



Análisis de vulnerabilidad y riesgos climáticos para las ciudades de Boquete, Dolega y Gualaca, Panamá

Autor: IHCantabria
15 de septiembre de 2024

LISTADO DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ACP	Autoridad del Canal de Panamá
AR5	Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
AR6	Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
ARAP	Autoridad de Recursos Acuáticos de Panamá
BID	Banco Interamericano para el Desarrollo
BLMM	Bosque Latifoliado Mixto Maduro
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CTCN	Climate Technology Centre and Network
ECMWF	Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio por sus siglas en inglés
EC-WSL	World Sea Levels from the European Commission
ESGF	Earth System Grid Federation
FVC	Fondo Verde para el Clima
GESLA3	Global Extreme Sea Level Analysis
GMC	Global Climate Model
HI	Heat Index o sensación térmica
ICES	Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles
IDAAN	Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados Nacionales
IGNTG	Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia"
IMHPA	Instituto de Meteorología e Hidrología de Panamá
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censo
IPC	Índice de Precios al Consumo
IPCC	Panel Intergubernamental Cambio Climático por sus siglas en inglés
JAXA	Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón por sus siglas en inglés
LULC	Usos y ocupación del suelo
MDT	Modelo Digital del Terreno
MiAMBIENTE	Ministerio de Ambiente de Panamá
MUSD \$	Millón de dólares americanos
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio por sus siglas en inglés
NCAR	Centro Nacional de Investigación Atmosférica
NMM	Nivel medio del mar
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos por sus siglas en inglés
PAE	Pérdida anual esperada
PMP	Pérdidas máximas probables
PNUMA	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP en sus siglas en inglés)
RCP	Trayectorias de concentración representativas en sus siglas en inglés

SbN	Soluciones basadas en la Naturaleza
SE	Servicio Ecosistémico
SSP	Trayectorias socioeconómicas compartidas en sus siglas en inglés
STRM	Shuttle Radar Topography Mission
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
USD \$	Dólar americano

ÍNDICE

1. RESUMEN EJECUTIVO	1
2. INTRODUCCIÓN	3
3. OBJETIVO	4
4. ÁREA DE ESTUDIO	5
5. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL RIESGO	8
6. DATOS DE PARTIDA	10
6.1. Modelo digital del terreno	10
6.2. Cobertura y usos del suelo	11
6.3. Información climática y escenarios de cambio climático	11
6.4. Datos socioeconómicos e información urbanística	14
7. EVALUACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS CLAVE PARA LA PROVISIÓN DE SERVICIOS A LA CIUDAD.....	16
7.1. Selección de los servicios ecosistémicos y de los ecosistemas que los proporcionan	16
7.2. Selección de los servicios ecosistémicos y de los ecosistemas que los proporcionan	17
7.2.1. Regulación hidrológica frente inundaciones	18
7.2.2. Regulación hidrológica frente sequía	18
7.3. Evaluación de los ecosistemas seleccionados.....	18
7.3.1. Localización espacial de los ecosistemas definidos	18
7.3.2. Evaluación de los ecosistemas	21
7.4. Identificación de áreas clave con alto potencial para la implementación de SbN.....	29
7.4.1. Conceptualización y caracterización de la relación SE – SbN	29
7.4.2. Modelado e identificación de áreas proveedoras de SE.....	30
8. ESTUDIO DE RIESGO POR ESCASEZ DE RECURSOS HÍDRICOS	37
8.1. Metodología de obtención del riesgo por escasez de recursos hídricos	37
8.2. Caracterización de la amenaza	38
8.2.1. Modelo hidrológico	38
8.2.2. Modelo de gestión de usos del agua	59
8.3. Caracterización de la vulnerabilidad.....	71
8.3.1. Densidad de población.....	71
8.3.2. Población sensible	75
8.3.3. Mujeres.....	79
8.3.4. Necesidades básicas insatisfechas (NBI)	82
8.4. Cálculo del riesgo	86
8.4.1. Metodología de obtención del riesgo estandarizado	86
8.4.2. Indicador de riesgo por escasez de recursos hídricos.....	87
9. ESTUDIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN FLUVIAL.....	93
9.1. Marco metodológico	93
9.2. Enfoque técnico	94
9.3. Caracterización de la amenaza	94
9.3.1. Selección del área de estudio y delimitación de las cuencas vertientes	94

9.3.2. Modelado hidráulico de la inundación.....	95
9.3.3. Resultados de la caracterización de la amenaza.....	100
9.4. Caracterización de la exposición.....	103
9.4.1. Exposición física.....	104
9.4.2. Exposición social.....	119
9.5. Caracterización de la vulnerabilidad.....	124
9.5.1. Vulnerabilidad física.....	124
9.5.2. Vulnerabilidad social.....	127
9.6. Cálculo del riesgo.....	128
9.6.1. Evaluación de los daños económicos por inundación.....	129
9.6.2. Evaluación de los daños sociales por inundación.....	139
10. ESTUDIO DE RIESGO POR OLA DE CALOR.....	144
10.1. Caracterización de la amenaza.....	144
10.2. Caracterización de la vulnerabilidad.....	146
10.2.1. Densidad de población.....	147
10.2.2. Población sensible.....	149
10.2.3. Mujeres.....	150
10.2.4. Necesidades básicas insatisfechas (NBI).....	152
10.2.5. Porcentaje de hogares sin aire acondicionado.....	155
10.2.6. Accesibilidad a los centros sanitarios.....	157
10.2.7. Zonas sin bosques o áreas verdes.....	160
10.3. Cálculo del riesgo.....	163
10.3.1. Metodología de obtención del riesgo estandarizado.....	163
10.3.2. Indicador de riesgo por ola de calor.....	164
11. ESTUDIO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS.....	167
11.1.1. Metodología de obtención del índice estandarizado de susceptibilidad por deslizamientos.....	167
11.1.2. Índice estandarizado de susceptibilidad por deslizamientos.....	168
12. CONCLUSIONES.....	171
12.1. Evaluación de los ecosistemas clave para la provisión de servicios a la ciudad.....	171
12.2. Estudio de riesgo por escasez de recursos hídricos.....	171
12.3. Estudio de riesgo por inundación fluvial.....	172
12.4. Estudio de riesgo por ola de calor.....	173
12.5. Estudio de susceptibilidad a deslizamientos.....	173
13. RECOMENDACIONES.....	174
14. BIBLIOGRAFÍA.....	175

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio definida para el análisis de vulnerabilidad y riesgo en Boquete. Fuente: IHCantabria, 2024.5

Figura 2. Área de estudio definida para el análisis de vulnerabilidad y riesgo en Dolega. Fuente: IHCantabria, 2024.	6
Figura 3. Área de estudio definida para el análisis de vulnerabilidad y riesgo en Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024.	7
Figura 4. Esquema conceptual del Quinto Informe de Evaluación - IE5 del IPCC. Fuente: IPCC, 2014.	8
Figura 5. Modelo Digital del Terreno (MDT) de Panamá facilitado por el IGNTG, y utilizado para el modelado de la inundación costera.	10
Figura 6. DEM STRM (30x30m). Fuente: IHCantabria, 2024.	10
Figura 7. Mapa de cobertura y usos del suelo 2021 de MiAMBIENTE. Fuente: IHCantabria, 2024.	11
Figura 8. Localización de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.	13
Figura 9. Variables topográficas (elevación/modelo digital del terreno, orientación de laderas, pendiente, distancia a la costa y distancia a cauces fluviales). Fuente: IHCantabria, 2024.	13
Figura 10. Mapa de usos y coberturas del suelo de bosque latifoliado mixto maduro y bosque de manglar para la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: MiAMBIENTE, 2021.	19
Figura 11. Mapa de unidades funcionales (laderas de drenaje y llanuras de inundación) para la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024.	20
Figura 12. Detalle de mapa de unidades funcionales (laderas de drenaje y llanuras de inundación) para la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024.	21
Figura 13. Esquema resumen de algoritmo RF y proceso <i>bagging</i> . Fuente: (Espinosa-Zuñiga, 2020).	22
Figura 14. Mapa de idoneidad del bosque latifoliado mixto maduro para la situación actual en la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024.	24
Figura 15. Mapa de idoneidad del bosque latifoliado mixto maduro para el escenario futuro SSP585 2050 en la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024.	25
Figura 16. EVI promedio en el año 2002 en la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024.	26
Figura 17. NDVI promedio en el año 2023 en la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024.	27
Figura 18. Árbol de decisiones para clasificación de las coberturas vegetales en: i) conservación pasiva (C1); ii) conservación activa (C2); iii) restauración activa (R1) y restauración intensiva (R2). Fuente: IHCantabria, 2024.	28
Figura 19. Áreas de conservación (pasiva y activa) para la cobertura bosque latifoliado mixto maduro en la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca en el escenario futuro SSP545 2050. Fuente: IHCantabria, 2024, 2024.	28
Figura 20. Mapa de SbN propuestas con bosque latifoliado mixto maduro para el SE de regulación hidrológica frente inundaciones en llanuras de inundación para la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca en el escenario futuro SS585 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.	31
Figura 21. Laderas de drenaje con potencial de generar escorrentía según factores topográficos, de permeabilidad y de uso para la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024.	32
Figura 22. Mapa de SbN propuestas con bosque latifoliado mixto maduro para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el control de escorrentía en la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca en el escenario futuro SSP585 2050. Fuente: IHCantabria.	33
Figura 23. Mapa de SbN propuestas con bosque latifoliado mixto maduro para el SE de regulación hidrológica frente sequía en llanuras de inundación para la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca en el escenario futuro SS585 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.	34
Figura 24. Laderas de drenaje con potencial de generar infiltración según factores topográficos, de permeabilidad y de uso para la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024.	35
Figura 25. Mapa de SbN propuestas con bosque latifoliado mixto maduro para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el aumento de la infiltración en la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca en el escenario futuro SSP585 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.	36
Figura 26. Comparación de caudales diarios medidos y simulados en escala logarítmica (izquierda) y caudales medidos vs. simulados en escala semilogarítmica (derecha) en la estación Peluca. Fuente: IHCantabria, 2015.	39

Figura 27. Cuencas hidrográficas oficiales existentes en el territorio de Panamá y su nomenclatura. Fuente: IHCantabria, 2024.....	40
Figura 28. Subcuencas consideradas en el territorio de Panamá. Fuente: IHCantabria, 2024.	41
Figura 29. Subcuencas consideradas en la cuenca de estudio, cuenca del río Chiriquí. Fuente: IHCantabria, 2024.	42
Figura 30. Usos del suelo de la cuenca de estudio, cuenca del río Chiriquí. Fuente: IHCantabria, 2024.	44
Figura 31. Número de curva (CN-II) de las subcuencas consideradas. Fuente: IHCantabria, 2024. ...	45
Figura 32. Precipitación media anual (mm/año) en las subcuencas consideradas para la situación actual y para los escenarios de cambio climático SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.	46
Figura 33. ETP media anual (mm/año) en las subcuencas consideradas para la situación actual y para los escenarios de cambio climático SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.	46
Figura 34. Estaciones hidrológicas consideradas. Fuente: IHCantabria, 2024.....	49
Figura 35. Regiones hidrológicamente homogéneas (en blanco aparecen las cuencas sin afloros). Fuente: Resumen técnico análisis regional de crecidas máximas de Panamá, periodo 1971-2006 (ETESA, 2008).	50
Figura 36. Caudales medios específicos (izquierda) y totales (derecha) observados (eje X) y simulados (eje Y). Fuente: IHCantabria, 2024.	51
Figura 37. Comparación de caudales Q2.33 observados, simulados, y los ajustes del régimen extremal disponibles por fachadas. Fuente: IHCantabria, 2024.....	52
Figura 38. Caudales Q2.33 específicos (izquierda) y totales (derecha) observados (eje X) y simulados (eje Y). Fuente: IHCantabria, 2024.	53
Figura 39. Caudal medio (m ³ /s) en las subcuencas consideradas para la situación actual y para los escenarios de cambio climático SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.	53
Figura 40. Caudal medio acumulado (m ³ /s) en las subcuencas consideradas para la situación actual y para los escenarios de cambio climático SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.	54
Figura 41. Serie mensual de precipitación (mm/mes) en la subcuenca 10811 que abastece a Boquete para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.....	55
Figura 42. Serie mensual de caudales naturales (m ³ /s) en la subcuenca 10811 que abastece a Boquete para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.....	55
Figura 43. Boxplot de precipitación (mm/mes) y caudales naturales (m ³ /s) en la subcuenca 10811 que abastece a Boquete para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	55
Figura 44. Serie mensual de precipitación (mm/mes) en el río Cochea que abastece a Dolega (subcuenca 10806) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.....	56
Figura 45. Serie mensual de caudales naturales (m ³ /s) en el río Cochea que abastece a Dolega (subcuenca 10806) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.....	56
Figura 46. Boxplot de precipitación (mm/mes) y caudales naturales (m ³ /s) en el río Cochea que abastece a Dolega (subcuenca 10806) para la situación actual. para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	56
Figura 47. Serie mensual de precipitación (mm/mes) en el río Majagua que abastece a Dolega (subcuenca 10804) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.....	57
Figura 48. Serie mensual de caudales naturales (m ³ /s) en el río Majagua que abastece a Dolega (subcuenca 10804) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.....	57
Figura 49. Boxplot de precipitación (mm/mes) y caudales naturales (m ³ /s) en el río Majagua que abastece a Dolega (subcuenca 10804) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	57
Figura 50. Serie mensual de precipitación (mm/mes) en el lago Barrigón que abastece a Gualaca (subcuenca 10807) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.....	58
Figura 51. Serie mensual de caudales naturales (m ³ /s) en el lago Barrigón que abastece a Gualaca (subcuenca 10807) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.....	58
Figura 52. Boxplot de precipitación (mm/mes) y caudales naturales (m ³ /s) en el lago Barrigón que abastece a Gualaca (subcuenca 10807) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	58
Figura 53. Esquema de funcionamiento del modelo de gestión del agua. Fuente: IHCantabria, 2024.	60
Figura 54. Localización de las plantas potabilizadoras, tanques de almacenamiento, tomas de agua, red de tuberías y tipo de área servida. Fuente: IHCantabria, 2024.....	62
Figura 55. Localización de las demandas de agua en la cuenca río Chiriquí. Fuente: IHCantabria, 2024.	64
Figura 56. Serie mensual de caudales naturales y modificados (m ³ /s) en la subcuenca 10811 que abastece a Boquete para la situación actual. Fuente: Elaboración propia, 2023.....	66

Figura 57. Boxplot de caudales naturales y modificados (m^3/s) en la subcuenca 10811 que abastece a Boquete para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	66
Figura 58. Serie mensual de caudales naturales y modificados (m^3/s) en el río Cochea que abastece a Dolega (subcuenca 10806) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	67
Figura 59. Boxplot de caudales naturales y modificados (m^3/s) en el río Cochea que abastece a Dolega (subcuenca 10806), para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	67
Figura 60. Serie mensual de caudales naturales y modificados (m^3/s) en el río Majagua que abastece a Dolega (subcuenca 10804) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	68
Figura 61. Boxplot de caudales naturales y modificados (m^3/s) en el río Majagua que abastece a Dolega (subcuenca 10804), para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	68
Figura 62. Serie mensual de caudales naturales y modificados (m^3/s) en el río Caldera que abastece a Gualaca (subcuenca 10807) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	69
Figura 63. Boxplot de caudales naturales y modificados (m^3/s) en el río Caldera que abastece a Gualaca (subcuenca 10807), para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	69
Figura 64. Densidad de población en el área de estudio de Boquete. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.	73
Figura 65. Densidad de población en el área de estudio de Dolega. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.	74
Figura 66. Densidad de población en el área de estudio de Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.	75
Figura 67. Porcentaje de población sensible en el área de estudio de Boquete. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.	76
Figura 68. Porcentaje de población sensible en el área de estudio de Dolega. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.	77
Figura 69. Porcentaje de población sensible en el área de estudio de Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.	78
Figura 70. Porcentaje de mujeres en el área de estudio de Boquete. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.	80
Figura 71. Porcentaje de mujeres en el área de estudio de Dolega. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.	81
Figura 72. Porcentaje de mujeres en el área de estudio de Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.	82
Figura 73. Índice agregado de NBI en el área de estudio de Boquete. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.	84
Figura 74. Índice agregado de NBI en el área de estudio de Dolega. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.	85
Figura 75. Índice agregado de NBI en el área de estudio de Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.	86
Figura 76. Riesgo por escasez de recursos hídricos en el área de estudio de Boquete para los tres escenarios climáticos analizados: situación actual y horizontes 2030 y 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.	88
Figura 77. Riesgo por escasez de recursos hídricos en el área de estudio de Dolega para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	89
Figura 78. Riesgo por escasez de recursos hídricos en el área de estudio de Dolega para el horizonte 2030 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.	90
Figura 79. Riesgo por escasez de recursos hídricos en el área de estudio de Dolega para el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.	91
Figura 80. Riesgo por escasez de recursos hídricos en el área de estudio de Gualaca para los tres escenarios climáticos analizados: situación actual y horizontes 2030 y 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.	92
Figura 81. Esquema amenaza-exposición-vulnerabilidad-riesgo. Fuente: IHCantabria, 2024.	94
Figura 82. Cuenca vertientes al área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.	95
Figura 83. DEM STRM (30x30m). Fuente: IHCantabria, 2024.	96
Figura 84. Puntos de entrada de caudales en el modelo hidráulico. Fuente: IHCantabria, 2024.	97
Figura 85. Caudales pico en los puntos de entrada de caudal en el modelo hidráulico para los eventos de periodo de retorno de 100 años en los diferentes escenarios climáticos. Fuente: IHCantabria, 2024.	98
Figura 86. Hietogramas de cálculo en las cuencas vertientes al área de estudio para el evento de 100 años de periodo de retorno en situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	99

Figura 87. Puntos de inundación de viviendas reportadas. Fuente: IHCantabria, 2024, con información proporcionada por SINAPROC, 2023.	100
Figura 88. Mapa de profundidad de la lámina de agua para el evento de 100 años de periodo de retorno en la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	101
Figura 89. Mapa de profundidad de la lámina de agua para el evento de 100 años de periodo de retorno en el horizonte 2030 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.	102
Figura 90. Mapa de profundidad de la lámina de agua para el evento de 100 años de periodo de retorno en el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.	103
Figura 91. Distribución de la superficie edificada y la población según categorías de calidad constructiva. Fuente: IHCantabria, 2024.	106
Figura 92. Distribución geográfica de la calidad constructiva de las edificaciones residenciales. Fuente: IHCantabria, 2024.	107
Figura 93. Infraestructuras críticas del área de estudio por categoría. Fuente: IHCantabria, 2024.	109
Figura 94. Infraestructuras críticas del área de estudio por categoría. Fuente: IHCantabria, 2024.	110
Figura 95. Superficie edificada expuesta (ha) para cada periodo de retorno y escenario climático. Los valores relativos se calculan respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.	112
Figura 96. Valor económico expuesto (MUSD \$) para cada periodo de retorno y escenario climático. Los valores relativos se calculan respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.	113
Figura 97. Valor económico expuesto de las edificaciones (MUSD \$) para el evento de 100 años de periodo de retorno en la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	114
Figura 98. Valor económico expuesto de las edificaciones (MUSD \$) para el evento de 100 años de periodo de retorno en el horizonte 2030 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.	115
Figura 99. Valor económico expuesto de las edificaciones (MUSD \$) para el evento de 100 años de periodo de retorno en el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.	116
Figura 100. Valor económico expuesto de IC (MUSD \$) para cada periodo de retorno y escenario climático. Los valores relativos se calculan respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.	117
Figura 101. Valor económico expuesto de las IC (MUSD \$) para el evento de 100 años de periodo de retorno en la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	118
Figura 102. Valor económico expuesto de las IC (MUSD \$) para el evento de 100 años de periodo de retorno en el horizonte 2030 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.	119
Figura 103. Distribución geográfica de la densidad de población en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.	120
Figura 104. Población expuesta para cada periodo de retorno y escenario climático. Los valores relativos se calculan respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.	121
Figura 105. Población expuesta (hab./ha) para el evento de 100 años de periodo de retorno en la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	122
Figura 106. Población expuesta (hab./ha) para el evento de 100 años de periodo de retorno en el horizonte 2030 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.	123
Figura 107. Población expuesta (hab./ha) para el evento de 100 años de periodo de retorno en el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.	124
Figura 108. Funciones de daño para calcular los riesgos de inundación. Fuente: IHCantabria, 2024.	126
Figura 109. Funciones de daño para infraestructuras críticas de tipo I, II y III. Fuente: IHCantabria, 2024.	127
Figura 110. Resultados de daños directos por inundación en edificaciones. Valores relativos respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.	130
Figura 111. Distribución geográfica de la pérdida económica en edificaciones para 100 años de periodo de retorno (USD \$/m ²) en la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	131
Figura 112. Distribución geográfica de la pérdida económica en edificaciones para 100 años de periodo de retorno (USD \$/m ²) en el horizonte 2030 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.	132
Figura 113. Distribución geográfica de la pérdida económica en edificaciones para 100 años de periodo de retorno (USD \$/m ²) en el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.	133
Figura 114. Resultados de daños directos por inundación en IC. Valores relativos respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.	134
Figura 115. Distribución geográfica de la pérdida económica en IC para 100 años de periodo de retorno (USD \$/m ²) en la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.	135
Figura 116. Distribución geográfica de la pérdida económica en IC para 100 años de periodo de retorno (USD \$/m ²) en el horizonte 2030 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.	136
Figura 117. Curva de excedencia de pérdidas económicas. Fuente: IHCantabria, 2024.	137

Figura 118. Comparación de resultados de daño económico en los escenarios climáticos considerados, para toda el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.....	138
Figura 119. Comparación de resultados de daño social en los escenarios climáticos considerados, para toda el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.....	140
Figura 120. Distribución geográfica de la pérdida de vidas humanas (hab./km ²) para 100 años de periodo de retorno en la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.....	141
Figura 121. Distribución geográfica de la pérdida de vidas humanas (hab./km ²) para 100 años de periodo de retorno en el horizonte 2030 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.....	142
Figura 122. Distribución geográfica de la pérdida de vidas humanas (hab./km ²) para 100 años de periodo de retorno en el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.....	143
Figura 123. Distribución geográfica de la sensación térmica media anual (°C) en el área de estudio para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.....	145
Figura 124. Distribución geográfica de la sensación térmica media (°C) en el área de estudio para el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.....	146
Figura 125. Densidad de población en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.....	148
Figura 126. Porcentaje de población sensible en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.....	149
Figura 127. Porcentaje de mujeres en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.....	152
Figura 128. Índice agregado de NBI en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.....	155
Figura 129. Porcentaje de hogares sin aire acondicionado en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.....	157
Figura 130. Distancia a un centro sanitario en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.....	158
Figura 131. Áreas de bosque, áreas verdes y arbolado urbano en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información de MiAMBIENTE, 2021.....	162
Figura 132. Porcentaje de áreas sin bosque o áreas verdes en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.....	163
Figura 133. Riesgo por ola de calor en el área de estudio en la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.....	165
Figura 134. Riesgo por ola de calor en el área de estudio para el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.....	166
Figura 135. Índice normalizado de susceptibilidad por deslizamiento en el distrito de Gualaca para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.....	169
Figura 136. Índice normalizado de susceptibilidad por deslizamiento en el distrito de Gualaca para para el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.....	170

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de las combinaciones de trayectorias socioeconómicas compartidas (SSPs) y trayectorias de concentración representativas (RCPs). Fuente: IHCantabria, 2024, con información del IPPC, 2021.....	12
Tabla 2. Conceptualización de las medidas de adaptación basadas en Naturaleza para los servicios ecosistémicos considerados para el área de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024.....	29
Tabla 3. Características principales de las subcuencas de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.....	43
Tabla 4. Número de curva asignado por uso del suelo. Fuente: IHCantabria, 2024.....	43
Tabla 5. Ecuaciones para la obtención del Q _{máx} (promedio de las crecidas anuales equivalente al Q _{2.33}) según región hidrológicamente homogénea. Fuente: Resumen técnico análisis regional de crecidas máximas periodo 1971-2006 (ETESA, 2008).....	52
Tabla 6. Resultados del modelo hidrológico en las principales subcuencas que abastecen a Boquete (10811), Dolega (10806 y 10804) y Gualaca (10807) para la situación actual y los escenarios SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.....	59
Tabla 7. Demandas de agua para consumo humano urbano y población abastecida de las plantas potabilizadoras y tanques de almacenamiento existentes en la cuenca río Chiriquí. Fuente: IHCantabria, 2024.....	62

Tabla 8. Características principales de los embalses considerados en el modelo de gestión.....	64
Tabla 9. Demandas de agua consideradas en la cuenca del río Chiriquí. Fuente: IHCantabria, 2024.	65
Tabla 10. Resultados del modelo de gestión en las principales subcuencas que abastecen a Boquete (10811), Dolega (10806 y 10804) y Gualaca (10807) para la situación actual y los escenarios SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.....	70
Tabla 11. Garantía de satisfacción de las demandas de las plantas potabilizadoras que obtienen agua para consumo humano en las áreas urbanas de Boquete, Dolega y Gualaca para la situación actual y los escenarios SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.	70
Tabla 12. Déficit hídrico para consumo humano en la planta potabilizadora de Los Algarrobos para la situación actual y los escenarios SSP585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.	71
Tabla 13. Variables y pesos que componen el índice agregado de NBI para los hogares del área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.	83
Tabla 14. Niveles de riesgo considerados. Fuente: IHCantabria, 2024.	87
Tabla 15. Indicadores de amenaza y vulnerabilidad frente a la escasez de recursos hídricos. Fuente: IHCantabria, 2024.	87
Tabla 16. Caudales pico en los puntos de entrada de caudal en el modelo hidráulico. Fuente: IHCantabria, 2024.	98
Tabla 17. Coeficientes de rugosidad de Manning para diferentes usos del suelo y vegetación. Fuente: IHCantabria, 2024, con información de MiAMBIENTE, 2021.	99
Tabla 18. Distribución de área y población según categoría de calidad constructiva de las edificaciones. Fuente: IHCantabria, 2024.....	107
Tabla 19. Valores de reposición según calidad constructiva, y valor total en millones de dólares (MUSD \$), de las edificaciones residenciales inventariadas. Fuente: IHCantabria, 2024.	108
Tabla 20. Inventario de infraestructuras críticas del área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024. ...	110
Tabla 21. Valores de reposición según categoría, y valor total en millones de dólares (MUSD \$), para las infraestructuras críticas del área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.	111
Tabla 22. Superficie edificada expuesta (ha) y valor económico expuesto (MUSD \$) para cada periodo de retorno y escenario climático. Valores relativos respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.	111
Tabla 23. Número de IC expuestas y el valor económico expuesto de IC (MUSD \$) para cada periodo de retorno y escenario climático. Valores relativos respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.	117
Tabla 24. Población expuesta para cada periodo de retorno y escenario climático. Valores relativos respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.	121
Tabla 25. Funciones de daño en función de la calidad constructiva de las edificaciones. Fuente: IHCantabria, 2024.	125
Tabla 26. Funciones de daño para las diferentes categorías de infraestructuras críticas. Fuente: IHCantabria, 2024.	126
Tabla 27. Resultados de daños directos por inundación en edificaciones. Valores relativos respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.	129
Tabla 28. Resultados de daños directos por inundación en IC. Valores relativos respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.	134
Tabla 29. Resultados de daños económicos por inundación. Valores relativos respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.	137
Tabla 30. Resultados de daños sociales por inundación. Valores relativos respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.	139
Tabla 31. Variables y pesos que componen el índice agregado de NBI para los hogares del área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.	154
Tabla 32. Niveles de riesgo considerados. Fuente: IHCantabria, 2024.	164
Tabla 33. Indicadores de amenaza y vulnerabilidad frente a las olas de calor. Fuente: IHCantabria, 2024.	164
Tabla 34. Clasificación cualitativa de los valores del Índice Normalizado de Susceptibilidad frente a Deslizamientos. Fuente: IHCantabria, 2024.	169

1. RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento, elaborado en el marco del proyecto Nature4Cities (N4C) liderado por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), analiza la vulnerabilidad y el riesgo climático en las áreas urbanas de Boquete, Dolega y Gualaca, Chiriquí, Panamá. Este proyecto busca implementar Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) como herramientas para reducir riesgos asociados al cambio climático y fomentar la sostenibilidad en áreas urbanas. El enfoque está en integrar estas soluciones en la planificación territorial, fortaleciendo las capacidades locales y promoviendo la co-creación de conocimiento con actores clave Boquete, Dolega y Gualaca, en la provincia de Chiriquí, destacan por su riqueza natural y su importancia agroproductiva. Boquete, conocido por su café y ecoturismo, alberga bosques nubosos y el Parque Nacional Volcán Barú, esenciales para la regulación hídrica. Dolega, en una zona de transición, combina agricultura y desarrollo residencial, con ríos clave para el control de caudales. Gualaca es rica en recursos hídricos y alberga proyectos hidroeléctricos, con ecosistemas que protegen la biodiversidad. Juntas, estas áreas son fundamentales para el desarrollo sostenible y la gestión del agua en la región.

El análisis identifica cuatro principales amenazas hidroclimáticas para esta área: escasez de recursos hídricos, inundaciones fluviales, olas de calor y deslizamientos, evaluadas desde el presente hasta escenarios futuros con cambio climático.

En términos de escasez de recursos hídricos, el área de Boquete posee suficiente agua superficial para satisfacer las demandas actuales, tanto en el escenario climático actual como en los horizontes a 2030 y 2050, lo que sugiere un bajo riesgo en cuanto a disponibilidad de recursos hídricos. Sin embargo, los problemas de infraestructura en la red de distribución y el abastecimiento de agua potable impiden que el agua llegue de manera eficiente a toda la población, sobre todo en zonas turísticas como El Francés y Alto Boquete, que experimentan un crecimiento estacional debido al turismo. En el caso de Dolega, el riesgo de escasez es bajo en la actualidad, pero se proyecta que aumentará, especialmente en los corregimientos de Los Anastacios y Los Algarrobos, donde la planta de tratamiento enfrenta un déficit hídrico progresivo, lo que incrementará el riesgo hacia 2030 y 2050 debido a la reducción de precipitaciones y el aumento de temperaturas debido al cambio climático. En Gualaca, el riesgo de escasez hídrica es bajo para todos los escenarios analizados, dado que el recurso disponible en el Lago Barrigón es suficiente para abastecer la demanda. No obstante, la planta de tratamiento presenta problemas de capacidad para cubrir las necesidades de la población, particularmente en los meses de verano.

Respecto al riesgo por inundación fluvial, el análisis para Boquete indica que las zonas más vulnerables son Los Naranjos y Bajo Boquete, donde el río Caldera desborda en eventos extremos. Con el cambio climático, se espera un incremento leve de la intensidad de los eventos de precipitación, lo que resultará en un aumento en los daños económicos asociados a inundaciones.

En relación con el riesgo de olas de calor, el distrito de Dolega es el más afectado, con un riesgo medio en la situación actual, que se proyecta a aumentar considerablemente para el 2050 debido a la sensación térmica más alta y la falta de infraestructura adaptada, como viviendas sin techos adecuados y la escasez de espacios verdes urbanos. Esto incrementará el riesgo para la población, especialmente en áreas como Los Algarrobos, Los Anastacios y Dolega Cabecera.

Finalmente, Gualaca es una zona susceptible a deslizamientos, especialmente en áreas como Gualaca Cabecera y Hornito, donde las infraestructuras críticas, como escuelas, infraestructura de

abastecimiento de agua y vías de comunicación, están ubicadas en zonas de alto riesgo, y el cambio climático podría aumentar esta susceptibilidad. El cambio climático podría aumentar la vulnerabilidad a deslizamientos en estas zonas, lo que afectaría la seguridad y la conectividad en el distrito.

Es fundamental implementar SbN que integren medidas estructurales y no estructurales para gestionar los riesgos climáticos. Estas soluciones no solo permiten abordar amenazas específicas, sino que también aportan beneficios múltiples, como la mejora de la calidad del agua, la regulación de la temperatura urbana y la creación de espacios verdes para la población. El bosque latifoliado mixto maduro en la cuenca del río Chiriquí juega un papel crucial en la regulación hidrológica de la región, siendo fundamental para la mitigación tanto de inundaciones como de sequías. Este ecosistema facilita la interceptación y almacenamiento de agua, lo que reduce significativamente la escorrentía superficial, y su sistema radicular, junto con la capa de materia orgánica, promueve la infiltración y recarga de acuíferos durante períodos de escasez hídrica. La conservación y restauración de estos ecosistemas son esenciales para una mejor gestión del agua y para fortalecer la mitigación de riesgos asociados a fenómenos hidrológicos extremos

2. INTRODUCCIÓN

Esta evaluación se realiza en el marco del proyecto Nature4Cities, implementado por el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), financiado por el Fondo Verde para el Clima (FVC) y cofinanciado por el programa de la Unión Europea Euroclima+. Este proyecto regional, implementado en el área urbana de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca y en otras 12 ciudades de la región, tiene por objetivo reducir la vulnerabilidad al cambio climático de las áreas urbanas a través de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN).

Para lograr este propósito, es necesario un proceso participativo que permita la co-creación de conocimientos y así facilitar la incorporación de todos los actores y las actoras en el proceso de diagnóstico de los riesgos climáticos, exploración de soluciones y selección de las SbN a implementar. De esta manera se puede apoyar la toma de decisiones en las ciudades a través de la integración de la vulnerabilidad y riesgos en la planificación urbana para asegurar el escalonamiento de las SbN y sus múltiples co-beneficios vinculados al buen uso de los ecosistemas urbanos y periurbanos.

En este contexto, el objetivo de la evaluación es identificar, en función de las problemáticas urbanas, los principales riesgos e impactos climáticos para poder seleccionar puntos, áreas y grupos críticos para la acción. Así se podrá conocer la exposición y la sensibilidad de las personas y grupos sociales, de las infraestructuras y de los servicios de los ecosistemas. Esta evaluación debe ser realizada sobre la base de los datos e información existente en cada ciudad, tanto de los riesgos e impactos climáticos actuales como futuros y debe ser espacialmente explícita y sensible a la variable género. Además, debe cubrir las zonas urbanas, peri-urbanas, rurales y las cuencas de las ciudades para así poder identificar las causas de los peligros y las consecuencias de los impactos sociales, ambientales y económicos.

El principal objetivo que se busca con este tipo de evaluaciones es el de disponer de información útil para la exploración e identificación de las SbN, el conocimiento de las escalas y niveles de decisión implicados y como insumo para el intercambio y validación de la definición, implementación e integración de SbN en el contexto de la ciudad. No se trata de realizar nuevos diagnósticos, sino más bien poner a disposición de todas las personas e instituciones involucradas la información existente y aquella que es necesaria para la integración de la vulnerabilidad y los riesgos climáticos en el ordenamiento urbano y la toma de decisiones.

La evaluación está dirigida principalmente a personal técnico, asesores y consultores de los gobiernos locales y otros actores clave a nivel de la ciudad tanto del sector público, la sociedad civil y el sector privado. Al mismo tiempo, los métodos y hallazgos de la evaluación tratan de integrar y asegurar sinergias con otras iniciativas existentes en las ciudades. Además, a nivel local y nacional, los gobiernos e instituciones, se pueden beneficiar para mejorar y crear capacidad e integrar las metodologías y hallazgos para su replicación y escalamiento a otras ciudades.

3. OBJETIVO

Tomando como referencia los enfoques planteados por el Proyecto Nature4Cities, así como los lineamientos de la gestión de cambio climático en Panamá, y las necesidades y capacidades locales, se plantean los siguientes objetivos generales para el análisis de vulnerabilidad y riesgo climáticos, en el marco de un proceso de consulta con los actores del grupo de trabajo de esta iniciativa:

- Identificar información que aporte al conocimiento sobre la vulnerabilidad y el riesgo de cambio climático en Chiriquí, mediante una articulación nacional y local, y generar criterios para las capacidades institucionales y los procesos de planificación territorial.
- Identificar los puntos o áreas que destacan por su alto nivel de riesgo dada su exposición y su sensibilidad socioeconómica ante las amenazas hidroclimáticas que se manifiestan como eventos dañinos exacerbados por el efecto del cambio climático, señalando las áreas, los grupos de población e infraestructuras críticas que implican la necesidad de acciones de SbN.

Para la consecución de estos objetivos generales se establecen, a su vez, los siguientes objetivos específicos:

- Conocer las amenazas hidroclimáticas actuales y futuras que impactan en los sistemas de interés considerados por el proyecto (población, viviendas e infraestructuras críticas) como resultado del análisis del clima del pasado, actual y futuro (proyecciones de cambio climático).
- Identificar y evaluar cuándo y dónde ocurren los impactos de la variabilidad climática y el cambio climático.
- Identificar áreas, grupos sociales e infraestructuras vulnerables a los impactos climáticos y las causas de su vulnerabilidad.
- Conocer las principales medidas y acciones estructurales y no estructurales llevadas a cabo en la ciudad con el objetivo de adaptarse a los impactos climáticos.
- Conocer cuáles son los mecanismos generadores de riesgo a través de la visualización de la cadena de impactos para cada riesgo considerado.
- Obtener una cartografía de riesgos (mapas de amenaza, de vulnerabilidad y de riesgos) que permitan obtener una comprensión de la situación de riesgo climático actual y futuro de forma rápida y sencilla.
- Seleccionar y evaluar los ecosistemas y determinar el servicio ecosistémico que ayuda a la adaptación al cambio climático.
- Identificar áreas proveedoras de los servicios ecosistémicos clave con alto potencial para la implementación de SbN.

4. ÁREA DE ESTUDIO

Se han delimitado tres áreas de estudio en las áreas urbanas de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca, en Chiriquí, en los que se evalúan los diferentes riesgos que a cada una de ellas les afectan.

El área de estudio para el análisis de vulnerabilidad y riesgos climáticos en Boquete comprende las zonas urbanas de los corregimientos de Alto Boquete, Bajo Boquete, Jaramillo y Los Naranjos (Figura 1). Este área tiene una extensión de 14 ha y una población, según el censo nacional de 2023, de 9169 habitantes.

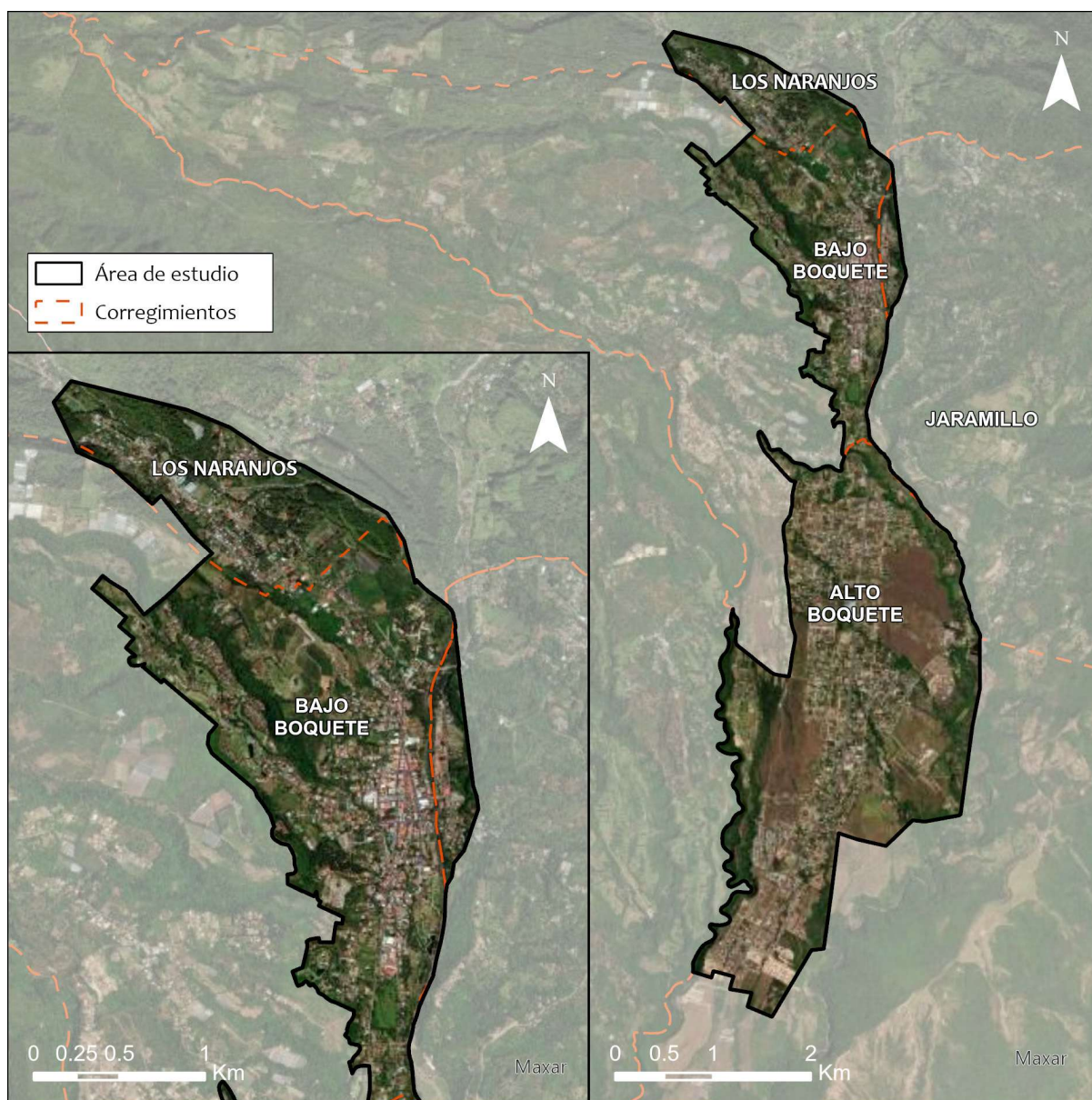


Figura 1. Área de estudio definida para el análisis de vulnerabilidad y riesgo en Boquete. Fuente: IHCantabria, 2024.

El área de estudio para el análisis de vulnerabilidad y riesgos climáticos en Dolega comprende las zonas urbanas de los corregimientos de Los Algarrobos, Los Anastacios y Dolega Cabecera (Figura 1). Este área tiene una extensión de 22 ha y una población, según el censo nacional de 2023, de 22047 habitantes.

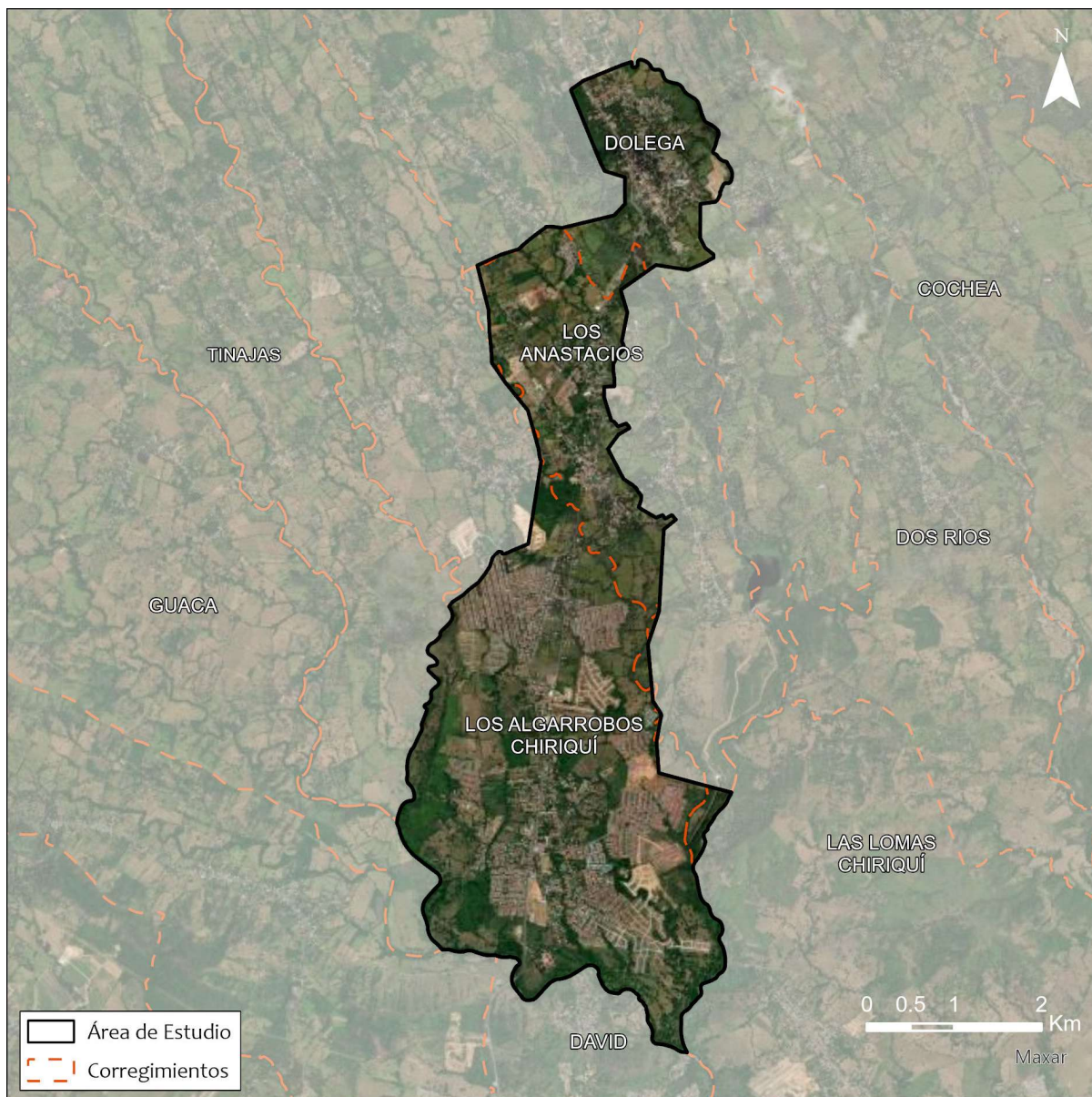


Figura 2. Área de estudio definida para el análisis de vulnerabilidad y riesgo en Dolega. Fuente: IHCantabria, 2024.

El área de estudio para el análisis de vulnerabilidad y riesgos climáticos en Gualaca se centra en el centro urbano del corregimiento de Gualaca Cabecera (Figura 1). Este área tiene una extensión de 5 ha y una población, según el censo nacional de 2023, de 3763 habitantes.

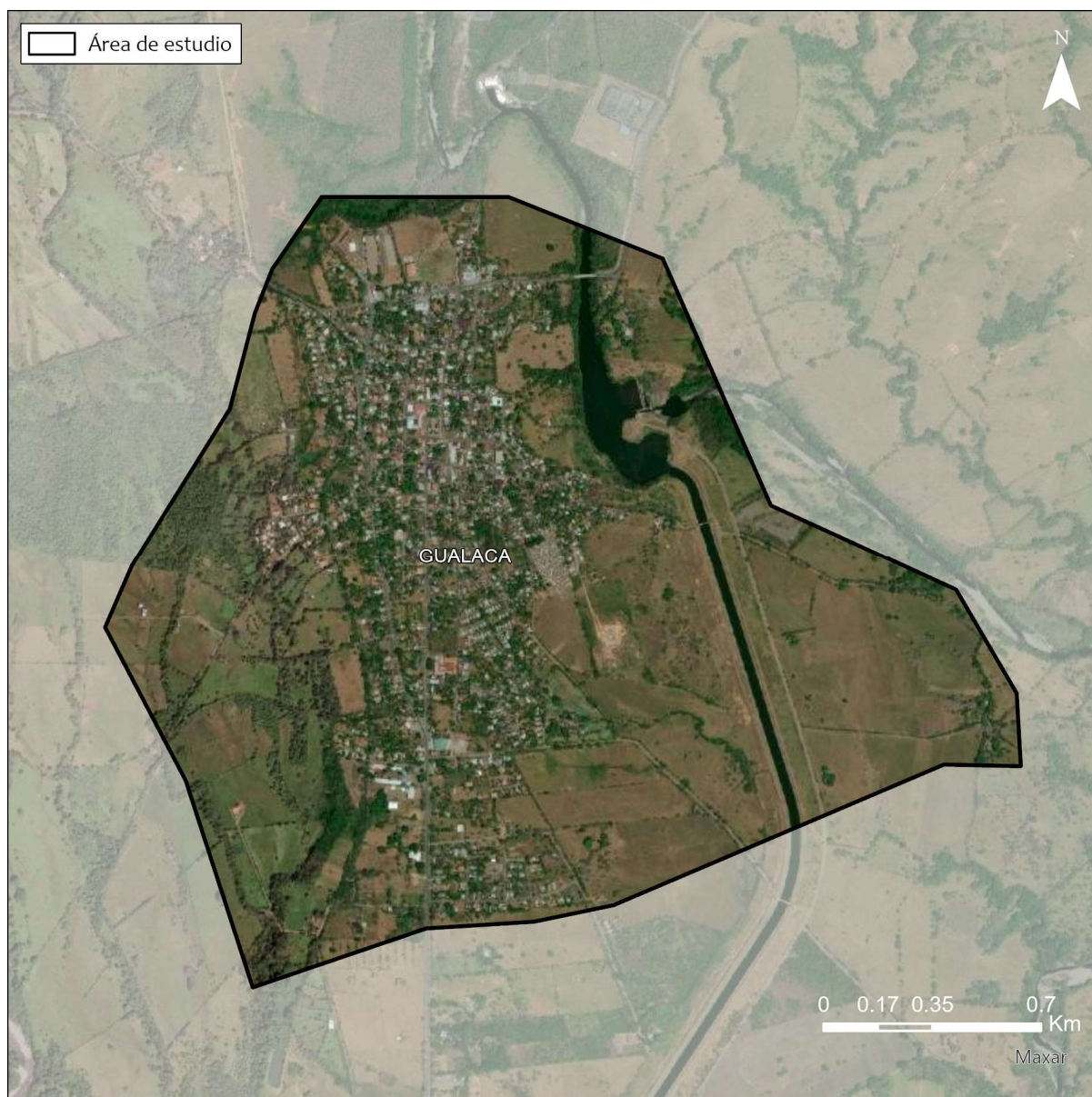


Figura 3. Área de estudio definida para el análisis de vulnerabilidad y riesgo en Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024.

5. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL RIESGO

Para recopilar los datos necesarios para la realización del análisis de vulnerabilidad, se ha usado un enfoque que combina tanto métodos cuantitativos, incluyendo modelos y escenarios climáticos, cartografía y sistemas de información geográfica, como enfoques socio-geográficos, complementados con consultas a la comunidad a través de los grupos de actores clave y de entrevistas al personal e instituciones del gobierno local.

La evaluación del riesgo frente al cambio climático se ha realizado con el enfoque propuesto por el Grupo Intergubernamental de Cambio Climático en su quinto informe de evaluación (IPCC, 2014), contemplando el riesgo como el resultado de la interacción de la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad (Figura 7).

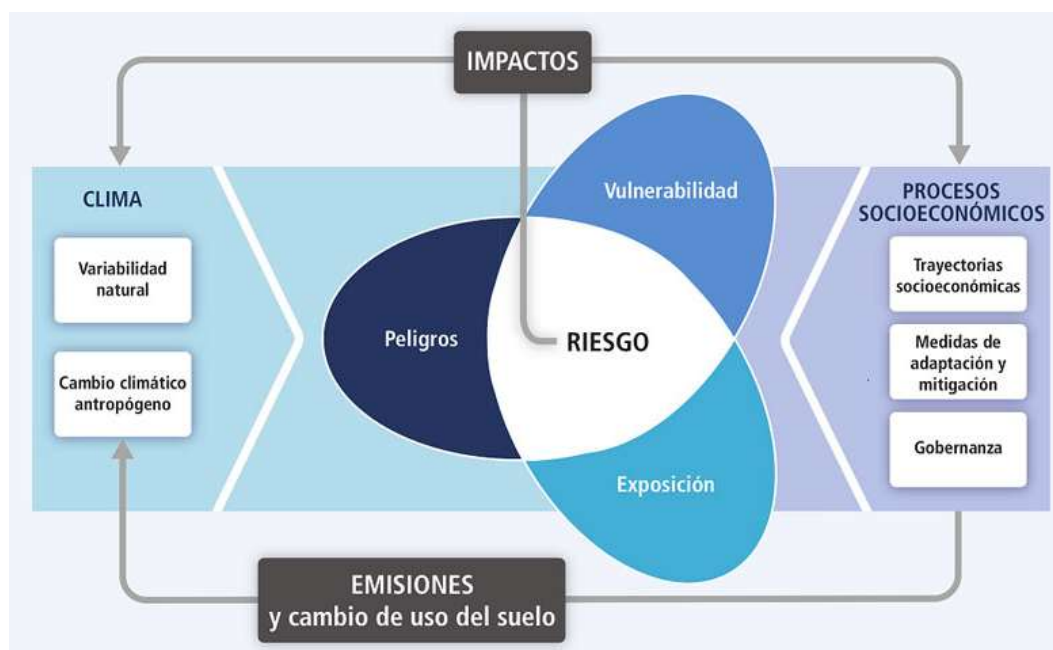


Figura 4. Esquema conceptual del Quinto Informe de Evaluación - IE5 del IPCC. Fuente: IPCC, 2014.

Este estudio aborda el concepto del riesgo desde una perspectiva integral, y lo concibe como la confluencia espacial y temporal de eventos peligrosos actuando sobre infraestructura y personas expuestas en condiciones de vulnerabilidad.

Ello implica que no basta solamente con la ocurrencia de un evento peligroso o dañino para hablar de riesgos, sino que debe incluir, además, el análisis de infraestructura y población expuesta y que la misma presente condiciones de vulnerabilidad.

Definición de Riesgo

El IPCC define el riesgo como el potencial de consecuencias adversas sobre la vida, la salud, los medios de subsistencia, los activos económicos, sociales y culturales, los servicios ambientales y los sistemas naturales debido a eventos peligrosos (incluidos aquellos relacionados con el clima) o tendencias de cambio. El riesgo se evalúa en función de tres componentes clave: peligro, exposición y vulnerabilidad.

Componentes del Riesgo

- Peligro/Amenaza: Se refiere a la posible ocurrencia de eventos físicos, como fenómenos meteorológicos extremos, incremento del nivel del mar, o cambios de temperatura y precipitación. Los peligros pueden ser naturales o inducidos por la actividad humana.
- Exposición: Involucra la presencia de personas, medios de vida, especies o ecosistemas, servicios ambientales, recursos, infraestructura o bienes económicos, sociales o culturales en lugares que podrían verse afectados negativamente por los peligros climáticos.
- Vulnerabilidad: Se refiere a la propensión o predisposición de los sistemas expuestos a sufrir daños. La vulnerabilidad depende de factores sociales, económicos, ambientales e institucionales, que pueden incrementar o disminuir la susceptibilidad al daño. A su vez, la vulnerabilidad tiene dos componentes, la sensibilidad (factores intrínsecos del sistema de interés que afectan la forma de enfrentar el impacto de una amenaza) y la capacidad de adaptación (habilidad de la sociedad).

Los cambios en el sistema climático (variabilidad natural y cambio climático antropogénico) y las trayectorias socioeconómicas, la adaptación y mitigación y la gobernanza, son impulsores de amenazas, exposición y vulnerabilidad.

El IPCC también enfatiza la importancia de abordar la equidad, la justicia social y la sostenibilidad en la evaluación y gestión del riesgo climático. Esto incluye reconocer las disparidades en la vulnerabilidad y la capacidad de adaptación entre diferentes regiones, comunidades y grupos socioeconómicos.

6. DATOS DE PARTIDA

6.1. Modelo digital del terreno

El Modelo Digital del Terreno (MDT) de Panamá utilizado en la evaluación de los ecosistemas es el facilitado por el Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia (IGNTG) de Panamá. Tiene una resolución horizontal de 5 m, sin precisión decimal en los valores de elevación (valor Z). La referencia espacial utilizada es el Datum World Geodetic System de 1984 (WGS 84), utilizando la Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) y en Zona 17 Norte. (Figura 5).

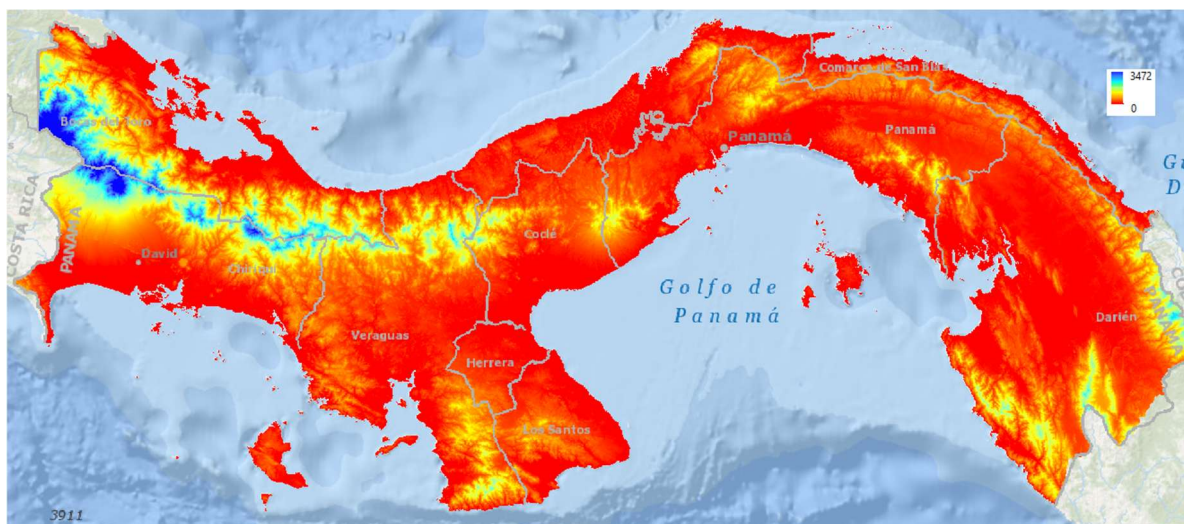


Figura 5. Modelo Digital del Terreno (MDT) de Panamá facilitado por el IGNTG, y utilizado para el modelado de la inundación costera.

En el modelado de la inundación fluvial, se ha utilizado el MDT STRM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de la NASA de 30 m de resolución (Figura 6) proyectado en el mismo sistema de referencia.

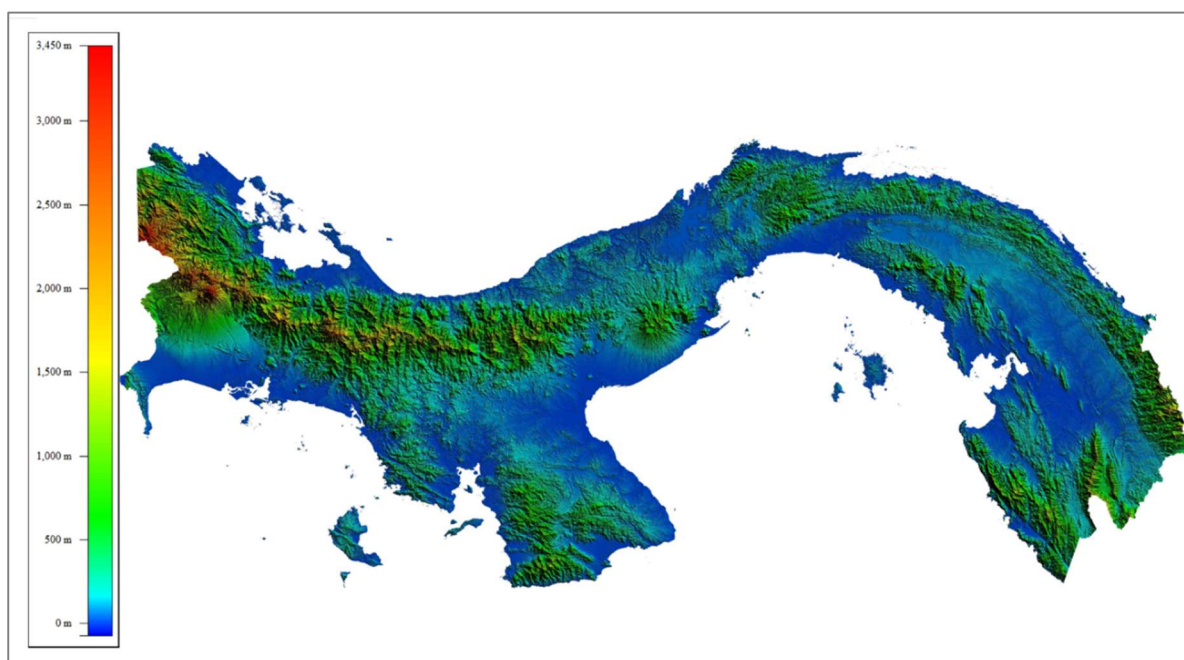


Figura 6. DEM STRM (30x30m). Fuente: IHCantabria, 2024.

6.2. Cobertura y usos del suelo

Se dispone del mapa de cobertura y usos del suelo de la República de Panamá de 2021 del Ministerio de Ambiente. Este producto se utiliza con diferentes objetivos en los análisis de riesgos y evaluación de ecosistemas.

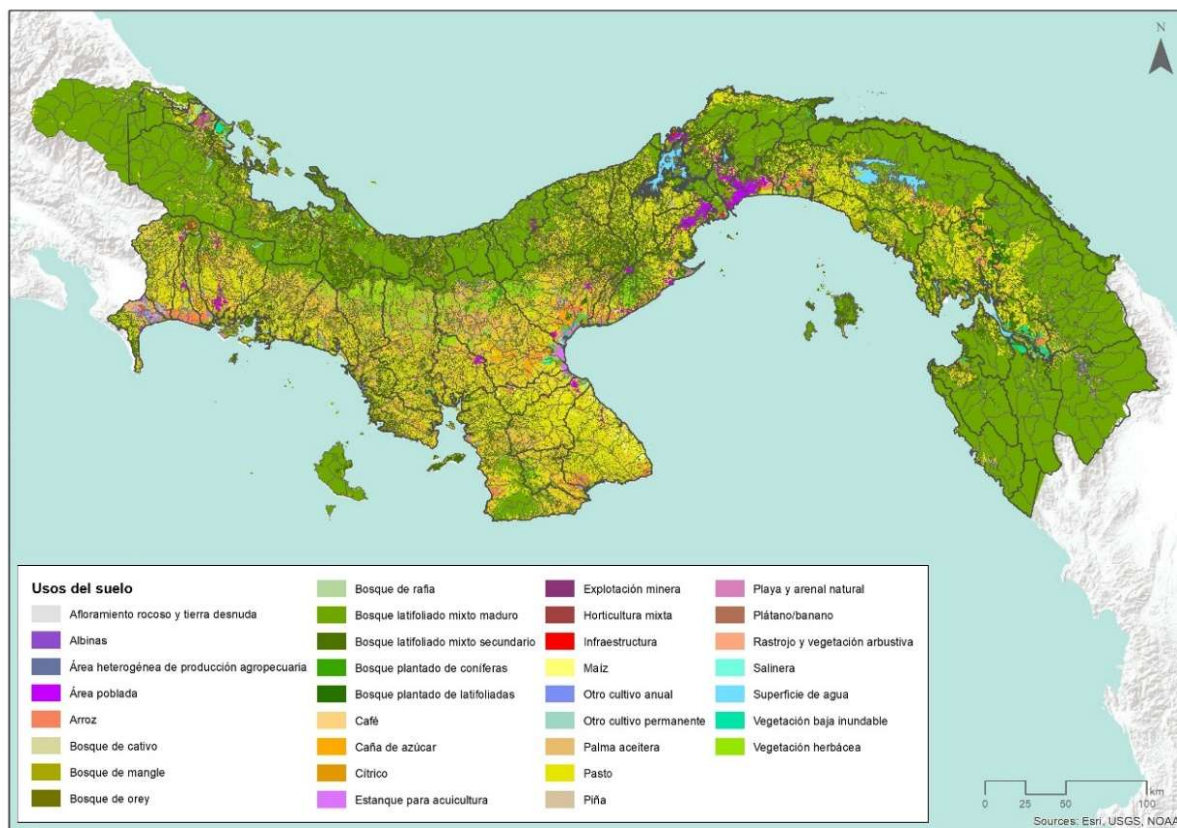


Figura 7. Mapa de cobertura y usos del suelo 2021 de MiAMBIENTE. Fuente: IHCantabria, 2024.

6.3. Información climática y escenarios de cambio climático

Ante la incertidumbre y la falta de capacidad para asignar probabilidades a los cambios que pueden producirse en el futuro, los escenarios de cambio climático permiten explorar futuros posibles. Para que este estudio se encuentre en consonancia con la información más avanzada en materia de cambio climático, se ha hecho uso de la última información publicada en el Sexto Informe del IPCC (AR6). En dicho informe, a diferencia de lo que sucedió en el AR5, los RCPs (trayectorias de concentración representativas) se integran con los SSPs (las trayectorias socioeconómicas compartidas) para combinar el desarrollo socioeconómico con las emisiones. La Tabla 1 recoge un resumen sobre las combinaciones más utilizadas, una descripción breve y una descripción general más detallada.

SSP	DESCRIPCIÓN BREVE	DESCRIPCIÓN GENERAL
SSP1-1.9	Más optimista: 1.5°C en 2050	Escenario más optimista del IPCC. Las emisiones globales de CO ₂ se reducen a cero en torno a 2050. Las sociedades cambian a prácticas más sostenibles, pasando del crecimiento económico al bienestar general. Los fenómenos meteorológicos extremos son más frecuentes, pero el mundo ha esquivado los peores impactos del cambio climático. <u>Único que cumple con el objetivo del Acuerdo de París</u> de mantener el calentamiento global en torno a 1.5°C por encima de las temperaturas preindustriales. Se alcanza los 1.5°C pero que luego desciende y se estabiliza en torno a los 1.4°C a finales de siglo.

SSP	DESCRIPCIÓN BREVE	DESCRIPCIÓN GENERAL
SSP1-2.6	Siguiente mejor: 1.8°C en 2100	En el siguiente mejor escenario, las emisiones globales de CO ₂ se reducen drásticamente, pero no tan rápidamente, alcanzando el cero emisiones después de 2050. Cambios socioeconómicos hacia la sostenibilidad equivalentes a SSP1-1.9. Las temperaturas se estabilizan en torno a 1.8°C por encima de las preindustriales a finales de siglo.
SSP2-4.5	Intermedio: 2.7°C en 2100	Escenario "intermedio". Las emisiones de CO ₂ rondan los <u>niveles actuales</u> antes de empezar a descender a mediados de siglo, pero no llegan a cero en 2100. Los factores socioeconómicos siguen sus tendencias históricas, sin cambios notables. El progreso hacia la sostenibilidad es lento, y el desarrollo y la renta crecen de forma desigual. En este escenario, las temperaturas aumentan 2.7°C a finales de siglo.
SSP3-7.0	Peligroso: 3.6°C en 2100	Las emisiones y las temperaturas aumentan constantemente y las emisiones de CO ₂ se duplican aproximadamente con respecto a los niveles actuales para el año 2100. Los países se vuelven más competitivos entre sí, orientándose hacia la seguridad nacional y asegurando su propio suministro de alimentos. A finales de siglo, la temperatura media habrá aumentado 3.6°C.
SSP5-8.5	A evitar a cualquier precio: 4.4°C en 2100	Es un futuro que hay que evitar a toda costa. Los niveles actuales de emisiones de CO ₂ se duplicarán aproximadamente en 2050. La economía mundial crece rápidamente, pero este crecimiento se alimenta de la explotación de los combustibles fósiles y de estilos de vida que consumen mucha energía. En 2100, la temperatura media del planeta es de 4.4°C más sobre los valores preindustriales

Tabla 1. Descripción de las combinaciones de trayectorias socioeconómicas compartidas (SSPs) y trayectorias de concentración representativas (RCPs). Fuente: IHCantabria, 2024, con información del IPCC, 2021.

De acuerdo con dicha tabla, solamente los SSP1-1.9 y SSP1-2.6 estarían cercanos a cumplir con el Acuerdo de París. Sin embargo, la coyuntura presente de la acción climática parece presagiar que ninguna de estos escenarios vaya a encontrarse entre los más probables. Por ello, en términos de gestión de riesgos, considerando la coyuntura política y socioeconómica y la gran inercia de algunos de los forzamientos climáticos como el aumento del nivel medio del mar, en esta evaluación se ha optado por seleccionar el escenario SSP5-8.5.

Este se correspondería con el utilizado en la mayor parte de los análisis de riesgo de cambio climático en el mundo. En la tabla, se describe cuáles son las circunstancias socioeconómicas globales esperables para dichos escenarios, así como el umbral de temperatura media global que se proyecta alcanzar bajo en dichos escenarios.

El modelado de las amenazas de escasez de recursos hídricos e inundación fluvial y evaluación de ecosistemas se realiza en el escenario climático actual, y los horizontes 2030 y 2050 en el escenario SSP5-8.5. Para ello se han utilizado los datos climáticos de registros instrumentales y reanálisis, recopilados y procesados, y el análisis de cambio climático realizado en el Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Generación del Atlas Interactivo de Visualización de los Resultados para la República de Panamá, desarrollada por IHCantabria para Banco Interamericano para el Desarrollo (IHCantabria, 2024). A continuación, se enumeran las principales fuentes de los datos empleados.

Para el análisis de la precipitación y la temperatura actuales se han utilizado los datos de 103 estaciones meteorológicas distribuidas sobre el país como se puede observar en la Figura 8.

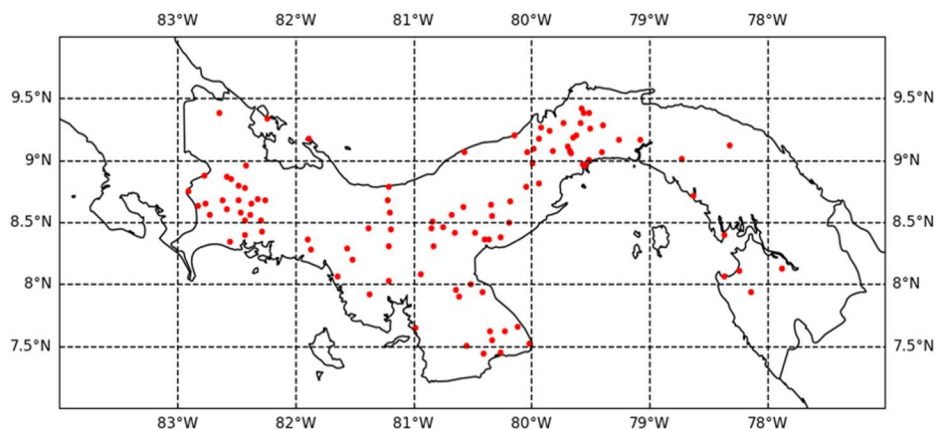


Figura 8. Localización de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.

Además de los datos que proporcionan las estaciones climáticas se obtienen variables geográficas como son la elevación del terreno, la pendiente, la orientación, la distancia a la costa o la distancia a cauces fluviales a partir del MDT oficial del IGN (5x5 m).

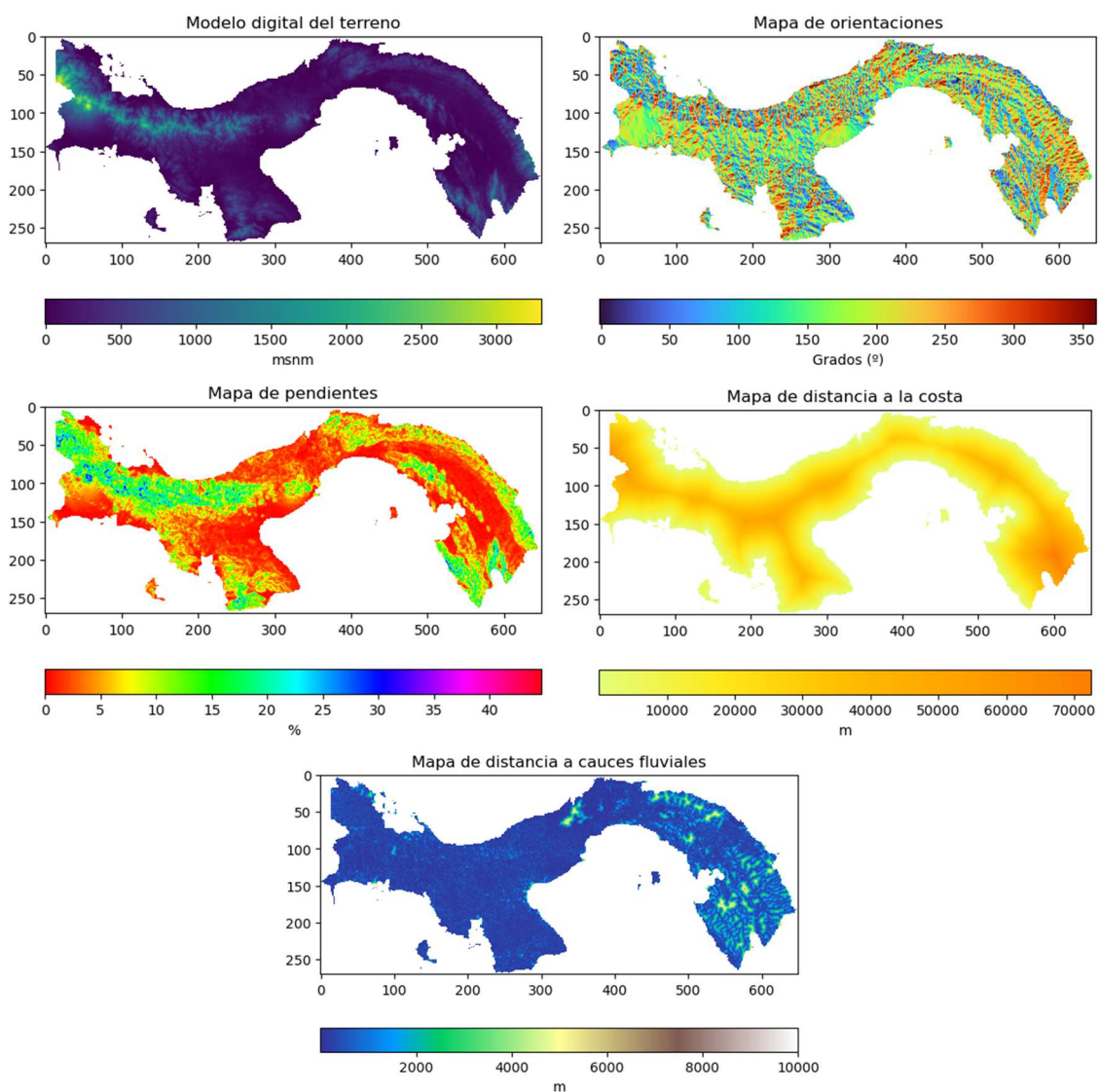


Figura 9. Variables topográficas (elevación/modelo digital del terreno, orientación de laderas, pendiente, distancia a la costa y distancia a cauces fluviales). Fuente: IHCantabria, 2024.

Si existiera relación de estas variables geográficas con los datos climáticos facilitaría el proceso de reconstrucción espacial dando lugar a resultados fidedignos.

Además de variables geográficas, para reconstruir las variables climáticas de forma espacial y temporal se recurren a bases de datos globales, en este caso se obtiene información de tres:

- Variables climáticas de CFSR (Climate Forecast System Reanalysis): es un reanálisis climático producido por el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los Estados Unidos. El reanálisis CFSR utiliza un sistema de modelos numéricos y observaciones para reconstruir y analizar retrospectivamente las condiciones atmosféricas y oceánicas a lo largo de un período de tiempo.
- Variables climáticas de ERA-5: es un producto climático desarrollado por el Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (ECMWF, por sus siglas en inglés). Representa un esfuerzo para reconstruir y analizar retrospectivamente el estado del clima en todo el mundo utilizando un sistema de modelos numéricos y observaciones.
- Precipitación de TRMM: La precipitación de TRMM se refiere a la estimación de la precipitación obtenida a través del satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). La misión TRMM fue una colaboración entre la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) que se llevó a cabo desde 1997 hasta 2015 con el objetivo de medir y monitorear la precipitación en las regiones tropicales y subtropicales de la Tierra.

Es importante tener en cuenta que el uso de estas bases de datos está sujeto a limitaciones y errores inherentes asociados con las observaciones y los modelos utilizados. Por lo tanto, es necesario evaluar adecuadamente la calidad y la confiabilidad de los datos.

Para la caracterización climática futura se han analizado modelos de clima globales, denominados GCM (*Global Climate Model*), que simulan numéricamente las interacciones de la atmósfera, los océanos, el relieve terrestre y el hielo. Son frecuentemente utilizados para el estudio de las dinámicas del sistema meteorológico y climático con el propósito de obtener proyecciones del clima futuro.

Los resultados de precipitación y temperatura para el clima futuro han sido obtenidos de las proyecciones climáticas que se enmarcan en la línea del Sexto Informe de Evaluación (AR6) del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). Los modelos de cambio climático han sido obtenidos de la Earth System Grid Federation (ESGF) infraestructura global que facilita el acceso, la distribución y el intercambio de datos climáticos y resultados de modelos climáticos a nivel internacional.

Para más información sobre las fuentes de datos y metodología empleada para la obtención y análisis de las variables climáticas se puede consultar el entregable 3 del estudio citado.

6.4. Datos socioeconómicos e información urbanística

Los riesgos resultan de la combinación de una amenaza y un receptor, cuyas características de vulnerabilidad determinan la generación de daños. Por ello, es importante caracterizar los principales atributos de los elementos expuestos a un determinado riesgo, para evaluar su vulnerabilidad. Existe una gran variedad de atributos que configuran la vulnerabilidad en sentido amplio, algunos de los cuales pueden cuantificarse, mientras que otros no (por ejemplo, los relacionados con aspectos

psicológicos, sociales y culturales). Este análisis se centrará en un enfoque cuantitativo de los factores de vulnerabilidad. A continuación, se resumen las principales fuentes de información recopilada:

1. Capa de edificaciones del Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), en la que se incluye la huella de cada edificio y su uso principal.
2. Infraestructuras públicas de INEC, Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN), Instituto Geográfico Nacional "Tommy Guardia" (IGN), Autoridad de Recursos Acuáticos de Panamá (ARAP) y Ministerio de Ambiente de Panamá.
3. XII Censo de Población y VIII de Vivienda de Panamá del año 2023 del INEC del que se obtienen variables de población, material de las paredes, techos y suelos de las viviendas, acceso a servicios básicos como agua potable, saneamiento y electricidad.

7. EVALUACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS CLAVE PARA LA PROVISIÓN DE SERVICIOS A LA CIUDAD

7.1. Selección de los servicios ecosistémicos y de los ecosistemas que los proporcionan

Los servicios ecosistémicos (SE) son descritos como las ventajas o beneficios que recibe la sociedad de forma directa o indirecta de la naturaleza y de sus ecosistemas (Hein, et al., 2006). Además de ser esenciales para la vida en la Tierra (Daily, et al., 1997), son un indicador preciso de la salud de los ecosistemas, por lo que entender su respuesta ante las alteraciones del medio es necesario para evaluar y equilibrar las necesidades cortoplacistas con los objetivos de sostenibilidad a largo plazo (Sekercioglu, 2014). Ecosistemas tales como las tierras agrícolas, los bosques, los pastizales y los entornos acuáticos, son responsables del suministro de diversos SE, que se han clasificados en los siguientes tipos (De Groot, et al., 2002):

- Los servicios de regulación, que son aquellos que derivan de las funciones clave de los ecosistemas y que ayudan a reducir riesgos ambientales de muy diversa naturaleza (por ejemplo, la regulación del clima y del ciclo del agua, el control de la erosión del suelo, la polinización, etc.).
- Los servicios de aprovisionamiento son aquellos referidos a la cantidad de bienes o materias primas ofrecidas por un ecosistema (como la madera, agua, pasto para ganado, etc.) y otros productos tangibles obtenidos de la naturaleza
- Los servicios de soporte son los procesos necesarios para la producción de todos los otros servicios del ecosistema y sin ellos la provisión no sería posible. Algunos son la formación y evolución de los suelos, la actividad fotosintética, y la producción primaria neta.
- Los servicios culturales están relacionados con el tiempo libre, el ocio o aspectos más generales de la cultura o el valor intangible de los ecosistemas y sus componentes. Estos servicios incluyen actividades recreativas, turismo, espiritualidad y expresiones artísticas inspiradas por la naturaleza.

De forma general, la necesidad de cuantificar y exponer el valor del medio ambiente a la sociedad ha llevado a la práctica de cotejar los datos de la cubierta terrestre con los SE, haciendo que la representación sea un simple recurso mapa con un valor determinado por unidad de área. Sin embargo, este enfoque pasa por alto la complejidad de los SE y la visión del conjunto como un sistema socio-ecológico que resulta de la interacción dinámica de múltiples componentes ambientales y humanos (por ejemplo, un bosque y un río o una producción agrícola y la población). Bajo esta perspectiva, las dinámicas espaciotemporales de los SE son el resultado del intercambio de valores dentro de una red de agentes ecológicos y antropogénicos, y cualquier ejercicio de valoración debe tener en cuenta que el rendimiento depende de la demanda y de la existencia de grupos sociales en el extremo receptor, los que denominamos beneficiarios.

Para garantizar la continuidad y provisión de estos servicios, es fundamental incorporar conceptos de infraestructura verde y azul (BGIN por sus siglas en inglés) en la planificación urbana y territorial. Estas redes, basadas en espacios verdes y naturales interconectados con cuerpos de agua como ríos y lagos, juegan un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad e incrementan la resiliencia de las ciudades ante el cambio climático (Ghofrani, et al., 2017). La integración efectiva de ambas

estrategias contribuye a promover sociedades más sostenibles y resilientes, donde la naturaleza y la infraestructura humana coexisten de manera armoniosa para el beneficio de las generaciones presentes y futuras. Una BGIN puede entenderse como un instrumento de planificación del paisaje cuyo objetivo es optimizar la disposición espacial de diferentes componentes de los ecosistemas y prácticas de gestión/explotaciones relacionadas en un territorio determinado para mejorar la conservación de la naturaleza y la biodiversidad y maximizar simultáneamente la provisión de SE. La implementación de las BGINs estará supeditada a las necesidades y potencialidades de cada territorio y su diseño dependerá de las condiciones iniciales y futuras relacionadas con el estado de la biodiversidad, los SE objetivo y las demandas de los diferentes grupos de interés (Pérez-Silos, et al., 2021).

Los componentes de una BGIN están fundamentados en las propiedades de los ecosistemas existentes en el territorio para responder a una gama variable de demandas sociales relacionadas con los bienes y servicios proporcionados por esos ecosistemas. Para ello, las BGINs se basan en la aplicación de intervenciones de diferente tipología (conservación y restauración), a diferentes escalas espaciales, sobre una gran variedad de elementos naturales del paisaje (bosques, pastizales, humedales, llanuras de inundación, etc.). Cada una de estas intervenciones sobre las que empleamos las propiedades de los ecosistemas para generar o conservar ciertos servicios son las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN por sus siglas en inglés) (Chausson, et al., 2020).

De esta forma, las medidas de SbN pueden ser tanto entidades físicas del territorio (diferentes tipos de hábitats y formaciones vegetales como bosques maduros de ladera, bosques de ribera, llanuras de inundación, etc.), como componentes relacionados con la manera en la que se gestiona y maneja estas entidades y otros elementos de la cubierta terrestre mediante prácticas y estrategias de manejo (por ejemplo, buenas prácticas de gestión agrícola-ganadera, delimitación de áreas para la renaturalización, gestión de zonas con combustible de vegetación de alto riesgo de incendio, etc.). Además, con independencia de su naturaleza, las SbN pueden estar vinculadas a:

- Elementos en buen estado de conservación que responden a funciones importantes dentro del territorio y sobre los que los esfuerzos deben dirigirse a seguir conservándolos de un modo adecuado (SbN de conservación).
- Elementos que actualmente no funcionan de manera óptima por la degradación de su estado pero que presentan un potencial importante para la generación de SE de interés en el territorio. En estos ecosistemas se aplicarían SbN destinadas a la recuperación de su funcionalidad, bien mediante la restauración o creación de hábitat, bien mediante la aplicación de ciertos criterios de manejo que permitan compatibilizar un uso actual más intensivo con la capacidad de generación de los SE requeridos (SbN de restauración).

7.2. Selección de los servicios ecosistémicos y de los ecosistemas que los proporcionan

En este contexto, los SE de regulación conforman el eje principal de análisis espacial sobre el que se vertebra la propuesta de BGIN para las cuencas vertientes a los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. La degradación en la provisión de estos SE conduce a perjuicios significativos en el bienestar humano, motivo por el que el análisis de las dinámicas espaciotemporales de estos SE toma gran importancia para apoyar la toma de decisiones en cuanto al desarrollo e implementación de políticas ambientales. Teniendo en cuenta estas indicaciones, el funcionamiento del ecosistema en la cuenca objeto de estudio, así como la información disponible, se han definido los siguientes SE para construir los componentes de la BGIN:

7.2.1. Regulación hidrológica frente inundaciones

El SE de regulación hidrológica se refiere a la capacidad de los ecosistemas terrestres de regular la proporción de las precipitaciones que pueden ser interceptadas e infiltradas en capas superficiales y subterráneas de las cubiertas naturales, reduciendo el flujo de agua que se generaría como escorrentía superficial en ausencia de tales coberturas. En este sentido, la capacidad de almacenamiento y atenuación de las llanuras de inundación y las coberturas vegetales naturales presentes en la cuenca hidrográfica son factores determinantes en la regulación frente inundaciones. Por un lado, el desbordamiento del río contribuye a disipar aguas abajo parte de la energía del caudal de avenida, moderando los caudales máximos y retardando el pico de caudal, y las masas forestales maduras presentes en las llanuras desempeña un papel determinante en este fenómeno ya que con un elevado número de estratos verticales, con horizontes superficiales más desarrollados y con una mayor capacidad de infiltración por raíces y la acción de macroinvertebrados, actúan como elementos de tapón del agua de lluvia, reduciendo la escorrentía.

7.2.2. Regulación hidrológica frente sequía

El SE de regulación de sequías está relacionado con la respuesta hidrológica de la cuenca, vinculado al potencial de almacenar agua y contribuir a su disponibilidad a lo largo del tiempo. En este sentido, cobra especial importancia la capacidad de almacenamiento de las llanuras de inundación y las coberturas vegetales presentes en la cuenca hidrográfica. Por un lado, las masas de bosque presentes en las áreas inundables aumentan la capacidad de almacenamiento de agua en las llanuras de inundación a través de sus raíces y la capa de materia orgánica que generan, lo que disminuye la velocidad de escorrentía superficial y permite que el agua se infiltre lentamente en el suelo, recargando los acuíferos subterráneos. Por su parte, el bosque maduro cobra especial importancia en relación al potencial de almacenamiento de agua subterránea, que se asocia con áreas del paisaje propensas a la infiltración con base a los factores abióticos relacionados principalmente con esta funcionalidad, es decir, la topografía, el tipo de suelo y la cubierta vegetal.

7.3. Evaluación de los ecosistemas seleccionados

7.3.1. Localización espacial de los ecosistemas definidos

Mapas de usos y ocupación del suelo (LULC)

Para el presente proyecto, se parte de la información oficial de LULC provista por el Ministerio de ambiente de Panamá (MiAMBIENTE) del año 2021 y que incluye la categoría de "Bosque latifoliado mixto maduro", donde se recogen las áreas compuestas principalmente por árboles adultos con diámetros altos y copas grandes, con menor presencia de sotobosque y con una serie temporal en la zona mayor de 40 años, aunque se haya practicado tala selectiva (Figura 10).

La elección de esta coberturas se debe a su importancia ecosistémica, siendo vitales para la conservación de la biodiversidad, regulación hídrica y protección del suelo. Los bosques, en especial el latifoliado mixto maduro, actúan como barreras naturales contra la escorrentía ya que sus copas amplias y densas interceptan la precipitación, reduciendo la velocidad del agua que llega al suelo y permitiendo una absorción más gradual. Esto es particularmente importante durante eventos de lluvia intensa, ya que minimiza el riesgo de inundaciones y erosión del suelo.

En general, la funcionalidad ecológica de estas coberturas forestales es vital para la sostenibilidad de sus respectivas cuencas. Los bosques actúan como reguladores climáticos, moderando las

temperaturas locales y creando microclimas que favorecen biodiversidades diversas. También proporcionan hábitats para una variedad de especies, lo que es esencial no solo para mantener la riqueza biológica, sino también para preservar las interacciones ecológicas entre especies que son fundamentales para la salud del ecosistema.

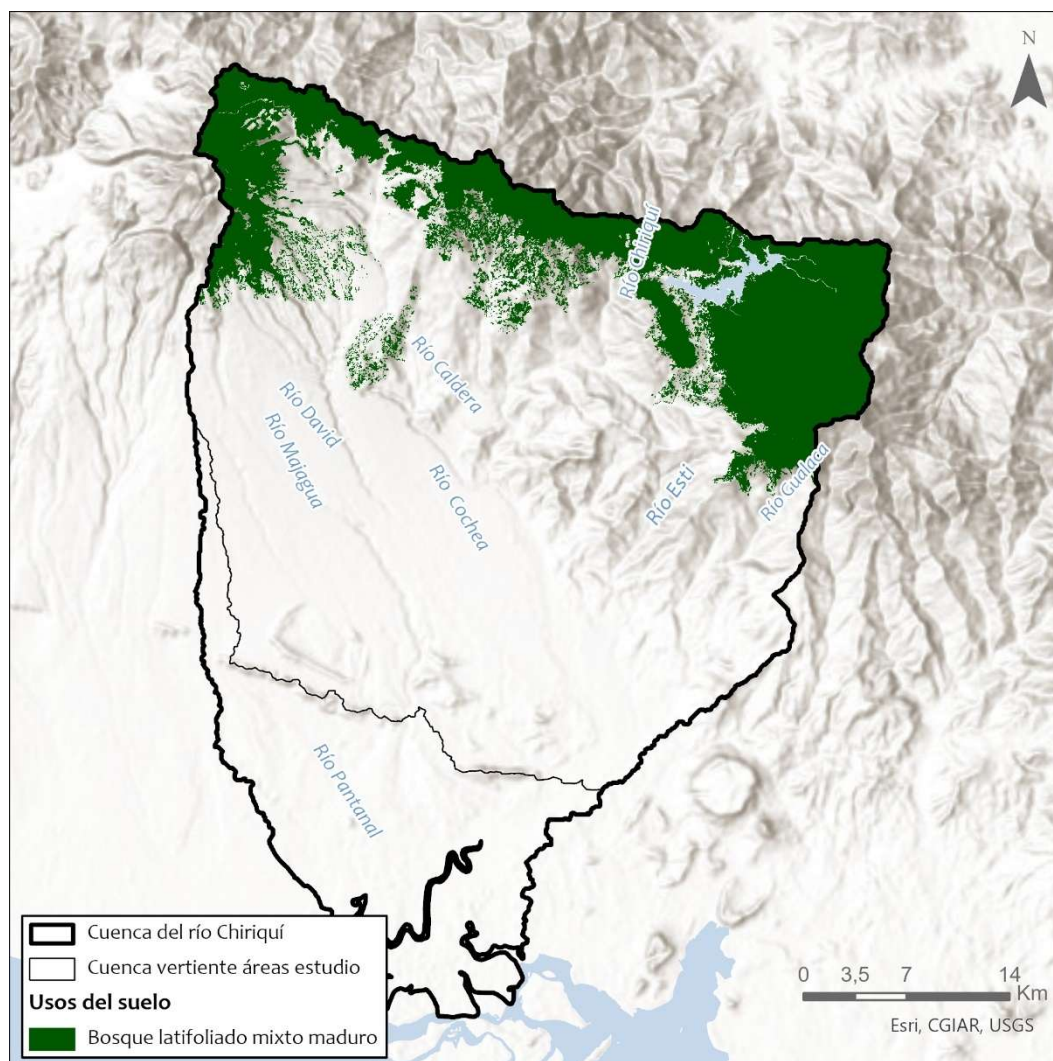


Figura 10. Mapa de usos y coberturas del suelo de bosque latifoliado mixto maduro y bosque de manglar para la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: MiAMBIENTE, 2021.

Unidades funcionales

Desde un punto de vista metodológico, los SE modelados a grandes escalas se presentan dentro de unidades de paisaje relacionadas con los procesos del ecosistema, como las cuencas hidrográficas, los hábitats específicos, o unidades funcionales (UF). En el marco del presente proyecto, los servicios de regulación hidrológica frente inundaciones y frente sequía se modelan a escala regional de la cuenca. Así, en el marco propuesto se considera cómo UF aquellos elementos morfoestructurales que dividen el medio físico de forma homogénea a nivel funcional. Las UF son dependientes del proceso que se esté analizando y deben cumplir una doble tarea: (i) relacionar el proceso funcional de análisis con unidades homogéneas en el territorio para una determinada función o proceso y (ii) permitir una identificación priorizada de las SbN a través de acciones de conservación o restauración. Según el marco propuesto, se definen las laderas de drenaje y las llanuras de inundación. Ambas constituyen formas de clasificar el territorio con capacidad para incorporar las interacciones biótico-abióticas a la

escala funcional requerida, así como la conectividad necesaria entre los diferentes ecosistemas. Desde un enfoque conceptual, esta división espacial facilita la identificación del flujo de SE desde la función biológica, mientras que, en términos de modelización, las UF posibilitan la simulación de las interrelaciones entre los diversos elementos biológicos y/o morfológicos del paisaje, permitiendo la incorporación de los procesos modelados a nivel de píxel en una unidad espacial con significado funcional completo.

- Laderas de drenaje: su cálculo se basa en la acumulación de flujo y se compone de todos los píxeles situados aguas arriba de cada segmento de canal definido. Se establecen con una superficie mínima de 5 hectáreas. De esta manera se establecen un total de 1,696 laderas de drenaje para toda el área de estudio.
- Llanura de inundación: las celdas del DEM se clasifican según la elevación sobre el segmento del canal más cercano. La diferencia de elevación entre cada celda del fondo del valle y la ubicación del canal asociado se normaliza por la profundidad de la orilla o por la elevación absoluta sobre el canal. Este procedimiento se repite para cada segmento de canal.

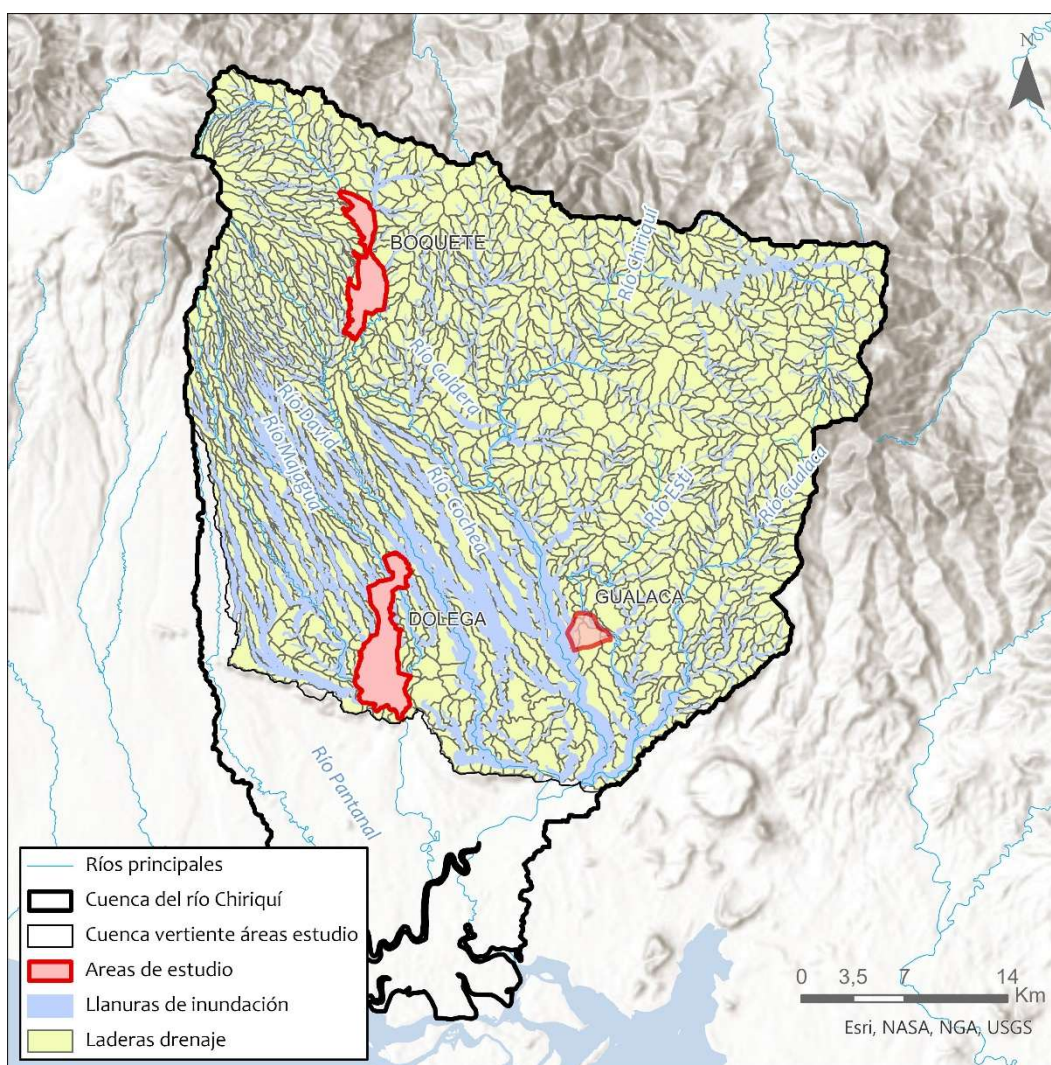


Figura 11. Mapa de unidades funcionales (laderas de drenaje y llanuras de inundación) para la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024.

Para una mejor apreciación, en la siguiente Figura 12 se presenta en detalle para el área de la ciudad de Boquete esta división del paisaje.

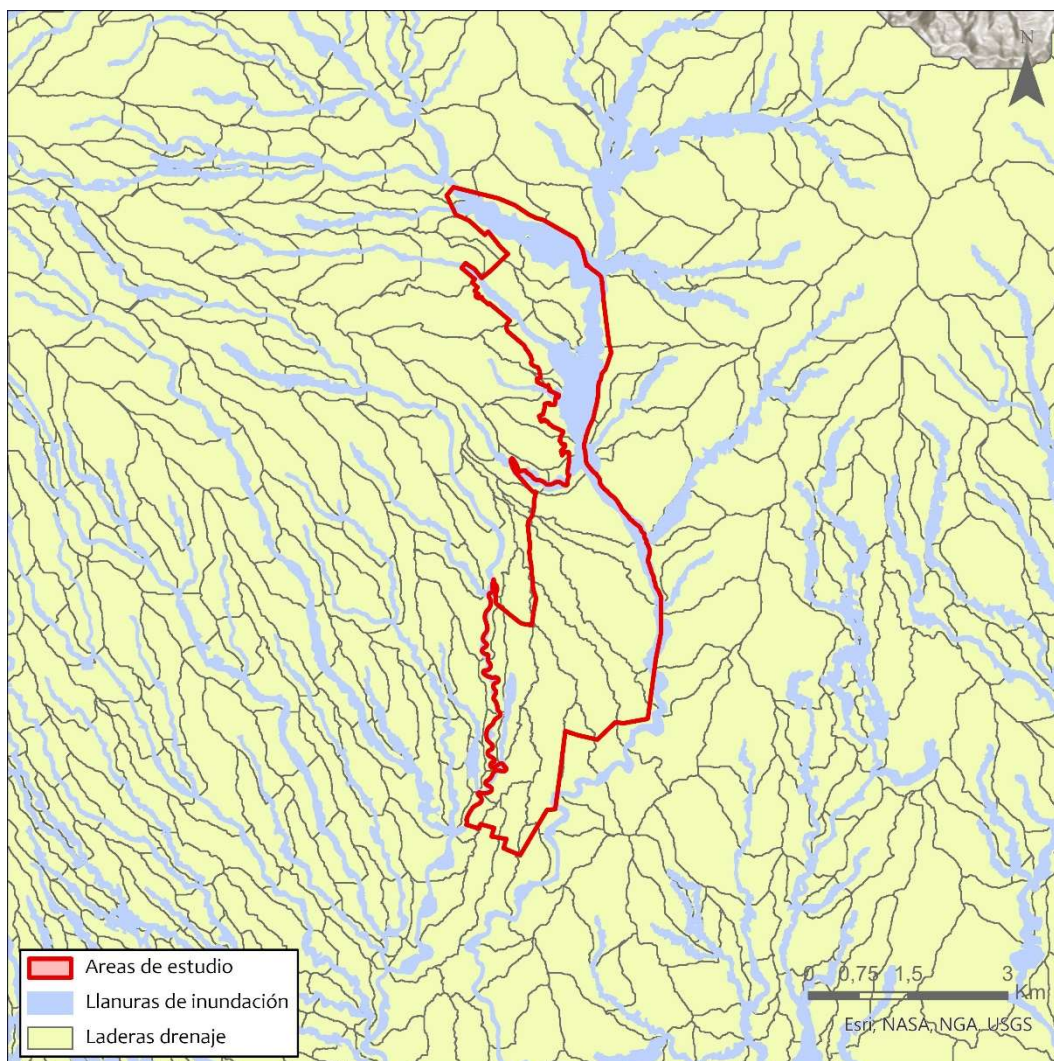


Figura 12. Detalle de mapa de unidades funcionales (laderas de drenaje y llanuras de inundación) para la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024.

7.3.2. Evaluación de los ecosistemas

Aptitud hidroclimática de los ecosistemas (variables hidroclimáticas y geomorfológicas)

El cálculo de la aptitud de los bosques latifoliados mixtos maduros se hará mediante los dos procesos que se definen a continuación. La elección de estos sistemas para el análisis ecológico y territorial se fundamenta en su importancia ecosistémica, ya que ambos desempeñan un papel vital en la conservación de la biodiversidad, la regulación hídrica y la protección del suelo. Por tanto, su relevancia para la conservación del medio ambiente y en su influencia en los procesos naturales que impactan directamente en la cuenca y en el entorno urbano de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca justifican su elección.

- Técnicas de Aprendizaje Automático para el modelado de la distribución de especies: algoritmo de bosque aleatorio.

Las técnicas de Aprendizaje Automático (ML por sus siglas en inglés) se incluyen en una rama del campo de la Inteligencia Artificial (AI por sus siglas en inglés) que a través de diferentes algoritmos permite a las máquinas realizar tareas específicas de forma autónoma, es decir, sin necesidad de programarlos para identificar patrones de datos masivos y elaborar predicciones (Cutler, et al., 2007). Existen tres categorías principales de algoritmos de ML: de aprendizaje supervisado, no supervisado y de refuerzo (Espinosa-Zuñiga, 2020).

Los algoritmos de Bosque Aleatorio (RF por sus siglas en inglés), son unas técnicas de ML del tipo supervisadas de uso generalizado debido a su método de partición recursivo, que permiten aumentar el rendimiento del modelo final con una mínima pérdida de interpretabilidad (Sinha, et al., 2019). Se trata de un conjunto o ensamble de Árboles de Decisión combinados mediante técnicas de bagging (Figura 13) en las que cada árbol se entrena con diferentes muestras de datos para la misma consulta, logrando así que ningún árbol de decisión vea todos los datos de entrenamiento, sino que cada uno ve una porción. Por último, las predicciones de cada árbol se combinan para obtener una predicción en conjunto, al combinar los resultados y promediarlo, unos errores compensan otro y se obtiene una predicción que generaliza con un rendimiento mejor (Guisan & Thuilleer, 2005).

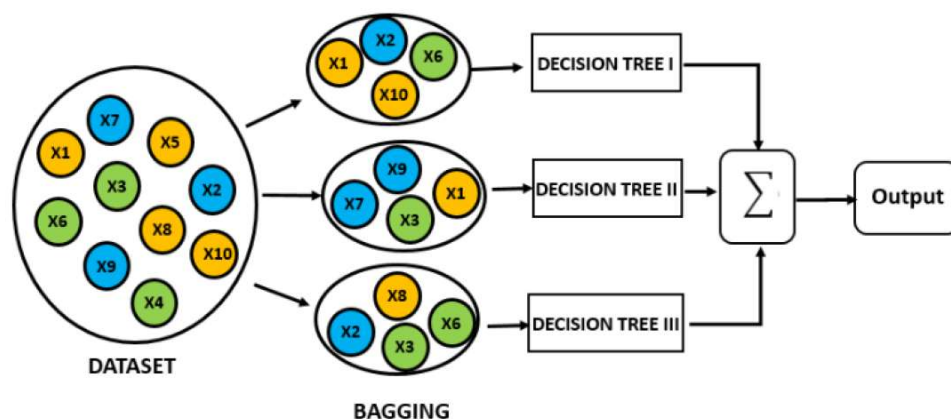


Figura 13. Esquema resumen de algoritmo RF y proceso *bagging*. Fuente: (Espinosa-Zuñiga, 2020).

Esta técnica es especialmente útil en el modelado de distribución de especies, donde se busca predecir la distribución geográfica en función de variables ambientales, principalmente abióticas, pero con notable relevancia también de las variables bióticas. De forma general, este modelo tiene las siguientes fases de desarrollo: i) recopilación datos relevantes sobre el hábitat y los puntos de presencia de la especie a modelar, los cuales se preprocesarán para estar en un formato estándar y ser geográficamente coherentes, resolviendo problemas de multicolinealidad y autocorrelación espacial; ii) construcción del modelo, que puede incluir dos algoritmos diferentes (Árbol de Clasificación y Árbol de Regresión) dependiendo de la naturaleza de la predicción requerida; iii) prueba y validación del modelo utilizando parámetros de evaluación estandarizados con el fin de asegurar su fiabilidad y precisión; iv) creación de mapas predictivos que pueden utilizarse para estimar y comprender la distribución de las especies, lo que resulta de gran utilidad en la planificación de la conservación y el manejo de los ecosistemas.

- Ejecución del modelo

Para el presente proyecto, se plantea la ejecución de un modelo RF que utiliza como variables independientes la presencia / ausencia del ecosistema según la cobertura de usos de suelo actual y como variables dependientes las climáticas y geomorfológicas relevantes según bibliografía

especializada (para más información consultar (Ward, et al., 2016), (Cavalli, et al., 2013), (Beleño, et al., 2022)). El algoritmo utilizado se compone de 300 árboles de decisión, con tantos nodos como determine el algoritmo de forma automática que son necesarios y que proporcionan 1 hoja de decisión (capa en formato ráster) para cada modelización (en situación actual y en escenario futuro SSP585 2050).

El clima es uno de los factores más influyentes en los patrones biogeográficos de las especies en el ambiente. En la actualidad, el cambio climático representa una de las principales tensiones ambientales que podrían impactar a las especies naturales, de manera directa mediante efectos en la productividad o estrés hídrico, o de forma indirecta a través de interacciones con distintas perturbaciones como incendios o plagas (Arenas-Castro, et al., 2018). Siguiendo los estudios de (Ward, et al., 2016) y la información disponible, se han incluido en el modelado las variables de temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial medias mensuales para la situación actual y los diferentes escenarios definidos. La información climática debe complementarse con datos relevantes de las características de los hábitats que determinarán la presencia y/o abundancia de las especies a modelizar. Así, la información topográfica aporta una serie de atributos fundamentales para las especies forestales ya que, como está bien documentado, la biomasa o la productividad (así como otras características y propiedades de las especies naturales) se ven fuertemente afectadas por la orientación del terreno, la radiación incidente, la pendiente o la elevación. En este punto, se incluye el Modelo Digital del Terreno (MDT) STRM 30x30 de la NASA y el ráster de pendientes derivada del mismo.

Los modelos de distribución de especies requieren datos reales de ocurrencia de las especies (por ejemplo, coordenadas geográficas), bien para identificar y calibrar su relación con variables ambientales (modelos correlacionales) o validar los resultados de dichos modelos. Para obtener los puntos de presencia de los ecosistemas objeto de estudio se ha desarrollado un muestreo estratificado mediante el uso de software GIS partiendo de la información de LULC proporcionado por MGAP. En primer lugar, se establece un buffer de exclusión de 200 metros de distancia alrededor de cada cobertura para evitar tener puntos en zonas de transición entre coberturas de suelo y se cubre toda el área con un mallado cuadrangular de 1,000 metros, asignando un punto de forma aleatoria en cada centroide. De esta forma, y matizándolos con el apoyo de ortografía aérea de máxima actualidad, se logra que sean puntos representativos de áreas bien identificadas, homogéneas y representativas de cada cobertura definida en la leyenda, evitando el ruido de escena. Se pone especial énfasis a su selección con la mayor variabilidad posible de ubicación, pendiente y orientación, y que eviten el efecto tipo frontera, siendo lo más puras posible y evitando la mezcla con otras categorías (Zhong, et al., 2019), evitando así el efecto de autocorrelación espacial y pseudoreplicación en imágenes de media resolución sobre espacios heterogéneos (Álvarez-Martínez, et al., 2018). De esta manera, se obtiene un total de 353 puntos de presencia para la categoría de bosque latifoliado mixto maduro. Una vez definidos los puntos de presencia se procede a la ejecución del modelo RF en la que se permite que sea el propio algoritmo quien defina las ausencias de forma automática. En primer lugar, se lanzará el 60% de los puntos contra las variables predictoras ya definidas en la situación actual, obteniendo así las zonas de idoneidad para la presencia de cada cobertura según las variables actuales (Figura 14). A continuación, se repite el modelo, pero incluyendo las variables en el escenario futuro SSP585 2050, así, se obtienen las zonas de idoneidad según las variables futuras (Figura 15). Estos resultados se proporcionan en formato ráster con valores normalizados de 0 a 1, siendo 0 las zonas de menor idoneidad y 1 las de mayor valor.

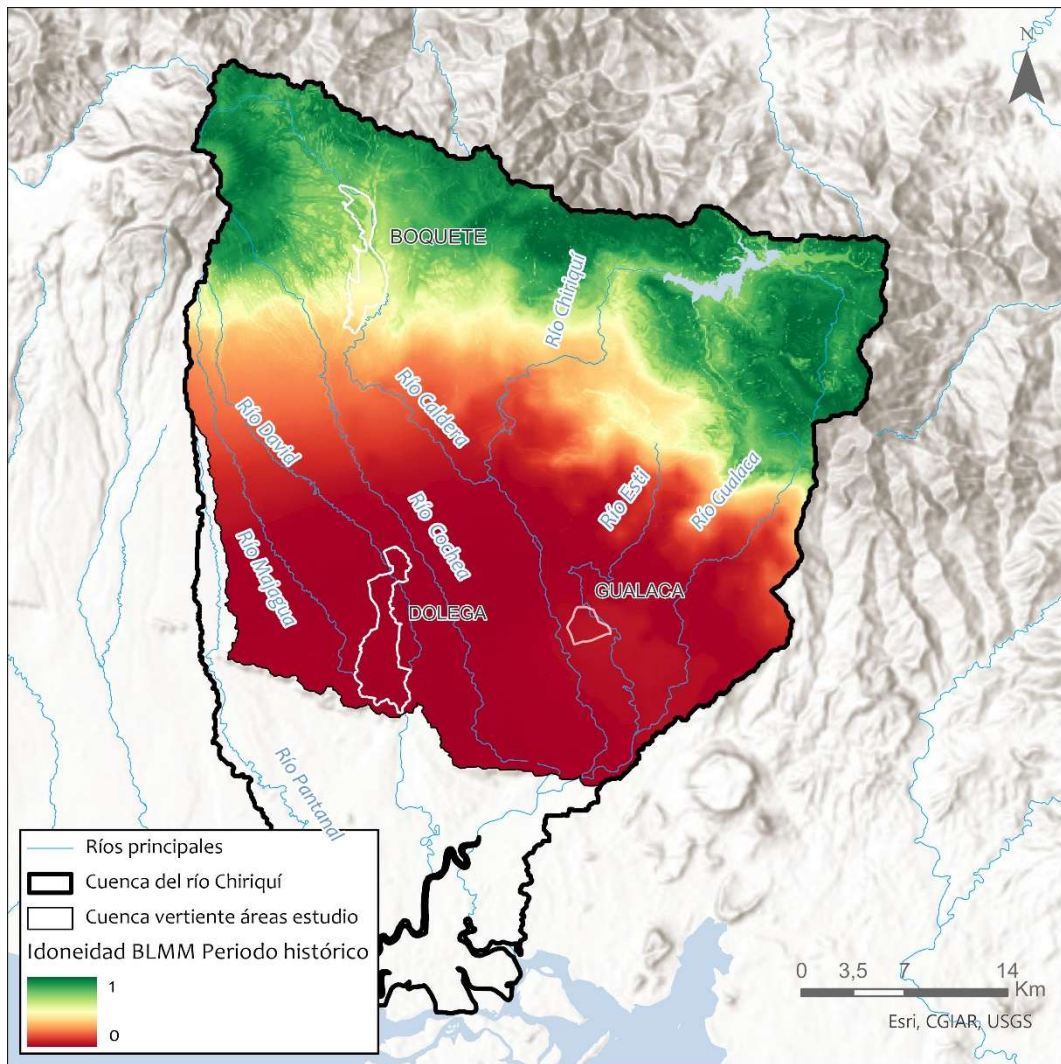


Figura 14. Mapa de idoneidad del bosque latifoliado mixto maduro para la situación actual en la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024.

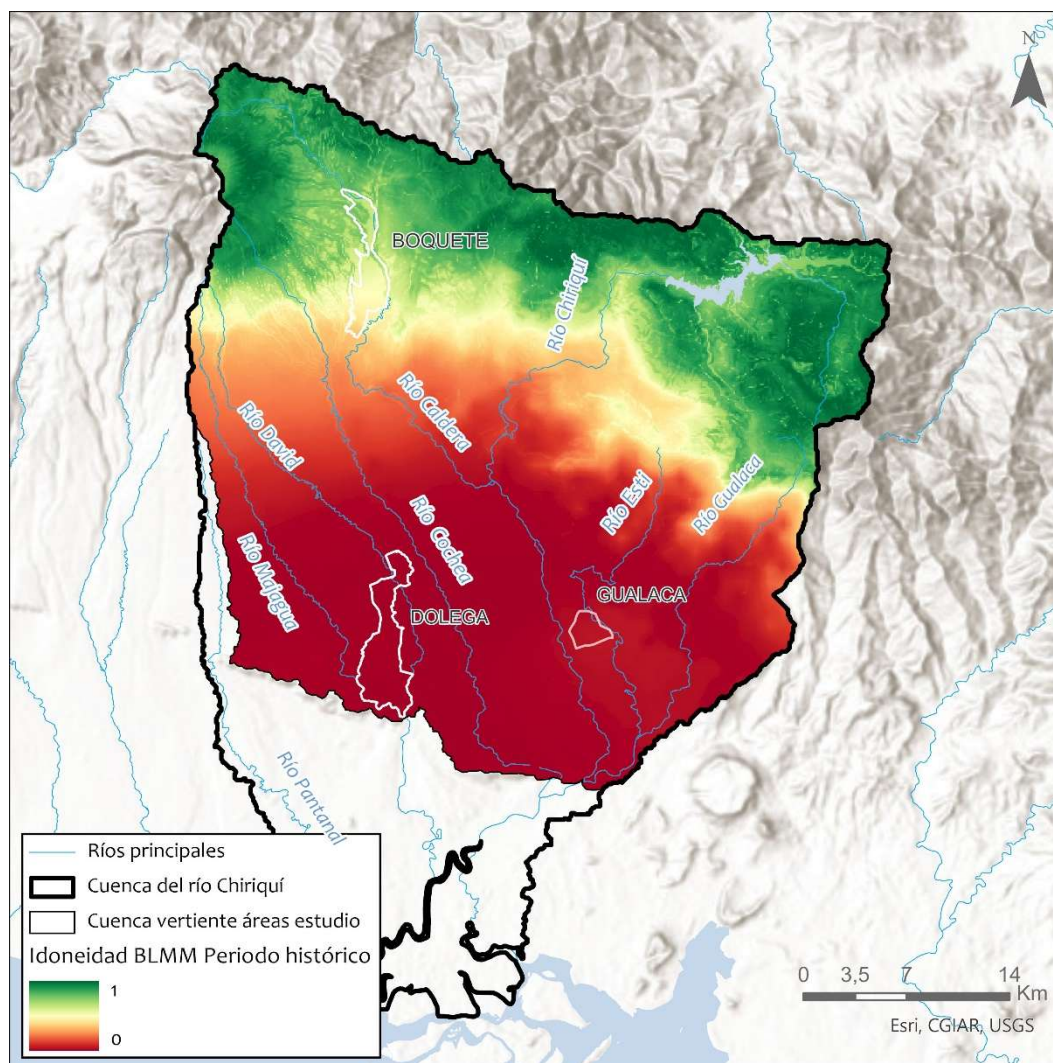


Figura 15. Mapa de idoneidad del bosque latifoliado mixto maduro para el escenario futuro SSP585 2050 en la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024.

- Datos bióticos y evaluación de tendencia.

El siguiente proceso de la metodología consiste en la obtención de una serie temporal de datos espectrales desde 1994 (coincidente con los datos climáticos disponibles) hasta la actualidad mediante el índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI por sus siglas en inglés) medio anual que nos permitirá evaluar la tendencia a futuro de los ecosistemas definidos en el marco de la información biótica (Guo, et al., 2020). Este índice, ampliamente usado en ciencia y aplicaciones de consultoría en todo el mundo, es el resultado de la combinación de las bandas rojas e infrarrojas y es un indicador lineal de la radiación fotosintética activa absorbida, proporcionando así una buena estimación de la fotosíntesis integrada a nivel de píxel (Parruelo, et al., 1997). Este tipo de análisis es fundamental para evaluar el estado de los ecosistemas ya que se trata de un índice sensible y confiable de la salud de la vegetación, ya que mide la cantidad y la calidad de la vegetación verde. En pastizales y bosques, el NDVI puede ayudar a identificar áreas con vegetación vigorosa y saludable, así como áreas con estrés hídrico o daños ambientales (Hernández-Romero, et al., 2022), además, permiten detectar cambios en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo (Gaitan, et al., 2021).

El siguiente proceso de la metodología consiste en la obtención de una serie temporal de datos espectrales desde 1994 (coincidente con los datos climáticos disponibles) hasta la actualidad mediante

diferentes índices espectrales, cómo el índice de vegetación mejorado (EVI por sus siglas en inglés) medio anual que nos permitirá evaluar la tendencia a futuro de los ecosistemas definidos en el marco de la información biótica (Guo, et al., 2020). Este índice, ampliamente usado en ciencia y aplicaciones de consultoría en todo el mundo, es el resultado de la combinación de las bandas rojas e infrarrojas y es un indicador lineal de la radiación fotosintética activa absorbida, proporcionando así una buena estimación de la fotosíntesis integrada a nivel de píxel (Parruelo, et al., 1997). Este tipo de análisis es fundamental para evaluar el estado de los ecosistemas ya que se trata de un índice sensible y confiable de la salud de la vegetación, ya que mide la cantidad y la calidad de la vegetación verde. En bosques, el EVI (y otros índices cómo el NDVI o el SAVI) puede ayudar a identificar áreas con vegetación vigorosa y saludable, así como áreas con estrés hídrico o daños ambientales (Hernández-Romero, et al., 2022), además, permiten detectar cambios en la cobertura vegetal a lo largo del tiempo (Gaitan, et al., 2021).

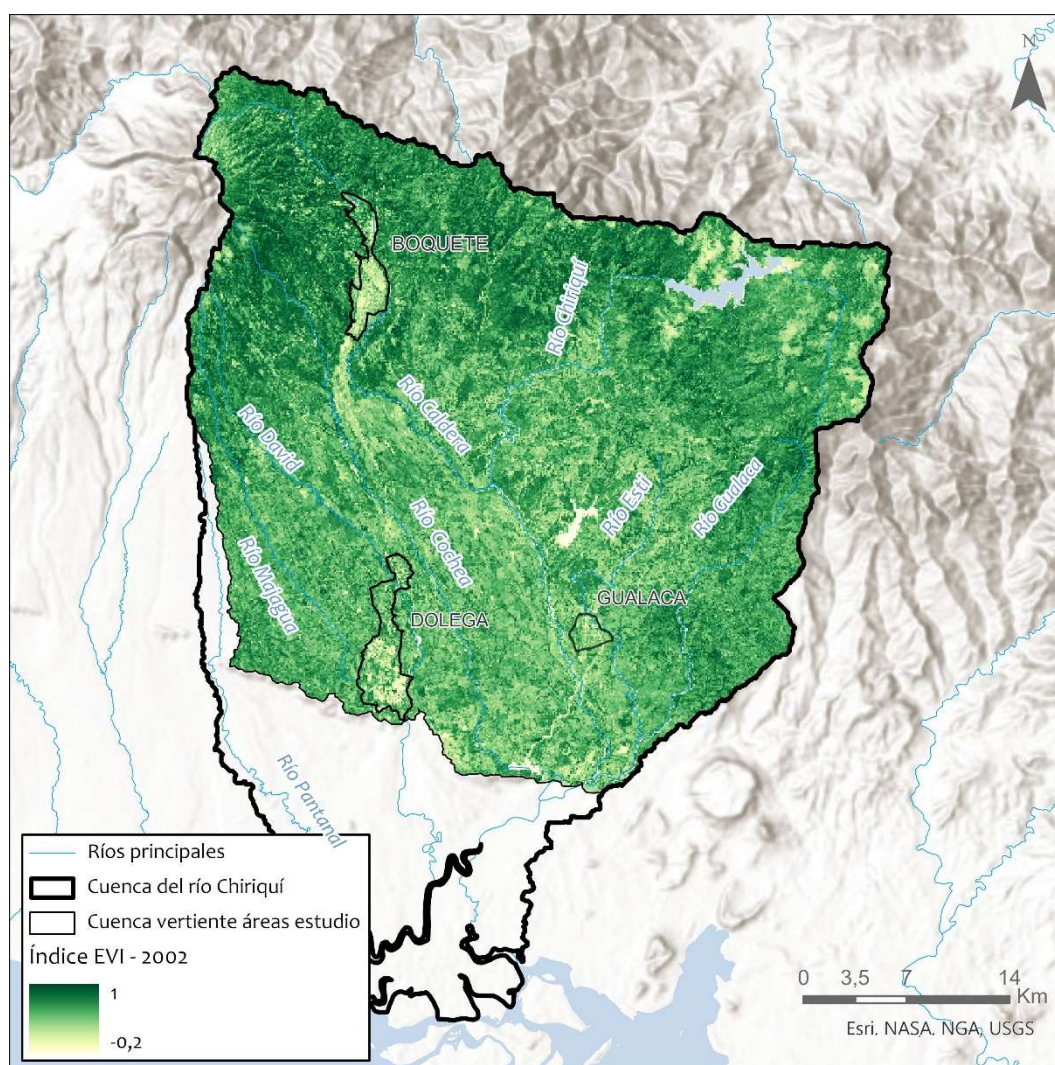


Figura 16. EVI promedio en el año 2002 en la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024.

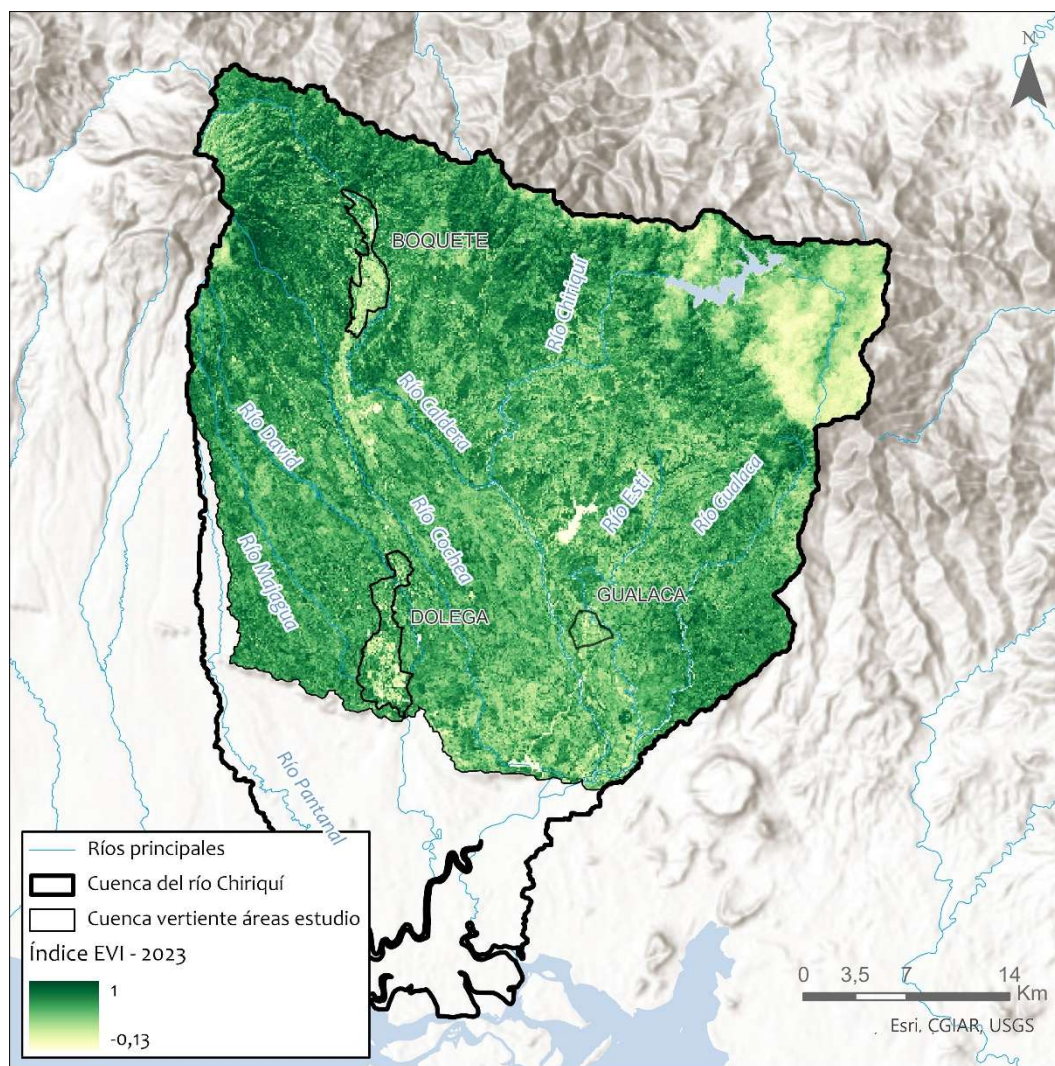


Figura 17. NDVI promedio en el año 2023 en la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024.

- Árbol de decisiones. Áreas potenciales de conservación y de restauración.

Con toda la información anteriormente expuesta, se realiza el siguiente árbol de decisiones (Figura 18) que permite clasificar la cobertura de BLMM por unidad funcional según su aptitud potencial de conservación o restauración (Figura 19) según las siguientes categorías.

- Áreas potenciales de conservación son aquellas con una idoneidad actual del ecosistema buena. En este punto se diferencia en función de si la idoneidad en escenario futuro es buena o mala entre áreas de conservación pasiva (C1) y áreas de conservación activas (C2) con medidas de mitigación de vectores climáticos.
- Áreas potenciales de restauración son aquellas zonas de presencia del ecosistema con idoneidad actual del ecosistema mala pero buena a escenario futuro y además con tendencia del factor biótico de crecimiento, clasificándolas como de restauración activa (R1). También se incluyen como zonas de restauración intensiva (R2) aquellas áreas de campo natural donde actualmente no existe el ecosistema, pero su aptitud hidroclimática a futuro es buena y el factor biótico es de crecimiento. La selección de este ecosistema se basa en que estos ecosistemas presentan condiciones favorables para su regeneración

en el área de estudio, lo que los hace más viables en comparación con los bosques nativos, que enfrentan retos mayores.

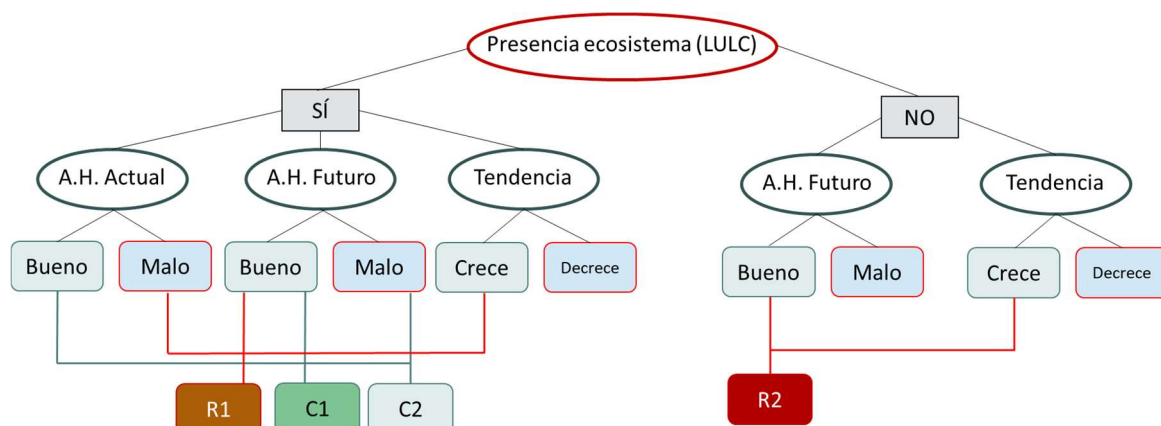


Figura 18. Árbol de decisiones para clasificación de las coberturas vegetales en: i) conservación pasiva (C1); ii) conservación activa (C2); iii) restauración activa (R1) y restauración intensiva (R2). Fuente: IHCantabria, 2024.

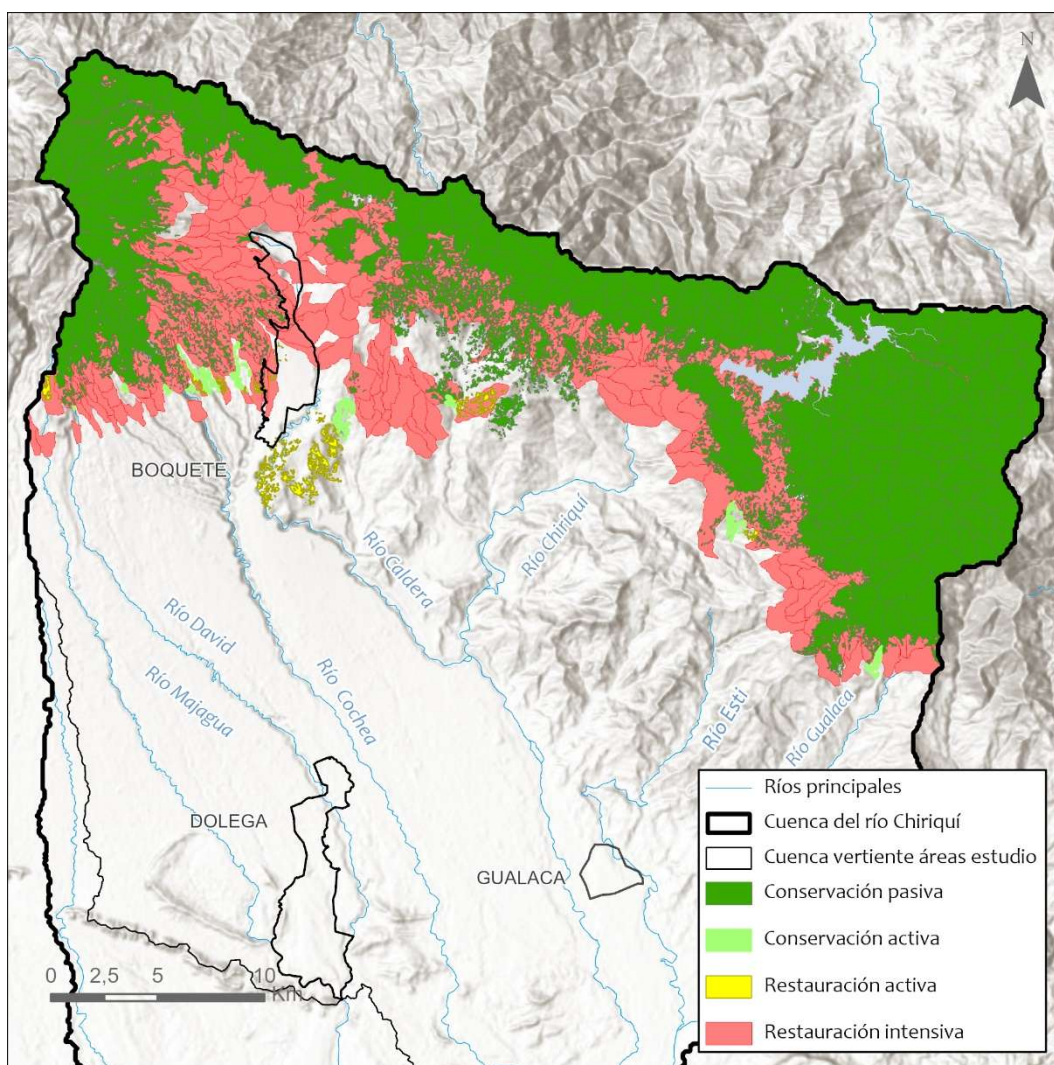


Figura 19. Áreas de conservación (pasiva y activa) para la cobertura bosque latifoliado mixto maduro en la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca en el escenario futuro SSP545 2050. Fuente: IHCantabria, 2024, 2024.

7.4. Identificación de áreas clave con alto potencial para la implementación de SbN

7.4.1. Conceptualización y caracterización de la relación SE – SbN

Como paso previo al modelado y cartografiado de SE, es necesario determinar la relación que existe entre los SE y las SbN que potencialmente pueden utilizarse para optimizar su provisión. Los SE considerados están fundamentalmente controlados por la interacción, a diversas escalas, de la vegetación terrestre con los factores físicos y procesos abióticos a escala de cuenca. Con el objetivo de identificar las SbN más adecuada para cada servicio, se identificó en primer lugar el proceso o componente biofísico que más pudiera beneficiarse de la aplicación de este tipo de solución a través de interacciones ampliamente contrastadas por la evidencia científica actual (Tabla 2). De la misma manera, se estableció la escala espacial de ecosistema / LULC a la que debería aplicarse la interacción para optimizar la provisión del SE.

Esta conceptualización permite establecer los métodos e información necesaria para conocer de forma espacialmente explícita cuales son las SbN (tanto de conservación como de restauración) de aplicación en el continuo territorial. Estas áreas, dada la naturaleza de los patrones y procesos del medio natural dominantes en la zona de estudio, con abundantes precipitaciones, topografía plana y un legado de ocupación del suelo dominado por procesos de usos agroganaderos, se encuentran principalmente relacionadas con la conservación y restauración de los bosques latifoliados mixtos (maduros y jóvenes) y bosques de manglar.

Amenaza	Servicio ecosistémico (SE)	Proceso / Comp. biofísico	Ecosistema/LULC (SbN)	Efecto
Inundación	Regulación hidrológica (frente inundaciones)	Conectividad lateral río - llanura de inundación	Llanura inundación y bosque latifoliado mixto maduro	Restauraciones de llanuras de inundación para aumentar el almacenamiento y la atenuación de inundaciones (Jacobsen et al., 2015). Moderación de caudales máximos al permitir el desbordamiento, ralentizando la ola de crecidas (Vis et al., 2001). La vegetación de ribera retarda ente 30-140 minutos el pico de caudal (Thomas y Nisbet, 2011).
		Generación de escorrentía	Bosque latifoliado mixto	El bosque latifoliado mixto maduro frena la escorrentía, interceptando hasta el 30% de la precipitación y promoviendo la infiltración del agua en el suelo, lo que puede aumentar la capacidad de almacenamiento hídrico en un 50% en comparación con áreas sin vegetación (Bruijnzeel, 2004). Reduce el riesgo de inundaciones en un 40% y mejora la estabilidad del ecosistema, lo que favorece la biodiversidad y la salud del suelo (Whelan et al., 2015).
Sequía	Regulación hidrológica (frente sequía)	Conectividad lateral río - llanura de inundación	Llanura inundación y bosque latifoliado mixto maduro	La vegetación de ribera aumenta entre un 15-71% la capacidad de almacenamiento de las llanuras (Thomas y Nisbet, 2011).
		Captura y almacén de agua	Bosque latifoliado mixto	El bosque latifoliado mixto maduro es fundamental en la captura y almacenamiento de agua, al aumentar la infiltración de lluvia en el suelo y mejorar la disponibilidad de agua en épocas de sequía. Este tipo de bosque puede incrementar la capacidad de retención de agua del suelo hasta un 50%, lo que permite almacenar grandes volúmenes de agua subterránea (Bruijnzeel, 2004). Además, su presencia puede reducir la escorrentía superficial en un 30%, favoreciendo la recarga de acuíferos y garantizando un suministro hídrico más estable durante períodos secos (Whelan et al., 2015).

Tabla 2. Conceptualización de las medidas de adaptación basadas en Naturaleza para los servicios ecosistémicos considerados para el área de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024.

7.4.2. Modelado e identificación de áreas proveedoras de SE

En los subapartados siguientes se describe la modelización realizada a nivel de provisión potencial de SE para cuantificar el efecto de las SbN. Como se ha señalado anteriormente, la modelización de SE está basada en la identificación de áreas prioritarias en las que está ocurriendo la provisión y demanda de los mismos. Los SE vienen determinados fundamentalmente por la interacción de la vegetación terrestre con factores topográficos, geomorfológicos y climáticos. Por ello, la selección e identificación de SbN en la matriz del paisaje se realizó en base a la identificación de áreas en las que se está produciendo una provisión deficiente del SE considerado debido a un estado de degradación de la vegetación, así como las áreas en las que la presencia de vegetal natural en un estado adecuado asegura la correcta provisión del SE. En el primer caso, deberán aplicarse soluciones de restauración mientras que en el segundo se aplicarán soluciones relacionadas con la conservación de la vegetación existente. En este contexto, la propuesta de SbN a integrar en la BGIN se basó en el establecimiento de umbrales estadísticos que prioricen aquellas áreas más interesantes por la intensidad y variedad (multifuncionalidad) de los SE potencialmente generados.

Regulación hidrológica frente inundaciones

- Volumen de almacenamiento de las llanuras de inundación

Una vez definidas las llanuras de inundación (ver apartado 7.3.1), la SbN lo constituiría el propio paisaje fluvial asumiendo su capacidad de almacenamiento de agua. Se identificaron aquellas llanuras de inundación con aptitud potencial del bosque de ribera como SbN de conservación y aquellas con aptitud potencial de restauración del bosque como área de restauración (Figura 20).

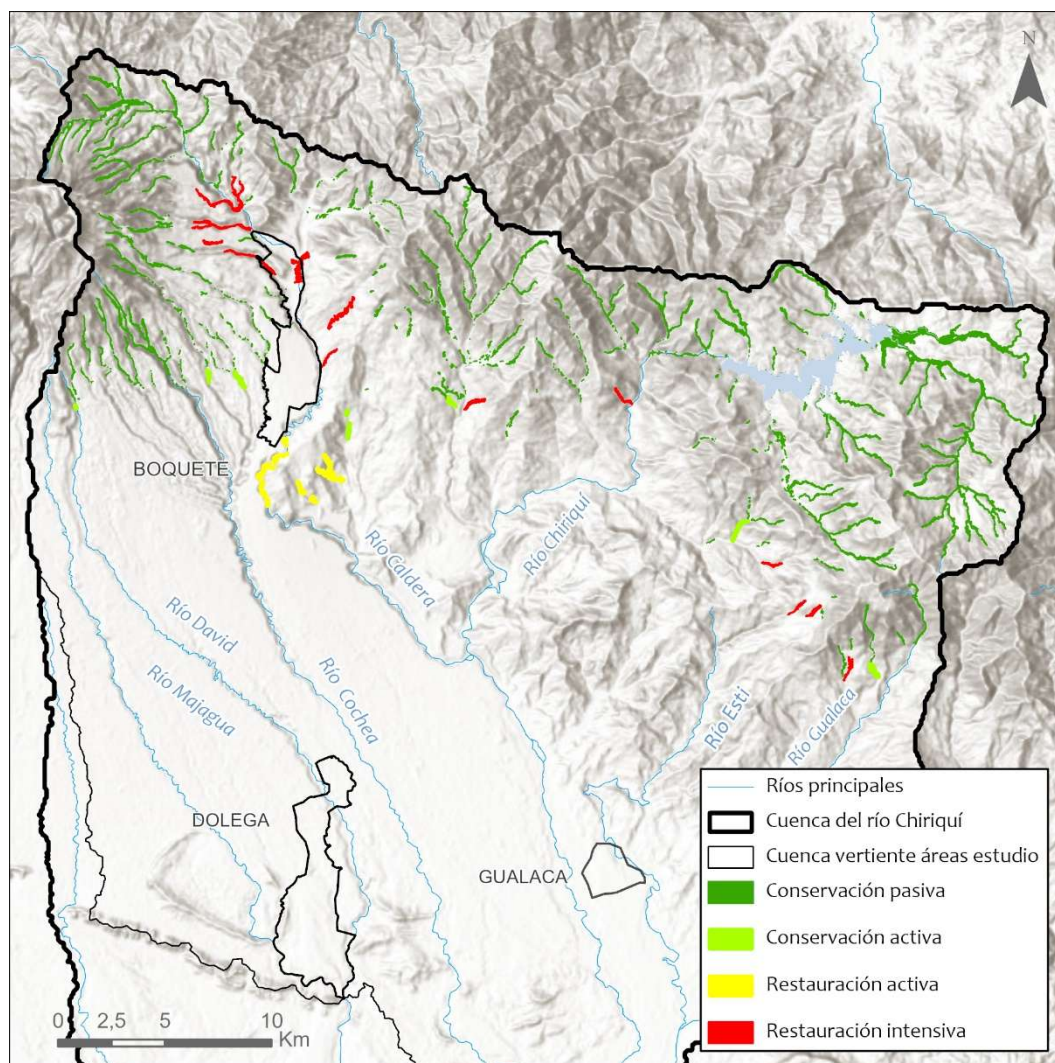


Figura 20. Mapa de SbN propuestas con bosque latifoliado mixto maduro para el SE de regulación hidrológica frente inundaciones en llanuras de inundación para la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca en el escenario futuro SS585 2050. Fuente: IHCantabria, 2024

- Control de escorrentía en las laderas

El potencial de una ladera para generar escorrentía (Figura 21) se consideró mediante los factores abióticos que controlan fundamentalmente la infiltración a escala de ladera (Dunne, et al., 1991), (Hopp & McDonnell, 2009): la pendiente y la permeabilidad del suelo. Además, según (Maetens, et al., 2012) las zonas con altas precipitaciones anuales suelen tener una distribución más uniforme de las precipitaciones a lo largo del año, lo que provoca una saturación estacional del suelo y una formación más rápida de escorrentía (Ponce & Hawkings, 1996) en las condiciones óptimas de permeabilidad y topografía. En este marco metodológico, se utiliza la pendiente y la permeabilidad del suelo para localizar aquellas laderas más susceptibles de generar escorrentía en cada cuenca considerando la precipitación como un indicador de magnitud de origen de la escorrentía. La permeabilidad del suelo se obtuvo de la información de geología procedente del IMHPHA/MiAMBIENTE y de la capa de geomorfología procedente del IGNTG, clasificando el área de estudio en zonas de permeabilidad baja, media y muy alta con base a bibliografía especializada y criterio de experto. Por su parte, la pendiente se derivó del MDT disponible y se promedió a escala de ladera de drenaje. Así, aquellas con una pendiente media de 5° a 45° que se encuentren en una zona de permeabilidad baja se consideran en el análisis como las laderas más importantes para la generación de escorrentía.

En este caso, se consideró el bosque latifoliado mixto maduro presente en las laderas como el elemento biótico que debería ser incluido como SbN. Aquellas laderas con riesgo alto de generación de escorrentía y con una potencialidad del bosque latifoliado mixto maduro de conservación se clasifican como SbN de conservación, en cambio, aquellas laderas también susceptibles de generar una alta escorrentía, pero con potencialidad de restauración de los bosques latifoliados mixtos maduros son determinadas como SbN de restauración (Figura 22).

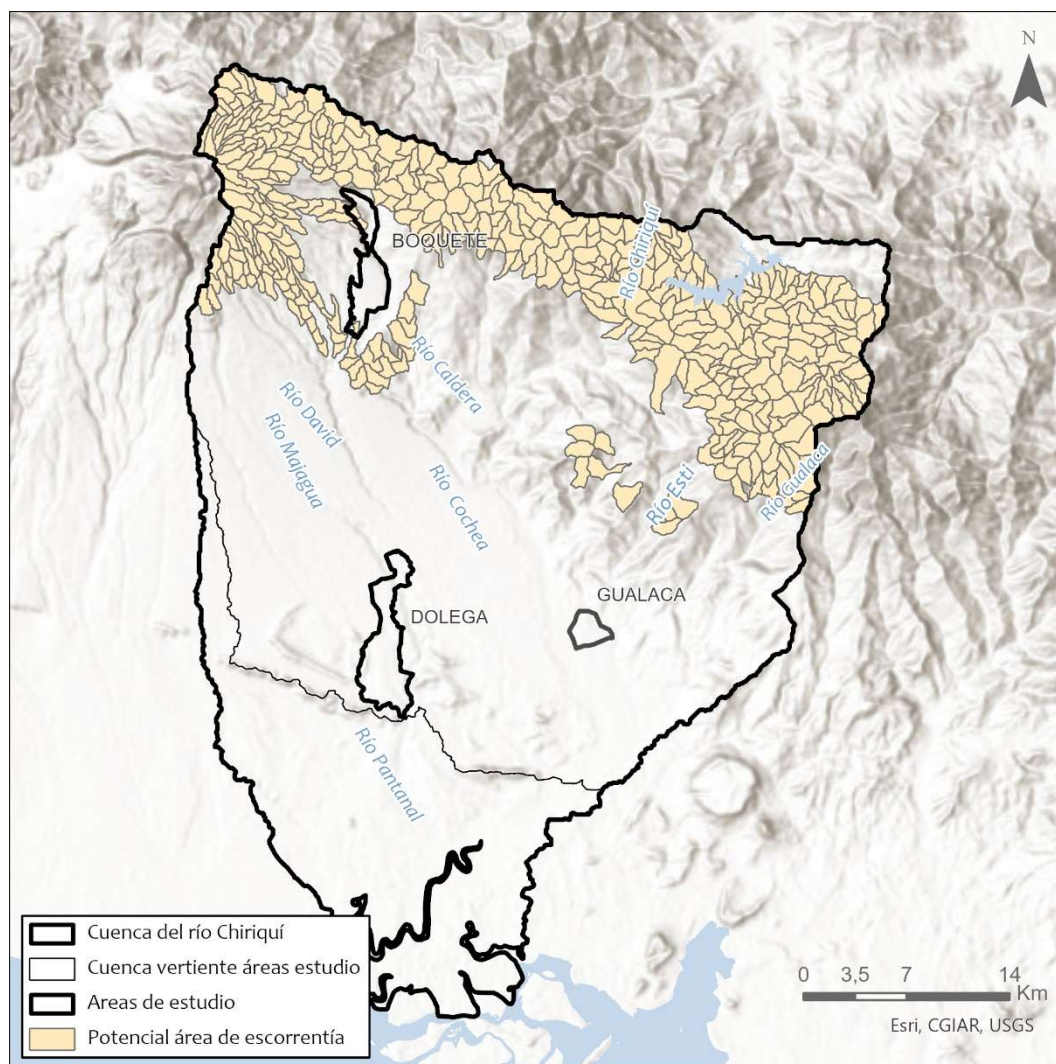


Figura 21. Laderas de drenaje con potencial de generar escorrentía según factores topográficos, de permeabilidad y de uso para la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024

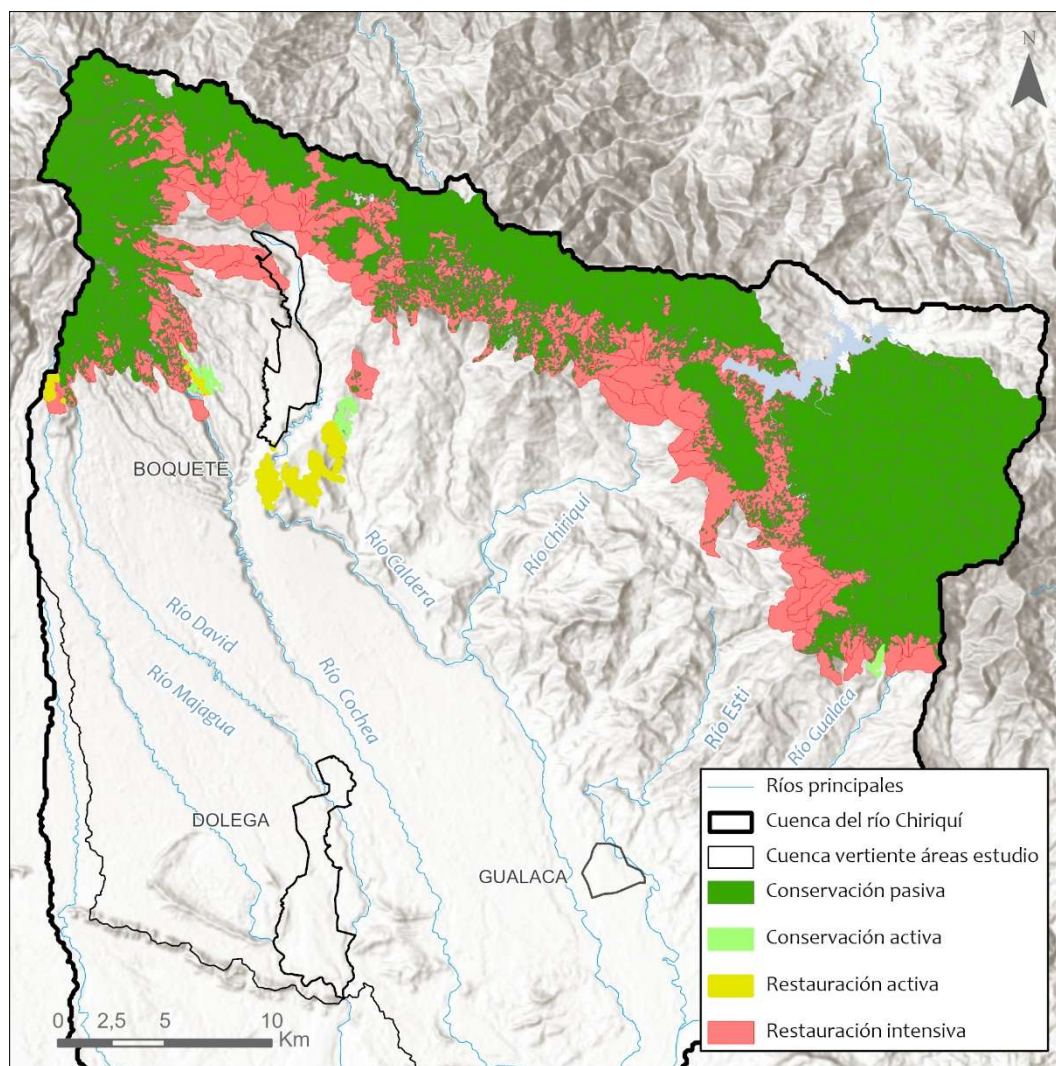


Figura 22. Mapa de SbN propuestas con bosque latifoliado mixto maduro para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el control de escorrentía en la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca en el escenario futuro SSP585 2050. Fuente: IHCantabria.

Regulación hidrológica frente sequía

- Volumen de almacenamiento de las llanuras de inundación

De forma análoga al anterior apartado, una vez definidas las llanuras de inundación (ver apartado 7.3.1), la SbN lo constituiría el propio paisaje fluvial asumiendo su capacidad de almacenamiento de agua. Se identificaron aquellas llanuras de inundación con aptitud potencial del bosque de ribera como SbN de conservación y aquellas con aptitud potencial de restauración del bosque como SbN de restauración (Figura 23)

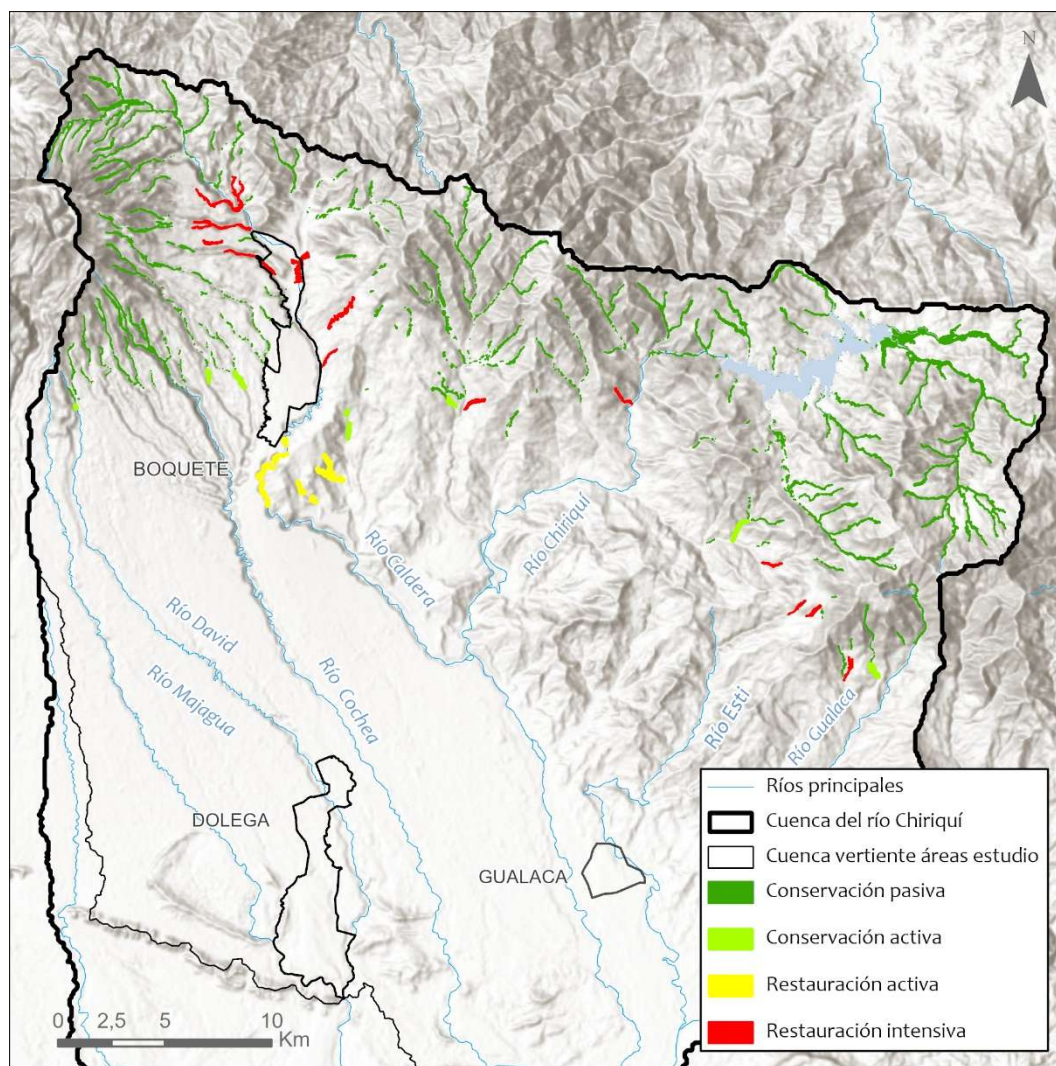


Figura 23. Mapa de SbN propuestas con bosque latifoliado mixto maduro para el SE de regulación hidrológica frente sequía en llanuras de inundación para la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca en el escenario futuro SS585 2050. Fuente: IHCantabria, 2024

- Captura y almacenamiento de agua

El potencial de una ladera para generar infiltración (Figura 24) se consideró mediante los factores abióticos que controlan fundamentalmente este fenómeno a escala de ladera (Dunne, et al., 1991), (Hopp & McDonnell, 2009): la pendiente y la permeabilidad del suelo. Además, según (Maetens, et al., 2012) las zonas con altas precipitaciones anuales y con una distribución uniforme de las precipitaciones a lo largo del año provoca una mayor capacidad de infiltración en condiciones óptimas de permeabilidad y topografía. En este marco metodológico, se utiliza la pendiente y la permeabilidad del suelo para localizar aquellas laderas más susceptibles de generar infiltración en la cuenca considerando la precipitación como un indicador de magnitud. La permeabilidad del suelo se obtuvo de la información de geología procedente del IMHPHA/MiAMBIENTE y de la capa de geomorfología procedente del IGNTG, clasificando el área de estudio en zonas de permeabilidad baja, media y muy alta con base a bibliografía especializada y criterio de experto. Por su parte, la pendiente se derivó del MDT disponible y se promedió a escala de ladera de drenaje. Así, aquellas con una pendiente media menor al 5° y que se encuentren en una zona de permeabilidad alta se consideran en el análisis como las laderas más importantes para la generación de infiltración de agua.

