UNIVERSIDAD NACIONAL ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Carrera de Geología

EVALUACIÓN DE RIESGO DE INUNDACIÓN POR DESBORDE DEL ESTERO BELLAVISTA

Tesis para optar al título de Geólogo

Diego Andrés Sierra Mora

Profesor Guía:

Elisabeth Lictevout

Miembros de la Comisión

Cristian Vera Soriano

Diego Caamaño Avendaño

Concepción, Chile

2020

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo la evaluación de los riesgos de inundación en el sector de Bellavista, comuna de Tomé, Región del Biobío, Chile. Para ello ha sido empleada de forma combinada y complementaria una valoración de peligrosidad en base a los resultados de un estudio de modelización hidrológica-hidráulica (Alarcón, 2019) y una valoración de vulnerabilidad y exposición de la zona urbana en base a un análisis multicriterio mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG). En Paralelo se llevó a cabo un análisis de la marea como factor condicionante en el desarrollo de estas inundaciones considerando que la localidad de Bellavista se encuentra próxima a la desembocadura de la cuenca costera.

Los resultados obtenidos han permitido elaborar cartografías que muestran la distribución espacial de los niveles de peligro, riesgo, vulnerabilidad y exposición ante inundaciones fluviales para toda la zona urbana de Bellavista y han permitido analizar la influencia del mar como factor condicionante.

Este trabajo evidencia un alto nivel de riesgo de inundación para las zonas habitadas de Bellavista, demostrando la necesidad de una correcta ordenación del territorio y de la adopción de una serie de medidas con el fin de minimizar el nivel de riesgo por inundación y sus efectos.

Abstract

The objective of this work is to evaluate the flood risks in the Bellavista sector, Tomé commune, Biobío Region, Chile. For this, a hazard assessment based on the results of a hydrological-hydraulic modeling study (Alarcón, 2019) and an assessment of vulnerability and exposure of the urban area based on a multi-criteria analysis using a multi-criteria analysis have been used in a combined and complementary way. Geographic Information Systems (GIS). In Parallel, a tidal analysis was carried out as a conditioning factor in the development of these floods, considering that the town of Bellavista is close to the mouth of the coastal basin.

The obtained results have allowed the elaboration of cartographies that show the spatial distribution of the levels of risk before river floods for the entire urban area of Bellavista and have allowed the analysis of the influence of the sea as a conditioning factor.

This work evidences a high level of flood risk for the inhabited areas of Bellavista that present a high level of flood risk, demonstrating the need for proper land use planning and the adoption of a series of measures in order to minimize the flood risk level and its effects.

1.Introducción

Desde su mismo origen las civilizaciones han puesto en evidencia la fuerte dependencia entre la ciudad y el potencial de los recursos naturales del entorno inmediato, eligiendo frecuentemente lugares próximos a redes fluviales para construir sus primeros asentamientos. Las primeras civilizaciones se situaron en llanuras fluviales, lo que proporcionaba buenas posibilidades para la agricultura (Tella, 2006), sin embargo, durante las últimas décadas, el crecimiento acelerado de los sectores urbanos y la falta de espacios aptos para ocupación de viviendas, han resultado en el uso de terrenos que muchas veces no son idóneos para la construcción de edificaciones o asentamientos (Araya, 2000).

"Las inundaciones fluviales son un proceso natural por el cual el flujo de agua desborda los límites de un cauce (Tockner et al., 2010)" (Rojas, Mardonez, Arumí, & Aguayo, 2014), este proceso deviene peligroso cuando el hombre ocupa zonas potencialmente inundables desconociendo la función natural de estas áreas, transformando el fenómeno en una amenaza para el asentamiento humano instalado (Rojas, 2015). Tal como ocurre en la localidad de Bellavista que través de su historia reciente se ha visto expuesta a desbordes de la red fluvial principal en los años 2002, 2005, 2006, 2013 y 2019. El sector de Bellavista pertenece a la comuna de Tomé ubicada en la Provincia de Concepción, VIII Región, Chile. Esta localidad se encuentra en las proximidades de un punto de confluencia entre el estero Bellavista que corresponde a la red fluvial principal y su mayor afluente el estero Nachur, además ambos confluyen a 800 metros aguas arriba de la desembocadura (figura 1).

La información asociada a inundaciones en el estero Bellavista es relativamente acotada, entre los estudios más relevantes destacan el realizado por el Ministerio de obras públicas (MOP, 2008), enfocado en la necesidad y prioridad de realización de obras ingenieriles para el mejoramiento del estero Bellavista. Este trabajo se basa en estudios de uso de suelo, hidrológicos y levantamientos topográficos con los cuales se prevén diferentes soluciones a la problemática con sus respectivas factibilidades.

Puentes (2014) determino áreas potencialmente amenazadas por el desborde de cauce del estero Bellavista. El estudio fue llevado a cabo mediante modelación hidráulica del estero, identificando que gran parte del sector Bellavista se encuentra bajo una amenaza de inundación.

Parra, Camaaño, & Fuentes, 2019 en su estudio "Determinación de zonas de

inundación mediante herramienta bidimensional en estero Bellavista" analizan la hidrodinámica de posibles inundaciones mediante simulaciones realizadas con el software Delft3D FM, con lo cual se establecen potenciales desbordes del cauce para diferentes periodos de retorno.

Este trabajo pretende contribuir a la información existente realizando una evaluación de riesgo de inundación fluvial a partir de la valoración de vulnerabilidad y exposición de la zona urbana y la valoración de la peligrosidad mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), intentando además analizar la influencia de la marea como factor condicionante en el desarrollo de inundaciones.

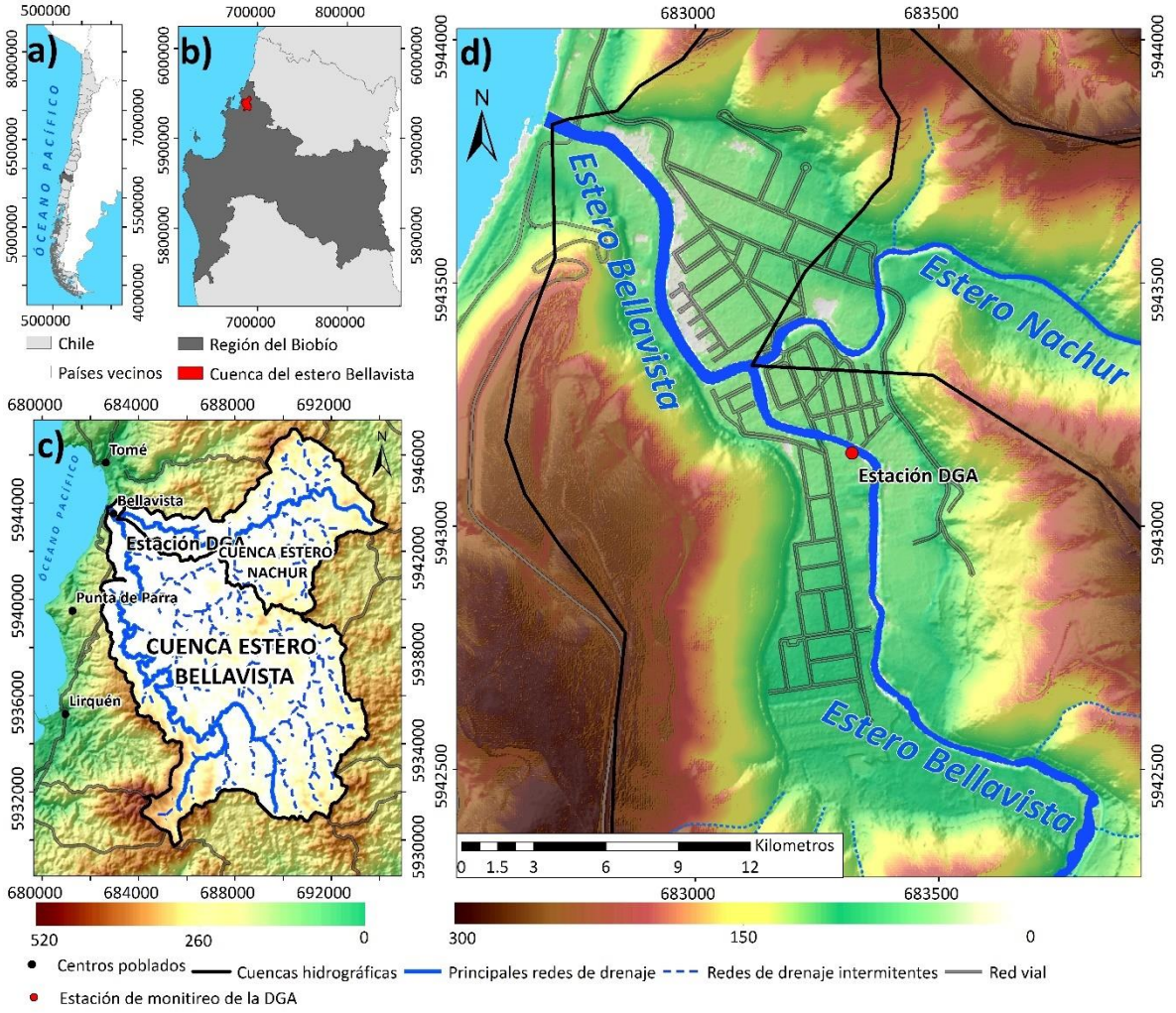


FIG.1. *Mapa de ubicación del área de estudio: (a) Contexto sudamericano, (b) Contexto regional, (c) Cuenca del estero Bellavista y subcuenca del estero Nachur, (d) Cuenca baja del estero Bellavista, sector Bellavista.*

2. Marco geológico

En la figura 2 se muestra una caracterización general de la geología en el área de estudio. En la cuenca del estero Bellavista existe una predominancia de rocas de composición granítica, de carácter intrusivo que varían de tonalitas a granodioritas con intercalaciones de diorita cuarcífera y granito. Estas rocas pertenecen a la subunidad Granitoides de Concepción del complejo plutónico denominado Batolito de la Costa (Creixell, 2001). Este se extiende a lo largo del borde occidental de la Cordillera de la Costa en una franja de orientación NNE-SSW, cuya edad ha sido determinada como Paleozoico Superior (Hervé et al., 1987).

En el sector occidental del área se encuentra una franja de rocas metamórficas, principalmente filitas, esquistos, metareniscas y localmente corneas y migmatitas correspondientes a la Serie Oriental de edad paleozoica (Burón et al., 2003). Estas secuencias sedimentarias se habrían depositado como turbiditas en un ambiente oceánico profundo y reductor (Hervé, 1977). Posteriormente estas secuencias fueron sometidas a metamorfismo regional de contacto. El responsable de este metamorfismo es el Batolito de la Costa (Mardones, Velásquez, Merino, & Bonilla, 2012).

Sobre la Serie Oriental y el Batolito de la Costa que conforman el sustrato más antiguo del área se dispone en discordancia angular e inconformidad una serie sedimentaria marina fosilífera denominada Formación Quiriquina (Ksq), a la cual se le asigna la edad Senoniano Superior generalmente atribuida al Maastrichtiano (Biró, 1982).

Sobreyaciendo a la Formación Quiriquina y en discordancia sobre rocas plutónicas y metamórficas del Paleozoico, se encuentra la Formación Curanilahue de edad Terciario inferior, Eoceno (Pineda, 1983), la cual está constituida por areniscas arcillas y estratos carbonosos.

Por último, las unidades litológicas más recientes corresponderían a Depósitos Litorales y a Depósitos Fluviales que sobreyacen a todas las unidades precuaternarias. Los Depósitos Litorales corresponden a arenas claras, de color pardo amarillento, debido al predominio de cuarzo y feldespato sobre los minerales máficos (e.g., micas, anfíboles, hematita, magnetita, piroxeno) (Erices, 2018), constituyen cordones litorales paralelos a la línea de costa (Ramírez, Vivallos, Cáceres, & Fonseca, 2012) o acumulaciones en el interior de ensenadas pequeñas, que bordean las bahías de Concepción (Galli, 1967). Los Depósitos Fluviales corresponden a arenas finas limosas

y arcillosas, pobremente seleccionadas, sin cementación, de color castaño amarillento; compuestas principalmente por cuarzo, feldespato y líticos plutónicos (Galli, 1967) estos depósitos fluviales serian el relleno sedimentario del valle fluvial sobre el que se ha edificado la zona urbana de Bellavista.

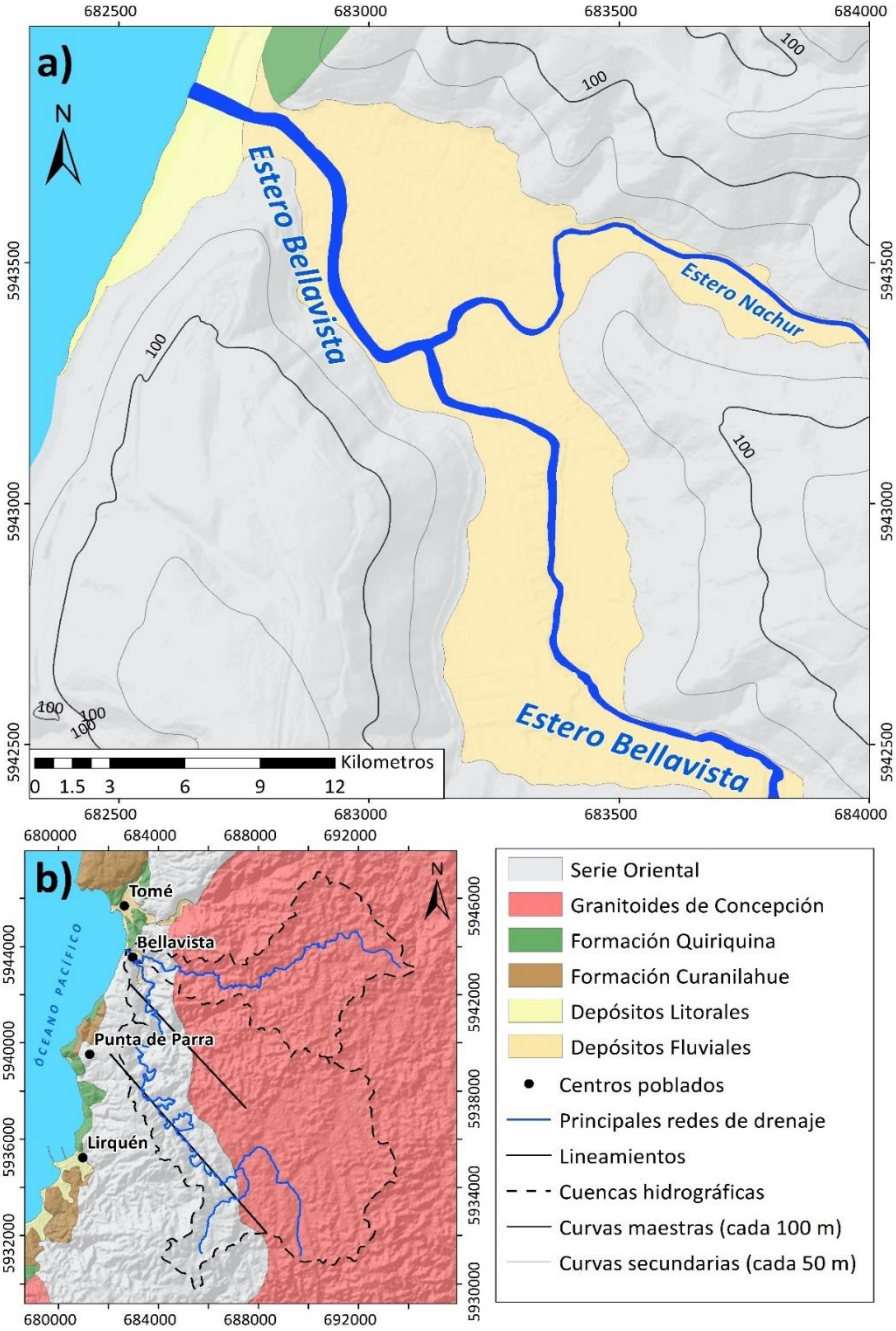


FIG.2. *Mapas geológicos del área de estudio. (a) Cuenca baja del estero Bellavista, sector Bellavista; (b) Cuenca del estero Bellavista y subcuenca del estero Nachur. Las unidades, ordenadas de la más antigua a la más reciente, corresponden a: Serie Oriental, Granitoides de Concepción, Formación Quiriquina, Formación Curanilahue, Depósitos Litorales y Depósitos Fluviales. Modificado de Chotin (1969), SERNAGEOMIN (2003) y Erices (2018).*

3. Metodología

A continuación, se describe la metodología seguida en este estudio para la evaluación de los riesgos de inundación en el sector de Bellavista por la ocurrencia de crecidas.

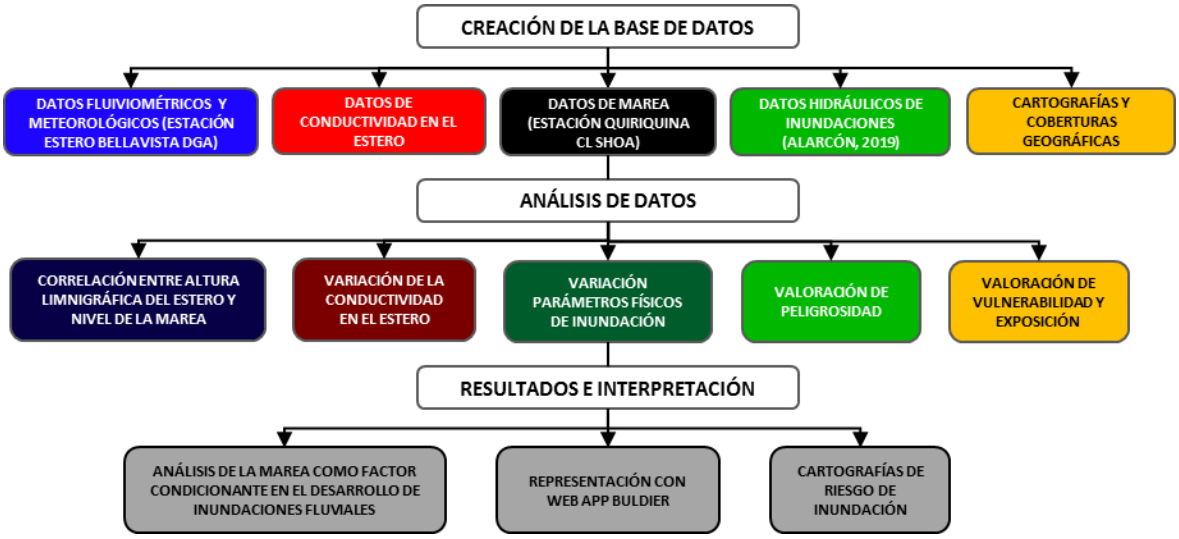


FIG.3. *Esquema de la metodología seguida en este estudio.*

3.1. Creación de base de datos

La información necesaria para la elaboración de este estudio puede ser clasificada en los siguientes grupos: datos fluviométricos (de altura limnigráfica del estero), meteorológicos (de precipitaciones), de mareas, cartográficos (coberturas geográficas de uso de suelo y catastros estadísticos tanto de densidad de población como de materialidad de las edificaciones), hidráulicos y fisicoquímicos (de conductividad eléctrica).

Los datos fluviométricos y meteorológicos usados provienen de la estación de monitoreo del estero Bellavista de la Dirección General de Aguas (DGA) y corresponden al registro de la altura limnigráfica del estero y sus precipitaciones. Los datos de mareas fueron recabados de la estación de monitoreo Quiriquina CL administrada por Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA).

Los datos cartográficos corresponden a usos de suelo del PRC de Tomé y datos estadísticos de densidad de población y materialidad de las edificaciones del Censo del 2017. Las características hidráulicas de inundaciones simuladas en el área de estudio provienen del modelo Hidrológico - hidráulico del estudio "Caracterización de las inundaciones fluviales sector Bellavista comuna de Tomé" (Alarcón, Caamaño, & Villagrán, 2009) basado en el usó

el software HEC-RAS 5.0.3, de dicho estudio se extrajo la distribución de alturas de la lámina de agua y la distribución de las velocidades de flujo. Finalmente, los datos de conductividad eléctrica del agua se obtuvieron a partir de mediciones realizadas en terreno con un equipo portátil marca GONDO modelo PCT-407; las mediciones se efectuaron tanto en periodos de pleamar como bajamar.

3.2. Cartografías

Las cartografías resultantes de este trabajo se elaboraron para tres periodos de retorno (50, 100 y 150 años) cada uno en dos condiciones de marea (pleamar y bajamar) dando como resultado mapas individuales para seis escenarios diferentes.

3.2.1 Peligro

La valoración de peligrosidad se obtiene de acuerdo a la metodología usada en Parra (2019) que considera y valora dos parámetros, altura del agua y velocidades de flujo del agua. El producto entre ambos parámetros vh (v: velocidad h: altura) se considera como un aproximado de la fuerza del flujo y se clasifica en los rangos expresados en Xia et al. (2014): vh = 0.4 m²/s indica que la inundación puede derribar a un niño; vh=0.65 m²/s indica un flujo que puede derribar a adultos; vh = 0.8 m²/s indica un flujo que puede deslizar a los autos (Xia, Teo, Lin, & Falconer, 2011). El daño estructural comienza a 1.5 m²/s (Kreibich et al., 2009). Como resultado, se obtienen cinco niveles de peligro (anexo 1).

- **Variación en las cartografías de peligro**

Por medio del software ArcGIS se analiza como varían las áreas cartográficas de los niveles peligro en los seis mapas de peligrosidad.

3.2.2 Vulnerabilidad y exposición

Para valorar y zonificar la vulnerabilidad y exposición de la zona urbana se optó por realizar un análisis multicriterio (anexo 2), para lo que se consideraron cuatro parámetros (densidad de población, infraestructura crítica, valor patrimonial y susceptibilidad físico-estructural). La valoración de vulnerabilidad y exposición se clasifico en cinco niveles desde muy bajo a muy alto. La ponderación correspondiente a la importancia relativa entre los criterios considerados fue definida en conjunto con funcionarios de la Unidad de Desarrollo Urbano de la Ilustre Municipalidad de Tomé.

3.2.3 Riesgo

La valoración de los niveles de riesgo consideró la peligrosidad, vulnerabilidad y exposición del área de estudio. Estas variables fueron relacionadas mediante una matriz en la cual se establecieron cinco niveles de

riesgo, desde muy bajo a muy alto (anexo 3). La representación cartográfica de esta información fue realizada mediante la herramienta calculadora ráster del software ArcGIS.

- **Variación en las cartografías de riesgo**

Por medio del software ArcGIS se analiza como varían las áreas cartográficas de los niveles riesgo para los seis escenarios.

3.3. Variación de parámetros físicos de inundación

Mediante el uso de software ArcGIS se analizó la variación de los parámetros físicos de inundación (altura del agua, velocidad de flujo y superficie inundada) para cada uno de los seis escenarios contemplados. Este análisis contempla la variación de los parámetros en su distribución espacial y su variación estadística.

3.4. Marea

3.4.1. Correlación entre altura limnigráfica y marea

Para determinar el grado de asociación lineal entre dos variables cuantitativas se utiliza el coeficiente de correlación lineal de Pearson (r). Si r = 0, se entiende que las variables analizadas están incorrelacionadas, es decir, no existe relación lineal entre ellas. Si r = -1, o bien r = 1, existe dependencia funcional. Situaciones intermedias entre -1 y 0, o bien entre 0 y 1 son indicativas de distintos grados de dependencia lineal (Castillo, 2006).

Para analizar la influencia de los cambios en la condición de marea en su grado de asociación lineal con la altura limnigráfica del estero se procede a calcular y comparar coeficientes de correlación lineal entre la altura limnigráfica (estación 08210003-2 DGA) y el nivel la marea (estación Quiriquina CL SHOA), en dos condiciones. La primera condición implicaría calcular la correlación de las variables solo entre las horas en las que la marea fuese menor al nivel medio del mar (condición de bajamar) y la segunda condición restringiría la correlación de las variables solo entre las horas en las que la marea fuese mayor al nivel medio del mar (condición de pleamar).

Para obtener coeficientes de correlación lineal representativos entre las dos variables analizadas se debe aislar la influencia de terceras variables. Por lo tanto, a fin de minimizar la variabilidad de la altura limnigráfica por efecto de las precipitaciones (tercera variable), se opta por reducir el espacio muestral a los lapsos de tiempo en los que se alcanza el flujo base del estero (periodos estiaje). Para determinar esto se utilizó el registro de datos meteorológicos de la estación del estero Bellavista (08210003-2 DGA).

3.4.2. Conductividad eléctrica

Para obtener valores de conductividad eléctrica del agua en el estero se realizaron tres campañas de muestreo durante el año 2019. La primera desde el 31 de julio hasta el 2 de agosto, la segunda desde el 30 de agosto hasta el 1 de septiembre y la última desde el 29 al 30 de septiembre. Para la medición de conductividad eléctrica se utilizó el equipo portátil marca GONDO modelo PCT-407, este equipo se calibro previo a las mediciones en cada día de cada campaña. Se realizaron 144 mediciones en nueve puntos del estero Bellavista, todas se efectuaron en días de sicigias en los horarios en los que se alcanzaron las máximas alturas en pleamar y las menores alturas en bajamar.

3.5. Representación de la información

Finalmente, con el objetivo de facilitar la divulgación y la comprensión de la información obtenida a todo tipo de público se procede a la creación de una aplicación web mediante la herramienta Web App Builder (WAB) del software ArcGIS PRO, herramienta que permite crear aplicaciones HTML/JavaScript personalizadas sin necesidad de grandes conocimientos en programación; la finalidad de esta aplicación es representar las capas obtenidas en la valoración de peligro y riesgo en conjunto con datos geográficos en 2D o 3D para una visualización optima, integral e intuitiva de los resultados más destacados de este estudio.

4. Resultados

4.1. Cartografías

4.1.1. Peligro

Los resultados de la zonificación de los distintos niveles peligro para inundaciones fluviales en el sector de Bellavista se muestran en seis figuras correspondientes a los seis escenarios considerados (figura 4.1, figura 4.2, figura 4.3, figura 4.4, figura 4.5 y figura 4.6).

