



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA
INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA

**“INCORPORACIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL DE PILAS DE PUENTE
EN MODELOS DE SIMULACIÓN 2D PARA REDUCIR LA SOCAVACIÓN LOCAL”**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTAN:

JORGE SAMUEL CARRANCO ROSALES

Y

MIGUEL ANGEL SÁNCHEZ BASTIDA

ASESOR DE TESIS

DR. HUMBERTO SALINAS TAPIA

CO-ASESOR

M. EN C.A. JUAN MANUEL BECERRIL LARA



TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, NOVIEMBRE 2023

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se centra en el estudio de la socavación local en las pilas de puentes, buscando valorar los beneficios obtenidos tras incorporar distintos acabados superficiales para mitigar la profundidad de socavación en estas estructuras. En México los problemas de socavación en infraestructuras son un desafío significativo, por lo que este estudio explora métodos para predecir, analizar y reducir este fenómeno. La implementación de acabados superficiales en las pilas de puentes se propone como una solución para disminuir los efectos de los vórtices de herradura y estela en el flujo, presentándose como una alternativa innovadora y potencialmente efectiva en la lucha contra la socavación.

La modelación y simulación numérica de flujo, debido a su menor demanda de recursos y su flexibilidad analítica, ha adquirido papel importante en este tipo de análisis. Por lo que mediante la implementación del modelo bidimensional IBER, se evaluó la eficacia los acabados superficiales en pilas de puente, tratándolos como un coeficiente de rugosidad equivalente. Este modelo permitió simular diferentes escenarios para validar el impacto de los acabados en el comportamiento hidrodinámico y en la profundidad de socavación en un estudio de caso real.

Para verificar si los acabados superficiales en las pilas de puentes efectivamente reducen la socavación local, se examinaron los efectos de la rugosidad equivalente en el puente “Maxixapa”. Se analizaron acabados tipo liso, casquete hexagonal y casquete esférico bajo condiciones hidrodinámicas y de transporte de sedimentos para periodos de retorno de 5, 10 y 20 años. Los resultados de la simulación bidimensional revelaron que la incorporación de rugosidad superficial sobre pilas de puente puede ser una medida protectora bastante eficaz para disminuir los efectos adversos de la socavación local. Los valores de rugosidad analizadas lograron una disminución de al menos un 30% en la profundidad de socavación en comparación con un acabado liso, demostrando así el potencial de este enfoque en la reducción de la profundidad de socavación en las pilas de puentes.

ABSTRACT

The present research focuses on the study of local scour in bridge piers, aiming to assess the benefits obtained by incorporating different surface finishes to mitigate scour depth in these structures. In México, scour issues in infrastructure pose a significant challenge, and this study explores methods to predict, analyze, and reduce this phenomenon. The implementation of surface finishes on bridge piers is proposed as a solution to decrease the effects of horseshoe and wake vortices in flow, presenting itself as an innovative and potentially effective alternative in the fight against scour.

Due to its lower resource demand and analytical flexibility, the modeling and numerical simulation of flow have gained importance in this type of analysis. Therefore, by implementing the two-dimensional IBER model, the effectiveness of surface finishes on bridge piers was evaluated, treating them as an equivalent roughness coefficient. This model allowed simulating different scenarios to validate the impact of finishes on hydrodynamic behavior and scour depth in a real case study.

To verify if surface finishes on bridge piers effectively reduce local scour, the effects of equivalent roughness on the "Maxixapa" bridge were examined. Smooth, hexagonal cap, and spherical cap finishes were analyzed under hydrodynamic and sediment transport conditions for return periods of 5, 10, and 20 years. The results of the two-dimensional simulation revealed that the incorporation of surface roughness on bridge piers can be a quite effective protective measure to decrease the adverse effects of local scour. The analyzed roughness values achieved a reduction of at least 30% in scour depth compared to a smooth finish, demonstrating the potential of this approach in reducing scour depth in bridge piers.

ÍNDICE GENERAL

<i>RESUMEN</i>	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
<i>ÍNDICE GENERAL</i>	ix
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	xiii
<i>ÍNDICE DE TABLAS</i>	xix
<i>SIMBOLOGÍA</i>	xxii
<i>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</i>	1
<i>1.1 Antecedentes</i>	2
<i>1.1.1 Casos reales de socavación</i>	3
<i>1.1.2 Antecedentes de rugosidad</i>	4
<i>1.1.2.1 Implementación de rugosidades en pilas por el IMTA</i>	5
<i>1.1.2.2 Análisis de la socavación con acabado superficial en puentes con Particle Image Velocimetry (PIV)</i>	8
<i>1.1.2.3 Discos Porosos</i>	11
<i>1.1.2.4 Antecedentes de modelos de simulación numérica</i>	13
<i>1.2 Planteamiento del problema</i>	14
<i>1.3 Justificación</i>	16
<i>1.4 Hipótesis</i>	19
<i>1.5 Objetivo general</i>	19
<i>1.6 Estructura de la tesis</i>	19
<i>CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO</i>	21
<i>2.1 Cuenca hidrográfica</i>	21
<i>2.2 Caracterización de la Precipitación</i>	25
<i>2.2.1 Modelo de los Polígonos de Thiessen</i>	25
<i>2.1.2.2 Modelo de lluvia intensa generalizada de Chen</i>	26
<i>2.2.3 Curvas de intensidad – duración – periodo de retorno (IDTr)</i>	28
<i>2.3 Relación lluvia- escurrimiento</i>	29
<i>2.3.1 Métodos para establecer la relación Lluvia-Escurrimiento</i>	29

2.3.2 Método del Hidrograma Sintético Unitario Triangular SCS.....	30
2.3.3 Precipitación Efectiva SCS	31
2.3.4 Evaluación de P_0	33
2.3.5 Número de Curva (CN)	33
2.4 Erosión en cauces	34
2.5 Socavación en cauces	39
2.5.1 Clasificación de la socavación en cauces	39
2.5.1.1 Métodos para calcular la socavación general	40
2.5.1.2 Métodos para calcular la socavación local	41
2.6 Aspectos de Hidráulica Fluvial.....	52
2.6.1 Inicio de Movimiento.....	53
2.6.2 Esfuerzo Cortante Crítico	53
2.6.3 Velocidad Crítica o de Inicio de Arrastre.....	54
2.3.3.4 Método de Maza García para diseño de secciones.	56
2.3.3.7 Esfuerzo Cortante Efectivo.....	57
2.3.3.8 Transporte de sedimentos	57
2.3.3.9 Método para evaluar el transporte de fondo.....	58
2.7.1 Modelo de simulación numérica bidimensional Iber.....	60
2.7.1.1 Módulo hidrodinámico	61
2.7.1.2 Condiciones de Contorno Hidrodinámicas	62
2.7.1.3 Módulo de Turbulencia.....	64
2.7.1.4 Modelo $k-\varepsilon$ de Rastogi y Rodi.....	65
2.7.1.5 Módulo de Transporte de Sedimentos	67
2.4.2 Sistemas de información geográfica SIG.....	67
2.8 Zona de estudio.....	70
2.5.1 Problemática en la Zona	70
2.8.2 Ubicación Geográfica.....	71
2.8.3 Geología y Geomorfología.....	73
2.8.5 Fisiografía.....	75
2.8.6 Actividades Económicas.....	76
2.8.7 Clima y Vegetación.....	77
2.8.8 Uso de Suelo.....	78

CAPÍTULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	79
3.1 Etapa 1: Búsqueda de Información	80
3.1.1 Textos relacionados con la problemática.....	80
3.1.2 Definición de la zona de estudio	81
3.1.3 Datos de la zona de estudio.....	82
3.2 Etapa 2: Estudio hidrológico de la cuenca	84
3.2.1 Identificación del lugar de estudio.....	84
3.2.2 Delimitación de la cuenca y parámetros hidrológicos.....	85
3.2.3 Obtención de las curvas IDTr	87
3.2.4 Calibración del factor de conectividad (R)	87
3.2.6 Conceptualización de pérdidas por infiltración.....	89
3.2.7 Estimación de los hidrogramas de la cuenca.....	89
3.3 Simulación Iber.....	90
3.3.1 Definición de escenarios de simulación.....	90
3.3.2 Comparativa de Hidrograma Completo y Caudal Pico.....	92
3.3.3 Proceso general de simulación dentro del modelo Iber.....	92
3.3.3 Pre- Proceso.....	92
3.3.3.1 Modelo Geométrico	93
3.3.3.2 Condiciones de contorno.....	93
3.3.3.3 Usos de suelo empleados en el tramo de estudio	95
3.3.3.4 Proceso de Mallado.....	97
3.3.3.5 Incorporación del módulo de transporte de sedimentos en el tramo de estudio.....	99
3.3.4 Proceso.....	99
3.3.5 Post Proceso.....	102
3.4 Etapa 4: Análisis de resultados	102
3.4.1 Identificación de valores máximos en velocidad, tirante y erosión	103
3.4.2 Discusión de resultados.....	103
CAPÍTULO 4 RESULTADOS.....	105
4.1 Estudio hidrológico.....	106
4.1.1 Caracterización de la precipitación.....	107
4.1.1.1 Polígonos de Thiessen	107
4.1.1.2 Precipitación en 24 hrs asociada a diferentes periodos de retorno.....	108

4.1.1.3 Curvas IDTr.....	108
4.1.1.4 Hietogramas de precipitación para las estaciones Huixtla y Despoblado	112
4.1.1.5 Precipitación Efectiva	116
4.1.2 Hidrogramas para el tramo de estudio.....	120
4.1.3 Acabados superficiales.....	122
4.2 Simulación Hidrodinámica del tramo de estudio	122
4.2.1 Comparación de la simulación del Hidrograma Completo vs. Caudal Pico	122
4.2.2 Simulaciones hidrodinámicas.....	132
4.2.2.1 Resultados de la simulación de pilas con acabado Liso	132
4.2.2.1.1 Velocidad.....	132
4.2.2.1.1 Profundidad del flujo (tirante).....	133
4.2.2.2 Resultados de la simulación de pilas con acabado rugoso (casquete hexagonal)	134
4.2.2.2.1 Velocidad.....	134
4.2.2.2.1 Profundidad del flujo (tirante).....	135
4.2.2.3 Resultados de la simulación de pilas con acabado rugoso (casquete esférico)	136
4.2.2.3.1 Velocidad.....	137
4.2.2.3.1 Profundidad del flujo (tirante).....	138
4.2.2.2 Comparativa de resultados de simulaciones hidrodinámicas	139
4.3 Resultados de la erosión para las pilas con acabado liso.....	140
4.5 Resultados de la erosión en pilas con acabado superficial de Casquete Hexagonal....	144
4.4 Resultados de la erosión en pilas con acabado superficial de casquete esférico	147
4.6 Sección longitudinal	155
4.7 Evolución de la profundidad de socavación a lo largo del tiempo	157
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	169
REFERENCIAS.....	173

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Puente Ashburton River, efectos de socavación local en pilas (Tomado de Cusba, 2011).</i>	3
<i>Figura 1.2 Cimentación de puente vehicular expuesta debido a la socavación (Tomado de Cusba, 2011).</i>	4
<i>Figura 1.3 Puentes vehiculares en México afectados por el fenómeno de socavación (Modificado de Martínez 2007).</i>	5
<i>Figura 1.4 Acabados superficiales de pilas, a) pila lisa, b) pila con perforaciones, c) pila con perforaciones en V, d) pila con ranuras y e) pila con ranuras horizontales (Modificada de IMTA, 2017).</i>	6
<i>Figura 1.5 Comparativa de profundidades de socavación según los acabados a lo largo del tiempo (Modificado de IMTA, 2017).</i>	7
<i>Figura 1.6 Resultados del estudio, a) morfología de pila lisa, b) morfología de pila rugosa, c) foso de socavación en pila lisa y d) foso de socavación en pila rugosa (Modificado de IMTA, 2017).</i>	8
<i>Figura 1.7 Acabados superficiales de pilas, a) pila con acabado casquete esférico, b) pila con acabado casquete hexagonal, c) pila con acabado V y d) pila lisa (Modificado de Salinas et al., 2017).</i>	10
<i>Figura 1.8 Campos de velocidades en pilas, a) Corte vertical en acabado liso, b) Corte vertical en acabado “casquete esférico”, c) Corte horizontal acabado liso y d) Corte horizontal acabado “casquete esférico” (Modificado de Salinas et al., 2017).</i>	12
<i>Figura 2.1 Principales características de una cuenca hidrográfica</i>	23
<i>Figura 2.2 Pendiente media del cauce principal</i>	23
<i>Figura 2.3 Pendiente media ponderada (P.M.P) del cauce principal</i>	24
<i>Figura 2.4 Diagrama de los Polígonos de Thiessen.</i>	26
<i>Figura 2.5 Hidrograma unitario adimensional SCS.</i>	31
<i>Figura 2.6 Consideraciones para la estimar la socavación local en pilas para el método de la Universidad de Colorado. a) Cálculo de la socavación local al pie de una pila rectangular, b) Cálculo de la socavación local al pie de una pila redondeada, c) Cálculo de la socavación local al pie de una pila circular y d) Formas de la nariz de una pila.</i>	43

<i>Figura 2.7 Consideraciones para evaluar la socavación local en el método Laursen-Toch. a) Relación entre la erosión y profundidad relativa, b) Coeficiente de corrección cuando existe un ángulo de incidencia entre el eje de la pila y la corriente.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 2.8 Valores de k_1 y b_1 para diferentes pilas y distintos ángulos de incidencia del método de Yaroslavtziev. a) Pilas tipo I, II y III, b) Pilas tipo IV y V, c) Pilas tipo VI y VII.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 2.9 Consideraciones adicionales para evaluar la socavación local en el método Yaroslavtziev. a) Valores de coeficiente K_v, b) Valores de coeficiente K_H y c) Zonas de aplicabilidad de los métodos de Laursen-Toch y Yaroslavtziev.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 2.10 Curva para valor de parámetro de Shields</i>	<i>54</i>
<i>Figura 2.11 Esquema del módulo de transporte sólido-no estacionario en Iber (Blade et al.,2014).</i>	<i>67</i>
<i>Figura 2.12 Estructura de imágenes en un SIG (Extraído de ArcGIS Resources,2023).</i>	<i>69</i>
<i>Figura 2.13 Cimentación del puente Maxixapa expuesta debido al fenómeno de socavación local (Martínez, 2017).</i>	<i>71</i>
<i>Figura 2.14 Cuencas Hidrológicas de la Costa de Chiapas (CONAGUA, 2014).</i>	<i>72</i>
<i>Figura 2.15 Cuencas y Subcuencas del Estado de Chiapas (GECCSA INGENIERIA S.A. DE C.V., 2003).....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 2.16 Hidrología superficial de Chiapas (GECCSA INGENIERIA S.A. DE C.V. 2003).....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 2.17 Geología de Chiapas (Modificada de GECCSA INGENIERIA S.A. DE C.V. (2003).</i>	<i>75</i>
<i>Figura 2.18 Fisiografía de Chiapas (Modificada de GECCSA INGENIERIA S.A. DE C.V. (2003).</i>	<i>76</i>
<i>Figura 2.19 Clima del estado de Chiapas (Modificada de GECCSA INGENIERIA S.A. DE C.V. (2003).</i>	<i>77</i>
<i>Figura 2.20 Usos de suelo y Vegetación en la costa de Chiapas (CONAGUA, 2014).</i>	<i>78</i>
<i>Figura 3.1 Etapas desarrolladas en el presente trabajo de investigación.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 3.2 Parámetros geométricos de los acabados superficiales (Modificado de Álvarez,2022).</i>	<i>81</i>
<i>Figura 3.3 Propuestas de puentes a estudiar; a) Puente Maxixapa y b) Puente Congreso San Nicolás.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 3.4 Tramo del río y ubicación del puente en estudio.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 3.5 Corte transversal del puente Maxixapa.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 3.6 Ubicación del puente Maxixapa</i>	<i>85</i>
<i>Figura 3.7 Cuenca de aporte delimitada utilizando un SIG.....</i>	<i>86</i>

<i>Figura 3.8 Influencia de las estaciones meteorológicas sobre la cuenca de estudio estimada a través de los Polígonos de Thiessen.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 3.9 Isoyetas SCT para una duración de 1 hora y 10 años periodo de retorno.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 3.10 Información y tipo de formato requerido para la alimentación del modelo Iber.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 3.11 Escenarios de simulación establecidos para el análisis de la rugosidad superficial en las pilas del puente Maxixapa</i>	<i>91</i>
<i>Figura 3.12 Simulación con el caudal pico y simulación con hidrograma completo</i>	<i>92</i>
<i>Figura 3.13 Etapas del Pre-Proceso en el Modelo IBER</i>	<i>93</i>
<i>Figura 3.14 Modelo geométrico del río Maxixapa.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 3.15 Asignación de las condiciones de contorno de entrada y salida</i>	<i>94</i>
<i>Figura 3.16 Asignación de las condiciones hidrodinámicas de contorno, a) Entrada y b) Salida.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 3.17 Usos de suelo en el tramo de estudio.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 3.18 Asignación automática de las rugosidades.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 3.19 Malla de cálculo obtenida para el tramo de estudio. a) Malla generada y b) Resultados de la malla.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 3.20 Tamaños de malla en el cauce.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 3.21 Malla con elevación asignada por MDE.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 3.22 Asignación automática de la capa roca.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 3.23 Posición de la capa roca.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 3.24 Parámetros de tiempo utilizados en el modelo Iber</i>	<i>101</i>
<i>Figura 3.25 Opciones de configuración del módulo de transporte de sedimentos.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 3.26 Ejemplo de resultados en postproceso.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 4.1 Cuenca delimitada del caso de estudio</i>	<i>106</i>
<i>Figura 4.2 Influencia de las estaciones Huixtla y Despoblado según el método de Polígonos de Thiessen.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 4.3 Curvas IDTr para la estación 7077 Huixtla.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 4.4 Curvas IDTr para la estación 7038 Despoblado.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 4.5 Hietogramas de altura de lluvia para la estación 7077 – Huixtla para diferentes periodos de retorno, a) Tr= 5 años, b) Tr= 10 años y C) Tr= 20 años.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 4.6 Hietogramas de intensidad de lluvia para la estación 7077 – Huixtla para diferentes periodos de retorno, a) Tr= 5 años, b) Tr= 10 años y C) Tr= 20 años.....</i>	<i>114</i>

<i>Figura 4.7 Hietogramas de altura de lluvia para la estación 7038 – Despoblado para diferentes periodos de retorno, a) Tr= 5 años, b) Tr= 10 años y C) Tr= 20 años.....</i>	115
<i>Figura 4.8 Hietogramas de intensidad de lluvia para la estación 7038 – Despoblado para diferentes periodos de retorno, a) Tr= 5 años, b) Tr= 10 años y C) Tr= 20 años.....</i>	116
<i>Figura 4.9 Tipos de usos de suelo designado por INEGI sobre la cuenca de estudio</i>	117
<i>Figura 4.10 Hietogramas de precipitación efectiva para la estación 7077-Huixtla, a) Tr= 5 años, b) Tr= 10 años y C) Tr= 20 años.</i>	119
<i>Figura 4.11 Hietogramas de precipitación efectiva para la estación 7078-Despoblado, a) Tr= 5 años, b) Tr= 10 años y C) Tr= 20 años.</i>	120
<i>Figura 4.13 Ubicación del punto de análisis de la evolución temporal del tirante y profundidad de socavación</i>	123
<i>Figura 4.14 Evolución del tirante en el punto de análisis a través del tiempo de simulación para Tr=100 años para un acabado superficial liso.....</i>	123
<i>Figura 4.15 Evolución de la profundidad de socavación local en el punto de análisis a través del tiempo de simulación para Tr=100 años para un acabado superficial liso.....</i>	124
<i>Figura 4.16 Comportamiento de la profundidad del flujo (tirante) en el tramo en estudio para un Tr= 100 años.....</i>	125
<i>Figura 4.17 Comportamiento de la velocidad en el tramo en estudio para un Tr= 100 años.....</i>	126
<i>Figura 4.18 Reducción del ancho del cauce antes de entrar en la zona de pilas.....</i>	127
<i>Figura 4.19 Comportamiento de la profundidad del flujo (Tirante -m-) en zona de pilas para un periodo de retorno Tr=20 años a) Hidrograma completo y b) Caudal pico.....</i>	127
<i>Figura 4.20 Comportamiento de la velocidad (m) en la zona de pilas para un periodo de retorno de Tr=20 años a) Hidrograma completo y b) Caudal pico</i>	128
<i>Figura 4.21 Mapas de erosión (m) en la zona de pilas para un periodo de retorno de Tr=20 años a) Hidrograma completo y b) Caudal pico</i>	129
<i>Tabla 4.19 Tiempo de cómputo requerido para los escenarios de simulación evaluados ...</i>	130
<i>Figura 4.22 Ataque del flujo en la pila uno.</i>	131
<i>Figura 4.23 Comportamiento de la velocidad (m/s) en zona de pilas con acabado liso, a) Tr= 5 años, b) Tr= 10 años, c) Tr= 20 años.</i>	133
<i>Figura 4.24 Comportamiento de la profundidad del flujo (tirante -m-) en zona de pilas con acabado liso para diferentes periodos de retorno, a) Tr= 5 años, b) Tr= 10 años, c) Tr = 20 años.</i>	134

<i>Figura 4.25 Comparación de la velocidad en zona de pilas con acabado superficial en casquete hexagonal para diferentes periodos de retorno, a) Tr= 5 años, b) Tr= 10 años, c) Tr = 20 años.</i>	135
<i>Figura 4.26 Comportamiento de la profundidad del flujo (tirante) en la zona de pilas con acabado superficial en casquete hexagonal para diferentes periodos de retorno, a) Tr= 5 años, b) Tr= 10 años, c) Tr = 20 años.</i>	136
<i>Figura 4.27 Comparación de la velocidad en zona de pilas con acabado superficial en casquete esférico para diferentes periodos de retorno, a) Tr= 5 años, b) Tr= 10 años, c) Tr = 20 años.</i>	137
<i>Figura 4.28 Comportamiento de la profundidad del flujo (tirante) en la zona de pilas con acabado superficial en casquete esférico para diferentes periodos de retorno, a) Tr= 5 años, b) Tr= 10 años, c) Tr = 20 años.</i>	138
<i>Figura 4.34 Mapa de erosión (m) en la zona de pilas con acabado de casquete hexagonal para un periodo de retorno de Tr=5 años donde los valores positivos son socavación (+) y negativos depósito (-).</i>	144
<i>Figura 4.35 Mapa de erosión (m) en la zona de pilas con acabado de casquete hexagonal para un periodo de retorno de Tr=10 años donde los valores positivos son socavación (+) y negativos depósito (-).</i>	144
<i>Figura 4.36 Mapa de erosión (m) en la zona de pilas con acabado de casquete hexagonal para un periodo de retorno de Tr=20 años donde los valores positivos son socavación (+) y negativos depósito (-).</i>	145
<i>Figura 4.39 Mapa de erosión (m) en la zona de pilas con acabado de casquete esférico para un periodo de retorno de Tr=5 años donde los valores positivos son socavación (+) y negativos depósito (-).</i>	147
<i>Figura 4.40 Mapa de erosión (m) en la zona de pilas con acabado de casquete esférico para un periodo de retorno de Tr=10 años donde los valores positivos son socavación (+) y negativos depósito (-).</i>	147
<i>Figura 4.41 Mapa de erosión (m) en la zona de pilas con acabado de casquete esférico para un periodo de retorno de Tr=20 años donde los valores positivos son socavación (+) y negativos depósito (-).</i>	148
<i>Figura 4.45 Comparativa de la profundidad de socavación con diferentes acabados en pila 1 para el periodo de retorno Tr=10 años.</i>	151
<i>Figura 4.50 Perfil longitudinal de descenso de fondo para Tr= 5 años</i>	155
<i>Figura 4.51 Perfil longitudinal de descenso de fondo para Tr= 10 años</i>	155
<i>Figura 4.52 Perfil longitudinal de descenso de fondo para Tr= 20 años</i>	156
<i>Figura 4.53 Imágenes de la zona del puente y la problemática de sedimentos.</i>	156
<i>Figura 4.54 Evolución de la profundidad de socavación (ds/y) a lo largo del tiempo para un Tr= 5 años en la “Pila 1”</i>	158

<i>Figura 4.55 Evolución de la profundidad de socavación (ds/y) a lo largo del tiempo para un $Tr= 10$ años en la “Pila 1”</i>	159
<i>Figura 4.56 Evolución de la profundidad de socavación (ds/y) a lo largo del tiempo para un $Tr= 20$ años en la “Pila 1”</i>	160
<i>Figura 4.57 Evolución de la profundidad de socavación (ds/y) a lo largo del tiempo para un $Tr= 5$ años en la “Pila 2”</i>	161
<i>Figura 4.58 Evolución de la profundidad de socavación (ds/y) a lo largo del tiempo para un $Tr= 10$ años en la “Pila 2”</i>	162
<i>Figura 4.59 Evolución de la profundidad de socavación (ds/y) a lo largo del tiempo para un $Tr= 20$ años en la “Pila 2”</i>	163
<i>Figura 4.60 Comparativa de la evolución ds/y para diferentes acabados en $Tr= 5$ años en “Pila 1”</i>	164
<i>Figura 4.61 Comparativa de la evolución ds/y para diferentes acabados en $Tr= 10$ años en “Pila 1”</i>	165
<i>Figura 4.62 Comparativa de la evolución ds/y para diferentes acabados en $Tr= 20$ años en “Pila 1”</i>	165
<i>Figura 4.63 Comparativa de la evolución ds/y para diferentes acabados en $Tr= 5$ años en “Pila 2”</i>	166
<i>Figura 4.64 Comparativa de la evolución ds/y para diferentes acabados en $Tr= 10$ años en “Pila 2”</i>	167
<i>Figura 4.65 Comparativa de la evolución ds/y para diferentes acabados en $Tr= 20$ años en “Pila 2”</i>	167

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.1 Dimensiones y características de la pila modelo “Congreso-San Nicolas” (Salinas et al., 2017).</i>	9
<i>Tabla 1.2 Parámetros hidráulicos usados para el análisis en pilas (Salinas et al., 2017).</i>	11
<i>Tabla 1.3 Comparación de los valores de la profundidad de socavación máxima para los diferentes números de Froude (Salinas et al., 2017).</i>	12
<i>Tabla 2.1 Valores de CN (Adaptado de Campos,2010).</i>	34
<i>Tabla 2.2 Valores del coeficiente μ (Perez, et al., 2018).</i>	41
<i>Tabla 2.3 Valores del coeficiente K_1</i>	44
<i>Tabla 2.4 Valores del coeficiente K_2</i>	44
<i>Tabla 2.5 Valores del coeficiente K_3</i>	44
<i>Tabla 2.6 Coeficiente de corrección que depende de la forma de la pila.</i>	47
<i>Tabla 2.7 Factor de corrección f_c</i>	51
<i>Tabla 2.8 Condiciones de acuerdo con el tipo de contorno y régimen (Blade et al., 2014).</i>	65
<i>Tabla 2.9 Tipos de rocas existentes en el municipio de Villa Comaltitlán (INEGI ,2010).</i>	74
<i>Tabla 2.10 Actividades de la zona (INEGI ,2010).</i>	77
<i>Tabla 3.1 Valores de rugosidad equivalente superficial para los diferentes acabados.</i>	81
<i>Tabla 3.2 Datos del estudio GECCSA INGENIERIA S.A. DE C.V. (2003).</i>	83
<i>Tabla 3.3 Tipo de condiciones de contorno asignadas al tramo de estudio</i>	95
<i>Tabla 3.4 Coeficientes de rugosidad (n) según en uso de suelo</i>	96
<i>Tabla 3.5 Parámetros generales de simulación utilizados en el modelo Iber</i>	101
<i>Tabla 4.1 Características fisiográficas de la cuenca de estudio</i>	106
<i>Tabla 4.2 Valores de precipitación máxima diaria anual para cada estación.</i>	109
<i>Tabla 4.3 Resultados del ajuste Gumbel para la estación 7077 Huixtla.</i>	110
<i>Tabla 4.4 Resultados del ajuste Gumbel para la estación 7038 Despoblado.</i>	110
<i>Tabla 4.5 Valor del coeficiente R para cada periodo de retorno, estación 7077 Huixtla.</i>	111
<i>Tabla 4.6 Valor del coeficiente R para cada periodo de retorno estación 7038 Despoblado.</i>	111
<i>Tabla 4.7 Valores de convectividad R usados en cada estación.</i>	111

<i>Tabla 4.8 Parámetros de ecuaciones para determinar las curvas IDTr para cada estación.....</i>	112
<i>Tabla 4.9 Características de los tipos de suelo publicados por INEGI para la cuenca de estudio.....</i>	117
<i>Tabla 4.10 Valores de CN asignados a las muestras y su ponderación.....</i>	118
<i>Tabla 4.11 Resultados finales de la precipitación.....</i>	118
<i>Tabla 4.12 Parámetros de la cuenca utilizado en el método del hidrograma unitario sintético del SCS.....</i>	121
<i>Tabla 4.13 Gastos máximos para cada Tr.....</i>	121
<i>Tabla 4.14 Valores de rugosidad superficial para los diferentes acabados (Álvarez, 2022).....</i>	122
<i>Tabla 4.15 Comparación de los valores de tirante y socavación simulados respecto a los valores presentados en la manifestación de impacto ambiental.....</i>	124
<i>Respecto a la comparativa del comportamiento de los tirantes a lo largo del tramo en estudio, para las condiciones de flujo de entrada (hidrograma completo y caudal pico) para un Tr=20 años, los resultados para el tirante y la velocidad se muestran en las Figura 4.16 y la Figura 4.17 respectivamente.</i>	124
<i>Tabla 4.16 Resultados generales en la zona de pilas.....</i>	126
<i>Tabla 4.17 Variables hidrodinámicas y de erosión obtenidas en los escenarios evaluados.....</i>	129
<i>Tabla 4.18 Diferencia en porcentaje de los resultados del caudal pico respecto al hidrograma completo.....</i>	130
<i>Tabla 4.19 Tiempo de cómputo requerido para los escenarios de simulación evaluados... </i>	130
<i>Tabla 4.20 Condiciones de simulación para cada periodo de retorno.....</i>	132
<i>Tabla 4.21 Tabla resumen de parámetros hidrodinámicos en la pila 1.....</i>	139
<i>Tabla 4.22 Porcentaje de reducción de valores hidrodinámicos con acabados superficiales en pila 1 respecto a pila lisa.....</i>	139
<i>Tabla 4.23 Tabla resumen de parámetros hidrodinámicos en pila 2.....</i>	140
<i>Tabla 4.24 Porcentaje de reducción de valores hidrodinámicos con acabados superficiales en pila 2 respecto a pila lisa.....</i>	140
<i>Figura 4.29 Mapa de erosión (m) en la zona de pilas con acabado liso para un periodo de retorno de Tr= 5 años donde los valores positivos son socavación (+) y negativos depósito (-).</i>	141
<i>Tabla 4.25 Profundidad máxima de socavación para diferentes Tr en pila lisa.....</i>	142
<i>Tabla 4.26 Profundidad máxima de socavación para diferentes Tr en las pilas con acabado de casquete hexagonal.....</i>	145

<i>Tabla 4.27 Profundidad máxima de socavación para diferentes Tr en pila con acabado decasquete esférico.</i>	<i>148</i>
<i>Tabla 4.28 Tabla resumen de valores máximos de socavación alcanzados en la pila I para diferentes acabados según el periodo de retorno.</i>	<i>154</i>
<i>Tabla 4.29 Porcentaje de reducción de profundidad máxima de socavación empleando acabados superficiales respecto al acabado liso.</i>	<i>154</i>
<i>Tabla 4.30 Alturas máximas de deposición de sedimento cercanas a las pilas.</i>	<i>157</i>

SIMBOLOGÍA

- D_s = Densidad de corriente ($\frac{Ns}{km^2}$)
- N_s = Suma del número de corrientes que hay en la cuenca
- A = Área de la cuenca (km^2 o m^2)
- D_d = Densidad de drenaje ($\frac{km}{km^2}$)
- L = Suma de la longitud de todos los tributarios (km)
- H_1 = Cota más baja de la pendiente media ponderada (m)
- H_2 = Cota más alta de la pendiente media ponderada (m)
- b = Longitud del cauce vista en planta (m)
- AT = Área bajo la curva que forma el perfil del cauce (m^2)
- P_t^T = Precipitación, en milímetros para una duración t en min, y un período de retorno T en años
- a , b y c = Parámetros de tormenta que pueden variar según el factor de conectividad
- k , m , n y c = Constantes que se calculan mediante un análisis de correlación lineal múltiple
- Q_p = *Caucal pico* ($m^3/s/mm$)
- t_b = Tiempo base en segundos (s)
- t_p = Tiempo pico en segundos (s)
- t_r = Tiempo de retraso en (s)
- d_e = Duración en exceso en segundos (s)
- t_c = Tiempo de concentración en segundos (s)
- FRA = Factor de reducción de área (adimensional)
- Q_p' = *Gasto pico* (m^3/s)
- Pe = *lamina de precipitación efectiva* (mm)
- P_0 = Abstracción inicial del método SCS (mm)
- ϵ = Tasa promedio de erosión fluvial

- k_d = Coeficiente de erodabilidad del suelo
- τ_b = Esfuerzo Actuante
- τ_c = Esfuerzo Crítico Asociado a las partículas que componen la margen
- E = Tasa promedio de erosión fluvial por unidad de tiempo
- Δt = lapso de tiempo relacionado con la tasa promedio de erosión fluvial
- Y_n = Profundidad inicial de cualquier franja de la sección del cauce, antes de iniciarse el proceso de socavación, medida de la superficie libre de agua cuando pasa la avenida de diseño hasta el fondo del cauce en época de estiaje (m).
- D_{84} = Diámetro por debajo del cual queda el 84% del suelo en peso. (m)
- dm = Tirante medio de la corriente (m).
- Q_d = Gasto de diseño (m^3/s).
- Tr = Periodo de retorno (años).
- Be = Ancho efectivo. (m)
- μ = Coeficiente que toma en cuenta las contracciones del flujo producto de las obstrucciones
- y_s = Profundidad de socavación (m).
- y_l = Tirante del flujo directamente aguas arriba de la pila (m).
- K_1 = Factor de corrección por la forma de la nariz de la pila
- K_2 = Factor de corrección para el ángulo de ataque de flujo
- K_3 = factor de corrección para la condición del fondo del cauce o lecho del río
- K_4 = Factor de corrección por acorazamiento del fondo del cauce,
- a = Ancho de la pila (m)
- L = Largo de la pila (m)
- Fr_l = Número de Froude directamente aguas arriba del puente
- g = Aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2)
- V_R = Razón de Velocidad
- V_1 = Promedio de velocidad en el cauce principal o el área de la llanura de inundación en la sección transversal justo aguas arriba del puente, (m/s)
- $V_{i_{50}}$ = Velocidad más cercana requerida para iniciar la erosión en el pilar para el tamaño de grano D_{50} (m/s)

- $V_{i_{95}}$ = Velocidad más cercana requerida para iniciar la erosión en el pilar para el tamaño de grano D_{95} (m/s)
- $V_{c_{50}}$ = Velocidad crítica para el lecho de tamaño de grano D_{50} (m/s)
- $V_{c_{95}}$ = Velocidad crítica para el lecho de tamaño de grano D_{95} (m/s)
- y = Profundidad del agua justo aguas arriba de la pila, con exclusión de la socavación local (m)
- K_u = 6.19 para unidades del sistema internacional
- S_0 = Profundidad de la socavación frente a la pila, medida desde el fondo original (m)
- K_1 = Coeficiente que depende de la relación que exista entre el tirante de agua después de que se presenta la socavación general “ h ” y el ancho o diámetro de la pila
- K_2 = Coeficiente de corrección que toma en cuenta la forma de la nariz de la pila
- b = Diámetro de la pila (m)
- K_3 = Coeficiente que depende del ángulo que forma el eje de la corriente con el eje de la pila
- K_f = Coeficiente que depende de la forma de la nariz de la pila y el ángulo ϕ que forma el eje de la corriente y el eje de la pila y que según el tipo de pila
- K_v = Coeficiente empleado en el método de Yaroslavtziev
- h = Tirante de la corriente después de que se presenta la socavación general, en m.
- b_l = Proyección en un plano perpendicular a la corriente, del ancho y largo de la pila.
- C = Coeficiente de corrección que depende del sitio donde esté colocada la pila
- K_H = Coeficiente que toma en cuenta el tirante del agua después de producirse la socavación general
- U = Velocidad media de la corriente aguas arriba de la pila, después de presentarse la socavación general, en m/s.
- D_{85} = Diámetro 85 “en cm”, conforme al autor, es el diámetro representativo en el fondo del cauce.
- H_s = Profundidad del agua hacia aguas arriba de la pila antes de la socavación local
- V = Velocidad media de la corriente frente a la pila
- ϕ = Angulo de ataque del flujo
- a' = ancho proyectado de la pila sobre un plano normal a la dirección de la corriente (m)

- H_T = Profundidad de socavación medida desde la superficie del flujo (m)
- d_s = Profundidad de socavación medida desde el lecho del cauce (m) para el método de Maza-Sanchez
- $\tau_* = \tau_0$ = Parámetro Adimensional de Shields (Adimensional)
- R_* = Número de Reynolds (Adimensional)
- U_* = Velocidad Asociada al esfuerzo cortante, Velocidad de Fricción (m/s)
- ρ = Densidad del Agua (kg/m^3)
- τ_c = Esfuerzo Cortante Crítico (kg/m^2)
- ν = Viscosidad Cinemática del Agua (m^2/s)
- δ_s = Peso Específico de las Partículas (kg/m^3)
- δ = Peso Específico del Agua (kg/m^3)
- D = Diámetro característico del material (m)
- U_c = Velocidad Media Crítica (m/s)
- d = Tirante medio de la corriente (m)
- D = Diámetro del material de fondo que se desea conocer su velocidad crítica (m)
- S_s = Densidad relativa de las partículas (Adimensional)
- g = Valor de la gravedad (m/s^2)
- D_{max} = Diámetro máximo del material de fondo que se desea conocer su velocidad crítica (m)
- $U_c = U^*$ = Velocidad media de la corriente (m/s)
- Δ = Relación del peso específico de los sólidos y el fluido.
- D_{50} = Diámetro 50 de la granulometría del suelo (m)
- R_h = Radio hidráulico (m)
- S = Pendiente del cauce
- \bar{U} = Velocidad media crítica (m/s)
- γ = Peso específico del agua o fluido (kg/m^3)
- γ_s = Peso específico de los sedimentos (kg/m^3)
- ks = Tamaño de esfera, para partículas naturales $ks = 2 * D_{50}$ (m)
- S' = Esfuerzo Cortante Actuante en la Margen
- g_T = Transporte total en ($\text{kg/s}\cdot\text{m}$)

- g_L = *Transporte de Fondo* (kg/s·m)
- g_B = *Arrastre en la capa de fondo* (kg/s·m)
- g_{BS} = *Transporte de Fondo en Suspensión* (kg/s·m)
- γ_S = Peso específico del material que conforma el cauce, en kg/m³,
- D_m = Diámetro medio del material del cauce (m),
- n = Coeficiente de rugosidad del cauce (adimensional),
- n' = Rugosidad asociada a las partículas
- D_{90} = Es el diámetro por debajo del cual queda el 90% del suelo en peso (m).

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La proyección, planeación y construcción de obras hidráulicas son esenciales para abordar los desafíos relacionados con el agua, promover el desarrollo sostenible y mejorar la calidad de vida de las comunidades. Por tal motivo, es de especial interés la implementación de nuevas estrategias que ayuden a prevenir y combatir los problemas a los cuales las obras hidráulicas se enfrentan como lo es la socavación local en estructuras colocadas en lechos móviles, azolves, problemas relacionados con el intemperismo, obstrucciones en canales o tuberías, mal diseño, problemas de asentamientos o geotécnicos y presencia de eventos atípicos (lluvias máximas y caudales extraordinarios).

En México, la problemática de la socavación es más prevalente de lo que comúnmente se percibe, con numerosos casos de puentes que han experimentado los impactos adversos de este fenómeno localizado. En 2003 una manifestación de impacto ambiental realizada por GECCSA S.A DE C.V. (2003) señaló que el puente Maxixapa ubicado en Chiapas sobre el km 235+700 del Camino Directo Arriaga – Huixtla se encuentra bajo esta problemática debido al flujo transportado por los ríos Huixtla y Despoblado.

Este fenómeno se ha estudiado con la finalidad de reducir los efectos negativos de la socavación local al pie de pilas de puente. Una alternativa interesante es analizar la incorporación de rugosidad artificial para atenuar los mecanismos hidrodinámicos que producen el fenómeno de socavación, sin embargo, es necesario valorar la elección del tipo de rugosidad a utilizar con el objetivo de maximizar su eficiencia y de esta forma disminuir el riesgo de falla en estructuras proclives a presentar socavación. Estas condiciones, ameritan la realización de estudios que permitan conocer con mayor precisión que características serían las más adecuadas de adoptar para circunstancias particulares de cada proyecto.

Sin embargo, hay que tener presente que la realización de este tipo de análisis representa un gran reto por lo que, en los últimos años, el uso y desarrollo de modelos computacionales dedicados a la ingeniería de ríos ha sido un elemento clave para simular, calcular e interpretar resultados del fenómeno de socavación minimizando así la cantidad de recursos requeridos para su realización.

Todos estos elementos permitieron plantear como tema de investigación la propuesta de emplear distintos tipos de rugosidades superficiales para pilas de puentes, aplicado sobre un caso de estudio real, con el fin de determinar cuáles son los beneficios obtenidos y cuál de las alternativas evaluadas resulta ser la más adecuada para reducir la profundidad de socavación en el puente Maxixapa.

1.1 Antecedentes

El estudio de la socavación en puentes resulta ser uno de los temas más interesantes en el ámbito de la ingeniería de puentes y de la ingeniería hidráulica. Entre estas disciplinas existe una relación muy estrecha, pues lo que ocurre en un campo tiene repercusiones en el otro. México es uno de los tantos países que sufren muchos problemas de infraestructura relacionados al problema de socavación, en donde diversos ejemplos dan cuenta de esta problemática.

Es importante resaltar que existen dos condiciones que tienen un interés primordial en este trabajo. Generalmente todo cauce natural sufre de erosión o socavación local debido al paso de la corriente de agua, sobre todo cuando se presentan caudales superiores a los valores medios de escurrimiento, que es el caso de las épocas de avenidas (Pérez et al., 2017). Por otro lado, alteraciones o modificaciones impuestas en el cauce o tramo de estudio generan irregularidades que pueden llegar a producir socavación local. Enfatizando sobre obstrucciones interpuestas en la corriente tales como los son las pilas de puentes. Donde si no se llega a tratar con cuidado e importancia el tema de la socavación se pueden generar daños significativos en las obras y así ocasionar pérdidas importantes.

1.1.1 Casos reales de socavación

Los efectos adversos de la socavación local son evidentes y han sido un tema relevante de investigación por diferentes autores alrededor del mundo. Cusba (2011), en su estudio titulado “Causas y soluciones de colapsos de puentes” muestra ejemplos claros de puentes que han fallado a consecuencia de la socavación local.

Uno de estos ejemplos es el puente vehicular sobre la carretera estatal 1 que permite el paso a través del río Ashburton en Nueva Zelanda, el cual fue construido de concreto reforzado en el año de 1931 y presentaba una longitud de 340 m. Las condiciones del sitio permitieron que dicha estructura presentara fallas desde sus inicios hasta presentar un derrumbamiento parcial ocasionado por la socavación que se presentó sobre sus pilas (Figura 1.1).

En 1978 luego de presentarse un informe de seguridad de la cimentación del puente, se decidió instalar en 1979 rocas para evitar que se siguiera socavando. El diseño inicial permitía un nivel máximo de socavación igual a 3.5 m, sin embargo, entre 1991 y 1994 la socavación llegó a alcanzar niveles de hasta 5.5 m. Las posibles soluciones que se plantearon para evitar la socavación consistieron en la colocación de 39 rocas aguas abajo, junto a nuevas cimentaciones que construyeron al lado de las pilas existentes y el monitoreo de los niveles de socavación en el sitio.



Figura 1.1 *Puente Ashburton River, efectos de socavación local en pilas (Tomado de Cusba, 2011).*

Otro caso interesante para ejemplificar es el puente vehicular en Taiwán (China), cuya estructura fue construida en concreto reforzado y su cimentación apoyada sobre pilotes. Este puente colapsó en 1993 debido a la socavación local que sufrió en su cimentación, la cual quedó expuesta como se observa en la Figura 1.2.



Figura 1.2 *Cimentación de puente vehicular expuesta debido a la socavación (Tomado de Cusba, 2011).*

Así como, los casos descritos existen ejemplos de puentes en la república mexicana que han sufrido el efecto del fenómeno de socavación (Figura 1.3). Algunos de estos casos son el puente “El Potrero”, puente “Maxixapa”, puente “San Isidro” (Figura 1.3a, 1.3b, y 1.3c) y algunos otros con consecuencias visibles de la socavación como el puente “Las Peñas”, puente “Huehuetán”, puente “Cintalapa”, puente “Pijjiapan”, puente “Margaritas I” (Figura 1.3d, 1.3e, 1.3f, 1.3g y 1.3h), destacando principalmente el deterioro del lecho y la afectación directa a la estructura en todos los casos.

1.1.2 Antecedentes de rugosidad

La necesidad de explorarán diversas estrategias y soluciones innovadoras enfocadas en combatir el fenómeno de la socavación local es de suma importancia para disminuir el colapso o falla de diferentes estructuras. Por esto, es esencial reconocer y analizar trabajos de investigación anteriores que han abordado esta temática. A continuación, se presenta una revisión de algunas

investigaciones en donde se ha destacado la importancia de encontrar alternativas y soluciones para combatir el fenómeno de la socavación local.

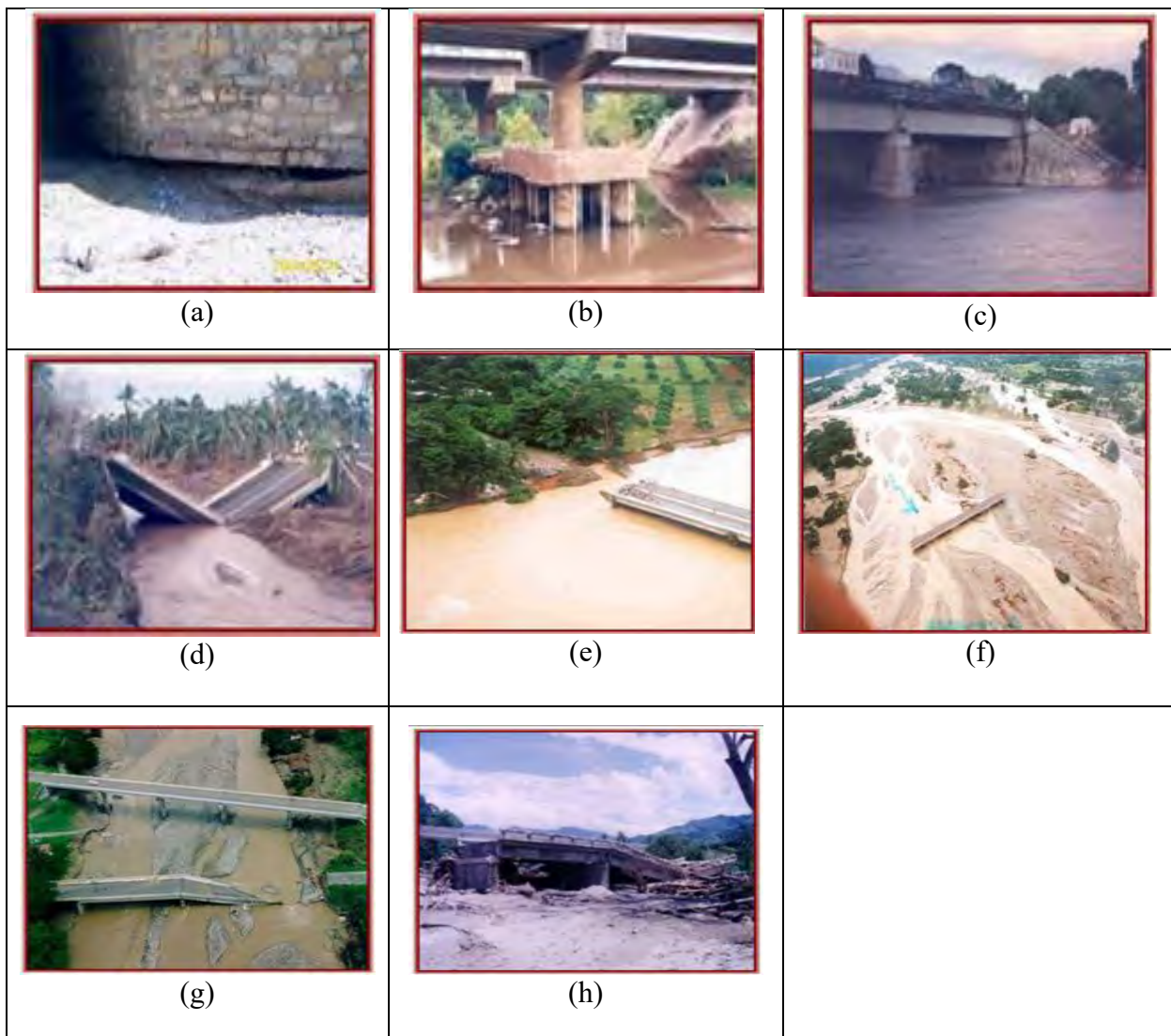


Figura 1.3 *Puentes vehiculares en México afectados por el fenómeno de socavación (Modificado de Martínez 2007)*

1.1.2.1 Implementación de rugosidades en pilas por el IMTA.

En 2017, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) desarrolló experimentalmente una tecnología de diseño cuyo objetivo era reducir la profundidad y el volumen de socavación local en pilas y estribos de puentes, así como en estructuras similares mediante la incorporación de una rugosidad superficial y su diseño hidrodinámico. En el modelo se realizaron pruebas a

cinco diferentes tipos de pilas en donde se probaron diferentes caudales que van desde los 50 lps hasta los 200 lps, posteriormente se construyó un canal con un tanque de depósito del material y se empleó un medidor de flujo ultrasónico para medir las velocidades del flujo e integrar los caudales junto con medidores de nivel ultrasónicos en conjunto con un scanner tipo Lidar para realizar escaneos y mediciones. Las rugosidades evaluadas en cada una de las pilas prestan las siguientes características (Figura 1.4).

- Pila 1 (a): Pila cilíndrica lisa de tubería de PVC con 10 cm de diámetro
- Pila 2 (b): Pila con una rugosidad construida a base de perforaciones de 6 mm de diámetro por 3 mm de profundidad a una distancia de 12 mm
- Pila 3 (c): Pila con una rugosidad construida a base de perforaciones de 6 mm de ancho por 3 mm de profundidad a una distancia de 6 mm en forma de V ascendente en un ángulo de 45°
- Pila 4 (d): Pila con una rugosidad construida a base de ranuras de 6 mm de ancho por 3 mm de profundidad a una distancia de 6 mm en forma de V ascendente al frente y descendente por detrás, en un ángulo de 45°
- Pila 5 (e): Pila con una rugosidad construida a base de ranuras horizontales en forma de canales separados de 6 mm de separación con una profundidad de 3 mm.

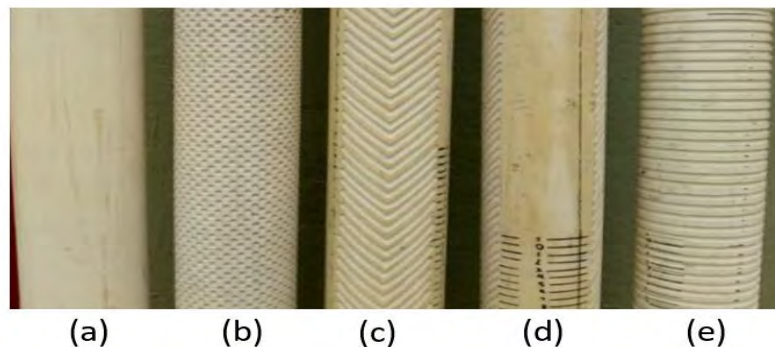


Figura 1.4 Acabados superficiales de pilas, a) pila lisa, b) pila con perforaciones, c) pila con perforaciones en V, d) pila con ranuras y e) pila con ranuras horizontales (Modificada de IMTA, 2017).

En el experimento evaluó el rendimiento de distintos acabados superficiales y números de Froude. La Figura 1.5 muestra una comparativa entre la profundidad de socavación alcanzada

por la pila lisa en comparación con los demás acabados superficiales para un número de Froude de 0.28. Como puede observarse hay acabados superficiales que tienen un mejor comportamiento ante la socavación, destacando los acabados P2 y P3, ya que este presenta menor profundidad de socavación. En la figura 1.6 se observan los fosos de socavación para dos tipos de pilas una de ellas con acabado liso y otra con un acabado rugoso.

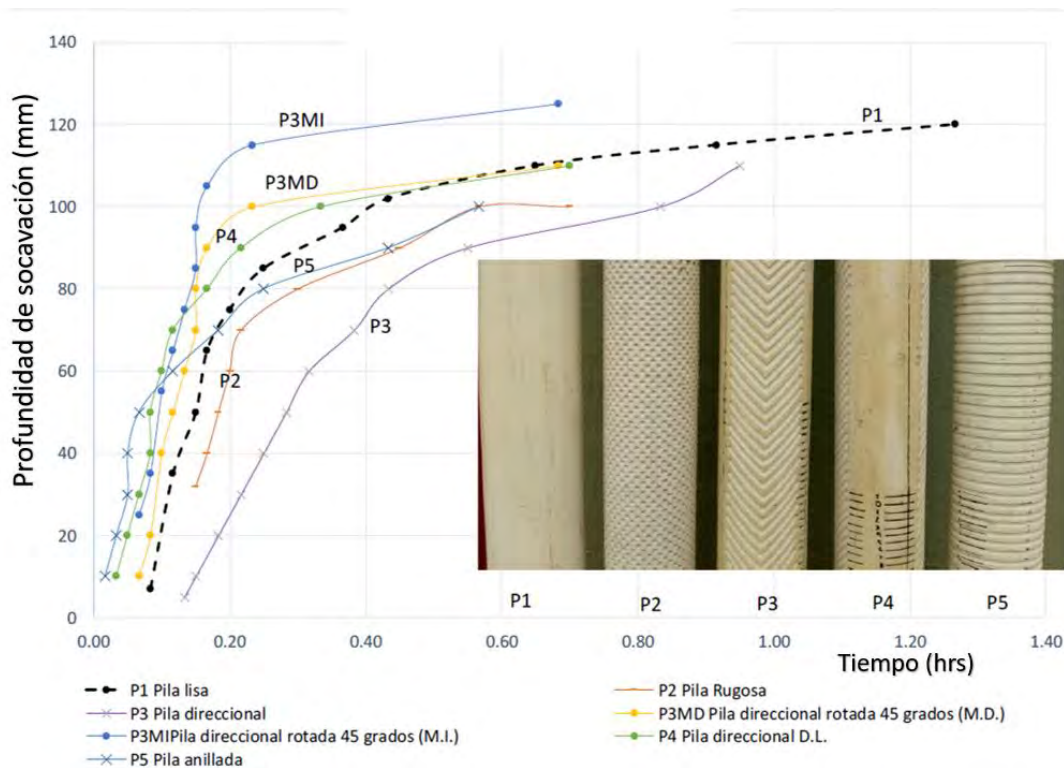


Figura 1.5 Comparativa de profundidades de socavación según los acabados a lo largo del tiempo (Modificado de IMTA, 2017).

Finalmente, el estudio citado, concluye que la pila lisa es aquella que tiene un mayor alcance y magnitud de socavación aguas abajo. Por otro lado, en todos los casos las pilas con rugosidad superficial presentan una menor profundidad de socavación en comparación con la condición lisa. Sin embargo, la reducción de la profundidad de socavación producida por las pilas rugosas (P2), rugosidad direccional en “V” (P3) y rugosidad direccional en anillos (P5) aumenta respecto al número de Froude. Así mismo se destaca el comportamiento de las pilas P2 y P3 donde la profundidad de socavación se produce con menor rapidez, lo cual es importante para avenidas con mayor duración.

