



MAC 2014-2020
Cooperación Territorial

Interreg



ESTUDIO HIDRÁULICO DEL BARRANCO DE PUERTO RICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE INUNDACIÓN EN LA SITUACIÓN ACTUAL (T.M. MOGÁN, GRAN CANARIA)

PROYECTO PLANCLIMAC

Leonardo S. Nanía Escobar

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Colegiado Nro. 19071

Área de Ingeniería Hidráulica

Universidad de Granada

Pablo Máyer Suárez

Departamento de Geografía de la ULPGC

Octubre de 2023

ÍNDICE

Índice	ii
Lista de Tablas.....	iv
Lista de Figuras	v
1. Introducción y Objetivos	1
2. Datos e Información de partida	4
2.1.... Introducción.....	4
2.2.... Modelos Digitales del Terreno	4
2.3.... Mapa de usos del suelo	6
2.4.... Caudales	7
2.5.... Puentes	7
3. Metodología	27
3.1.... Introducción.....	27
3.2.... Descripción del software IBER.....	27
3.2.1. Ecuaciones de Saint Venant.....	28
3.2.2. Discretización en volúmenes finitos	28
3.2.3. Condición de Courant.....	29
3.2.4. Información requerida	30
4. Resultados	31
4.1.... Introducción.....	31
4.2.... Rugosidad	31
4.3.... Condiciones iniciales	34
4.4.... Condiciones de contorno	35
4.5.... Malla de cálculo.....	35
4.6.... Periodo de retorno de 50 años	44
4.6.1. Mapa de calados	44
4.6.2. Mapa de velocidades.....	45
4.6.3. Mapa de cota de agua	46
4.7.... Periodo de retorno de 100 años	47
4.7.1. Mapa de calados	47
4.7.2. Mapa de velocidades.....	48
4.7.3. Mapa de cota de agua	49

4.7.4. Mapa de caudal específico (calado x velocidad)	50
4.8.... Periodo de retorno de 500 años	51
4.8.1. Mapa de calados	51
4.8.2. Mapa de velocidades.....	52
4.8.3. Mapa de cota de agua	53
4.9. Periodo de retorno de 100 años. Zona de Flujo Preferente.....	54
4.9.1. Zona de inundación peligrosa.....	54
4.10.. Análisis comparativo por zonas	60
4.10.1. Zona de aguas abajo del parque de bomberos.....	61
4.10.2. Zona del Centro Comercial Mogan Mall	69
4.10.3. Zona entre el Parking y el Mini Golf.....	77
4.10.4. Zona de la desembocadura	83
4.10.5. Resumen de la situación en los puentes	89
4.10.6. Resumen de la situación por calles	89
5. Conclusiones	91
6. Referencias	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de los puentes con levantamiento topográfico específico.	9
Tabla 2. Recategorización de los usos del suelo y coeficientes de rugosidad de Manning utilizados en las simulaciones con Iber.....	33
Tabla 3. Resumen de las cotas en los puentes.	89
Tabla 4. Resumen de los calados máximos en las calles.	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Plano de situación de Puerto Rico en la Isla de Gran Canaria.	2
Figura 2. Plano de situación del barranco de Puerto Rico de Gran Canaria.	3
Figura 3. Modelo digital del terreno de 0,2m de resolución del valle de Puerto Rico de Gran Canaria.	5
Figura 4. Mapa de usos del suelo en la zona de influencia del barranco de Puerto Rico de Gran Canaria.	6
Figura 5. Situación de los puentes y puntos de referencia.	8
Figura 6. Vista del puente 1 junto a la ETAP.	10
Figura 7. Características geométricas de la sección transversal del puente 1.	10
Figura 8. Representación de la geometría del puente 1 en 3D.	11
Figura 9. Vista de la zona de aguas arriba del puente 2.	11
Figura 10. Vista de la zona de aguas arriba del puente 2, sobre margen izquierda.	12
Figura 11. Vista de la zona de aguas abajo del puente 2, sobre margen izquierda (12/2018).	12
Figura 12. Representación de la geometría del puente 2 en 3D.	13
Figura 13. Vista de la zona de aguas arriba de la Estación de Bomberos (6/2014).	13
Figura 14. Vista de la zona de aguas arriba del puente 3.	14
Figura 15. Representación de la geometría del puente 3 en 3D.	14
Figura 16. Vista del barranco aguas arriba del puente 4.	15
Figura 17. Vista del barranco aguas abajo del puente 4.	15
Figura 18. Características geométricas de la sección transversal del puente 4.	16
Figura 19. Representación de la geometría del puente 4 en 3D.	17
Figura 20. Vista del barranco aguas arriba del puente 5 (12/2018).	17
Figura 21. Vista del barranco aguas abajo del puente 5 (12/2018).	18
Figura 22. Representación de la geometría del puente 5 en 3D.	18
Figura 23. Vista del barranco aguas abajo del puente 6.	19
Figura 24. Características geométricas de la sección transversal del puente 6.	20

Figura 25. Representación de la geometría del puente 6 en 3D.	20
Figura 26. Vista de la zona del puente 7 sobre la carretera de Mogán.....	21
Figura 27. Vista de la zona aguas abajo del puente 7, desde margen izquierda.....	21
Figura 28. Vista de la zona aguas abajo del puente 7, desde margen derecha.	22
Figura 29. Representación de la geometría del puente 7 en 3D.	22
Figura 30. Vista de la pasarela peatonal 1, puente 8.	23
Figura 31. Representación de la geometría del puente 8 en 3D.....	23
Figura 32. Vista de la pasarela peatonal 2, puente 9.	24
Figura 33. Representación de la geometría del puente 9 en 3D.	24
Figura 34. Vista del barranco aguas arriba del puente 10.	25
Figura 35. Representación de la geometría del puente 10 en 3D.	25
Figura 36. Vista del barranco aguas abajo del puente 10.	26
Figura 37. Discretización en volúmenes finitos de un dominio bidimensional.	29
Figura 38. Mapa de rugosidades obtenido de la reclasificación de los usos del suelo.	32
Figura 39. Mapa de los códigos utilizados en Iber para la determinación de las rugosidades.	34
Figura 40. Malla de cálculo utilizada en Iber para el barranco de Puerto Rico.	36
Figura 41. Detalle de la malla en la zona del puente 1.....	37
Figura 42. Detalle de la malla en la zona del puente 3.	38
Figura 43. Detalle de la malla en la zona del puente 4.	39
Figura 44. Detalle de la malla en la zona del puente 6.	40
Figura 45. Detalle de la malla en la zona del puente 7.	41
Figura 46. Detalle de la malla en la zona de los puentes 8 y 9 (pasarelas peatonales).	42
Figura 47. Detalle de la malla en la zona del puente 10.	43
Figura 48. Mapa de calados para periodo de retorno de 50 años.	44
Figura 49. Mapa de velocidades para periodo de retorno de 50 años.....	45
Figura 50. Mapa de cotas de inundación para periodo de retorno de 50 años.....	46
Figura 51. Mapa de calados para periodo de retorno de 100 años.	47
Figura 52. Mapa de velocidades para periodo de retorno de 100 años.	48
Figura 53. Mapa de cota de inundación para periodo de retorno de 100 años.	49
Figura 54. Mapa de caudal específico (calado x velocidad) para periodo de retorno de 100 años.....	50
Figura 55. Mapa de calados para periodo de retorno de 500 años.....	51
Figura 56. Mapa de velocidades para periodo de retorno de 500 años.	52

Figura 57. Mapa de cota de inundación para periodo de retorno de 500 años.	53
Figura 58. Mapa de la zona con calados mayores a 1 m, para periodo de retorno de 100 años.	55
Figura 59. Mapa de la zona con velocidades mayores a 1 m/s, para periodo de retorno de 100 años.	56
Figura 60. Mapa de la zona con productos de calado por velocidad mayor a 0,5 m ² /s, para periodo de retorno de 100 años.	57
Figura 61. Mapa de la zona donde no se cumple ninguno, 1, 2 o 3 de los criterios de inundación peligrosa, para periodo de retorno de 100 años.	58
Figura 62. Mapa de la zona de inundación peligrosa en el barranco de Puerto Rico.	59
Figura 63. Manchas de inundación para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años en el barranco de Puerto Rico.	60
Figura 64. Zona inmediatamente aguas abajo del Parque de Bomberos.	61
Figura 65. Detalle de la zona inmediatamente aguas abajo del Parque de Bomberos, donde se ve la disminución de altura del cajero de margen izquierda.	62
Figura 66. Detalle de manchas de inundación en la zona de aguas abajo del Parque de Bomberos.	63
Figura 67. Detalle las zonas donde se cumplen los criterios para inundación peligrosa en la zona de aguas abajo del Parque de Bomberos.	64
Figura 68. Detalle de la zona de inundación peligrosa en la zona de aguas abajo del Parque de Bomberos.	65
Figura 69. Detalle de calados en la zona de aguas abajo del Parque de Bomberos, para T 50 años.	66
Figura 70. Detalle de calados en la zona de aguas abajo del Parque de Bomberos, para T 100 años.	67
Figura 71. Detalle de calados en la zona de aguas abajo del Parque de Bomberos, para T 500 años.	68
Figura 72. Detalle de manchas de inundación en la zona del Mogán Mall.	69
Figura 73. Detalle las zonas donde se cumplen los criterios para inundación peligrosa en la zona del Mogán Mall.	70
Figura 74. Detalle de la zona de inundación peligrosa en la zona del Mogán Mall.	71
Figura 75. Detalle de calados en la zona del Mogán Mall, para T 500 años.	72
Figura 76. Detalle de calados en la zona del Mogán Mall, para T 100 años.	73
Figura 77. Detalle de velocidades en la zona del Mogán Mall, para T 100 años.	74

Figura 78. Detalle de producto de calado x velocidad en la zona del Mogán Mall, para T 100 años.	75
Figura 79. Detalle de calados en la zona del Mogán Mall, para T 50 años.	76
Figura 80. Detalle de manchas de inundación en la zona entre el parking y el minigolf.	77
Figura 81. Detalle las zonas donde se cumplen los criterios para inundación peligrosa en la zona entre el parking y el minigolf.	78
Figura 82. Detalle de la zona de inundación peligrosa en la zona entre el parking y el minigolf.	79
Figura 83. Detalle de calados en la zona entre el parking y el minigolf, para T 500 años.	80
Figura 84. Detalle de calados en la zona entre el parking y el minigolf, para T 100 años.	81
Figura 85. Detalle de calados en la zona entre el parking y el minigolf, para T 50 años.	82
Figura 86. Detalle de manchas de inundación en la zona de la desembocadura.	83
Figura 87. Detalle las zonas donde se cumplen los criterios para inundación peligrosa en la zona de la desembocadura.	84
Figura 88. Detalle de la zona de inundación peligrosa en la zona de la desembocadura.	85
Figura 89. Detalle de calados en la zona de la desembocadura, para T 500 años.	86
Figura 90. Detalle de calados en la zona de la desembocadura, para T 100 años.	87
Figura 91. Detalle de calados en la zona de la desembocadura, para T 50 años.	88
Figura 92. Mapa de calles en el valle del barranco de Puerto Rico.	90

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Dentro de las actividades del proyecto PLANCLIMAC (MAC2/3.5b/244) se encuentra el análisis de los cambios recientes del litoral y sus consecuencias ambientales. Se propone un diagnóstico sobre el origen de los problemas mediante la modelización de “cuencas tipo”, así como la evaluación de la incidencia del cambio climático en el litoral y la propuesta de medidas mitigadoras. En este contexto, se seleccionó como cuenca piloto el barranco de Puerto Rico, situado en el SO de la isla de Gran Canaria, un espacio que ha sido transformado desde la década de los años 1960 por las actividades turísticas, especialmente en el litoral. En un trabajo previo (García Romero et al, 2023) se abordaron las consecuencias de los temporales marinos en las construcciones e infraestructuras ubicadas en el litoral de esta cuenca, así como otros espacios cercanos, incluyendo las consecuencias del incremento del nivel del mar en un contexto de cambio climático global. Se trata ahora, con este informe, de conocer cuáles son las consecuencias de las avenidas torrenciales en esta cuenca y su impacto en las urbanizaciones turísticas, especialmente las situadas cerca del litoral y las posibles medidas de mitigación que se pueden plantear.

Así pues, el objetivo de este informe es determinar los niveles de inundación del barranco de Puerto Rico, en el último tramo de 2.700 m antes de desembocar en el océano, en la situación actual, para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años.

En la siguiente Figura se indica la situación relativa de la localidad de Puerto Rico en la isla de Gran Canaria y en la posterior, una vista del valle que conforma el barranco de Puerto Rico.



Figura 1. Plano de situación de Puerto Rico en la Isla de Gran Canaria.

2. DATOS E INFORMACIÓN DE PARTIDA

2.1. Introducción

Para la determinación de los niveles de inundación en un río, es necesario contar con la geometría del mismo, representada en forma de celdas, generalmente cuadradas a las que se le asigna una determinada cota, representación que se suele llamar Modelo Digital del Terreno (MDT) o Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Cuanto menor es el tamaño de la celda, mayor es la resolución y precisión del MDT. También es necesario contar con un mapa de usos del suelo, que permita definir el grado de rugosidad de la superficie del terreno y que será crucial a la hora de definir los niveles de inundación. Dentro de la definición de la geometría, también se necesita el conocimiento preciso de la geometría de las estructuras que entrarán en contacto con el agua del río, tales como puentes, alcantarillas, obras de drenaje transversal de carreteras, etc.

En el presente capítulo se realiza una recopilación de todos los datos e información necesaria para poder aplicar la metodología que se presentará en el siguiente capítulo.

2.2. Modelos Digitales del Terreno

MDT con resolución de 0,2 m obtenido a partir de un levantamiento topográfico específico de la zona propia del barranco y, fuera de esta zona, utilizando las nubes de puntos LiDaR obtenidas del Centro de Descarga del Instituto Geográfico Nacional (IGN), con densidad mínima de 0,5 puntos/m² y máxima de entre 1 y 2 puntos/m², según la zona.

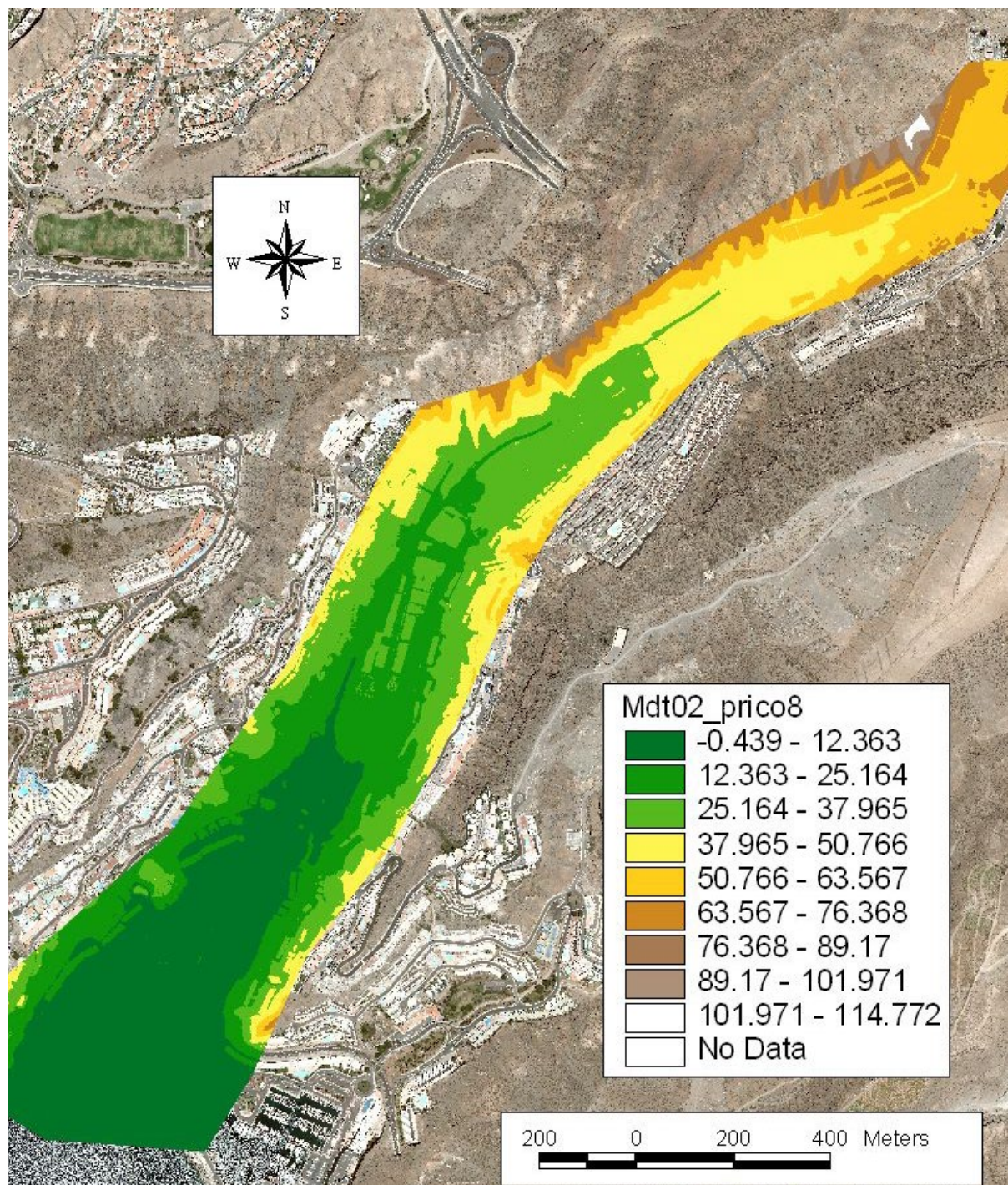


Figura 3. Modelo digital del terreno de 0,2m de resolución del valle de Puerto Rico de Gran Canaria.

2.3. Mapa de usos del suelo

En la siguiente Figura, se muestran los usos del suelo presentes en la zona de influencia del barranco de Puerto Rico.

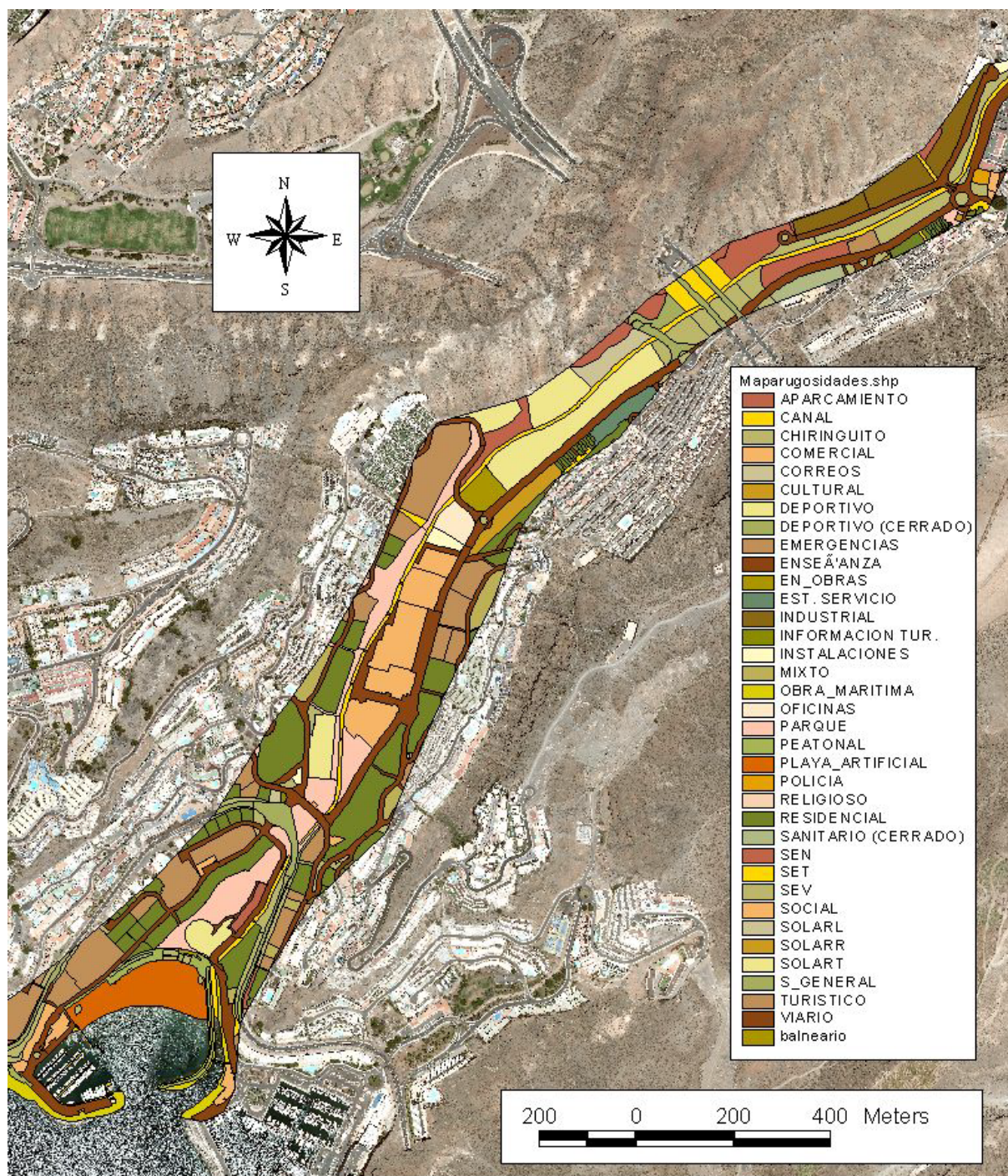


Figura 4. Mapa de usos del suelo en la zona de influencia del barranco de Puerto Rico de Gran Canaria.

2.4. Caudales

Los caudales para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años, utilizados en este estudio, se han obtenido del estudio hidrológico realizado específicamente para éste y que arrojó caudales punta de 22,1; 66,9 y 97,1 m³/s.

A partir de los hidrogramas obtenidos, se han simplificado a la forma triangula, con la punta a las 2 hs de comenzada la esorrentía (7200 s) y una recesión lineal hasta o en 3 hs (instante 18000 s).

2.5. Puentes

En la siguiente Figura, se indica la posición de los puentes levantados específicamente para el presente trabajo, así como los puntos de referencia utilizados.

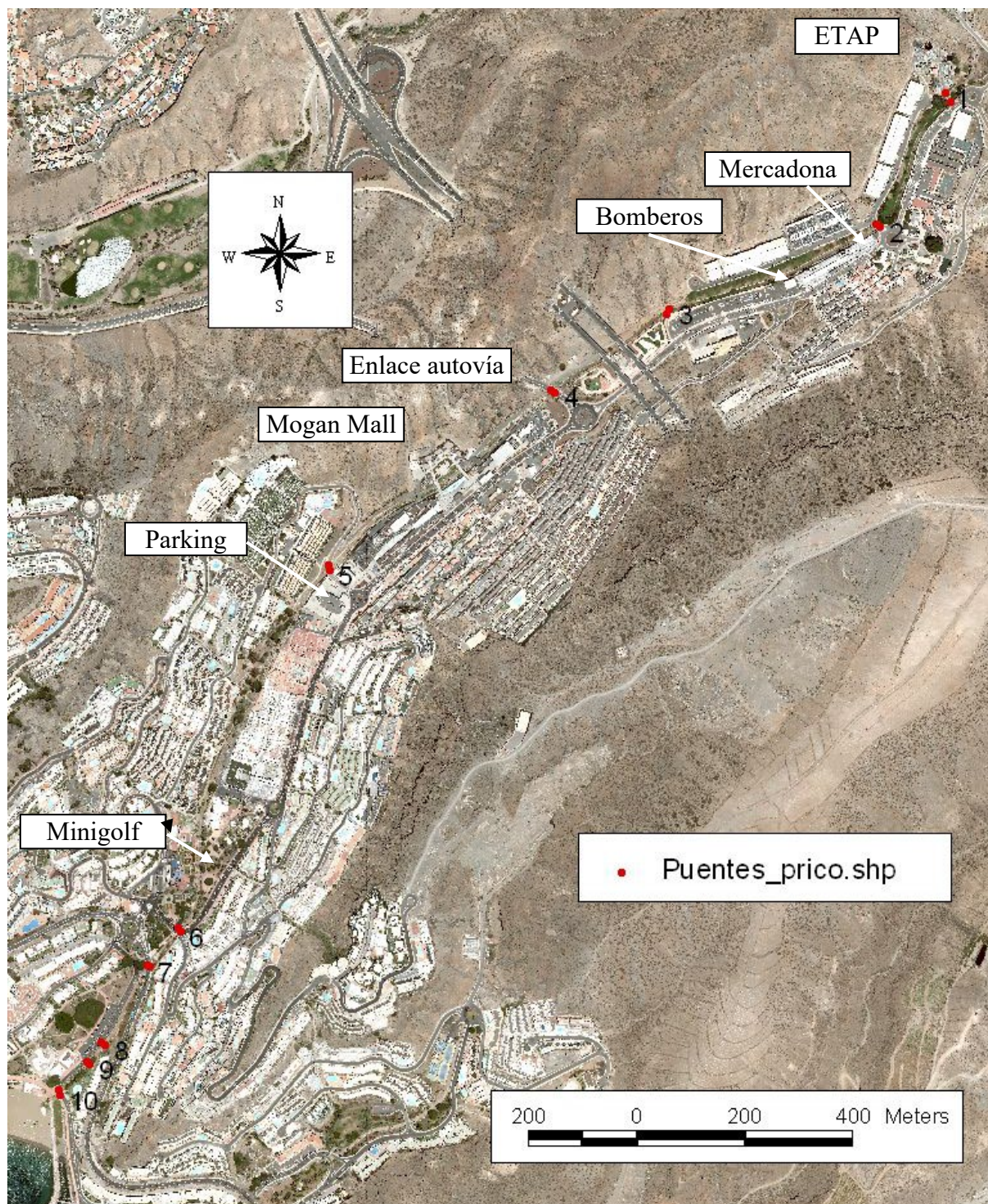


Figura 5. Situación de los puentes y puntos de referencia.

En la siguiente Tabla, se indican las principales características de los puentes con levantamiento topográfico específico.

Tabla 1. Características de los puentes con levantamiento topográfico específico.

Puente	Longitud	Ancho	Com/Fin	x	y	Cota sup	Cota inf
1	17.58	8	Comienzo	431475.511	3075439.32		
			Fin	431465.598	3075453.84		
2	9.37	18.3	Comienzo	431345.507	3075208.44	57.1100	55.8327
			Fin	431337.189	3075212.75	57.3100	56.0335
3	9.03	6.48	Comienzo	430951.818	3075047.73	43.6404	63.0969
			Fin	430954.721	3075056.28	43.7906	56.0008
4	8.73	32.96	Comienzo	430744.729	3074903.22		
			Fin	430738.188	3074907.23		
5	10.43	17.41	Comienzo	430328.092	3074573.84	25.9975	24.6372
			Fin	430327.222	3074583.23	25.9975	24.7003
6	7.22	22.83	Comienzo	430053.068	3073908.95		
			Fin	430048.212	3073914.29		
7	6	34.62	Comienzo	429996.002	3073843.19	8.7000	7.7
			Fin	429991.333	3073847.01	8.3600	7.36
8	7.2	1.59	Comienzo	429913.496	3073698.61	4.8300	4.3300
			Fin	429908.002	3073703.2	4.7700	4.2700
9	7.26	1.95	Comienzo	429885.717	3073663.24	4.3255	3.9255
			Fin	429880.137	3073667.88	4.2630	3.863
10	10.4	19.7	Comienzo	429832.017	3073607.47	4.1734	3.67
			Fin	429829.508	3073617.26	4.1443	3.64

A continuación, se presenta una descripción de los puentes con levantamiento topográfico específico.

Puente 1. Junto a Estación de Tratamiento de Aguas Potables (ETAP).



Figura 6. Vista del puente 1 junto a la ETAP.

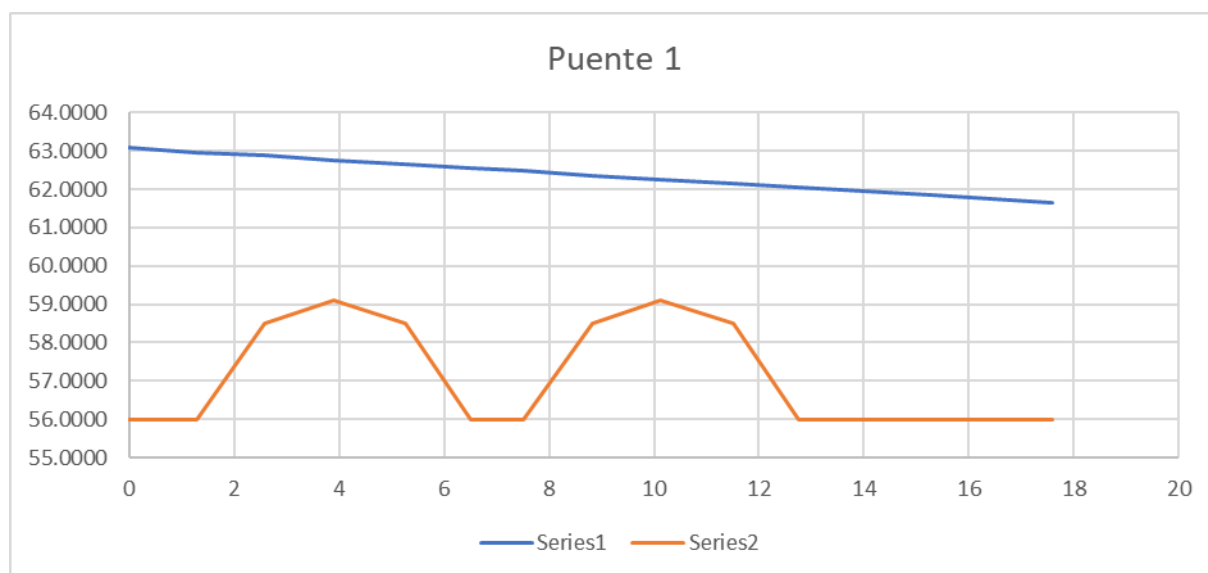


Figura 7. Características geométricas de la sección transversal del puente 1.

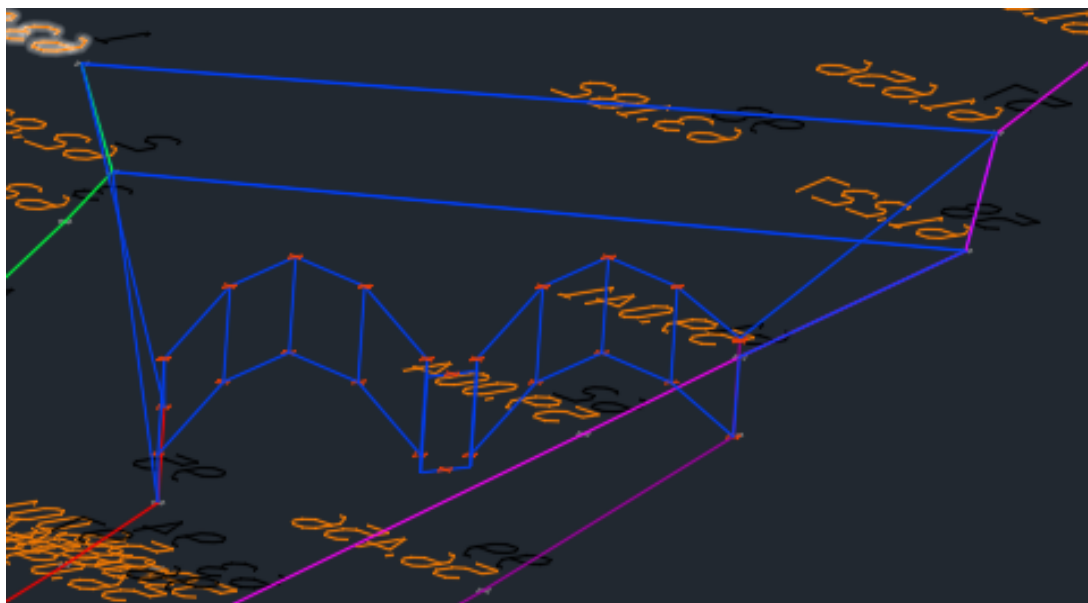


Figura 8. Representación de la geometría del puente 1 en 3D.

Puente 2: aguas arriba rotonda del Mercadona



Figura 9. Vista de la zona de aguas arriba del puente 2.



Figura 10. Vista de la zona de aguas arriba del puente 2, sobre margen izquierda.



Figura 11. Vista de la zona de aguas abajo del puente 2, sobre margen izquierda (12/2018).

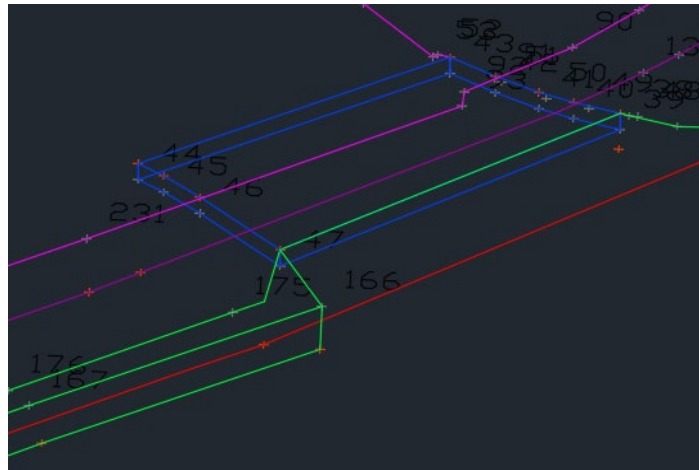


Figura 12. Representación de la geometría del puente 2 en 3D.



Figura 13. Vista de la zona de aguas arriba de la Estación de Bomberos (6/2014).