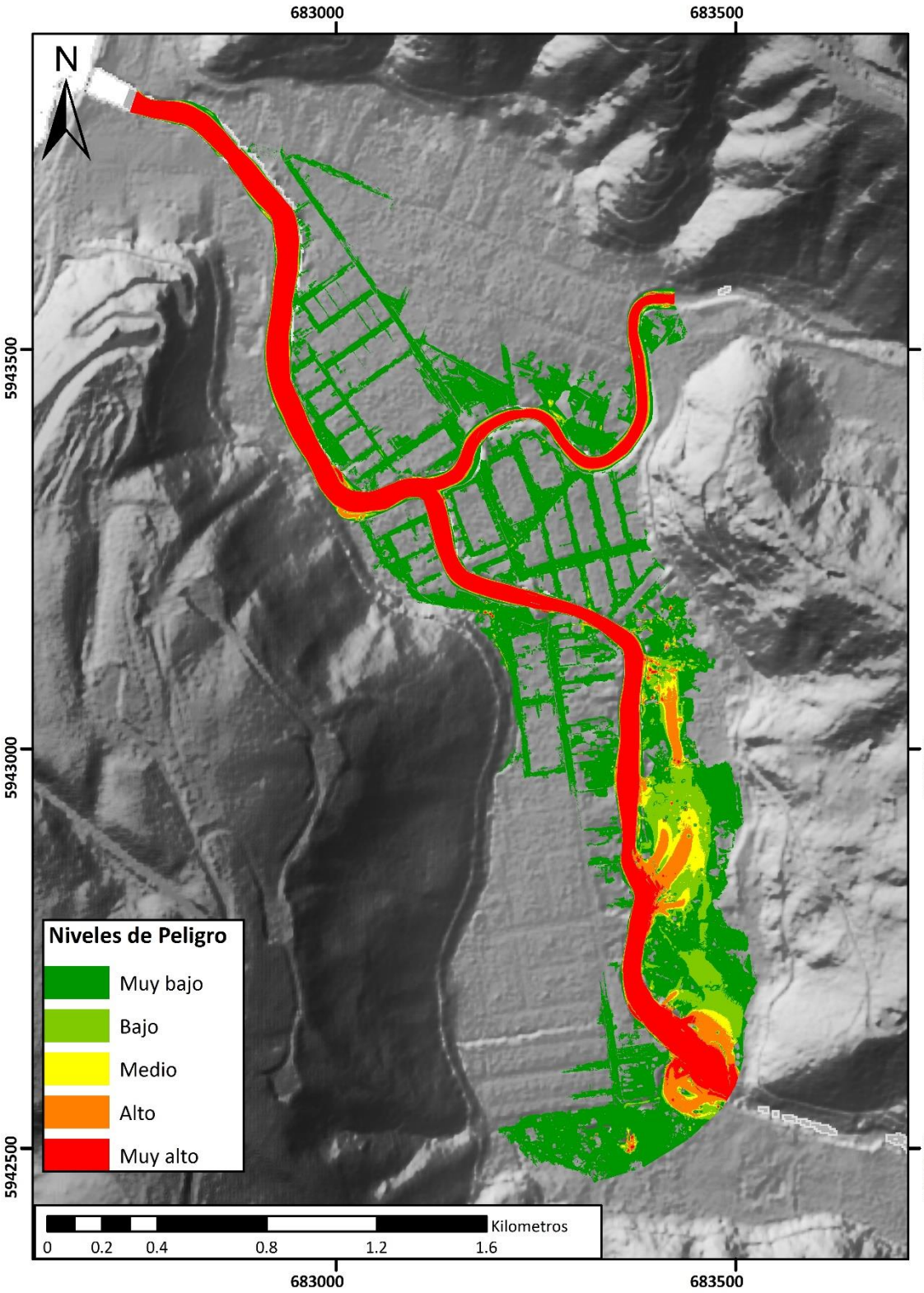


FIG.4.1. *Mapa de peligro asociado a inundaciones fluviales para un periodo de retorno de 50 años en bajamar.*

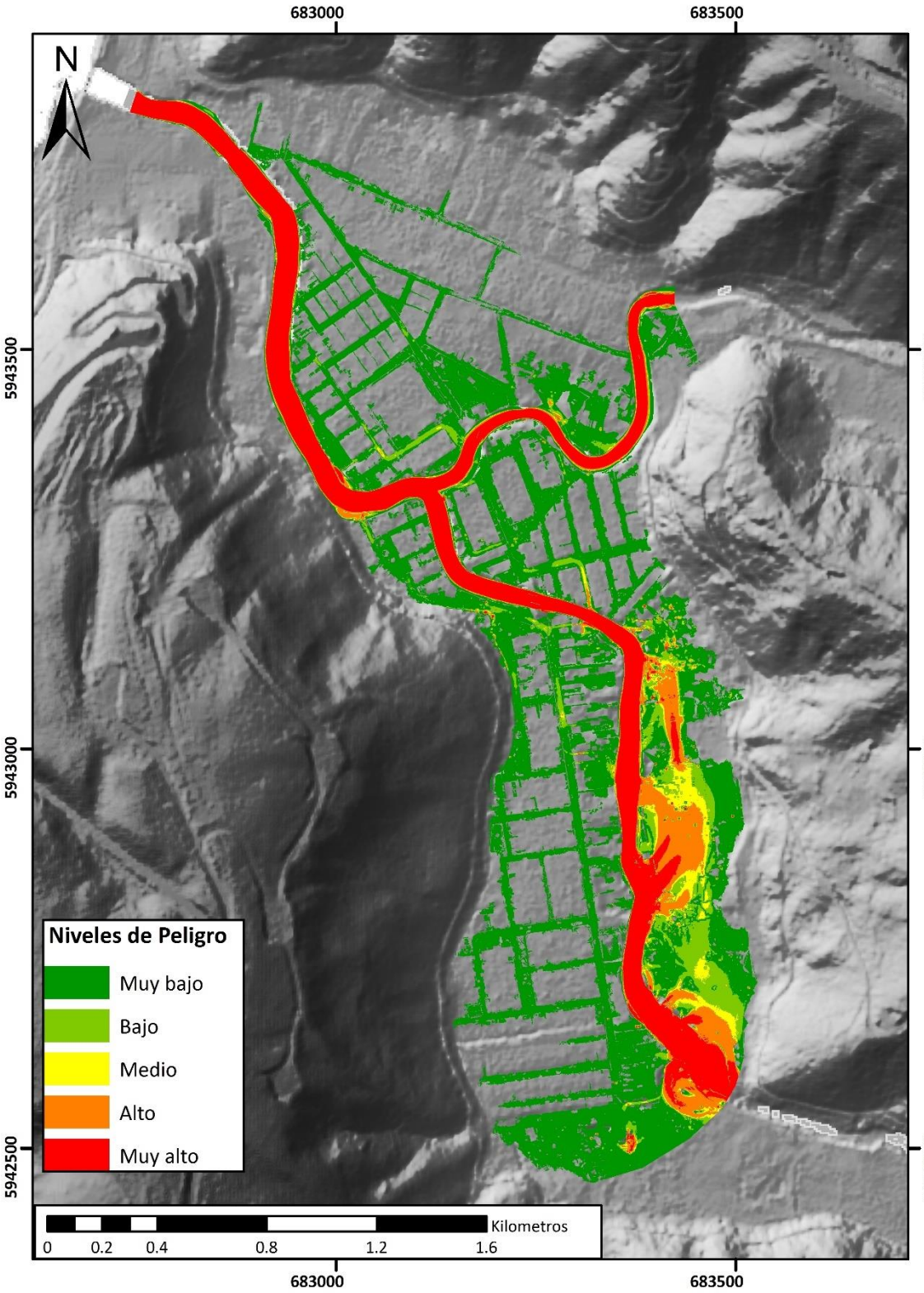


FIG.4.2. *Mapa de peligro asociado a inundaciones fluviales para un periodo de retorno de 100 años en bajamar.*

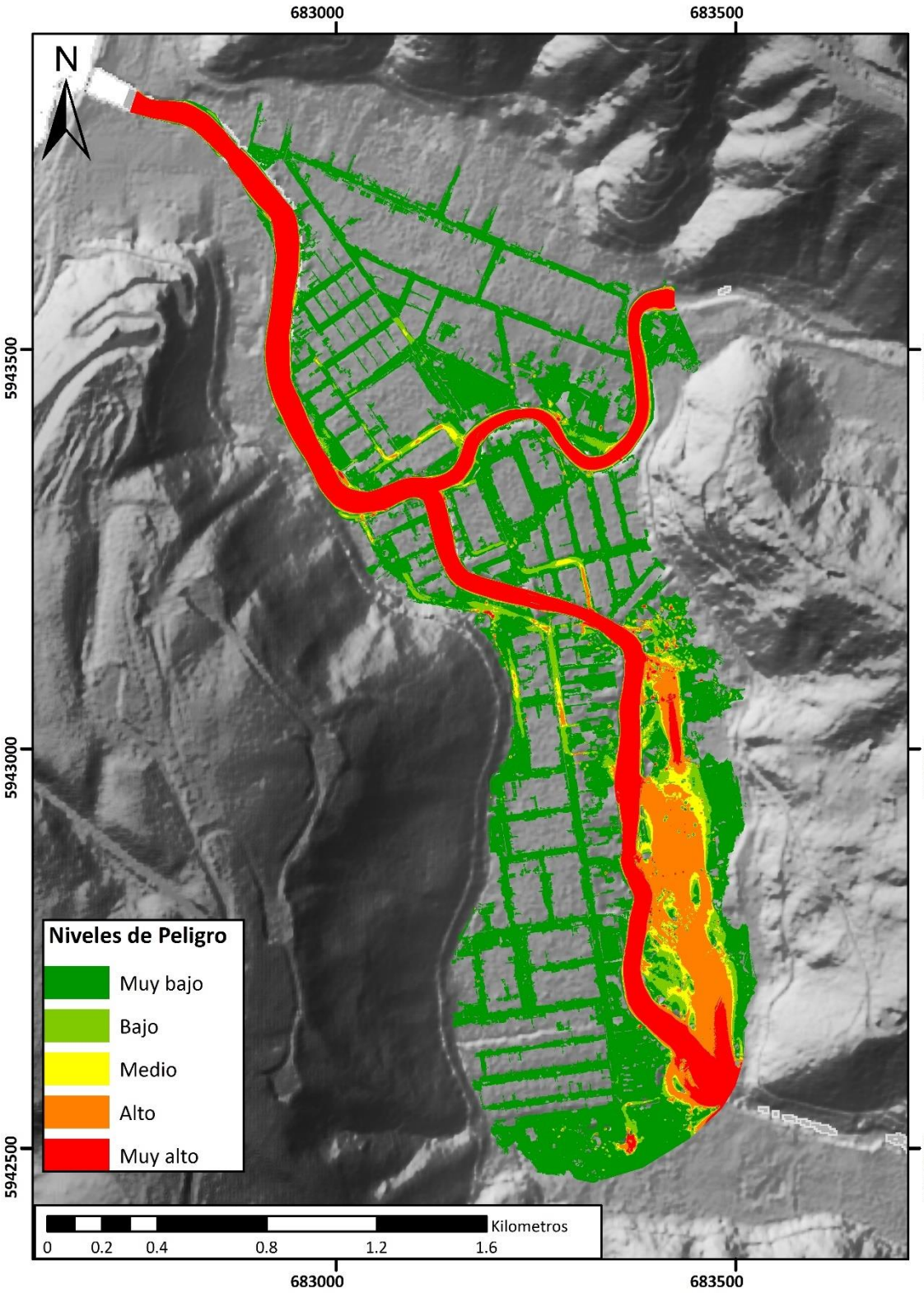


FIG.4.3. *Mapa de peligro asociado a inundaciones fluviales para un periodo de retorno de 150 años en bajamar.*

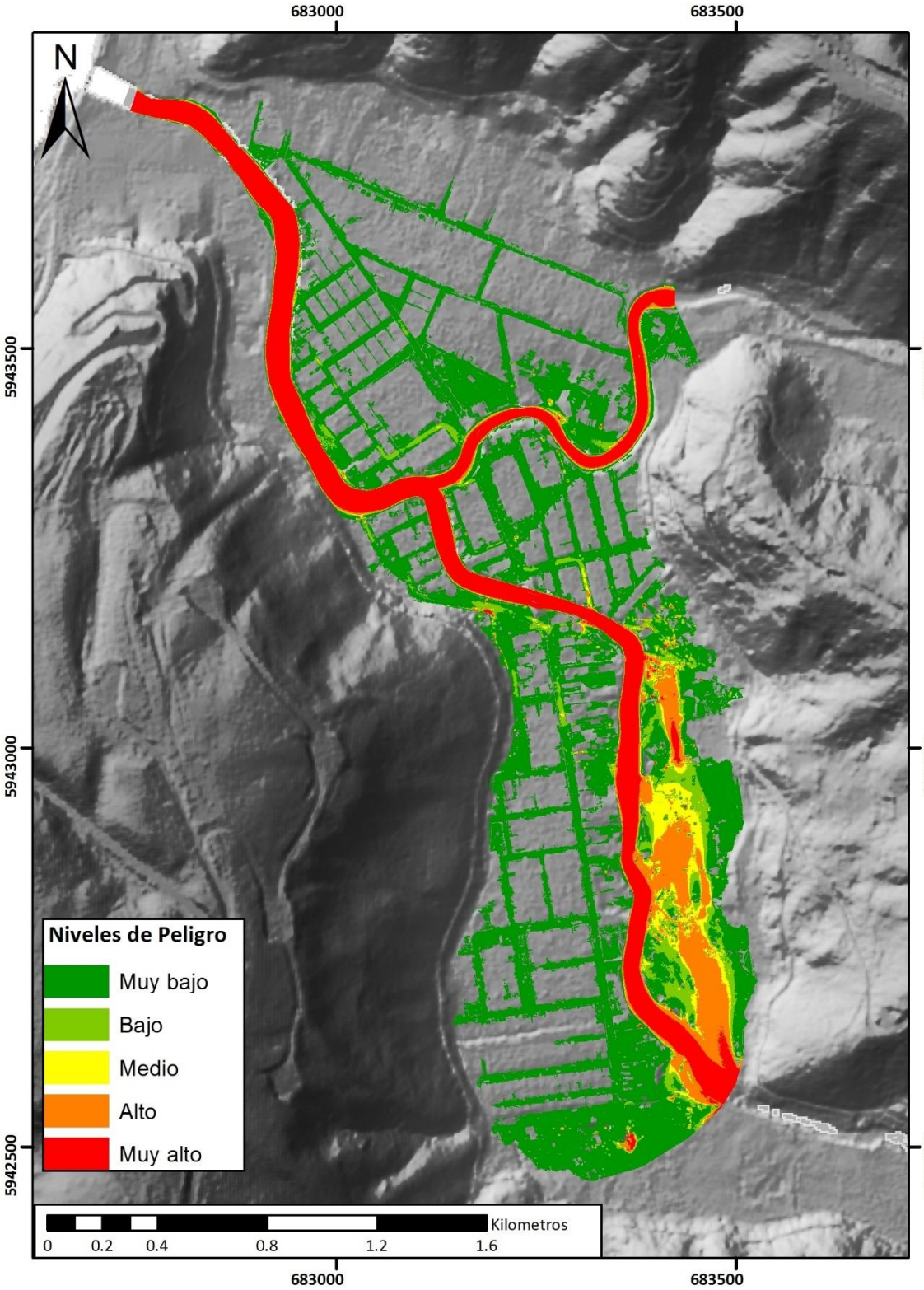


FIG.4.4. *Mapa de peligro asociado a inundaciones fluviales para un periodo de retorno de 50 años en pleamar.*

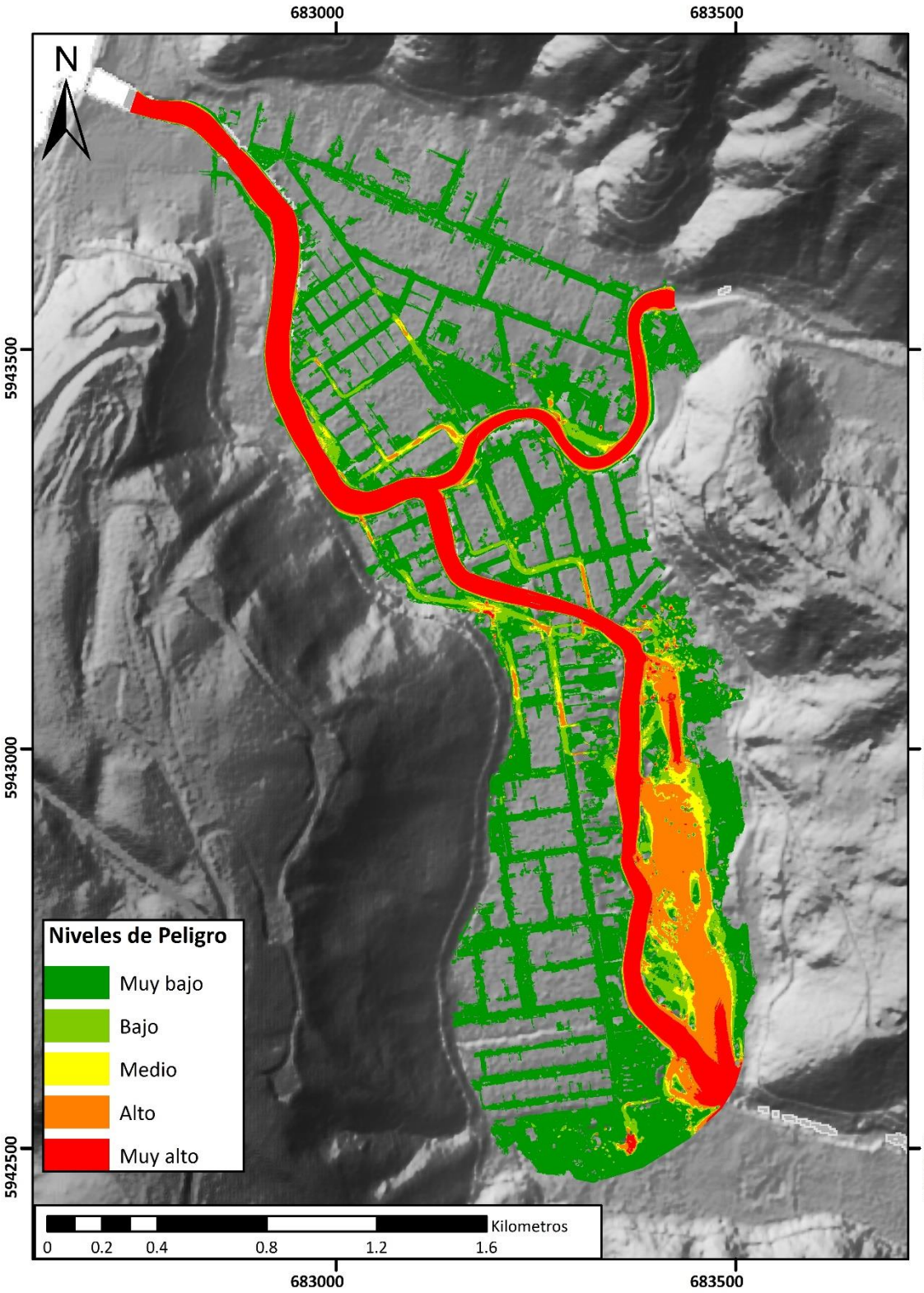


FIG.4.5. *Mapa de peligro asociado a inundaciones fluviales para un periodo de retorno de 100 años en pleamar.*

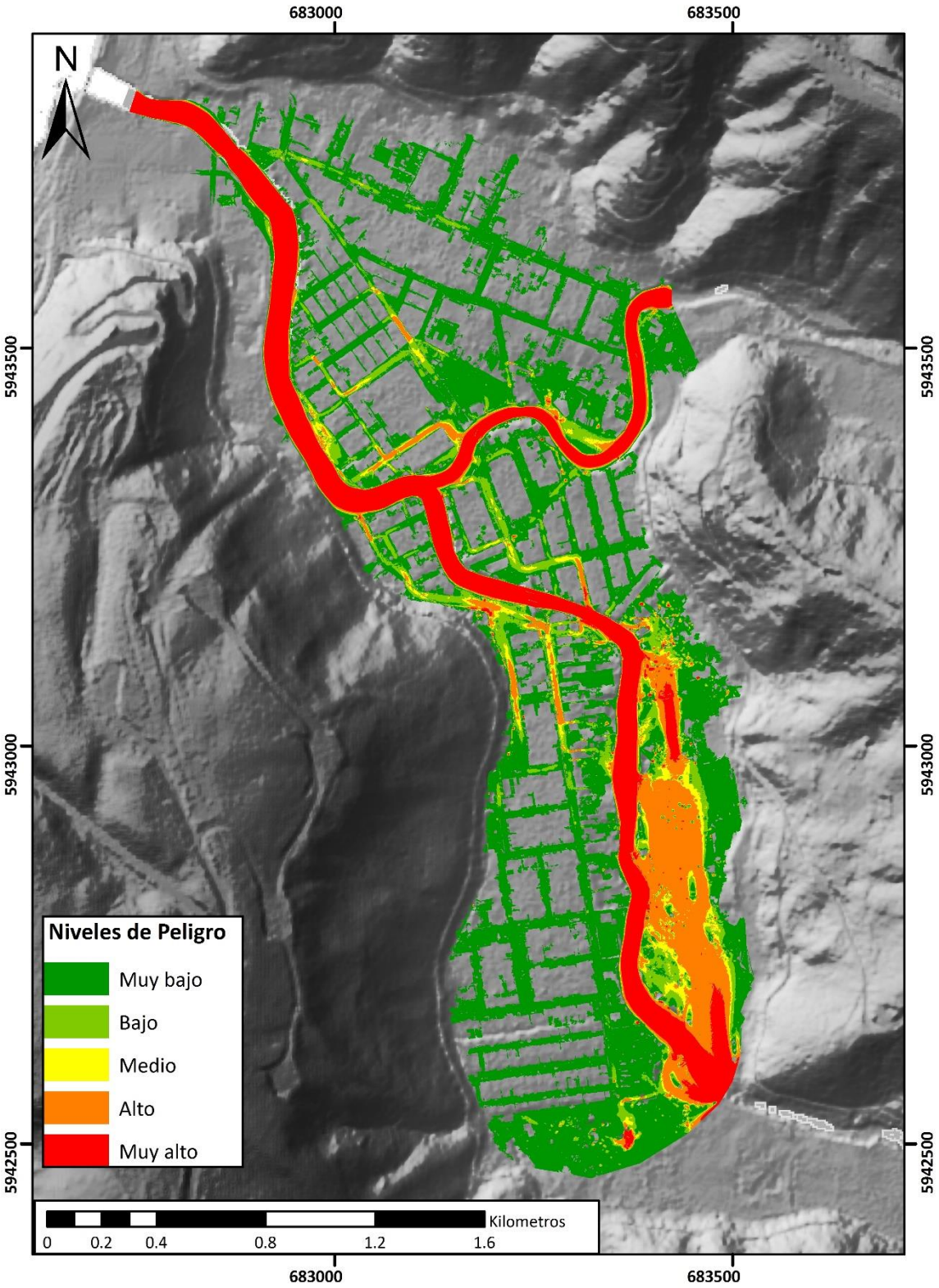


FIG.4.6. *Mapa de peligro asociado a inundaciones fluviales para un periodo de retorno de 150 años en pleamar.*

Variación en la cartografía de peligro

La variación de las áreas cartográficas de los distintos niveles de peligro se encuentra en la tabla 4.1. La figura 4.7 muestra que en todos los casos un aumento en la marea genera un incremento del área total expuesta a peligro. Dicha elevación del mar genera también un incremento de todos los niveles de peligro con excepción de los 100 años de periodo de retorno, donde hay una disminución del peligro muy alto.

Tabla 4.1
Áreas cartográfica de los niveles de peligrosidad

Periodo de retorno	Condición de marea	Muy bajo (ha)	Bajo (ha)	Medio (ha)	Alto (ha)	Muy alto (ha)	Superficie total (ha)
50	Bajamar	11.29	1.66	0.58	1.26	4.97	19.77
50	Pleamar	15.26	1.73	0.92	2.11	5.02	25.04
100	Bajamar	14.40	1.81	0.74	1.72	5.44	24.11
100	Pleamar	16.18	2.22	0.89	2.87	5.38	27.54
150	Bajamar	15.63	1.79	0.82	2.71	5.47	26.42
150	Pleamar	16.44	2.74	1.01	3.36	5.63	29.19

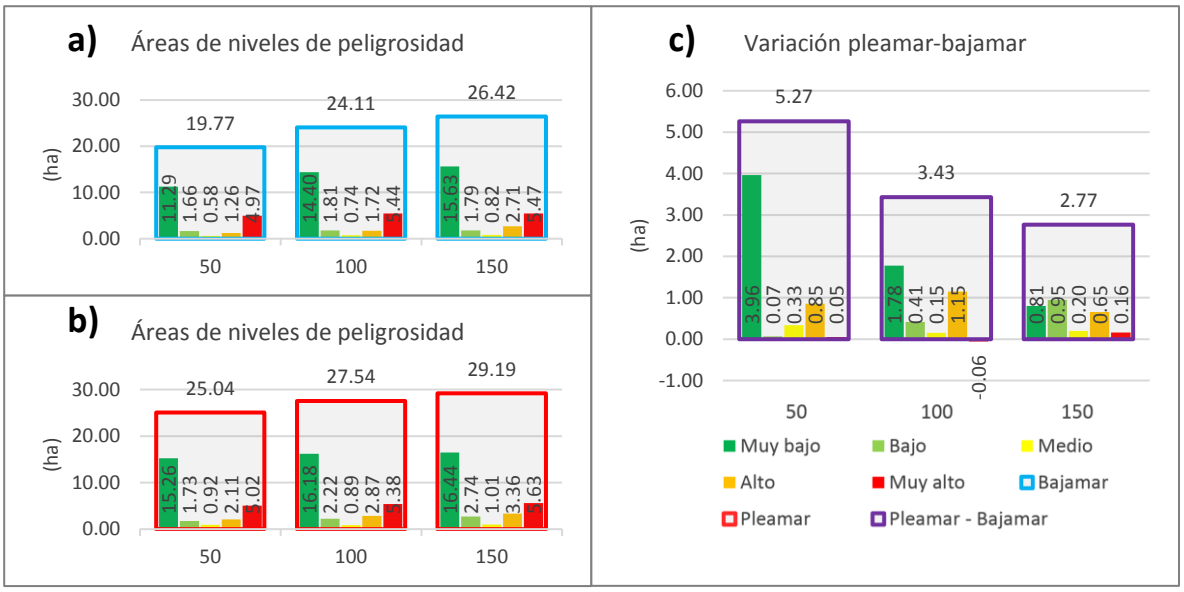


FIG.4.7. *Áreas cartográficas de los niveles de peligro (a) áreas cartográficas en bajamar (b) áreas cartográficas en pleamar (c) variación de las áreas cartográficas de pleamar respecto a bajamar.*

4.1.2. Vulnerabilidad y exposición

Los resultados de la zonificación de los distintos niveles de vulnerabilidad y exposición del sector urbano de Bellavista frente al peligro de inundaciones fluviales se muestran en la figura 4.8.

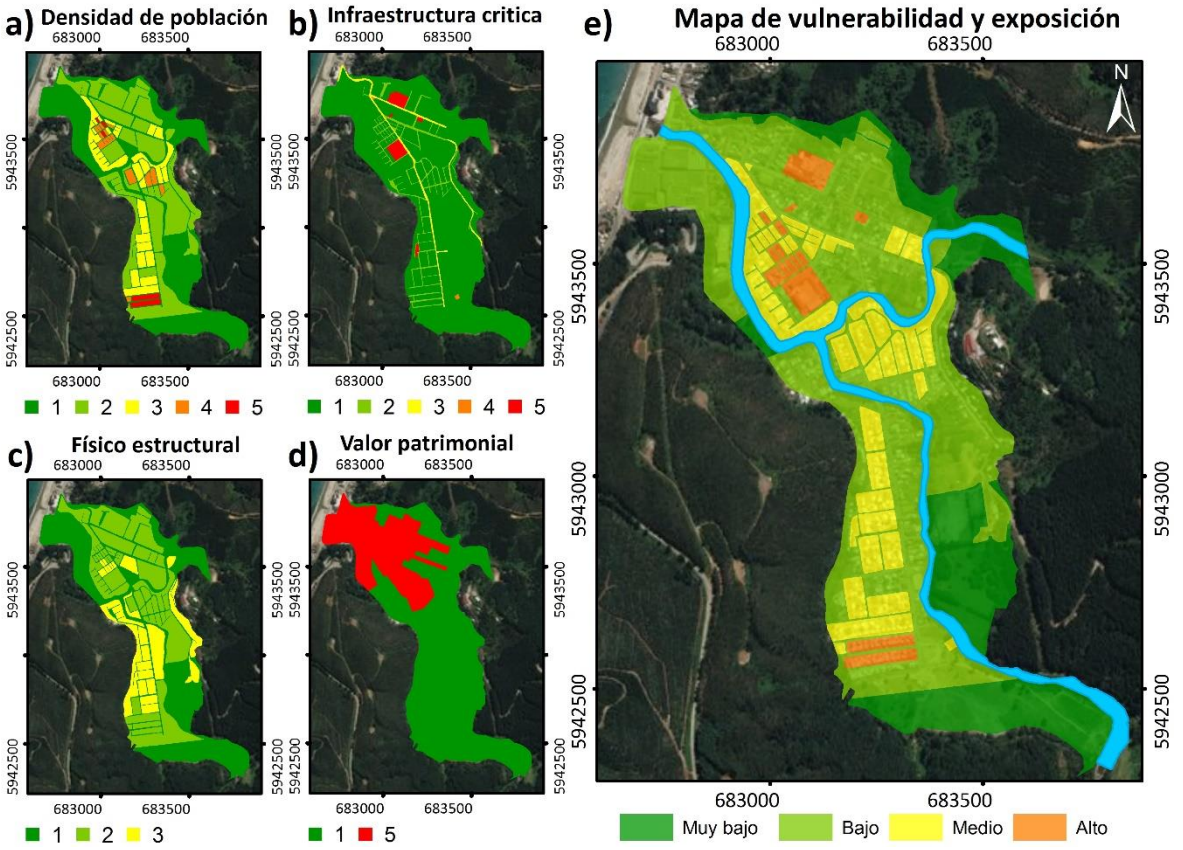


FIG 4.8. *Zonificación de los niveles de vulnerabilidad y exposición en base a múltiples criterios: (a) Densidad de población, (b) Infraestructura critica, (c) susceptibilidad físico estructural, (d) valor patrimonial. (e) Zonificación final de vulnerabilidad y exposición.*

4.1.3. Riesgo

Al igual que en las cartografías de peligrosidad los resultados de la zonificación de riesgo de inundaciones fluviales para el sector de Bellavista se muestran en seis figuras correspondientes a los seis posibles escenarios considerados (figura 4.9, figura 4.10, figura 4.11, figura 4.12, figura 4.13 y figura 4.14).