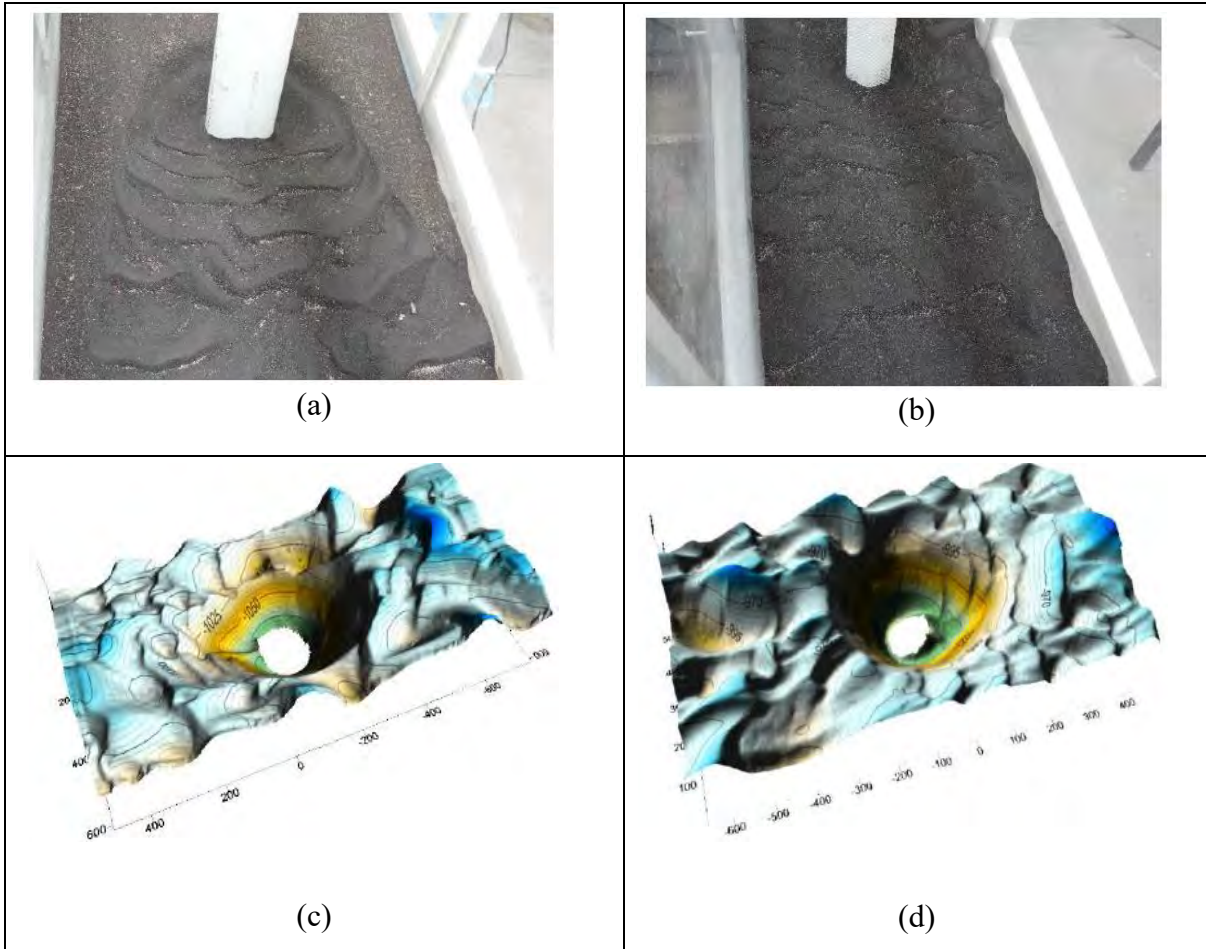


Figura 1.6 Resultados del estudio, a) morfología de pila lisa, b) morfología de pila rugosa, c) foso de socavación en pila lisa y d) foso de socavación en pila rugosa (Modificado de IMTA, 2017).

1.1.2.2 Análisis de la socavación con acabado superficial en puentes con Particle Image Velocimetry (PIV)

Otro estudio de interés es el presentado en el XXII Congreso Nacional de Hidráulica, en Acapulco Guerrero, México en marzo de 2017 (Salinas et al., 2017) en donde se resalta la necesidad de emplear técnicas no invasivas para medir la profundidad de socavación. Para ello se propuso el empleo de técnicas ópticas para evitar modificaciones en el flujo y en las condiciones del fenómeno y tomando como referencia de análisis el caso del puente “Congreso – San Nicolas” en el municipio de Teziutlán en el estado de Puebla.

Una de estas técnicas no invasivas es la denominada Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV, por sus siglas en inglés), ya que resulta ser una técnica factible debido a los parámetros medidos, relacionados con el tamaño y características de las partículas. Esta técnica tiene inicio con la adquisición de una serie de imágenes que posteriormente se someten a un tratamiento numérico que permite determinar campos de velocidad del flujo. Para la elaboración de este estudio se construyó un modelo físico reducido mediante un análisis dimensional empleando el teorema π de Buckingham, junto con las características geométricas del puente, las cuales se resumen en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Dimensiones y características de la pila modelo “Congreso-San Nicolas” (Salinas et al., 2017).

Parámetro	Unidad	Dimensión	
		Prototipo	Modelo
Área hidráulica (A)	m ²	19.23	0.052
Ancho del canal (B)	m	8.00	0.40
Longitud del canal (l)	m	20000	12.00
Caudal (Q)	m ³ /s	47.68	0.0094
Tirante (y)	m	2.60	0.10
Velocidad media (V)	m/s	2.66	0.18
diámetro de la pila (b)	m	1.20	0.06
Tamaño del sedimento (d)	mm	10.00	0.60
Densidad del sedimento	kg/m ³	1800	1830
Densidad relativa (S)	adim.	1.80	1.83
Aceleración de la gravedad (g)	m/s ²	9.81	9.81

Teniendo en cuenta que la profundidad de socavación se presenta en función de las variables como densidad del flujo (ρ), viscosidad cinemática (ν), velocidad media del flujo (V), el tirante aguas arriba de la sección (y), el diámetro característico de las partículas del lecho (d), la

velocidad crítica de inicio de movimiento (V_c), el diámetro de la pila del puente (b) y la profundidad del acabado superficial de la pila de puente (k). Los diferentes acabados de rugosidad analizados fueron los siguientes (Figura 1.7):

- Pila con acabado de casquetes esféricos (a)
- Un diseño adicional que fue un arreglo geométrico de casquetes de forma hexagonal. (b)
- Pila con acabado en V (c)
- Pila con acabado liso (d)

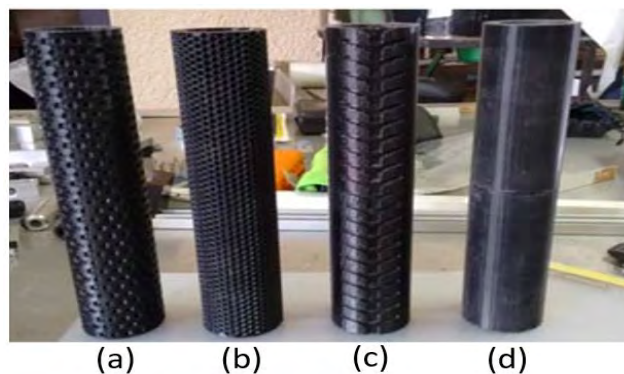


Figura 1.7 Acabados superficiales de pilas, a) pila con acabado casquete esférico, b) pila con acabado casquete hexagonal, c) pila con acabado V y d) pila lisa (Modificado de Salinas et al., 2017).

Los modelos de cada una de las pilas se colocaron y probaron en un canal de pendiente variable del Laboratorio de Modelos Hidráulicos del Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA), llevado a cabo la caracterización del flujo en 2D con los campos de velocidad recolectados del análisis PIV y se determinando los perfiles de velocidad para cada configuración de flujo, así mismo se calcularon las velocidades de inicio de movimiento de las partículas del lecho ya que es un parámetro que rige las condiciones con las cuales se presenta la socavación local y con ello se puede analizar el comportamiento del foso de socavación.

La caracterización del flujo permite definir la configuración de caudal-tirante-velocidad a utilizar en el experimento para después obtener la profundidad de socavación. Paralelo a la determinación de la socavación, se analizó el comportamiento del flujo determinando los campos de velocidad con PIV para observar su comportamiento del flujo alrededor de las pilas

aguas arriba y aguas abajo. También se realizó una comparativa del comportamiento del flujo alrededor de las pilas con los acabados superficiales y sus parámetros hidráulicos mostrados la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 *Parámetros hidráulicos usados para el análisis en pilas (Salinas et al., 2017).*

Parámetros hidráulicos	Acabados de la pila				
	Pila Lisa	Pila V invertida	Pila V	Pila casquetes esféricos	Pila casquetes hexagonales
Q (m ³ /s)	0.007	0.007	0.009	0.007	0.009
V (m/s)	0.249	0.218	0.222	0.218	0.222
y (m)	0.070	0.080	0.100	0.080	0.100
Froude (adimensional)	0.301	0.246	0.223	0.246	0.223

Algunas imágenes de los campos de velocidad en planos verticales y horizontales en la pila obtenidos mediante la técnica PIV se muestran en la Figura 1.8. Los resultados determinaron que el acabado superficial si reduce la profundidad de socavación, siendo el acabado con casquetes hexagonales el que presento mejores resultados ya que redujo en un 30% la profundidad de socavación respecto al acabado liso. Además, se demostró la eficiencia de las técnicas no invasivas, como es la técnica PIV, para el estudio de estos fenómenos. La Tabla 1.3 muestra un resumen de la comparativa de los números de Froude y profundidad de socavación para cada caso evaluado.

1.1.2.3 Discos Porosos

Otra medida de prevención ante la socavación es la que se presentó en el XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica en Lima Perú en el 2016, donde se plantea la colocación de discos porosos al pie de las pilas circulares con el fin de reducir la profundidad de socavación (Hidalgo et al., 2016). En este caso se determinó que el uso de estos discos (también conocidos como collares) ayudan a disipar los vórtices que generan la socavación local. Esto se especificó mediante un programa experimental desarrollado en dos módulos, en ambos casos se emplearon tramos rectos y como material de fondo se ocupó arena cuyo diámetro (D_{50}) fue

aproximadamente entre 0.22 – 0.228 mm. El ancho del canal fue de por lo menos 10 veces el ancho de la pila, esto con el propósito de evitar efectos de pared.

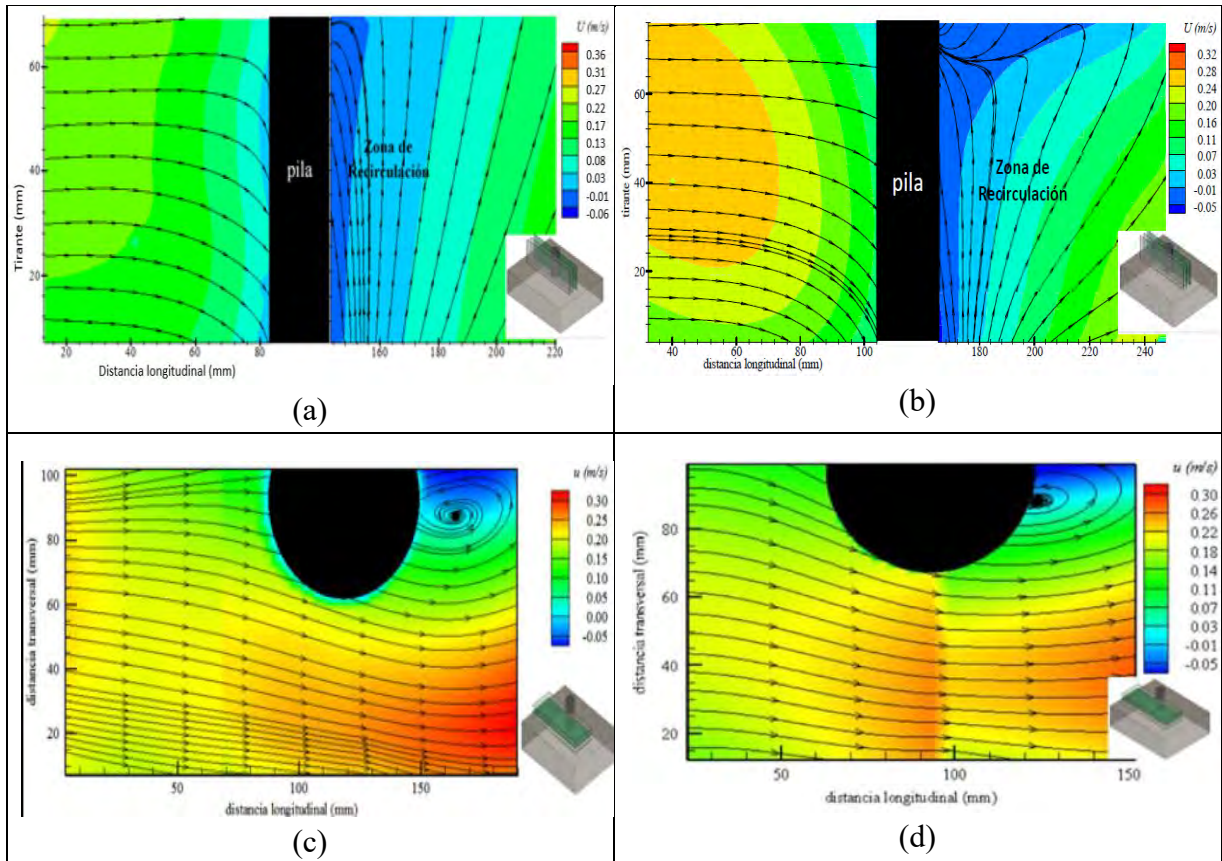


Figura 1.8 Campos de velocidades en pilas, a) Corte vertical en acabado liso, b) Corte vertical en acabado “casquete esférico”, c) Corte horizontal acabado liso y d) Corte horizontal acabado “casquete esférico” (Modificado de Salinas et al., 2017).

Tabla 1.3 Comparación de los valores de la profundidad de socavación máxima para los diferentes números de Froude (Salinas et al., 2017).

Acabado de la pila	Profundidad de Socavación (m)		
	Fr 4	Fr 5	Fr 6
	0.121	0.222	0.325
Liso	0.016	0.044	0.091
V invertida	0.013	0.042	0.079
V	0.0125	0.041	0.079
Casquetes esféricos	0.0115	0.037	0.085

1.1.2.4 Antecedentes de modelos de simulación numérica

Los modelos de simulación numérica se han convertido en una herramienta de gran utilidad en el ámbito de la ingeniería civil y en especial para el análisis de estudios hidrológicos e hidráulicos. Como ejemplo se tiene el caso Marcos et al. (2011), donde aplicó el modelo de simulación numérica Iber en el estudio hidráulico del arroyo de la Almucera ubicado en Quiruelas de Vidriales (Zamora - España) en donde se presentaban problemas asociados a inundaciones de forma muy frecuente por lo que las localidades aledañas solían inundarse. La utilización del modelo numérico permitió definir las zonas de inundación, con lo cual se propuso la ampliación de la carretera Quiruelas a Aguilar (que cruzaba el río), una eliminación de motas en el margen del río y el rebaje de una isleta.

En México también se han llevado a cabo distintas simulaciones empleando el modelo Iber, como la modelación hidrometeorológica en la cuenca del río de la Sierra, en los estados de Chiapas y Tabasco, la cual pretendía evaluar el riesgo de inundación, además, los resultados proponen la construcción de una presa de almacenamiento sobre el cañón Itzantun, conformación de bordos en las márgenes y desazolve en la zona baja pretendiendo disminuir las inundaciones en un 90% (Roblero, 2013).

Por otro lado, Salinas et al., (2018), aplicaron el modelo Iber para realizar un análisis del comportamiento geomorfológico de ríos pequeños, analizaron el comportamiento del cauce “Agua Bendita” ubicado en los municipios de Metepec y Mexicaltzingo, pertenecientes al Estado de México. Con el uso del modelo se logró reproducir las condiciones hidrodinámicas del cauce y determinar el grado de erosión para caudales con diferentes periodos de retorno, y con base en los resultados proponer obras de protección.

1.2 Planteamiento del problema

El estudio de las problemáticas a las que se encuentran sujetas las obras civiles son un punto importante en la ingeniería, en particular cuando se trata de aquellas estructuras que se colocan en los ríos como son los puentes, específicamente las pilas, las cuales están expuestas de forma directa al problema de socavación.

De acuerdo con diversos estudios de ingeniería de puentes, la mayoría de las fallas de estas estructuras se deben a la socavación local en las pilas debido al paso de una avenida, lo que ocasiona que la cimentación quede expuesta y falle. En México han ocurrido diversos colapsos de puentes como el puente Tonalá (Tabasco), puente Marquelia (Guerrero), puente Contla (Jalisco), puente Ameca de la carretera federal 200 (Jalisco- Nayarit), puente de Santa María Macuilxochitl (Oaxaca), puente Papagayo (Guerrero-Oaxaca) y puente Coyuca de Benítez (Guerrero), el puente Teapa (Tabasco), puente el río Papaloapan (Veracruz), puentes Cuates (Michoacán) y puente Juquiaqui (Guerrero) (Jiménez et al., 2006).

La socavación local se presenta en sitios particulares de la corriente y es ocasionada por el paso de crecientes y por la acción de obras civiles, tales como obras de encauzamiento, espolones, puentes con pilas o estribos dentro del cauce y obras transversales de control (Martínez, 2007).

Por lo tanto, antes de diseñar obras en cauces es necesario conocer la magnitud de la socavación, acompañados de la realización de análisis geomorfológicos entre puntos de control, es decir entre secciones estables. Estos análisis se basan en el estudio de fotografías aéreas y cartografía de diferentes épocas y los cambios que se aprecien en observaciones de campo y en levantamientos topográficos (Martínez, 2007).

En cuanto se habla de socavación local, siempre se toman en cuenta variables que giran en torno al estudio del fenómeno como es el tirante aguas arriba, la sección transversal, velocidad del flujo, entre otras variables que afectan directamente la profundidad de socavación (Salinas et al., 2017). Todas estas variables son la base del desarrollo de diversos estudios donde se presentan alternativas para reducir la socavación local en pilas de puentes, por ejemplo, se han

realizado experimentos sobre una pila cilíndrica con diámetro de 32 mm en la cual se estudiaron los efectos de la colocación de un collar a la pila, sobre la socavación en pilas de puente, donde se encontró que el collar contribuyo a reducir la profundidad de la socavación (Chiew, 1992).

También, algunos investigadores han desarrollado alternativas que tienen relación directa con el acabado superficial de las pilas de puentes y su comportamiento ante la socavación, como es el caso de Jiménez et al. (2006) y Bonilla (2010) donde a través de un modelo físico reducido, y el uso de siete tipos de rugosidad artificial en la superficie de la pila, demostraron que utilizando esta alternativa se puede reducir la magnitud de la profundidad de socavación al pie de las pilas por el efecto erosivo del agua.

Para ello, es importante el uso de la tecnología en combinación con el avance computacional, y una alternativa que ha tenido fuerte desarrollo en la ingeniería de ríos es la aplicación de modelos de simulación tanto en 1D, 2D y en algunos casos en 3D. Existe una gran variedad de software para la modelación numérica de flujo en superficie libre tanto en 1D como 2D, tales como Iber 2D, HEC-RAS 1D y 2D, RIVER2D, BRISTARS, RMA-2, FESWMS y SSIM. Cada uno implementa metodologías distintas y escenarios de aplicación, con ventajas y desventajas en comparación de los otros, sin embargo, la mayoría no son de uso libre y acceder a ellos requiere un costo elevado, uno de los modelos de acceso libre que permite simular estructuras en los cauces e incluir el análisis de la erosión es Iber, el cual ya ha sido ampliamente probado.

No obstante, que para ríos con geometría simple y preferiblemente con un solo puente, el software unidimensional HEC-RAS se presenta como la mejor alternativa de uso debido a la facilidad en la introducción de datos, proporcionando resultados confiables en un menor tiempo. Mientras que el paquete Iber por ser bidimensional, representa una mejor opción para modelaciones de ríos con geometrías de mayor irregularidad, cuando se tiene especial interés en el comportamiento hidráulico del flujo a través de estribos y pilas, y al tener dos o más puentes con separación reducida (Rincón, et al., 2017).

Algunas características que presenta el software Iber son las siguientes: brinda la posibilidad de realizar gran cantidad de modelos con aplicación a la hidráulica y morfología fluvial, es

adecuado para el cálculo de flujo en ríos, con Iber se pueden identificar zonas inundables, es útil para evaluar de zonas de riesgo, y delimitación de vías de intenso desagüe, en la simulación se puede trabajar con el módulo de transporte de sedimentos son algunas aplicaciones que el modelo permite manejar (Blade et al., 2014).

Como se puede observar el problema de la socavación puede ser analizado con modelos de simulación bidimensional, sin embargo, identificar las variables y condiciones hidrodinámicas del cauce requiere de estudios hidrológicos de la zona de interés. Así mismo la inclusión de otras variables (como es el caso de la rugosidad superficial) en los análisis ayudan a reducir la profundidad de socavación a escala real en los modelos de simulación, por ello se requieren de estudios para la validación de resultados y ello solo se logra cuando se emplean estudios previos de laboratorio.

1.3 Justificación

Evaluar la problemática que presenta la socavación local en las pilas de puentes es un tema muy importante, ya que es una situación muy común que afecta a la mayoría de los puentes. En México se sabe que hay casos en donde los puentes colapsan debido a los efectos generados por la socavación. Sin embargo, no se tienen con claridad datos acerca de las estadísticas sobre el estado actual que presentan los puentes y también sobre los reportes de puentes que han colapsado (Salinas et al., 2017).

El colapso de puentes debido a problemas relacionados con la socavación resulta ser un problema más común de lo que se piensa y sobre todo se posiciona como un reto constante en el ejercicio del ingeniero civil. De ahí, la importancia de comprender el tema, pero sobre todo aportar herramientas que presenten soluciones y medidas que puedan ayudar a reducir los efectos de socavación, como es el caso de demostrar el uso de la simulación de los fenómenos a escala real mediante los modelos numéricos bidimensionales.

No obstante, algunas medidas para reducir la profundidad de socavación local exigen un alto consumo de recursos como tiempo y dinero. Por ejemplo, la elaboración de prototipos a escala

resulta ser una solución adecuada, pero requiere de recursos importantes tanto económicos como de tiempo, además de tecnologías de medición no invasivas, tecnologías que incluso no son factibles de usar en campo solo en laboratorio. Además, generar diferentes opciones de solución resulta hoy en día poco viable, lo que implica aprovechar el avance tecnológico y el auge que ha tenido el desarrollo de la hidráulica computacional, que permite simular diferentes fenómenos hidráulicos utilizando software libre.

Actualmente existe una gran variedad de software para la modelación y simulación numérica de flujo en superficie libre tanto en 1D, 2D y en 3D. Algunos de los más conocidos son: HEC-RAS, RIVER2D, BRISTARS, RMA-2, FESWMS, SSIM e Iber por mencionar algunos. Cada uno implementando metodologías distintas y escenarios de aplicación, con sus ventajas y desventajas en comparación de los otros.

Este trabajo busca implementar los acabados superficiales en pilas de puente estudiados en laboratorio por Diaz (2016) como un coeficiente de rugosidad en un modelo de simulación bidimensional, con la finalidad de reducir la profundidad de socavación en un caso a escala real. Se plantea el uso del software de flujo bidimensional Iber ya que es la mejor opción en cuanto a modelaciones de ríos con geometrías irregulares. El software permite incluir modelos digitales de elevaciones, emular diferentes estructuras hidráulicas (como pilas de puentes) con la finalidad de analizar su comportamiento hidráulico (Rincón et al., 2017).

Además, Iber es un software de uso libre que permite realizar análisis bidimensionales, hidrodinámicos, erosión en cauces que además permite incluir estructuras hidráulicas como son las pilas de puentes, y en cuanto a su interfaz resulta ser sencilla y permite incluir múltiples tipos de rugosidad en el dominio de análisis ya sea en el propio cauce o en las estructuras que se estén modelando. Lo anterior abre una gama de opciones más amplia, que es una de las alternativas que se busca con este trabajo al incluir rugosidad superficial en pilas de puentes.

El uso de modelos de simulación bidimensional como es el caso de Iber, permite realizar investigaciones menos costosas, ya que se ahorra tiempo y dinero al omitir la elaboración de prototipos a escala como un canal artificial o bien una pila con las características necesarias.

Todo lo anterior puede ser digitalizado en el modelo de simulación además de que se facilitaría más la opción de poder realizar cambios en el modelo ya que en comparación con los prototipos a escala solamente se modificarían los parámetros correspondientes y no se volvería a rehacer todo el proyecto.

Así mismo, la importancia de implementar la rugosidad superficial como un coeficiente en los modelos de simulación radica en la sencillez de la modificación del parámetro. Al poder emplear como ejemplo un caso real de un puente en el modelo bidimensional se puede analizar los efectos que tiene la rugosidad superficial ante la socavación. En dado caso de que se quiera probar otro valor del parámetro (es decir otro tipo de rugosidad) o se puede modificar cambiando el valor de este, esto sin afectar otros elementos o características del modelo. Lo anterior simplifica mucho el poder cambiar de una rugosidad a otra y poder elegir de un valor adecuado que permita verificar que se pueden reducir los efectos de la socavación y poder relacionar estos parámetros con condiciones reales del caso de estudio.

Para este proyecto se analizó el puente Maxixapa ya que en este puente se han realizado estudios de socavación y también se han generado reportes de impacto ambiental, en los cuales se pueden obtener las características necesarias para poder implementar un modelo bidimensional y calibrarlo para así poder asignarle un valor de rugosidad a diferentes acabados superficiales de pilas de puentes, ya que al tratarse de casos previamente analizados se puede establecer una comparativa vista desde el enfoque que presenta la simulación y los datos obtenidos mediante los estudios realizados tanto en campo como en laboratorio.

El caso del puente Maxixapa ubicado en el estado de Chiapas, a finales del año 2011 en el río “Saltillito” se presentaron daños debido a los efectos de la socavación local generados por las crecientes del río, donde incluso se tuvieron estudios previos respecto a los daños que ocasionan las crecientes en dicho puente, según describe GECCSA INGENIERIA S.A. DE C.V. (2003) se detectaron problemas de socavación local en la pila central del puente estudiado, con lo cual se deja ver la necesidad real de analizar este tipo de problemas.

1.4 Hipótesis

La implementación de la rugosidad superficial en pilas de puente como un coeficiente de rugosidad en los modelos de simulación de flujo bidimensional permitirá determinar los efectos de la rugosidad en la reducción de la socavación local lo cual podría implementarse como una medida de prevención ante esta problemática.

1.5 Objetivo general

Analizar distintos acabados superficiales de pilas de puente para su implementación como un coeficiente de rugosidad en un modelo de simulación bidimensional, para medir los efectos del acabado en reducción de la profundidad de socavación de pilas de puente.

1.6 Estructura de la tesis

El trabajo está constituido por cinco capítulos. En el primero “Introducción” se establece la base para este trabajo de investigación, teniendo como principal punto de apoyo la parte de Hipótesis, Justificación, Antecedentes y Objetivo, mismos que servirán como una guía en el proceso de investigación. Además, en este apartado se aborda información acerca de métodos realizados por diversos autores que consideran diferentes medidas ante la socavación.

En el segundo “Marco Teórico” se establece una referencia de conceptos los cuales a través de un catálogo de temas y conceptos relacionados temas hidrológicos y de socavación que serán utilizados para ayudar a entender los resultados del estudio. Además, se presenta de forma general características hidrológicas, edafológicas, topográficas y climatológicas de la zona donde se encuentra el área de interés.

El tercero “Materiales y Métodos” describe cronológicamente de forma detallada todos y cada uno de los pasos ejecutados para llevar a cabo las actividades para alcanzar el objetivo y verificar la hipótesis de este trabajo de investigación.

El cuarto “Resultados” corresponde a la presentación de los resultados obtenidos después de aplicar la metodología desarrollada en el capítulo tres mediante el programa Iber.

Finalmente, un apartado de “Conclusiones y recomendaciones” donde se expone aquellos datos confirmatorios y limitaciones finales de la investigación, así como las recomendaciones finales para líneas de investigación subsecuentes.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se exponen los conceptos, fórmulas fundamentales, modelos teóricos y teorías esenciales que servirán de base para respaldar cada una de las secciones que integran esta investigación. El eje principal de la información presentada se enfoca en el análisis del comportamiento erosivo y de socavación en los cauces naturales, especialmente en aquellos contextos que involucran la presencia de pilas de puentes, así como otros elementos vinculados a la elaboración de un estudio hidrológico general el cual permite conocer y evaluar sus características físicas y geomorfológicas de la cuenca las cuales servirán posteriormente para el cálculo de la socavación local.

2.1 Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es una zona de la superficie terrestre, en donde las gotas de lluvia que caen en ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hasta un punto de salida (Aparicio 1992), conocido como exutorio, provista además de una corriente principal que pasa por la salida de esta.

La cuenca hidrográfica se encuentra delimitada por una línea divisora de aguas, este límite separa la superficie de tierra cuyo drenaje fluye hacia un río dado, a esta línea se le conoce como parteaguas, y está formada por los puntos topográficos más altos y separa a la cuenca de las cuencas vecinas. Aparicio (1992) describe algunos de los elementos más importantes dentro de la cuenca de la siguiente manera:

a) **Área de la cuenca (A).** Se define como la superficie en proyección horizontal de la cuenca, que se encuentra delimitada por el parteaguas.

b) **Perímetro de la Cuenca (P).** Este es el resultado de la longitud del parteaguas de la cuenca.

c) **Densidad de corriente (D_s).** Definida como el número de corrientes perpetuas e intermitentes por unidad de área. Su estimación se realiza de la siguiente forma:

$$D_s = \frac{N_s}{A} \quad (2.1)$$

Donde:

- D_s = Densidad de corriente ($\frac{Ns}{km^2}$)
- N_s = Suma del número de corrientes que hay en la cuenca
- A = Área de la cuenca (km^2)

Un orden de corrientes alto o una densidad elevada corresponde a una cuenca que responde rápidamente a una tormenta, mientras que para ordenes pequeños suele deberse a que los suelos son muy resistentes a la erosión o muy permeables.

d) **Densidad de drenaje (D_d).** Se entiende como la longitud de corrientes por unidad de área y se calcula como se muestra a continuación:

$$D_d = \frac{L}{A} \quad (2.2)$$

Donde:

- D_d = Densidad de drenaje ($\frac{km}{km^2}$)
- L = Suma de la longitud de todos los tributarios (km)
- A = Área de la cuenca (km^2)

e) **Longitud del cauce principal (Lc).** Este valor se determina con una medida directa de la longitud en planta del cauce principal que pasa por la salida de la cuenca. Generalmente se

expresa en unidades de longitud como km y m, en la Figura 2.1 se muestran un esquema de las principales características de una cuenca hidrográfica.

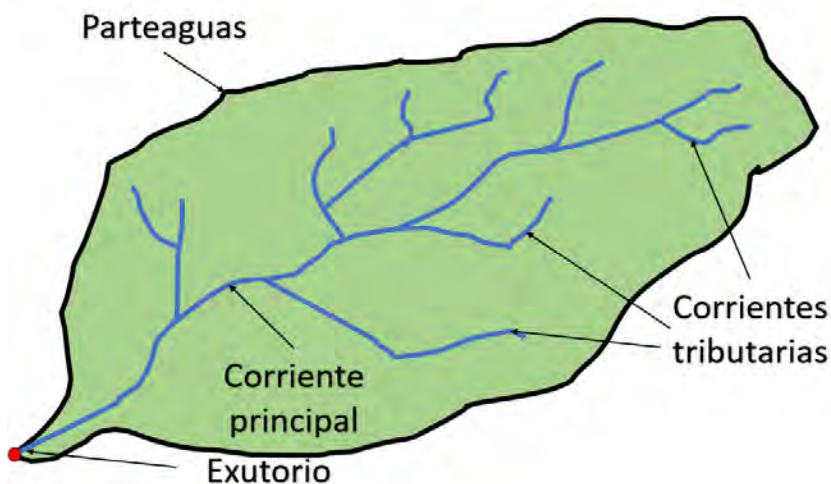


Figura 2.1 Principales características de una cuenca hidrográfica

f) Pendiente media del cauce principal I_c (Adimensional). Se puede definir como el desnivel existente entre los extremos de la corriente, dividido entre su longitud medida en planta (Figura 2.2). Este parámetro es un indicador importante del grado de respuesta de una cuenca a una tormenta.

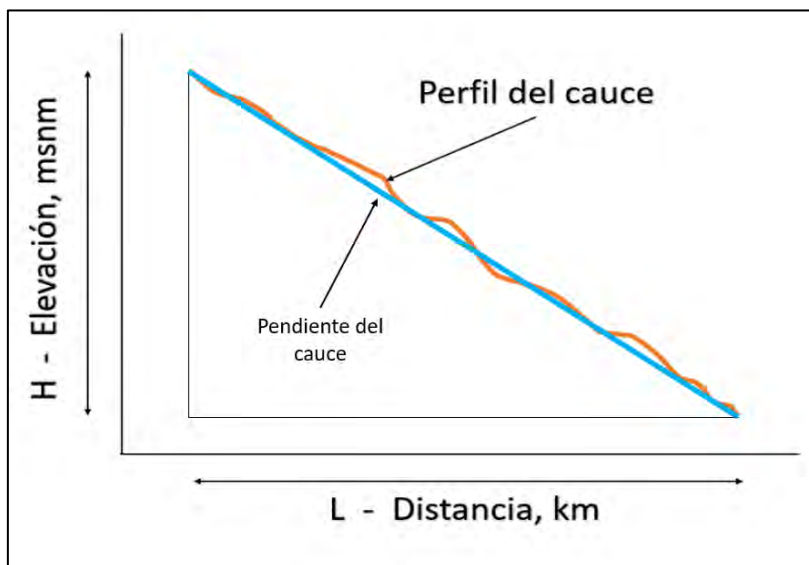


Figura 2.2 Pendiente media del cauce principal

Otra forma de estimar la pendiente de un cauce es utilizando el método de la pendiente media ponderada (Figura 2.3). Es un valor resulta ser más razonable para representar la pendiente media del cauce principal. Para calcularlo se traza una línea, en el perfil longitudinal del cauce, tal que el área comprendida entre esa línea y los ejes coordenados sea igual a la comprendida entre el perfil y dichos ejes.

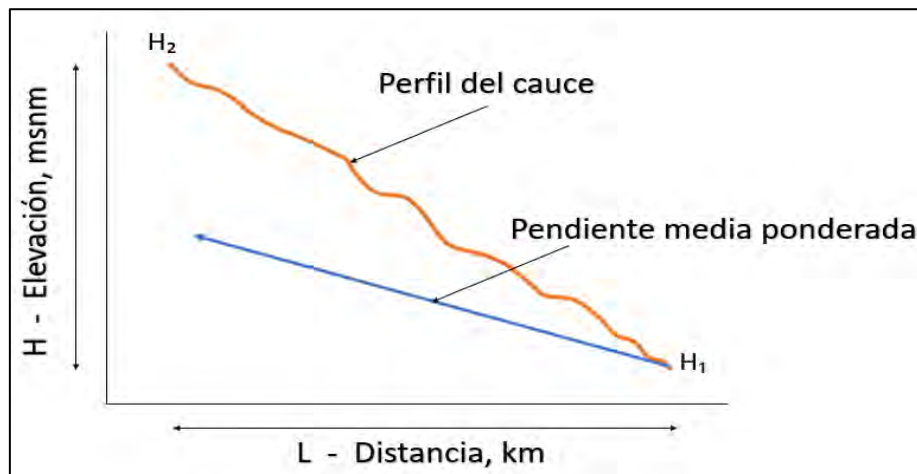


Figura 2.3 *Pendiente media ponderada (P.M.P) del cauce principal*

Conociendo la altura H_1 (punto más bajo del río) se puede conocer la altura H_2 con la siguiente Fórmula:

$$AT = \frac{b(H_1 + H_2)}{2} \quad (2.3)$$

Donde

- H_1 = Cota más baja de la pendiente media ponderada (m)
- H_2 = Cota más alta de la pendiente media ponderada (m)
- b = Longitud del cauce vista en planta (m)
- AT = Área bajo la curva que forma el perfil del cauce (m^2)

Con lo cual es posible despejar de la Fórmula H_2 para después obtener la pendiente media ponderada de la siguiente manera:

$$H_2 = \frac{AT \times 2}{b} - H_1$$
$$P.M.P = \frac{H_2 - H_1}{b} \quad (2.4)$$

2.2 Caracterización de la Precipitación

Uno de los principales propósitos de un estudio hidrológico es conocer el comportamiento de las precipitaciones sobre un área determinada. Su importancia se debe a la relación que guarda con la estimación del escurrimiento de flujo en la cuenca, ya que es el objetivo principal a la hora de evaluar caudales de diseño. Para lograr este objetivo es necesario considerar aspectos relacionados con la distribución espacial y temporal de las precipitaciones. A continuación se describen algunas metodologías relacionadas con la caracterización de la precipitación.

2.2.1 Modelo de los Polígonos de Thiessen.

Este método permite el área de influencia para cada una de las estaciones meteorológicas asumiendo que dentro de la porción de área delimitada por el polígono predominan las condiciones meteorológicas registradas por la estación. El proceso de estimación consiste en unir mediante líneas rectas dibujadas en un plano de la cuenca las estaciones más próximas entre sí, con ello se forman triángulos cuyos vértices son las estaciones. Después se trazan líneas rectas que bisectan los lados de los triángulos en donde convergerán en un solo punto. El área encerrada por los polígonos será el área de influencia de la estación correspondiente como se muestra en la Figura 2.4:

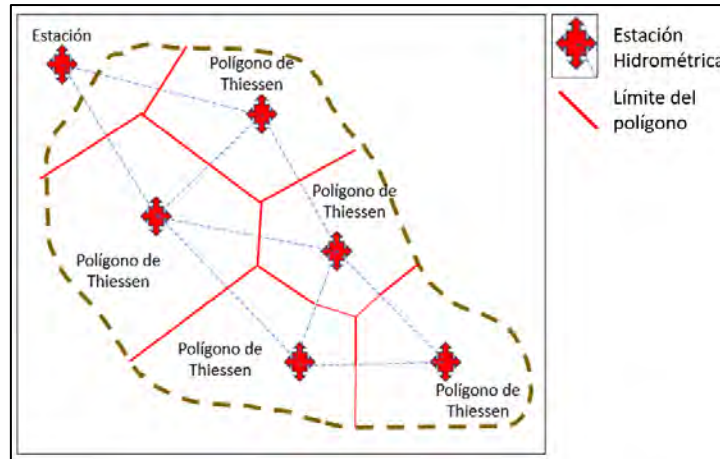


Figura 2.4 Diagrama de los Polígonos de Thiessen.

2.1.2.2 Modelo de lluvia intensa generalizada de Chen

Las curvas Intensidad-Duración-Periodo de retorno (IDTr) son instrumentos cruciales en el campo de la hidrología. Su diseño permite cuantificar y prever las características de los eventos de precipitación relacionando la intensidad de la lluvia, su duración, y la frecuencia o probabilidad de ocurrencia de tales eventos. La información que proporcionan es esencial para el diseño adecuado y la planificación de infraestructuras hidráulicas. Su obtención o estimación dependen del tipo de información disponible en las estaciones meteorológicas. A continuación, se describe uno de los métodos disponibles para su estimación el cual toma como información base registros históricos de precipitación diaria.

Chen realizó estudios sobre las precipitaciones para diferentes períodos de retorno apoyados en los estudios generados por el USBW. Con lo que obtuvo una fórmula generalizada de intensidad- duración-periodo de retorno para cualquier localidad en los Estados Unidos (Chow, 1994).

$$P_t^T = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-X}T^{X-1})}{(t + b)^c} \left(\frac{t}{60}\right) \quad (2.5)$$

Donde:

P_t^T = Precipitación, en milímetros para una duración t en min, y un período de retorno T en años
 a , b y c son parámetros de tormenta que pueden variar según el factor de conectividad

$$a = -2.297536 + 100.0389R - 432.5438R^2 + 1256.228R^3 - 1028.902R^4 \quad (2.6)$$

$$b = -9.845761 + 96.94864R - 341.4349R^2 + 757.9172R^3 - 598.7461R^4 \quad (2.7)$$

$$c = -0.06498345 + 5.069294R - 16.08111R^2 + 29.09596R^3 - 20.06288R^4 \quad (2.8)$$

El Factor de Conectividad (R) queda definido de la siguiente manera:

$$R = \frac{P_1^T}{P_{24}^T} \quad (2.9)$$

Donde

- P_1^T = Precipitación, en milímetros para una duración de 1 hr, y un período de retorno T en años
- P_{24}^T = Precipitación, en milímetros para una duración de 24 hrs, y un período de retorno T en años

Mientras que X es un valor que se obtiene de la siguiente manera:

$$X = \frac{P_t^{100}}{P_T^{10}} \quad (2.10)$$

Donde

- P_t^{100} = Precipitación, en milímetros para una duración de t minutos, y un período de retorno de 100 años
- P_T^{10} = Precipitación, en milímetros para una duración de t minutos, y un período de retorno de 10 años

Con estos datos se obtienen las precipitaciones asociadas a diferentes duraciones para diferentes periodos de retorno, lo cual se maneja como un paso previo a la obtención de hidrogramas y con ellos poder alimentar el modelo de simulación Iber.

2.2.3 Curvas de intensidad – duración – periodo de retorno (IDTr)

Aparicio (1992) menciona que las curvas IDTr son una relación matemática entre la intensidad de una precipitación, su duración y la frecuencia con la que se observa, la metodología relaciona los tres parámetros simultáneamente en una familia de curvas cuya ecuación general puede representarse de la siguiente manera:

$$i = \frac{K * T^m}{(d + c)^n} \quad (2.11)$$

Donde:

k, m, n y c son constantes que se calculan mediante un análisis de correlación lineal múltiple

De la Ecuación anterior, si se toman los logaritmos se tiene la siguiente Ecuación:

$$\log i = \log k + m \log T - n \log (d + c) \quad (2.12)$$

Visto también como:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad (2.13)$$

Esta es una ecuación de una familia de líneas rectas de pendiente a_2 , ordenada al origen a_0 y espaciamiento a_1 .

Dónde:

$$y = \log i \quad (2.14)$$

$$a_0 = \log k \quad (2.15)$$

$$a_1 = m \quad (2.16)$$

$$x_1 = \log T \quad (2.17)$$

$$a_2 = -n \quad (2.18)$$

$$x_2 = \log(d + c) \quad (2.19)$$

Al hacer un ajuste de correlación lineal múltiple de una serie de tres tipos de datos, se obtiene un sistema de ecuaciones similar al siguiente:

$$Na_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 = \sum y \quad (2.20)$$

$$a_0 \sum x_1 + a_1 \sum (x_1^2) + a_2 \sum (x_1 x_2) = \sum x_1 y \quad (2.21)$$

$$a_0 \sum x_2 + a_1 \sum x_1 x_2 + a_2 \sum x_2^2 = \sum x_2 y \quad (2.22)$$

Una vez calculados los coeficientes a_0 , a_1 y a_2 es posible evaluar los parámetros k , m y n de la ecuación (2.11)

2.3 Relación lluvia- escurrimiento

Un hidrograma está definido como un gráfico que muestra la tasa de flujo en función del tiempo en un lugar dado de la corriente. Esto facilita el análisis de la variación del flujo a medida que el tiempo transcurre (Chow, 1994). Así mismo, un hidrograma es también un reflejo de las características fisiográficas y climáticas por las cuales se precisan las relaciones entre la lluvia y la escorrentía. Además, refleja la influencia de otros factores importantes como lo es el área de la cuenca, la distribución espacial, temporal y altura de la precipitación, así como parámetros fisiológicos de la cuenca (vegetación, forma, pendiente etc.).

2.3.1 Métodos para establecer la relación Lluvia-Escurrimiento

En este apartado se enlistan y describen algunos de los métodos más recurrentes para la obtención de la relación lluvia escurrimiento: Hidrogramas Tradicionales: Formula Racional,

Curva S, Hidrograma Unitario Instantáneo. Hidrogramas Sintéticos: debido a la falta de mediciones o instrumentación en las cuencas se han generado formulas empíricas que relacionan características y parámetros fisiográficos de la cuenca con la generación de escorrentía. Uno de los métodos más usados son Hidrograma de Snyder e Hidrograma Sintético Unitario Triangular SCS (Soil Conservation Service) los cuales basan la estimación en función en tiempo de concentración y área de la cuenca.

2.3.2 Método del Hidrograma Sintético Unitario Triangular SCS

El Método del Hidrograma Sintético Unitario Triangular del Soil Conservation Service (SCS), es una técnica ampliamente utilizada en hidrología para estimar la respuesta de escorrentía de una cuenca ante un evento de precipitación. Este método simplifica la representación del proceso de escorrentía, facilitando la predicción del hidrograma de salida. Se expresa mediante la siguiente ecuación, relacionada con la obtención del gasto/caudal pico (Aparicio 1992):

$$Q_p = 0.555 \frac{A}{t_b} \quad (2.23)$$

Dónde:

- Q_p = Caudal pico ($m^3/s/mm$)
- t_b = Tiempo base en segundos (s)
- A = Área de la cuenca (m^2)

Para poder calcular el tiempo base son necesarias las siguientes relaciones:

$$t_b = 2.67 t_p \quad (2.24)$$

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r \quad (2.25)$$

$$d_e = 2 * \sqrt{t_c} \quad (2.26)$$

$$t_r = 0.6 * t_c \quad (2.27)$$

Donde:

- t_p =Tiempo pico en segundos (s)
- t_r =Tiempo de retraso en (s)
- d_e =Duración en exceso en segundos (s)
- t_c =Tiempo de concentración en segundos (s)

El hidrograma unitario final se obtiene multiplicando los valores de Q_p por las ordenadas y a t_p por las abscisas del hidrograma adimensional mostrado en la Figura 2.5:

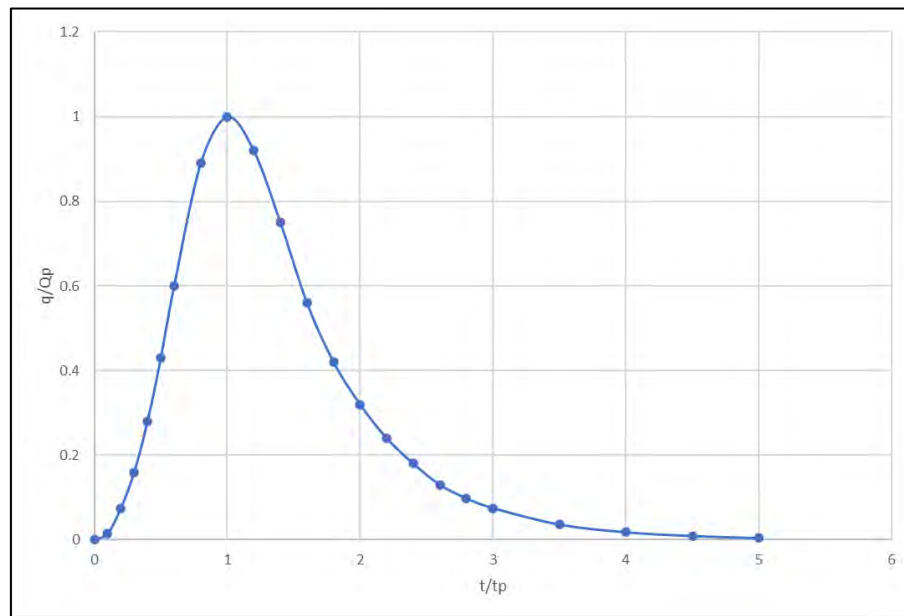


Figura 2.5 Hidrograma unitario adimensional SCS.

2.3.3 Precipitación Efectiva SCS

La precipitación efectiva o también conocida como precipitación neta se puede entender como la fracción de la precipitación total caída sobre una superficie que ha generado escorrentía directa, en ella no se contempla aquella precipitación que queda como retención superficial o bien se infiltra (Sánchez 2022).

Si se quiere conocer la precipitación efectiva de un hidrograma completo mediante el método de la SCS se deben seguir los siguientes pasos:

- Se calcula la abstracción inicial P_0
- A partir de datos de precipitación (P) se calcula la precipitación acumulada ($\sum P$)
- Si $\sum P$ es menor que la abstracción inicial, la P_e es igual a 0
- Si $\sum P$ supera la abstracción inicial se aplica la siguiente ecuación:

$$\sum P_e = \frac{(\sum P - P_0)^2}{\sum P + 4 * P_0}, \text{ siempre y cuando } P > P_0 \quad (2.28)$$

Calculada la precipitación efectiva acumulada ($\sum P_e$) se desacumulan estos datos, restando a cada valor actual de $\sum P_e$ el valor anterior.

Adicionalmente Campos (2010) indica que para estimar la precipitación neta que es conveniente utilizar un factor de reducción de área por el tamaño de la cuenca, este factor este definido por la siguiente formula y se aplica sobre los valores de precipitación total:

$$FRA = 1 - 0.3549 \times (1 - e^{-0.005794 \times A}) \quad (2.29)$$

Donde

- FRA = Factor de reducción de área (adimensional)
- A = Área de la cuenca en km^2

Si a la ecuación Q_p se le multiplica por la precipitación efectiva se obtiene la siguiente ecuación (2.30) que contiene las unidades de gasto deseada (m^3/s) para establecer los hidrogramas de entrada:

$$Q_p' = 0.555 \frac{A}{t_b} P_e \quad (2.30)$$

Dónde:

- Q_p' = Gasto pico (m^3/s)
- P_e = lamina de precipitación efectiva (mm)

2.3.4 Evaluación de P_0 .

Existen diversos métodos que nos pueden ayudar a evaluar la abstracción inicial, sin embargo, dentro del método de la SCS el valor de P_0 y el Número de curva de la cuenca (CN) se relacionan mediante la siguiente expresión (Sánchez 2022):

$$P_0 = \frac{5080}{CN} - 50.8 \quad (2.31)$$

2.3.5 Número de Curva (CN)

El método del número de curva o también conocido como número de escurrimientos se conoce como una ponderación que depende del tipo de suelo, cobertura vegetal, pendiente del terreno, entre otros factores (Aparicio 1992). Existen tablas que pueden ayudar a definir mejor los valores del tipo de suelo que se presentan en las condiciones de estudio, por lo que se puede obtener un valor medio de la cuenca de acuerdo con las condiciones que ésta presente. La Tabla 2.1 muestra algunos valores del número de curva en función del uso de suelo y el grupo hidrológico al que pertenece. La caracterización de los diferentes grupos hidrológicos de acuerdo con Campos (2010) se realiza de la siguiente manera:

Grupo A: Suelos con altas velocidades de infiltración cuando están mojados, son principalmente arenas y gravas profundas con un drenaje bueno a excesivo.

Grupo B: Suelos con moderadas velocidades de infiltración cuando están mojados, con cantidades moderadas de texturas finas a gruesas, con drenaje medio y algo profundos. básicamente suelos arenosos con moderadas velocidades de transmisión del agua.

Grupo C: Suelos que tienen bajas velocidades de infiltración cuando están mojados, consisten principalmente de suelos que tienen un estrato que impide el flujo del agua, son suelos con texturas finas. Estos suelos tienen bajas velocidades de transmisión del agua.

Grupo D: Suelos con bajas velocidades de infiltración, son principalmente suelos arcillosos con alto potencial de hinchamiento, nivel freático alto y permanente.

Tabla 2.1 Valores de CN (Adaptado de Campos, 2010).

Descripción del uso del terreno	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Barbecho en surcos rectos	77	86	91	94
Terrenos cultivados				
Sin tratamiento de conservación	72	81	88	91
Con tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastizal natural en condición hidrológica pobre	68	79	86	89
Pastizal natural en condición hidrológica buena	39	61	74	80
Pradera (pasto permanente)	30	58	71	78
Lotes de bosque en zonas agrícolas				
Condición hidrológica pobre	45	66	77	83
Condición hidrológica buena	25	55	70	77
Bosque				
Muy esparcido o de baja transpiración	56	75	86	91
Esparcido o de baja transpiración	46	68	78	84
Denso o de alta transpiración	26	52	62	69
Muy denso o de alta transpiración	15	44	54	61
Casco de hacienda o de ranchos	59	74	82	86
Caminos de tierra incluido derecho de vía	72	82	87	89
Caminos con pavimentos duros incluyendo derecho de vía	74	84	90	92
Superficie impermeable	100	100	100	100

2.4 Erosión en cauces

La morfología de un río puede variar debido a la acción de fenómenos fluviales e hidrológicos y también por la intervención humana, generalmente el agua de los cauces naturales no es limpia, por lo que es común encontrar material disuelto en el agua, transportado o en suspensión. A este material se le conoce como sedimentos y es importante aclarar que cuando se menciona esta palabra esta por entendido que materiales como basura o algún conglomerado que no sea constituido por el material de la zona no se le cataloga como sedimento. La erosión del suelo consiste en la remoción, arranque y transporte de los materiales que constituyen la capa más

superficial del suelo, sea cual sea el agente responsable: agua, viento, hielo, actuaciones humanas.

La erosión produce la reducción del espesor efectivo del perfil edáfico y, por tanto, del volumen de suelo explotable por la vegetación o el cultivo. Dado que la pérdida de material afecta fundamentalmente a las capas superficiales del suelo, en las que reside la mayor fertilidad, su pérdida supone una merma significativa de los contenidos de materia orgánica y nutrientes. La acción de los agentes erosivos provoca una degradación progresiva de la estructura física del suelo lo que, a su vez, aumenta la vulnerabilidad de este a ser degradado y afecta al resto de las funciones del suelo (*Pérez, et al., 2018*).

Por todo lo anterior, el suelo manifiesta una disminución progresiva en su capacidad de retención de agua y nutrientes disponibles para las plantas, lo que repercute en una reducción drástica de su fertilidad. El hecho de reconocer la naturaleza no renovable a escala temporal humana del recurso edáfico es de extraordinaria importancia.

Su degradación supone la mayoría de las veces su destrucción irreversible y en el caso límite la desertificación del territorio, la formación de suelo fértil es un proceso sumamente lento medible únicamente en una escala de tiempo geológico. Una formación de apenas 5 cm de suelo puede necesitar el transcurso de cientos e incluso miles de años, mientras que los procesos erosivos pueden actuar rápida y drásticamente. El equivalente a esos 5 cm de espesor de la capa superficial de suelo puede ser eliminado durante una única tormenta. En condiciones naturales, los procesos responsables de la formación de los suelos y aquellos responsables de su destrucción por erosión alcanzan un equilibrio tal que asegura el mantenimiento de una capa superficial de suelo capaz de soportar una cubierta vegetal estable.

Si existe una ruptura del equilibrio suelo-vegetación-clima debido a las actividades humanas se puede llegar a desencadenar la degradación irreversible del suelo y, con ello, limitar tanto su potencial productivo agroforestal como su capacidad de regeneración y soporte de los ecosistemas naturales.

En consecuencia, la gestión del territorio desde una perspectiva conservacionista debe asumir el objetivo de mantener, de forma indefinida, el potencial productivo de los suelos y, con ello, asegurar la sostenibilidad de las explotaciones agroforestales.

Además de lo mencionado anteriormente, también se puede encontrar erosión en cauces, donde las corrientes naturales forman y ajustan sus propios cauces en busca de un equilibrio, los sedimentos que transporta en ella son consecuencia natural de la degradación del suelo, puesto que, el material procedente de la erosión llega a las corrientes a través de tributarios menores debido a la capacidad que tiene la corriente de agua para transportar sólidos.

El sistema fluvial incluye zonas de producción de sedimentos, de transporte y finalmente de deposición, es por ello, que los fenómenos de erosión, transporte de sedimentos y sedimentación siempre están relacionados. Las alteraciones que sufren estos parámetros en un río pueden ser de forma natural o bien causadas por el ser humano y atienden diversas causas.

Existe un punto de equilibrio en condiciones normales, pero si se modifica algún parámetro en el cauce, con el tiempo y lentamente, el río cambiara a una nueva condición de equilibrio (*Pérez, et al., 2018*), por ello es importante recordar que el equilibrio de una partícula en el lecho de un río está gobernado por el balance de fuerzas actuantes en la corriente debidas al paso del agua (aumento en el caudal, tirante y velocidad media del flujo) y las resistentes al arrastre.

La resistencia que un cauce erosionable presenta al movimiento del fluido está en función de los parámetros hidráulicos asociados al fenómeno: caudal, tirante, rugosidad del cauce, densidad del agua, etc. Generando la existencia, o no, de movimiento del material que forma el lecho (*Martínez, 2004*). La resistencia a la erosión de los márgenes de un cauce está íntimamente relacionada con las características de los materiales que constituyen los mismos, los cuales suelen clasificar en:

- Cohesivos
- No cohesivos y
- Estratificados.