Puente 3: aguas arriba autovía.



Figura 14. Vista de la zona de aguas arriba del puente 3.

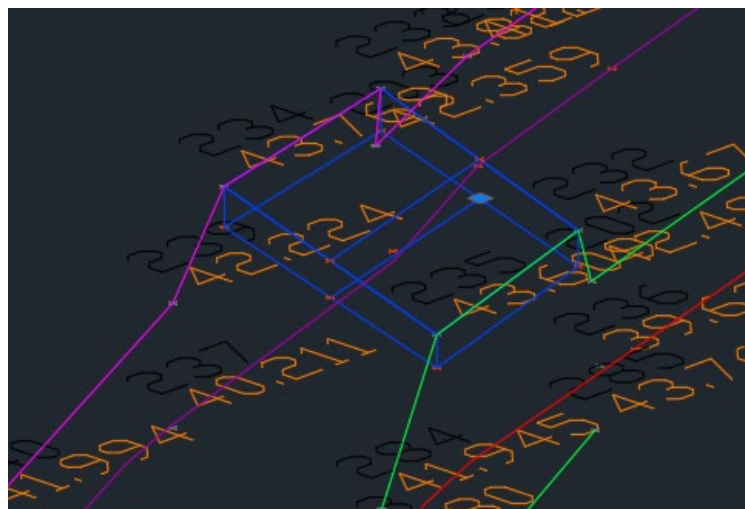


Figura 15. Representación de la geometría del puente 3 en 3D.

Puente 4: aguas abajo Autovía, enlace



Figura 16. Vista del barranco aguas arriba del puente 4.

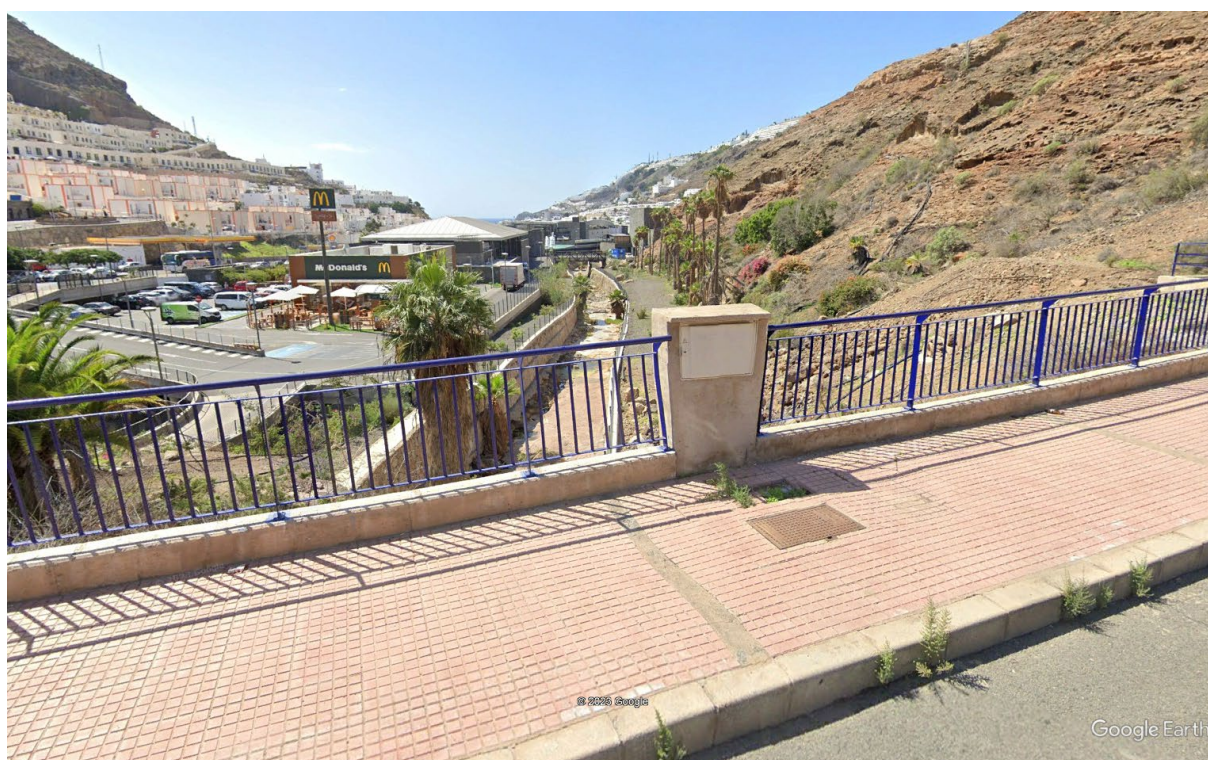


Figura 17. Vista del barranco aguas abajo del puente 4.

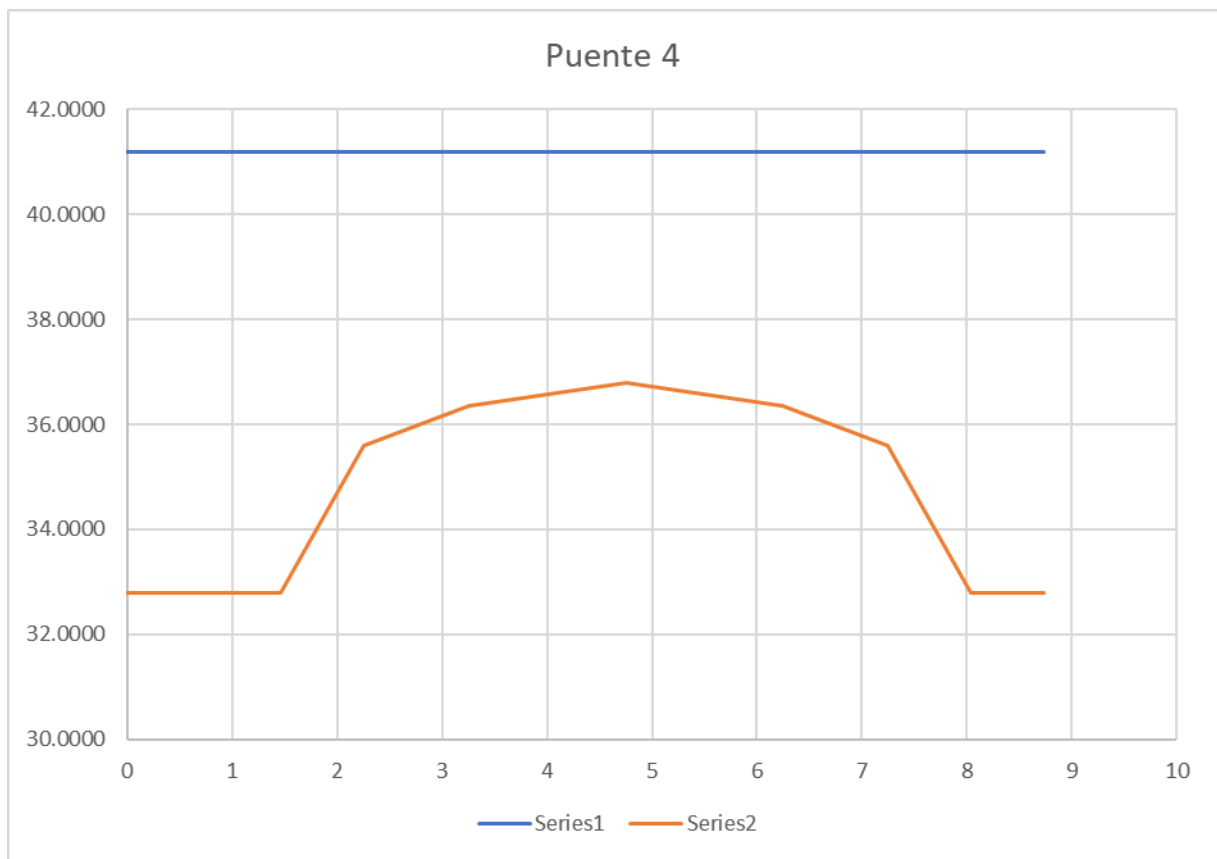


Figura 18. Características geométricas de la sección transversal del puente 4.

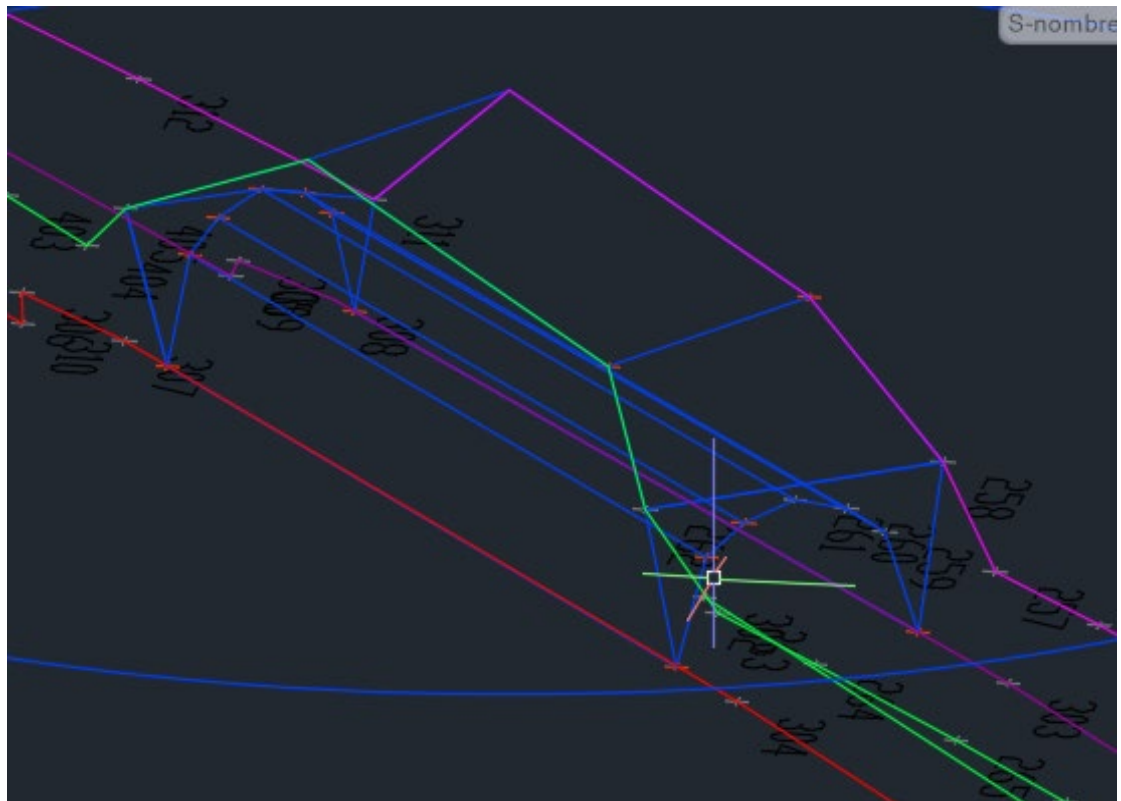


Figura 19. Representación de la geometría del puente 4 en 3D.

Puente 5: entre Mogan Mall y Parking



Figura 20. Vista del barranco aguas arriba del puente 5 (12/2018).

Puente 6: aguas abajo Minigolf



Figura 23. Vista del barranco aguas abajo del puente 6.

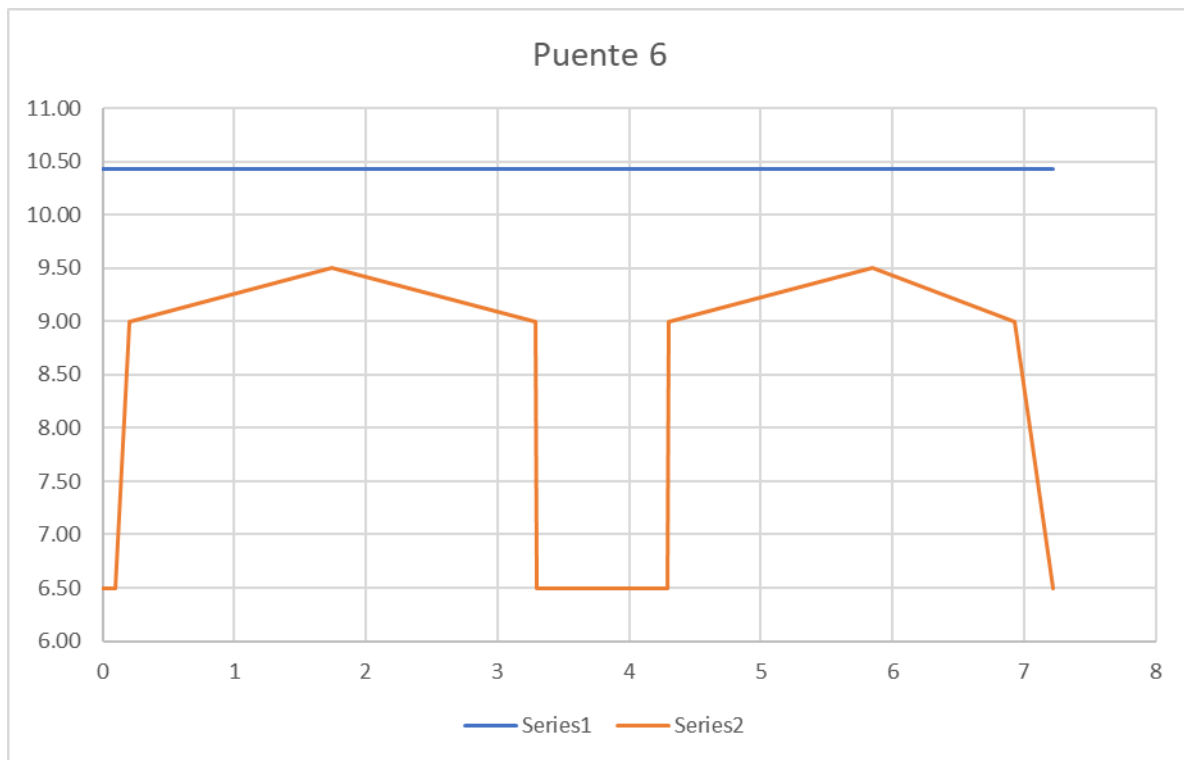


Figura 24. Características geométricas de la sección transversal del puente 6.

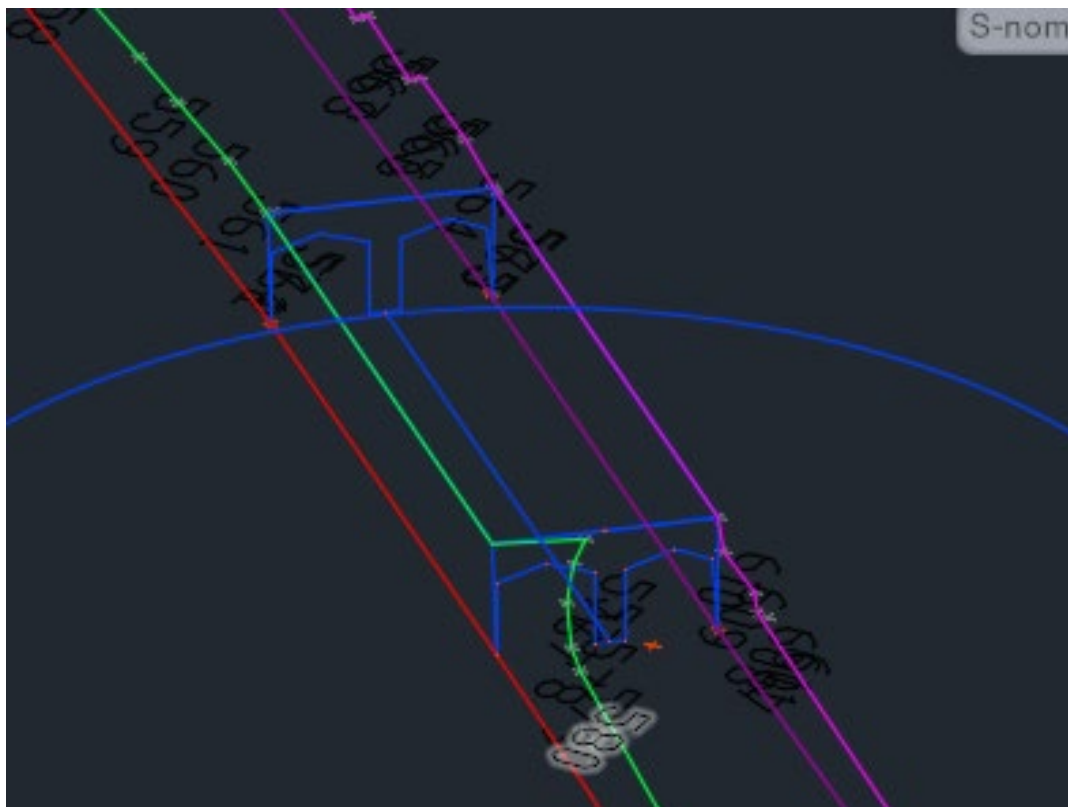


Figura 25. Representación de la geometría del puente 6 en 3D.

Puente 7: carretera de Mogán



Figura 26. Vista de la zona del puente 7 sobre la carretera de Mogán.



Figura 27. Vista de la zona aguas abajo del puente 7, desde margen izquierda.



Figura 28. Vista de la zona aguas abajo del puente 7, desde margen derecha.

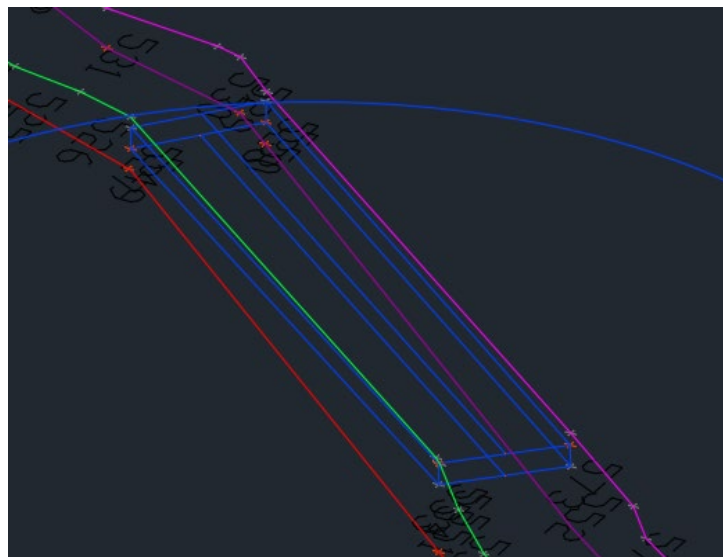


Figura 29. Representación de la geometría del puente 7 en 3D.

Puente 8: pasarela peatonal 1



Figura 30. Vista de la pasarela peatonal 1, puente 8.

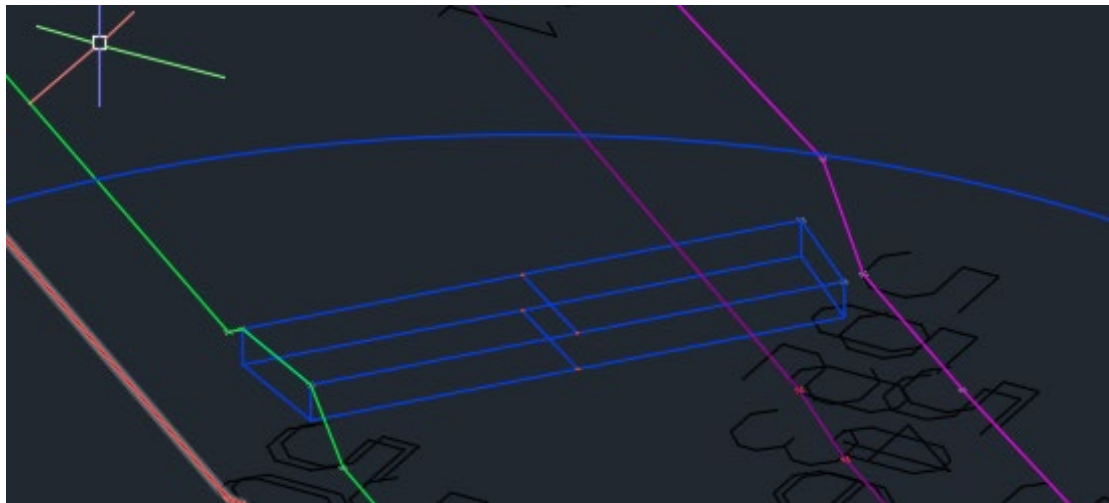


Figura 31. Representación de la geometría del puente 8 en 3D.

Puente 9: pasarela peatonal 2

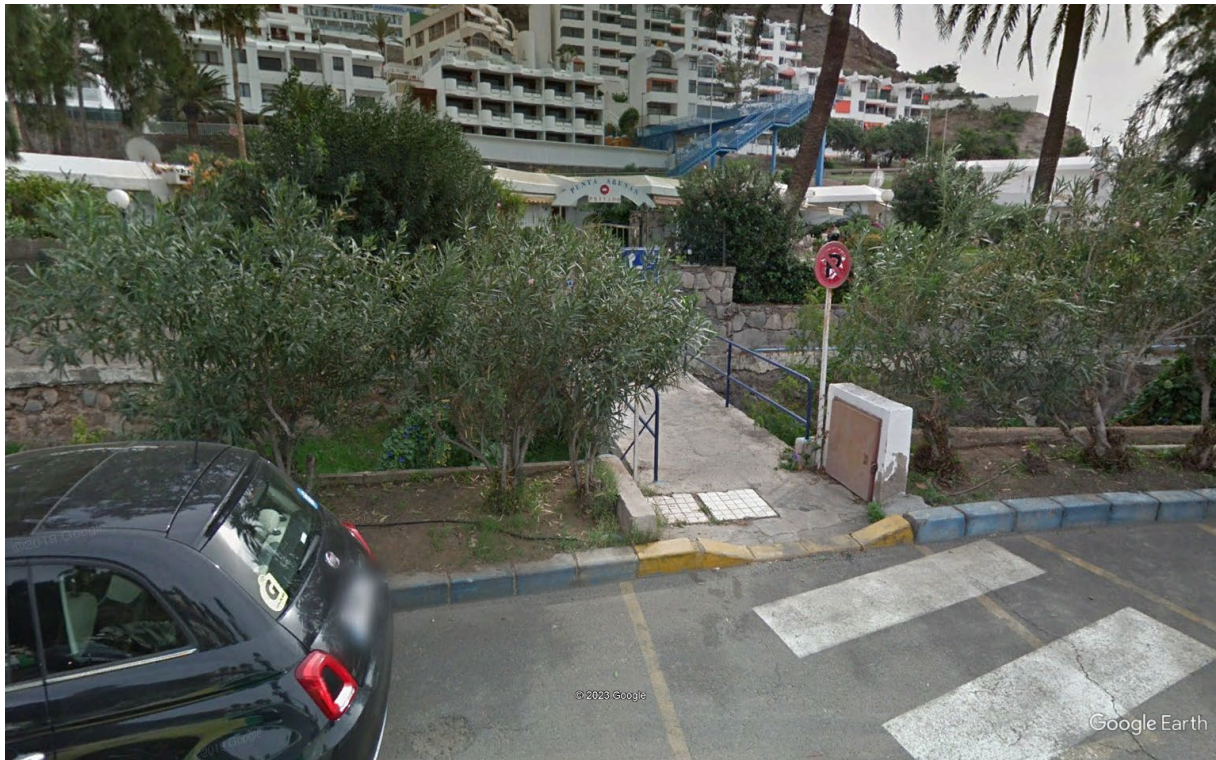


Figura 32. Vista de la pasarela peatonal 2, puente 9.

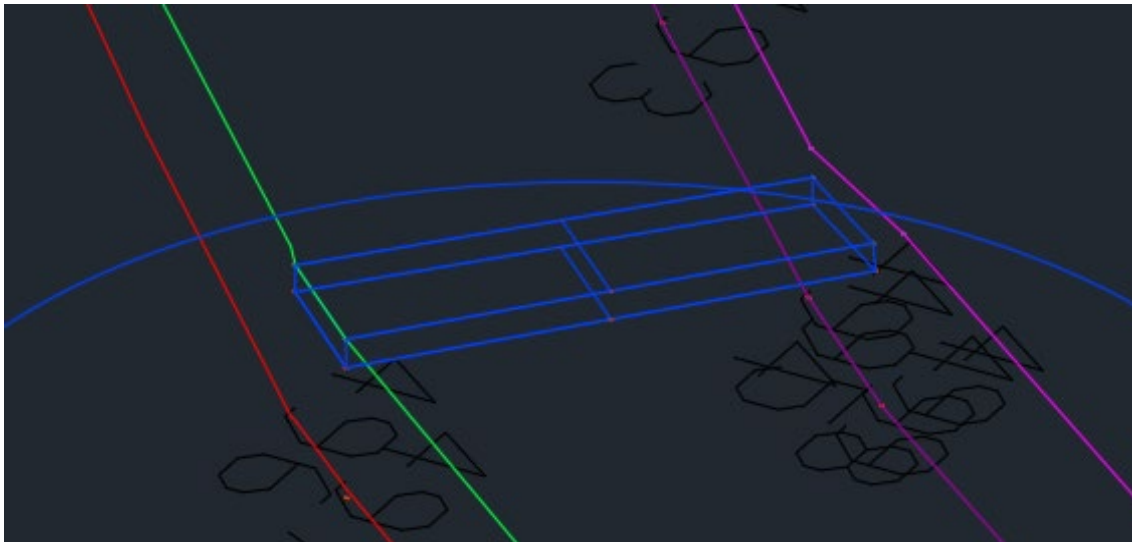


Figura 33. Representación de la geometría del puente 9 en 3D.

Puente 10: desembocadura



Figura 34. Vista del barranco aguas arriba del puente 10.

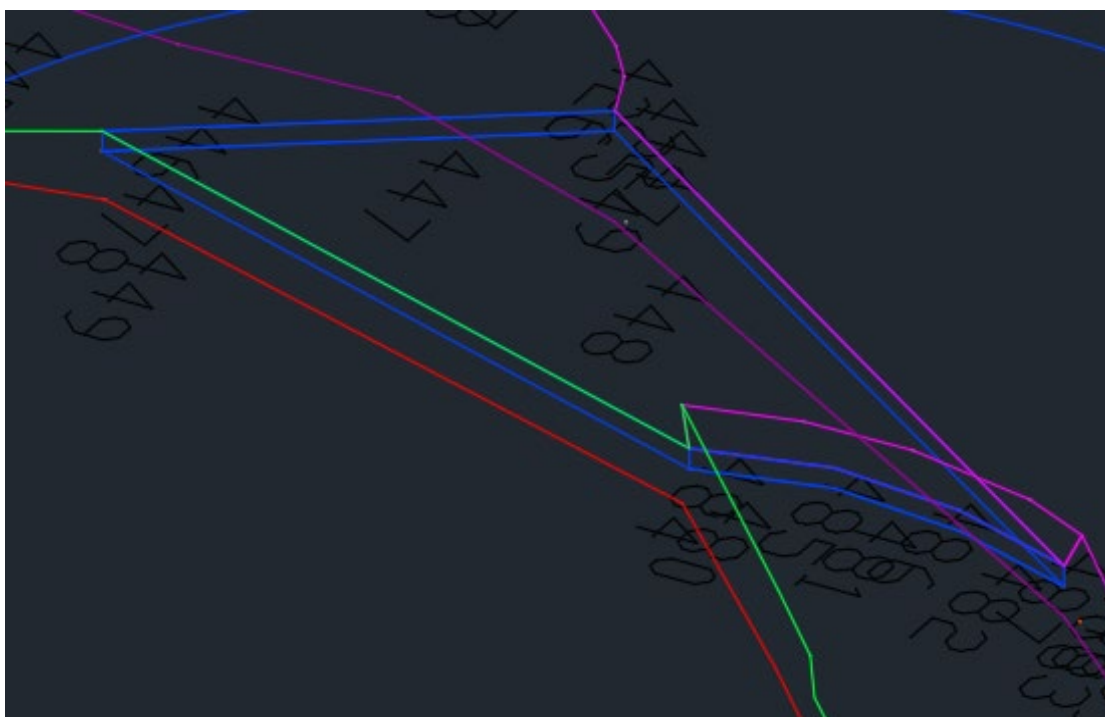


Figura 35. Representación de la geometría del puente 10 en 3D.



Figura 36. Vista del barranco aguas abajo del puente 10.

3. METODOLOGÍA

3.1. Introducción

En el cálculo hidráulico se utilizará el software hidrodinámico bidimensional IBER, desarrollado en conjunto por el Instituto FLUMEN de la Universidad Politécnica de Cataluña y la Universidad de La Coruña para el CEDEX (Bladé et al, 2014).

3.2. Descripción del software IBER

Iber es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en lámina libre y procesos de transporte en ríos y estuarios, desarrollado en colaboración por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidade da Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE), en el marco de un Convenio de Colaboración suscrito entre el CEDEX y la Dirección General del Agua.

IBER es capaz de realizar simulaciones hidrodinámicas sobre geometrías irregulares, integrando aproximaciones uni- y bidimensionales con varios tipos de conexiones entre los dos tipos de dominios. IBER usa esquemas numéricos de alta resolución que permite el cálculo de flujos discontinuos, en 2D puede usar tanto mallas irregulares no estructuradas como estructuradas de triángulos o cuadriláteros, y en 1D secciones transversales compuestas (canal principal y llanuras de inundación).

IBER incorpora procesos que consideran el mojado y secado del dominio, así como rugosidades variables en el espacio y con las características del flujo. Finalmente, el sistema, que usa las

ecuaciones completas de Saint Venant, puede utilizarse como un modelo hidrológico distribuido de transformación lluvia-caudal completamente integrado en el modelo hidráulico.

3.2.1. Ecuaciones de Saint Venant

Aplicando las leyes de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento a un fluido isotrópico e incompresible como el agua, se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes del movimiento instantáneo del flujo, de las cuales pueden derivarse las ecuaciones de Reynolds promediando las variables en el tiempo. Considerando un flujo en lámina libre e integrando las ecuaciones de Reynolds en profundidad se obtienen las ecuaciones de Saint Venant 2D, que son válidas cuando el flujo tiene un comportamiento predominantemente bidimensional en horizontal, con velocidades verticales despreciables, pequeña pendiente de fondo (menor al 10%), lo cual se cumple, en general, si las dimensiones en horizontal predominan sobre la vertical.

Las ecuaciones de Saint Venant pueden escribirse en su forma conservativa como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{U} + \nabla \mathbf{F} = \mathbf{H}$$

Donde $\mathbf{U}$ es el vector de variables del flujo, $\mathbf{F}$ el tensor de flujo y $\mathbf{H}$ el término fuente, que se escriben:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}; \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} hu & hv \\ hu^2 + g \frac{h^2}{2} & huv \\ huv & hv^2 + g \frac{h^2}{2} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{pmatrix}$$

Donde h es el calado o profundidad del flujo, u y v las componentes de flujo en las 2 direcciones horizontales, S_0 la pendiente del fondo y S_f la pendiente de fricción.

La ecuación anterior consta de 3 términos. El primero representa la variación local de masa y cantidad de movimiento, la segunda la variación espacial del flujo de masa y cantidad de movimiento y el tercero la pérdida o ganancia de masa y cantidad de movimiento debida a la gravedad y las fuerzas de fricción.

Las ecuaciones de Saint Venant son un caso de ecuaciones diferenciales hiperbólicas en derivadas parciales y con término fuente.

3.2.2. Discretización en volúmenes finitos

La discretización en volúmenes finitos ha probado ser una técnica muy útil para construir esquemas numéricos de alta resolución para el tipo de ecuaciones que aquí se encuentran. Los

volúmenes finitos se pueden usar con dominios de discretización de mallas irregulares y con la formulación integral de las ecuaciones.

Si $\mathbf{U}$ y $\mathbf{H}$ representan el valor medio de las variables dependientes y el término fuente sobre un volumen finito, la integración de las ecuaciones de Saint Venant sobre un volumen finito resulta en la siguiente expresión válida para cualquier esquema numérico de volúmenes finitos explícito:

$$\mathbf{U}_i^{n+1} = \mathbf{U}_i^n - \frac{\Delta t}{V_i} \sum_{k=1}^{N_i} (\mathbf{F}_{i,k}^* \mathbf{n}_{i,k})_{i,k} + \Delta t \mathbf{H}_i$$

Donde $\mathbf{F}^*$ es el flujo numérico: una aproximación al valor de $\mathbf{F}$ en la pared k del volumen o elemento finito V_i , N es el número de paredes del elemento, mientras $\mathbf{n}$ es el vector normal a la pared k y l la longitud de esa pared, tal como se describe en la siguiente figura:

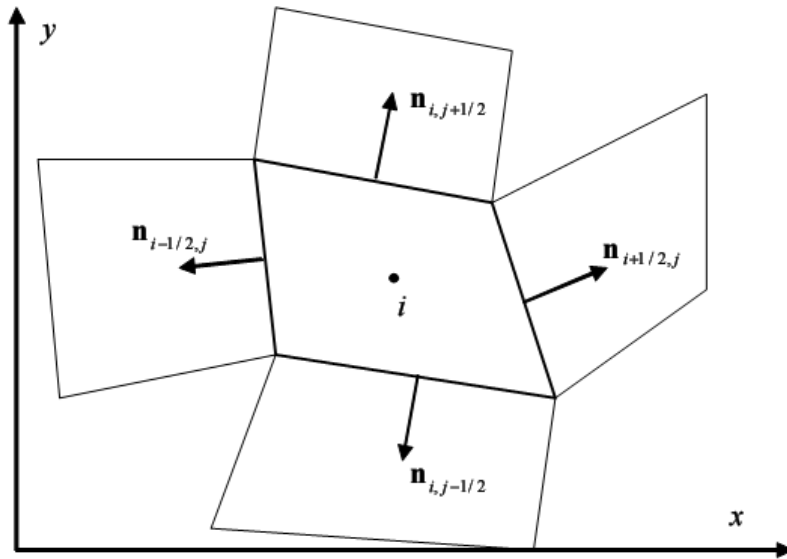


Figura 37. Discretización en volúmenes finitos de un dominio bidimensional.