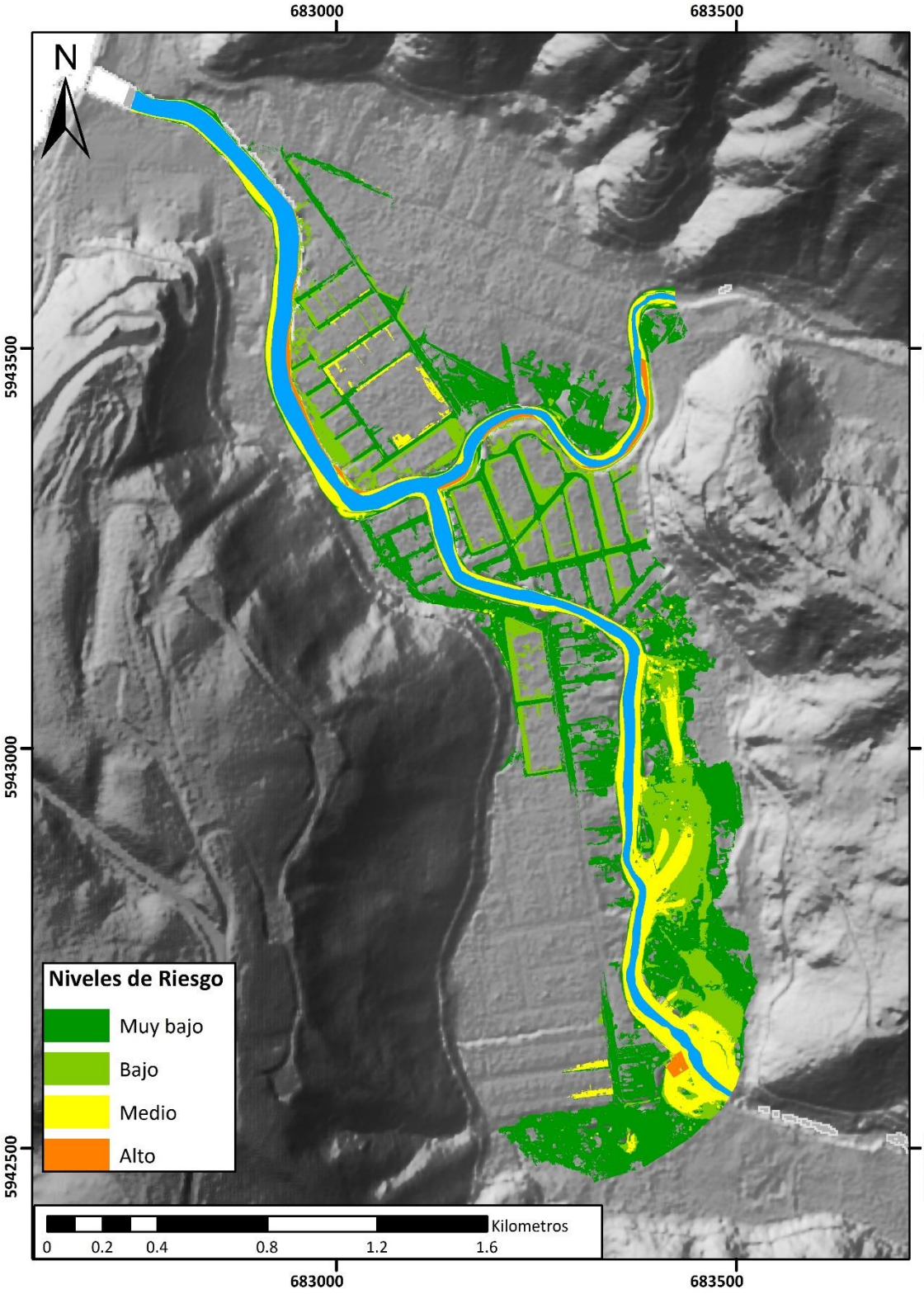


FIG.4.9. *Mapa de riesgo asociado a inundaciones fluviales para un periodo de retorno de 50 años en bajamar*

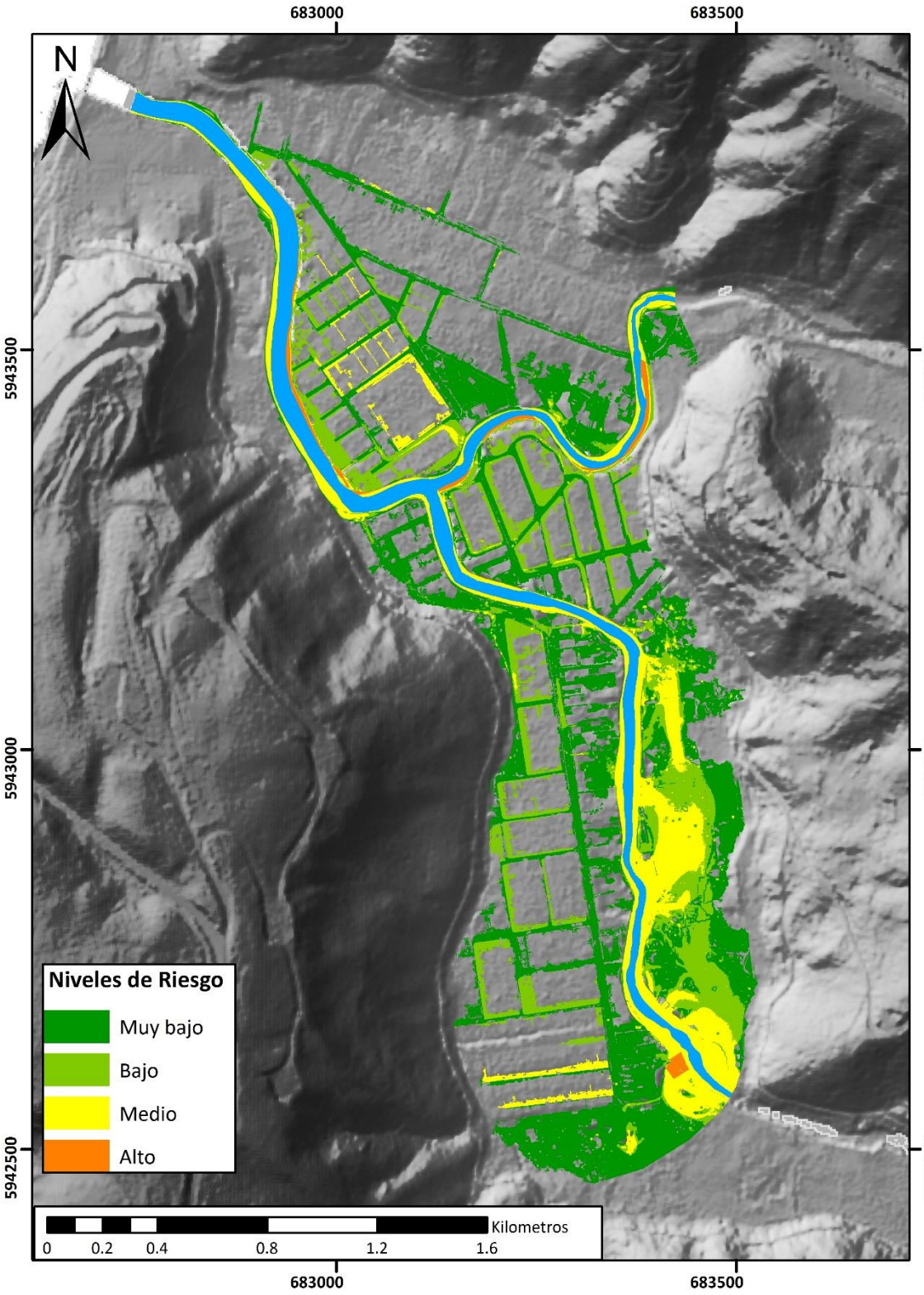


FIG.4.10. *Mapa de riesgo asociado a inundaciones fluviales para un periodo de retorno de 100 años en bajamar.*

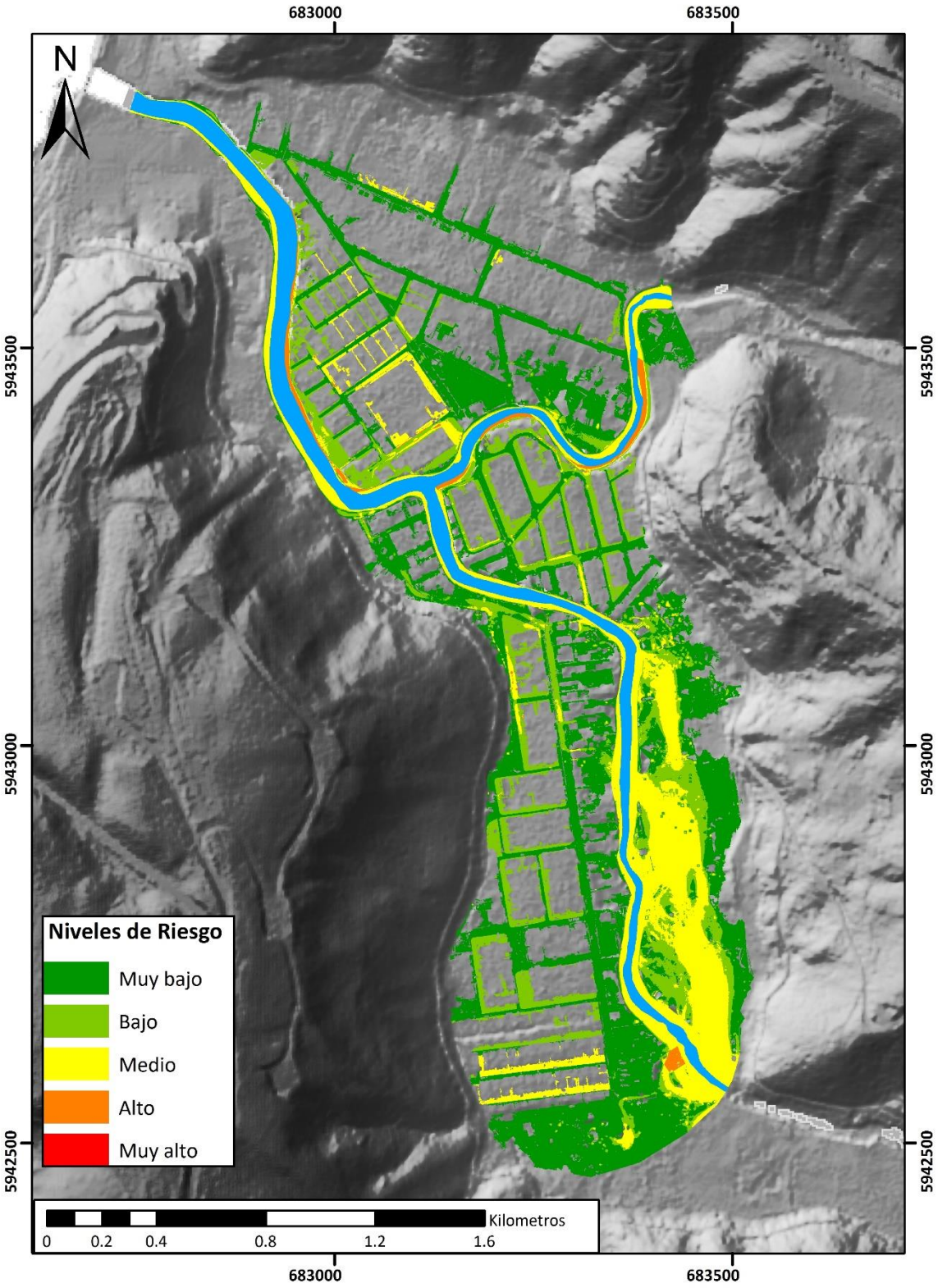


FIG.4.11. *Mapa de riesgo asociado a inundaciones fluviales para un periodo de retorno de 150 años en bajamar.*

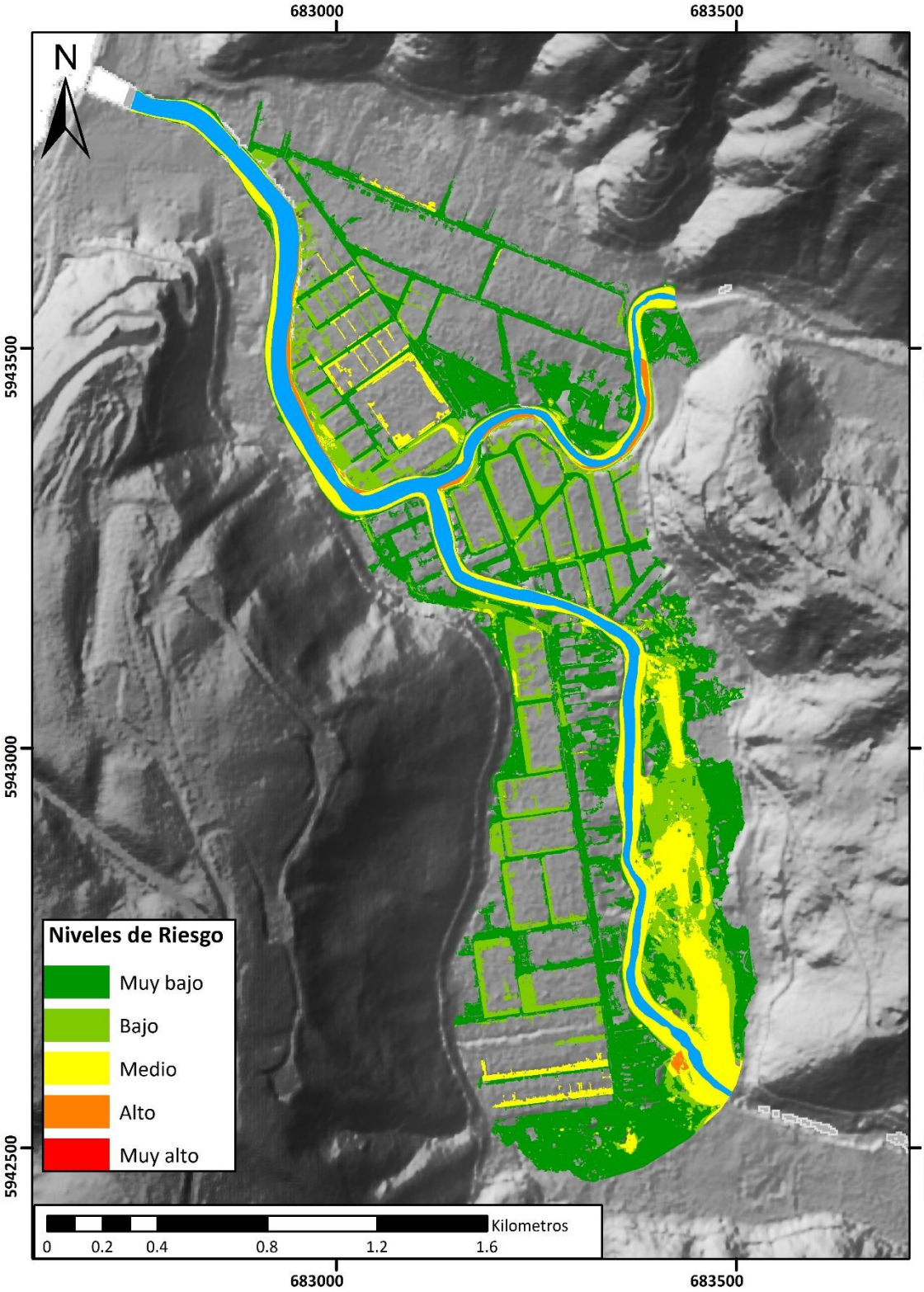


FIG.4.12. *Mapa de riesgo asociado a inundaciones fluviales para un periodo de retorno de 50 años en pleamar.*

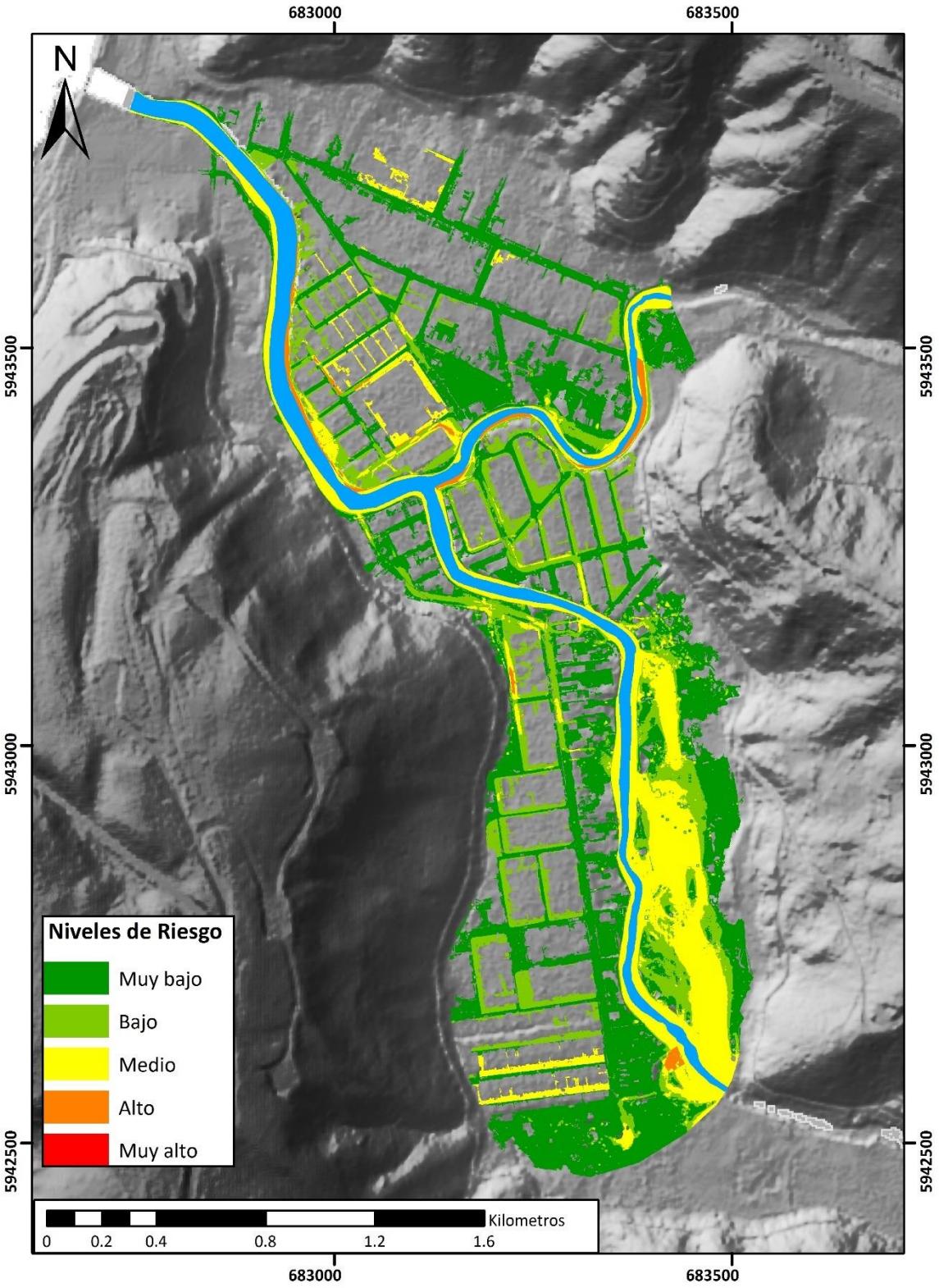


FIG.4.13. *Mapa de riesgo asociado a inundaciones fluviales para un periodo de retorno de 100 años en pleamar.*

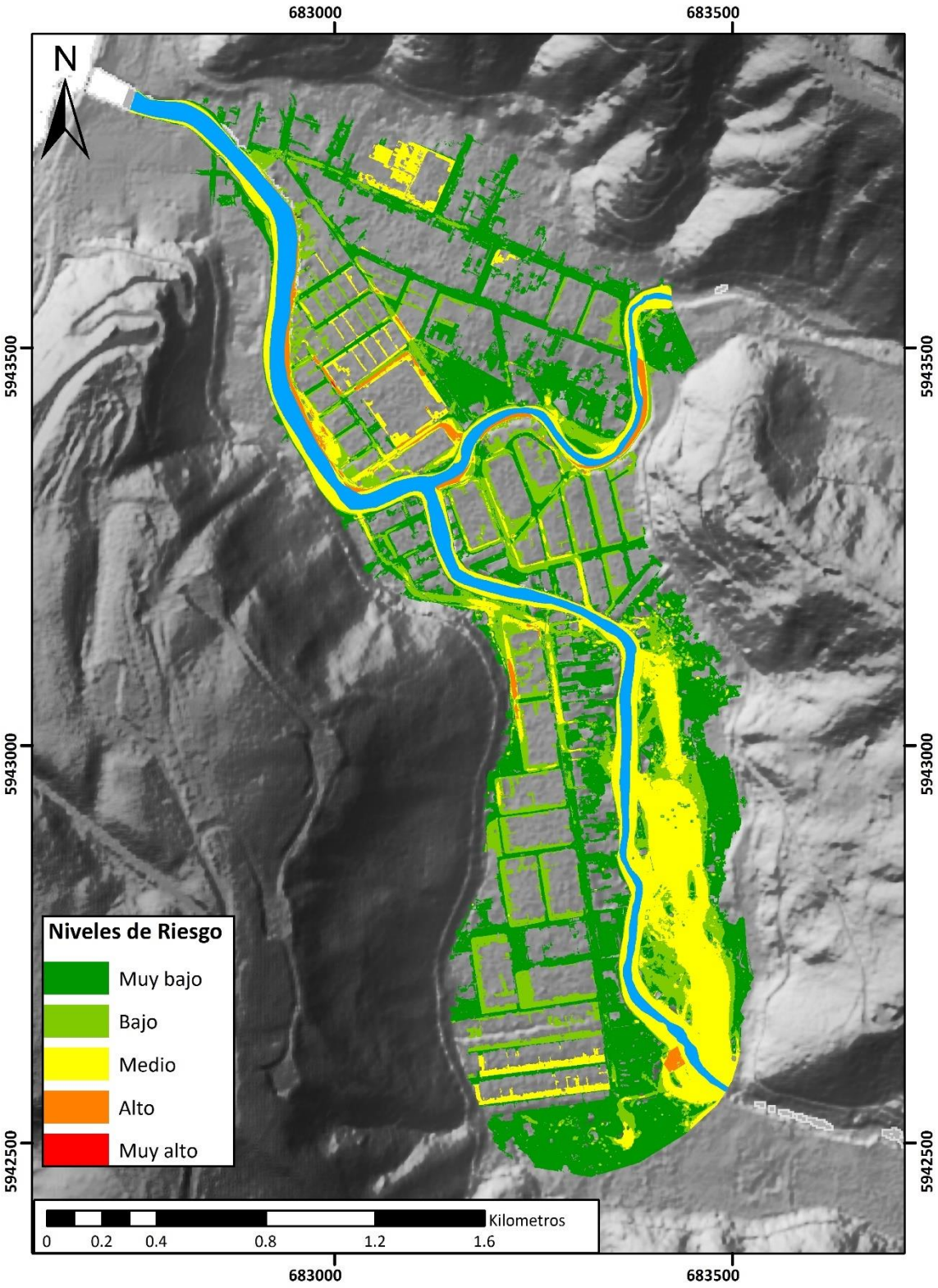


FIG.4.14. *Mapa de riesgo asociado a inundaciones fluviales para un periodo de retorno de 150 años en pleamar.*

Variación en la cartografía de riesgo

Las áreas cartográficas de los distintos niveles de riesgo en los seis escenarios considerados se encuentran en la tabla 4.2.

La figura 4.15 muestra que en todos los casos una elevación de la marea genera un amento en las áreas de los niveles de riesgo Muy bajo, Bajo, Medio y Alto, también genera un incremento del área total expuesta al riesgo. Los escenarios de 50 años de periodo de retorno en bajamar y de 100 años de periodo de retorno en bajamar no presentan áreas con niveles de riesgo Muy alto, el resto de los escenarios muestran áreas mínimas con nivel de riesgo Muy Alto.

Tabla 4.2
Áreas cartográfica de los niveles de riesgo

Periodo de retorno	Condición de marea	Muy bajo (ha)	Bajo (ha)	Medio (ha)	Alto (ha)	Muy alto (ha)	Superficie total (ha)
50	Bajamar	9.27	3.97	6.12	0.42	0.00	19.77
50	Pleamar	11.87	5.26	7.48	0.43	1.35×10^{-5}	25.04
100	Bajamar	11.18	5.13	7.35	0.45	0.00	24.11
100	Pleamar	12.48	5.63	8.90	0.54	3.56×10^{-4}	27.54
150	Bajamar	12.02	5.28	8.62	0.49	1.25×10^{-5}	26.42
150	Pleamar	12.56	6.10	9.84	0.68	1.61×10^{-3}	29.19

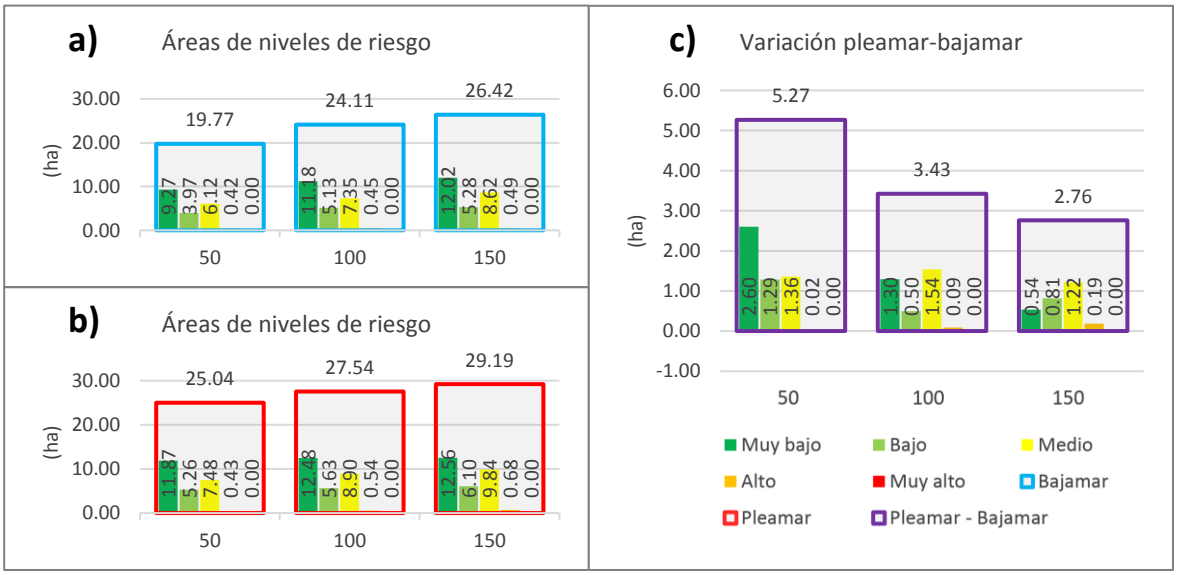


FIG.4.15. *Áreas cartográficas de los niveles de riesgo (a) áreas cartográficas en bajamar (b) áreas cartográficas en pleamar (c) variación de las áreas cartográficas de pleamar respecto a bajamar.*

4.2. Variación de parámetros físicos de inundación

Los valores de los parámetros físicos de las inundaciones se muestran en la tabla 4.3. En la figura 4.16, se grafica como varían los parámetros analizados. La figura 4.16 muestra que la altura del espejo de agua y la superficie de inundación son directamente proporcionales al aumento de los años de periodo de retorno y al aumento del nivel del

mar, por el contrario, la velocidad del flujo de agua es inversamente proporcional a los años de periodo de retorno y al incremento del nivel del mar.

