntos críticos, como los cruces de los puentes Cáceres, Eguiguren, Sánchez Cerro y San Miguel, por donde podría ocurrir el desborde del río Piura para los escenarios analizados.
- La situación más desfavorable respecto de la inundación del área urbana de Piura corresponde al Escenario 3.
- La implementación de infraestructura de protección no resultaría suficiente si no se tienen en cuenta los puntos críticos identificados en los cruces de los puentes de la ciudad de Piura, por lo que deben implementarse medidas complementarias que permitan regular los caudales de ingreso al tramo urbano (reservorios de regulación para disminuir los caudales pico) y asegurar un adecuado manejo de niveles de fondo del río, asegurando su desembocadura en el Océano Pacífico.
- Para la situación analizada en el Escenario 2 y Escenario 3 debería replantearse las cotas propuestas para la infraestructura de protección (elevación en ciertos tramos). Luego de ello, se debe realizar un nuevo modelamiento, con la finalidad de verificar que al contener la totalidad del caudal dentro del cauce del río Piura, los tramos no modificados y los puntos críticos cumplan con evitar el desborde.



## Referencias

- Apaclla, R. (Diciembre de 2010). Estudio de Máximas Avenidas en las cuencas de la zona centro de la Vertiente del Pacífico. (A. N. Agua, Ed.) Lima, Lima, Lima.
- Autoridad Autónoma Cuenca Chira - Piura. (Agosto de 2007). Plan de Defensas Ribereñas y Encauzamiento de Ríos - Resumen del Diagnóstico Situacional. 71. Piura, Piura, Perú.
- Azurin Gonzáles, C. (2010). Estudio para la conformacion de un programa de inversión pública que permita disminuir la vulnerabilidad frente al incremento de caudales originados por precipitaciones extremas en la cuenca Media y Baja del río Piura. Piura.
- Bladé, E., Cea, L., & Corestein, G. (2014). Modelización numérica de inundaciones fluviales. *Ingeniería Del Agua*, 18(1), 71-82.
- Cabello, R. E. (2021). Modelamiento hidrológico e hidráulico para el análisis de inundaciones en la ciudad de Piura utilizando HEC-HMS y HEC-RAS. Lima.
- Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Colombia: McGraw-Hill.
- Consorcio Los Ejidos. (Setiembre de 2018). Mejoramiento del Servicio de Protección contra inundaciones de las ciudades de Piura y Castilla, margen derecha e izquierda del río Piura en el tramo: Represa Los Ejidos al Puente Cáceres, distritos Piura y Castilla, de la provincia y departamento de Piur. Piura, Perú: Gobierno Regional de Piura.
- Consorcio Protección Piura y Castilla. (Abril de 2018). Mejoramiento y Ampliación del Servicio de Protección contra inundaciones de las ciudades de Piura y Castilla, entre el puente Cáceres y el futuro Puente Integración de la margen derecha Prog. 2+665 hasta Prog. 5+432 y la margen izquierda Prog. 2+540 hasta. Piura, Piura: Gobierno Regional Piura.
- Córdova Elera, Y. E. (Septiembre de 2020). Análisis del comportamiento hidráulico - sedimentológico del río Piura, tramo presa Los Ejidos - Sector Cordillera, Perú.

- Problemática actual y propuestas de solución. Valencia, Perú: Universitat Politecnica de Valencia.
- García Rivera, I. V. (28 al 30 de Setiembre de 2016). *Erosión regresiva en bocatomas "La Huaca" y "La Víbora", cuenca baja del río Santa, Perú*, 11. Lima, Lima, Perú.
- Gutiérrez de la Torre, F. (Octubre de 2016). Modelación Numérica con Telemac del comportamiento del flujo y sedimentos del desarenador Quitaracsa I. Piura, Piura, Perú: Universidad de Piura.
- INGEMMET. (Diciembre de 2017). Peligros Geológicos y Geo-Hidrológicos detonados por el Niño Costero 2017 en la Región Piura. Perú.
- Li, G., Liu, J., & Shao, W. (15 de Agosto de 2022). Flood Risk Assessment Using TELEMAC-2D Models Integrated with Multi-Index Analysis in Shenzhen River Basin, China. 21. (M. Mimikou, Ed.) MDPI.
- Li, Z., Liu, J., Mei, C., Shao, W., Wang, H., & Yan, D. (4 de Setiembre de 2019). Comparative Analysis of Building Representations in TELEMAC-2D for Flood Inundation in Idealized Urban Districts. 21. MDPI.
- Maza Sócola, J. P. (Marzo de 2019). Análisis del comportamiento hidráulico del río Piura, en el tramo Los Ejidos - Puente Independencia. Piura, Piura, Perú: Universidad de Piura.
- Ministerio de Economía y Finanzas. (Junio de 2013). Guía Simplificada para la identificación, formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de servicios de protección frente a inundaciones, a nivel de perfil. 106. Lima, Lima, Perú: Dirección General de Política de Inversiones.
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2017). *Portal de Transparencia Económica*. Obtenido de Consultar el Gasto del Fondo para Intervenciones ante la Ocurrencia de Desastres Naturales - FONDES: [https://apps5.mineco.gob.pe/seguimiento\\_fondes/Navegador/default.aspx?y=2017&ap=ActProy&ar=Todos](https://apps5.mineco.gob.pe/seguimiento_fondes/Navegador/default.aspx?y=2017&ap=ActProy&ar=Todos)
- Montero Torres, M. A. (2019). Estudio de Tránsito de Avenidas del río Piura por el método Muskingum Tramo Tambogrande - Piura. Piura.
- Murillo, J., Brufau, P., & Garcia-Navarro, P. (2008). Aplicación del Modelo Bidimensional Quad-2D para la determinación de zonas inundables en el T.M. de Fraga (Huesca). Universidad de Zaragoza.
- Perleche Fuentes, C. (Marzo de 2019). Adaptación al Cambio Climático y Eventos Extremos. *Construcción del la Gestión Regional del Agua en el marco del décimo aniversario*

*de la Ley de Recursos Hídricos y décimo aniversario de creación de la Autoridad Nacional del Agua.* Lima, Lima, Perú.

Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe. (2010). *Procesos de erosión - sedimentación en cauces y cuencas.* Programa Hidrológico Internacional de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe. José Daniel Brea, Francisco Balocchi.

Secretaría de Gestión del Riesgo de Desastres de la Presidencia del Consejo de Ministros. (2014). *Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - PLANAGERD 2014-2021.* Lima: Publimagen ABC sac.

Terrones Carrillo, D. d. (Diciembre de 2019). Determinación de los caudales máximos ocurridos durante el Fenómeno de El Niño 2017 en el río Piura - presa Los Ejidos. Piura, Piura, Perú: Universidad de Piura.

Vargas Curo, L. A. (2018). Mapa de Caudales Máximos en cuencas de la zona centro de la Vertiente del Pacífico. Lima, Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Velasco Ocaña, M. M. (Octubre de 2002). Investigación hidráulica y sedimentológica del tramo urbano del río Piura. Piura, Piura, Perú: Universidad de Piura.

Velásquez Bejarano, T. (2006). *Guía Metodológica para Proyectos de Protección y/o Control de Inundaciones en áreas agrícolas o urbanas.* Guía Metodológica, Programa de Modernización y Descentralización del Estado, Lima.

Vu, T., Nguyen, P., Chua, L., & Law, A. (5 de Junio de 2015). Two-Dimensional Hydrodynamic Modelling of Flood Inundation for a Part of the Mekong River with TELEMAC-2D. 14. British Journal of Environment & Climate Change.

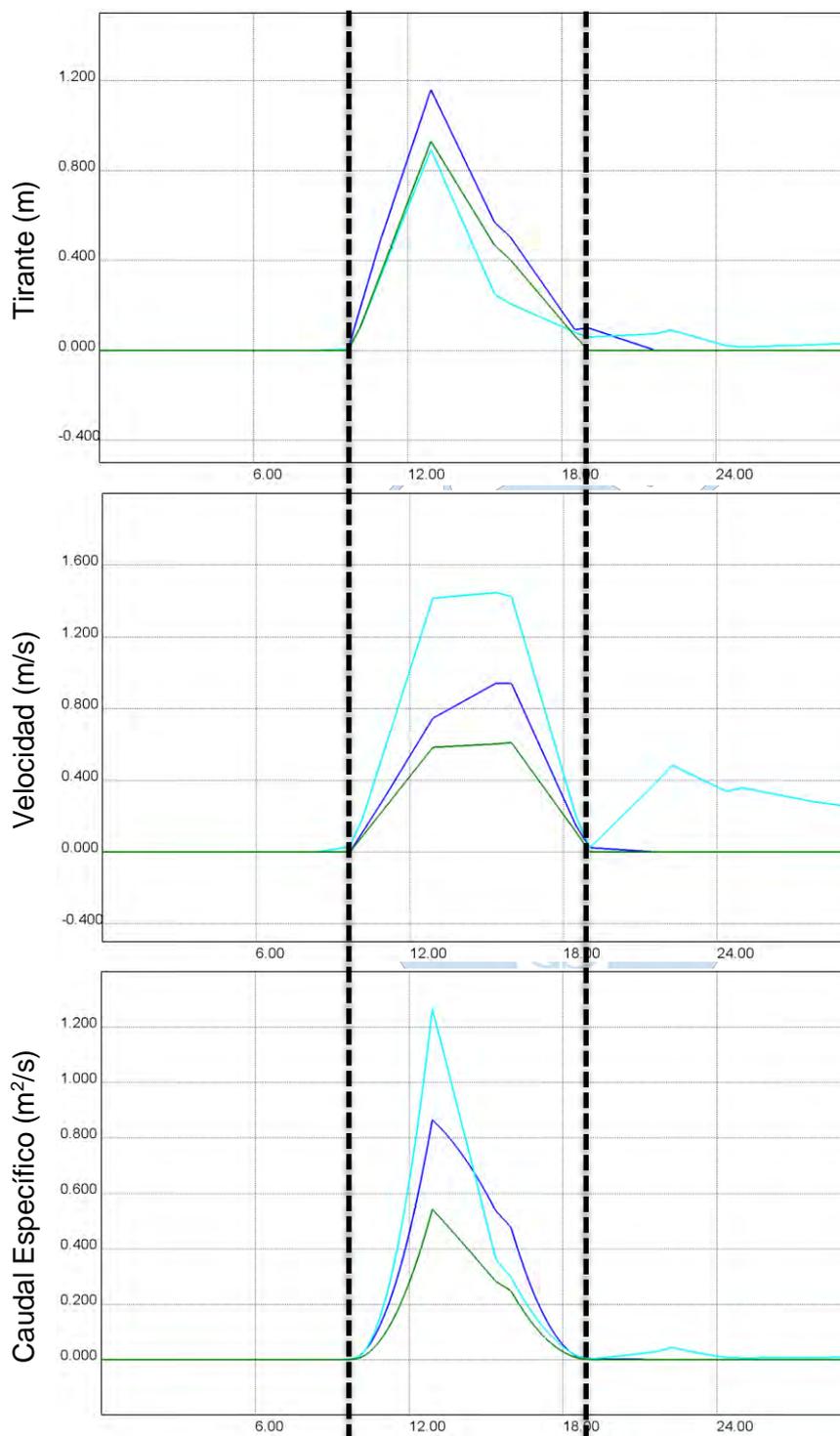
## Anexos

### Anexo N° 1: Análisis de parámetros hidráulicos en el área inundada – Resultados obtenidos en las secciones analizadas



**Figura A 1**

*Análisis del tirante, velocidad y caudal específico para la Sección 1*



En la Sección 1 se observa que el mayor valor del tirante fue alcanzado por el nivel de Detalle 1, seguido del Detalle 3; siendo el Detalle 2 el que menor valor de tirante calculó.