La relación que tiene lugar entre los procesos erosivos y el tipo de material que constituye la margen, así como algunas de las propiedades asociadas a los sedimentos son:

- Velocidad de caída
- Densidad y Peso Específico
- Tamaño
- Distribución Granulométrica

Los lechos y márgenes de los cauces naturales están sujetos a procesos de erosión cuando circula por ellos un determinado caudal. Cuando un río está sometido a un proceso de erosión existen factores clave que condicionan el proceso, siendo estos de tipo geomorfológico, geotécnico e hidráulico, y que comúnmente se encuentran interrelacionados (Martínez, 2004).

Existen también algunas consideraciones teóricas para abordar el estudio del proceso de erosivo en ríos, algunas de ellas son:

1. El flujo de agua en movimiento ejerce fuerzas sobre las partículas del lecho que tienden a ponerlas en movimiento.
2. Las fuerzas que resisten esta acción del flujo dependen de las propiedades del material del lecho.
3. Si el material del lecho está formado por partículas gruesas como gravas y arenas, las fuerzas que se oponen al movimiento estarán relacionadas principalmente con el peso de las partículas.
4. Cuando las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre una partícula alcanzan un valor tal que si éste se incrementa ligeramente la partícula comienza a moverse, esto implica que se han alcanzado las condiciones denominadas críticas.
5. Bajo estas condiciones las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre una partícula y las fuerzas resistentes que se oponen a éstas están en equilibrio.

La erosión hídrica en los cauces naturales resulta de una interacción entre las fuerzas impuestas por el poder erosivo del agua y la resistencia ofrecida por el esfuerzo inherente del suelo a resistir la erosión, las corrientes de agua poseen un comportamiento complejo y sobre todo dinámico.

El río es solamente una parte del sistema en donde también se deben de considerar otras variables como la cuenca, la geología, el clima, la vegetación y demás factores que influyen en forma determinante en su comportamiento (Álvarez & Becerril, 2017).

Algunos de los parámetros que intervienen en dicho equilibrio son:

1. Gasto líquido y su distribución a lo largo del año
2. Gasto solido es el transporte del material
3. Ancho de la superficie libre del agua
4. Tirante medio
5. Pendiente de la pérdida de carga
6. Diámetro representativo
7. Resistencia de las orillas a ser erosionadas
8. Peso específico del agua
9. Concentración del material de lavado
10. Número de brazos o cauces

Por lo tanto, la magnitud y el tipo de erosión que se produce en un tramo de un cauce natural viene definida por las características del cauce y las condiciones medioambientales del lugar, únicas para cada tramo de río y para cada situación. Para calcular la tasa promedio de erosión fluvial Partheiades y Arulanandan propusieron la siguiente Ecuación experimental:

$$\epsilon = k_d * (\tau_b - \tau_c) \quad (2.32)$$

$$k_d = (0.20\tau_c)^{-0.5} \quad (2.33)$$

Donde:

- ϵ = Tasa promedio de erosión fluvial

- k_d = Coeficiente de erodabilidad del suelo
- τ_b = Esfuerzo Actuante
- τ_c = Esfuerzo Crítico Asociado a las partículas que componen la margen

Además, para conocer la erosión producida en la margen durante un lapso de tiempo se emplea la siguiente Ecuación:

$$E = \epsilon * \Delta t \quad (2.34)$$

Donde:

- E = Tasa promedio de erosión fluvial por unidad de tiempo
- Δt = lapso de tiempo deseado

2.5 Socavación en cauces

Cualquier cauce natural está expuesto a procesos de socavación debido al paso de una corriente de agua, en especial cuando se encuentran caudales que sobrepasan los valores medios, esto sucede muy a menudo durante la temporada de lluvias. Como consecuencia de este fenómeno se pueden llegar a modificar las condiciones geomorfológicas del cauce alterando su comportamiento hidráulico.

2.5.1 Clasificación de la socavación en cauces

La socavación, un fenómeno crítico en la dinámica fluvial y en la ingeniería hidráulica, se clasifica en dos categorías principales: general y local. La socavación general se refiere al desgaste extendido del lecho de un río o canal, mientras que la socavación local se concentra en áreas específicas, a menudo exacerbada por estructuras artificiales o cambios en el flujo del agua. Esta última puede manifestarse de diversas maneras, como en zonas transversales, en curvas fluviales, alrededor de las bases de estructuras (como puentes o represas), en las inmediaciones de embalses, en las zonas de descarga, debajo de tuberías, y en áreas afectadas por meandros naturales o rectificaciones artificiales del cauce. Cada tipo de socavación posee

características únicas y, por tanto, requiere enfoques específicos y formulaciones detalladas para su análisis y mitigación. Estos métodos consideran una variedad de factores, incluyendo las propiedades hidrodinámicas del flujo de agua y la geología del lecho fluvial

2.5.1.1 Métodos para calcular la socavación general

Si bien es cierto que existen varias metodologías para calcular la socavación general para propósitos de este trabajo se presenta la metodología de Lischtván – Lebediev, ya que en su mayor parte se dispone de las variables que emplea el método y se evita tener que realizar visitas al sitio, aunque también existen otros métodos importantes para la socavación general como lo son el método de teoría de régimen y el método de formulación generalizada.

A) Método de Lischtván – Lebediev

El método propone calcular la profundidad de socavación teniendo en cuenta la granulometría del material, siendo este de dos tipos, granular y cohesivo, y para cada tipo de material existe una ecuación correspondiente:

Material Granular:

$$ds = \left(\frac{\alpha Y n^{5/3}}{4.7 \beta D_{84}^{0.28}} \right)^{\frac{D_{84}^{0.082}}{(0.232 + D_{84}^{0.082})}} \quad (2.35)$$

Material Cohesivo:

$$ds = \left(\frac{\alpha Y n^{5/3}}{4.7 \beta D_{84}^{0.28}} \right)^{\frac{D_{84}^{0.082}}{(0.232 + D_{84}^{0.082})}} \quad (2.36)$$

β y α son coeficientes que se calculan de la siguiente manera:

$$\beta = 0.8416 + 0.03342 \ln(Tr) \quad (2.37)$$

$$\alpha = \frac{Qd}{dm^{\frac{5}{3}} Be\mu} \quad (2.38)$$

Donde:

- Y_n = Profundidad inicial de cualquier franja de la sección del cauce, antes de iniciarse el proceso de socavación, medida de la superficie libre de agua cuando pasa la avenida de diseño hasta el fondo del cauce en época de estiaje (m).
- D_{84} = Diámetro por debajo del cual queda el 84% del suelo en peso (m).
- dm = Tirante medio de la corriente (m).
- Qd = Gasto de diseño (m^3/s).
- Tr = Periodo de retorno (años).
- Be =Ancho efectivo. (m)
- μ = Coeficiente que toma en cuenta las contracciones del flujo producto de las obstrucciones, en la Tabla 2.2 se presentan algunos de estos valores en función de la separación mínima entre las obstrucciones y la velocidad media de la corriente:

Tabla 2.2 Valores del coeficiente μ (Perez, et al., 2018).

Velocidad media en la sección (m/s)	Longitud libre entre dos pilas (claro) en m												
	10	13	16	18	21	25	30	42	52	63	106	124	200
< 1.00	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
1.00	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
1.50	0.94	0.96	0.97	0.97	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.0	1.0	1.0
2.00	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.0
2.50	0.90	0.93	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.0
3.00	0.89	0.91	0.93	0.94	0.95	0.95	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
3.50	0.87	0.90	0.92	0.93	0.94	0.94	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
> 4.00	0.85	0.89	0.91	0.92	0.93	0.93	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	0.99

2.5.1.2 Métodos para calcular la socavación local

La socavación local es un fenómeno que ocurre en ríos y canales, caracterizado por la erosión del suelo alrededor de estructuras como pilas de puentes, estribos, y otras obras hidráulicas. Para abordar adecuadamente este desafío, se han desarrollado varios métodos de cálculo, cada uno

adaptado a distintas condiciones y tipos de estructuras. Estos métodos incluyen enfoques empíricos, basados en observaciones y datos experimentales, y modelos analíticos o numéricos, que utilizan principios de la mecánica de fluidos y la dinámica de sedimentos para predecir la profundidad y extensión de la socavación. La elección del método más adecuado depende de factores como la geometría de la estructura, las características del cauce, el tipo de suelo, y las condiciones hidrodinámicas. A continuación, se detallan algunos de los métodos desarrollados para la estimación de la socavación local.

A) Método de la Universidad de Colorado (CSU) (1975)

La fórmula propuesta para encontrar la socavación máxima en una pila se define de la siguiente manera:

$$y_s = 2.0 * K_1 * K_2 * K_3 * K_4 * a^{0.65} * y_1^{0.35} * Fr_1^{0.43} \quad (2.39)$$

Donde:

- y_s = Profundidad de socavación (m).
- y_1 = Tirante del flujo directamente aguas arriba de la pila (m).
- K_1 = Factor de corrección por la forma de la nariz de la pila, se obtiene tomando en cuenta la Figura 2.6 d y el valor de la Tabla 2.3
- K_2 = Factor de corrección para el ángulo de ataque de flujo, se toma de la Tabla 2.4 o la Ecuación:

$$K_2 = \left(\cos\theta + \frac{L}{a} \sin\theta \right)^{0.65} \quad (2.40)$$

- K_3 = factor de corrección para la condición del fondo del cauce o lecho del río, se obtiene de la Tabla 2.5
- K_4 = Factor de corrección por acorazamiento del fondo del cauce, de la Ecuación 2.41
- a = ancho de la pila (m)
- L = largo de la pila (m)
- Fr_1 = Número de Froude directamente aguas arriba del puente = $V_1/(gY_1)^{1/2}$
- La velocidad V_1 = Media de flujo directamente aguas arriba del puente (m/s)
- g = aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

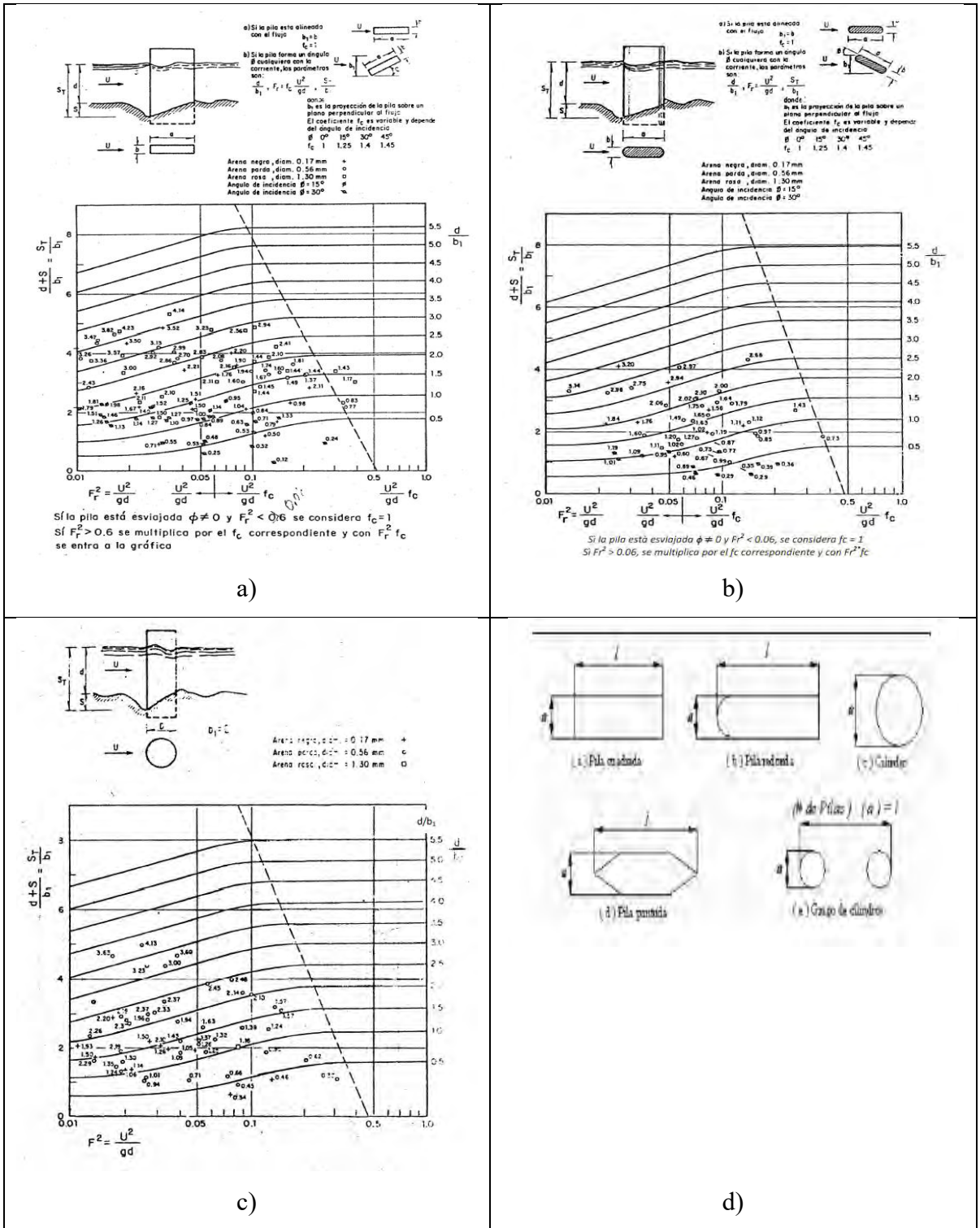


Figura 2.6 Consideraciones para la estimar la socavación local en pilas para el método de la Universidad de Colorado. a) Cálculo de la socavación local al pie de una pila rectangular, b) Cálculo de la socavación local al pie de una pila redondeada, c) Cálculo de la socavación local al pie de una pila circular y d) Formas de la nariz de una pila.

Tabla 2.3 *Valores del coeficiente K_1*

Forma de la nariz de la pila	K_1
(a) Nariz cuadrada	1.1
(b) Nariz redonda	1.0
(c) Cilindro circular	1.0
(d) Nariz puntiaguda triangular	0.9
(e) Grupo de cilindros	1.0

Tabla 2.4 *Valores del coeficiente K_2*

Coeficiente K_2 para diferentes ángulos θ del flujo con el eje de la pila			
Ángulo ($^\circ$)	$L/a=4$	$L/a=8$	$L/a=12$
0	1.0	1.0	1.0
15	1.5	2.0	2.5
30	2.0	2.75	3.5
45	2.3	3.3	4.3
90	2.5	3.9	5.0

Tabla 2.5 *Valores del coeficiente K_3*

Coeficiente K_3 para diferentes condiciones del lecho del cauce		
Condición del lecho	Altura de la duna (m)	K_3
Erosión de aguas claras	No aplica (N/A)	1.0
Lecho plano y flujo antidunas	N/A	1.1
Dunas pequeñas	$0.6 < H \leq 3.0$	1.1
Dunas medianas	$3.0 < H \leq 9.0$	1.1 a 1.2
Dunas grandes	$H \geq 9.0$	1.3

El factor de corrección K_4 disminuye las profundidades de erosión por el acorazamiento del foso de erosión para los materiales del lecho que tiene un D_{50} igual o mayor que 2mm y un D_{95} igual o mayor que 20 mm. El factor de corrección resulta de la investigación realizada por A. Molinas en la CSU, la cual mostró que cuando la velocidad (V_1) es menor que la velocidad crítica (V_{c90}) del tamaño D_{90} del material del lecho, y hay una gradación en el material del lecho, el D_{90} limitará la profundidad de erosión. La Ecuación desarrollada por J.S Jones de un análisis de los datos es:

$$K_4 = 0.4(V_R)^{0.15} \quad (2.41)$$

Donde:

$$V_R = [V_1 - Vi_{50}]/[Vc_{50} - Vi_{95}] \quad (2.42)$$

$$Vi_{50} = 0.645[D_{50}/a]^{0.053}Vc_{50} \quad (2.43)$$

$$Vi_{95} = 0.645[D_{95}/a]^{0.053}Vc_{95} \quad (2.44)$$

Donde:

- V_R = Razón de Velocidad
- V_1 = Promedio de velocidad en el cauce principal o el área de la llanura de inundación en la sección transversal justo aguas arriba del puente, (m/s)
- Vi_{50} = Velocidad más cercana requerida para iniciar la erosión en el pilar para el tamaño de grano D_{50} (m/s)
- Vi_{95} = Velocidad más cercana requerida para iniciar la erosión en el pilar para el tamaño de grano D_{95} (m/s)
- Vc_{50} = Velocidad crítica para el lecho de tamaño de grano D_{50} (m/s)
- Vc_{95} = Velocidad crítica para el lecho de tamaño de grano D_{95} (m/s)
- a = Ancho del pilar (m)

$$Vc_{50} = K_u y^{1/6} D_{50}^{1/3} \quad (2.45)$$

$$Vc_{95} = K_u y^{1/6} D_{95}^{1/3} \quad (2.46)$$

Donde:

- y = Profundidad del agua justo aguas arriba de la pila, con exclusión de la socavación local (m)
- $K_u = 6.19$ para unidades del sistema internacional

Valores restrictivos de K_4 y tamaño del material del fondo del cauce se proporcionan en la

literatura especializada, indicando que para D_{50} debe ser mayor o igual a 2 mm, para el D_{95} debe ser mayor o igual a 20 mm y el mínimo valor de K_4 debe ser igual a 0.4.

B) Método de Laursen-Toch

Este método, considera dos casos en la determinación de la socavación en las pilas, uno cuando la corriente incide paralelamente al eje de las pilas y otro cuando forma un determinado ángulo. Cuando la corriente incide paralelamente al eje de las pilas la profundidad de socavación se estima mediante siguiente expresión:

$$S_0 = K_1 * K_2 * b \quad (2.47)$$

Donde:

- S_0 = Profundidad de la socavación frente a la pila, medida desde el fondo original (m)
- K_1 = Coeficiente que depende de la relación que exista entre el tirante de agua después de que se presenta la socavación general “ h ” y el ancho o diámetro de la pila, su valor se obtiene con la Figura 2.7a
- K_2 = Coeficiente de corrección que toma en cuenta la forma de la nariz de la pila, tomando el valor de la Tabla 2.6
- b = Ancho o diámetro de la pila (m)

Por otro lado, cuando la corriente incidente forma un determinado ángulo. Los valores de socavación local se estiman mediante siguiente expresión:

$$S_0 = K_1 * K_3 * b \quad (2.48)$$

Donde:

- K_3 = Coeficiente que depende del ángulo que forma el eje de la corriente con el eje de la pila y de la relación que exista entre el largo (a) y el ancho (b) de la pila y su valor se obtiene con ayuda de la Figura 2.7b

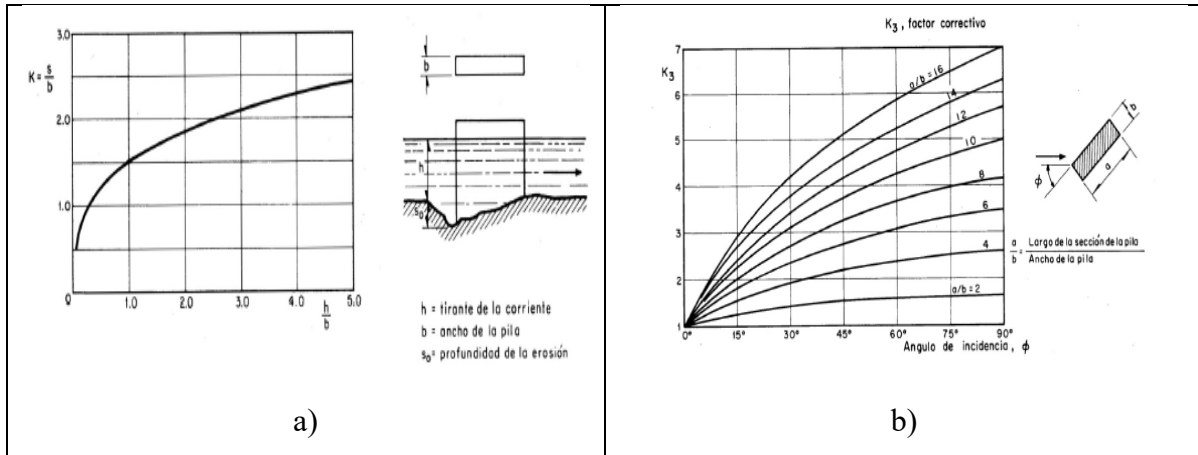

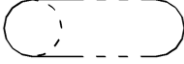
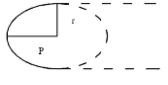

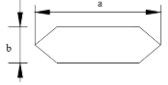
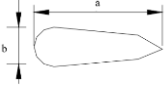


Figura 2.7 Consideraciones para evaluar la socavación local en el método Laursen-Toch. a) Relación entre la erosión y profundidad relativa, b) Coeficiente de corrección cuando existe un ángulo de incidencia entre el eje de la pila y la corriente.

Tabla 2.6 Coeficiente de corrección que depende de la forma de la pila

Forma de la nariz			Coeficiente K ₂ de Schneible
Rectangular	a / b = 4		1.00
Semicircular			0.90
Elíptica	P / r = 2 / 1		0.81
	P / r = 3 / 1		0.75
Lenticular	P / r = 2 / 1		0.81
	P / r = 3 / 1		0.69
Forma de la nariz			Según Tison
Biselada	a / b = 4		0.78
Perfil Hidrodinámico	a / b = 4		0.75

C) Método de Yaroslavtziev

Este método diferencia la socavación de acuerdo con el tipo de material que forma el cauce, a través de dos formulaciones, una para material cohesivo y otro para material granular o friccionante. Para material granular no cohesivo se tiene la siguiente fórmula:

$$S_0 = \frac{K_f K_v (C + K_H) U^2}{g} - (30D_{85}) \quad (2.49)$$

Donde:

- S_0 = Profundidad de la socavación frente a la pila, medida desde el fondo original, en m.
- K_f = Coeficiente que depende de la forma de la nariz de la pila y el ángulo ϕ que forma el eje de la corriente y el eje de la pila y que según el tipo de pila se obtiene con la ayuda de la Figura 2.8a, 2.8b y 2.8c.
- K_v = Coeficiente definido por la expresión siguiente:

$$\log K_v = \frac{-0.28^{1/3} * U^2}{g * b_1} \quad (2.50)$$

Donde:

- h = Tirante de la corriente después de que se presenta la socavación general, en m.
- b_1 = Proyección en un plano perpendicular a la corriente, del ancho y largo de la pila.

Cuando el ángulo de incidencia sea 0° , b_1 toma el valor del ancho de la pila (b), en m. Otra forma de obtener el valor de K_v es por medio de la Figura 2.9a, que está en función de la velocidad de la corriente.

- C = Coeficiente de corrección que depende del sitio donde esté colocada la pila, tomando un valor de 0.6 si se encuentra en el cauce principal y de 1 si está en la zona de avenidas.
- K_H = Coeficiente que toma en cuenta el tirante del agua después de producirse la socavación general y que se puede obtener con la ayuda de la Figura 2.9b
- U = Velocidad media de la corriente aguas arriba de la pila, después de presentarse la socavación general, en m/s.
- D_{85} = Diámetro 85 “en cm”, conforme al autor, es el diámetro representativo en el fondo del cauce.

Cuando el material del fondo tiene un D_m menor de 5 mm, el investigador recomienda no considerar el segundo término de la Ecuación 2.49, es decir no restar $(30 D_{85})$.

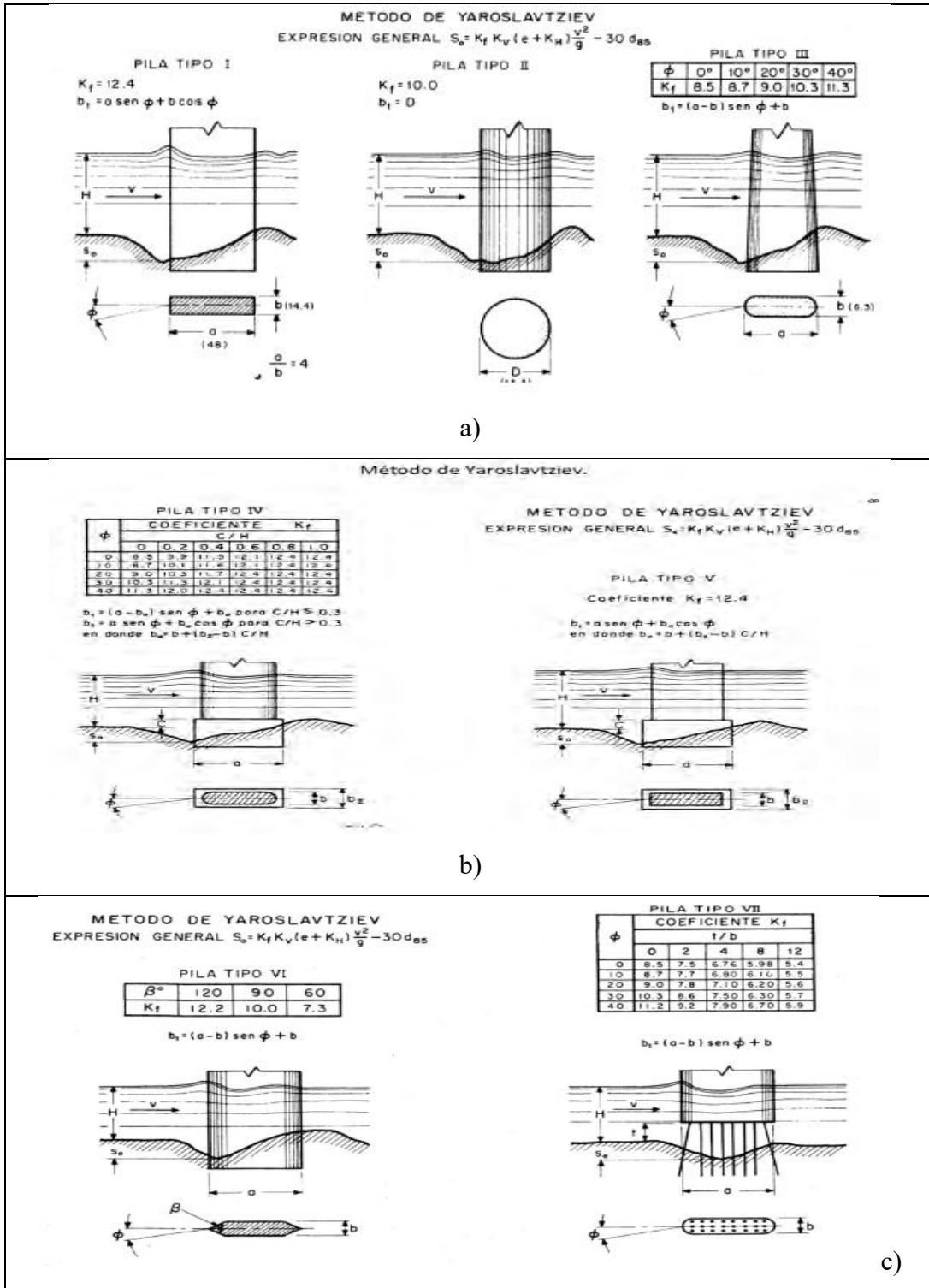


Figura 2.8 Valores de k_1 y b_1 para diferentes pilas y distintos ángulos de incidencia del método de Yaroslavtziev. a) Pilas tipo I, II y III, b) Pilas tipo IV y V, c) Pilas tipo VI y VII.

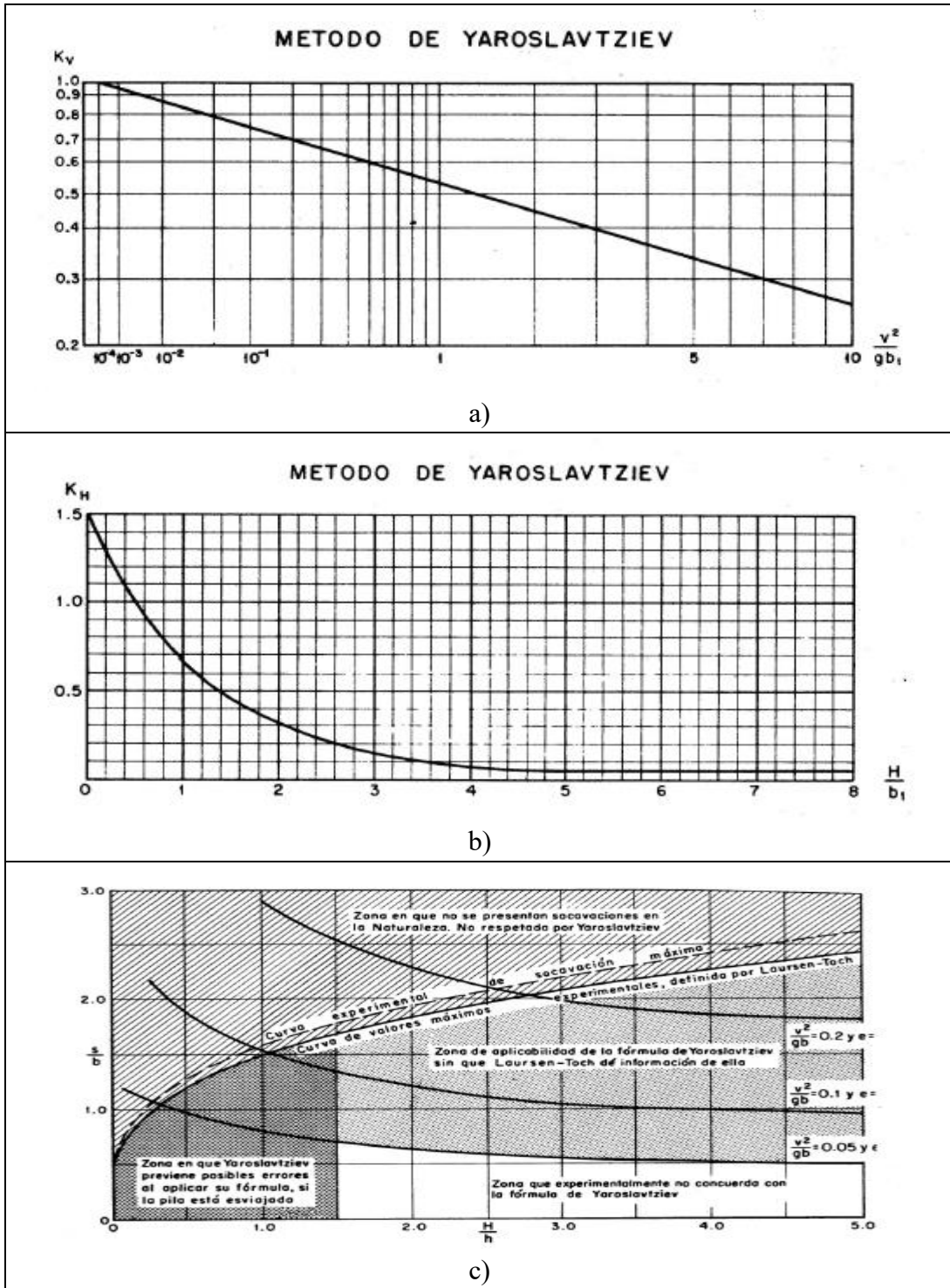


Figura 2.9 Consideraciones adicionales para evaluar la socavación local en el método Yaroslavtziev. a) Valores de coeficiente K_v , b) Valores de coeficiente K_H y c) Zonas de aplicabilidad de los métodos de Laursen-Toch y Yaroslavtziev

D) Método de Maza-Sánchez

Es un método aplicable para lechos cubiertos por arena y grava. El método se basa en el uso de curvas elaboradas a partir de resultados experimentales de laboratorio en investigaciones realizadas en la División de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en México. Las curvas se derivaron con materiales de diámetro entre 0.17 mm y 0.56 mm. La socavación obtenida a partir de estas curvas para partículas con diámetro medio de 1.3 mm da mayor que la obtenida experimentalmente.

Parámetros que intervienen en el método son: profundidad del flujo, ancho de la pila, número de Froude y el ángulo de ataque del flujo sobre la estructura. El diámetro de las partículas no se tiene en cuenta. Los siguientes son los pasos para la aplicación del método:

a) Cálculo del cuadrado del número de Froude de la corriente, F_r^2 :

$$F_r^2 = \frac{V^2}{gH_s} \quad (2.51)$$

$$V_r = \frac{\alpha h^{5/3}}{H_s} \quad (2.52)$$

Donde

- H_s = Profundidad del agua hacia aguas arriba de la pila antes de la socavación local
- V = Velocidad media de la corriente frente a la pila
-

b) Evaluación del factor de corrección f_c que considera el ángulo de ataque de la corriente:

Tabla 2.7 Factor de corrección f_c

ϕ	0°	15°	30°	45°
f_c	1.0	1.25	1.40	1.45

Donde

- ϕ = Angulo de ataque del flujo

Si la pila está sesgada con respecto al flujo y $F_r^2 < 0.06$, se trabaja con $f_c = 1.0$.

Si la pila está sesgada con respecto al flujo y $F_r^2 \geq 0.06$, se trabaja con la siguiente expresión:

$$F_r^2 = f_c \frac{V^2}{gH_s} \quad (2.53)$$

c) Cálculo de la relación H_s/a'

Donde

- a' = ancho proyectado de la pila sobre un plano normal a la dirección de la corriente (m)
-

d) Selección de la curva a usar dependiendo de la forma de la pila, (Figura 2.6a, Figura 2.6b, ó Figura 2.6c).

e) Cálculo de la profundidad de socavación. Con el número de Froude corregido $(f_c \cdot v^2)/gH_s$ se entra en las abscisas de la respectiva gráfica hasta interpolar la curva de H_s/a' y se lee en las ordenadas el valor de H_T/a' del cual se despeja el valor de d_s :

$$d_s = H_T - H_s \quad (2.54)$$

Donde:

- H_T = Profundidad de socavación medida desde la superficie del flujo (m)
- d_s = Profundidad de socavación medida desde el lecho del cauce (m)

2.6 Aspectos de Hidráulica Fluvial

La hidráulica fluvial se enfoca en las actividades humanas que intervienen directamente en los ríos para poder adecuar el aprovechamiento de sus recursos sin causar un alto riesgo o daño a los ríos. A continuación, se mencionan aspectos relacionados con el tema para comprender mejor el papel que tiene dentro de los procesos de erosión y socavación.

2.6.1 Inicio de Movimiento

Las partículas sólidas que forman el fondo de un cauce son sometidas a la acción de las fuerzas hidrodinámicas del flujo como son la fuerza de arrastre, sustentación y las fuerzas viscosas sobre la superficie de la partícula cuya resultante, si es mayor que las fuerzas de equilibrio, como son la gravedad y la cohesión, harán que la partícula inicie su movimiento, conociéndose a esta condición como “Condición crítica” (Pérez, et al., 2018).

Para ello se consideran dos criterios para calcular la fuerza crítica de la corriente que es capaz de iniciar el movimiento de las partículas del lecho: Esfuerzo cortante crítico y Velocidad media crítica

2.6.2 Esfuerzo Cortante Crítico

Para determinar el esfuerzo cortante crítico existen diferentes métodos que varían según los tamaños de las partículas que se distribuyen uniformemente y si el material es o no es cohesivo, para fines de este estudio únicamente se describirán las formulaciones desarrolladas para cauces compuestos de materiales no cohesivos y de distribución no uniforme.

Según el método propuesto por Shields la estimación del esfuerzo cortante crítico depende de la determinación de los parámetros R_* y τ_* :

$$\tau_* = \frac{\tau_c}{(\delta_s - \delta) * D} \quad (2.55)$$

$$R_* = \frac{U_* * D}{\nu} \quad (2.56)$$

$$U_* = \sqrt{\frac{T_c}{\rho}} \quad (2.57)$$

Dónde:

- τ_* = Parámetro Adimensional de Shields (Adimensional)
- R_* = Número de Reynolds (Adimensional)
- U_* = Velocidad Asociada al esfuerzo cortante, Velocidad de Fricción (m/s)
- ρ = Densidad del Agua (kg/m^3)
- τ_c = Esfuerzo Cortante Crítico (kg/m^2)
- ν = Viscosidad Cinemática del Agua (m^2/s)
- δ_s = Peso Específico de las Partículas (kg/m^3)
- δ = Peso Específico del Agua (kg/m^3)
- D = Diámetro característico del material (m)

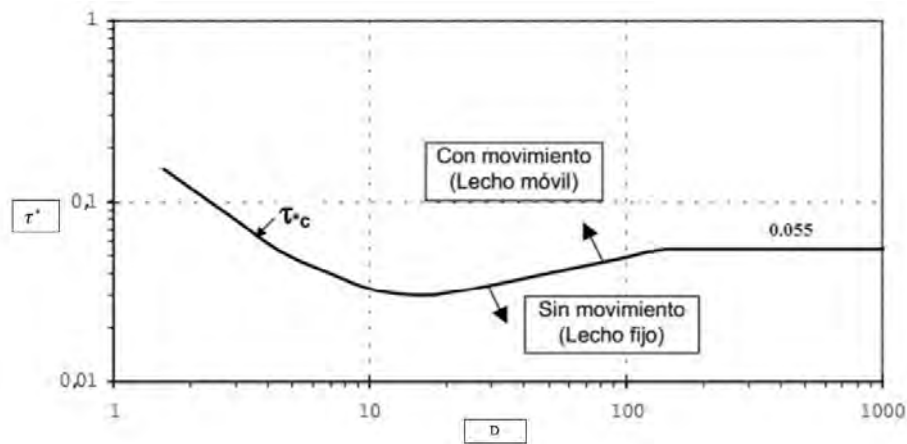


Figura 2.10 Curva para valor de parámetro de Shields

El cálculo del esfuerzo cortante es un proceso iterativo donde se supone un valor inicial del esfuerzo crítico, posteriormente se calcula la velocidad de fricción y el número de Reynolds, se estima el valor del parámetro de Shields en la curva de inicio arrastre Figura 2.10 y finalmente se calcula el esfuerzo crítico, este procedimiento se realiza hasta que el valor calculado sea igual al supuesto inicialmente.

2.6.3 Velocidad Crítica o de Inicio de Arrastre

La máxima velocidad media del flujo que pueden soportar las partículas de un cauce sin ser desprendidas o sin provocar erosión se denomina velocidad sin desplazamiento, velocidad,

crítica, máxima permisible o velocidad no erosiva y se puede determinar según los siguientes autores:

Ecuación de Maza-García:

$$U_c = 1.5040 \left(\frac{d}{D}\right)^{0.15} \sqrt{(S_s - 1)gD} \quad (2.58)$$

Donde

- U_c = Velocidad Media Crítica (m/s)
- d = Tirante medio de la corriente (m)
- D = Diámetro del material de fondo que se desea conocer su velocidad crítica (m)
- S_s = Densidad relativa de las partículas (Adimensional)
- g = Valor de la gravedad (m/s^2)

Ecuación de Neill:

$$U_c = 1.414 \left(\frac{d}{D}\right)^{1/6} \sqrt{(S_s - 1)gD} \quad (2.59)$$

Ecuación de Grade:

$$U_c = (0.50 \log \left(\frac{d}{D}\right) + 1.63) \sqrt{(S_s - 1)gD} \quad (2.60)$$

Ecuaciones de Levi:

Si $10 < \frac{d}{D} < 60$

$$U_c = 1.4 \left[1 + \log_e \left(\frac{d}{7D_m}\right)^{1/2} \right] \left[\frac{D_{max}}{D_m} \right]^{1/7} \sqrt{gD_m} \quad (2.61)$$

Donde:

- D = Diámetro medio del material de fondo que se desea conocer su velocidad crítica (m)

- D_{max} = Diámetro máximo del material de fondo que se desea conocer su velocidad crítica (m)

Si $\frac{d}{D} > 60$

$$U_c = 1.4 \left[1 + \left(\frac{D_{max}}{D_m} \right)^{1/7} \right] \log_e \left[\frac{d}{7D_m} \right] \sqrt{gD_m} \quad (2.62)$$

2.3.3.4 Método de Maza García para diseño de secciones.

El método de Maza-García se basa en el criterio de condición y velocidad crítica, a partir de estos se formularon ecuaciones que son de utilidad al momento de diseñar secciones de río. En realidad, consiste en encontrar una igualdad entre la velocidad media de la corriente y la velocidad media crítica, las Ecuaciones (2.63) y (2.66) fueron propuestas por Keulegan para secciones trapezoidales rugosas.

$$U_c = 4.71 \sqrt{\Delta} D_{50}^{0.35} R_h^{0.15} \quad (2.63)$$

$$U^* = \sqrt{g R_h S} \quad (2.64)$$

$$\bar{U} = 5.57 \log \left(\frac{12.3 R_h}{k_s} \right) U^* \quad (2.65)$$

$$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \quad (2.66)$$

Donde:

- U_c = Velocidad media de la corriente (m/s)
- Δ = Relación del peso específico de los sólidos y el fluido.
- D_{50} = Diámetro 50 de la granulometría del suelo (m)
- R_h = Radio hidráulico (m)
- U^* = Velocidad media de la corriente (m/s)

- S = Pendiente del cauce
- \bar{U} = Velocidad media crítica (m/s)
- γ = Peso específico del agua o fluido (kg/m^3)
- γ_s = Peso específico de los sedimentos (kg/m^3)
- k_s = Tamaño de esfera, para partículas naturales $k_s = 2 * D_{50}$ (m)

Si se propone un radio hidráulico inicial y se calculan los valores hasta verificar que $U^* = \bar{U}$, entonces a partir del radio hidráulico propuesto es posible diseñar una sección trapezoidal, si no se conocen los pesos específicos del fluido y los sedimentos es válido usar un valor de $\Delta = 1.65$ (Pérez, et al., 2018).

2.3.3.7 Esfuerzo Cortante Efectivo

El esfuerzo que provoca la corriente es causado por la interacción entre el lecho del río y el flujo y está definido por las fuerzas hidrodinámicas, así como las fuerzas de fricción.

$$\tau_0 = \gamma_w R_h S' \quad (2.67)$$

Donde:

- τ_0 = Parámetro de Shields (Adimensional)
- S' = Esfuerzo Cortante Actuante en la Margen

Según Leutheusser (1970):

$$\tau_0 = 0.76 \gamma_w R_h S \quad (2.68)$$

2.3.3.8 Transporte de sedimentos

El estudio del transporte de sedimentos tiene un papel muy importante debido a la gran cantidad de problemas o estudios en la que es necesario cuantificarlo, algunas de las aplicaciones del estudio de transporte de sedimentos son las siguientes: Tiempos de llenado de azolve en presas,

estabilización y rectificación de cauces, tanques de sedimentación, diseño de canales sin arrastre, estudios de socavación y sedimentación en ríos.

Para su cuantificación se han desarrollado y propuesto una gran cantidad de métodos enfocados a obtener algún tipo de transporte antes mencionado. Los más complicados son aquellos que calculan el transporte total, sin embargo, no en todos los problemas reales es necesario cuantificar el transporte total.

$$g_T = g_L + g_B + g_{BS} \quad (2.69)$$

Dónde:

- g_T = *Transporte total* en (kg/s·m)
- g_L = *Transporte de Fondo* (kg/s·m)
- g_B = *Arrastre en la capa de fondo* (kg/s·m)
- g_{BS} = *Transporte de Fondo en Suspensión* (kg/s·m)

A continuación, se enuncian algunos de los métodos disponibles para poder estimar transporte total de fondo.

2.3.3.9 Método para evaluar el transporte de fondo.

Uno de los métodos más conocidos para evaluar el transporte de fondo es el método de Meyer, Peter & Müller (1948). El transporte de fondo se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$g_B = 8\gamma_S \sqrt{g\Delta D_m^3} \left[\left(\frac{n'}{n} \right)^{3/2} \tau_* - 0.047 \right]^{3/2} \quad (2.70)$$

Dónde:

- γ_S = Peso específico del material que conforma el cauce, en kg/m³,

- g = Aceleración de la gravedad (9.81), en m/s^2 ,
- Δ = Relación de los pesos específicos del material y el agua, es decir: $\Delta = (\gamma_s - \gamma)/\gamma$
- D_m = Diámetro medio del material del cauce (m),
- n = Coeficiente de rugosidad del cauce (adimensional),
- τ_* = Parámetro adimensional de Shields,
- n' = Rugosidad asociada a las partículas

Los valores de la rugosidad asociada a las partículas se obtienen de algunos de estos métodos:
De acuerdo con Meyer-Peter y Müller

$$n' = \frac{D_{90}^{1/6}}{26} \quad (2.71)$$

Según Strickler:

$$n' = \frac{D_{90}^{1/6}}{24} \quad (2.72)$$

Donde:

- D_{90} = Es el diámetro por debajo del cual queda el 90% del suelo en peso (m).

Los límites de aplicación de la formula son para D_m entre 0.4 y 30 mm. A manera de nota se aclara que las características del experimento para llegar a esa ecuación fueron las siguientes:

- La sección de canal empleada por los autores fue de 2 x 2 m,
- Longitud del canal de 20 m,
- Pendientes entre 0.04 y 0.2,
- Tirantes entre 1 cm y 1.20 m,
- Gastos entre 0.002 y 4 m^3/s ,
- γ_s entre 1.25 y 4.02 $Tonf/m^3$.

Para realizar la formula universal, los autores volvieron adimensional algunos parámetros, por lo que, se puede emplear para cualquier tipo de D_m y cualquier γ_s , aunque generalmente produce mejores resultados cuando se tienen cauces con material grueso.

2.7.1 Modelo de simulación numérica bidimensional Iber

La modelación numérica aplicada a la hidráulica se ha convertido en una herramienta fundamental para comprender y predecir la dinámica del flujo de agua. Esta disciplina combina principios de hidrodinámica, matemáticas y computación para simular el comportamiento del flujo del agua en cuerpos de agua como ríos, lagos, mares y sistemas de drenaje. Estos modelos numéricos son herramientas indispensables en el diseño y la gestión de infraestructura hidráulicas, evaluación de impactos ambientales, gestión de recursos hídricos y la mitigación de riesgos de inundaciones. Permitiendo a los ingenieros analizar complejas interacciones entre flujos de agua, estructuras y el medio natural, con lo que, se facilita la toma de decisiones basada en la simulación de escenarios de interés. Con los avances en la capacidad de cómputo y la disponibilidad de datos, la modelación numérica se ha convertido en un componente esencial en el campo de la hidráulica, proporcionando perspectivas más profundas y soluciones innovadoras a los retos contemporáneos en la gestión del agua.

Bajo este contexto el modelo de simulación numérica bidimensional Iber se presenta como una herramienta de cálculo matemático, enfocado en el modelamiento hidráulico del flujo de aguas someras a superficie libre en ríos y estuarios, abordando problemas hidrodinámicos, de turbulencia, transporte de sedimentos, procesos de calidad de agua y hábitat. La ventaja de este software es que, es de libre acceso y multilinguaje convirtiéndose en una opción factible para trabajar modelos bidimensionales de flujos.

Es importante destacar que se busca la mejora continua de los sistemas de cálculo en aguas someras. “La tendencia actual se decanta claramente hacia la metodología de volúmenes finitos, los cuales trabajan con mallas no estructuradas, aprovechando así los importantes desarrollos habidos en las últimas décadas con este tipo de esquemas para las ecuaciones de aguas someras” (Blade et al., 2014). Por lo anterior, se reconoce que el software Iber destaca en el desarrollo de

trabajos de investigación y además se precisa como necesaria su implementación en diversas circunstancias de la ingeniería civil, algunas de las aportaciones que este programa hace son las siguientes:

- Simular el flujo en lámina libre en cauces naturales,
- Análisis de zonas de inundación,
- Cálculos hidrodinámicos para encauzamientos,
- Cálculos de redes de canales,
- Análisis de sedimentos (erosión, estabilidad, transporte de material),
- Estudios hidrológicos,
- Análisis de ríos con estructuras internas (compuertas y vertederos)

A continuación, se describen algunos de los módulos que integran el modelo Iber y que son de especial interés en el desarrollo de este estudio.

2.7.1.1 Módulo hidrodinámico

Este módulo trabaja con las ecuaciones Saint-Venant, las cuales describen el comportamiento de un fluido en aguas de poca profundidad. “Se asume una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad y de la presión hidrostática, siendo esta última la que se cumple de manera razonable en ríos y estuarios, mientras que para la velocidad no siempre se cumplen esta hipótesis ya que hay zonas en donde no se cumple debido a flujos locales tridimensionales o a cuñas salinas” (Blade et al., 2014).

Para el caso de Iber la respuesta hidrodinámica viene dada por la resolución de las ecuaciones de St-Venant a través del método de volúmenes finitos (Rincón et al., 2017), resolviéndose forma conjunta las ecuaciones de conservación de masa y de Momentum.

Ecuación de conservación de masa (Blade et al., 2014).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} = M_s \quad (2.73)$$

Ecuación de Momentum en las direcciones horizontales (Blade et al., 2014).

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - gh \frac{\partial h}{\partial x} + 2\Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x \quad (2.74)$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - gh \frac{\partial h}{\partial y} + 2\Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y \quad (2.75)$$

Dónde:

- h = Tirante (m),
- U_x, U_y = Velocidades Promediadas en profundidad (m/s),
- g = Aceleración de la gravedad (m/s^2),
- Z_b = Elevación del Fondo (m),
- τ_s = Fricción en la superficie libre debida al rozamiento por el viento
- τ_b = Fricción en la superficie libre debida al rozamiento de fondo
- ρ = Densidad del Agua (kg/m^3)
- λ = Latitud del punto considerado
- Ω = Velocidad Angular de rotación de la tierra (rad/s)
- $\tau_{xy}^e, \tau_{xx}^e, \tau_{yy}^e$ = Tensiones Tangenciales Efectivas Horizontales (kg/m^2)
- M_s, M_x, M_y = Términos fuente de masa y momentum (kg/m^2)

2.7.1.2 Condiciones de Contorno Hidrodinámicas

Las condiciones de contorno se definen como el conjunto de condiciones que debe satisfacer la solución de una ecuación diferencial en el contorno (incluyendo el contorno del fluido) de la región en la que se busca dicha solución. Para el caso de la dinámica de fluidos son el conjunto de restricciones de los problemas de valor límite en la dinámica de fluidos computacional.

a) Contornos Cerrados

Siempre es necesario distinguir los tipos de contornos que se pueden establecer en los problemas bidimensionales, estos son dos tipos de contorno: cerrados y abiertos. Estos últimos conocidos también como los contornos de pared los cuales poseen la característica de ser impermeables, entendiéndose como el tipo de contorno que no deja pasar agua a través de él.

Este tipo de contornos al ser impermeables tienen la capacidad de generar un efecto de rozadura entre él y el fluido con el que este en contacto, por ello se pueden imponer las siguientes condiciones para este tipo de contorno (Blade et al., 2014):

- Condición de deslizamiento libre
- Condición de fricción de pared

La primera condición marca que se puede despreciar la tensión de rozamiento generada sobre el fluido. En el estudio de la ingeniería fluvial y de la hidráulica de ríos, se tiene en cuenta que la superficie de contacto con un contorno lateral es menor que la superficie de contacto con el fondo, razón por la cual es posible despreciar esta fricción.

Sin embargo, existen algunas condiciones donde se presenten similitudes entre las dimensiones horizontales y verticales (magnitudes casi iguales) la fuerza de rozamiento cobra importancia, por lo que, es posible establecer la segunda condición que consiste en imponer una fuerza tangencial en dirección opuesta al flujo en el contorno.

b) Contornos Abiertos

En este tipo de contornos se pueden establecer condiciones diferentes, pero esto depende si el contorno es de salida o de entrada de flujo, así como del régimen del propio contorno si este es rápido o lento (crítico/supercrítico o subcrítico).

En un contorno de entrada es importante imponer tres condiciones de contorno si el régimen es de carácter supercrítico, pero si el régimen es subcrítico solamente se estarían colocando dos condiciones. Para un contorno de salida de igual manera depende de la condición del régimen, si este es subcrítico es suficiente con colocar una sola condición, mientras que si es supercrítico no se necesita colocar ninguna condición. Para entender mejor esta clasificación de condiciones Blade et al., (2014) sugiere emplear la Tabla 2.8 evaluando la condición que se tenga para considerar las condiciones a usar.

2.7.1.3 Módulo de Turbulencia

Para estudios de ingeniería de ríos e hidráulica se consideran que prácticamente todos los flujos son turbulentos cuando están en lamina libre. Esto de cierta forma es cierto ya que se pueden apreciar en algunas partes de ríos como se forman irregularidades en el flujo como son los remolinos. La palabra caótico es un buen adjetivo para describir el comportamiento del flujo en ese estado. La importancia de este tipo de flujos se debe a que son los encargados de los procedimientos de mezclas, algunos ejemplos de estos procedimientos son los sólidos en suspensión y la propagación de sustancias solubles (Blade et al., 2014).

A pesar de lo anterior, es posible encontrarse con flujos en donde el comportamiento turbulento no llegue a tener un alto impacto en cuanto a cuestiones de velocidad, parámetro donde se puede apreciar el impacto de la turbulencia. Ejemplo de estos casos son los estuarios y en algunas zonas costeras, pero a pesar de ello no se debe descartar, emplear una modelización adecuada de la turbulencia.

El programa Iber incluye dentro de sus análisis las siguientes opciones para el modelado de la turbulencia en aguas someras:

- **Viscosidad turbulenta constante.** Se calcula mediante modelos de turbulencia específicos para las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad y su valor es constante.

- **Modelo parabólico.** Modelo en el cual se calcula la viscosidad turbulenta apoyados de la velocidad de fricción de fondo.
- **Modelo de longitud de mezcla.** Modelo donde la viscosidad turbulenta se calcula mediante el apoyo de la constante de von Karman y la distancia desde el punto considerado a la pared más cercana
- **Modelo $k-\varepsilon$ de Rastogi y Rodi.** Modelo de resolución de ecuación de transporte de sedimentos

Tabla 2.8 Condiciones de acuerdo con el tipo de contorno y régimen (Blade et al., 2014).

Contorno	Régimen		Condiciones impuestas
Entrada	Caudal total	Subcrítico/Crítico	Caudal total en dirección normal al contorno
		Supercrítico	Caudal total en dirección normal al contorno y velocidad media
	Caudal específico	Subcrítico/Crítico	Caudal específico en dirección normal al contorno
		Supercrítico	a) Caudal específico en dirección normal al contorno y calado b) Caudal específico en dirección normal al contorno y cota de agua
Salida	Subcrítico		a) Tirante b) Cota de agua c) Vertedero (Cota y coeficiente de descarga) d) Curva gasto
	Supercrítico/ Crítico		No es necesario imponer una condición

2.7.1.4 Modelo $k-\varepsilon$ de Rastogi y Rodi

Este modelo resuelve una ecuación de transporte para tasa de disipación de energía turbulenta ε y también para la energía cinética turbulenta k (Blade et al., 2014). Este modelo tiene en cuenta lo siguiente:

- La producción debido al rozamiento de fondo,

- La producción por gradientes de velocidad,
- Transporte convectivo y disipación.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial U_x k}{\partial x} + \frac{\partial U_y k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_k \frac{u_f^3}{h} - \varepsilon \quad (2.76)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_x \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial U_y \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_\varepsilon \frac{u_f^4}{h^2} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^3}{k} \quad (2.77)$$

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.78)$$

$$c_k = c_f^{-1/2} \quad (2.79)$$

$$c_\varepsilon = 3.6 c_k^{3/2} c_{\varepsilon 2} c_\mu^{1/2} \quad (2.80)$$

$$c_f = \frac{\tau_b}{\rho} \frac{1}{|U|^2} \quad (2.81)$$

Con las constantes:

$$c_\mu = 0.09 \quad (2.82)$$

$$c_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad (2.83)$$

$$c_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad (2.84)$$

$$\sigma_k = 1.0 \quad (2.85)$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.31 \quad (2.86)$$

Donde:

- k es la energía cinética turbulenta
- ε es la tasa de disipación de turbulencia
- S_{ij} es el tensor de deformación
- u_f es la velocidad de fricción de fondo

2.7.1.5 Módulo de Transporte de Sedimentos

Este módulo resuelve ecuaciones de transporte de sedimentos no-cohesivos en un régimen no estacionario. Se resuelven las ecuaciones de transporte de fondo y transporte en suspensión, que a su vez se modela el acoplamiento entre la carga de fondo y la carga en suspensión mediante un término de sedimentación/resuspensión (Blade et al., 2014). Además, este módulo se ayuda de otras opciones y características del programa para poder calcular el transporte de sedimentos como son: el campo de velocidades, turbulencia y tirantes. Para calcular el caudal sólido de fondo se emplean ecuaciones empíricas como la ecuación de Peter y Müller y la de Van Rijn. La Figura 2.11 representa el esquema del transporte sólido no-estacionario.