Tabla 4.3

Parámetros físicos de inundación

Periodo de retorno	Condición de marea	VFA [a] máxima (m/s)	VFA [a] media (m/s)	AEA [b] máxima (m)	AEA [b] media (m)	Área inundada (ha)	Caudal (m^3/s)
50	Bajamar	3.29	0.69	4.95	1.35	19.77	167.9
50	Pleamar	2.83	0.48	5.24	1.37	25.04	167.9
100	Bajamar	3.56	0.66	5.24	1.35	24.11	193.7
100	Pleamar	3.07	0.49	5.47	1.48	27.54	193.7
150	Bajamar	3.36	0.56	5.4	1.43	26.42	212.4
150	Pleamar	3	0.5	5.62	1.55	29.19	212.4

[a] VFA Velocidad del flujo de agua. [b] AEA Altura del espejo de agua



FIG.4.16. *Gráficos de variación de los parámetros físicos de las inundaciones.*

En los anexos 4, 5 y 6 se muestra como varia espacialmente la velocidad de flujo del agua, la profundidad del agua y vh (producto entre la velocidad de flujo y la profundidad del agua) comparando los distintos escenarios de inundación.

En el anexo 4 se muestra que al aumentar los años de periodo de retorno y al incrementar el nivel de la marea la velocidad del flujo de agua muestra variaciones negativas y positivas. Las variaciones negativas se concentran en el cauce del río y variaciones positivas se concentran en las áreas más distales de la superficie inundada.

En el anexo 5 se muestra que la profundidad de agua siempre muestra variaciones positivas al aumentar los años de periodo de retorno y al elevar el nivel de la marea.

En el anexo 6 se muestra como varia vh. Las variaciones positivas ocurren cuando hay aumento en la velocidad de flujo y en la profundidad de agua. Por otro lado, las variaciones negativas de vh se producen cuando hay una disminución de la velocidad de flujo y un aumento no proporcional de la profundidad del agua en el mismo punto.

4.3. Marea

4.3.1. Correlación entre altura limnigráfica y marea

En la figura 4.17 se muestran las series de datos horarias de altura limnigráfica del estero en naranja y del nivel de la marea en azul. La línea segmentada roja representa el nivel medio del mar que se calculó a partir del promedio de los datos de marea (1.05 metros), este señala el límite entre la condición de bajamar y la condición de pleamar.

La interpretación de los valores de correlación obtenidos se basa en la tabla 4.4

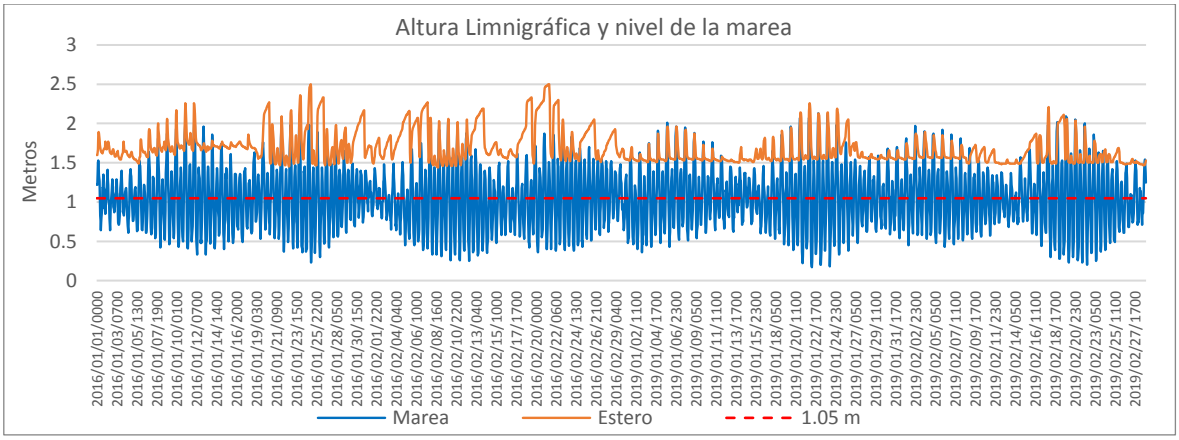


FIG 4.17. *Variaciones de altura de la marea y altura limnigráfica del estero para un periodo de 118 días*.

Tabla 4.4

Fuerza y dirección del coeficiente de correlación lineal

Valor	Correlación lineal
-1,00 a -0,76	Negativa perfecta
-0,75 a -0,51	Negativa fuerte
-0,50 a -0,26	Negativa moderada
-0,25 a -0,00	Negativa débil
0.00	Nula
0,00 a 0,25	Positiva débil
0,26 a 0,50	Positiva moderada
0,51 a 0,75	Positiva fuerte
0,76 a 1,00	Positiva perfecta

Modificado de Lind, Marchal & Wathen, 2005.

En la figura 4.18 se grafica la correlación para una condición de bajamar, en este caso la correlación es negativa débil (r = -0.0615). Para la condición pleamar la correlación es positiva moderada (r = 0.3573) tal como lo muestra en el gráfico de dispersión de la figura 4.19.

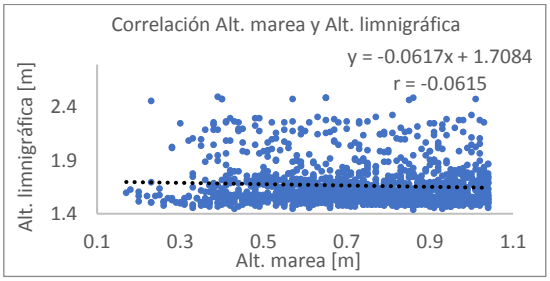


FIG.4.18. *Coeficiente de correlación entre las alturas de marea y altura limnigráfica en condición de bajamar.*

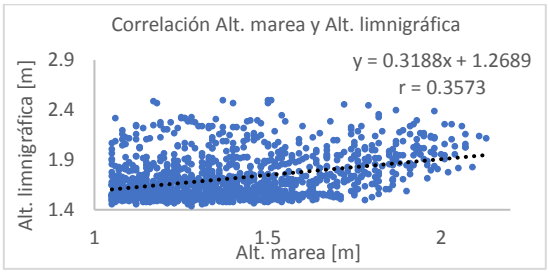


FIG.4.19. *Coeficiente de correlación entre las alturas de marea y altura limnigráfica en condición de pleamar.*

4.3.1. Conductividad eléctrica

Para el análisis de conductividad se realizaron mediciones en distintos puntos a lo largo del estero, la ubicación de dichos puntos se representa en la figura 4.20, los correspondientes valores de conductividad obtenidos se encuentran en la tabla 4.5, dichos valores variaron de 48.8 a 28300 µS/cm, también se realizaron mediciones en el mar a 100 metros de la desembocadura del estero obteniendo un valor promedio de 33000 µS/cm para el agua de mar.

En la figura 4.20 se observa como los valores de conductividad presentan una tendencia decreciente alcanzando valores máximos en áreas cercanas a la costa (punto T1P1 a 58 metros del mar) que disminuyen haciéndose prácticamente constantes desde los puntos T2P1 (950 metros del mar) y T3P1(1050 metros del mar) hacia aguas arriba.

Los mayores valores de conductividad medidos en el estero Bellavista se alcanzaron siempre durante horas de pleamar en punto de control T1P1. El máximo valor alcanzado en la primera campaña de muestreo fue de 7330 µS/cm y se obtuvo durante la segunda pleamar del 01 de agosto (figura 4.21). En la segunda campaña de muestreo el mayor valor obtenido fue de 25200 µS/cm y se obtuvo durante la pleamar del 01 de septiembre (figura 4.22). En la tercera campaña de muestreo se registró un valor máximo de conductividad de 28300 µS/cm durante la pleamar del 29 de septiembre (figura 4.23).

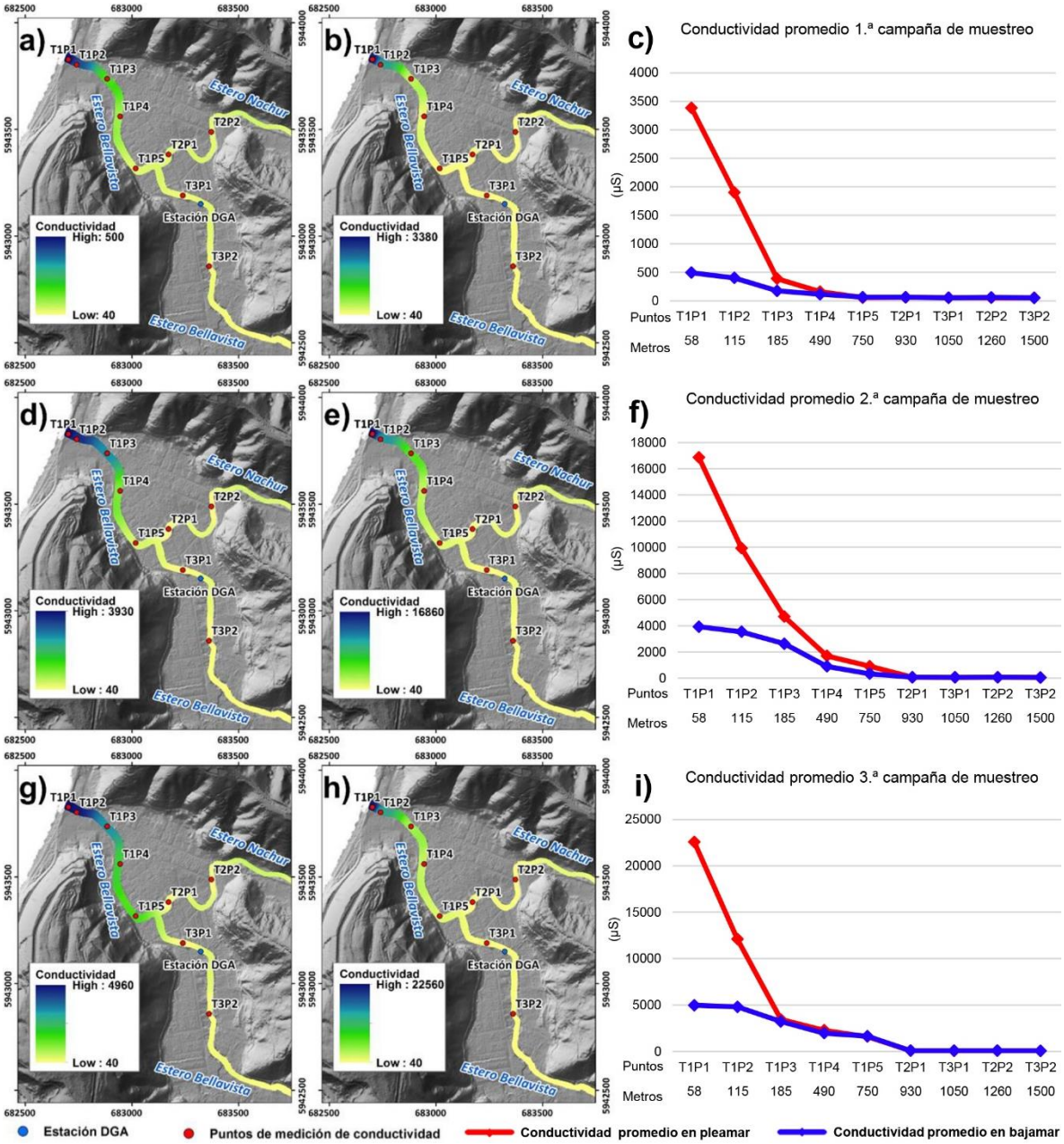


FIG.4.20. *Conductividad 1.ª campaña de muestreo del 31 de julio a 2 de agosto (a) valores en bajamar, (b) valores en pleamar (c) valor promedio en los distintos puntos de control. Conductividad 2.ª campaña de muestreo 31 de agosto a 1 de septiembre (d) valores en bajamar y (e) valores en pleamar (f) valor promedio en los distintos puntos de control. Conductividad 3.ª Campaña de muestreo de 28 de septiembre a 30 de septiembre (g) valores en bajamar (h) valores en pleamar (i) valor promedio en los distintos puntos de control.*

Tabla 4.5

Valores de conductividad (µS/cm)

Punto	Coordenadas		31-07-2019		01-08-2019		02-08-2019		30-08-2019		31-08-2019		01-09-2019		29-09-2019		30-09-2019	
	Norte	Este	P [a]	B [b]	P [a]	B [b]	P [a]	B [b]	P [a]	B [b]	P [a]	B [b]	P [a]	B [b]	P [a]	B [b]	P [a]	B [b]
T1P1	5943828	682702	464	122.8	7330	109.7	2350	1252	3290	1415	22100	4850	25200	5520	16830	5300	28300	4630
T1P2	5943803	682740	215	106	3030	106.1	2460	996	3020	1202	7890	4370	18850	5070	11120	4820	13060	4770
T1P3	5943737	682883	87.7	77.2	123.6	85	957	371	2100	512	4510	3800	7510	3600	3750	3580	3150	2870
T1P4	5943561	682944	57.1	80.7	56.3	77.5	378	194.6	1205	226	1590	940	2310	1541	2620	2130	1919	1808
T1P5	5943317	683017	56.8	66.1	55.1	65.4	59.3	67.6	220	72.4	798	768	1714	184	2050	1390	1153	1879
T2P1	5943382	683171	60.7	66.8	59.8	65.6	62.8	68.8	78.6	73.2	70.4	80.5	86.8	78.6	78.8	74.6	80.7	79.4
T3P1	5943190	683238	60.2	56.6	58.7	53.9	52.2	56.6	61.5	60.1	58.2	61.5	61.1	62.8	77.9	70.2	77.2	71.5
T2P2	5943488	683372	50.2	61.9	49.3	60.7	62.2	62.3	67.1	70.9	68.9	70.01	75.8	68.2	67.8	67.8	65.7	69.8
T3P2	5942858	683361	58.3	53.2	57.1	49.8	49.5	55.2	55.2	56.9	56.2	58.7	48.8	56.6	64.2	62.7	63.4	62.4

[a] Pleamar. [b] Bajamar

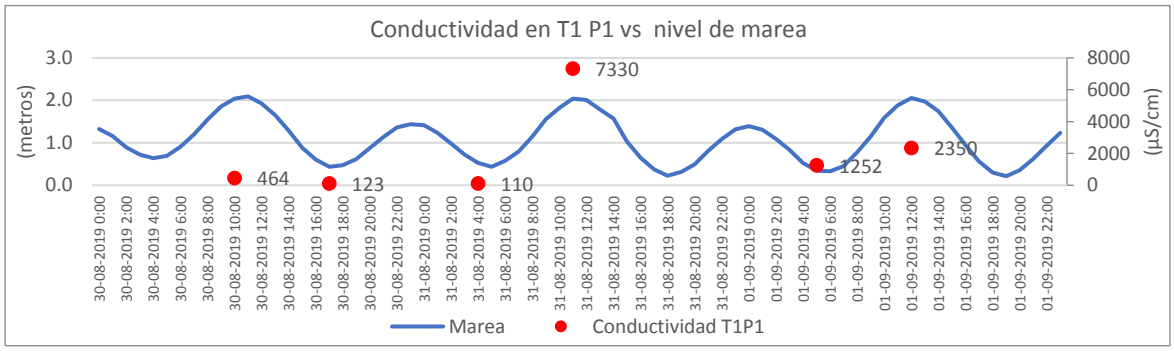


FIG.4.21. *Valores de conductividad medidas en T1P1 en 1.ª campaña de muestreo.*

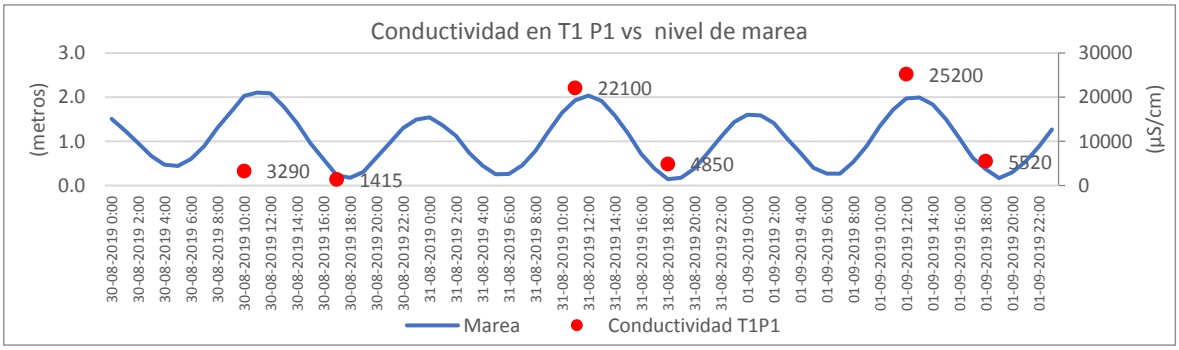


FIG.4.22. *Valores de conductividad medidas en T1P1 durante 2.ª campaña de muestreo.*

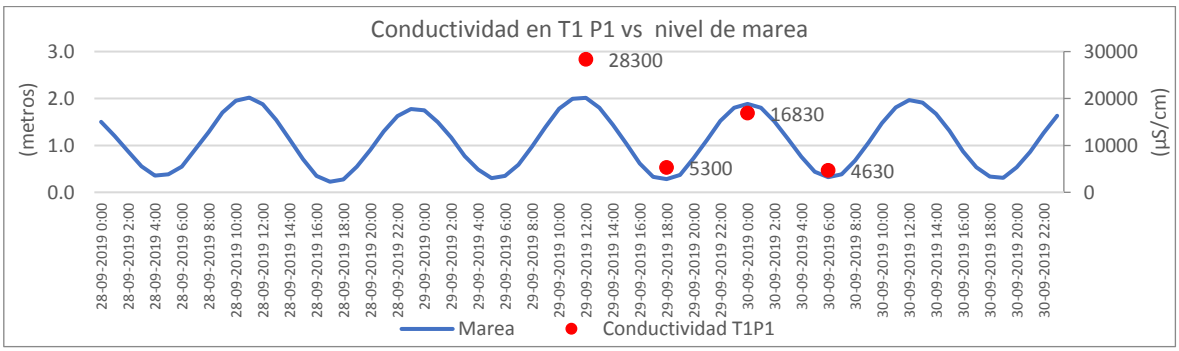


FIG.4.23. *Valores de conductividad medidas en T1P1 durante la 3.ª campaña de muestreo.*

4.4 Representación de la información

La aplicación creada con Web App Builder de ArcGIS da acceso a las cartografías que muestran la distribución espacial de los niveles de peligro, riesgo, vulnerabilidad y exposición en los seis escenarios considerados.



FIG.4.24. *Código QR de aplicación web "Inundaciones estero Bellavista".*

5. Discusión

5.1. Peligrosidad

A partir de los resultados del modelo hidráulico (Alarcón et al., 2009) se evidencia que en las condiciones actuales es posible que se produzcan desbordes del estero Bellavista por la ocurrencia de crecidas, en consecuencia, el sector de Bellavista está expuesto al peligro de una inundación fluvial, lo anterior es consistente con lo ya señalado por MOP (2008), Puentes (2014) y Parra (2019).

En lo referente a las cartografías de peligrosidad la principal diferencia del presente estudio con Puentes (2014) y Parra (2019) radica en la metodología utilizada para definir los niveles de peligro. En el estudio de Puentes (2014) se elaboraron mapas donde los niveles de peligro se definen en función de la probabilidad de ocurrencia, en el estudio de Parra (2019) se utilizaron dos presentaciones para los mapas de peligrosidad; primero en rangos de profundidad alcanzada por el agua y en segundo lugar de acuerdo rangos del producto entre la velocidad y la profundidad del agua. A diferencia de los dos estudios anteriores en este estudio se optó por elaborar mapas de peligro individuales para cada periodo de retorno en dos condiciones de marea (bajamar y pleamar) y los niveles de peligrosidad se definieron considerando tanto la velocidad de flujo de agua como la altura de la columna de agua.

Al comparar los escenarios considerados se evidencio que el incremento de los años de periodo de retorno y la elevación del nivel del mar generan inundaciones de mayor magnitud que representan mayor peligro a nivel general, pero simultáneamente en ciertos sectores disminuyen la velocidad del flujo de agua lo que implica una disminución

del peligro en esas áreas. Esto evidencia la importancia de tener mapas de peligro individuales para múltiples escenarios posibles. Sin embargo, el tener múltiples cartografías de peligro puede resultar más complejo para la interpretación de la información cuando se utiliza como referencia por ejemplo para el ordenamiento territorial.

De lo anterior se plantea y analiza la pregunta: ¿qué metodología proporciona resultados de mayor utilidad en este tipo de estudios?

Con respecto a la excepción mencionada en el apartado "variación de las cartografías de peligro" existe una diferencia negativa del área total expuesta a un nivel de peligro Muy alto que muestra la comparación entre los estados de inundación de 100 años de periodo de retorno al pasar de bajamar a pleamar. Esto se debe a que dicha comparación entre dos estados de inundación es la que presenta mayor área de variación negativa de vh (anexo 6) que coinciden espacialmente con las áreas de nivel de peligro Muy alto.

5.2. Vulnerabilidad y exposición

La metodología utilizada en la valoración de vulnerabilidad y exposición en este trabajo es similar a la metodología del estudio realizado por Sarricolea (2004) orientado a la medición de niveles de vulnerabilidad y amenazas naturales en la ciudad de Coquimbo, Chile. Ambos análisis coinciden en la medición de parámetros como densidad de población, infraestructura crítica y material de construcción de viviendas, sin embargo, también existen contraste entre ellas. Por ejemplo, Sarricolea (2004) plantea un enfoque socioeconómico de la vulnerabilidad con lo cual incorpora parámetros como nivel socioeconómico y nivel de accesibilidad vial, a diferencia del presente estudio que, por ejemplo, incorpora zonas de patrimonio nacional.

En cuanto a la utilización de parámetros socioeconómicos en la valoración de la vulnerabilidad, Orellana (2016), en su estudio de análisis de exposición y gestión de riesgo en zonas de expansión urbana frente a la amenaza de inundación y anegamiento en la ciudad de Puerto Montt, también expone la necesidad de plantear aspectos sociales como en nivel educacional, tipo de cultura, características ideológicas y económicas como valor de infraestructuras, niveles de pobreza, distribución de la riqueza, tenencia de tierra entre otros. A pesar de lo anteriormente mencionado, el autor realiza el análisis de vulnerabilidad y exposición con proyecciones matemáticas debido a la inexistencia de información socioeconómica espacial, lo cual evidencia la carencia de este tipo de datos a diferentes niveles de estudio.

Durante el proceso de recopilación de datos usados en el análisis multicriterio del presente estudio se evidencio la ausencia de datos relevantes para determinar la vulnerabilidad y exposición frente a inundaciones, tales como el número de pisos o la valoración económica de las edificaciones. El no contar con la información antes señalada conlleva a sesgos ligados a la posible subestimación o sobrestimación del nivel real de vulnerabilidad y exposición de la población bajo el riesgo de inundación.

De esta forma se recomienda al municipio o la entidad encargada crear y mantener una base de datos actualizada de capas con información específica de cada edificación, así la valoración de vulnerabilidad y exposición podría considerar una cantidad mayor de criterios y tener resultados más precisos incluso para diferentes tipos de enfoques según sea requerido.

5.3. Marea

Las variaciones de altura limnigráfica, conductividad y parámetros físicos de inundación (altura, velocidad y superficie) con respecto a la marea indican que el comportamiento hidráulico del estero Bellavista se ve condicionado por las variaciones del nivel del mar en la desembocadura lo cual concuerda con lo ya señalado por MOP (2008), Puentes (2014) y Parra (2019).

5.3.1. Correlación altura limnigráfica

Los valores de correlación entre la altura limnigráfica del estero y el nivel de la marea fueron de -0.0615 durante las horas de bajamar y de 0.3573 durante la pleamar. Esta importante diferencia podría deberse a que la marea forma una condición de borde en la desembocadura del estero que ejerce un control diferencial sobre la altura limnigráfica entre la bajamar y la pleamar.

El valor de correlación durante las horas de bajamar indica un grado de asociación lineal casi nulo. Esto demuestra que mientras la marea se mantiene bajo el nivel medio del mar no ejerce influencia sobre el comportamiento hidráulico del estero.

El valor de correlación positivo en la condición de pleamar refleja una influencia de la marea sobre la dinámica de flujo del estero. Esto se debe a que la marea restringe la circulación de agua desde el estero hacia el mar en la desembocadura. A partir de este punto se producen sobreelevaciones en la altura limnigráfica que variación de forma conjunta con el nivel del mar y esto se refleja en un valor de correlación lineal positivo de 0.3573.

5.3.2. Conductividad eléctrica

Los resultados del análisis de conductividad eléctrica (µS/cm) muestran que el agua del mar entra físicamente en el estero hasta 1km aguas arriba de la desembocadura donde además los mayores niveles de marea coinciden con mayores valores de conductividad eléctrica.

Existe una importante variación entre los valores máximos de conductividad eléctrica medidos en cada campaña de muestreo. Considerando las diferencias entre la altura limnigráfica del estero y los niveles de marea en el momento que se realizaron estas mediciones (anexo 7) se infiere que dichas variaciones se deben a un menor flujo de agua en el estero qué coincidía con niveles más altos de marea lo cual facilito la intrusión de mayores volúmenes de agua de mar desde la desembocadura.

5.4. Relación entre la acción antrópica y las inundaciones

Desde el año 1900 hasta la actualidad se han realizado una serie de modificaciones en la desembocadura del estero Bellavista y sus terrenos aledaños.

Descripciones de calicatas (anexo 8) y sondajes (anexo 9) realizados para distintos estudios geotécnicos en esta área muestran importantes espesores de relleno artificial (hasta 3 metros de espesor) sobre depósitos fluviales y niveles de areniscas. También, el registro fotográfico del Museo Histórico de Tomé (anexo 10) evidencia una serie de cambios en la configuración geomorfológica de la desembocadura desde el año 1900, entre las que destaca la existencia de un área de inundación localizada en lo que en la actualidad corresponde a áreas urbanas con edificios residenciales.

Las evidencias muestran como la acción antrópica asociada al relleno artificial de terrenos con fines de urbanización ha modificado la geomorfología en la desembocadura, esto a su vez podría haber alterado la dinámica fluvial del estero. Con base en lo anterior, se considera como una posibilidad que las inundaciones en el área de estudio sean en parte consecuencia de la acción antrópica.

5.5. Representación de la información

La aplicación web creada mediante la herramienta Web App Builder (WAB) de ArcGIS da acceso a las capas obtenidas en las valoraciones de peligro, riesgo, vulnerabilidad y exposición frente a inundaciones fluviales en el área de estudio. La configuración y el diseño de esta aplicación se enfocó en crear una interfaz intuitiva para facilitar la visualización dichas capas según sea requerido. Sin embargo, no ha sido evaluada la interacción de usuarios con la aplicación,

por lo que sería ideal realizar pruebas en las que se valore la usabilidad del producto.

6. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en el presente estudio se concluye que el sector de Bellavista se encuentra expuesto a peligro de inundación fluvial lo que implica un riesgo para sus habitantes. Los niveles de peligro y de riesgo, así como la distribución de estos muestra una fuerte dependencia de las condiciones de marea en la desembocadura.

El incremento en los años de periodo de retorno y la elevación del nivel del mar generan inundaciones de mayor magnitud que representan mayor peligro a nivel general, pero en ciertos sectores disminuyen la velocidad del flujo del agua lo que implica una disminución del peligro a nivel local.

Para los criterios considerados en este estudio no existen zonas en el sector urbano de Bellavista que se califiquen con una vulnerabilidad muy alta frente al peligro de inundación fluvial.

En todos los escenarios considerados (50, 100 y 150 años de periodo de retorno en ambas condiciones de marea) el agua alcanza los sectores urbanos con nivel de vulnerabilidad Alto. Entre estos, el escenario más probable es el de 50 años de periodo de retorno (2% de probabilidad de ocurrencia para un año cualquiera). Por lo tanto, se concluye que en las condiciones actuales la probabilidad de que ocurra una inundación donde el flujo de agua alcance los sectores más vulnerables es mayor o igual al 2% para un año cualquiera.

La correlación lineal entre la altura limnigráfica del estero y el nivel del mar muestra una fuerte dependencia de la marea, pasando de una correlación negativa de 0.06 en bajamar a una correlación positiva de 0.36 en pleamar.