El esquema numérico usado por IBER se basa en el esquema WAF TVD, el cual puede entenderse como una extensión de los sistemas de ecuaciones del esquema de Lax-Wendroff o también como una extensión de alta resolución del esquema de Roe. Tal esquema se basa en el método de Godunov con el Riemann Solver aproximado de Roe.

3.2.3. Condición de Courant

Todo esquema explícito está sujeto a la condición de Courant que limita el incremento de tiempo según la siguiente fórmula:

$$\Delta t \leq \min \left(\frac{l}{\sqrt{2} \left| \sqrt{u^2 + v^2} + c \right|} \right)$$

Donde c es la celeridad o velocidad con la que se propagan las perturbaciones, que se calcula como $c = \sqrt{gh}$.

3.2.4. Información requerida

La información básica para el estudio hidráulico está compuesta por:

- Caudales de avenidas: obtenidos en un estudio hidrológico previo
- Características geométricas:
 - Modelo digital del terreno de la zona de influencia hasta una cota suficiente, proveniente de levantamiento topográfico específico.
 - Rugosidad del lecho del río y sus llanuras de inundación: a partir de mapas de usos del suelo, fotografías aéreas y visita a la zona de estudio.
 - Singularidades: obras de drenaje, puentes, áreas de flujo inefectivo, estructuras en línea, etc.
- Condiciones de contorno:
 - Aguas arriba: caudal de entrada
 - Aguas abajo: cota del nivel del mar o nivel de agua en el tramo de aguas abajo
 - Internas: puentes, culverts (alcantarillas) y/o viaductos

4. RESULTADOS

4.1. Introducción

En el presente capítulo se presentarán los resultados obtenidos de aplicar la metodología descrita en el capítulo 3, con los datos presentados en el capítulo 2.

4.2. Rugosidad

En la siguiente Figura, se observa el mapa de rugosidades obtenido a través de la recategorización del mapa de usos del suelo con los datos que se presentan en la siguiente Tabla.

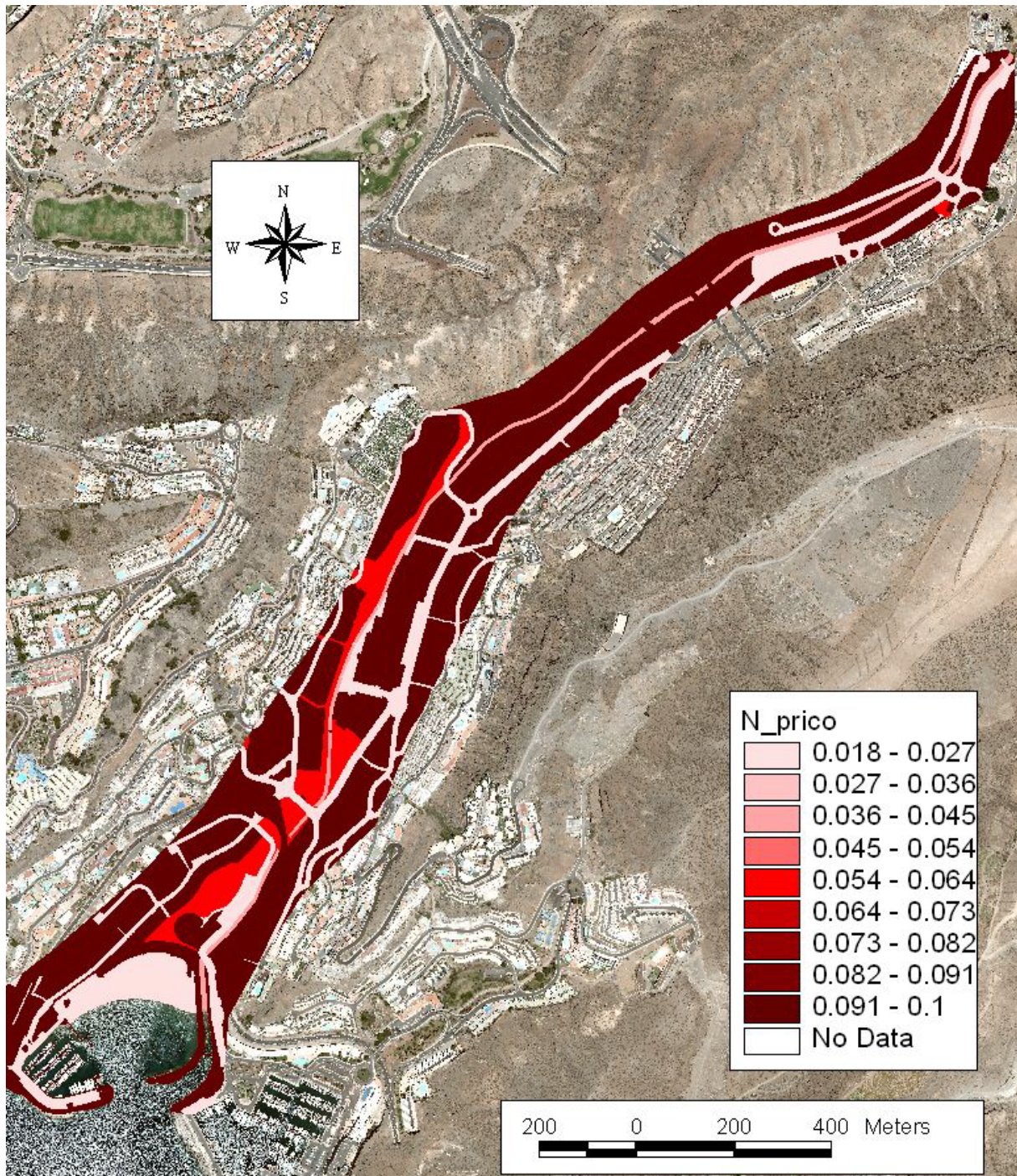


Figura 38. Mapa de rugosidades obtenido de la reclasificación de los usos del suelo.

Tabla 2. Recategorización de los usos del suelo y coeficientes de rugosidad de Manning utilizados en las simulaciones con Iber.

Uso	n	codigo	uso iber
APARCAMIENTO	0.018	1	concrete
VIARIO	0.018	1	concrete
PLAYA_ARTIFICIAL	0.023	2	bare_soil
CANAL	0.04	3	river
PARQUE	0.06	4	brushland
balneario	0.1	5	residential
CHIRINGUITO	0.1	5	residential
COMERCIAL	0.1	5	residential
CORREOS	0.1	5	residential
CULTURAL	0.1	5	residential
DEPORTIVO	0.1	5	residential
EMERGENCIAS	0.1	5	residential
EN_OBRAS	0.1	5	residential
ENSEÑANZA	0.1	5	residential
EST. SERVICIO	0.1	5	residential
INDUSTRIAL	0.1	5	residential
INFORMACION TUR.	0.1	5	residential
INSTALACIONES	0.1	5	residential
MIXTO	0.1	5	residential
OBRA_MARITIMA	0.1	5	residential
OFICINAS	0.1	5	residential
PEATONAL	0.1	5	residential
POLICIA	0.1	5	residential
RELIGIOSO	0.1	5	residential
RESIDENCIAL	0.1	5	residential
S_GENERAL	0.1	5	residential
SANITARIO (CERRADO)	0.1	5	residential
SEN	0.1	5	residential
SET	0.1	5	residential
SEV	0.1	5	residential
SOCIAL	0.1	5	residential
SOLARL	0.1	5	residential
SOLARR	0.1	5	residential
SOLART	0.1	5	residential
TURISTICO	0.1	5	residential

En la siguiente Figura, se muestra cómo quedaría el mapa de rugosidades indicando los códigos que se utilizarán con Iber.

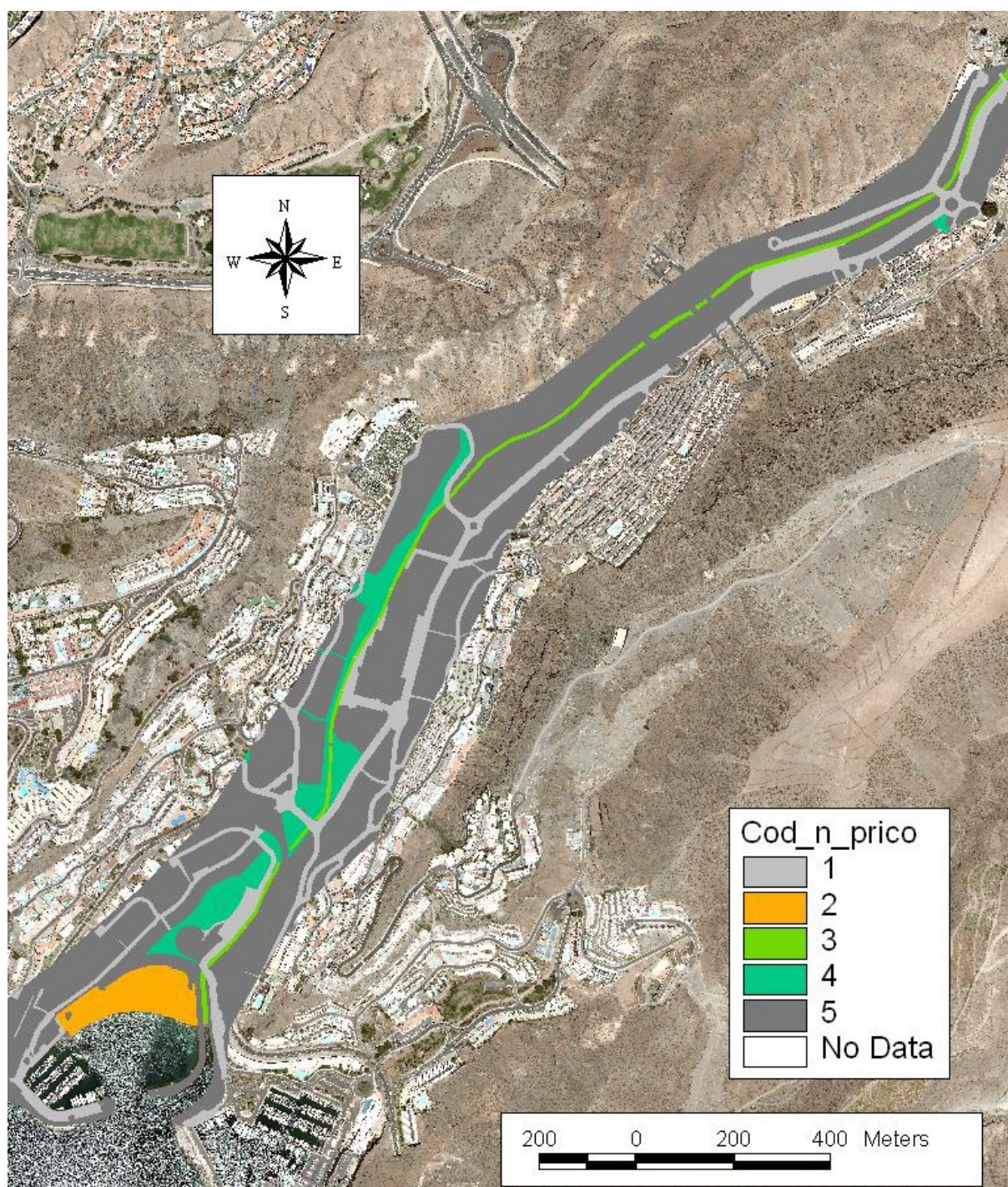


Figura 39. Mapa de los códigos utilizados en Iber para la determinación de las rugosidades.

4.3. Condiciones iniciales

Como condición inicial se consideró una cota de agua igual al nivel de marea de cálculo, que ha sido de 2,58 m. En aquellas zonas del terreno superiores a dicha cota, el lecho se considera seco. El umbral entre lecho seco y mojado se ha fijado en 0,01 m, es decir, que para calados menores a esa cifra, la celda de cálculo se considera seca.

4.4. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno se fijan en los extremos de aguas arriba y aguas abajo del tramo de estudio. En el caso de tramos de río con pendientes relativamente pequeñas (menores al 1%), las condiciones más importantes son las de aguas abajo.

Aguas arriba, se ha impuesto como condición de contorno el caudal de diseño. En este caso se ha considerado un caudal creciente desde 0 hasta el correspondiente al máximo en 7200 s (2 horas) y luego se ha considerado una recesión lineal hasta los 18000 s (5 horas).

Recordamos que los caudales punta utilizados para 50, 100 y 500 años de periodo de retorno han sido de 22,1; 66,9 y 97,1 m³/s.

4.5. Malla de cálculo

La malla de cálculo para este escenario consta de poco más de 2100000 elementos, que han sido obtenidos del MDT de 0,2 m de resolución, con un tamaño máximo de 5 m y mínimo de 0,2 m, con una tolerancia en cota de 0,3 m, lo que significa que mientras haya una diferencia de cotas menor a 0,3 m no se dividirá el elemento en sub-elementos y viceversa, hasta alcanzar el tamaño mínimo impuesto.



Figura 40. Malla de cálculo utilizada en Iber para el barranco de Puerto Rico.

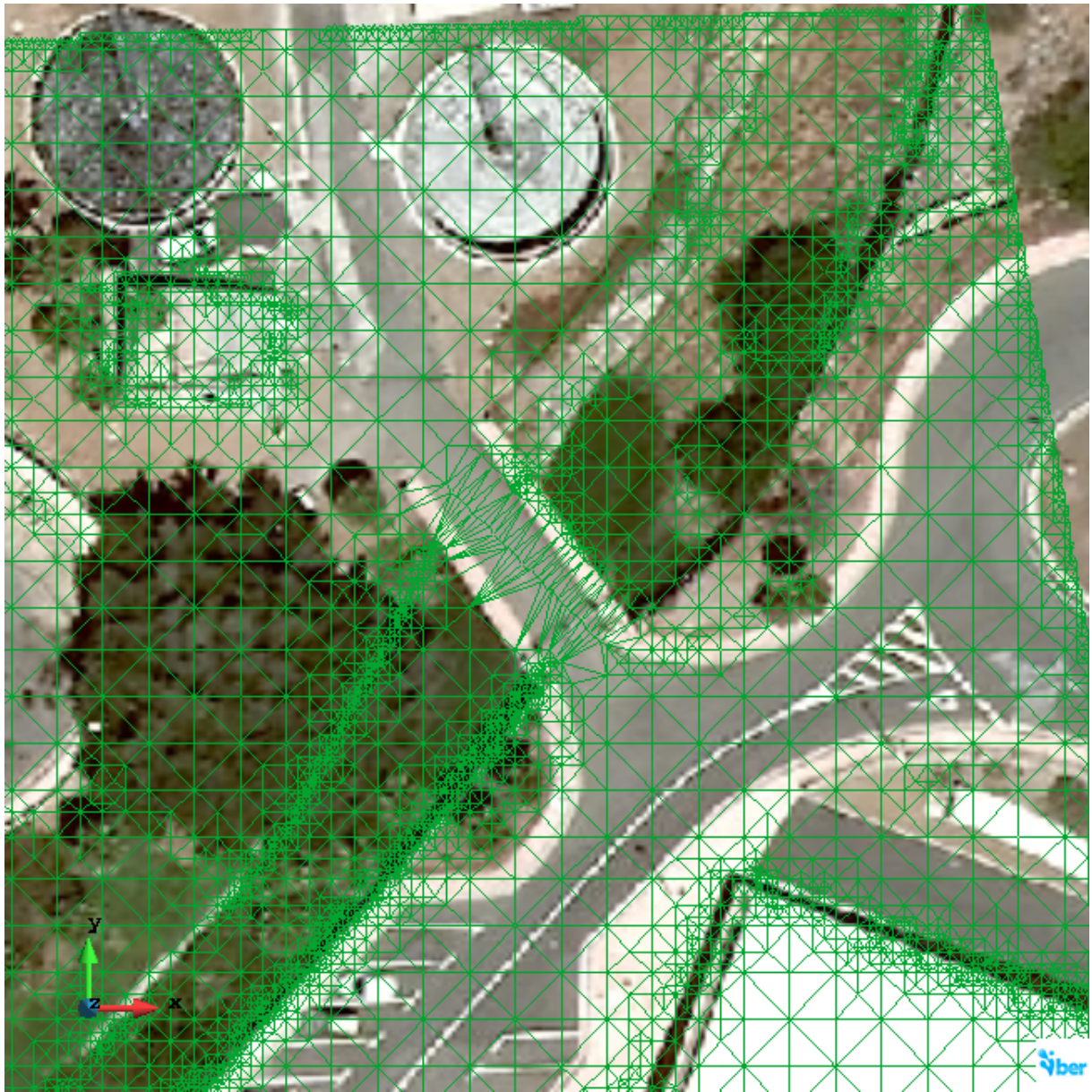


Figura 41. Detalle de la malla en la zona del puente 1.

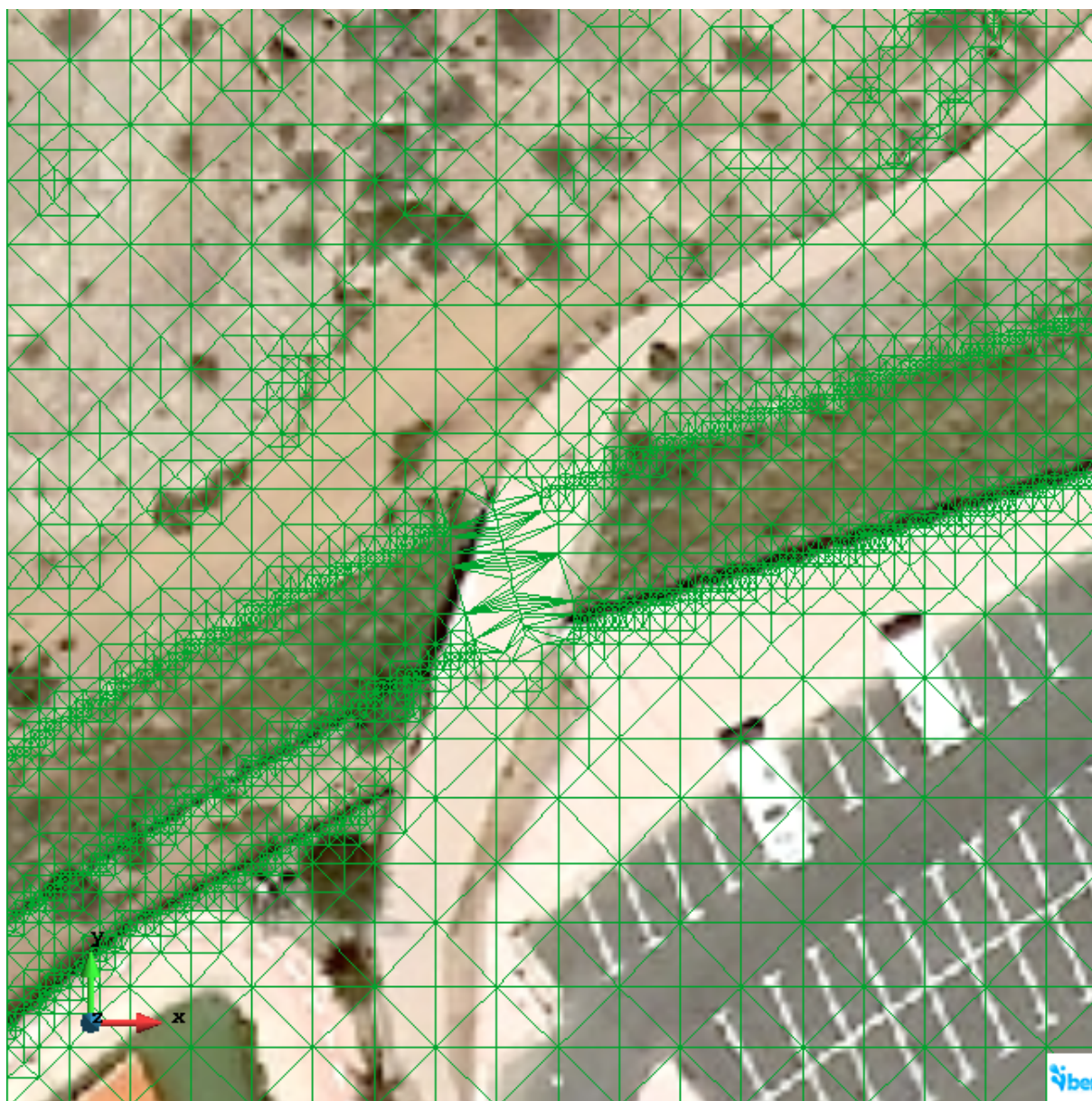


Figura 42. Detalle de la malla en la zona del puente 3.

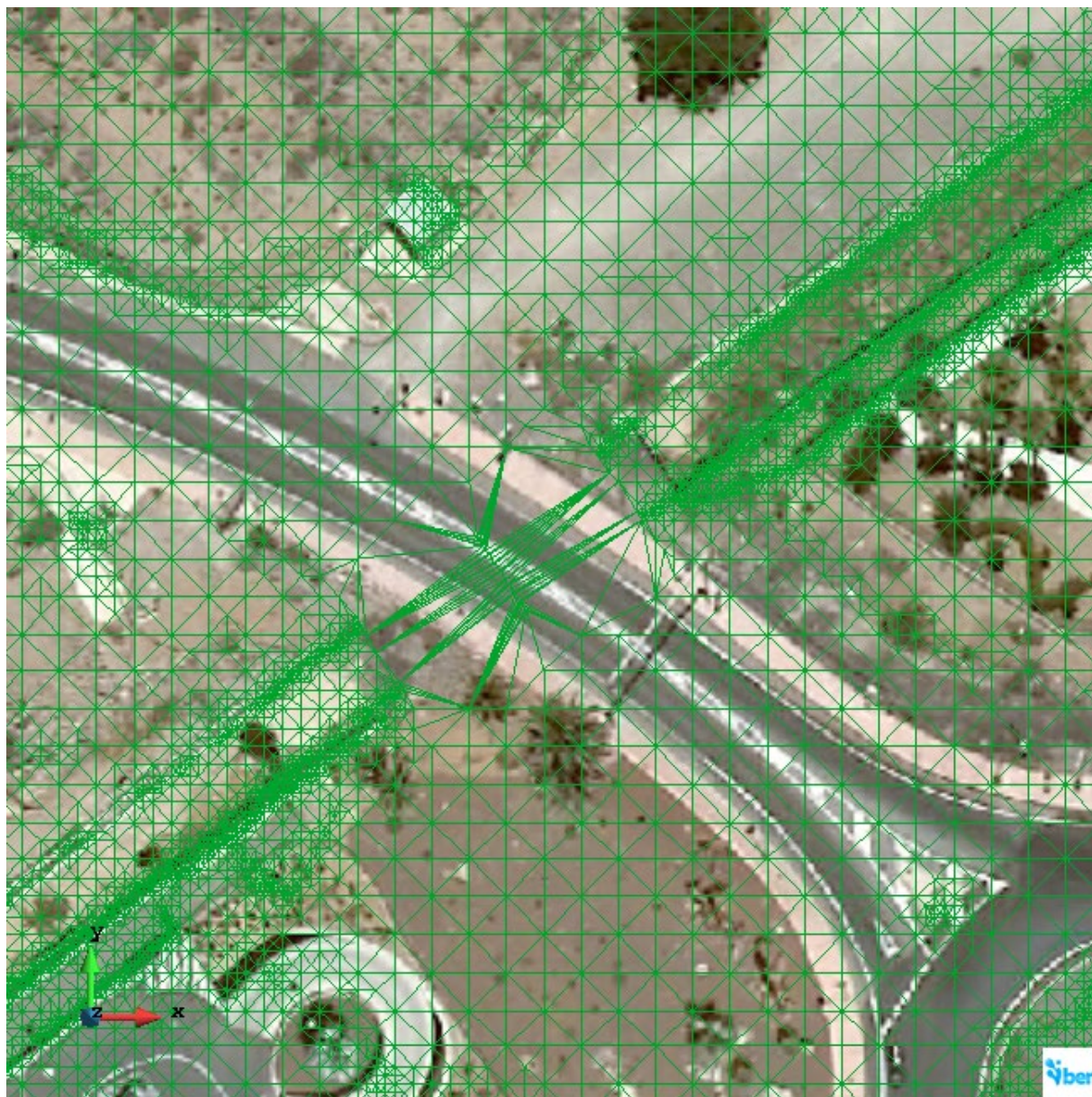


Figura 43. Detalle de la malla en la zona del puente 4.



Figura 44. Detalle de la malla en la zona del puente 6.

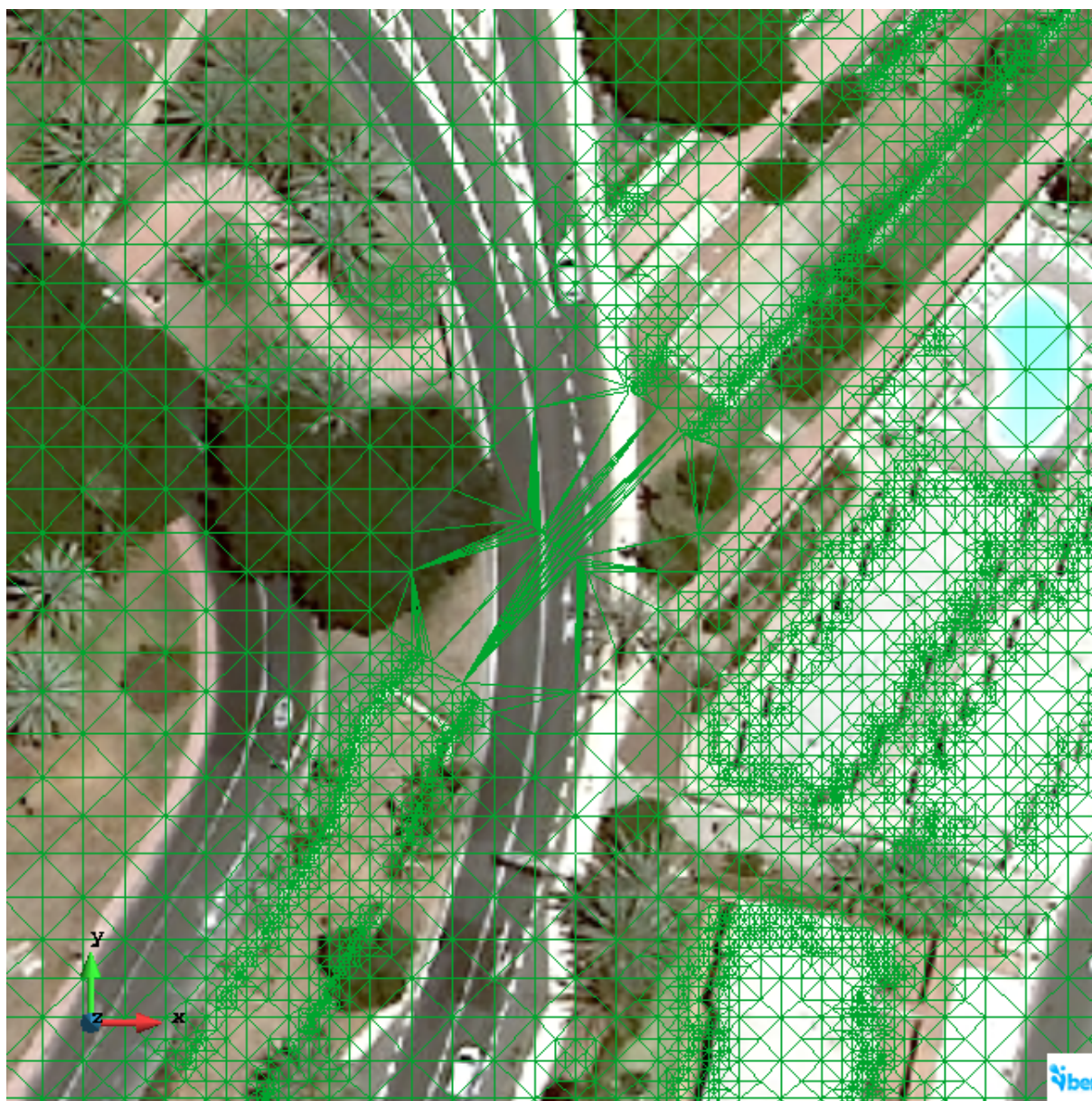


Figura 45. Detalle de la malla en la zona del puente 7.

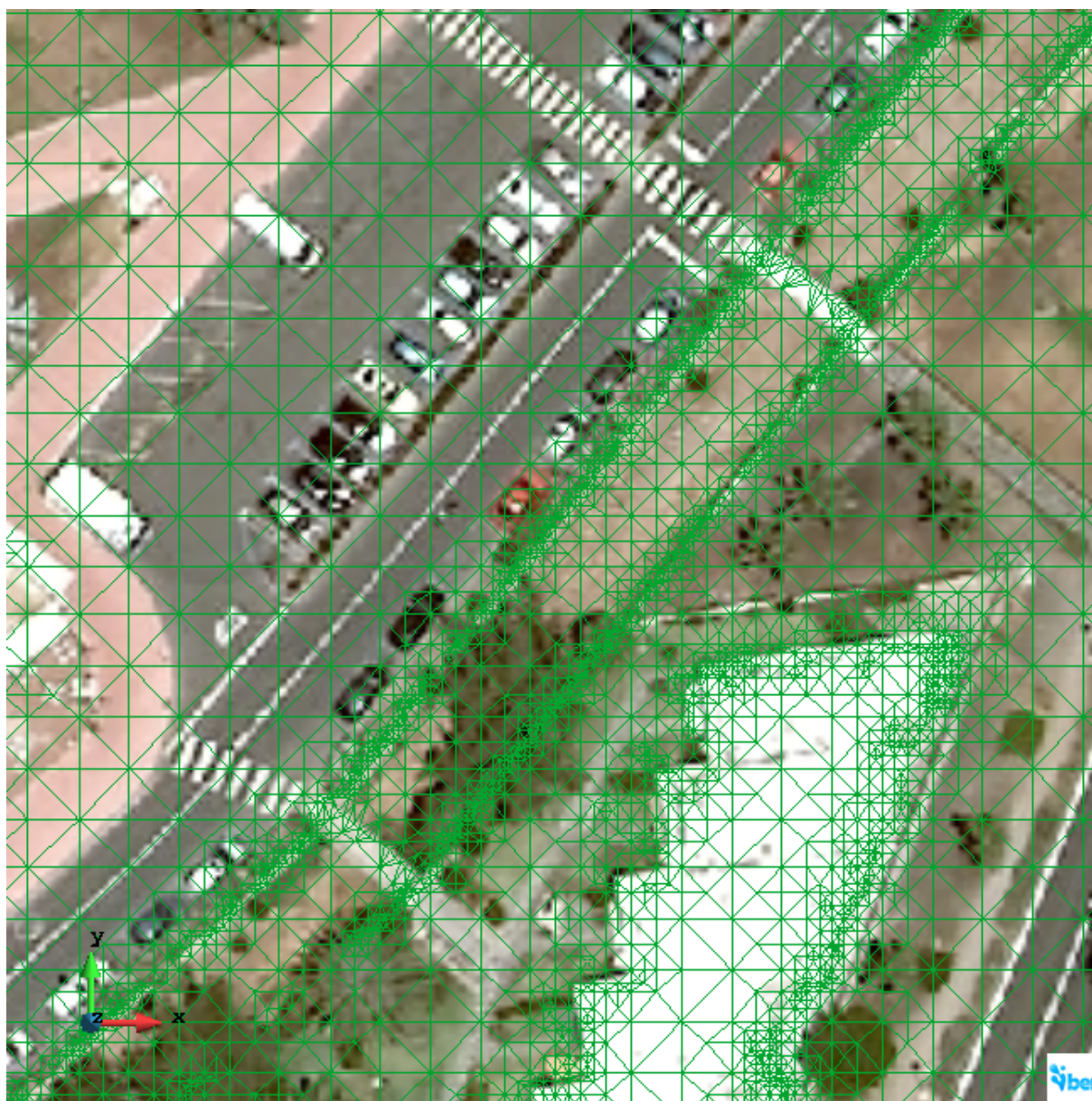


Figura 46. Detalle de la malla en la zona de los puentes 8 y 9 (pasarelas peatonales).