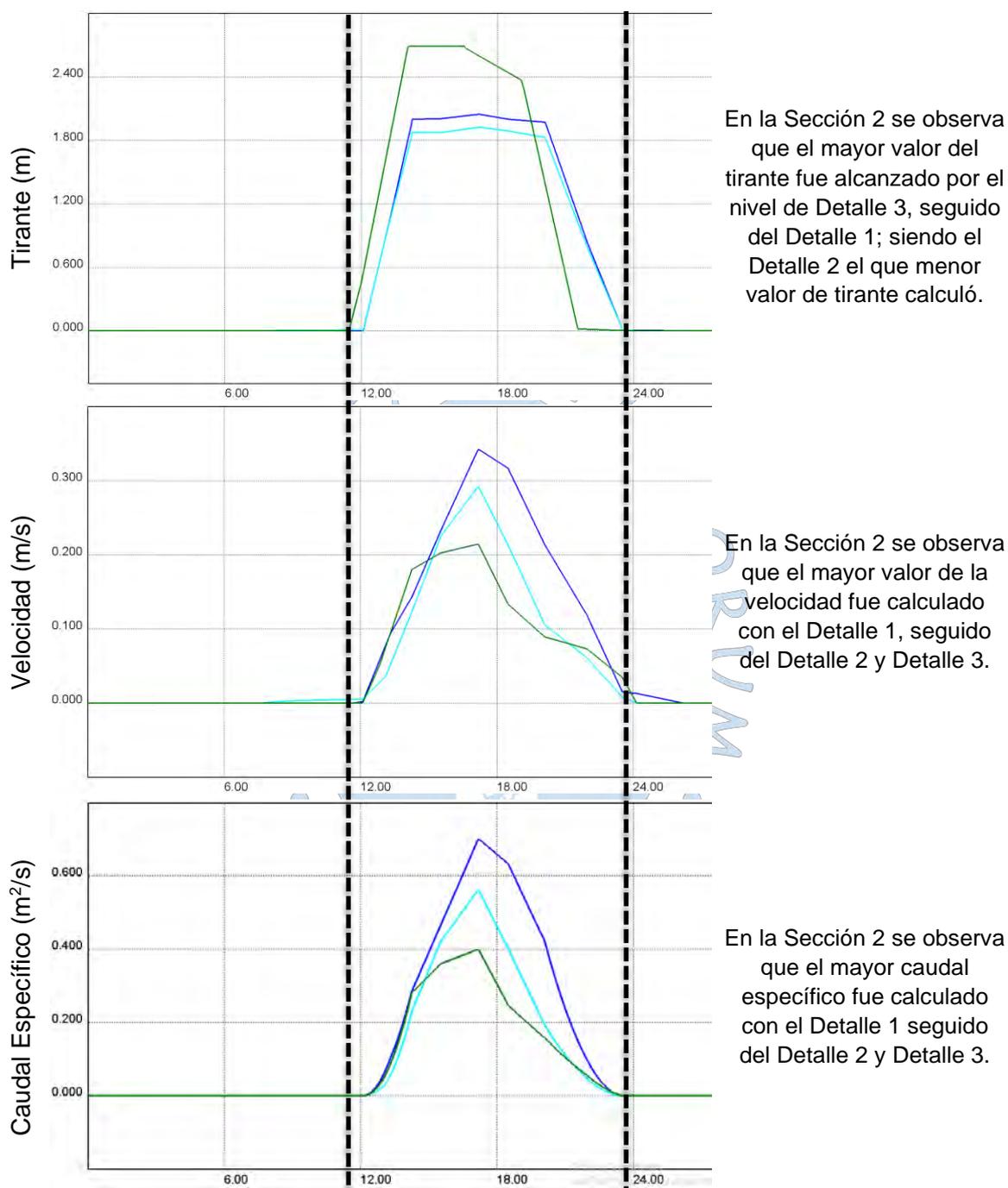
En la Sección 1 se observa que el mayor valor de la velocidad fue calculado con el Detalle 2, seguido del Detalle 1 y Detalle 3.

En la Sección 1 se observa que el mayor caudal específico fue calculado con el Detalle 2 seguido del Detalle 1 y Detalle 3.

*Nota:* Elaboración propia. Las líneas negras verticales segmentadas representan los límites de las calles o avenidas analizadas, es decir, representan el inicio de las edificaciones.

**Figura A 2**

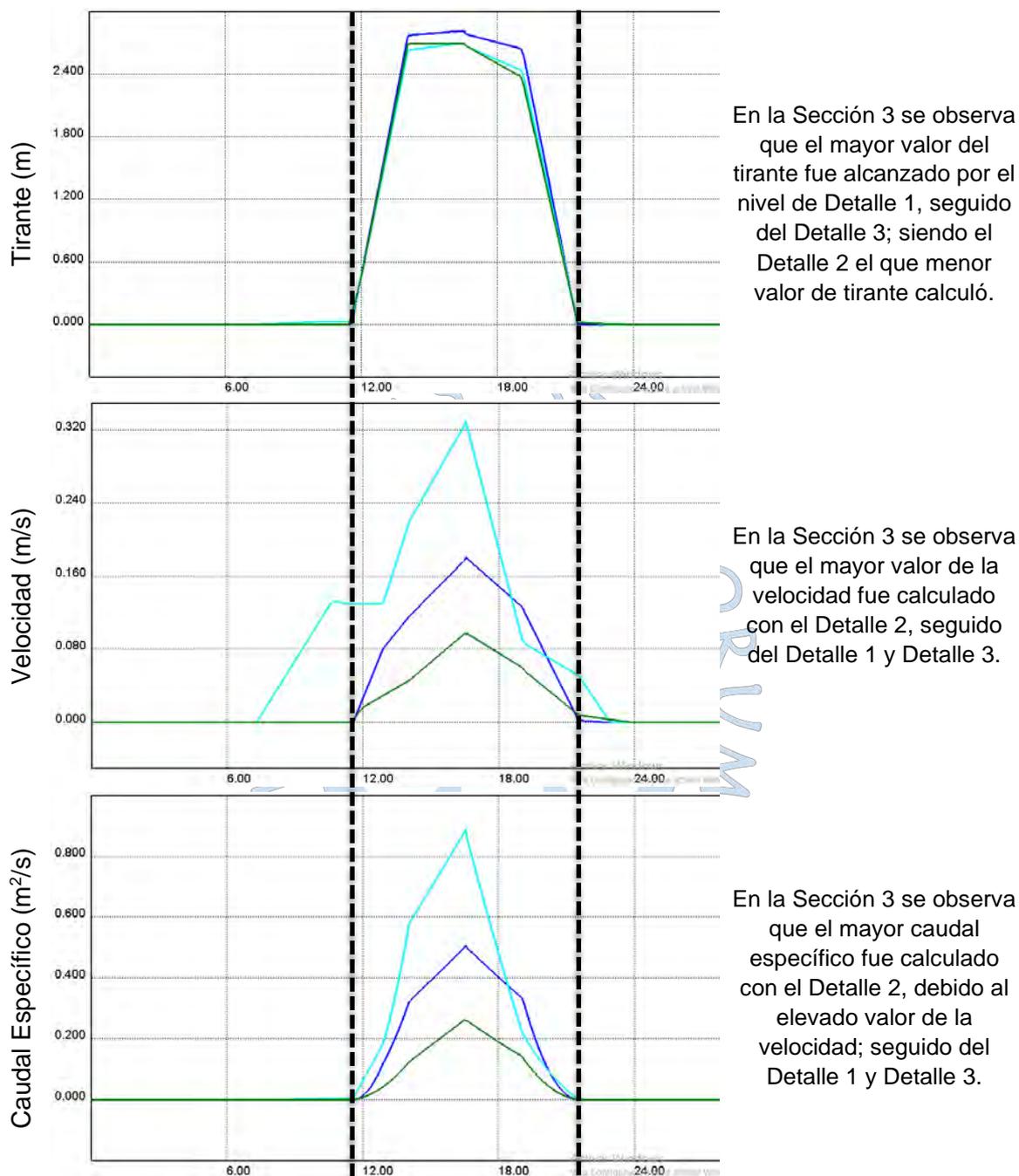
*Análisis del tirante, velocidad y caudal específico para la Sección 2*



*Nota:* Elaboración propia. Las líneas negras verticales segmentadas representan los límites de las calles o avenidas analizadas, es decir, representan el inicio de las edificaciones.

**Figura A 3**

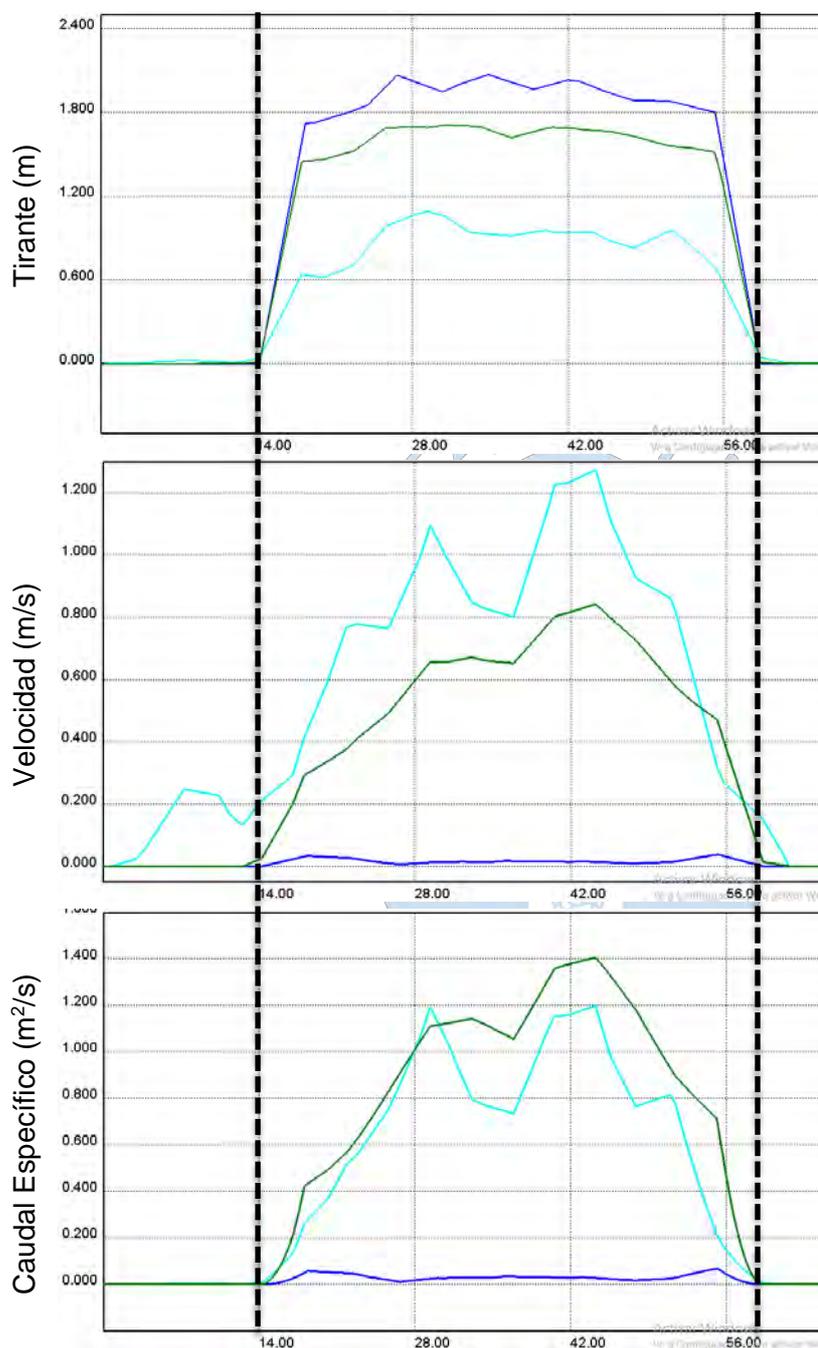
*Análisis del tirante, velocidad y caudal específico para la Sección 3*



*Nota:* Elaboración propia. Las líneas negras verticales segmentadas representan los límites de las calles o avenidas analizadas, es decir, representan el inicio de las edificaciones.