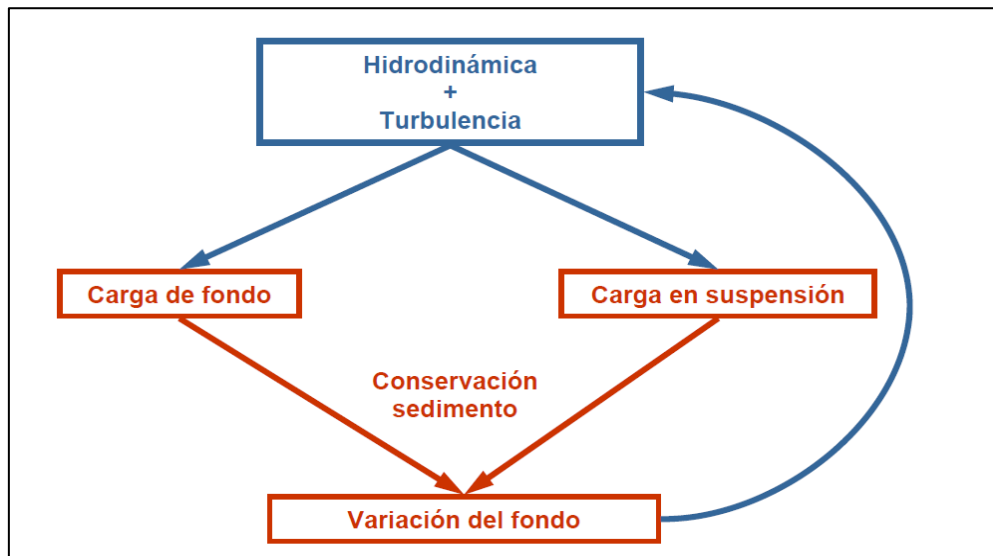


Figura 2.11 Esquema del módulo de transporte sólido-no estacionario en Iber (Blade et al.,2014).

2.4.2 Sistemas de información geográfica SIG

Un sistema de información geográfica (SIG) se puede definir como el conjunto de software y hardware que permite a los usuarios crear consultas interactivas, integrar, analizar y representar de una forma eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada asociada a un territorio. El uso de este tipo de sistemas facilita la visualización de los datos obtenidos en un mapa, con el fin de reflejar y relacionar fenómenos geográficos de cualquier tipo, desde mapas de carreteras, ríos, cuerpos de agua, identificación de zonas agrícolas, silvestres, bosques etc.

Un concepto más acertado y fácil de comprender de un SIG es el siguiente: “Conjunto integrado de medios y métodos informáticos, capaz de recoger, verificar, almacenar, gestionar, actualizar, manipular, recuperar, transformar, analizar, mostrar y transferir datos espacialmente referidos a la Tierra, sea cual sea el caso, se compone de datos, hardware, software, recursos humanos y un esquema organizativo” (Servicio Geológico Mexicano. SGM).

Su funcionamiento se basa en la representación de datos geográficos (datos alfanuméricos) asociados a los objetos existentes en un mapa digital y dan respuesta a las consultas interactivas de los usuarios, analizando y relacionando diferentes tipos de información con una sola localización geográfica. De esta forma señalando un objeto se conocen sus atributos, e inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

Los SIG son el método más utilizado para la creación de datos digitales, donde a partir de un mapa impreso o con información tomada en campo, se transfiere a un medio digital por el empleo de un programa de Diseño Asistido por Ordenador (DAO o CAD) con capacidades de georreferenciación. Una de sus mayores ventajas es que el sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, facilitando la posibilidad de relacionar la información existente para la obtención de resultados. La Figura 2.12 muestra la representación de la información mediante los SIG.

Los datos SIG representan los objetos del mundo real (carreteras, usos del suelo, altitudes). En función de la forma de representar el espacio, hay dos formas de almacenar los datos en un SIG: formato tipo ráster y formato tipo vectorial, la diferencia de ello son formas intuitivas y versátiles de ilustrar el espacio y ayudan a comprender mejor los elementos objeto del estudio según su naturaleza.

La mayoría de los elementos que existen en la naturaleza se pueden representar mediante formas geométricas (puntos, líneas o polígonos), esto es, de forma vectorial o, mediante matrices, es

decir, de forma ráster. La elección de un modelo u otro dependerá del tipo de información que se quiere representar, por un lado, el formato ráster es mejor para la representación de datos continuos y un formato vectorial para datos discretos. Por lo tanto, si las propiedades topológicas son importantes para el análisis, el modelo de datos vectorial suele ser la mejor opción, aunque esto puede ralentizar el proceso de análisis. Sin embargo, si el análisis no requiere acudir a las propiedades topológicas, es mucho más rápido, sencillo y eficaz el uso del formato ráster.

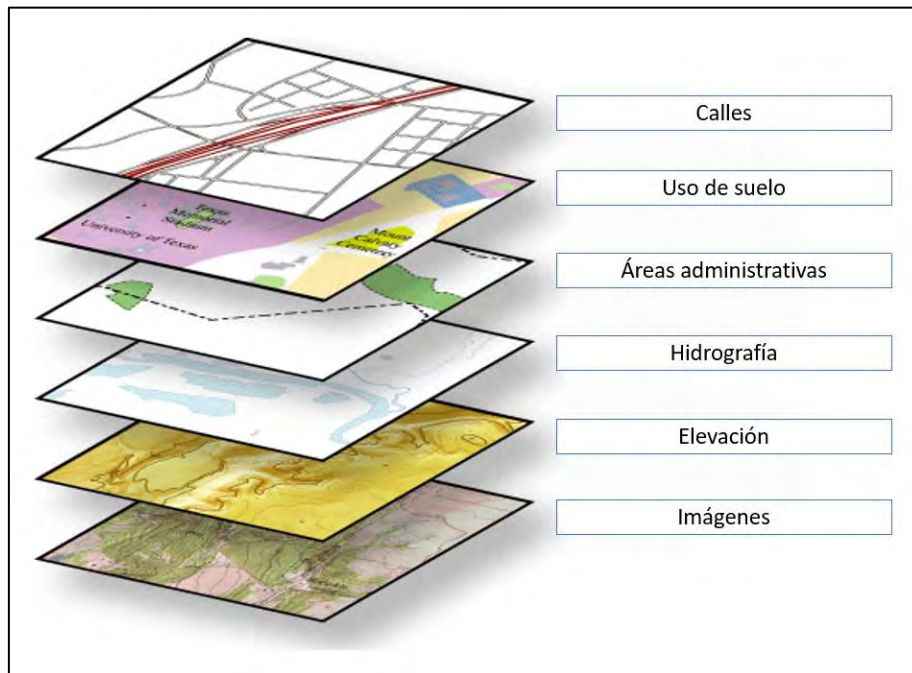


Figura 2.12 Estructura de imágenes en un SIG (Extraído de ArcGIS Resources,2023).

Algunas facilidades que se cuentan al trabajar con los SIG son:

- Extracción rápida de información
- Reducción de esfuerzo en la recolección de información
- Mejoras en la actualización de datos, precisión y coherencia
- Promueve la cultura del trabajo en equipo
- Mapas más organizados

Para propósitos de este trabajo el uso de las herramientas SIG permitirán definir las elevaciones de la zona de estudio ayudando a modelar la zona del cauce, además de incluir información

valiosa como son los usos de suelo presentes en el área y la identificación de estaciones hidrométricas.

2.8 Zona de estudio

En este apartado se muestra una descripción de la zona donde se presenta la problemática del trabajo de investigación, además de que se menciona la situación presentada en el puente Maxixapa, debido a que en 2003 se encontraron daños en los cimientos generados por la socavación local. Se atribuye que las condiciones hidrológicas y del lugar favorecieron el surgimiento de problemas estructurales en la zona del puente. Para ello, es necesario exponer información relevante en temas de hidrología, geografía, topografía, climatología y edafológica.

2.5.1 Problemática en la Zona

El río “Saltillito” se caracteriza por presentar diversas problemáticas a lo largo de su recorrido tales como: socavación local y general, obras de protección deterioradas, inestabilidad en los taludes que componen las márgenes y desbordamientos cuando ocurren lluvias intensas. Lo anterior, se debe al desequilibrio en los parámetros que gobiernan su comportamiento hidrodinámico y sedimentológico.

De acuerdo con la información presentada en la manifestación de impacto ambiental por GECCSA INGENIERIA S.A. DE C.V. (2003), a finales del año 2001 en el río “Saltillito” se generaron crecientes que ocasionaron daños en el puente Maxixapa. Entre los daños se pueden mencionar la destrucción de las protecciones en los márgenes del río y los conos de derrame en la zona de cruce. Lo más importante que se detectó fue la socavación local en la pila central.

Esta última situación permitió detectar daños ocultos en las pilas que constituyen el soporte del puente. Los daños se ubican en zonas de concreto contaminado por el suelo y/o bentonita empleada durante el proceso constructivo de este, se encontró que la cimentación del puente estaba prácticamente expuesta dejando a la vista los efectos de la socavación local (Figura 2.13). Estas condiciones reducen de manera importante la resistencia del puente y deterioran la vida

útil de la obra y el servicio de esta, además de verse altamente comprometida la estabilidad de la estructura.



Figura 2.13 *Cimentación del puente Maxixapa expuesta debido al fenómeno de socavación local (Martínez, 2017).*

2.8.2 Ubicación Geográfica

De acuerdo con Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2014), en el estudio “Disponibilidad de agua de la región 23 de la costa de Chiapas” se menciona que la costa de Chiapas se subdivide en 4 subregiones contando con 23 ríos principales (INEGI), las subdivisiones son las siguientes (Figura 2.14):

- Laguna de mar muerto
- Río Pijijiapan y otros
- Río Huixtla y otros
- Río Suchiate y otros

Por otro lado, comparando con el informe de GECCSA INGENIERIA S.A. DE C.V. (2003), se verifica que la cuenca del río Despoblado se encuentra ubicada en el estado de Chiapas en la subregión hidrológica costa de Chiapas y en la Región Hidrológico-Administrativa (RHA) XI Frontera Sur, la cual es perteneciente a la subregión del río Huixtla y otros.



Figura 2.14 Cuencas Hidrológicas de la Costa de Chiapas (CONAGUA, 2014).

La subcuenca se localiza en el límite de la Sierra Madre y la Llanura Costera del Pacífico, la cual se encuentra contenida principalmente en el municipio de Villa Comaltitlán y en menor porción en Huixtla, Escuintla y Motozintla (Figura 2.15).

En cuanto al puente a tratar se tiene la siguiente información (GECCSA, 2003): coordenadas geográficas 15° 12' 34.17'' N y 92° 33' 46.89'' O (UTM Zona 15), la altitud es de 35 metros y su extensión territorial corresponde a un 1.12% de la superficie estatal.

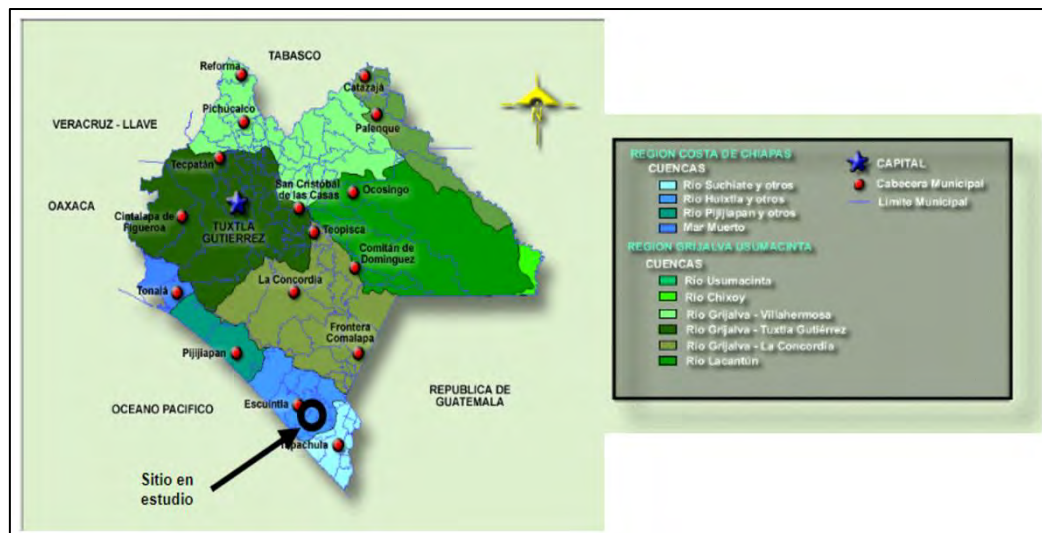


Figura 2.15 Cuencas y Subcuencas del Estado de Chiapas (GECCSA INGENIERIA S.A. DE C.D., 2003)

Al pie de la región montañosa afloran unidades de retrabajo que pueden incluir depósitos de diferentes tipos de flujos, productos de erosión, etc. En el centro del municipio abundan depósitos Cuaternarios de aluvión, cubriendo las unidades anteriores. Los depósitos de aluvión están formados por sedimentos depositados por los ríos en áreas planas, como son los valles y las planicies costeras. Más al sur del municipio de Villa Comaltitlán afloran depósitos lacustres que se componen de sedimentos que se forman en zonas de inundación.

El municipio abarca parte de la Reserva de la Biosfera La Encrucijada. Constituido geológicamente por terrenos cuaternarios, predominando los tipos de suelos de cambisol, acrisol y solonchak, el uso principal del suelo es agrícola pecuario y selva, correspondiendo el 20% del territorio municipal a terrenos ejidales y el resto son terrenos nacionales y privadas.

Los depósitos Cuaternarios de palustre cerca de la costa Pacífica se forman en zonas de manglares y consisten en sedimentos finos con un alto contenido de materia orgánica (zonas pantanosas). Además, los sedimentos litorales (Cuaternario) ocurren en el contacto del medio marino y el terrestre.

En la Tabla 2.9 se resume la información de los tipos de roca presentes en el municipio de Villa Comaltitlán y su porcentaje correspondiente de acuerdo con el periodo al que refiere:

Tabla 2.9 *Tipos de rocas existentes en el municipio de Villa Comaltitlán (INEGI, 2010).*

Periodo	Cuaternario (72.46%) y No aplicable (26.56%)
Roca	Ígnea intrusiva: Granito (26.56%) Sedimentaria: Conglomerado (0.03%) Suelo: Aluvial (38.02%), lacustre (30.47%), litoral (3.95%) y palustre (0.15%)

La mayor parte del municipio de Villa Comaltitlán se encuentra en la zona de transición entre la Sierra Madre del Sur de Chiapas y la planicie costera del pacífico; esta configuración geológica morfológica da lugar a una diversidad de paisajes, así como de unidades geomorfológicas. Dentro del municipio de localizaron tres unidades geomorfológicas al norte lomeríos endógeno modelado con alturas que oscilan entre los 200 y 700 metros, seguidos de colina exógena acumulativa y al sur (zona que cubre la mayor extensión territorial) se localizan

planicies sub-horizontales endógeno acumulativas. Cabe señalar que en esta zona de planicie se ubica la cabecera municipal del municipio, y que por la cercanía de la subcuenca Huixtla comparten muchas características (Figura 2.17).



Figura 2.17 Geología de Chiapas (Modificada de GECCSA INGENIERIA S.A. DE C.V. (2003).

2.8.5 Fisiografía

La cuenca de la Costa de Chiapas se localiza en la parte sureste de México, donde se extiende desde el nacimiento en el país vecino de Guatemala, el río Suchiate y Coatán. El 90% de la superficie de la cuenca se localiza en territorio del estado de Chiapas, integrada por los municipios de Arriaga, Tonalá, Pijijiapan, Mapastepec, Acacoyagua, Acapetahua, Escuintla, Villa Comaltitlán, Motozintla, Huixtla, Tuzantán, Huehuetán, Mazatán, Tapachula, Cocolhoatán, Unión Juárez, Tuxtla Chico, Metapa, Frontera Hidalgo y Suchiate, incluyéndose a 2 municipios del estado de Oaxaca, Chahuities y San Pedro (Figura 2.18).

La extensión territorial en el estado de Chiapas contempla las Regiones Económicas IX Istmo - Costa y X Soconusco, que forman parte de las regiones fisiográficas Llanura Costera del Pacífico y Sierra Madre de Chiapas.

De igual manera GECCSA INGENIERIA S.A. DE C.V. (2003) presenta la fisiografía del estado de Chiapas mediante la Figura 2.18.

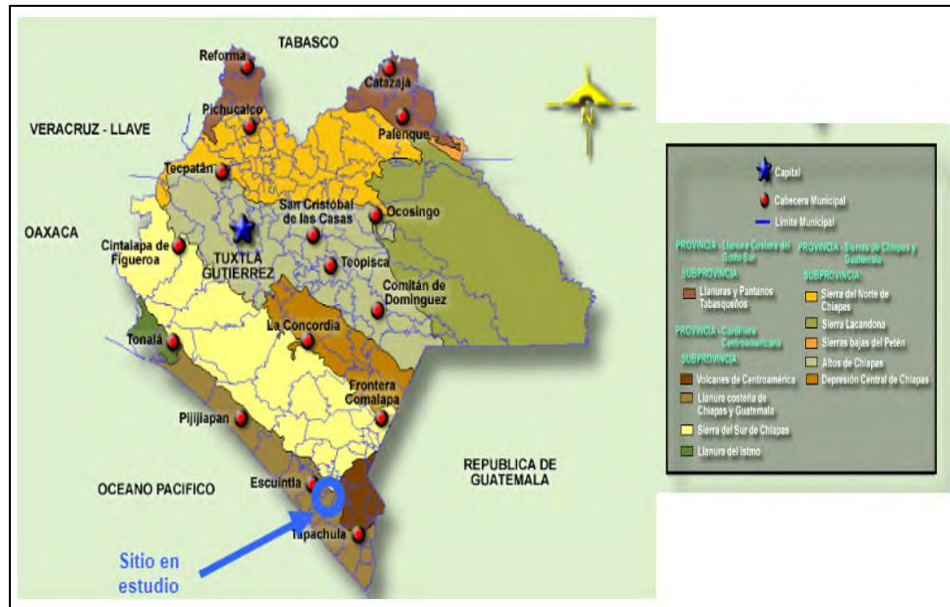


Figura 2.18 Fisiografía de Chiapas (Modificada de GECCSA INGENIERIA S.A. DE C.V. (2003).

2.8.6 Actividades Económicas

El uso potencial de la tierra es la agricultura mecanizada continua (39.08%), la agricultura de tracción animal continua (2.54%), y la agricultura manual continua (0.01%)

Las actividades económicas y sociales del área de estudio se basan principalmente en agrícolas, ganaderas, pesca y ahora por la fuerza de la mano de obra, se suma la minería, aunque no existe una industria dominante, ni una zona turística, lo que limita mucho el desarrollo económico. En materia agrícola las principales fuentes de ingresos están presentadas en la tabla 2.10 de acuerdo con la cuenca alta, media y baja.

Tabla 2.10 *Actividades de la zona (INEGI, 2010).*

Cuenca Alta	Cuenca Media	Cuenca Baja
Cultivo de café y maíz	Café, maíz y cacao (de baja calidad)	Maíz, caña de azúcar, sorgo, ajonjolí, cacao, sandía, mango, palma de aceite y palma de coco.

2.8.7 Clima y Vegetación

El clima en Villa Comaltitlán varía según la altitud de cálido húmedo a semicálido húmedo, con una temperatura media anual de 27 °C y una precipitación pluvial de 3638 milímetros anuales (Figura 2.19). Su vegetación es de selva mediana, la cual está compuesta por una gran variedad de especies como flor de concha, flor de venado, galán de noche, coyol, cucunuch, guanacaste, guapinol, morro, palo mulato, quebracho, botoncillo, mangle blanco y mangle colorado, además de contar con grandes cultivos de caña de azúcar, ubicándose la mayor parte de ella en la parte baja del municipio.

El municipio de Huixtla cuenta con una gran variedad de animales, los cuales se encuentran a lo largo y ancho del municipio por ejemplo: Venado, jabalí, faisán, pavón, boa, cantil, iguana de ribera, tortuga crucilla, chachalaca copetona, garcita verde, loro, espátula, gaviota, golondrina, pelícano, tecolotito manglero, mapache, murciélago, jaguar, puerco espín, tepescuincle, urraca, liebre. También, es posible encontrar animales como tortugas de río, cotorras y diversos animales de vida acuática como la mojarra tilapia.



Figura 2.19 *Clima del estado de Chiapas (Modificada de GECCSA INGENIERIA S.A. DE C.V. (2003).*

2.8.8 Uso de Suelo

Uno de los factores más importantes en el estudio de cualquier medio físico resulta sin duda la interacción del ambiente ante situaciones de origen antropogénico, es por ello, que para evaluar este parámetro el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Instituto Interamericano de tecnología y Ciencias del Agua de la Universidad Autónoma del Estado de México, ofrecen distribuciones de los usos de suelos predominantes para cada región. La región de la cuenca del puente “Maxixapa” se presenta en la Figura 2.20.

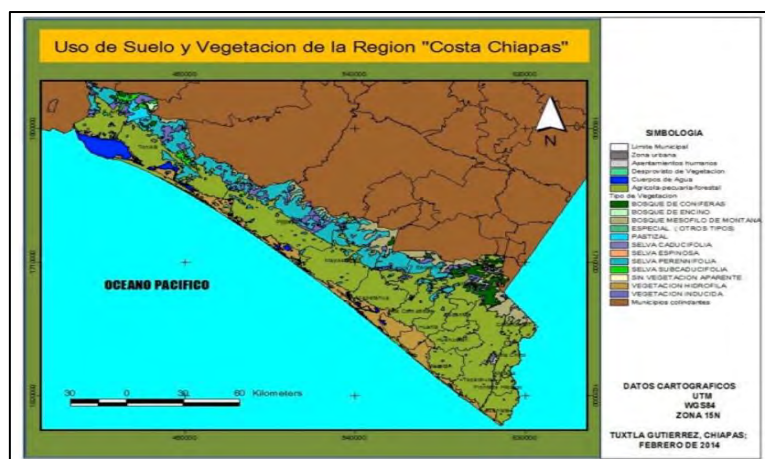


Figura 2.20 Usos de suelo y Vegetación en la costa de Chiapas (CONAGUA, 2014).

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se detallan los métodos empleados en el desarrollo de esta investigación, asimismo ofrece la descripción de cada una de las actividades llevadas a cabo. El trabajo se divide en cuatro etapas secuenciales. Etapa 1: Búsqueda de información; Etapa 2: Estudio hidrológico de la cuenca; Etapa 3: Simulación con Iber y Etapa 4: Análisis de resultados, de esta manera se alcanza el objetivo planteado y los alcances fijados en el proyecto.

En la Figura 3.1 se muestran las etapas que se abordaron durante el desarrollo de la presente investigación, las cuales en los siguientes apartados se describen a detalle.

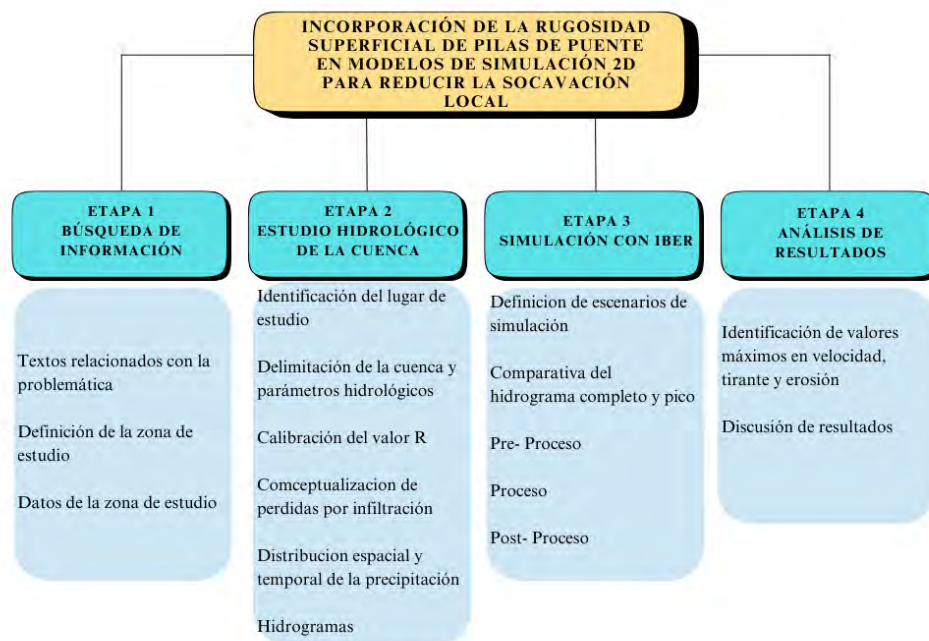


Figura 3.1 *Etapas desarrolladas en el presente trabajo de investigación.*

3.1 Etapa 1: Búsqueda de Información

Esta etapa consistió en la obtención de información relacionada con el tema de investigación, para ello, se recurrieron a artículos de revistas, tesis, congresos y libros. La información recolectada permitió abordar tareas relacionadas con las siguientes etapas como fue: la elaboración del análisis hidrológico del sitio, la creación de modelos y escenarios de simulación en Iber.

3.1.1 Textos relacionados con la problemática.

Como primera etapa se revisaron artículos y trabajos de investigación relacionados con esta problemática, abordando inicialmente el trabajo de Cusba (2011) y Martínez (2007), donde muestran evidencia de la problemática y consecuencias de la socavación en puentes vehiculares en México y otras partes del mundo.

Se prestó especial atención a trabajos que consideran los efectos de la erosión, la socavación y sus posibles soluciones. Se examinaron los estudios de IMTA (2017), Hidalgo (2016), Diaz (2016), destacando los resultados de la investigación de Álvarez (2022) donde, para pilas con diferentes acabados superficiales, determina un coeficiente rugosidad superficial equivalente. Para este trabajo se seleccionaron dos acabados superficiales el acabado “Casquete Esférico” y el acabado “Casquete Hexagonal”.

Para evaluar el efecto del acabado superficial en la reducción de la profundidad de socavación, se realizó la comparación con el acabado liso por ser este el que tradicionalmente se usa en la mayoría de las pilas de puente construidas en cauces. Para caracterizar los acabados superficiales se emplearon tres variables geométricas de los casquetes asociadas al diámetro (α), profundidad (β) y separación entre casquetes (ϕ), tal como se muestran en la Figura 3.2. Para cada uno de los acabados estas relaciones geométricas permiten establecer un valor de rugosidad equivalente “ n ” y donde dicho valor se incorpora en el modelo de simulación según lo descrito en la Tabla 3.1.

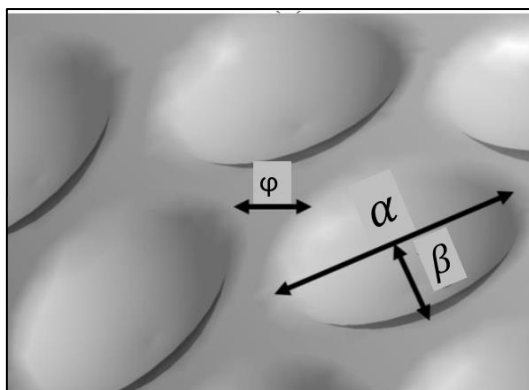


Figura 3.2 *Parámetros geométricos de los acabados superficiales (Modificado de Álvarez, 2022).*

Tabla 3.1 Valores de rugosidad equivalente superficial para los diferentes acabados.

Acabado	Valor “n”
Liso	0.011
Casquete Hexagonal	0.0329
Casquete Esférico	0.03

Para complementar la información, se revisaron los conceptos teóricos de Aparicio (1992) relacionados a la hidrología en estudios de investigación, esto con la finalidad de determinar las características y parámetros hidrológicos de la cuenca mediante un estudio hidrológico.

3.1.2 Definición de la zona de estudio

Una vez recopilada la información relacionada al tema se eligió el caso de estudio, para ello se realizó una comparativa y valoración de la información recopilada entre dos propuestas que son el puente Congreso-San Nicolas y el puente Maxixapa (Figura 3.3), donde al contar con más información del puente Maxixapa relacionadas con las condiciones del puente y características hidráulicas, se seleccionó este como caso de estudio. Una vez seleccionado el caso, se realizó el estudio hidrológico, el análisis hidrodinámico de cauce y de socavación para diferentes periodos de retorno. Para llevar a cabo un correcto análisis de información se toma como punto de partida el proyecto realizado en dicha zona sobre la manifestación de impacto ambiental realizada por GECCSA INGENIERIA S.A. DE C.V. (2003).

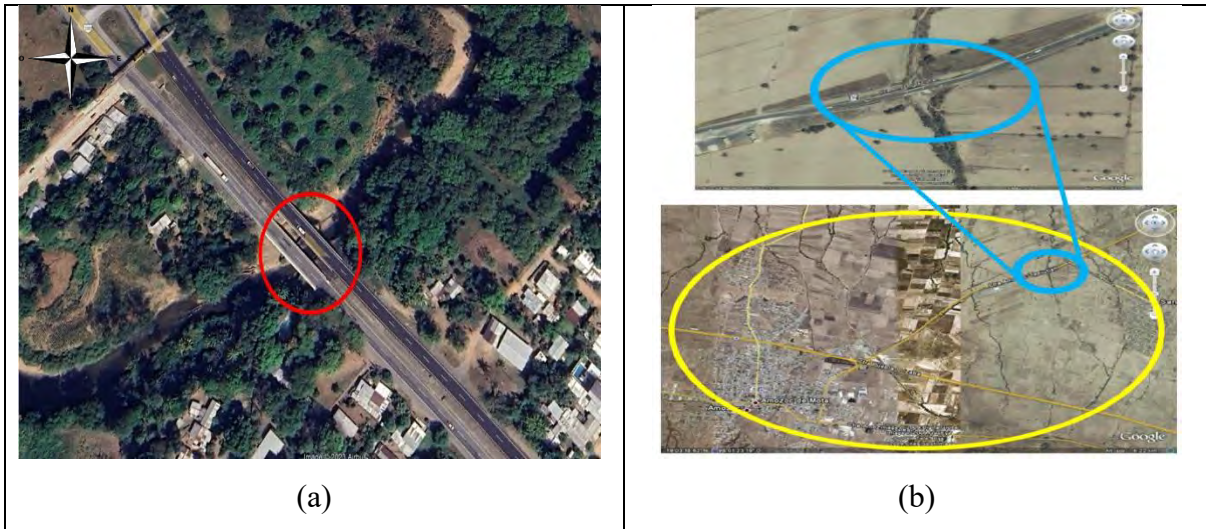


Figura 3.3 Propuestas de puentes a estudiar; a) Puente Maxixapa y b) Puente Congreso San Nicolás

Para corroborar la información del estudio, se identificó en Google Earth el río en su totalidad junto con el puente descrito en el estudio, todo ello con la finalidad de definir de forma más clara la zona de interés. El puente Maxixapa está ubicado sobre la autopista federal No. 200, C.D. Arriaga-Huixtla en el kilometraje 235+700 cruzando el río “Saltillito” en el estado de Chiapas. Se considero como dominio de simulación 450 m aguas arriba y 530 m aguas abajo ya que, con estas distancias se alcanza el desarrollo del flujo, por lo que, las condiciones de contorno impuestas al inicio y final del tramo de análisis pierden influencia directa sobre las condiciones hidrodinámicas en la zona del puente.

Del estudio de la manifestación de impacto ambiental se obtuvieron las secciones del río en la zona de pilas, aguas abajo, aguas arriba y la zona de puente. Esta información permitió realizar el diseño hidráulico de las secciones a lo largo del cauce, la Figura 3.4 muestra el tramo de estudio.

3.1.3 Datos de la zona de estudio

Derivado del análisis de información, los datos requeridos para el desarrollo del proyecto se obtuvieron de la manifestación de impacto ambiental hecha por GECCSA INGENIERIA S.A.

DE C.V. (2003). En la Figura 3.5 se muestra la sección transversal del río en la zona del puente, y en la Tabla 3.2 se muestran un resumen de la información relacionada con el caso de estudio.



Figura 3.4 Tramo del río y ubicación del puente en estudio.

Tabla 3.2 Datos del estudio GECCSA INGENIERIA S.A. DE C.V. (2003).

Datos	Valor
Gasto de diseño (Tr =100 años)	102.8 m ³ /s
Nivel de Aguas de Construcción (NAC)	25.193 m
Nivel de Aguas de Diseño (NADI)	28.433 m
Distancia Secciones Levantadas Aguas Arriba	61.78 m
Distancia Secciones Levantadas Aguas Abajo	90.65 m
Socavación General (Lischtvan-Levediev)	3.84 m
Socavación Local (Yaroslavtziev)	1.63 m
Diámetro de la pila	1.60 m

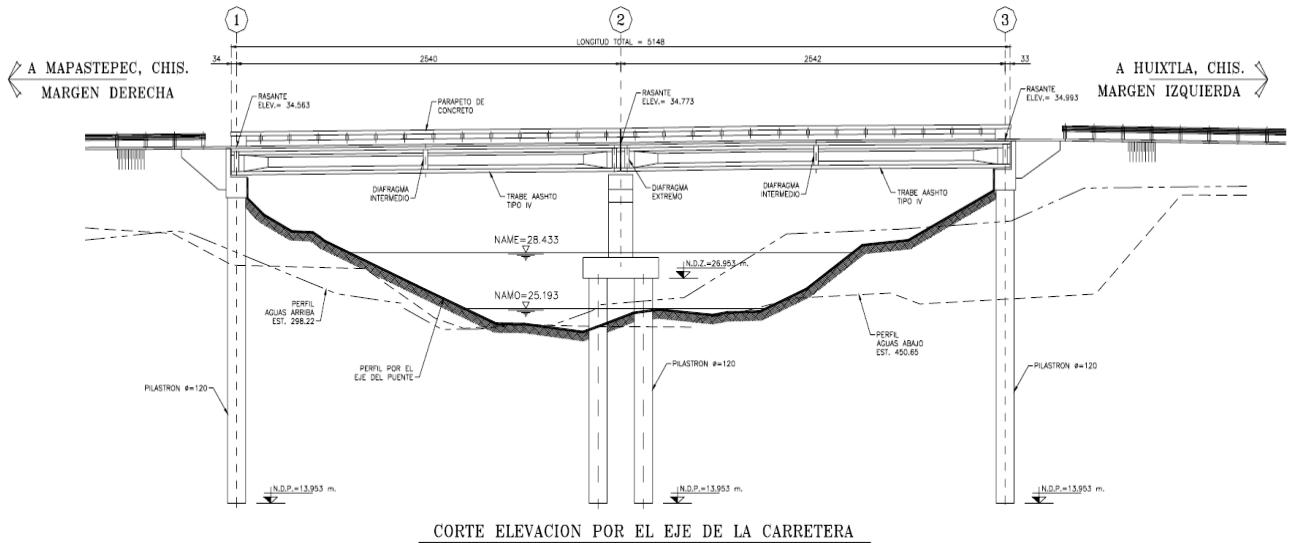


Figura 3.5 Corte transversal del puente Maxixapa.

3.2 Etapa 2: Estudio hidrológico de la cuenca

Durante esta etapa, se recurrió a las bases de datos de instituciones clave como el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). El acceso a estas fuentes resultó esencial, ya que proporcionaron datos detallados y actualizados lo cuales fueron fundamentales para la realización del estudio hidrológico de la zona de estudio. Entre la información recabada, destacan datos sobre usos de suelo, registros históricos de precipitación y modelos digitales de elevación. A continuación, se detallan cada uno de los aspectos abordados durante la elaboración del estudio hidrológico.

3.2.1 Identificación del lugar de estudio

Para obtener una comprensión integral de las condiciones del sitio de estudio, fue esencial realizar una delimitación precisa de la zona de análisis. En este contexto, se utilizó Google Earth como herramienta clave para identificar con exactitud la ubicación del puente Maxixapa, elemento referencial importante en el estudio (ver Figura 3.6). A través de esta plataforma, se logró determinar las coordenadas geográficas específicas del sitio, utilizando el sistema de coordenadas UTM. Es importante resaltar que, la ubicación del puente Maxixapa identificada

previamente, se considera como el exutorio de la cuenca. Esta característica es fundamental, ya que permite delimitar la cuenca de interés y estimar el caudal que fluye a través del cauce en estudio. La comprensión de este aspecto es vital para la evaluación hidrológica del área, ya que aporta información clave sobre el comportamiento del agua en la cuenca y su impacto en la infraestructura y el entorno.

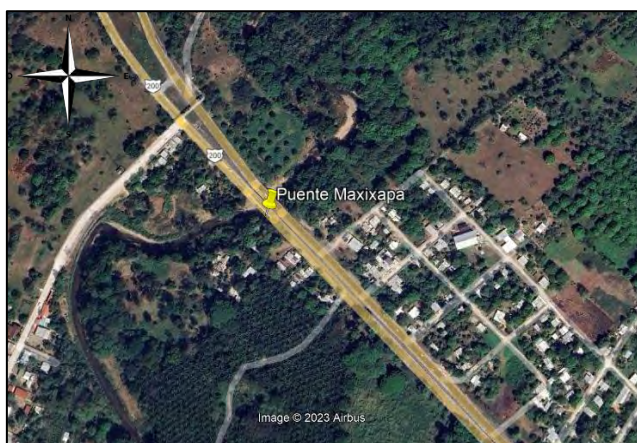


Figura 3.6 *Ubicación del puente Maxixapa*

3.2.2 Delimitación de la cuenca y parámetros hidrológicos

Una vez identificado plenamente el puente Maxixapa, a través del INEGI se obtuvieron cartas topográficas y modelos digitales de elevación con una resolución de 15 x 15 m por píxel para la extensión completa de la zona circundante.

Con la información recabada y con ayuda del software ArcGIS versión 10.8, se llevó a cabo la delimitación precisa de la cuenca (Figura 3.7). Este proceso permitió estimar los parámetros hidrológicos clave, tal como se detalla en la metodología del estudio. Entre estos parámetros, los más significativos incluyen el área, el perímetro, el tiempo de concentración y la pendiente de la cuenca. Resaltado que el uso de los SIG es fundamental para determinar las características hidrológicas del área en estudio.

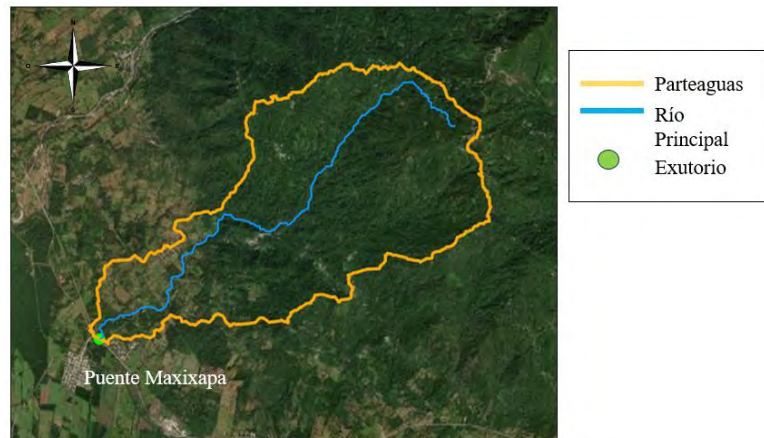


Figura 3.7 Cuenca de aporte delimitada utilizando un SIG

Con la delimitación de la cuenca ya establecida, se consultó nuevamente el portal INEGI donde se identificaron los diferentes usos de suelo presentes en el área de estudio, así como sus características específicas que permiten asimilar el potencial de infiltración y la escorrentía superficial que puede generarse. Este análisis fue complementado con una consulta en el portal de la CONAGUA, enfocándose en la identificación de las estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca.

Para una integración eficaz de estos datos, se utilizó un archivo tipo KML obtenido de CONAGUA, que permitió identificar las ubicaciones exactas de las estaciones sobre la zona de estudio. Con el software ArGIS se incorporó la ubicación de las estaciones y se procedió a establecer las áreas de influencia de cada una de ellas, utilizando el método de los Polígonos de Thiessen (Figura 3.8). Estos polígonos proporcionaron una base sólida para comprender la influencia de las estaciones y analizar la distribución espacial de la precipitación sobre la cuenca.

De la página de la CONAGUA se extrajeron registros de las precipitaciones máximas registradas diariamente. Esta información fue tratada de forma individual para verificar su calidad y completitud de datos faltantes. El objetivo de este enfoque es, determinar los valores de precipitación registrados y a partir de ellos ponderar los valores según el área de influencia específica de cada estación hidrométrica para obtener valores específicos de precipitación media sobre la cuenca.

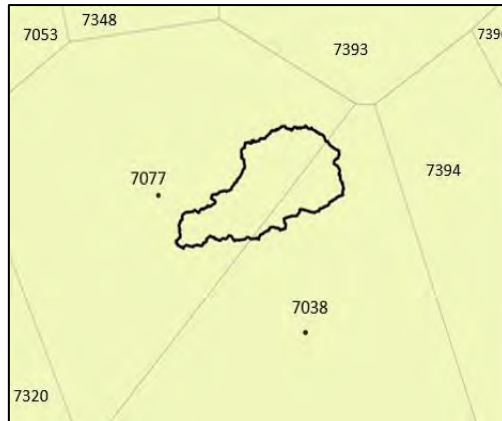


Figura 3.8 *Influencia de las estaciones meteorológicas sobre la cuenca de estudio estimada a través de los Polígonos de Thiessen*

En el proceso de análisis de los datos de precipitación, se implementó un ajuste estadístico de tipo Gumbel. Este método es reconocido por su eficacia en el modelado de eventos extremos, como las precipitaciones máximas. Este ajuste estadístico permite estimar valores de precipitación asociados a un periodo de retorno y sobre los cuales se plantearon los escenarios de análisis. Los valores estimados se consideran láminas de precipitación diaria, sin embargo, para transformar estos valores a precipitación máxima en 24 h es necesario realizar un ajuste por intervalo fijo de observación incrementando un 13% los valores obtenidos.

3.2.3 Obtención de las curvas IDTr

Realizado el tratamiento estadístico a los datos de precipitación, se aplicó la fórmula de Chen (ecuación 2.5) para obtener los valores de intensidad para distintos periodos de retorno a diferentes duraciones. En particular se obtuvieron las curvas correspondientes a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años con intervalos de tiempo divididos a cada 5 min, con estos datos fue posible realizar predicciones de la intensidad de lluvia para una duración en particular y para cada periodo de retorno.

3.2.4 Calibración del factor de convectividad (R)

Complementando el estudio hidrológico, se procedió con la revisión del valor de convectividad R, revisando la referencia de Baeza (2007) sobre la calibración de este valor y su importancia

al momento de obtener lluvias correspondientes a una duración de 1 hora para cualquier periodo de retorno. El factor R representa el cociente de las precipitaciones máximas asociadas a 1 y 24 h para un mismo periodo de retorno, donde los valores de precipitación a 24 h se obtienen directamente del análisis de precipitaciones. Sin embargo, la determinación de precipitación a 1 h suele ser difícil de obtener debido a la escasa o nula información de información pluviográfica o de estaciones automáticas.

En este trabajo los valores de precipitación a 1h y para diferentes periodos de retorno se obtuvieron a través de los mapas de isoyetas construidos por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). En la Figura 3.9 se muestra un ejemplo de este tipo de mapas.

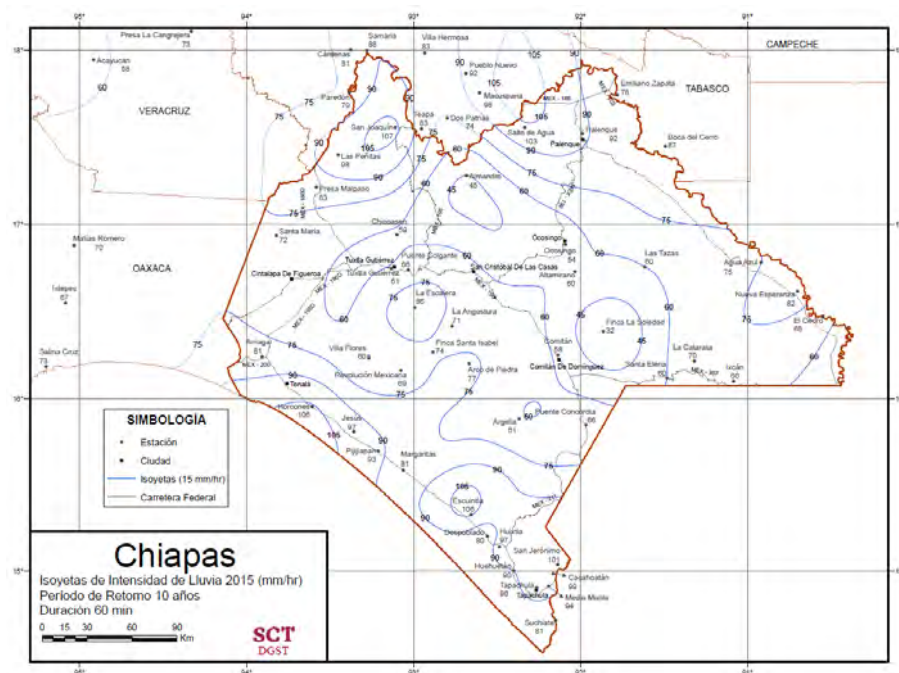


Figura 3.9 Isoyetas SCT para una duración de 1 hora y 10 años periodo de retorno.

Capturados los valores de precipitación a 1 h se estimó y calibro el factor R para cada estación buscando que, los valores de intensidad obtenidos en las curvas IDTr preservaran los valores de intensidad presentados en los diferentes mapas de isoyetas de la SCT. Este proceso de ajuste del valor R permite que cada estación tenga su propio factor calibrado en lugar de consultar un mapa de regionalización del factor R, donde en particular la zona de estudio quedo en un área límite de dos valores y dificulta su determinación.

3.2.6 Conceptualización de pérdidas por infiltración

La conceptualización de la distribución espacial de la lluvia permite definir en cada intervalo de tiempo, cuanta es la precipitación que cae sobre la cuenca, sin embargo, esta precipitación no genera escorrentía, puesto que la escorrentía se obtiene una vez que se evalúan las pérdidas por abstracciones iniciales o pérdidas por infiltración. La conceptualización de las pérdidas por infiltración se determinó utilizando el método del Número de Curva (NC) de la SCS. Donde la asignación de los valores se realizó atendiendo las características hidrológicas, usos y características del suelo y tomando como referencia valores disponibles en bibliografía especializada. La evaluación del método permite estimar la precipitación efectiva y sobre la cual se evalúa la construcción de los hidrogramas generados en la cuenca.

3.2.7 Estimación de los hidrogramas de la cuenca

Con base en la información disponible, se determinó utilizar un esquema de hidrograma unitario sintético para estimar los caudales de flujo que serían simulados en el tramo de estudio. Específicamente se implementó el método del hidrograma unitario del SCS, considerando un tiempo de concentración de 1.39 h.

Para cada periodo de retorno se estima el caudal pico tomando en cuenta la ecuación 2.23, para después elaborar el hidrograma unitario adimensional SCS. Este hidrograma permite obtener los hidrogramas finales multiplicando los valores de sus abscisas por la precipitación efectiva. Finalmente, a los caudales obtenidos se le añade un caudal base de $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$ con la finalidad representar el flujo permanente que fluye sobre el tramo de estudio. Según los datos de estudio de impacto ambiental existe un tirante de 0.6 m, dadas las condiciones finales del modelo se buscó un caudal que bajo condiciones de flujo estable alcanzara esta profundidad. De esta forma se obtuvo un valor de caudal base igual a $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$ para un tirante de 0.56 m en la zona del puente.

3.3 Simulación Iber

Esta etapa consiste en la modelación del tramo de estudio, utilizando el software de simulación Iber. Para ello, es necesario realizar un tratamiento y acomodo de toda la información obtenida del estudio hidrológico para alimentar el modelo de simulación. Este tratamiento consistió transformar la información a los formatos correspondientes para su lectura en Iber. Se importan los datos de los diferentes softwares de apoyo para los casos de MDE. El tipo de formato utilizado fue del tipo TXT ya que permite representar las elevaciones topográficas del terreno. Para el caso de la geometría del río se utilizó un formato DXF, con lo cual, se establecen los límites del dominio a modelar. Finalmente, para los valores de uso de suelo se utilizaron los formatos de TXT y CSV con lo cual se permite conceptualizar la rugosidad de la superficie (Figura 3.10).



Figura 3.10 Información y tipo de formato requerido para la alimentación del modelo Iber

3.3.1 Definición de escenarios de simulación

Para realizar las simulaciones en el programa Iber, se definieron una serie de escenarios a simular según las necesidades de análisis requeridas. En total se plantearon 18 escenarios base relacionados con el tipo de rugosidad superficial, tipo de análisis (hidrodinámico y de transporte de sedimento) y periodo de retorno asumido. Para cada tipo de rugosidad superficial se analizó su comportamiento para periodos de retorno de 5, 10 y 20 años (Figura 3.11), con la finalidad de analizar las condiciones hidrodinámica, así como, los niveles de erosión alcanzados.

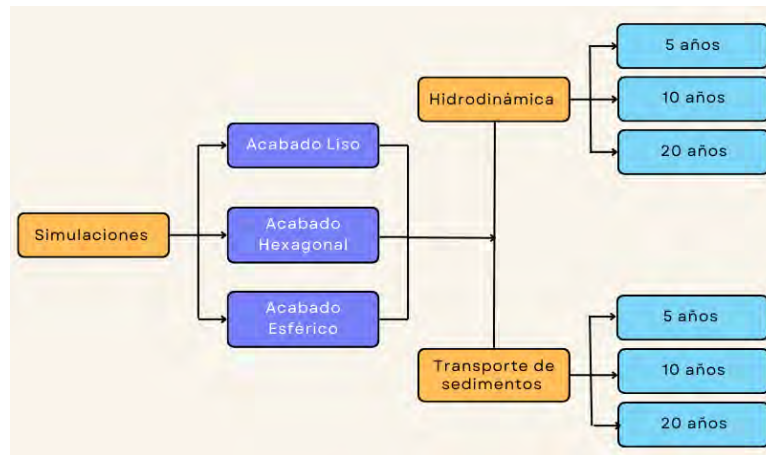


Figura 3.11 Escenarios de simulación establecidos para el análisis de la rugosidad superficial en las pilas del puente Maxixapa

Para llevar a cabo la comparativa se extrajeron los resultados en tablas comparativas de Excel, para posteriormente ser tratados en el software de Matlab. Los resultados se centraron en analizar los efectos hidrodinámicos (campo de velocidad y profundidad de flujo) y de erosión (profundidad de socavación) sobre la zona de pilas del puente según la siguiente clasificación:

- Resultados sobre pila con acabado liso para diferentes periodos de retorno.
- Resultados sobre pila con acabado esférico para diferentes periodos de retorno.
- Resultados sobre pila con acabado hexagonal para diferentes periodos de retorno.
- Resultados sobre pila con acabado liso, acabado esférico y acabado hexagonal para periodo de retorno de 5 años.
- Resultados sobre pila con acabado liso, acabado esférico y acabado hexagonal para periodo de retorno de 10 años.
- Resultados sobre pila con acabado liso, acabado esférico y acabado hexagonal para periodo de retorno de 20 años.

La comparativa de resultados se estableció a través de gráficos (perfiles transversales y longitudinales de erosión) y mapas (campo de velocidad y profundidad de flujo), con los cuales se permitió identificar cual es el acabado óptimo, para utilizarse según las condiciones del sitio.

3.3.2 Comparativa de Hidrograma Completo y Caudal Pico

Debido a los requerimientos computacionales del análisis se evaluó la viabilidad de solo simular la condición más desfavorable (caudal pico). Para ello, se llevó a cabo la comparativa directa de los resultados obtenidos de la simulación para un periodo de retorno de 20 años para una pila lisa (Figura 3.12), bajo una condición de entrada de flujo transitoria (imposición del hidrograma completo) y otra estacionaria (caudal pico). El objetivo de esto consistió en determinar si en ambos escenarios los resultados son similares y emplear en las simulaciones hidrogramas pico teniendo como beneficio el ahorro de tiempo y esfuerzo computacional.

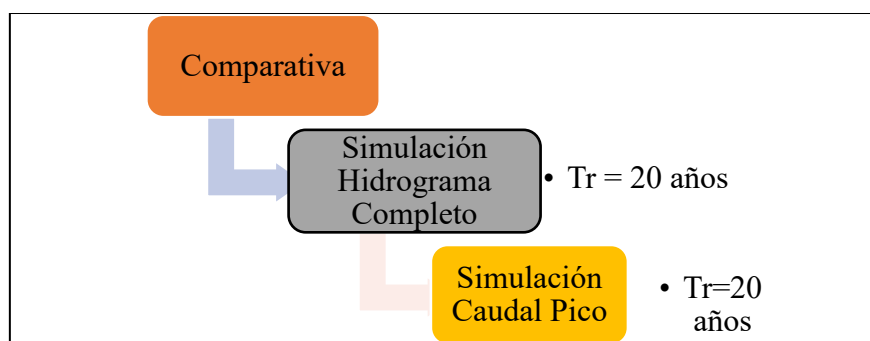


Figura 3.12 *Simulación con el caudal pico y simulación con hidrograma completo*

3.3.3 Proceso general de simulación dentro del modelo Iber

La estructura del software Iber requiere de tres etapas para la configuración de cada simulación a realizar, estas etapas secuenciales se denominan Pre-Proceso, Proceso y Post-Proceso y engloban las particularidades requeridas para la ejecución correcta del modelo de simulación. A continuación, se describe a detalle cada una de ellas y las consideraciones asumidas para la elaboración de este estudio.

3.3.3 Pre- Proceso

Para esta etapa, en el modelo Iber se tiene como principal objetivo la conceptualización de la problemática a modelar, de ella dependen en gran medida los resultados y se realiza a través de 5 pasos principales (Figura 3.13).

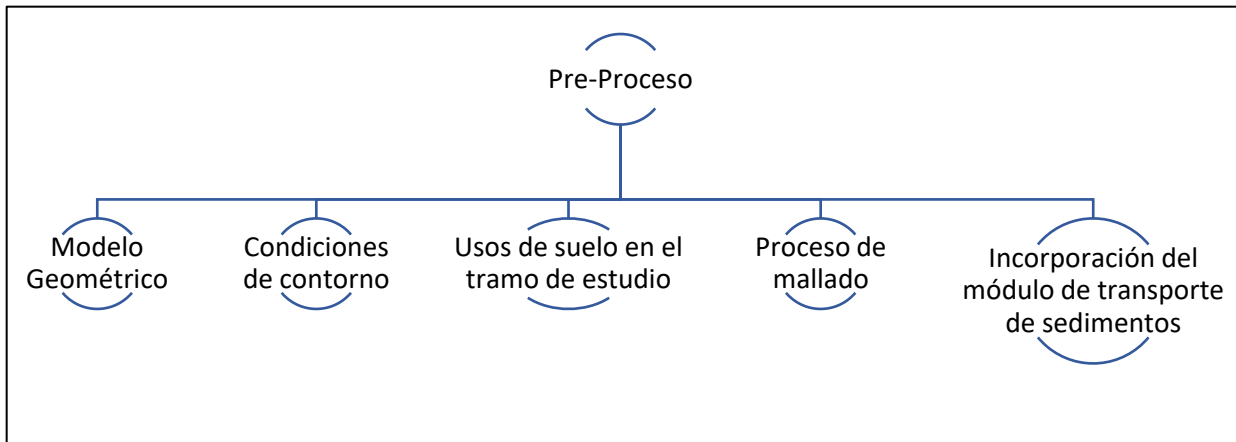


Figura 3.13 *Etapas del Pre-Proceso en el Modelo IBER*

3.3.3.1 Modelo Geométrico

En el caso de este software la geometría es la representación idealizada del problema a estudiar, además su creación o importación depende de los datos con los que se dispongan, para el caso de estudio permitió delimitar el tramo del río, para ello, se apoyó del software AutoCAD y a su vez del software ArcGIS, lo que permitió la generación de secciones a través de superficies por contorno con la incorporación de imágenes georreferenciadas para brindar mayor precisión (Figura 3.14).

Para el caso de estudio se secciono la geometría en función, teniendo presente la generación de la malla y asignación de parámetros tomando como punto de partida secciones incluyendo los taludes del cauce y fondo. Esta subdivisión lo largo del cauce, se realizó con el objetivo de tener un control en la generación de la malla, asignando tamaños de elementos variables que fueron sometidos a varias pruebas para determinar la configuración más adecuada.

3.3.3.2 Condiciones de contorno

El siguiente paso para la conformación del modelo a simular, consiste en la asignación de las características correspondientes al problema de estudio (Figura 3.15), la información que se ingresó para las simulaciones de esta etapa se compone inicialmente de las condiciones de

contorno mediante las opciones mostradas en la Figura 3.16 a), Figura 3.16 b) y las categorías presentadas en Tabla 3.3.