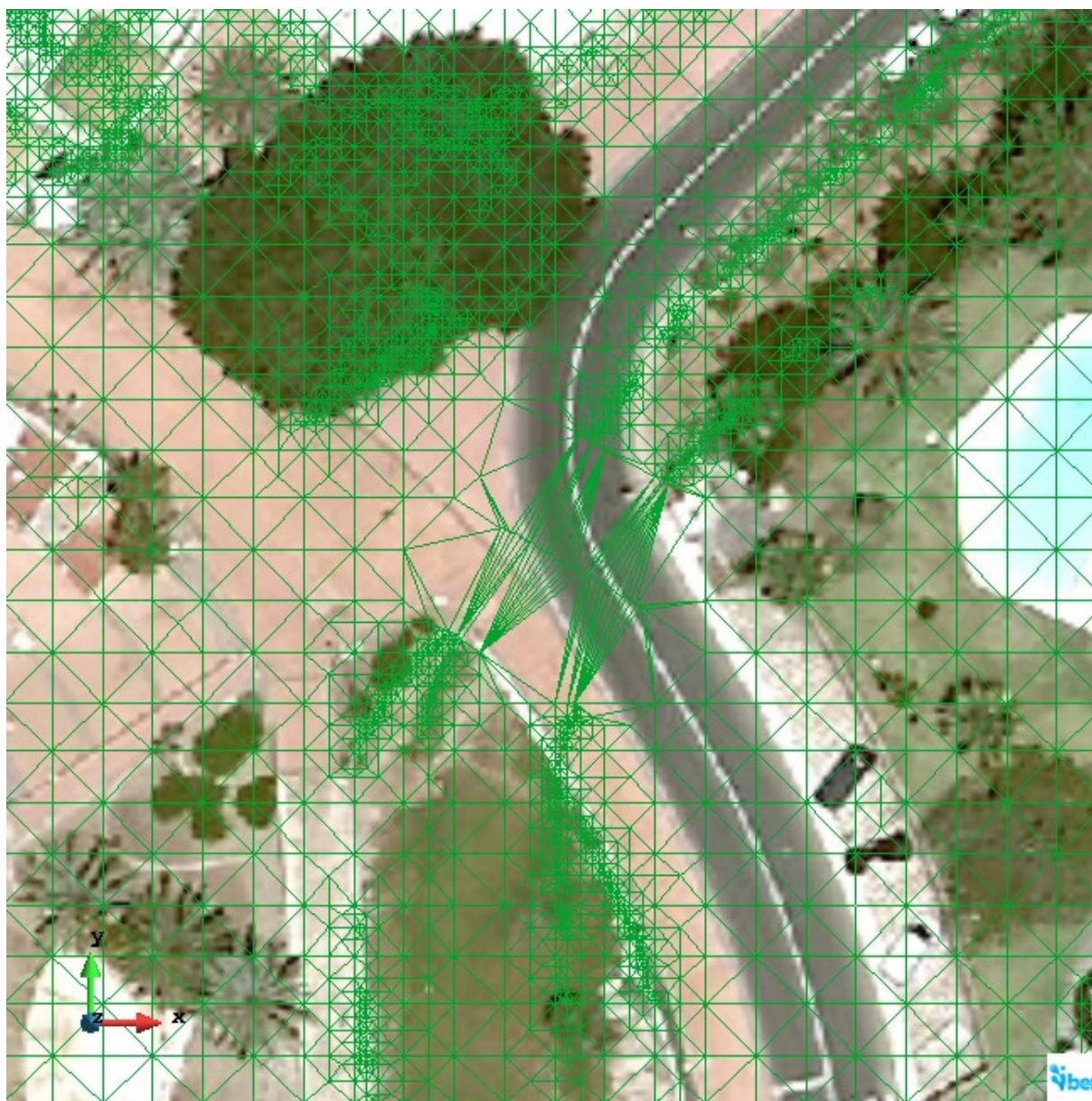


Figura 47. Detalle de la malla en la zona del puente 10.

4.6. Periodo de retorno de 50 años

A continuación, se presentan los resultados para el periodo de retorno de 50 años en forma de mapas de calados, velocidades y niveles de agua.

4.6.1. Mapa de calados

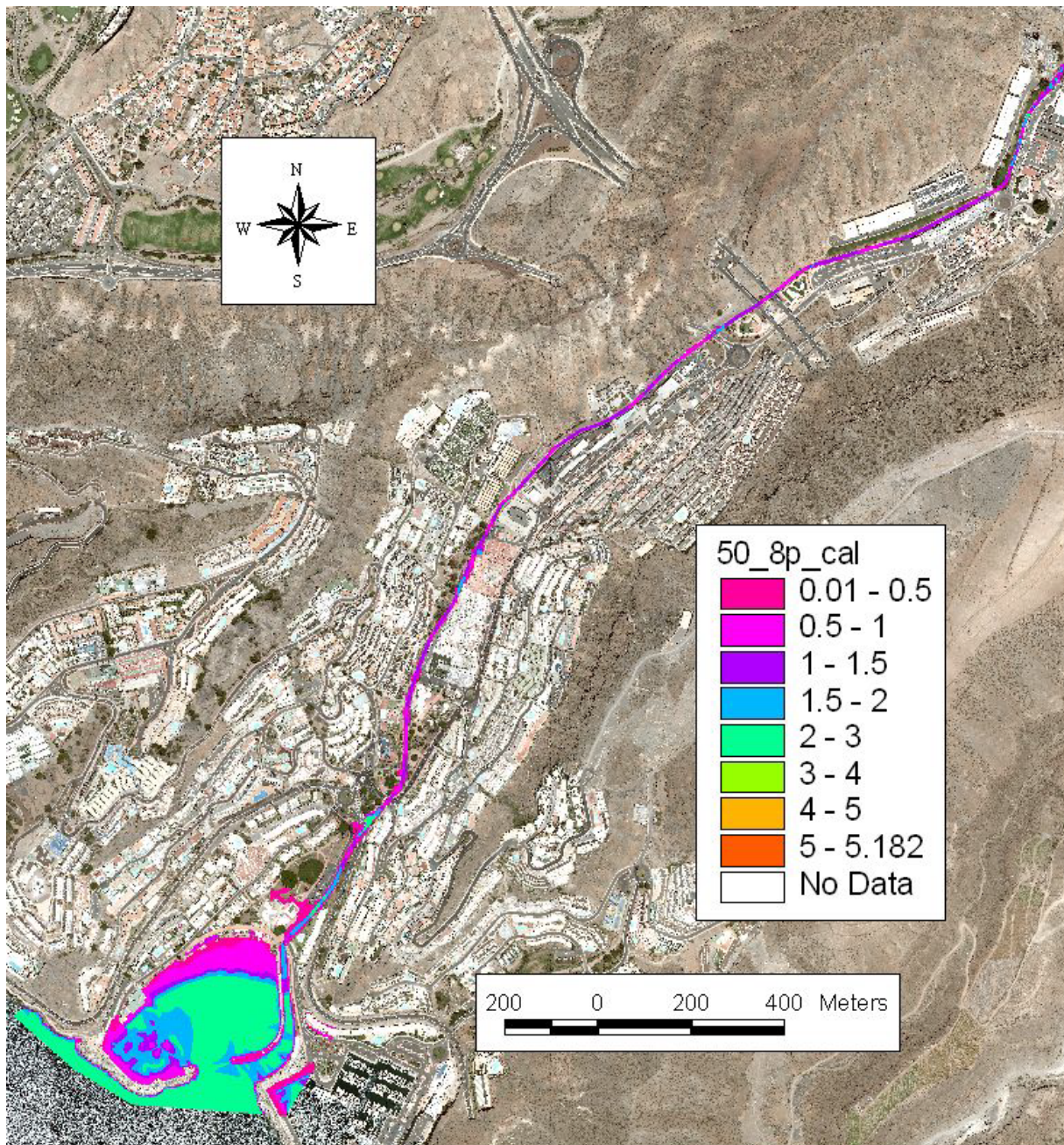


Figura 48. Mapa de calados para periodo de retorno de 50 años.

4.6.2. Mapa de velocidades

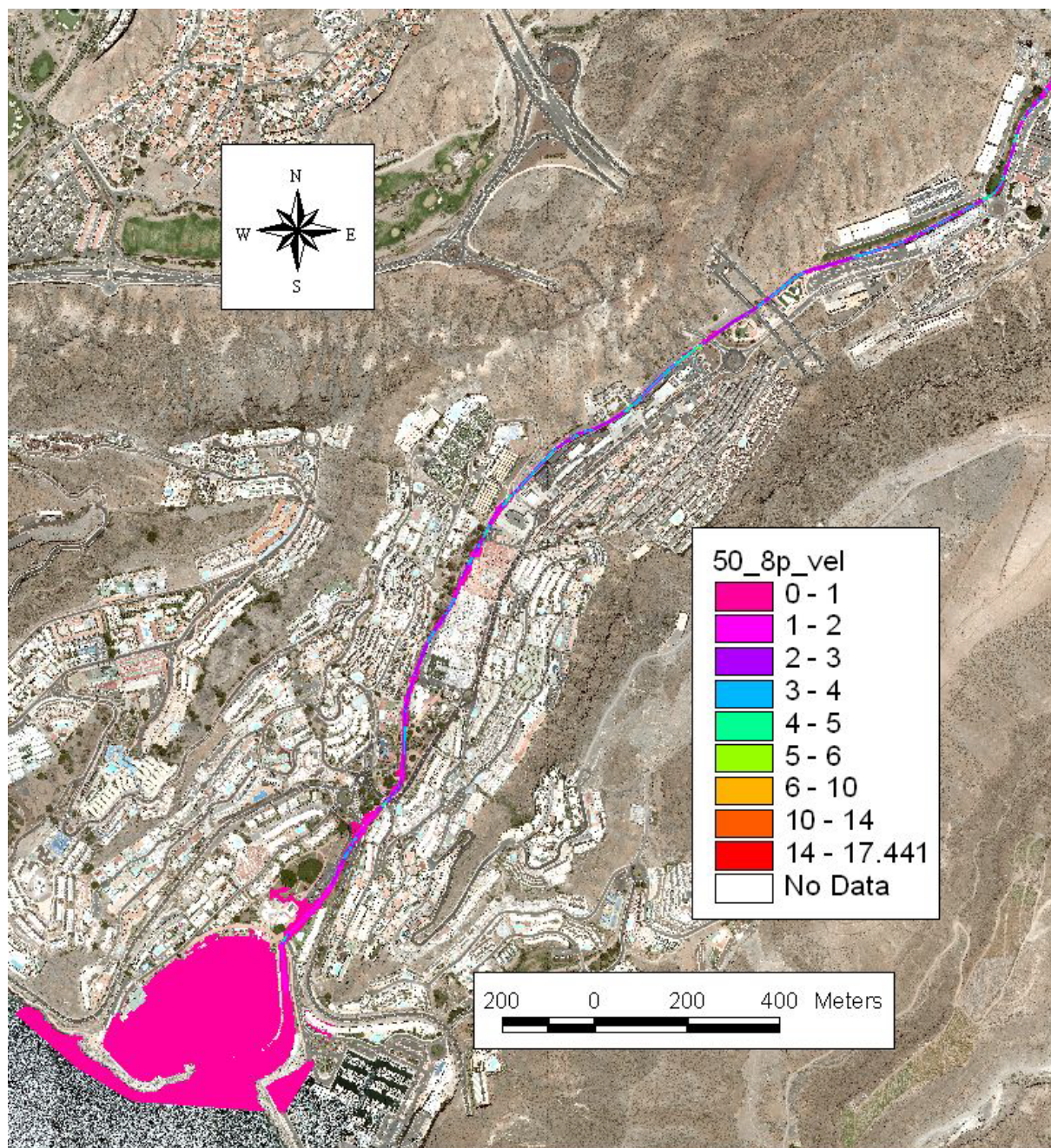


Figura 49. Mapa de velocidades para periodo de retorno de 50 años.

4.6.3. Mapa de cota de agua

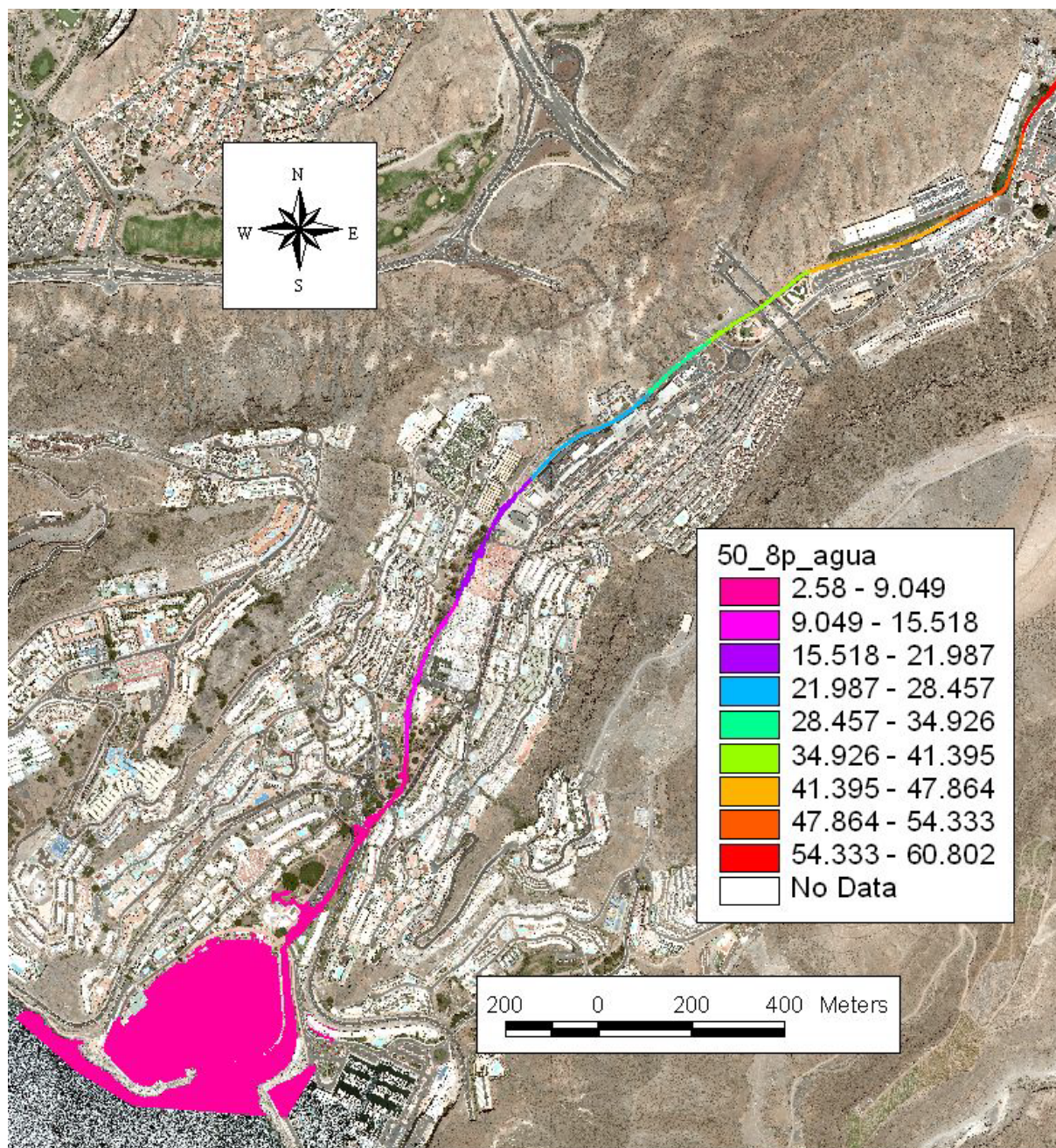


Figura 50. Mapa de cotas de inundación para periodo de retorno de 50 años.

4.7. Periodo de retorno de 100 años

En las siguientes Figuras, se presentan los resultados para el periodo de retorno de 100 años.

4.7.1. Mapa de calados

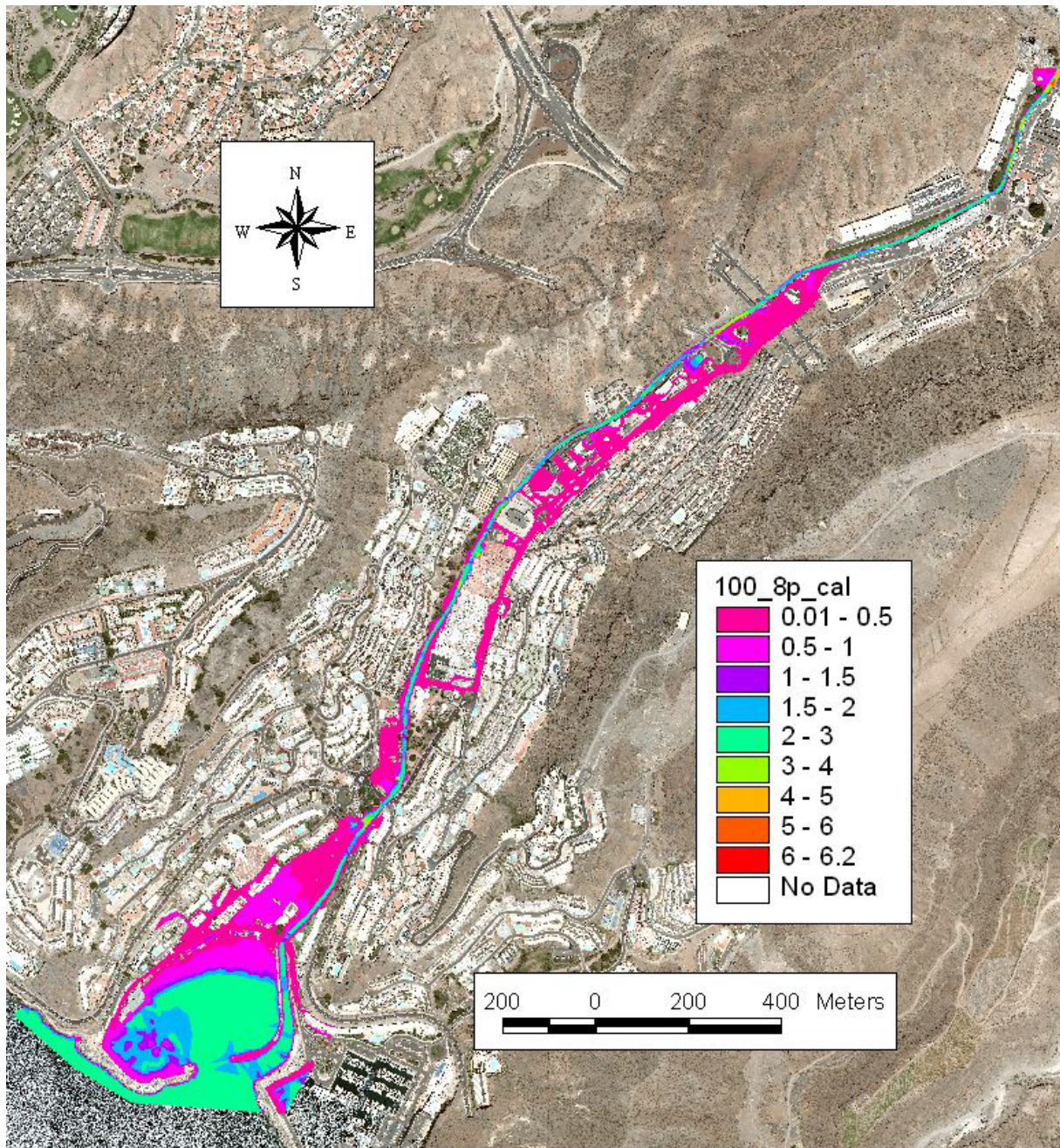


Figura 51. Mapa de calados para periodo de retorno de 100 años.

4.7.2. Mapa de velocidades

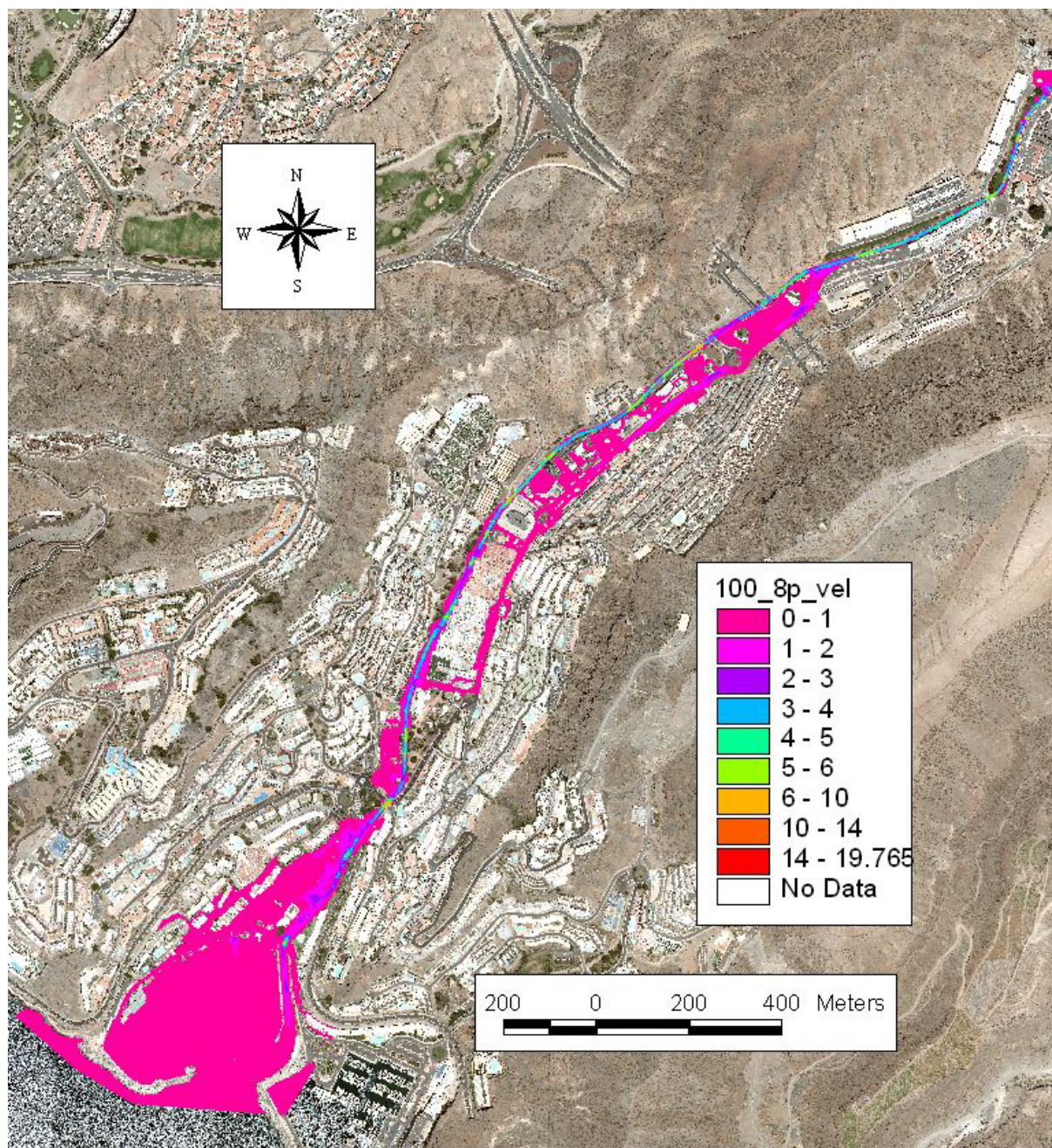


Figura 52. Mapa de velocidades para periodo de retorno de 100 años.

4.7.3. Mapa de cota de agua

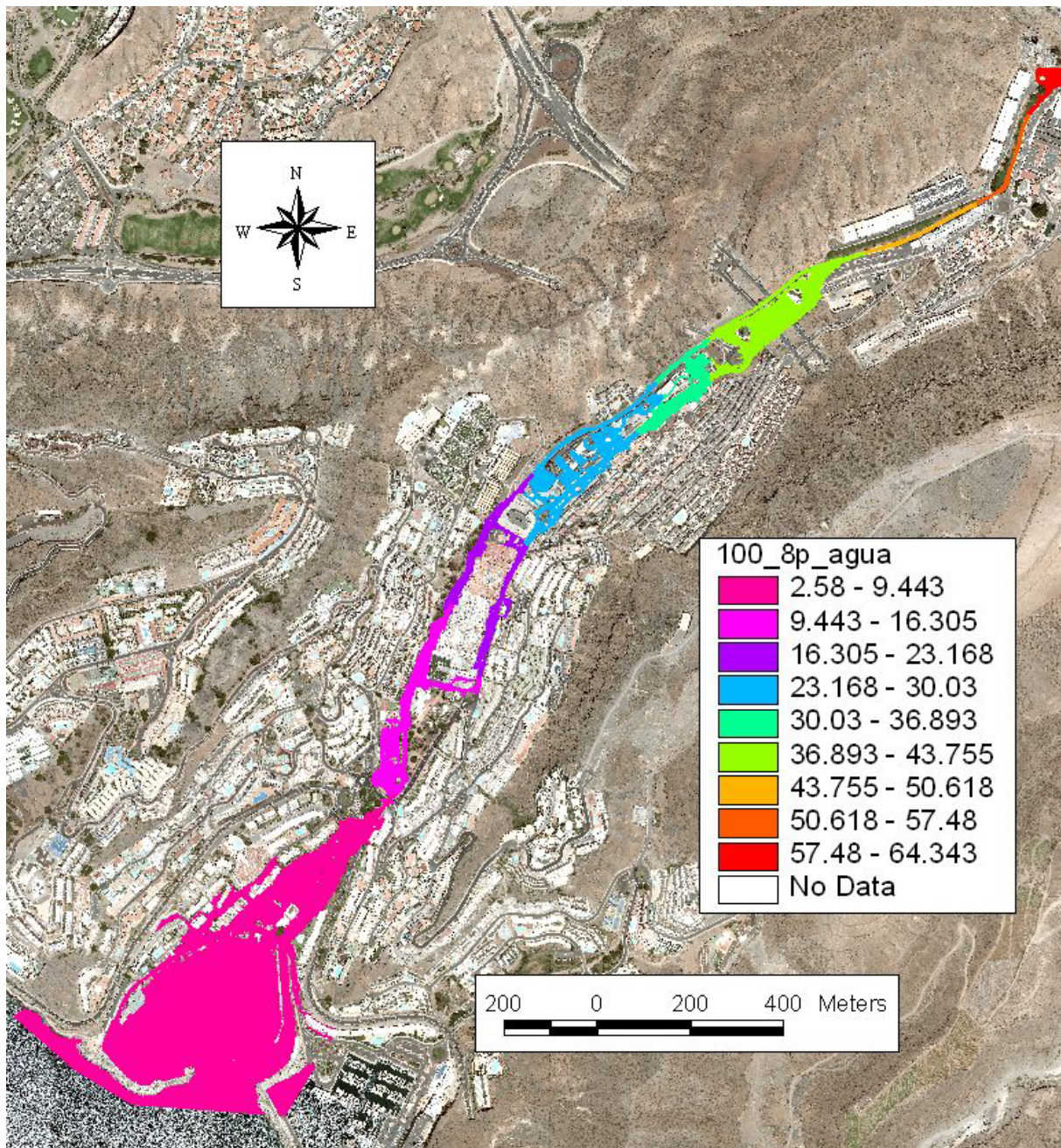


Figura 53. Mapa de cota de inundación para periodo de retorno de 100 años.

4.7.4. Mapa de caudal específico (calado x velocidad)

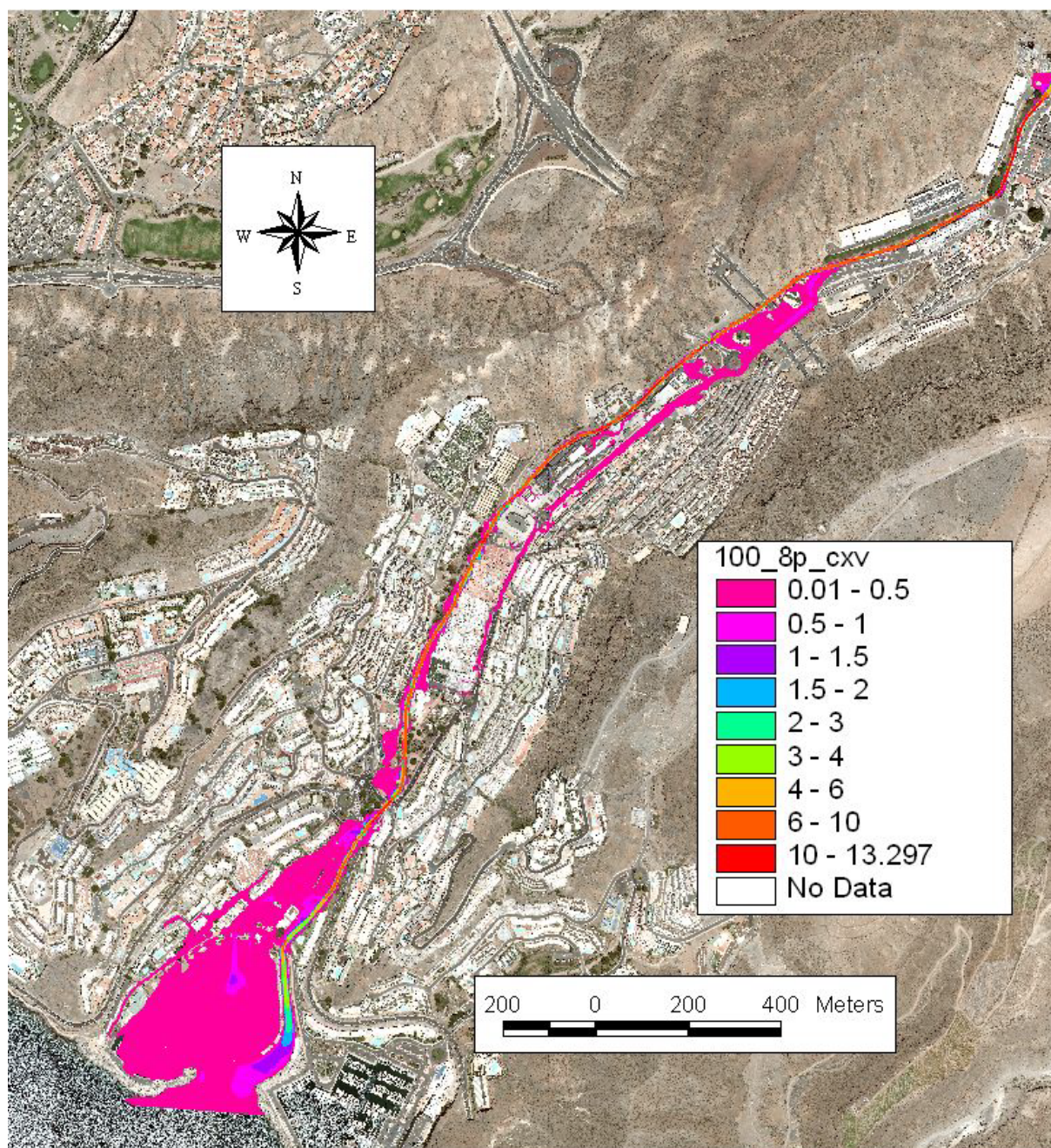


Figura 54. Mapa de caudal específico (calado x velocidad) para periodo de retorno de 100 años.

4.8. Periodo de retorno de 500 años

A continuación, se muestran los resultados para un periodo de retorno de 500 años.

4.8.1. Mapa de calados

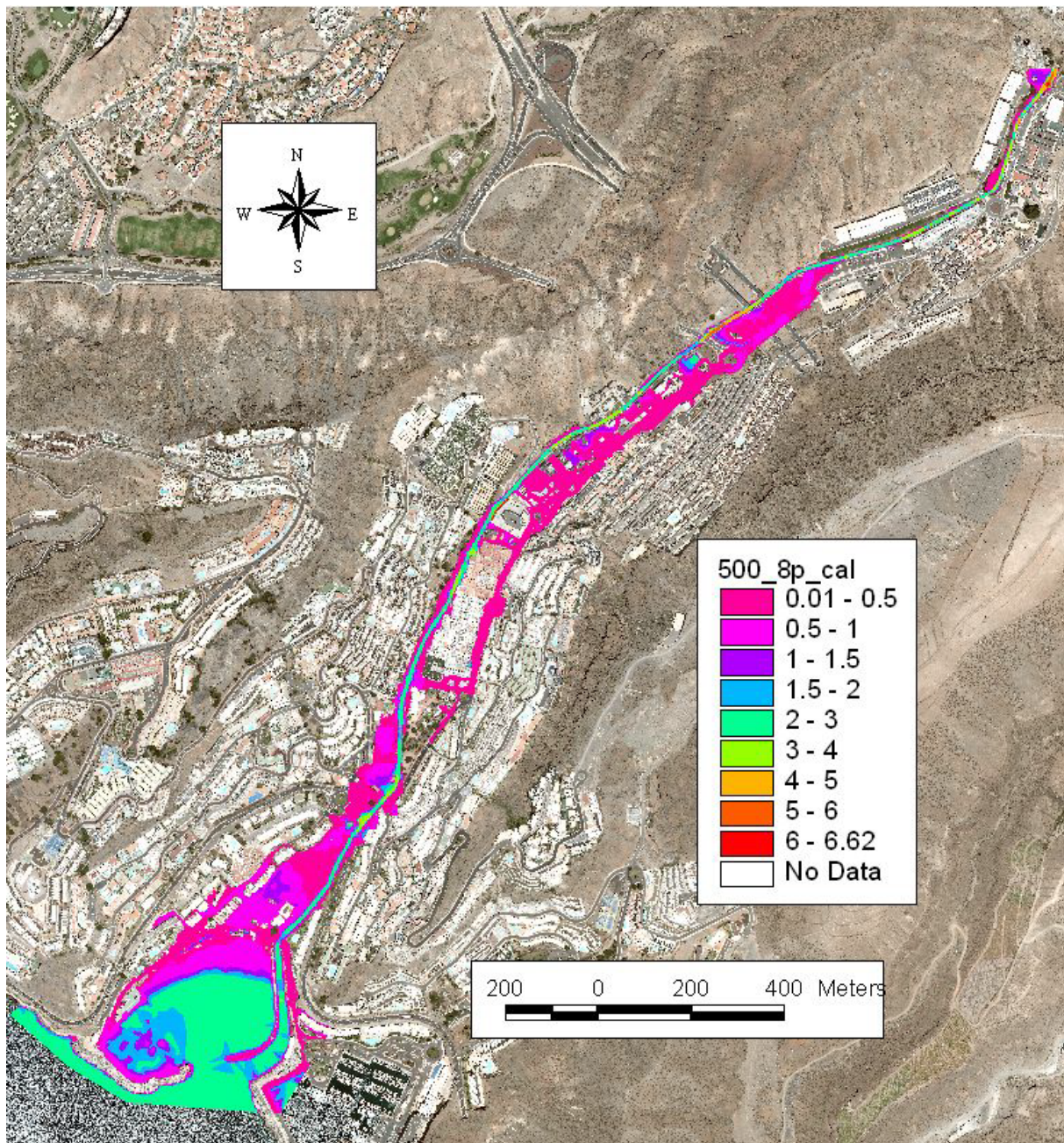


Figura 55. Mapa de calados para periodo de retorno de 500 años.