En este caso, se consideró el bosque latifoliado mixto maduro presente en las laderas como el elemento biótico que debería ser incluido como SbN. Aquellas laderas con una capacidad alta de infiltración y con una potencialidad del bosque latifoliado mixto maduro de conservación se clasifican como SbN de conservación, en cambio, aquellas laderas también con alta capacidad de infiltración, pero con potencialidad de restauración de los bosques latifoliados mixtos maduros son determinadas como SbN de restauración (Figura 25)

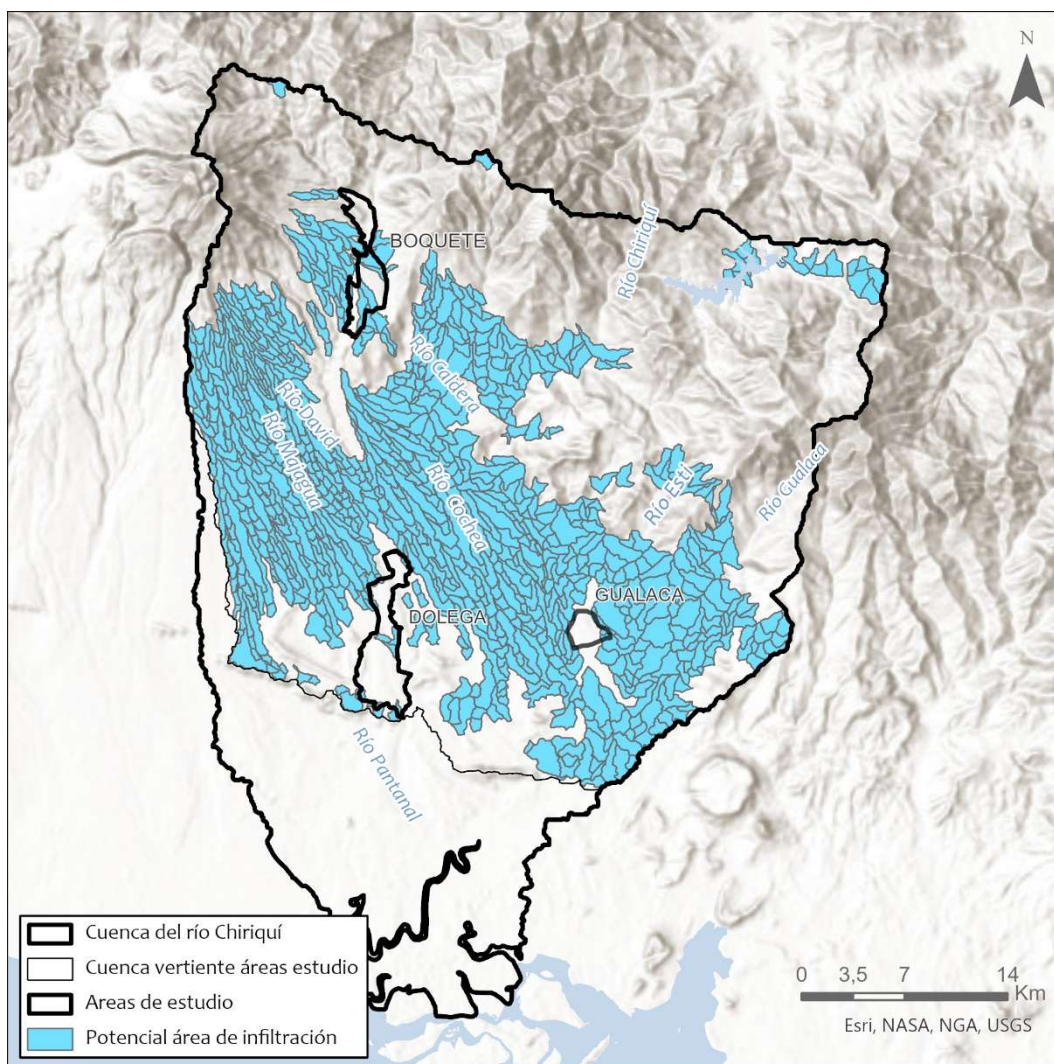


Figura 24. Laderas de drenaje con potencial de generar infiltración según factores topográficos, de permeabilidad y de uso para la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024

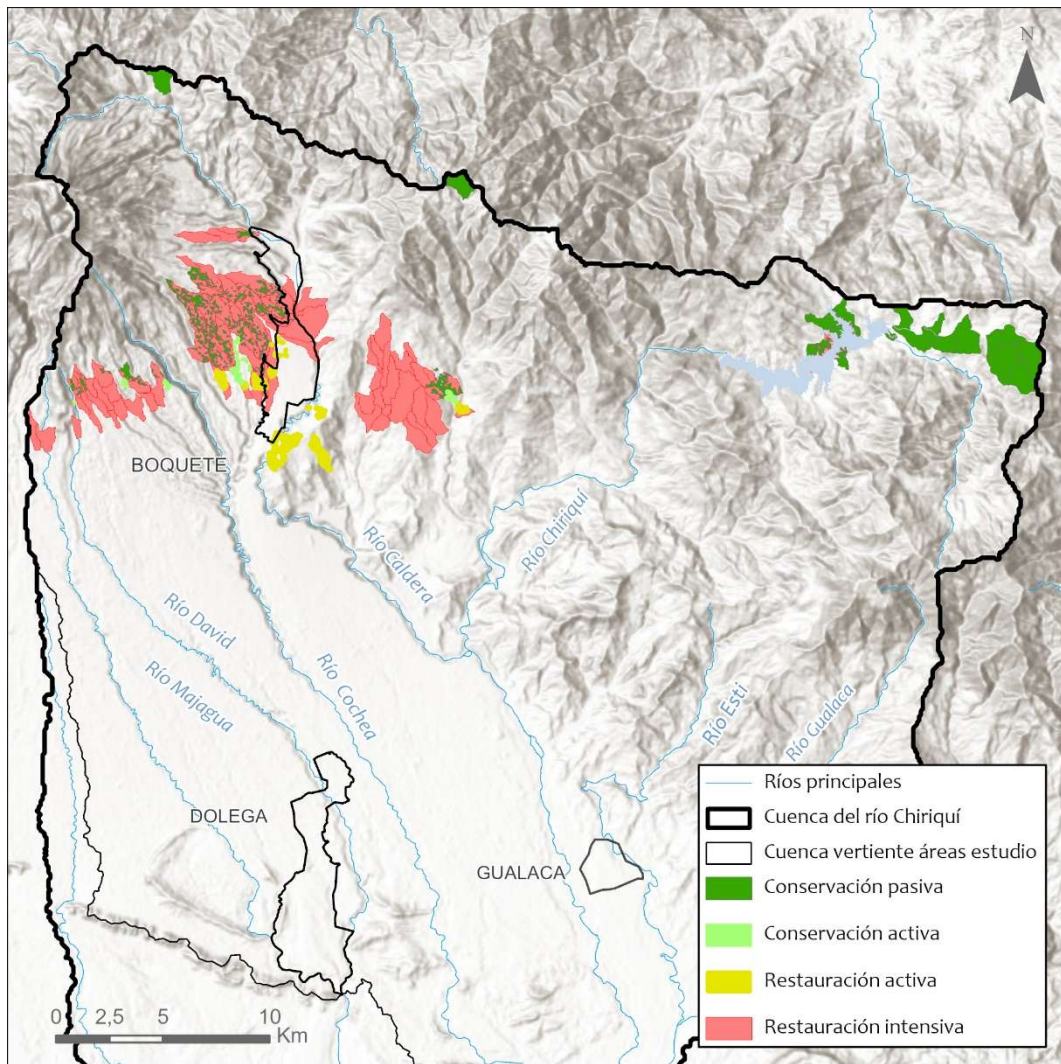


Figura 25. Mapa de SbN propuestas con bosque latifoliado mixto maduro para el SE de regulación hidrológica en laderas de drenaje para el aumento de la infiltración en la cuenca drenante de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca en el escenario futuro SSP585 2050. Fuente: IHCantabria, 2024

8. ESTUDIO DE RIESGO POR ESCASEZ DE RECURSOS HÍDRICOS

El objetivo principal del presente estudio es conocer cómo afecta la escasez del recurso hídrico a la población de las áreas urbanas de Boquete, Dolega y Gualaca. La escasez representa una situación permanente de déficit en relación con la demanda de agua en un sistema de recursos de ámbito local o regional, caracterizado, bien por un clima árido o bien por un rápido crecimiento de las demandas consuntivas.

El distrito de Boquete se abastece de agua potable a través del Sistema de Acueducto Municipal, Juntas Administradoras de Acueductos Rurales (JAARs) y pozos. La fuente de agua del Sistema de Acueducto Municipal son dos ojos de agua ubicados en Los Ladrillos y Las Mercedes, de los que se toma el agua y se conduce a tanques de almacenamiento próximos para su posterior distribución a los corregimientos de Los Naranjos, Bajo Boquete y parte de Alto Boquete (Cruz Roja y Volcancito).

Donde no se tiene acceso al sistema de abastecimiento municipal, las comunidades crean organizaciones comunitarias llamadas JAARs que son responsables de la administración, operación y mantenimiento de los sistemas de agua potable y saneamiento del sector que corresponda. En Boquete hay un total de 10 JAARs en los corregimientos de Jaramillo, Alto Boquete, Caldera, Palmira, Los Naranjos y Bajo Boquete.

Por último, debido al crecimiento poblacional en los corregimientos de Alto Boquete y El Francés, el municipio ha solicitado a los nuevos proyectos residenciales el abastecimiento para los habitantes a través de pozos. Tal es el caso de los residenciales PGR y Villa Altos de Boquete en Caldera. El municipio no tiene la capacidad para abastecer a la población creciente y en estas zonas no hay fuentes de agua como en Bajo Boquete y las zonas cercanas a las áreas de recarga hídrica.

Según la información obtenida en los talleres con actores locales, existen diferentes sistemas de abastecimiento en el área urbana del distrito Dolega: Sistema de Acueducto Municipal, JAARs y pozos (en áreas residenciales, hospitales y escuelas). El Sistema de Acueducto Municipal toma agua de distintas fuentes superficiales que son tratadas en dos plantas previamente a su distribución. La planta de Dolega que toma agua del río Cochea y abastece al corregimiento de Dolega Cabecera y la planta de Los Algarrobos que toma agua de los ríos Majagua y David y abastece a la parte baja del área de estudio, corregimientos de Los Algarrobos y Los Anastacios, así como la ciudad de David.

La población del área urbana de Gualaca Cabecera se abastece exclusivamente de una planta de tratamiento cuya fuente de agua es el Lago Barrigón, que embalsa agua procedente de los ríos Caldera y Chiriquí. El río de Estí, cauce más próximo al área de estudio, solo sirve de fuente de agua en caso de emergencia. El agua que suministra la planta es únicamente para consumo humano, el agua para los sistemas agropecuario y acuícola lo suministra el canal de riego que atraviesa el área de estudio.

Este estudio se centra en el análisis de la escasez de recursos hídricos superficiales que abastecen al área de estudio, cuyo uso principal es el consumo humano.

8.1. Metodología de obtención del riesgo por escasez de recursos hídricos

Para obtener el riesgo de escasez de recursos hídricos se ha seguido una metodología que incluye los siguientes pasos, aplicados de forma secuencial:

- Obtención del régimen natural de caudales de la cuenca del río Chiriquí, empleando un modelo hidrológico semidistribuido.
- Obtención del régimen de caudales modificado, considerando los principales usos del agua y embalses en la cuenca. Se consideran caudales de mantenimiento como restricciones a los usos existentes, con una prioridad dada.
- Determinación de la garantía de satisfacción media de los diferentes usos, a partir del modelo anterior. Dicha garantía opera como un nivel de amenaza, dentro del marco conceptual de análisis de riesgos aplicado.
- Obtención de las principales variables de vulnerabilidad relevantes para determinar el riesgo de escasez de recursos hídricos.
- Cálculo del riesgo estandarizado, definido en una escala homogénea de 0 a 1, como combinación de la amenaza y la vulnerabilidad.

Cabe señalar que el procedimiento descrito se basa en procesar series climáticas de las variables relevantes (precipitación, temperaturas y evapotranspiración potencial) a escala diaria durante los periodos de análisis, tanto para el clima actual como para las proyecciones de cambio climático futuras (horizontes 2030 y 2050 para el escenario SSP5-8.5), por lo que el recurso analizado en este estudio es únicamente el superficial. Los resultados son también las series de satisfacción de las demandas a escala mensual, que posteriormente se postprocesan para obtener sus estadísticos (media, desviación típica y percentiles). Por tanto, el análisis es totalmente probabilista en lo que respecta a la amenaza, si bien los factores de vulnerabilidad, y el riesgo resultante, se expresan de manera determinista.

8.2. Caracterización de la amenaza

Para la caracterización de la amenaza de escasez de recursos hídricos se realiza el balance hídrico a nivel de subcuenca. La obtención del balance hídrico a nivel de subcuenca es una tarea fundamental para conocer la disponibilidad real de agua a escala de cuenca hidrográfica. Su finalidad es determinar, con los caudales naturales obtenidos tras la aplicación de un modelo hidrológico y las demandas existentes en las diferentes subcuencas, esto es, el agua que se utiliza para cada uso, la garantía de suministro de cada demanda considerada y los caudales intervenidos fluyentes en cada tramo de río.

La metodología utilizada se basa en la realizada en el Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Generación del Atlas Interactivo de Visualización de los Resultados para la República de Panamá, desarrollada por IHCantabria para Banco Interamericano para el Desarrollo (BID), adaptada al área de estudio.

8.2.1. Modelo hidrológico

Uno de los fenómenos que pueden generar mayores impactos, como consecuencia del cambio climático, es la alteración del régimen de caudales en los ríos. El análisis de recursos hídricos tiene como objetivo cuantificar la variabilidad de los caudales fluyentes en los principales ríos de la cuenca del río Chiriquí, tanto en situación actual como bajo distintas proyecciones de cambio climático. Cabe resaltar que el objetivo en este estudio es determinar no sólo los caudales medios, sino su variabilidad a lo largo del año, incluyendo años secos y húmedos.

La transformación del agua de lluvia en caudal fluvial es un proceso relativamente complejo que puede aproximarse mediante modelos hidrológicos. En su versión más simple (por ejemplo, las curvas de Budyko), se calcula únicamente un caudal medio, pero resulta más útil determinar las series completas de caudales a partir de las precipitaciones y la evapotranspiración, la cual está muy ligada a la temperatura y a la vegetación.

En 2015, IHCantabria desarrolló un estudio hidrológico de las cuencas vertientes al sistema del Canal de Panamá (sector Gatún y Alhajuela), cubriendo aproximadamente 3,300 km², lo que supone un 4.5% de la superficie de Panamá. En dicho estudio se comprobó que un modelo hidrológico basado en principios de equilibrio desarrollado en IHCantabria, en concreto el *Logistic Equilibrium Model* (LEM, por sus siglas en inglés), era capaz de reproducir de forma muy satisfactoria el comportamiento de estos ríos; en concreto, se alcanzaron niveles de ajuste de NS= 0.87 a escala diaria (6 años de datos) en las estaciones de Peluca y Candelaria, ambas tributarias del lago Alhajuela (ver Figura 26). Por otra parte, se pudo comprobar que la relativa homogeneidad de clima y suelos de la región permitía extrapolar con buena aproximación los parámetros del modelo obtenidos a cuencas no instrumentadas.

En la actualidad, se han desarrollado versiones mejoradas del modelo LEM (por ejemplo, se cuenta con una versión semiagregada y distribuida), al tiempo que se dispone de nuevos datos para su calibración. Se propone, por tanto, el uso de este modelo para simular la situación actual y los escenarios futuros en cuanto a recursos hídricos en Panamá. El modelo es libre y abierto, y se dispone de códigos y ejecutables en Python, R y Matlab, que podrían ser transferidos, con los talleres de formación/capacitación necesarios, a las instituciones que lo requieran.

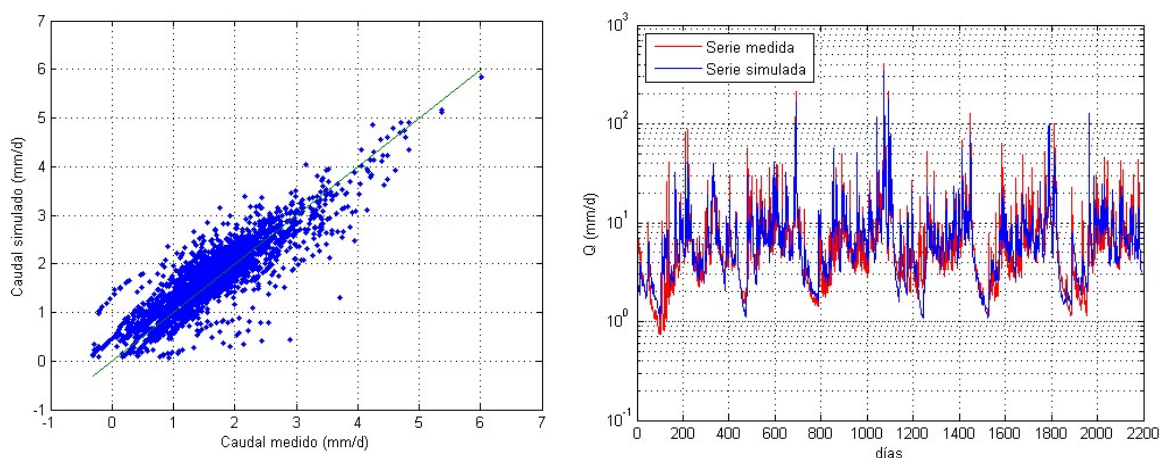


Figura 26. Comparación de caudales diarios medidos y simulados en escala logarítmica (izquierda) y caudales medidos vs. simulados en escala semilogarítmica (derecha) en la estación Peluca. Fuente: IHCantabria, 2015.

Definición de subcuencas de trabajo

La red hidrográfica básica de Panamá está dividida en 52 cuencas (ver Figura 27), de las cuales 18 corresponden a la vertiente del mar Caribe, representando el 30% del territorio nacional y denominándose con números impares comenzando desde el 87 hasta el 121 (según la convención aceptada tras el Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano de 1972); las otras 34 cuencas hidrográficas pertenecen a la vertiente del océano Pacífico, representando el 70% restante del territorio nacional, denominándose con números pares desde el 100 hasta el 166. El tamaño medio de estas cuencas es de unos 1500 km², siendo las más extensas la de Tuira-Chucunaque (13400 km²) y Bayano (5291 km²).

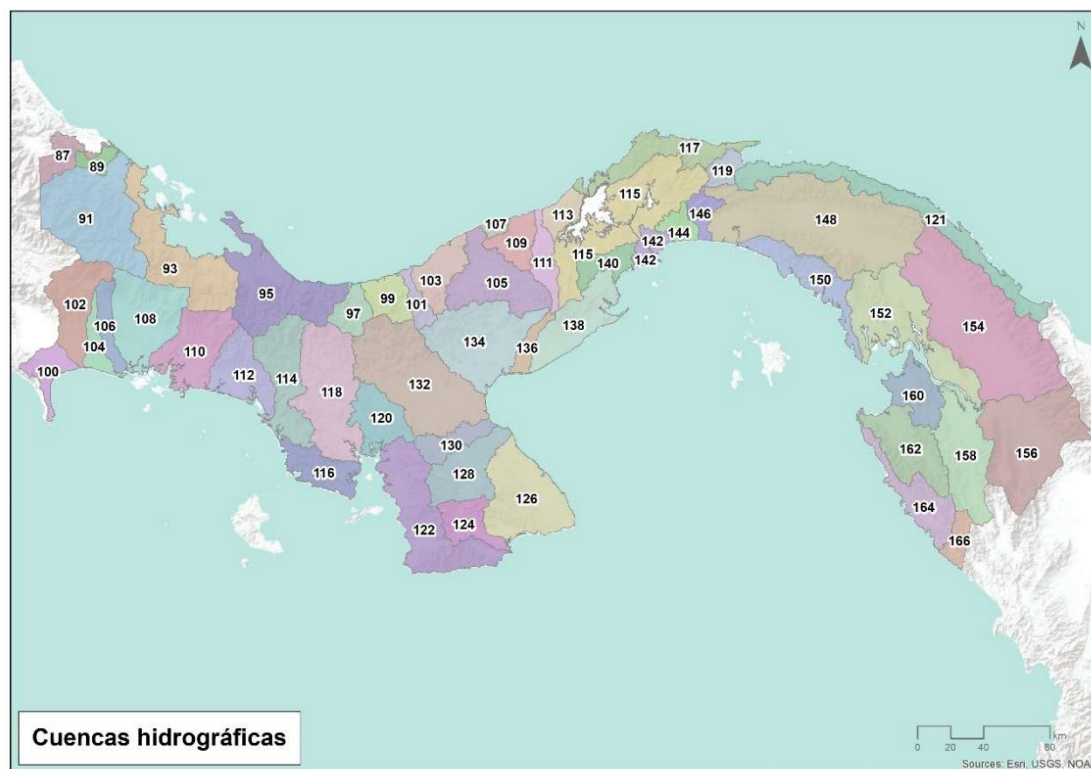


Figura 27. Cuencas hidrográficas oficiales existentes en el territorio de Panamá y su nomenclatura. Fuente: IHCantabria, 2024.

Para el Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Generación del Atlas Interactivo de Visualización de los Resultados para la República de Panamá, se ha llevado a cabo una subdivisión de las cuencas oficiales, respetando su nomenclatura oficial, hasta llegar a un total de 719 subcuencas con un tamaño mediano de 90 km² (incluyendo 15 subcuencas pertenecientes a Costa Rica que vierten a Panamá y que son necesarias para la caracterización de los caudales en la totalidad del territorio panameño).

El proceso de subdivisión de las cuencas oficiales se ha basado en las subcuencas que fueron proporcionadas por la Dirección de Seguridad Hídrica del Ministerio de Ambiente, si bien se han realizado algunas modificaciones con base en la hidrología, para favorecer un tamaño de subcuenca más homogéneo en todo el territorio.

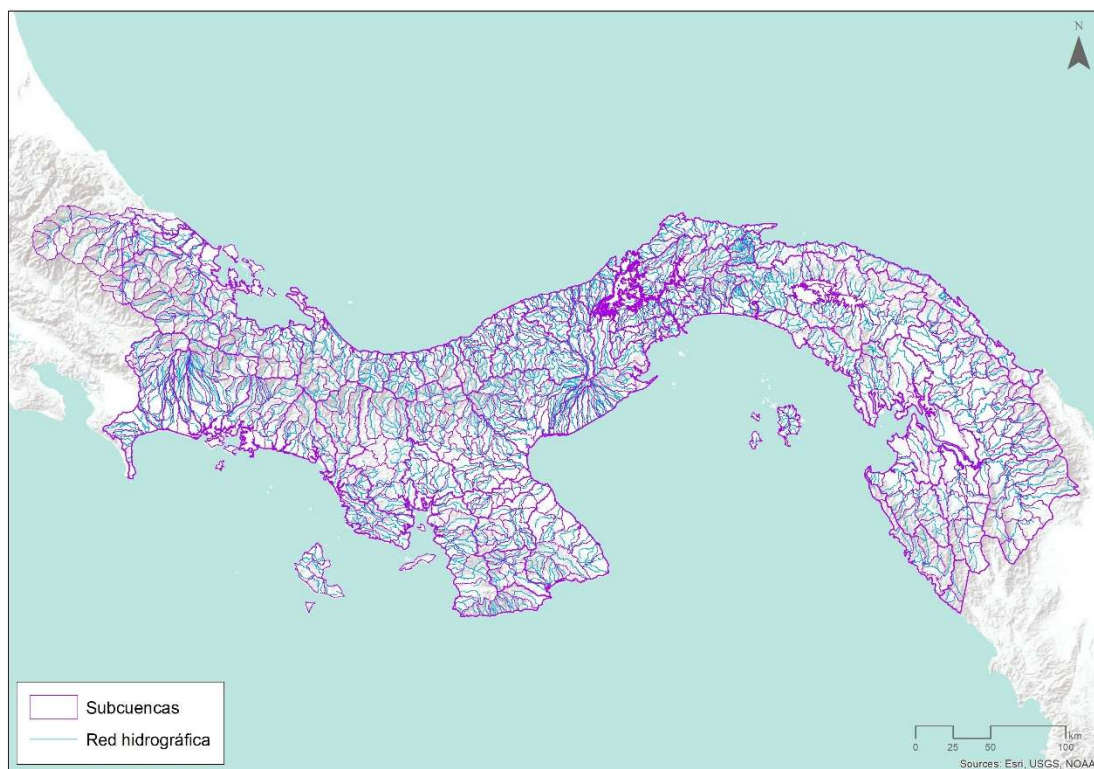


Figura 28. Subcuencas consideradas en el territorio de Panamá. Fuente: IHCantabria, 2024.

El recurso hídrico para consumo humano de las áreas urbanas de Boquete, Dolega y Gualaca se obtiene tal y como se comenta anteriormente de diferentes fuentes dentro de la cuenca del río Chiriquí. En ese sentido, en la Figura 29 se presentan las subcuencas en las que se ha dividido dicha cuenca y en la Tabla 3 sus principales características.

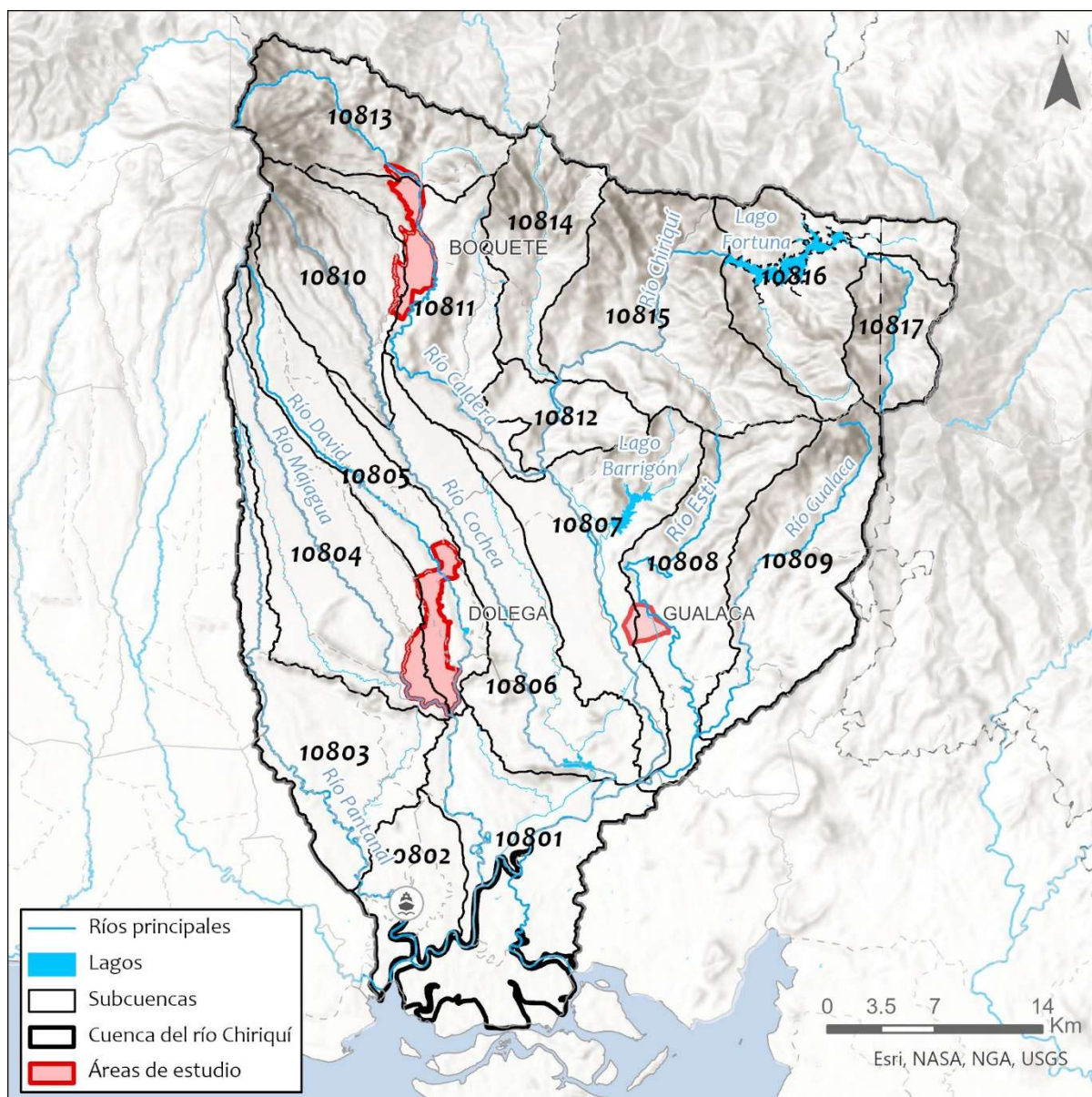


Figura 29. Subcuencas consideradas en la cuenca de estudio, cuenca del río Chiriquí. Fuente: IHCantabria, 2024.

ID Subcuenca	Área (km ²)	Altura media (m)	Longitud del cauce (km)	Pendiente
10801	160.09	21.03	19.50	0.49
10802	56.35	10.60	13.18	0.28
10803	130.74	127.25	35.98	2.14
10804	154.99	408.32	40.00	3.65
10805	107.89	527.33	44.52	4.58
10806	149.84	217.65	34.76	1.28
10807	137.94	241.71	33.00	1.18
10808	117.93	325.30	36.45	5.18
10809	136.69	543.99	32.67	6.01
10810	100.21	1258.18	26.65	8.58
10811	111.99	897.91	30.35	2.92
10812	44.90	417.51	15.29	2.63

ID Subcuenca	Área (km ²)	Altura media (m)	Longitud del cauce (km)	Pendiente
10813	106.58	1892.32	30.12	3.06
10814	75.56	1367.76	21.51	8.98
10815	166.16	933.08	20.54	3.59
10816	114.85	1323.61	10.75	0.18
10817	52.55	1560.47	14.51	6.37

Tabla 3. Características principales de las subcuencas de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.

Para cada una de las subcuencas, se han tenido en cuenta las variables tipo de suelo, uso del suelo y pendiente para asignar un valor del número de curva, que es uno de los parámetros hidrológicos fundamentales que utiliza el modelo LEM. Además, se han determinado las longitudes y pendientes medias de los cauces principales en cada subcuenca, con el fin de calcular el tiempo de respuesta hidrológica (similar al tiempo de concentración), otro parámetro principal empleado por el modelo.

Tipo	CNII	Tipo	CNII
Afloramiento rocoso y tierra desnuda	71	Explotación minera	85
Albinas	67	Horticultura mixta	70
Área heterogénea de producción agropecuaria	76	Infraestructura	92
Área poblada	85	Maíz	67
Arroz	67	Otro cultivo anual	67
Bosque de cativo	58	Otro cultivo permanente	67
Bosque de mangle	96	Palma aceitera	66
Bosque de orey	58	Pasto	69
Bosque de rafia	58	Piña	60
Bosque latifoliado mixto maduro	58	Plátano/banano	60
Bosque latifoliado mixto secundario	58	Playa y arenal natural	25
Bosque plantado de coníferas	52	Rastrojo y vegetación arbustiva	58
Bosque plantado de latifoliadas	58	Salinera	25
Café	67	Superficie de agua	100
Caña de azúcar	67	Vegetación baja inundable	58
Cítrico	60	Vegetación herbácea	69
Estanque para acuicultura	100		

Tabla 4. Número de curva asignado por uso del suelo. Fuente: IHCantabria, 2024.

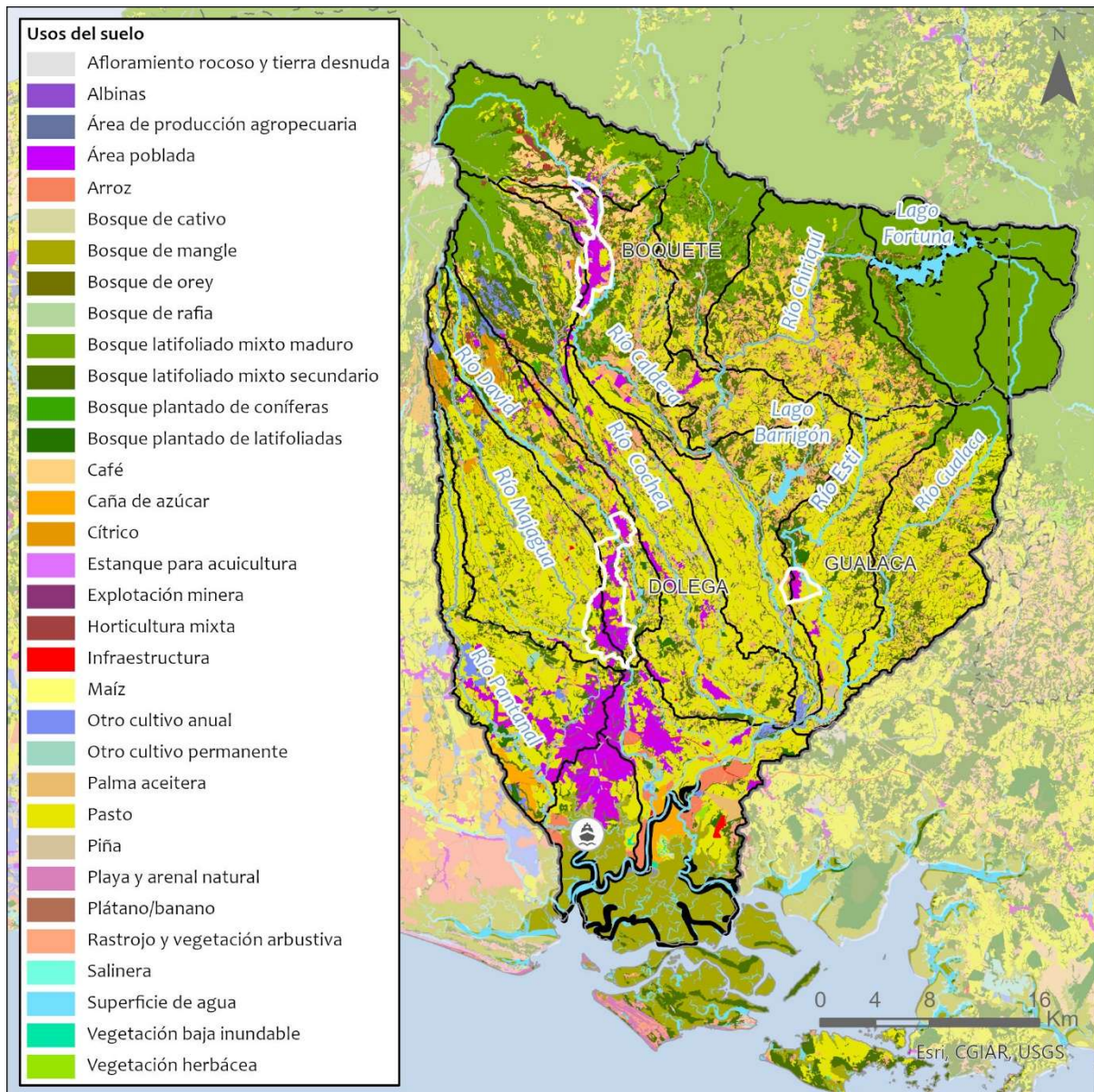


Figura 30. Usos del suelo de la cuenca de estudio, cuenca del río Chiriquí. Fuente: IHCantabria, 2024.

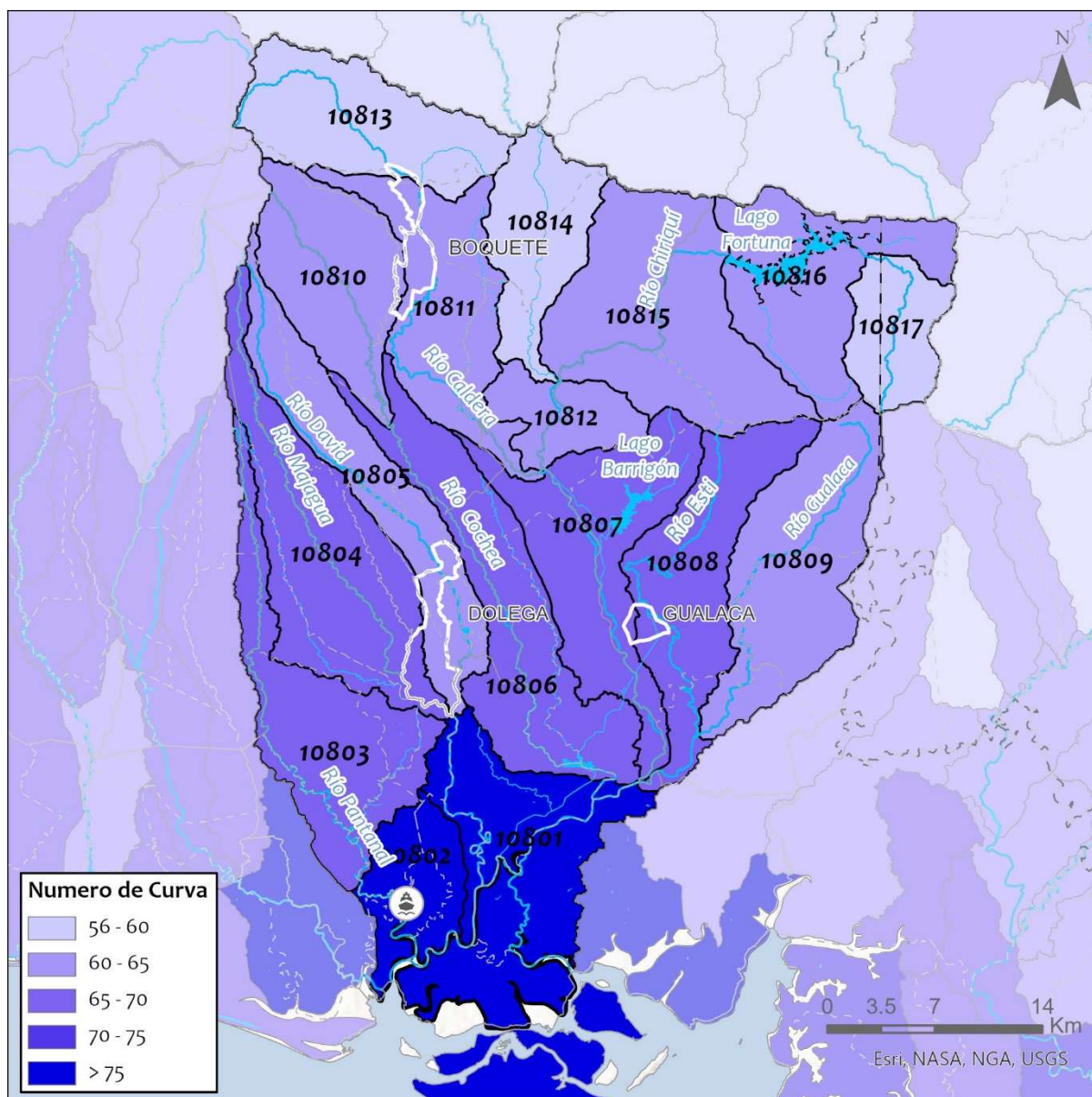


Figura 31. Número de curva (CN-II) de las subcuencas consideradas. Fuente: IHCantabria, 2024.

También se han extraído las series climáticas de precipitación y evapotranspiración potencial (ETP) diarias para cada una de las subcuencas tanto para la situación actual como para los escenarios de cambio climático SSP585 2030 y 2050 (representados por la mediana de los 23 modelos cambio climático utilizados).

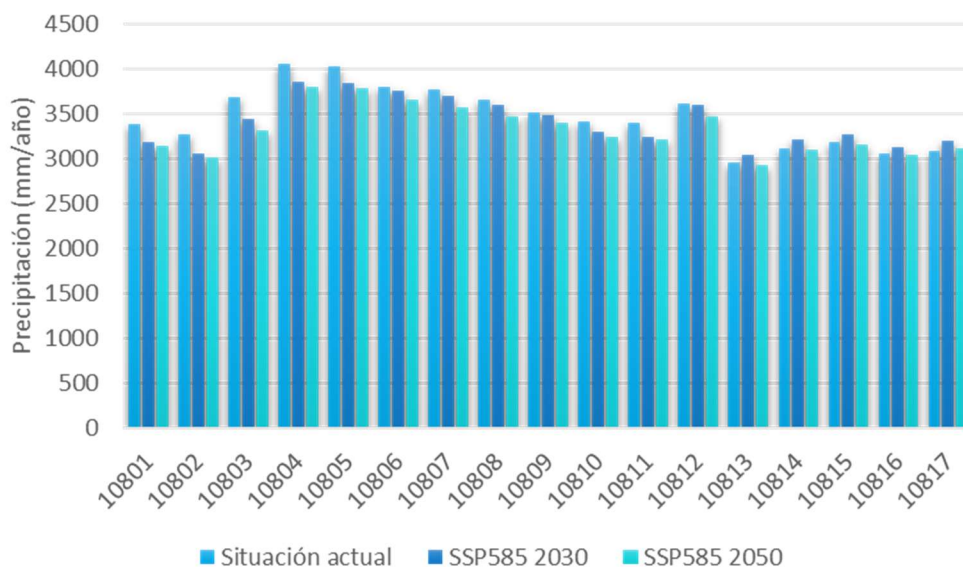


Figura 32. Precipitación media anual (mm/año) en las subcuencas consideradas para la situación actual y para los escenarios de cambio climático SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.

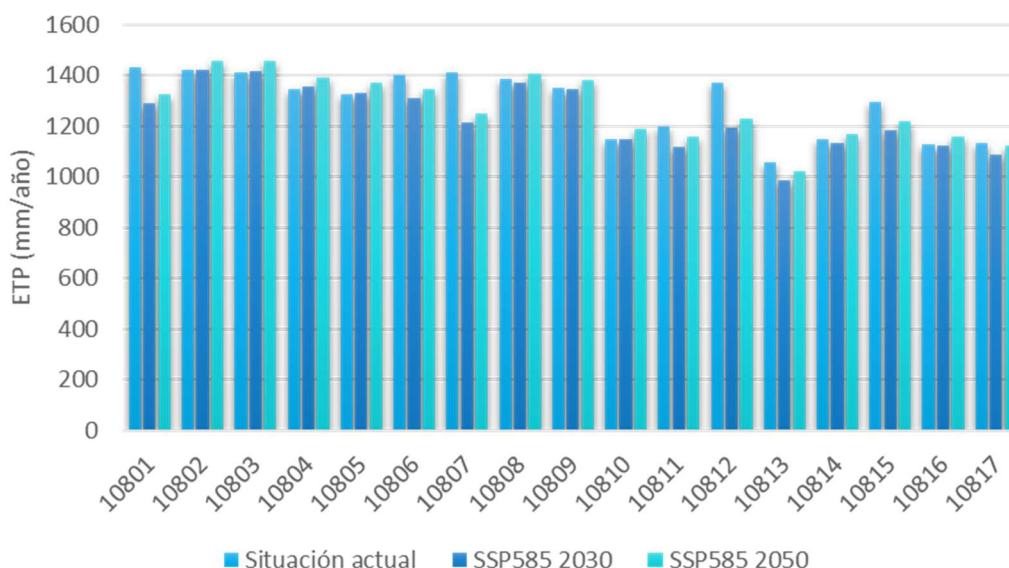


Figura 33. ETP media anual (mm/año) en las subcuencas consideradas para la situación actual y para los escenarios de cambio climático SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.

Descripción del modelo hidrológico LEM

El modelo hidrológico de equilibrio logístico fue desarrollado por IHCantabria para resolver de forma agregada los procesos de producción de escorrentía en cuencas naturales, teniendo en cuenta los siguientes requisitos:

- El modelo debe incorporar un número reducido de parámetros, no más de 3 o 4, incluyendo uno para el fenómeno de enrutamiento.

- Dichos parámetros deben guardar relación con otros parámetros previamente usados en hidrología aplicada: número de curva, capacidad de almacenamiento del suelo, parámetros de Budyko, tiempo de concentración, etc.
- Las ecuaciones del modelo deben poder resolverse con un esquema numérico simple e incondicionalmente estable, para cualquier paso de tiempo, y empleando tanto caudales medios (a lo largo del intervalo de tiempo) como instantáneos. En consecuencia, el modelo debe ser eficiente en términos computacionales, para facilitar la calibración o su aplicación en un marco probabilista.
- El modelo debe poder representarse en forma de espacio de estado (o *state-space*), para poder aplicar, en caso necesario, técnicas como los filtros de Kalman y sus variantes.
- El modelo debe representar de forma diferenciada el proceso de conversión de la lluvia en escorrentía, por un lado, y el de propagación de la escorrentía al punto de salida, por otro. Ambos subprocesos (que denominaremos escorrentía y enrutamiento) deben ser independientes y estar desacoplados.

La idea germinal para lograr estos objetivos fue abandonar el enfoque mecanicista de los modelos de depósitos, y tratar de representar el proceso hidrológico a partir de una serie de hipótesis empíricas basadas en lo que se ha venido en denominar hidrología adaptativa o darwiniana:

1. Las cuencas hidrográficas son sistemas complejos que persiguen continuamente un equilibrio dinámico, dado por una combinación del forzamiento climático (principalmente asociado a la precipitación y evapotranspiración potencial) y algunas características clave del terreno (topografía, vegetación, suelo, geología, etc.). La evolución de la escorrentía (R) hacia el equilibrio sigue una ley clásica de crecimiento limitado o ecuación logística:

$$\frac{dR(t)}{dt} = K \cdot R(t) \cdot \left(1 - \frac{R(t)}{R_{eq}}\right)$$

que incluye dos parámetros que varían en el tiempo: la capacidad de carga o la escorrentía de equilibrio (R_{eq}) y la tasa de crecimiento (K).

2. La escorrentía de equilibrio R_{eq} se puede expresar como un coeficiente de escorrentía de equilibrio (C_{eq}) multiplicado por la precipitación instantánea: $R_{eq} = P \cdot C_{eq}$. El coeficiente de escorrentía de equilibrio (C_{eq}) sigue una fórmula de tipo Budyko, en este caso gobernada por una relación de aridez dinámica que refleja las condiciones de humedad antecedente de la cuenca.
3. La tasa de crecimiento (K) de la ecuación logística es una función lineal de la precipitación: $K = \frac{P}{S_0}$, donde S_0 es una constante con unidades de longitud (mm) que representa un espesor característico del suelo (pero no se trata de su capacidad máxima de almacenamiento).
4. La ecuación logística representa la producción de agua sin considerar ningún tiempo de viaje o mecanismo de enrutamiento desde las zonas de producción de escorrentía hasta el punto final de medida del caudal, en la salida de la cuenca. Cuando el intervalo de tiempo de análisis es del mismo orden de magnitud que el tiempo de respuesta de una cuenca, se debe agregar

un método de propagación o factor de retraso para transformar la escorrentía (R) en caudal (Q), medido en la salida de la cuenca.

Si se adopta un modelo lineal para el submodelo de enrutamiento (cualquier otro método puede ser válido, incluido un desfase temporal constante) se llega al siguiente sistema de ecuaciones diferenciales, que constituye la versión estándar del LEM:

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{P(t)}{S_0} \cdot R(t) \cdot \left[1 - \frac{R(t)}{R_{eq}(t)} \right]$$

$$\frac{d\hat{P}(t)}{dt} = P(t) - \frac{\hat{P}(t)}{\lambda}$$

$$\frac{d\hat{E}(t)}{dt} = E(t) - \frac{\hat{E}(t)}{\lambda}$$

$$R_{eq}(t) = P(t) \cdot C_{eq}(\psi); C_{eq}(\psi) = e^{-a \cdot \psi}, \psi = \frac{\hat{E}}{\hat{P}}$$

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot [R(t) - Q(t)]$$

Donde R y Q representan la escorrentía total y la descarga medida en la salida de la cuenca, respectivamente. P y E son la precipitación y la evapotranspiración potencial en cada paso de tiempo, mientras que \hat{P} y \hat{E} son valores promediados de P y E durante un periodo de tiempo característico, respectivamente. La versión estándar del LEM tiene cuatro parámetros:

1. λ (días), que representa el tiempo característico de respuesta lenta o la "memoria" de la cuenca.
2. S_0 (mm), que representa un espesor medio de suelo o una capacidad de almacenamiento característica de la cuenca (pero no es su máxima capacidad de almacenamiento)
3. a (-): un parámetro adimensional que modifica la forma de la función de equilibrio (típicamente en el rango 0.5-1.5)
4. τ (horas), el parámetro de enrutamiento, que es similar a un tiempo al pico característico o un tiempo de respuesta rápido de la cuenca.

Cabe indicar que este sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias puede resolverse numéricamente de manera muy eficiente con un esquema explícito incondicionalmente estable, aprovechando el hecho de que todas las ecuaciones, y en especial la logística, tienen solución analítica.

Las ecuaciones anteriores pueden aplicarse de manera agregada para toda una cuenca, considerada como un ente único, o bien de manera semi-distribuida, considerando varias subcuencas, cada una de ellas con sus parámetros y forzamientos climáticos diferenciados. Si se emplea el modelo en un marco semi-distribuido, es preciso incluir, cuando el paso temporal de cálculo lo requiera, la traslación del flujo desde cada subcuenca al punto de salida.

Para calibrar el modelo basándose en datos de reanálisis, es necesario definir la función de error, que se trata de minimizar, como una distancia entre la curva de caudales acumulados simulada y medida (distancia de Kolmogorov, Jensen-Shannon o similar); la falta de simultaneidad entre las lluvias disponibles y los caudales medidos impide usar los criterios habituales basados en la similitud directa (día a día) de series temporales sincronizadas (coeficientes de Nash-Sutcliffe o Kling-Gupta).

Calibración del modelo hidrológico semidistribuido de Panamá

El modelo se ha calibrado a nivel país en el Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Generación del Atlas Interactivo de Visualización de los Resultados para la República de Panamá, desarrollada por IHCantabria para Banco Interamericano para el Desarrollo (BID) con el objetivo cumplir los siguientes requisitos:

- Representar adecuadamente el régimen de caudales mínimos, medios y máximos en toda la red fluvial.
- Reproducir adecuadamente los datos de aforo disponible en los puntos de medida.
- Permitir extrapolar razonablemente al resto del territorio el comportamiento observado en los puntos de medida.

Para la calibración del modelo, se dispone de información de caudales en 47 puntos de aforo (Figura 34), con calidad variable y desigualmente repartidos por todo el territorio (43 estaciones del Instituto Meteorológico Hidrológico de Panamá (IMHPA) y 4 de la Autoridad del Canal de Panamá (ACP)). Existen zonas con escasa o nula información (Figura 35), especialmente en el oriente (provincias de Darién, Guna Yala y Pacífico Este).

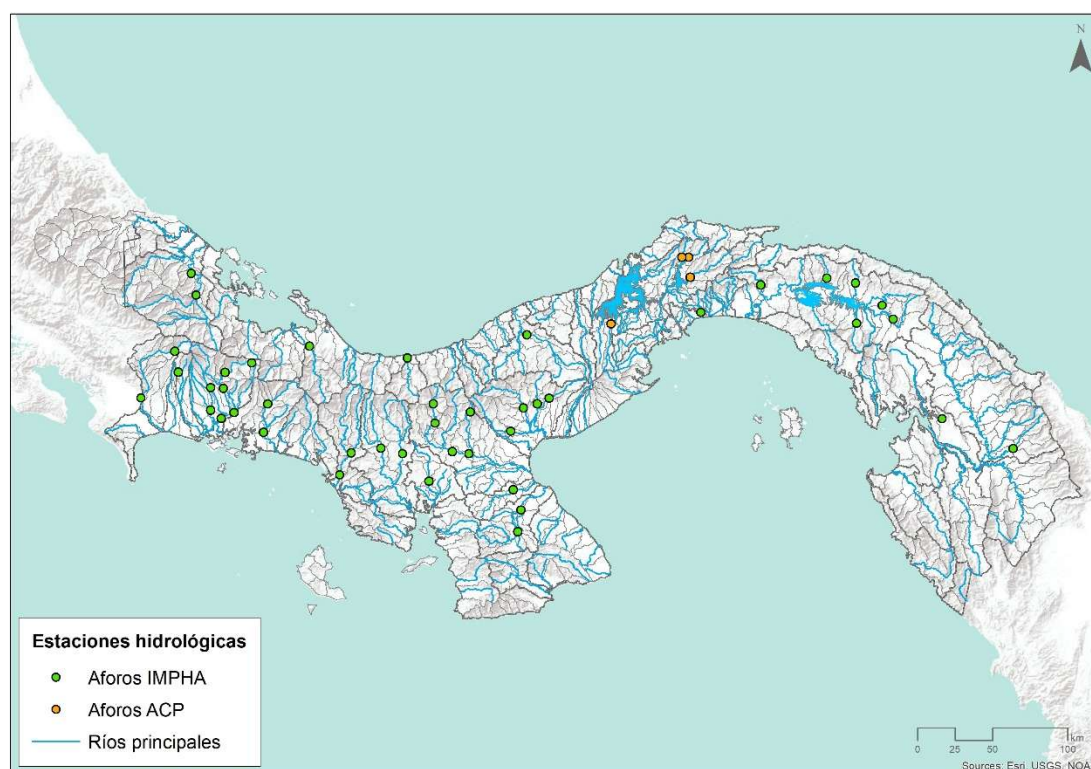


Figura 34. Estaciones hidrológicas consideradas. Fuente: IHCantabria, 2024.

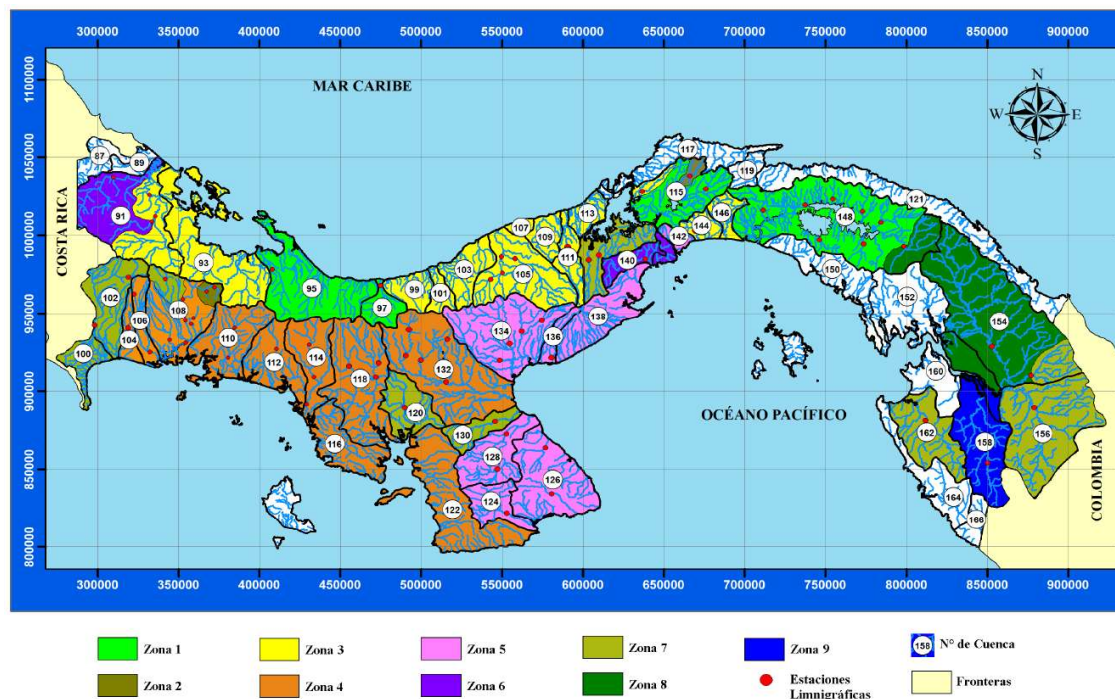


Figura 35. Regiones hidrológicamente homogéneas (en blanco aparecen las cuencas sin afloros). Fuente: Resumen técnico análisis regional de crecidas máximas de Panamá, periodo 1971-2006 (ETESA, 2008).

La metodología para la calibración del mismo, así como los ajustes obtenidos tanto para el régimen medio como para el régimen extremal se resumen a continuación.

Metodología:

Los pasos seguidos en la metodología aplicada se describen a continuación:

1. Se han corregido las series de reanálisis de ETP para reflejar el comportamiento observado y definido en otros estudios locales. En concreto, se ha aplicado un factor corrector de 0.79 a las series iniciales, para que se ajusten a las recomendaciones incluidas en el Atlas Nacional de Panamá de 2007 (MOP, 2007). Estas series de ETP ya no sufrirán más alteraciones en el resto del método.
2. Se han corregido los valores extremos de las series de precipitación disponibles mediante un método de corrección de cuantiles, sin alterar los valores medios de las mismas puesto que las lluvias de reanálisis tienen sus valores extremos muy suavizados y resultan, en general, muy bajas para generar los caudales extremos medidos de las cuencas.
3. Se ha adoptado como curva de Budyko la fórmula de Schreiber para todo el territorio de Panamá. Esta ecuación plantea una relación algebraica entre el índice de aridez y el coeficiente de escorrentía medio (CE) de una cuenca:

$$CE = \exp(-ETP/P)$$

El modelo permite imponer que todas las subcuencas cumplan esta relación.

4. Se han estimado las capacidades de almacenamiento medias del suelo (S_{max}) en todas las subcuencas a partir del método del número de curva. Posteriormente, se han reescalado de

forma homogénea los valores de S_{max} para conseguir reproducir los valores de Q20% y Q80% medidos.

5. Se ha determinado el valor del parámetro asociado al método de corrección por cuantiles de las precipitaciones extremas, para conseguir ajustar lo mejor posible los valores del caudal Q2.33, equivalentes a la media de las máximas crecidas anuales.

Tras estos pasos, se dispone de un modelo hidrológico calibrado para toda la República de Panamá, que cumple razonablemente con los datos instrumentales disponibles. El parámetro de enrutamiento, tau, se ha obtenido con la fórmula de Kirpich y no tiene apenas efecto en los resultados.

Ajuste del régimen medio:

En la Figura 36 se presentan los caudales medios observados vs simulados (absolutos y específicos) obtenidos como resultado de la calibración del modelo.

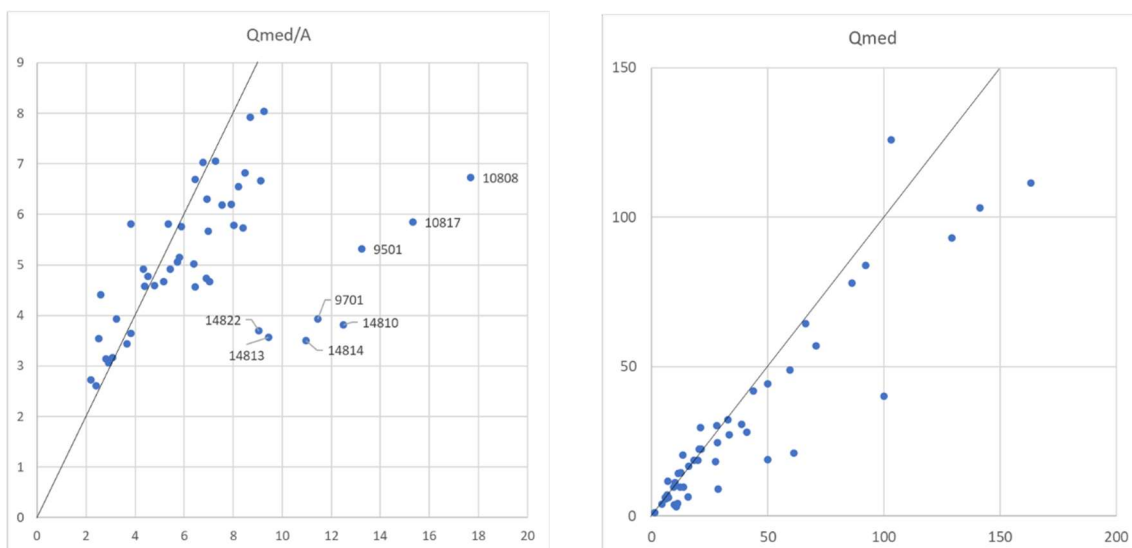


Figura 36. Caudales medios específicos (izquierda) y totales (derecha) observados (eje X) y simulados (eje Y).
Fuente: IHCantabria, 2024.

Se observa que hay un grupo de cuencas donde no se consigue ajustar el caudal medio, debido a una discrepancia importante entre los datos de caudal disponibles y los datos de lluvia generados a partir de la interpolación de datos instrumentales combinados con datos de reanálisis de modelos. En esas cuencas caben tres posibilidades para explicar la discrepancia:

- Las lluvias disponibles están ampliamente infravaloradas (deberían ser aproximadamente el doble).
- Los caudales medidos están sobrevalorados (deberían ser entre un 30 y un 50% inferiores).
- Una combinación de las dos causas anteriores.

Ajuste del régimen extremal:

Para poder realizar el ajuste del régimen extremal se ha aplicado un factor de pico (fp) superior a la unidad, que depende del tamaño y velocidad de cada cuenca a los resultados del modelo, permitiendo convertir los caudales medios diarios que genera el modelo en máximos instantáneos.

En la Figura 37 se presentan la comparación de los caudales Q2.33 observados (caudales máximos instantáneos disponibles, Tabla 5), simulados con el modelo (con el fp ya aplicado) y los ajustes del régimen extremal disponibles por fachadas obtenidos a partir de las ecuaciones propuestas en el Resumen técnico análisis regional de crecidas máximas periodo 1971-2006 (ETESA, 2008) (Tabla 5) diferenciadas por regiones hidrológicamente homogéneas (ver Figura 35), observándose como los datos simulados presentan un buen ajuste.

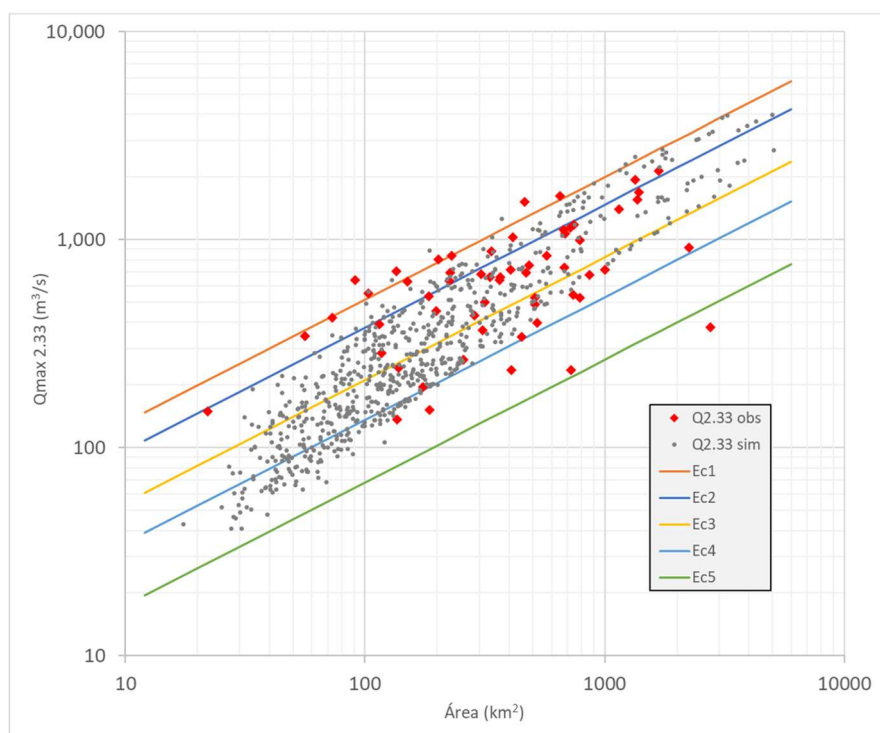


Figura 37. Comparación de caudales Q2.33 observados, simulados, y los ajustes del régimen extremal disponibles por fachadas. Fuente: IHCantabria, 2024.

Zona	Número de ecuación	Ecuación
1	1	$Q_{\text{máx}} = 34A^{0.59}$
2	1	$Q_{\text{máx}} = 34A^{0.59}$
3	2	$Q_{\text{máx}} = 25A^{0.59}$
4	2	$Q_{\text{máx}} = 25A^{0.59}$
5	3	$Q_{\text{máx}} = 14A^{0.59}$
6	3	$Q_{\text{máx}} = 14A^{0.59}$
7	4	$Q_{\text{máx}} = 9A^{0.59}$
8	5	$Q_{\text{máx}} = 4.5A^{0.59}$
9	2	$Q_{\text{máx}} = 25A^{0.59}$

Tabla 5. Ecuaciones para la obtención del $Q_{\text{máx}}$ (promedio de las crecidas anuales equivalente al Q2.33) según región hidrológicamente homogénea. Fuente: Resumen técnico análisis regional de crecidas máximas periodo 1971-2006 (ETESA, 2008).

Por último, en la Figura 38 se presentan los caudales 2.33 observados vs simulados en los diferentes puntos de aforo de manera análoga al régimen medio.

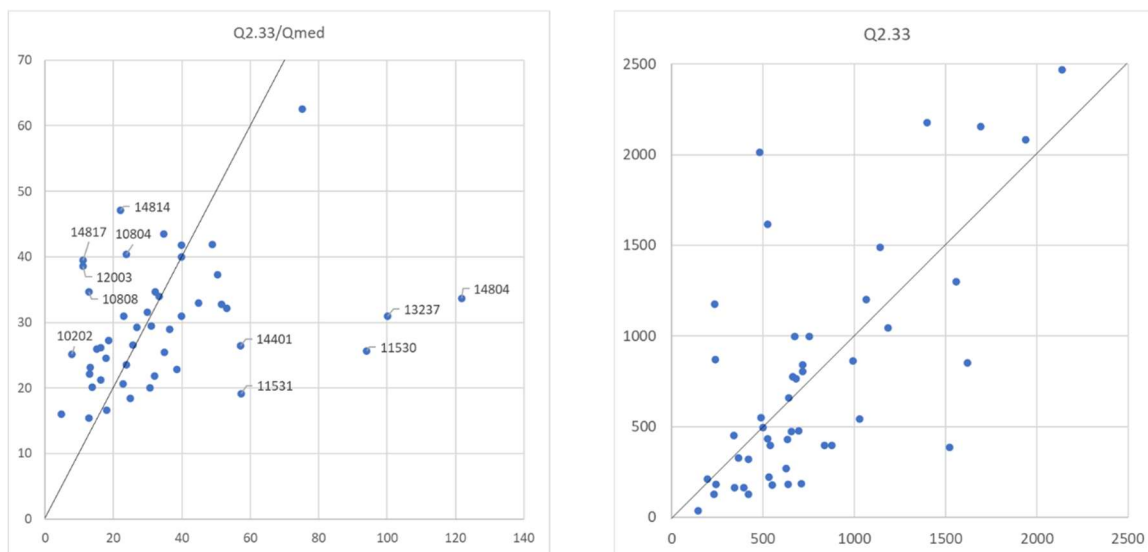


Figura 38. Caudales Q2.33 específicos (izquierda) y totales (derecha) observados (eje X) y simulados (eje Y). Fuente: IHCantabria, 2024.

Resultados del modelado hidrológico

El modelo se ha ejecutado con las series de lluvia de reanálisis tanto para la situación actual como para los 23 modelos de cambio climático analizados para los escenarios SSP 585 2030 y 2050 obteniendo como resultado el cuantil del 50 % (mediana) de los 23 modelos.

En las Figura 39 se presentan los caudales naturales medios anuales obtenidos por subcuenca y el la Figura 40 los caudales naturales acumulados.

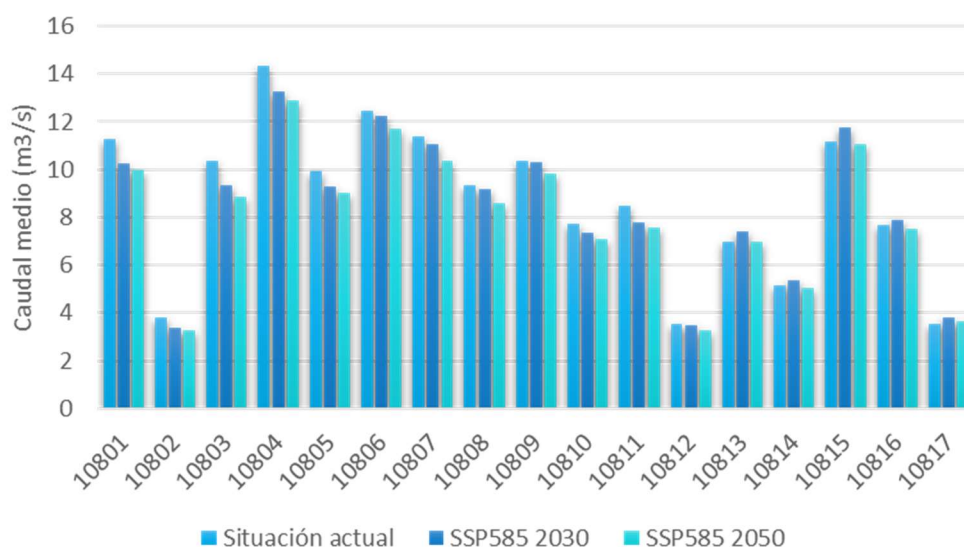


Figura 39. Caudal medio (m³/s) en las subcuencas consideradas para la situación actual y para los escenarios de cambio climático SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.

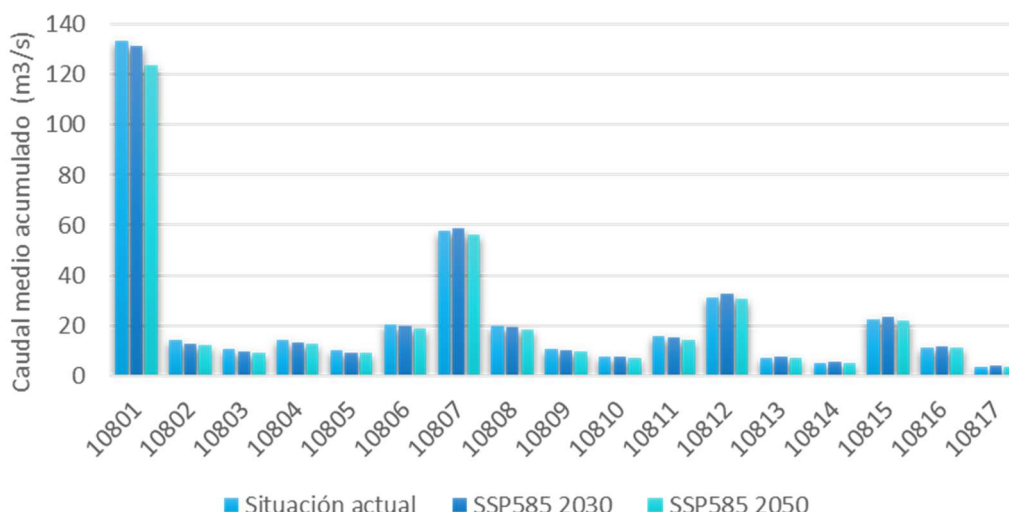


Figura 40. Caudal medio acumulado (m^3/s) en las subcuencas consideradas para la situación actual y para los escenarios de cambio climático SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.

En cuanto a los resultados por meses entre las Figuras 41 y 49 se muestran a modo de ejemplo las series mensuales y su distribución en diagramas de cajas en las subcuencas principales donde se extrae el agua para el consumo humano en el área de estudio, áreas urbanas de Boquete (ojo de agua - subcuenca 10811), Dolega (ríos Cochea y Majagua – subcuencas 10806 y 10804) y Gualaca (Lago Barrigón - subcuenca 10807) para la situación actual, así como un resumen de los resultados obtenidos para todos los escenarios climáticos analizados (Tabla 6).

En cada rectángulo vertical del diagrama de cajas, la marca central indica la mediana y los bordes inferior y superior del cuadro indican los percentiles 25 y 75, respectivamente. Los bigotes se extienden hasta los puntos de datos más extremos que no se consideran valores atípicos, y los valores atípicos se trazan individualmente utilizando el símbolo marcador '+'.