De los análisis de conductividad se concluye que el agua de mar entra físicamente en el estero alterando su conductividad hasta los 1050 metros en el estero Bellavista y hasta 930 metros en el estero Nachur.

7.Referencias

Alarcón, S., Caamaño, D., & Villagrán, M. (2009). Caracterización de las inundaciones fluviales del sector Bellavista, comuna de Tomé. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Católica de la Santísima Concepción. pp 1-18.

Araya, I. (2000). Vulnerabilidad de la zona urbana de Concepción aledaña al río Andalién, en relación al riesgo por inundación. Proyecto de Título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Chile.

Biró, L. (1982). Revisión y redefinición de los Estratos de Quiriquina, Campaniano

Maastrichtiano, en su localidad tipo, en la Isla Quiriquina a 36°27’ Lat.Sur, Chile, Sudamérica, con su perfil complementario en Cocholgüe.- III Congreso Geológico Chileno. Vol. I. 29-64. Concepción.

Burón, P. (2003). Petrografía, Estructuras y Microtectónica del área de contacto entre las Series Metamórficas del Basamento Metamórfico entre los 38°08’ y 38°21’, Cordillera de Nahuelbuta, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): (144 pp). Concepción.

Castillo, I., & Garvi, M. G. (2006). Estadística descriptiva y cálculo de probabilidades. Madrid: Pearson educación S.A.

Chotin, P. (1969). Geología del área de Tomé. Revista Geoandes, Vol. 3: 1-56. Concepción.

Creixell, C. 2001. Petrología y Geotermobarometría de las Rocas Intrusivas de la Cordillera de la Costa entre los 36º30’ S y 38º00’ S. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inedito): 149pp. Concepción.

Erices, J. (2018). Estratigrafía e Icnología de los estratos de la Formación Quiriquina que afloran en el área costera de la Provincia de Concepción, Región del BioBío, Chile evolución ecosedimentaria del sustrato (Doctoral dissertation, Universidad de Concepción. Facultad de Educación).

Galli, C. (1967). Geología urbana y suelo de fundación de Concepción y Talcahuano, Chile. Informe final del proyecto de investigación Nº 75 de la Comisión de Investigación Científica de la Universidad de Concepción (Inédito): 248 p.

Hervé, F., Godoy, E.; Parada, M.A., Ramos, V., Rapela, C., Mpodozis, C., & Davidson, J. (1987). A general view on the Chilean-Argentine Andes, with emphasis on their early History - Circum Pacific orogenic belts and the evolution of the Pacific Ocean Basin. American Geophysical Union, Geodynamics. Series 18. 97- 114. Washington.

Hervé, F. (1977). Petrology of the Crystalline Basement of the Nahuelbuta Mountains, South Central Chile. Comparative studies on the geology of the Circum-Pacific Orogenic Belt in Japan and Chile. T. Ishikawa y L. Aguirre editores. Japan Society for the promotion of Science: 1-5 pp. Tokyo.

Kreibich, H., Piroth, K., Seifert, I., Maiwald, H., Kunert, U., Schwarz, J., Merz, B., & Thieken, A. H. (2009). Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling?. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1679–1692.

Lind, D. A., Marchal, W. G., & Wathen, S. A. 2010. Statistical techniques in business and economics, 14th edn. New York: McGraw-Hill.

Mardonez, D., Velásquez, R., Merino, R., & Bonilla, R. (2012). Caracterización y condiciones de metamorfismo de una nueva unidad dentro del paleozoico de la Cordillera de la Costa (Unidad Patagual–El Venado), Región de Biobío, Chile. In XIII Congreso Geológico Chileno, Antofagasta (pp. 365-367).

MOP-DOH (2008). Estudio de factibilidad y diseño definitivo mejoramiento estero Bellavista, comuna Tomé, Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas, Chile.

Orellana, N. (2016). Análisis de exposición y gestión de riesgo en zonas de expansión urbana frente a amenaza de inundación y anegamiento en la ciudad de Puerto Montt. Memoria para optar al título de Geógrafo. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile. Santiago.

Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental N° 16: 3 mapas en una hoja escala 1:20.000. Santiago.

Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J. L., & Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. Revista de Geografía Norte Grande, (57), 177-192.

Parra, I., Caamaño, D., Fuentes, P. (2019). Determinación zonas de inundación mediante herramienta bidimensional en estero Bellavista. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Católica de la Santísima Concepción. pp. 1-20.

Pineda, V. (1983). Evolución Pelaogeográfica de la Península de Arauco durante el Cretácico Superior-Terciario. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile (Inédito):(268 pp). Santiago.

Puentes, M. (2014). Zonas amenazadas por inundación del estero Bellavista en Tomé. Proyecto de Título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Chile.

Ramírez, P., Vivallos, J., Cáceres, D. & Fonseca, A. (2012). Microzonificación sísmica de la ciudad de San Pedro de la Paz, Región del Biobío. Servicio Nacional de Geología y

Rojas, O. (2015). Cambios ambientales y dinámica de inundaciones fluviales en una cuenca costera del centro sur de Chile (Doctoral dissertation, Universidad de Concepción, Centro de Ciencias Ambientales EULA - Chile).

Sarricolea, P. (2004) Niveles de vulnerabilidad a amenazas naturales en una ciudad

intermedia y sus áreas de expansión: el caso de La Serena, IV región de Coquimbo. Memoria para optar al título de Geógrafo. Universidad de Chile, Facultad de arquitectura y urbanismo, Departamento de Geografía.

SERNAGEOMIN, S. (2003). Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital.

Tella, G. (2006). Hacer ciudad: la construcción de las metrópolis. Buenos Aires, Argentina Editorial Nobuko, 131 -133.

Xia, J., Falconer, R., Xiao, X., & Wang, Y. (2014). New criterion for the stability of a human body in floodwaters. *Journal of Hydraulic Research, 52*(1), 93-104.

Xia, J., Teo, F., Lin, R., & Falconer, R. (2011). Formula of incipient velocity for flooded vehicles. *Natural Hazards* 58(1), 1-14.

Anexos

Anexo 1

Velocidad de flujo x Profundidad del agua	Peligrosidad
Rango (m^2/s)	Nivel
> 1.5	Muy alto
0.8 - 1.5	Alto
0.65 - 0.8	Medio
0.4 - 0.65	Bajo
< 0.4	Muy bajo

Anexo 1. *Detalle de valoración de los cinco niveles de Peligrosidad.*

Anexo 2

Criterio Vulnerabilidad	Descripción del criterio	Categorías	Descripción de Categorías	Valor
DENSIDAD DE POBLACIÓN	De acuerdo a la densidad de población por cuadra	Muy densa	Cuadras dentro del primer cuartil con mayor densidad de población	5
		Densa	Cuadras dentro del segundo cuartil con mayor densidad de población	4
		Moderadamente densa	Cuadras dentro del tercer cuartil con mayor densidad de población	3
		Abierta	Cuadras dentro del ultimo cuartil con mayor densidad de población	2
		No residencial	Zonas no residenciales	1
INFRAESTRUCTURA CRITICA	De acuerdo a la importancia del inmueble en el funcionamiento de del sistema territorial	Instalaciones esenciales	Instalaciones esenciales (instituciones educacionales, de salud y bomberos)	5
		Redes vitales	Redes vitales (planta elevadora de aguas servidas y captaciones de agua)	4
		Redes de transporte primarias	Vialidad estructurante y puentes	3
		Redes de transporte secundarias	Vías locales	2
		Instalaciones no esenciales	Instalaciones no esenciales de carácter prescindible, recreativas o complementarias.	1
PATRIMONIAL	De acuerdo a la Importancia patrimonial de la zona o edificación	Zonas de conservación histórica	Zonas declaradas como patrimonio nacional	5
		Zonas sin valor patrimonial	Zonas no consideradas como parte del patrimonio nacional	1
FÍSICO ESTRUCTURAL	De acuerdo a la susceptibilidad estructural de los materiales del piso y paredes de las edificaciones.	Susceptible	Materiales de pisos y paredes susceptibles ante inundaciones	5
		Medianamente susceptible	Materiales de pisos y paredes moderadamente susceptibles ante inundaciones	4
		Resistente	Materiales de pisos y paredes resistentes ante inundaciones	3
		Muy resistente	Materiales de pisos y paredes muy resistentes ante inundaciones	2
		No edificadas	Zonas no edificadas	1

MATRIZ DE COMPARACIÓN DE CRITERIOS									
Criterios	Densidad de población	Estructura critica	Físico estructural	Valor patrimonial	Matriz ponderada				Ponderación
Densidad de población	1.00	2.00	4.00	5.00	0.51	0.55	0.56	0.29	**0.48**
Estructura critica	0.50	1.00	2.00	6.00	0.26	0.27	0.28	0.35	**0.29**
Físico-estructural	0.25	0.50	1.00	5.00	0.13	0.14	0.14	0.29	**0.17**
Valor patrimonial	0.20	0.17	0.20	1.00	0.10	0.05	0.03	0.06	**0.06**
TOTAL	1.95	3.67	7.20	17.00					

Índice de consistencia	Cl=(nmax-n)/(n-1)	0.0820	Cl=(nmax-n)/(n-1)	0.0820
Consistencia aleatoria	RI=1,98*(n-2)/n	0.9900	RI=1,98*(n-2)/n	0.9900
Relación de consistencia	CR=Cl/RI	0.0829	CR=Cl/RI	0.0829

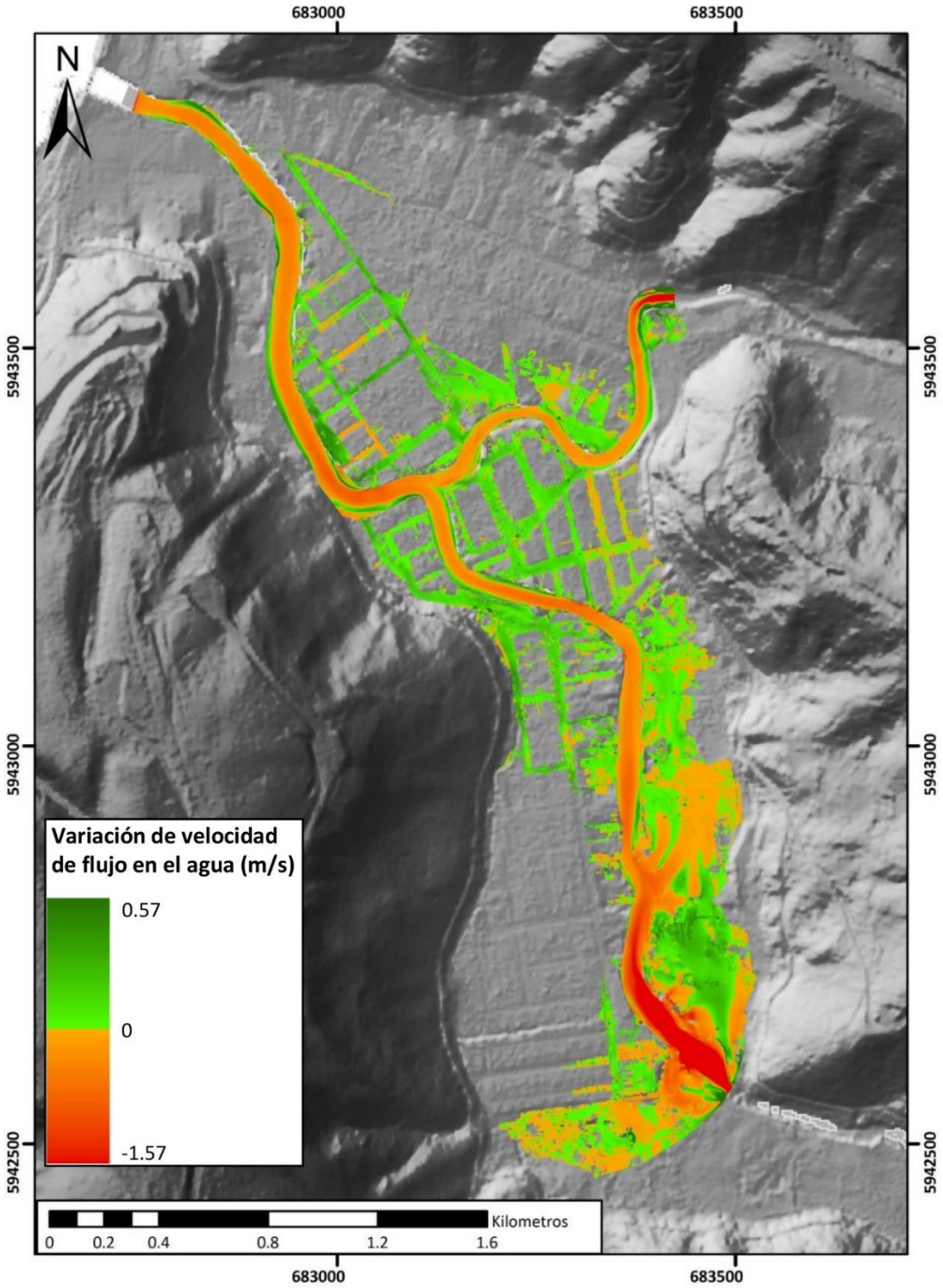
Anexo 2*. Detalle de los criterios considerados para valoración de vulnerabilidad y exposición y sus respectivas ponderaciones de importancia relativa.*

Anexo 3

		NIVEL DE VULNERABILIDAD Y EXPOSICIÓN				
		Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo
NIVEL DE PELIGRO	Muy alto	Muy alto		Alto	Medio	
	Alto					
	Medio	Alto		Medio	Bajo	
	Bajo					
	Muy bajo	Medio		Bajo	Muy bajo	

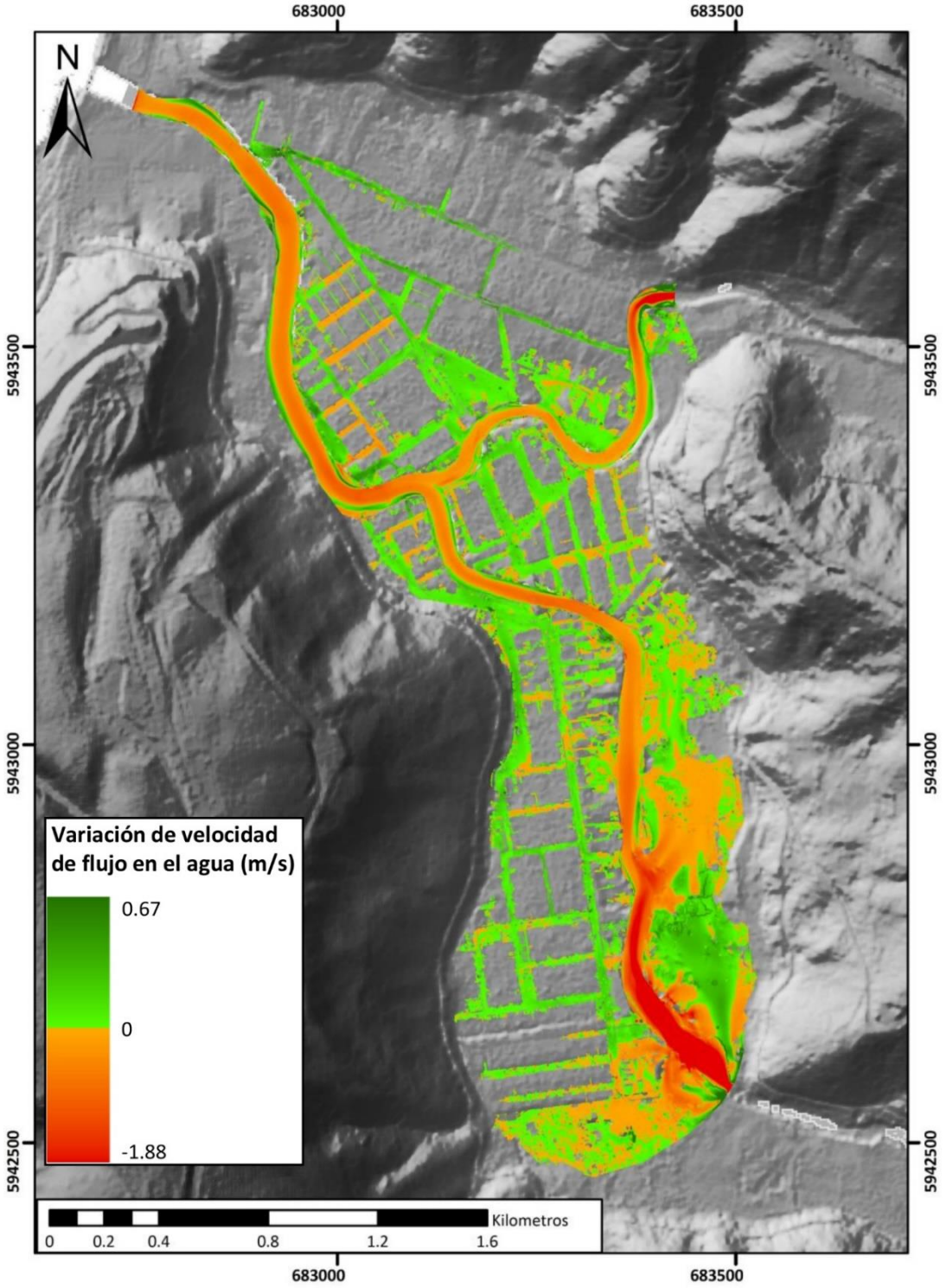
Anexo 3. *Matriz de elaboración propia para la valoración del Riesgo.*

Anexo 4



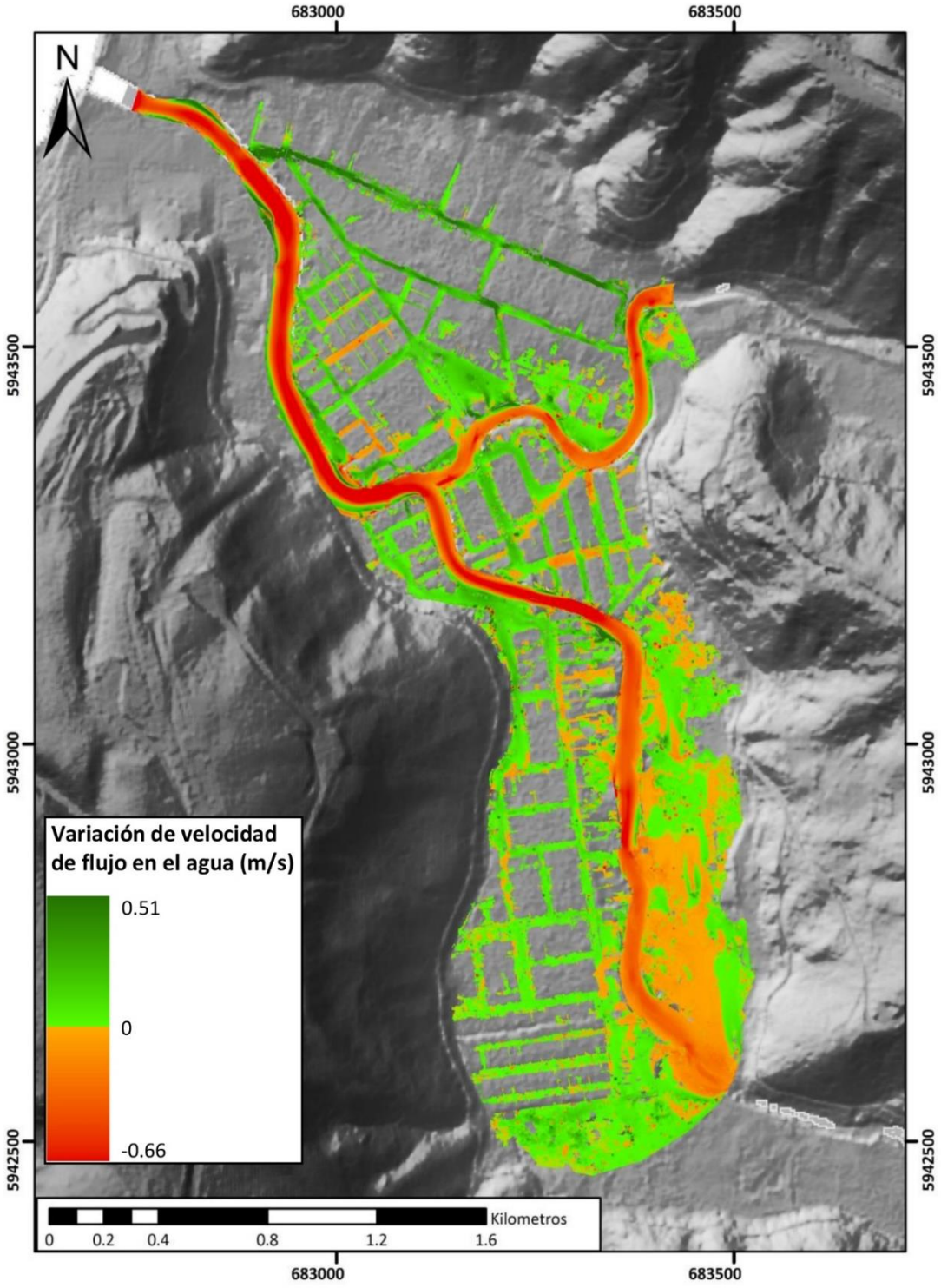
Área de variación negativa (ha)	Área de variación positiva (ha)
8.78	10.99

Anexo 4.1. *Variación de la velocidad de flujo de una inundación de un periodo de retorno de 50 años en pleamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 50 años en bajamar.*



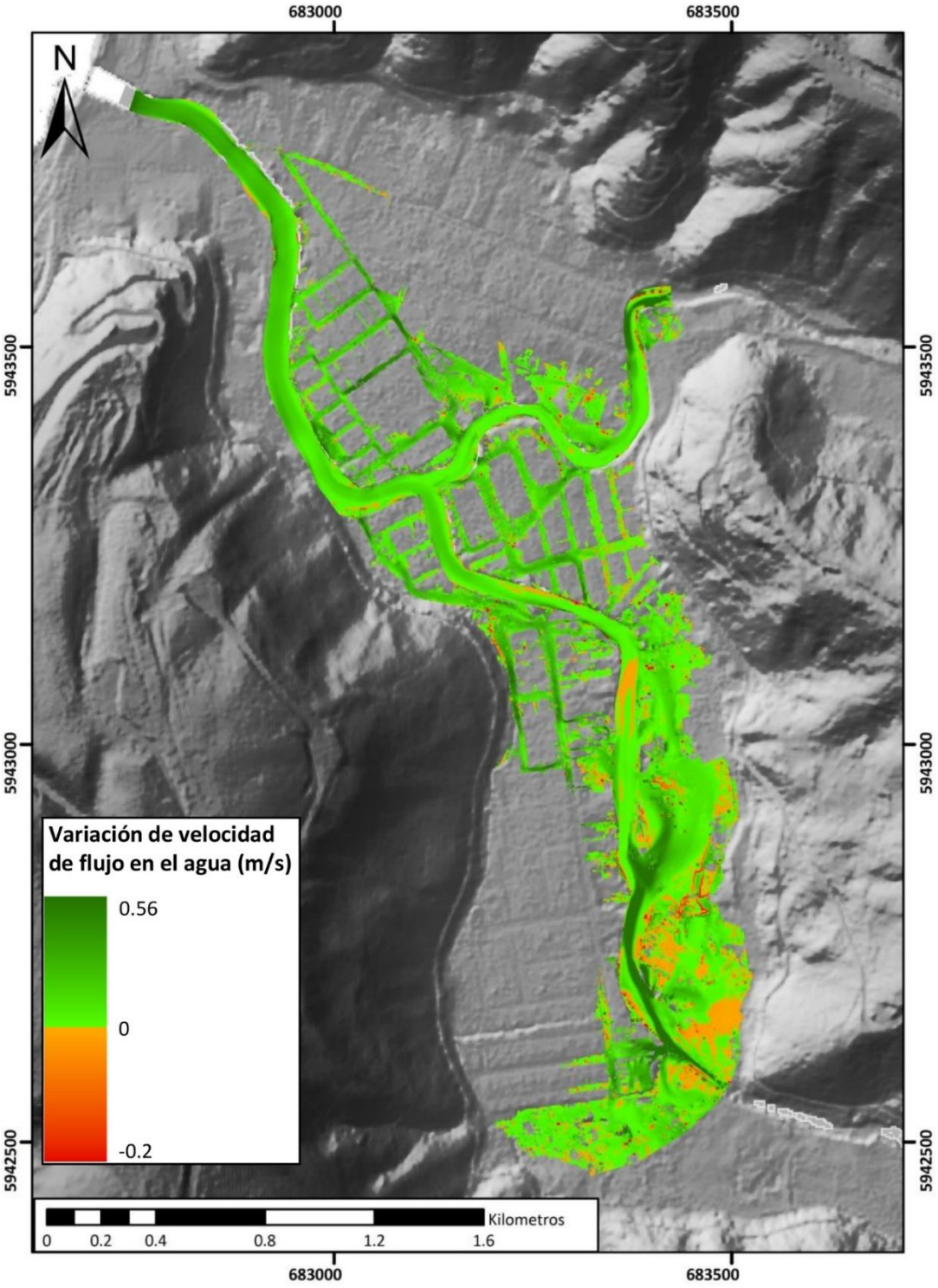
Área de variación negativa (ha)	Área de variación positiva (ha)
10.78	13.33

Anexo 4.2. *Variación de la velocidad de flujo de una inundación de un periodo de retorno de 100 años en pleamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 100 años en bajamar.*



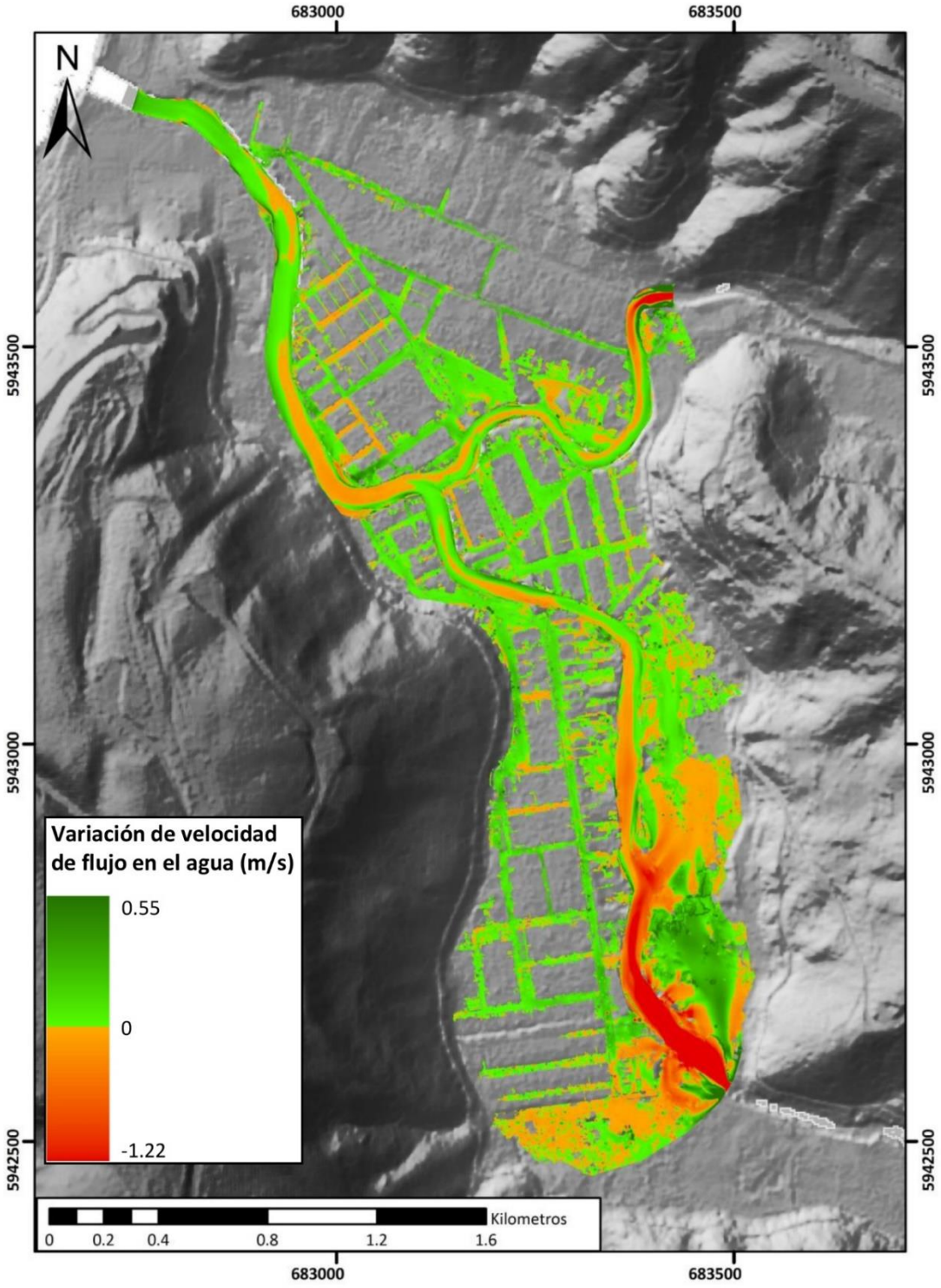
Área de variación negativa (ha)	Área de variación positiva (ha)
11.03	15.39