4.8.2. Mapa de velocidades

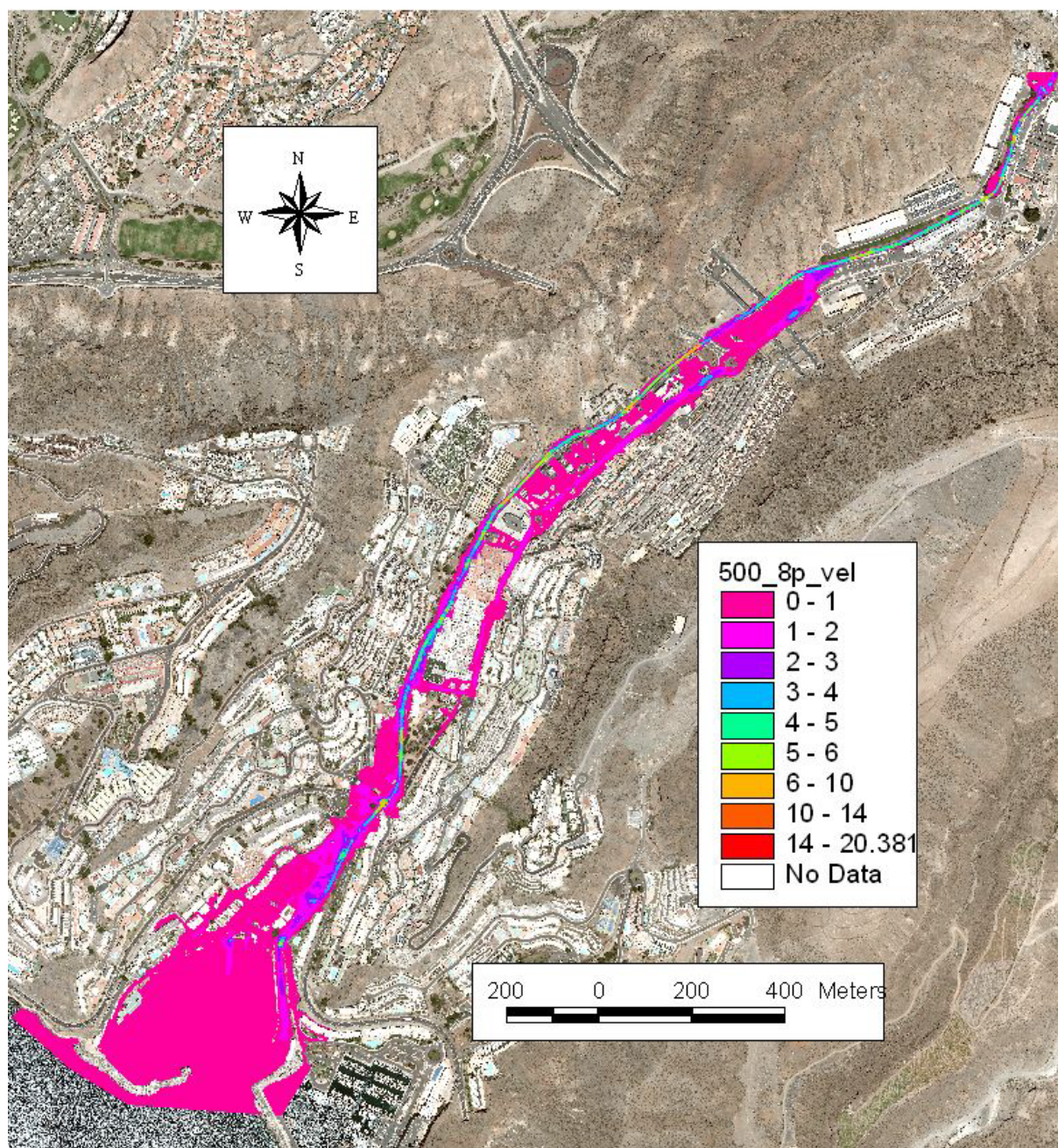


Figura 56. Mapa de velocidades para periodo de retorno de 500 años.

4.8.3. Mapa de cota de agua

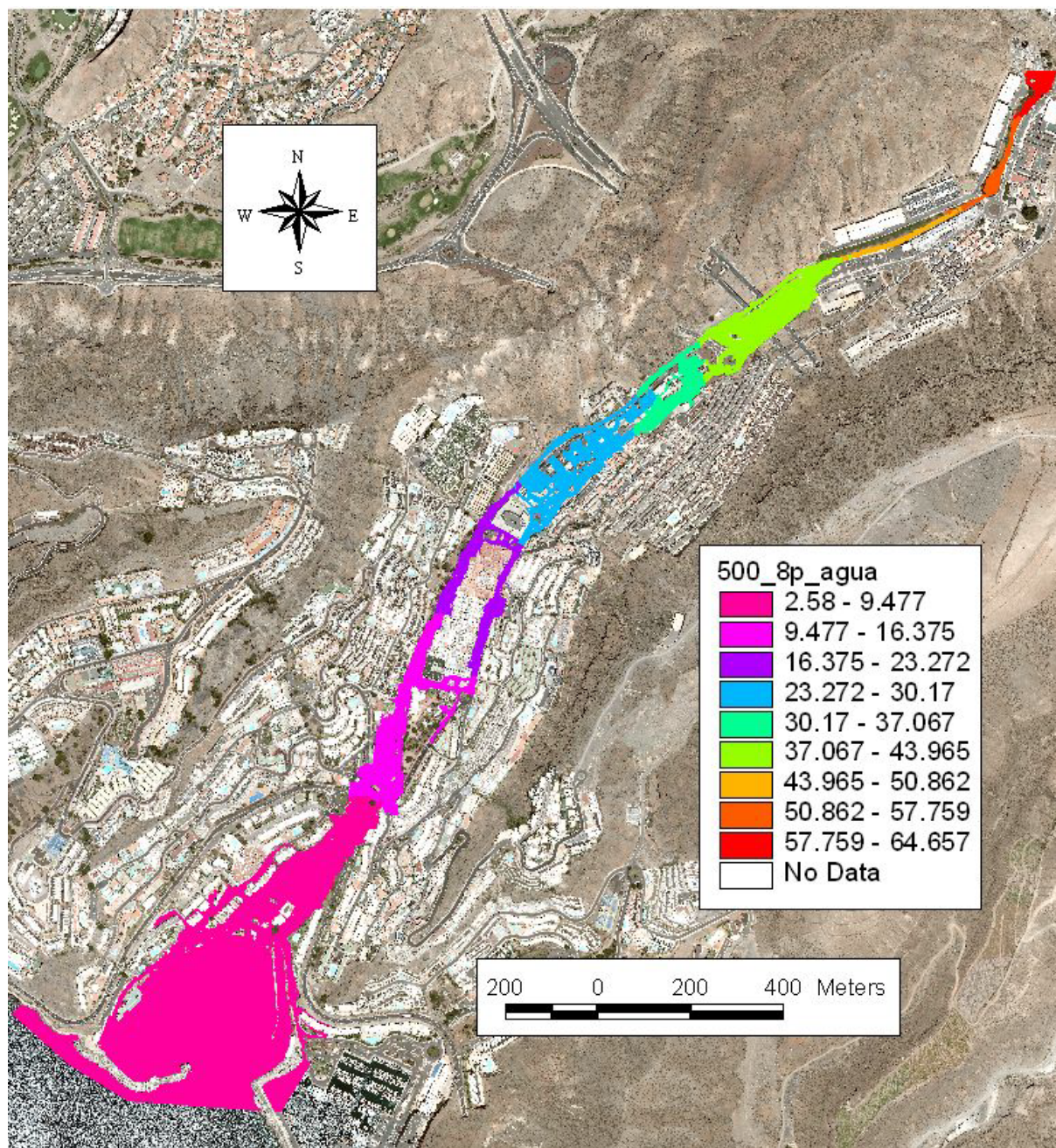


Figura 57. Mapa de cota de inundación para periodo de retorno de 500 años.

4.9. Periodo de retorno de 100 años. Zona de Flujo Preferente

La zona de flujo preferente se considera como la envolvente de las zonas de inundación peligrosa y la vía de intenso desagüe. La primera es la unión de la zona donde los calados son mayores a 1m, las velocidades son mayores a 1 m/s y el producto del calado por velocidad es mayor a 0,5 m²/s. La segunda, es una zona tal, que permita el paso del agua con una sobreelevación máxima de 0,3m. Dadas las características de la zona inundable del barranco de Puerto Rico, se considerará la zona de inundación peligrosa como zona de flujo preferente.

4.9.1. Zona de inundación peligrosa

En las siguientes Figuras, se presentan las zonas donde los calados son mayores a 1m, las velocidades son mayores a 1 m/s y el producto del calado por velocidad es mayor a 0,5 m²/s, respectivamente.

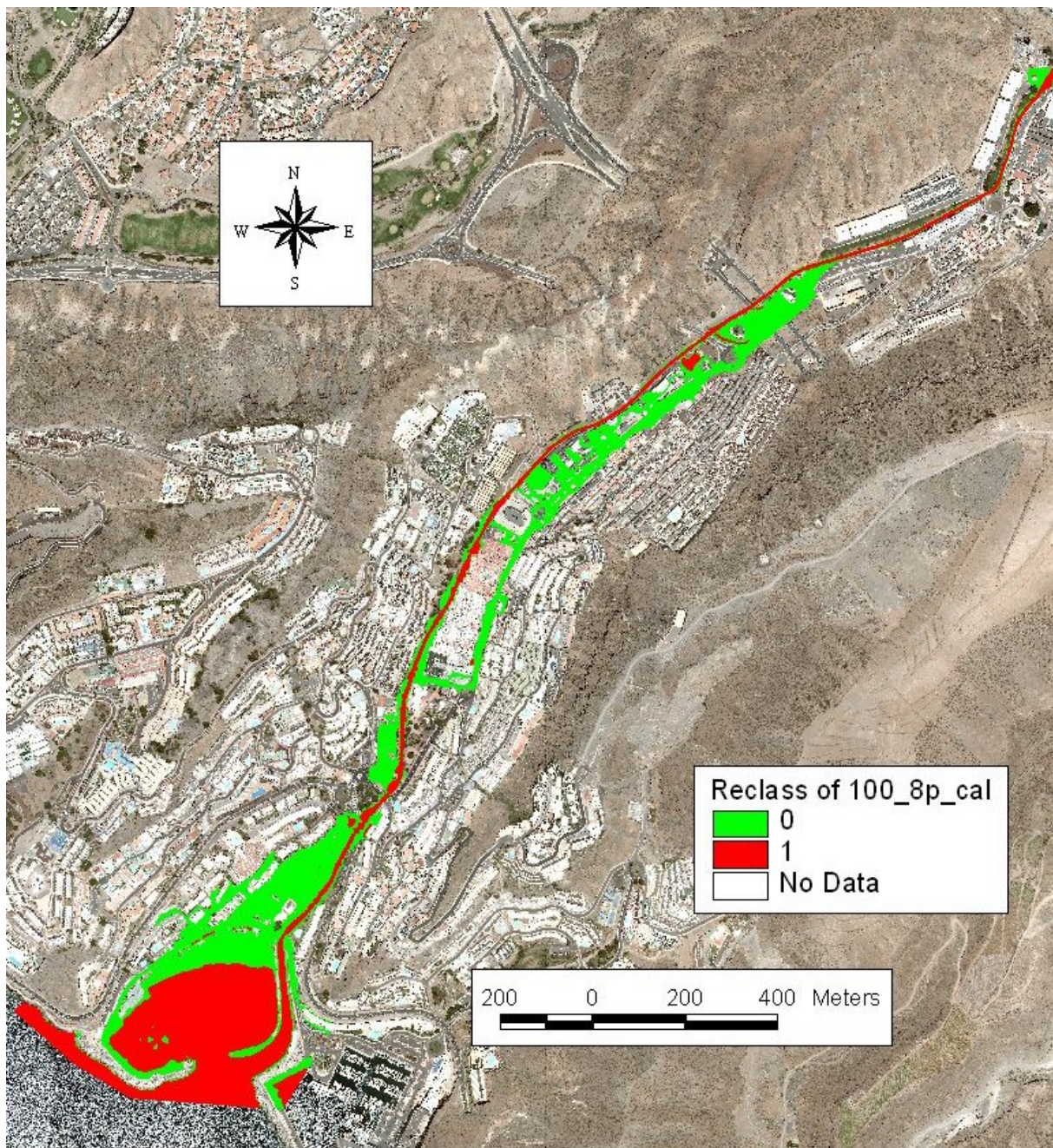


Figura 58. Mapa de la zona con calados mayores a 1 m, para periodo de retorno de 100 años.

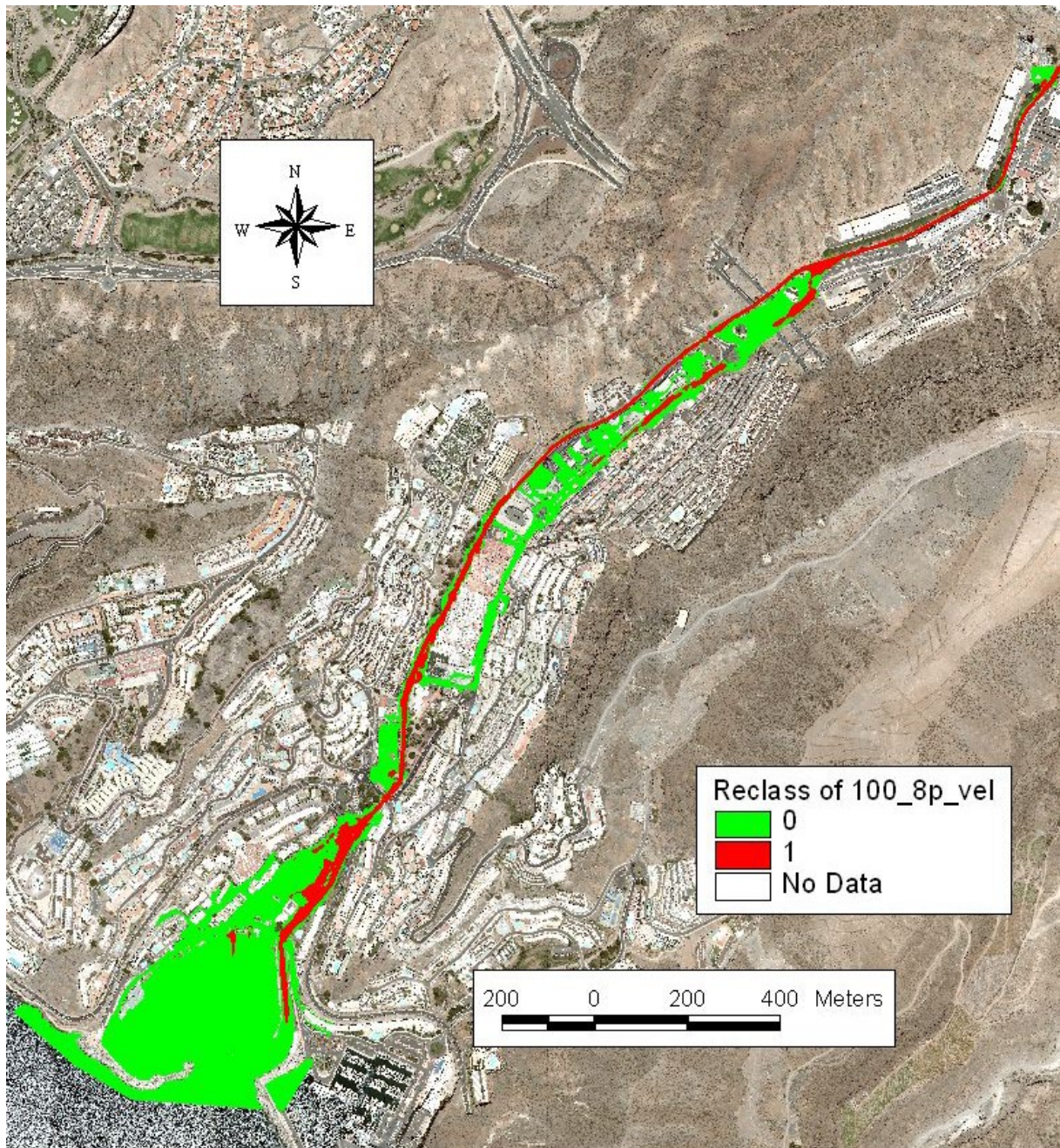


Figura 59. Mapa de la zona con velocidades mayores a 1 m/s, para periodo de retorno de 100 años.

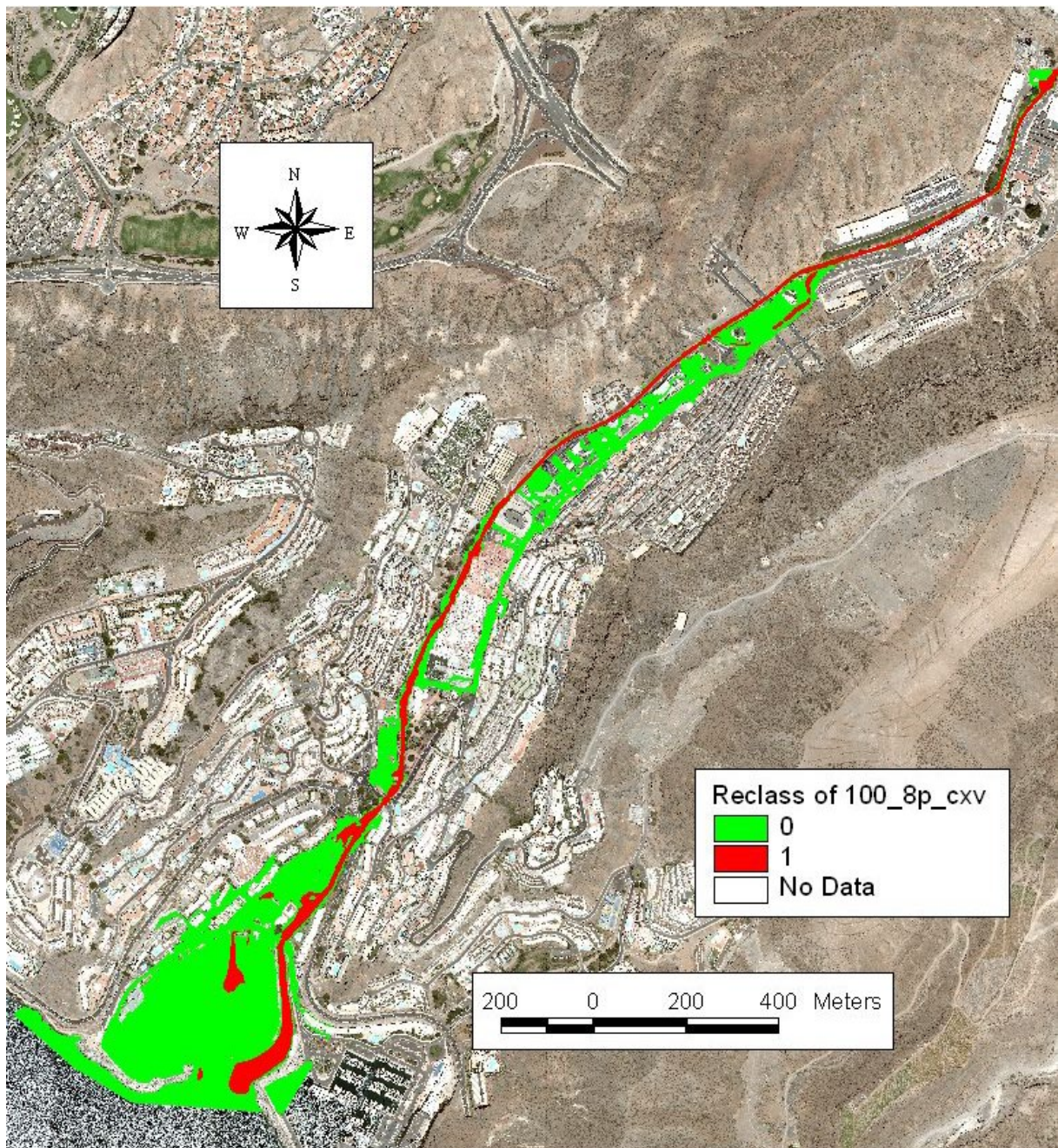


Figura 60. Mapa de la zona con productos de calado por velocidad mayor a $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$, para periodo de retorno de 100 años.

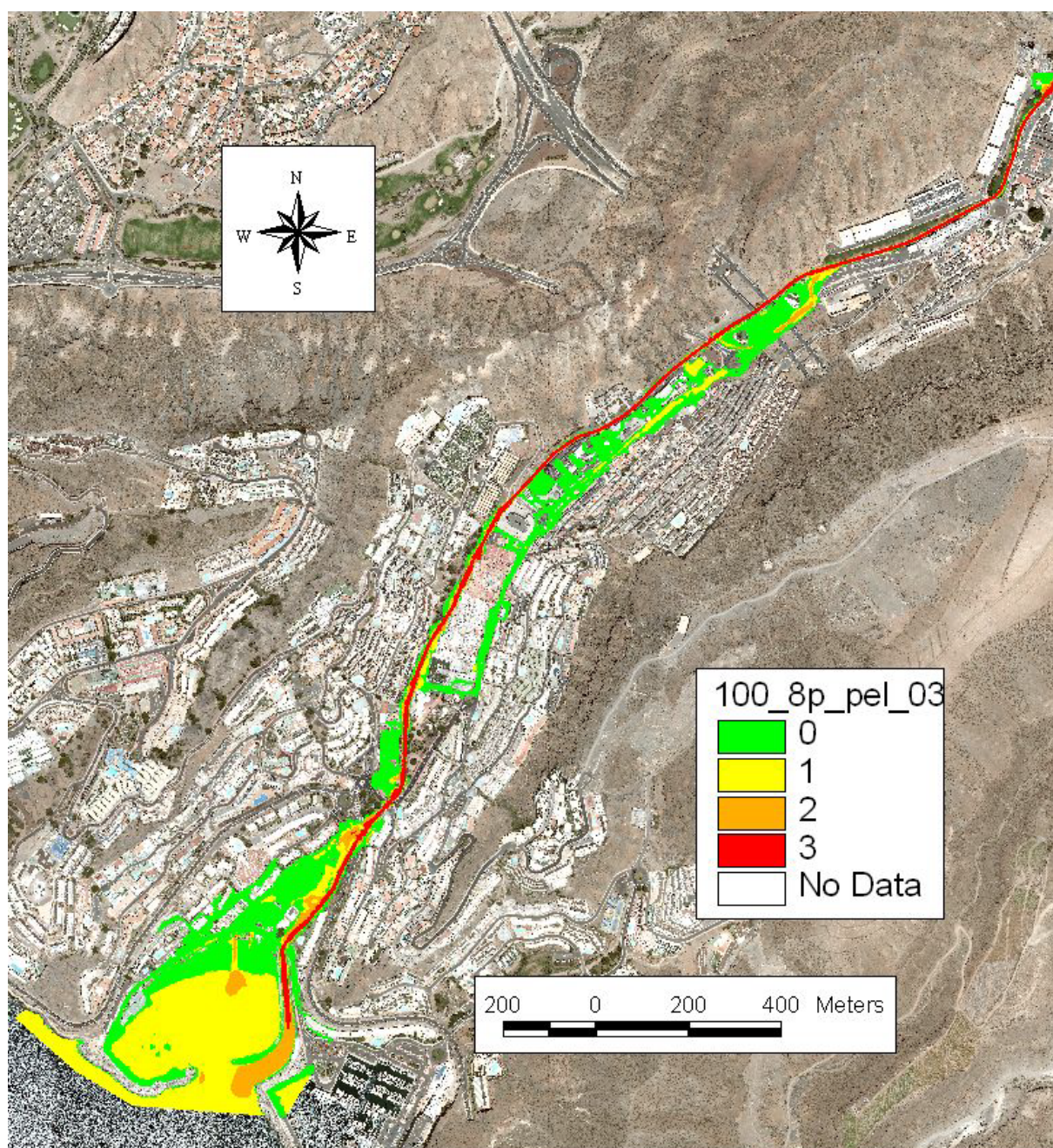


Figura 61. Mapa de la zona donde no se cumple ninguno, 1, 2 o 3 de los criterios de inundación peligrosa, para periodo de retorno de 100 años.

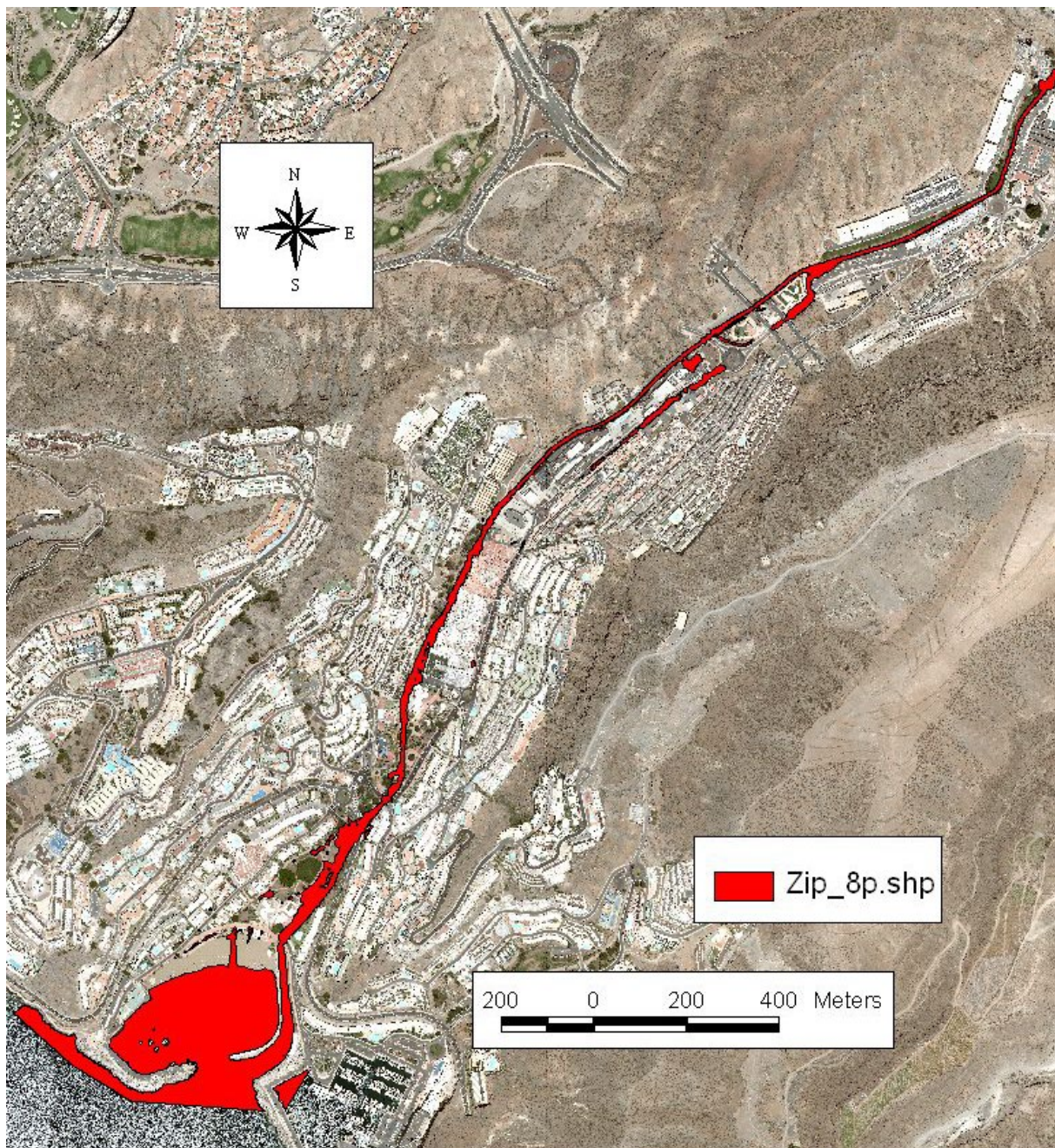


Figura 62. Mapa de la zona de inundación peligrosa en el barranco de Puerto Rico.

4.10. Análisis comparativo por zonas

A continuación, se presenta un mapa con las manchas de inundación para los 3 periodos de retorno estudiados.

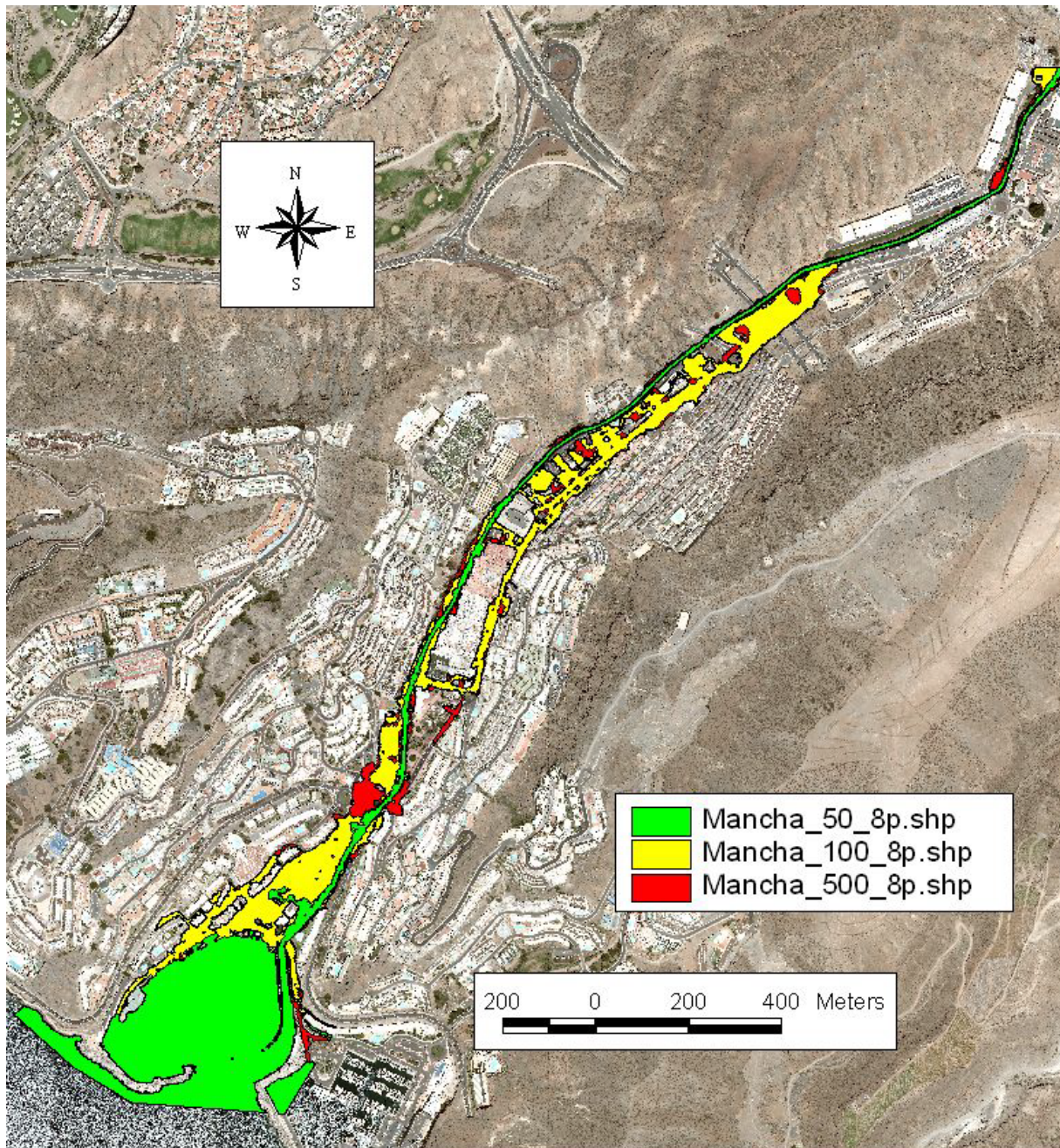


Figura 63. Manchas de inundación para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años en el barranco de Puerto Rico.

4.10.1. Zona de aguas abajo del parque de bomberos

En la siguiente Figura, se muestra la zona inmediatamente aguas abajo del parque de Bomberos, donde se observa que existe una disminución de la altura del cajero sobre margen izquierda, que es justamente donde comienzan los desbordamientos.



Figura 64. Zona inmediatamente aguas abajo del Parque de Bomberos.



Figura 65. Detalle de la zona inmediatamente aguas abajo del Parque de Bomberos, donde se ve la disminución de altura del cajero de margen izquierda.