**Figura A 4**

*Análisis del tirante, velocidad y caudal específico para la Sección 4*



En la Sección 4 se observa que el mayor valor del tirante fue alcanzado por el nivel de Detalle 1, seguido del Detalle 3; siendo el Detalle 2 el que menor valor de tirante calculó.

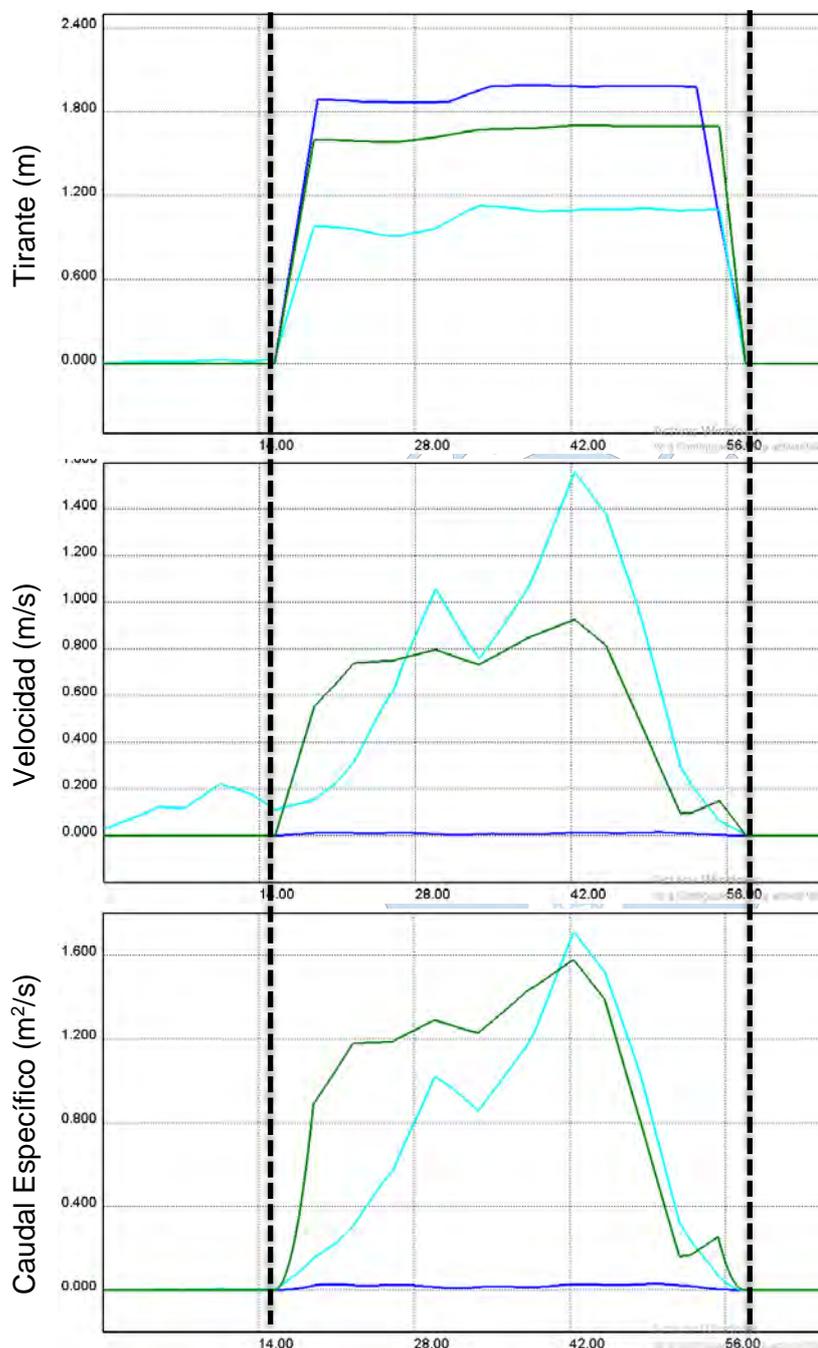
En la Sección 4 se observa que el mayor valor de la velocidad fue calculado con el Detalle 2, seguido del Detalle 3 y Detalle 1, el cual presenta un valor mucho menor.

En la Sección 4 se observa que el mayor caudal específico fue calculado con el Detalle 3, debido al elevado valor del tirante; seguido del Detalle 2 y Detalle 1; el cual presenta un valor mucho menor.

*Nota:* Elaboración propia. Las líneas negras verticales segmentadas representan los límites de las calles o avenidas analizadas, es decir, representan el inicio de las edificaciones.

**Figura A 5**

*Análisis del tirante, velocidad y caudal específico para la Sección 5*



En la Sección 5 se observa que el mayor valor del tirante fue alcanzado por el nivel de Detalle 1, seguido del Detalle 3; siendo el Detalle 2 el que menor valor de tirante calculó.

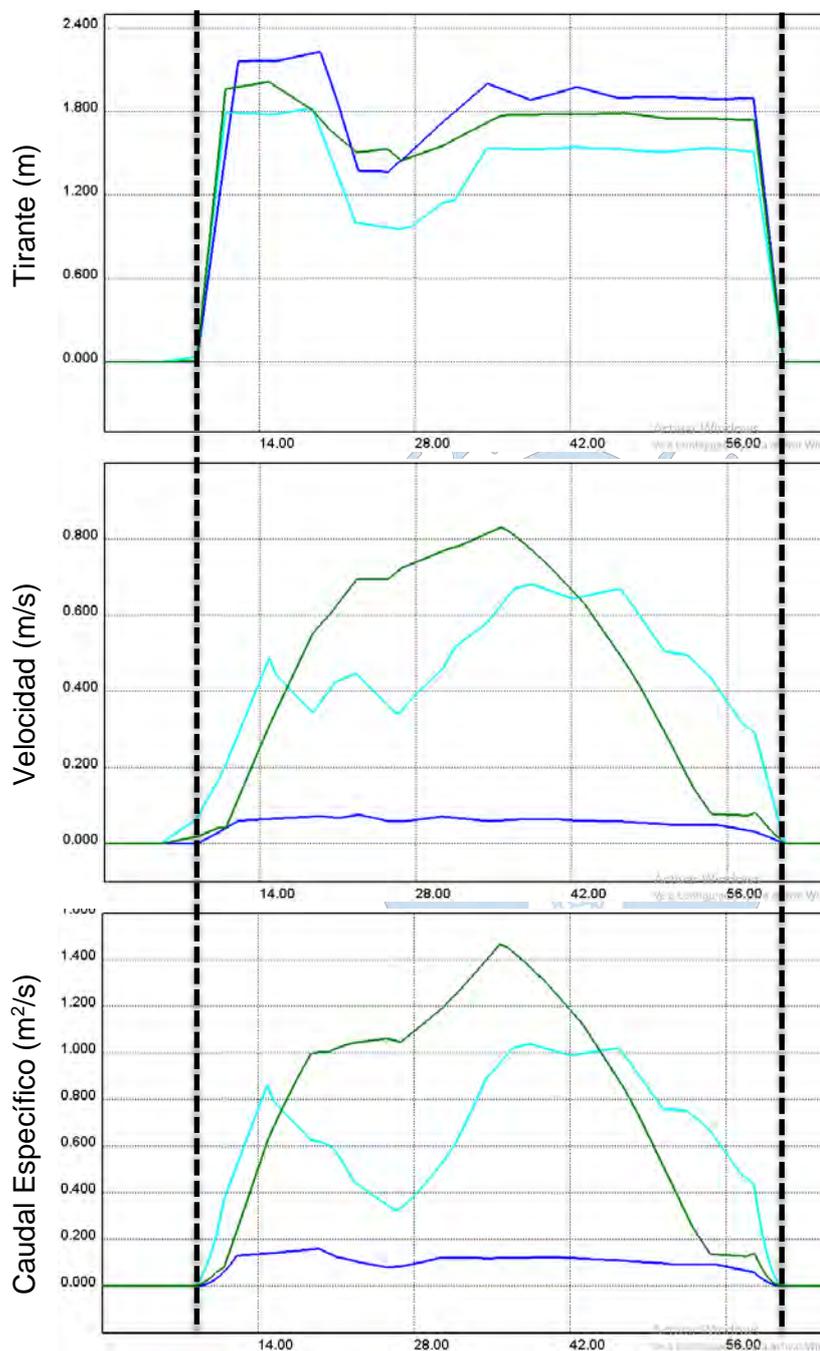
En la Sección 5 se observa que el mayor valor de la velocidad fue calculado con el Detalle 2, seguido del Detalle 3 y Detalle 1, el cual presenta un valor mucho menor.

En la Sección 5 se observa que el mayor caudal específico fue calculado con el Detalle 2, debido al elevado valor de la velocidad; seguido del Detalle 3 y Detalle 1; el cual presenta un valor mucho menor.

*Nota:* Elaboración propia. Las líneas negras verticales segmentadas representan los límites de las calles o avenidas analizadas, es decir, representan el inicio de las edificaciones.

**Figura A 6**

*Análisis del tirante, velocidad y caudal específico para la Sección 6*



En la Sección 6 se observa que el mayor valor del tirante fue alcanzado por el nivel de Detalle 1, seguido del Detalle 3; siendo el Detalle 2 el que menor valor de tirante calculó.