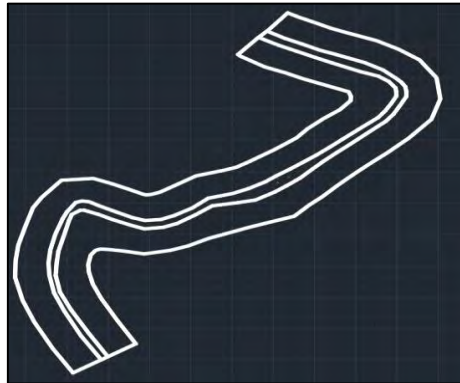


Figura 3.14 Modelo geométrico del río Maxixapa



Figura 3.15 Asignación de las condiciones de contorno de entrada y salida



Figura 3.16 Asignación de las condiciones hidrodinámicas de contorno, a) Entrada y b) Salida.

Tabla 3.3 Tipo de condiciones de contorno asignadas al tramo de estudio

Condiciones de entrada		Condiciones de salida	
Entrada:	Caudal total	Condición de flujo:	Supercrítico/Critico
Régimen:	Crítico/Subcrítico		
Caudal Total:	Hidrograma Pico (m ³ /s)	Número de salidas:	1
Número de entradas:	1		

Una vez concluido lo anterior, se definieron los parámetros del proceso hidrológico los cuales se componen de hidrogramas y condiciones iniciales, en particular se consideró un gasto inicial de 4.5 m³/s. En el caso de los usos de suelos para el modelo hidrológico estos se generaron en ArcGIS, se utilizó como referencia los datos vectoriales proporcionados por INEGI. Posteriormente se realizó una extracción de la información considerando como frontera el parteaguas de la cuenca y se identificó el número de usos para su posterior exportación a un archivo ASCII tipo ráster.

3.3.3.3 Usos de suelo empleados en el tramo de estudio

Para la asignación de los valores de uso de suelo en el cauce se realizó una inspección visual a través de medios digitales e imágenes satelitales, y considerando además algunos elementos presentes en la manifestación de impacto ambiental, dando como resultado las clasificaciones presentadas en la Tabla 3.4. Para la asignación de los valores de rugosidad de Manning, se apoyó de los datos de usos de suelo contenidos en Aparicio (1992) y el manual Iber.

- Cultivo
- Lecho
- TSV (Talud sin vegetación)
- TVB (Talud con vegetación baja)
- TVM (Talud con vegetación media)
- TVA (Talud con vegetación alta)

Tabla 3.4 *Coefficientes de rugosidad (n) según en uso de suelo*

Clasificación	n
Cultivo	0.04
Lecho	0.035
TSV	0.04
TVB	0.045
TVM	0.05
TVA	0.07

Respecto a la delimitación de forma digital, esta se realizó utilizando AutoCAD y ArcGIS donde se asignó cada una de las clasificaciones al tramo de estudio. Seguido de ello se exporta la información a archivos con formato tipo ASCII para ser leídos por el modelo IBER y poder realizar su asignación correspondiente (Figura 3.17), destacando también que, para que puedan leerse en el programa de Iber fue necesario dar de alta diferentes tipos de usos de suelo con su coeficiente de rugosidad correspondiente.

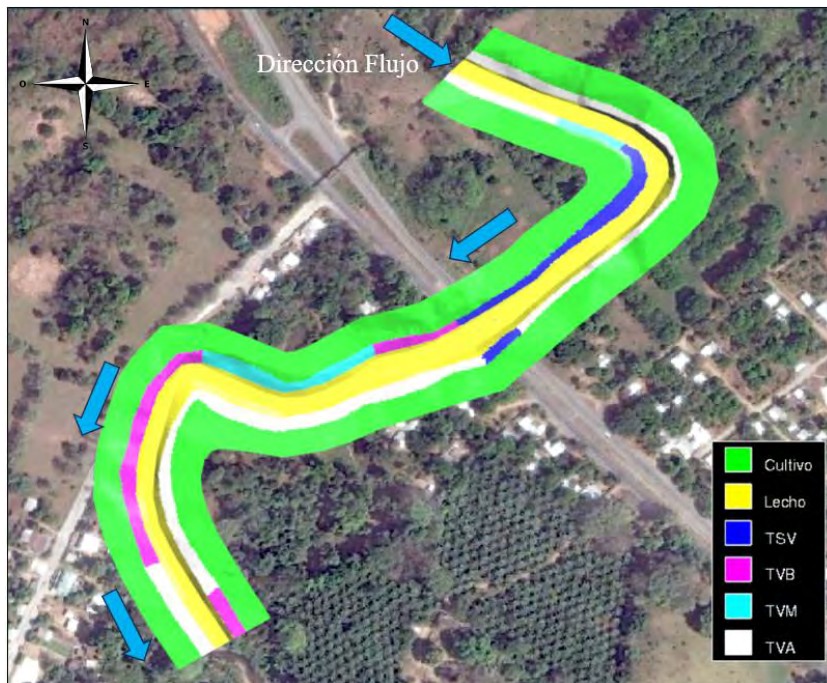


Figura 3.17 *Usos de suelo en el tramo de estudio.*

La asignación de la rugosidad en el modelo fue de forma automática (Figura 3.18), donde Iber identifica el valor de la rugosidad en cada celda del archivo ráster y la asigna al modelo en base

a las coordenadas manejadas. Para la correcta identificación es necesario generar un archivo tipo CSV el cual sirve de enlace con el modelo Iber. El archivo CSV contiene el nombre de los usos de suelo mediante el identificador asignado en el modelo digital.



Figura 3.18 *Asignación automática de las rugosidades.*

3.3.3.4 Proceso de Mallado

Un punto muy importante para llevar a cabo la simulación es la generación de la malla de cálculo, dicha malla discretiza el modelo para llevar a cabo el cálculo y de esto depende la calidad de resultados. Debido a la topografía del terreno se optó por utilizar una malla no estructurada, ya que, es la que mejor se adapta a terrenos irregulares. La malla generada y sus características se describen en la Figura 3.19 a) y b) respectivamente.

La malla generada contiene un total de 80.722 elementos con un total de 81736 nodos, con diferentes tamaños de elemento (1.2, 0.6 y 0.2 m) como muestra la Figura 3.20. Para la generación de la malla se priorizó la resolución sobre el cauce y zona de pilas, por lo que sobre este sitio predominan valores de 0.2 m.

Para asignar las elevaciones de terreno sobre malla, esta se realiza utilizando la información del MDE previamente generado. Las elevaciones en Iber son asignadas de forma automática con la

finalidad de obtener una deformación en todo el dominio de análisis, la Figura 3.21 muestra las elevaciones adquiridas en el cauce gracias al MDE original extraído del INEGI.

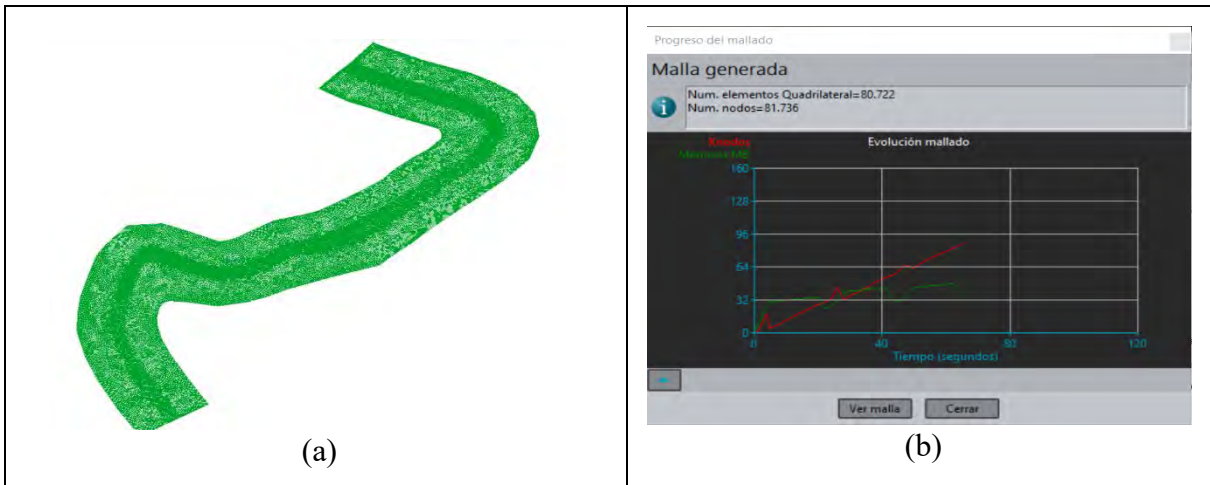


Figura 3.19 Malla de cálculo obtenida para el tramo de estudio. a) Malla generada y b) Resultados de la malla.

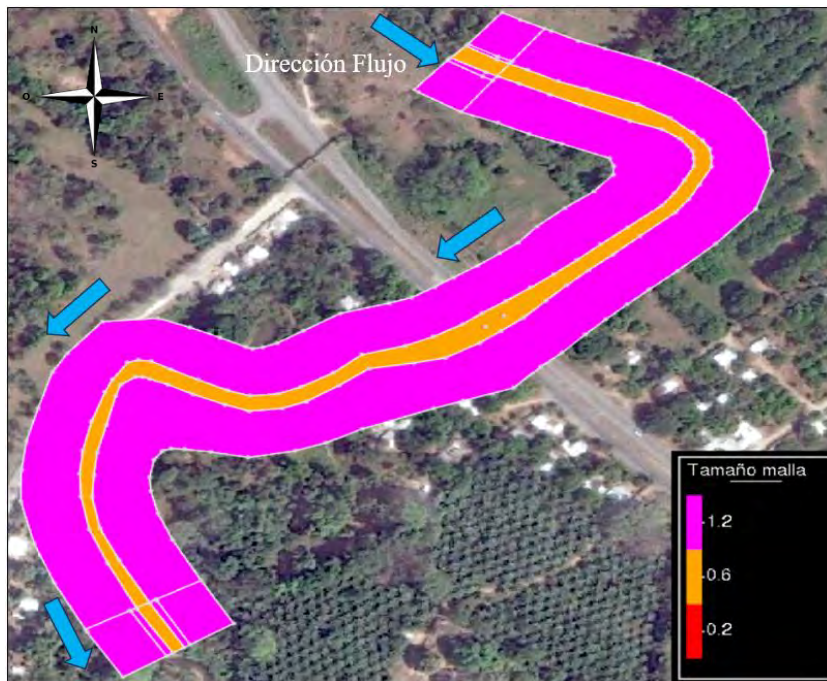


Figura 3.20 Tamaños de malla en el cauce.



Figura 3.21 *Malla con elevación asignada por MDE.*

3.3.3.5 Incorporación del módulo de transporte de sedimentos en el tramo de estudio

Para contemplar el análisis de transporte de sedimentos, es necesario asignar la posición de la capa de roca (Figura 3.22). Este valor se propuso debido a que se desconoce su ubicación en profundidad real, para ello se considera adecuado manejar cierta holgura para que no se condicione la profundidad de la erosión (socavación) y los resultados sean completamente definidos por la capacidad de transporte del flujo. El valor asignado considera que la roca se encuentra a 10 metros del fondo inicial (Figura 3.23). Para los escenarios de análisis se consideró únicamente valorar el transporte de fonde mediante el método de Meyer Peter & Müller (1948).

3.3.4 Proceso

En la etapa de proceso se realizó la configuración necesaria para la correcta ejecución del software Iber, se establecieron los parámetros generales del esquema de cálculo y pasos de tiempo. La Tabla 3.5 y la Figura 3.24 muestran los parámetros generales y de tiempo incorporados respectivamente. El tiempo total de simulación para cada escenario fue de 2,100 s con intervalos de resultados a cada 600 s. Para los parámetros de transporte de sedimentos se

introdujeron las características del material de fondo (Figura 3.25), cuyos valores fueron obtenidos de la manifestación de impacto ambiental, además para analizar los procesos de erosión, Iber requiere que se active el método a emplear para el transporte de fondo en este estudio se utilizó el modelo de Meyer-Peter&Muller.

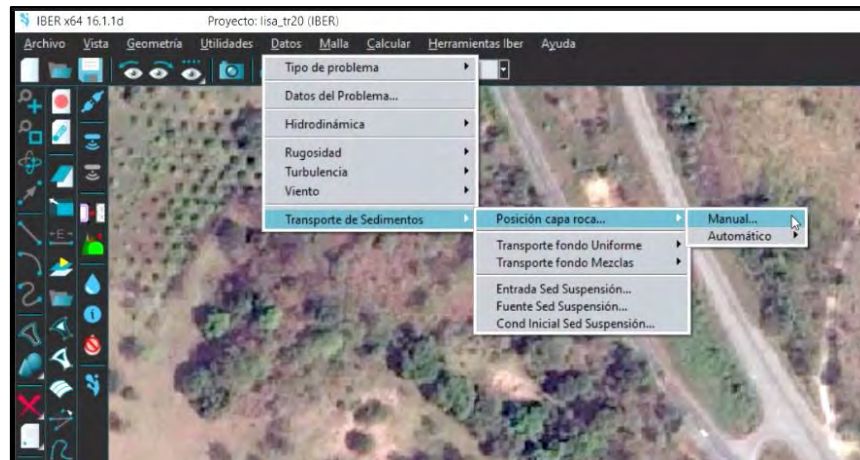


Figura 3.22 *Asignación automática de la capa roca.*

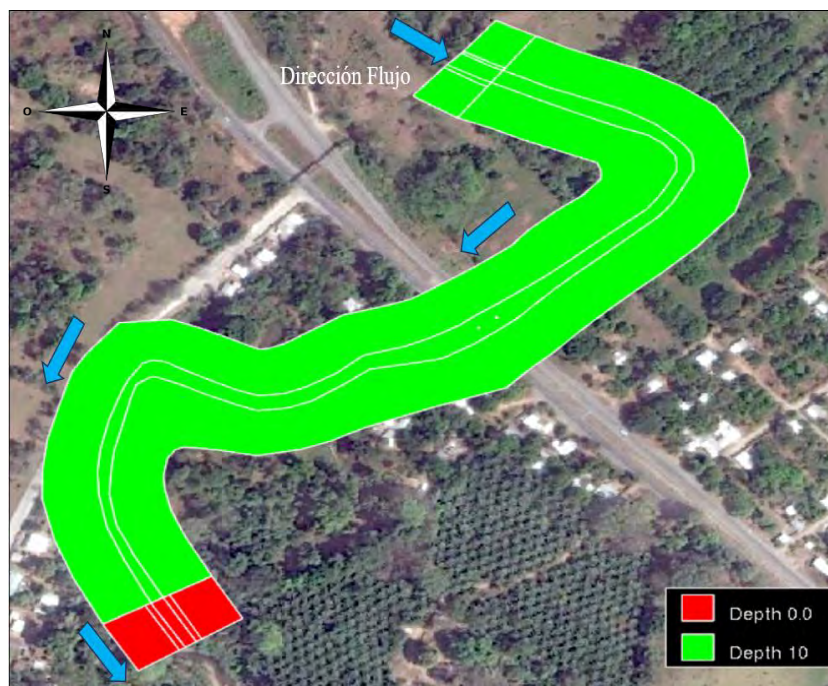


Figura 3.23 *Posición de la capa roca.*

Tabla 3.5 *Parámetros generales de simulación utilizados en el modelo Iber*

Parámetro	Valor
Esquema Numérico	DHD (hidrológico)
Limite Seco-Mojado	0.001
Secado	Hidrológico
Intervalo	600 s
CFL	0.9
Instante Inicial	0
Tiempo Máximo	2100 s
Duración del Calculo	30 min

Figura 3.24 *Parámetros de tiempo utilizados en el modelo Iber*

Figura 3.25 *Opciones de configuración del módulo de transporte de sedimentos.*

3.3.5 Post Proceso

La última etapa de la simulación es el post proceso, el cual permite la visualización de los resultados 2D para las diferentes variables de interés, como son: el tirante, los niveles de erosión, velocidad y profundidad de flujo, depósito de sedimentos y niveles de socavación. Estos mapas se pueden consultar en cualquier parte del río (Figura 3.26), lo cual facilito la extracción de resultados en secciones específicas. Mediante el uso de las herramientas disponibles en Iber se exportaron diferentes resultados a formato ráster para ser tratados directamente en ArcGIS y poder visualizar los resultados sobre imágenes geo-referenciadas.

Los tipos de datos para análisis que se extrajeron fueron: mapas de máximos, graficas de evolución de punto, gráficos de línea, tablas de resultados, tablas comparativas, cortes del cauce entre dos puntos y secciones del cauce en un lugar de estudio específico.

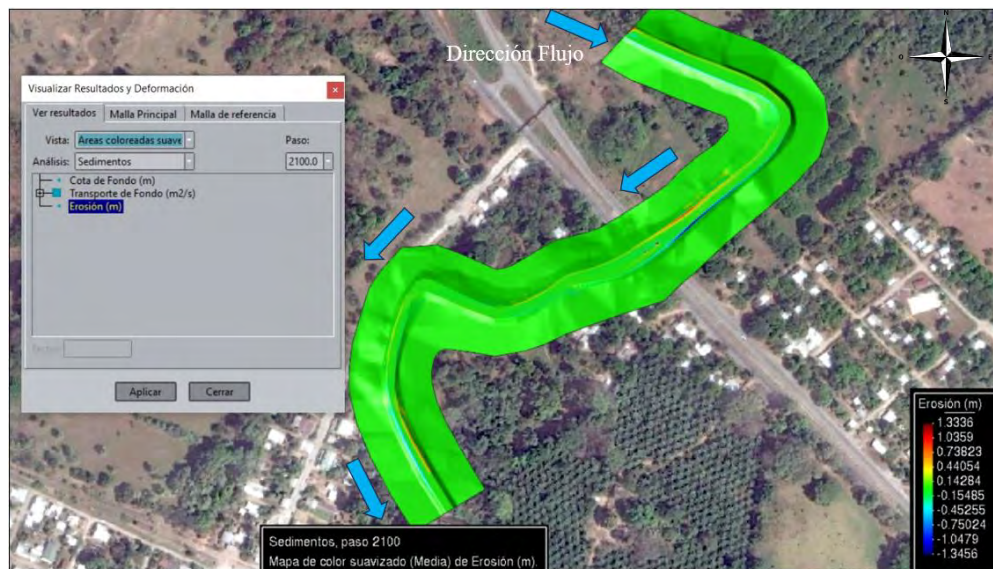


Figura 3.26 Ejemplo de resultados en postproceso.

3.4 Etapa 4: Análisis de resultados

Con los resultados obtenidos de la etapa 3, se procedió a analizar la información de forma detallada, destacando el enfoque de los resultados de la profundidad de socavación, presentando mapas ráster, gráficos y tablas.

3.4.1 Identificación de valores máximos en velocidad, tirante y erosión

En esta fase se extrajeron los resultados obtenidos de las simulaciones destacando los resultados de velocidad, tirante y erosión, para ello se utilizan las herramientas de exportación del entorno Iber y ArcGIS con lo cual se pueden generar mapas ráster, dibujado zonas con cortes transversales. Además, se identificaron los resultados máximos de las simulaciones para velocidad, tirante y erosión de los acabados liso, casquete hexagonal y casquete esférico en para los periodos de retorno de 5, 10 y 20 años para su posterior comparación.

3.4.2 Discusión de resultados

En este apartado se utilizó la información recolectada sobre las simulaciones que se utilizaron en los casos de estudio (que para propósitos de este trabajo se hace un énfasis en las distintas rugosidades superficiales en pilas de puente) ya que dependiendo del análisis de cada resultado se seleccionan los casos que sean más favorables, de igual manera se identificaron los comportamientos que se encuentran en el proyecto y a su vez seleccionar casos que puedan llevarse a un caso real.

Lo que se pretende es, brindar una solución teórica que pueda ser aplicable a casos reales para poder implementar soluciones ante los problemas de socavación que cada vez son más recurrentes y tienen un gran impacto en la sociedad.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el trabajo de investigación. La presentación de los resultados se agrupa según las etapas planteadas en la metodología, señaladas a continuación:

- Etapa 1: Consistió en la obtención de información y definición de la zona de estudio
- Etapa 2: Hace referencia a todo lo relacionado con elaboración del estudio hidrológico en la zona de estudio, tratamiento de los modelos digitales de elevación, definición geométrica del tramo del río y acabados superficiales sobre las pilas.
- Etapa 3: Se aborda el proceso de simulación en el modelo Iber a través de las subetapas de pre-proceso, proceso y postproceso, además de las configuraciones necesarias para las simulaciones hidrodinámicas y de transporte de sedimentos.
- Etapa 4: Relacionado con los resultados de las simulaciones realizadas con el modelo Iber referentes a la evaluación de las condiciones hidrodinámicas y de transporte de sedimentos para el análisis de profundidades de flujo, campos de velocidades y profundidades de erosión al incorporar los acabados de rugosidad analizados.

Es importante señalar que para efectos de esta investigación y dada la cantidad de información se considera al puente Maxixapa como una alternativa viable para tomarse como caso de estudio, bajo la consideración de que los resultados presentados en la manifestación de impacto ambiental por parte de GECSSA (2003) son confiables y dan un panorama de las condiciones y problemática que se tiene que afrontar.

4.1 Estudio hidrológico

La delimitación de la cuenca de estudio es un aspecto básico para la elaboración de cualquier estudio hidrológico. Para el caso de estudio del puente Maxixapa ubicado en el camino directo Arriaga-Huixtla la cuenca de análisis presenta un área de 27.82 km, un perímetro de 29.21 km (Figura 4.1). Las principales características fisiográficas se muestran a manera de resumen en la Tabla 4.1.

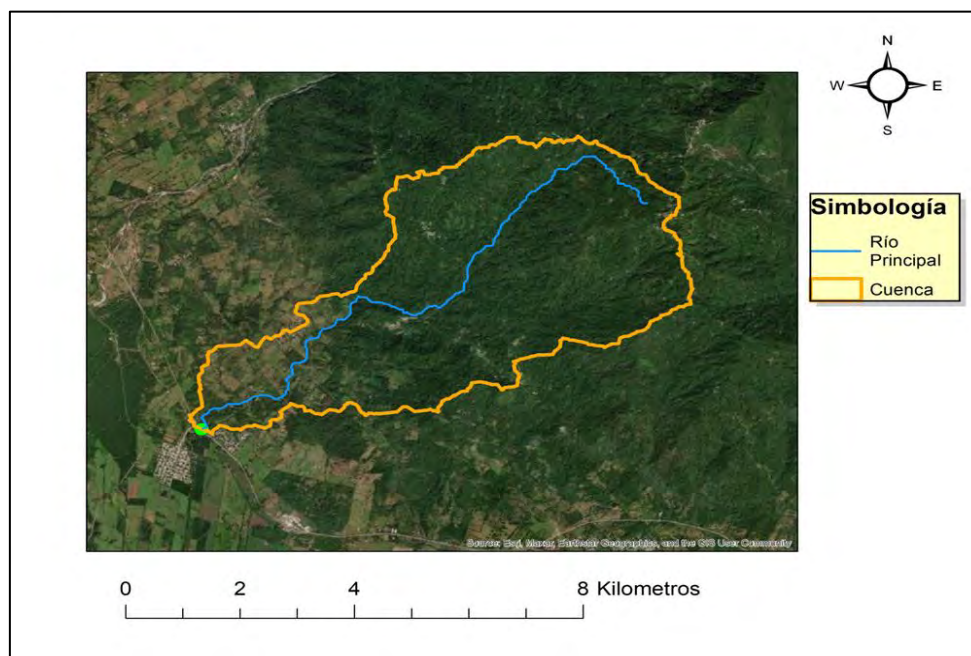


Figura 4.1 Cuenca delimitada del caso de estudio

Tabla 4.1 Características fisiográficas de la cuenca de estudio

Característica	Valor	Unidad
Área	27.826	km ²
Perímetro	29.212	km ²
Densidad de corriente	0.826	km ²
Densidad de drenaje	692.294	km/km ²
Longitud del cauce principal	12.84	km
Pendiente del cauce principal	6.08	%
Tiempo de concentración	96	min

4.1.1 Caracterización de la precipitación

En este apartado se presentan los resultados referentes al estudio de precipitaciones, comenzando por la ubicación de las estaciones pluviométricas con influencia en la cuenca hasta la obtención de las intensidades de precipitación e hidrogramas de diseño.

4.1.1.1 Polígonos de Thiessen

Con base en la información recabada de CONAGUA, se identificaron las estaciones Despoblado y Huixtla cuyo identificador es ID: 7038 e ID: 7077 respectivamente. En la Figura 4.2 se muestra la influencia espacial de cada estación, donde los resultados arrojan valores de influencia igual a 72.1 % para Huixtla y 27.9% para Despoblado. La influencia de las estaciones en la cuenca es de utilidad para determinar la precipitación en 24 horas.

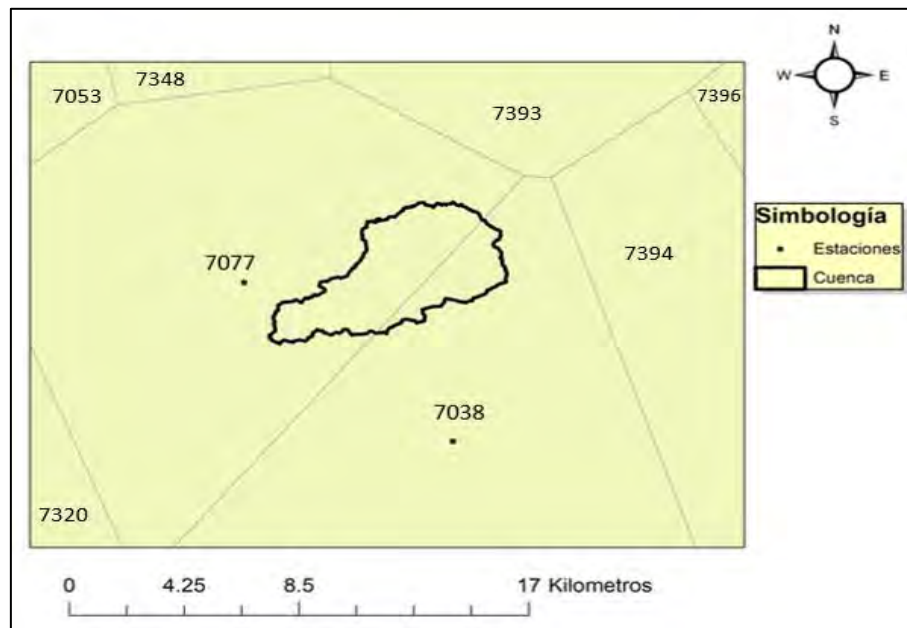


Figura 4.2 Influencia de las estaciones Huixtla y Despoblado según el método de *Polígonos de Thiessen*

4.1.1.2 Precipitación en 24 hrs asociada a diferentes periodos de retorno.

Identificadas las estaciones con influencia en el área de estudio (Estación Despoblado ID: 7038, Estación Huixtla ID: 7077), se realiza la recopilación y análisis de los registros de precipitación disponibles. Para la estación ID-7077 se obtuvieron registros continuos comprendidos en el periodo de 1954 hasta 2018 y de 1964 hasta 2016 para la estación ID-7038, los datos se resumen en la Tabla 4.2 de precipitaciones máximas diarias.

Para la predicción de valores máximos de precipitación en 24 h para cada estación, primero se realizó un ajuste de distribución de probabilidad mediante la función tipo Gumbel y se aplicó la corrección por intervalo fijo de observación (incremento del 13 %). Los resultados del análisis para cada estación se muestran a continuación junto con la Tabla 4.3 y Tabla 4.4.

Estación 7077 Huixtla:

Media aritmética: 129.4607

Desviación estándar: 24.1180

Parámetro α : 1.176

Parámetro β : 0.0488

Estación 7038 Despoblado:

Media aritmética: 121.7269

Desviación estándar: 20.7559

Parámetro α : 1.159

Parámetro β : 0.0558

4.1.1.3 Curvas IDTr

Para la metodología de las ecuaciones se precisa tener el valor del factor de convectividad R, atendiendo a la metodología de Baeza (2007) el resultado de la calibración del factor de convectividad R la Tabla 4.5 y Tabla 4.6 muestran los datos obtenidos para las estaciones Huixtla y Despoblado respectivamente.

Tabla 4.2 *Valores de precipitación máxima diaria anual para cada estación.*

Estación 7077				Estación 7038			
Año	Precipitación (mm)	Año	Precipitación (mm)	Año	Precipitación (mm)	Año	Precipitación (mm)
1954	113	1994	135.1	1964	106	2004	104.5
1955	155	1995	141.1	1965	142	2006	137
1956	170	1996	120	1966	96.5	2007	136.5
1957	130	1997	110.3	1967	120.5	2008	138
1958	148.8	1998	144	1968	133.5	2009	89.5
1959	136.3	1999	122.5	1969	147	2011	123.5
1960	118.5	2000	160	1970	107	2012	99
1961	146.4	2001	106.5	1971	123.5	2013	120
1962	139.4	2002	130.1	1972	114.5	2014	107
1963	187.4	2003	97.5	1973	103.5	2015	145
1964	103.6	2004	97	1974	130.1	2016	148
1965	113.7	2006	126.3	1975	108.5		
1966	149.5	2007	170.3	1976	86.5		
1967	101	2008	169.5	1977	100.5		
1968	101.3	2009	102.6	1978	152.5		
1969	158	2010	147	1979	125.5		
1970	124.1	2011	107.5	1980	146		
1971	108	2012	104.5	1981	144.5		
1972	102.7	2013	120.5	1982	154		
1973	136.3	2015	102.3	1983	125		
1975	109.7	2016	171	1984	97		
1976	106.4	2017	145.5	1985	130		
1977	140.7	2018	116.5	1986	150		
1978	157			1987	93.5		
1979	163.3			1989	110		
1980	124.5			1990	123.4		
1981	115.9			1991	103		
1982	122.5			1992	77		
1983	151.2			1993	90		
1984	108.5			1994	138		
1985	123.6			1995	137		
1986	141.1			1996	107.5		
1987	178.8			1997	117.12		
1988	135.1			1999	115.5		
1990	134.7			2000	148		
1991	75.8			2001	114		
1992	120			2002	157		
1993	133.7			2003	141.5		

Tabla 4.3 Resultados del ajuste Gumbel para la estación 7077 Huixtla.

Periodo de retorno T (años)	$F(x) = 1 - \frac{1}{T}$	Precipitación máxima diaria P_{md} (mm)	Precipitación máxima en 24 hrs $1.3 * P_{md}$ (mm)
2	0.50	125.65	141.98
5	0.80	148.90	168.25
10	0.90	164.29	185.65
20	0.95	179.05	202.33
50	0.98	198.17	223.93
100	0.99	212.49	240.11
200	1.00	226.76	256.23
1000	1.00	259.81	293.58
2000	1.00	274.03	309.66
10000	1.00	307.05	346.96

Tabla 4.4 Resultados del ajuste Gumbel para la estación 7038 Despoblado.

Periodo de retorno T (años)	$F(x) = 1 - \frac{1}{T}$	Precipitación máxima diaria P_{md} (mm)	Precipitación máxima en 24 hrs $1.3 * P_{md}$ (mm)
2	0.50	118.48	133.88
5	0.80	138.77	156.82
10	0.90	152.21	172.00
20	0.95	165.11	186.57
25	0.96	169.20	191.19
50	0.98	181.79	205.43
100	0.99	194.30	219.56
200	1.00	206.76	233.64
1000	1.00	235.62	266.25
2000	1.00	248.04	280.28
10000	1.00	276.86	312.86

Tabla 4.5 Valor del coeficiente *R* para cada periodo de retorno, estación 7077 Huixtla.

Periodo de Retorno (Tr)	Valor Isoyeta 1 hr Gumbel (7077)	Valor Isoyeta 1 hr (SCT)	Coeficiente "R"
10	185.647	97	0.522
25	207.623	109	0.525
50	223.927	117	0.522
100	240.110	125	0.521

Tabla 4.6 Valor del coeficiente *R* para cada periodo de retorno estación 7038 Despoblado.

Periodo de Retorno (Tr)	Valor Isoyeta 1 hr Gumbel (7038)	Valor Isoyeta 1 hr (SCT)	Coeficiente "R"
10	172.00	80	0.465
25	191.19	89	0.466
50	205.43	95	0.433
100	219.56	102	0.437

Finalmente, la Tabla 4.7 muestra los valores del factor *R* usados en cada estación, recordando que el ajuste realizado busca mantener los valores de intensidad de precipitación mostrados en el mapa de isoyetas de la SCT para diferentes duraciones y periodos de retorno.

Tabla 4.7 Valores de convectividad *R* usados en cada estación.

Estación	Coeficiente "R" Promediado	Valor "R" Ajustado
7077 – Huixtla	0.523	0.579
7038 - Despoblado	0.450	0.517

Con estos datos se construyeron las curvas IDTr con las cuales se obtuvieron diferentes valores de precipitación en diferentes periodos de retorno como lo muestra la Figura 4.3 y la Figura 4.4, mientras que la Tabla 4.8 muestra los parámetros de la ecuación característica del método de Chen.

Tabla 4.8 *Parámetros de ecuaciones para determinar las curvas IDTr para cada estación.*

Estación	a	b	c	x	P_1^{10} (mm)
7077 – Huixtla	38.28	11.65	0.87	1.29	107.49
7038 - Despoblado	33.90	10.97	0.84	1.19	88.93

Para las curvas de la estación 7077 Huixtla se muestra que, para el tiempo de concentración de la cuenca se tienen valores de intensidad media de 56.10 mm/hr, 64.34 mm/hr, 70.57 mm/hr, 76.81 mm/hr, 85.05 mm/hr y 91.28 mm/hr para cada Tr (2,5,10,20,50 y 100 años).

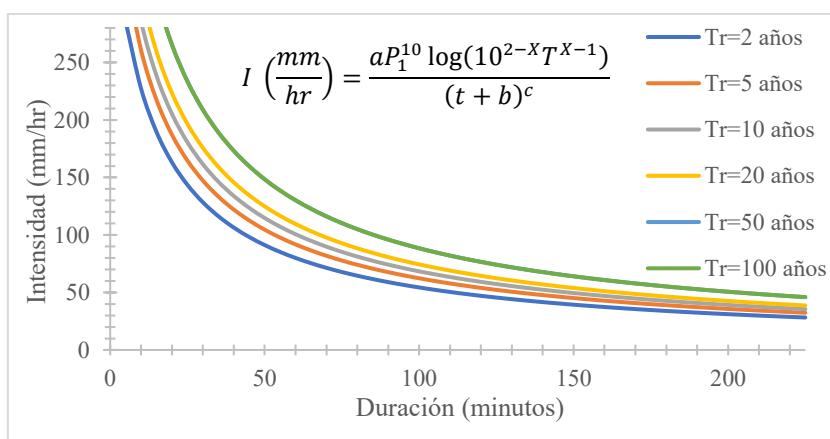


Figura 4.3 *Curvas IDTr para la estación 7077 Huixtla.*

Mientras que, para la estación 7038 Despoblado se muestran que, para el tiempo de concentración la cuenca se tienen valores de intensidad media de 50.26 mm/hr, 54.76 mm/hr, 58.16 mm/hr, 61.56 mm/hr, 66.06 mm/hr y 69.46 mm/hr para cada Tr (2,5,10,20,50 y 100 años).

4.1.1.4 Hietogramas de precipitación para las estaciones Huixtla y Despoblado

Como se puede observar los valores obtenidos tanto de la estación 7077 Huixtla como de la estación 7038 Despoblado son similares debido a la cercanía y características que se tienen en las estaciones. Una vez obtenidas las curvas IDTr, se construyeron los hietogramas de altura e intensidad de lluvia para cada periodo de retorno en cada estación (Figura 4.5 a Figura 4.8), cabe aclarar que para la obtención de estos gráficos se emplearan solamente para los periodos de retorno previamente definidos para las simulaciones los cuales son 5, 10 y 20 años, teniendo

para Huixtla una intensidad promedio de 70.57 mm/hr y 58.16 mm/hr para Despoblado en ambas para periodos de retorno de 5, 10 y 20 años.

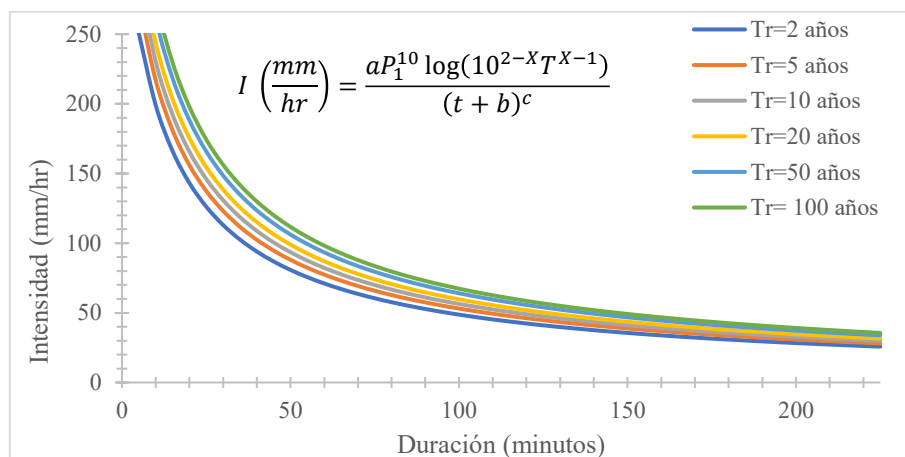


Figura 4.4 Curvas IDTr para la estación 7038 Despoblado.

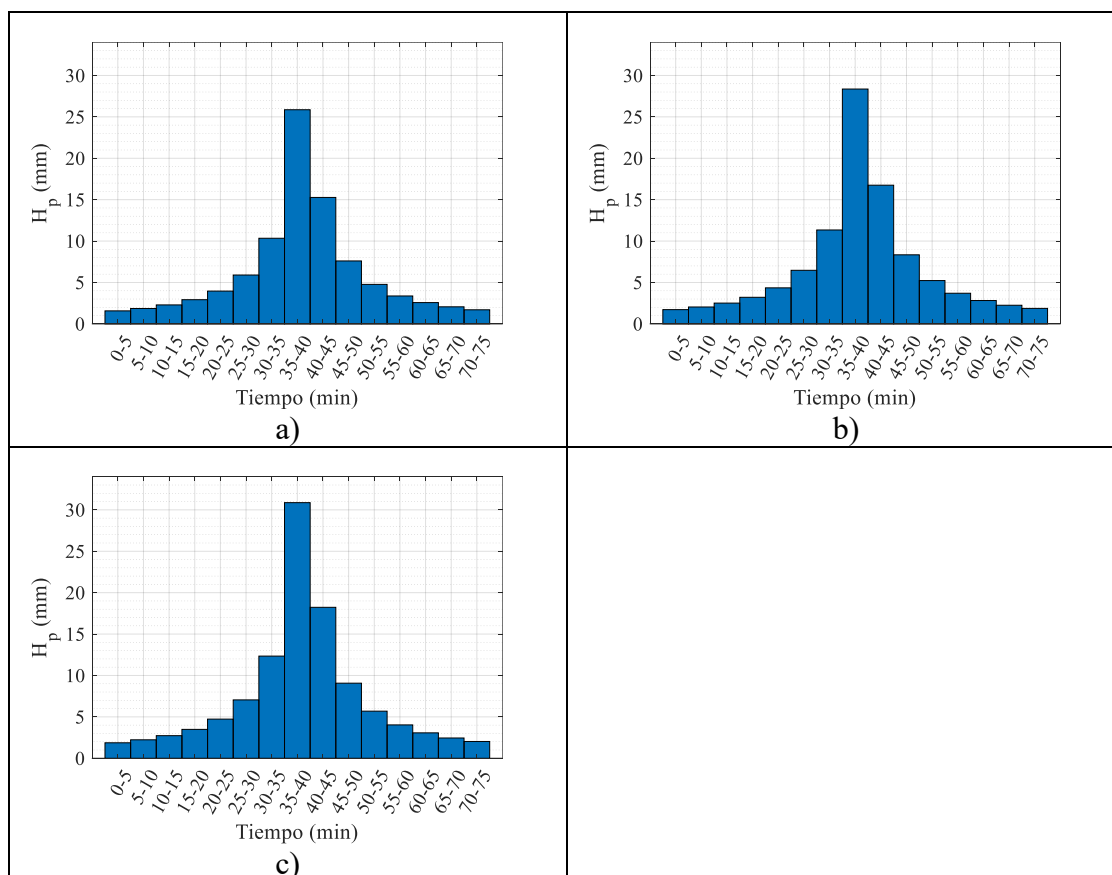


Figura 4.5 Hietogramas de altura de lluvia para la estación 7077 – Huixtla para diferentes periodos de retorno, a) Tr= 5 años, b) Tr= 10 años y C) Tr= 20 años.

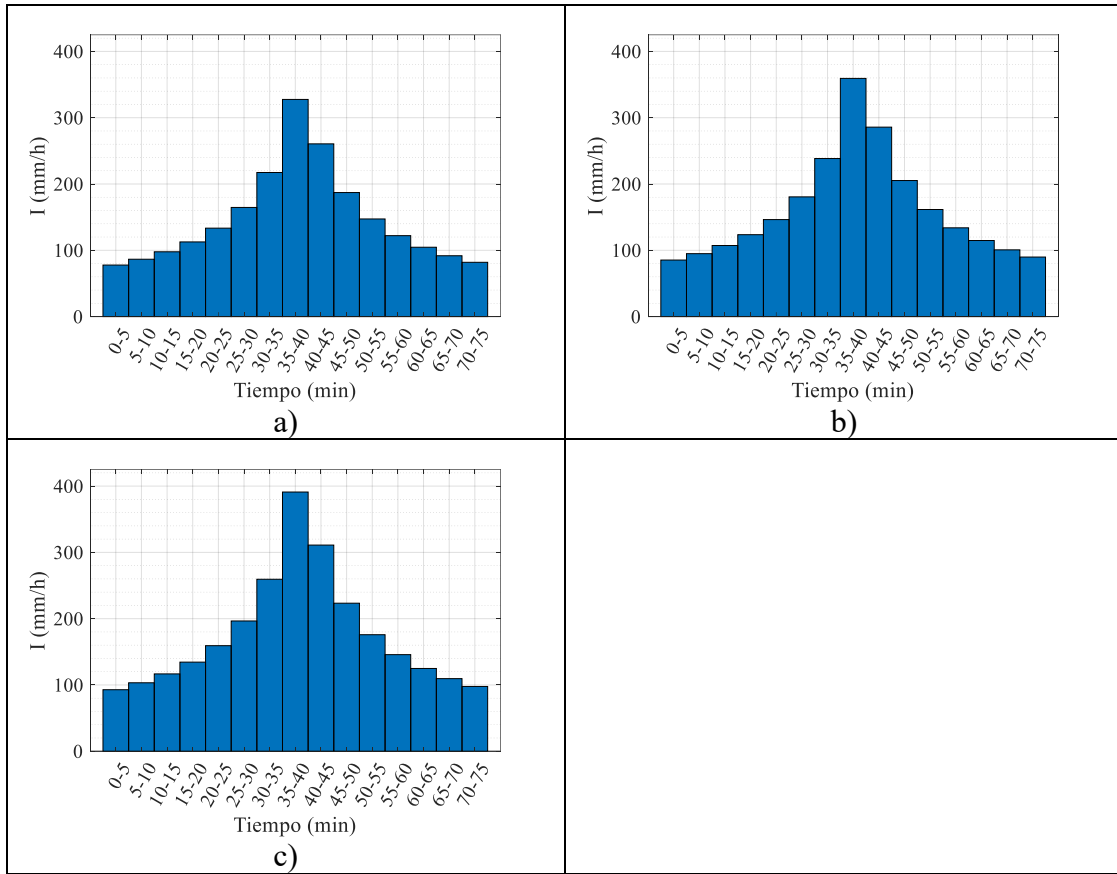


Figura 4.6 Hietogramas de intensidad de lluvia para la estación 7077 – Huixtla para diferentes periodos de retorno, a) $Tr= 5$ años, b) $Tr= 10$ años y C) $Tr= 20$ años.

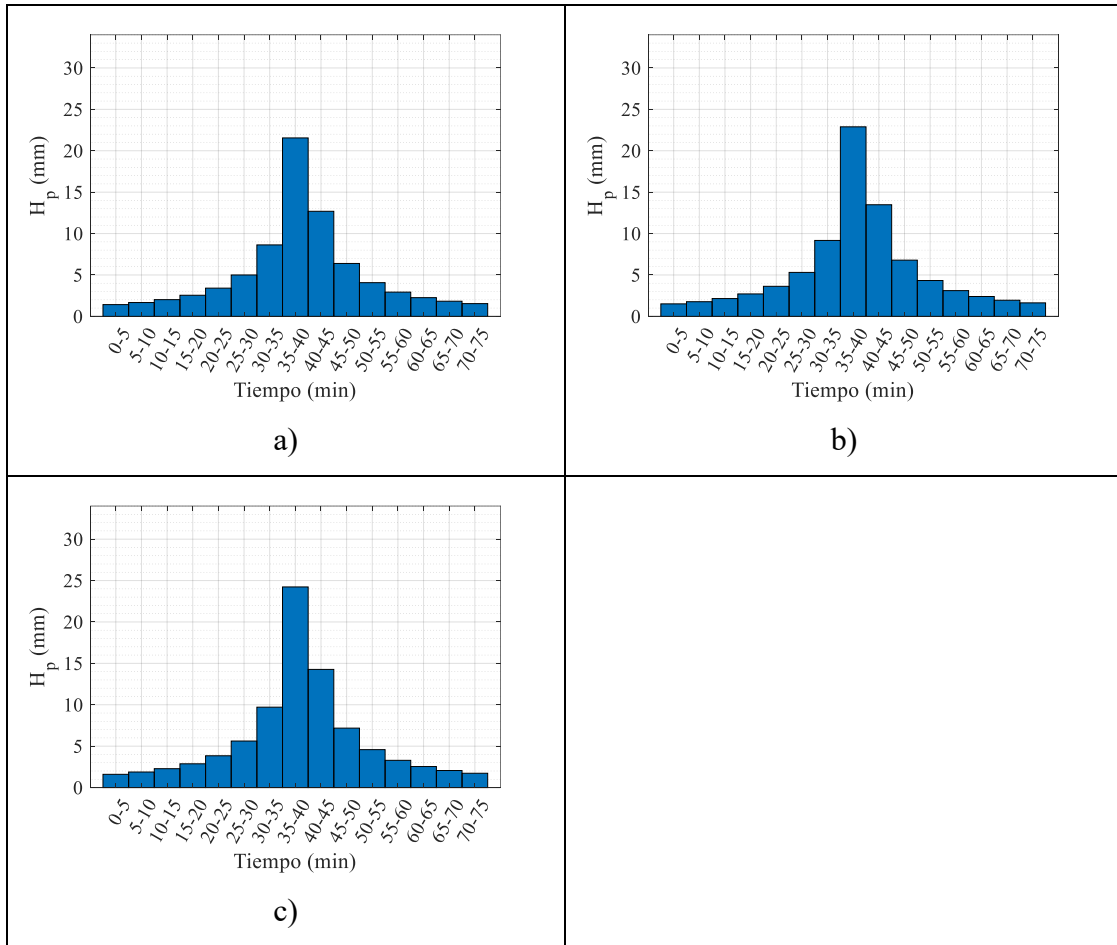


Figura 4.7 Hietogramas de altura de lluvia para la estación 7038 – Despoblado para diferentes periodos de retorno, a) $Tr= 5$ años, b) $Tr= 10$ años y C) $Tr= 20$ años.

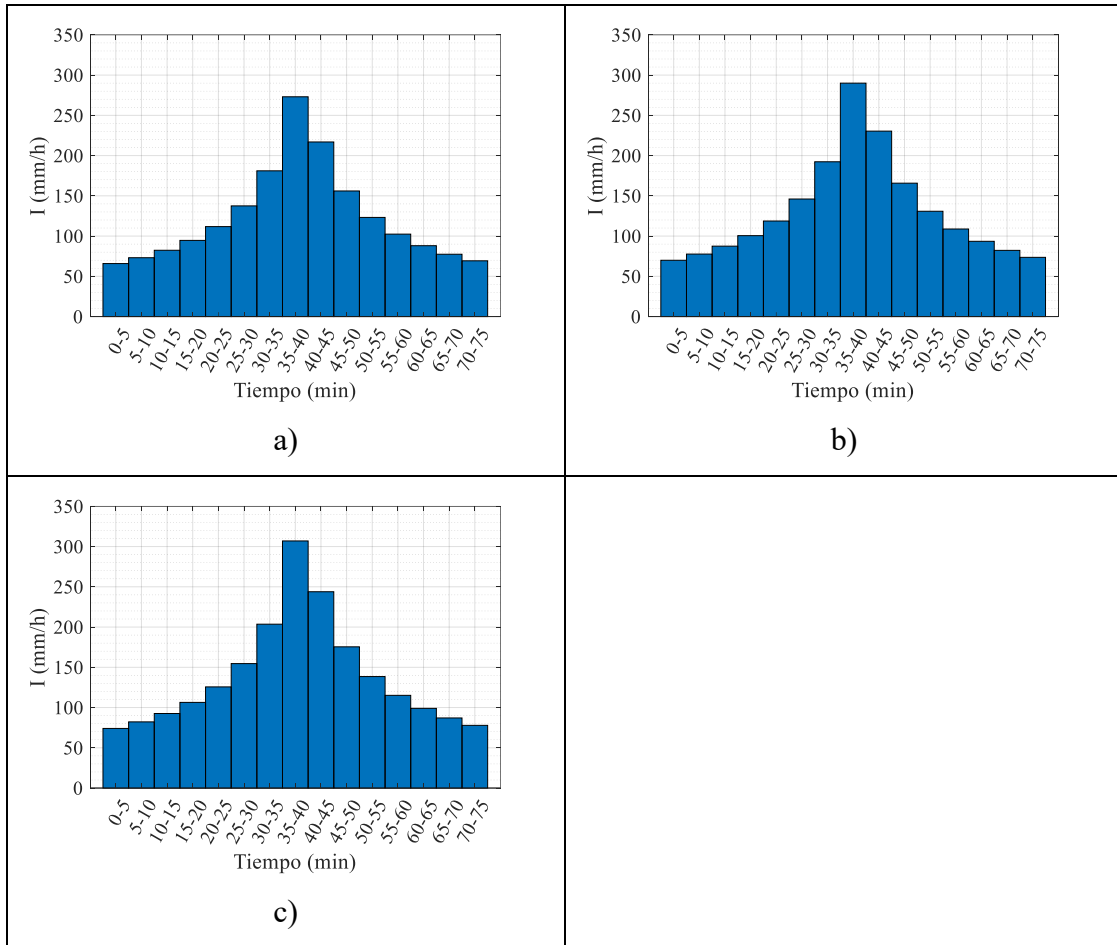


Figura 4.8 Hietogramas de intensidad de lluvia para la estación 7038 – Despoblado para diferentes periodos de retorno, a) $Tr= 5$ años, b) $Tr= 10$ años y C) $Tr= 20$ años.

4.1.1.5 Precipitación Efectiva

La distribución de los usos de suelo fue una variable que condiciono la estimación de la precipitación efectiva, en la Figura 4.9 se presenta la distribución dominante de los usos de suelo en la zona de estudio, donde el uso de Bosque tiene un porcentaje de ocupación del 86 % y Agricultura un porcentaje de uso del 14 %.

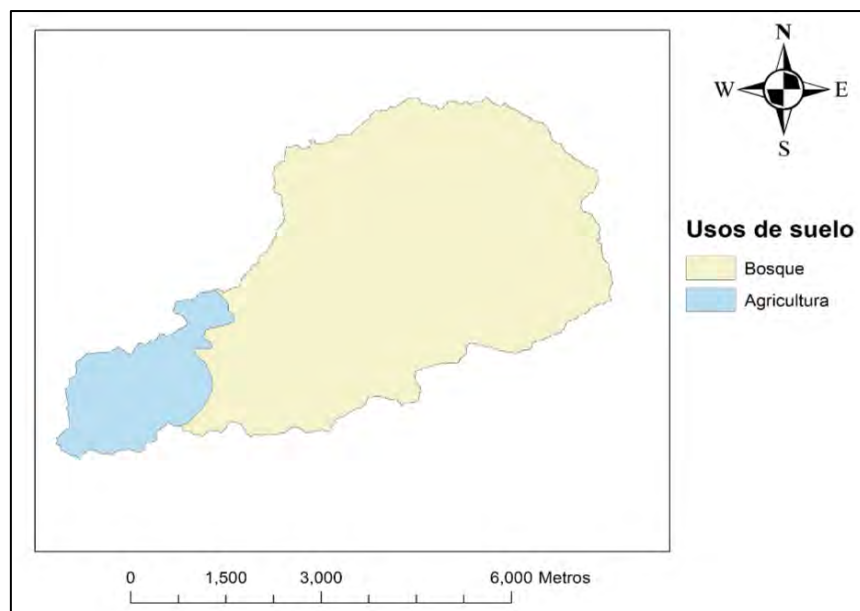


Figura 4.9 Tipos de usos de suelo designado por INEGI sobre la cuenca de estudio

Por otro lado, en Tabla 4.9 se muestran las características de drenaje según el tipo de suelo, teniendo una zona muy amplia en drenaje moderado. Esto impacta directamente sobre la escorrentía superficial.

Tabla 4.9 Características de los tipos de suelo publicados por INEGI para la cuenca de estudio

ID	Drenaje Externo	% de Arcilla	% de Limo	% de Arena	Grupo de suelo
3265	4	35	31	34	Cambisol - Endoglético
3266	3	24	50	26	Cambisol - Húmico

Nota. Para el apartado de drenaje externo INEGI marca como 4 un drenaje moderado, 3 como moderadamente drenado.

Finalmente, a partir de los usos y características del suelo se asignaron los valores CN para poder obtener la ponderación final sobre la cuenca presentada en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Valores de CN asignados a las muestras y su ponderación.

ID	Uso de suelo	Grupo de suelo	% de ocupación	CN	Ponderación	CN ponderado
3265	Bosque con cobertura buena	C	86	59	50.86	60.55
3266	Agricultura – Terrenos cultivados	B	14	70	9.87	

Con los resultados anteriores se logró estimar las pérdidas por infiltración y construir los hietogramas de precipitación efectiva de cada estación (Figuras 4.10 y 4.11). La distribución a través de los hietogramas permite hacer adecuaciones para modificar la forma en que la precipitación cae, entonces, con los métodos aplicados se obtuvo una lámina de precipitación máxima para la estación Huixtla y Despoblado al centro de la tormenta con valor de 6.53 y 3.6 mm para un $Tr= 20$ años respectivamente.

A manera de comparativa y como resumen en la Tabla 4.11 se muestran los valores de precipitación efectiva para cada periodo de retorno y los valores de precipitación total junto con las pérdidas por infiltración estimadas.