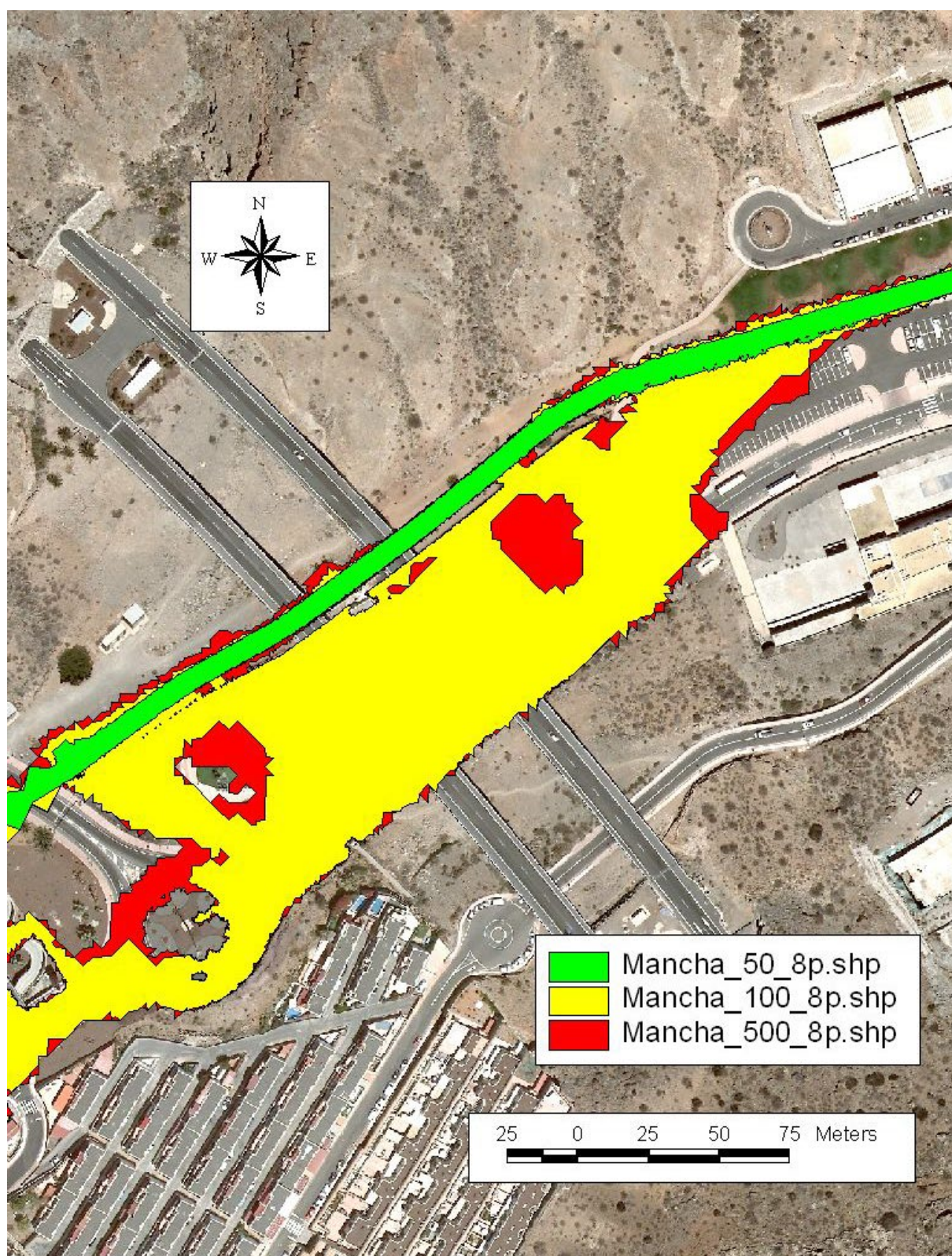


Figura 66. Detalle de manchas de inundación en la zona de aguas abajo del Parque de Bomberos.

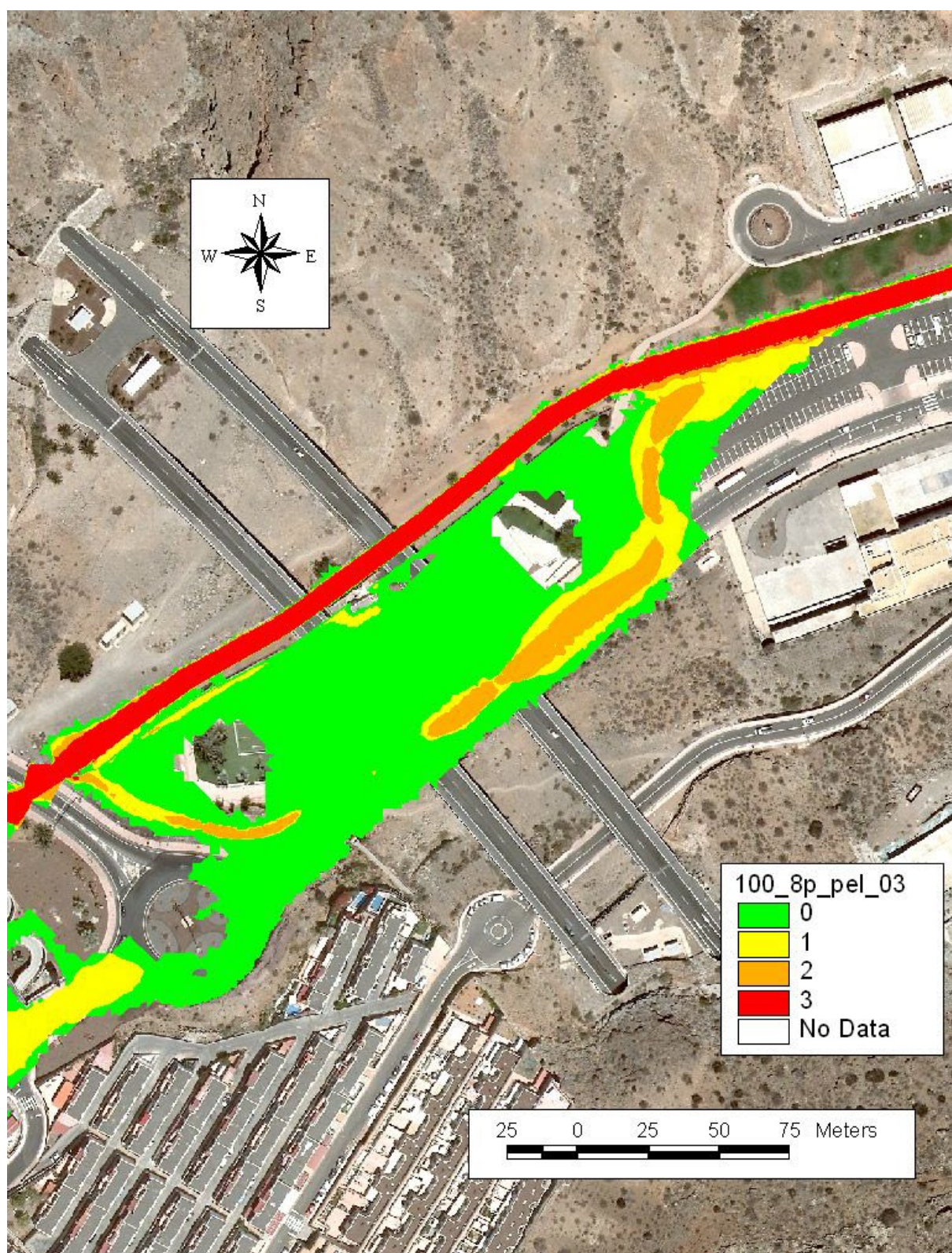


Figura 67. Detalle las zonas donde se cumplen los criterios para inundación peligrosa en la zona de aguas abajo del Parque de Bomberos.

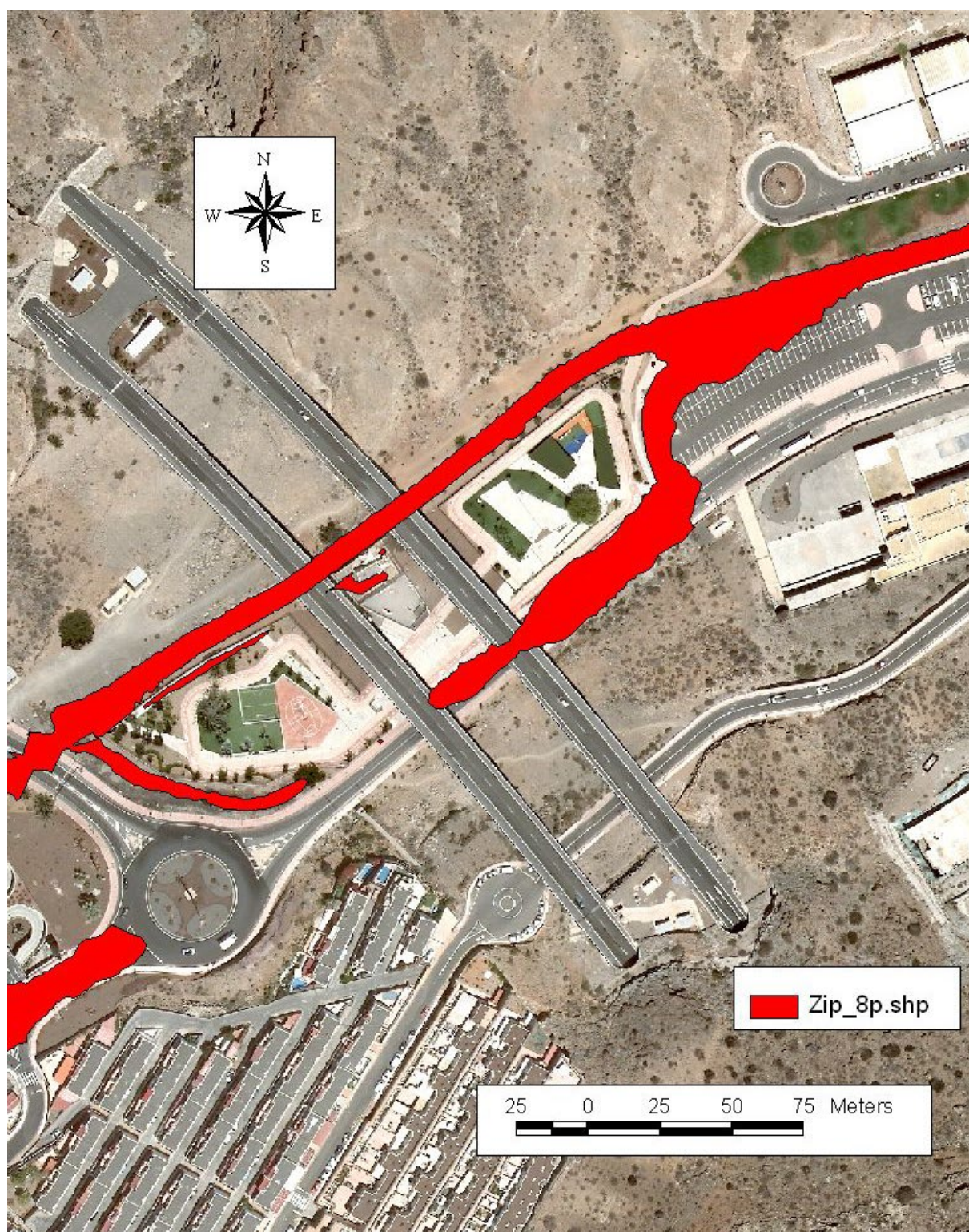


Figura 68. Detalle de la zona de inundación peligrosa en la zona de aguas abajo del Parque de Bomberos.

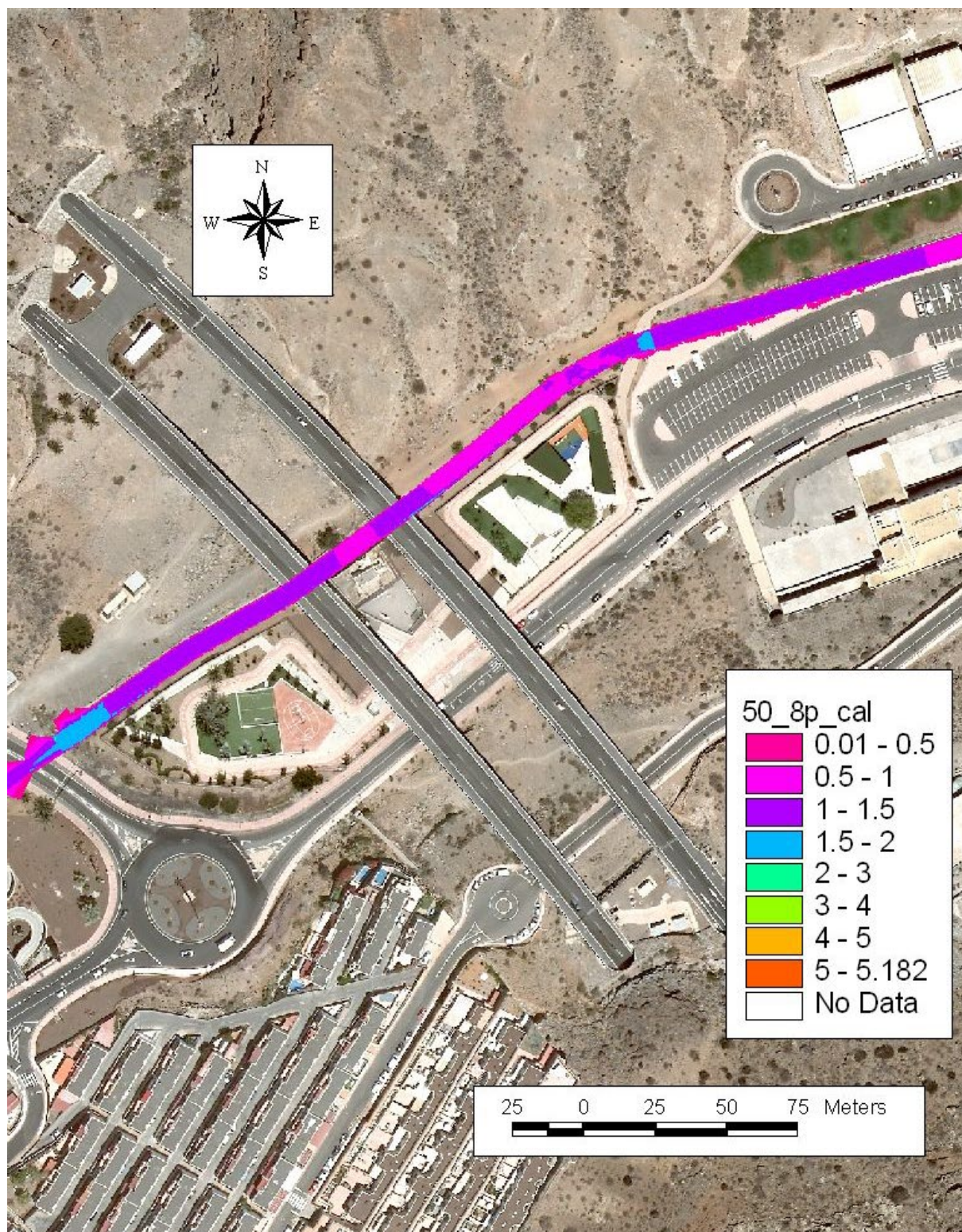


Figura 69. Detalle de calados en la zona de aguas abajo del Parque de Bomberos, para T 50 años.

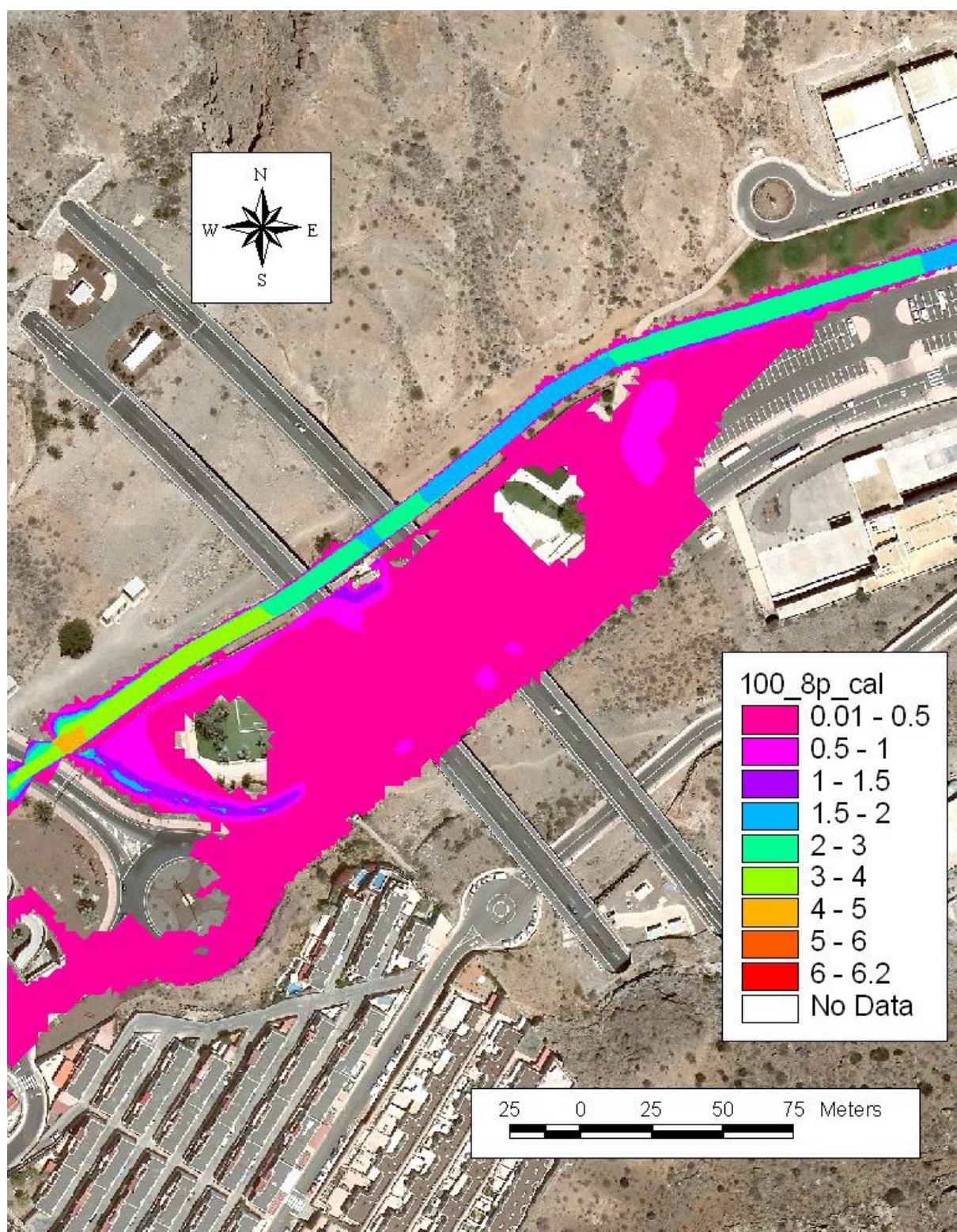


Figura 70. Detalle de calados en la zona de aguas abajo del Parque de Bomberos, para T 100 años.

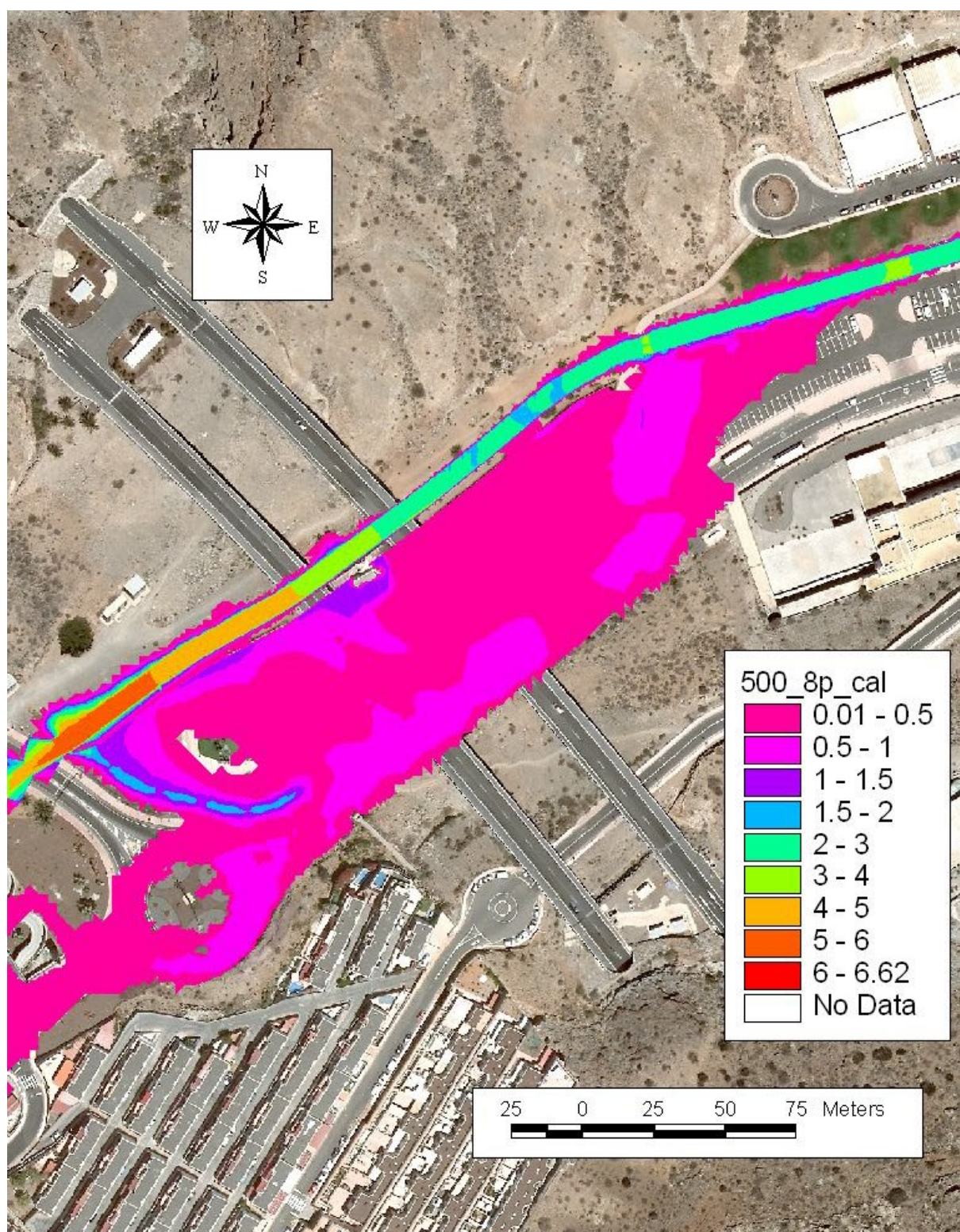


Figura 71. Detalle de calados en la zona de aguas abajo del Parque de Bomberos, para T 500 años.

4.10.2. Zona del Centro Comercial Mogan Mall

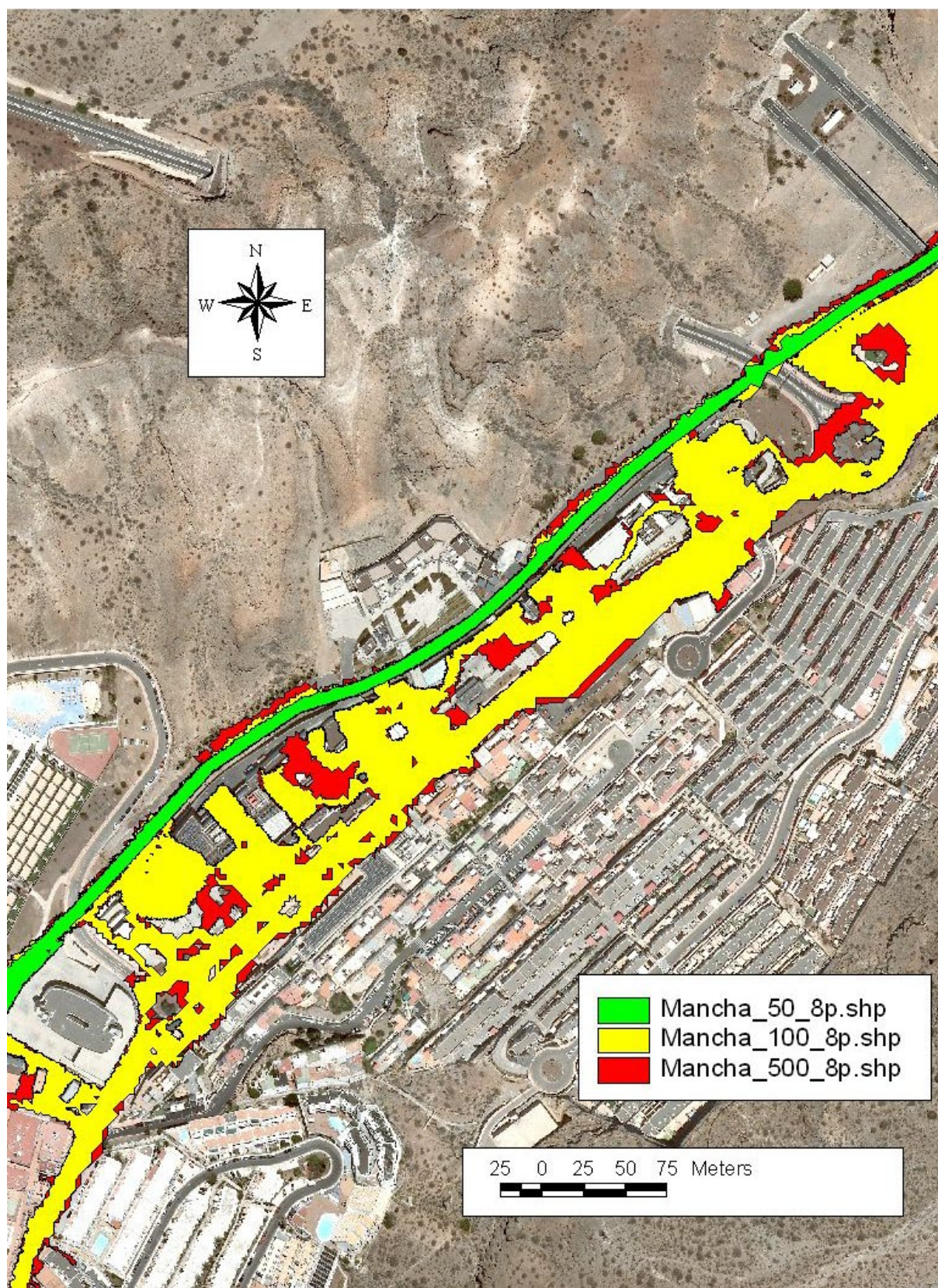


Figura 72. Detalle de manchas de inundación en la zona del Mogán Mall.

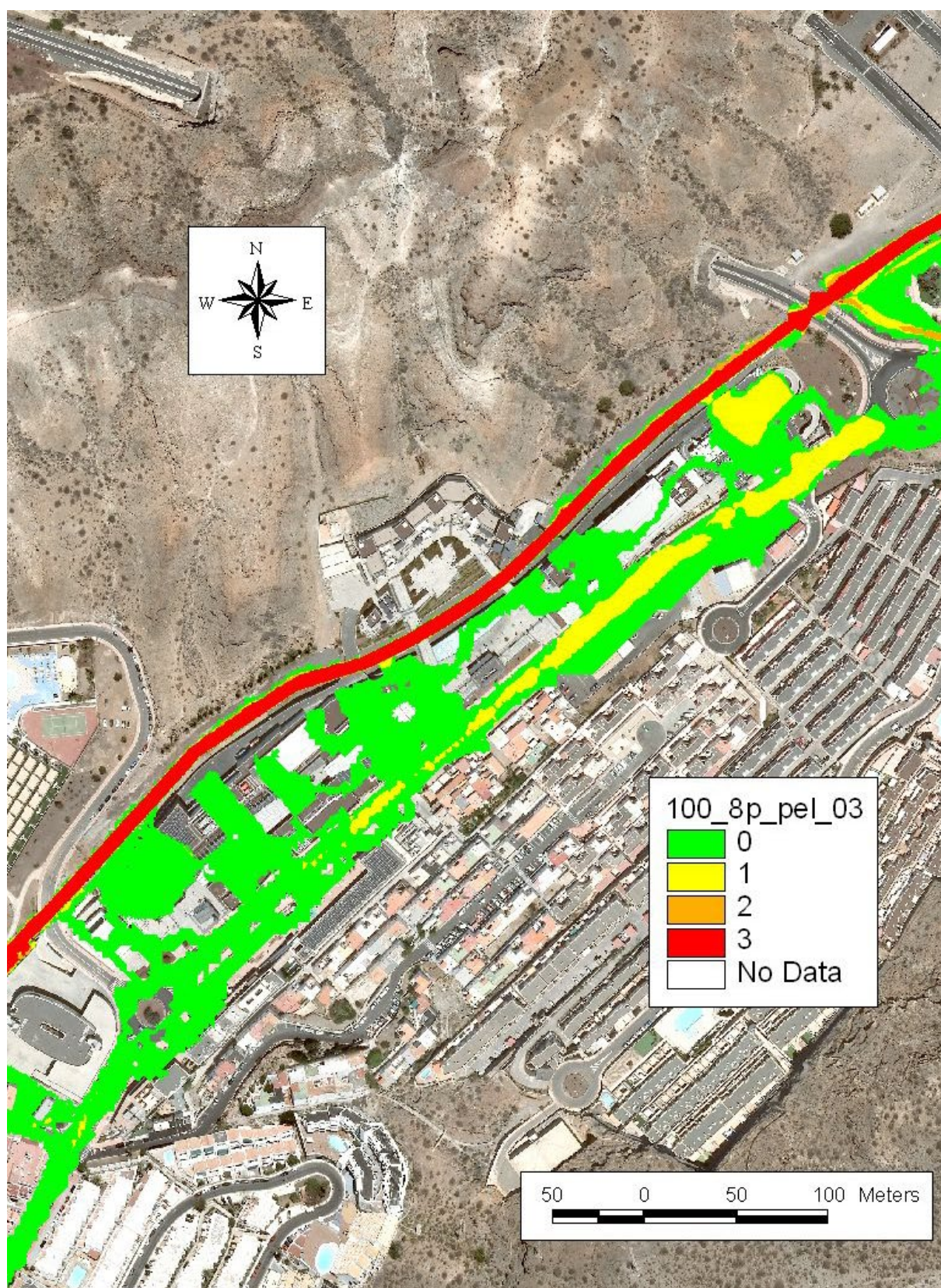


Figura 73. Detalle las zonas donde se cumplen los criterios para inundación peligrosa en la zona del Mogán Mall.

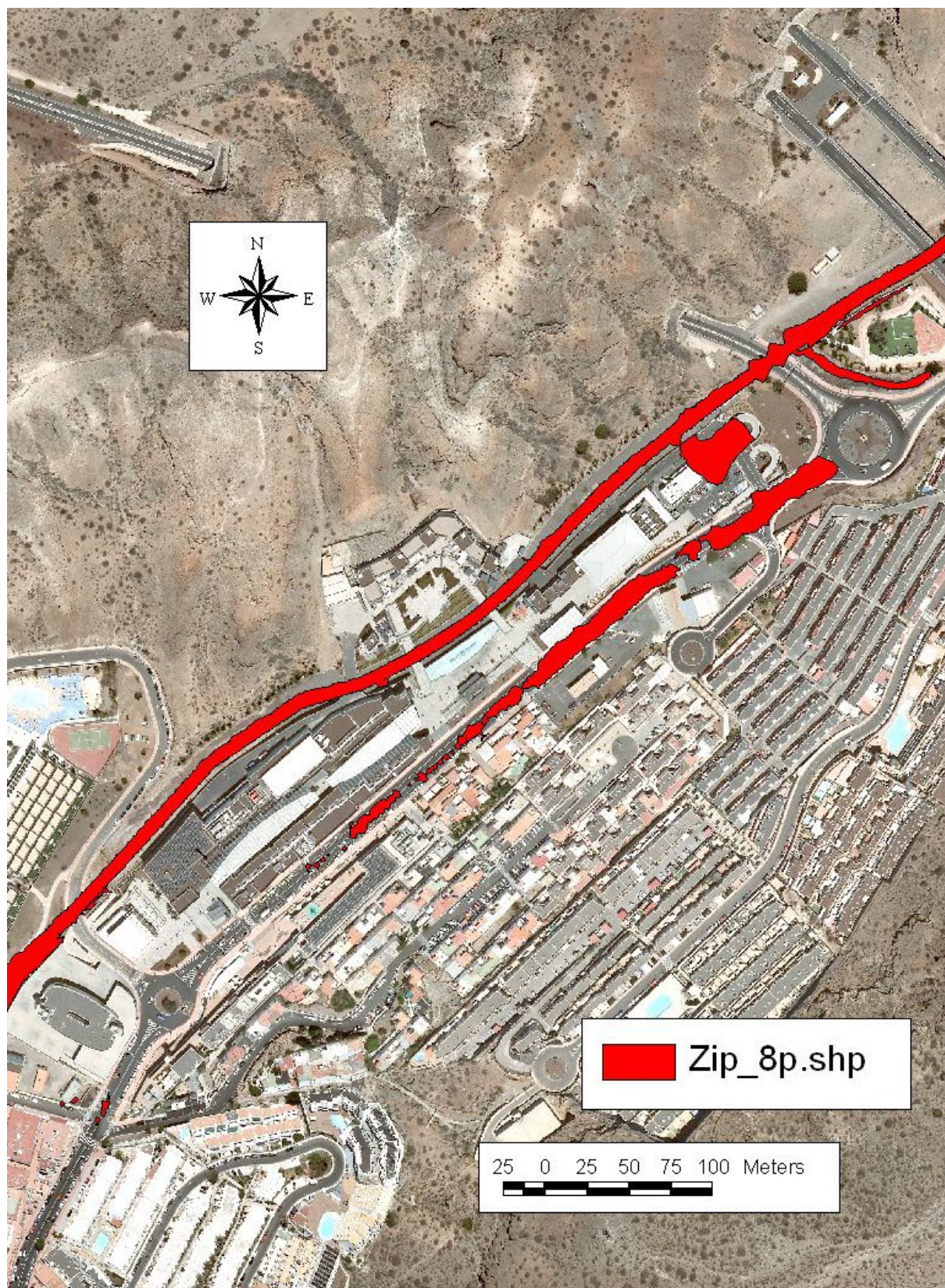


Figura 74. Detalle de la zona de inundación peligrosa en la zona del Mogán Mall.