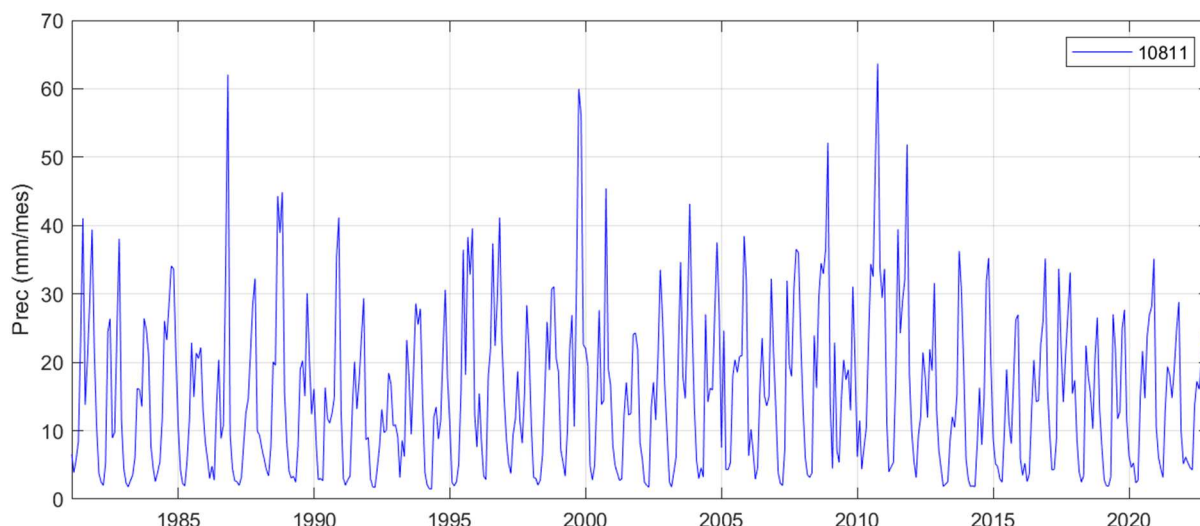


Figura 41. Serie mensual de precipitación (mm/mes) en la subcuenca 10811 que abastece a Boquete para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

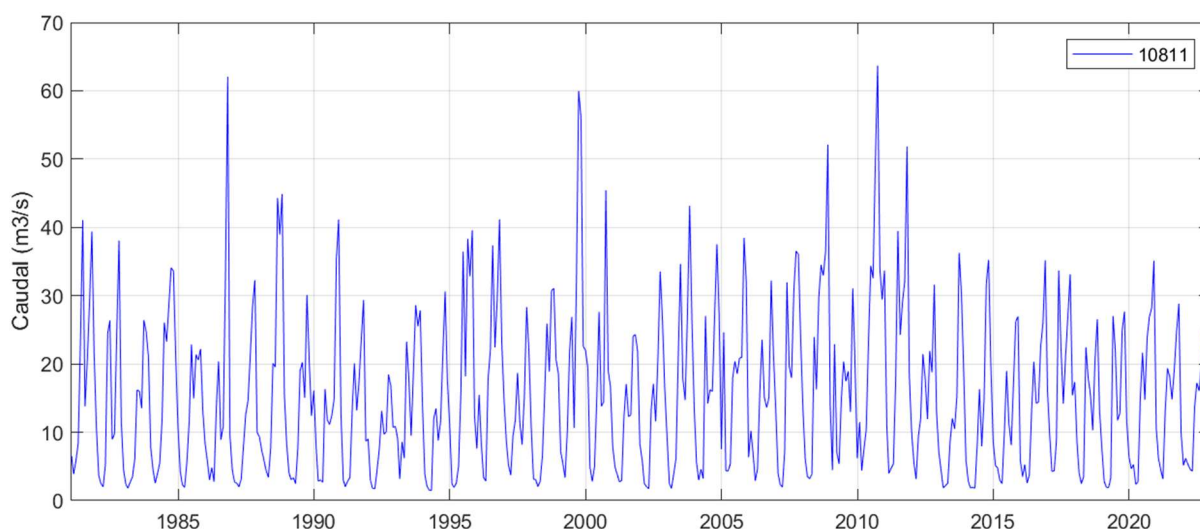


Figura 42. Serie mensual de caudales naturales (m³/s) en la subcuenca 10811 que abastece a Boquete para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

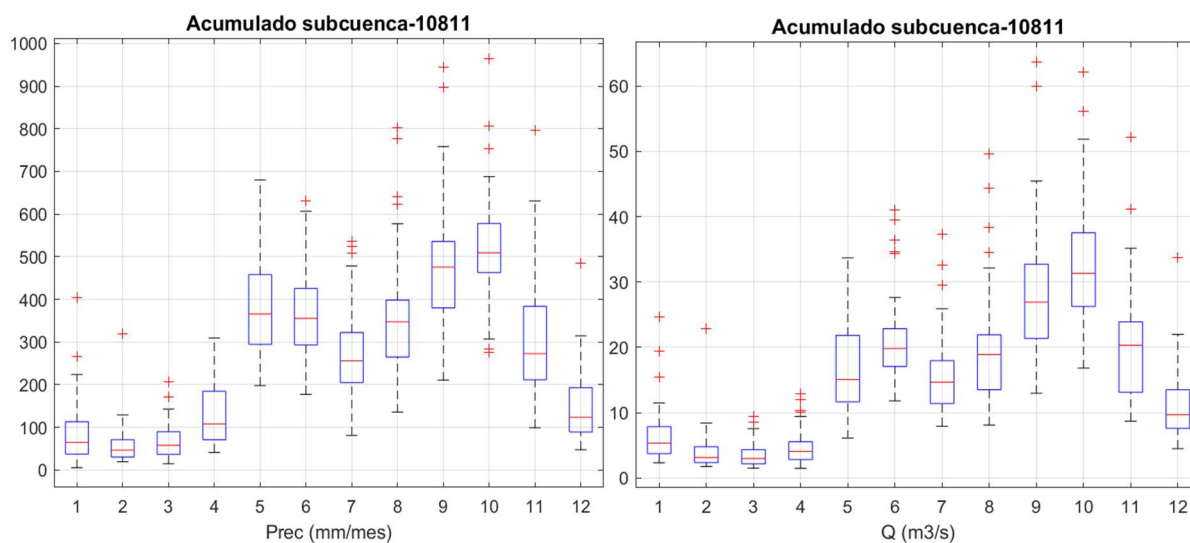


Figura 43. Boxplot de precipitación (mm/mes) y caudales naturales (m³/s) en la subcuenca 10811 que abastece a Boquete para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

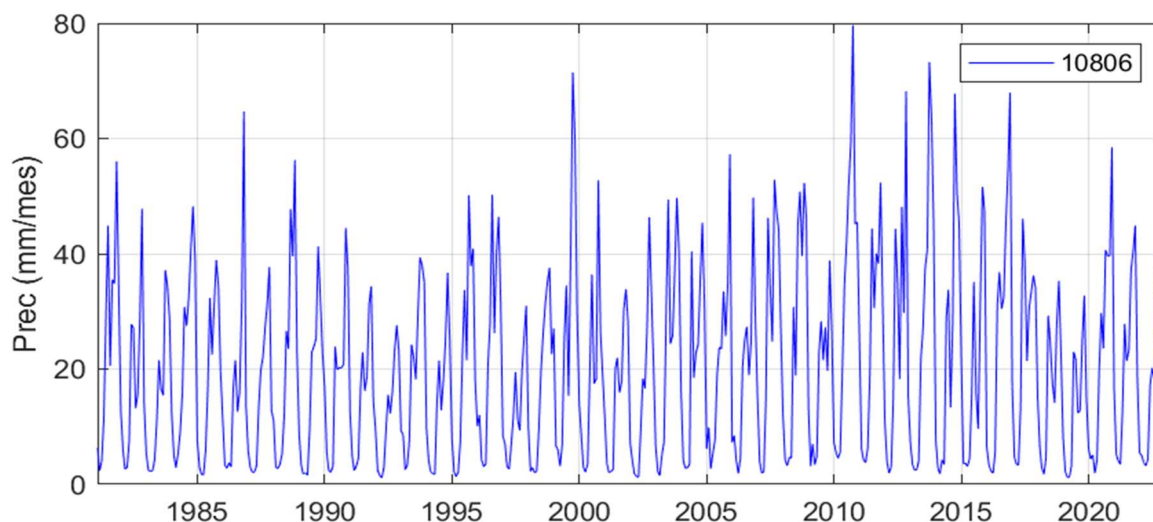


Figura 44. Serie mensual de precipitación (mm/mes) en el río Cochea que abastece a Dolega (subcuenca 10806) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

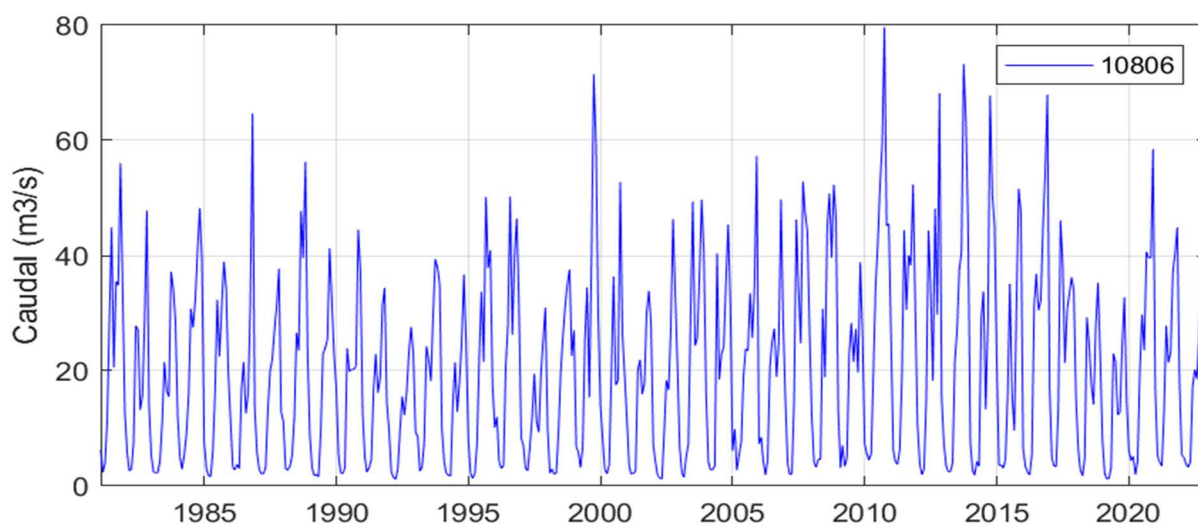


Figura 45. Serie mensual de caudales naturales (m³/s) en el río Cochea que abastece a Dolega (subcuenca 10806) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

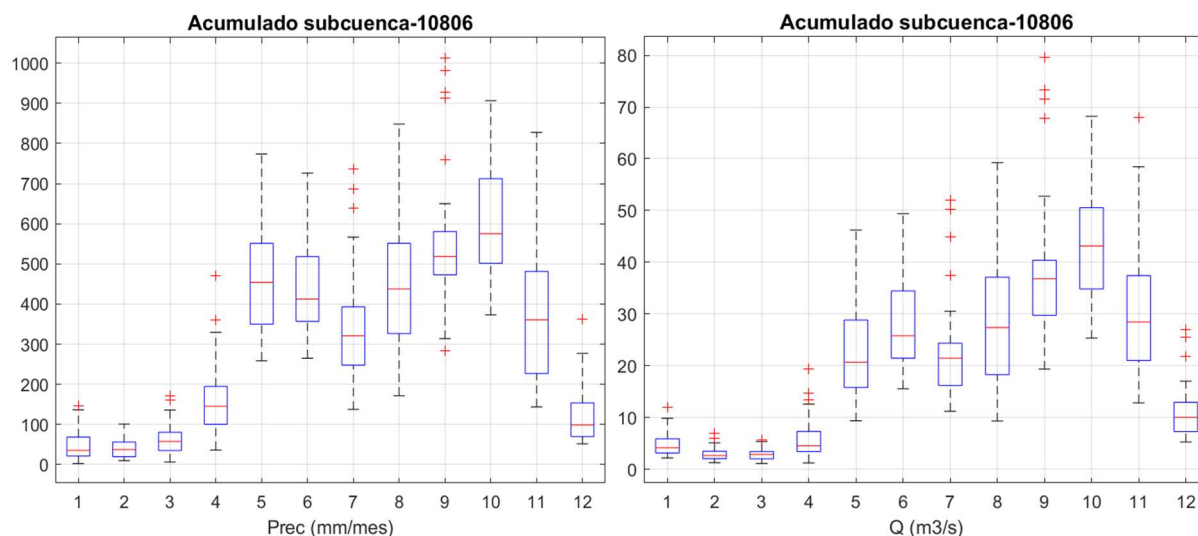


Figura 46. Boxplot de precipitación (mm/mes) y caudales naturales (m³/s) en el río Cochea que abastece a Dolega (subcuenca 10806) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

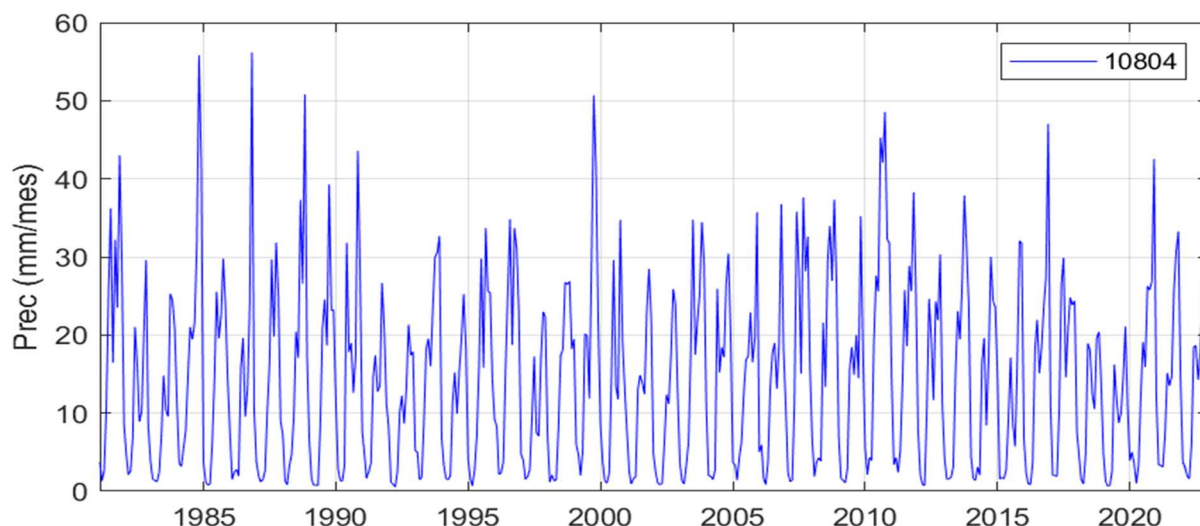


Figura 47. Serie mensual de precipitación (mm/mes) en el río Majagua que abastece a Dolega (subcuenca 10804) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

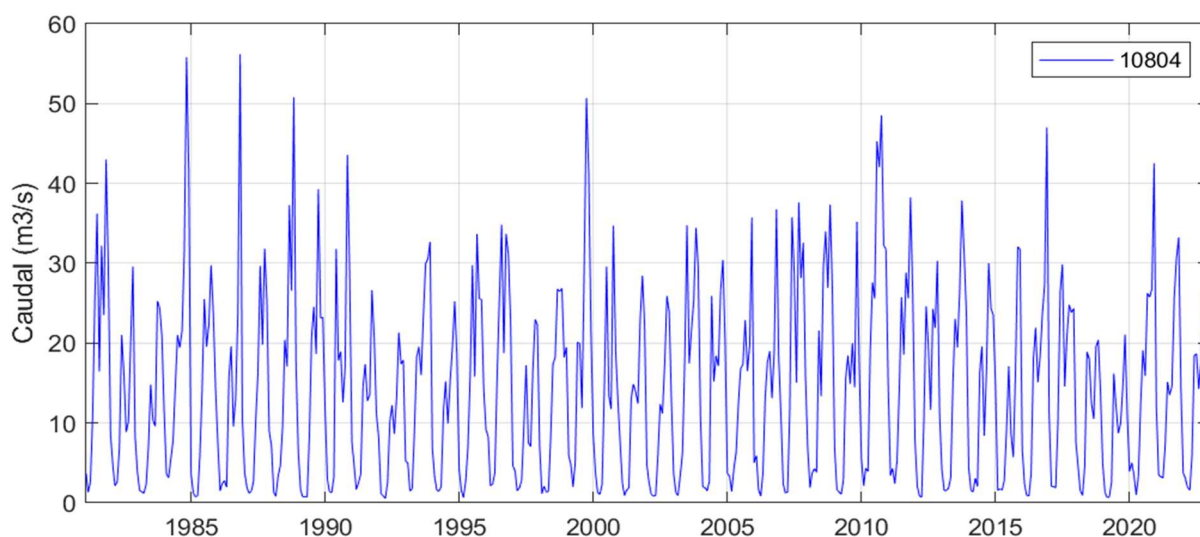


Figura 48. Serie mensual de caudales naturales (m³/s) en el río Majagua que abastece a Dolega (subcuenca 10804) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

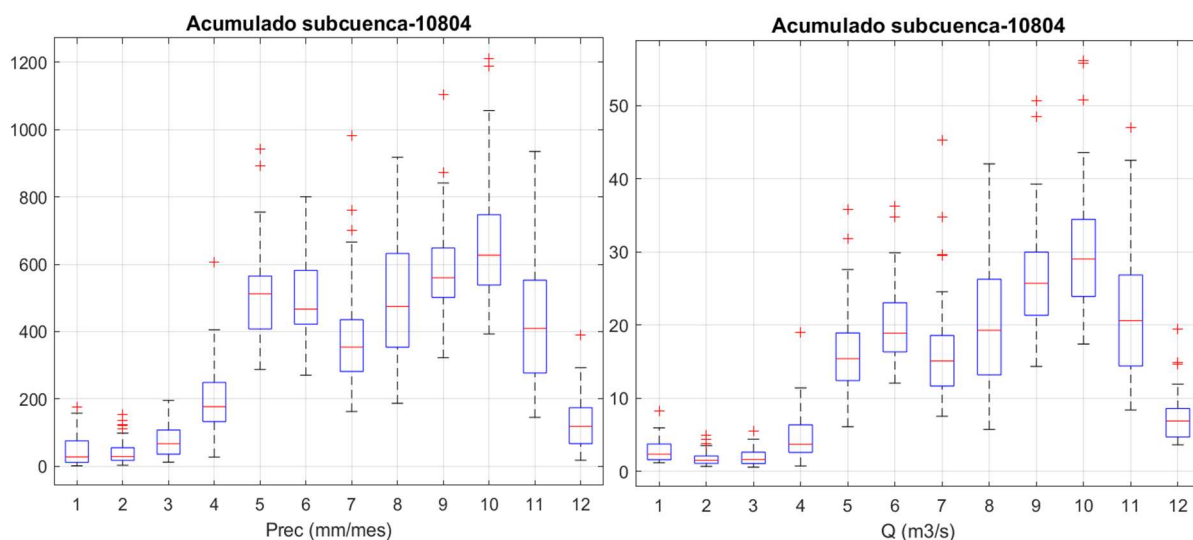


Figura 49. Boxplot de precipitación (mm/mes) y caudales naturales (m³/s) en el río Majagua que abastece a Dolega (subcuenca 10804) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

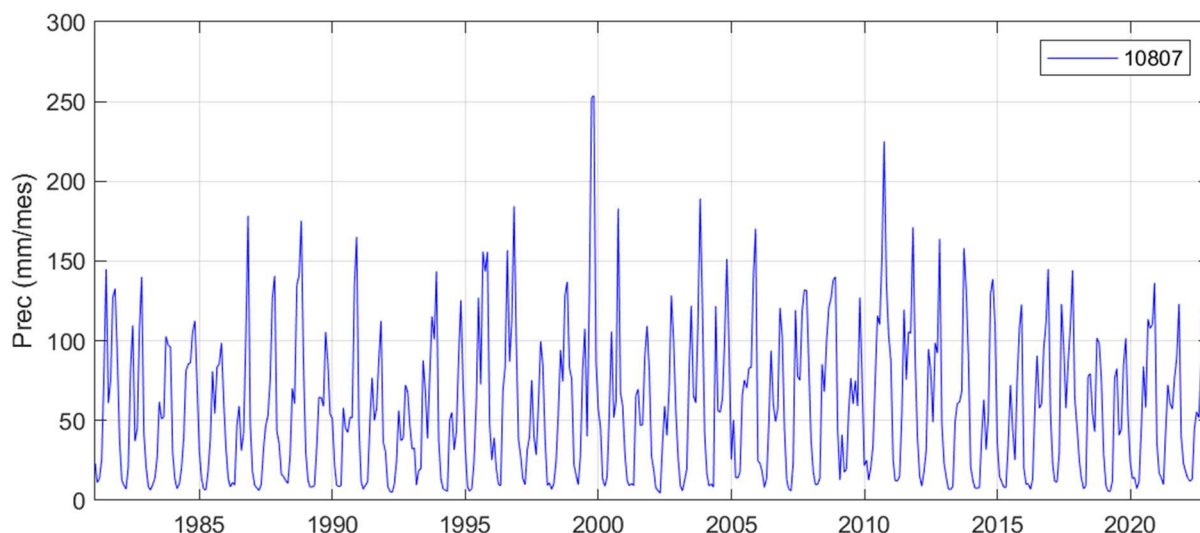


Figura 50. Serie mensual de precipitación (mm/mes) en el lago Barrigón que abastece a Gualaca (subcuenca 10807) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

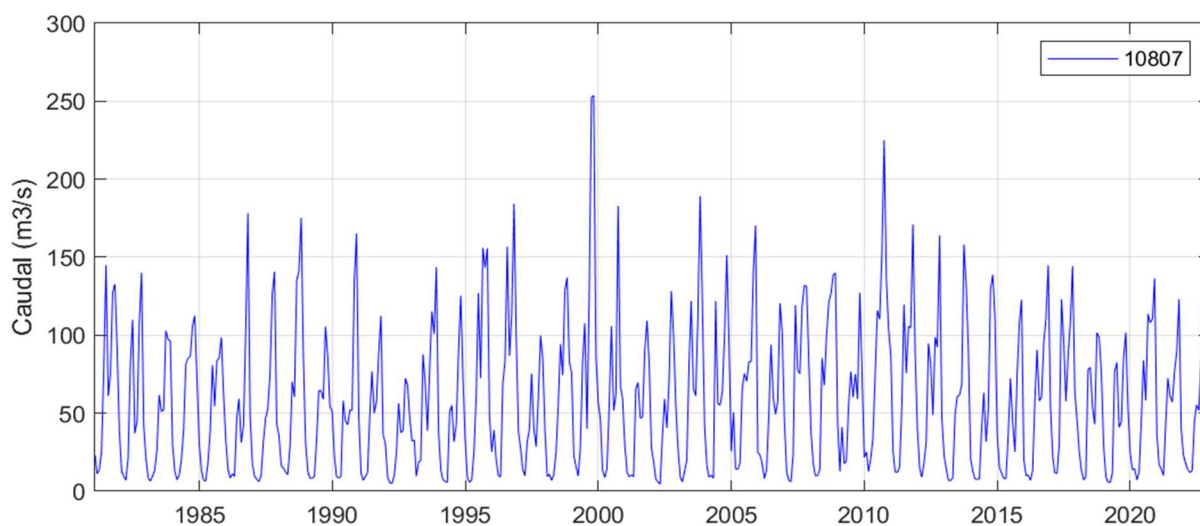


Figura 51. Serie mensual de caudales naturales (m³/s) en el lago Barrigón que abastece a Gualaca (subcuenca 10807) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

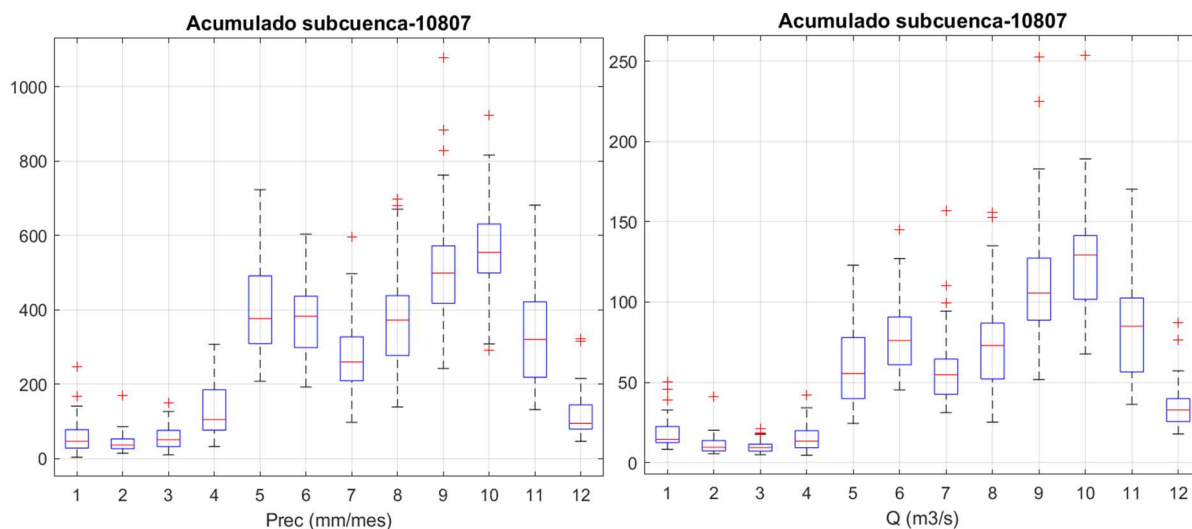


Figura 52. Boxplot de precipitación (mm/mes) y caudales naturales (m³/s) en el lago Barrigón que abastece a Gualaca (subcuenca 10807) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

Subcuenca	Precipitación media (mm/año)	ETP media (mm/año)	Caudal medio (m3/s)	Caudal superado el 80% del tiempo (m3/s)	Caudal superado el 20% del tiempo (m3/s)
SITUACIÓN ACTUAL					
10811	3186.20	1130.66	15.48	2.64	23.49
10806	3643.25	1300.20	20.21	2.36	32.09
10804	4059.64	1346.22	14.31	1.28	22.63
10807	3277.71	1227.12	57.91	11.84	91.54
HORIZONTE 2030 SSP585					
10811	3137.25	1119.68	15.38	1.54	24.98
10806	3593.60	1309.36	19.78	1.50	29.95
10804	3852.95	1353.70	13.27	0.85	21.40
10807	3298.53	1211.82	58.81	5.43	94.88
HORIZONTE 2050 SSP585					
10811	3048.79	1156.58	14.40	1.25	22.30
10806	3458.41	1346.47	18.58	1.28	28.81
10804	3793.18	1392.03	12.87	0.73	19.48
10807	3214.18	1248.80	56.03	4.22	86.15

Tabla 6. Resultados del modelo hidrológico en las principales subcuencas que abastecen a Boquete (10811), Dolega (10806 y 10804) y Gualaca (10807) para la situación actual y los escenarios SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.

8.2.2. Modelo de gestión de usos del agua

Descripción del modelo de gestión

El modelo de gestión obtiene los caudales modificados en cada tramo de río (un tramo configura una subcuenca) y los caudales captados por cada demanda. Para ello tiene en cuenta los caudales naturales obtenidos tras la aplicación del modelo hidrológico (en este caso las series de caudales ya obtenidas con el modelo LEM, *Logistic Equilibrium Model*), todos los puntos de demanda existentes en cada subcuenca con su información básica (caudal demandado, tipo de uso, prioridad de uso, subcuenca en la que se capta y subcuenca en la que se vierte) y los embalses existentes caracterizados por su volumen, área, caudal de salida máximo y curva de exportación).

Todas las demandas tienen un orden de prioridad asignado (1, 2, 3, ...). Estas se van satisfaciendo en orden de prioridad, de manera que una demanda con una prioridad mayor (p.e. 1) se satisfará antes que una con una prioridad menor (p.e. 3). En este sentido, nunca una demanda de prioridad menor podrá satisfacerse antes que una demanda de prioridad mayor, aunque esté situada aguas arriba.

Además, este modelo es capaz de tener en cuenta el caudal ecológico en cada tramo de río y la prioridad de uso de este. El caudal ecológico se trata como una demanda más, que se capta y devuelve en la misma subcuenca con una determinada prioridad.

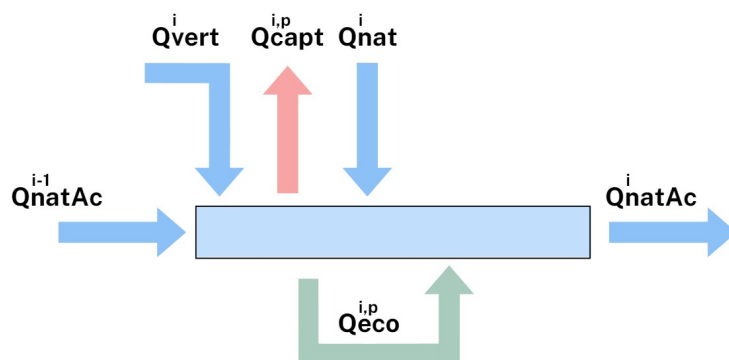


Figura 53. Esquema de funcionamiento del modelo de gestión del agua. Fuente: IHCantabria, 2024.

La principal ecuación que gobierna el módulo de gestión del agua es la siguiente, donde la 'i' representa cada subcuenca y la 'p' representa la prioridad de cada uso:

$$Q_{natAc}^i = \sum Q_{natAc}^{i-1} + Q_{nat}^i + \sum Q_{vert}^i - \sum Q_{capt}^{i,p} - Q_{eco}^{i,p} + Q_{eco}^{i,p}$$

Demandas de agua

Entre los principales usos del agua en la cuenca del río Chiriquí, se destacan potabilización de agua para consumo humano, el regadío en la agricultura, el uso industrial y la producción de energía hidroeléctrica.

Las necesidades de agua de la población tienen prioridad sobre las demás demandas, por lo que, en teoría, la administración del recurso hídrico siempre asegura la disponibilidad de agua para el abastecimiento para este propósito. Seguido del agua para riego que garantice la soberanía alimentaria. A continuación, se incluyen el resto de actividades productivas y finalmente el mantenimiento del caudal ecológico. Este orden en la prioridad de usos se ha establecido teniendo en cuenta que no hay una legislación que establezca esta prioridad ni existen caudales ecológicos de obligado cumplimiento.

Para cada uno de estos usos se establece la demanda por subcuenca.

Demandas de agua para consumo humano

Históricamente, la mayor parte de la producción y distribución de agua potable para consumo de la población es realizada por el Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAN) y está destinada a abastecer cuatro grandes grupos de usuarios: hogares, comercio, industria y gobierno. Complementariamente, en comunidades rurales con menos de 1500 habitantes, el agua potable es abastecida por el Ministerio de Salud, que a través de la Dirección del Subsector del Agua Potable y Alcantarillado Sanitario organiza las Juntas Administradoras de Acueductos Rurales (JAAR). Cabe resaltar también que, cerca del 95% del agua potabilizada en Panamá proviene de fuentes superficiales (ríos y lagos), mientras que el 5% restante proviene de aguas subterráneas ¹ ("Oferta y uso de agua en Panamá", basado en los resultados de la Cuenta Ambiental de Agua 2000-2018 (MiAMBIENTE).

¹ Queda fuera del alcance del estudio el abastecimiento de agua por fuentes de agua subterránea.

Teniendo todo esto en cuenta se han establecido dos tipos de demandas para consumo humano dentro de la cuenca del río Chiriquí.

- *Demanda de consumo humano urbano:* Incluye la demanda abastecida por la Plantas Potabilizadoras existentes conectadas a la red del IDAAN actualmente en funcionamiento (4 plantas en operación) y los dos tanques de almacenamiento gestionados por las JAARs que abastecen al área urbana de Boquete.

Para su obtención a nivel de subcuenca se ha utilizado:

- Información de las plantas potabilizadoras, tomas de agua y red de tuberías proporcionada por el IDAAN que incluye el caudal nominal y de real de funcionamiento y población abastecida por cada una de ellas.
- Capacidad de los tanques de almacenamiento para el área urbana de Boquete obtenida durante los talleres.
- Datos de población por corregimiento del censo de 2023 trasladados a las subcuencas.

Puesto que la información proporcionada no incluye el área abastecida por cada planta ha sido necesario asignarla teniendo en cuenta la localización de los principales núcleos de población y redes de comunicación, así como la red de abastecimiento, información validada durante los talleres realizados.

- *Demanda de consumo humano rural:* Incluye la demanda de agua para consumo humano de toda la población no conectada a la red del IDAAN (poblaciones de menos de 1500 habitantes).
 - Como se comenta anteriormente, esta población esta abastecida en su mayoría por JAARs de las cuales no se dispone información detallada, por lo que se ha considerado una dotación rural de 491 (l/hab/día) obtenida del PIOTA (BID, 2022b).

En la Figura 54 se presenta la localización de las plantas potabilizadoras existentes en la cuenca del río Chiriquí, tanques de almacenamiento, red de tuberías y puntos de toma de agua y en la Tabla 7 sus características principales con indicación de las plantas población abastecida por cada planta.

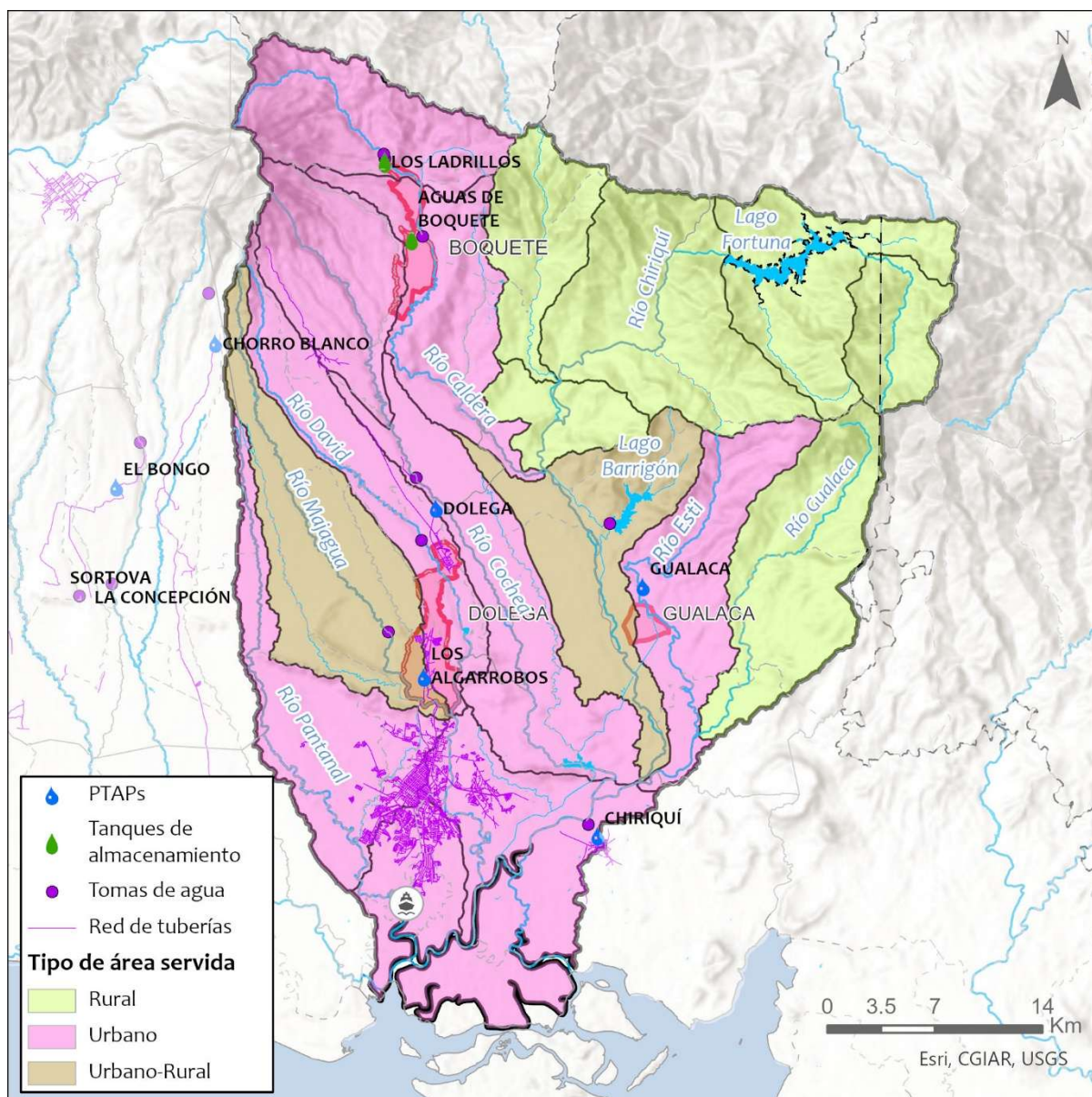


Figura 54. Localización de las plantas potabilizadoras, tanques de almacenamiento, tomas de agua, red de tuberías y tipo de área servida. Fuente: IHCantabria, 2024.

Planta Potabilizadora / Tanque de almacenamiento	Fuente	Demanda (m ³ /s)	Área urbana que abastece	Población abastecida (hab)
Los Ladrillos y Las Mercedes /Aguas de Boquete	Ojos de agua	0.3067	Boquete	9169
Dolega	Río Cochea	0.0381	Dolega	4243
Los Algarrobos	Ríos Majagua y David	0.8762	Los Anastacios, Los Algarrobos y David	162137
Gualaca	Lago Barrigón	0.0232	Gualaca	3708
Chiriquí	Río Chiriquí Nuevo	0.0092	Chiriquí	2875

Tabla 7. Demandas de agua para consumo humano urbano y población abastecida de las plantas potabilizadoras y tanques de almacenamiento existentes en la cuenca río Chiriquí. Fuente: IHCantabria, 2024.

Demandas de agua para riego

Para la obtención de la demanda de agua para riego por subcuenca se han considerado los cultivos con altas necesidades hídricas (de regadío). Estos cultivos se han obtenido a partir de los datos oficiales de distribución geográfica de los tipos de cultivos en el país (Cobertura y usos del suelo, MiAMBIENTE, 2021) y se les ha aplicado una dotación según tipo de cultivo obtenida del documento “Oferta y uso de agua en Panamá”, con base en los resultados de la Cuenta Ambiental de Agua 2000-2018 (MiAMBIENTE) y elaborado a partir de datos del Ministerio de Desarrollo Agropecuario (MIDA), 2019. Además, se ha comprobado que las demandas obtenidas coinciden en gran medida con las concesiones agrícolas vigentes (tanto en distribución como en valor total).

Demandas agropecuarias

Dentro de las demandas agropecuarias se han incluido las concesiones agropecuarias, avícolas, pecuarias y acuícolas vigentes cuya fuente de agua es superficial sin incluir las que tienen como fuente los pozos y las aguas subterráneas. No se incluyen las concesiones agrícolas ya que se encuentran consideradas dentro de las demandas de agua de riego.

Demandas industriales

De acuerdo con la información recabada, la gran mayoría de las industrias están conectadas a la red municipal. En este sentido, las demandas industriales que se encuentran en zonas urbanas o con conexión a la red de abastecimiento del IDAAN se abastecen del agua de la red (cantidad de agua que está contemplada dentro del caudal que producen las plantas potabilizadoras existentes). En cuanto al resto de demandas industriales, se han considerado como demandas industriales las concesiones industriales y agroindustriales, en general de industrias con demandas importantes (minerías, papeleras, sosa, químicas, energéticas, refinerías, farmacéuticas, agroalimentarias, ...) o sin acceso a la red pública de abastecimiento (zonas rurales) que toman agua de fuentes de agua superficiales sin incluir las que tienen como fuente los pozos y las aguas subterráneas.

Demandas de centrales hidroeléctricas

Para la obtención de las demandas hidroeléctricas se ha utilizado información de ETESA y Autoridad Nacional de los Servicios Públicos (ASEP) proporcionada por la Secretaría Nacional de Energía (SNE), así como la información de las concesiones e información obtenido de distintas fuentes de internet. A partir de toda esta información se ha generado un inventario de centrales hidroeléctricas activas con la localización de sus casas de máquinas, puntos de toma y sus características incluyendo: área de drenaje (km²), caudal concesionado diferenciando época seca y lluviosa (m³/s), máximo caudal turbinable (m³/s), número de turbinas, producción anual (GWh), capacidad instalada (MW), potencia efectiva (MW), potencia en firme (MW), empresa que la ópera y en algunos casos altitud sobre el nivel del mar, salto neto y salto bruto (m).

Embalses

Se han considerado los principales embalses de la cuenca por su importancia dentro del modelo de gestión, concretamente se han incluido 2 embalses (Fortuna y Barrigón) caracterizados por su volumen, área, caudal de salida máximo y curva de explotación. En la Tabla 22 se presentan sus características principales.

Nombre	Volumen max (Hm ³)	Área (km ²)	Q salida max (m ³ /s)
Fortuna	221.7	10.9	2000
Barrigón	43.3	2.74	1200

Tabla 8. Características principales de los embalses considerados en el modelo de gestión.

A modo de resumen de todas las demandas consideradas en la Figura 55 se presenta su localización y en la Tabla 9 el valor considerado por tipo de demanda.

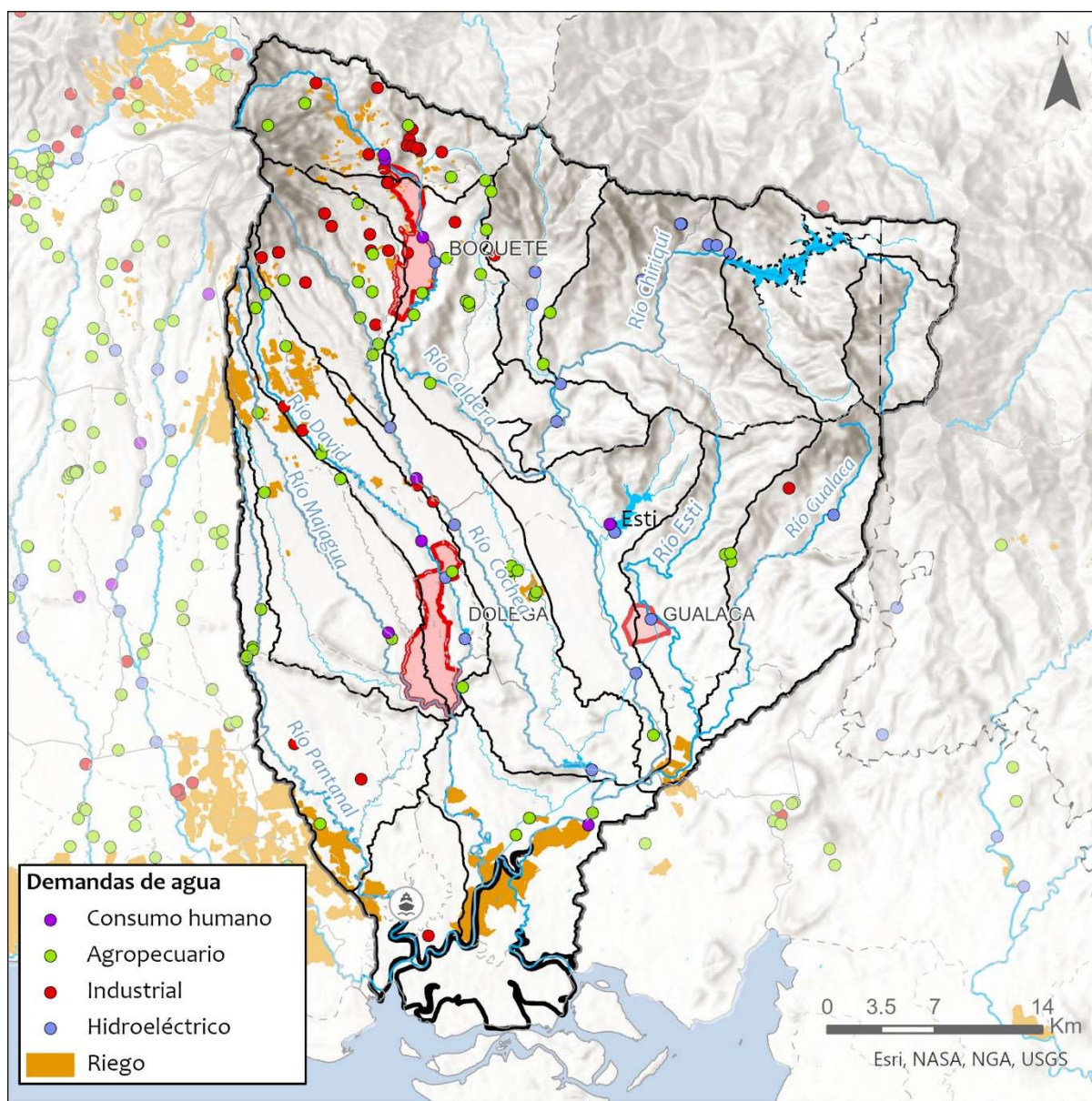


Figura 55. Localización de las demandas de agua en la cuenca río Chiriquí. Fuente: IHCantabria, 2024.

Tipo	Descripción	Q época seca (m ³ /s)	Q época lluviosa (m ³ /s)	D total (Hm ³ /año)
Consumo humano urbano	Demanda para consumo humano de las poblaciones de más de 1500 habitantes (conectadas a la red IDAAN y tanques de almacenamiento de Boquete - JAARS)	1.25	1.25	39.42

Tipo	Descripción	Q época seca (m ³ /s)	Q época lluviosa (m ³ /s)	D total (Hm ³ /año)
Consumo urbano rural	Demanda para consumo humano de las poblaciones de menos de 1500 habitantes (no conectadas a la red)	0.086	0.086	2.71
Industrial	Demanda equivalente a las concesiones industriales y agroindustriales vigentes	2.1	2.46	71.90
Agropecuario	Demanda equivalente a las concesiones agropecuarias vigentes	1.27	1.03	36.27
Riego	Demandas de agua asignadas por dotación según ha de tipo de cultivo anual	1.55	1.55	48.88
Hidroeléctrica	Demanda de agua para la generación de energía hidroeléctrica	512.95	527.07	16,399.10
TOTAL		519.29	533.53	16,600.99

Tabla 9. Demandas de agua consideradas en la cuenca del río Chiriquí. Fuente: IHCantabria, 2024.

Resultados

Como resultados principales obtenidos tras la realización del balance hídrico a nivel de subcuenca se encuentran:

- Los caudales captados o satisfechos de cada demanda
- Los caudales modificados en cada tramo de río (o subcuenca)
- Garantía volumétrica de cada demanda, es decir, el porcentaje de la demanda que se satisface a lo largo de todo el periodo de estudio
- Garantías volumétricas de satisfacción de las diferentes demandas a nivel de subcuenca

En las Figuras 56 y 63 se muestran las series mensuales y su distribución en diagramas de cajas en las subcuencas principales donde se extrae el agua para el consumo humano en el área de estudio, áreas urbanas de Boquete (ojo de agua - subcuenca 10811), Dolega (ríos Cochea y Majagua – subcuencas 10806 y 10804) y Gualaca (río Caldera - subcuenca 10807) para la situación actual y en la Tabla 10 un resumen de los resultados principales para todos los escenarios climáticos analizados. La garantía de satisfacción de la demanda de consumo humano es del 100% en todas las subcuencas menos en la 10804 que es del 99% para la situación actual, disminuyendo para los dos escenarios cambio climático analizados.

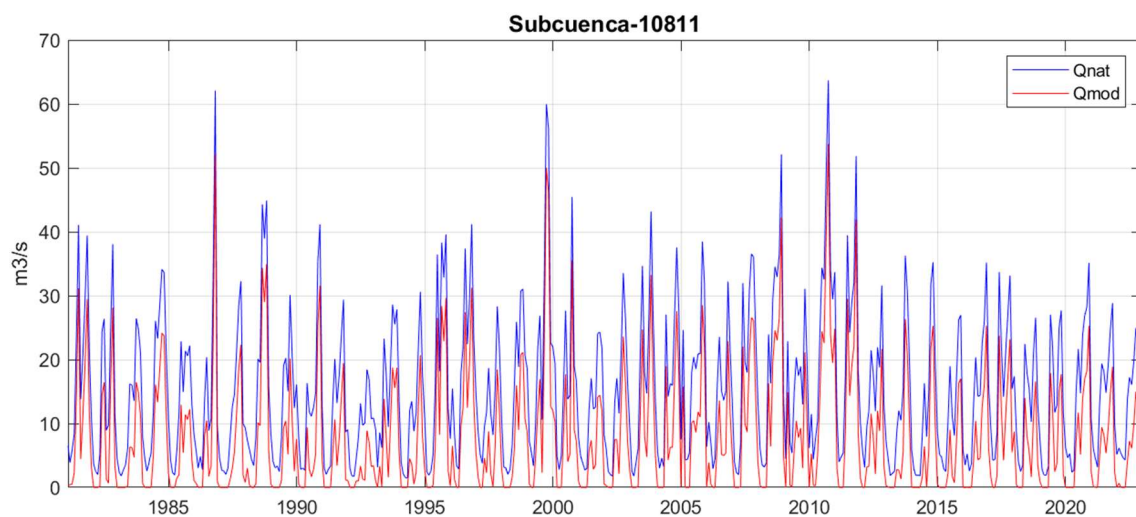


Figura 56. Serie mensual de caudales naturales y modificados (m^3/s) en la subcuenca 10811 que abastece a Boquete para la situación actual. Fuente: Elaboración propia, 2023.

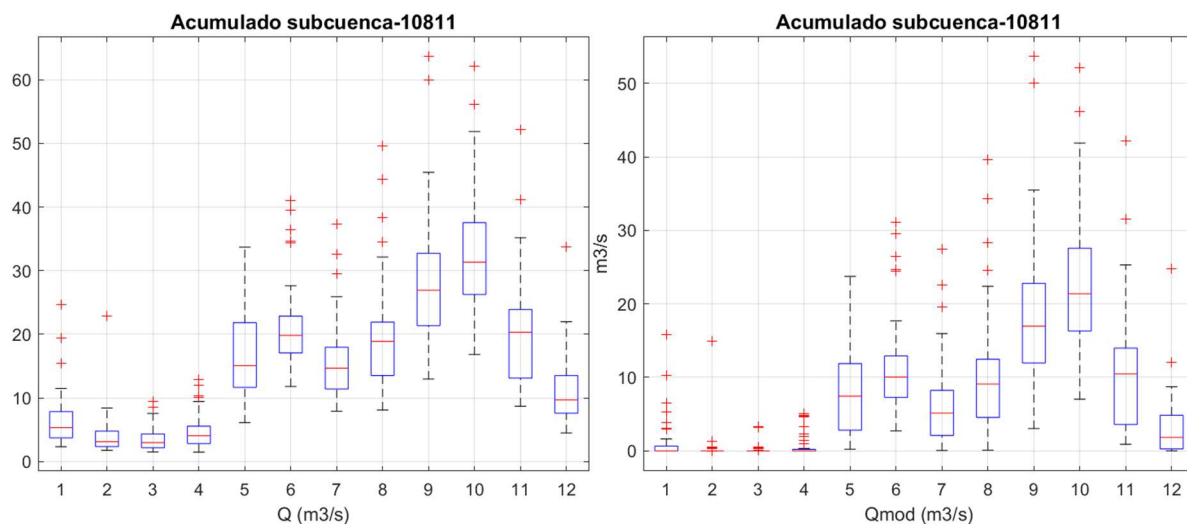


Figura 57. Boxplot de caudales naturales y modificados (m^3/s) en la subcuenca 10811 que abastece a Boquete para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

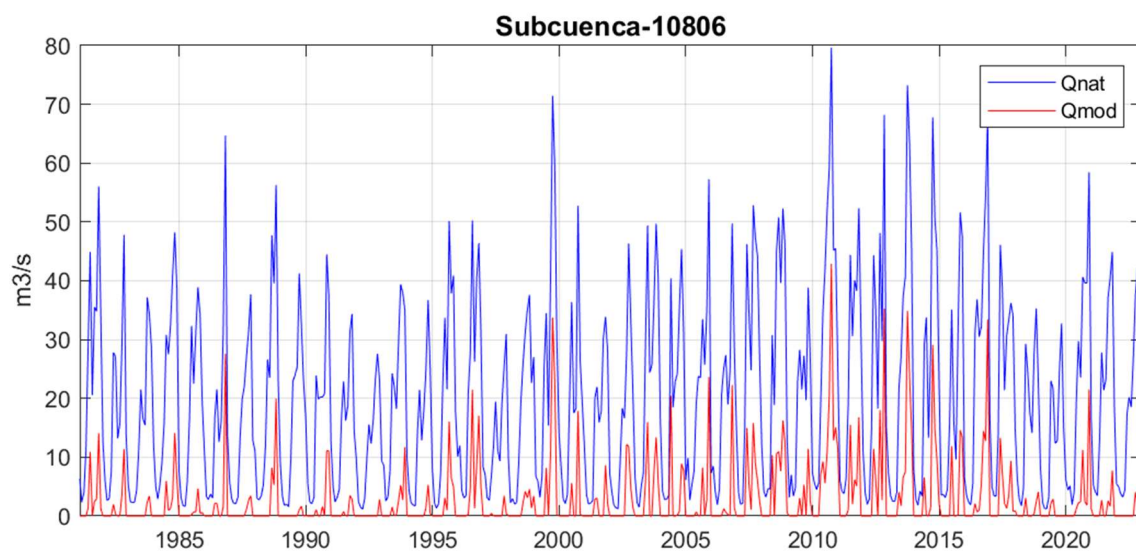


Figura 58. Serie mensual de caudales naturales y modificados (m^3/s) en el río Cochea que abastece a Dolega (subcuenca 10806) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

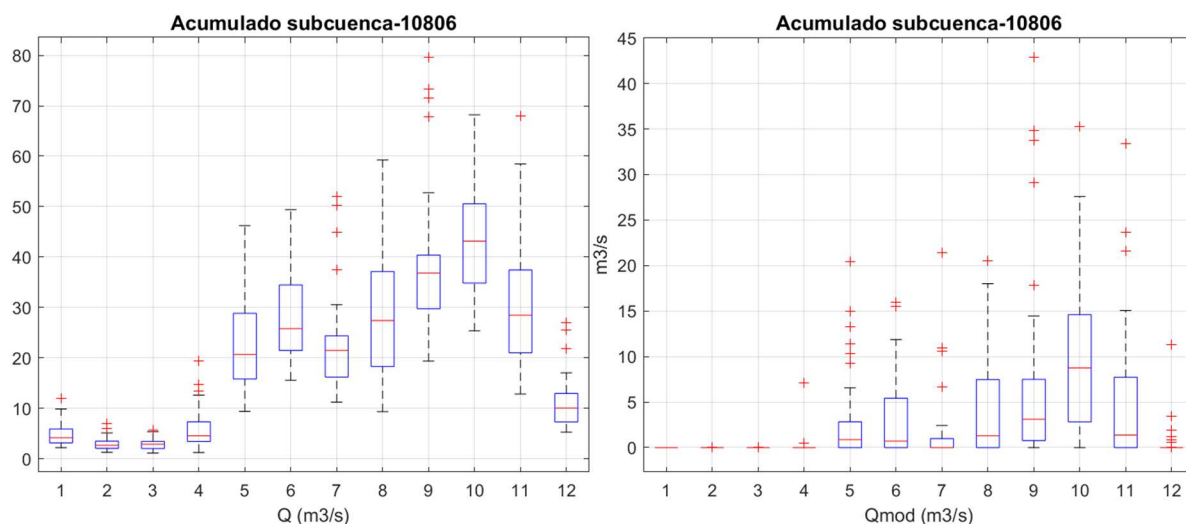


Figura 59. Boxplot de caudales naturales y modificados (m^3/s) en el río Cochea que abastece a Dolega (subcuenca 10806), para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

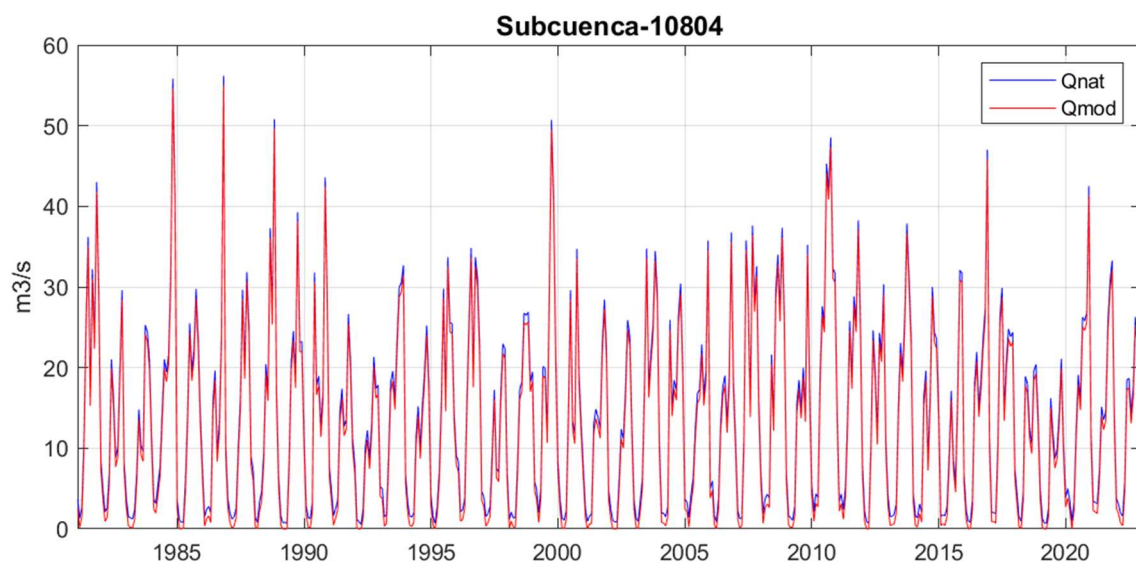


Figura 60. Serie mensual de caudales naturales y modificados (m^3/s) en el río Majagua que abastece a Dolega (subcuenca 10804) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

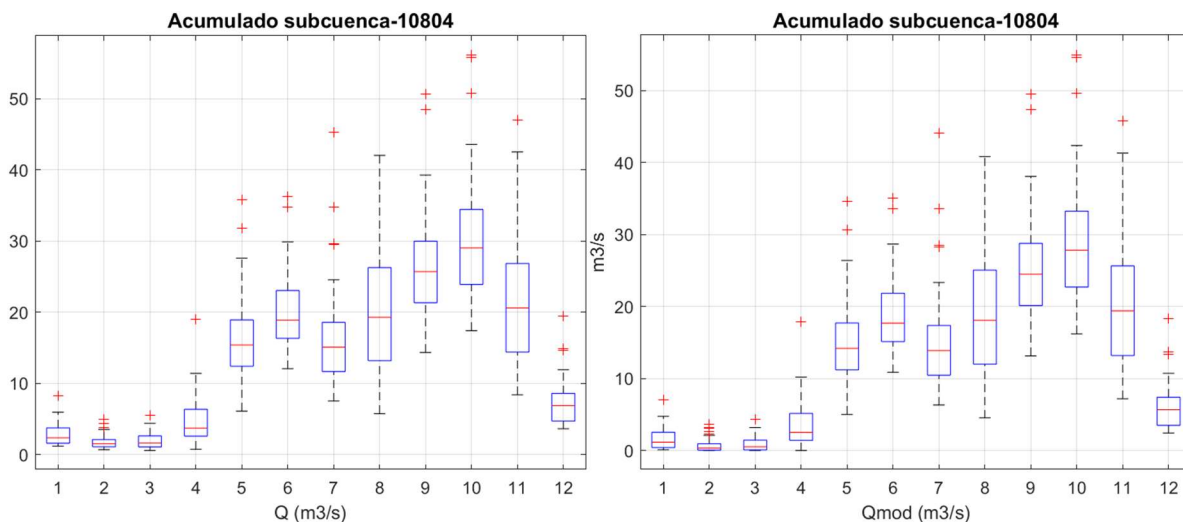


Figura 61. Boxplot de caudales naturales y modificados (m^3/s) en el río Majagua que abastece a Dolega (subcuenca 10804), para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

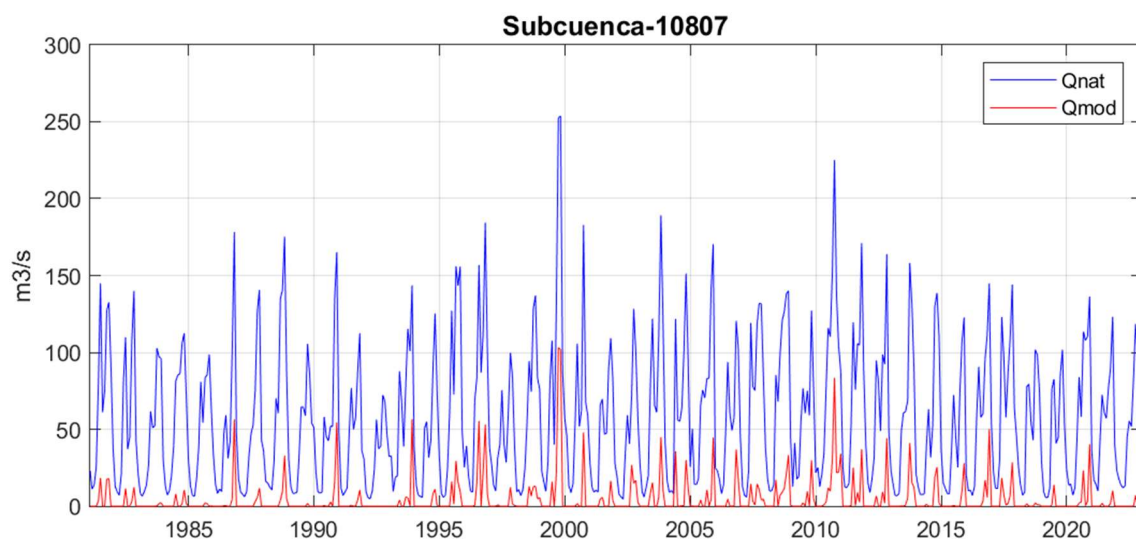


Figura 62. Serie mensual de caudales naturales y modificados (m^3/s) en el río Caldera que abastece a Gualaca (subcuenca 10807) para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

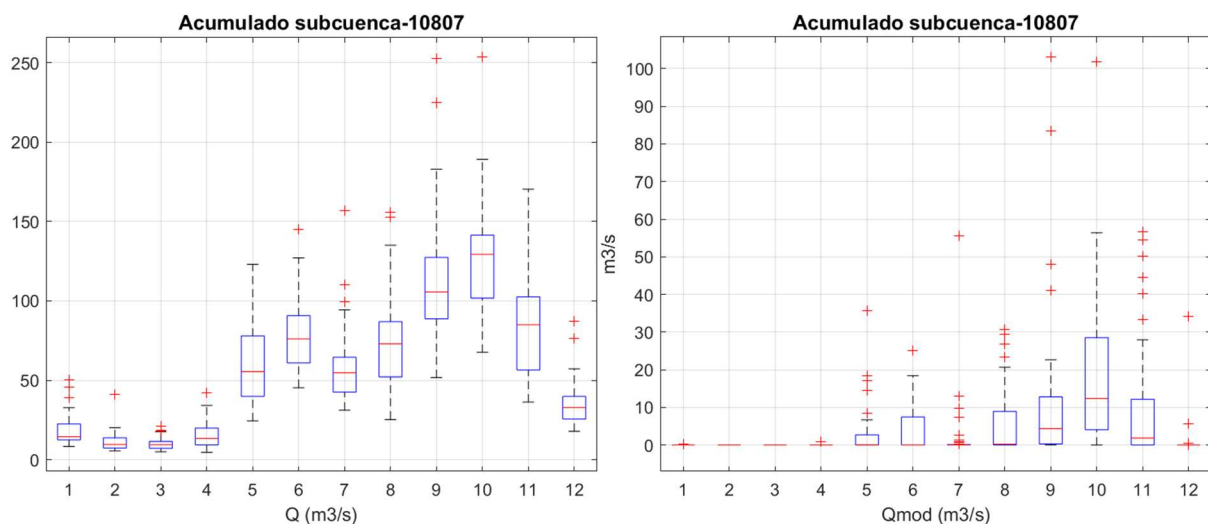


Figura 63. Boxplot de caudales naturales y modificados (m^3/s) en el río Caldera que abastece a Gualaca (subcuenca 10807), para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

Subcuenca	Caudal natural medio (m ³ /s)	Caudal modificado medio (m ³ /s)	Garantía volumétrica de satisfacción de la demanda de consumo humano
SITUACIÓN ACTUAL			
10811	15.48	7.93	100%
10806	20.21	2.85	100%
10804	14.31	13.15	99%
10807	57.91	4.71	100%
HORIZONTE 2030 SSP585			
10811	15.38	8.75	100%
10806	19.78	4.25	100%
10804	13.27	12.22	91%
10807	58.81	8.18	100%
HORIZONTE 2050 SSP585			
10811	14.40	8.12	100%
10806	18.58	3.87	100%
10804	12.87	11.86	89%
10807	56.03	7.41	100%

Tabla 10. Resultados del modelo de gestión en las principales subcuencas que abastecen a Boquete (10811), Dolega (10806 y 10804) y Gualaca (10807) para la situación actual y los escenarios SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.

Además, se incluye en la Tabla 11 la garantía de satisfacción de la demanda en las plantas potabilizadoras y tanques de almacenamiento que obtienen agua para consumo humano en las áreas urbanas de Boquete, Dolega y Gualaca.

Área urbana	Planta Potabilizadora /Tanque de almacenamiento	Garantía de abastecimiento		
		Situación actual	2030 SSP585	2050 SSP585
Boquete	Los Ladrillos	100%	100%	100%
	Aguas de Boquete	100%	100%	100%
Dolega	Dolega	100%	100%	100%
	Los Algarrobos	99%	91%	89%
Gualaca	Gualaca	100%	100%	100%

Tabla 11. Garantía de satisfacción de las demandas de las plantas potabilizadoras que obtienen agua para consumo humano en las áreas urbanas de Boquete, Dolega y Gualaca para la situación actual y los escenarios SSP 585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.

El indicador de amenaza que se utiliza posteriormente para para el cálculo del riesgo por escasez de recursos hídricos a la población en combinación con los indicadores de vulnerabilidad que se presentan a continuación, es el déficit hídrico para consumo humano (volumen de la garantía hídrica que no se satisface). En la Tabla 12 se recoge el valor del déficit de la planta potabilizadora de los Algarrobos que abastece a parte del área urbana de Dolega, corregimientos de los Anastacios y los Algarrobos, así como a la ciudad de David, única planta con déficit hídrico, en los escenarios climáticos analizados.

Escenario	Déficit hídrico
Situación actual	1%
Horizonte 2030 SSP585	9%
Horizonte 2050 SSP585	11%

Tabla 12. Déficit hídrico para consumo humano en la planta potabilizadora de Los Algarrobos para la situación actual y los escenarios SSP585 2030 y 2050. Fuente: IHCantabria, 2024.

En el escenario climático analizado con datos históricos (situación actual), el recurso superficial que se genera no es suficiente para cubrir la demanda de agua de las plantas de tratamiento de Dolega, hay un 1% del volumen que no se satisface. En los escenarios futuros el déficit hídrico va incrementando progresivamente conforme lo hace el horizonte temporal por la combinación del descenso de las precipitaciones y el ascenso de las temperaturas, que reducen la producción de agua superficial en la cuenca disponible para consumo. Para el horizonte 2030, el 9% de la demanda de agua para consumo humano no va a satisfacerse, y para el horizonte se tendrá un 11% de déficit hídrico.

8.3. Caracterización de la vulnerabilidad

En este apartado se analizan las principales variables de vulnerabilidad relevantes para determinar el riesgo de escasez de recursos hídricos.

En cuanto a los indicadores de vulnerabilidad, se han considerado los siguientes:

- Densidad de población. Las zonas más densas suelen ser más vulnerables al fenómeno.
- Porcentaje de población sensible. La proporción de ancianos y niños es un factor de vulnerabilidad a la escasez de recursos hídricos bien documentado.
- Porcentaje de mujeres: Las mujeres son más vulnerables a la escasez de recursos hídricos por una combinación de factores sociales, económicos y de roles de género.
- Necesidades básicas insatisfechas (NBI). Identifican carencias críticas en una población y caracterizan la pobreza. En este caso, utiliza indicadores directamente relacionados con dos áreas de necesidades básicas de las personas (vivienda y servicios básicos), disponibles en los censos de población y vivienda.

Todas estas variables se obtienen con datos del del XII Censo de Población y VIII de Vivienda de Panamá del año 2023 del INEC a nivel de barrio urbano o lugar poblado.

8.3.1. Densidad de población

Las zonas más densamente pobladas son más vulnerables frente a la escasez de recursos hídricos por varias razones:

- Alta demanda de agua: en áreas densamente pobladas, la demanda de agua es mucho mayor debido a la concentración de personas, industrias y servicios. Esta alta demanda puede sobrecargar las fuentes de agua disponibles, llevándolas a niveles insostenibles.
- Infraestructura sobrecargada: la infraestructura de distribución de agua, como tuberías, plantas de tratamiento y sistemas de alcantarillado, puede no estar diseñada para manejar grandes

cantidades de población. Esto puede resultar en pérdidas significativas de agua debido a fugas, y en una distribución ineficiente que agrava la escasez.

- Contaminación: en áreas densamente pobladas, la contaminación del agua puede ser un problema grave debido a los desechos industriales, agrícolas y domésticos. La contaminación reduce la cantidad de agua potable disponible, lo que exacerba la escasez.
- Competencia por recursos: en zonas con alta densidad poblacional, existe una mayor competencia por los recursos hídricos entre diferentes sectores, como el doméstico, industrial y agrícola. Esta competencia puede generar conflictos y dificultar la gestión equitativa y sostenible del agua.
- Vulnerabilidad a crisis: las áreas densamente pobladas son más vulnerables a crisis de agua como sequías, cortes de suministro o fallos en la infraestructura. Cualquier interrupción en el suministro de agua puede tener un impacto significativo en la salud pública, la economía y la estabilidad social.
- Crecimiento urbano no planificado: el crecimiento rápido y no planificado de las ciudades puede llevar a la expansión de asentamientos informales sin acceso adecuado a agua y saneamiento. Esto aumenta la vulnerabilidad de las poblaciones en estas áreas frente a la escasez de agua.
- Dependencia de fuentes limitadas: Las zonas densamente pobladas a menudo dependen de una cantidad limitada de fuentes de agua, como ríos, embalses o acuíferos. Si estas fuentes se agotan o se contaminan, la escasez de agua puede volverse crítica.

En las siguientes figuras se presenta la distribución espacial de la densidad de población a nivel de barrio urbano o lugar poblado en las áreas de estudio de Boquete, Dolega y Gualaca respectivamente.

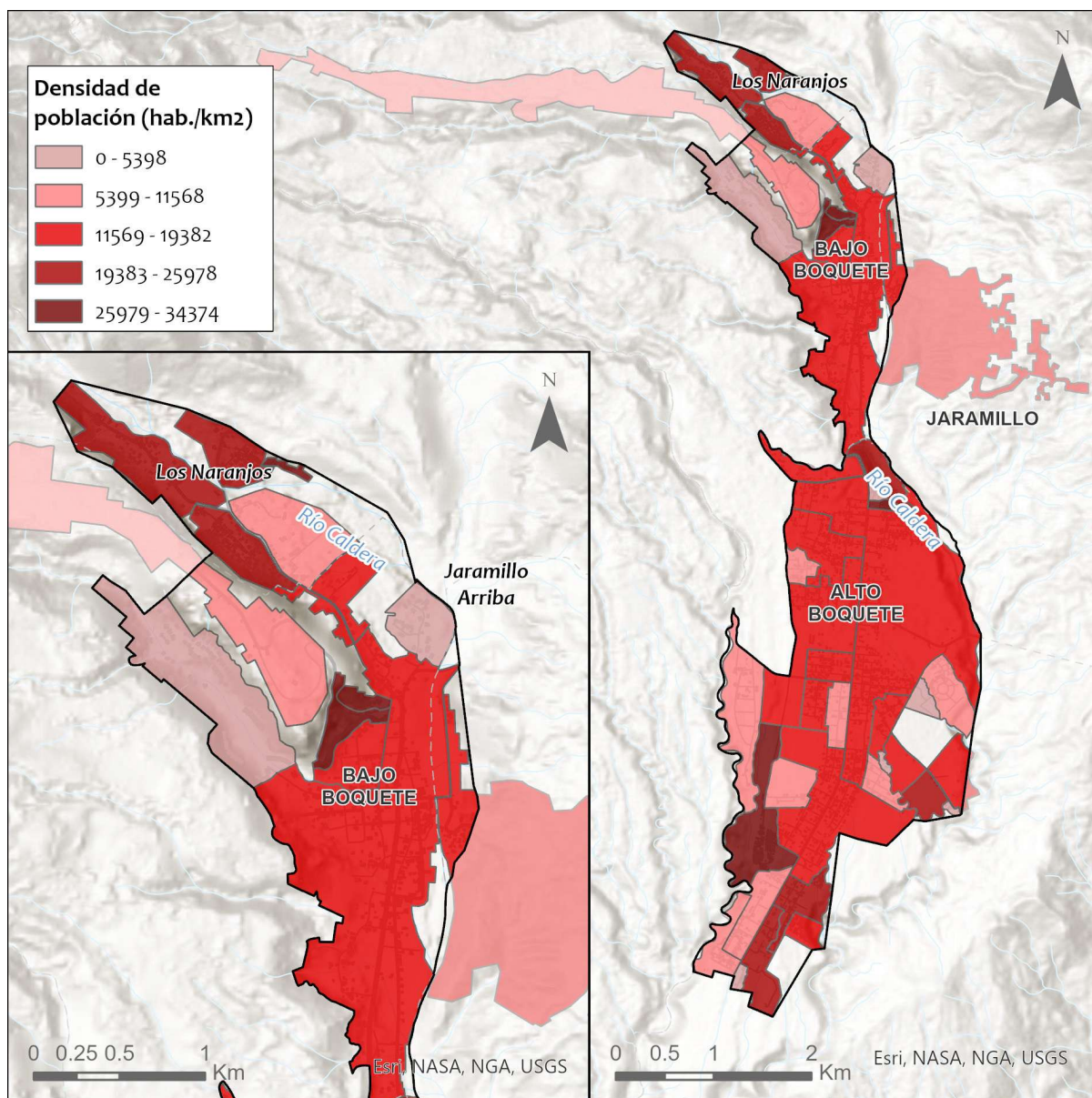


Figura 64. Densidad de población en el área de estudio de Boquete. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

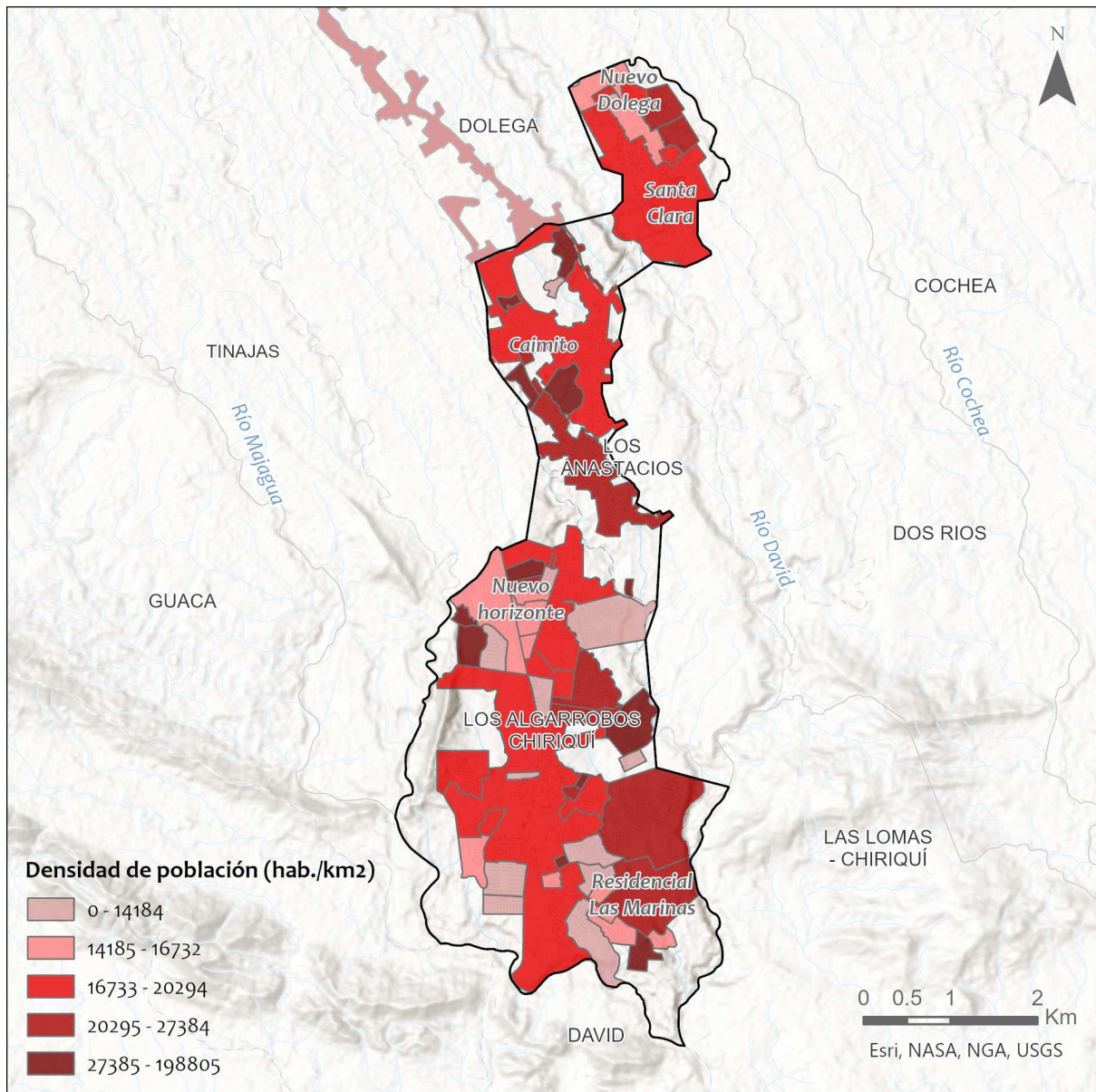


Figura 65. Densidad de población en el área de estudio de Dolega. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

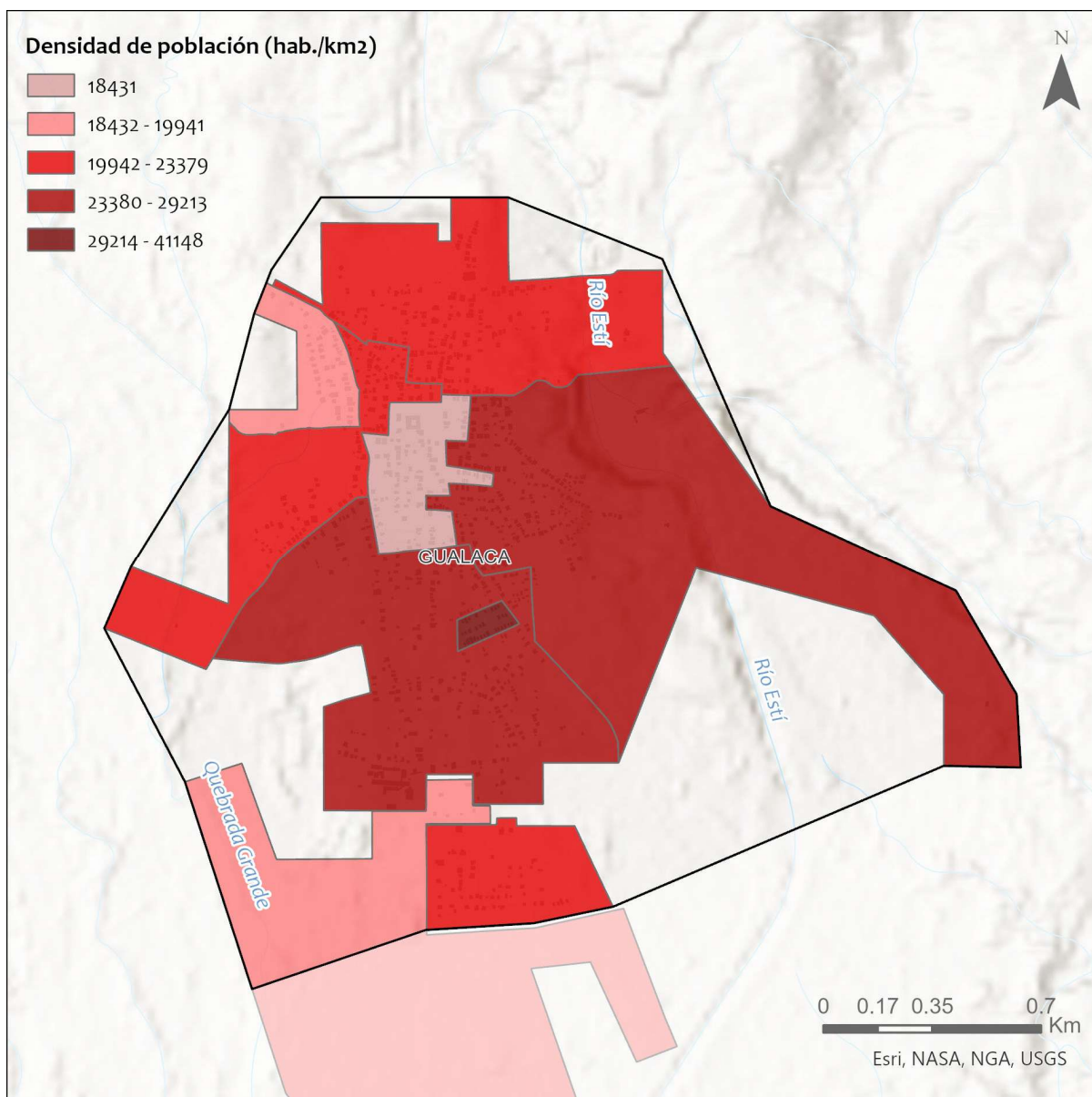


Figura 66. Densidad de población en el área de estudio de Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

8.3.2. Población sensible

En la siguientes figuras se presenta la distribución espacial de la población sensible, entendida como la población menor de 5 años y mayor de 65 años, a nivel de barrio urbano o lugar poblado en las áreas de estudio de Boquete, Dolega y Gualaca respectivamente.