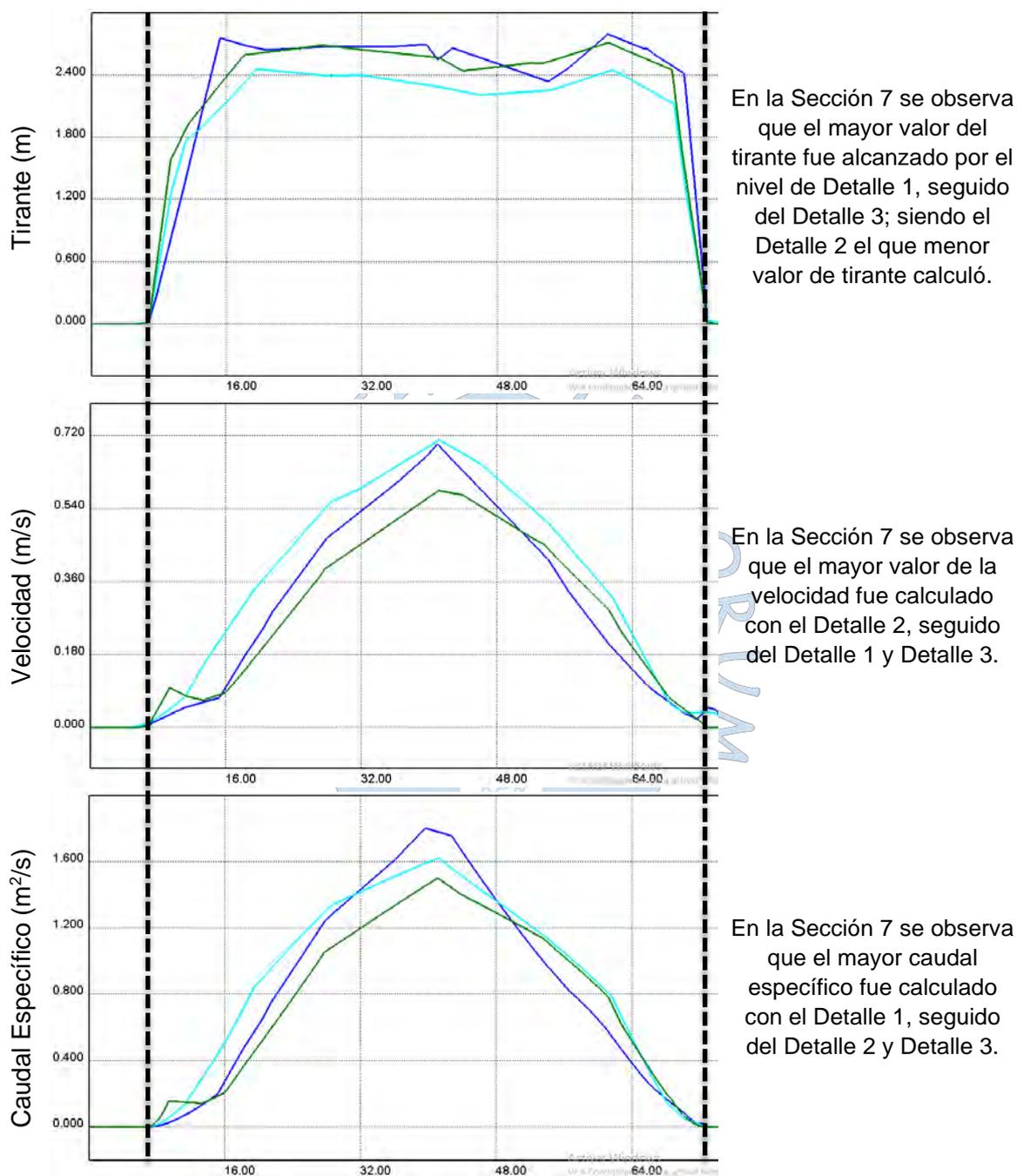
En la Sección 6 se observa que el mayor valor de la velocidad fue calculado con el Detalle 3, seguido del Detalle 2 y Detalle 1, el cual presenta un valor mucho menor.

En la Sección 6 se observa que el mayor caudal específico fue calculado con el Detalle 3, debido al elevado valor de la velocidad; seguido del Detalle 2 y Detalle 1; el cual presenta un valor mucho menor.

*Nota:* Elaboración propia. Las líneas negras verticales segmentadas representan los límites de las calles o avenidas analizadas, es decir, representan el inicio de las edificaciones.

**Figura A 7**

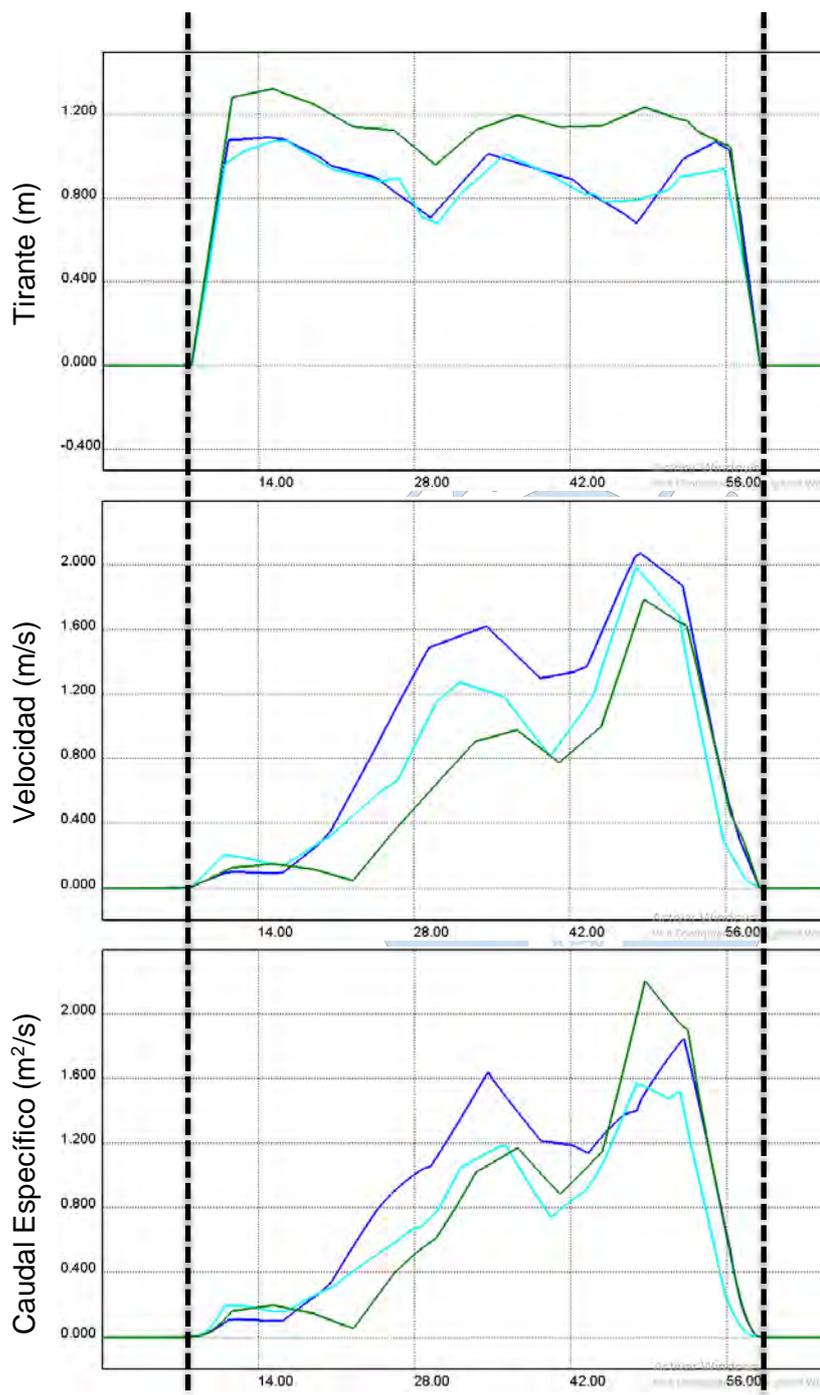
*Análisis del tirante, velocidad y caudal específico para la Sección 7*



*Nota:* Elaboración propia. Las líneas negras verticales segmentadas representan los límites de las calles o avenidas analizadas, es decir, representan el inicio de las edificaciones.

**Figura A 8**

*Análisis del tirante, velocidad y caudal específico para la Sección 8*



En la Sección 8 se observa que el mayor valor del tirante fue alcanzado por el nivel de Detalle 3. Los resultados para el Detalle 1 y Detalle 2 fueron muy similares.

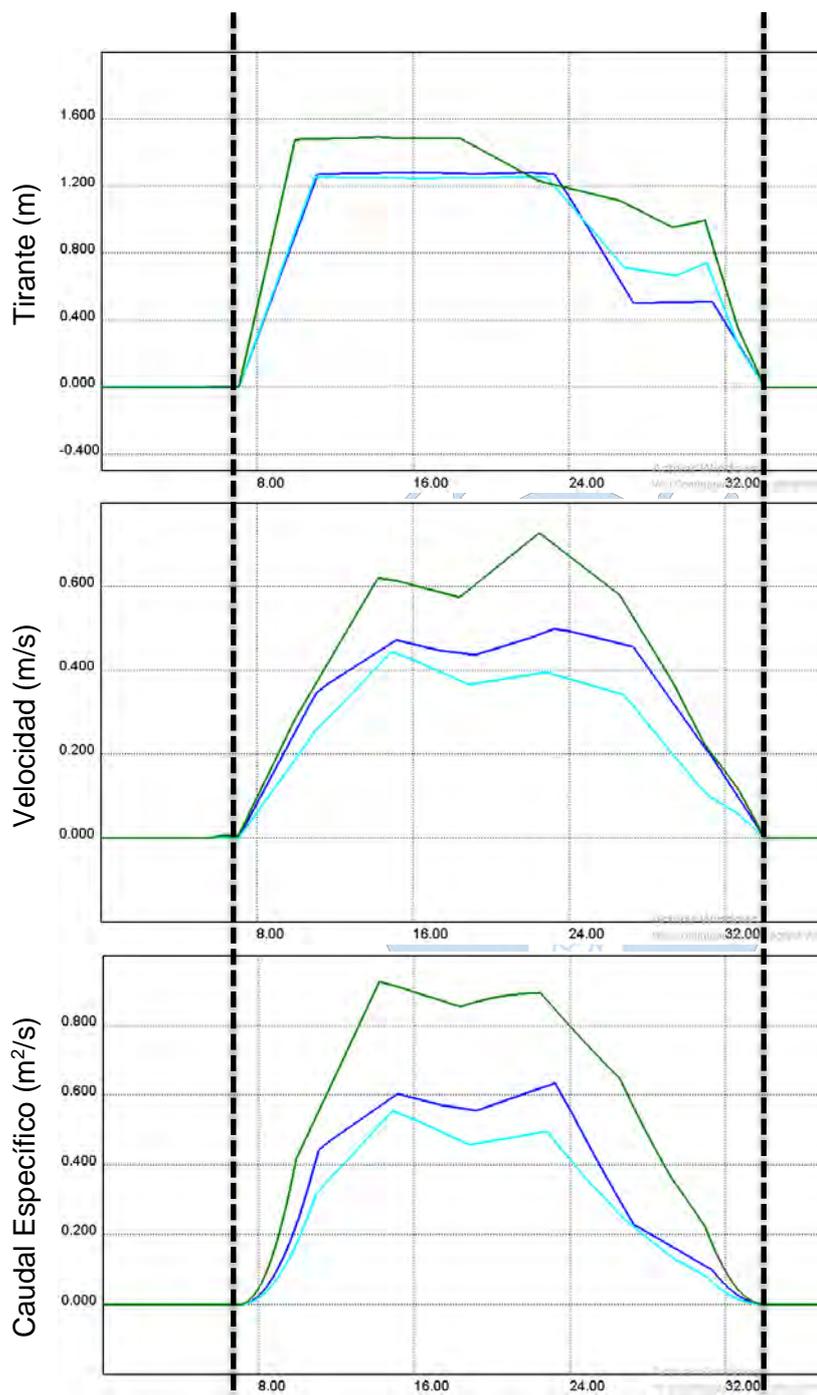
En la Sección 8 se observa que el mayor valor de la velocidad fue calculado con el Detalle 1, seguido del Detalle 2 y Detalle 3.

En la Sección 8 se observa que el mayor caudal específico fue calculado con el Detalle 3, seguido del Detalle 1 y Detalle 2.