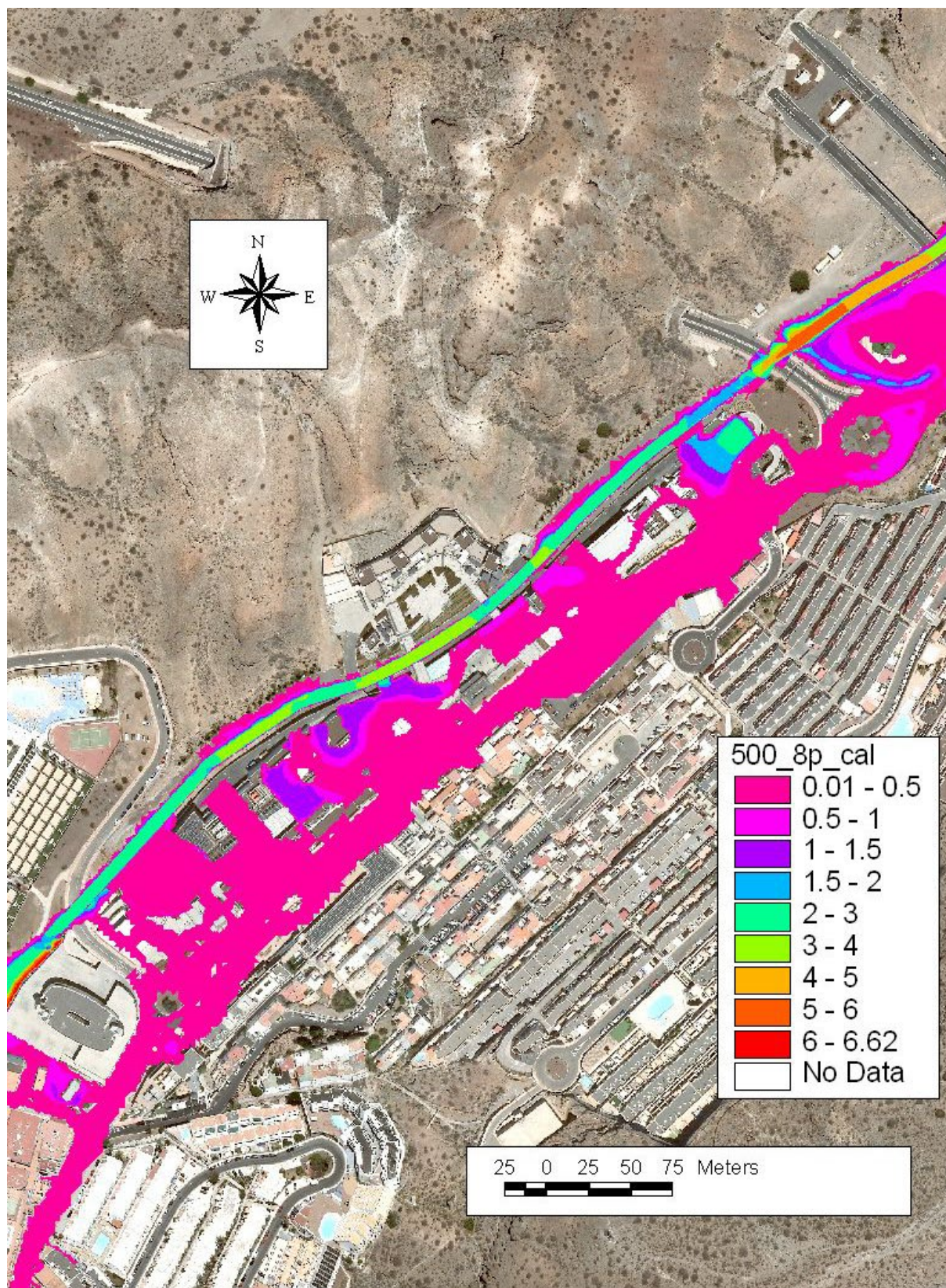


Figura 75. Detalle de calados en la zona del Mogán Mall, para T 500 años.

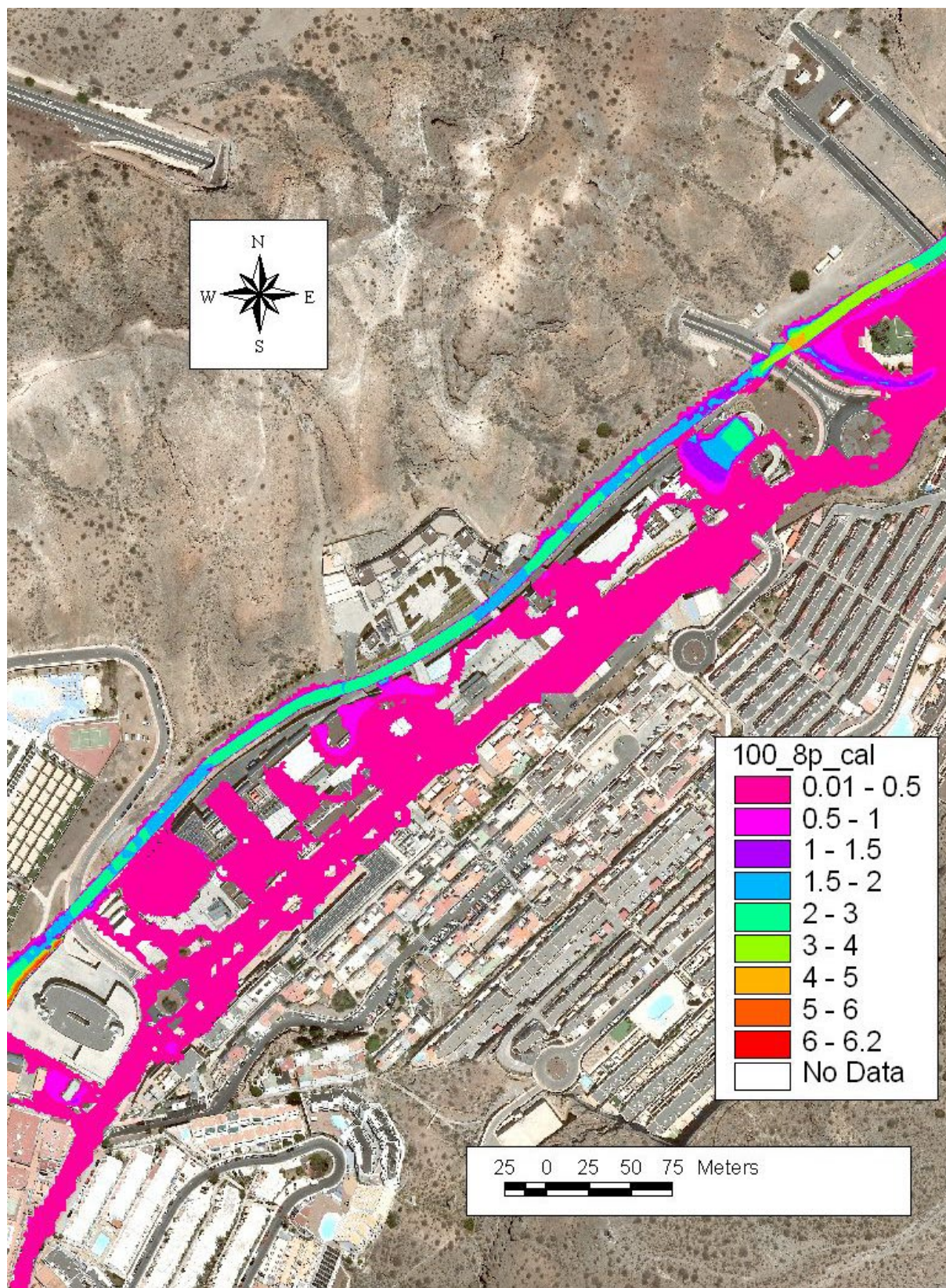


Figura 76. Detalle de calados en la zona del Mogán Mall, para T 100 años.

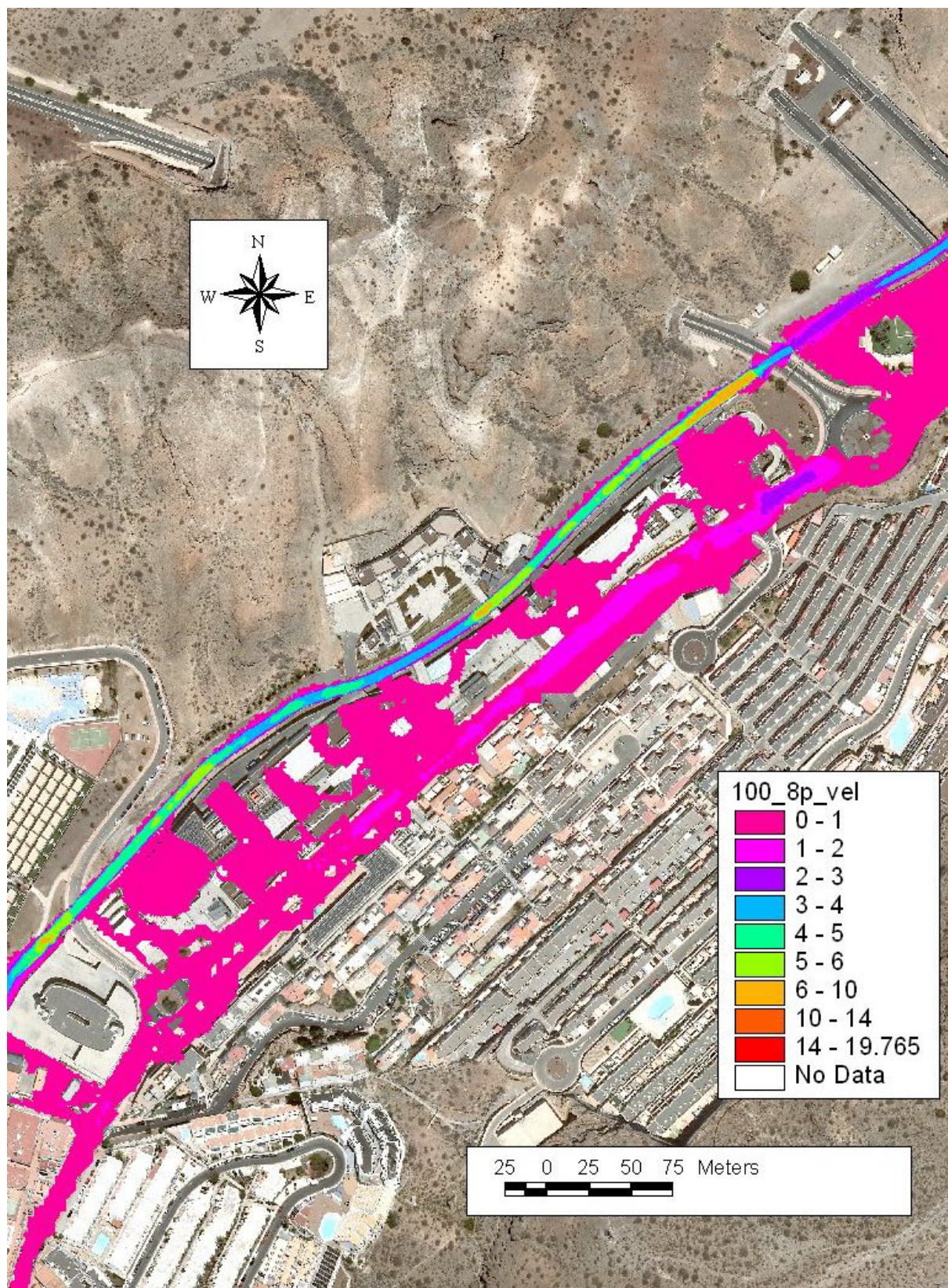


Figura 77. Detalle de velocidades en la zona del Mogán Mall, para T 100 años.

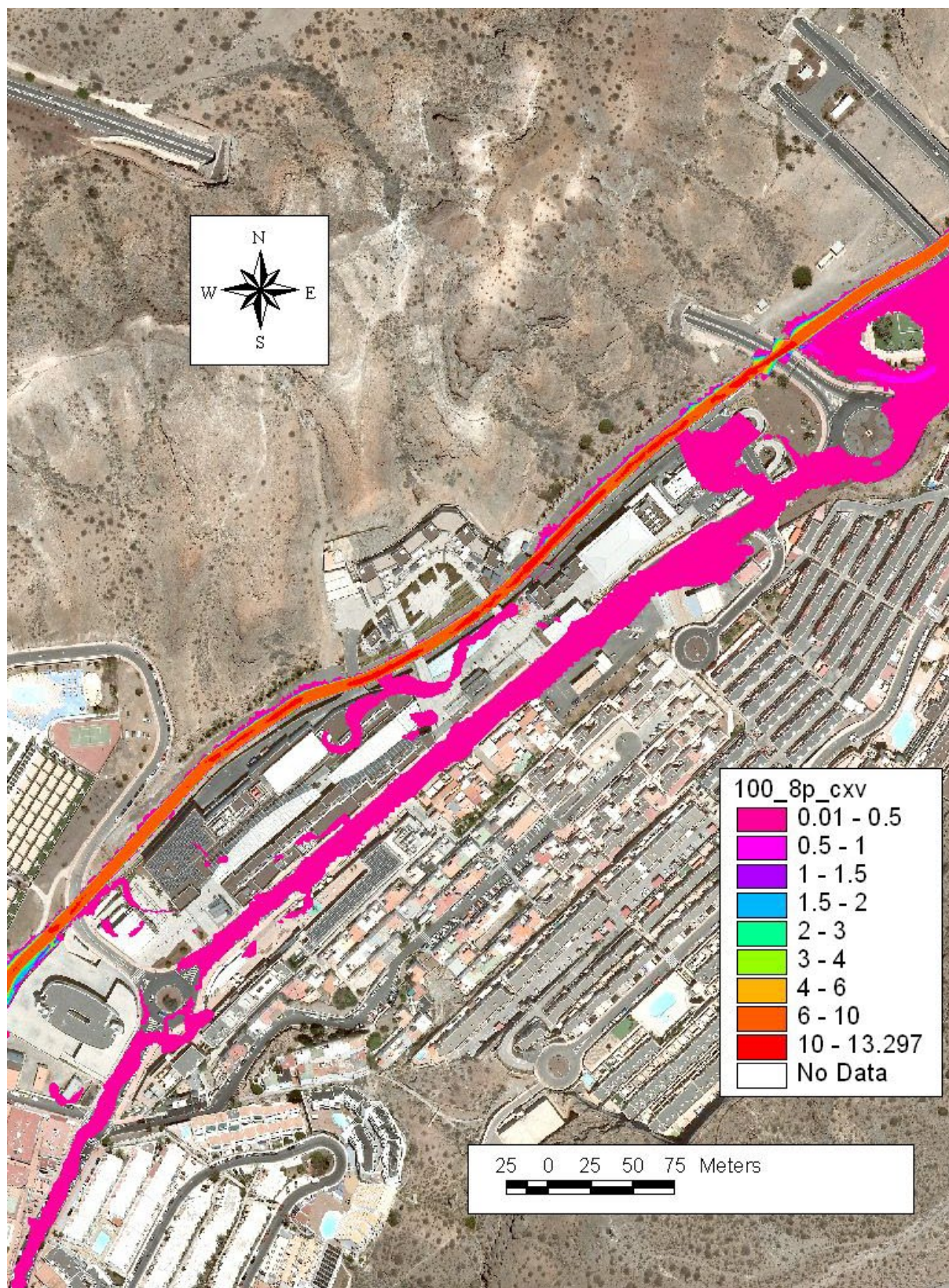


Figura 78. Detalle de producto de calado x velocidad en la zona del Mogán Mall, para T 100 años.

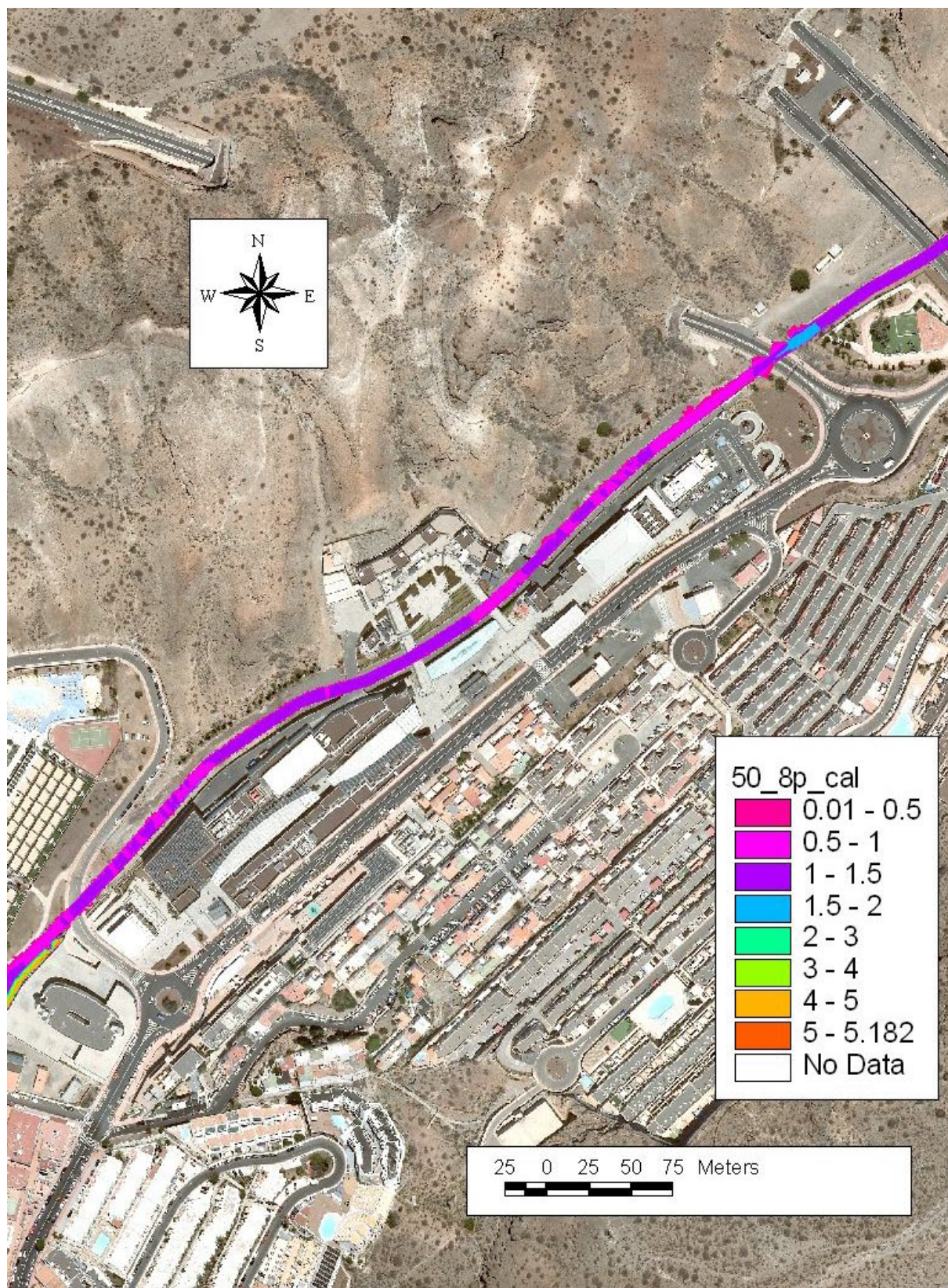


Figura 79. Detalle de calados en la zona del Mogán Mall, para T 50 años.

4.10.3. Zona entre el Parking y el Mini Golf

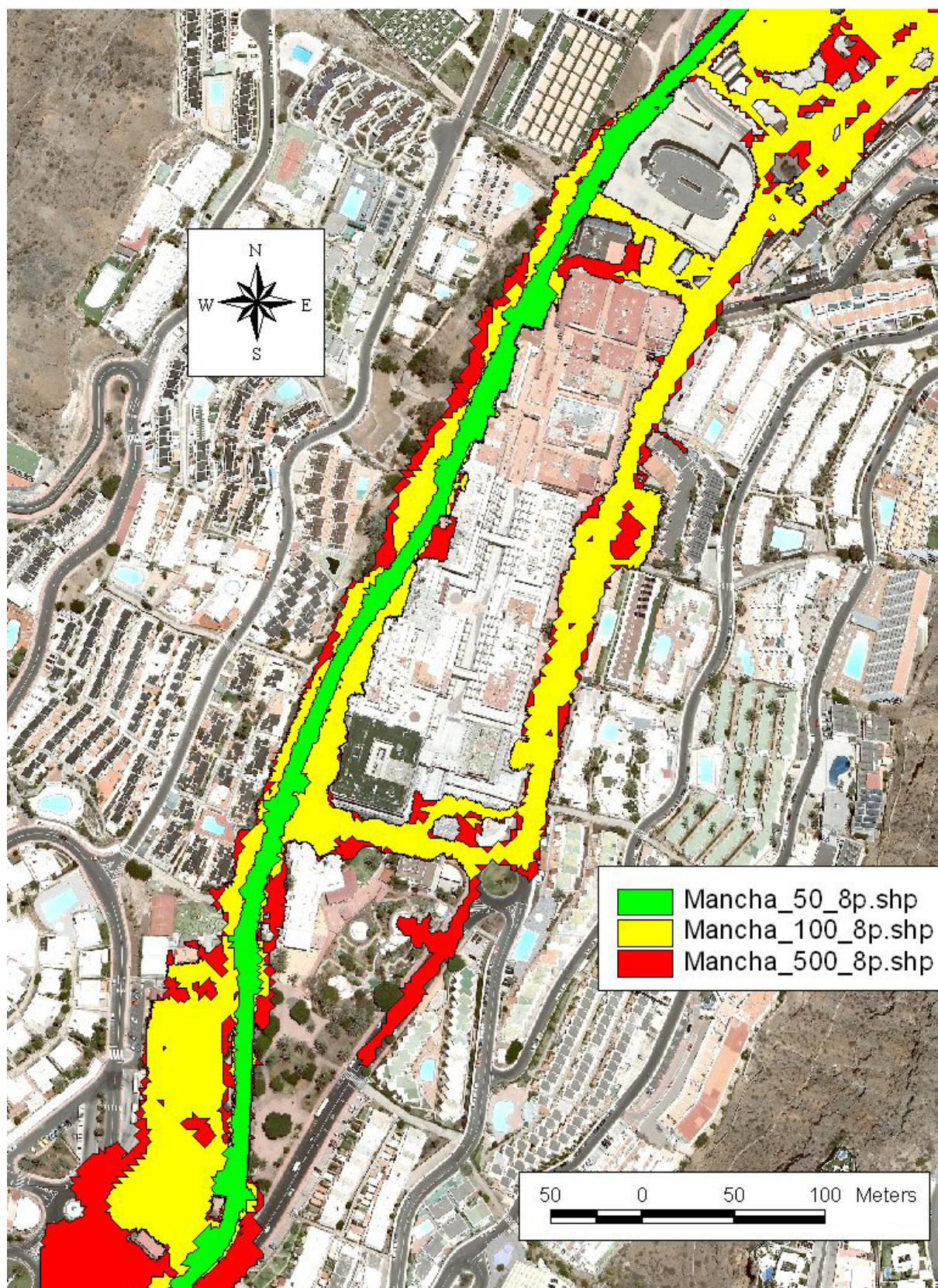


Figura 80. Detalle de manchas de inundación en la zona entre el parking y el minigolf.

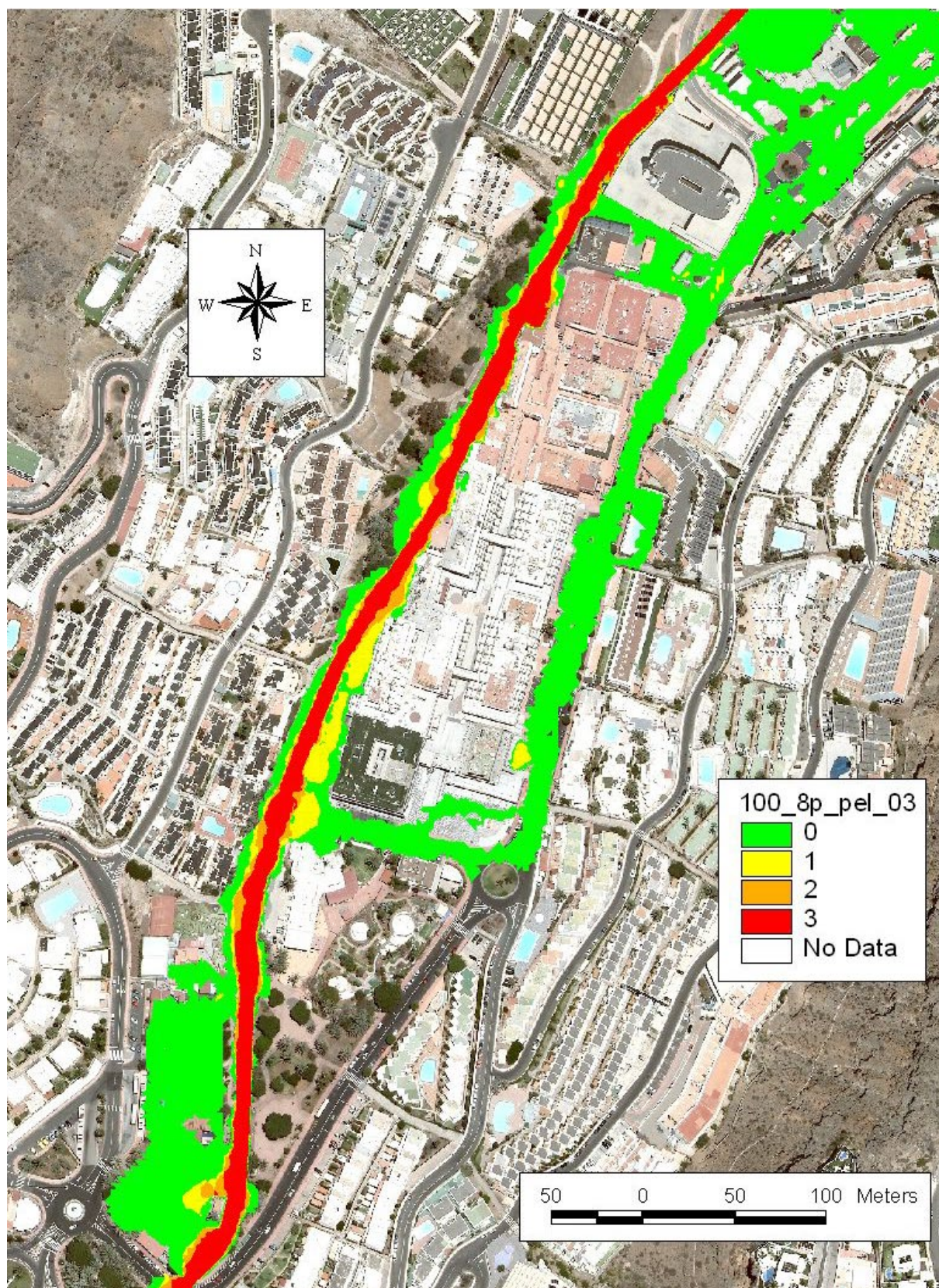


Figura 81. Detalle las zonas donde se cumplen los criterios para inundación peligrosa en la zona entre el parking y el minigolf.



Figura 82. Detalle de la zona de inundación peligrosa en la zona entre el parking y el minigolf.

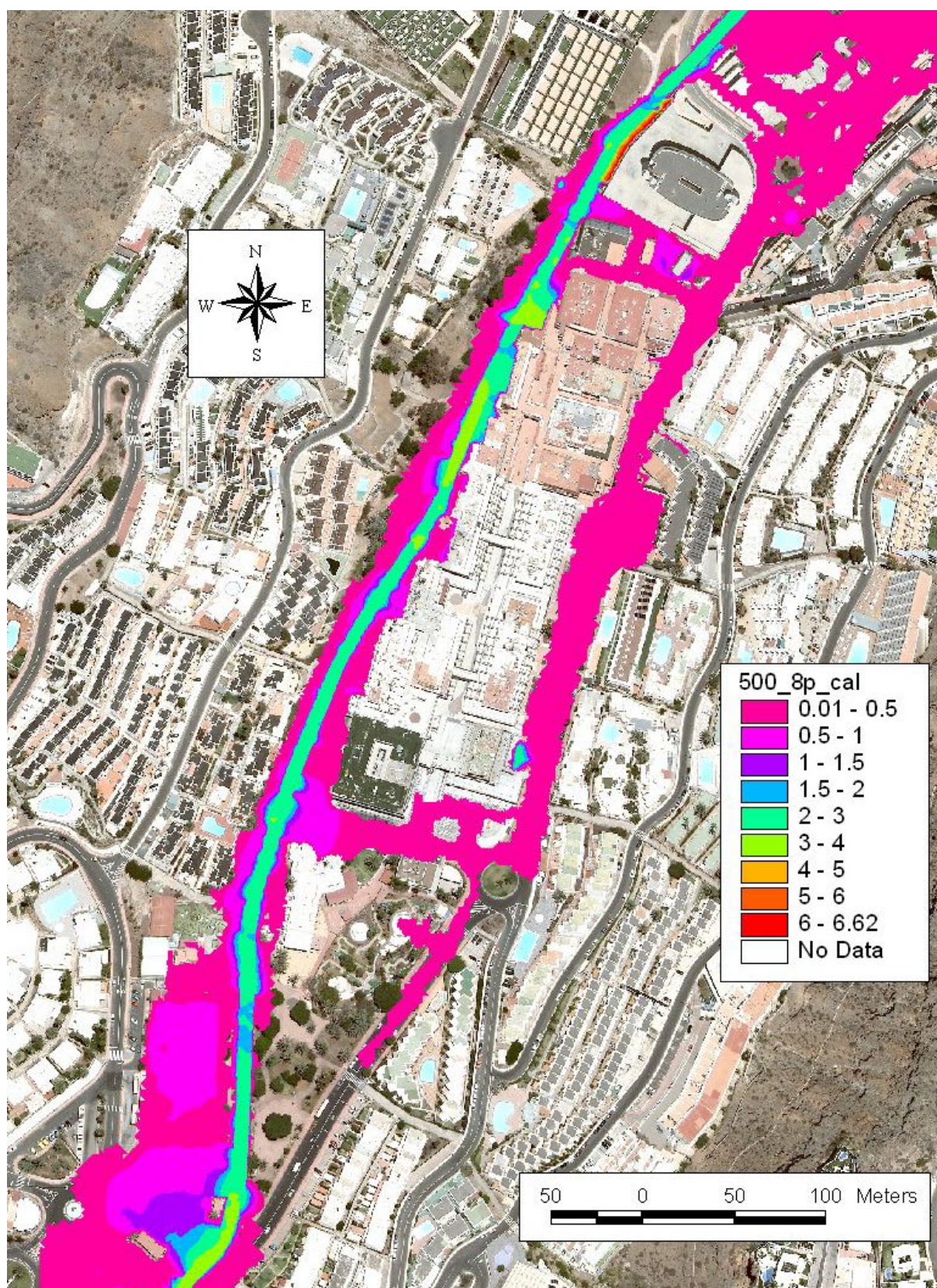


Figura 83. Detalle de calados en la zona entre el parking y el minigolf, para T 500 años.

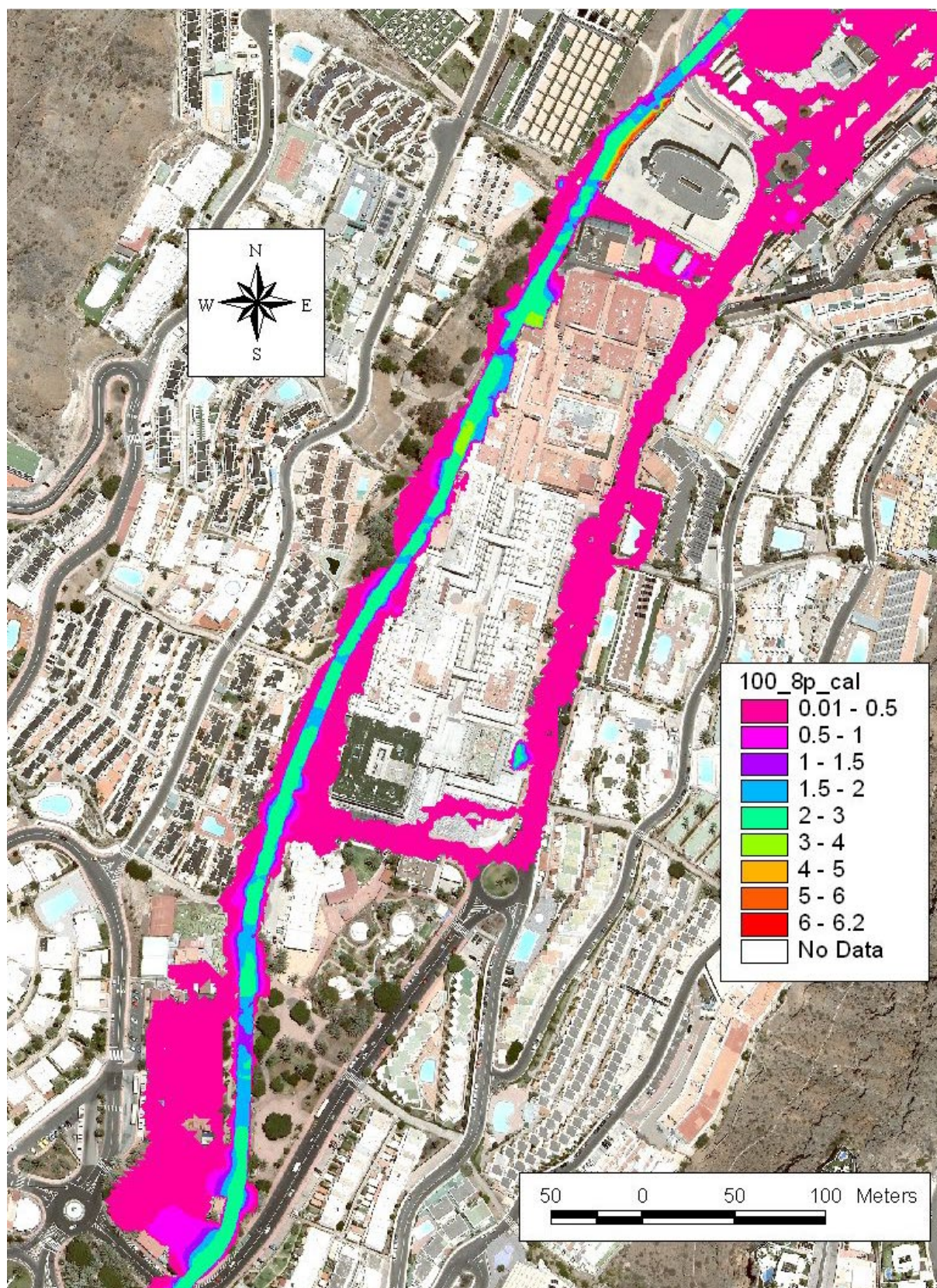


Figura 84. Detalle de calados en la zona entre el parking y el minigolf, para T 100 años.