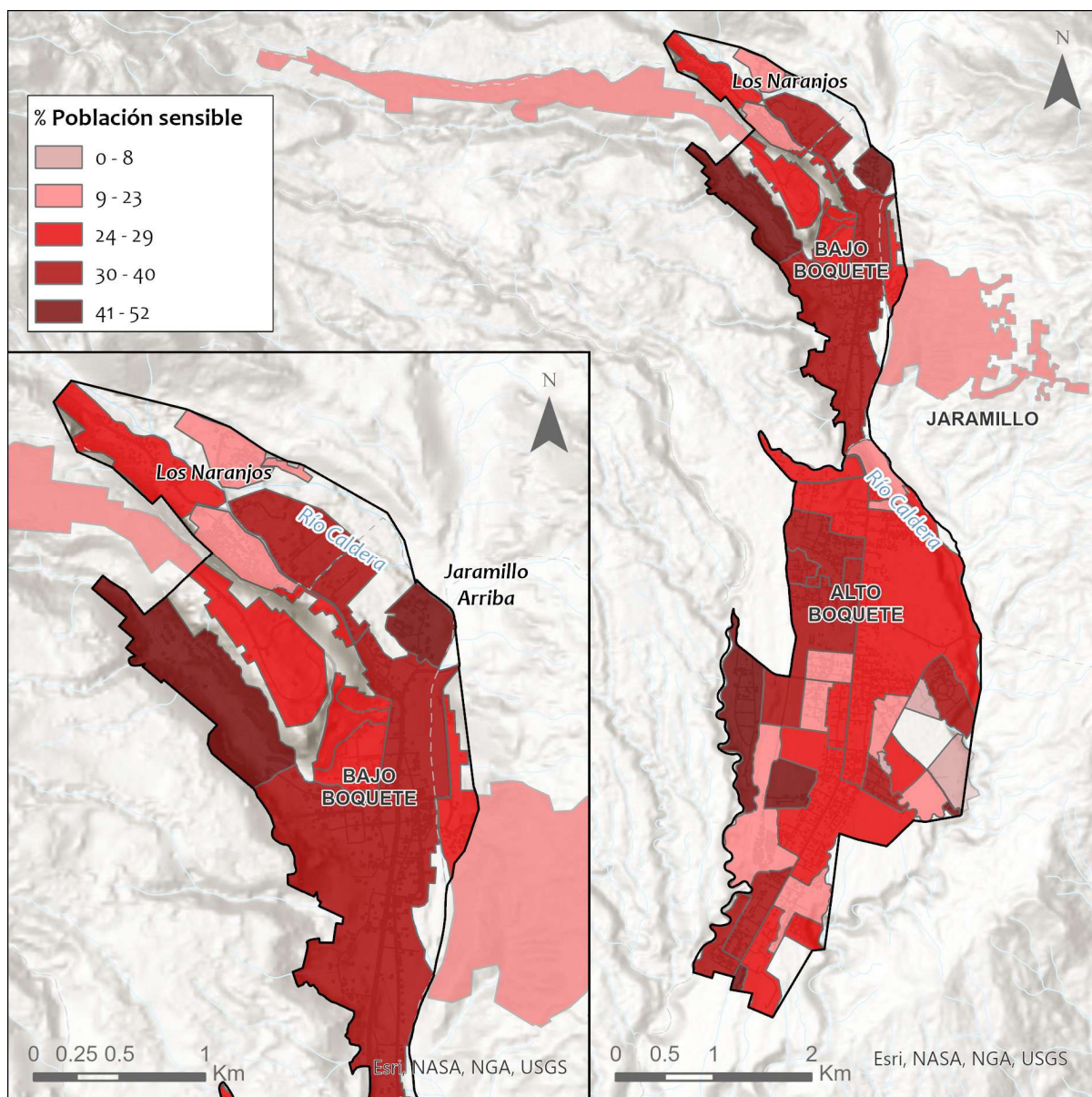


Figura 67. Porcentaje de población sensible en el área de estudio de Boquete. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

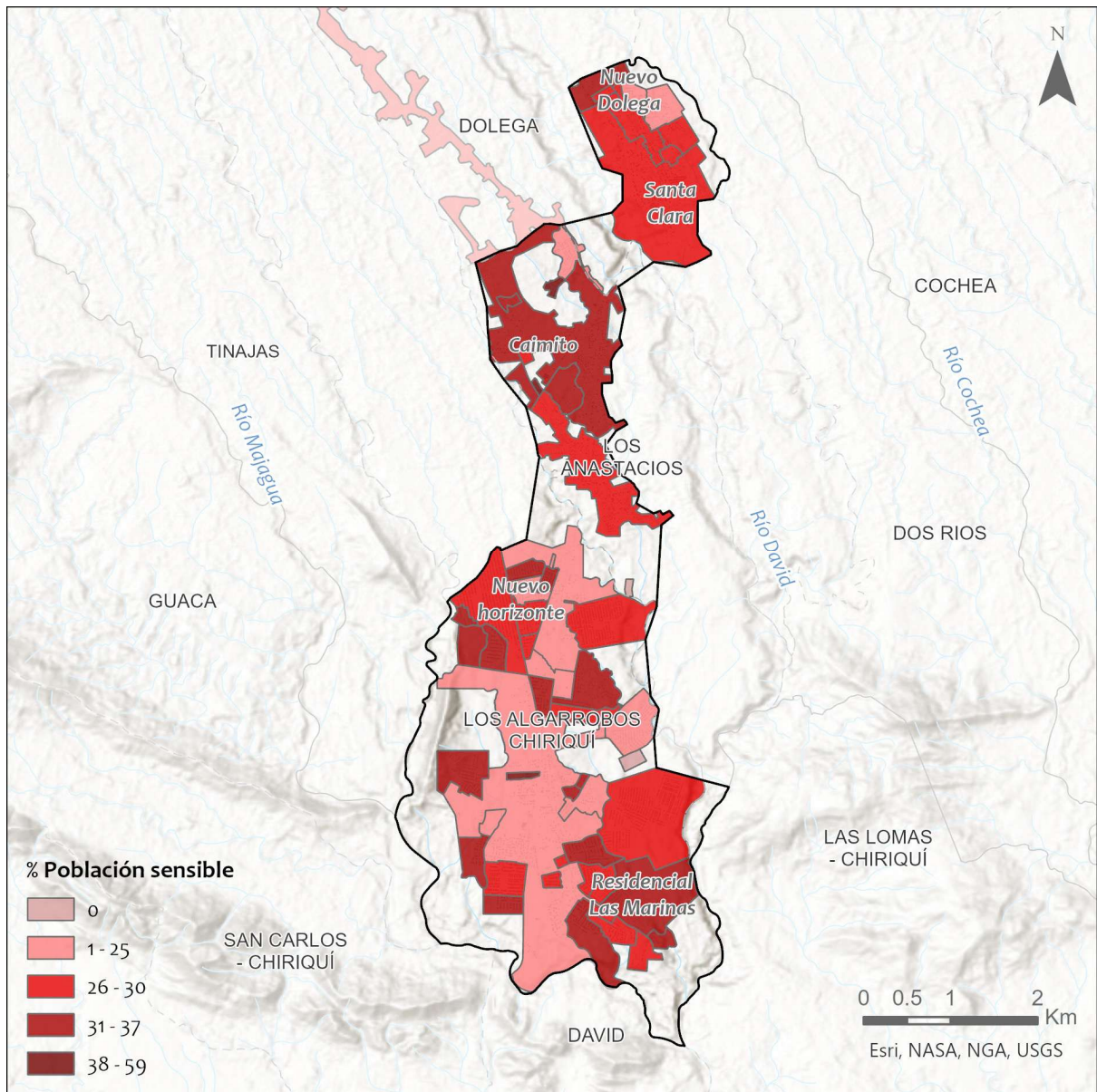


Figura 68. Porcentaje de población sensible en el área de estudio de Dolega. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

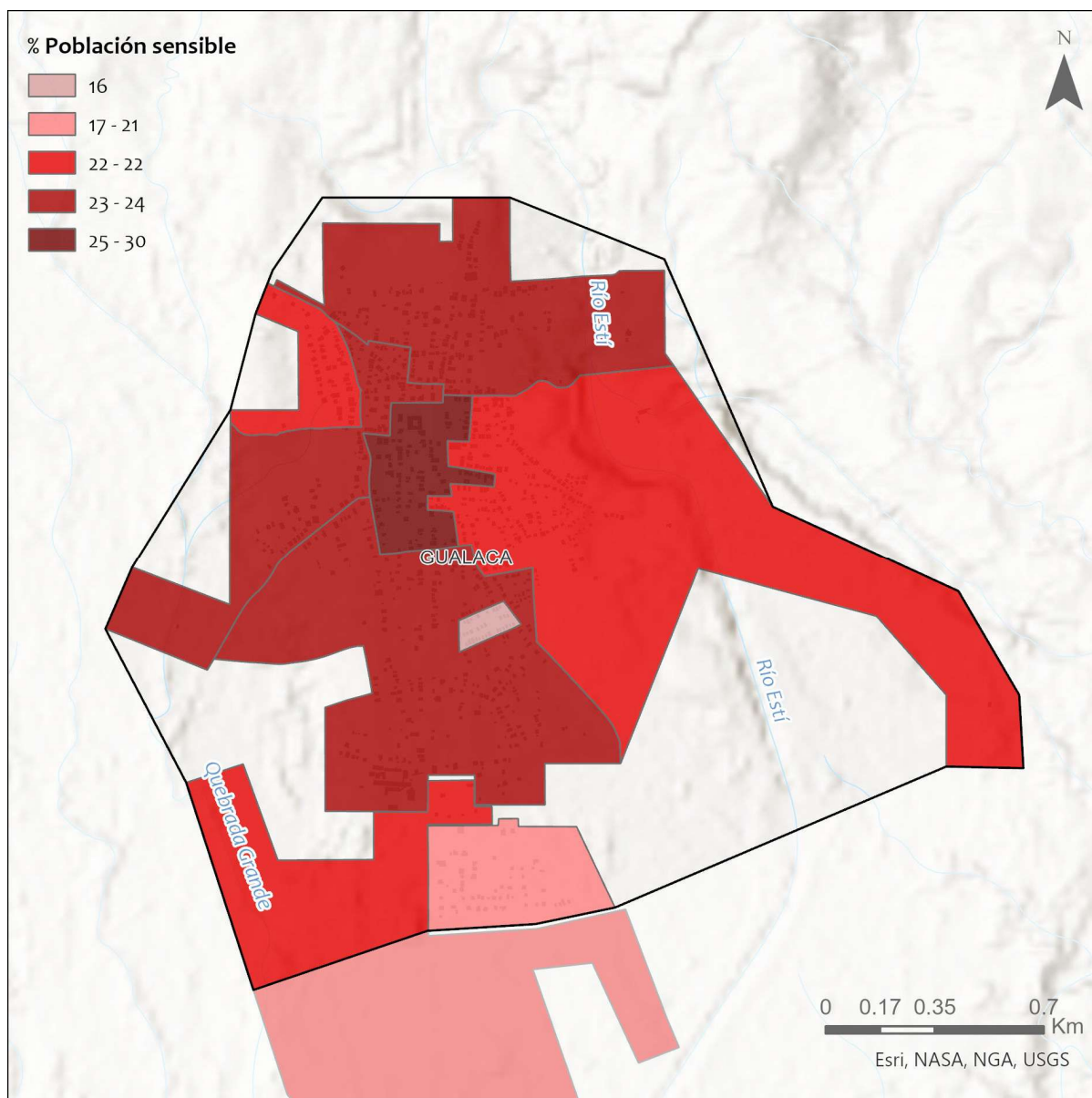


Figura 69. Porcentaje de población sensible en el área de estudio de Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

Las zonas con una mayor población sensible, como niños y ancianos, son más vulnerables frente a la escasez de recursos hídricos por varias razones clave:

- Mayor vulnerabilidad a enfermedades: niños y ancianos son más susceptibles a enfermedades transmitidas por el agua, como la diarrea, que pueden ser mortales si no se tratan adecuadamente. La falta de acceso a agua limpia agrava el riesgo de estas enfermedades, especialmente en poblaciones con sistemas inmunológicos más débiles.
- Necesidades específicas de hidratación y nutrición: tanto los niños como los ancianos requieren una hidratación adecuada para mantener su salud. Los niños, debido a su crecimiento, y los ancianos, por la reducción de la eficiencia de sus riñones y una menor percepción de la sed, pueden deshidratarse más rápidamente, lo que puede ser particularmente peligroso en condiciones de escasez de agua.

- Dependencia de otros para acceder al agua: los ancianos y los niños a menudo dependen de otros para acceder a agua potable. Si el suministro de agua es escaso, esta dependencia puede convertirse en una barrera significativa, especialmente si los cuidadores también están enfrentando dificultades para obtener agua.
- Impacto en la nutrición: la escasez de agua puede afectar la preparación de alimentos y, por lo tanto, la nutrición. Los niños, que están en etapas críticas de desarrollo, y los ancianos, que pueden tener necesidades dietéticas especiales, son particularmente sensibles a cualquier deterioro en la calidad o cantidad de los alimentos disponibles.
- Mayor riesgo en situaciones de crisis: en situaciones de crisis por escasez de agua, como sequías prolongadas o interrupciones en el suministro, los niños y los ancianos son los primeros en verse afectados. Su menor capacidad para adaptarse rápidamente a condiciones adversas los pone en mayor riesgo de sufrir consecuencias graves.
- Acceso limitado a soluciones alternativas: las poblaciones sensibles, como los ancianos, pueden tener dificultades para acceder a soluciones alternativas, como la compra de agua embotellada o el transporte a lugares con mejor acceso a agua. Esto es especialmente relevante en zonas con infraestructura deficiente.

8.3.3. Mujeres

La vulnerabilidad de las mujeres frente a la escasez de recursos hídricos se debe a varios factores interrelacionados:

- Roles de género tradicionales: En muchas culturas, las mujeres son las principales responsables de la recolección de agua para el hogar, lo que las expone directamente a la escasez y a la calidad del agua.
- Salud y saneamiento: Las mujeres necesitan agua adicional para su higiene personal, especialmente durante la menstruación, el embarazo y la lactancia, lo que incrementa su dependencia de recursos hídricos adecuados.
- Acceso y tiempo: La recolección de agua puede requerir largas caminatas, lo que implica una carga física y de tiempo significativa. Esto limita las oportunidades de las mujeres para participar en actividades educativas, económicas y recreativas.
- Riesgos de seguridad: Viajar largas distancias para recoger agua puede exponer a las mujeres y niñas a riesgos de violencia y acoso.
- Participación en la toma de decisiones: Las mujeres a menudo tienen menos acceso a la toma de decisiones en temas de gestión de recursos hídricos, lo que significa que sus necesidades y perspectivas pueden ser subestimadas o ignoradas.
- Efectos económicos: La falta de acceso a agua segura puede afectar la capacidad de las mujeres para mantener sus medios de vida, especialmente en áreas agrícolas donde ellas juegan un papel clave en la producción de alimentos.

A continuación, se presenta la distribución espacial del porcentaje de mujeres a nivel de barrio urbano o lugar poblado en las áreas de estudio de Boquete, Dolega y Gualaca respectivamente.

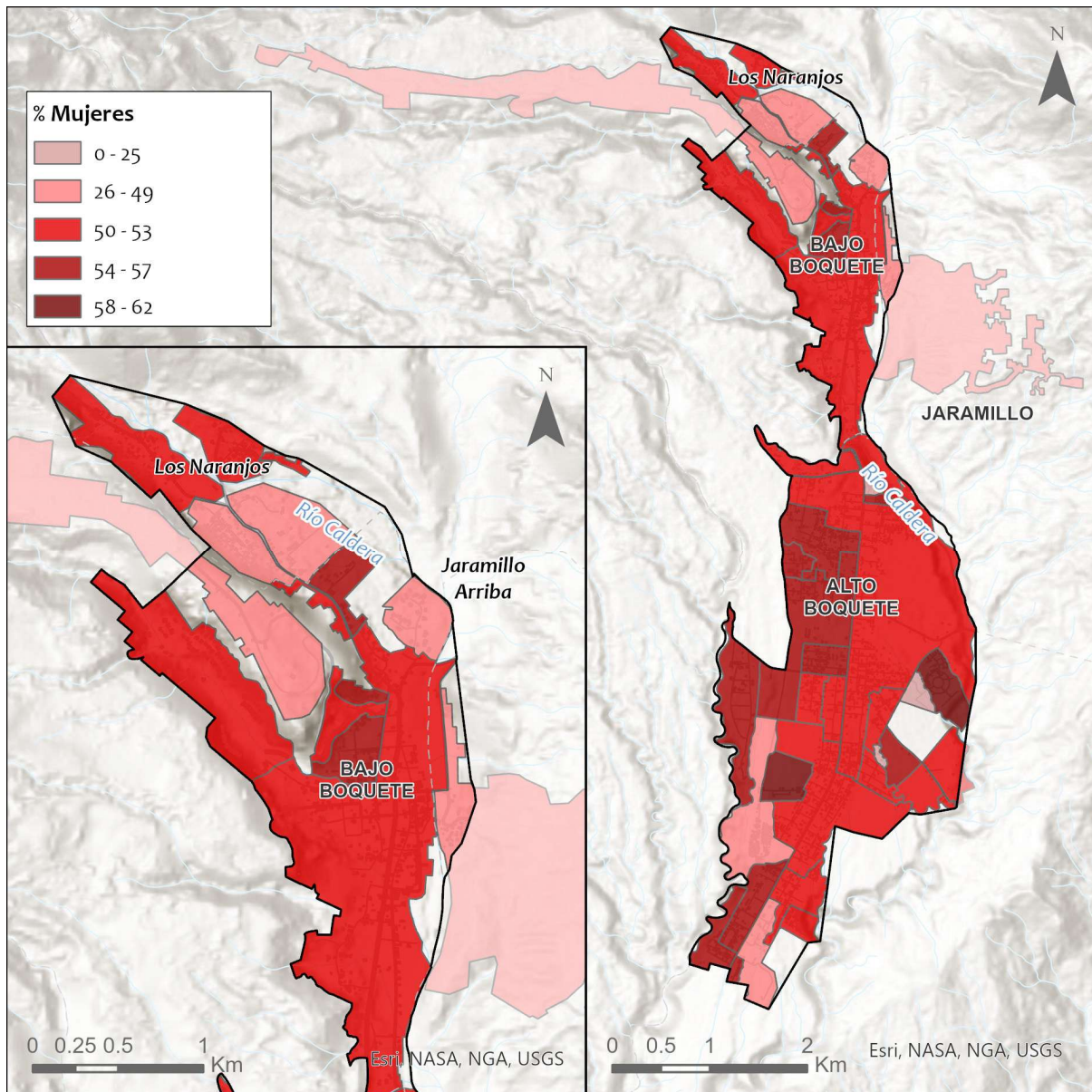


Figura 70. Porcentaje de mujeres en el área de estudio de Boquete. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

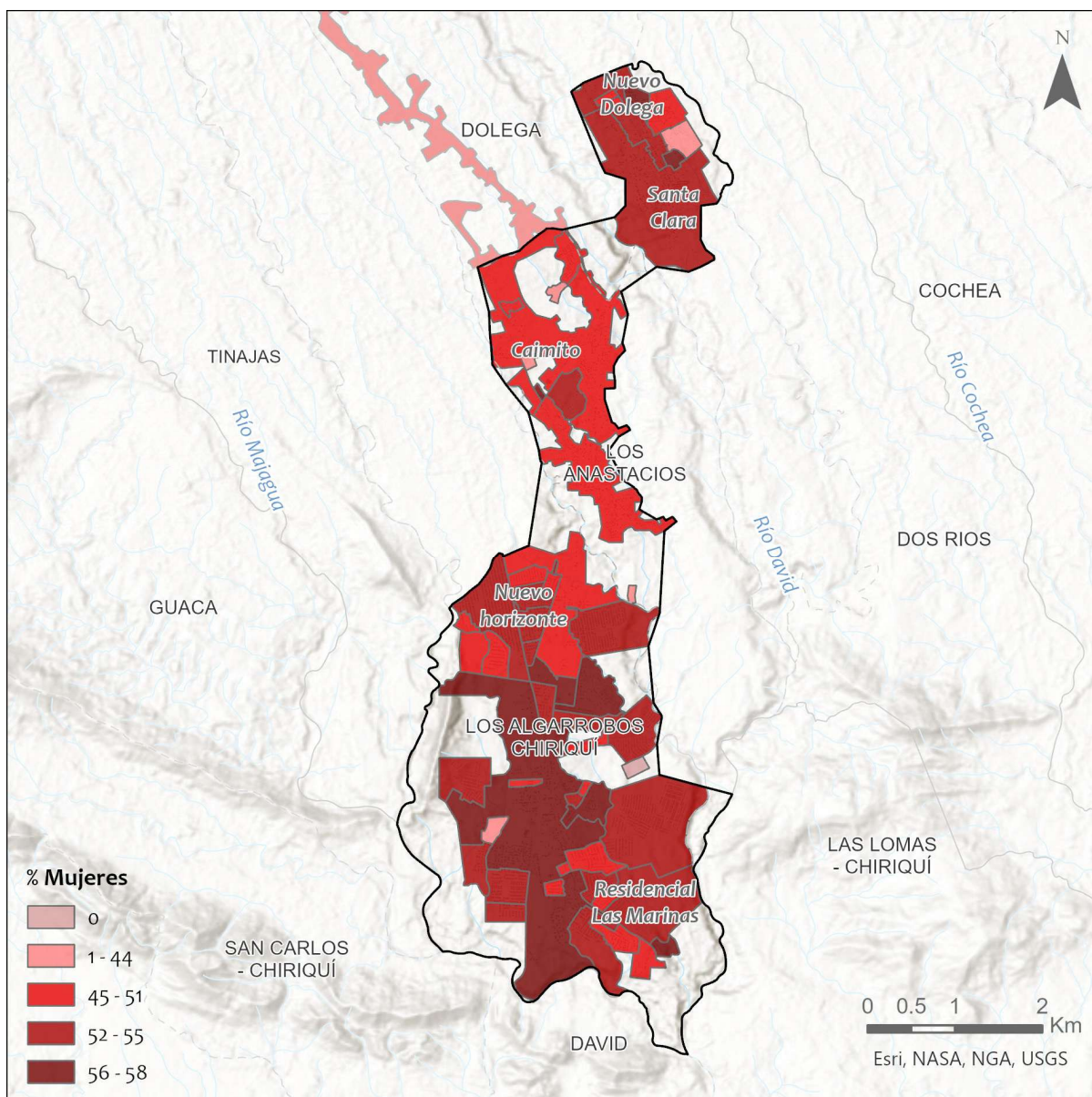


Figura 71. Porcentaje de mujeres en el área de estudio de Dolega. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

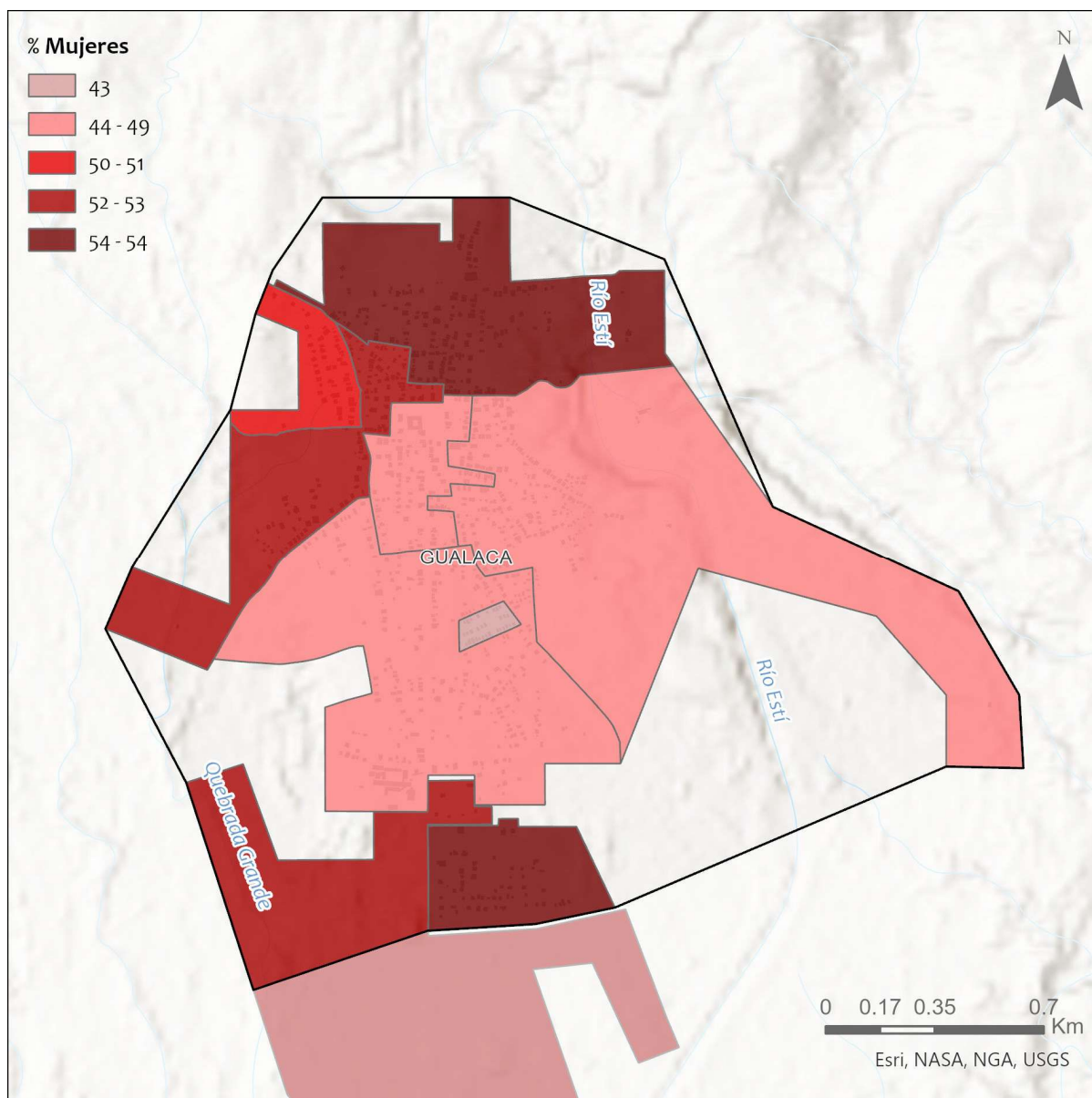


Figura 72. Porcentaje de mujeres en el área de estudio de Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

8.3.4. Necesidades básicas insatisfechas (NBI)

Las zonas con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) son más vulnerables frente a la escasez de recursos hídricos debido a una combinación de factores económicos, sociales y de infraestructura. A continuación, se detallan las principales razones:

- **Infraestructura deficiente:** En las zonas con NBI, la infraestructura de agua potable suele ser inadecuada o inexistente. Esto significa que las comunidades dependen de fuentes de agua no seguras o tienen acceso limitado al agua, lo que exacerba la vulnerabilidad frente a la escasez.
- **Baja capacidad económica:** Las personas en estas áreas generalmente tienen ingresos bajos, lo que les dificulta acceder a soluciones alternativas durante la escasez de agua, como

comprar agua embotellada, instalar sistemas de almacenamiento o acceder a tecnologías de purificación.

- Falta de acceso a servicios básicos: Las zonas con NBI a menudo carecen de servicios esenciales como el saneamiento adecuado, lo que aumenta el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua. La escasez de agua agrava este problema, ya que limita la disponibilidad de agua limpia para el consumo y la higiene.
- Desigualdad en la distribución de recursos: En contextos de escasez, las zonas con NBI pueden ser las últimas en recibir agua debido a la falta de representación política y a la desigualdad en la distribución de recursos. Esto puede resultar en un suministro de agua inconsistente o en cortes prolongados.
- Limitado acceso a educación y recursos para la gestión del agua: Las comunidades con NBI suelen tener menos acceso a la educación y a recursos que podrían ayudarles a gestionar mejor sus recursos hídricos, como la información sobre conservación de agua o la participación en proyectos de infraestructura.

Para el cálculo de este indicador de vulnerabilidad se ha calculado un índice agregado de NBI para los hogares del Censo de 2023 en función de las variables y pesos que se describen en la Tabla 13.

Indicador NBI	Peso	Descripción	Variables del Censo de 2023
Precariedad de los materiales de la vivienda	15	Al menos una de las siguientes condiciones se cumple: Si en el área urbana la casa cuenta con paredes de madera, quincha adobe, metal, palma paja o penca caña o bambú o palos, otros materiales (cartón) o sin paredes. O si el material de los techos es de madera, palma, paja, pencas u otros materiales. O si el material de los pisos es de madera, tierra u otros materiales.	4.MATERIAL DE LAS PAREDES 5.MATERIAL DEL TECHO 6.MATERIAL DEL PISO
Personas por habitación o hacinamiento	15	Una habitación (excluyendo la cocina, servicio y el baño) es compartida por tres (3) o más personas.	7a. DORMITORIOS CANTIDAD DE PERSONAS
Carencia de electricidad	15	La fuente principal de alumbrado es querosín o diésel, gas, velas u otro.	14.TIPO DE ALUMBRADO
Carencia de saneamiento mejorado	20	El hogar cuenta con un servicio de hueco o letrina exclusivo de la vivienda o compartido, el servicio está conectado a alcantarillado o tanque séptico, pero es compartido con otras viviendas o si no cuenta con servicio sanitario.	11.SERVICIO SANITARIO
Carencia de fuentes de agua mejorada para beber	35	La principal fuente de agua para beber es: pozo brocal no protegido, o pozo superficial o carro cisterna o río, quebrada, lago, estanques, arroyo, agua de lluvia u otra fuente. En el caso de hogares cuya principal fuente de agua es un acueducto público del IDAAN, serán privados si reciben el agua menos de siete días a la semana o menos de 12 horas al día durante el verano o el invierno.	8.ABASTECIMIENTO DE AGUA 10.DÍAS A LA SEMANA EN ESTACIÓN SECA 10.HORAS AL DÍA EN ESTACIÓN SECA 10.DÍAS A LA SEMANA EN ESTACIÓN LLUVIOSA 10.HORAS AL DÍA EN ESTACIÓN LLUVIOSA

Tabla 13. Variables y pesos que componen el índice agregado de NBI para los hogares del área de estudio.
Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

La distribución espacial del índice de NBI a nivel de barrio urbano o lugar poblado se presenta a continuación en las áreas de estudio de Boquete, Dolega y Gualaca respectivamente.

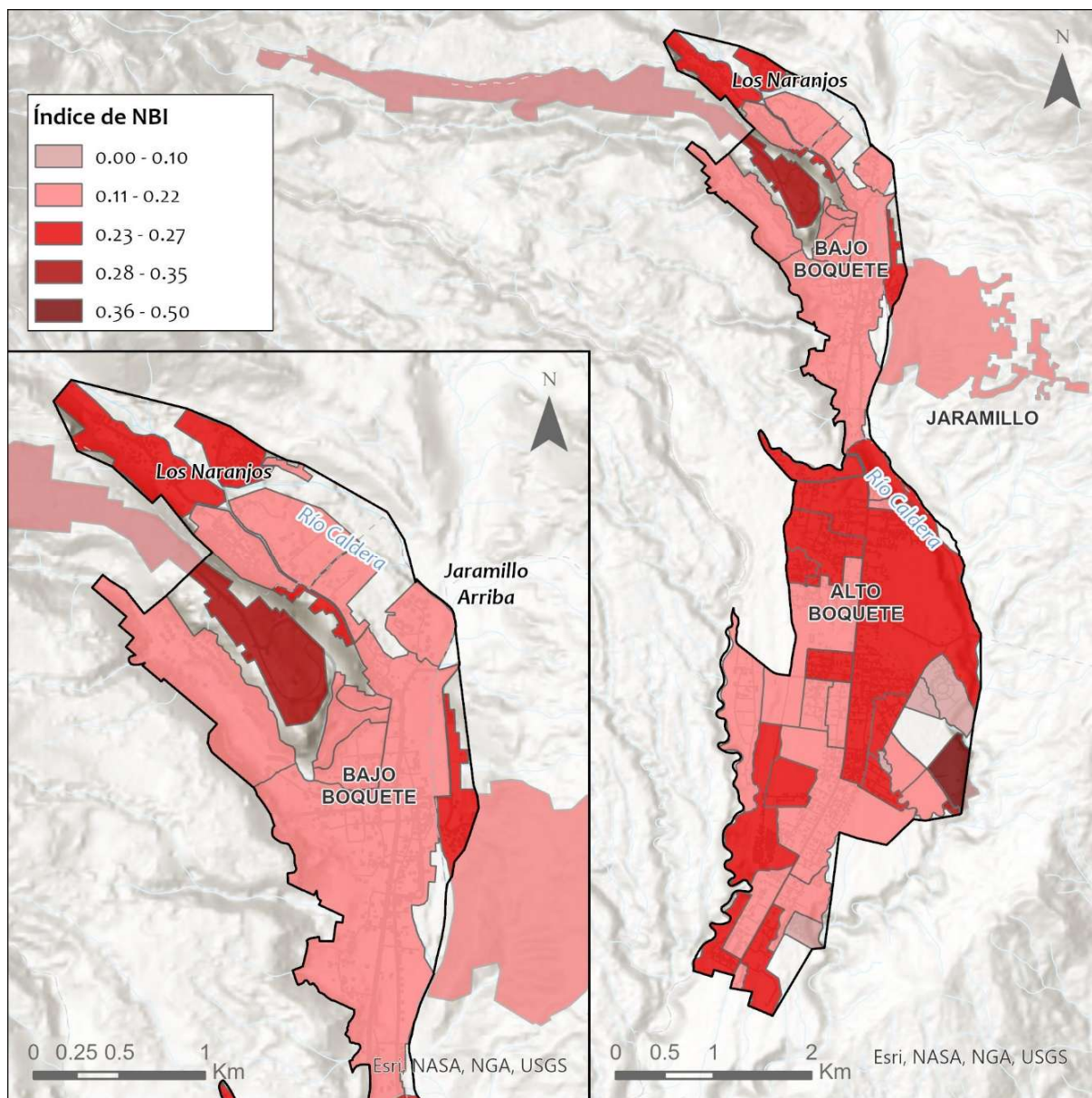


Figura 73. Índice agregado de NBI en el área de estudio de Boquete. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

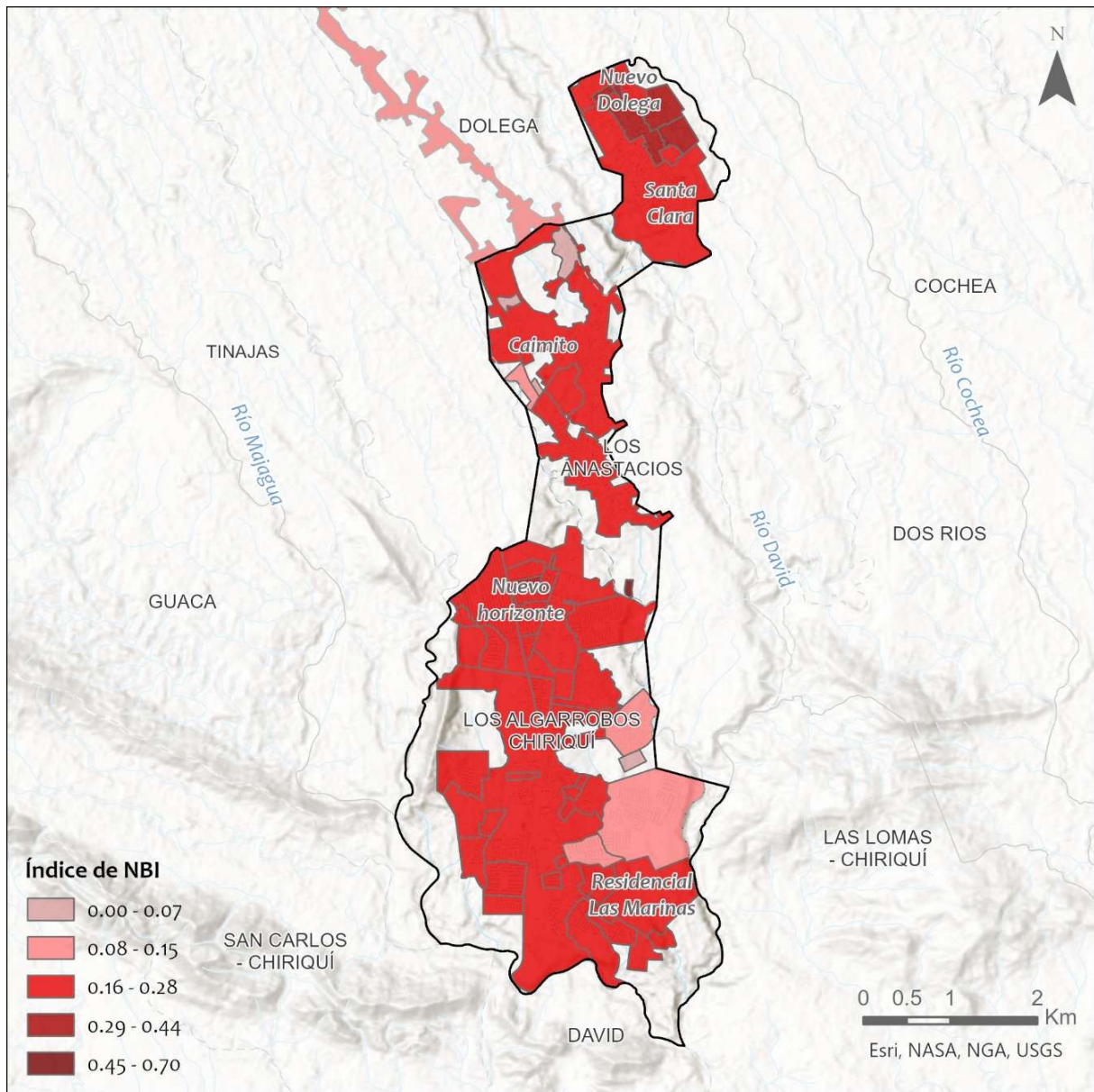


Figura 74. Índice agregado de NBI en el área de estudio de Dolega. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

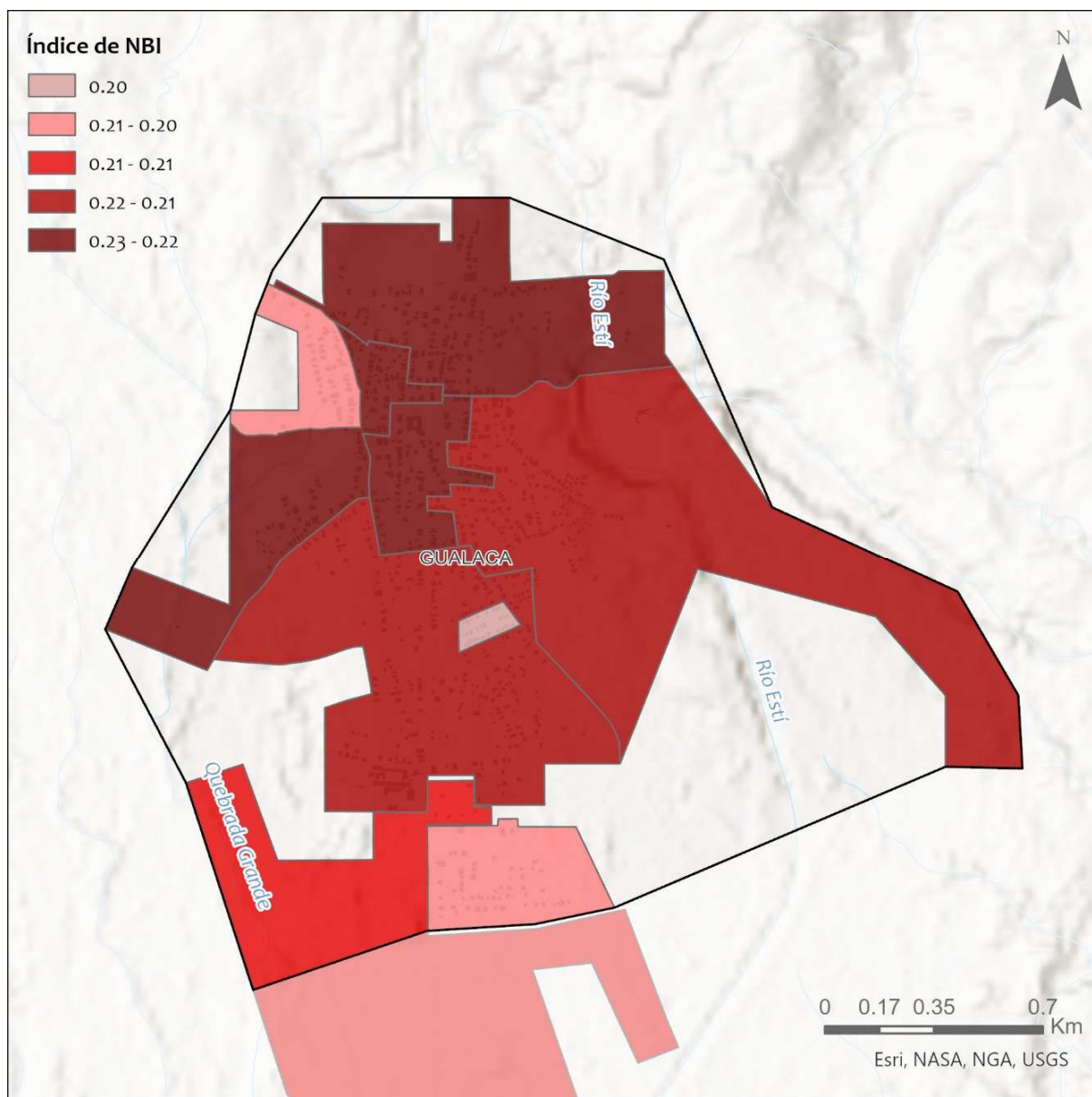


Figura 75. Índice agregado de NBI en el área de estudio de Gualaca. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

8.4. Cálculo del riesgo

8.4.1. Metodología de obtención del riesgo estandarizado

Para el cálculo del riesgo estandarizado, en primer lugar, se obtienen los indicadores de riesgo estándar, a partir de los indicadores de amenaza y vulnerabilidad elaborados previamente. Estos suelen estar expresados en unidades y escalas diferentes (de menos infinito a infinito, de 0 a infinito, de 0 a 1), por lo que, antes de combinarlos, deben homogeneizarse en una escala de 0 a 1 utilizando una función de transformación. Para elegir la función de transformación, se establecen los valores que definen los umbrales de riesgo en cada contexto.

Por ejemplo, el indicador que expresa el déficit hídrico (volumen de la garantía hídrica que no se satisface) de una cuenca es adimensional y va de 0 a infinito. El criterio experto indica que un valor mayor de 5% comienza a tener cierto riesgo (umbral de riesgo bajo a medio) y que un valor mayor de 10% ya supone un riesgo alto. Con estos criterios, se define la función con la que se obtiene el riesgo estandarizado correspondiente, que otorga un valor de 0.33 al valor de 5% y de 0.66 al de 10%, interpolando o extrapolando para el resto de los valores.

NIVEL DE RIESGO	RANGOS DEL RIESGO ESTANDARIZADO (RE)
Muy bajo	$0 \leq RE < 0.2$
Bajo	$0.2 \leq RE < 0.4$
Medio	$0.4 \leq RE < 0.6$
Alto	$0.6 \leq RE < 0.8$
Muy alto	$0.8 \leq RE \leq 1$

Tabla 14. Niveles de riesgo considerados. Fuente: IHCantabria, 2024.

Una vez estandarizados los indicadores de amenaza y vulnerabilidad, a estos se les asigna un peso que determina la relevancia de este dentro del proceso de generación del riesgo y se combinan para obtener el indicador de riesgo. Los pesos deben estar equilibrados entre los componentes del riesgo (amenaza y vulnerabilidad) para que el indicador de riesgo sea coherente. Los umbrales y pesos adoptados se basan en juicio de experto, teniendo en cuenta las características y particularidades del área de estudio. En la Tabla 15 se presentan cada uno de los indicadores empleados con sus umbrales y pesos asignados.

Indicador	Umbrales adoptados		Peso
	Riesgo bajo a medio	Riesgo medio a alto	
Déficit (amenaza)	5%	10%	5
Densidad de población hab./km ² (vulnerabilidad)	1000	3000	1
Porcentaje de población sensible (vulnerabilidad)	10%	25%	1
Porcentaje de mujeres (vulnerabilidad)	50%	53%	1
Índice agregado de NBI (vulnerabilidad)	20%	50%	2

Tabla 15. Indicadores de amenaza y vulnerabilidad frente a la escasez de recursos hídricos. Fuente: IHCantabria, 2024.

8.4.2. Indicador de riesgo por escasez de recursos hídricos

Como resultado final se obtienen mapas con la distribución de los niveles de riesgo, a nivel de barrio urbano o lugar poblado, para las tres áreas de estudio delimitadas en Chiriquí.

En el área de estudio en Boquete hay suficiente recuso hídrico superficial para garantizar las demandas existentes, tanto en el escenario climático actual, como en los horizontes 2030 y 2050 considerando el efecto del cambio climático. Como se observa en la Figura 76, el riesgo de escasez de recursos hídricos, por tanto, es bajo, y así se mantiene en los escenarios futuros con cambio climático.

Ahora bien, la realidad en Boquete, según lo recopilado en los talleres de validación de resultados con actores locales, es que existen varios problemas en la red de distribución e infraestructura de

abastecimiento de agua potable que no permiten que el agua llegue a toda la población de Boquete. Además, hay zonas como El Francés y Alto Boquete, que, en verano, debido al turismo, crecen poblacionalmente de forma considerable y no se cuenta con los medios para abastecer el aumento estacional de la demanda de agua que supone el incremento de población.

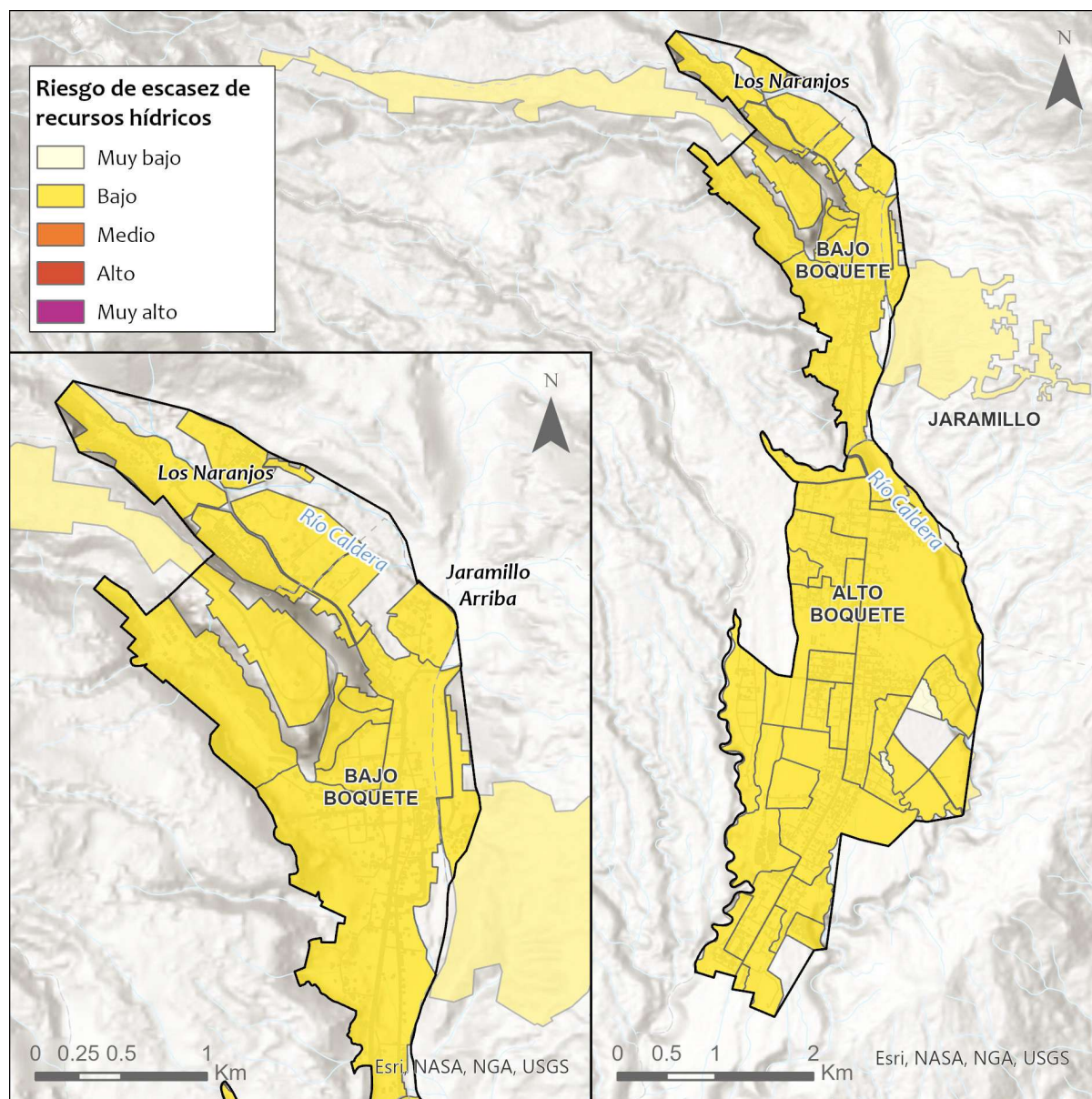


Figura 76. Riesgo por escasez de recursos hídricos en el área de estudio de Boquete para los tres escenarios climáticos analizados: situación actual y horizontes 2030 y 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

En el caso de Dolega (Figura 77), se pueden distinguir dos zonas dentro del análisis, el área poblada en el corregimiento de Dolega Cabecera, que se abastece del río Cochea, y la ubicada en los corregimientos de Los Anastacios y Los Algarrobos, cuya planta de tratamiento también abastece a David y toma agua del río Majagua.

Para la situación actual, analizada con datos históricos, a pesar de que hay cierto déficit en la planta de tratamiento de Los Algarrobos, toda el área de estudio se encuentra en un nivel de riesgo bajo.

En los talleres se concluyó que en la actualidad no hay un problema de recurso hídrico disponible, sino de capacidad de la infraestructura y planteamiento del sistema de distribución. Los Anastacios y Los Algarrobos son áreas en rápido crecimiento que comparten sistema de abastecimiento con un gran núcleo urbano, David, que recibe en torno al 90% del agua que se trata en la planta potabilizadora.

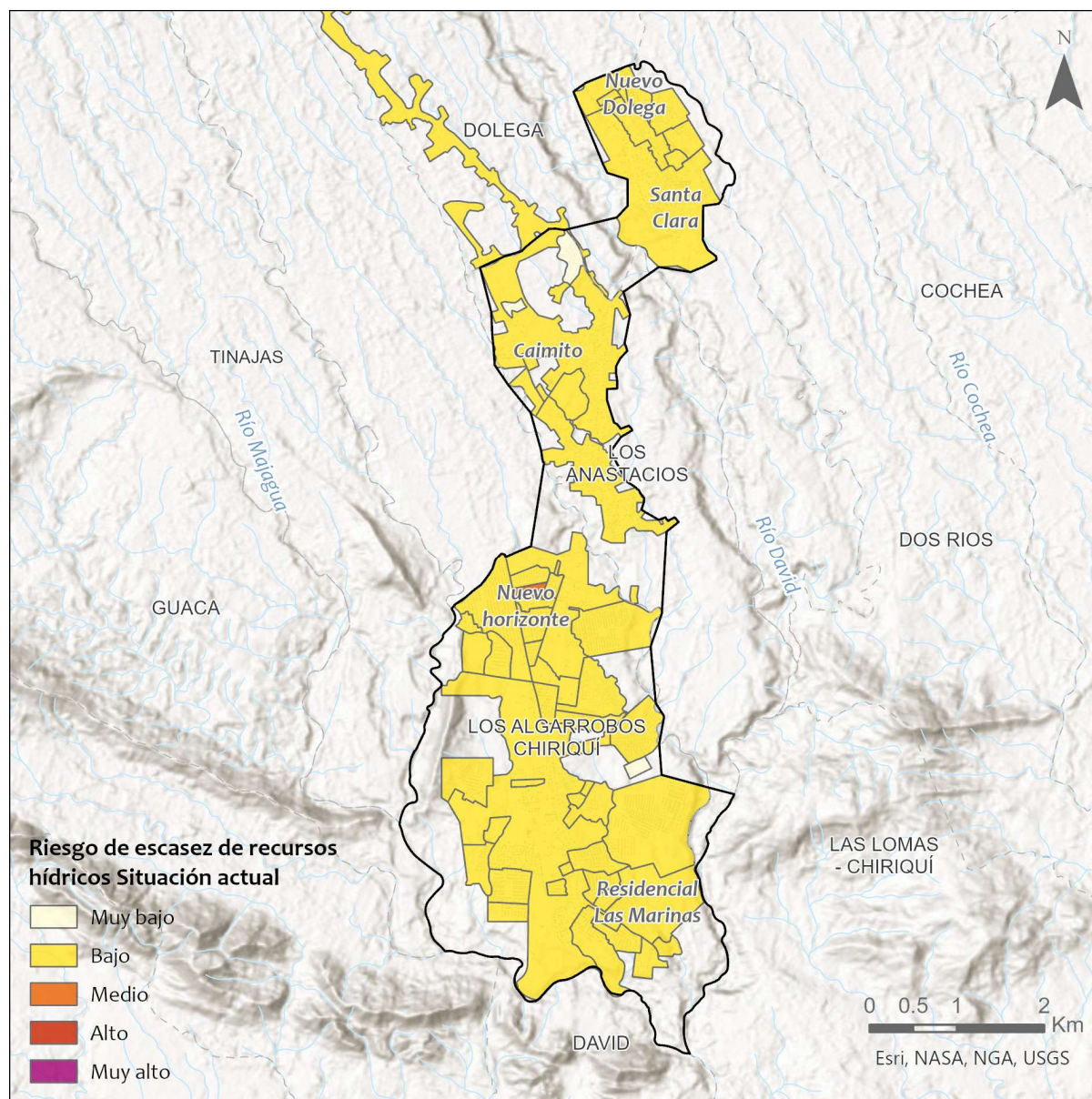


Figura 77. Riesgo por escasez de recursos hídricos en el área de estudio de Dolega para la situación actual.
Fuente: IHCantabria, 2024.

En los escenarios futuros el riesgo en la zona abastecida por la planta de Los Algarrobos va incrementándose progresivamente conforme lo hace el déficit hídrico. La combinación de disminución en las precipitaciones y el ascenso en las temperaturas, reducen la producción de agua superficial en la cuenca disponible para consumo. En el área de Dolega cabecera se mantiene un nivel de riesgo bajo.

Para el horizonte 2030, los corregimientos de Los Algarrobos y Los Anastacios se encuentra en riesgo medio y alto, y para el horizonte 2050, prácticamente todos los barrios en ellos se encuentran en riesgo alto.

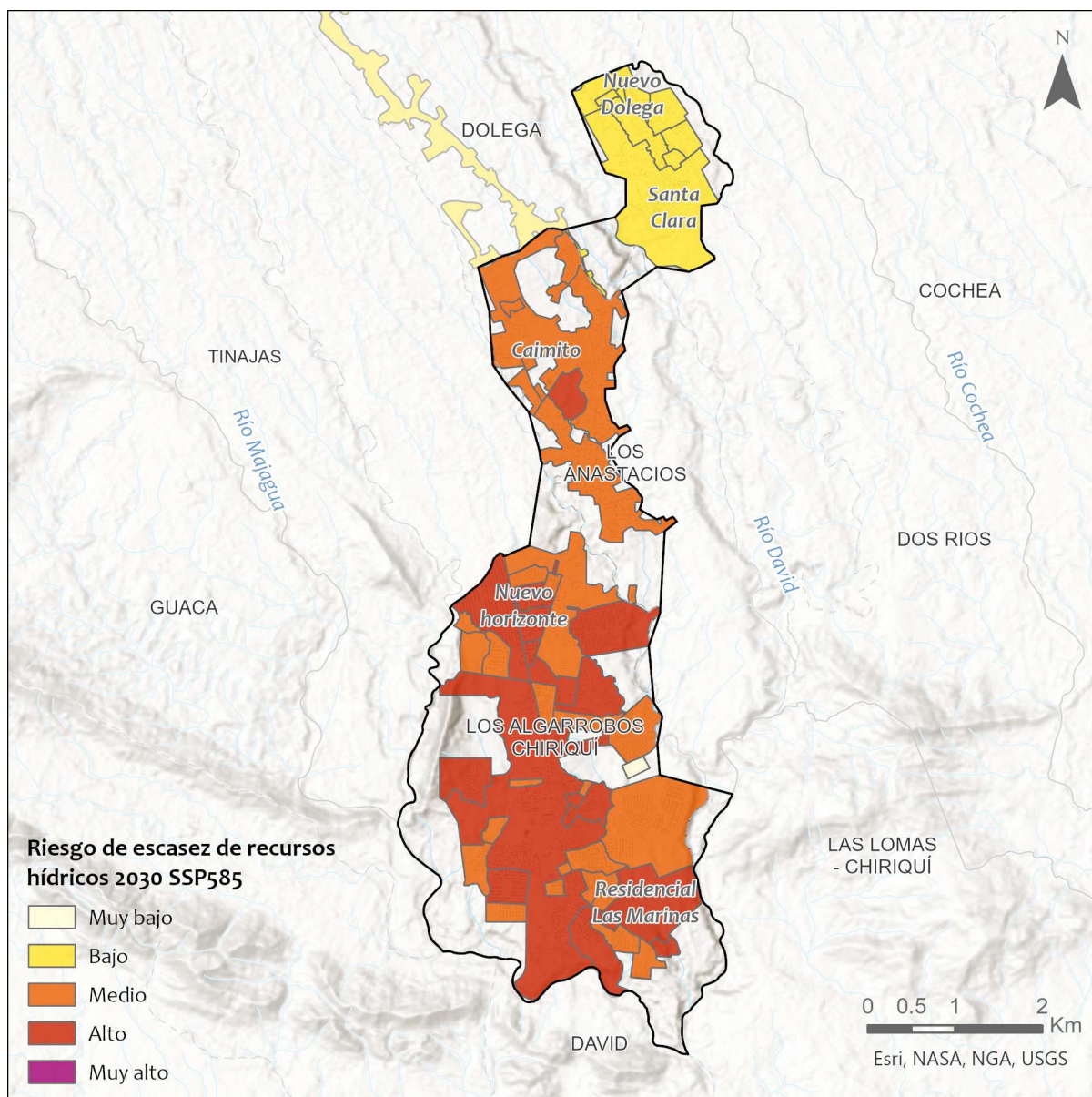


Figura 78. Riesgo por escasez de recursos hídricos en el área de estudio de Dolega para el horizonte 2030 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

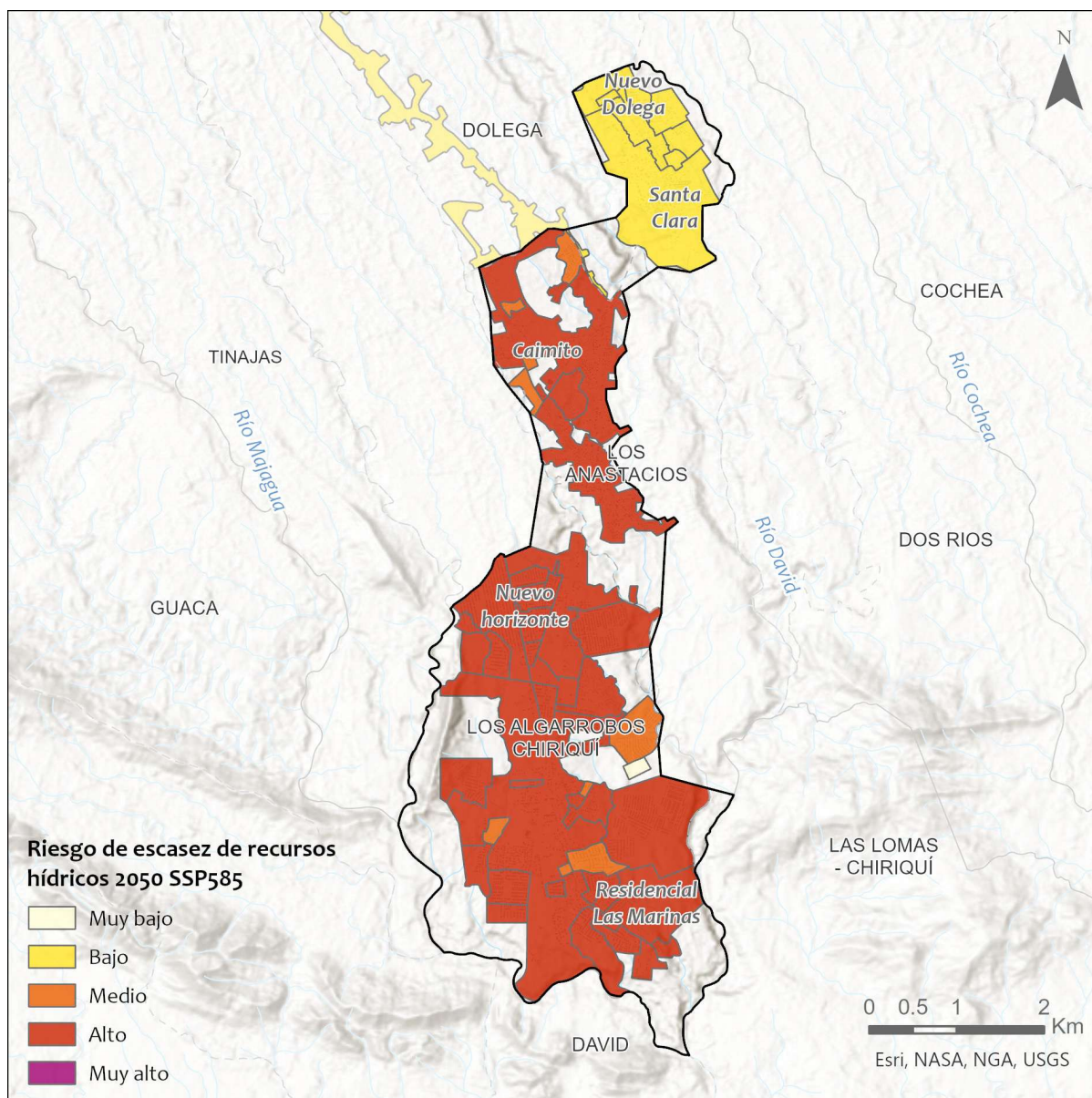


Figura 79. Riesgo por escasez de recursos hídricos en el área de estudio de Dolega para el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

El área de estudio en Gualaca (Figura 80) el análisis de riesgo por escasez de recursos hídricos resulta en un nivel bajo para los tres escenarios analizados, ya que no se produce déficit hídrico en ninguno de ellos. El recurso en el Lago Barrigón es suficiente para abastecer la demanda de la planta de tratamiento, tanto en la situación actual, como en los escenarios futuros con cambio climático.

Según la información recopilada en los talleres, en Gualaca el principal problema es la capacidad de tratamiento de la planta, que no se adecua a las necesidades de la población a la que abastece. La planta, que es gestionada en gran medida por la Junta Comunal, no dispone de los medios para poder dar un servicio continuo, especialmente en verano cuando el consumo se incrementa.

Además de la falta de capacidad de la red, también se dan, en época de lluvias, problemas de sedimentación en la toma que capta el agua del Lago Barrigón y en la planta. En 2020 la planta sufrió daños por la entrada de sedimentos en el sistema por la toma de agua que tardaron 2 años en reparar.

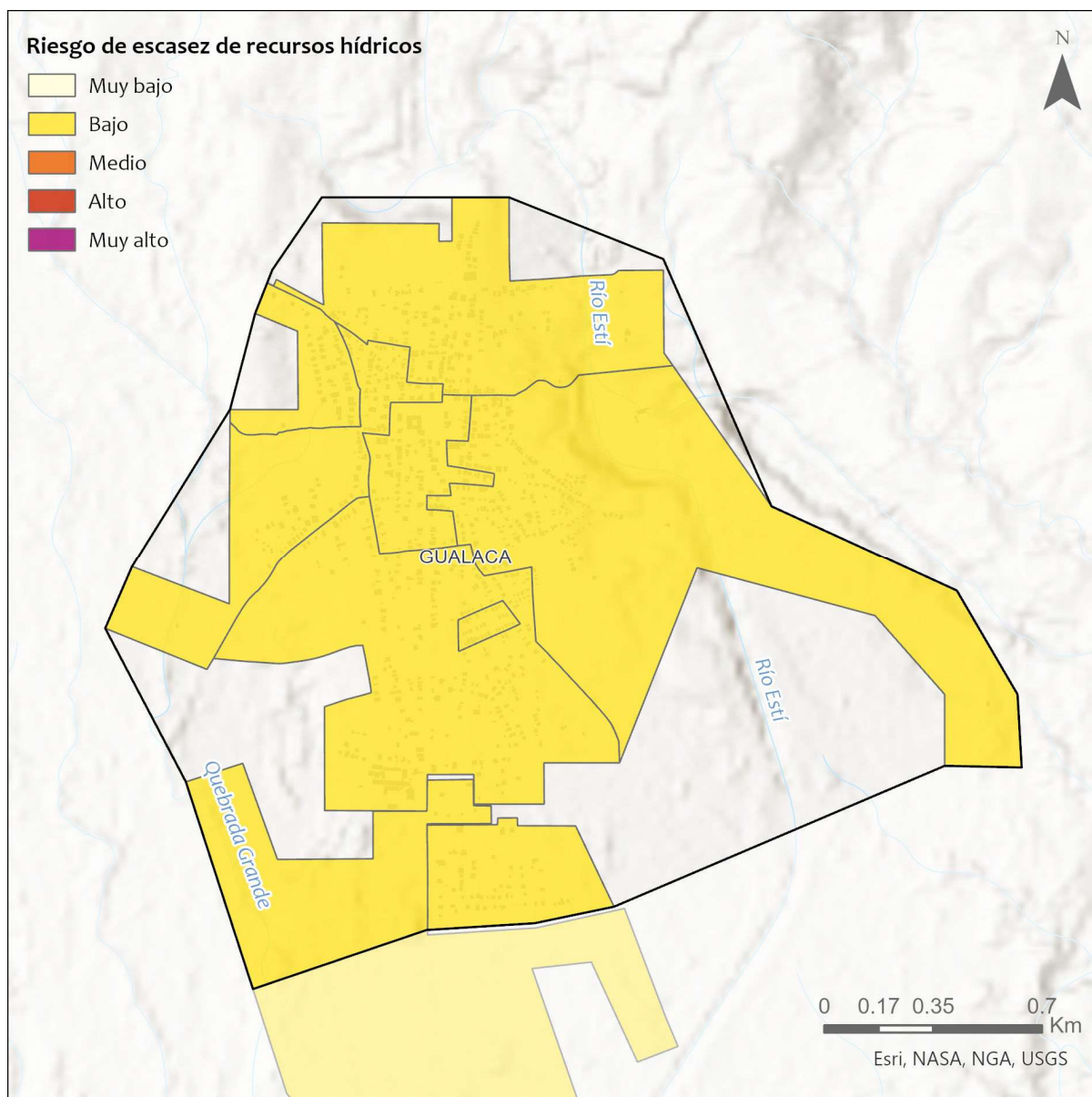


Figura 80. Riesgo por escasez de recursos hídricos en el área de estudio de Gualaca para los tres escenarios climáticos analizados: situación actual y horizontes 2030 y 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

9. ESTUDIO DE RIESGO POR INUNDACIÓN FLUVIAL

El objetivo principal del presente estudio es conocer cómo afecta la inundación a las edificaciones, infraestructuras críticas y población del área de estudio, el área urbana del distrito de Chiriquí, para lo cual se realiza un análisis de dicho riesgo cuantificando las pérdidas económicas a través de la evaluación la amenaza de inundación, así como la exposición y vulnerabilidad (física y social) tanto para un escenario climático basado en datos históricos (situación actual), como para dos escenarios climáticos futuros en los horizontes 2030 y 2050, en el que se considera la influencia del cambio climático en la trayectoria socioeconómica y de emisiones SSP5-8.5.

En este caso la única área de estudio definido en el distrito de Chiriquí afectado por inundación fluvial es el área urbana de Boquete, por lo que el estudio se centrará en esta zona.

Para la consecución de este objetivo general se establecen, a su vez, los siguientes objetivos específicos:

- Calcular la amenaza de inundación y las variables que le caracterizan: profundidad de la lámina de agua en las zonas de afectación.
- Conocer y analizar la exposición de los elementos físicos urbanos (edificaciones e infraestructuras críticas) y de la población a la amenaza de inundación.
- Analizar la vulnerabilidad de los diferentes tipos de elementos (físicos y humanos) obteniendo sus curvas de daño.
- Calcular los distintos indicadores económicos y sociales que caractericen el riesgo en el área de estudio.

Para llevar a cabo dicho estudio se cuenta con la información digital recopilada de diversas fuentes de información espacial, gráfica y alfanumérica que se presentan en el apartado 6.

9.1. Marco metodológico

Siguiendo un marco conceptual ampliamente aceptado, el **riesgo** resulta de la coincidencia, en el tiempo y en el espacio, de una amenaza y un ente (ser vivo o cualquier elemento físico o intangible del territorio) susceptible de experimentar una pérdida de valor, funcionalidad o bienestar, como consecuencia de esa amenaza. La **exposición** es la cualidad binaria que refleja esta coincidencia, mientras que la **vulnerabilidad** recoge todos los factores que explican la conversión de la amenaza en daños. La vulnerabilidad es, en definitiva, la caracterización de ciertas propiedades de los elementos expuestos, desde el punto de vista de su potencial de ser afectados o destruidos, y puede tener varias dimensiones: humana (daño físico o psicológico, muerte), económica (pérdida de valor de activos), o de otro tipo (por ejemplo, daños ambientales o de patrimonio) (BID, 2019).

Este esquema se resume en la pseudoecuación **Riesgo = Amenaza x Exposición x Vulnerabilidad** (Figura 81), que indica que el impacto total que puede producir un evento tiene una probabilidad asociada que resulta de combinar la probabilidad de dicho evento, la probabilidad de que afecte espacialmente zonas ocupadas y, finalmente, la de que los activos y personas expuestos sufran daños (BID, 2019).

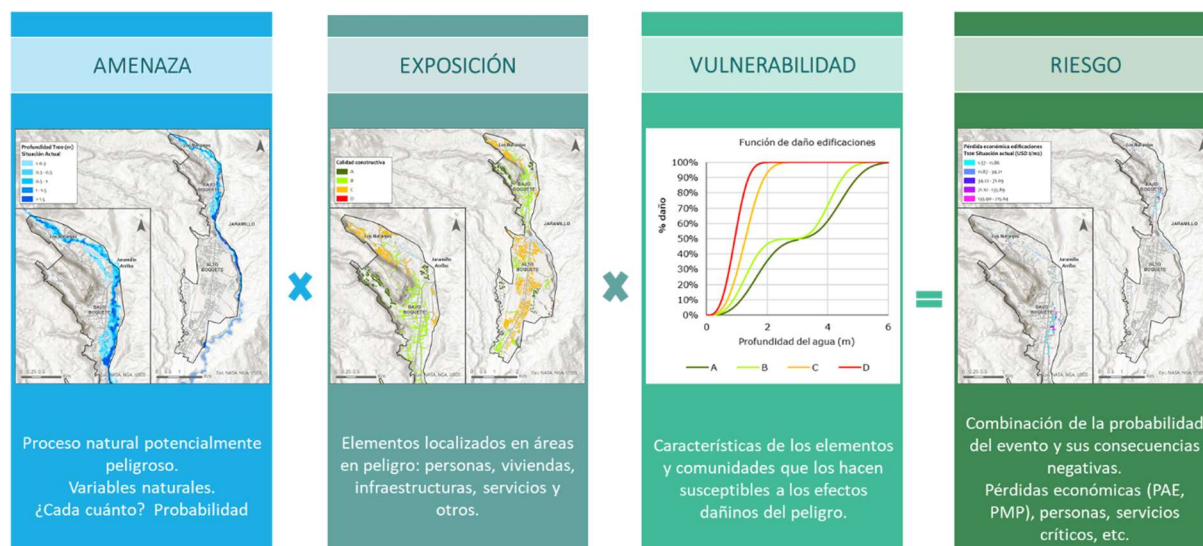


Figura 81. Esquema amenaza-exposición-vulnerabilidad-riesgo. Fuente: IHCantabria, 2024.

9.2. Enfoque técnico

Una evaluación probabilística de riesgo busca estimar la distribución de pérdidas (económicas y humanas) que se puede esperar que ocurran con una cierta recurrencia temporal en una cartera determinada de activos o población que está expuesto a una o más peligros. El procedimiento consiste básicamente en crear un conjunto de todos los posibles eventos que podrían ocurrir en un área de estudio, en este caso eventos de inundación, que afectan la cartera de activos expuestos para evaluar las pérdidas debidas a cada evento, y luego agregar estas pérdidas (utilizando la tasa de ocurrencia de cada evento como factor de ponderación) para obtener la distribución completa de las pérdidas esperadas con su correspondiente tasa de excedencia. Las medidas de riesgo más comunes que se pueden obtener de este menú son la pérdida anual esperada (PAE) y las pérdidas máximas probables (PMP) (BID, 2019).

9.3. Caracterización de la amenaza

La metodología para caracterización de la amenaza en este estudio se basa en la realizada en el Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Generación del Atlas Interactivo de Visualización de los Resultados para la República de Panamá, desarrollada por IHCantabria para Banco Interamericano para el Desarrollo (BID), del que también se obtienen datos climáticos, topográficos, etc., necesarios para la realización del modelo hidráulico de la inundación, adaptado al área de estudio.

9.3.1. Selección del área de estudio y delimitación de las cuencas vertientes

Para el estudio de las inundaciones, la cuenca vertiente al área de estudio es la cuenca hidrográfica 108, Cuenca del río Chiriquí (Figura 82), con un área aproximada de 1925 km². Los principales cauces que atraviesan las áreas urbanas y, por tanto, en los eventos de precipitación extrema podrían provocar inundaciones a su paso son los ríos Caldera, Estí, David y Majagua. En este caso el único de ellos que causa daños en el área poblada es el río Caldera a su paso por Boquete.

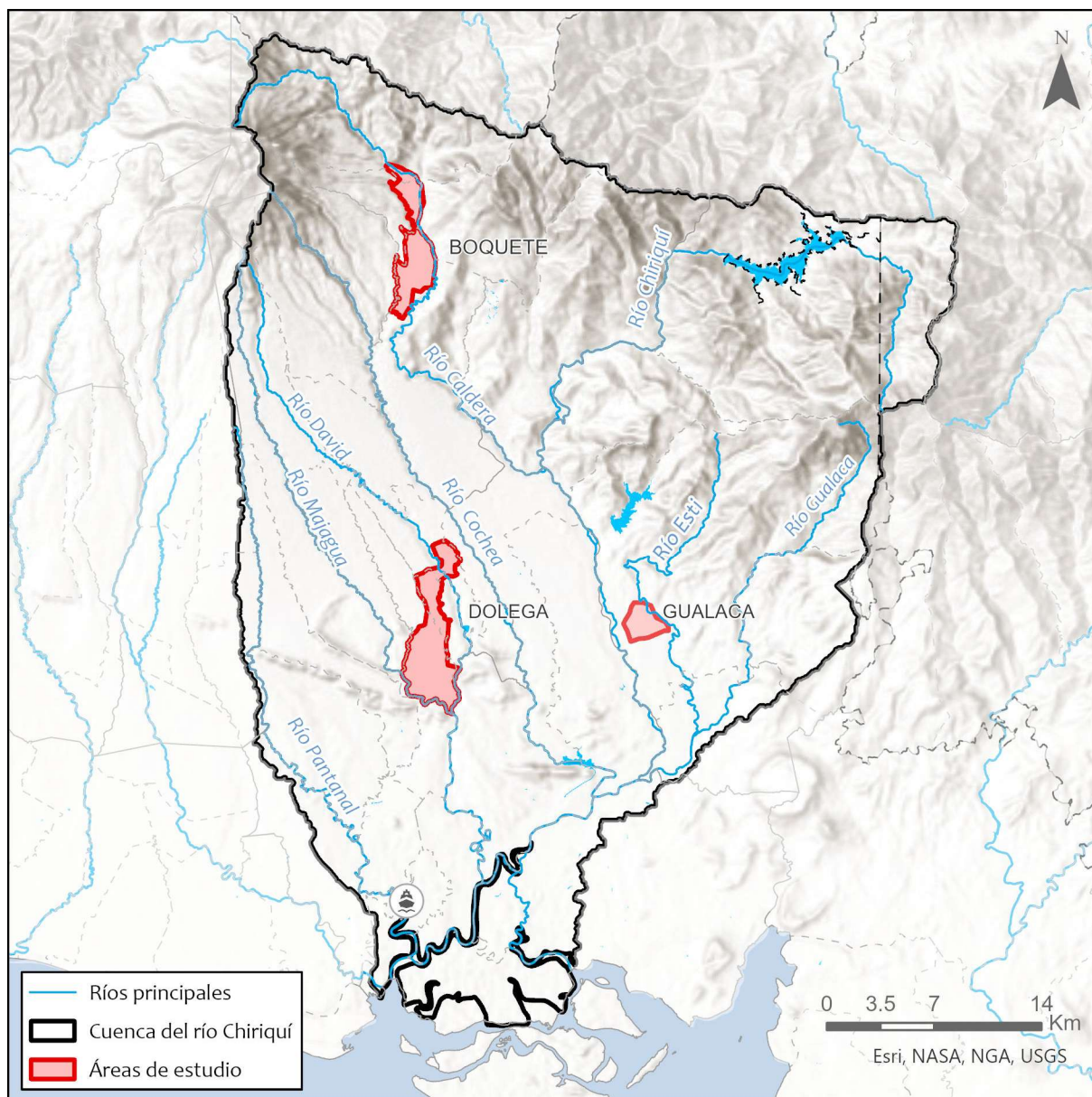


Figura 82. Cuenca vertientes al área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.

9.3.2. Modelado hidráulico de la inundación

Se propone elaborar un mapa de amenaza de inundación de forma aproximada, empleando la información generada en cuanto a caudales fluviales (ver apartado previo de riesgos de escasez de recursos hídricos), combinada con la mejor topografía a escala de país disponible para este fin (generalmente una combinación de ASTER, Alos-Palsar y STRM), con al menos 30 m de resolución. Para ello se aplica el modelo SFINCS (Super-Fast Inundation of CoastS) desarrollado por Deltares. SFINCS es un modelo de complejidad reducida capaz de simular inundaciones compuestas incluyendo procesos fluviales, pluviales, de marea, de viento y de olas con una alta eficiencia computacional equilibrada con una precisión adecuada. En SFINCS se resuelve un conjunto de ecuaciones de momento y continuidad con un esquema explícito de primer orden. Este el modelo es muy apropiado para modelar un gran conjunto de escenarios estocásticos, ejecutar el mismo modelo en una resolución más alta o modelar escalas más grandes, como es el caso de la metodología propuesta.

A continuación, se describen brevemente los pasos que se han seguido para la implementación del modelo hidráulico SFINCS para la obtención de los mapas de inundación.

Caracterización de la topografía y malla de cálculo

El primer paso en el cálculo hidráulico bidimensional exige la correcta caracterización geométrica de la zona de estudio. Esto se consigue mediante la definición de una serie de elementos triangulares o rectangulares, que conforman la malla de cálculo. Esta malla debe tener una precisión suficiente para una adecuada definición de la zona de estudio y una correcta representación de las condiciones del flujo. En este sentido hay que hacer referencia, en primer lugar, a la información topográfica, que es básica para la realización del estudio y el análisis del comportamiento hidráulico.

En este caso, se ha utilizado el DEM STRM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de la NASA de 30 m de resolución (Figura 83) y, a partir del mismo se ha generado con el modelo una malla numérica reticular de las cuencas vertientes al área de estudio, para realizar el cálculo bidimensional del área de estudio.

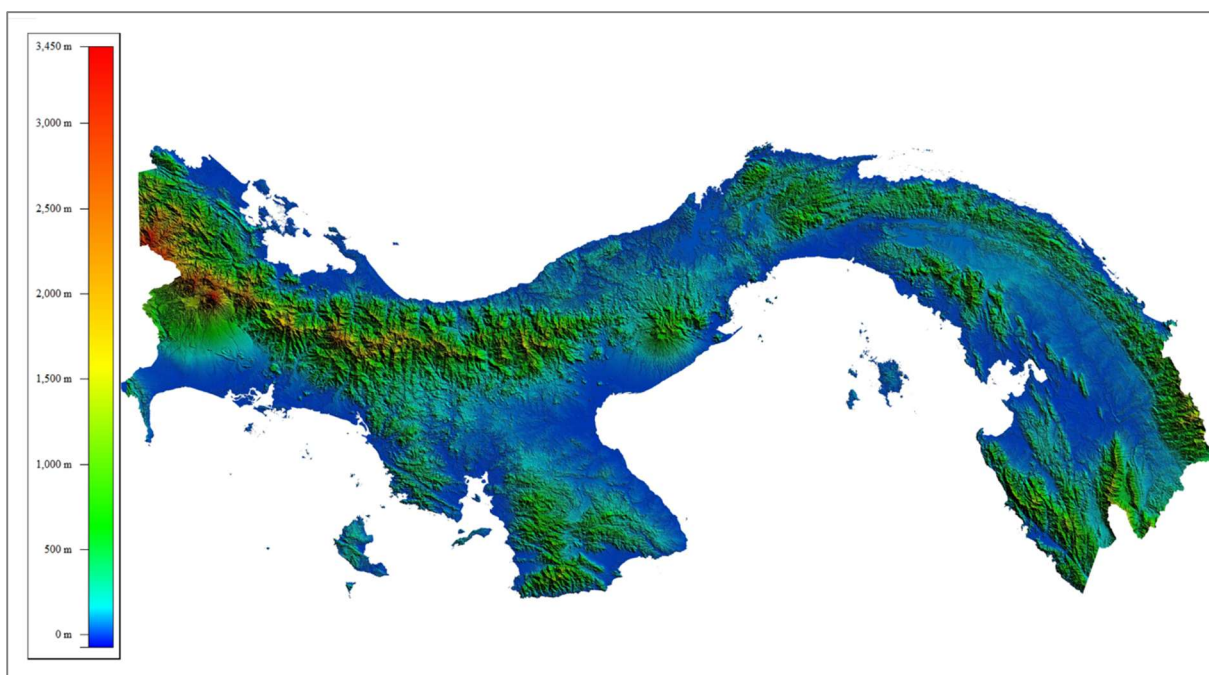


Figura 83. DEM STRM (30x30m). Fuente: IHCantabria, 2024.

Puntos de entrada al modelo e hidrogramas de cálculo

Para la caracterización de la amenaza de inundación se han seleccionado 17 puntos de entrada de caudales (inflows) definidos a partir de la red hidrográfica y la división en subcuencas teniendo en cuenta los principales ríos del área de estudio (Figura 84).