Anexo 4.3. *Variación de la velocidad de flujo de una inundación de un periodo de retorno de 150 años en pleamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 150 años en bajamar*



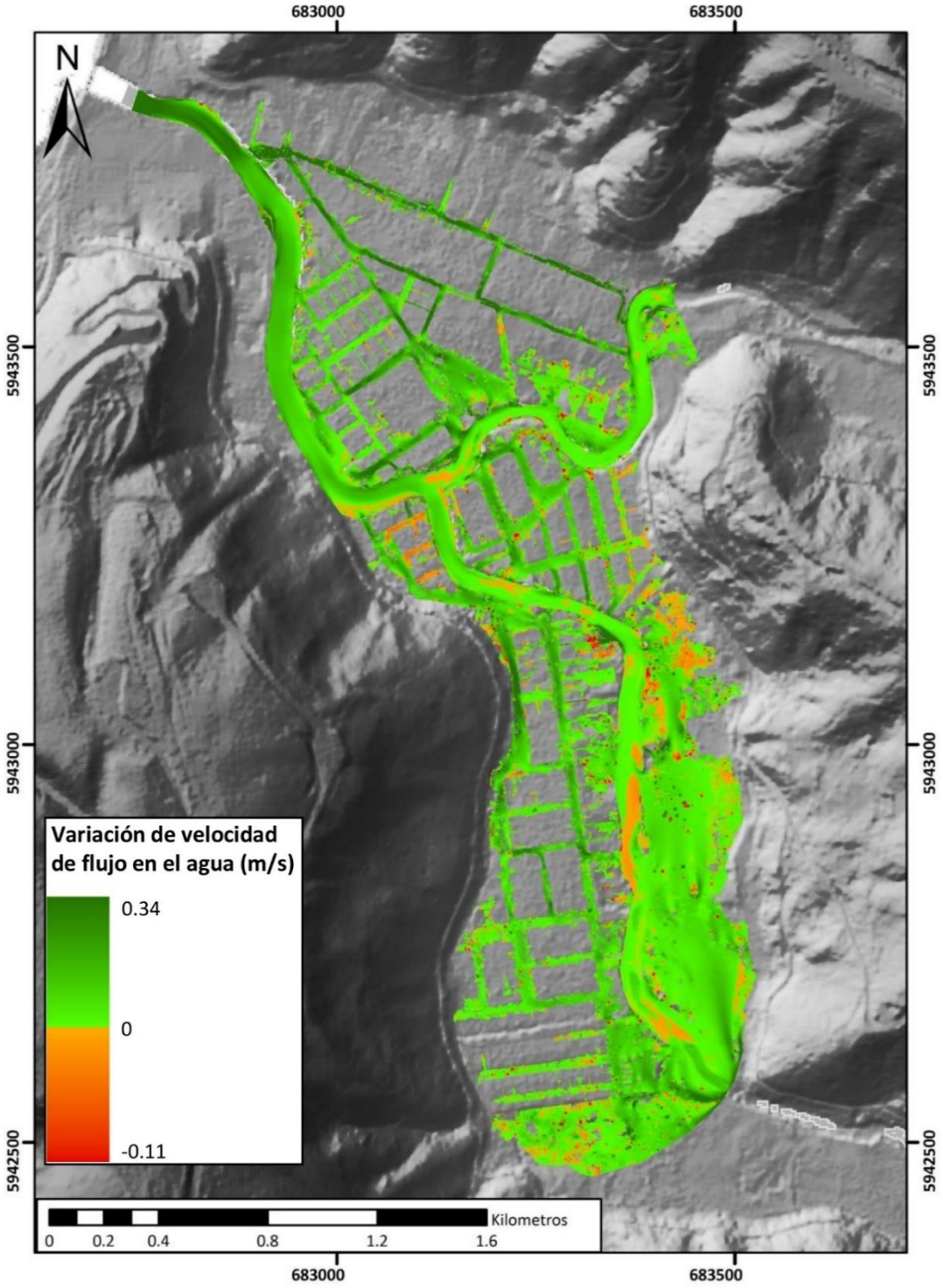
Área de variación negativa (ha)	Área de variación positiva (ha)
2.41	17.36

Anexo 4.4. *Variación de la velocidad de flujo de una inundación de un periodo de retorno de 100 años en bajamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 50 años en bajamar.*



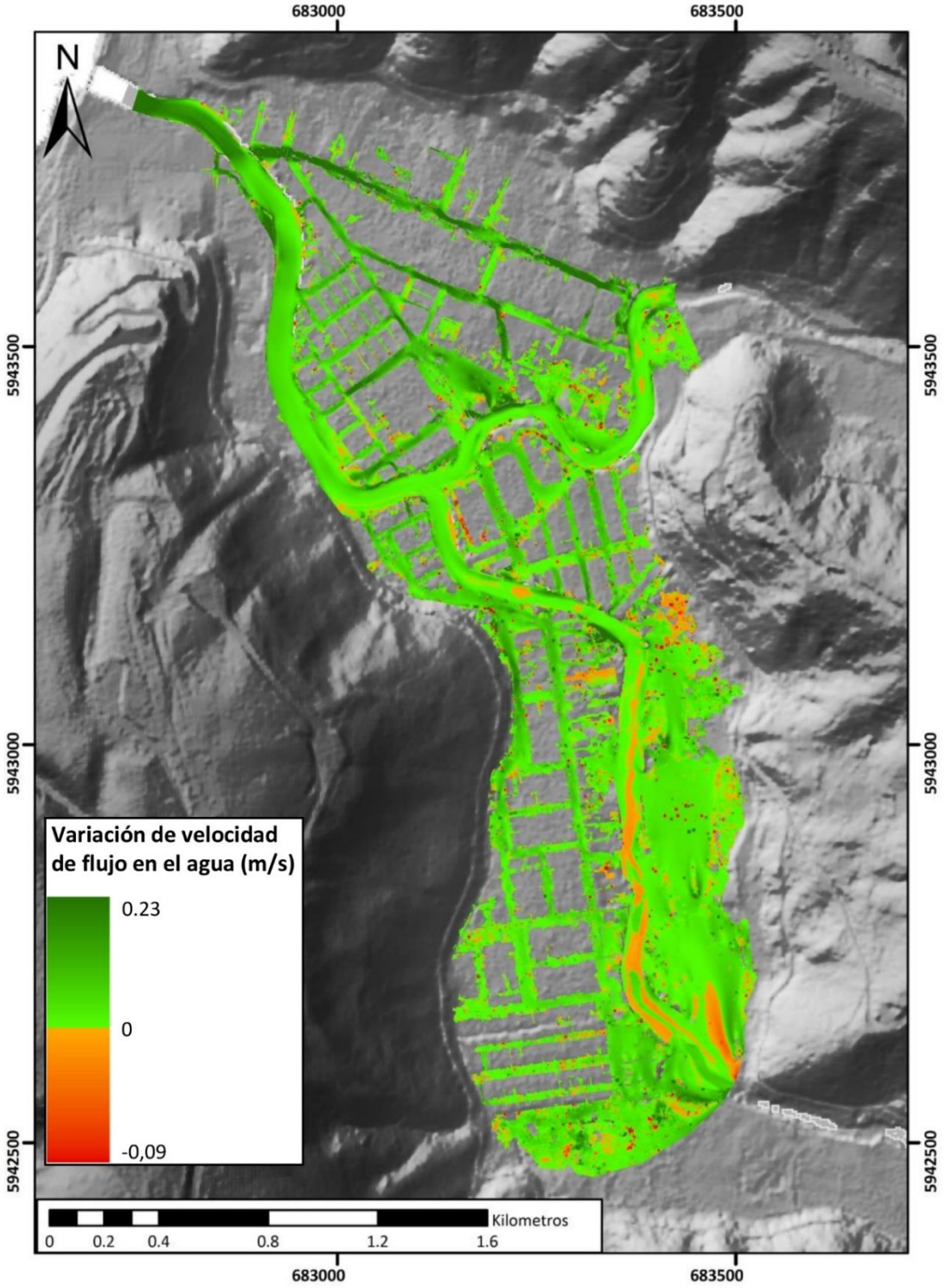
Área de variación negativa (ha)	Área de variación positiva (ha)
8.70	15.41

Anexo 4.5. *Variación de la velocidad de flujo de una inundación de un periodo de retorno de 150 años en bajamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 100 años en bajamar.*



Área de variación negativa (ha)	Área de variación positiva (ha)
2.79	22.25

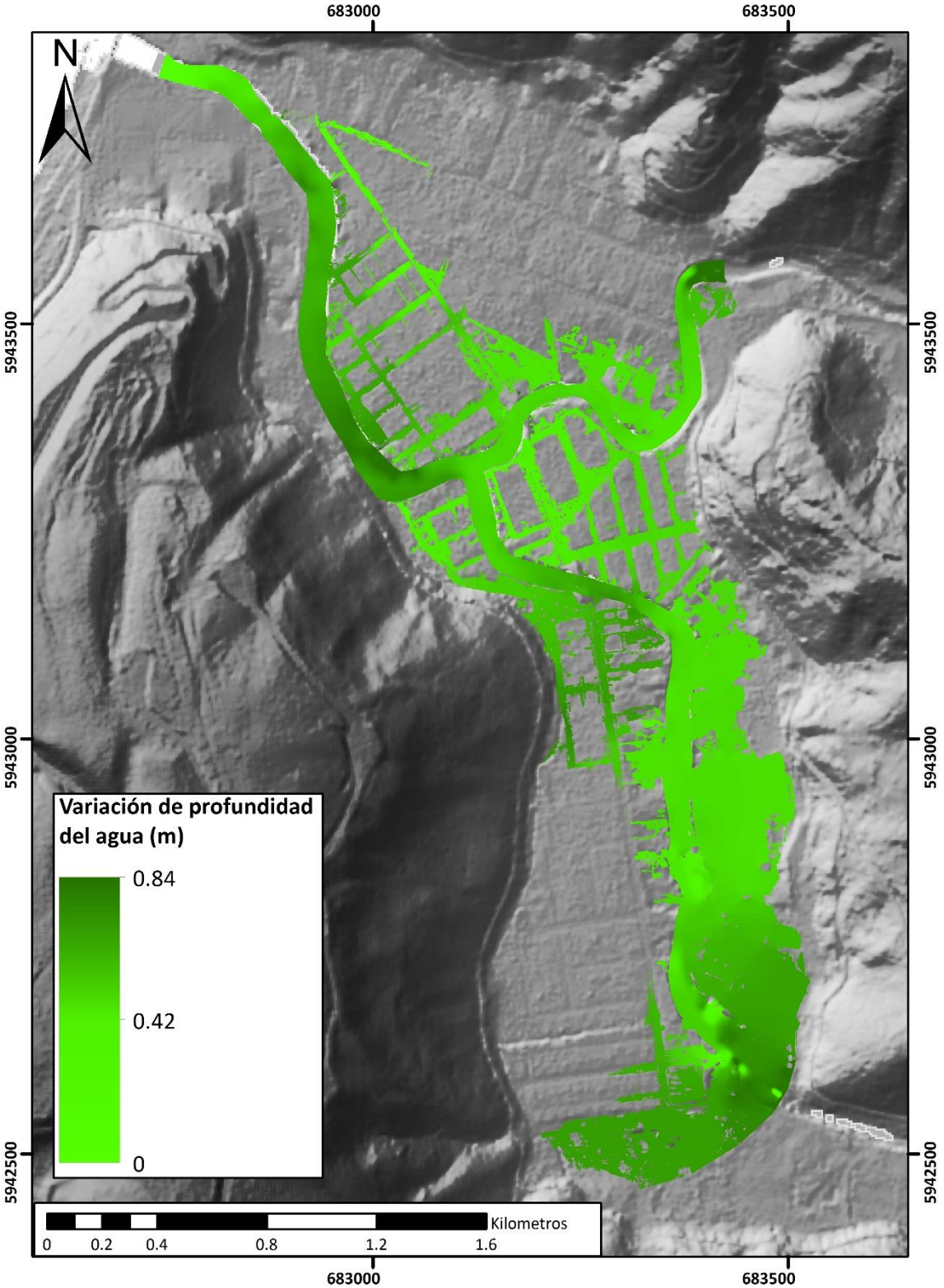
Anexo 4.6. *Variación de la velocidad de flujo de una inundación de un periodo de retorno de 100 años en pleamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 50 años en pleamar.*



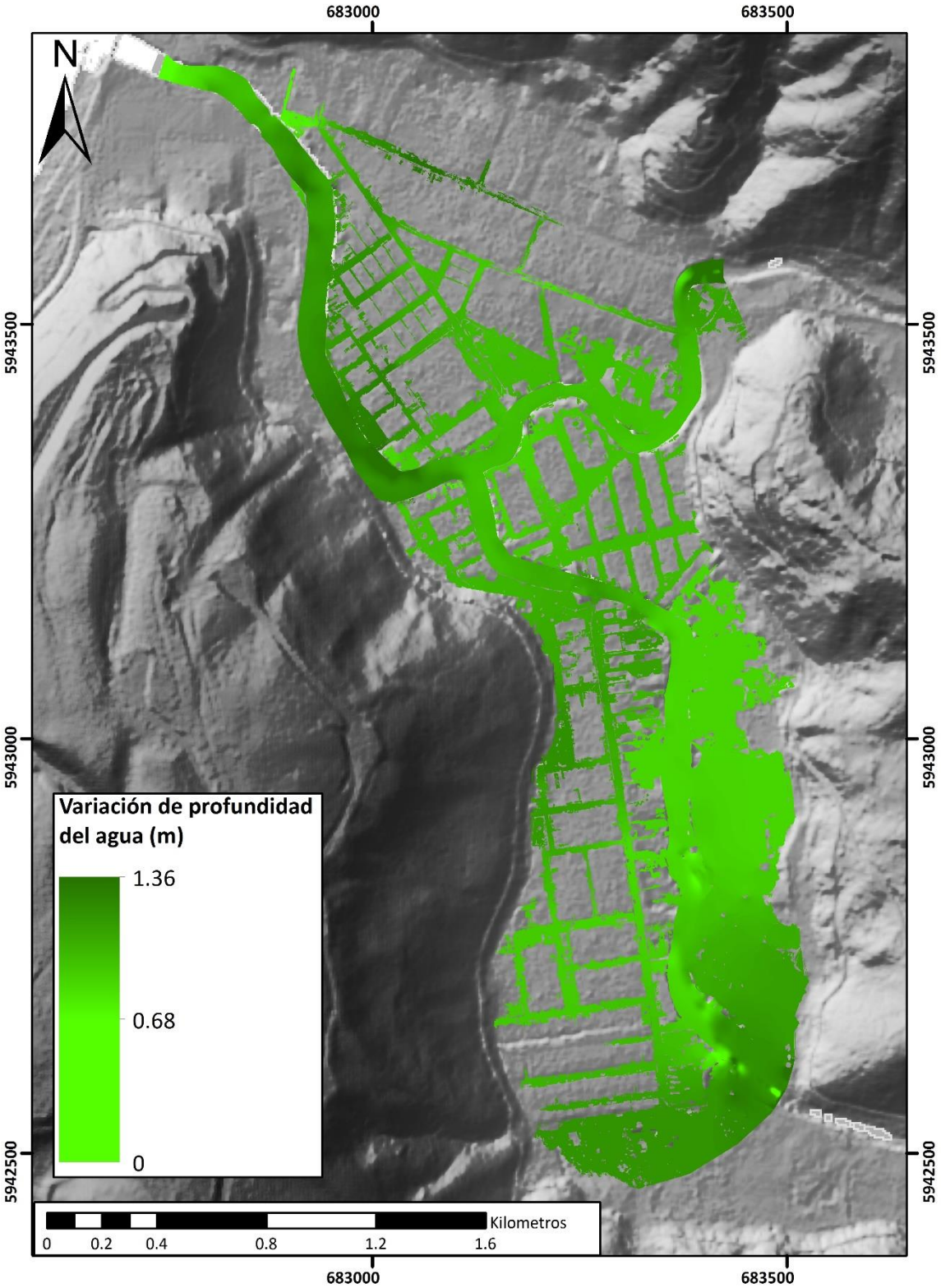
Área de variación negativa (ha)	Área de variación positiva (ha)
3.12	24.43

Anexo 4.7. *Variación de la velocidad de flujo de una inundación de un periodo de retorno de 150 años en pleamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 100 años en pleamar*.

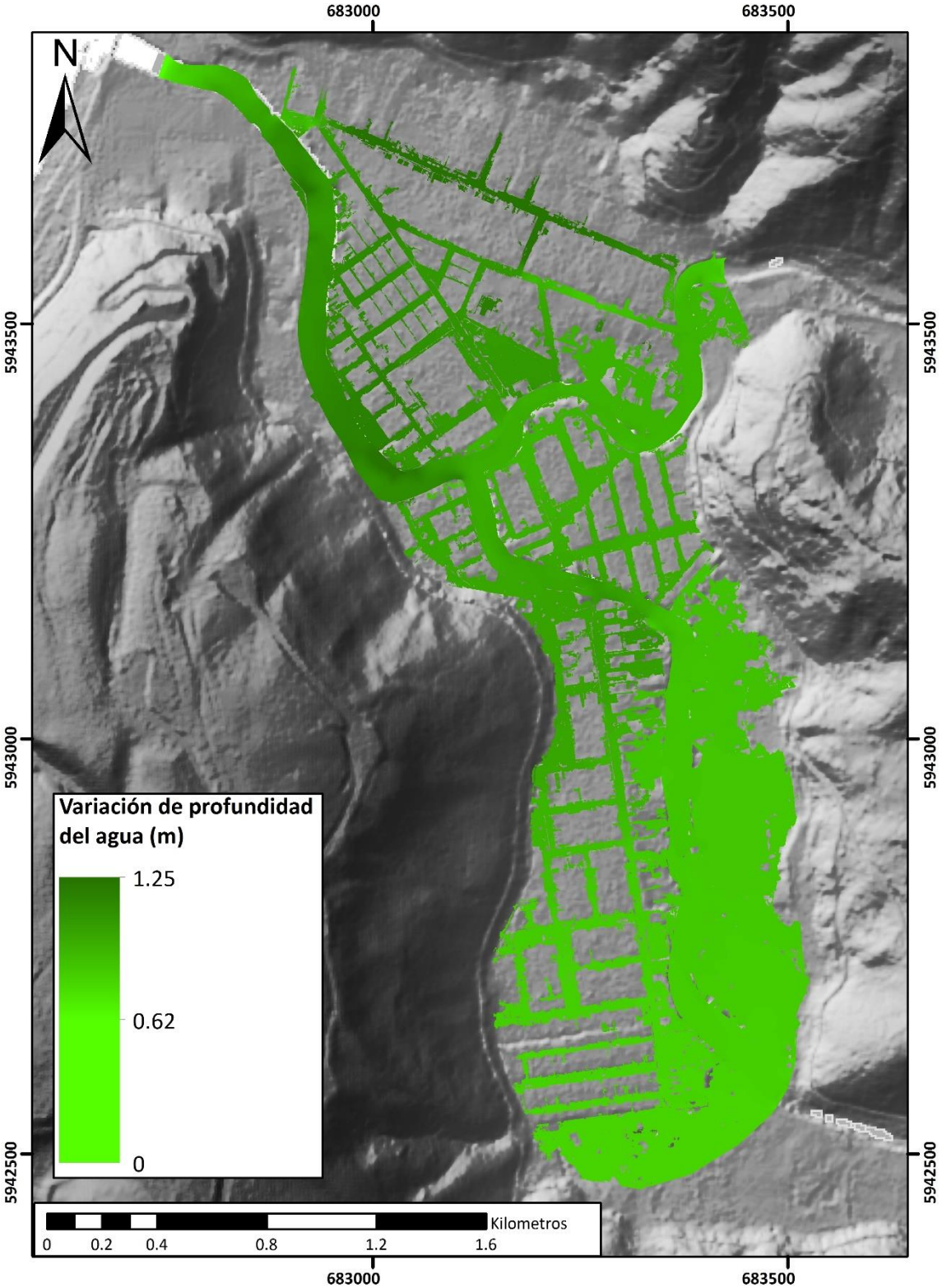
Anexo 5



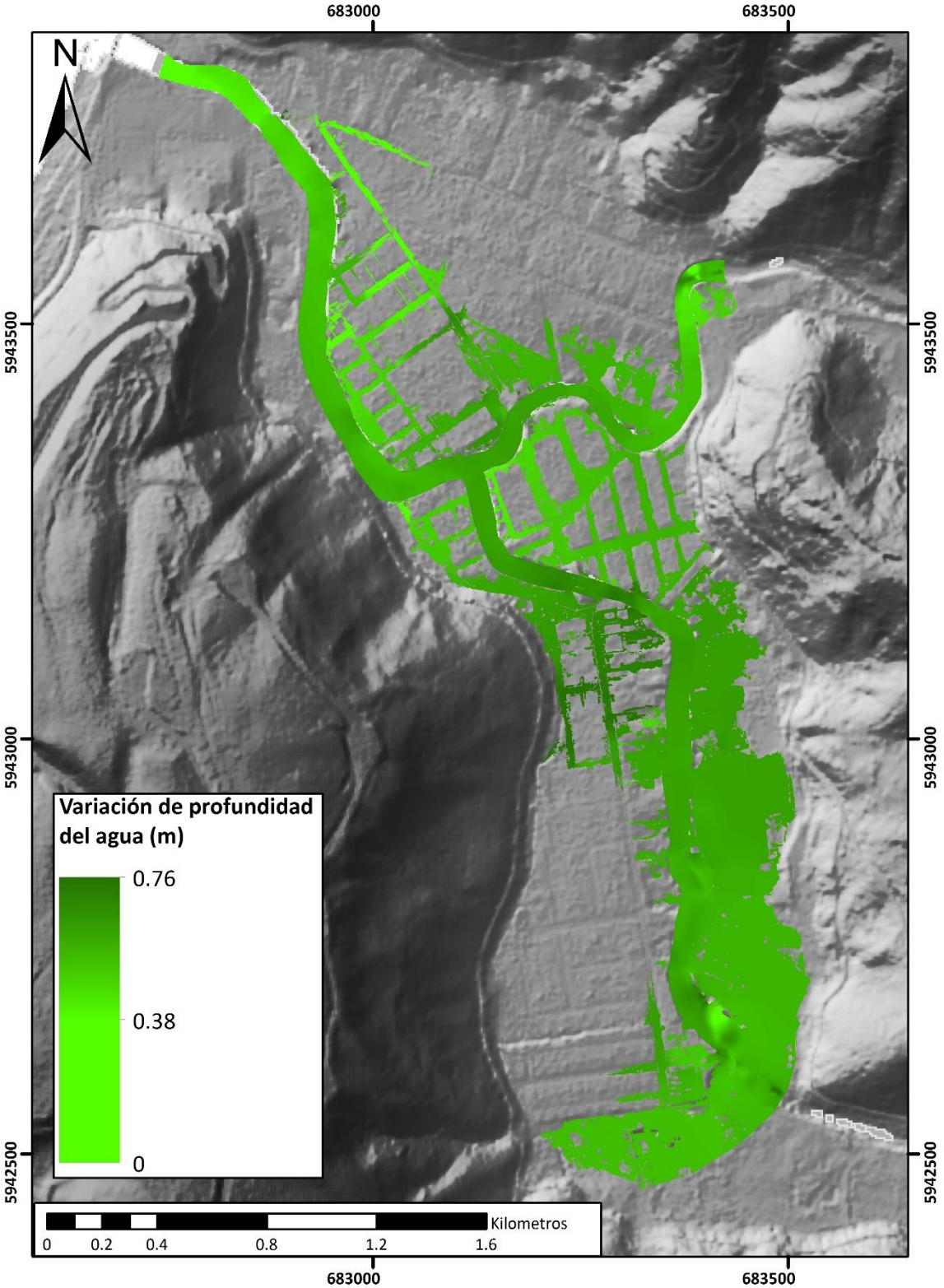
Anexo 5.1. *Variación la profundidad de agua en una inundación de un periodo de retorno de 50 años en pleamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 50 años en bajamar.*



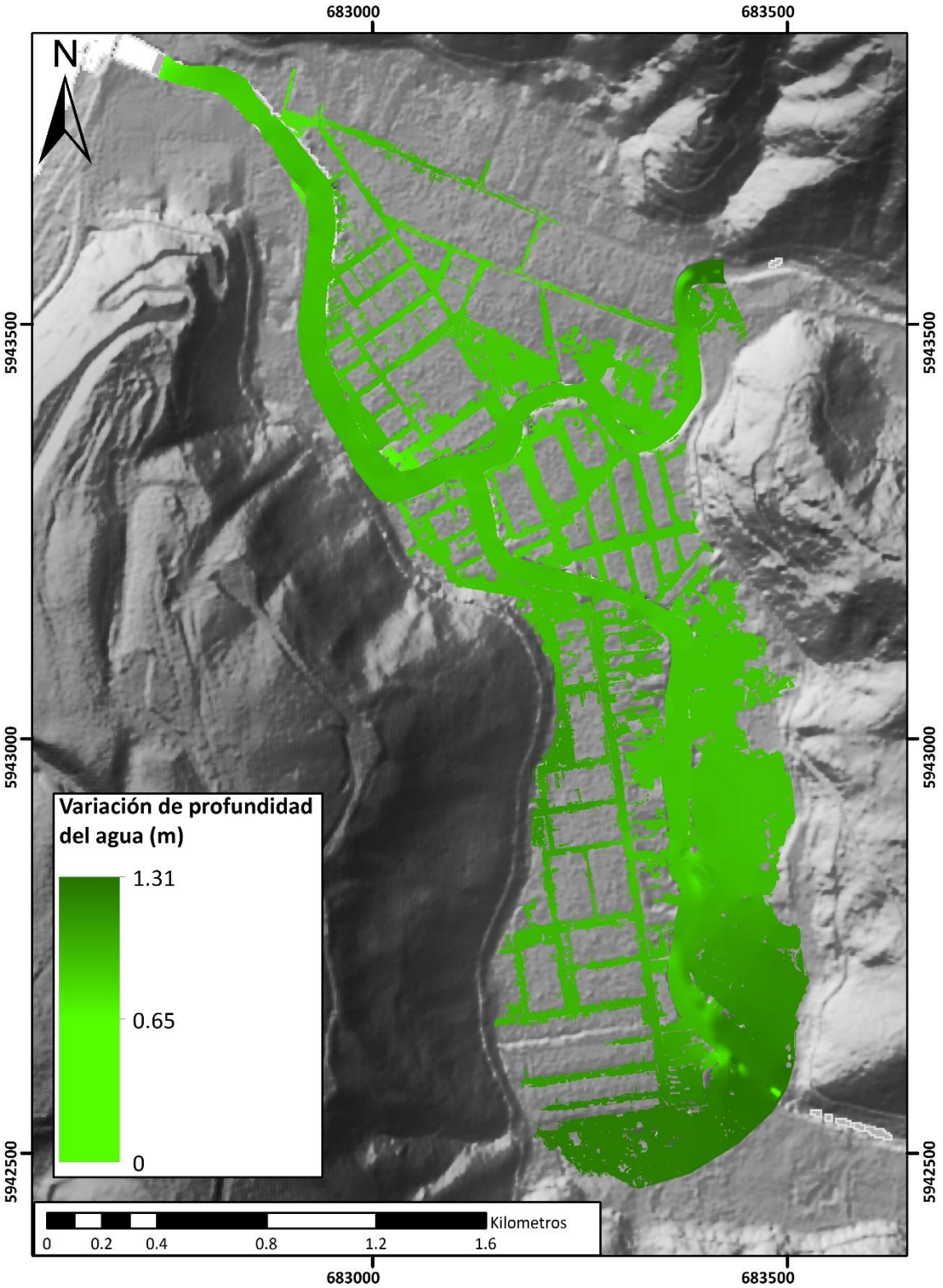
Anexo 5.2. *Variación la profundidad de agua en una inundación de un periodo de retorno de 100 años en pleamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 100 años en bajamar.*