*Nota:* Elaboración propia. Las líneas negras verticales segmentadas representan los límites de las calles o avenidas analizadas, es decir, representan el inicio de las edificaciones.

**Figura A 9**

*Análisis del tirante, velocidad y caudal específico para la Sección 9*



En la Sección 9 se observa que el mayor valor del tirante fue alcanzado por el nivel de Detalle 3. Los resultados para el Detalle 1 y Detalle 2 fueron muy similares.

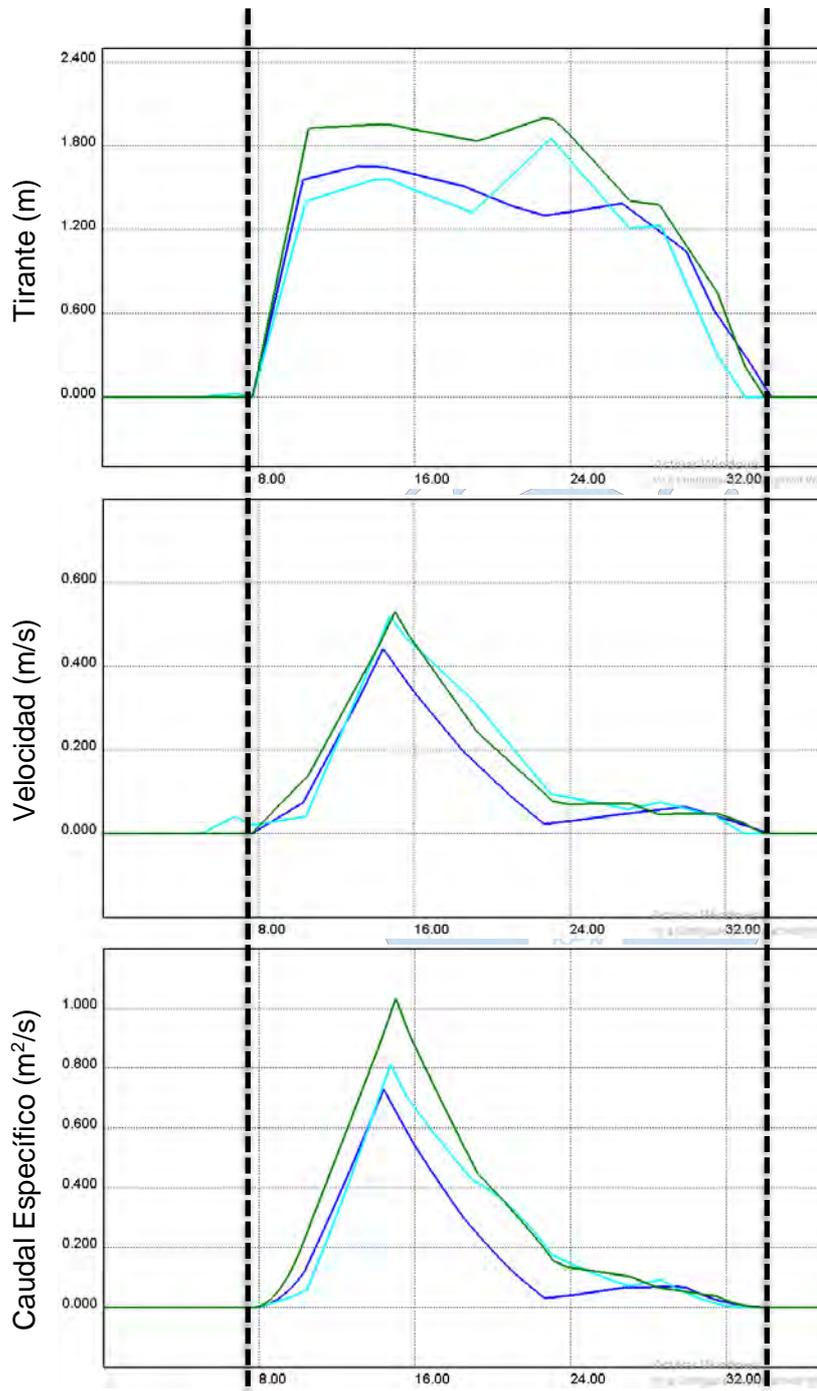
En la Sección 9 se observa que el mayor valor de la velocidad fue calculado con el Detalle 3, seguido del Detalle 1 y Detalle 2.

En la Sección 9 se observa que el mayor caudal específico fue calculado con el Detalle 3, seguido del Detalle 1 y Detalle 2.

*Nota:* Elaboración propia. Las líneas negras verticales segmentadas representan los límites de las calles o avenidas analizadas, es decir, representan el inicio de las edificaciones.

**Figura A 10**

*Análisis del tirante, velocidad y caudal específico para la Sección 10*



En la Sección 10 se observa que el mayor valor del tirante fue alcanzado por el nivel de Detalle 3.

Los resultados para el Detalle 1 y Detalle 2 fueron similares, presentándose un pico en el Detalle 2.

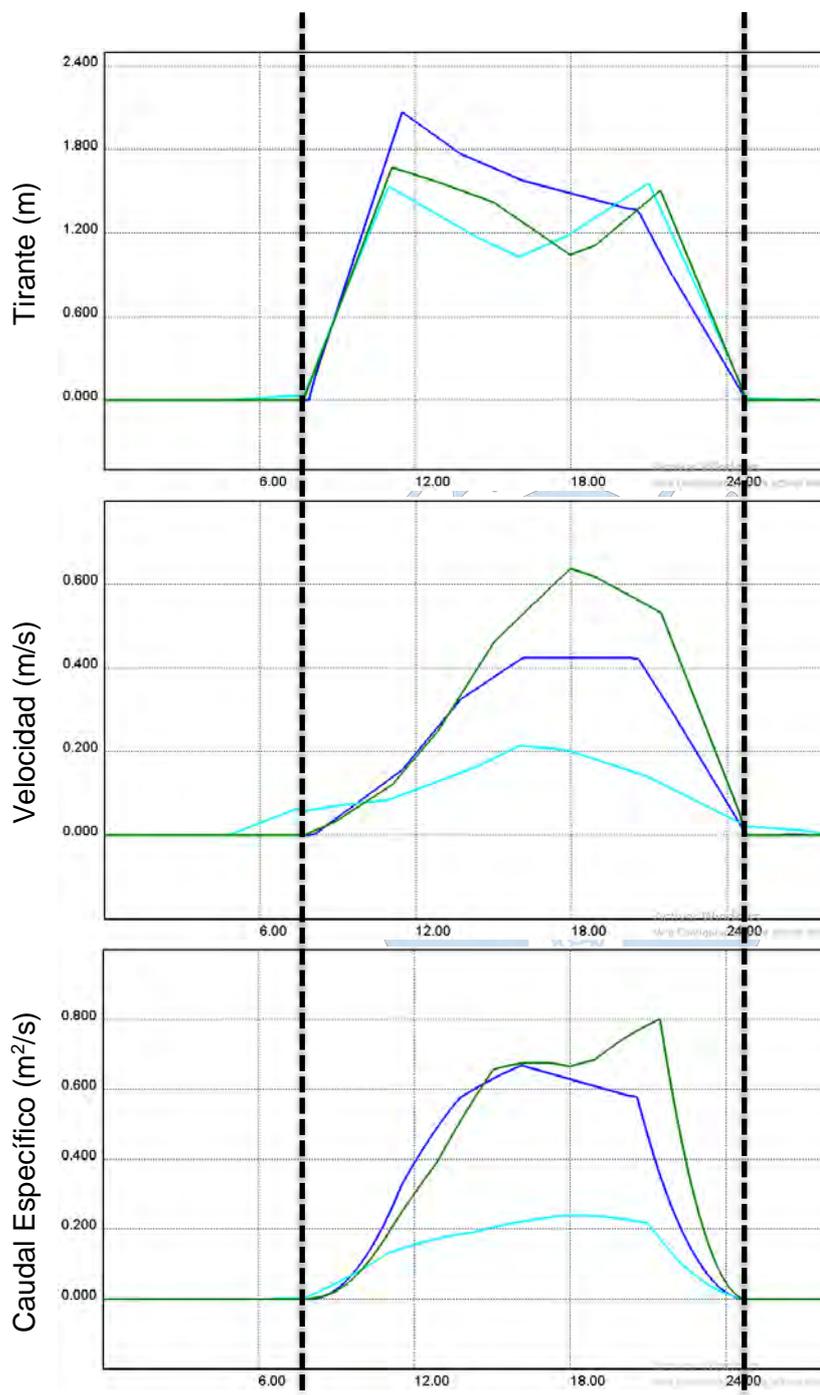
En la Sección 10 se observa que los valores de la velocidad calculados con el Detalle 3 y Detalle 2 fueron muy similares. El Detalle 1 calculó valores menores.

En la Sección 10 se observa que el mayor caudal específico fue calculado con el Detalle 3, seguido del Detalle 2 y Detalle 1.

*Nota:* Elaboración propia. Las líneas negras verticales segmentadas representan los límites de las calles o avenidas analizadas, es decir, representan el inicio de las edificaciones.

**Figura A 11**

*Análisis del tirante, velocidad y caudal específico para la Sección 11*



En la Sección 11 se observa que el mayor valor del tirante fue calculado por el nivel de Detalle 1, seguido del nivel de Detalle 3 y finalmente el nivel de Detalle 2.

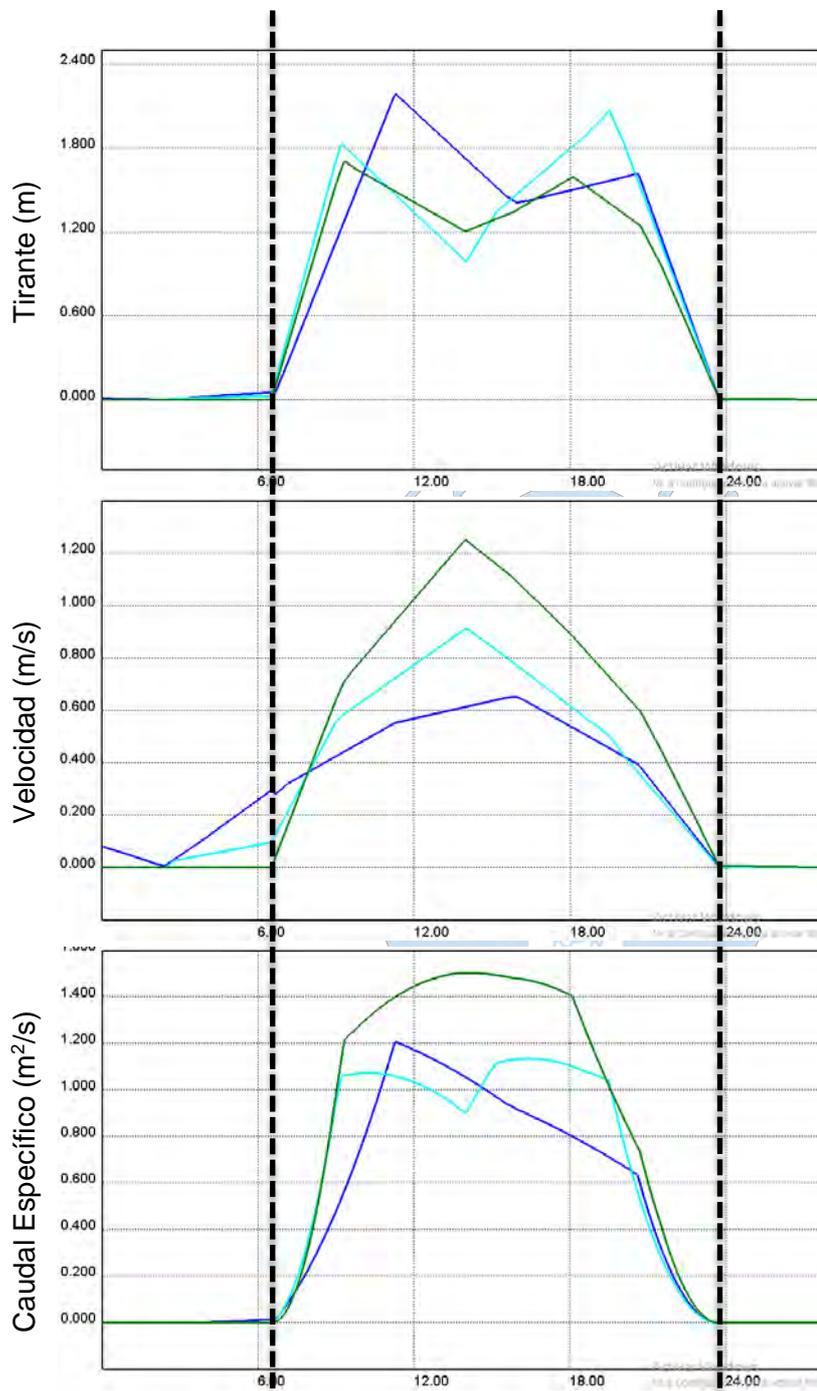
En la Sección 11 se observa que el mayor valor de la velocidad fue calculado por el nivel de Detalle 3, seguido del nivel de Detalle 1 y finalmente el nivel de Detalle 2.