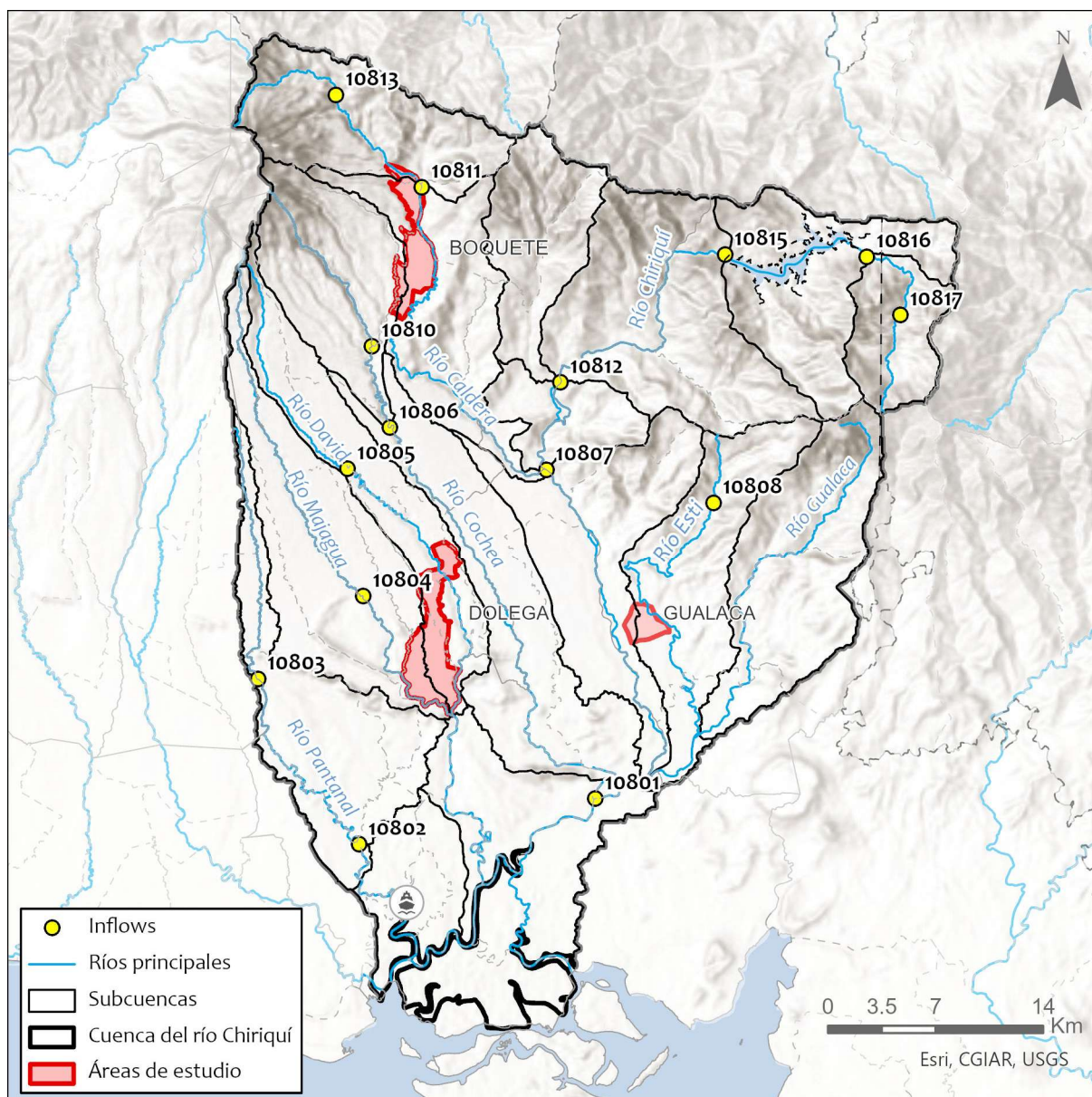


Figura 84. Puntos de entrada de caudales en el modelo hidráulico. Fuente: IHCantabria, 2024.

Una vez seleccionados los puntos de entrada al modelo, se han extraído los caudales máximos para los periodos de retorno de 10, 50 y 100 años, a partir de los resultados del modelado hidrológico (ver apartado 8.2.1).

Los caudales pico obtenidos para los tres escenarios climáticos analizados se recogen en la Tabla 18. En la Figura 85 se pueden apreciar las variaciones que se producen en los caudales pico para los eventos de 100 años de periodo de retorno en los escenarios con cambio climático.

El caudal que se producen en los dos puntos localizados aguas arriba de Boquete (10813 y 10811) crece en el escenario de cambio climático a 2030, respecto de la situación actual. Sin embargo, para el horizonte 2050 estos descienden, respecto de los obtenidos en el horizonte 2030, llegando a ser el que se produce en el punto 10811 algo menor que el obtenido en la situación actual.

ID Subcuenca	Caudal pico (m ³ /s)								
	Situación actual			2030 SSP585			2050 SSP585		
	T10	T50	T100	T10	T50	T100	T10	T50	T100
10801	322.02	452.41	509.70	341.83	480.25	541.06	315.52	443.28	499.41
10802	116.39	163.52	184.22	131.76	185.12	208.56	123.89	174.06	196.10
10803	205.56	288.79	325.36	224.95	316.03	356.05	198.54	278.94	314.26
10804	289.73	407.04	458.59	327.44	460.02	518.27	277.56	389.95	439.33
10805	186.48	261.99	295.17	217.77	305.94	344.68	182.43	256.30	288.76
10806	225.65	317.02	357.17	319.28	448.56	505.36	282.00	396.19	446.36
10807	238.14	334.57	376.94	276.89	389.01	438.27	241.12	338.75	381.65
10808	370.99	521.21	587.21	440.32	618.61	696.95	386.18	542.55	611.25
10810	135.77	190.75	214.91	156.40	219.73	247.56	126.44	177.63	200.13
10811	127.87	179.65	202.40	174.92	245.75	276.87	119.57	167.98	189.25
10812	135.21	189.96	214.02	196.10	275.50	310.39	150.76	211.80	238.62
10813	155.72	218.78	246.48	204.70	287.58	324.00	182.37	256.22	288.67
10815	238.82	335.52	378.01	303.23	426.01	479.95	253.53	356.19	401.30
10816	146.42	205.71	231.76	194.72	273.56	308.21	159.84	224.55	252.99
10817	65.28	91.71	103.33	88.33	124.10	139.81	73.62	103.43	116.52

Tabla 16. Caudales pico en los puntos de entrada de caudal en el modelo hidráulico. Fuente: IHCantabria, 2024.

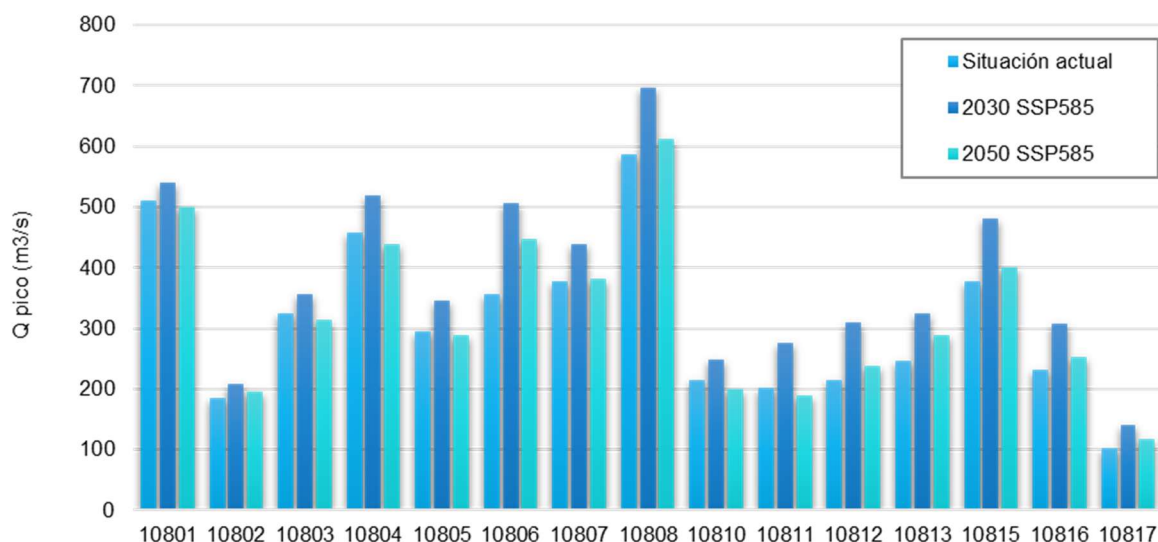


Figura 85. Caudales pico en los puntos de entrada de caudal en el modelo hidráulico para los eventos de periodo de retorno de 100 años en los diferentes escenarios climáticos. Fuente: IHCantabria, 2024.

A partir de los caudales pico se han generado hidrogramas de cálculo aplicando la siguiente formulación en función del caudal y el tiempo al pico.

$$Q(t) = \alpha \cdot Q_p + 54.64 \cdot Q_p \cdot (1 - \alpha) \left(\frac{t}{T_p}\right)^4 \cdot \exp[-4 \cdot (t/T_p)]$$

En la Figura 86 se presentan los hidrogramas de cálculo para el evento de 100 años de periodo de retorno en el escenario climático actual.

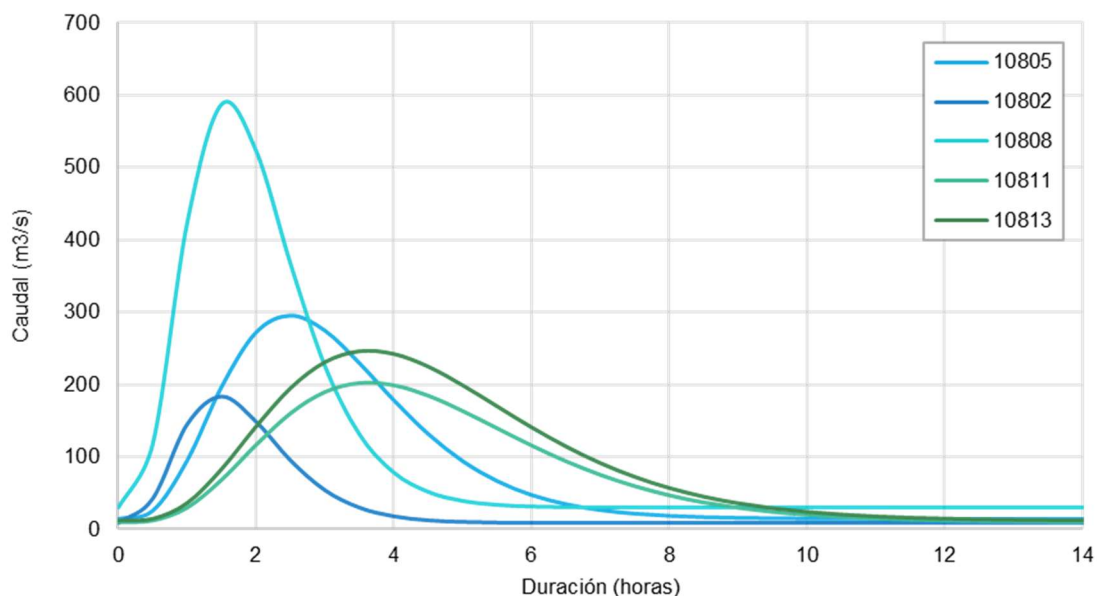


Figura 86. Hietogramas de cálculo en las cuencas vertientes al área de estudio para el evento de 100 años de periodo de retorno en situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

Caracterización física del área de estudio

Para la caracterización de los diferentes elementos de la malla desde el punto de vista hidráulico, es necesario determinar un valor del coeficiente de rugosidad de Manning para cada tipología de uso del suelo. En la Tabla 17 se recogen los valores del coeficiente de rugosidad de Manning considerados para los diferentes usos del mapa de cobertura y usos del suelo 2021 proporcionado por MiAMBIENTE.

Tipo	Rugosidad (Coef. Manning)	Tipo	Rugosidad (Coef. Manning)
Afloramiento rocoso y tierra desnuda	0.040	Explotación minera	0.035
Albinas	0.040	Horticultura mixta	0.040
Área heterogénea de producción agropecuaria	0.040	Infraestructura	0.075
Área poblada	0.075	Maíz	0.040
Arroz	0.040	Otro cultivo anual	0.040
Bosque de cativo	0.065	Otro cultivo permanente	0.040
Bosque de mangle	0.065	Palma aceitera	0.045
Bosque de orey	0.065	Pasto	0.040
Bosque de rafia	0.065	Piña	0.060
Bosque latifoliado mixto maduro	0.065	Plátano/banano	0.040
Bosque latifoliado mixto secundario	0.065	Playa y arenal natural	0.030
Bosque plantado de coníferas	0.065	Rastrojo y vegetación arbustiva	0.055
Bosque plantado de latifoliadas	0.065	Salinera	0.000
Café	0.040	Superficie de agua	0.000
Caña de azúcar	0.040	Vegetación baja inundable	0.035
Cítrico	0.040	Vegetación herbácea	0.055
Estanque para acuicultura	0.000		

Tabla 17. Coeficientes de rugosidad de Manning para diferentes usos del suelo y vegetación. Fuente: IHCantabria, 2024, con información de MiAMBIENTE, 2021.

Calibración del modelo hidráulico

Para calibrar un modelo de este tipo, basado en la elevación sobre el cauce situado a la mínima distancia, es conveniente usar datos de eventos reales, y para ello se propone emplear la información sobre áreas y puntos de inundación de viviendas reportadas proporcionadas por SINAPORC (p. ej. Figura 87), así como los resultados del proyecto *Global Surface Water Explorer* (Pekel, et al., 2016) una iniciativa del *European Commission's Joint Research Centre, UN Environment* y Google, basado en imágenes Landsat de los últimos 38 años (frecuencia máxima en torno a 4 imágenes por mes, con 30 m de resolución). Se ha comprobado en el Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Generación del Atlas Interactivo de Visualización de los Resultados para la República de Panamá (IHCantabria, 2024) que para el país las imágenes de *Landsat* tienen una buena disponibilidad, lo que hace que los resultados de este proyecto sean útiles y puedan servir para calibrar los resultados obtenidos.

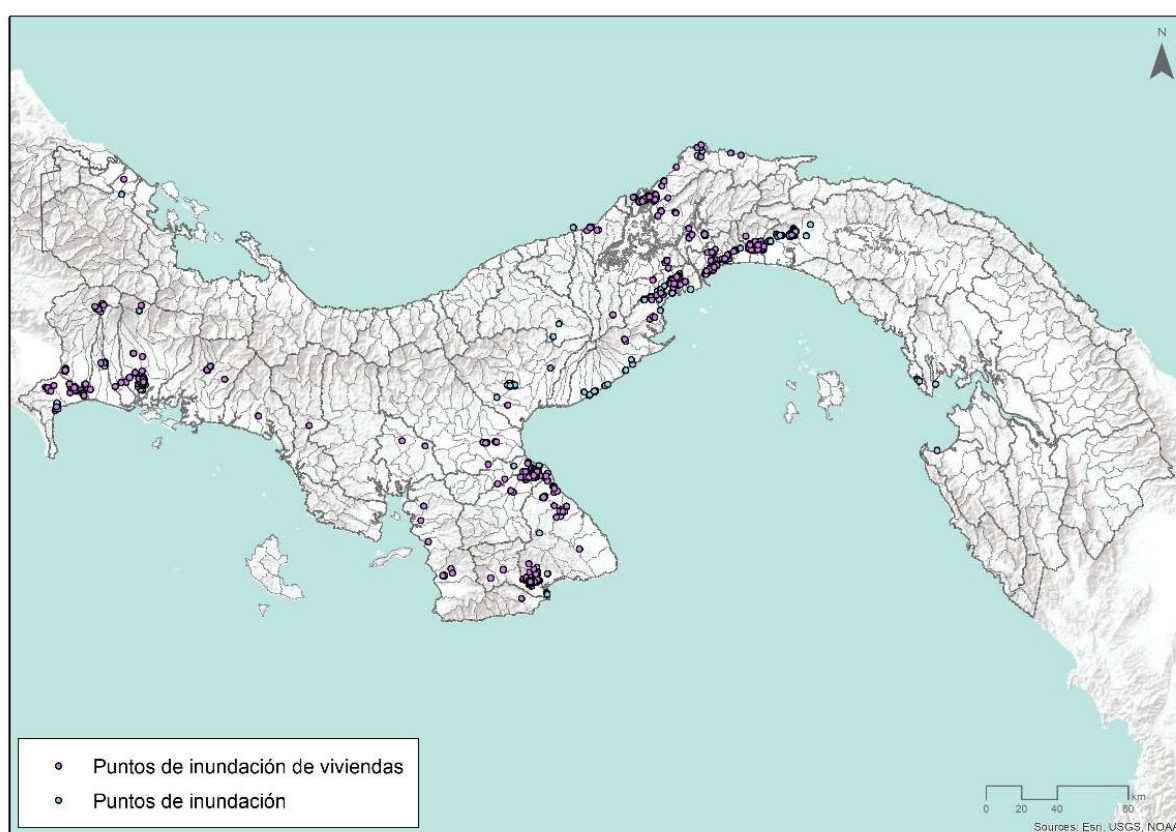


Figura 87. Puntos de inundación de viviendas reportadas. Fuente: IHCantabria, 2024, con información proporcionada por SINAPROC, 2023.

9.3.3. Resultados de la caracterización de la amenaza

Como resultado de este estudio, se obtienen mapas de zonas inundables, caracterizadas por la profundidad de la lámina de agua, para cada uno de los eventos de 10, 50 y 100 años de periodo de retorno y escenarios climáticos analizados: situación actual, y SSP5-8.5 en los horizontes 2030 y 2050.

A modo de ejemplo, de la Figura 88 a la Figura 90 se muestran los mapas de máxima profundidad de agua obtenidos para el evento de 100 años de periodo de retorno en el área de estudio para los tres escenarios climáticos analizados. Todas las capas que recogen los resultados para cada periodo de retorno y escenario climático se adjuntan a este informe en base de datos GIS (Geodatabase).

Se puede observar en los mapas que las zonas más afectadas por la inundación se localizan en la zona de Los Naranjos y Bajo Boquete, donde el río desborda a su paso por el área urbana.

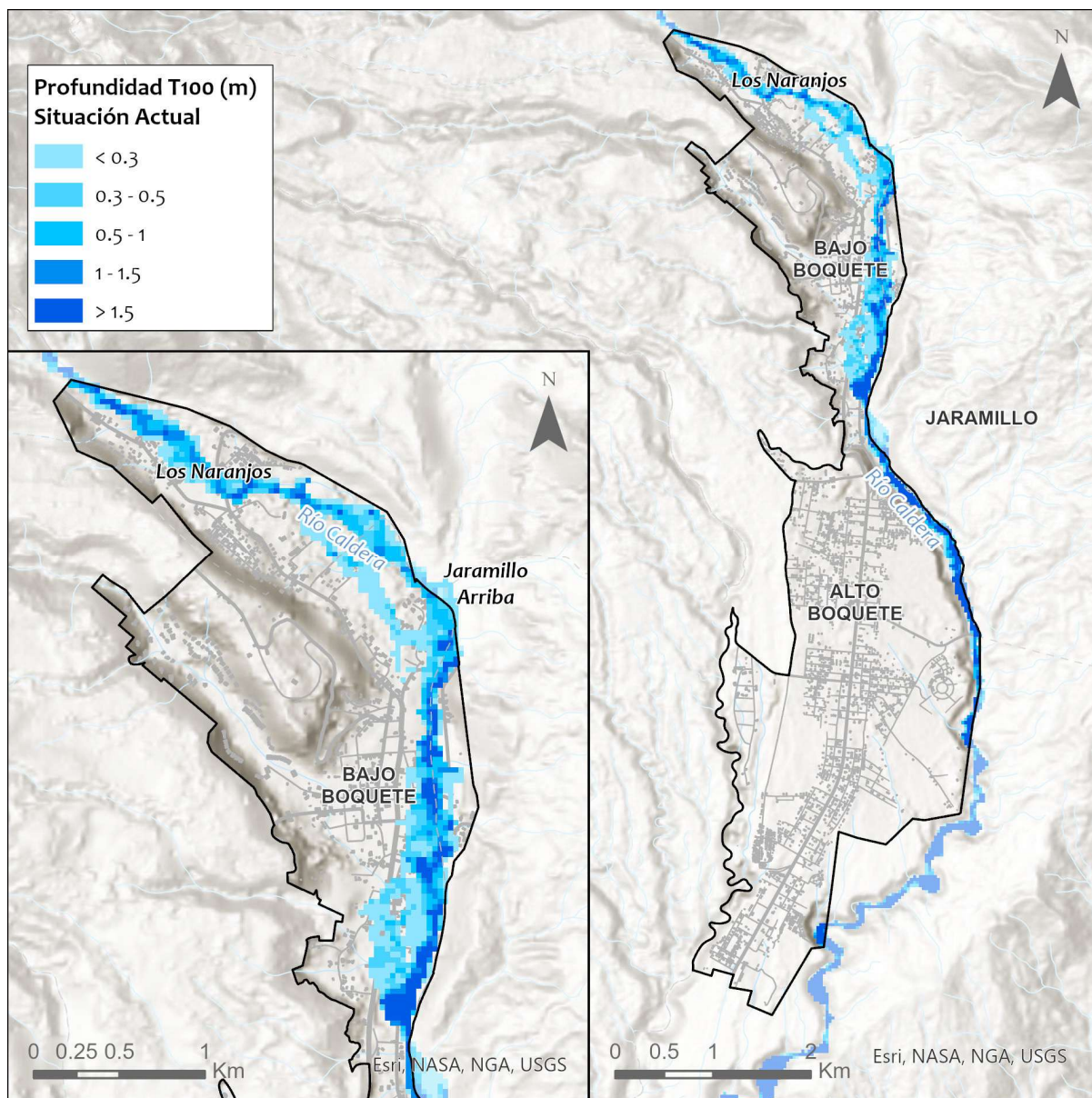


Figura 88. Mapa de profundidad de la lámina de agua para el evento de 100 años de periodo de retorno en la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

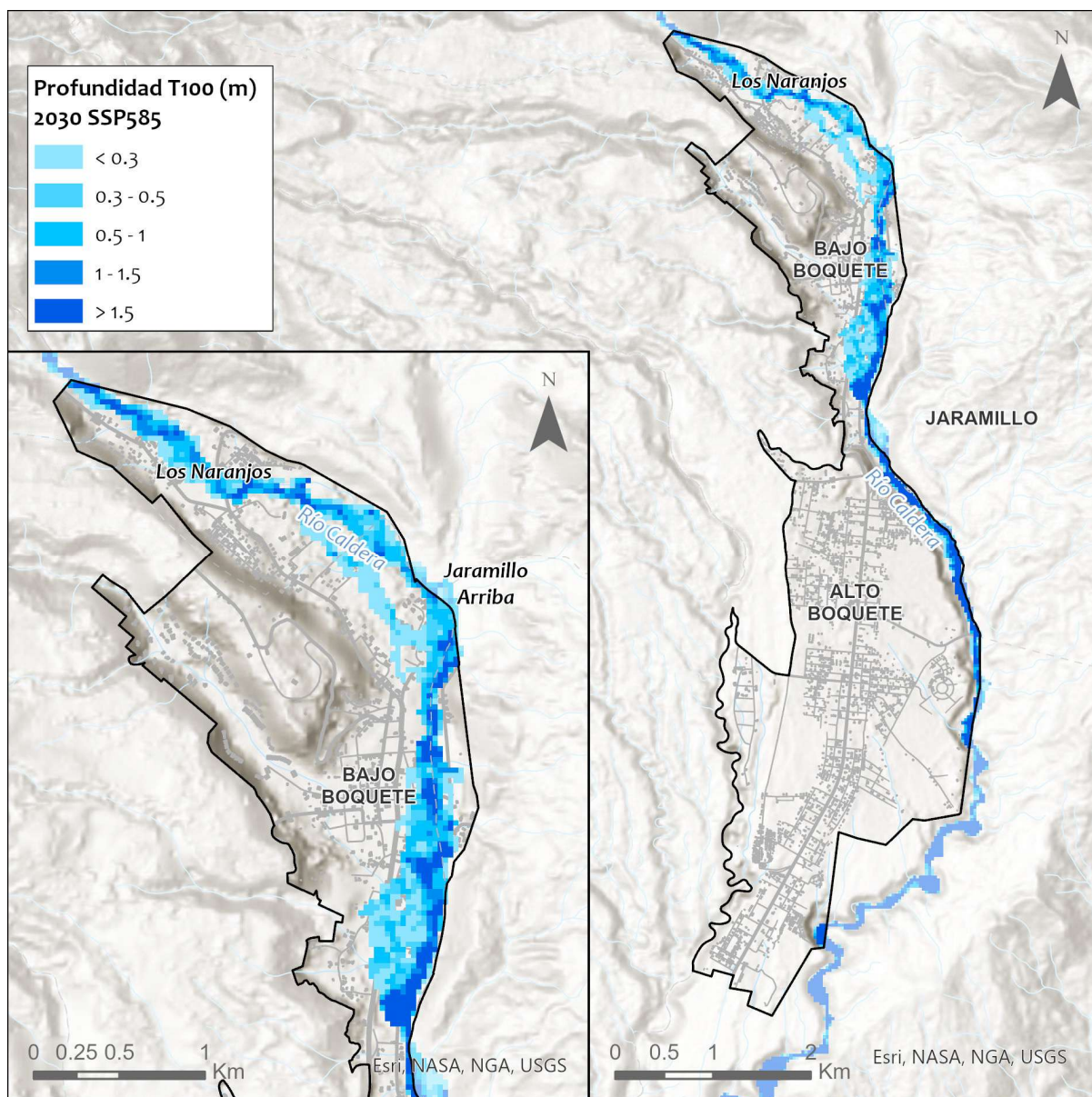


Figura 89. Mapa de profundidad de la lámina de agua para el evento de 100 años de periodo de retorno en el horizonte 2030 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

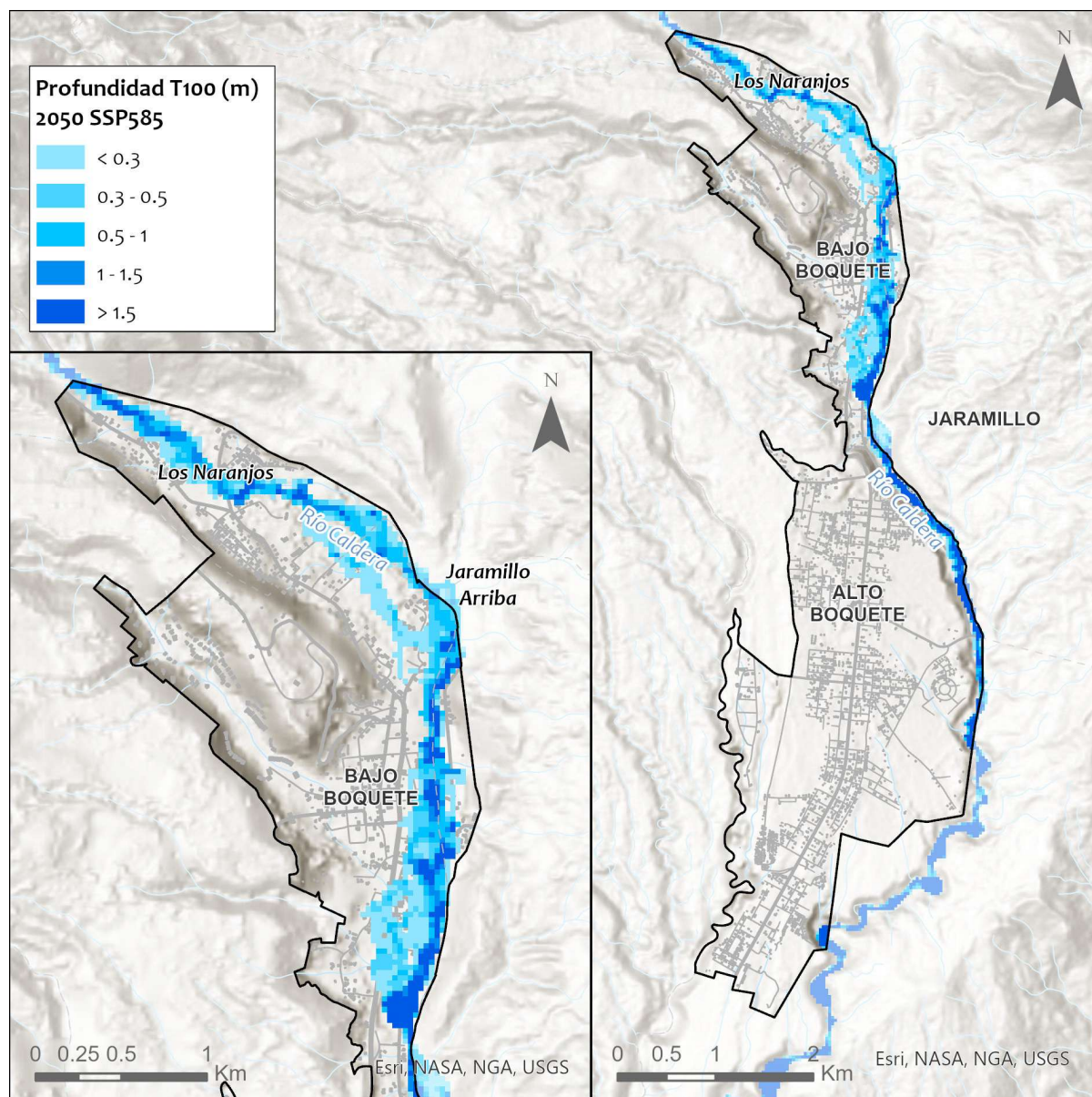


Figura 90. Mapa de profundidad de la lámina de agua para el evento de 100 años de periodo de retorno en el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

9.4. Caracterización de la exposición

La evaluación de la exposición engloba la identificación y caracterización de los elementos expuestos. Para ello, se desarrollará un inventario de activos expuestos donde se recopilen todos los activos físicos (edificaciones e infraestructuras críticas²) y los activos sociales (población).

Para llevar a cabo el análisis de la exposición a inundaciones se establece un umbral mínimo de profundidad de agua a partir del cual se considera que puede existir algún tipo de afectación. Este análisis se realiza en dos dimensiones, física y social, orientadas a la posterior evaluación de impactos/daños económicos y sociales respectivamente:

² Infraestructuras públicas cuya afectación supone un trastorno para el funcionamiento del sistema urbano (edificios destinados a ofrecer atención y asistencia médica, centros comerciales, escuelas y universidades, infraestructuras destinadas a la producción de energía, infraestructuras industriales, edificios ocupados por los servicios de policía, los bomberos y el ejército, centros de transporte y las principales vías de comunicación, etc.).

- Dimensión física: se analizan los elementos físicos urbanos (edificaciones e infraestructuras críticas) sobre los que se determinarán los impactos económicos.
- Dimensión social: referida a la población, sobre la que se evaluarán los impactos sociales relacionados con la pérdida y afectación de vidas humanas.

En este contexto, la evaluación de la exposición engloba la identificación y caracterización de los elementos expuestos para ambas dimensiones como paso previo a la caracterización de la exposición. Para ello, se ha desarrollado un inventario de activos (elementos existentes en el área de estudio) que incluye todos los activos físicos (edificaciones e infraestructuras críticas) y los activos sociales (población) que forman parte del área urbana de Boquete caracterizándolos a través de sus condiciones físicas, sus sectores de uso y su valor económico de forma que permita determinar su vulnerabilidad frente a la amenaza estudiada. Esta información sobre exposición constituye, por tanto, una parte fundamental de los modelos de riesgo.

A continuación, se desarrollan en sendos subcapítulos la exposición física y la exposición social siguiendo el esquema antes mencionado: se procede a inventariar los elementos, se caracterizan los mismos y se presentan los resultados en forma de mapas y tablas. A modo de ejemplo, se muestran los mapas de elementos expuestos para el evento de 100 años de periodo de retorno en el área de estudio. Todas las capas que recogen los resultados para cada periodo de retorno y escenario climático se adjuntan a este informe en base de datos GIS (Geodatabase).

9.4.1. Exposición física

Los activos físicos pueden clasificarse en términos generales en edificaciones e infraestructuras públicas (potencialmente críticas). La exposición es una variable binaria a escala local (sí / no) que se puede agregar a una escala mayor para proporcionar una estimación o representación rápida de los riesgos (económicos y sociales) que se evaluarán más adelante (combinando la amenaza y los datos de vulnerabilidad). La exposición proporciona índices rápidos y claros sobre cuánto y dónde se puede esperar el riesgo, y su reducción (cuando sea posible) es uno de los medios más efectivos para reducir el riesgo.

Tanto para las edificaciones como para las infraestructuras críticas (IC) se ha obtenido el área expuesta, medida como el área total propensa al peligro, y los índices de exposición (proporción del área expuesta frente al área total).

De forma previa al análisis de los resultados de la exposición, se presenta a continuación la caracterización y el inventario de los elementos físicos urbanos presentes en la zona de estudio.

Inventario de edificaciones residenciales

Los impactos de las amenazas afectan a las edificaciones destinadas al uso habitacional o residencial agravando las consecuencias de los impactos en la población debido a la protección que ofrece la vivienda a sus ocupantes. Para conocer de forma precisa los impactos negativos que las inundaciones tienen, se hace necesario contar con un inventario de edificaciones en formato digital con atributos que caractericen cada edificio, sin embargo, no siempre se dispone de este nivel de detalle en la información, siendo más habitual contar con manzanas o parcelas del área en estudio.

Las edificaciones del área de estudio se dividen en diferentes calidades constructivas basadas, en primer lugar, y siempre que se cuente con información, en los materiales de construcción de aquellas,

en el acceso a los servicios básicos, y en cualquier tipo de información que nos permita obtener la clasificación requerida; en segundo lugar, se basa en la relación del nivel socioeconómico de los habitantes de las edificaciones con la calidad constructiva de las mismas que ocupan.

Para el caso que nos ocupa se han utilizado los siguientes insumos:

1. Capa de edificaciones del Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), en la que se incluye la huella de cada edificio y su uso principal, permitiendo en este caso seleccionar las edificaciones de tipo vivienda.
2. Variables del Censo de 2023 que indican a nivel de barrio urbano, o en su defecto, a nivel de lugar poblado, material de las paredes, techos y suelos de las viviendas; acceso a servicios básicos como agua potable, saneamiento y electricidad; e ingresos de los habitantes que los ocupan, lo que permite realizar una clasificación en diferentes categorías de calidad constructiva.
3. Servicios de ortofotos para los barrios urbanos o lugares poblados de un tamaño considerable en los que se pueda localizar dentro de ellos zonas con diferentes categorías constructivas a partir de imágenes satelitales.

Las cuatro categorías de calidad constructiva definidas en el análisis se describen de la siguiente forma:

- Categoría A (alta calidad constructiva)
 - o Asociada a clase socioeconómica alta.
 - o Cuentan con todos los servicios de infraestructura básica: energía eléctrica, agua potable y saneamiento.
 - o Edificaciones con piso, techo y paredes de materiales resistentes y de gran calidad. Presentan estructuras con diseño que siguen normas o estándares constructivos.
 - o Dentro de esta categoría se pueden encontrar tipologías edificatorias unifamiliares y multifamiliares que varían en número de altura.
- Categoría B (media calidad constructiva)
 - o Asociada a clase socioeconómica media.
 - o Cuentan con los siguientes servicios de infraestructura básica: energía eléctrica y agua potable.
 - o Corresponde a esta categoría la vivienda edificada con materiales permanentes, resistentes y acabados de buena calidad.

- Categoría C (limitada calidad constructiva, tipo popular)
 - Asociada a clase socioeconómica de menores recursos.
 - Cuentan con los siguientes servicios de infraestructura básica: energía eléctrica y agua potable.
 - Edificaciones realizadas con materiales de construcción básicos que se traducen en diseños sencillos y de escasa calidad. Se construyen con materiales resistentes en paredes (normalmente bloque), no así en techos y/o cubiertas donde la lámina de zinc es el material comúnmente utilizado.
 - Suele corresponderse con tipologías edificatorias de una o dos alturas. Se encuadran aquí las áreas de uso mixto (residencial mezclado con locales comerciales) de calidad baja.

- Categoría D (muy baja a precaria calidad constructiva)
 - Asociada a clase socioeconómica de escasos recursos y en hábitat precario.
 - Carecen de vías pavimentadas y servicios de infraestructura básica en su mayoría, sobre todo en el caso de asentamientos informales e invasiones.
 - Se caracteriza por presentar materiales frágiles y de desecho en muros y/o techos y piso de tierra. Siempre producto de la autoconstrucción.

Como arrojan los datos del siguiente gráfico, la calidad constructiva que más superficie ocupa en el área de estudio es la de tipo popular (C), concentrando en torno al 66% de la población del área edificada dedicada a uso residencial. Le sigue la calidad constructiva media (B) con un 29% de la población del área de estudio. Las categorías alta (A) y precaria (D) son las menos abundantes en lo que respecta al área que ocupan dentro del ámbito de estudio concentrando un 4.8 y un 0.3% de la población y un 14 y un 0.2% del área residencial edificada respectivamente.

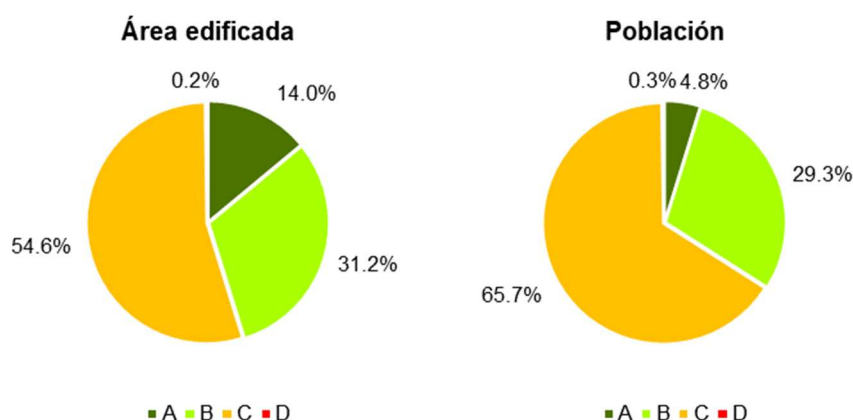


Figura 91. Distribución de la superficie edificada y la población según categorías de calidad constructiva. Fuente: IHCantabria, 2024.

Calidad constructiva	Área (ha)	%	Población	%
A	7.87	14.0	437	4.8
B	17.53	31.2	2684	29.3
C	30.68	54.6	6024	65.7
D	0.12	0.2	24	0.3
Total	56	100	9169	100

Tabla 18. Distribución de área y población según categoría de calidad constructiva de las edificaciones. Fuente: IHCantabria, 2024.

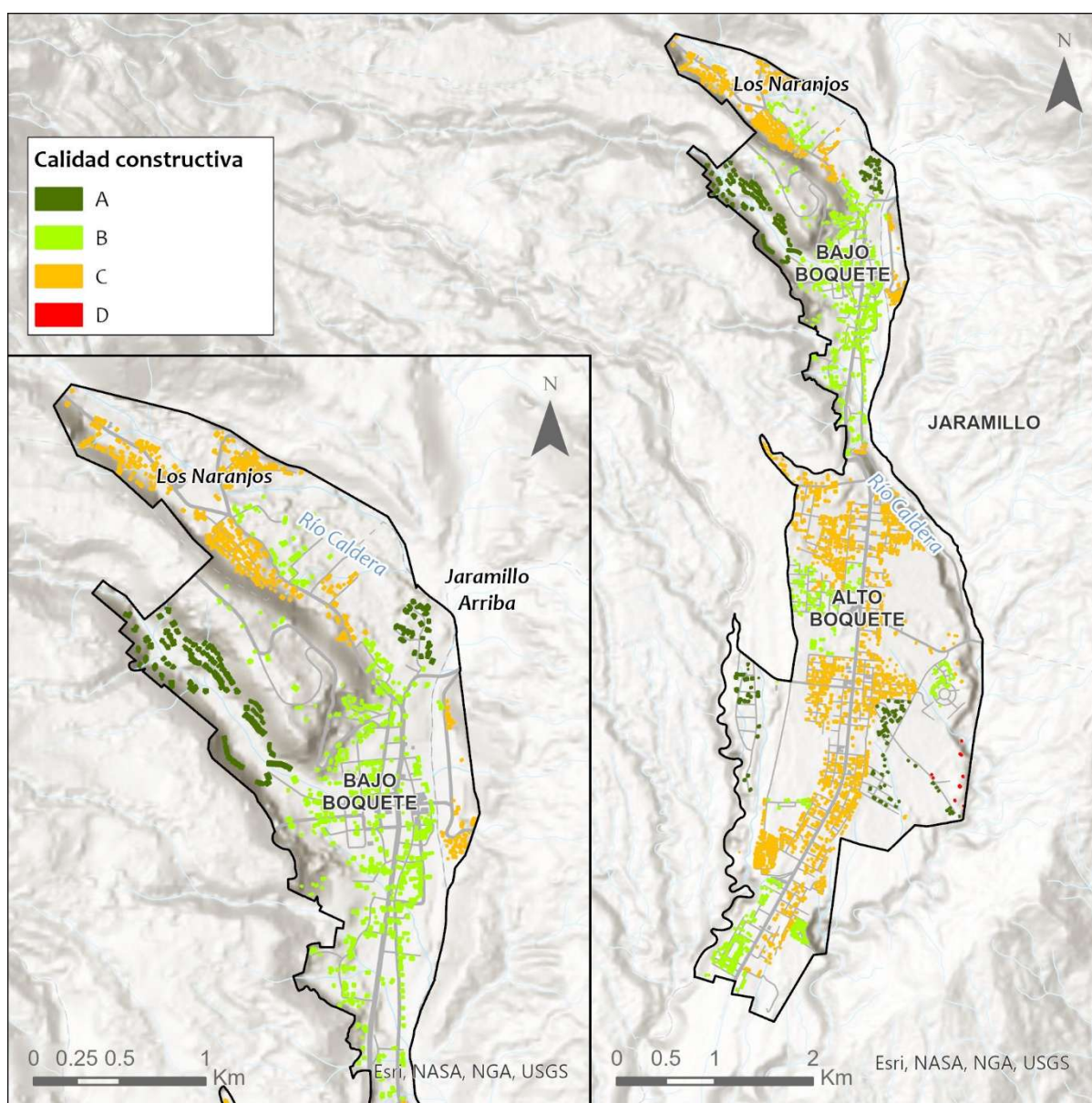


Figura 92. Distribución geográfica de la calidad constructiva de las edificaciones residenciales. Fuente: IHCantabria, 2024.

Valor económico de las edificaciones

El valor económico de reposición (o valor en riesgo) de las edificaciones residenciales considerado representa el conjunto de activos susceptibles de deteriorarse por efecto de una inundación. Este

conjunto de activos incluye: su continente (elementos estructurales e instalaciones) y contenido (equipamiento).

La estimación de este valor económico de reposición para cada categoría de calidad constructiva se ha realizado con base en los considerados en los Estudios de desarrollo urbano y cambio climático para el Área Metropolitana de Panamá Pacífico (IDOM-IHCantabria, 2016) de la Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles (ICES) y en las tablas tributarias de la Alcaldía de Panamá de 2017. Los valores ahí recogidos para diferentes tipologías constructivas se han actualizado al año 2024 aplicando el Índice de Precios al Consumo (IPC) obtenido del INEC.

En la Tabla 19 se presentan los valores de reposición para cada una de las categorías de calidades constructivas en los que se ha basado, tanto la estimación del valor económico de reposición del total de las edificaciones residenciales inventariadas, como el cálculo de su valor expuesto.

Calidad constructiva	Valor de reposición (USD \$/m2)	Valor total (MUSD \$)	%
A	2,000.00	157.43	29.1
B	960.00	168.29	31.1
C	700.00	214.76	39.7
D	39.00	0.05	0.0
Total		540.53	100

Tabla 19. Valores de reposición según calidad constructiva, y valor total en millones de dólares (MUSD \$), de las edificaciones residenciales inventariadas. Fuente: IHCantabria, 2024.

Inventario de infraestructuras críticas

En lo referente a las infraestructuras críticas afectadas por inundaciones, es preciso realizar un análisis de los valores económicos expuestos derivados del daño o destrucción de estas. Los daños económicos en estas infraestructuras pueden ser directos, cuando lo que se evalúa es el valor económico de la infraestructura dañada, o indirectos, cuando lo que se tiene en cuenta es la capacidad afectada, la pérdida de servicio y el tiempo de recuperación de la infraestructura debido a la afectación por inundación, en este estudio solo se evalúan los daños directos derivados de los eventos de inundación. Así pues, con vistas a valorar lo mencionado previamente, se debe realizar el inventario de las infraestructuras críticas (IC), que son aquellas infraestructuras cuya afectación suponga un trastorno para el funcionamiento del sistema urbano. Este inventario se ha realizado, del mismo modo que para las edificaciones residenciales, con base en información oficial de infraestructuras públicas y la fotointerpretación de imágenes de satélite. Con base en esta información para el presente, las infraestructuras urbanas del área de estudio han sido identificadas, localizadas y clasificadas en categorías según el tipo de uso que se hace de ellos o el subsistema infraestructural al que pertenecen. Así, se ha elaborado una base de datos de infraestructuras críticas que cuenta con los siguientes elementos distribuidos según las categorías mostradas a continuación:

- Agua y saneamiento: esta categoría incluye plantas de tratamiento de agua, estaciones de bombeo y otros elementos del sistema de abastecimiento de agua.
- Asistencia médica: en esta categoría se incluyen todos los edificios e infraestructuras destinadas a ofrecer atención y asistencia médica.
- Comercial: dentro de esta categoría encontramos mercados y grandes superficies comerciales.

- Educación: en esta categoría se incluyen las infraestructuras destinadas a la educación de jóvenes de diferentes edades, desde los niveles más básicos de enseñanza, hasta centros de estudios superiores como pueden ser las universidades.
- Industrial: en esta categoría se incluyen las infraestructuras de mayor relevancia destinadas a la práctica de las actividades del sector privado industrial. Incluyen almacenes, plantas de procesamiento de alimentos y bebidas, actividades asociadas al transporte terrestre, astilleros, etc.
- Servicios urbanos: en esta categoría se hace referencia a los elementos cuya función es ofrecer un servicio de atención y protección a los ciudadanos de manera gratuita. En este sentido, se han tenido en cuenta los edificios ocupados por los servicios de policía, los bomberos y el ejército.
- Transporte: esta categoría incluye puertos y terminales de transporte de pasajeros, aeropuertos y las principales vías de comunicación.

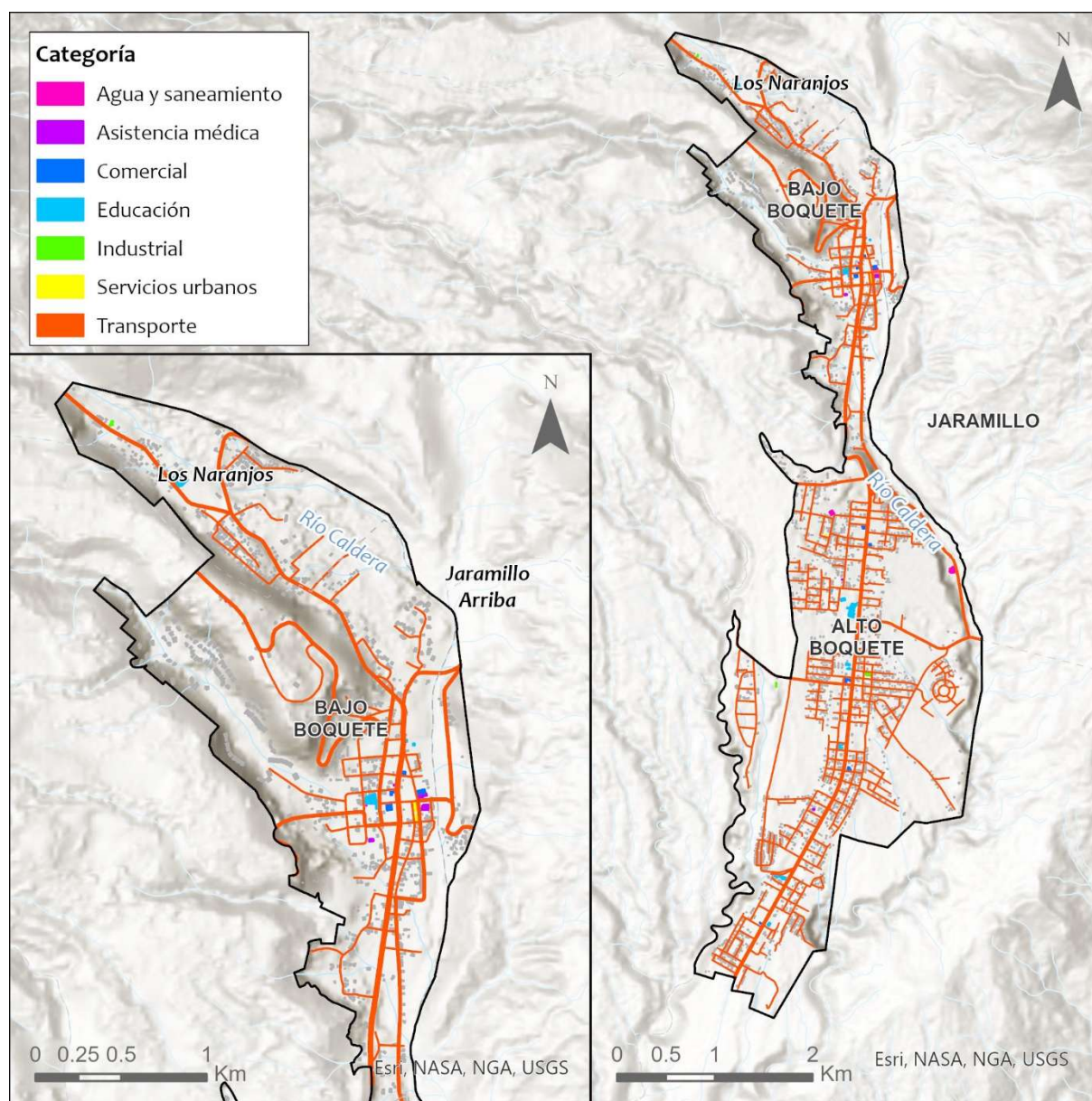


Figura 93. Infraestructuras críticas del área de estudio por categoría. Fuente: IHCantabria, 2024.

Categoría IC	Número de elementos	%
Agua y saneamiento	4	10.00
Asistencia Médica	7	17.50
Comercial	9	22.50
Educación	12	30.00
Industrial	4	10.00
Servicios Urbanos	3	7.50
Transporte	1	2.50
Total	40	100.00

Tabla 20. Inventario de infraestructuras críticas del área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.

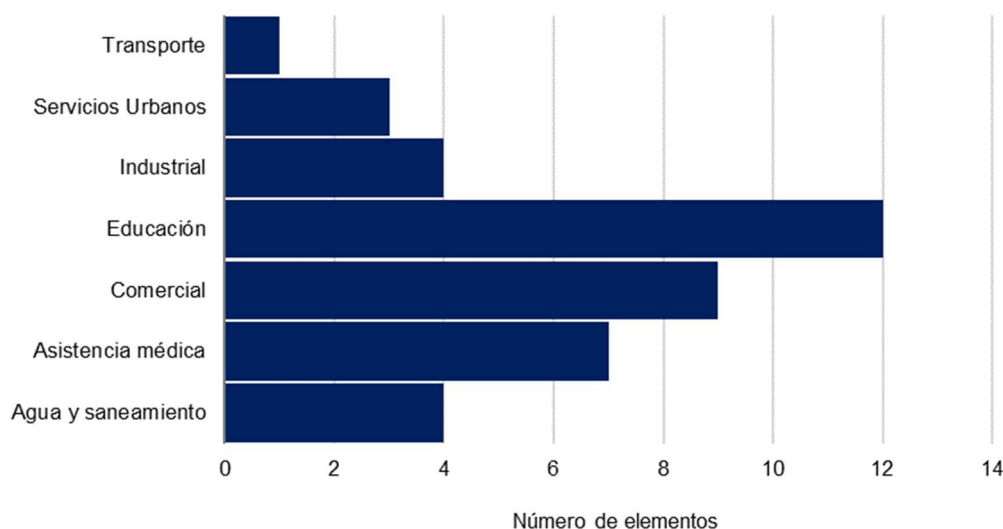


Figura 94. Infraestructuras críticas del área de estudio por categoría. Fuente: IHCantabria, 2024.

Valor económico de las infraestructuras críticas

El valor económico de reposición de las infraestructuras críticas considera, al igual que para las edificaciones residenciales, el conjunto de activos susceptibles de deteriorarse por efecto de la inundación.

En este caso, se han considerado valores unitarios específicos (USD \$/m²) para cada categoría de IC teniendo en cuenta que, cada una de ellas tiene unos costes estructurales y de instalaciones diferentes. Estos valores se basan en valores unitarios de este tipo de infraestructuras en los Estudios de desarrollo urbano y cambio climático para el Área Metropolitana de Panamá Pacífico (IDOM-IHCantabria, 2016) de la Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles (ICES) actualizados al año 2024 con el IPC.

En la Tabla 21 se presentan los valores de reposición para cada una de las categorías consideradas de IC, así como el valor económico de reposición del total.

Categoría IC	Valor de reposición (USD \$/m2)	Valor total (MUSD \$)
Agua y saneamiento	0.90	0.01
Asistencia Médica	120.00	0.44
Comercial	6.50	0.06
Educación	45.00	0.95
Industrial	1.60	0.00
Servicios Urbanos	45.00	32.24
Transporte	0.60	0.43
Total		34.12

Tabla 21. Valores de reposición según categoría, y valor total en millones de dólares (MUSD \$), para las infraestructuras críticas del área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.

Resultado de la exposición física a inundación

En este apartado se presenta un resumen de los resultados de la exposición física que incluye la exposición tanto de las edificaciones como de las infraestructuras críticas para cada escenario considerado que representan eventos de alta y baja probabilidad de ocurrencia.

Se considera que una edificación residencial está expuesta cuando la profundidad máxima es superior a 0.3 m; en el caso de las infraestructuras críticas, la exposición viene dada por la profundidad máxima superior a 0.5 m, considerando que este tipo de elementos suelen tener un plinto con nivel de acceso más elevado.

La Tabla 22 presenta la superficie edificada expuesta y el valor económico expuesto, para todos los periodos de retorno analizados, obtenida de cruzar la amenaza de inundación con la superficie edificada para cada escenario climático analizado. La tabla también muestra el porcentaje de la superficie edificada expuesta y el valor económico expuesto con respecto al total inventariado.

Periodo de retorno (años)	Superficie edificada expuesta		Valor económico expuesto	
	ha	%	MUSD \$	%
SITUACIÓN ACTUAL				
10	1.11	1.98	11.13	2.06
50	1.72	3.07	16.98	3.14
100	2.06	3.67	20.63	3.82
HORIZONTE 2030 SSP585				
10	1.66	2.95	16.22	3.00
50	2.58	4.59	26.49	4.90
100	2.68	4.78	27.40	5.07
HORIZONTE 2050 SSP585				
10	1.21	2.16	12.21	2.26
50	1.87	3.33	18.77	3.47
100	2.28	4.06	23.62	4.37

Tabla 22. Superficie edificada expuesta (ha) y valor económico expuesto (MUSD \$) para cada periodo de retorno y escenario climático. Valores relativos respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.

Como se puede apreciar en la Figura 95, la superficie edificada expuesta representa un bajo porcentaje del total para la situación actual, que va de un 1.98% para el periodo de retorno de 10 años (evento de alta probabilidad) a un 3.67% de las edificaciones para el periodo de retorno de 100 años (evento de baja probabilidad).

Para los escenarios con cambio climático en los horizontes 2030 y 2050 estos porcentajes sufren un ligero aumento, algo más marcado en el 2030, pero sin grandes diferencias entre ellos, situándose en el más desfavorable en torno al 2.95% de la superficie edificada expuesta para el periodo de retorno de 10 años y al 4.78% para el periodo de retorno de 100 años.

En cuanto al valor económico expuesto, la relación entre los escenarios climáticos se mantiene (Figura 96), siendo el valor económico expuesto para la situación actual un 11.13 MUSD \$, lo que en términos relativos supone un 2.06%, para el evento de alta probabilidad de ocurrencia (10 años de periodo de retorno) y 20.63 MUSD \$, un 3.82% del valor total de las edificaciones, para el periodo de retorno de baja probabilidad de ocurrencia (100 años de periodo de retorno).

Para el horizonte 2030, en términos relativos, el valor expuesto se incrementa a un 3% el evento de 10 de periodo de retorno, y el valor expuesto para el evento de periodo de retorno de 100 años es del 5.07%.

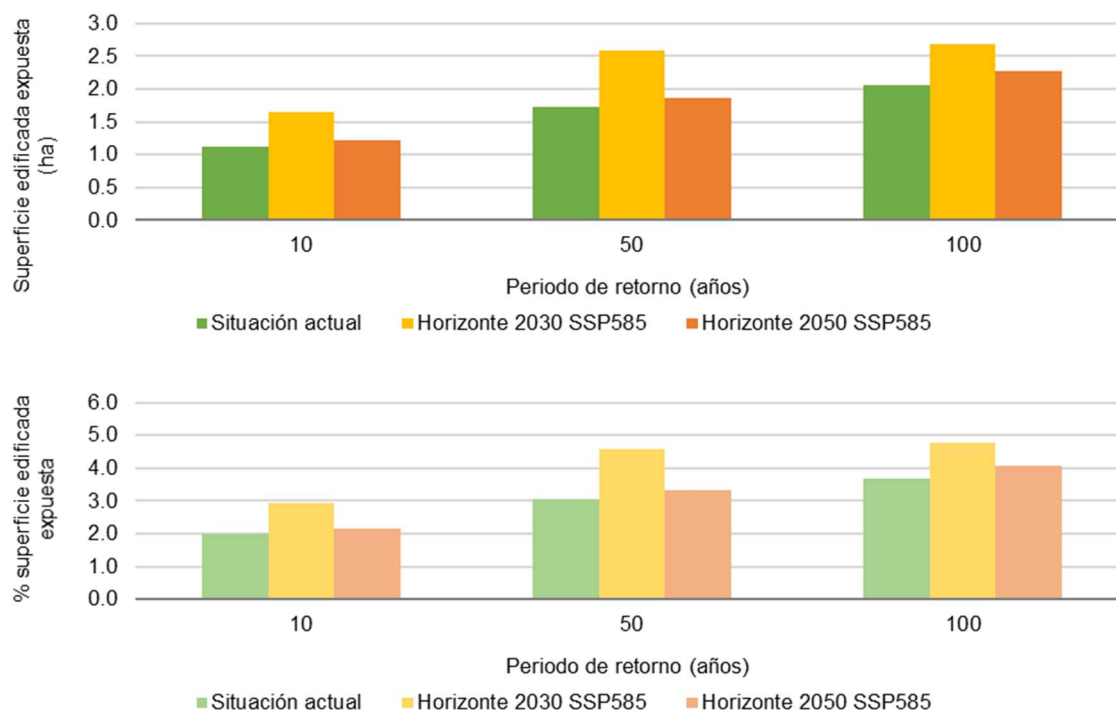


Figura 95. Superficie edificada expuesta (ha) para cada periodo de retorno y escenario climático. Los valores relativos se calculan respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.

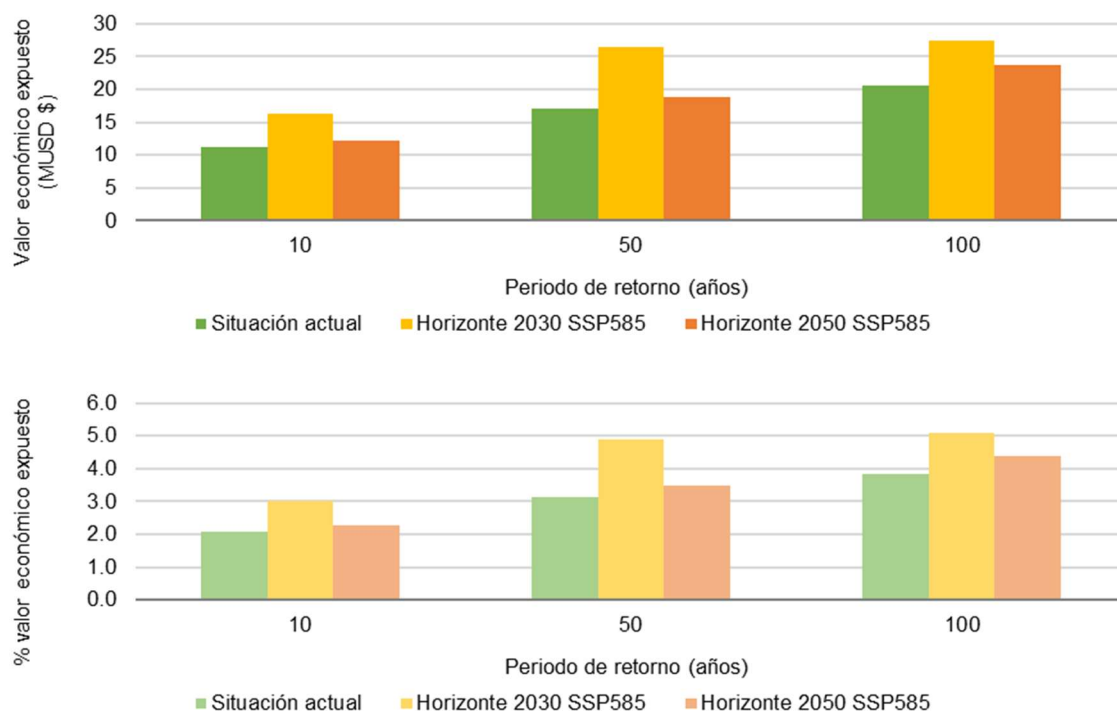


Figura 96. Valor económico expuesto (MUSD \$) para cada periodo de retorno y escenario climático. Los valores relativos se calculan respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.

A modo de ejemplo, de la Figura 97 a la Figura 99 se presenta la distribución geográfica de los valores económicos expuestos para el periodo de retorno de 100 años los tres escenarios climáticos analizados.

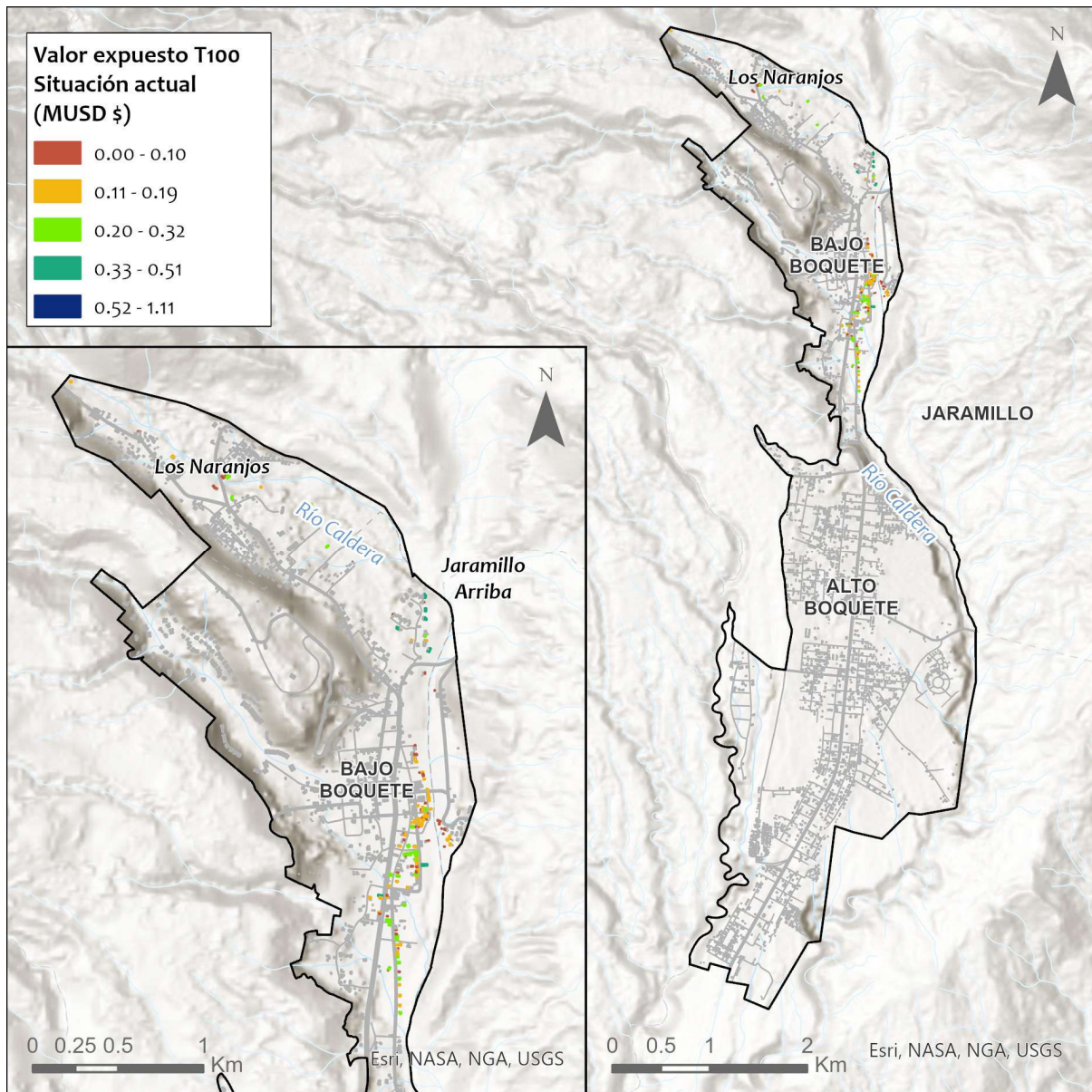


Figura 97. Valor económico expuesto de las edificaciones (MUSD \$) para el evento de 100 años de periodo de retorno en la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

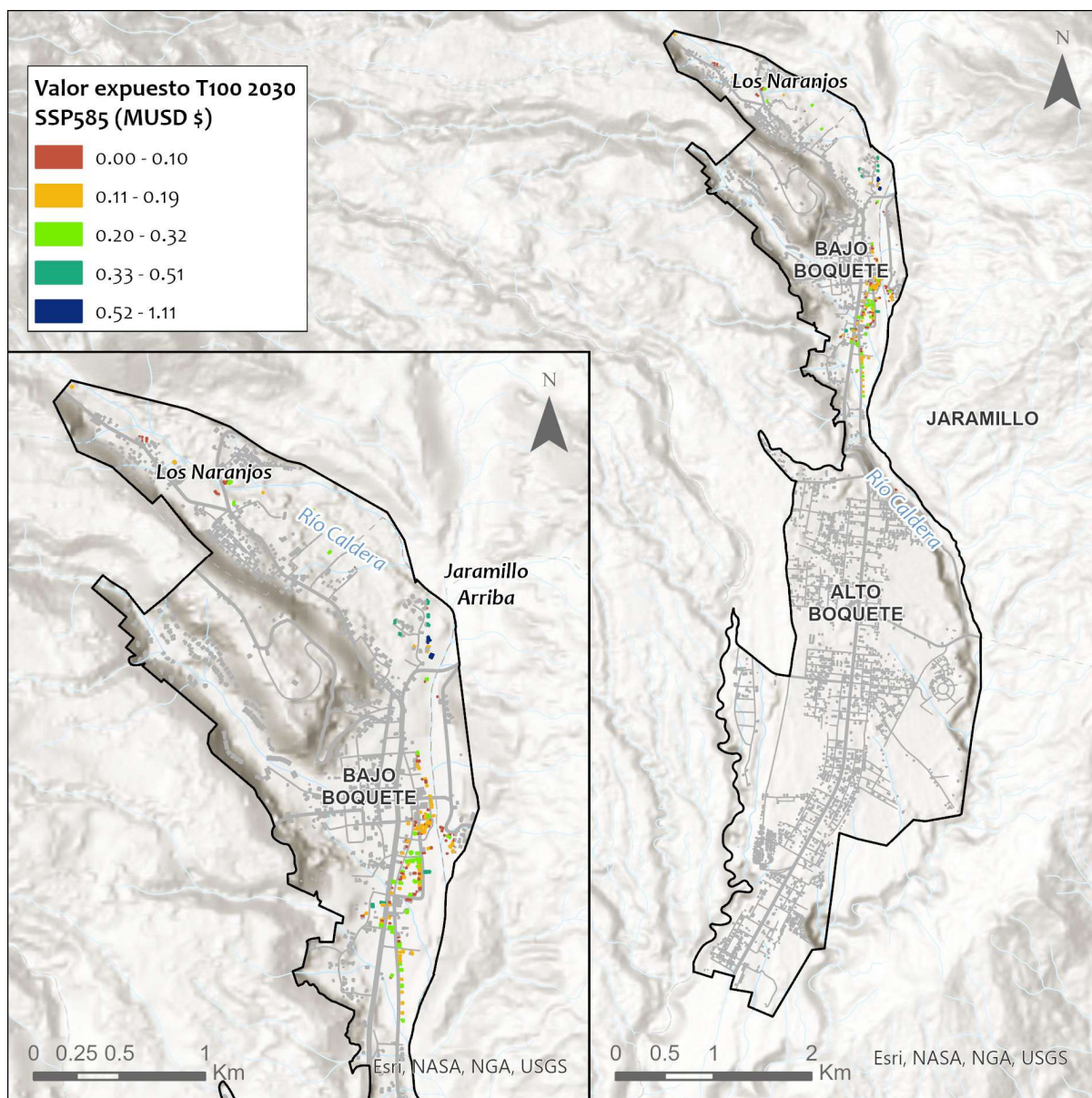


Figura 98. Valor económico expuesto de las edificaciones (MUSD \$) para el evento de 100 años de periodo de retorno en el horizonte 2030 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

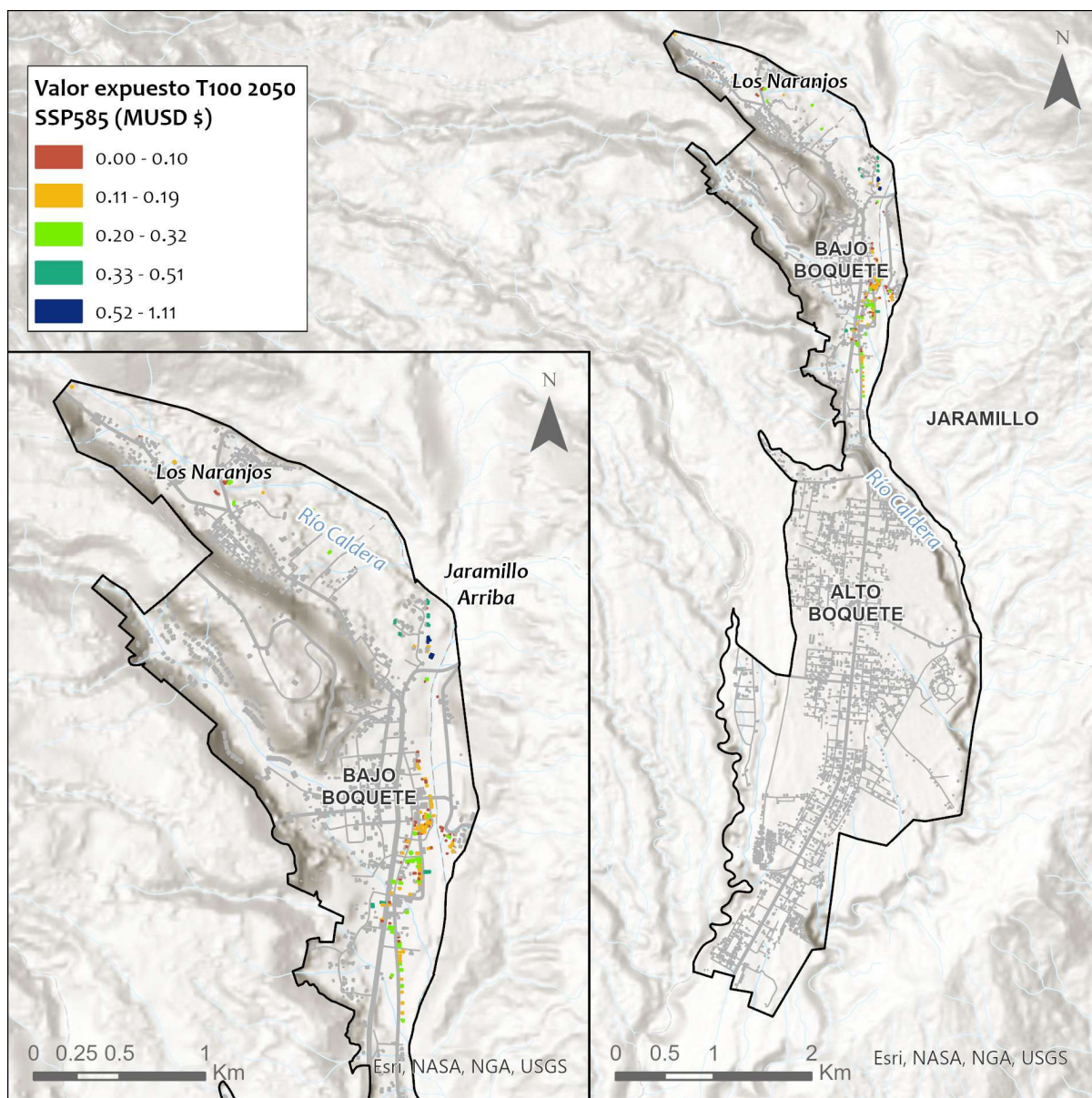


Figura 99. Valor económico expuesto de las edificaciones (MUSD \$) para el evento de 100 años de periodo de retorno en el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

La Tabla 23 presenta el número de IC expuestas y el valor económico expuesto de IC, para todos los periodos de retorno analizados, obtenida de cruzar la amenaza de inundación con el inventario de infraestructuras críticas para cada escenario climático analizado. La tabla también muestra el porcentaje de IC expuestas y el valor económico de IC expuestas con respecto al total inventariado.

Periodo de retorno (años)	Elementos expuestos		Valor económico expuesto	
	Número	%	MUSD \$	%
SITUACIÓN ACTUAL				
10	6	15.00	0.07	0.19
50	7	17.50	0.26	0.77
100	8	20.00	0.28	0.83
HORIZONTE 2030 SSP585				
10	7	17.50	0.18	0.52
50	8	20.00	0.29	0.84
100	8	20.00	0.29	0.85
HORIZONTE 2050 SSP585				
10	6	15.00	0.07	0.19
50	7	17.50	0.26	0.77
100	8	20.00	0.29	0.84

Tabla 23. Número de IC expuestas y el valor económico expuesto de IC (MUSD \$) para cada periodo de retorno y escenario climático. Valores relativos respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.

Como se puede apreciar en la Tabla 23, hay poca variación en las IC situadas en área inundable, entre 6 y 8 para todos los eventos y escenarios climáticos analizados, en torno a un 18% de las inventariadas. Destaca la localización de la planta de tratamiento de aguas residuales en zona inundable.

En cuanto al valor expuesto a la amenaza, se mantiene la misma relación entre escenarios, en la situación actual el valor expuesto es menos del 1% del inventariado, y para los horizontes 2030 y 2050 éste aumenta mínimamente, manteniéndose por debajo de ese porcentaje (Figura 100).

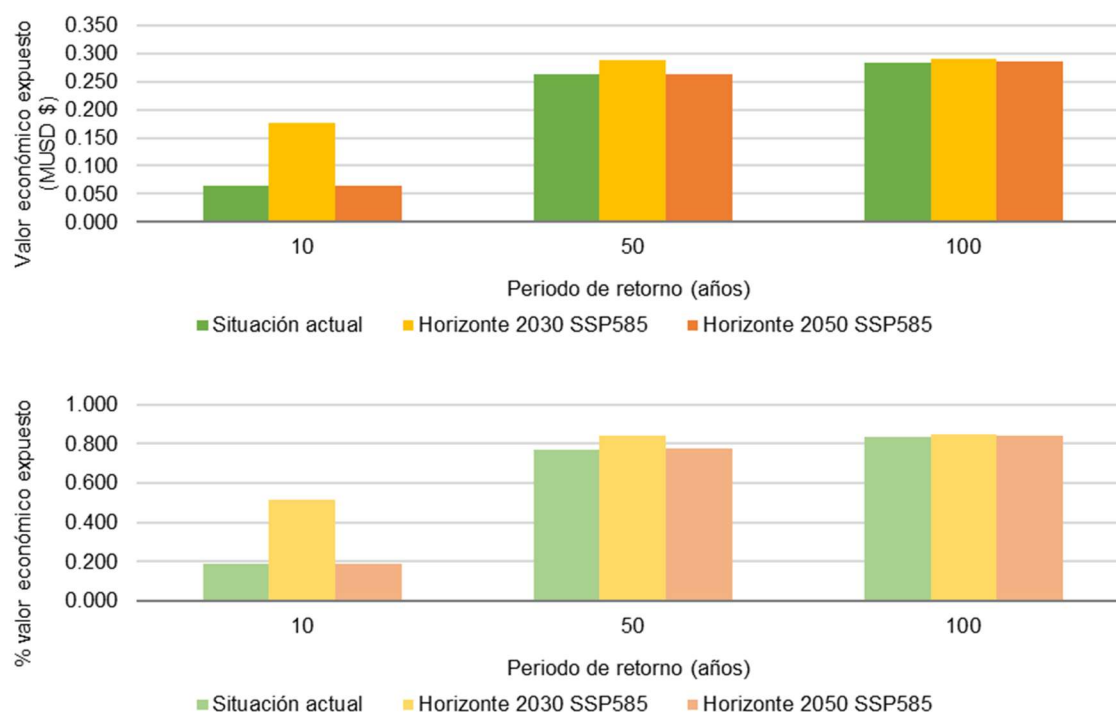


Figura 100. Valor económico expuesto de IC (MUSD \$) para cada periodo de retorno y escenario climático. Los valores relativos se calculan respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.

A modo de ejemplo, de la Figura 101 y Figura 102 se presenta la distribución geográfica de los valores económicos expuestos para el periodo de retorno de 100 años en la situación actual y el horizonte 2030.