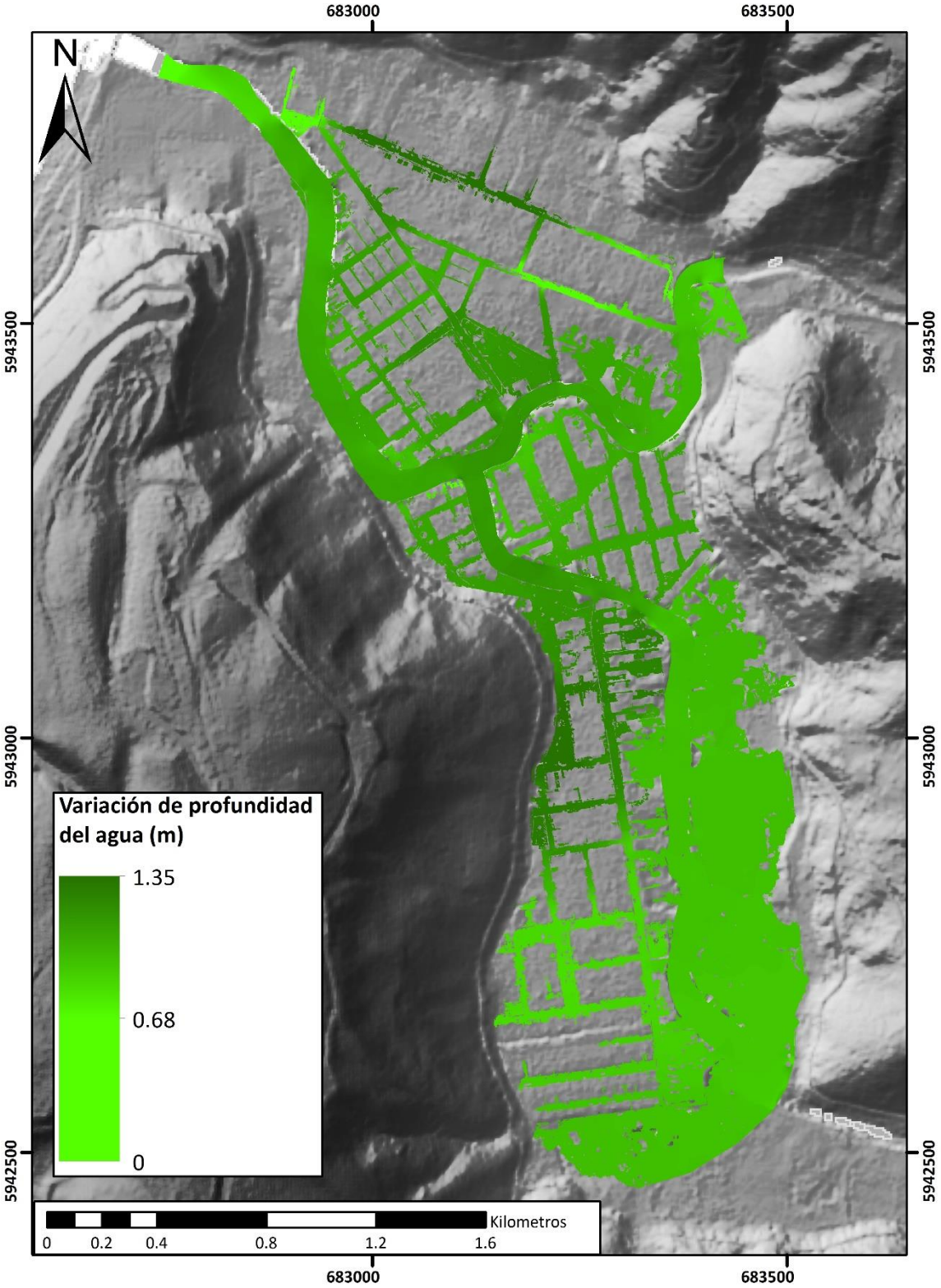
Anexo 5.3. *Variación la profundidad de agua en una inundación de un periodo de retorno de 150 años en pleamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 150 años en bajamar.*



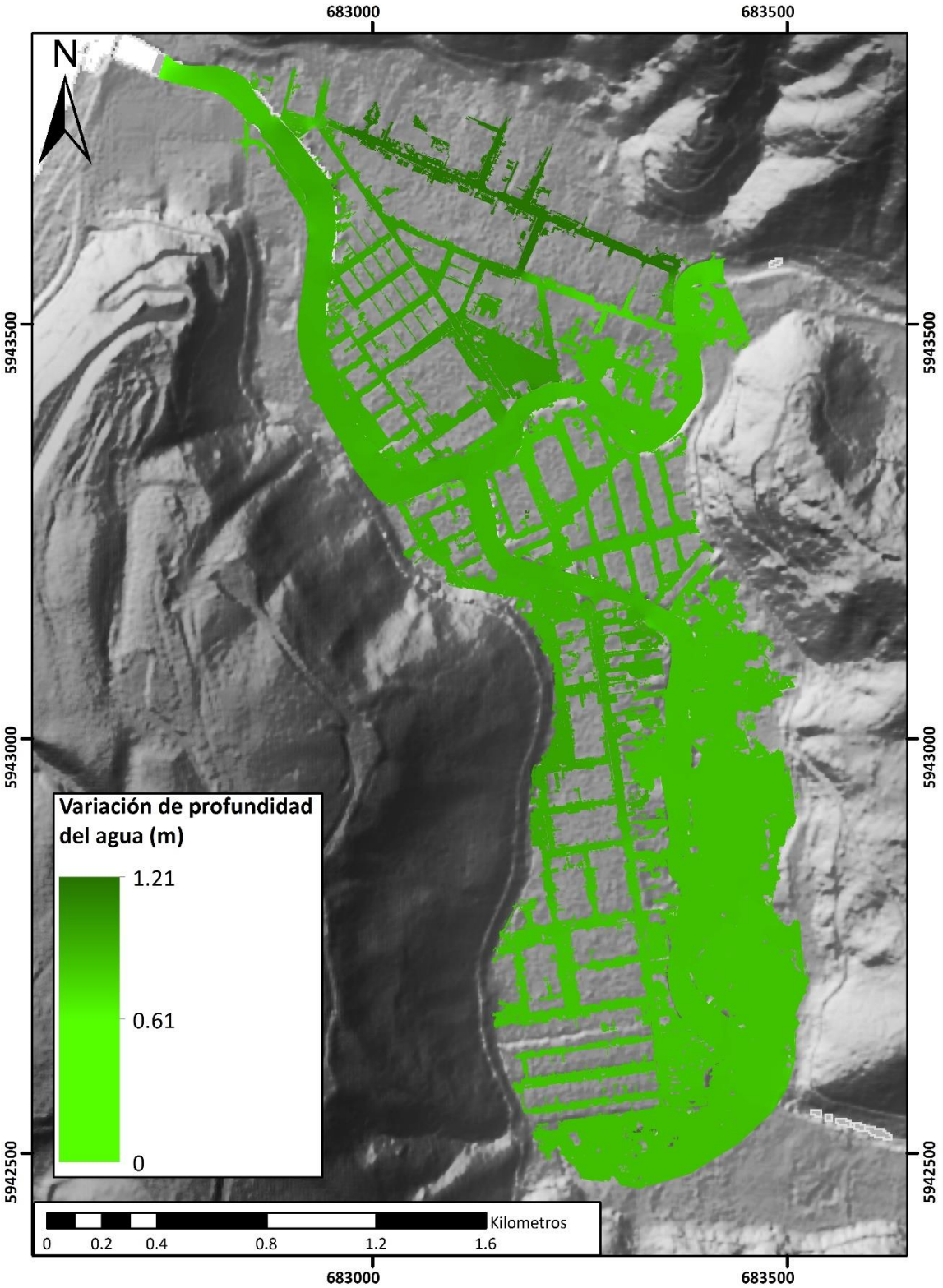
***Anexo 5.4**. Variación la profundidad de agua en una inundación de un periodo de retorno de 100 años en bajamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 50 años en bajamar.*



Anexo 5.5. *Variación la profundidad de agua en una inundación de un periodo de retorno de 150 años en bajamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 100 años en bajamar.*

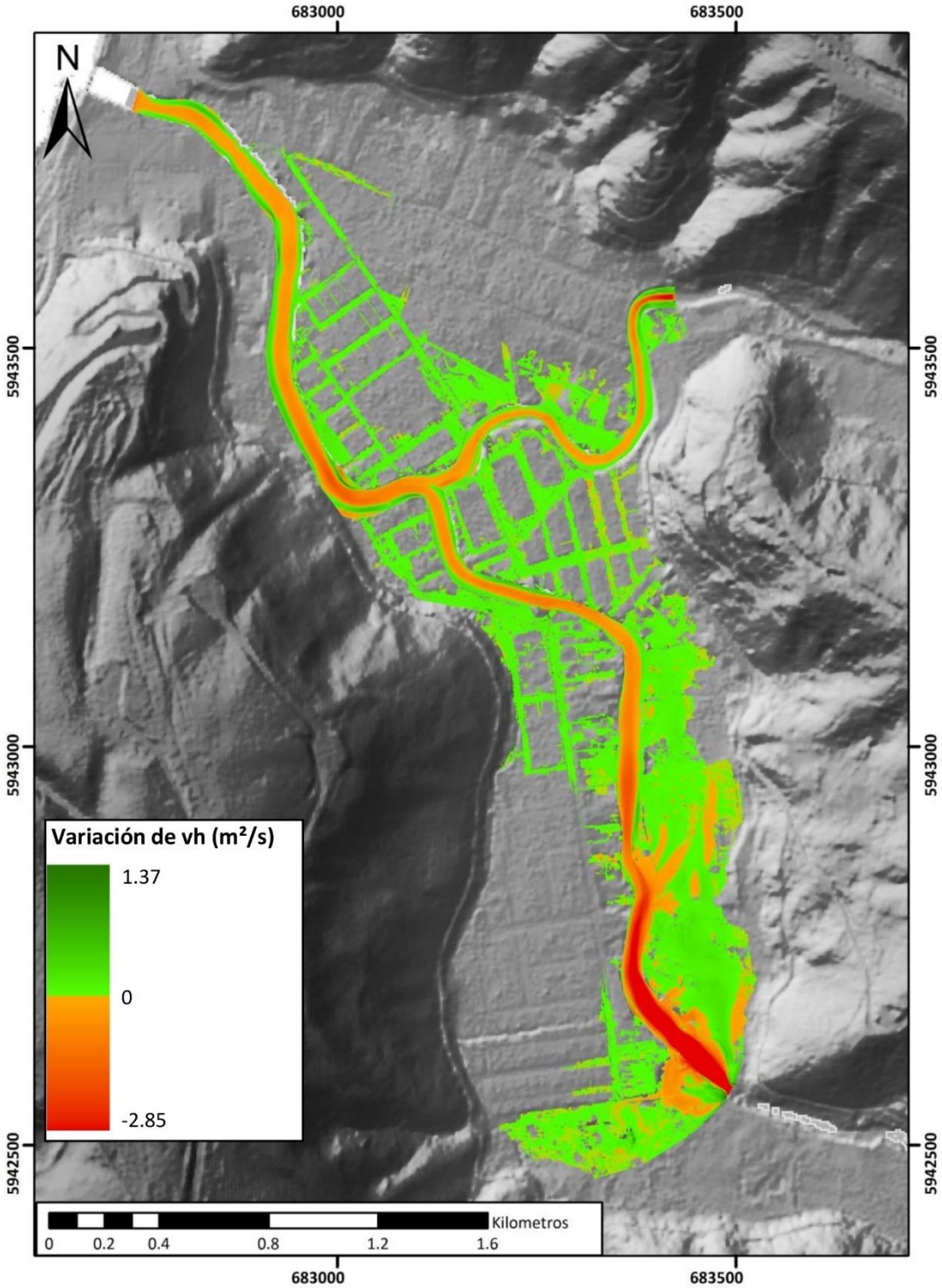


Anexo 5.6. *Variación la profundidad de agua en una inundación de un periodo de retorno de 100 años en pleamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 50 años en pleamar.*



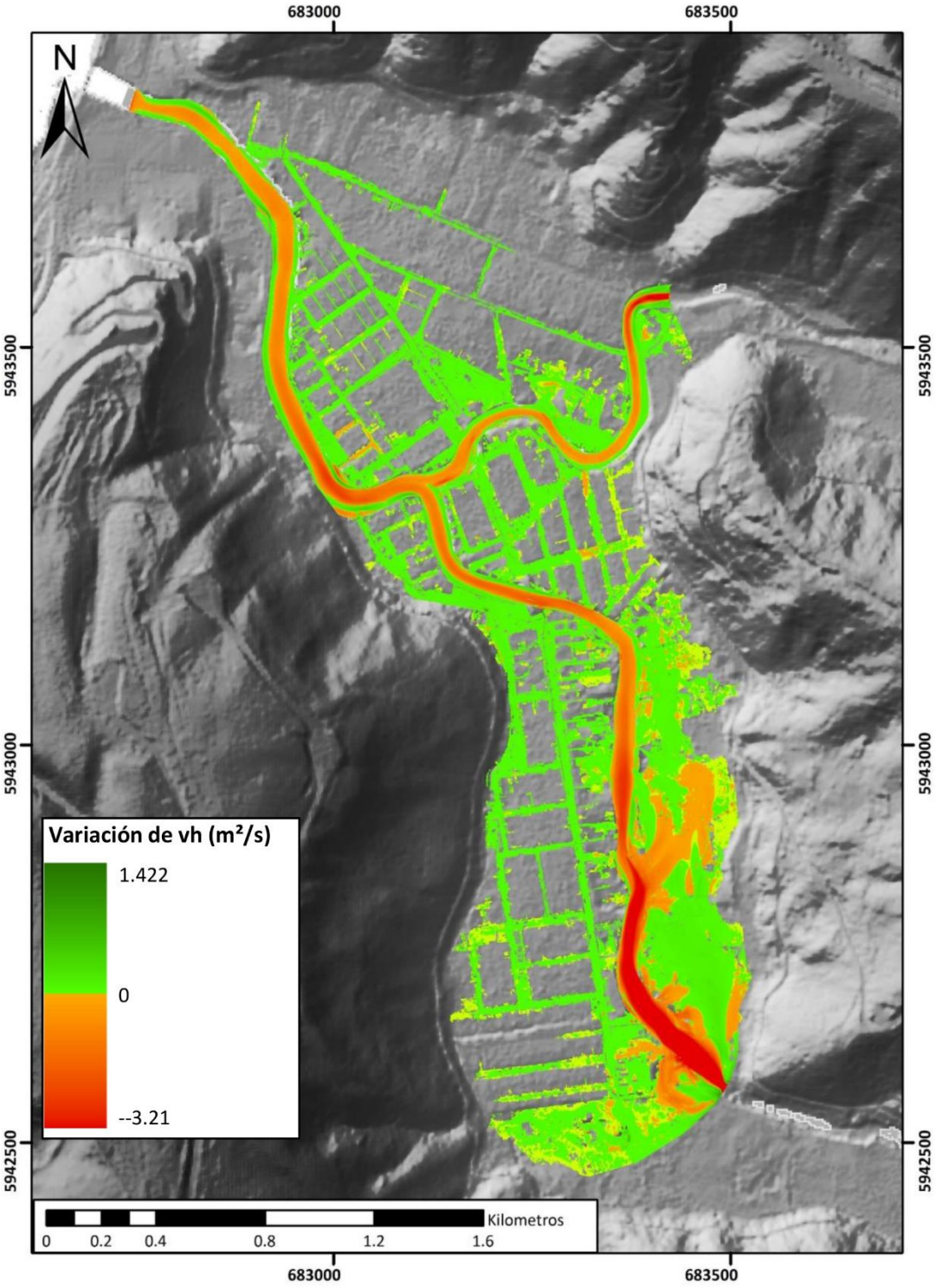
Anexo 5.7. *Variación la profundidad de agua en una inundación de un periodo de retorno de 150 años en pleamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 100 años en pleamar*.

Anexo 6



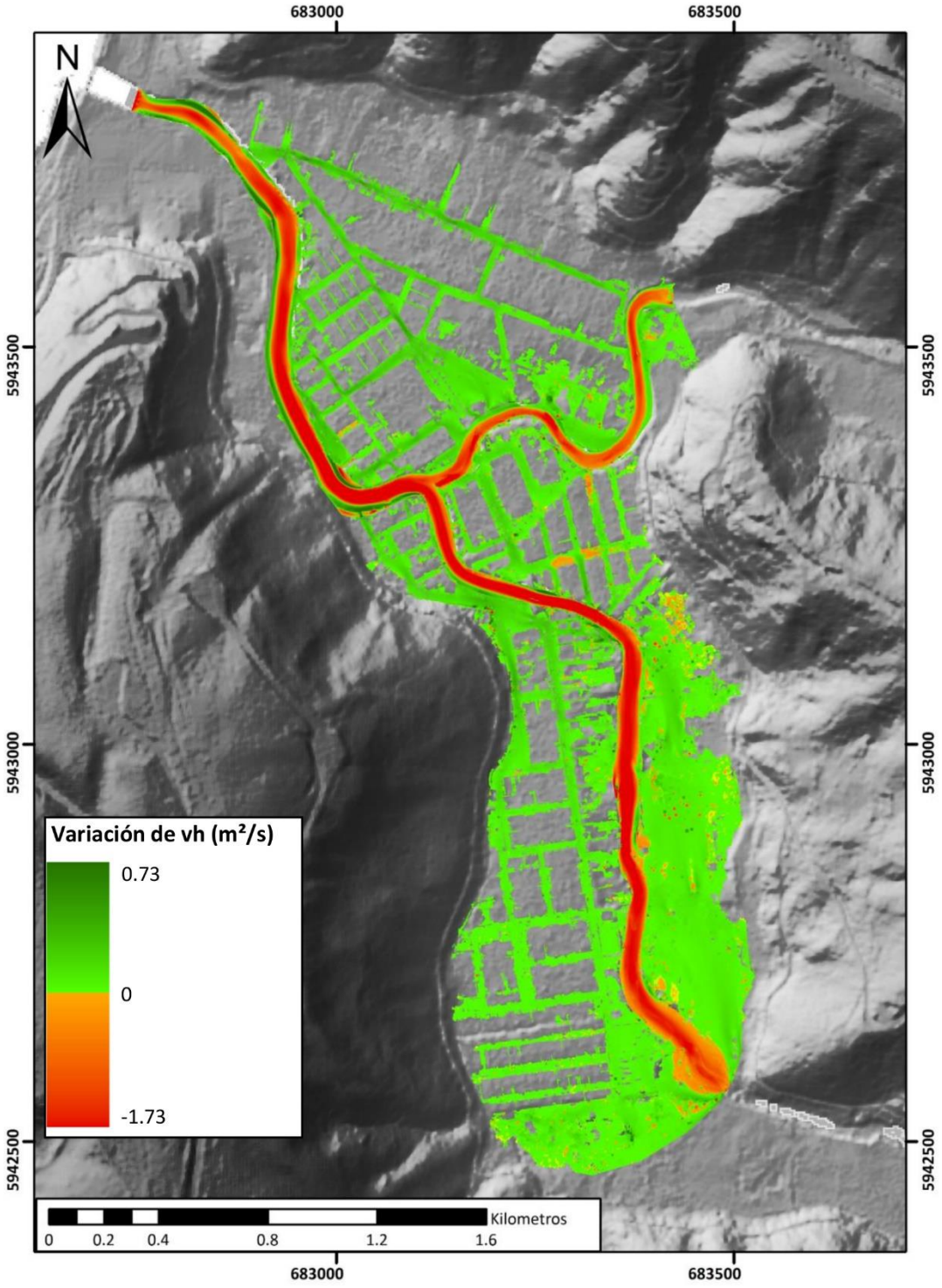
Área de variación negativa (ha)	Área de variación positiva (ha)
5.71	14.05

Anexo 6.1. *Variación de vh (producto de la velocidad de flujo por la profundidad de agua) de una inundación de un periodo de retorno de 50 años en pleamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 50 años en bajamar.*



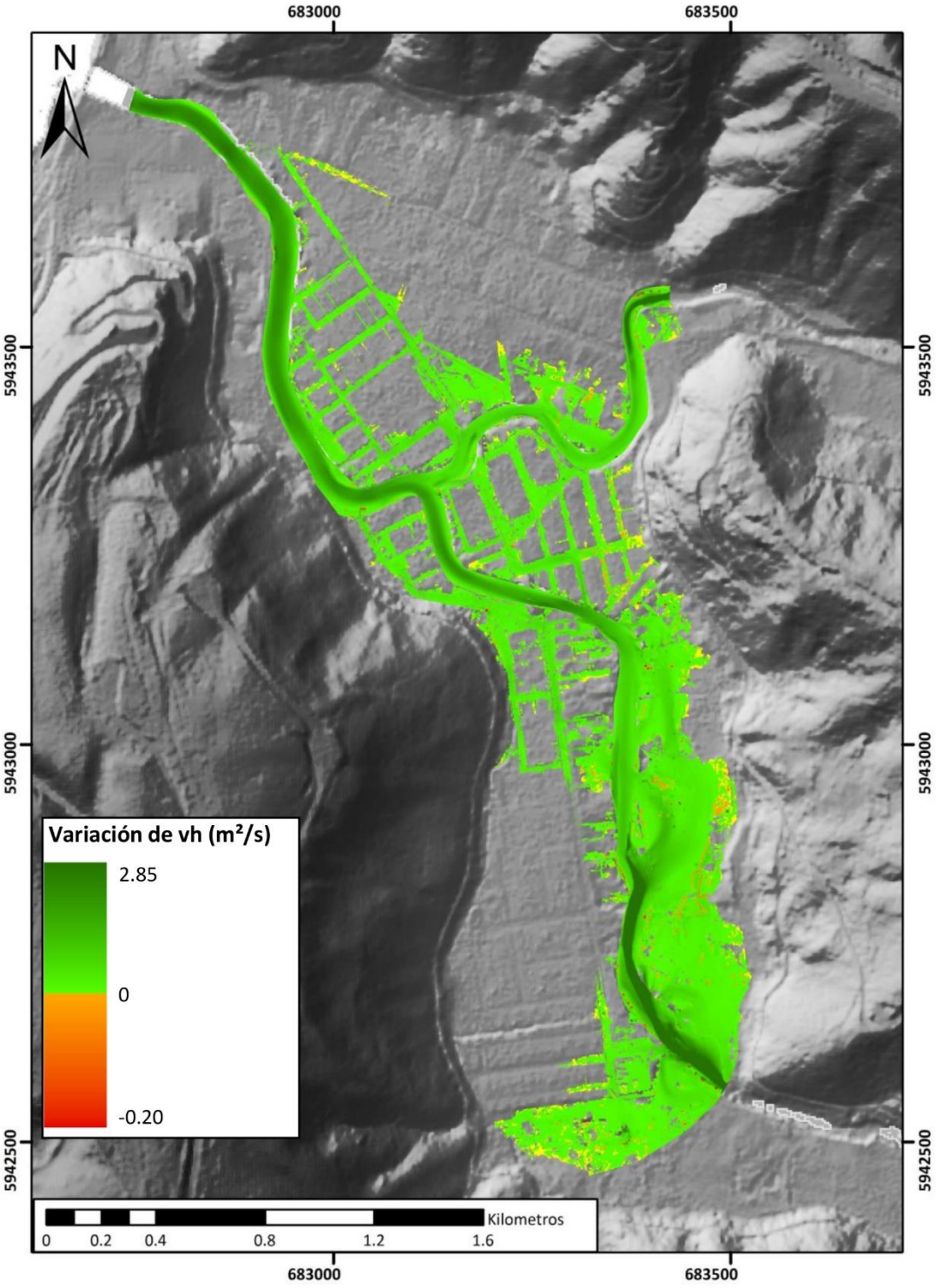
Área de variación negativa (ha)	Área de variación positiva (ha)
6.86	17.25

Anexo 6.2. *Variación de vh (producto de la velocidad de flujo por la profundidad de agua) de una inundación de un periodo de retorno de 100 años en pleamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 100 años en bajamar.*



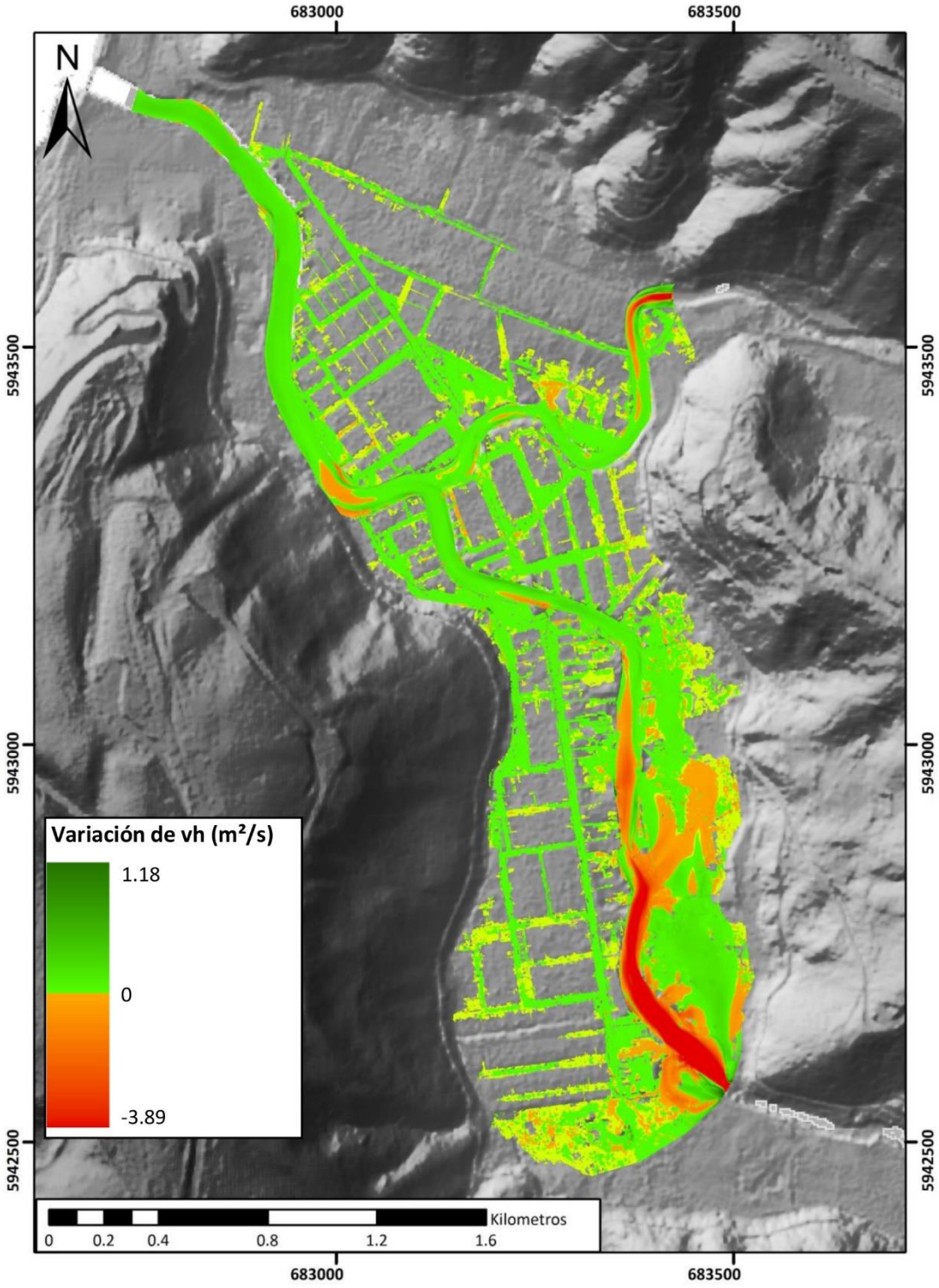
Área de variación negativa (ha)	Área de variación positiva (ha)
5.56	20.87