Tabla 4.11 Resultados finales de la precipitación

Tr (años)	P Total (mm)	Pe (mm)	Pérdidas por infiltración (mm)	% de reducción de la precipitación
2	77.83	9.57	68.26	87.71
5	88.12	13.84	74.28	84.30
10	95.90	17.44	78.46	81.82
20	103.68	21.32	82.36	79.44
50	113.96	26.84	87.12	76.45
100	121.74	31.28	90.46	74.31

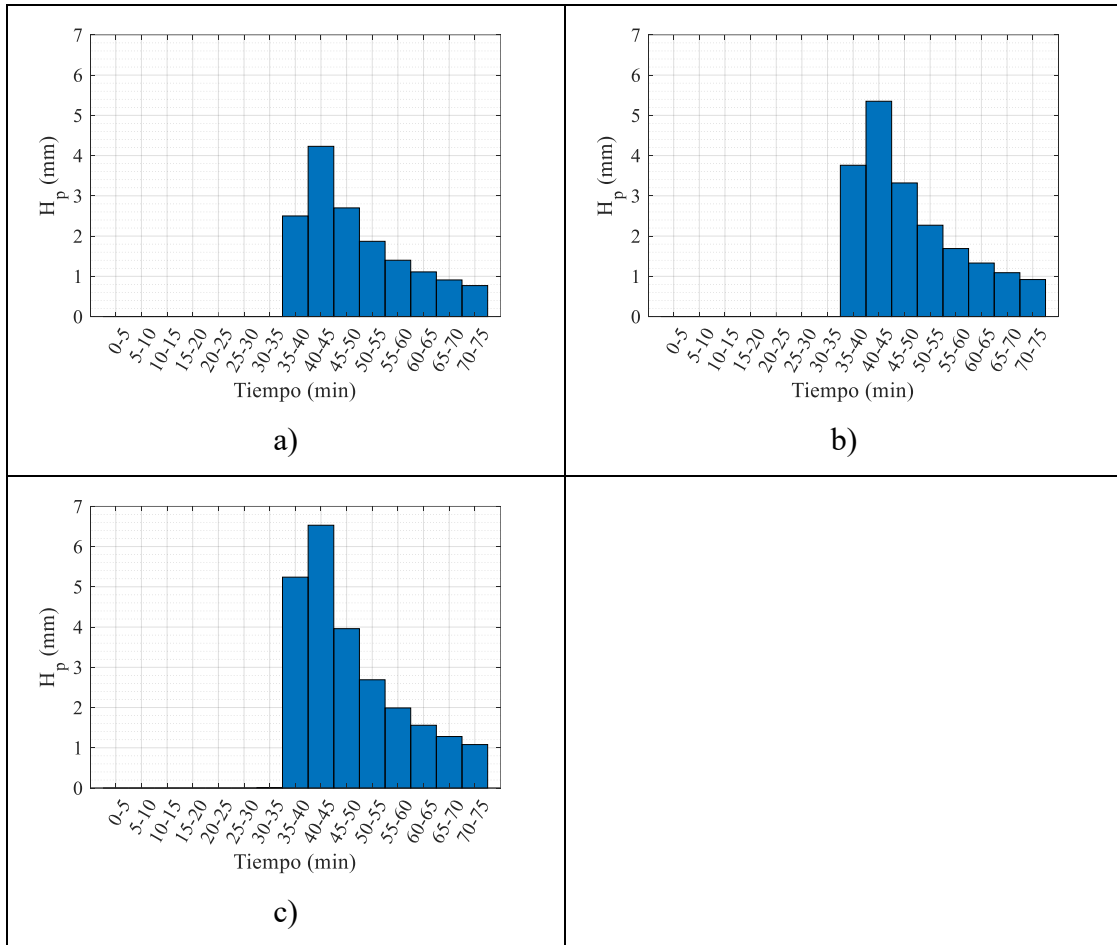


Figura 4.10 *Hietogramas de precipitación efectiva para la estación 7077-Huixtla, a) $Tr= 5$ años, b) $Tr= 10$ años y c) $Tr= 20$ años.*

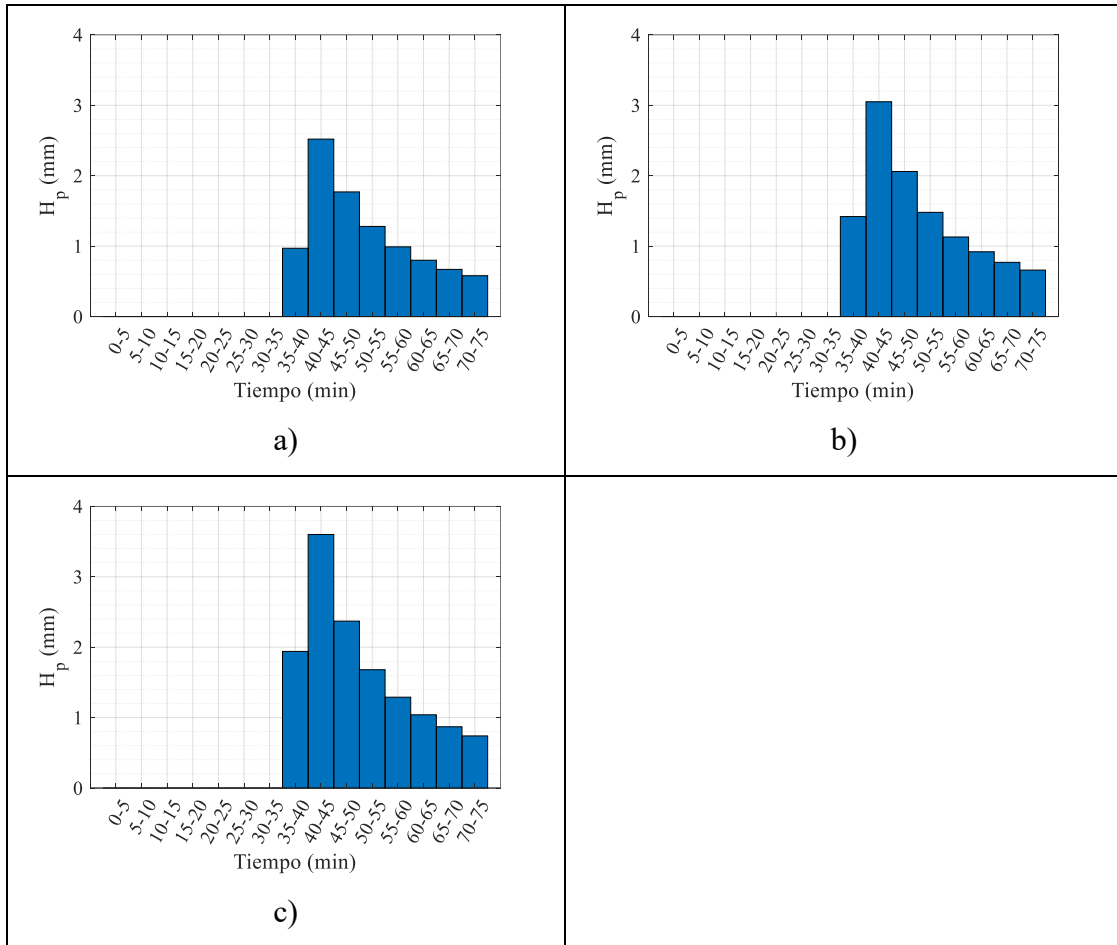


Figura 4.11 *Hietogramas de precipitación efectiva para la estación 7078-Despoblado, a) $Tr=5$ años, b) $Tr=10$ años y c) $Tr=20$ años.*

4.1.2 Hidrogramas para el tramo de estudio.

La Figura 4.12 muestra los hidrogramas correspondientes a cada periodo de retorno obtenidos aplicando la metodología del hidrograma sintético unitario del SCS. Se muestran también, los datos empleados en la Tabla 4.12 junto con la recomendación de Campos (2010) acerca del factor de reducción de área. Así mismo, en la Tabla 4.13 se muestra un resumen de los caudales máximos estimados para cada periodo de retorno con valores de 31.96, 44.22 y 65.71 m^3/s para 5, 10 y 20 años de periodo de retorno.

Tabla 4.12 *Parámetros de la cuenca utilizado en el método del hidrograma unitario sintético del SCS.*

Parámetro	Valor	Unidad
Área	27.826	km ²
Tiempo de concentración	1.39	h
Tiempo de respuesta	0.84	h
Duración en exceso	2.36	h
Tiempo pico	2.01	h
Tiempo base	5.36	h
<i>Factor de reducción de área</i>	<i>0.95</i>	<i>Adimensional</i>

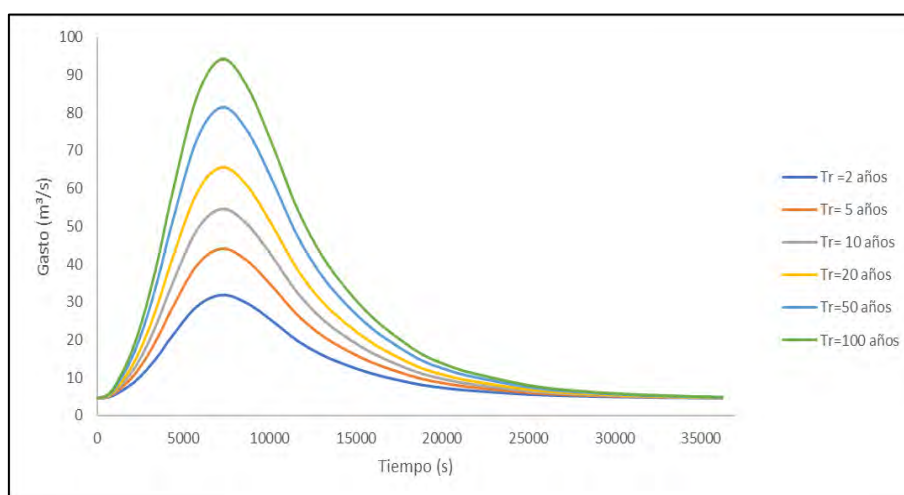


Figura 4.12 *Hidrogramas de la cuenca de estudio para cada periodo de retorno.*

Tabla 4.13 *Gastos máximos para cada Tr.*

Periodo de retorno	Gasto Máximo (m ³ /s)
2 años	31.96
5 años	44.22
10 años	54.56
20 años	65.71
50 años	81.56
100 años	94.30

4.1.3 Acabados superficiales

La rugosidad superficial equivalente empleada en las pilas para cada tipo de acabado, utilizadas en la simulación con el modelo Iber se presentan en Tabla 4.14.

Tabla 4.14 *Valores de rugosidad superficial para los diferentes acabados (Álvarez, 2022)*

Acabado	Valor “n”
Liso	0.011
Casquete Hexagonal	0.0329
Casquete Esférico	0.03

4.2 Simulación Hidrodinámica del tramo de estudio

Como parte esencial del estudio, en este apartado se presentan los resultados obtenidos mediante las simulaciones realizadas en el tramo del cauce para periodos de retorno de 5, 10 y 20 años, utilizando como condición de entrada un caudal constante correspondiente al caudal pico del hidrograma. Los resultados ilustran el comportamiento del flujo a través de mapas e imágenes, permitiendo una visualización clara de las condiciones hidrodinámicas en el cauce.

Como primera aproximación se analiza la comparación entre los resultados de la simulación efectuada considerando como entrada de flujo el caudal pico y un hidrograma completo. Esta comparación destaca la viabilidad del uso solo de caudales pico, al evidenciar similitudes sustanciales en el comportamiento del flujo. Además, se subraya que esta consideración contribuye significativamente al ahorro de recursos y a la reducción de la carga computacional.

4.2.1 Comparación de la simulación del Hidrograma Completo vs. Caudal Pico

Para comenzar la evaluación de cada escenario de simulación inicialmente se realizó una comparativa, donde se simuló el tramo de estudio para un $Tr=100$ años con la finalidad de obtener resultados de tirante y profundidad de socavación mediante el análisis comportamiento del tirante y la profundidad de socavación en la zona de interés, esto con la intención de tener

una comparativa sobre los datos presentados en la manifestación de impacto ambiental, ya que los resultados reportados por GECSSA (2003) corresponden a un estudio para $Tr=100$ años.

A continuación, se muestran la evolución temporal de la profundidad de socavación cercana a la pila P1. En la Figura 4.13 se muestra la ubicación del punto sobre el cual se evaluaron los resultados de las variables de tirante y socavación. En contraste, en las Figuras 4.14 y 4.15 se muestra el comportamiento de la profundidad de flujo (tirante) y en el tiempo en el punto seleccionado. Donde se muestra el tirante alcanzan valores de hasta 3.51 m. aproximadamente, mientras que los resultados de la profundidad de socavación alcanzan valores máximos de hasta 1.46 m.

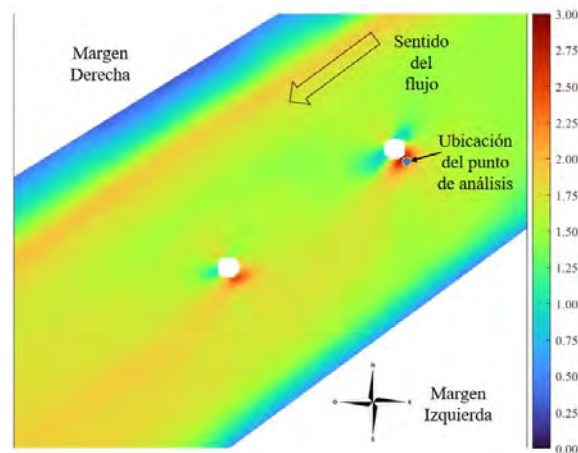


Figura 4.13 Ubicación del punto de análisis de la evolución temporal del tirante y profundidad de socavación

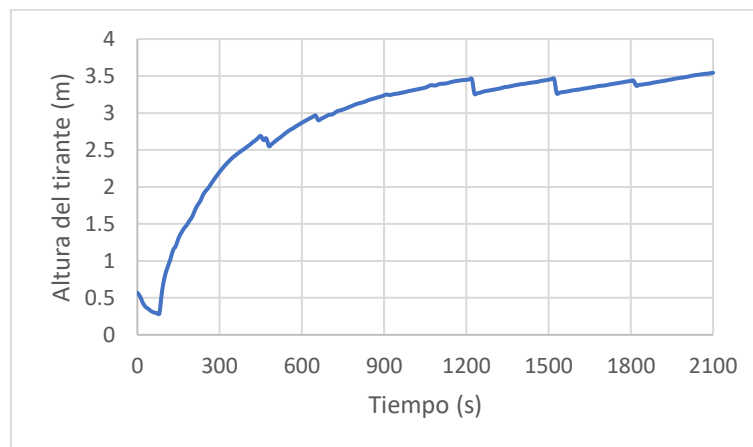


Figura 4.14 Evolución del tirante en el punto de análisis a través del tiempo de simulación para $Tr=100$ años para un acabado superficial liso

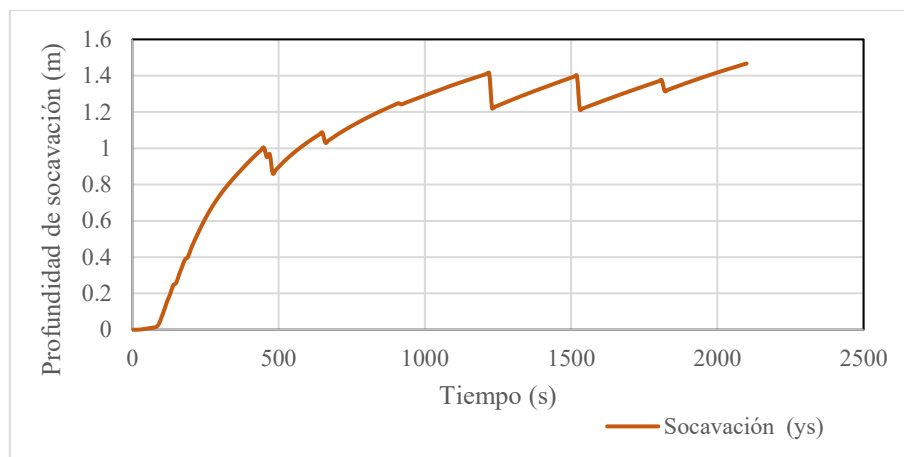


Figura 4.15 Evolución de la profundidad de socavación local en el punto de análisis a través del tiempo de simulación para $Tr=100$ años para un acabado superficial liso

Mientras que, en la Tabla 4.15 se muestra la comparativa entre valores y la diferencia porcentual de los resultados obtenidos con la simulación y los datos reportados en la manifestación de impacto ambiental por parte de GECSSA (2003), cabe aclarar que se calculó un tirante promedio con el levantamiento transversal de la sección del río mostrada en la manifestación ya que el fondo levantado presentaba irregularidades.

Tabla 4.15 Comparación de los valores de tirante y socavación simulados respecto a los valores presentados en la manifestación de impacto ambiental

Variable	Simulación	Manifestación	% de Diferencia
Tirante (m)	3.51	4.0	13.96
Profundidad de socavación local (m)	1.46	1.63	11.64

La comparativa de ambos escenarios radica en al menos un 13.96 % para el tiempo de simulación planteado, es claro que si se continua con más tiempo es muy probable que se alcance la profundidad de socavación reportada en la manifestación. Además, si se desea reducir esta diferencia se puede ajustar un mallado más fino, trabajar con los usos de suelo del programa o bien ajustar la sección del cauce.

Respecto a la comparativa del comportamiento de los tirantes a lo largo del tramo en estudio, para las condiciones de flujo de entrada (hidrograma completo y caudal pico) para un $Tr=20$

años, los resultados para el tirante y la velocidad se muestran en las Figura 4.16 y la Figura 4.17 respectivamente.

Según, la Figura 4.16 el comportamiento de los tirantes en ambos escenarios resulta ser muy similar ya que en las curvas los tirantes suelen ser mayores y este comportamiento se presenta en ambos escenarios. En general en la mayor parte del tramo el valor del tirante máximo es en promedio 1.52 m para el hidrograma completo (Figura 4.16a), mientras que, para el caudal pico es de 1.45 m (Figura 4.16b), presentando una diferencia porcentual de 4.61%. Lo que demuestra que se puede simular solo el caudal pico.

Respecto al comportamiento de la velocidad, en la Figura 4.17 se observa que en ambos casos se tiene un comportamiento de la velocidad bastante similar. Los valores de velocidad máximos cercanos a la zona de pilas es en promedio de 2.68 m/s para la simulación del hidrograma completo (Figura 4.17a) y de 2.71 m/s para para la simulación del caudal pico (Figura 4.17b), lo que resulta que en ambos escenarios la distribución general de velocidades se mantiene prácticamente igual. A manera de resumen se muestra la Tabla 4.16 con resultados generales en la zona de las pilas.

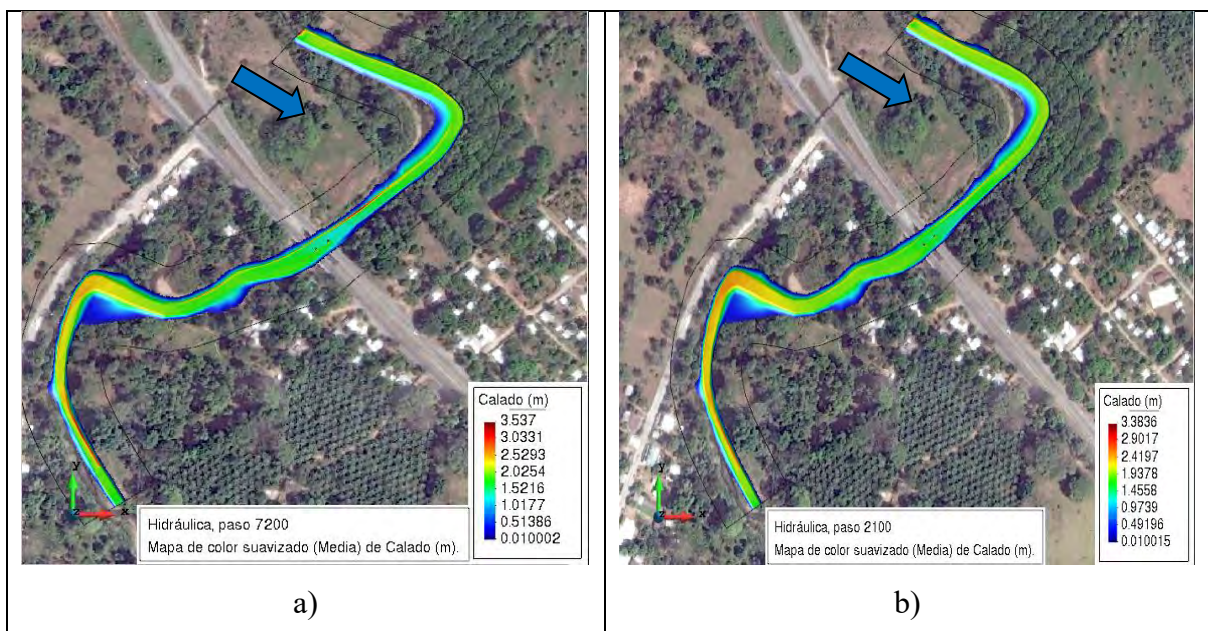


Figura 4.16 Comportamiento de la profundidad del flujo (tirante) en el tramo en estudio para un $Tr= 100$ años, a) Hidrograma completo y b) Caudal pico

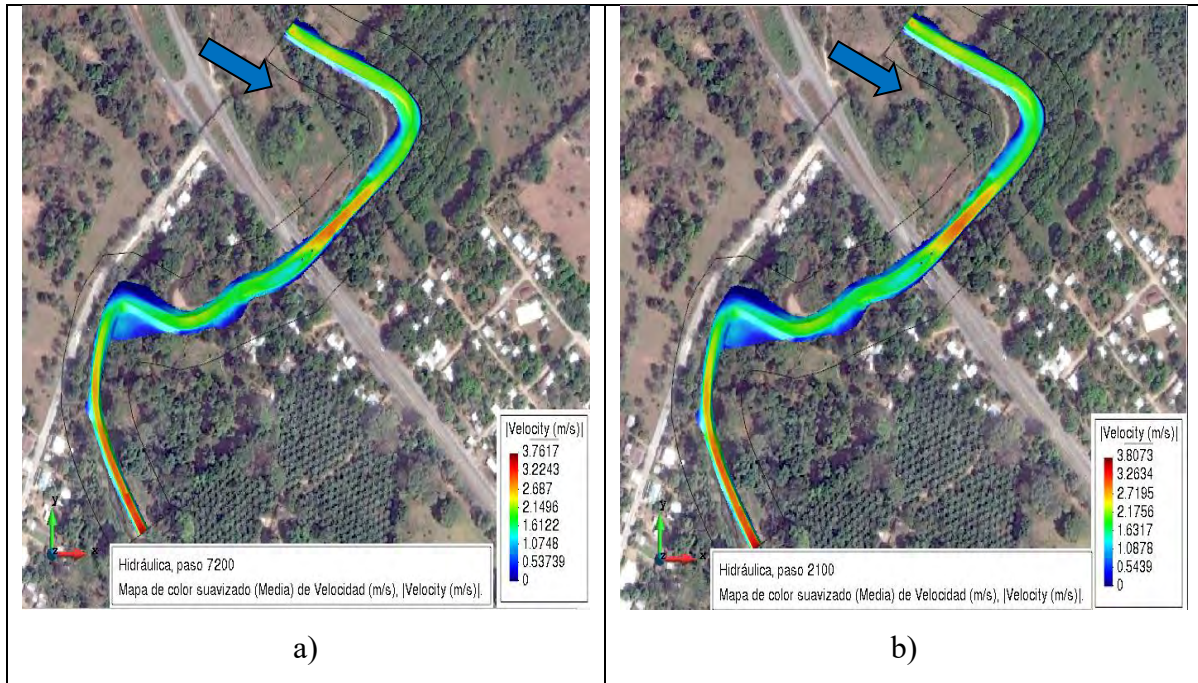


Figura 4.17 Comportamiento de la velocidad en el tramo en estudio para un $Tr= 100$ años. a) Hidrograma completo y b) Caudal pico

Tabla 4.16 Resultados generales en la zona de pilas

Escenario	Tirante y (m)	$V_{m\acute{a}x}$ (m/s)
Hidrograma completo	1.52	2.68
Gasto Pico	1.45	2.71

Los resultados de la Tabla 4.16 indican que la diferencia entre los dos escenarios para los valores de tirantes en la zona de pilas es de únicamente el 4.61% y para velocidades se reduce al 2.71 %. La explicación del por qué, se realizó la comparativa del comportamiento hidrodinámico del flujo en la zona del puente, se debe en gran parte a que existe una reducción del ancho del cauce, lo cual ocasiona que el flujo impacte de forma acelerada en las pilas produciendo cambios de dirección, de velocidad, tirante y erosión (Figura 4.18). Sin embargo, los resultados demuestran que se puede utilizar en las simulaciones solo el caudal pico, no afectando en los resultados del comportamiento hidrodinámico.

Esta observación permitió identificar un desfase entre la trayectoria del flujo con la primera pila, ocasionando que los resultados se presenten de diferente manera en las simulaciones

hidrodinámicas y de transporte de sedimentos, lo cual representaría el comportamiento no controlado de un caso real.



Figura 4.18 Reducción del ancho del cauce antes de entrar en la zona de pilas.

Además, en la Figura 4.19 se presentan los valores de profundidad de flujo (tirante) obtenidos en la zona del puente, en donde se destaca una correspondencia espacial de los valores máximos condicionados por el nivel de erosión en la margen derecha para la simulación ejecutada con el hidrograma completo, sin embargo, la correspondencia alrededor de la pila se considera aceptable.

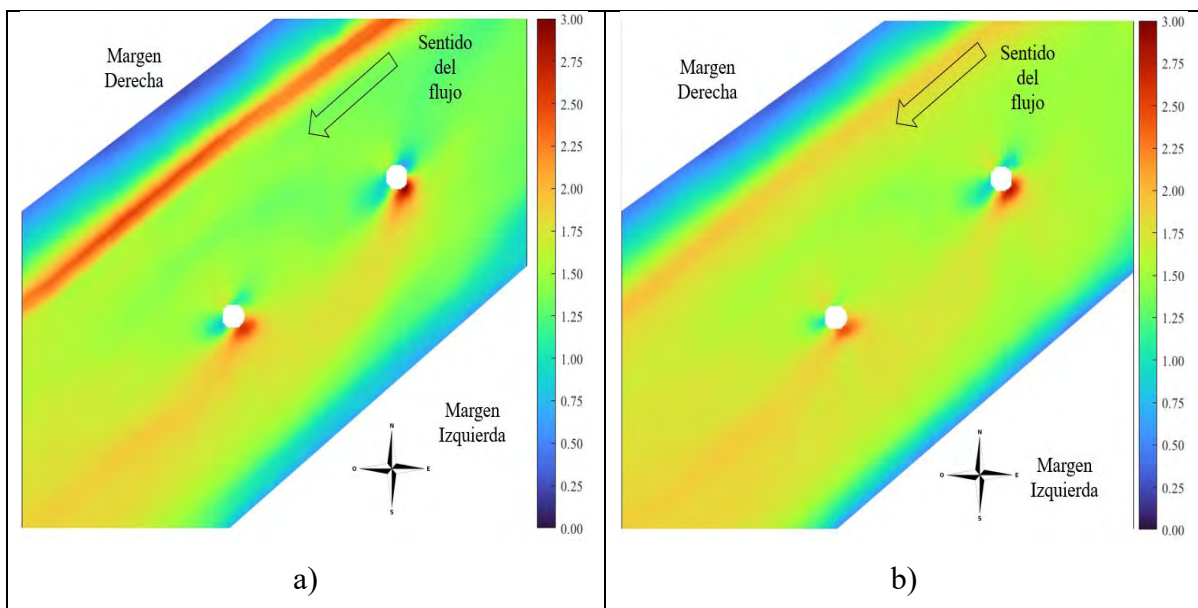


Figura 4.19 Comportamiento de la profundidad del flujo (Tirante -m-) en zona de pilas para un periodo de retorno $Tr=20$ años a) Hidrograma completo y b) Caudal pico

Por otra parte, en la Figura 4.20 se muestran los resultados para velocidad en la zona de pilas, observando para ambos casos el campo se ve afectado de forma similar al encontrarse con las pilas en términos de espacialidad y magnitud.

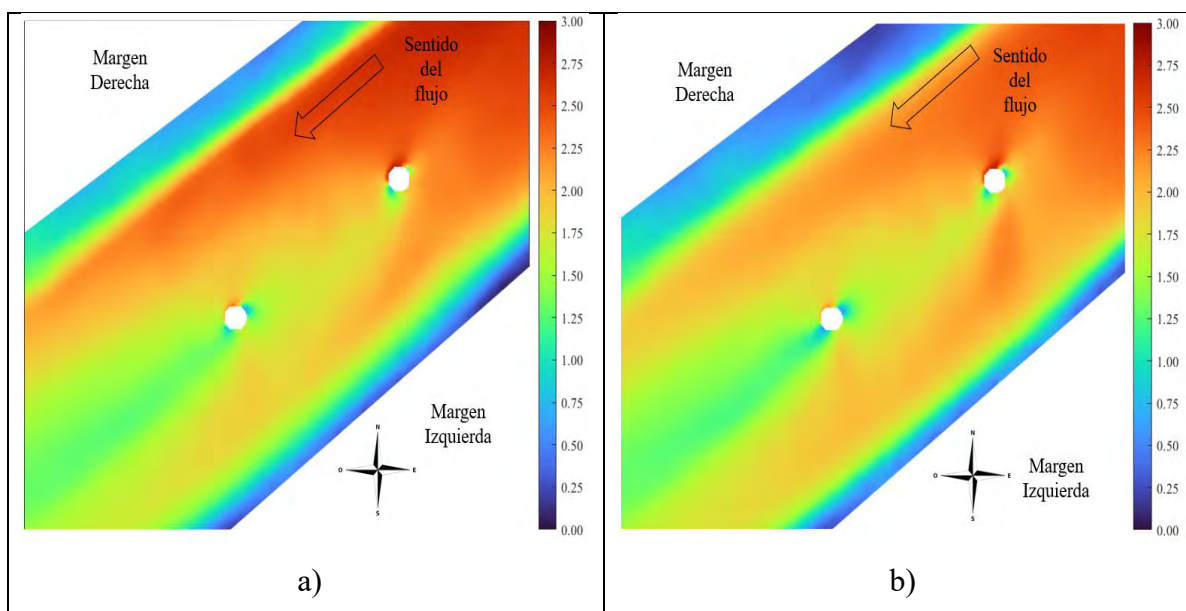


Figura 4.20 Comportamiento de la velocidad (m) en la zona de pilas para un periodo de retorno de $Tr=20$ años a) Hidrograma completo y b) Caudal pico

Respecto con los resultados obtenidos al evaluar los niveles de erosión estos se muestran en la Figura 4.21. Donde se puede observar como el fenómeno de erosión (valores positivos) se presenta sobre la margen derecha del cauce y alrededor de las pilas del puente presentando valores máximos de hasta 1.53 m. para el hidrograma completo y de 1.33 m para el caudal pico. Destacando en la simulación la presencia de zonas donde existe depósito de sedimentos (valores negativos) al pie de la margen izquierda y en zonas de flujo muerto alrededor de la pila.

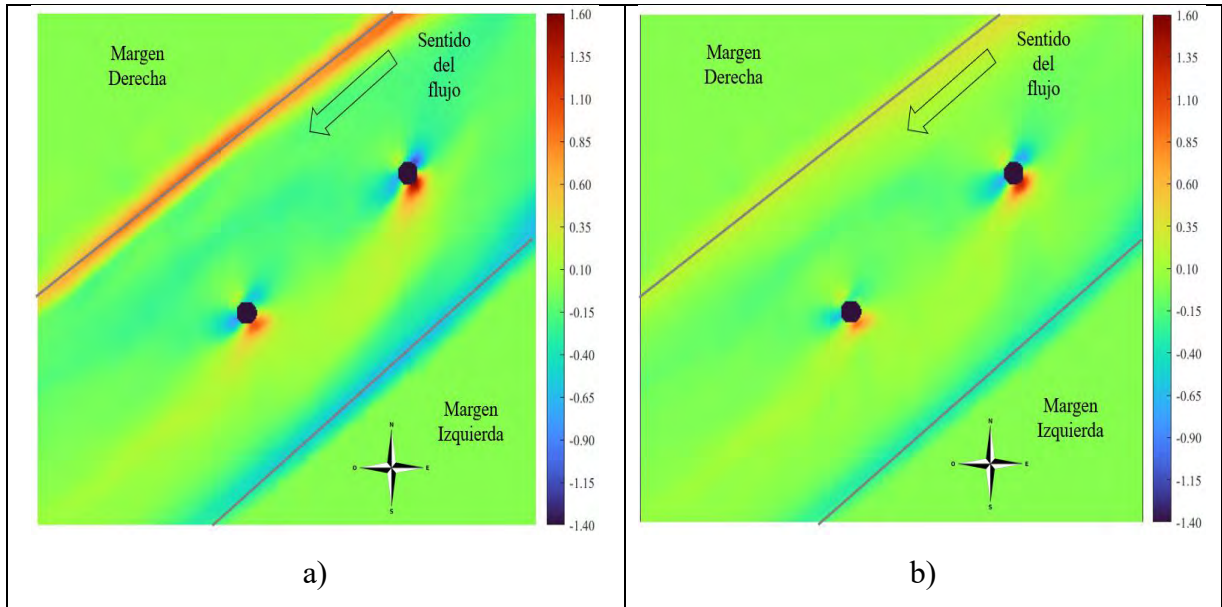


Figura 4.21 Mapas de erosión (m) en la zona de pilas para un periodo de retorno de $Tr=20$ años
a) Hidrograma completo y b) Caudal pico

Así, a manera de resumen se presenta en la Tabla 4.17 de forma general los valores promedio de cada variable analizada tanto para el Hidrograma completo como para el caudal pico solamente.

Tabla 4.17 Variables hidrodinámicas y de erosión obtenidas en los escenarios evaluados

Escenario	Velocidad máxima (m/s)	Tirante máximo (m)	Socavación máxima (m)	Deposito máximo (m)
Hidrograma completo	3.15	3.31	1.53	1.51
Caudal Pico	2.81	2.85	1.33	1.34

La comparativa final destaca la diferencia que hay entre el hidrograma pico respecto al hidrograma completo estos resultados se muestran de forma resumida en la Tabla 4.18. Se puede concluir entonces que el comportamiento del caudal pico en comparación con el hidrograma completo resulta ser bastante similar en términos de la magnitud alcanzada en las variables analizadas, ya que en las zonas donde hay cambios de dirección y estrechamiento las manchas de velocidad y tirante son muy similares, además de que la distribución de estas se respeta entre un modelo y otro. Complementando la información anterior se muestran los tiempos de cálculo computacional en la Tabla 4.19 donde se observa que la simulación solo del caudal pico reduce

el tiempo de cálculo en un 82 % y la diferencia de los resultados es de menos del 15% lo que demuestra que es factible solo simular el caudal pico sin afectar considerablemente los resultados.

Tabla 4.18 *Diferencia en porcentaje de los resultados del caudal pico respecto al hidrograma completo*

Variable	% de Diferencia respecto al hidrograma completo
Velocidad	10.79
Tirante	13.90
Deposito	11.26
Socavación	13.07

Tabla 4.19 *Tiempo de cómputo requerido para los escenarios de simulación evaluados*

Hidrograma Completo		Caudal Pico	
Tiempo de carga del modelo=	1.65 s	Tiempo de carga del modelo=	1.57 s
Tiempo escritura resultados=	0.00 s	Tiempo escritura resultados=	0.00 s
Tiempo neto de computación=	13004.23 s	Tiempo neto de computación=	2280.73 s
Tiempo total de computación=	13005.88 s	Tiempo total de computación=	2282.30 s

Se observa que la diferencia entre un tiempo y otro es muy grande ya que en el hidrograma completo se tiene un tiempo de simulación equivalente a 3 horas en contraste con los 38.04 minutos requeridos para la simulación del caudal pico. Donde se resalta que los tiempos de cómputo indican que el proceso de una simulación con hidrograma completo equivale a seis simulaciones con hidrograma pico.

Las simulaciones comparativas también indican que el flujo choca con la primera pila con un cierto ángulo de ataque (Figura 4.22), ese ángulo se debe principalmente a los cambios de dirección que hay antes de llegar a la zona y por el estrechamiento que sufre forzando un redireccionamiento del flujo y erosión sobre la margen derecha.

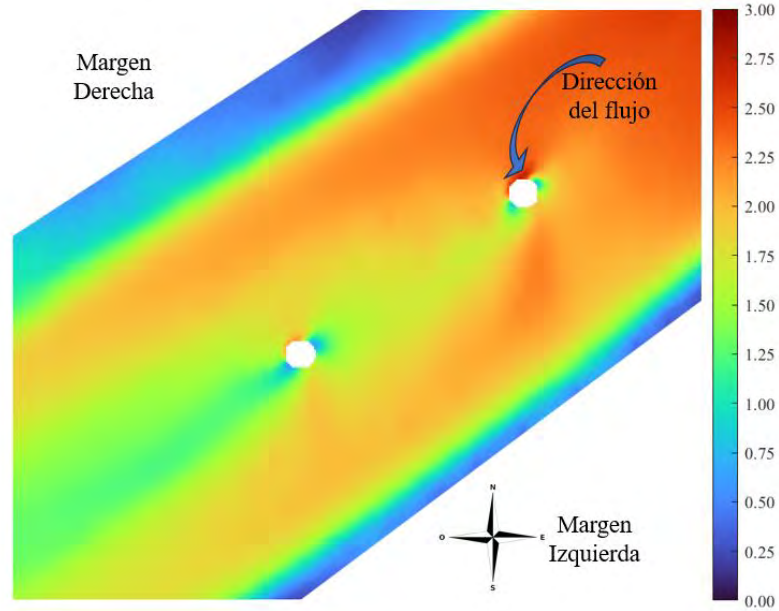


Figura 4.22 *Ataque del flujo en la pila uno.*

Este cambio de dirección beneficia a la segunda pila, por lo que se esperaría que esta última sufra efectos con menor magnitud debido a que la pila uno actúa como un dissipador de flujo debido a la división del flujo. Así mismo, se observa en las Figuras 4.19 y 4.20 que los márgenes sufren valores altos de velocidad y socavación debido al comportamiento del flujo descrito. Sin embargo, el análisis de estas variables se mantiene solamente al pie de las pilas por ser este el objetivo del estudio.

Considerando que las diferencias que hay entre un escenario y otro no son altas y que en esencia el comportamiento del flujo en ambos es muy similar, se optó por hacer los análisis hidrodinámicos y de transporte de sedimentos empleando solo los caudales pico. Sumado a esto se considera también que el hecho de realizar las simulaciones con un hidrograma completo no afecta en gran medida el propósito de la investigación que es demostrar la utilidad de los acabados superficiales en reducción de la profundidad de socavación.

Para la simulación de los escenarios de análisis propuestos se empleó un tiempo de 2100 s con resultados a cada 100 s. A lo largo de este periodo de tiempo el caudal que transcurre es el máximo correspondiente a cada periodo de retorno T_r . Las configuraciones para cada escenario se presentan en la Tabla 4.19.

Tabla 4.20 *Condiciones de simulación para cada periodo de retorno.*

Periodo de retorno	Gasto máximo (m³/s)	Tiempo de simulación (s)
5 años	44.22	2100
10 años	54.56	2100
20 años	65.71	2100

4.2.2 Simulaciones hidrodinámicas

Para este apartado se consideraron dos variables importantes en el procedimiento de socavación que son los valores de velocidad y tirante presentes en el tramo, se muestran mapas de ambas variables para los acabados: liso, casquete hexagonal y casquete esférico, los cuales dan un panorama general de los valores máximos alcanzados y de su ubicación espacial en el dominio de análisis. Finalmente se presenta una discusión de las magnitudes obtenidas para cada una de las variables obtenidas para cada escenario simulado.

4.2.2.1 Resultados de la simulación de pilas con acabado Liso

Para esta condición se asignó un valor de rugosidad a la pila $n = 0.011$ determinado como concreto bien terminado, a continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada periodo de retorno de la velocidad, tirante y erosión (socavación).

4.2.2.1.1 Velocidad

La Figura 4.23 presenta el comportamiento de la velocidad en la zona de pilas para los diferentes periodos de retorno simulados, considerando pilas con acabado liso. Los resultados muestran que los rangos de velocidad aumentan conforme cambia el periodo de retorno y la pila 1 (P_1) es la que tiene mayor impacto en comparación con la pila 2 (P_2).

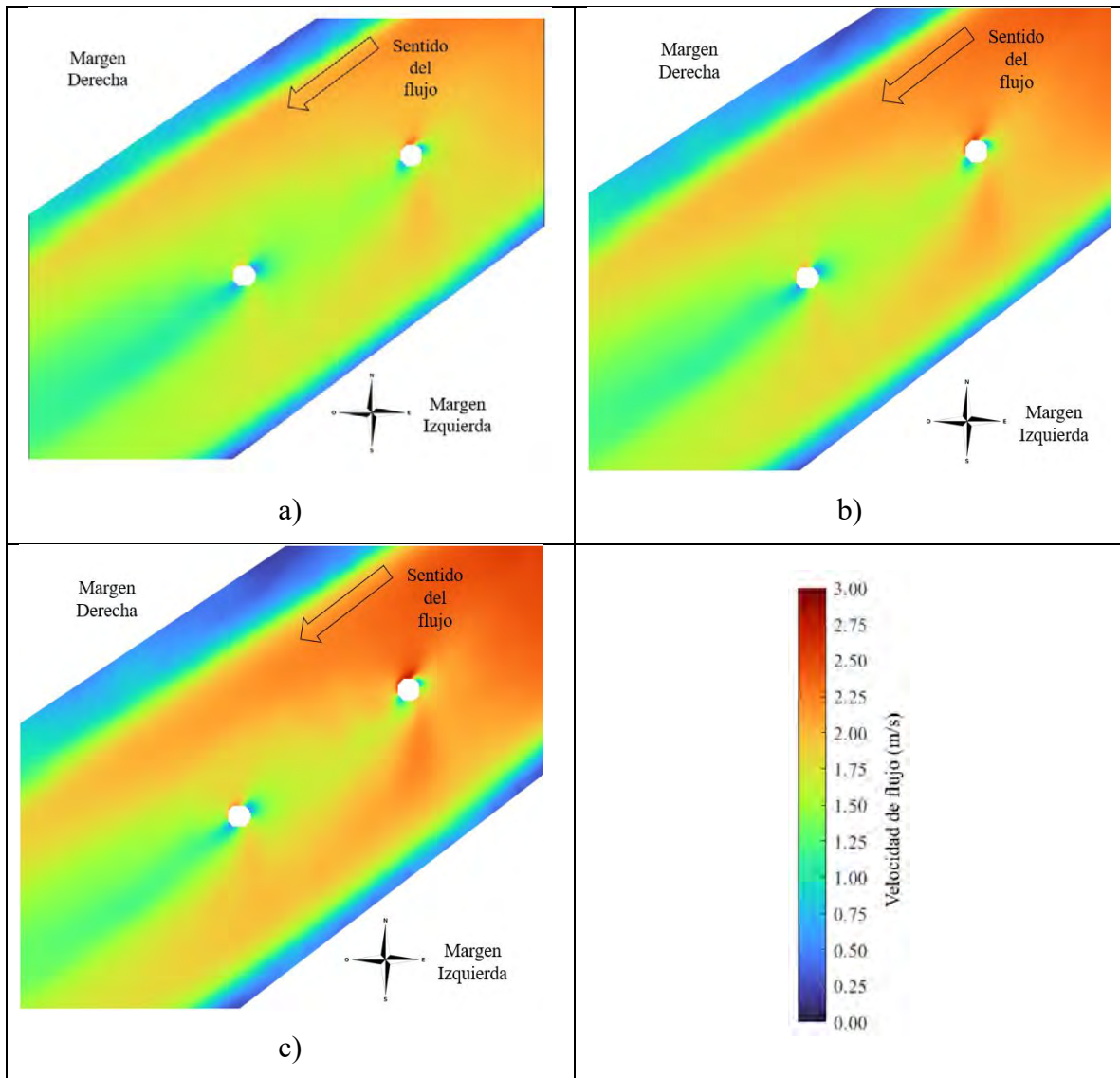


Figura 4.23 Comportamiento de la velocidad (m/s) en zona de pilas con acabado liso, a) $Tr=5$ años, b) $Tr=10$ años, c) $Tr=20$ años.

4.2.2.1.1 Profundidad del flujo (tirante)

La Figura 4.24 se presenta el comportamiento de los tirantes en la zona de pilas, para las pilas con acabado liso en los diferentes periodos de retorno, resaltando que los valores de los tirantes son mayores en la lateral izquierda de la pila y que esta magnitud es muy similar para ambas pilas.

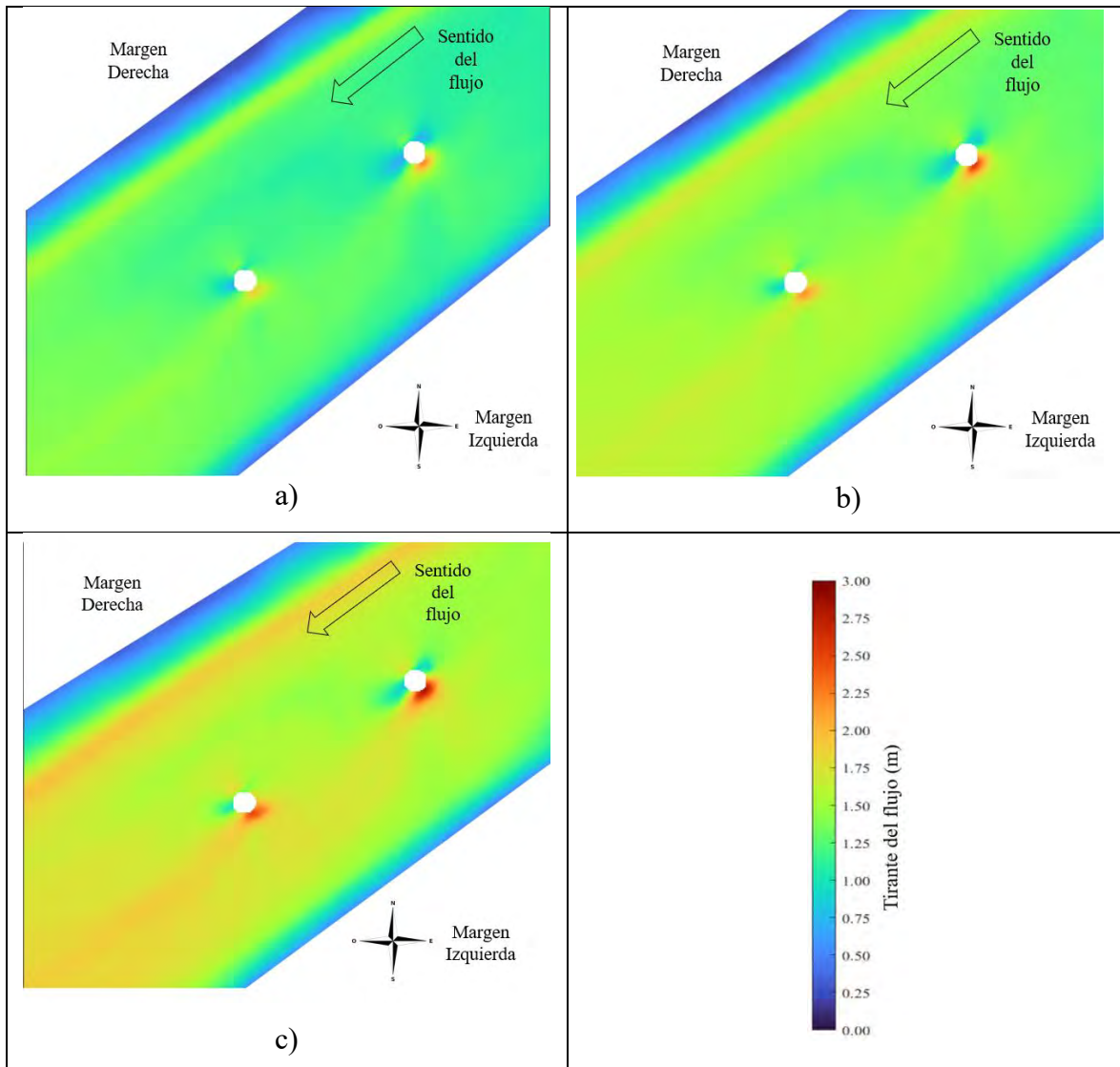


Figura 4.24 Comportamiento de la profundidad del flujo (tirante -m-) en zona de pilas con acabado liso para diferentes periodos de retorno, a) $Tr = 5$ años, b) $Tr = 10$ años, c) $Tr = 20$ años.

4.2.2.2 Resultados de la simulación de pilas con acabado rugoso (casquete hexagonal)

En este acabado el valor de la rugosidad asignada a las pilas fue de 0.0329, siendo aproximadamente tres veces más rugoso que el acabado liso.

4.2.2.2.1 Velocidad

La Figura 4.25 presenta los valores de velocidad en la zona de pilas, para pilas con acabado superficial en casquete hexagonal para los diferentes periodos de retorno, donde puede

observarse que los rangos de velocidad disminuyeron alrededor y cercanías de la pila en comparación con el acabado liso

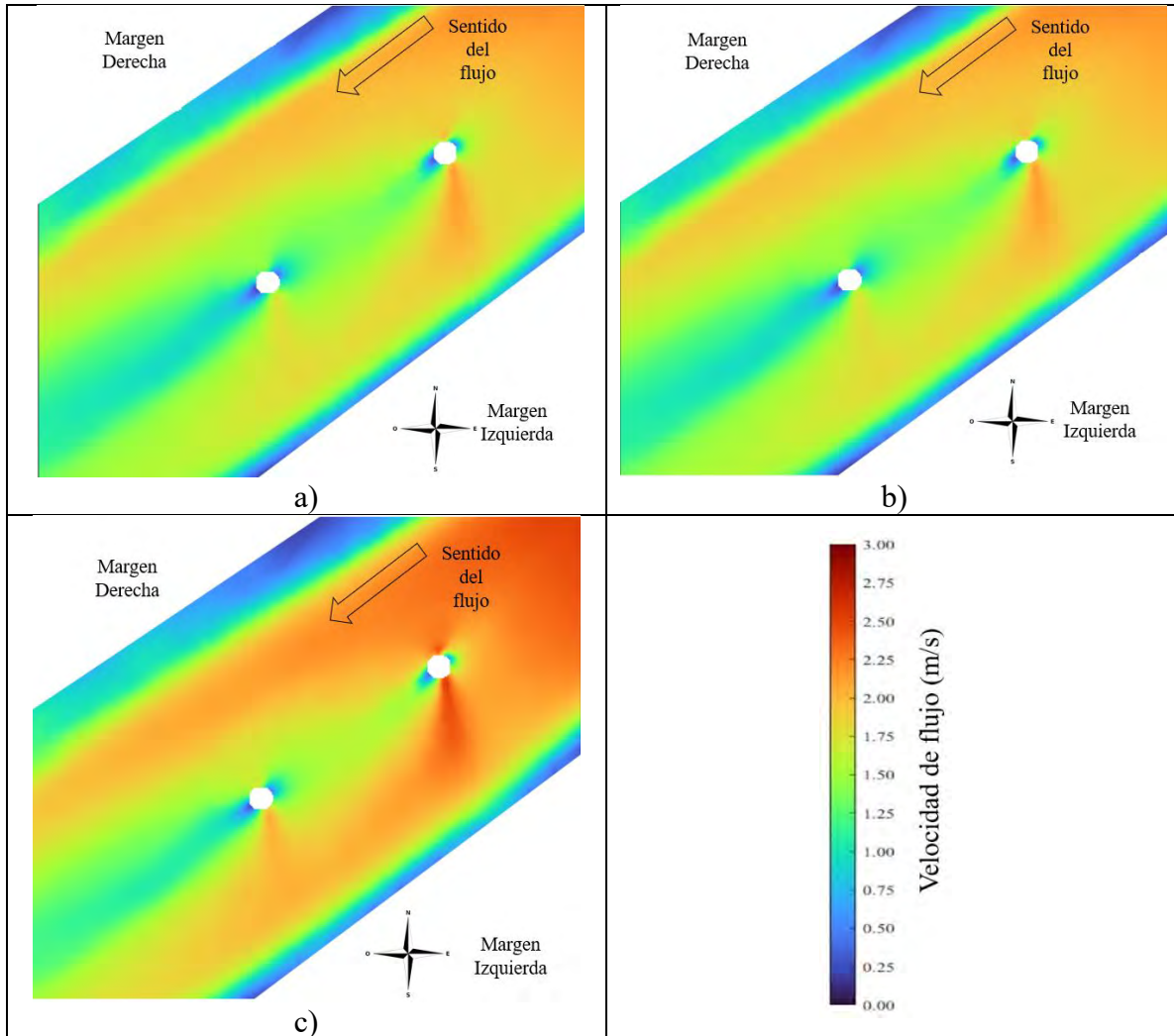


Figura 4.25 Comparación de la velocidad en zona de pilas con acabado superficial en casquete hexagonal para diferentes periodos de retorno, a) $Tr = 5$ años, b) $Tr = 10$ años, c) $Tr = 20$ años.

4.2.2.2.1 Profundidad del flujo (tirante)

En la Figura 4.26 se presenta los valores de los tirantes en la zona de pilas, para las pilas con acabado superficial en casquete hexagonal para los diferentes periodos de retorno. En ella se observa que los valores máximos tienen un área más pequeña en comparación con el acabado liso y con una disipación más drástica.

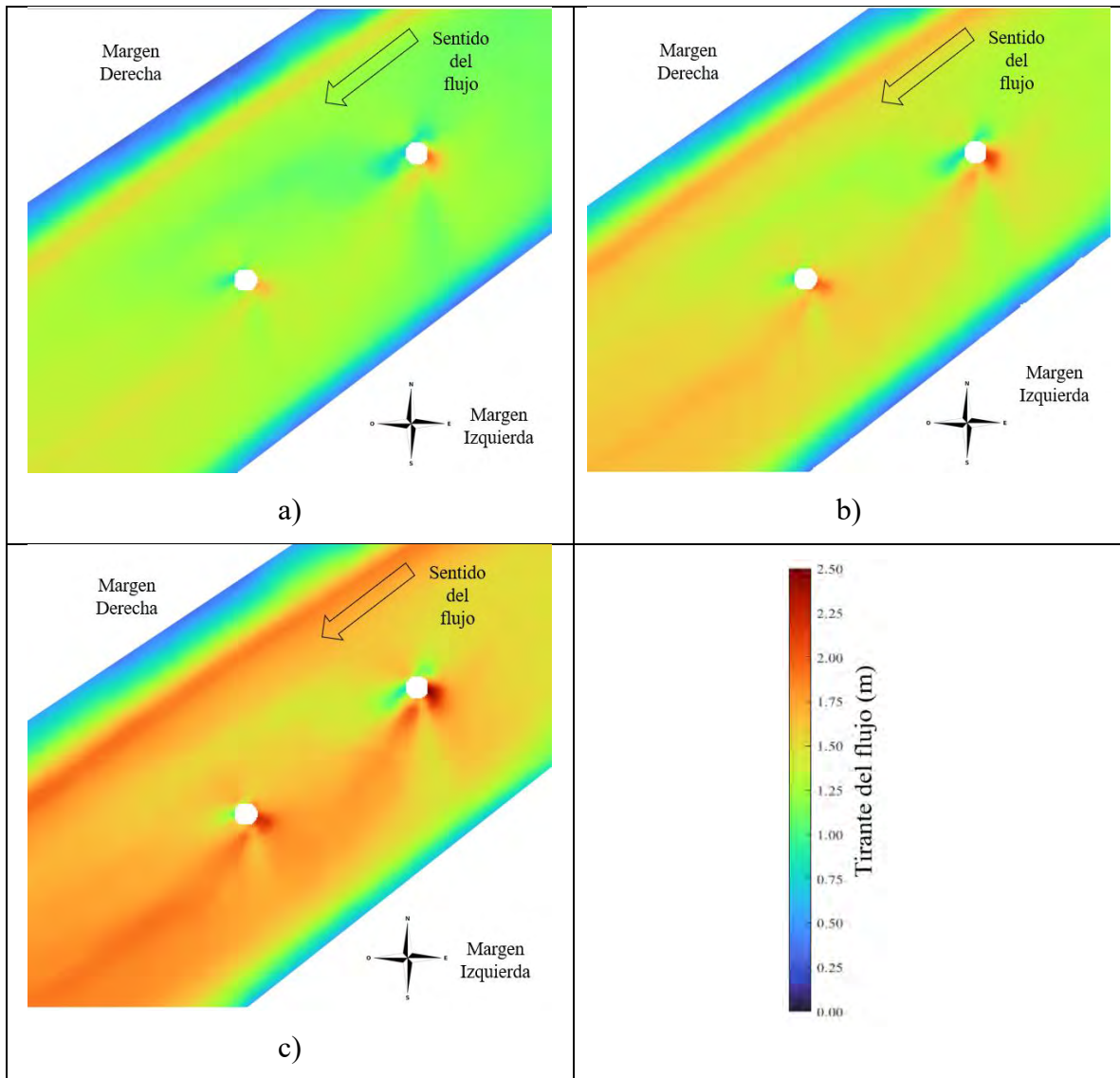


Figura 4.26 Comportamiento de la profundidad del flujo (tirante) en la zona de pilas con acabado superficial en casquete hexagonal para diferentes periodos de retorno, a) $Tr= 5$ años, b) $Tr= 10$ años, c) $Tr = 20$ años.

4.2.2.3 Resultados de la simulación de pilas con acabado rugoso (casquete esférico)

En este acabado el valor de la rugosidad asignada a las pilas fue de 0.03, siendo aproximadamente 2.79 veces más rugoso que el acabado liso.

4.2.2.3.1 Velocidad

La Figura 4.27 presenta los valores de velocidad en la zona de pilas considerando un acabado superficial de tipo casquete esférico para los diferentes periodos de retorno, resaltando que los rangos de velocidad disminuyen más en valor y en área de ocupación en comparación con los acabados liso y hexagonal.