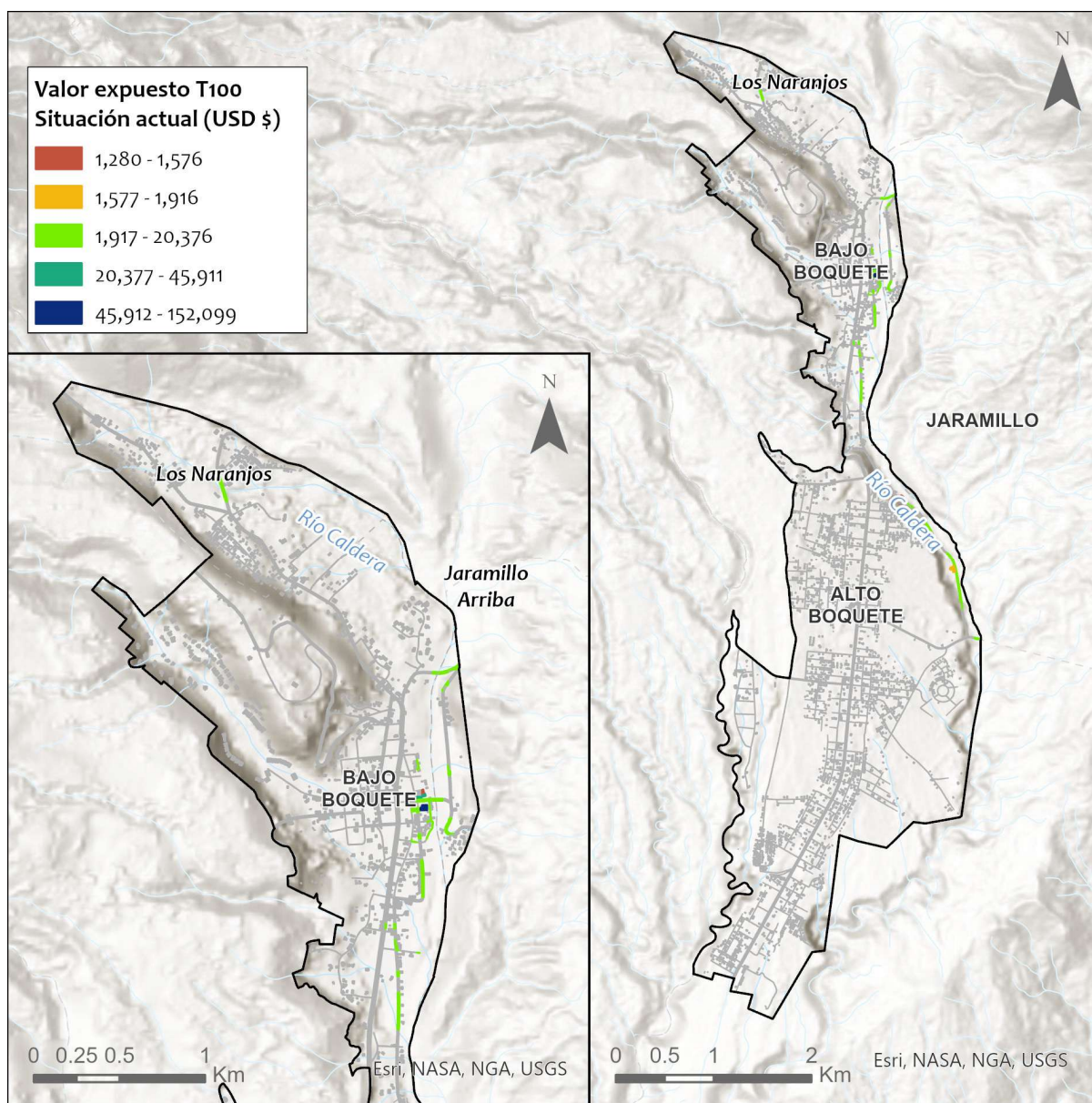


Figura 101. Valor económico expuesto de las IC (MUSD \$) para el evento de 100 años de periodo de retorno en la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

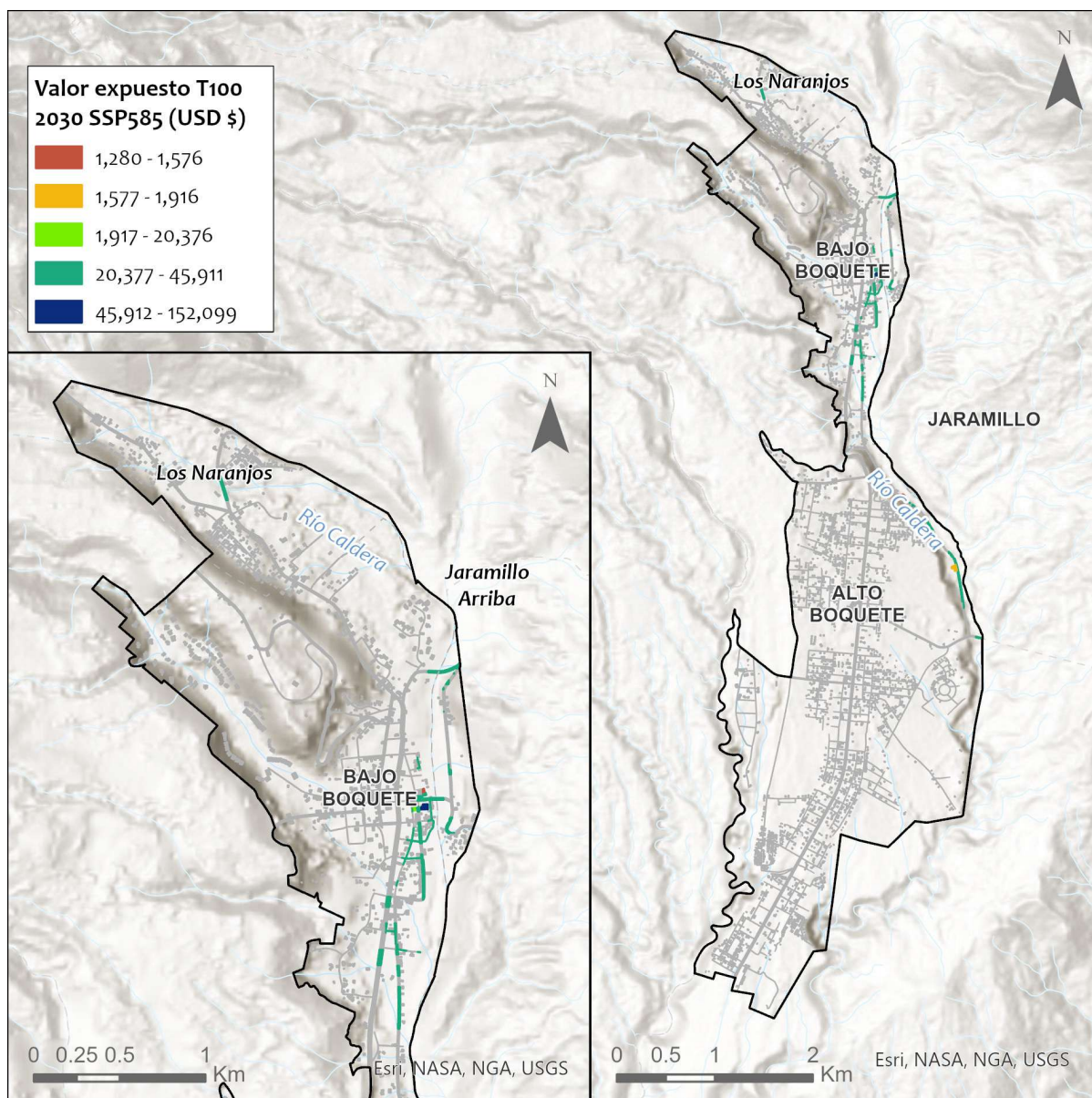


Figura 102. Valor económico expuesto de las IC (MUSD \$) para el evento de 100 años de periodo de retorno en el horizonte 2030 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

9.4.2. Exposición social

La exposición social se refiere inicialmente a la cantidad de personas afectadas por una amenaza en particular. Se asume la población estática como punto de inicio típico y simplificado para estimar la exposición social.

Inventario de población

Se ha considerado una población de 9,169 habitantes. Esta población ha sido obtenida de a partir de XII Censo de Población y VIII de Vivienda de Panamá del año 2023 del INEC a nivel de barrio urbano o lugar poblado, y traslada a la capa de edificaciones residenciales dentro del área urbana de Boquete.

En la Figura 103 se presenta la distribución geográfica de la densidad de población en el área de estudio.

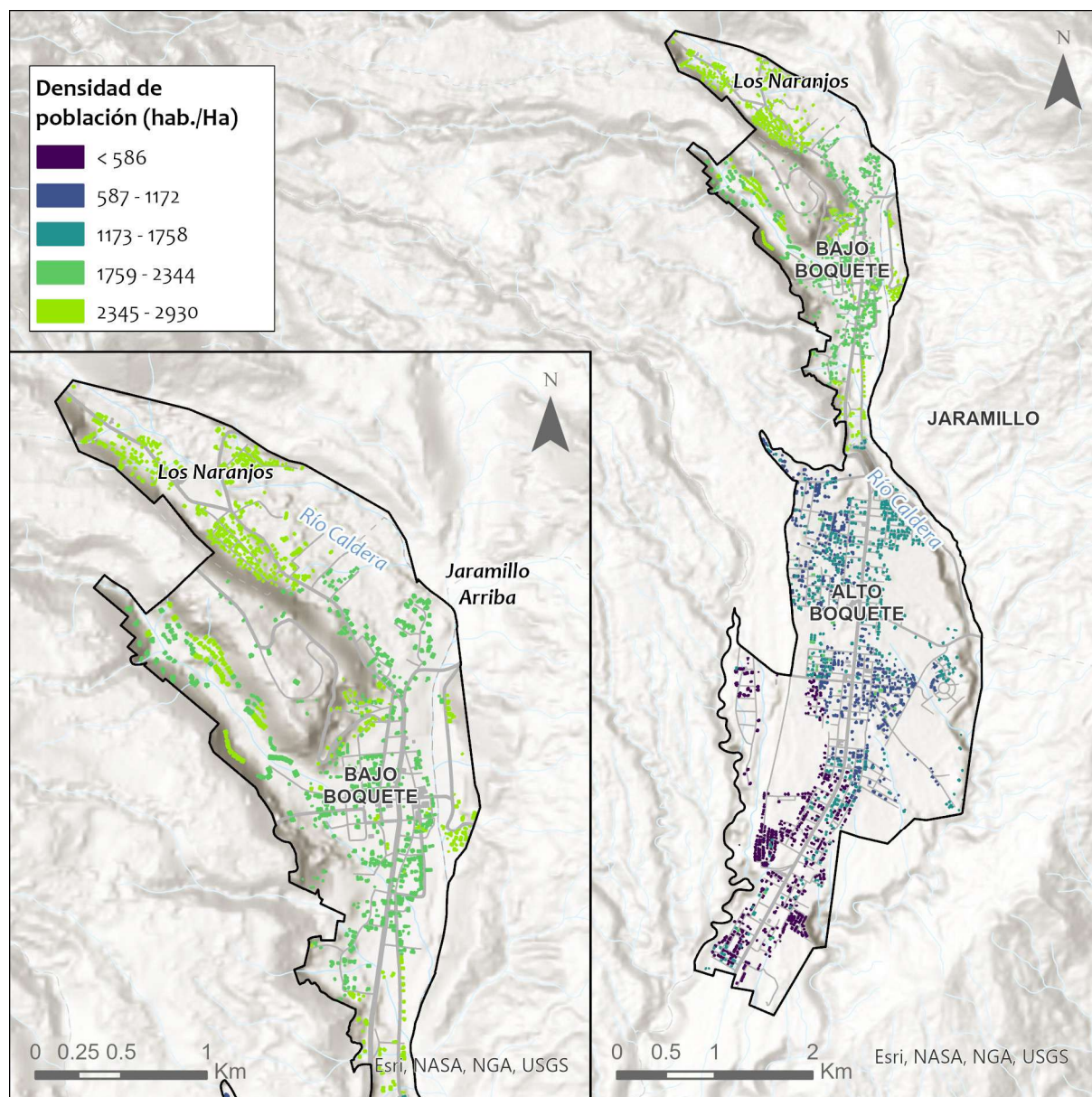


Figura 103. Distribución geográfica de la densidad de población en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.

Resultado de la exposición social a inundación

En este apartado se presenta un resumen de los resultados de la exposición social para los periodos de retorno analizados.

Para obtener la población expuesta a inundaciones se ha tenido en cuenta la densidad de población presentada en el apartado de inventario de población y las capas de área inundable para los de distintos periodos de retorno.

La presenta Tabla 24 el número de habitantes expuestos para todos los periodos de retorno analizados, obtenido de cruzar la amenaza de inundación con el inventario de población para cada escenario climático analizado. La tabla también muestra el porcentaje de población expuesta con respecto al total inventariado.

Periodo de retorno (años)	Población expuesta	
	Habitantes	%
SITUACIÓN ACTUAL		
10	181	1.98
50	287	3.13
100	340	3.71
HORIZONTE 2030 SSP585		
10	276	3.01
50	417	4.55
100	436	4.76
HORIZONTE 2050 SSP585		
10	196	2.14
50	307	3.35
100	364	3.97

Tabla 24. Población expuesta para cada periodo de retorno y escenario climático. Valores relativos respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.

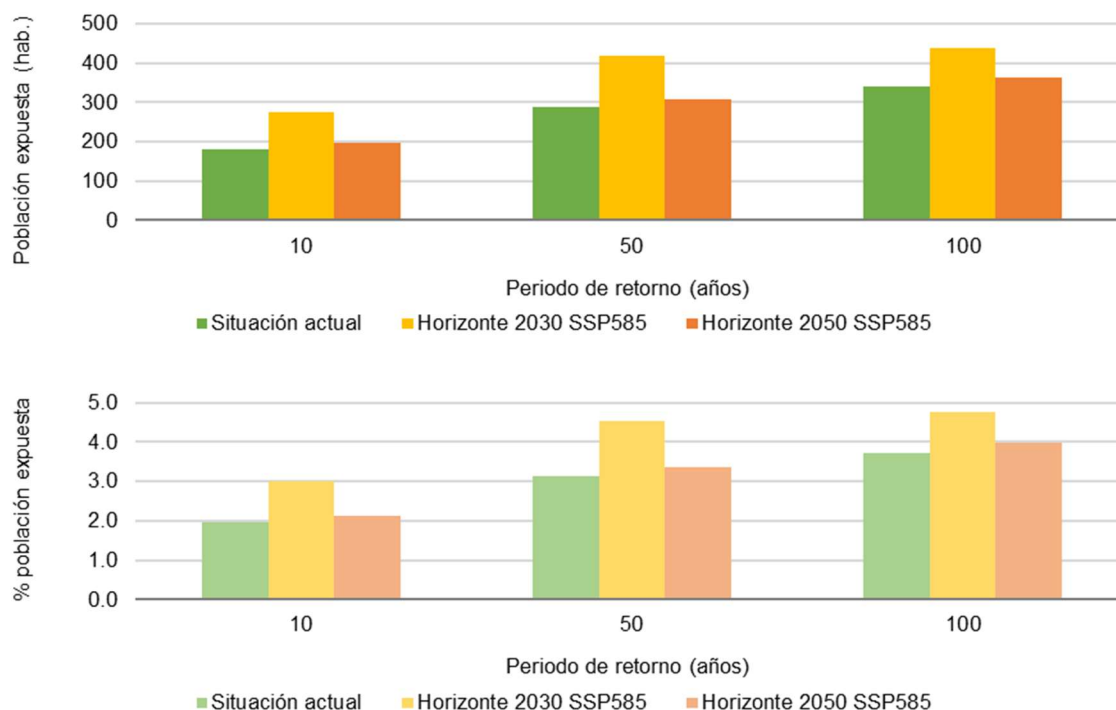


Figura 104. Población expuesta para cada periodo de retorno y escenario climático. Los valores relativos se calculan respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.

Como se puede apreciar, la población afectada representa un bajo porcentaje de la población total para la situación actual, que va de un 1.98% para el periodo de retorno de 10 años a un 3.71% de la población para el periodo de retorno de 100 años.

Para los escenarios con cambio climático estos porcentajes sufren un ligero aumento, de entorno al 1%, pasando de los 181 habitantes afectados en situación actual, a 276 en el horizonte 2030 y 196 en el horizonte 2050 para el periodo de retorno de 10 años, y de 340 habitantes afectados en situación actual, a 436 en el horizonte 2030 y 364 en el horizonte 2050 para el periodo de retorno de 100 años.

De la Figura 105 a la Figura 107 se presenta la distribución geográfica de la población afectada para periodo de retorno de 100 años y escenarios climáticos analizados.

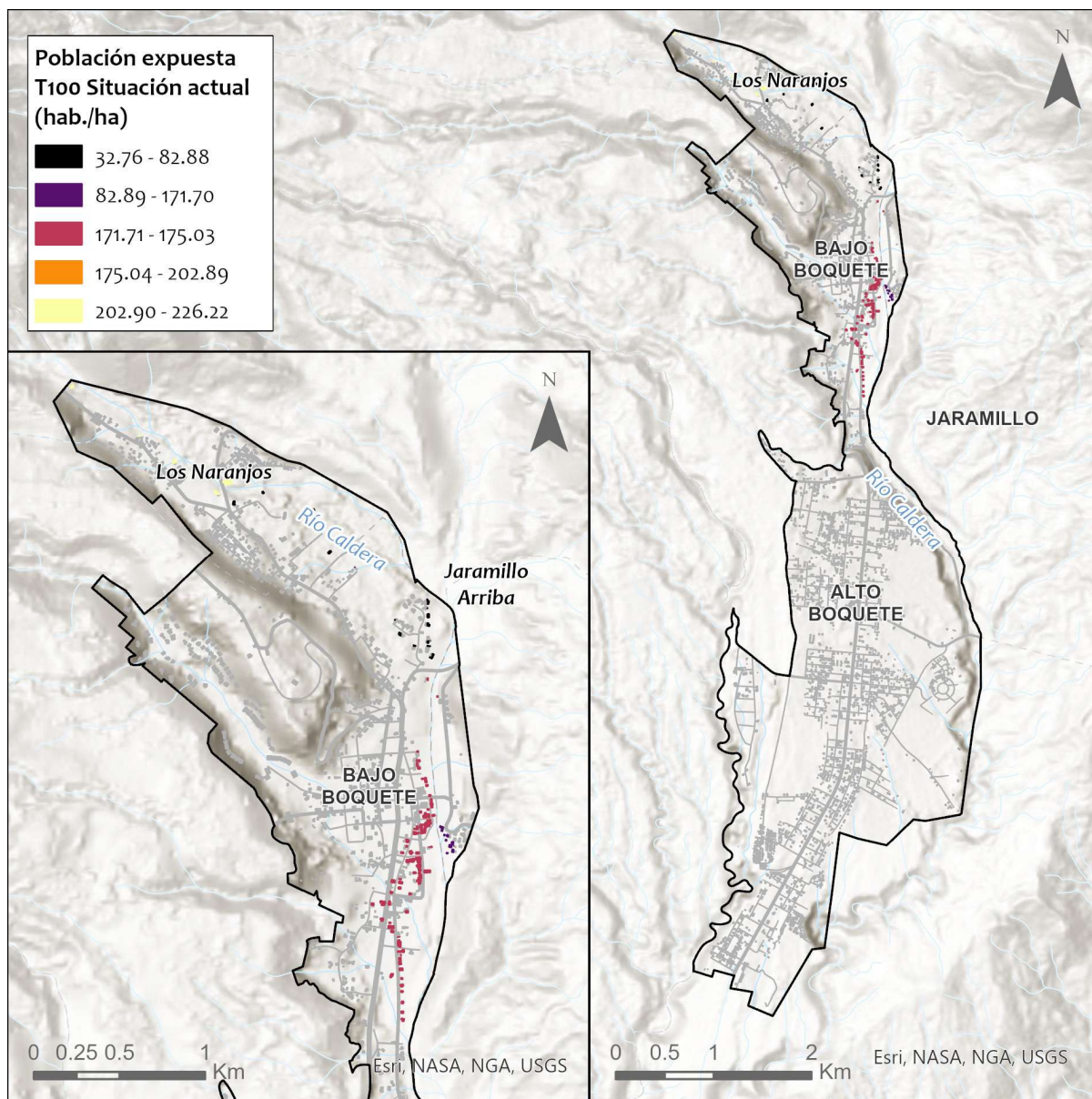


Figura 105. Población expuesta (hab./ha) para el evento de 100 años de periodo de retorno en la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

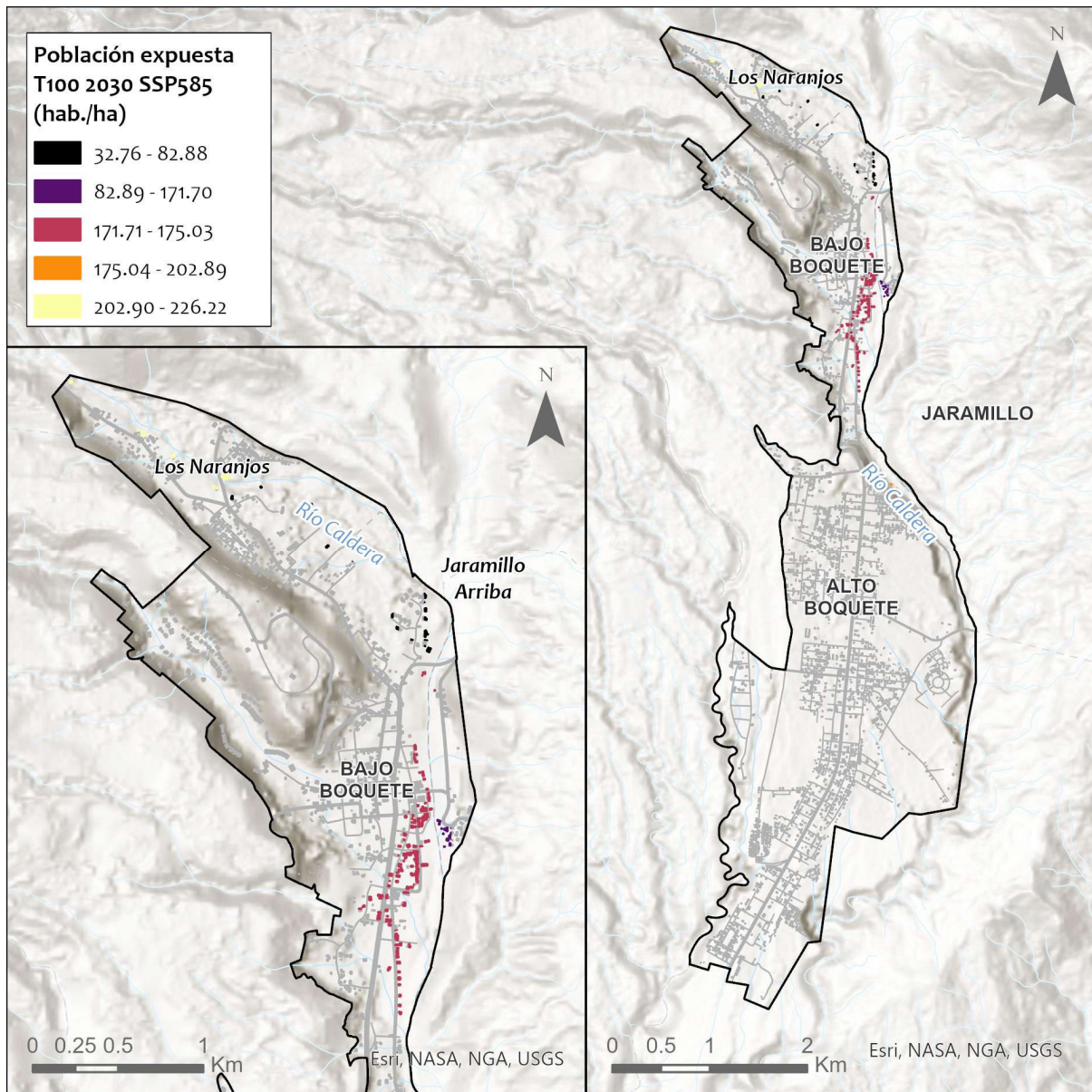


Figura 106. Población expuesta (hab./ha) para el evento de 100 años de periodo de retorno en el horizonte 2030 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

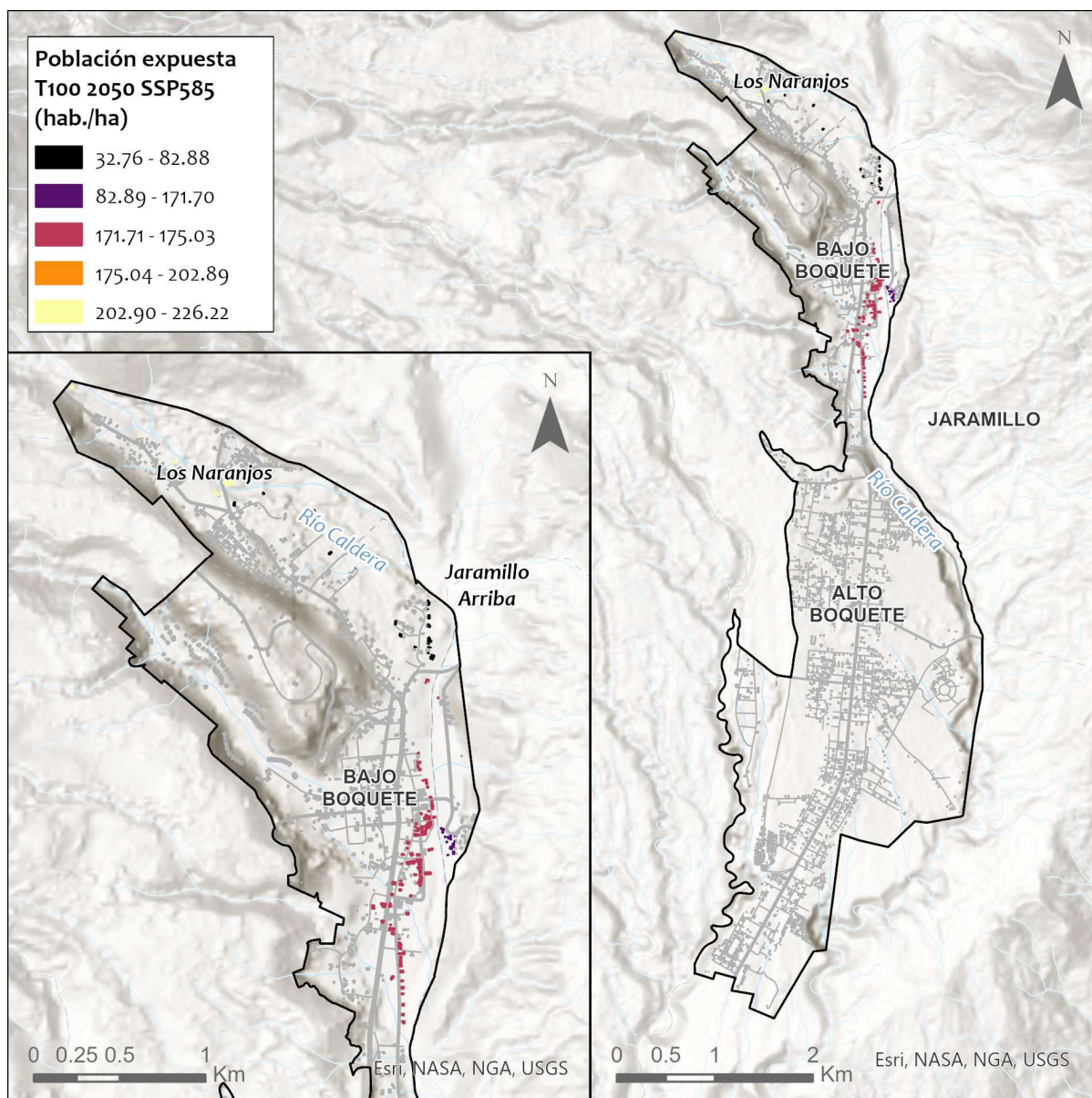


Figura 107. Población expuesta (hab./ha) para el evento de 100 años de periodo de retorno en el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

9.5. Caracterización de la vulnerabilidad

El análisis de la vulnerabilidad de los elementos expuestos consiste en el estudio del grado de afectación que puede generar la amenaza en los elementos expuestos, siendo una cualidad intrínseca al sistema y función de las características naturales de esos elementos y del umbral a partir del cual se produce el impacto objeto de estudio, se trata de evaluar las características intrínsecas de los elementos expuestos que les hacen más susceptibles de sufrir los impactos negativos de un peligro.

9.5.1. Vulnerabilidad física

La vulnerabilidad física se representa mediante curvas de vulnerabilidad o funciones de daño que relacionan la profundidad de la lámina de agua con el daño potencial sobre el elemento analizado, que dependerá de las características intrínsecas de este.

Las funciones de vulnerabilidad física para inundaciones se han establecido considerando las definidas por la herramienta ERN-Vulnerabilidad (CAPRA, www.capra.org), adaptándolas al contexto del presente estudio según la caracterización física de las construcciones. Se emplean las mismas funciones de daño para los diferentes periodos de retorno y los diferentes escenarios analizados.

A continuación, se presenta el análisis de la vulnerabilidad y las funciones de daño establecidas para las edificaciones y las infraestructuras críticas.

Funciones de daño para edificaciones

La asignación de funciones de daño por inundación en edificaciones viene definida para cada tipo constructivo, descritos en el módulo de exposición. A efectos de inundaciones, se consideran cuatro funciones de daño, dos para viviendas de un solo piso (planta baja) y otras dos para viviendas de dos o más pisos. Se han adoptado las siguientes funciones de daño dependientes de la profundidad del agua, tomadas de la base de datos de CAPRA (Tabla 25).

Categoría	Función CAPRA	Función de daño (h=profundidad de agua)
A	M2 (2 pisos)	si $h < 2.8$: Daño = $0.5 * (1 - \text{EXP}(-0.155 * h^3))$
		si $h \geq 2.8$: Daño = $0.5 + 0.5 * (1 - \text{EXP}(-0.155 * (h - 2.8)^3))$
B	W2 (2 pisos)	si $h < 2.8$: Daño = $0.5 * (1 - \text{EXP}(-0.33 * h^3))$
		si $h \geq 2.8$: Daño = $0.5 + 0.5 * (1 - \text{EXP}(-0.33 * (h - 2.8)^3))$
C	M1 (1 piso)	Daño = $1 - \text{EXP}(-0.33 * h^3)$
D	W1 (1 piso)	Daño = $1 - \text{EXP}(-0.86 * h^3)$

Tabla 25. Funciones de daño en función de la calidad constructiva de las edificaciones. Fuente: IHCantabria, 2024.

Para la asignación de estas funciones, se ha aplicado el juicio de experto para seleccionar las funciones CAPRA que mejor se relacionan con las cuatro categorías empleadas (A, B, C y D), que finalmente se han ajustado con funciones analíticas para facilitar la implementación. Nótese que, aunque en las denominaciones de las funciones CAPRA se hace referencia a los materiales constructivos (W: madera; M: Mampostería; etc.), que a su vez guardan relación con las categorías empleadas, esta información no se ha considerado la más relevante a la hora de elegir las, ni afecta de forma significativa a la vulnerabilidad frente a la amenaza de inundación lenta. La hipótesis de trabajo es que este tipo de inundaciones dañan las instalaciones y los equipamientos de cualquier vivienda, sea de madera o de ladrillo, pero no alteran en general su estructura.

En términos generales, la proporción de daños viene dada por la existencia de un o más niveles funcionales en las viviendas. En las viviendas más frágiles, se asume que el segundo piso es inexistente, o es la propia cubierta del inmueble, por lo que no tiene capacidad portante; en cambio, en las viviendas de fragilidad media o de mejor calidad, se considera que la existencia de pisos superiores permite poner a salvo una mayor proporción de los activos en riesgo. En la Figura 108 se muestran de forma gráfica las funciones de daño por inundaciones adoptadas.

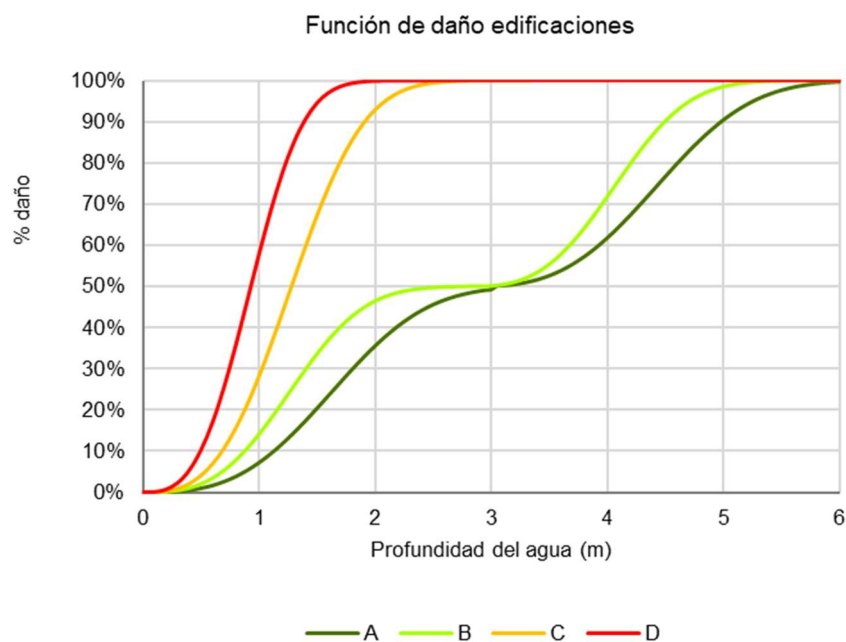


Figura 108. Funciones de daño para calcular los riesgos de inundación. Fuente: IHCantabria, 2024.

Funciones de daño para infraestructuras críticas

En el caso de las infraestructuras críticas, se asigna una curva de vulnerabilidad o función de daño a cada categoría de infraestructura crítica, agrupadas por su tipología y tipo de servicios que provén (Tabla 26).

Categoría	Función de daño
Comercial	Tipo I
Educación	
Asistencia médica	
Servicios urbanos	
Energía	Tipo II
Industria	
Agua y saneamiento	
Transporte	Tipo III

Tabla 26. Funciones de daño para las diferentes categorías de infraestructuras críticas. Fuente: IHCantabria, 2024.

Para cada tipo de función de daño, se asignan funciones que permiten valorar los daños directos, asociados a la afección de la propia infraestructura crítica. A partir de estas funciones, es posible cuantificar los costes de la infraestructura crítica.

Estas funciones de daño en infraestructuras críticas no están disponibles de forma genérica en la literatura técnica, y por tanto se han elaborado a partir de la experiencia adquirida en numerosas ciudades de Latinoamérica y el Caribe, tratando de minimizar el número de parámetros necesarios y con un enfoque práctico. Las funciones de daño empleadas son rectas que representan la relación entre el incremento de profundidad y el daño producido mediante tres tramos: un primer tramo sin daños que se extiende hasta una profundidad de inicio de daños; a continuación, un tramo en que el daño aumenta proporcionalmente con la profundidad (en las funciones CAPRA esta expresión suele

tener forma sigmoïdal en lugar de lineal, pero con mayor dificultad de manejo); por último, a partir de un cierta profundidad de agua, se define un porcentaje de pérdidas constante. Nótese que estas funciones en tres tramos, basadas en tres parámetros con un significado físico intuitivo, deben permitir representar tanto daños físicos como pérdida de funcionalidad en infraestructuras tan diversas como un colegio, una planta depuradora, una estación de transformación de la red eléctrica o una carretera. Dado el alcance y la información disponible, se considera que este enfoque para el análisis de los daños indirectos y sistémicos tiene el grado de parsimonia adecuado y refleja de forma clara las hipótesis de fondo.

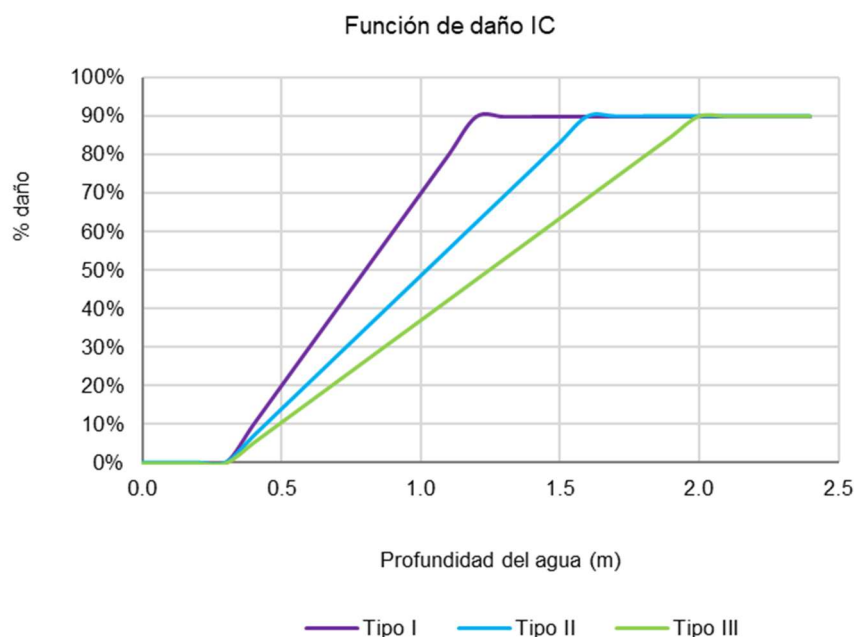


Figura 109. Funciones de daño para infraestructuras críticas de tipo I, II y III. Fuente: IHCantabria, 2024.

9.5.2. Vulnerabilidad social

La densidad de población es uno de los factores clave de la vulnerabilidad, ya que determina la cantidad de personas que potencialmente pueden encontrarse en un lugar alcanzado por las aguas de una creciente. No obstante, una alta densidad de población no implica una vulnerabilidad alta, ya que la población puede estar más o menos expuesta a la peligrosidad en función de las características tipológicas y estructurales de los edificios, así como de otras variables no estructurales asociadas a la capacidad de evacuación temprana de la zona afectada.

Una de las fórmulas disponibles, que ha sido empleada con éxito en diversos estudios y se basa en datos de eventos reales, es la debida a Jonkman (Jonkman, et al., 2008). Estos autores introducen una probabilidad de muerte que depende de la profundidad del agua (h), la velocidad (v) y la tasa de aumento de la profundidad del agua (dh/dt). Dada la velocidad del agua en las inundaciones que tienen lugar en el área de estudio, la función recomendada es una distribución log-normal de la profundidad del agua, con parámetros $\mu=1,46$ y $\sigma=0,28$; se ha asumido que en toda la zona de estudio la tasa de ascenso del nivel del agua es superior a 0,5 metros por hora. Esta fórmula se ha aplicado considerando un coeficiente de exposición de la población censada del 1%, indicando este factor que únicamente una pequeña parte de la población se ve expuesta a condiciones de riesgo, sin poder acceder a sitios elevados o algún tipo de lugar en el que resguardarse.

9.6. Cálculo del riesgo

En este capítulo se presentan riesgos económicos y sociales, tanto en su faceta de daños económicos en edificaciones e infraestructuras críticas, como en la vertiente social, expresada en número de fallecidos y afectados. Estos riesgos se han calculado para cada escenario considerado y para todos los periodos de retorno considerados (10, 50 y 100 años).

Para el cálculo de los daños se han considerado las siguientes categorías de daño económico para cada periodo de retorno:

- Daños directos en edificaciones: se obtienen aplicando las curvas de vulnerabilidad a las tipologías de viviendas de la zona, teniendo en cuenta la profundidad del agua alcanzado por los eventos de distinto periodo de retorno.
- Daños directos en infraestructuras críticas: son el equivalente a los daños en edificaciones, pero aplicados a infraestructuras públicas.
- Daños totales: la suma de todos los anteriores para cada periodo de retorno.

Igualmente, se han considerado para cada periodo de retorno los siguientes tipos de daño humano:

- Número de personas afectadas por eventos: se define como el número de habitantes ubicados en lugares afectados por un evento y se ha obtenido como aquellas personas censadas en zonas cuya profundidad asociada a un evento dado es superior a 0.3 m.
- Número de fallecidos y heridos graves.

Toda esta información se ha condensado en un número más reducido de parámetros (con dimensiones) e indicadores (adimensionales) de daño, tanto económico como humano:

PARÁMETROS DE DAÑO ECONÓMICO	INDICADORES DE DAÑO ECONÓMICO
<ul style="list-style-type: none"> ➤ <u>Pérdida máxima probable (PMP)</u>: la PMP representa el valor de pérdida global para una tasa de excedencia dada. Dependiendo de la capacidad de la entidad para manejar el riesgo, se puede optar por gestionar pérdidas hasta determinado periodo de retorno (BID, 2019). ➤ <u>Pérdida anual esperada (PAE)</u>: la PAE se calcula como la suma del producto entre las pérdidas esperadas para determinado evento, y la probabilidad de ocurrencia de dicho evento en un periodo de un año, para todos los periodos de retorno considerados. En términos probabilistas, la PAE es la esperanza matemática de la pérdida anual (BID, 2019). 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ <u>Índice de daños económicos medios</u>, es el porcentaje que representa la PMP sobre la renta total de la zona afectada (%). ➤ <u>Índice de daños económicos medios</u>, es el porcentaje que representa la PAE sobre la renta total de la zona afectada (%).

PARÁMETROS DE DAÑOS HUMANOS	INDICADORES DE DAÑOS HUMANOS
➤ <u>Número medio anual de personas afectadas por eventos de inundación</u>	➤ <u>Índice de afectación humana (%)</u> : porcentaje de afectados por la amenaza.
➤ <u>Número medio de fallecidos anuales</u>	➤ <u>Índice de fatalidad</u> : proporción de fallecidos y heridos graves por cada millón de habitantes.

Para obtener el riesgo se ha empleado un método de cálculo probabilista simplificado, en el que se asume que el periodo de retorno de las pérdidas es el mismo que el periodo de retorno de los eventos de amenaza, considerados como sucesos estadísticos univariados. Desde este enfoque, los valores de PMP son aproximados, y no incluyen factores como eventos de amenaza con varios fenómenos (por ejemplo, la confluencia de lluvias locales y el nivel/caudal del río principal), la incertidumbre asociada a los factores de propagación de la amenaza (por ejemplo, parámetros hidrológicos e hidráulicos) o el error en el cálculo de la vulnerabilidad (bandas de confianza de las curvas de daño).

Además de todas las tablas y figuras con resultados para todos los periodos de retorno y escenarios climáticos evaluados, a modo de ejemplo, se muestran los mapas de elementos expuestos para los eventos de 100 años de periodo de retorno en el área de estudio. Todas las capas que recogen los resultados para cada periodo de retorno y escenario climático se adjuntan a este informe en base de datos GIS (Geodatabase).

9.6.1. Evaluación de los daños económicos por inundación

Riesgo económico en edificaciones

Los riesgos económicos directos en las edificaciones del área de estudio, debidos a una inundación se han obtenido aplicando las curvas de vulnerabilidad antes descritas a las tipologías de viviendas de la zona, teniendo en cuenta la profundidad del agua alcanzada por los eventos de distinto periodo de retorno. Con estos valores, también se ha podido estimar un valor anualizado medio de dichos daños.

Los riesgos económicos directos en las edificaciones para los escenarios contemplados se presentan en la Tabla 27.

Indicador de riesgo de inundación	T10	T50	T100	PAE
SITUACIÓN ACTUAL				
Daños directos edificaciones (MUSD \$)	0.48	0.69	0.74	0.07
Daños directos edificaciones (% sobre el valor de reposición de las edificaciones)	0.09	0.13	0.14	0.01
HORIZONTE 2030 SSP585				
Daños directos edificaciones (MUSD \$)	0.66	0.91	1.04	0.09
Daños directos edificaciones (% sobre el valor de reposición de las edificaciones)	0.12	0.17	0.19	0.02
HORIZONTE 2050 SSP585				
Daños directos edificaciones (MUSD \$)	0.52	0.70	0.82	0.07
Daños directos edificaciones (% sobre el valor de reposición de las edificaciones)	0.10	0.13	0.15	0.01

Tabla 27. Resultados de daños directos por inundación en edificaciones. Valores relativos respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.

Para la situación actual los resultados obtenidos indican que los daños directos por inundación pueden oscilar, para eventos de menor a mayor periodo de recurrencia, entre 0.48 MUSD \$ y 0.74 MUSD \$, con un valor medio anual de 0.07 MUSD \$. Estos daños representan entre un 0.09% y un 0.14% del valor económico de reposición inventariado de las edificaciones, con un valor medio anual de 0.01%.

En cuanto a los escenarios con cambio climático los resultados apuntan a un ligero aumento de los daños directos por inundación algo más pronunciados en el horizonte 2030. Para eventos de menor a mayor periodo de recurrencia, entre 0.66 MUSD \$ y 1.04 MUSD \$ para el horizonte 2030 y entre 0.52 MUSD \$ y 0.82 MUSD \$ para el horizonte 2050, con un valor medio anual de entre 0.07 y 0.09 MUSD \$ para ambos. Estos daños representan entre un 0.1% y un 0.19% del valor económico de reposición inventariado de las edificaciones, con un valor medio anual de 0.01-0.02%.

En la Figura 110 los valores para todos los periodos de retorno y escenarios analizados. Y en las Figura 111, Figura 112 y Figura 113 se presenta la distribución geográfica de la de la pérdida económica en edificaciones para el periodo de retorno de 100 años y escenarios climáticos analizados.

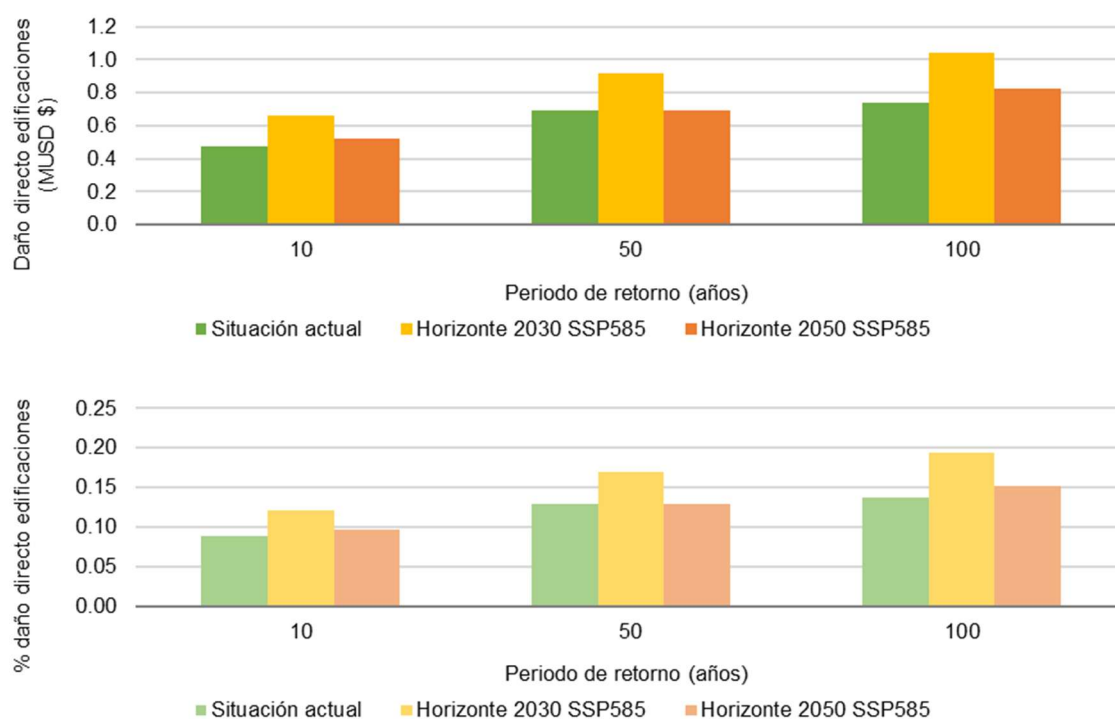


Figura 110. Resultados de daños directos por inundación en edificaciones. Valores relativos respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.

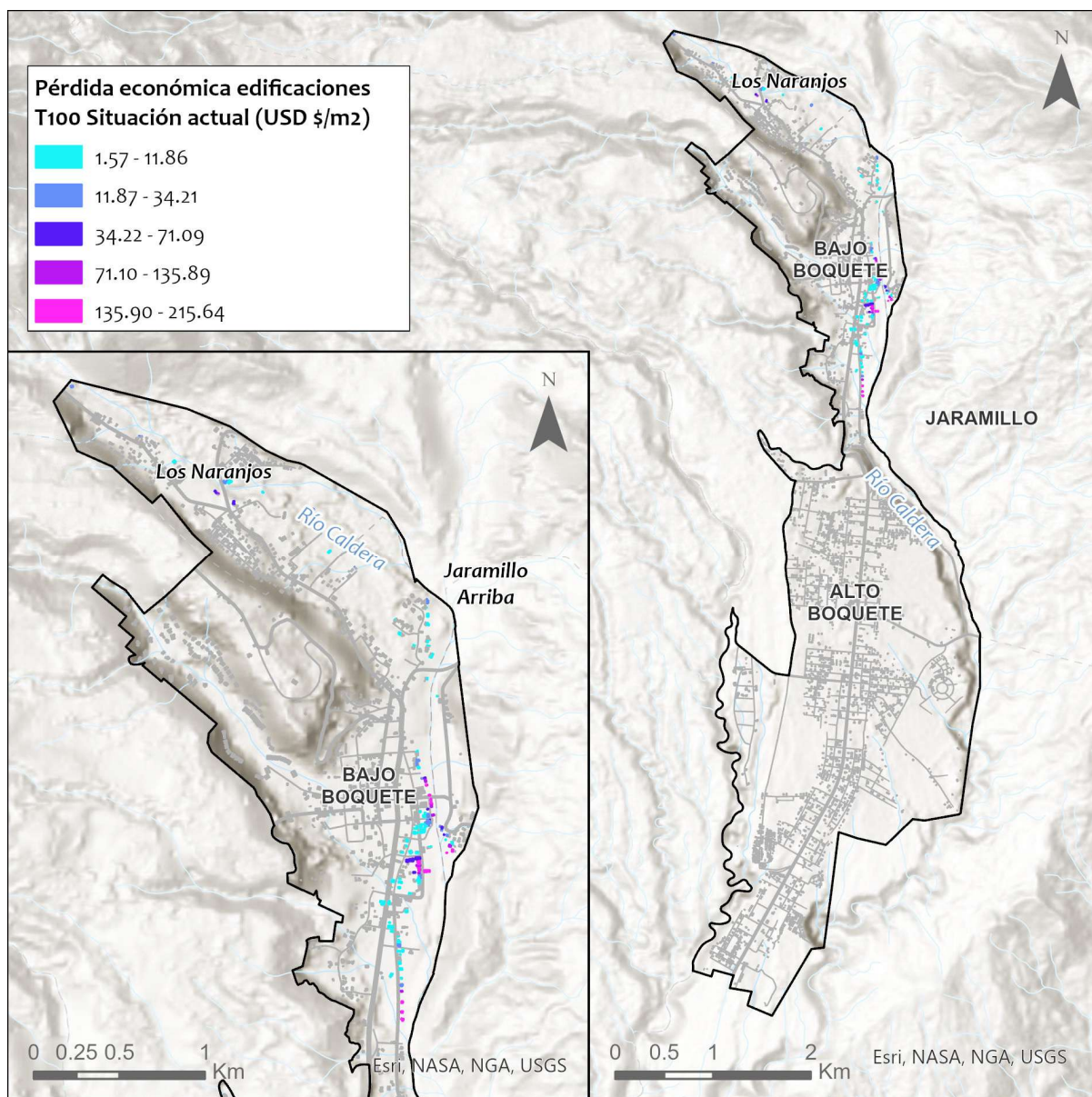


Figura 111. Distribución geográfica de la pérdida económica en edificaciones para 100 años de periodo de retorno (USD \$/m²) en la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

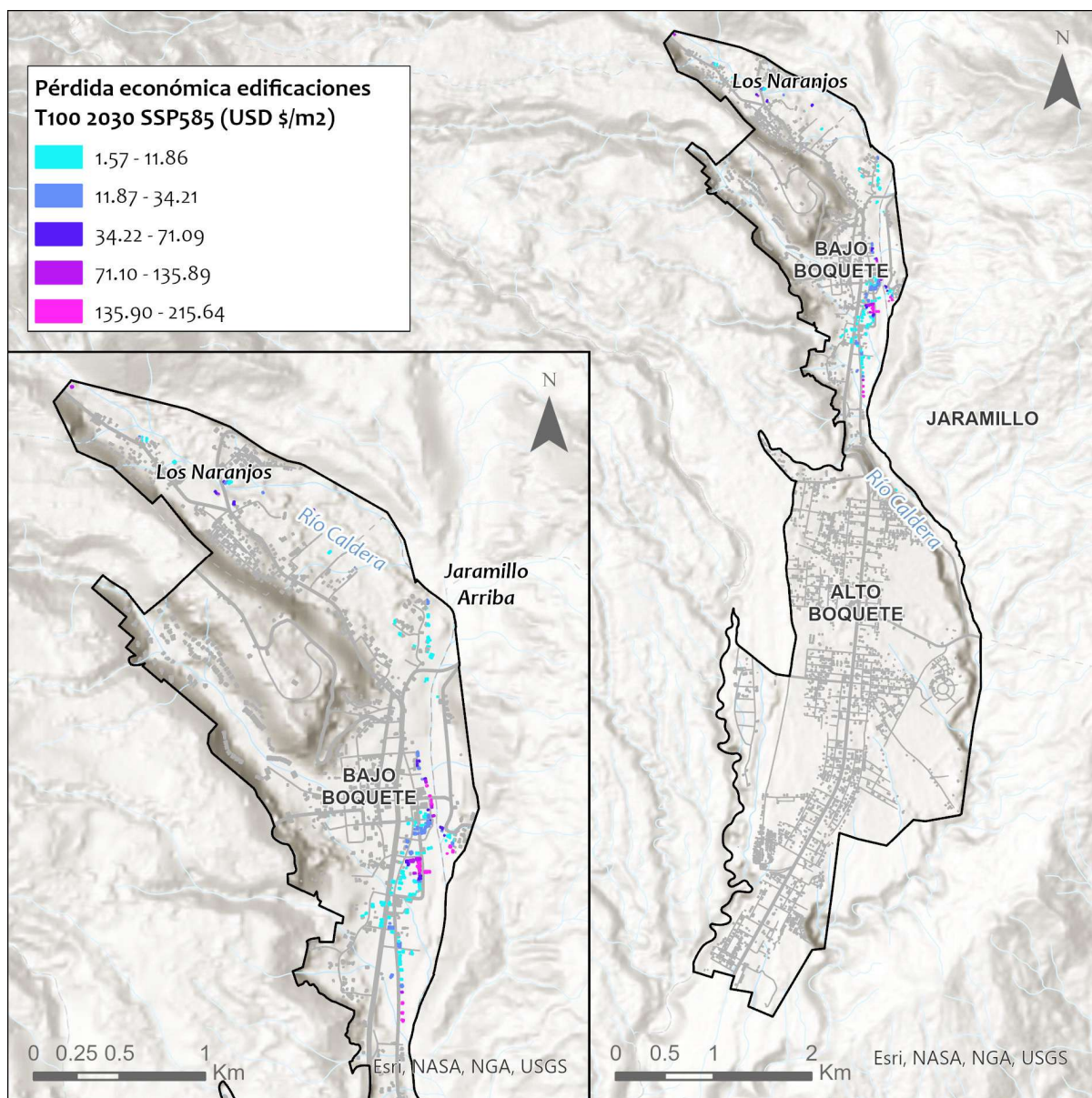


Figura 112. Distribución geográfica de la pérdida económica en edificaciones para 100 años de periodo de retorno (USD \$/m²) en el horizonte 2030 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

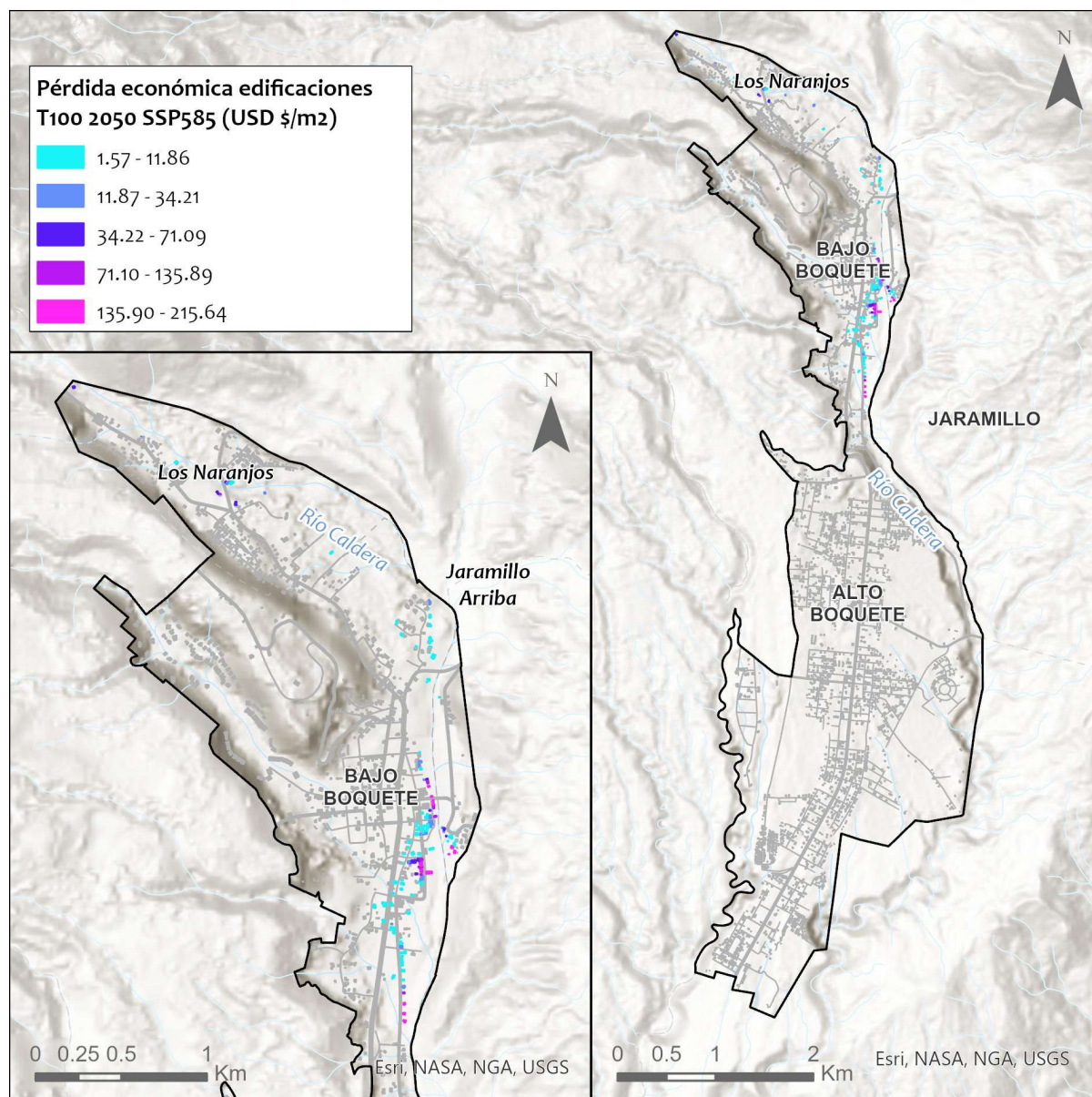


Figura 113. Distribución geográfica de la pérdida económica en edificaciones para 100 años de periodo de retorno (USD \$/m²) en el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

Riesgo económico infraestructuras críticas

Las inundaciones también pueden dañar infraestructuras críticas, de carácter público o privado, que además de sufrir un daño directo, inducen daños indirectos o sistémicos, derivados de la interrupción de los flujos o servicios que generan. En el ámbito de este estudio solo se evalúan los daños económicos directos, que son el equivalente a los daños directos en edificaciones, pero aplicados a infraestructuras críticas. Dependen del nivel máximo del agua en el lugar donde se encuentra cada infraestructura.

En la Tabla 28 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de daños en infraestructuras críticas para una inundación fluvial asociada a cada uno de los eventos y escenarios climáticos.

Indicador de riesgo de inundación	T10	T50	T100	PAE
SITUACIÓN ACTUAL				
Daños directos IC (MUSD \$)	0.051	0.107	0.134	0.009
Daños directos IC (% sobre el valor de reposición de las IC)	0.15	0.31	0.39	0.03
HORIZONTE 2030 SSP585				
Daños directos IC (MUSD \$)	0.086	0.127	0.149	0.013
Daños directos IC (% sobre el valor de reposición de las IC)	0.25	0.37	0.44	0.04
HORIZONTE 2050 SSP585				
Daños directos IC (MUSD \$)	0.051	0.119	0.132	0.009
Daños directos IC (% sobre el valor de reposición de las IC)	0.15	0.35	0.39	0.03

Tabla 28. Resultados de daños directos por inundación en IC. Valores relativos respecto del total inventariado.
Fuente: IHCantabria, 2024.

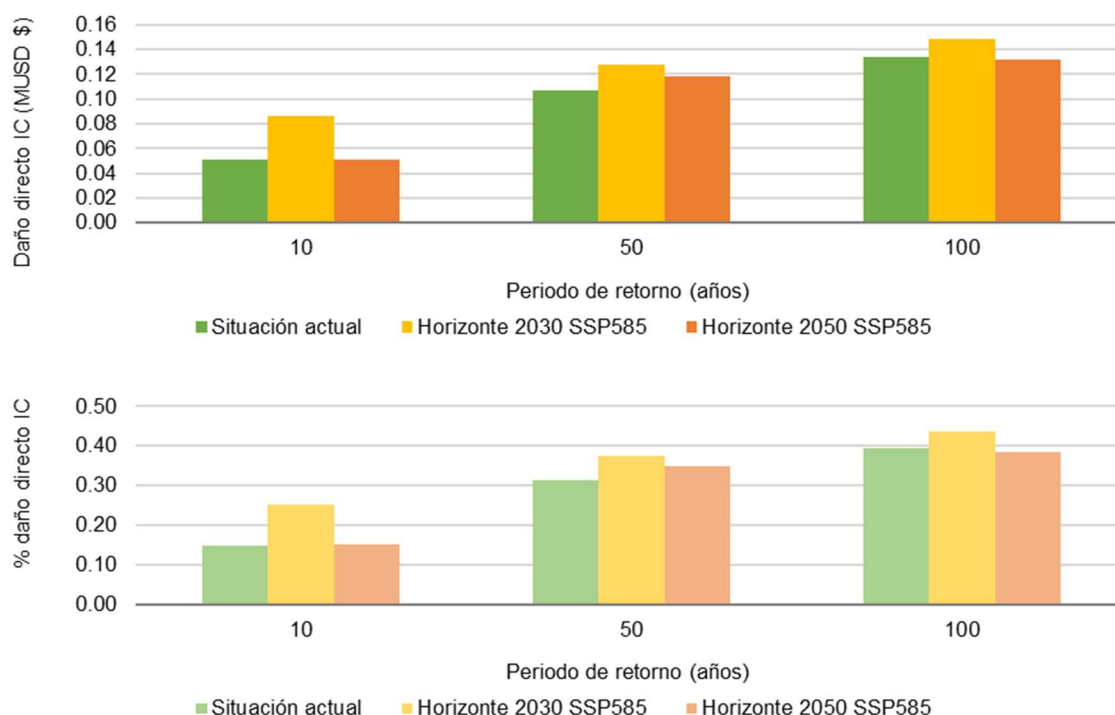


Figura 114. Resultados de daños directos por inundación en IC. Valores relativos respecto del total inventariado.
Fuente: IHCantabria, 2024.

Para la situación actual los resultados obtenidos indican que los daños directos pueden oscilar, para eventos de menor a mayor periodo de recurrencia, entre 51,000 USD \$ y 134,000 USD \$, con un valor medio anual de 9,000 USD \$. Estos daños representan entre un 0.15% y un 0.39% del valor económico de reposición inventariado de las IC, con un valor medio anual de 0.03%, lo que representa un valor muy bajo del total.

En cuanto a los escenarios con cambio climático los resultados, del mismo modo que en las edificaciones residenciales, apuntan a un aumento muy pequeño de los daños directos por inundación que pueden oscilar, para eventos de menor a mayor periodo de recurrencia, entre 86,000 USD \$ y 149,000 USD \$ para el horizonte 2030, escenario más desfavorable, con un valor medio anual de 13,000 USD \$. Estos daños representan en ese mismo escenario futuro entre un 0.25% y un 0.44% del valor económico de reposición inventariado de las edificaciones, con un valor medio anual de 0.04%.

En las Figura 115 y Figura 116 se presenta la distribución geográfica de la de la pérdida económica en edificaciones para el periodo de retorno de 100 años para la situación actual y el horizonte 2030 donde los valores incrementan ligeramente.

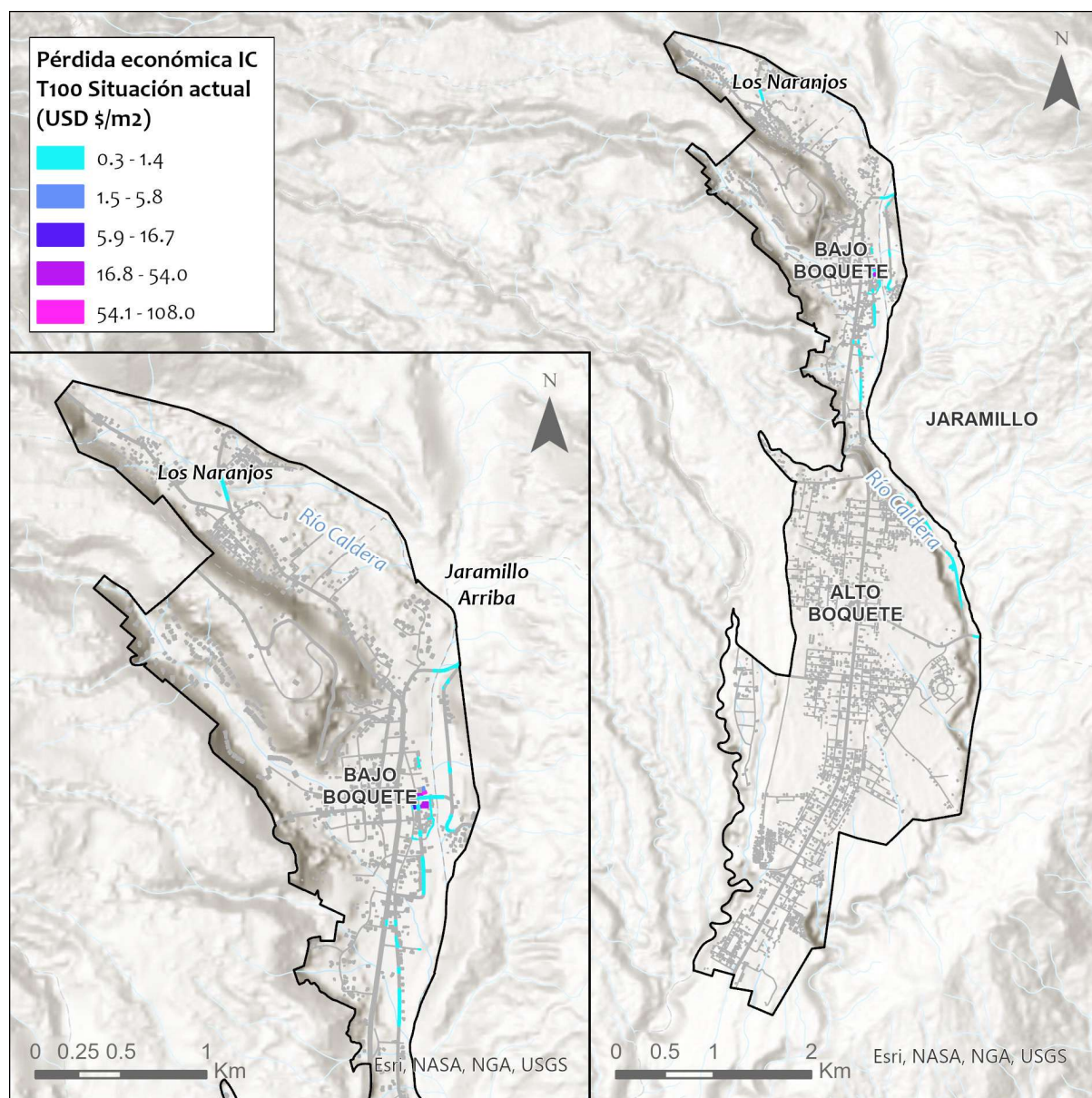


Figura 115. Distribución geográfica de la pérdida económica en IC para 100 años de periodo de retorno (USD \$/m²) en la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

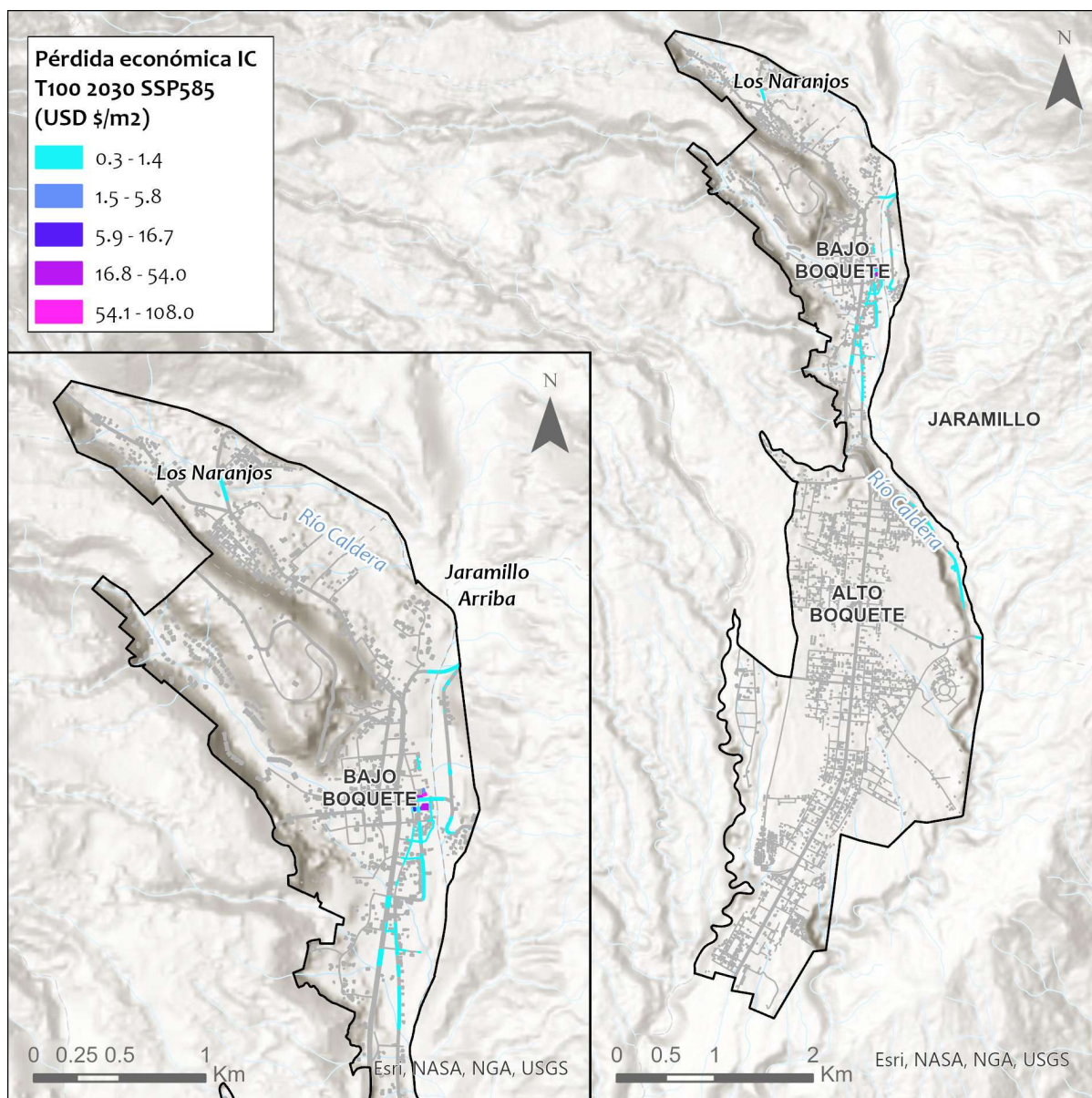


Figura 116. Distribución geográfica de la pérdida económica en IC para 100 años de periodo de retorno (USD \$/m²) en el horizonte 2030 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

Riesgo económico total por inundación

En este apartado se presentan los riesgos económicos totales teniendo en cuenta los riesgos directos tanto para las edificaciones como para las infraestructuras críticas para periodos de retorno y escenarios climáticos analizados.

Se presentan además los siguientes indicadores de riesgos económicos:

- Pérdida máxima probable (PMP): la PMP representa el valor de pérdida global para una tasa de excedencia dada. Dependiendo de la capacidad de la entidad para manejar el riesgo, se puede optar por gestionar pérdidas hasta determinado periodo de retorno (BID, 2019).
- Pérdida anual esperada (PAE): la PAE se calcula como la suma del producto entre las pérdidas esperadas para determinado evento, y la probabilidad de ocurrencia de dicho evento en un

periodo de un año, para todos los eventos estocásticos considerados. En términos probabilistas, la PAE es la esperanza matemática de la pérdida anual (BID, 2019).

- Índice de daños económicos totales, sobre el valor de la renta total de la zona afectada³ (%).

En la Tabla 29 se presentan los daños económicos totales y los indicadores de riesgos de desastres económicos para los escenarios y periodos de retorno considerados.

Indicador de riesgo de inundación	T10	T50	T100	PAE
SITUACIÓN ACTUAL				
Daños directos edificaciones (MUSD \$)	0.48	0.69	0.74	0.07
Daños directos IC (MUSD \$)	0.05	0.11	0.13	0.009
Daños totales (MUSD \$)	0.53	0.80	0.87	0.08
Daños totales (% sobre el valor de reposición total)	0.09	0.14	0.15	0.01
Índice de daños económicos (% daños sobre renta)	0.31	0.47	0.51	0.05
HORIZONTE 2030 SSP585				
Daños directos edificaciones (MUSD \$)	0.66	0.91	1.04	0.09
Daños directos IC (MUSD \$)	0.09	0.13	0.15	0.013
Daños totales (MUSD \$)	0.74	1.04	1.19	0.11
Daños totales (% sobre el valor de reposición total)	0.13	0.18	0.21	0.02
Índice de daños económicos (% daños sobre renta)	0.44	0.61	0.70	0.06
HORIZONTE 2050 SSP585				
Daños directos edificaciones (MUSD \$)	0.52	0.70	0.82	0.07
Daños directos IC (MUSD \$)	0.05	0.12	0.13	0.009
Daños totales (MUSD \$)	0.57	0.81	0.95	0.08
Daños totales (% sobre el valor de reposición total)	0.10	0.14	0.17	0.01
Índice de daños económicos (% daños sobre renta)	0.33	0.48	0.56	0.05

Tabla 29. Resultados de daños económicos por inundación. Valores relativos respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.

En la siguiente figura se presenta la curva de excedencia de las pérdidas económicas.

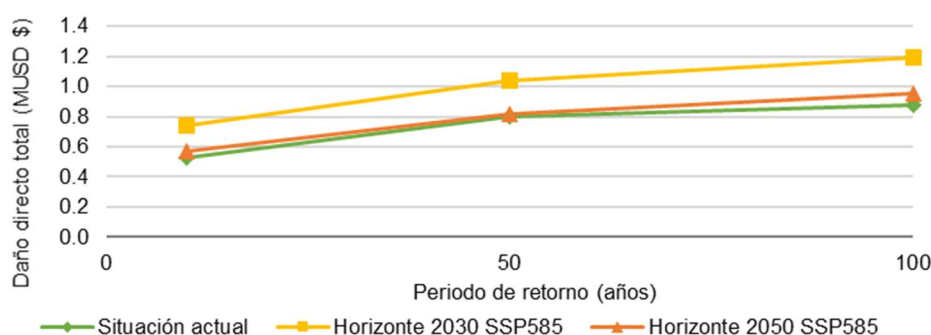


Figura 117. Curva de excedencia de pérdidas económicas. Fuente: IHCantabria, 2024.

³ PIB per cápita de Panamá (2023) Fuente: Indicadores del Banco Mundial (<https://data.worldbank.org/indicador/NY.GDP.PCAP.CD?locations=PA>)

Para la situación actual el riesgo económico total aumenta, como es de esperar, a medida que lo hace el periodo de retorno, desde los 0.53 MUSD \$ a los 0.87 MUSD \$, con un valor medio anual de 0.08 MUSD \$. Estos valores suponen entre un 0.09% y un 0.15% del valor de reposición total de las edificaciones y las infraestructuras críticas, y entre un 0.31% y un 0.51% del valor de la renta del área de estudio.

En el horizonte 2030 el riesgo económico total aumenta ligeramente respecto de la situación actual para todos los periodos de retorno con valores que van desde los 0.74 MUSD \$ a los 1.19 MUSD \$, con un valor medio anual de 0.11 MUSD \$. Estos valores suponen entre un 0.13% y un 0.21% del valor de reposición total de las edificaciones y las infraestructuras críticas, y entre un 0.44% y un 0.70% del valor de la renta del área de estudio.

Para el horizonte 2050 los daños son ligeramente mayores a los de la situación actual, con valores que van desde los 0.57 MUSD \$ a los 0.95 MUSD \$, con un valor medio anual de 0.08 MUSD \$. Estos valores suponen entre un 0.10% y un 0.17% del valor de reposición total de las edificaciones y las infraestructuras críticas, y entre un 0.33% y un 0.56% del valor de la renta del área de estudio.

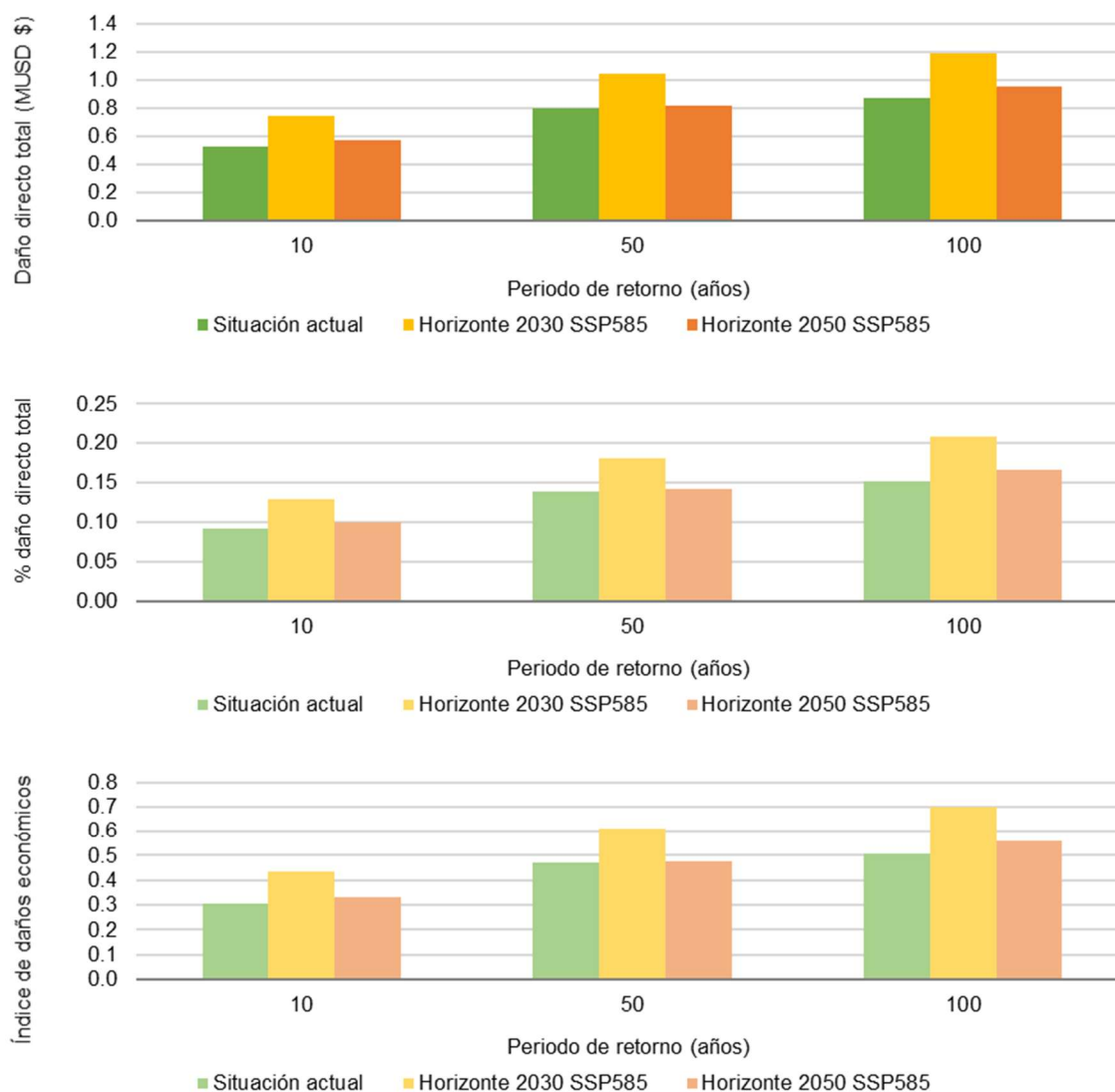


Figura 118. Comparación de resultados de daño económico en los escenarios climáticos considerados, para toda el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.