En la Sección 11 se observa que el mayor caudal específico fue calculado con el Detalle 3; debido principalmente a los altos valores de velocidad, seguido del Detalle 1 y Detalle 2.

*Nota:* Elaboración propia. Las líneas negras verticales segmentadas representan los límites de las calles o avenidas analizadas, es decir, representan el inicio de las edificaciones.

**Figura A 12**

*Análisis del tirante, velocidad y caudal específico para la Sección 12*



En la Sección 12 se observa que el mayor valor del tirante fue calculado por el nivel de Detalle 1, seguido del nivel de Detalle 2 y finalmente el nivel de Detalle 3.

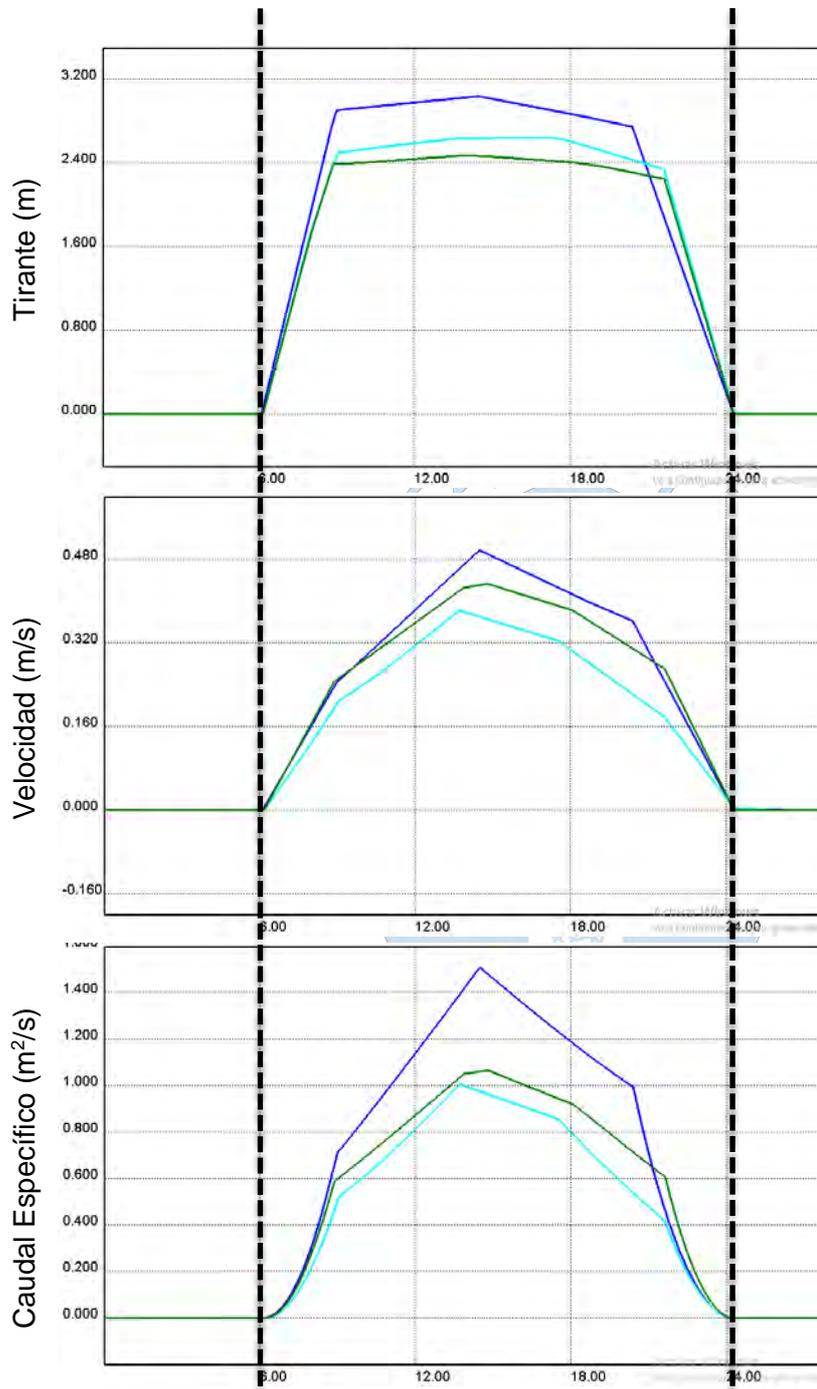
En la Sección 12 se observa que el mayor valor de la velocidad fue calculado por el nivel de Detalle 3, seguido del nivel de Detalle 2 y finalmente el nivel de Detalle 1.

En la Sección 12 se observa que el mayor caudal específico fue calculado con el Detalle 3; debido principalmente a los altos valores de velocidad, seguido del Detalle 1 y Detalle 2.

*Nota:* Elaboración propia. Las líneas negras verticales segmentadas representan los límites de las calles o avenidas analizadas, es decir, representan el inicio de las edificaciones.

**Figura A 13**

*Análisis del tirante, velocidad y caudal específico para la Sección 13*



En la Sección 13 se observa que el mayor valor del tirante fue calculado por el nivel de Detalle 1, seguido del nivel de Detalle 2 y finalmente el nivel de Detalle 3.

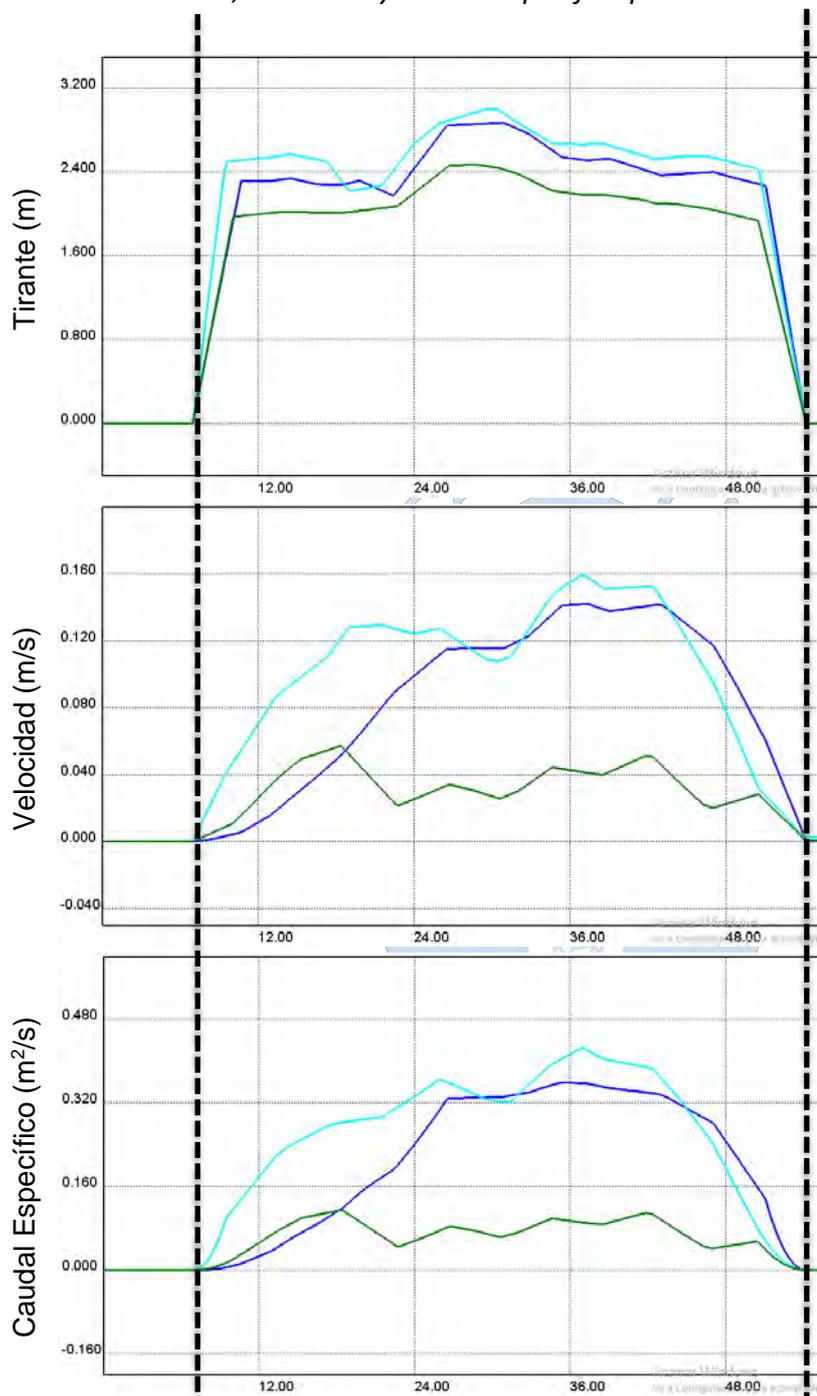
En la Sección 13 se observa que el mayor valor de la velocidad fue calculado por el nivel de Detalle 1, seguido del nivel de Detalle 3 y finalmente el nivel de Detalle 2.

En la Sección 13 se observa que el mayor caudal específico fue calculado con el Detalle 1; debido a los mayores valores de velocidad y tirante, seguido del Detalle 3 y Detalle 2.

*Nota:* Elaboración propia. Las líneas negras verticales segmentadas representan los límites de las calles o avenidas analizadas, es decir, representan el inicio de las edificaciones.

**Figura A 14**

*Análisis del tirante, velocidad y caudal específico para la Sección 14*



En la Sección 14 se observa que el mayor valor del tirante fue calculado por el nivel de Detalle 2, seguido del nivel de Detalle 1 y finalmente el nivel de Detalle 3. La variación entre el Detalle 2 y 1 es mínima.