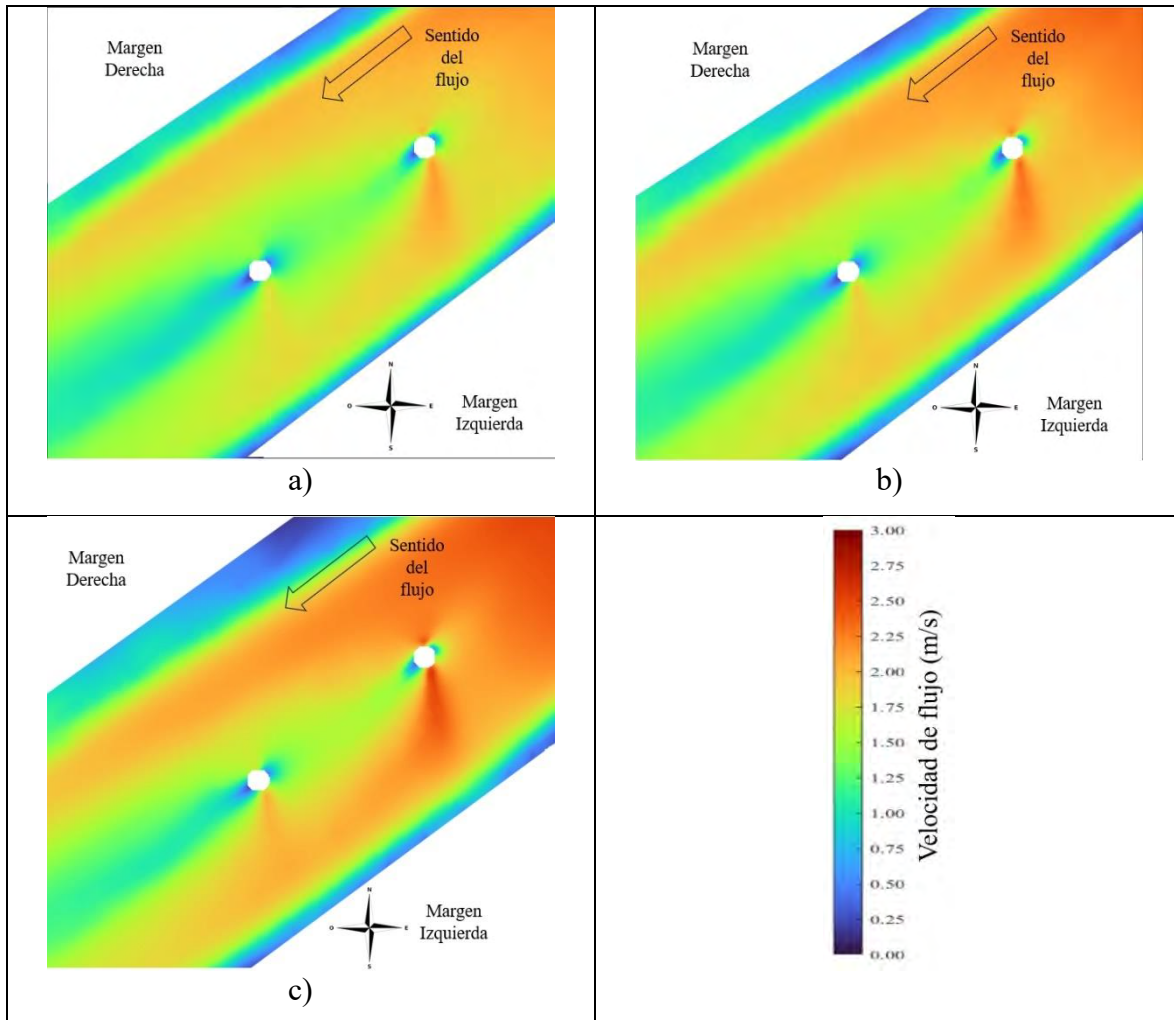


Figura 4.27 Comparación de la velocidad en zona de pilas con acabado superficial en casquete esférico para diferentes periodos de retorno, a) $Tr = 5$ años, b) $Tr = 10$ años, c) $Tr = 20$ años.

4.2.2.3.1 Profundidad del flujo (tirante)

La Figura 4.28 presenta los valores de los tirantes en la zona de pilas, para las pilas con acabado superficial tipo casquete esférico para los diferentes periodos de retorno, resaltando que las manchas de valores máximos se disipan de mejor forma comparado con las pilas con acabado liso.

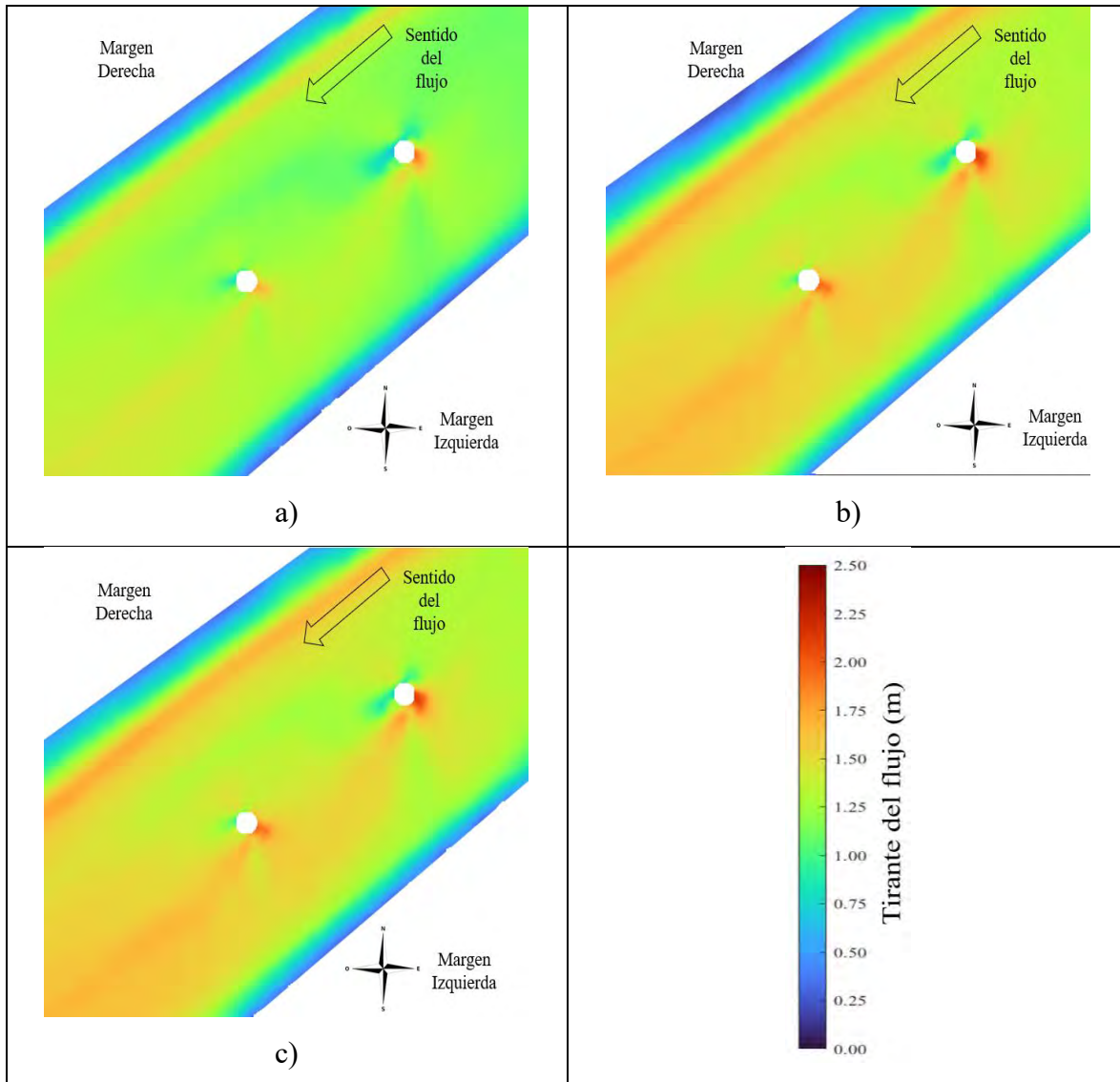


Figura 4.28 Comportamiento de la profundidad del flujo (tirante) en la zona de pilas con acabado superficial en casquete esférico para diferentes periodos de retorno, a) $Tr = 5$ años, b) $Tr = 10$ años, c) $Tr = 20$ años.

4.2.2.2 Comparativa de resultados de simulaciones hidrodinámicas

A manera de resumen la Tabla 4.21 muestra los valores de velocidad y tirante en la pila 1 para los diferentes acabados analizados y los diferentes periodos de retorno. Los valores indican que se obtienen beneficios hidrodinámicos si se incorpora una rugosidad superficial en la pila.

Tabla 4.21 *Tabla resumen de parámetros hidrodinámicos en la pila 1.*

Tr (años)	Velocidad Máxima (m/s)			Tirante Máximo (m)		
	Acabado liso	Acabado Hexagonal	Acabado Esférico	Acabado liso	Acabado Hexagonal	Acabado Esférico
5	2.55	2.24	2.22	2.18	1.95	1.94
10	2.73	2.39	2.38	2.54	2.17	2.14
20	2.87	2.49	2.48	2.77	2.51	2.39

De igual forma en la Tabla 4.22 se muestra las diferencias relativas obtenidas para cada acabado analizado con respecto al acabado liso en la pila 1. Donde se observa que en promedio para el acabado hexagonal las velocidades se reducen en promedio un 12.6 %, mientras que, para el acabado esférico las reducciones son del 13.1 %. Para los tirantes el acabado hexagonal presenta una reducción promedio del 11.5 % y el esférico un 13.5 %. Siendo el acabado esférico aquel que mayor beneficio aporta en este caso de estudio.

Tabla 4.22 *Porcentaje de reducción de valores hidrodinámicos con acabados superficiales en pila 1 respecto a pila lisa.*

Tr (Años)	Velocidad (%)		Tirante (%)	
	Acabado hexagonal	Acabado esférico	Acabado hexagonal	Acabado esférico
5	12.2	12.9	10.6	11
10	12.5	12.8	14.6	15.7
20	13.2	13.5	9.4	13.7

De igual forma en la Tabla 4.23 muestra los valores de velocidad y tirante en la pila 2 para los diferentes acabados analizados. Los valores indican que se obtienen beneficios hidrodinámicos si se incorpora una rugosidad superficial en la pila.

Tabla 4.23 *Tabla resumen de parámetros hidrodinámicos en pila 2.*

Tr (años)	Velocidad Máxima (m/s)			Tirante Máximo (m)		
	Acabado liso	Acabado Hexagonal	Acabado Esférico	Acabado liso	Acabado Hexagonal	Acabado Esférico
5	1.80	1.79	1.77	2.18	1.95	1.94
10	2.13	1.88	1.89	2.54	2.17	2.14
20	2.28	1.95	1.95	2.77	2.51	2.39

Para la pila 2 la Tabla 4.23 de primera instancia se observa que los valores alcanzados en esta pila son muy reducidos en comparación con la pila 1 ya que esta última funciona como un dissipador de estos efectos en la pila 2. Finalmente, la Tabla 4.24 muestra una comparativa de las diferencias relativas obtenidas con respecto al acabado liso en la pila 2. Los resultados muestran que para las pilas con acabado superficial tipo hexagonal, las velocidades se reducen en promedio un 8.9 % y para tirantes un 11.5 % respecto a la pila con acabado liso. Mientras que, para las pilas con acabado superficial tipo esférico las reducciones de velocidad son en promedio 9.1 % y para tirantes un 13.5 %. Esto demuestra que el mejor comportamiento hidrodinámico se presenta cuando se incorpora un acabado tipo esférico.

Tabla 4.24 *Porcentaje de reducción de valores hidrodinámicos con acabados superficiales en pila 2 respecto a pila lisa.*

Tr (años)	Velocidad (m/s)		Tirante (m)	
	Acabado hexagonal	Acabado esférico	Acabado hexagonal	Acabado esférico
5	0.6	1.7	10.6	11.0
10	11.7	11.3	14.6	15.7
20	14.5	14.5	9.4	13.7

4.3 Resultados de la erosión para las pilas con acabado liso

Inicialmente se ha manejado erosión y socavación de forma diferente, sin embargo, los resultados de las simulaciones arrojan valores tanto de sedimentación como de socavación, por lo cual se hace la aclaración de que, en la escala presentada los valores que tienen signo (-) representan un depósito y aquellos que tienen signo (+) representan erosión (socavación).

A continuación, se muestran los mapas de erosión correspondientes a los periodos de retorno de 5, 10 y 20 años en la condición de pila lisa (Figura 4.29 a Figura 4.31) ya que al encontrarse valores negativos estos representan los depósitos de sedimentos, principalmente en las márgenes del cauce y en algunas zonas cercanas a las pilas.

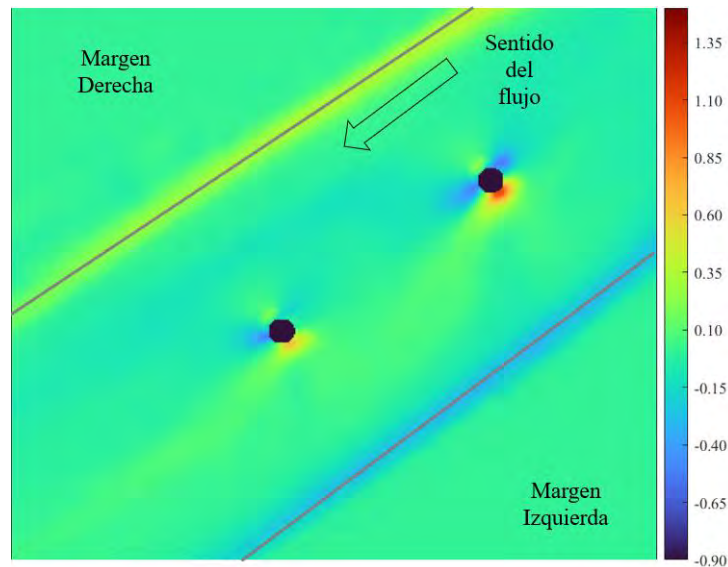


Figura 4.29 Mapa de erosión (m) en la zona de pilas con acabado liso para un periodo de retorno de $Tr= 5$ años donde los valores positivos son socavación (+) y negativos depósito (-).

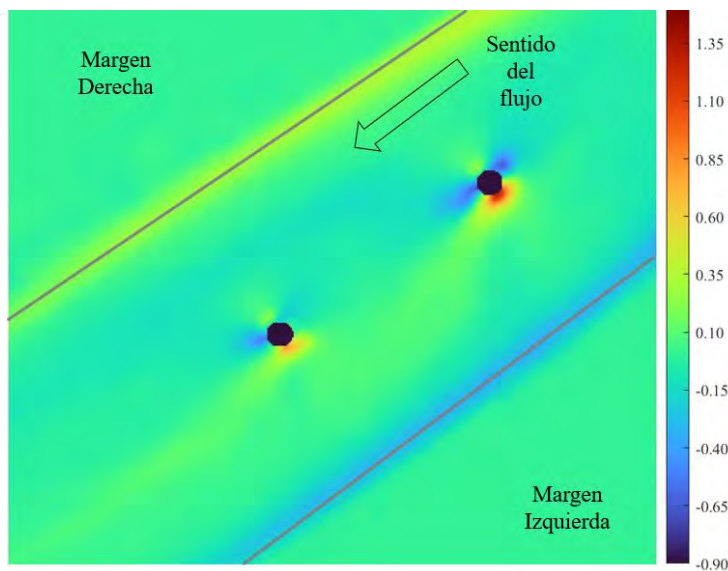


Figura 4.30 Mapa de erosión (m) en la zona de pilas con acabado liso para un periodo de retorno de $Tr=10$ años donde los valores positivos son socavación (+) y negativos depósito (-).

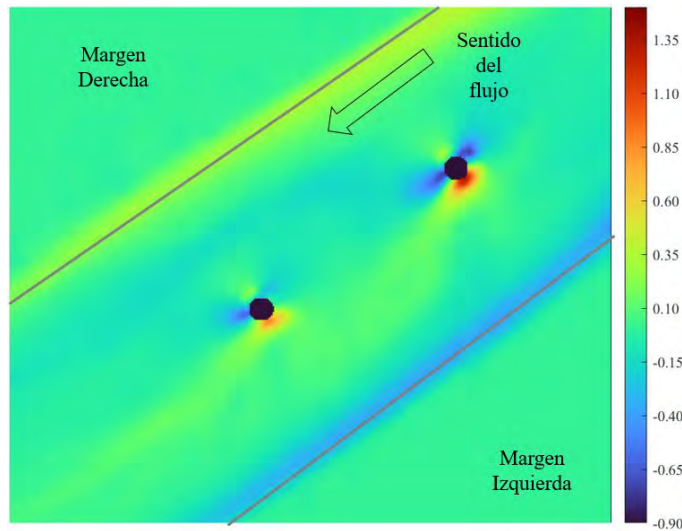


Figura 4.31 Mapa de erosión (m) en la zona de pilas con acabado liso para un periodo de retorno de $Tr=20$ años donde los valores positivos son socavación (+) y negativos depósito (-).

En la Tabla 4.25 muestra un resumen de los valores de profundidad máxima de socavación alcanzado para cada periodo de retorno.

Tabla 4.25 Profundidad máxima de socavación para diferentes Tr en pila lisa.

Tr	Pila 1			Pila 2		
	5 años	10 años	20 años	5 años	10 años	20 años
Profundidad máxima de socavación	1.1 m	1.27 m	1.32 m	0.650 m	0.740 m	0.850 m

Para un mejor entendimiento de los niveles de socavación alcanzados, se presenta un corte en la sección transversal en la pila 1 y 2 donde se comparan la sección de fondo final en cada escenario de análisis. Las Figuras 4.32 y 4.33 muestran las diferentes profundidades de socavación para el acabado superficial liso que se alcanzan con diferente periodo de retorno en cada pila.

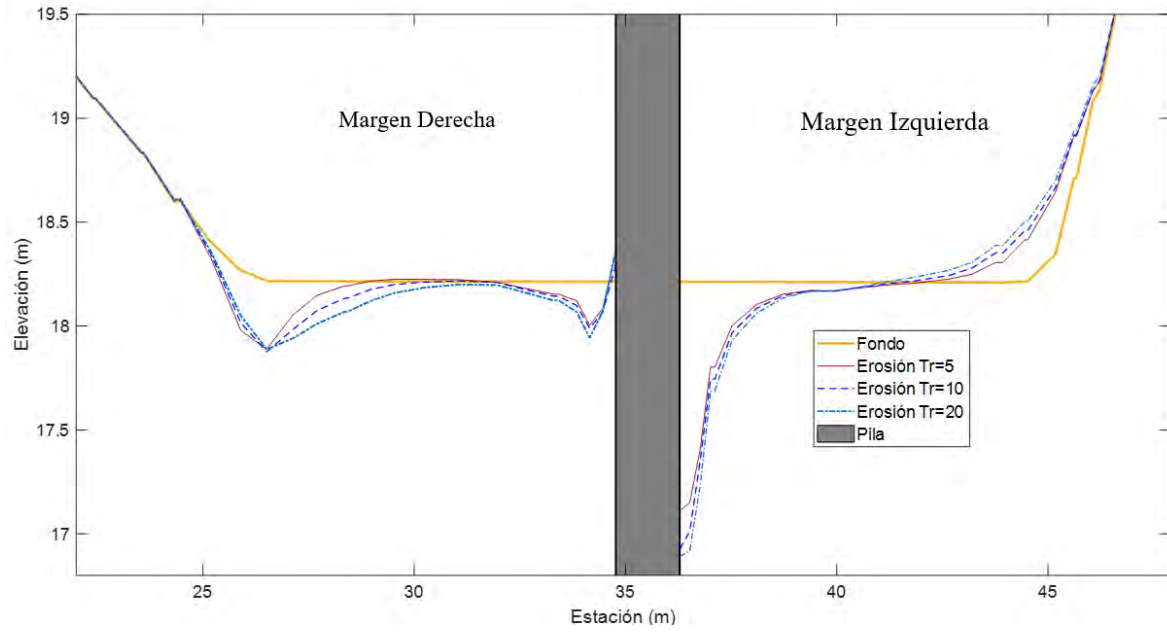


Figura 4.32 Comparativa de la profundidad de socavación en la sección transversal, Pila 1 con acabado liso para diferentes periodos de retorno.

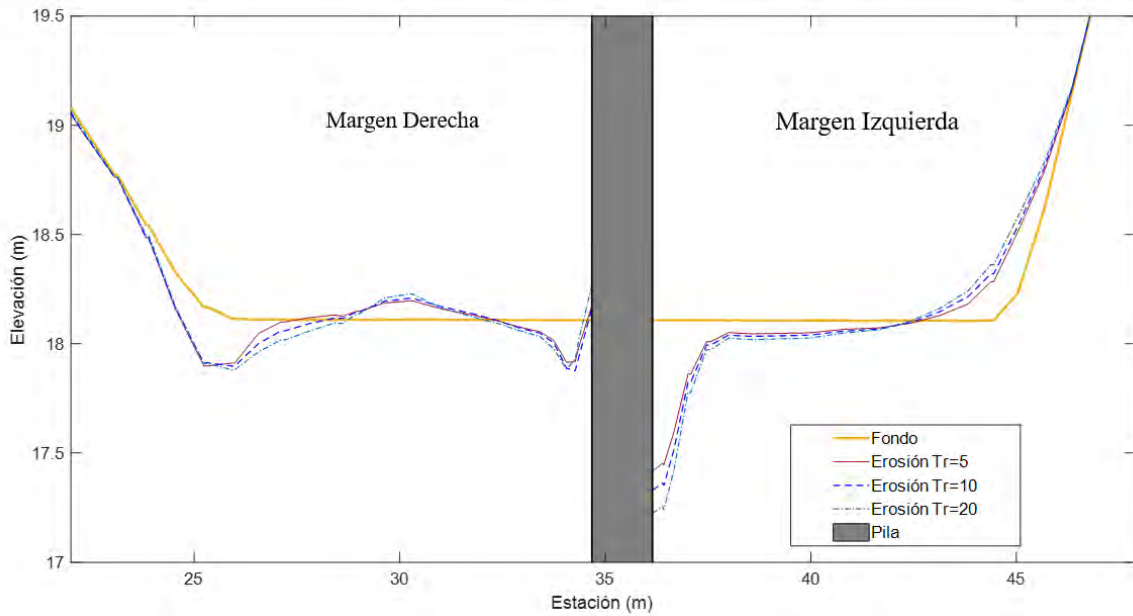


Figura 4.33 Comparativa de la profundidad de socavación en la sección transversal, Pila 2 con acabado liso para diferentes periodos de retorno.

4.5 Resultados de la erosión en pilas con acabado superficial de Casquete Hexagonal

A continuación, se muestran los mapas de erosión correspondientes a los periodos de retorno de 5, 10 y 20 años en la condición de pila con acabado superficial de casquete hexagonal (Figura 4.34 a Figura 4.36), en estas figuras los valores negativos representan depósito de sedimentos, y los valores positivos erosión (socavación).

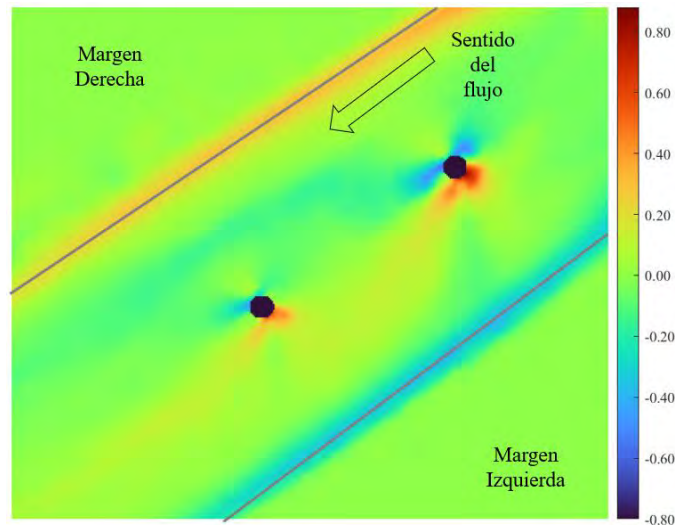


Figura 4.34 Mapa de erosión (m) en la zona de pilas con acabado de casquete hexagonal para un periodo de retorno de $Tr=5$ años donde los valores positivos son socavación (+) y negativos depósito (-).

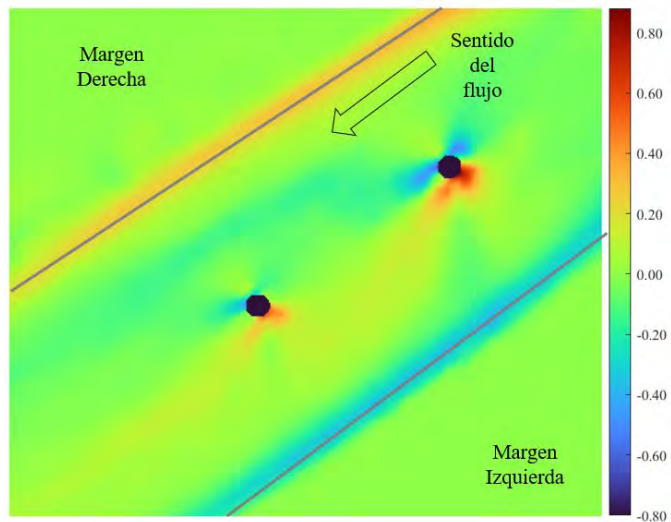


Figura 4.35 Mapa de erosión (m) en la zona de pilas con acabado de casquete hexagonal para un periodo de retorno de $Tr=10$ años donde los valores positivos son socavación (+) y negativos depósito (-).

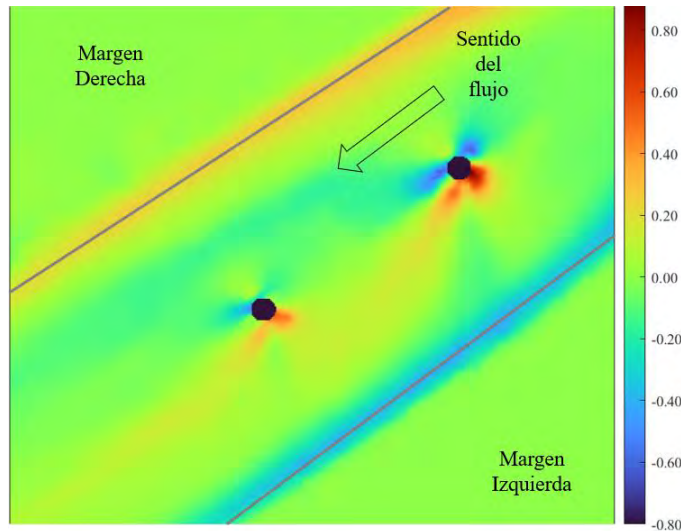


Figura 4.36 Mapa de erosión (m) en la zona de pilas con acabado de casquete hexagonal para un periodo de retorno de $Tr=20$ años donde los valores positivos son socavación (+) y negativos depósito (-).

La tabla 4.26 muestra los valores de profundidad de socavación estimados, donde se alcanzaron niveles máximos de 0.876 y 0.425 m para las pilas P1 y P2 respectivamente para un Tr igual a 20 años.

Tabla 4.26 Profundidad máxima de socavación para diferentes Tr en las pilas con acabado de casquete hexagonal.

	Pila 1			Pila 2		
Tr	5 años	10 años	20 años	5 años	10 años	20 años
Profundidad máxima de socavación	0.749 m	0.793 m	0.876 m	0.375 m	0.432 m	0.425 m

A manera de comparativa también se presenta un corte en la sección transversal en la pila 1 y 2 (Figuras 4.37 y 4.38) donde se muestran las diferentes profundidades de socavación que se alcanzan para los diferentes periodos de retorno.

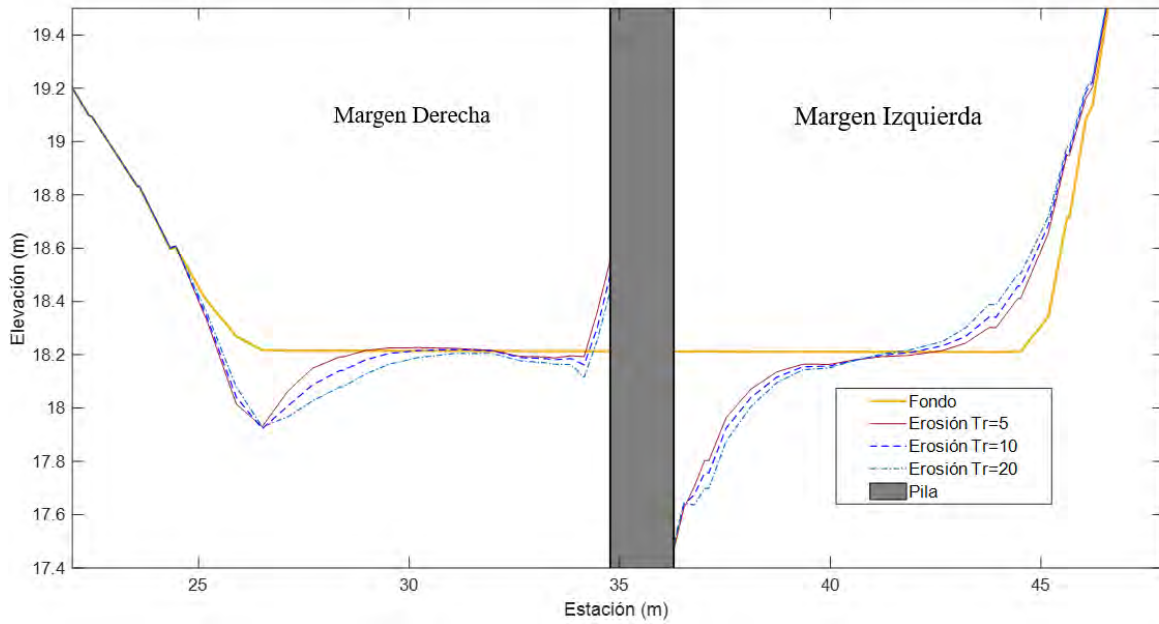


Figura 4.37 Comparativa de la profundidad de socavación en la sección transversal Pila 1 con acabado superficial de casquete hexagonal para diferentes periodos de retorno

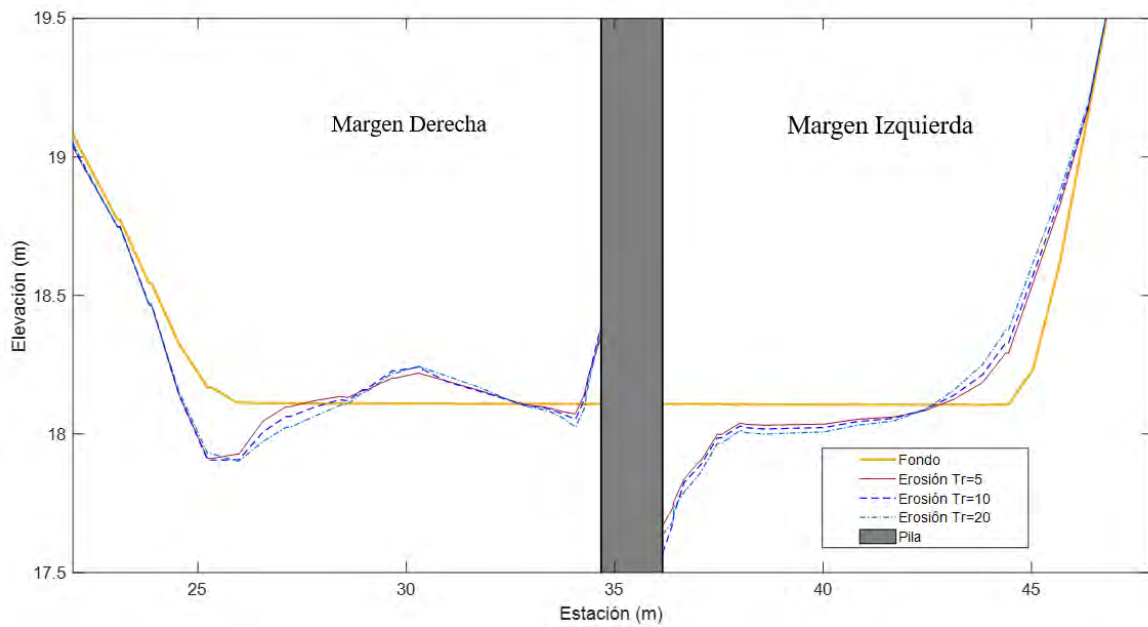


Figura 4.38 Comparativa de la profundidad de socavación en la sección transversal Pila 2 con acabado superficial de casquete hexagonal para diferentes periodos de retorno.

4.4 Resultados de la erosión en pilas con acabado superficial de casquete esférico

A continuación, se muestran los mapas de erosión correspondientes a los periodos de retorno de 5, 10 y 20 años en la condición de pila con acabado superficial de casquete esférico (Figura 4.39 a Figura 4.41). En los mapas mostrados los valores negativos representan depósito de sedimentos y los valores positivos erosión (socavación).

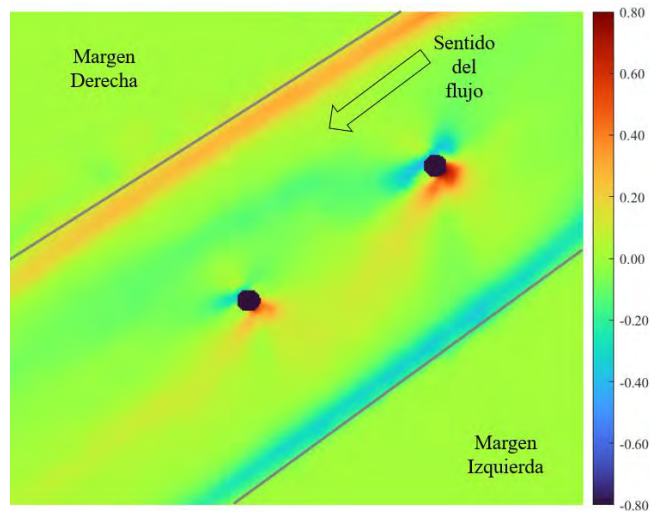


Figura 4.39 Mapa de erosión (m) en la zona de pilas con acabado de casquete esférico para un periodo de retorno de $Tr=5$ años donde los valores positivos son socavación (+) y negativos depósitos (-).

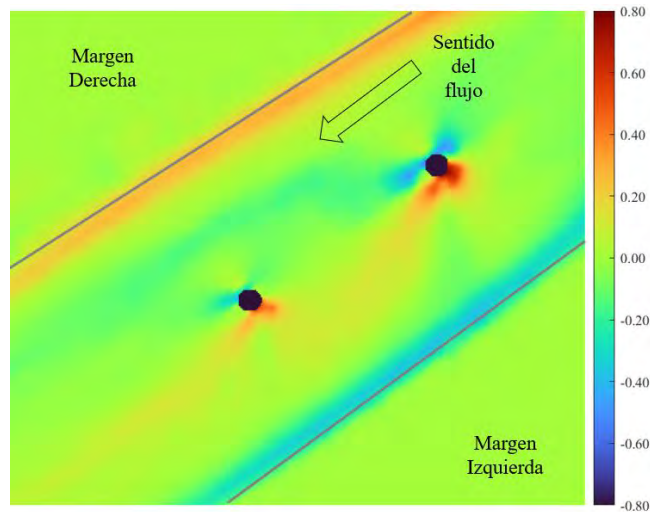


Figura 4.40 Mapa de erosión (m) en la zona de pilas con acabado de casquete esférico para un periodo de retorno de $Tr=10$ años donde los valores positivos son socavación (+) y negativos depósitos (-).

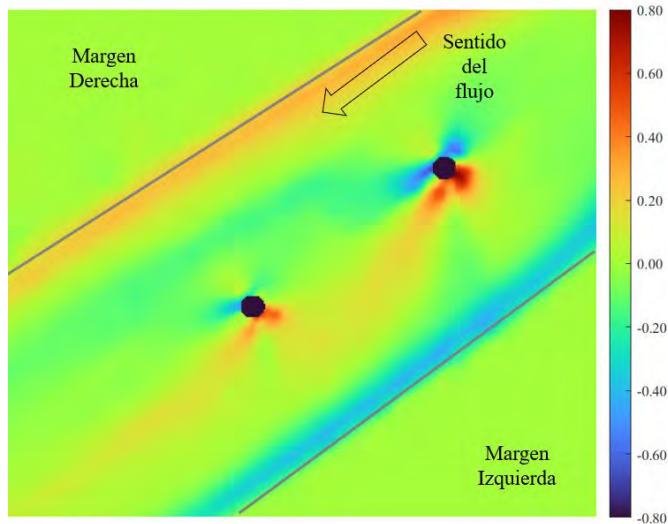


Figura 4.41 Mapa de erosión (m) en la zona de pilas con acabado de casquete esférico para un periodo de retorno de $Tr=20$ años donde los valores positivos son socavación (+) y negativos depósito (-).

La Tabla 4.27 muestra los valores de profundidad de socavación estimados para el acabado esférico, donde se alcanzaron niveles máximos de 0.798 y 0.415 m para las pilas P1 y P2 respectivamente para un Tr igual a 20 años.

Tabla 4.27 Profundidad máxima de socavación para diferentes Tr en pila con acabado de casquete esférico.

Tr	Pila 1			Pila 2		
	5 años	10 años	20 años	5 años	10 años	20 años
Profundidad máxima de socavación	0.742 m	0.754 m	0.798 m	0.416 m	0.408 m	0.415 m

A manera de comparativa también se presenta un corte en la sección transversal en la pila 1 y 2 en las Figuras 4.42 y 4.43, donde se muestran las diferentes profundidades de socavación que se alcanzan para diferentes periodos de retorno.

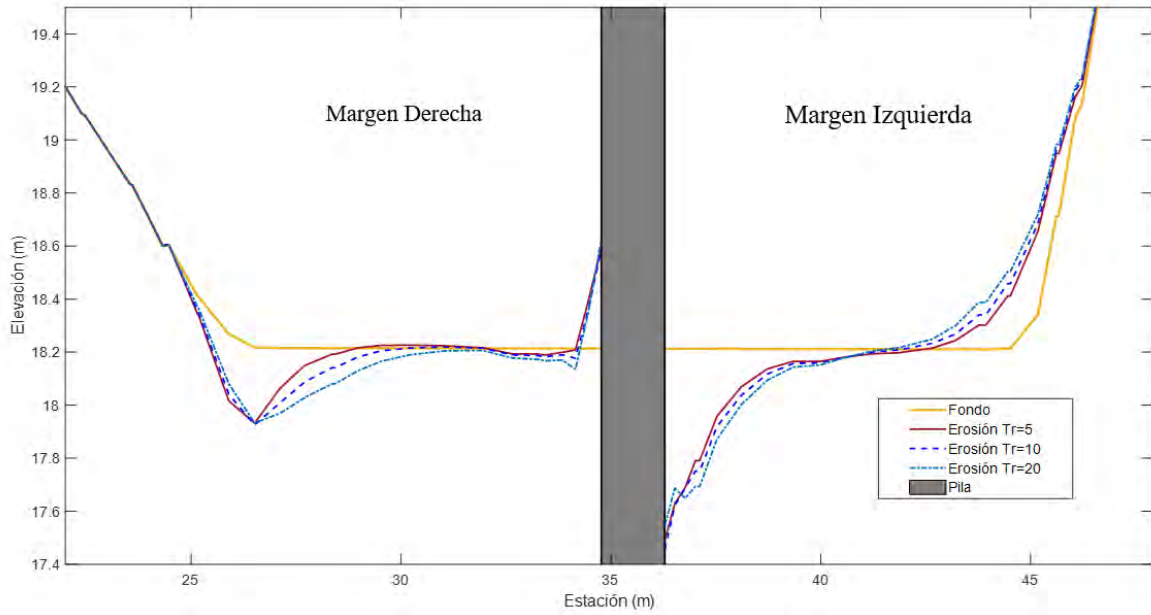


Figura 4.42 Comparativa de la profundidad de socavación en la sección transversal para la zona de la Pila 1 con acabado superficial de casquete esférico, para diferentes periodos de retorno.

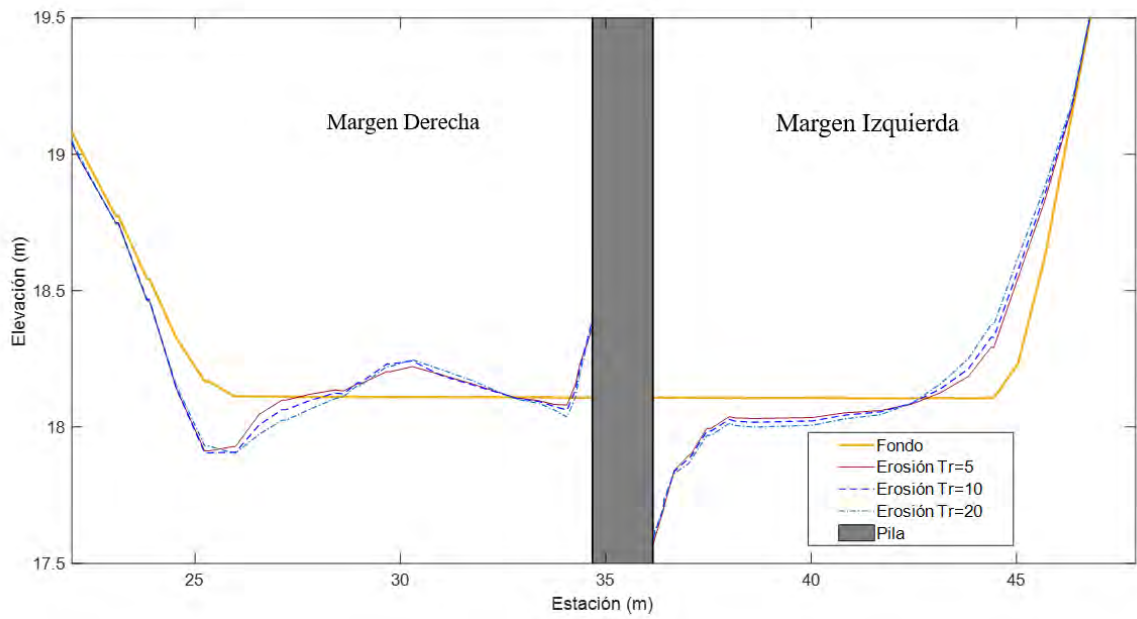


Figura 4.43 Comparativa de la profundidad de socavación en la sección transversal para la zona de la Pila 2 con acabado superficial de casquete esférico, para diferentes periodos de retorno.

Adicionalmente se muestran una serie de figuras donde se puede contrastar para cada periodo de periodo de retorno como es la influencia de cada acabado superficial en la profundidad de socavación, sumando así otra perspectiva de la efectividad de los acabados (Figuras 4.44-4.49).

En la Figura 4.44 se observa que para un $Tr = 5$ años la profundidad máxima corresponde al acabado liso con un valor de 1.1 m, mientras que el acabado hexagonal presenta una profundidad de socavación de 0.749 m y el acabado esférico una profundidad de 0.742 m, destacando la efectividad de los acabados superficiales reduciendo en al menos un 30% la profundidad del foso de socavación respecto al acabado liso.

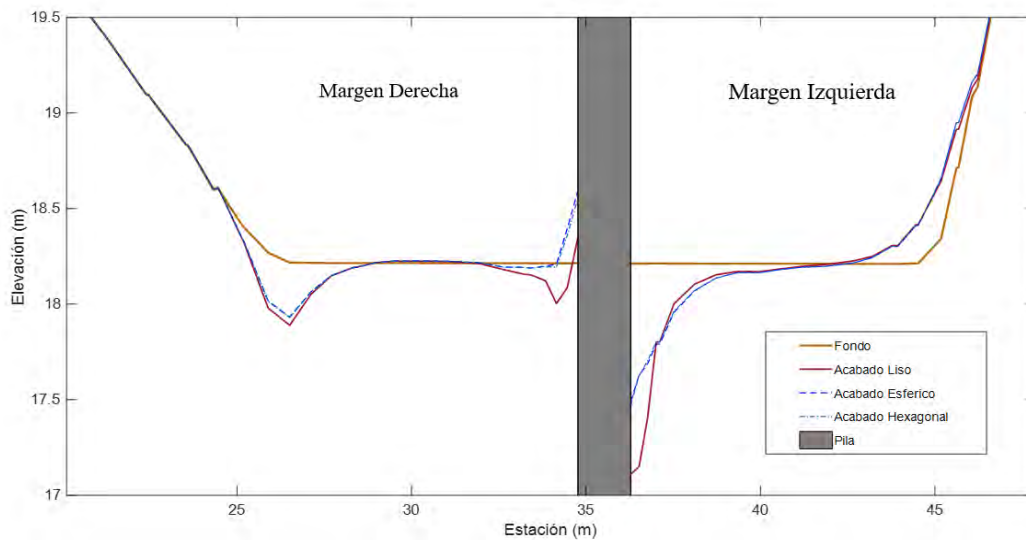


Figura 4.44 Comparativa de la profundidad de socavación con diferentes acabados en pila 1 para el periodo de retorno $Tr=5$ años.

Para la Figura 4.45 se puede apreciar que la profundidad máxima de socavación para un $Tr = 10$ años ocurre al emplear el acabado liso con un valor de 0.650 m, mientras que el acabado hexagonal presenta una profundidad de 0.375 m y el acabado esférico una profundidad de 0.416 m, este fenómeno se aprecia ya que la pila 1 produce la reducción de efectos sobre la pila 2, aun así, se muestra la efectividad de los acabados superficiales destacando ahora el acabado hexagonal como el que tiene mejor comportamiento.

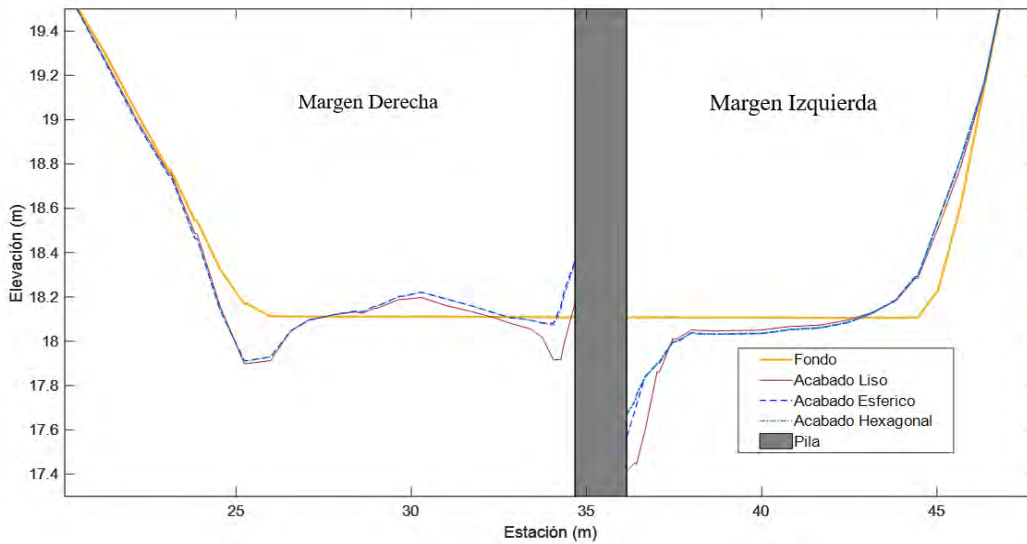


Figura 4.45 Comparativa de la profundidad de socavación con diferentes acabados en pila 1 para el periodo de retorno $Tr=10$ años.

Para la Figura 4.46 se puede apreciar que la profundidad máxima de socavación para un Tr 20 años ocurre al emplear el acabado liso con un valor de 1.27 m, incrementando un 15% respecto al $Tr=5$ años, mientras que el acabado hexagonal presenta una profundidad de 0.793 m, incrementando apenas un 5.8% respecto al $Tr=5$ años y el acabado esférico una profundidad de 0.754 m, incrementando a su vez un 1.6% respecto al $Tr=5$ años. Como se puede notar entre periodos de retorno no ocurre un aumento considerable.

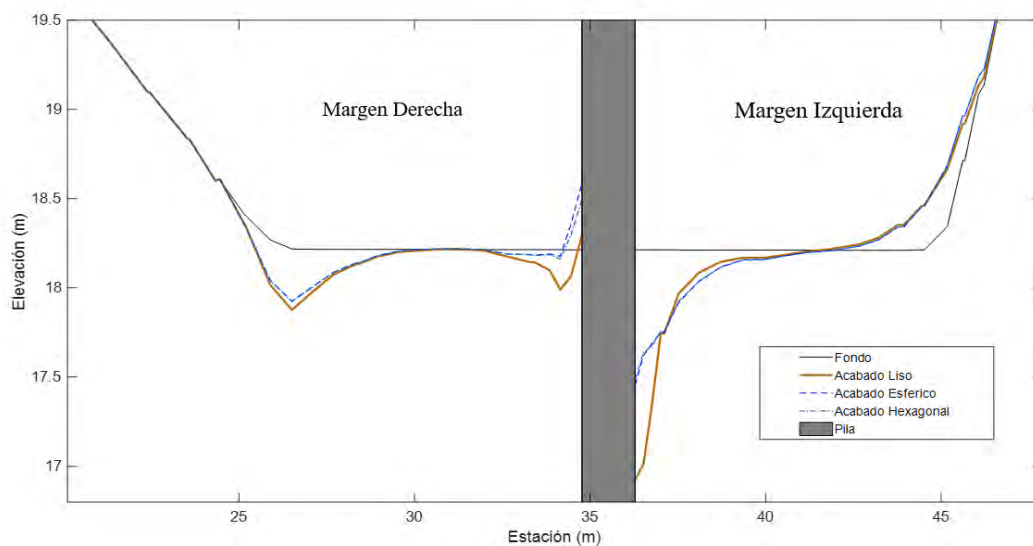


Figura 4.46 Comparativa de la profundidad de socavación con diferentes acabados en pila 1 para el periodo de retorno $Tr=20$ años.

Para la Figura 4.47 se puede apreciar que la profundidad máxima de socavación para la pila 2 y un $Tr=5$ años ocurre al emplear el acabado liso con un valor de 0.740 m, mientras que el acabado hexagonal presenta una profundidad de 0.432 m y el acabado esférico una profundidad de 0.408 m, este fenómeno se aprecia ya que la pila 1 produce la reducción de efectos sobre la pila 2, aún así, se muestra la efectividad de los acabados superficiales destacando ahora el acabado hexagonal como el que tiene mejor comportamiento.

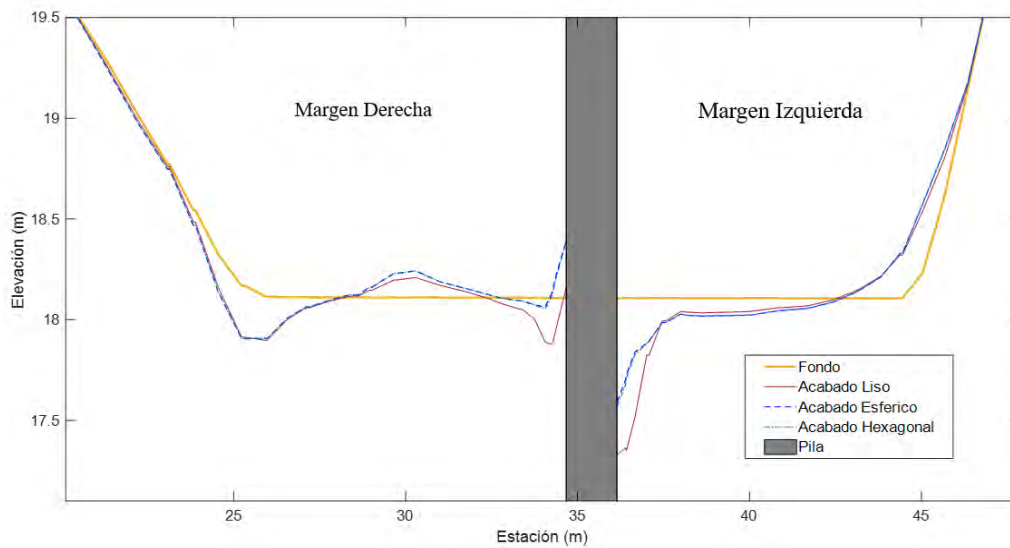


Figura 4.47 Comparativa de la profundidad de socavación con diferentes acabados en pila 2 para el periodo de retorno $Tr=5$ años.

En la Figura 4.48 se muestra que la profundidad máxima de socavación para la pila 2 y un $Tr=10$ años ocurre sobre el acabado liso con un valor de 1.32 m, mientras que el acabado hexagonal presenta una profundidad de 0.876 m, y el acabado esférico una profundidad de 0.798 m. Pese a que la profundidad de socavación con el acabado liso aumento poco en comparación con los acabados superficiales esto no indica que tenga un mejor comportamiento, los valores obtenidos con los acabados demuestran ser efectivos.

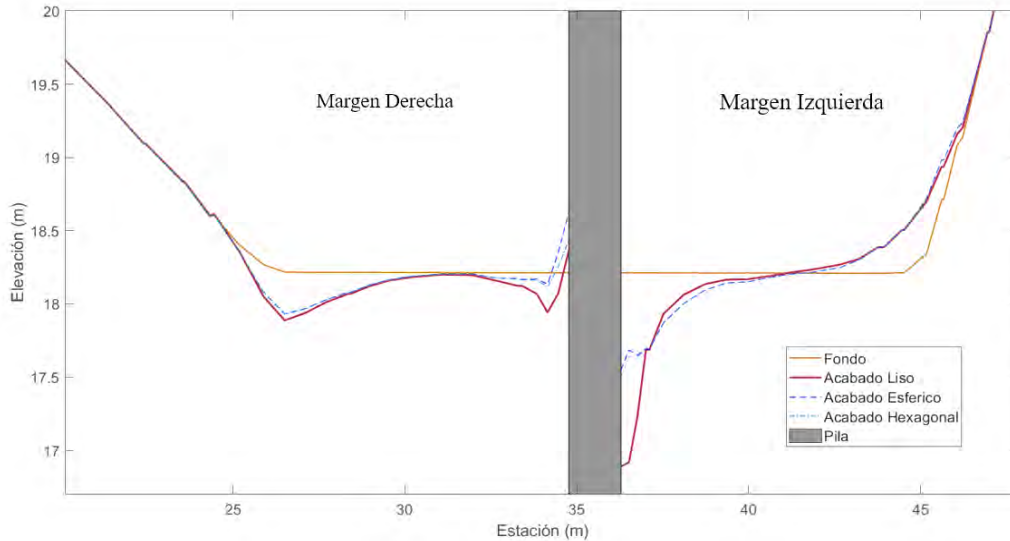


Figura 4.48 Comparativa de la profundidad de socavación con diferentes acabados en pila 2 para el periodo de retorno $Tr=10$ años.

En la Figura 4.49 se muestra que la profundidad máxima de socavación para la pila 2 y un $Tr=20$ ocurre al emplear el acabado liso con un valor de 0.850 m, mientras que el acabado hexagonal presenta una profundidad de 0.425 m y el acabado esférico una profundidad de 0.415 m, este fenómeno se aprecia ya que la pila 1 produce la reducción de efectos sobre la pila 2, aun así se muestra la efectividad de los acabados superficiales destacando ahora el acabado hexagonal como el de mejor comportamiento.

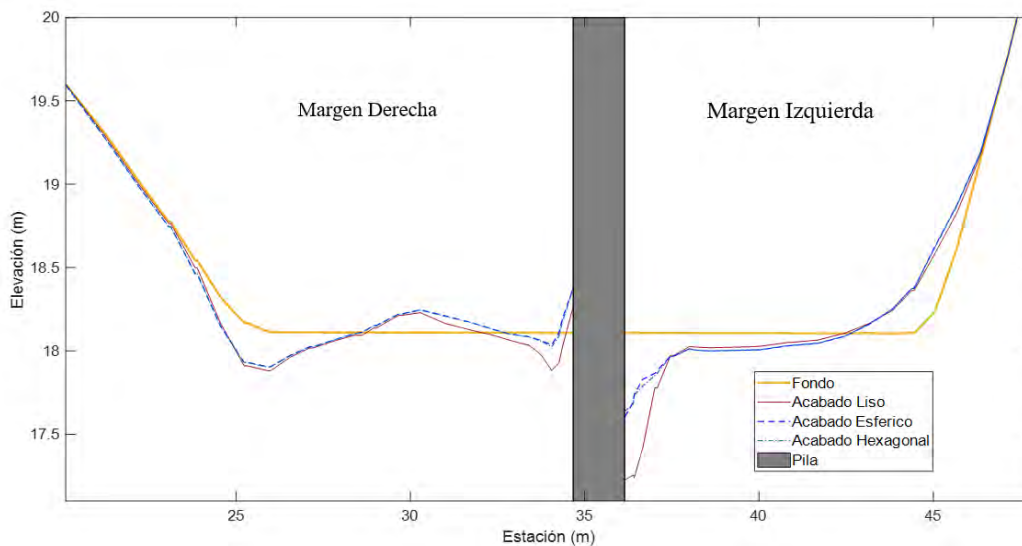


Figura 4.49 Comparativa de la profundidad de socavación con diferentes acabados en pila 2 $Tr=20$ años.