Anexo 6.3. *Variación de vh (producto de la velocidad de flujo por la profundidad de agua) de una inundación de un periodo de retorno de 150 años en pleamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 150 años en bajamar*



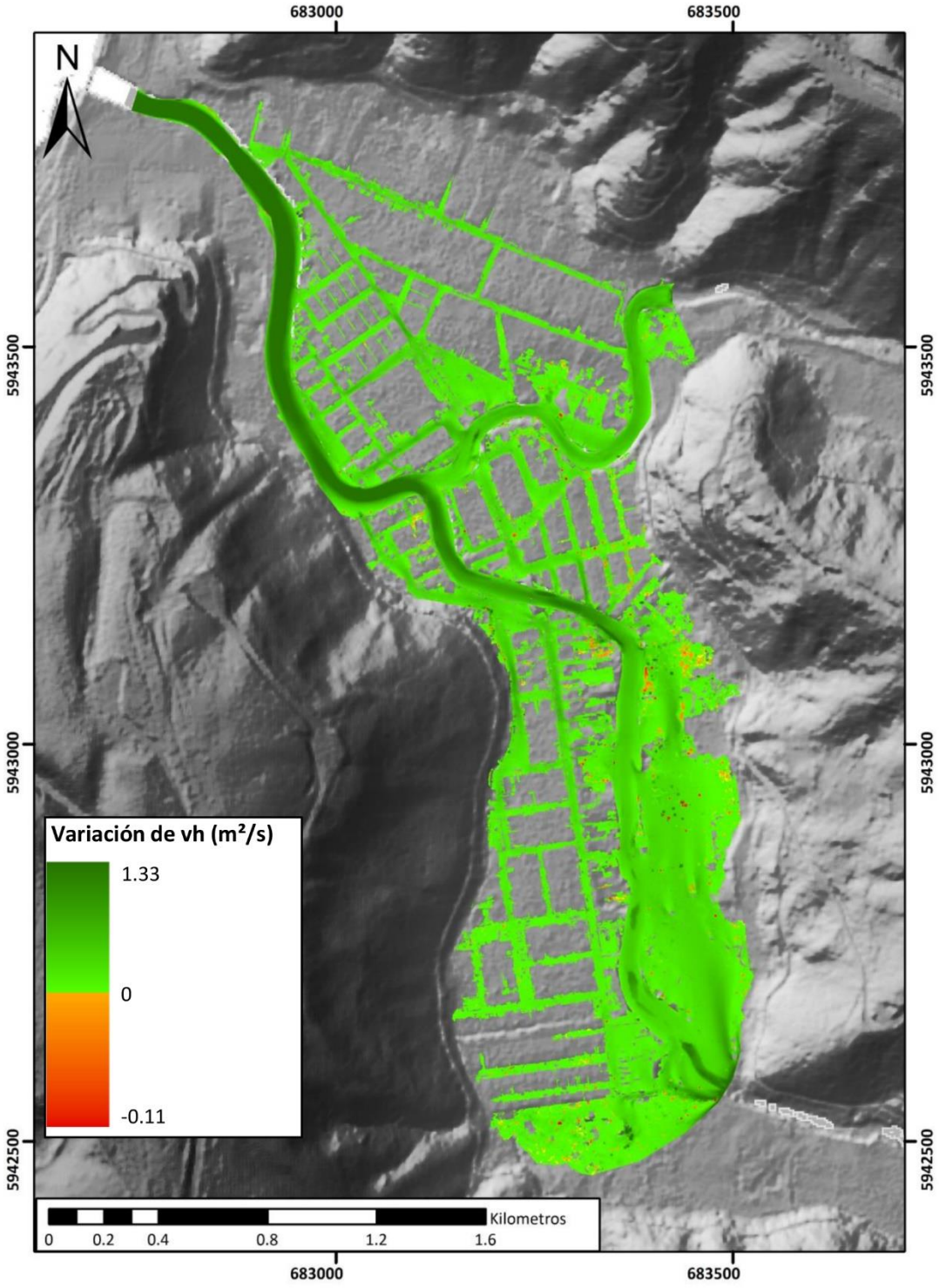
Área de variación negativa (ha)	Área de variación positiva (ha)
0.40	19.37

Anexo 6.4. *Variación de vh (producto de la velocidad de flujo por la profundidad de agua) de una inundación de un periodo de retorno de 100 años en bajamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 50 años en bajamar.*



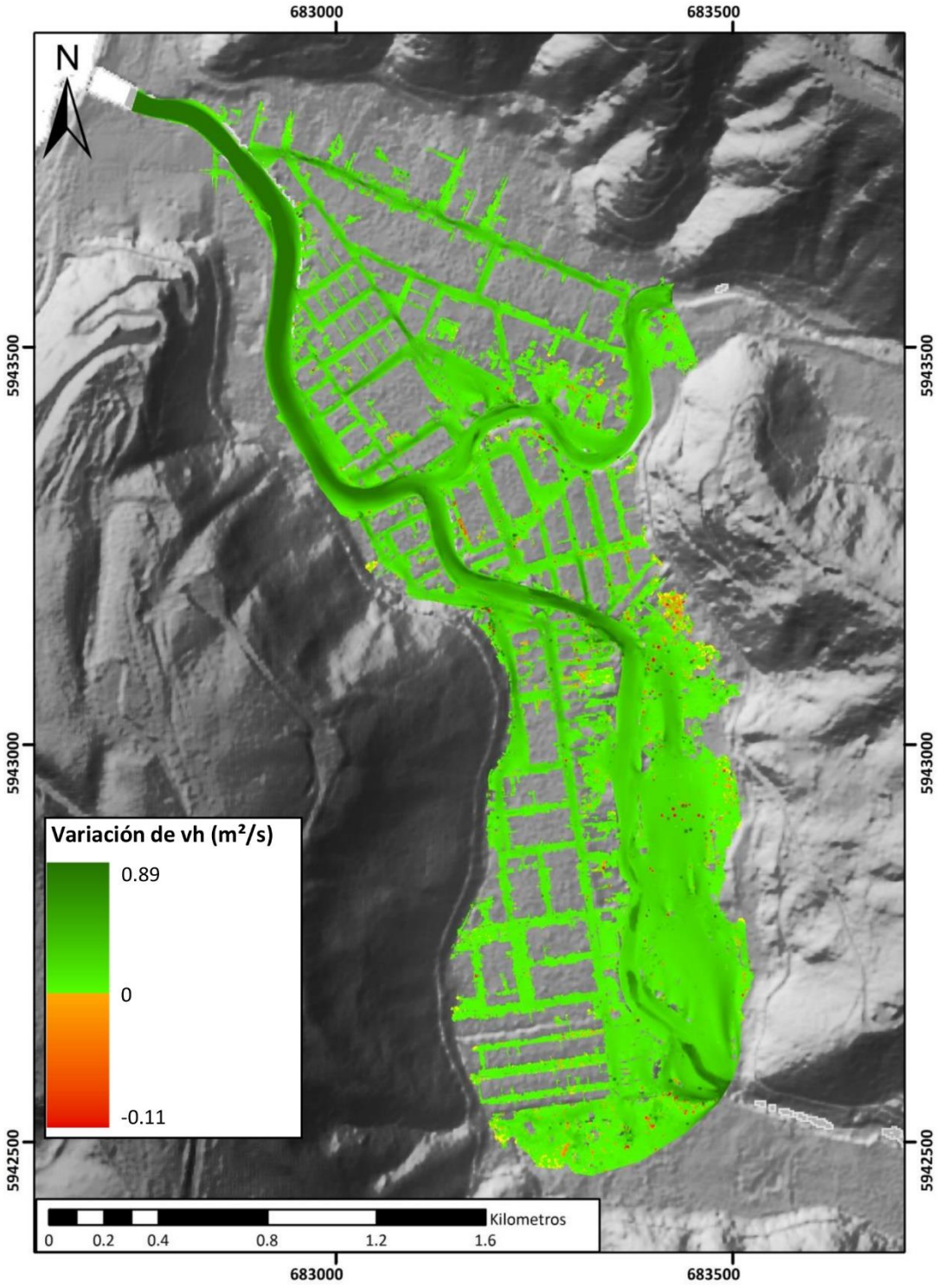
Área de variación negativa (ha)	Área de variación positiva (ha)
4.44	19.67

Anexo 6.5. *Variación de vh (producto de la velocidad de flujo por la profundidad de agua) de una inundación de un periodo de retorno de 150 años en bajamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 100 años en bajamar.*



Área de variación negativa (ha)	Área de variación positiva (ha)
0.48	24.55

Anexo 6.6. *Variación de vh (producto de la velocidad de flujo por la profundidad de agua) de una inundación de un periodo de retorno de 100 años en pleamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 50 años en pleamar.*



Área de variación negativa (ha)	Área de variación positiva (ha)
0.59	26.95

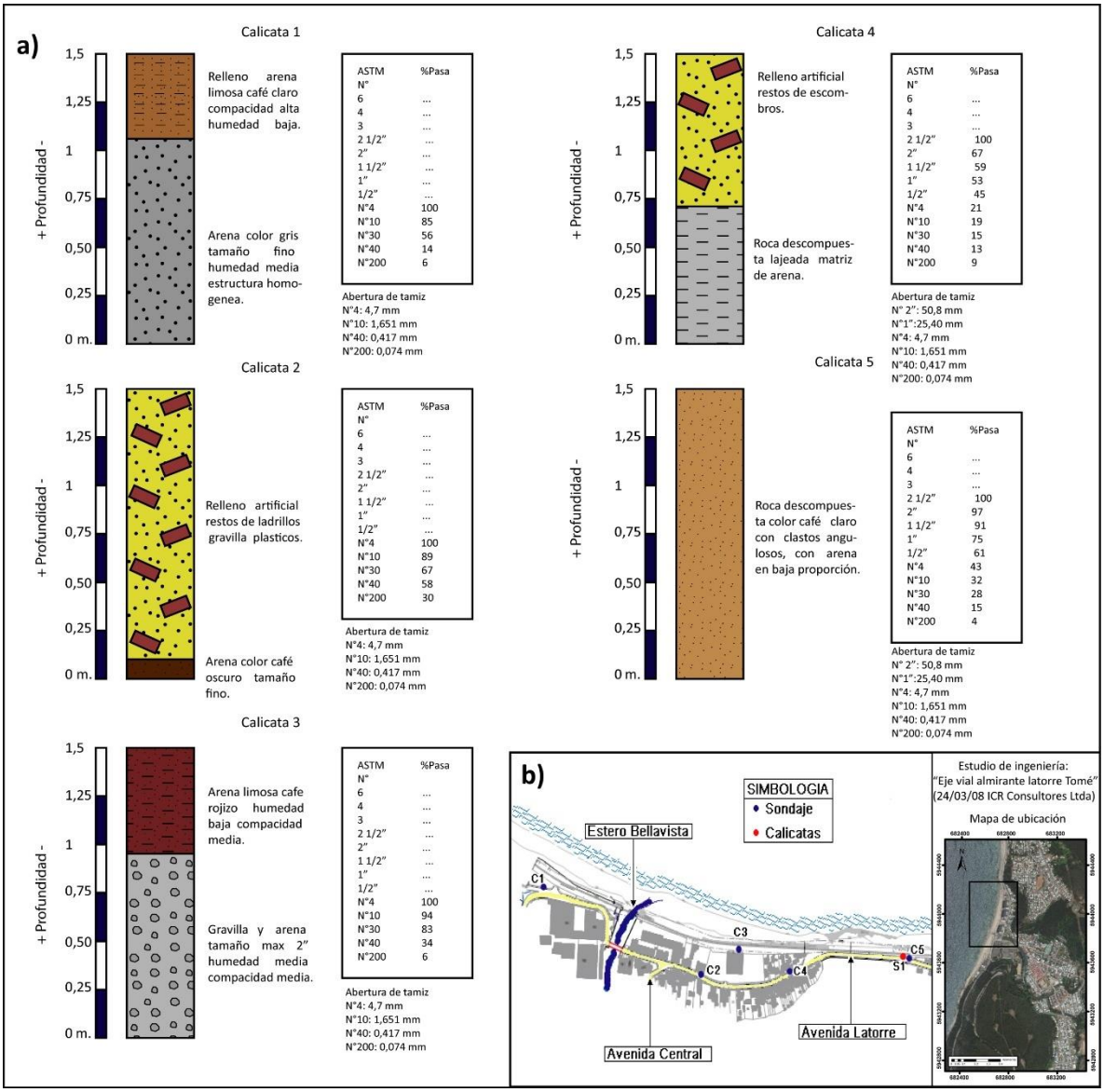
Anexo 6.7. *Variación de vh (producto de la velocidad de flujo por la profundidad de agua) de una inundación de un periodo de retorno de 150 años en pleamar respecto a una inundación de un periodo de retorno de 100 años en pleamar*.

Anexo 7

Campaña	Fecha y hora de la medición	Alt. Limnigráfica mínima de ese día (m)	Alt. Limnigráfica durante la medición (m)	Marea durante la medición (m)	Conductividad eléctrica (µS/cm)
1	01-08-2019 10:31	1.56	1.9	3.53	7330
2	01-09-2019 11:43	1.54	1.93	3.59	25200
3	29-09-2019 11:22	1.54	1.95	3.59	28300

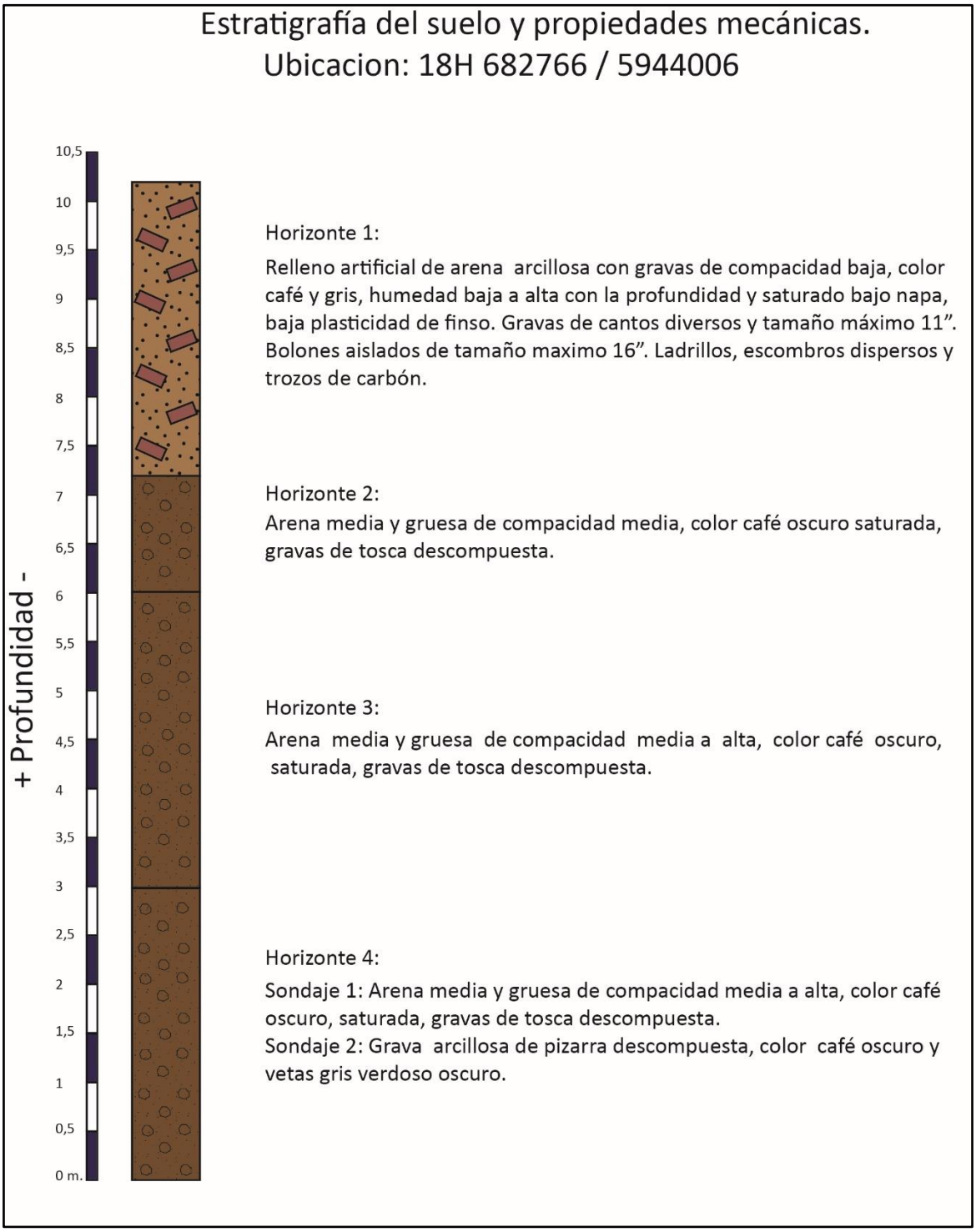
Anexo 7. *Las alturas limnigráficas provienen de la estación de monitoreo del estero Bellavista de la Dirección General de Aguas (DGA), los datos de mareas proceden de la estación de monitoreo Quiriquina CL del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA).*

Anexo 8



Anexo 8. *Representación de calicatas descritas en estudio geotécnico del proyecto "eje vial almirante Latorre, Tomé" de la empresa Lematco Limitada.*

Anexo 9

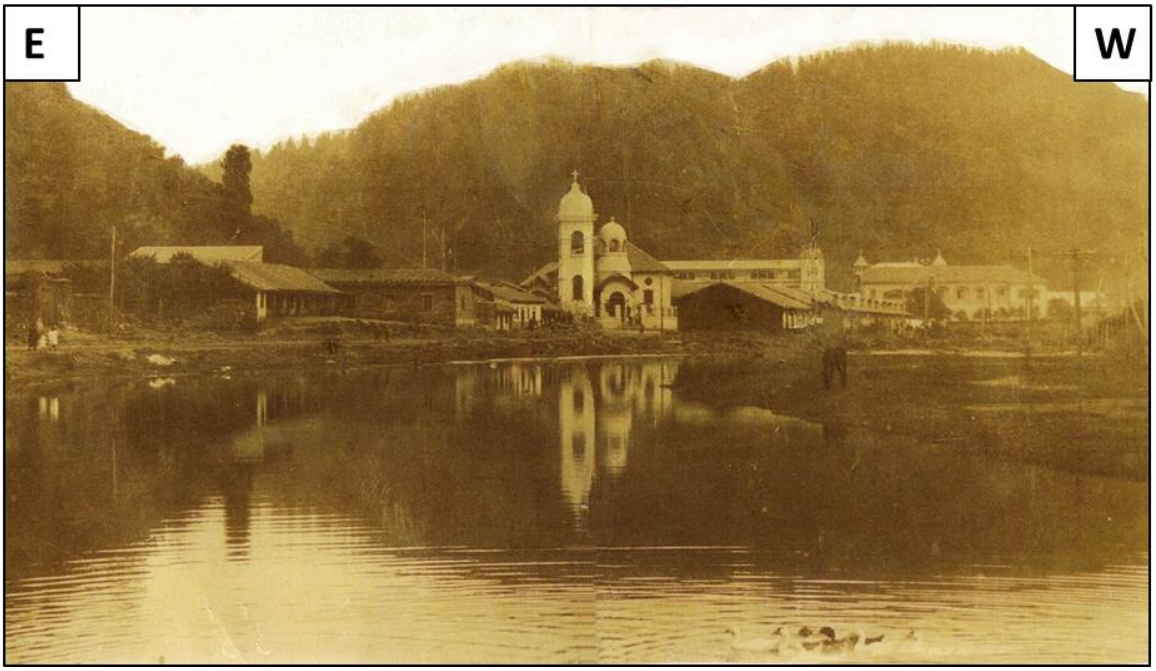


Anexo 9. *Representación de sondaje descrito en el estudio "Análisis sismorresistente mediante método modal espectral de un edificio habitacional ubicado en la comuna de Tomé". (Rodríguez, 2016)*

Anexo 10



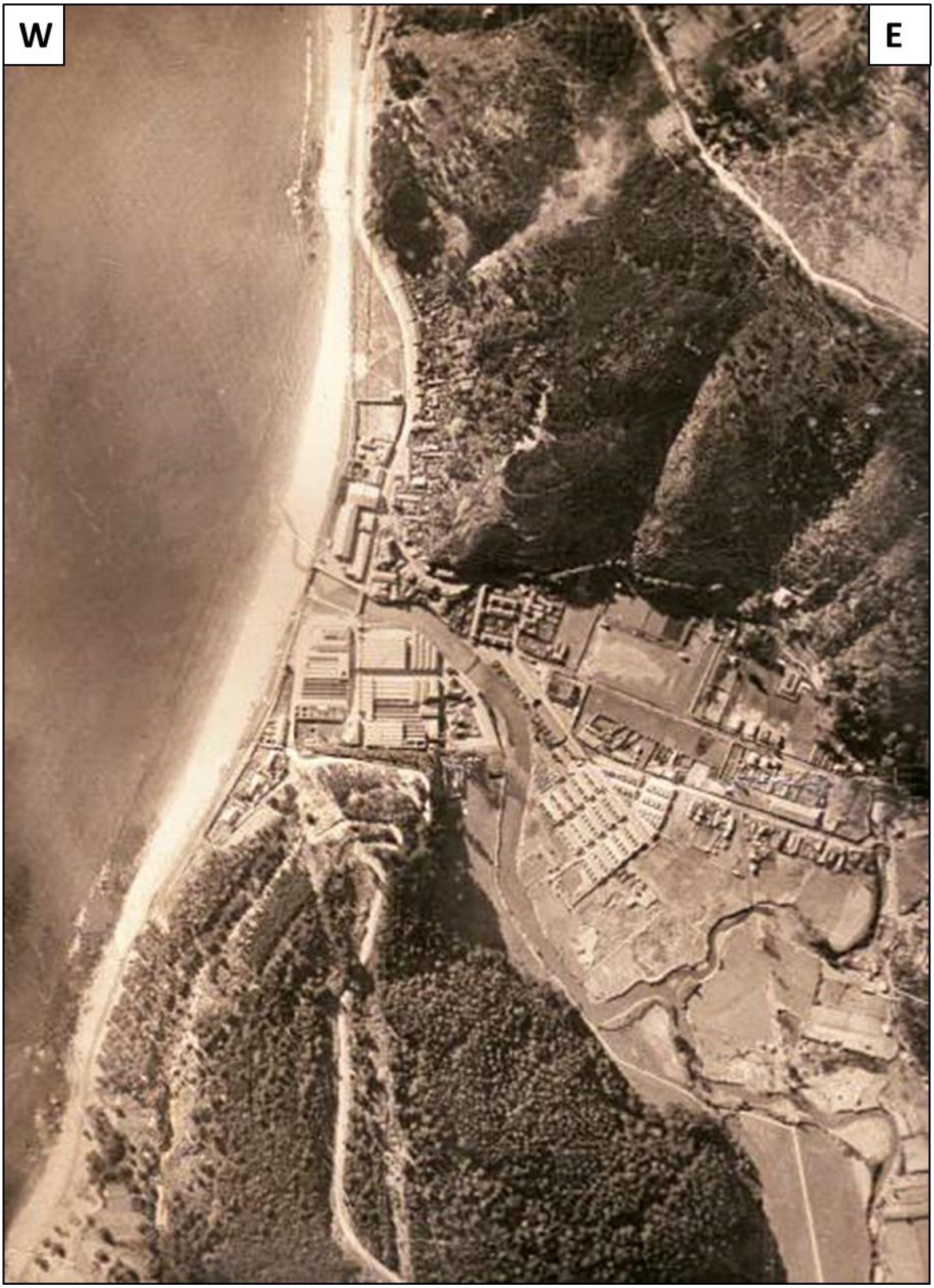
Anexo 10.1. *Fotografía de la desembocadura del estero Bellavista. Registro fotográfico del Museo Histórico de Tomé. Fecha estimada entre 1980 y 1910.*



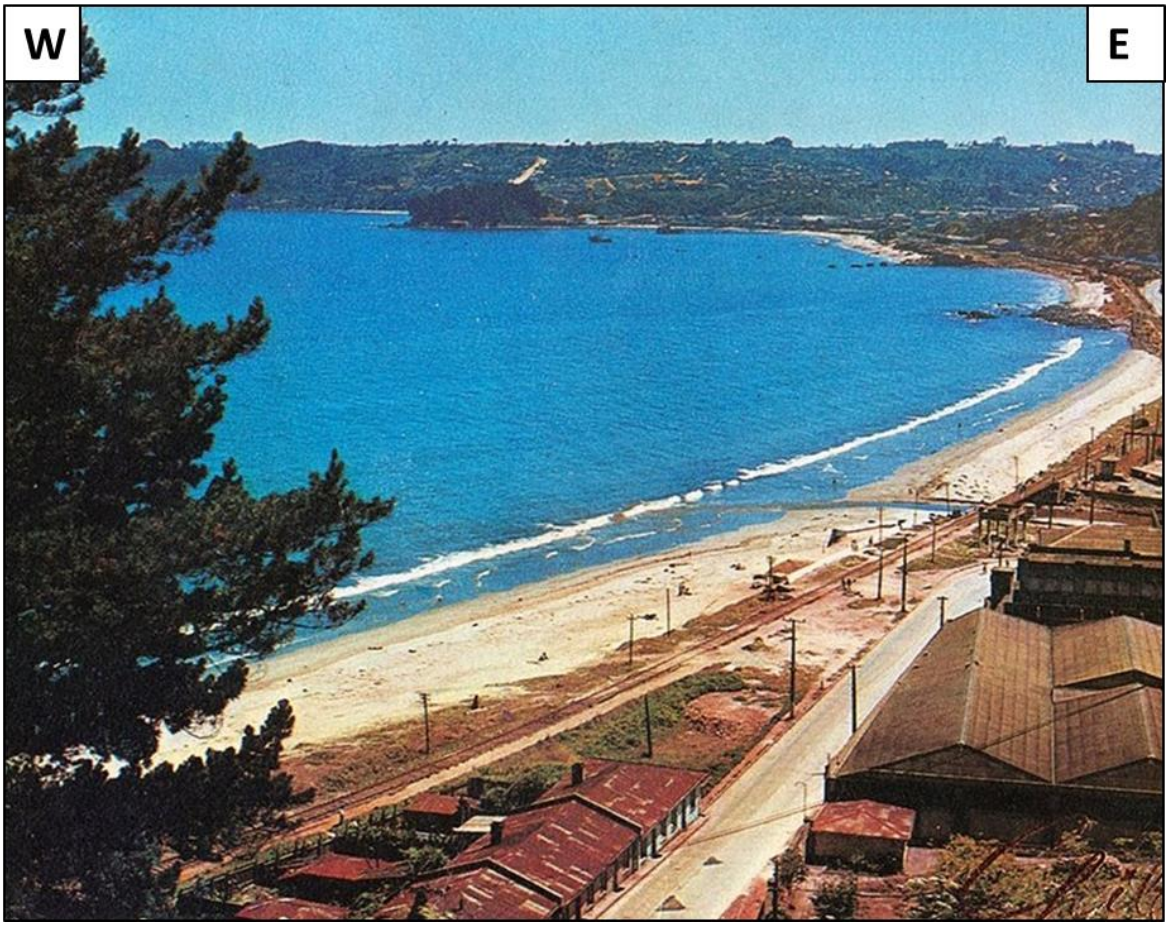
Anexo 10.2. *Fotografía de antigua laguna formada frente a iglesia Cristo Rey y Fábrica Bellavista. Registro fotográfico del Museo Histórico de Tomé. Fecha estimada alrededor de 1930.*



Anexo 10.3. *Fotografía de antigua laguna formada frente a iglesia Cristo Rey y Fábrica Bellavista, limitada al oeste por la línea férrea. Registro fotográfico del Museo Histórico de Tomé. Fecha estimada alrededor de 1930.*



Anexo 10.4. *Fotografía aérea de Bellavista. Registro fotográfico del Museo Histórico de Tomé. Fecha estimada alrededor de 1943.*



Anexo 10.5. *Fotografía de la desembocadura del estero Bellavista. Registro fotográfico del Museo Histórico de Tomé. Fecha estimada alrededor de 1970.*