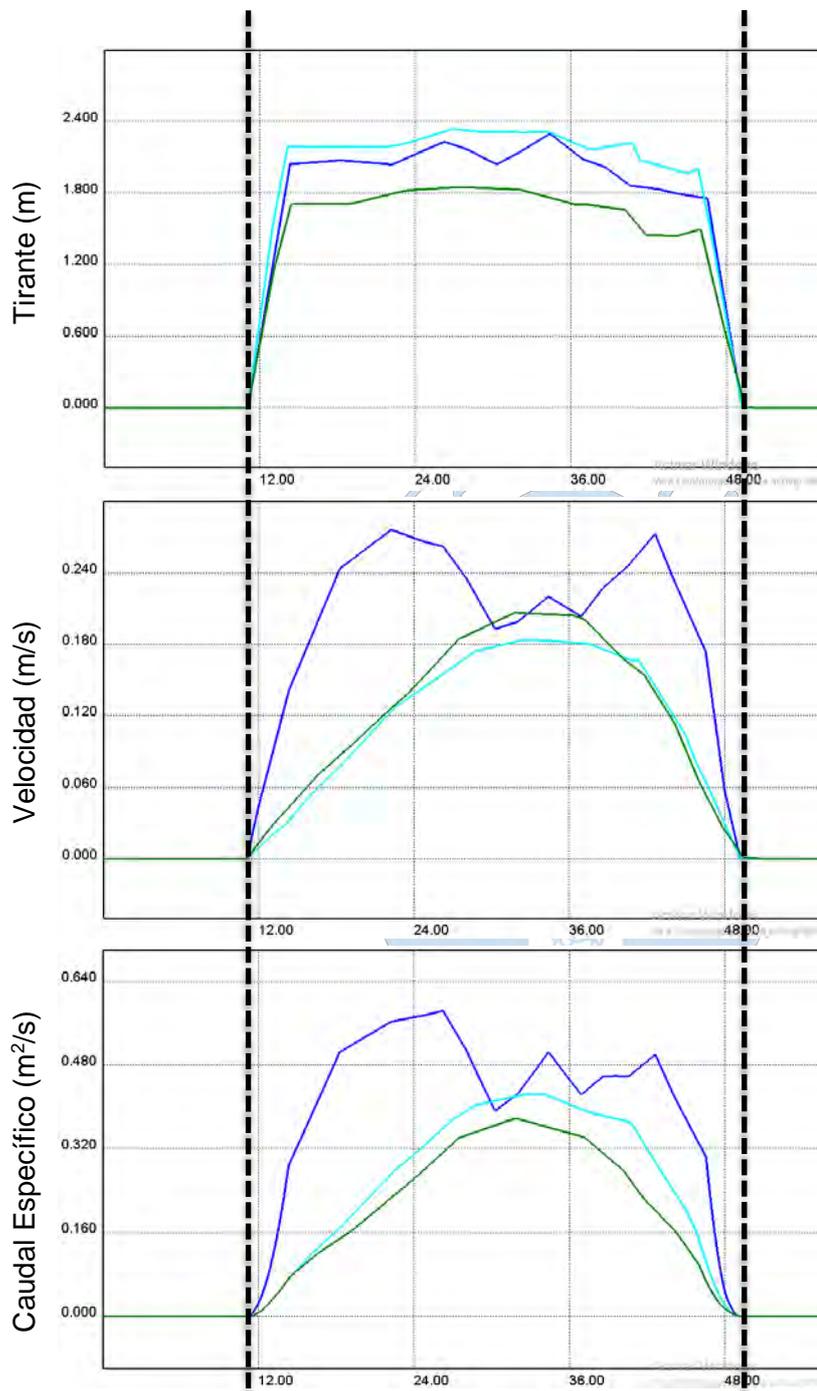
En la Sección 14 se observa que el mayor valor de la velocidad fue calculado por el nivel de Detalle 2, seguido del nivel de Detalle 1 y finalmente el nivel de Detalle 3, que presenta valores mucho menores.

En la Sección 14 se observa que el mayor caudal específico fue calculado con el Detalle 2, seguido del Detalle 1 y Detalle 3. Este último presenta valores mucho menores.

*Nota:* Elaboración propia. Las líneas negras verticales segmentadas representan los límites de las calles o avenidas analizadas, es decir, representan el inicio de las edificaciones.

**Figura A 15**

*Análisis del tirante, velocidad y caudal específico para la Sección 15*



En la Sección 15 se observa que el mayor valor del tirante fue calculado por el nivel de Detalle 2, seguido del nivel de Detalle 1 y finalmente el nivel de Detalle 3.

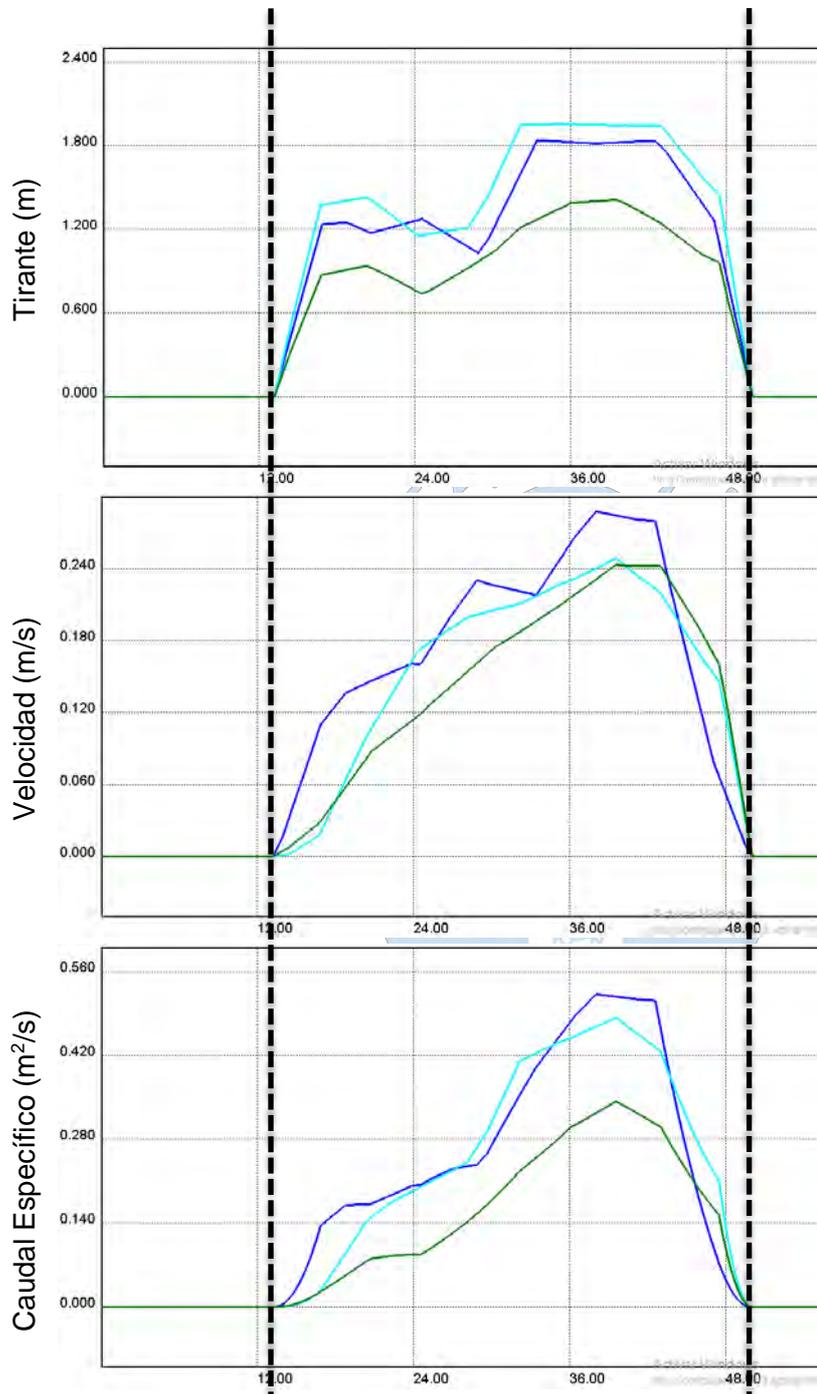
En la Sección 15 se observa que el mayor valor de la velocidad fue calculado por el nivel de Detalle 1, seguido del nivel de Detalle 3 y finalmente el nivel de Detalle 3.

En la Sección 15 se observa que el mayor caudal específico fue calculado con el Detalle 1, seguido del Detalle 2 y Detalle 3. En este caso primó la influencia de la velocidad sobre el tirante.

*Nota:* Elaboración propia. Las líneas negras verticales segmentadas representan los límites de las calles o avenidas analizadas, es decir, representan el inicio de las edificaciones.

**Figura A 16**

*Análisis del tirante, velocidad y caudal específico para la Sección 16*



En la Sección 16 se observa que el mayor valor del tirante fue calculado por el nivel de Detalle 2, seguido del nivel de Detalle 1 y finalmente el nivel de Detalle 3. La variación entre el Detalle 2 y 1 es mínima.

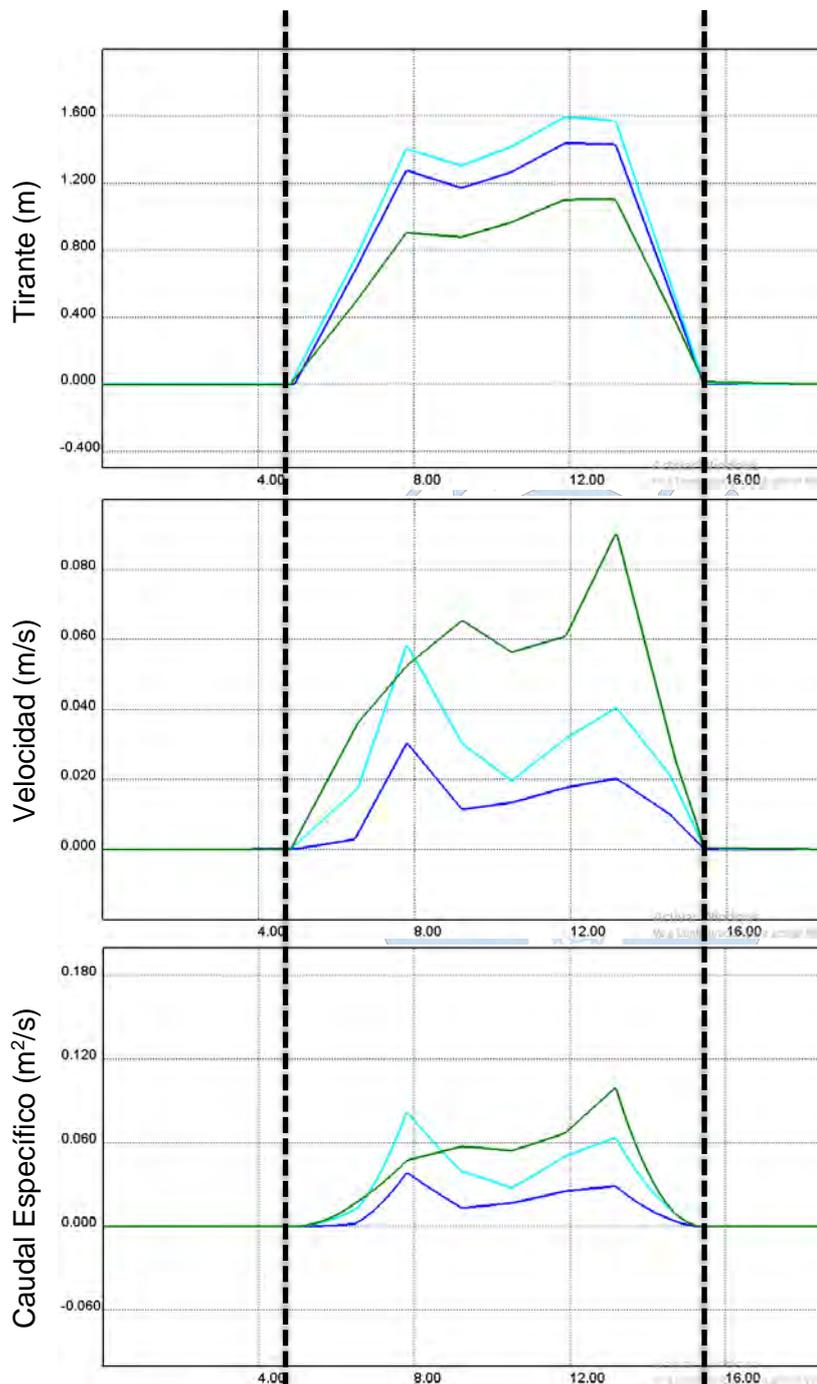
En la Sección 16 se observa que el mayor valor de la velocidad fue calculado por el nivel de Detalle 1, seguido del nivel de Detalle 2 y finalmente el nivel de Detalle 3.