La Tabla 4.28 muestra a manera de resumen los valores de profundidad de socavación para los diferentes acabados sobre la pila 1.

Tabla 4.28 *Tabla resumen de valores máximos de socavación alcanzados en la pila 1 para diferentes acabados según el periodo de retorno.*

Tr (años)	Acabado Liso	Acabado Hexagonal	Acabado Esférico
5	1.1 m	0.749 m	0.742 m
10	1.27 m	0.793 m	0.754 m
20	1.32 m	0.876 m	0.798 m

Mientras que en la Tabla 4.29 se muestra una comparativa de la diferencia de porcentaje de reducción de profundidad de socavación empleando acabados superficiales con respecto a la pila con acabado liso. En promedio el acabado hexagonal reduce en un 34.4 % la profundidad de socavación, mientras que el acabado esférico reduce en promedio un 37.6 % la profundidad de socavación, todo lo anterior es referente a la pila 1, para la pila 2 las reducciones son más grandes por efecto de disipación de la pila 1, estas llegan a reducir en promedio 44.6 % el acabado hexagonal y un 44 % el acabado esférico.

Tabla 4.29 *Porcentaje de reducción de profundidad máxima de socavación empleando acabados superficiales respecto al acabado liso.*

Tr (años)	Reducción en Pila 1 (%)		Reducción en Pila 2 (%)	
	Acabado Hexagonal	Acabado Esférico	Acabado Hexagonal	Acabado Esférico
5	31.9	32.5	42.3	36
10	37.6	40.6	41.6	44.9
20	33.6	39.5	50	51.2

4.6 Sección longitudinal

Además de los gráficos de corte transversal, se muestra un corte longitudinal, mostrando así el comportamiento de la erosión de fondo ante la presencia de distintos acabados (Figuras 4.50-4.52), la ventaja de Iber es que permite elaborar cortes en secciones deseadas para analizar distintos tipos de comportamientos y resultados. Además, en las Figuras 4.50-4.52 se aprecia que la cantidad de sedimentos que se acumulan al emplear acabados superficiales es menor en comparación con el acabado liso reduciéndose considerablemente, siendo este otro beneficio de los acabados superficiales.

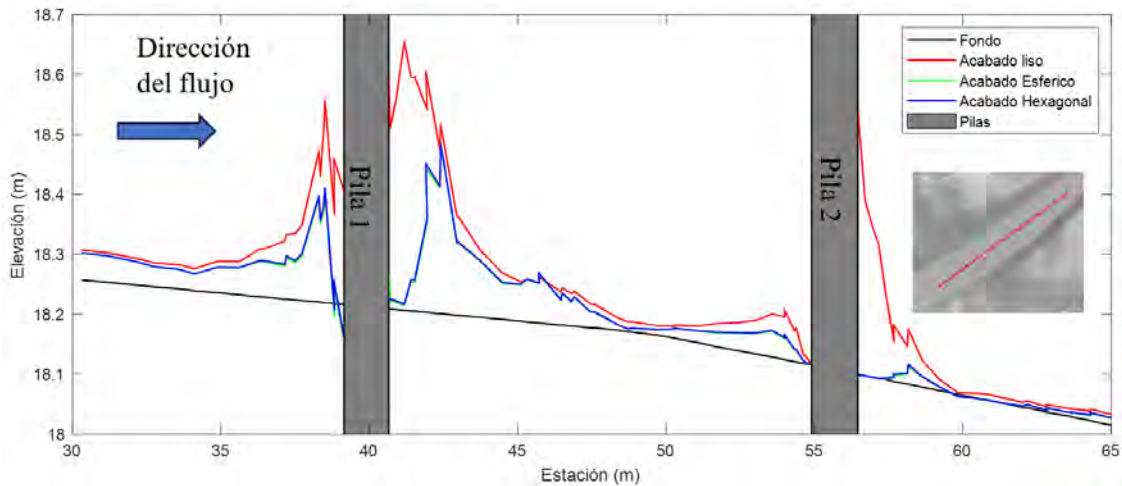


Figura 4.50 Perfil longitudinal de descenso de fondo para $Tr= 5$ años

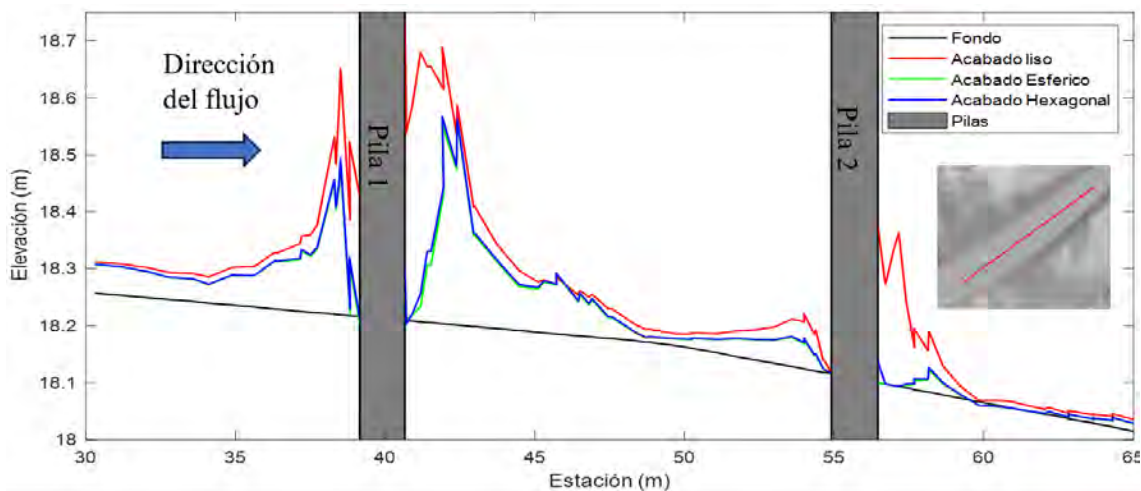


Figura 4.51 Perfil longitudinal de descenso de fondo para $Tr= 10$ años

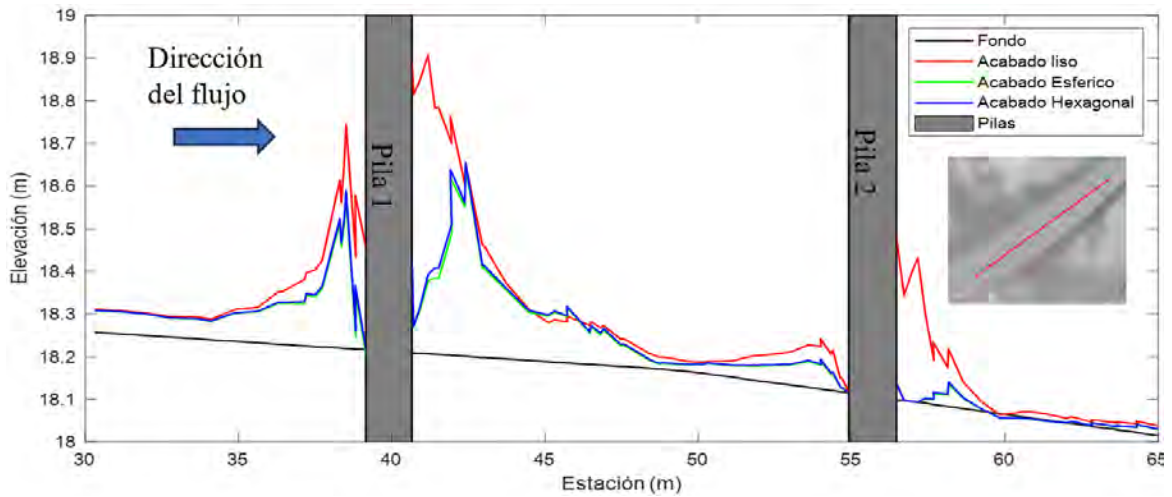


Figura 4.52 Perfil longitudinal de descenso de fondo para $Tr= 20$ años

En la Figura 4.53 muestra una recopilación de imágenes extraídas por Google Earth donde se observa que la zona es muy propensa a tener depósitos de este tipo con lo cual se asume una correspondencia de los resultados obtenidos, en la figura también se nota que al pie de los taludes el depósito de sedimentos es mayor, e inclusive hay maquinaria que ayuda a remover los sólidos acumulados en el cauce.



Figura 4.53 Imágenes de la zona del puente y la problemática de sedimentos.

Como complemento en la Tabla 4.30 se muestran los valores de la altura de deposición de sedimentos máximos alcanzados en cada periodo de retorno y su valor correspondiente a cada acabado. Esto demuestra que el empleo de acabado superficiales no solo ayuda a reducir la profundidad de socavación, sino que también, disminuye la altura de deposición de sedimentos considerablemente, para el caso de la pila 2 la diferencia es mucho más notoria ya que las alturas alcanzadas no superan los 10 cm.

Se destaca también que estos acabados en promedio (para la pila 1) las alturas de depósito de sedimento se reducen en promedio un 32.6 % para el acabado hexagonal y 31.6 % para el acabado casquete esférico, por otro lado la pila 2 se logra una reducción media de hasta 84.9 % en la altura de depósito de sedimento para ambos casos, lo cual demuestra que la implementación de estos acabados influye de manera positiva en la reducción de la altura de sedimento en comparación con el acabado liso.

Tabla 4.30 *Alturas máximas de deposición de sedimento cercanas a las pilas.*

Tr	Pila 1			Pila 2		
	Acabado Liso (cm)	Acabado Esférico (cm)	Acabado Hexagonal (cm)	Acabado Liso (cm)	Acabado Esférico (cm)	Acabado Hexagonal (cm)
5	44.8 cm	28.1 cm	28.6 cm	44.3 cm	Menor a 0.5 cm	Menor a 0.5 cm
10	47.2 cm	35.8 cm	36.2 cm	27.5 cm	Menor a 0.5 cm	Menor a 0.5 cm
20	69.9 cm	44.5 cm	45.3 cm	38.0 cm	Menor a 0.6 cm	Menor a 0.6 cm

4.7 Evolución de la profundidad de socavación a lo largo del tiempo

Un gráfico de evolución del comportamiento de la profundidad de socavación en el tiempo muestra como el fenómeno interactúa a lo largo del tiempo, de acuerdo con Diaz (2016), la recomendación inicial es relacionar la profundidad de socavación (ds) con respecto a algún parámetro, a manera de hacer adimensional esta relación se recomienda considerar el tirante (y) como un parámetro comparativo y así se introduce la relación adimensional ds/y.

Desde la Figura 4.54 hasta la Figura 4.59 se presenta el comportamiento temporal de la profundidad de socavación para cada una de las pilas en diferentes periodos de retorno y diferentes acabados superficiales con respecto a la variable ds/y .

En la Figura 4.54 se puede ver que los ajustes realizados para un $Tr=5$ años se encuentran en un rango aceptable ya los valores de R^2 presentan valores de 0.92-0.969.

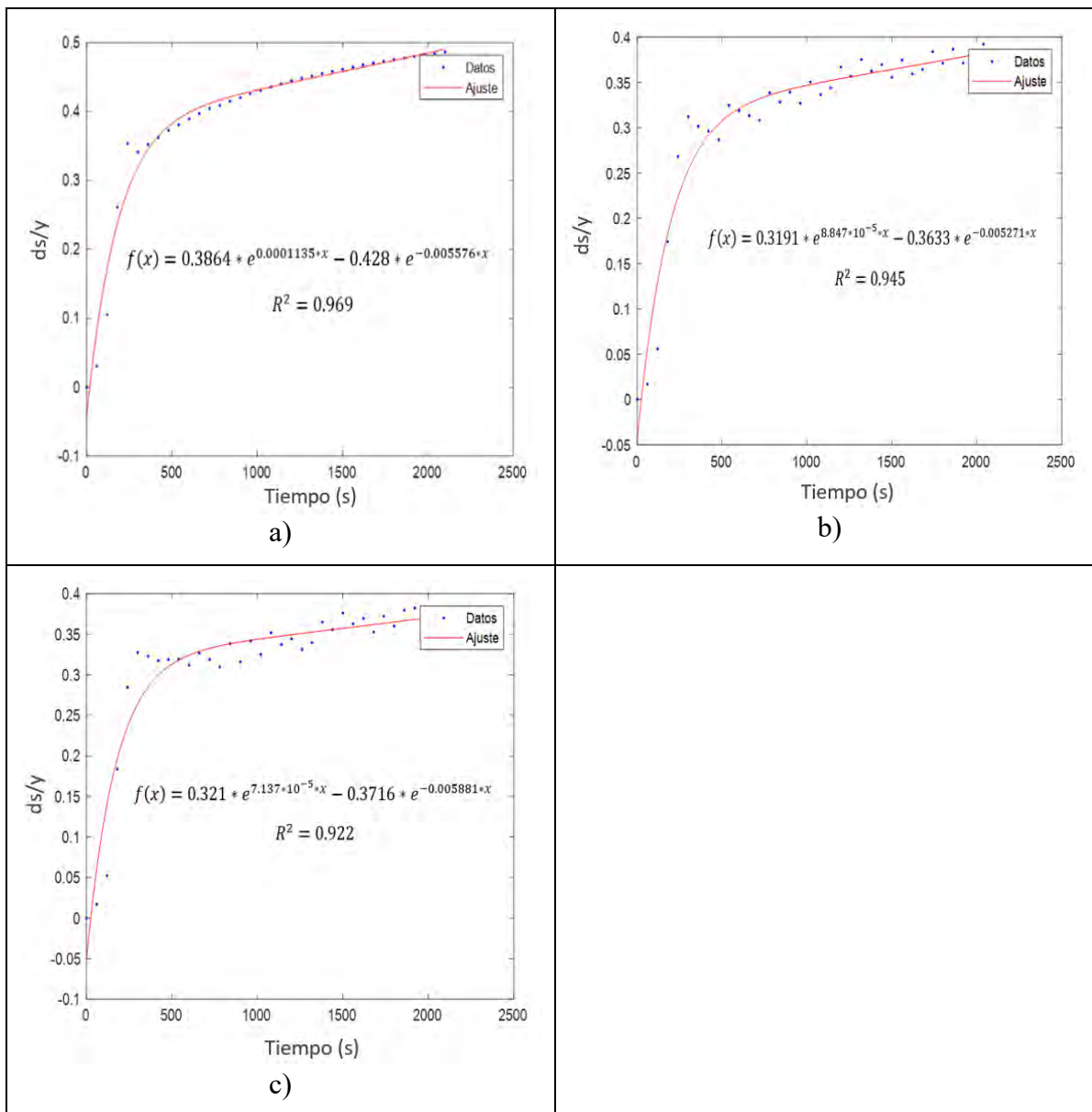


Figura 4.54 Evolución de la profundidad de socavación (ds/y) a lo largo del tiempo para un $Tr= 5$ años en la “Pila 1”; a) Acabado Liso, b) Acabado Esférico y c) Acabado Hexagonal.

En la Figura 4.55 se muestra que los valores de R^2 son bastantes cercanos a 1 y se encuentran dentro del rango de 0.9 y 0.97, por lo que el ajuste para un $Tr=10$ años daría un buen comportamiento, destacando que los valores de ds/y son menores en los acabados superficiales en comparación con el acabado liso.

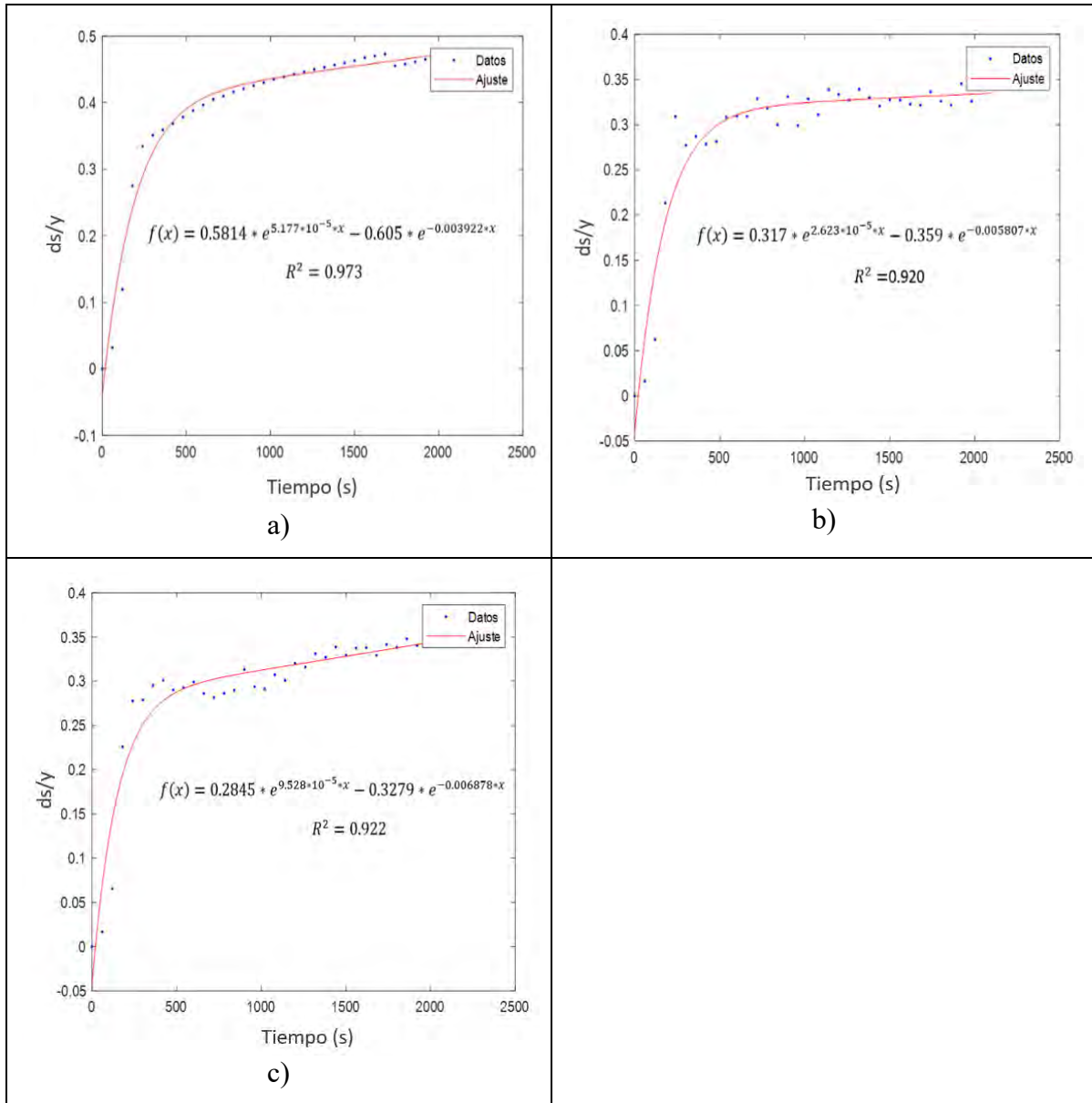


Figura 4.55 Evolución de la profundidad de socavación (ds/y) a lo largo del tiempo para un $Tr= 10$ años en la “Pila 1”; a) Acabado Liso, b) Acabado Esférico y c) Acabado Hexagonal.

En la Figura 4.56 para un $Tr=20$ años se muestran resultados similares a los otros periodos de retorno, destacando los valores de R^2 son cercanos a 1.0 y destacando que los valores más bajos de la relación ds/y se encuentran en los acabados superficiales.

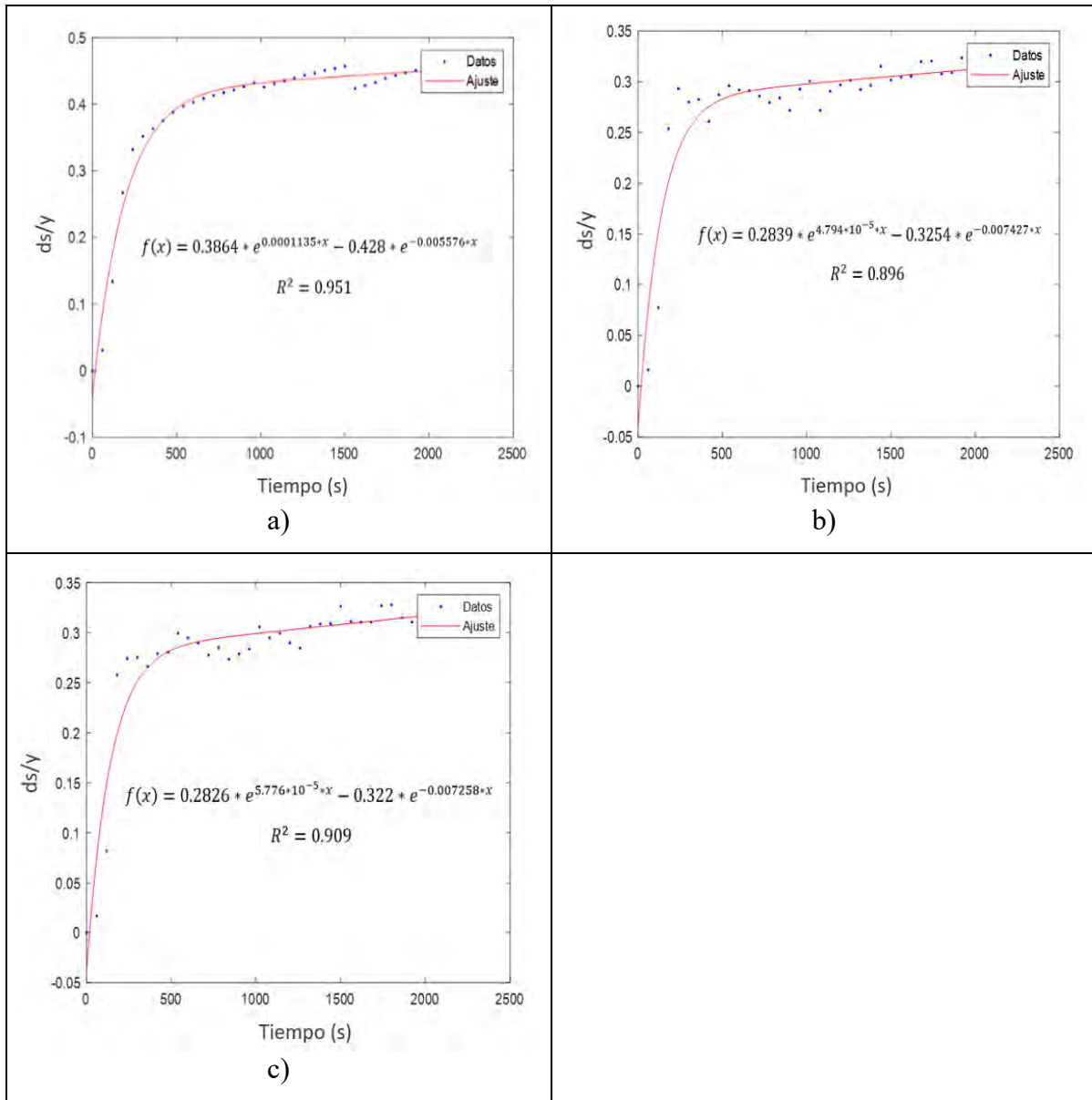


Figura 4.56 Evolución de la profundidad de socavación (ds/y) a lo largo del tiempo para un $Tr= 20$ años en la “Pila 1”; a) Acabado Liso, b) Acabado Esférico y c) Acabado Hexagonal.

En la Figura 4.57 se muestra como el ajuste para ds/y para la pila 2 y un $Tr=5$ años, donde los resultados se consideran aceptables ya que el valor de R^2 se encuentra en el rango de 0.9 y 0.97.

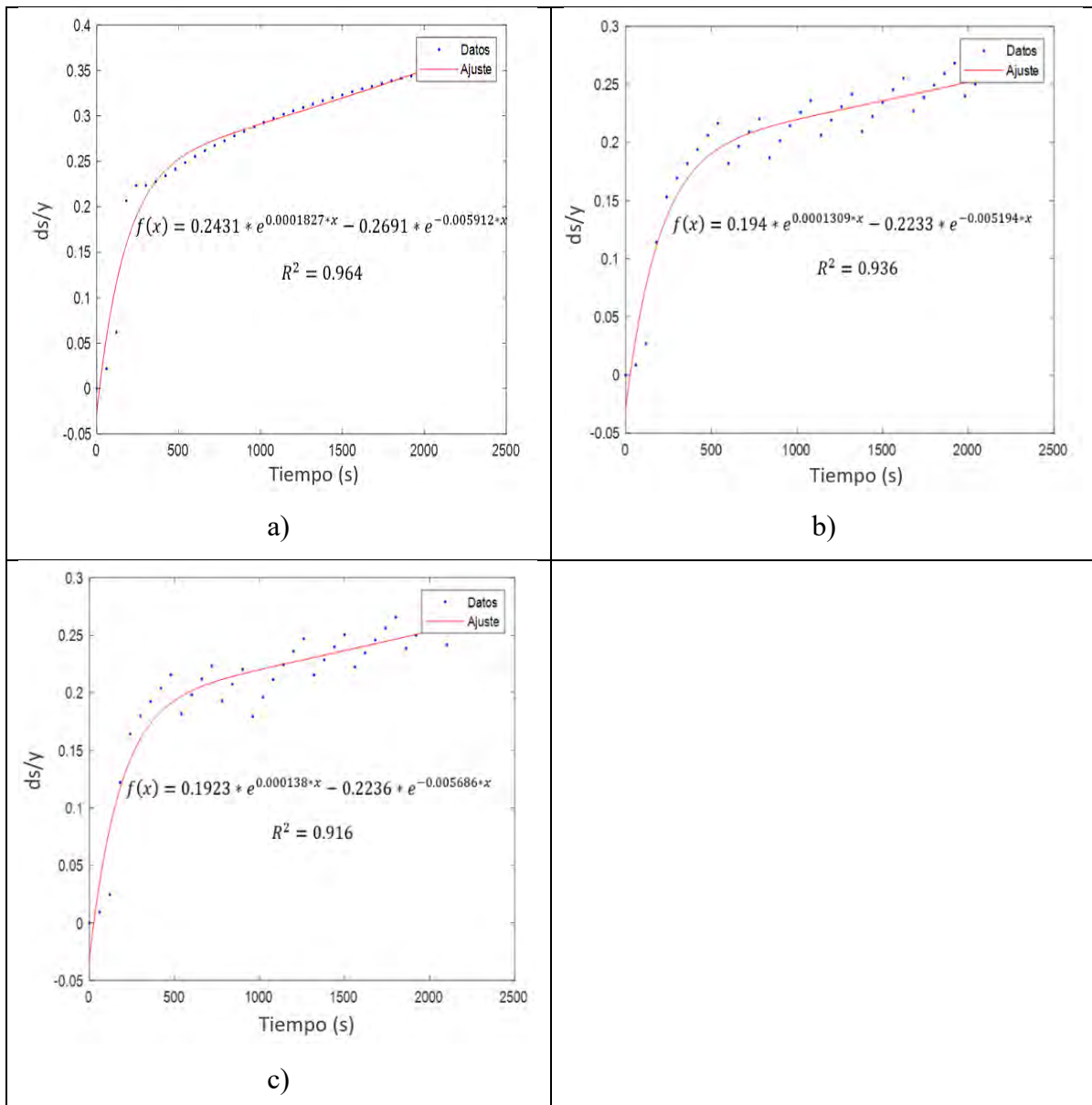


Figura 4.57 Evolución de la profundidad de socavación (ds/y) a lo largo del tiempo para un $Tr= 5$ años en la “Pila 2”; a) Acabado Liso, b) Acabado Esférico y c) Acabado Hexagonal.

En la Figura 4.58 se muestra como los valores tiene un ajuste cercano a la relación ds/y ya que el valor de R^2 se encuentra con valores cercanos a 0.8 y 0.99.

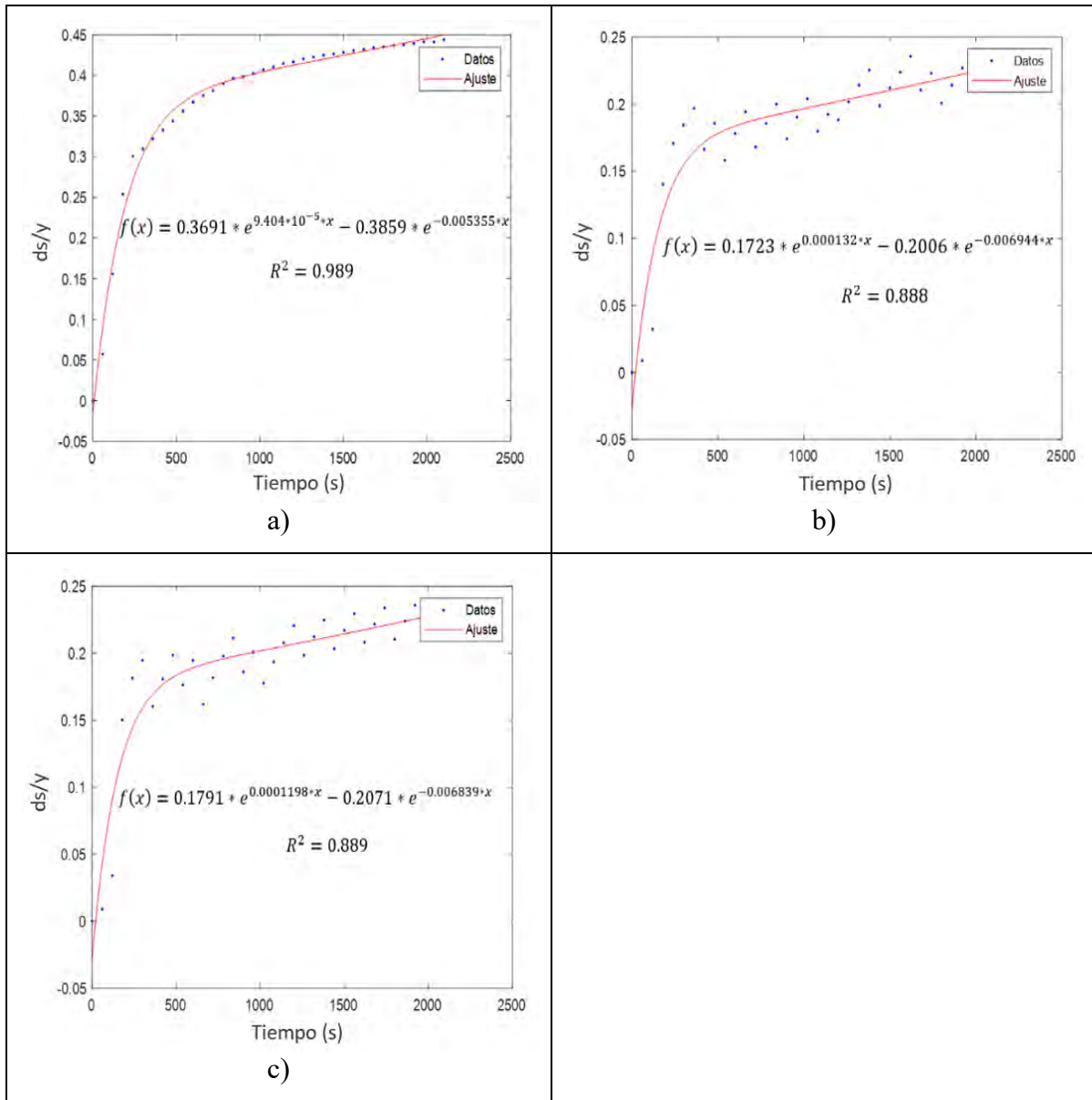


Figura 4.58 Evolución de la profundidad de socavación (ds/y) a lo largo del tiempo para un $Tr = 10$ años en la “Pila 2”; a) Acabado Liso, b) Acabado Esférico y c) Acabado Hexagonal.

En la Figura 4.59 se muestra como los valores tiene un ajuste cercano a la relación ds/y ya que el valor de R^2 se encuentra con valores cercanos a 0.85 y 0.96, para este caso el valor de R^2 es más bajo en comparación con los casos anteriores, esto se debe al comportamiento de ds/y ya que en estos casos se observa mejor que los valores son más complicados de modelar y predecir

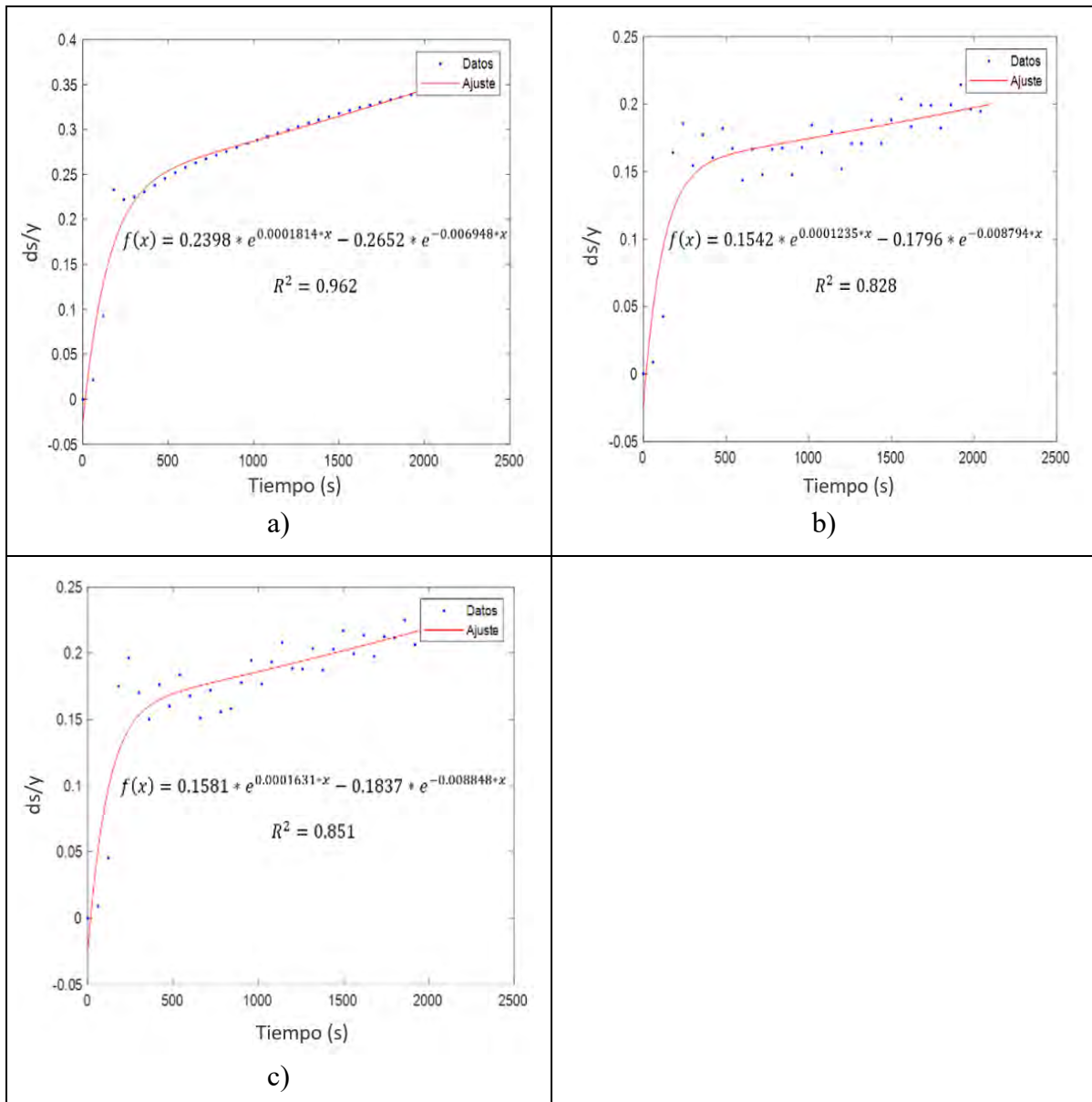


Figura 4.59 Evolución de la profundidad de socavación (ds/y) a lo largo del tiempo para un $Tr= 20$ años en la “Pila 2”; a) Acabado Liso, b) Acabado Esférico y c) Acabado Hexagonal.

Finalmente se muestran las Figura 4.60, Figura 4.61 y la Figura 4.62 en donde se realiza una comparativa por periodo de retorno y los ajustes mostrados ahora son con respecto al tipo de acabado, por lo que, es posible verificar con qué tipo de acabado la relación ds/dy es menor conforme al paso del tiempo y por ende también indica que tipo de acabado resulta ser más eficiente para combatir la socavación.

Para el caso de la pila 1 en la Figura 4.60, los acabados superficiales muestran una reducción importante en el valor de ds/y en comparación con el acabado liso, señalando que el acabado hexagonal muestra los menores valores de esta relación además de que estos últimos tienden a tener un comportamiento asintótico lo cual indica que se va estabilizando la profundidad de socavación.

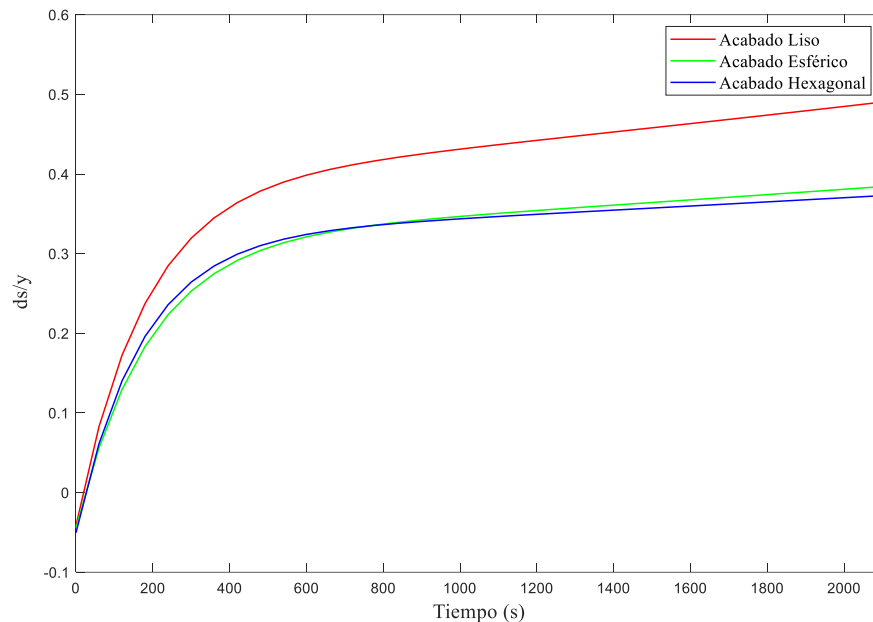


Figura 4.60 Comparativa de la evolución ds/y para diferentes acabados en $Tr= 5$ años en “Pila 1”

Para la Figura 4.61 se puede apreciar mejor el comportamiento asintótico de la profundidad de socavación para acabados superficiales, destacando que el acabado esférico logra tener un comportamiento más estable en menos tiempo.

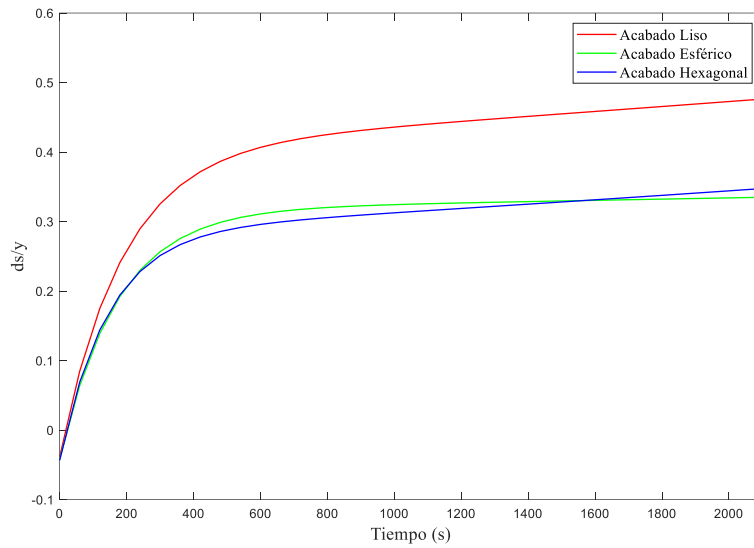


Figura 4.61 Comparativa de la evolución ds/y para diferentes acabados en $Tr= 10$ años en “Pila 1”

En la Figura 4.62 se observa que los acabados superficiales no rebasan el valor de 0.35 para ds/y , mientras que con el acabado liso llega casi a 0.5 teniendo una diferencia de 30% respecto a los acabados superficiales, donde estos últimos logran estabilizarse y tener un comportamiento asintótico en menor tiempo.

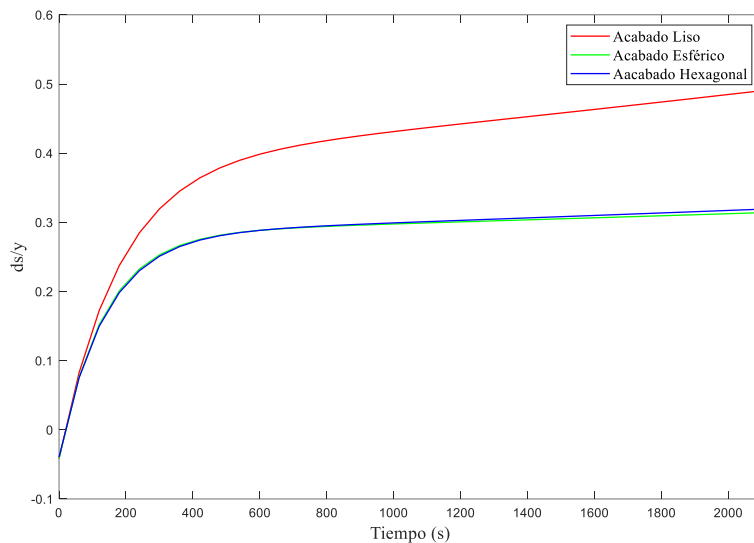


Figura 4.62 Comparativa de la evolución ds/y para diferentes acabados en $Tr= 20$ años en “Pila 1”

En el caso de la Figura 4.63 se observa que los efectos producidos en la pila 2 son menores debido al impacto de la pila 1, aún así, se aprecia que los acabados superficiales tienden a comportarse mejor y lograr estabilizar la profundidad de socavación en menos tiempo.

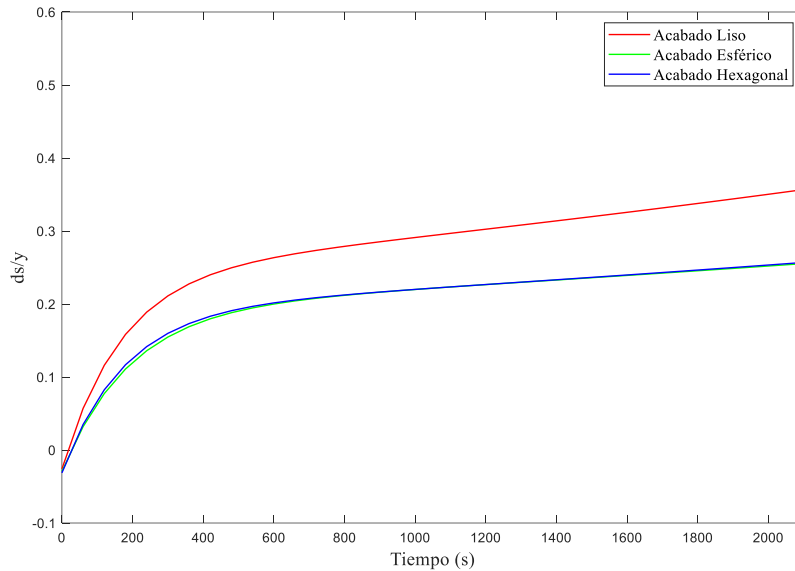


Figura 4.63 Comparativa de la evolución ds/y para diferentes acabados en $Tr= 5$ años en “Pila 2”

Para la Figura 4.64 el efecto es mucho más notorio, mientras que los acabados superficiales comienzan a estabilizarse en un valor menor a 0.25 para ds/y el acabado liso no logra comenzar a estabilizarse en un valor de 0.45 para ds/y , teniendo una diferencia de poco más del 50%, dejando en claro los beneficios de los acabados superficiales.

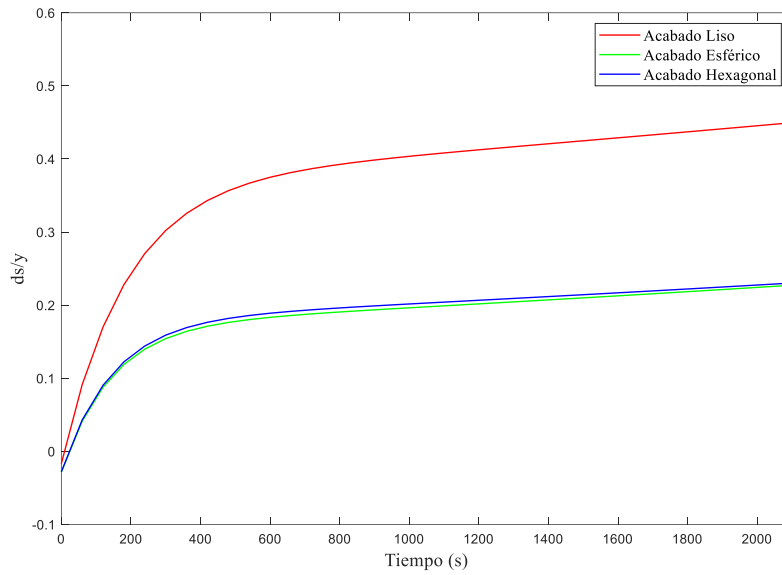


Figura 4.64 Comparativa de la evolución ds/y para diferentes acabados en $Tr= 10$ años en “Pila 2”

En el caso de la segunda pila, la Figura 4.65 muestra que no hay diferencia significativa entre acabados y que estos resultan ser mejores que el acabado liso, pero en $Tr=20$ destaca el acabado esférico ya que por poca diferencia se comienza a estabilizar la socavación en menor tiempo.

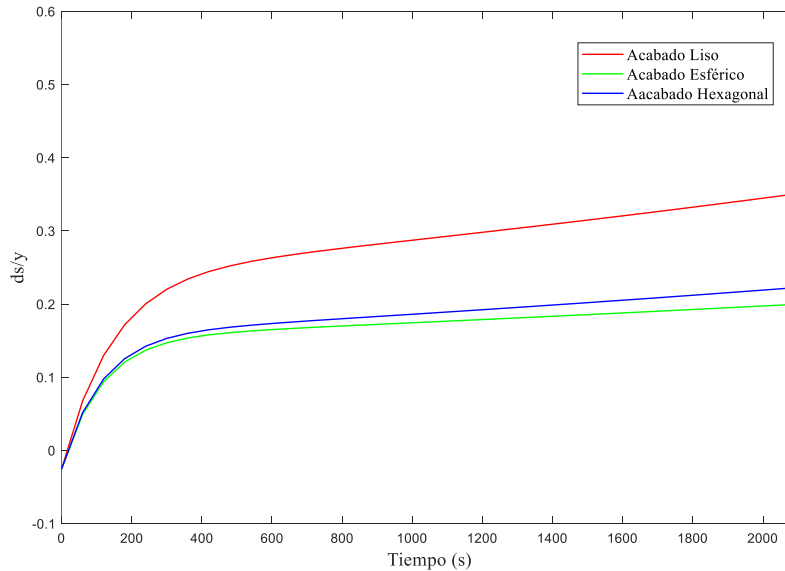


Figura 4.65 Comparativa de la evolución ds/y para diferentes acabados en $Tr= 20$ años en “Pila 2”.

CONCLUSIONES

Y

RECOMENDACIONES

En este capítulo se mencionan, interpretan y se hace además una comparativa sobre los resultados, presentando un interés mayor en la socavación y en otras variables que intervienen en su desarrollo, llegando a las siguientes conclusiones y recomendaciones.

CONCLUSIONES

- La implementación de la rugosidad superficial en pilas de puente en un modelo de simulación bidimensional demostró ser efectiva para reducir la profundidad del foso de socavación, siempre y cuando esta rugosidad se implemente como un coeficiente numérico.
- Los acabados superficiales en comparación con un acabado liso reducen la profundidad del foso de socavación que ocurre al pie de la estructura en al menos un 30%.
- Los valores máximos de velocidad y tirante se logran reducir más al pie de la pila empleando el acabado casquete esférico, siendo la pila 1 la que tiene mejores resultados con este acabado y presenta una reducción del 13.1 % para velocidad y 13.5% en tirantes.
- Para una configuración de dos pilas resulta conveniente emplear un acabado distinto en cada una, en particular la pila 1 tendría el acabado esférico y la pila dos el acabado de casquete hexagonal. Si se opta por elegir un solo acabado se sugiere implementar el

acabado casquete esférico ya que presenta mejores resultados para reducir la profundidad de socavación.

- El uso de modelos bidimensionales resultó ser útil para localizar zonas de depósito de materiales y zonas de erosión.
- Por otra parte, en cuanto a la sección longitudinal que pasa por las pilas, se presenta una tendencia a tener sedimentos en la parte frontal y posterior de la pila. Como ya se había mencionado anteriormente el efecto de la pila 1 sobre la pila 2 hace que se mitiguen los efectos del flujo en esta última, teniendo también una reducción de la altura del sedimento.

RECOMENDACIONES

- Se sugiere hacer la recreación de un modelo a escala para dimensionar los efectos que tiene la pila con su nuevo acabado, esto debido a que no se puede trabajar en el área de estudio real.
- Hacer una visita a la zona para realizar mediciones obteniendo un levantamiento topográfico, tirantes, gastos observados, condiciones de las pilas, la profundidad de la socavación local, datos granulométricos, además de verificar que lo propuesto de manera teórica sea similar o que la diferencia no sea excesiva.
- Se sugiere hacer una malla de cálculo que sea lo más fina posible, esto con el fin de poder modelar la sección de la pila con el acabado, es decir que tenga las muescas del acabado final, con la intención de incorporar un efecto de sección.
- De ser posible emplear algún otro modelo de simulación de flujo bidimensional para contrastar los datos obtenidos el cual considere los datos de gastos, rugosidades, tirantes y socavación local (Usar otro programa).

- Se recomienda hacer simulaciones variando los acabados en las pilas, es decir una configuración donde la pila 1 tenga el acabado “casquete hexagonal” y la pila dos el acabado “casquete esférico” y en otra simulación ahora la pila 1 tendrá el acabado “casquete esférico” y la pila 2 el acabado “casquete hexagonal”, esto para registrar el comportamiento de ambas pilas.
- Modificar los parámetros de la malla realizando un ajuste más fino invirtiendo más tiempo computacional para así identificar si existen variaciones entre un modelo y otro, también considerar modificar los valores de rugosidad y de ser posible hacer adecuaciones al tramo modelado

REFERENCIAS.

- Álvarez, A. (2017). *Análisis del acabado superficial en pilas de puentes y su efecto en la profundidad de socavación, aplicando CFD*. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias del Agua. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Álvarez, A. & Becerril, J. (2017). *Simulación Numérica Bidimensional Del Flujo En Cauces Naturales Altamente Erosivos, Caso De Estudio: "Río Agua Bendita, Metepec Edo. México*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Limusa.
- Baeza, C. (2007). *Estimación Regional De Factores De Convectividad Para El Cálculo De Las Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia*. Tesis para obtener el grado de Maestro en ingeniería civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Blade, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cedón, E., Dolz, J. & Coll, A. (2014). *IBER herramienta de simulación numérica del flujo en ríos*. *Rev. Int. de Métodos Num.* V 30, pp 1-10.
- Bonilla, R. (2010). *Sheath for Reducing Local Scour in Bridge Piers*. Scour and Erosion, ASCE, Estados Unidos, 987-996.
- Campos, D. (2010), *Introducción a la Hidrología Urbana*. Printego.
- Chiew, YM, (1992). *Scour protection at bridge piers*, *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Chow, V. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGRAWL-HILL.
- Comisión Nacional del Agua. (2014). *Programa De Medidas Preventivas Y De Mitigación De La Sequía En La Cuenca De La Costa De Chiapas*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/99925/PMPMS_CC_Costa_de_chiapas.pdf
- Cusba, B. (2011). *Estudio De Las Causas Y Soluciones Estructurales Del Colapso Total O Parcial De Los Puentes Vehiculares De Colombia Desde 1986 Al 2011, Y La Evaluación De Las Consecuencias Del Derrumbamiento De Uno De Ellos*.

- Díaz-González, E. V. (2016). *Análisis experimental de la socavación local de pilas de puente, con acabado hidrodinámico*. Tesis de Maestría en Ciencias del Agua. Centro Interamericano de Recursos del Agua. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca. México.
- GECCSA INGENIERIA S.A. DE C.V. (2003). *Manifestación de impacto ambiental modalidad regional proyecto de reparación del puente "Maxixapa", ubicado en el km 235+700 del C.D. Arriaga-Huixtla*. Informe técnico para Caminos y Puentes Federales de ingresos y servicios conexos dirección técnica gerencia de puentes.
- Hidalgo, D., Pacheco, P., & Kuroiwa, J. (2016). *Reducción de socavación en pilares circulares usando discos porosos*. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Lima, Perú.
- INEGI (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010 Villa Comaltitlán. Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/07/0707_.pdf
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2017), Desarrollo De Tecnología Para El Diseño Contra socavación En Pilas Y Estribos De Puente Mediante Rugosidad Artificial Y Diseño Hidrodinámico <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/2050>
- Jiménez P., Roldan H. F., M., Uribe C. D., (2006). *Reducción de la socavación local en pilas circulares mediante el uso de rugosidades artificiales*. Tesis para obtener el grado de la licenciatura en Ingeniería Civil. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Adolfo López Mateos. Instituto Politécnico Nacional, México.
- Marcos, P., Anta, R., Herrero, J., Goya, R. & Cuadr, M. (2011). *Aplicación del modelo IBER al estudio hidráulico del arroyo de la Almucera en Quiruelas de Vidriales (Zamora)*. XI Jornada Internacional del Agua, Barcelona, España.
- Martínez, E. (2004). *Análisis de procesos de erosión local en márgenes de cauces fluviales con curvatura en planta*. Tesis para obtener el grado de doctor. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos.
- Martínez, G. (2007). *Socavación en obras civiles y su problemática [Tesis de Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional]*. Recuperado de: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/317/Socavacionen%20obras%20civiles.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mendoza, F. (2014). *Modelación del transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente, aplicación al río Las Cruces, Calimaya Estado de México*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México.

- Pérez, G., Rodríguez, J. & Molina, J. (2017). *Apuntes de la materia Ingeniería de ríos*. Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo. Recuperado de: <http://hidraulica.umich.mx/bperez/APUNTES%20INGENIER%C3%8DA%20DE%20R%C3%OS-AGO-2018%20V-3.pdf>
- Rincon, J., Perez, M., Delfin, G., Freitez, C., & Martinez, F. (2017). *Análisis comparativo entre los modelos HEC-RAS e IBER en la evaluación hidráulica de puentes*. Revista Gaceta Técnica. 17(1) pp. 9-28.
- Roblero, R. H. (2013). *Modelación hidrometeorológica de áreas con riesgos de inundación en la cuenca del río La Sierra, en los estados Chiapas y Tabasco, México*. Tesis para obtener el grado de maestría en Ciencias, especialista en Hidrociencias. Colegio de Postgraduados, México.
- Salinas, H., Diaz, E., & García, J. (2017). *Análisis de la profundidad de socavación de pilas de puente con diferente acabado superficial, con Particle Image Velocimetry (PIV)*. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, Guerrero, México.
- Salinas, H., García, J., Cruz, R., Gonzales, D., & García, J.A. (2018). *Análisis experimental de la evolución del foso de socavación en pilas con diferente acabado superficial utilizando procesamiento de imágenes*. XXV Congreso Nacional de Hidráulica, México.
- Sánchez, F. (2022). *Hidrología Superficial y Subterránea*. 2ª ed. Kindle Direct Publishing. Recuperado de: <https://hidrologia.usal.es/temas.html>
- Servicio Geológico Mexicano (2020,). *Introducción Sistemas de información Geográfica*. Modificado de: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/SIG/Introduccion-SIG.html>
- Silva, A. & Gualdrón, D. (2022) *Gestión de pavimentos flexibles basado en sistema de información geográfica para la red vial de Boyacá, Colombia*. *Aplicaciones SIG para la Ingeniería* (pp. 41-81). UPTC.