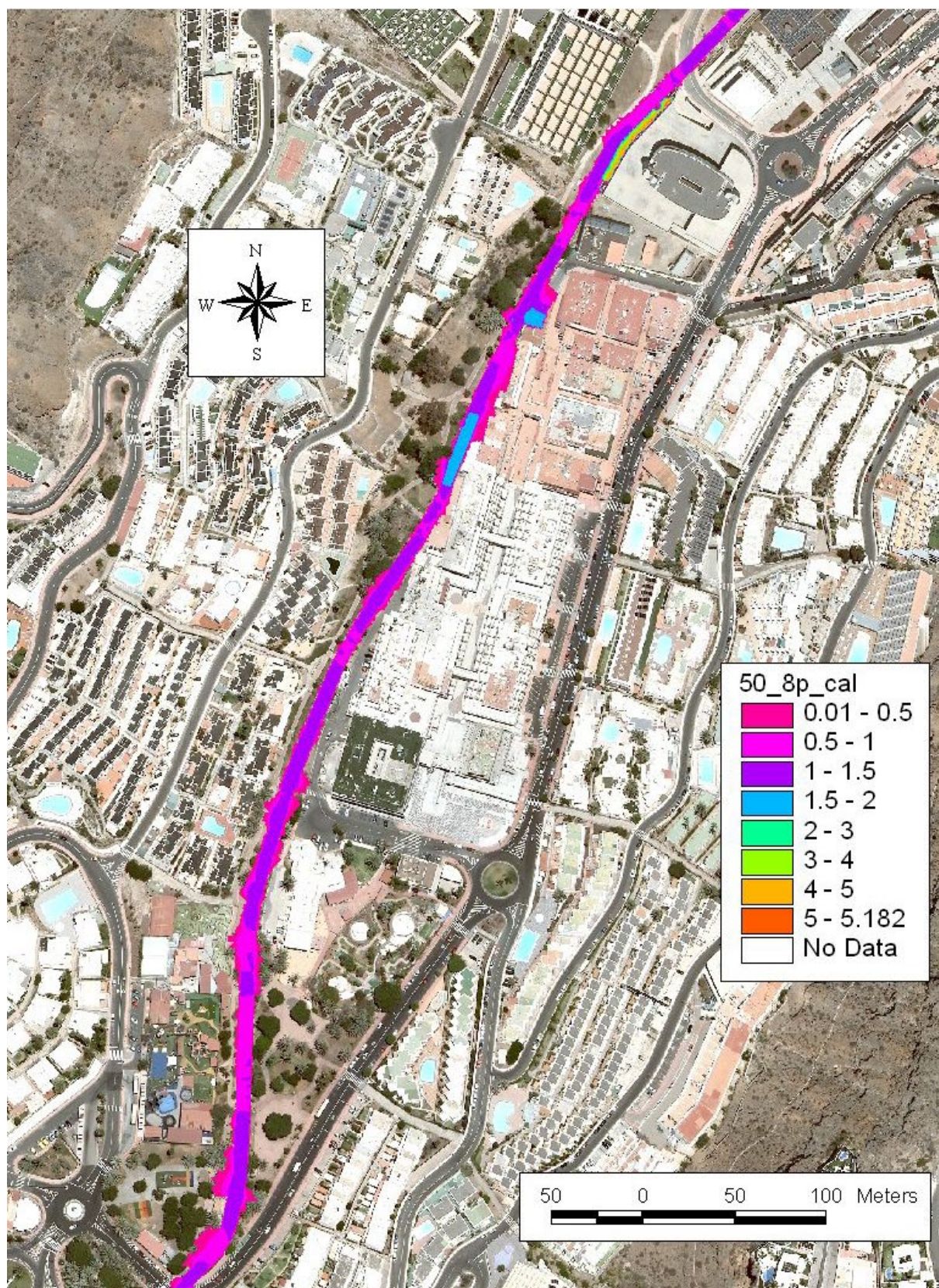


Figura 85. Detalle de calados en la zona entre el parking y el minigolf, para T 50 años.

4.10.4. Zona de la desembocadura

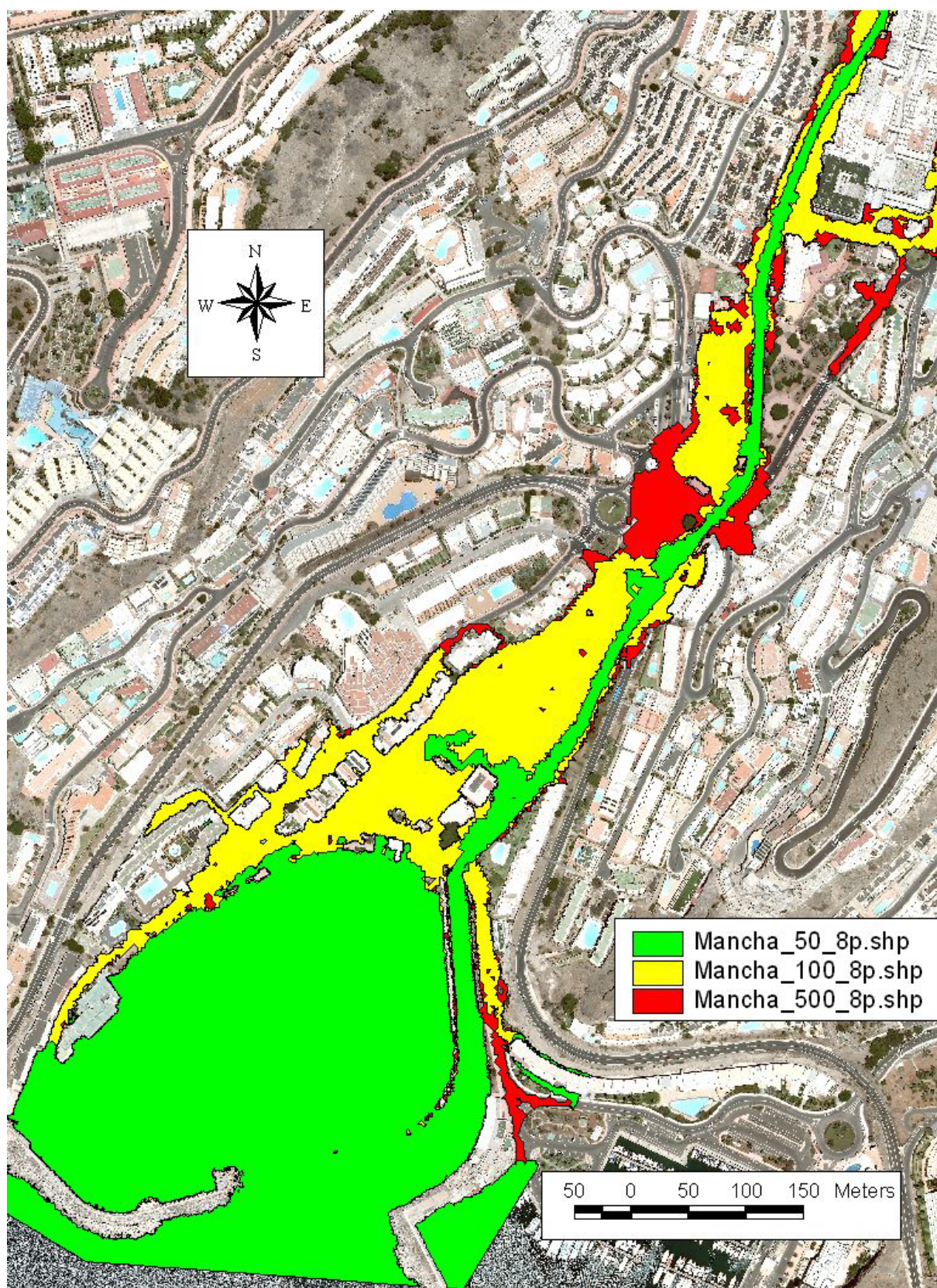


Figura 86. Detalle de manchas de inundación en la zona de la desembocadura.

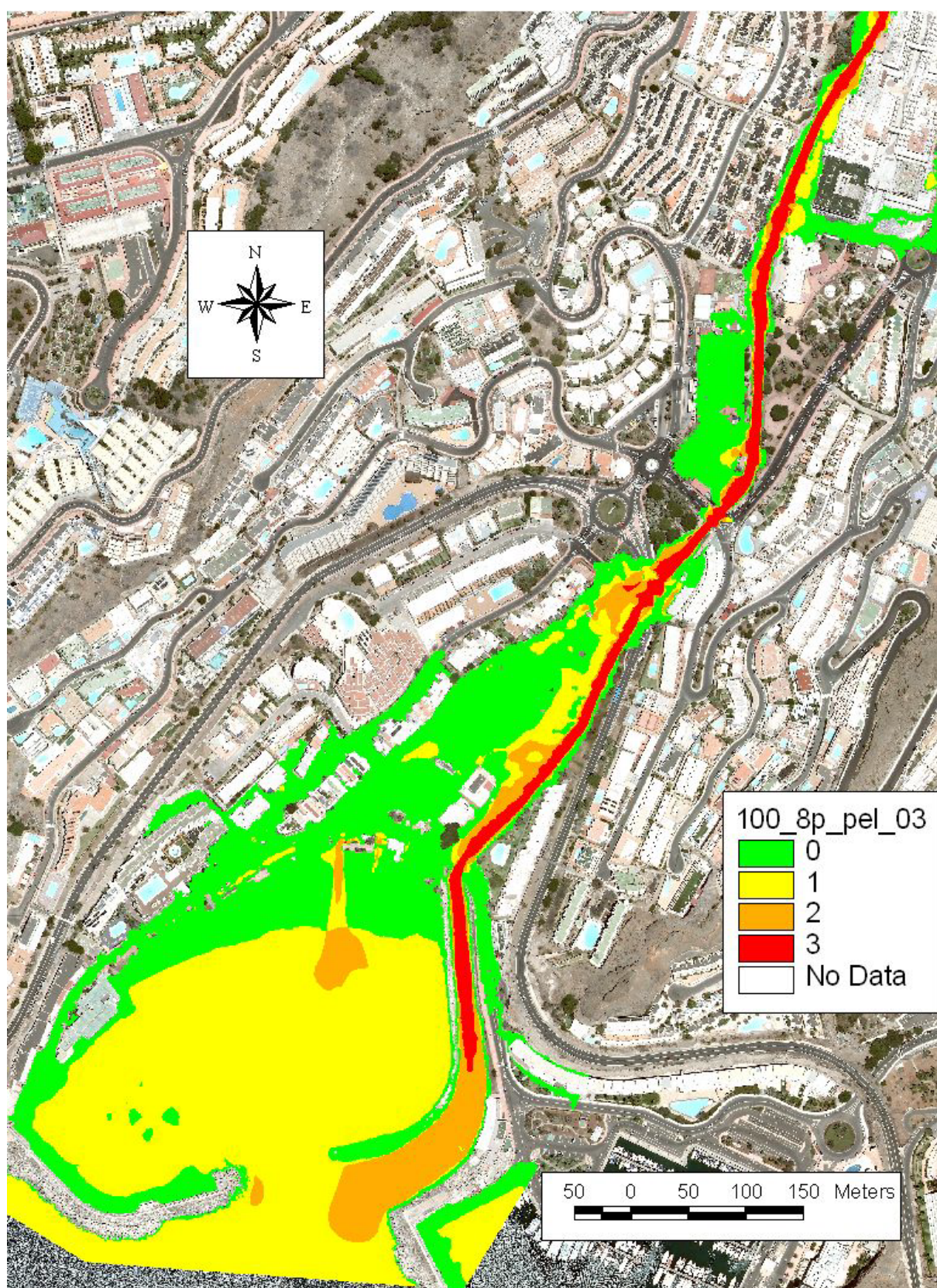


Figura 87. Detalle las zonas donde se cumplen los criterios para inundación peligrosa en la zona de la desembocadura.

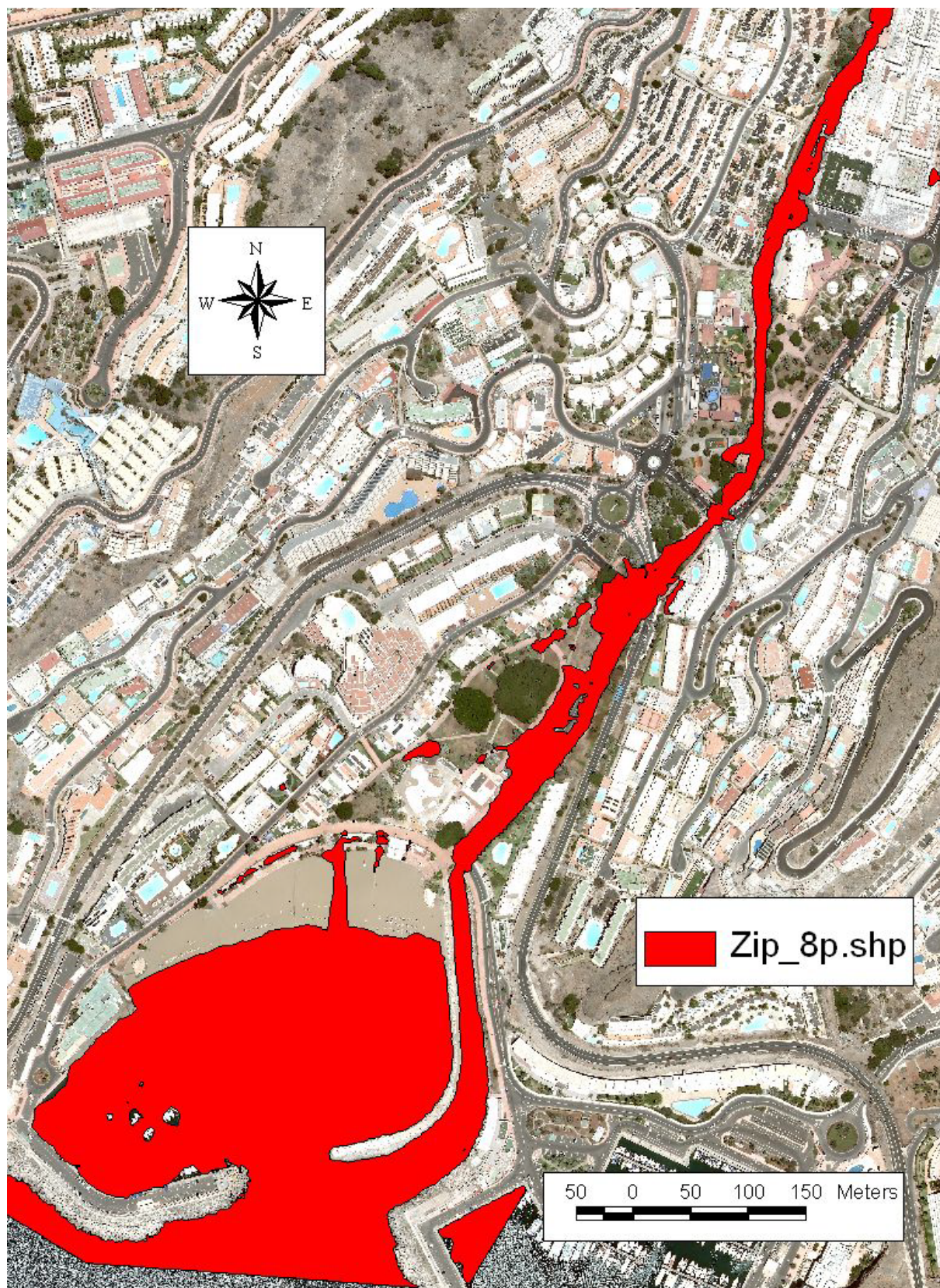


Figura 88. Detalle de la zona de inundación peligrosa en la zona de la desembocadura.

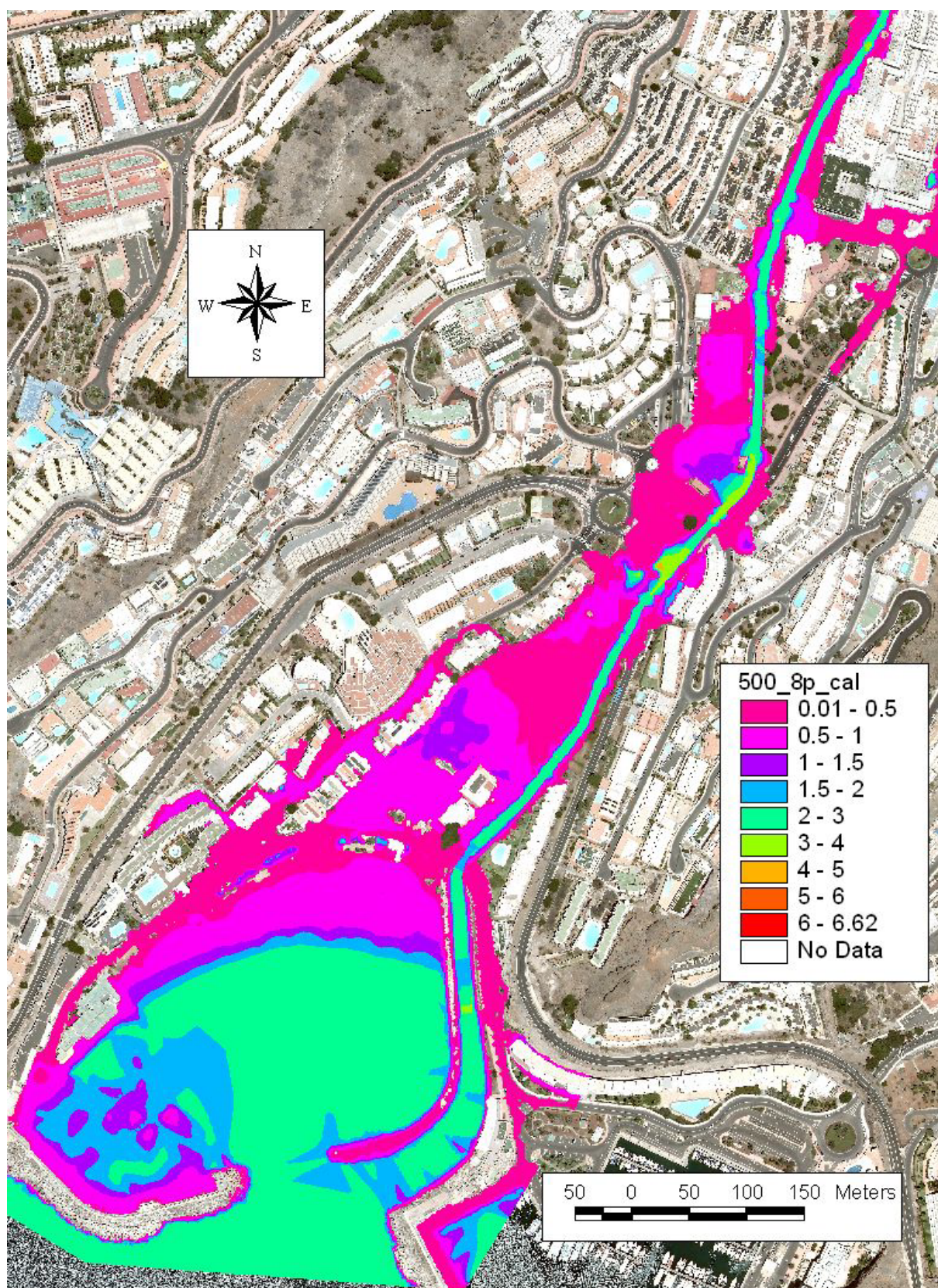


Figura 89. Detalle de calados en la zona de la desembocadura, para T 500 años.

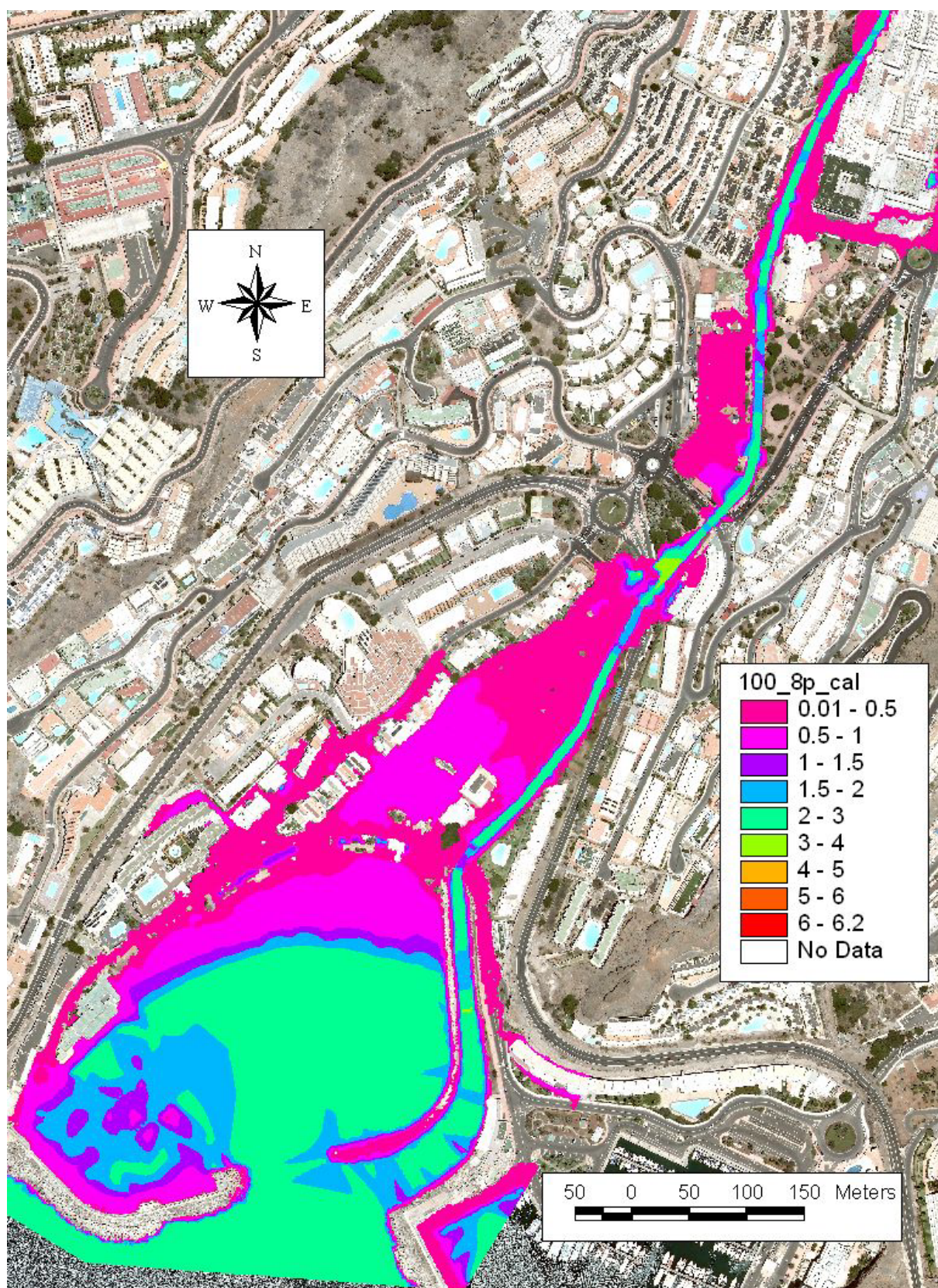


Figura 90. Detalle de calados en la zona de la desembocadura, para T 100 años.

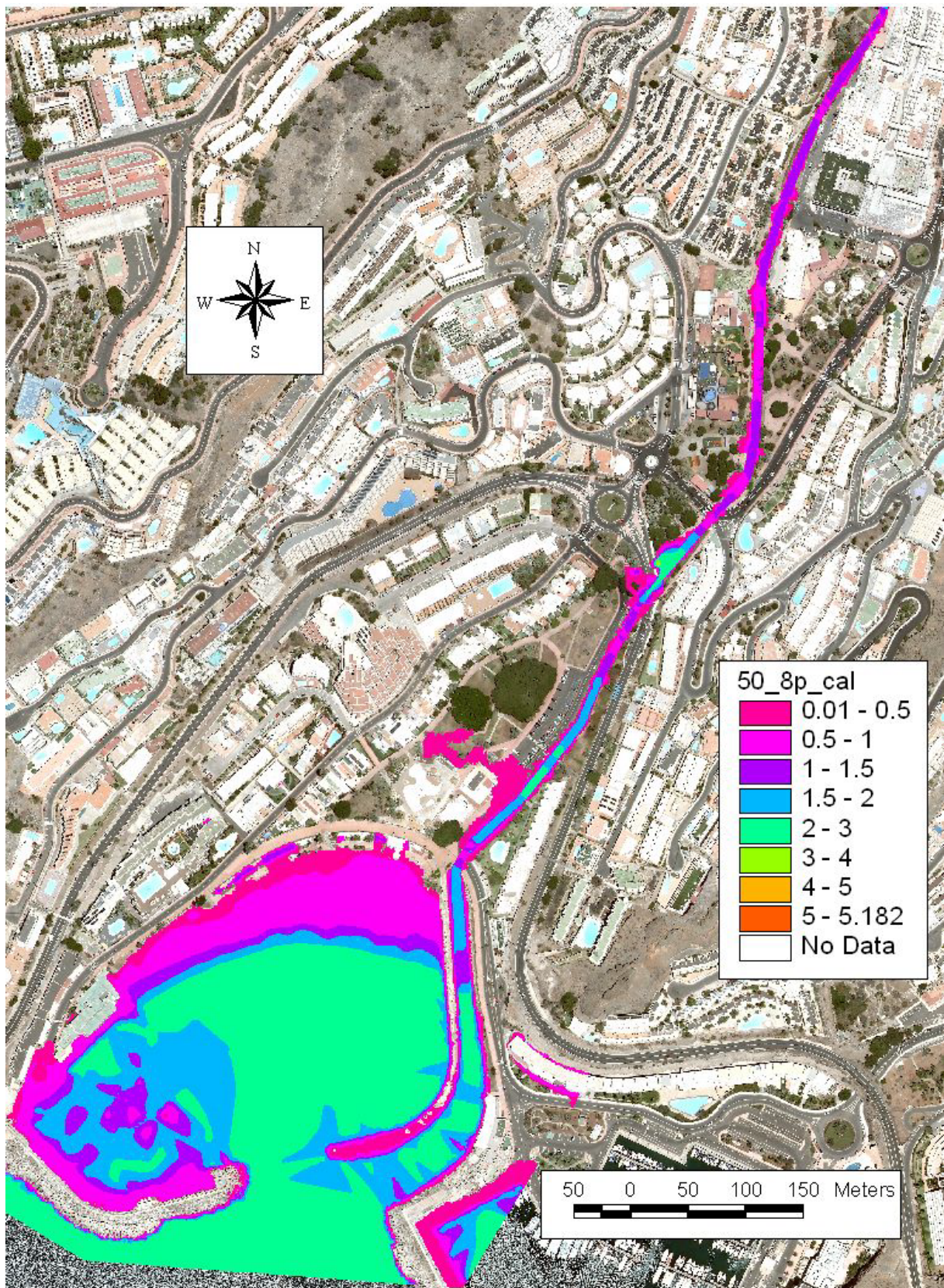


Figura 91. Detalle de calados en la zona de la desembocadura, para T 50 años.

4.10.5. Resumen de la situación en los puentes

En la siguiente Tabla, se presenta un resumen de las cotas en cada uno de los puentes, incluyendo la cota máxima de inundación para cada periodo de retorno.

Se observa que, para un periodo de retorno de 50 años sólo los puentes 8 y 9 se muestran insuficientes, para 100 años, se agregan los puentes 1, 4, 7 y 10 y para 500 años, se agrega el puente 6. Los puentes 2, 3 y 5 resultan suficientes en todas los casos analizados.

Tabla 3. Resumen de las cotas en los puentes.

Puente	Cota lecho (m)	Cota inf. tablero	Cota sup. tablero	Cota máxima de inundación (m)		
				T500	T100	T50
1	56,6	59,1	61,7	63,0	62,5	58,7
2	49,7	55,8	57,1 (56,5)	52,3	51,1	50,6
3	40,1	43,5	56,0 (43,8)	43,1	42,8	41,7
4	34,4	36,8	41,2	39,8	38,5	36,2
5	20,5	24,6	26,0 (25,5)	23,3	22,7	21,5
6	6,5	9,5	10,4 (9,9)	10,2	9,3	7,7
7	4,6	7,4	8,4 (7,5)	8,4	8,2	7,2
8	2,4	4,3	4,8	5,4	5,2	4,5
9	2,2	3,9	4,3	5,0	4,8	4,3
10	2,1	3,6	4,1	4,3	4,2	3,6

4.10.6. Resumen de la situación por calles

En la siguiente Figura, se muestra un mapa callejero de la zona de interés y en la siguiente Tabla un resumen de la situación en cada una de las calles afectadas.

Se observan problemas de inundaciones, para 100 años de periodo de retorno, desde el parque de Bomberos, calle Madrid, luego llamada Avda. Tomás Roca Bosch, hasta la rotonda de la calle de La Gomera, siendo de un máximo de 56 cm en el primer tramo hasta la rotonda de la GC-500, de 12 cm hasta la rotonda de la Avda. de las Palmeras y de 6 cm hasta La Gomera. Para 500 años, en esta calle los calados máximos son de 72, 20 y 12 cm, respectivamente.

Luego, en la zona de la desembocadura, se observan inundaciones de hasta 87 cm en la calle Juan Díaz Rodríguez y 73 cm en Doreste y Molina para un periodo de retorno de 500 años, mientras que para 100 años lo son de 63 y 56 cm, respectivamente. Para el periodo de retorno de 50 años, sólo se observa inundación en la primera de un máximo de 13 cm.

En lo que concierne a zonas de inundación peligrosa, dado que los calados en las calles son menos a 1m no lo son por calado, sino más bien por velocidad y éstas se manifiestan en la calle Madrid y en la Avda. Tomás Roca Bosch frente al Mogán Mall.

5. CONCLUSIONES

Una vez analizados los resultados del Estudio Hidráulico del barranco de Puerto Rico, se concluye que para periodos de retorno de 100 y 500 años se produce un desbordamiento en la zona inmediatamente aguas abajo del parque de Bomberos, coincidiendo con una disminución de la cota del cajero de margen izquierda. La inundación prosigue hacia aguas abajo por la calle Madrid, después llamada Avda. Tomás Roca Bosch, hasta la rotonda de la calle La Gomera donde se incorpora prácticamente en su totalidad al barranco. En ese mismo punto comienzan los desbordamientos sobre margen derecha hasta llegar a la desembocadura. En la desembocadura se detectan calados de hasta 87 cm en la calle Juan Díaz Rodríguez y de hasta 73 cm en Doreste y Molina, para 500 años, mientras que para 100 años resultan ser de 63 y 56 cm, respectivamente.

Se detectan zonas de inundación peligrosa a causa de velocidades mayores a 1 m/s en la calle Madrid y en Avda. Tomás Roca Bosch frente al Mogán Mall.

Para 50 años de periodo de retorno, sólo resulta inundada una pequeña zona en las inmediaciones de la desembocadura con un calado máximo de 13 cm en la calle Juan Díaz Rodríguez.

Los puentes tienen un desempeño desigual, siendo los llamados con los números 2, 3 y 5 los únicos que quedarían sin afectación. Las pasarelas peatonales, puentes 8 y 9 resultan insuficientes en todos los casos, mientras que los 1, 4, 7 y 10 lo son para 100 y 500 años y el 6, sólo para 500 años.

Es importante destacar, que, dado que la inundación comienza aguas abajo del Parque de Bomberos, justo aguas arriba del puente 3, la solución no depende de mejorar la capacidad en dicho puente, sino en aumentar la capacidad de ese tramo del encauzamiento, bien aumentando

la altura del cajero de margen izquierda, bien ensanchando la sección o con una actuación combinada.

La solución en la zona de la desembocadura no queda clara, pues la cota de inundación supera la cota superior de los tableros en los últimos 3 puentes y el aumento de cota de los cajeros solucionaría la inundación, pero posiblemente esa solución dificulte el drenaje una vez pasado el evento que provoca la inundación.

Se recomienda explorar varias alternativas, acompañadas todas ellas de estudios hidráulicos 2D para predecir su comportamiento de forma adecuada.

Fdo. Leonardo S. Nanía Escobar

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Colegiado N° 19071

Profesor Titular de Universidad – Universidad de Granada

6. REFERENCIAS

Bladé, E., L. Cea, G. Corestein, E. Escolano, J. Puertas, E. Vázquez-Cendón, J. Dolz, A. Coll (2014) *Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos*. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. Volumen 30, Nro. 1, 1-10. ISSN 0213-1315. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>.

Nanía, L.S. y Gómez.Valentín, M. (2020) *Ingeniería Hidrológica*. Tercera Edición. Editorial Técnica AVICAM, Granada, 280 pp. ISBN: 978-84-18147-31-9.