En la Sección 16 se observa que el mayor caudal específico fue calculado con el Detalle 1, seguido del Detalle 2 y Detalle 3. Este último presenta valores mucho menores.

*Nota:* Elaboración propia. Las líneas negras verticales segmentadas representan los límites de las calles o avenidas analizadas, es decir, representan el inicio de las edificaciones.

**Figura A 17**

*Análisis del tirante, velocidad y caudal específico para la Sección 17*



En la Sección 17 se observa que el mayor valor del tirante fue calculado por el nivel de Detalle 2, seguido del nivel de Detalle 1 y finalmente el nivel de Detalle 3.

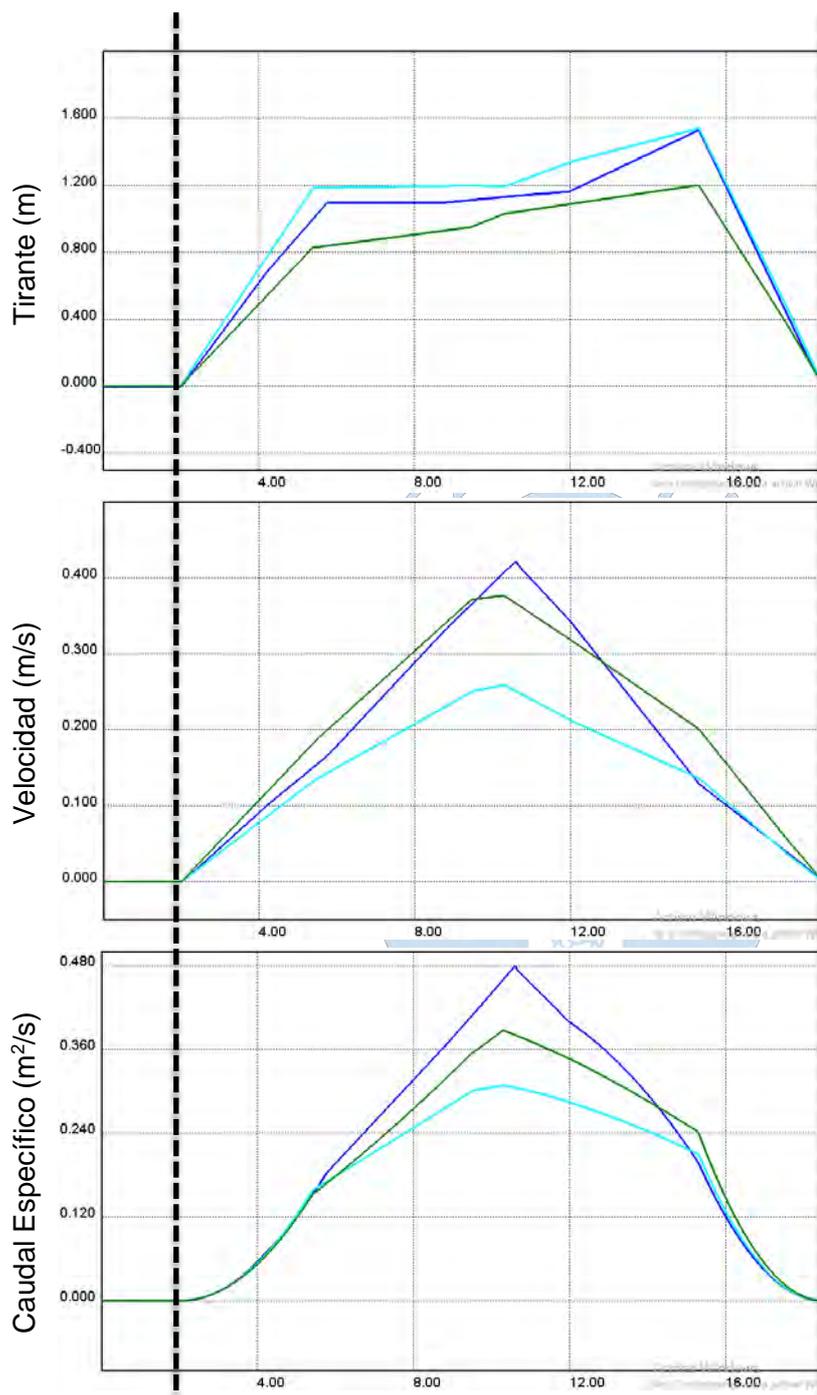
En la Sección 17 se observa que el mayor valor de la velocidad fue calculado por el nivel de Detalle 3, seguido del nivel de Detalle 2 y finalmente el nivel de Detalle 3.

En la Sección 17 se observa que el mayor caudal específico fue calculado con el Detalle 3, seguido del Detalle 2 y Detalle 1.

*Nota:* Elaboración propia. Las líneas negras verticales segmentadas representan los límites de las calles o avenidas analizadas, es decir, representan el inicio de las edificaciones.

**Figura A 18**

*Análisis del tirante, velocidad y caudal específico para la Sección 18*



En la Sección 18 se observa que el mayor valor del tirante fue calculado por el nivel de Detalle 2, seguido del nivel de Detalle 1 y finalmente el nivel de Detalle 3. La variación entre el Detalle 2 y 1 es mínima.

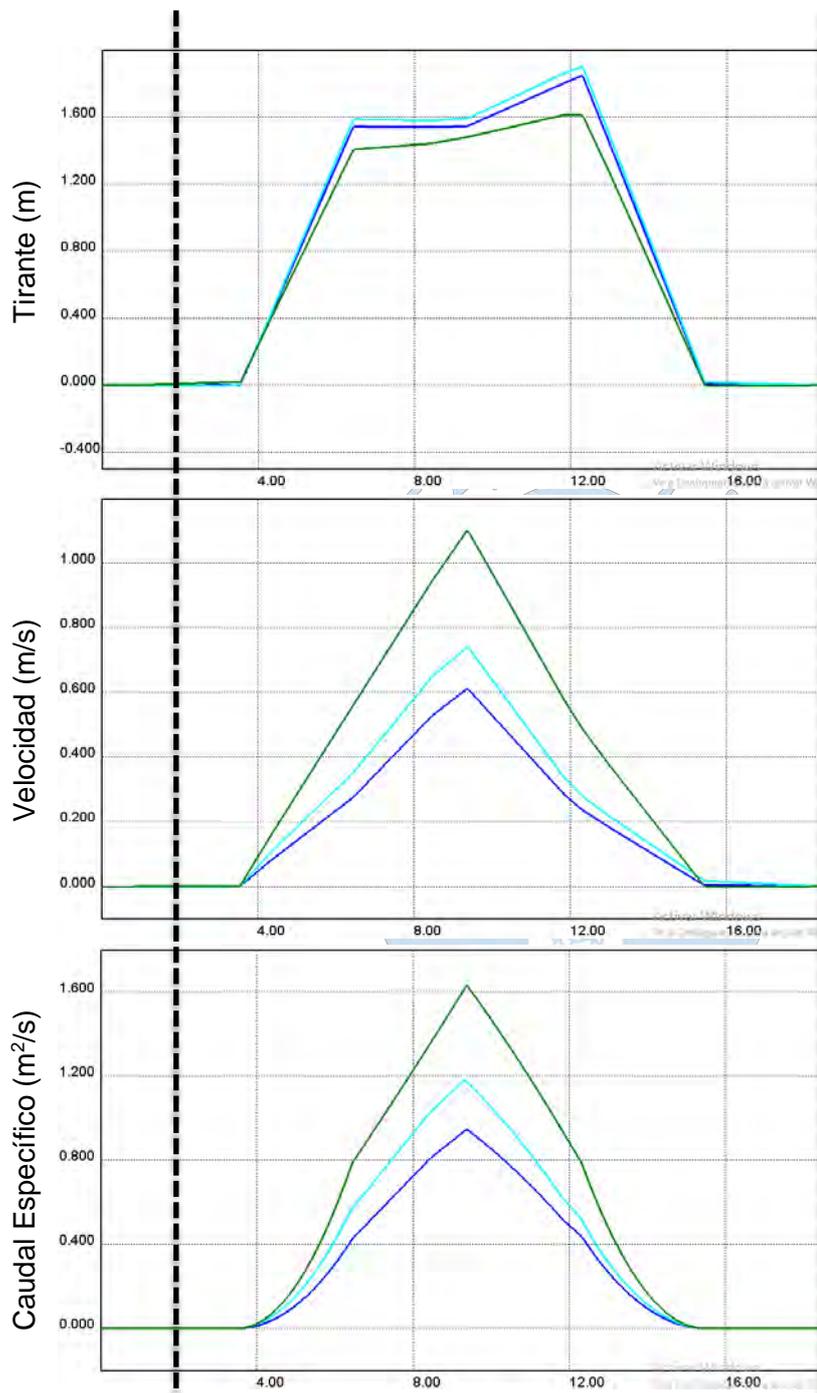
En la Sección 18 se observa que el mayor valor de la velocidad fue calculado por el nivel de Detalle 1, seguido del nivel de Detalle 3 y finalmente el nivel de Detalle 2.

En la Sección 18 se observa que el mayor caudal específico fue calculado con el Detalle 1, seguido del Detalle 3 y Detalle 2.

*Nota:* Elaboración propia. Las líneas negras verticales segmentadas representan los límites de las calles o avenidas analizadas, es decir, representan el inicio de las edificaciones.

**Figura A 19**

*Análisis del tirante, velocidad y caudal específico para la Sección 19*



En la Sección 19 se observa que el mayor valor del tirante fue calculado por el nivel de Detalle 2, seguido del nivel de Detalle 1 y finalmente el nivel de Detalle 3. La variación entre el Detalle 2 y 1 es mínima.

En la Sección 19 se observa que el mayor valor de la velocidad fue calculado por el nivel de Detalle 3, seguido del nivel de Detalle 2 y finalmente el nivel de Detalle 1.

En la Sección 19 se observa que el mayor caudal específico fue calculado con el Detalle 3, seguido del Detalle 2 y Detalle 1.

*Nota:* Elaboración propia. Las líneas negras verticales segmentadas representan los límites de las calles o avenidas analizadas, es decir, representan el inicio de las edificaciones.