9.6.2. Evaluación de los daños sociales por inundación

En este apartado se presentan los riesgos sociales para todos los periodos de retorno analizados. Concretamente, se han obtenido:

- Número de personas afectadas por eventos de inundación: se define como el número de habitantes ubicados en lugares afectados por un evento y se ha obtenido como aquellas personas censadas en zonas cuya profundidad de agua asociada a un evento dado es superior a 0.3 m.
- Número de fallecidos y heridos graves

Además, se han obtenido los correspondientes indicadores de riesgos sociales debidos a inundaciones adimensionalizados con respecto a la población total:

- Índice de afectación humana (%): porcentaje de afectados por la amenaza.
- Índice de fatalidad: proporción de fallecidos y heridos graves por cada millón de habitantes.

Riesgo social por inundación

En la Tabla 30 se presentan los daños sociales y los indicadores de riesgos de desastres sociales para los escenarios y periodos de retorno considerados.

Indicador de riesgo de inundación	T10	T50	T100	PAE
SITUACIÓN ACTUAL				
Personas afectadas	181	287	340	27.28
Fallecidos y heridos graves	0.02	0.03	0.04	0.003
Índice de afectación (% personas afectadas respecto de la población total)	1.98	3.13	3.71	0.30
Índice de fatalidad (vidas por millón de habitantes)	1.74	3.30	4.19	0.28
HORIZONTE 2030 SSP585				
Personas afectadas	276	417	436	40.28
Fallecidos y heridos graves	0.03	0.05	0.06	0.004
Índice de afectación (% personas afectadas respecto de la población total)	3.01	4.55	4.76	0.44
Índice de fatalidad (vidas por millón de habitantes)	2.99	5.81	7.02	0.49
HORIZONTE 2030 SSP585				
Personas afectadas	196	307	364	29.36
Fallecidos y heridos graves	0.02	0.03	0.04	0.003
Índice de afectación (% personas afectadas respecto de la población total)	2.14	3.35	3.97	0.32
Índice de fatalidad (vidas por millón de habitantes)	1.97	3.63	4.84	0.32

Tabla 30. Resultados de daños sociales por inundación. Valores relativos respecto del total inventariado. Fuente: IHCantabria, 2024.

Para la situación actual las personas afectadas aumentan de 181 a 340, conforme lo hace el periodo de retorno de la inundación. Así, el 1.98% de la población se ve afectada directamente por eventos de inundación fluvial moderados con cierta frecuencia (cada 10 años); en el caso de un hipotético evento extremo, por ejemplo, una avenida de 100 años de periodo de retorno, este fenómeno podría afectar, con variada intensidad, al 3.71% de la población.

Inundaciones de distinta magnitud producen un índice de fatalidad entre 1.74 y 4.19 (eventos de 10 y 100 años de periodo de retorno, respectivamente), lo que da una fatalidad media anualizada de 0.28.

En el horizonte 2030 cambio climático, las personas afectadas aumentan ligeramente respecto de la situación actual para todos los periodos de retorno con valores que van 276 desde a 436 personas afectadas lo que supone un 3% a un 4.76% de la población inventariada para 10 y 100 años de periodo de retorno. En cuanto al índice de fatalidad este va de 3 a 7 (eventos de 10 y 100 años de periodo de retorno, respectivamente), lo que da una fatalidad media anualizada de 0.50.

En el horizonte 2050, del mismo modo que para los daños económicos, hay un número levemente mayor población afectada, con valores que van 196 desde a 364 personas afectadas lo que supone un 2.14% a un 3.97% de la población inventariada para 10 y 100 años de periodo de retorno. En cuanto al índice de fatalidad este va de 1.97 a 4.84 (eventos de 10 y 100 años de periodo de retorno, respectivamente), lo que da una fatalidad media anualizada de 0.32.

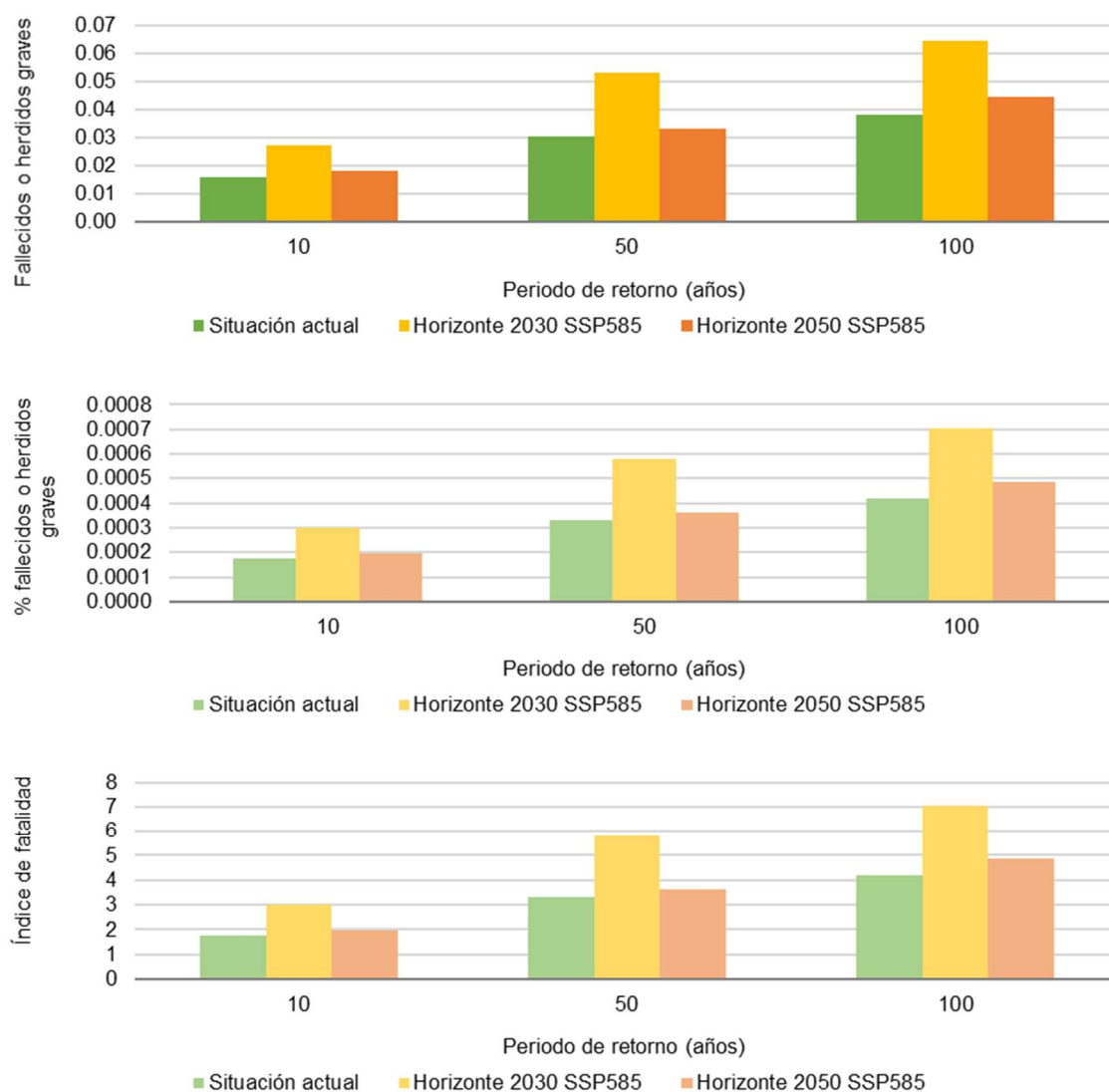


Figura 119. Comparación de resultados de daño social en los escenarios climáticos considerados, para toda el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.

En las Figura 120, Figura 121 y Figura 122 se presenta la distribución geográfica de la pérdida de vidas humanas para el periodo de retorno de 100 años y escenarios climáticos analizados.

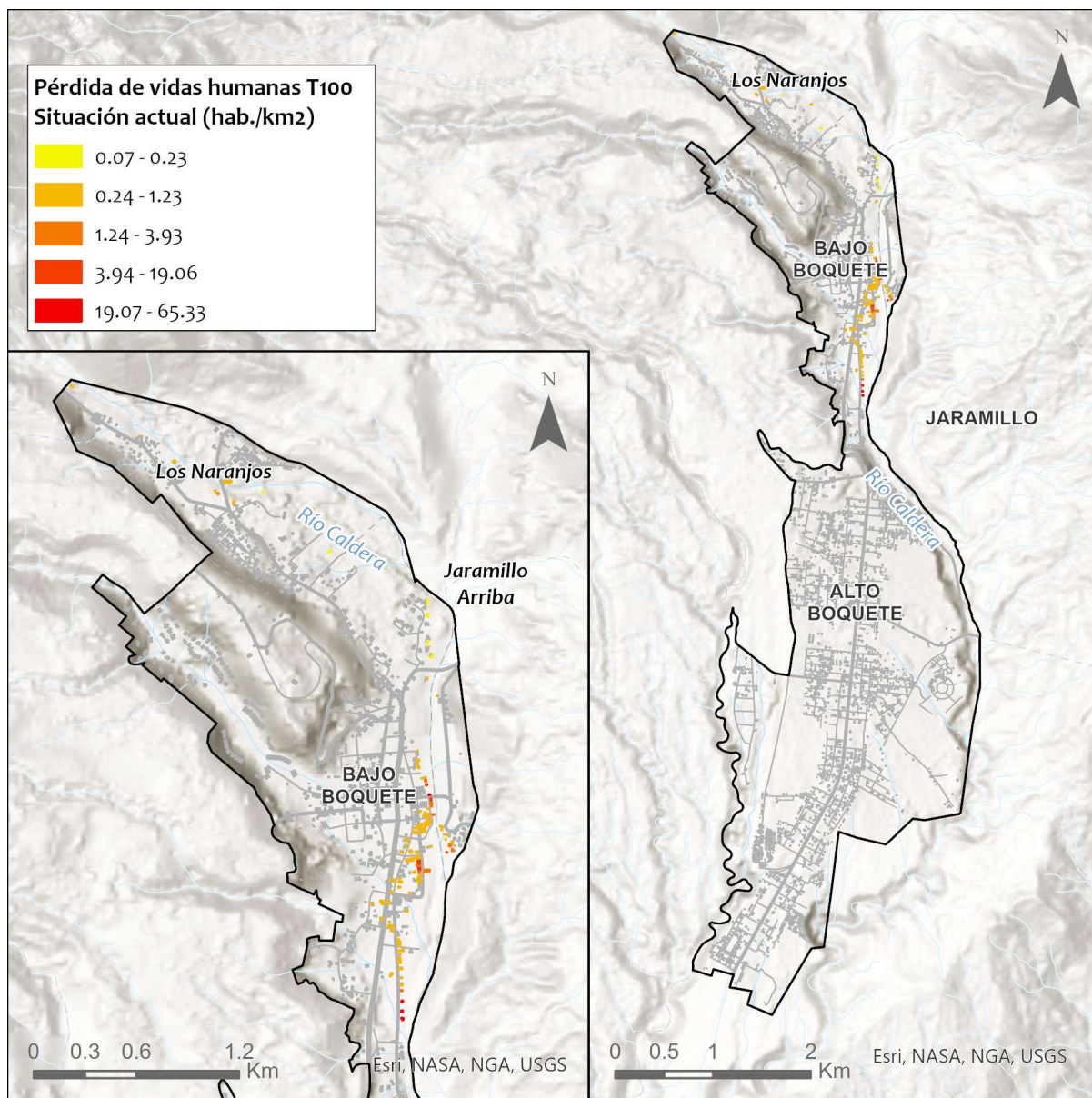


Figura 120. Distribución geográfica de la pérdida de vidas humanas (hab./km²) para 100 años de periodo de retorno en la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

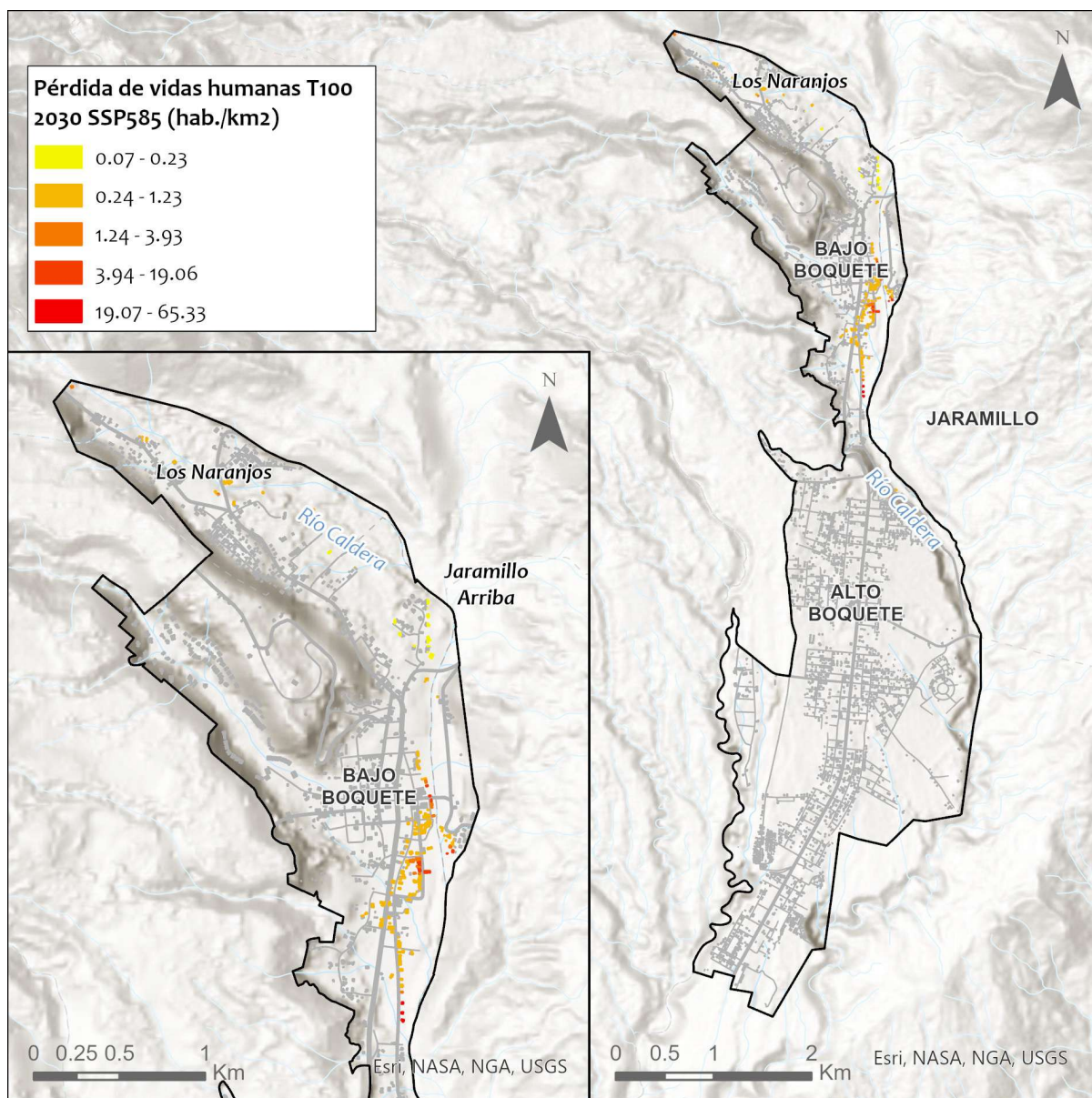


Figura 121. Distribución geográfica de la pérdida de vidas humanas (hab./km²) para 100 años de periodo de retorno en el horizonte 2030 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

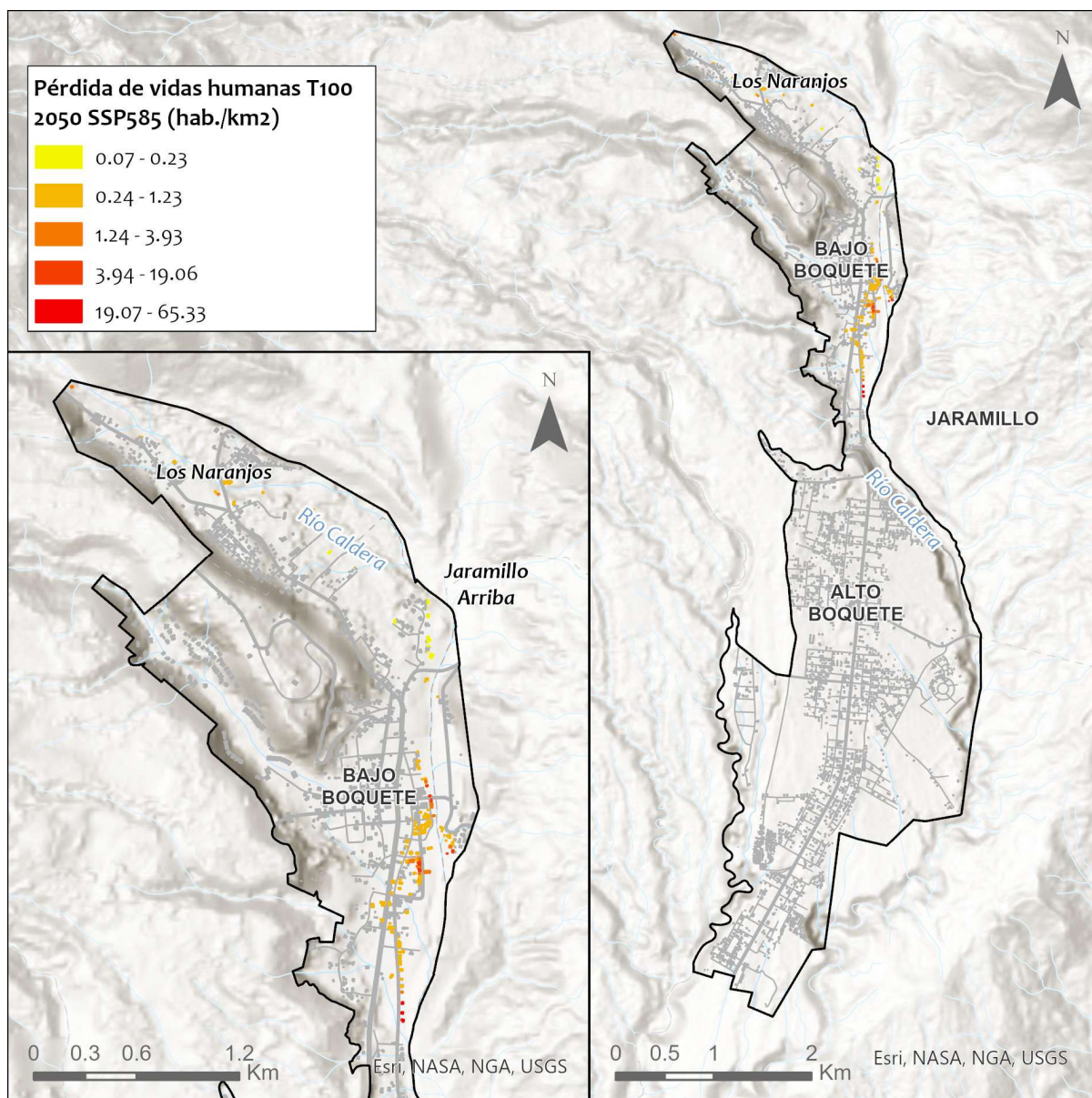


Figura 122. Distribución geográfica de la pérdida de vidas humanas (hab./km²) para 100 años de periodo de retorno en el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

10. ESTUDIO DE RIESGO POR OLA DE CALOR

Las olas de calor pueden definirse como periodos de temperatura anormalmente alta que se mantienen varios días y afectan a una parte importante de la geografía. Existen diversos criterios que definen este tipo de eventos en función de las variables analizadas (temperaturas máxima, media y mínima; humedad, etc.), del umbral de temperatura establecido (valor fijo o estadístico) y de la duración mínima del evento (días consecutivos por encima del umbral).

Su estudio y monitoreo son de gran importancia debido a la relevancia para la salud pública (deshidratación y golpes de calor, problemas respiratorios debido al empeoramiento de la calidad del aire, sobre todo en población vulnerable), la economía (la población trabajadora expuesta a altas temperaturas diurnas, pero sobre todo nocturnas, no descansa ni se recupera correctamente lo que supone un aumento de los riesgos laborales y puede incurrir en bajas médicas que impacten en la economía de las empresas), la gestión de recursos energéticos (debido a la alta demanda energética que tiene lugar durante los eventos de ola de calor), la planificación de respuesta a la emergencia y la adaptación al cambio climático.

De las tres áreas de estudio analizadas en Chiriquí, Dolega es la más afectada por las olas de calor, por lo que es el área seleccionado para analizar este fenómeno y el riesgo que trae aparejado para la población.

10.1. Caracterización de la amenaza

El objetivo de este apartado es la caracterización de la amenaza de ola de calor en el área de estudio de Dolega en cada uno de los escenarios climáticos analizados. En este caso el índice que va a caracterizar la amenaza es el Heat Index (HI) o sensación térmica.

Es un índice que mide la sensación de incomodidad del ser humano en ambientes exteriores debido al calor. Este índice de calor es una medida de lo que siente el cuerpo humano (sensación térmica) por la combinación de la temperatura ambiente y la humedad relativa del aire, válida para ambientes exteriores. Esta medida se realiza en grados centígrados (°C), aunque no es una temperatura real, sino una temperatura percibida. Ayuda a valorar la mayor dificultad que tiene el organismo para bajar la temperatura corporal mediante la evaporación de sudor sobre la piel, por efecto de la humedad ambiente; se trata de indicador muy efectivo cuando la temperatura es superior a 26°C y la humedad es de al menos el 40%, como es el caso del área de estudio.

Este índice es ampliamente utilizado por el Servicio Nacional de Clima (NWS) de la NOAA (EEUU), y se basa en calcular una temperatura equivalente, que incluye el efecto de la humedad en la capacidad humana para mantener el equilibrio térmico mediante la transpiración:

$$\begin{aligned} \text{Heat Index (HI)} = & -42.379 + 2.04901523(T_f) + 10.14333127(\text{RH}) - 0.22475541(T_f)(\text{RH}) \\ & - (6.83783 * 10^{-3})(T_f^2) - (5.481717 * 10^{-2})(\text{RH}^2) + (1.22874 * 10^{-3})(T_f^2)(\text{RH}) \\ & + (8.5282 * 10^{-4})(T_f)(\text{RH}^2) - (1.99 * 10^{-6})(T_f^2)(\text{RH}^2) \end{aligned}$$

Donde:

T_f : temperatura del aire (°F)

RH: humedad relativa (%)

Con base en esta definición y los datos de temperatura y humedad relativa espacialmente distribuidos obtenidos del Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Generación del Atlas Interactivo de Visualización de los Resultados para la República de Panamá (IHCantabria, 2024) se ha calculado la sensación térmica media anual en cada uno de los barrios y lugares poblados del área de estudio de Dolega para el escenario climático actual y el horizonte 2050 en el escenario SSP5-8.5 con cambio climático (Figura 123 y Figura 124).

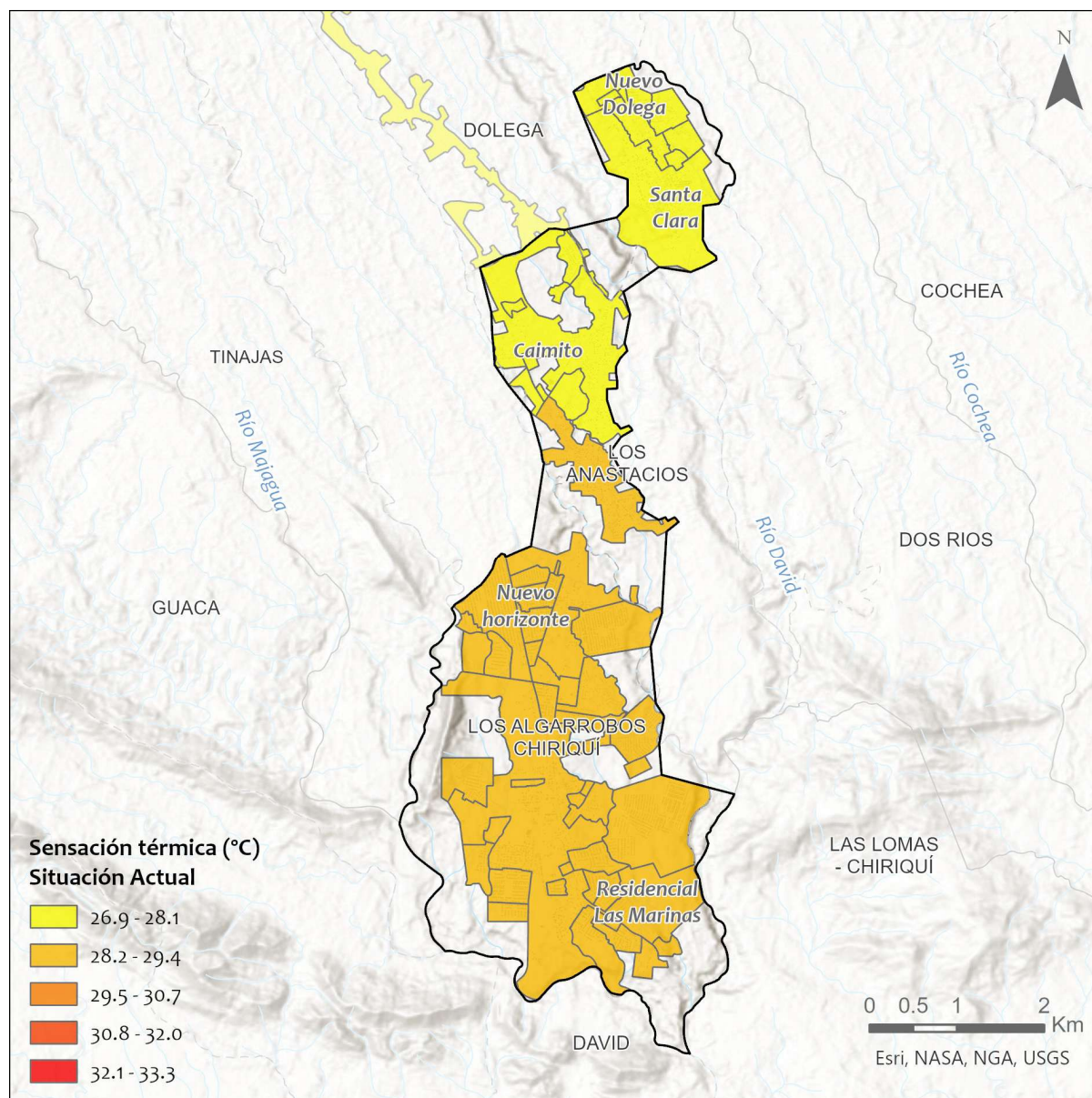


Figura 123. Distribución geográfica de la sensación térmica media anual (°C) en el área de estudio para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

Como se puede observar en las figuras, la sensación térmica media se distribuye de menor a mayor de norte a sur, siendo el corregimiento con mayor HI Los Algarrobos situado al sur del área de estudio.

Para el horizonte 2050 con cambio climático, la sensación térmica mantiene la distribución espacial del escenario climático actual incrementando entre 3°C y 4°C en el área de estudio, lo que se puede denominar como un cambio importante en el índice.

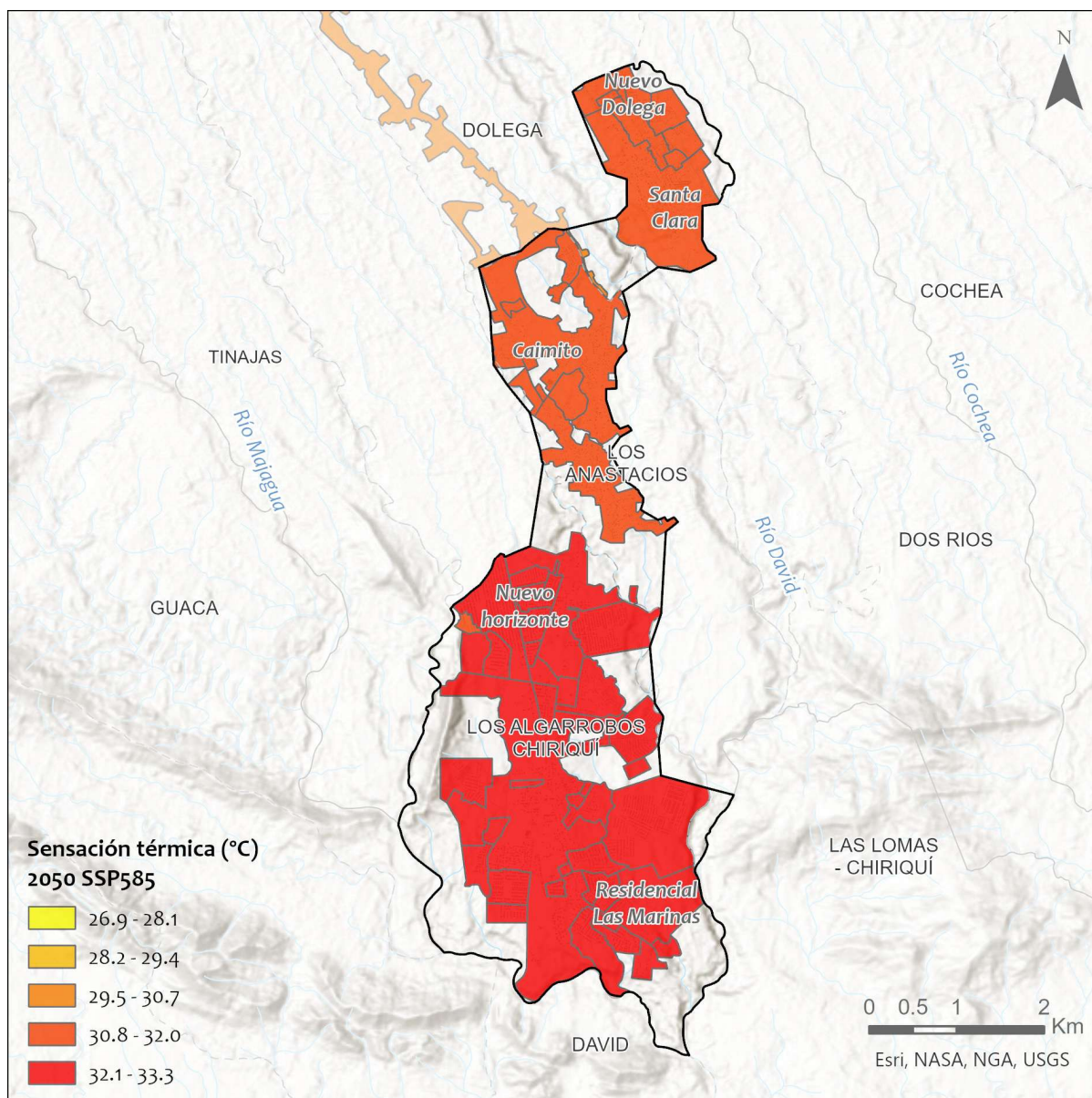


Figura 124. Distribución geográfica de la sensación térmica media (°C) en el área de estudio para el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

10.2. Caracterización de la vulnerabilidad

En este apartado se analizan los principales indicadores de vulnerabilidad relevantes para determinar el riesgo de ola de calor.

En cuanto a los indicadores de vulnerabilidad, se han considerado los siguientes:

- Densidad de población. Las zonas más densas suelen ser más vulnerables al fenómeno.
- Porcentaje de población sensible. La proporción de ancianos y niños es un factor de vulnerabilidad a las olas de calor bien documentado.
- Porcentaje de mujeres: Las mujeres son más vulnerables a las olas de calor por una combinación de factores fisiológicos, sociales, económicos y de roles de género.

- Necesidades básicas insatisfechas (NBI). Identifican carencias críticas en una población y caracterizan la pobreza. En este caso, utiliza indicadores directamente relacionados con dos áreas de necesidades básicas de las personas (vivienda y servicios básicos), disponibles en los censos de población y vivienda.
- Porcentaje de hogares que no cuentan con aire acondicionado.
- Accesibilidad a los centros sanitarios.
- Zonas sin bosques o áreas verdes.

Todas estas variables se obtienen con datos del del XII Censo de Población y VIII de Vivienda de Panamá del año 2023 del INEC a nivel de barrio urbano o lugar poblado.

10.2.1. Densidad de población

Las zonas más densamente pobladas son más vulnerables frente a las olas de calor por varias razones:

- Efecto isla de calor urbano (en olas de calor): las áreas densamente pobladas, especialmente en las ciudades, tienden a ser más cálidas que las áreas rurales circundantes debido a la acumulación de materiales como el asfalto, el concreto y los edificios, que absorben y retienen calor durante el día. Impacto: Durante las olas de calor, este fenómeno agrava las temperaturas en las ciudades, elevándolas aún más en comparación con las zonas menos urbanizadas, lo que aumenta el riesgo de enfermedades relacionadas con el calor, como golpes de calor, deshidratación y agotamiento.
- Infraestructura inadecuada o sobrecargada: las infraestructuras de refrigeración, como los sistemas de aire acondicionado, pueden verse sobrecargadas en áreas densamente pobladas, lo que lleva a fallos en la red eléctrica y cortes de energía. Esto deja a muchas personas sin acceso a sistemas de enfriamiento adecuados.
- Concentración de población vulnerable: las ciudades densamente pobladas a menudo albergan una gran proporción de personas vulnerables, como ancianos, personas sin hogar y familias de bajos ingresos, quienes tienen menos acceso a recursos para protegerse de temperaturas extremas. Estos grupos son más susceptibles a problemas de salud durante las olas de calor.
- Calidad del aire deteriorada: durante las olas de calor, la mala calidad del aire en las zonas densamente pobladas empeora debido a la acumulación de contaminantes y la reducción del flujo de aire. Esto puede agravar problemas respiratorios, especialmente en personas con afecciones como asma o enfermedades cardíacas.
- Menor acceso a espacios verdes y áreas de refugio: las áreas densamente pobladas suelen tener menos espacios verdes, como parques o áreas abiertas, que pueden actuar como "pulmones" para mitigar el calor. La falta de vegetación urbana y sombra hace que los habitantes estén más expuestos al calor.
- Viviendas mal adaptadas: en áreas densamente pobladas, muchas viviendas son pequeñas, con mala ventilación o aislamiento insuficiente, lo que las hace menos aptas para soportar olas

de calor. En particular, en zonas informales o de bajos ingresos, las viviendas no están diseñadas para manejar cambios extremos de temperatura, lo que aumenta la vulnerabilidad de sus habitantes.

- Propagación de enfermedades: las olas de calor en zonas densamente pobladas pueden contribuir a la propagación de enfermedades transmitidas por vectores, como el dengue o el zika, ya que el calor extremo y la falta de agua en áreas urbanas densas pueden crear condiciones propicias para la proliferación de mosquitos.
- Falta de planificación urbana adecuada: las áreas densamente pobladas a menudo crecen rápidamente sin una adecuada planificación urbana. Esto incluye la falta de infraestructura resiliente ante olas de calor, como espacios verdes, sistemas de refrigeración y calefacción eficientes, o medidas de respuesta ante emergencias climáticas.

En la Figura 125 se presenta la distribución espacial de la densidad de población a nivel de barrio urbano o lugar poblado (Censo 2023) en el área de estudio.

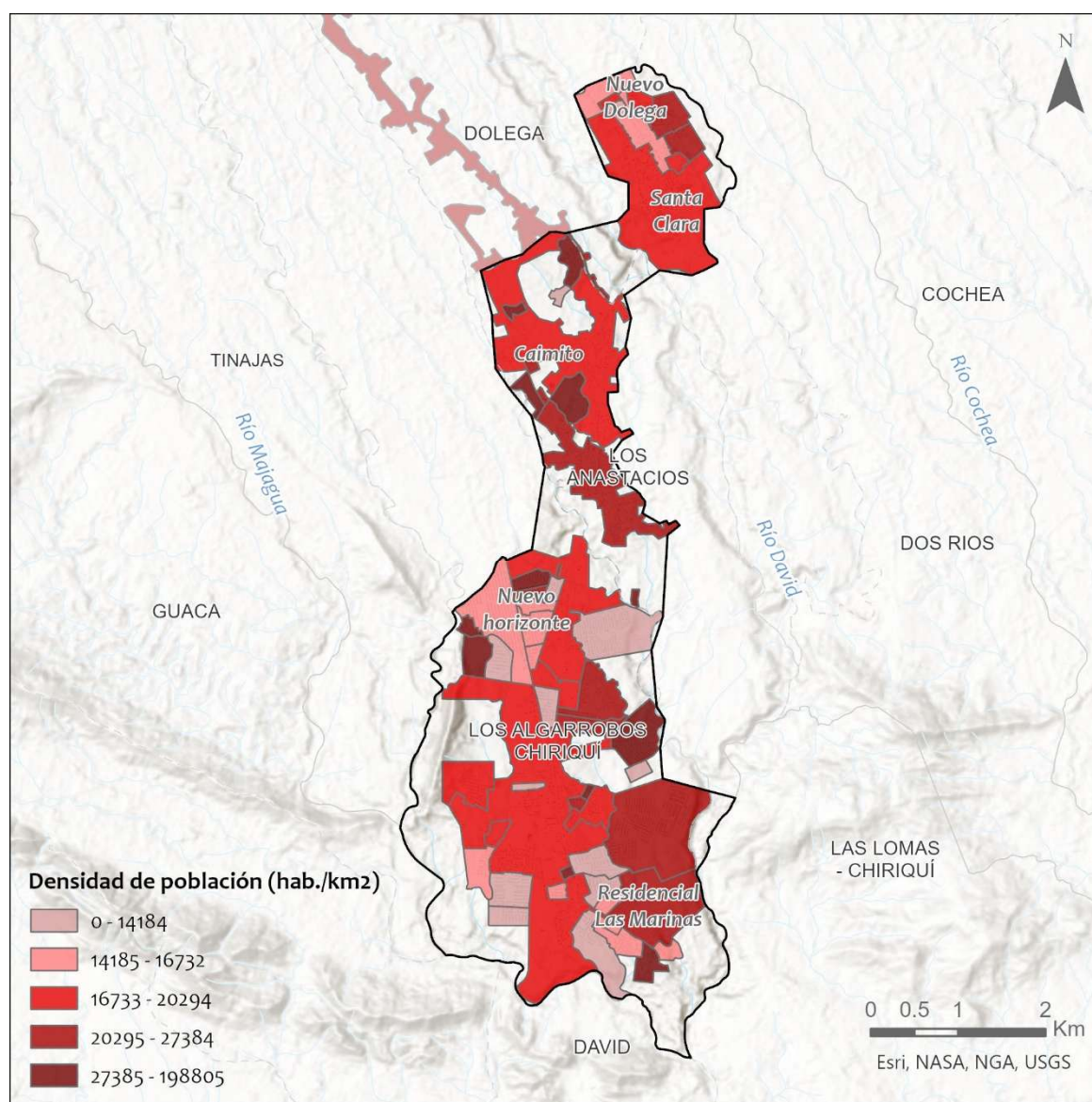


Figura 125. Densidad de población en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

10.2.2. Población sensible

En la Figura 126 se presenta la distribución espacial de la población sensible, entendida como la población menor de 5 años y mayor de 65 años, a nivel de barrio urbano o lugar poblado (Censo 2023) en el área de estudio.

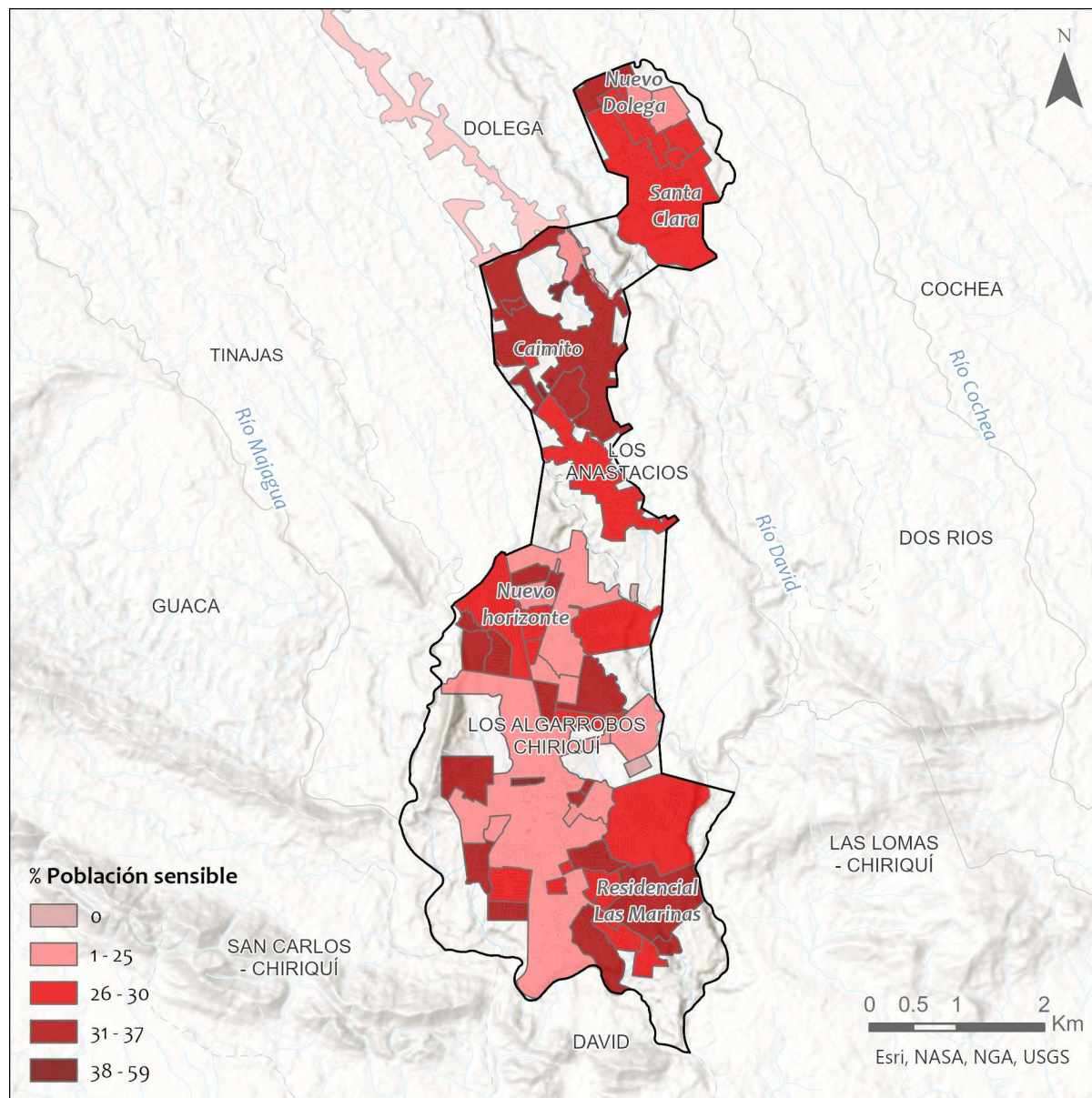


Figura 126. Porcentaje de población sensible en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

Las zonas con una mayor concentración de población sensible, como niños y ancianos, son más vulnerables frente a las olas de calor debido a varias razones relacionadas con las características fisiológicas y socioeconómicas de estos grupos:

- Termorregulación menos eficiente:
 - o Niños: Los niños, especialmente los muy pequeños, tienen un sistema de termorregulación inmaduro. Esto significa que su cuerpo tiene menos capacidad para

mantener una temperatura interna constante, lo que los hace más propensos a sufrir golpes de calor o deshidratación durante olas de calor.

- Ancianos: Con la edad, el cuerpo pierde parte de su capacidad para regular la temperatura. Esto se debe a varios factores, como la disminución de la sudoración, la menor sensación de sed y la reducción de la eficiencia cardiovascular. Los ancianos también son más propensos a tener enfermedades crónicas que pueden agravar los efectos del calor.
- Mayor prevalencia de condiciones de salud preexistentes:
 - Niños: Los niños, en especial aquellos con enfermedades crónicas como el asma, pueden verse más afectados por el calor extremo, que puede agravar problemas respiratorios o causar agotamiento por calor.
 - Ancianos: Los ancianos suelen tener enfermedades preexistentes como enfermedades cardíacas, diabetes o problemas respiratorios que se agravan con el calor extremo, aumentando el riesgo de complicaciones graves e incluso la mortalidad.
- Dependencia de cuidadores:
 - Niños: Los niños dependen de los adultos para su cuidado. Si los cuidadores no reconocen o no pueden actuar rápidamente ante los síntomas del golpe de calor, los niños pueden estar en mayor riesgo.
 - Ancianos: Muchos ancianos dependen de cuidadores o viven solos, lo que puede dificultar el acceso a ayuda rápida durante una ola de calor. Además, pueden no tener los recursos o el conocimiento para mantenerse frescos de manera efectiva.

En resumen, la combinación de factores fisiológicos, dependencia, condiciones de salud preexistentes y acceso limitado a recursos hace que los niños y ancianos sean particularmente vulnerables frente a las olas de calor.

10.2.3. Mujeres

La vulnerabilidad de las mujeres frente a las olas de calor se debe a varios factores interrelacionados:

- Diferencias biológicas:
 - Termorregulación y composición corporal: Las mujeres suelen tener una mayor proporción de grasa corporal y menos masa muscular que los hombres. La grasa corporal actúa como un aislante, lo que puede hacer que las mujeres tengan más dificultades para disipar el calor. Además, la menor masa muscular puede reducir la capacidad del cuerpo para generar calor y sudor, lo que afecta la regulación de la temperatura corporal.
 - Hormonas: Las hormonas sexuales, como el estrógeno, pueden influir en la termorregulación. Durante el ciclo menstrual, el embarazo o la menopausia, las mujeres pueden experimentar cambios en la temperatura corporal que las hagan más susceptibles al calor.

- Roles de género y responsabilidades:
 - o Cuidado de otros: En muchas culturas, las mujeres son a menudo las principales cuidadoras de niños, ancianos y personas enfermas. Durante las olas de calor, esta responsabilidad adicional puede hacer que descuiden su propio bienestar, aumentando su vulnerabilidad al estrés térmico.
 - o Exposición al calor: En algunos contextos laborales, las mujeres pueden estar expuestas a ambientes de trabajo donde el calor es intenso, como en la agricultura o la manufactura, sin los recursos adecuados para protegerse.
- Condiciones de salud preexistentes: las mujeres tienen una mayor prevalencia de ciertas condiciones de salud, como enfermedades autoinmunes, que pueden ser exacerbadas por el calor extremo. Además, las mujeres mayores suelen tener enfermedades crónicas como osteoporosis o problemas cardiovasculares, que aumentan el riesgo durante las olas de calor.

En la Figura 127 se presenta la distribución espacial del porcentaje de mujeres a nivel de barrio urbano o lugar poblado (Censo 2023) en el área de estudio.

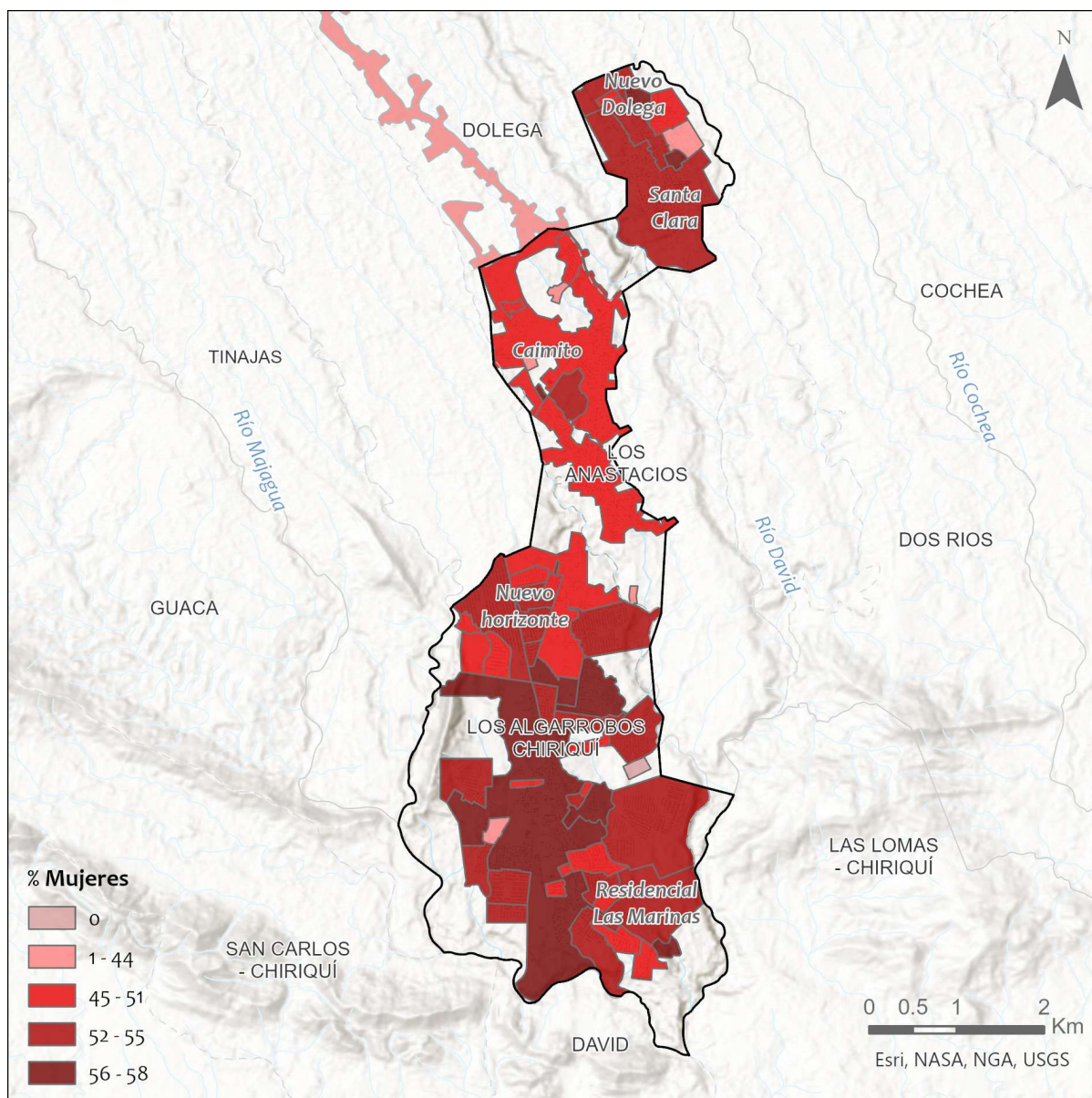


Figura 127. Porcentaje de mujeres en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

10.2.4. Necesidades básicas insatisfechas (NBI)

Las zonas con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) son más vulnerables frente a las olas de calor por diversas razones que se relacionan principalmente con la pobreza, la falta de infraestructura adecuada y la limitada capacidad de respuesta ante situaciones extremas. A continuación, se detallan las principales razones:

1. Vivienda inadecuada:

Calidad de la construcción: En zonas con NBI, las viviendas suelen ser de baja calidad, mal aisladas y construidas con materiales precarios. Esto significa que no pueden proteger adecuadamente a sus habitantes de temperaturas extremas.

Hacinamiento: El hacinamiento es común en áreas con NBI, lo que puede aumentar la exposición al calor, ya que muchas personas comparten espacios reducidos que no están diseñados para manejar cambios extremos de temperatura.

2. Acceso limitado a servicios básicos:

Falta de electricidad: Muchas de estas zonas carecen de acceso regular o estable a electricidad, lo que limita el uso de dispositivos de enfriamiento (como ventiladores o aires acondicionados) o de calefacción en invierno.

Agua potable y saneamiento: La falta de acceso a agua potable limita la capacidad de las personas para mantenerse hidratadas durante las olas de calor, lo que es crucial para prevenir problemas de salud relacionados con el calor. Además, la falta de saneamiento adecuado puede agravar los problemas de salud con temperaturas extremas.

3. Pobreza y acceso limitado a recursos:

Incapacidad para adquirir medios de protección: Las personas en zonas con NBI a menudo no tienen los recursos financieros para comprar ventiladores, aires acondicionados, o ropa adecuada para protegerse del calor.

Dependencia de empleo informal: Muchas personas en estas áreas dependen de trabajos informales que no les permiten quedarse en casa durante condiciones climáticas extremas. Esto aumenta su exposición y vulnerabilidad.

4. Acceso limitado a atención médica:

Salud precaria: Las personas en zonas con NBI suelen tener acceso limitado a servicios de salud y, en muchos casos, ya viven con problemas de salud crónicos no tratados que pueden empeorar durante las olas de calor.

Falta de infraestructura médica: Incluso si existe alguna forma de atención médica en estas áreas, a menudo está mal equipada para manejar emergencias relacionadas con el calor extremo, como golpes de calor.

5. Desigualdades sociales y económicas:

Vulnerabilidad social: Las zonas con NBI tienden a tener una alta concentración de grupos vulnerables, como niños, ancianos, y personas con discapacidades, quienes son más susceptibles a las temperaturas extremas.

Bajo nivel educativo: El bajo nivel educativo en estas áreas puede significar que las personas no estén informadas o no comprendan cómo protegerse adecuadamente durante olas de calor.

6. Redes de apoyo comunitario débiles:

Menor cohesión social: En áreas con NBI, las redes de apoyo social pueden ser más débiles o estar menos organizadas, lo que limita la capacidad de las comunidades para ayudarse mutuamente en situaciones de emergencia.

Falta de planificación y recursos de emergencia: Estas zonas suelen recibir menos atención en términos de planificación y recursos para emergencias, lo que las deja más expuestas cuando ocurren fenómenos extremos.

7. Efecto acumulativo de la pobreza:

Ciclo de vulnerabilidad: Las personas que viven en la pobreza extrema, enfrentan una acumulación de desventajas que las hace más vulnerables a cualquier crisis, incluidas las olas de calor. Las condiciones de vida, salud y trabajo interactúan de manera que cualquier perturbación climática exacerba su situación de vulnerabilidad.

En resumen, las zonas con NBI son más vulnerables frente a las olas de calor porque carecen de la infraestructura, los recursos, y los servicios básicos necesarios para protegerse adecuadamente contra las temperaturas extremas. La pobreza y la marginalización intensifican la exposición y el riesgo, haciendo que los impactos de estos eventos climáticos sean más severos para las personas que viven en estas áreas.

Para el cálculo de este indicador de vulnerabilidad se ha calculado un índice agregado de NBI para los hogares del Censo de 2023 en función de las variables y pesos que se describen en la Tabla 31.

Indicador NBI	Peso	Descripción	Variables del Censo de 2023
Precariedad de los materiales de la vivienda	15	Al menos una de las siguientes condiciones se cumple: Si en el área urbana la casa cuenta con paredes de madera, quincha adobe, metal, palma paja o penca caña o bambú o palos, otros materiales (cartón) o sin paredes. O si el material de los techos es de madera, palma, paja, pencas u otros materiales. O si el material de los pisos es de madera, tierra u otros materiales.	4.MATERIAL DE LAS PAREDES 5.MATERIAL DEL TECHO 6.MATERIAL DEL PISO
Personas por habitación o hacinamiento	15	Una habitación (excluyendo la cocina, servicio y el baño) es compartida por tres (3) o más personas.	7a. DORMITORIOS CANTIDAD DE PERSONAS
Carencia de electricidad	15	La fuente principal de alumbrado es querosín o diésel, gas, velas u otro.	14.TIPO DE ALUMBRADO
Carencia de saneamiento mejorado	20	El hogar cuenta con un servicio de hueco o letrina exclusivo de la vivienda o compartido, el servicio está conectado a alcantarillado o tanque séptico, pero es compartido con otras viviendas o si no cuenta con servicio sanitario.	11.SERVICIO SANITARIO
Carencia de fuentes de agua mejorada para beber	35	La principal fuente de agua para beber es: pozo brocal no protegido, o pozo superficial o carro cisterna o río, quebrada, lago, estanques, arroyo, agua de lluvia u otra fuente. En el caso de hogares cuya principal fuente de agua es un acueducto público del IDAAN, serán privados si reciben el agua menos de siete días a la semana o menos de 12 horas al día durante el verano o el invierno.	8.ABASTECIMIENTO DE AGUA 10.DÍAS A LA SEMANA EN ESTACIÓN SECA 10.HORAS AL DÍA EN ESTACIÓN SECA 10.DÍAS A LA SEMANA EN ESTACIÓN LLUVIOSA 10.HORAS AL DÍA EN ESTACIÓN LLUVIOSA

Tabla 31. Variables y pesos que componen el índice agregado de NBI para los hogares del área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

En la Figura 128 se presenta la distribución espacial del porcentaje de hogares con NBI a nivel de barrio urbano o lugar poblado (Censo 2023) en el área de estudio.

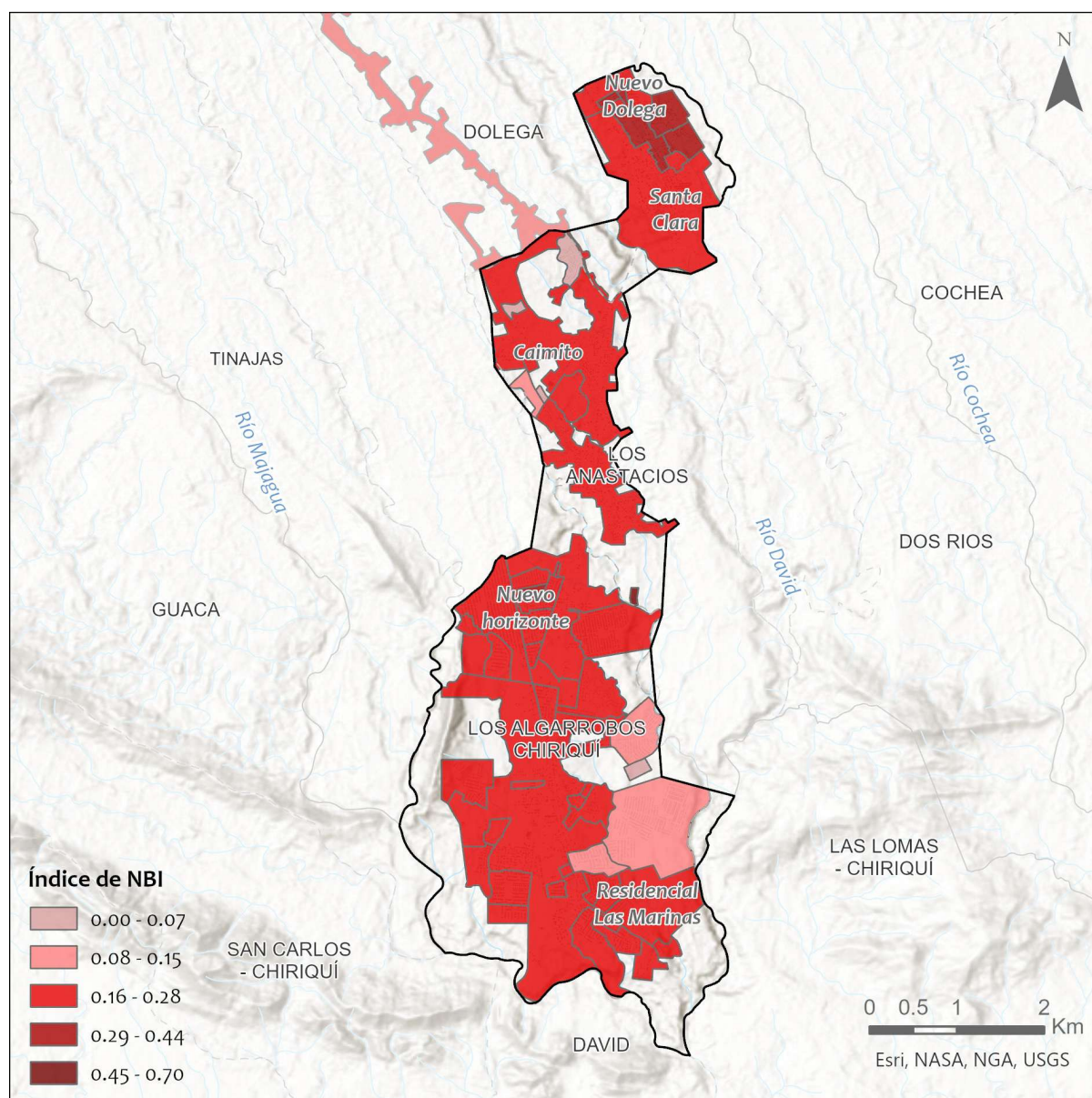


Figura 128. Índice agregado de NBI en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

10.2.5. Porcentaje de hogares sin aire acondicionado

Las viviendas sin aire acondicionado son más vulnerables frente a las olas de calor por varias razones que afectan tanto la salud como el bienestar de las personas que las habitan:

- Incapacidad para regular la temperatura interna: el aire acondicionado es uno de los medios más efectivos para reducir la temperatura interna de una vivienda durante una ola de calor. Sin él, las temperaturas en el interior de la casa pueden aumentar considerablemente, igualando o incluso superando las temperaturas exteriores. Esto dificulta mantener un ambiente seguro y confortable, aumentando el riesgo de golpe de calor y otros problemas de salud relacionados con el calor.

- Mayor riesgo de problemas de salud: sin aire acondicionado, las personas, especialmente las más vulnerables (como ancianos, niños y personas con enfermedades crónicas), son más propensas a sufrir golpes de calor, deshidratación y otros problemas de salud graves. Las altas temperaturas prolongadas dentro de una vivienda pueden elevar la temperatura corporal, lo que afecta el sistema cardiovascular y puede provocar agotamiento por calor o incluso ser fatal.
- Pocas opciones para refrescar el ambiente: en ausencia de aire acondicionado, las viviendas dependen de métodos menos efectivos para enfriar el aire, como ventiladores, abrir ventanas o usar sombras. Estos métodos pueden proporcionar alivio limitado, pero son insuficientes cuando las temperaturas son extremadamente altas, y en algunos casos, como el uso de ventiladores en ambientes muy calientes, pueden ser contraproducentes porque solo mueven el aire caliente.
- Efecto acumulativo del calor: las olas de calor suelen durar varios días, y la falta de aire acondicionado impide que el cuerpo se recupere del estrés térmico diario. Al no poder escapar del calor durante la noche, las personas pueden experimentar agotamiento acumulado, lo que aumenta su vulnerabilidad a problemas graves de salud, como el golpe de calor.
- Condiciones de vida más difíciles: las altas temperaturas dentro de la vivienda afectan las actividades cotidianas, como cocinar, dormir y descansar, lo que impacta el bienestar físico y mental de las personas. La incomodidad constante puede llevar a estrés, fatiga y problemas para dormir, lo que compromete la capacidad del cuerpo para recuperarse de la exposición al calor.
- Vulnerabilidad económica: muchas personas que viven en viviendas sin aire acondicionado pertenecen a grupos de bajos ingresos que no pueden permitirse instalar o mantener un sistema de aire acondicionado. Esto agrava su vulnerabilidad durante las olas de calor, ya que no tienen acceso a tecnologías que pueden aliviar los efectos del calor extremo.

En resumen, las viviendas sin aire acondicionado son más vulnerables frente a las olas de calor porque no pueden regular efectivamente la temperatura interna, lo que aumenta el riesgo de problemas de salud graves, como el golpe de calor. Además, estas viviendas suelen carecer de aislamiento adecuado y dependen de métodos menos efectivos para combatir el calor, exponiendo a las personas a un mayor estrés térmico y una mayor acumulación de calor a lo largo del día y la noche.

En la Figura 129 se presenta la distribución espacial del porcentaje de hogares sin aire acondicionado a nivel de barrio urbano o lugar poblado (Censo 2023) en el área de estudio.

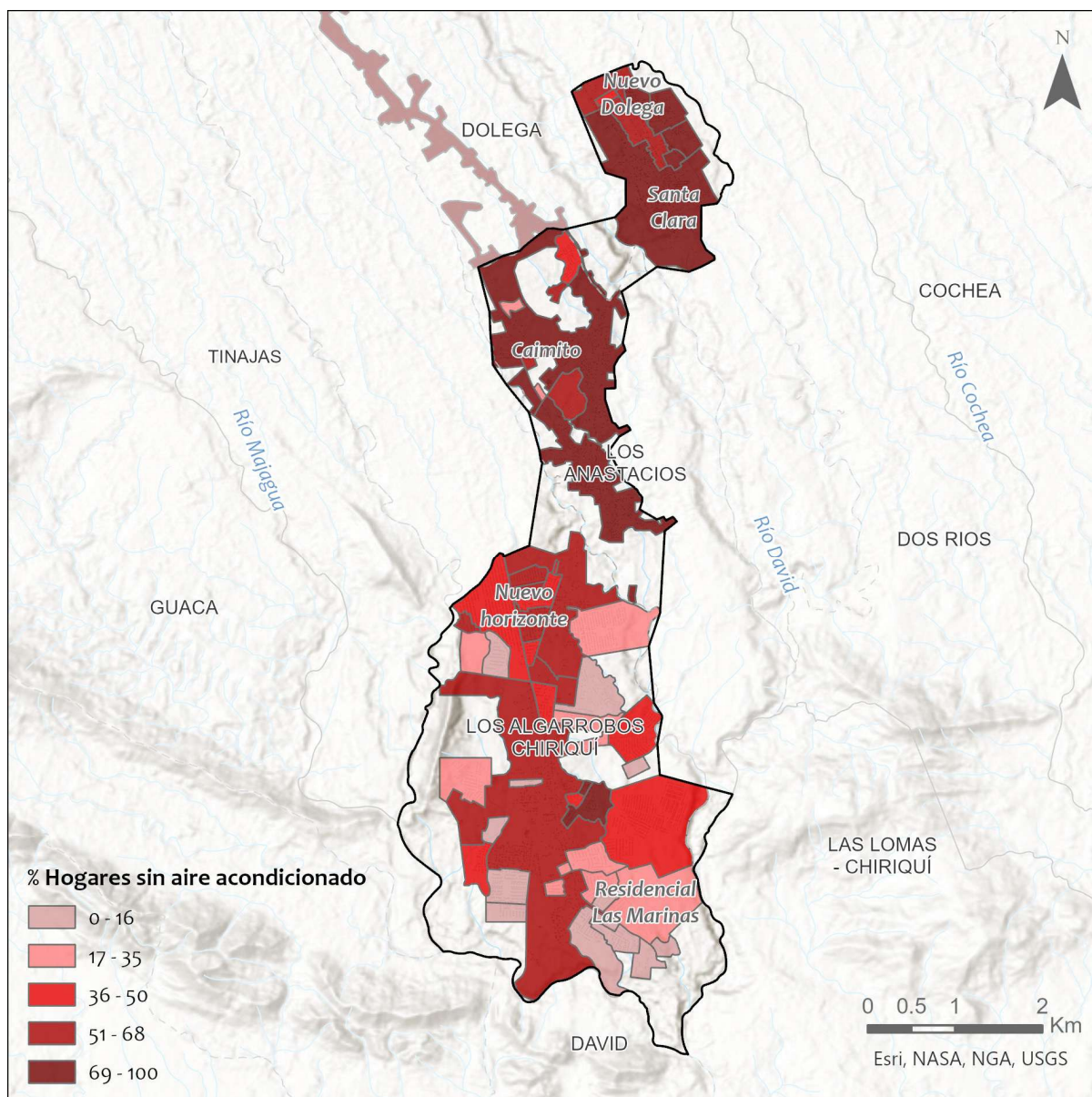


Figura 129. Porcentaje de hogares sin aire acondicionado en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

10.2.6. Accesibilidad a los centros sanitarios

En la Figura 130 se presenta la distribución espacial de la distancia existente a un centro sanitario en kilómetros, a a nivel de barrio urbano o lugar poblado en el área de estudio.

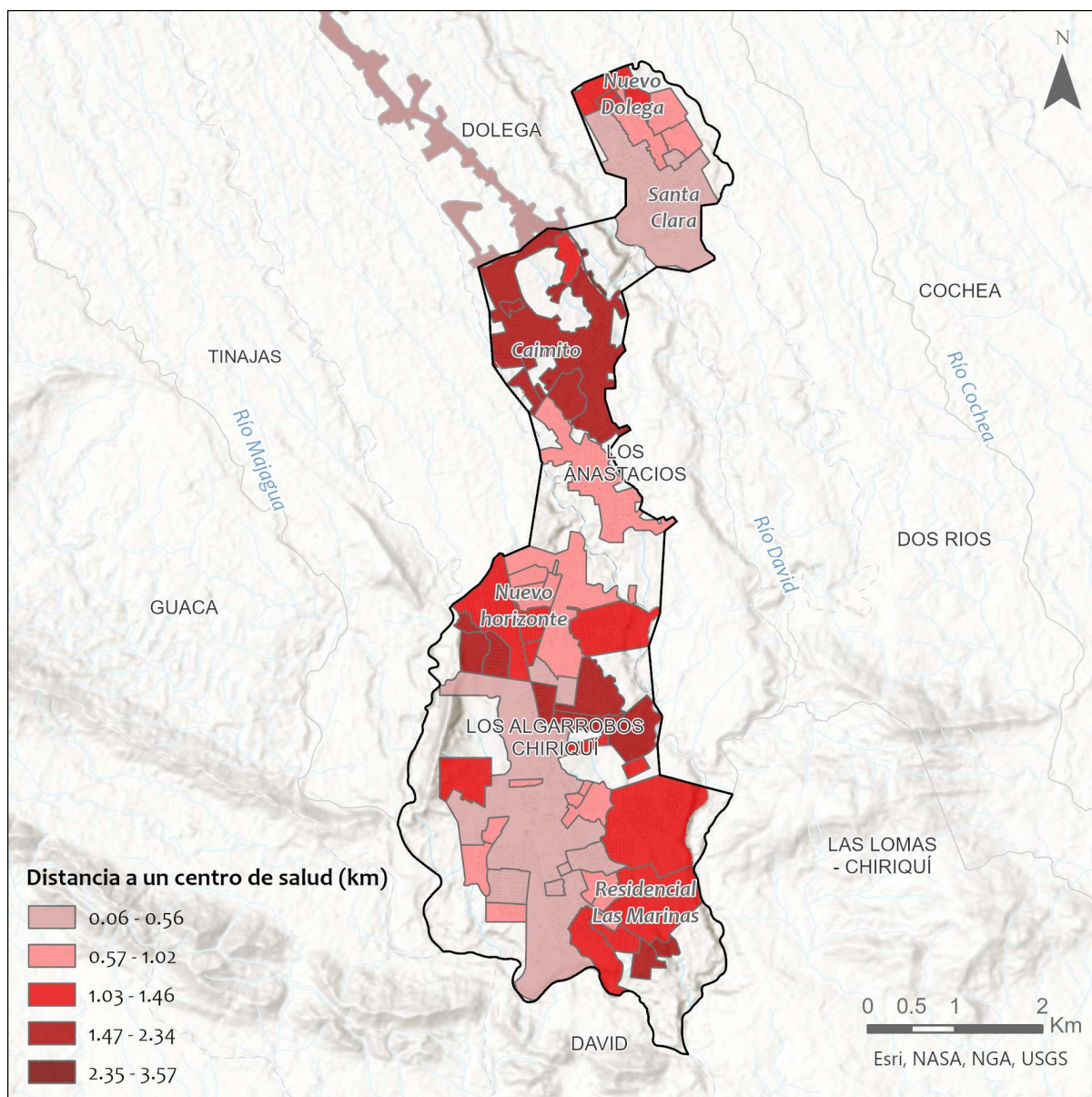


Figura 130. Distancia a un centro sanitario en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información del Censo de 2023.

La distancia a un centro de salud incrementa la vulnerabilidad de la población frente a las olas de calor por varias razones, relacionadas principalmente con la accesibilidad a la atención médica, la capacidad de respuesta en emergencias y las limitaciones de movilidad. A continuación, se detallan los factores clave:

1. Retraso en la atención médica:

Tiempo de respuesta en emergencias: Durante olas de calor, las condiciones de salud pueden deteriorarse rápidamente. Si las personas viven lejos de un centro de salud, el tiempo que les toma llegar a recibir atención médica puede ser demasiado largo, lo que aumenta el riesgo de complicaciones graves o incluso la muerte.

Diagnóstico y tratamiento tardío: La distancia a un centro de salud puede retrasar el diagnóstico y el tratamiento de afecciones relacionadas con el calor (como el golpe de calor, deshidratación), lo que puede empeorar la condición del paciente.

2. Limitaciones en la movilidad:

Transporte insuficiente o inaccesible: En áreas alejadas, el acceso a transporte adecuado puede ser limitado. Esto es especialmente problemático para poblaciones vulnerables, como ancianos, personas con discapacidades, o aquellas sin acceso a un vehículo propio. En situaciones de calor extremo, la falta de transporte puede impedir que estas personas lleguen a un centro de salud cuando lo necesitan.

Condiciones adversas de las vías: Durante olas de calor, las condiciones de las carreteras pueden empeorar si las infraestructuras no están en buen estado y las altas temperaturas deterioran las vías.

3. Mayor riesgo para personas vulnerables:

Poblaciones de riesgo: Las personas más vulnerables, como los ancianos, los niños, y aquellos con condiciones de salud crónicas, requieren atención médica más frecuente y urgente durante eventos extremos de temperatura. La distancia a un centro de salud aumenta el riesgo de que no reciban la atención oportuna.

Emergencias no atendidas: Las personas con enfermedades crónicas, como problemas cardíacos, respiratorios o diabetes, pueden experimentar exacerbaciones durante olas de calor. Estar lejos de un centro de salud puede significar que estas emergencias no sean atendidas a tiempo.

4. Menor acceso a recursos preventivos:

Falta de acceso a orientación médica: Los centros de salud no solo tratan enfermedades, sino que también proporcionan orientación sobre cómo prevenirlas. Vivir lejos de un centro de salud puede limitar el acceso a la información y recursos preventivos cruciales para protegerse durante olas de calor.

5. Impacto socioeconómico:

Costos adicionales: Viajar largas distancias para recibir atención médica implica costos adicionales en transporte, tiempo y, en algunos casos, la necesidad de tomar tiempo libre del trabajo. Esto puede ser una carga financiera considerable para personas de bajos ingresos, quienes ya son más vulnerables a los efectos de las olas de calor.

Desigualdades en la atención médica: Las personas que viven en zonas alejadas de los centros de salud suelen tener un acceso desigual a la atención médica, lo que refuerza las desigualdades en salud y hace que estas poblaciones sean más vulnerables durante eventos extremos de temperatura.

6. Capacidad de respuesta limitada:

Menor capacidad para acceder a atención en crisis: Durante una ola de calor, la demanda en los centros de salud puede aumentar. Las personas que viven lejos pueden tener dificultades para acceder a estos servicios en momentos de alta demanda, agravando su situación.

Recursos de emergencia insuficientes: En áreas alejadas de los centros de salud, los servicios de emergencia (como ambulancias) pueden tardar más en llegar o estar menos disponibles, lo que disminuye la capacidad de respuesta en situaciones críticas.

En resumen, la distancia a un centro de salud aumenta la vulnerabilidad de la población frente a las olas de calor al retrasar la atención médica, limitar el acceso a recursos preventivos y agravar las desigualdades en salud. Esto es particularmente peligroso para las personas más vulnerables, que necesitan atención rápida y eficiente durante eventos climáticos extremos.

10.2.7. Zonas sin bosques o áreas verdes

Las ciudades sin áreas verdes y sin bosques incrementan la vulnerabilidad de la población frente a las olas de calor por varias razones relacionadas con la capacidad de las áreas naturales para regular la temperatura, mejorar la calidad del aire, y proporcionar protección contra los extremos climáticos. Aquí se detallan los factores clave:

1. Efecto de Isla de Calor Urbano:

Aumento de la temperatura: En las ciudades sin áreas verdes, el efecto de isla de calor urbano es más pronunciado. Las superficies de concreto, asfalto y edificios retienen y emiten más calor que las áreas con vegetación, lo que provoca que las temperaturas en la ciudad sean significativamente más altas que en las zonas rurales o con vegetación.

Pérdida de sombra natural: Los árboles y áreas verdes proporcionan sombra, lo que reduce la temperatura del suelo y del aire en su entorno. Sin esta sombra, la exposición directa al sol es mayor, aumentando la temperatura en las zonas urbanas y haciendo que las olas de calor sean aún más peligrosas.

2. Reducción de la humedad y enfriamiento natural:

Evapotranspiración: Las plantas y los árboles liberan vapor de agua a través de un proceso llamado evapotranspiración, lo que enfría el aire circundante. Sin áreas verdes, este efecto de enfriamiento natural se pierde, lo que contribuye a temperaturas más altas durante las olas de calor.

Reducción de la calidad del aire: La vegetación también ayuda a filtrar contaminantes del aire y produce oxígeno. Sin áreas verdes, la calidad del aire empeora, lo que puede exacerbar los problemas respiratorios durante las olas de calor.

3. Aumento del consumo energético:

Mayor demanda de energía: Sin áreas verdes que moderen las temperaturas, los habitantes de las ciudades dependen más del aire acondicionado en verano. Esto no solo aumenta el

consumo de energía, sino que también puede sobrecargar las redes eléctricas, especialmente durante olas de calor.

Costos económicos y vulnerabilidad social: El aumento del consumo energético también implica mayores costos para los residentes, lo que puede ser un problema significativo para las personas de bajos ingresos, quienes son más vulnerables a las olas de calor.

4. Impacto en la salud mental y bienestar:

Falta de espacios recreativos y de relajación: Las áreas verdes proporcionan lugares donde las personas pueden relajarse, hacer ejercicio y escapar del estrés urbano. Sin estos espacios, la salud mental de la población puede verse afectada, especialmente durante períodos de temperaturas extremas que limitan las actividades al aire libre.

Reducción del bienestar general: Los espacios verdes contribuyen al bienestar general al mejorar la calidad de vida y proporcionar un entorno más agradable. Su ausencia puede aumentar la sensación de malestar y el estrés durante olas de calor, lo que agrava los impactos sobre la salud.

5. Resiliencia ambiental disminuida:

Menor capacidad para adaptarse al cambio climático: Las ciudades sin áreas verdes tienen menos capacidad para adaptarse y mitigar los efectos del cambio climático, como el aumento de la frecuencia e intensidad de las olas de calor. Las áreas verdes actúan como amortiguadores naturales, ayudando a regular el microclima urbano y a reducir los efectos extremos de las temperaturas.

Pérdida de biodiversidad: Sin vegetación, las ciudades también pierden biodiversidad, lo que afecta a los ecosistemas locales y reduce la resiliencia de la ciudad ante eventos climáticos extremos.

6. Aumento del riesgo de enfermedades:

Enfermedades relacionadas con el calor: La falta de áreas verdes puede aumentar el riesgo de enfermedades relacionadas con el calor, como golpes de calor, deshidratación y exacerbación de enfermedades cardiovasculares y respiratorias.

Enfermedades respiratorias y cardiovasculares: Sin la mejora de la calidad del aire proporcionada por los árboles y plantas, las ciudades enfrentan mayores niveles de contaminación del aire, lo que puede agravar las enfermedades respiratorias y cardiovasculares, especialmente durante olas de calor.

En la Figura 131 se presenta la distribución espacial de las áreas de bosque, áreas verdes y arbolado urbano en el área de estudio, con base en la capa de usos y cobertura del suelo de MiAMBIENTE, y en la Figura 132 el inverso, el porcentaje de área sin bosques o áreas verdes por barrio urbano o lugar poblado.

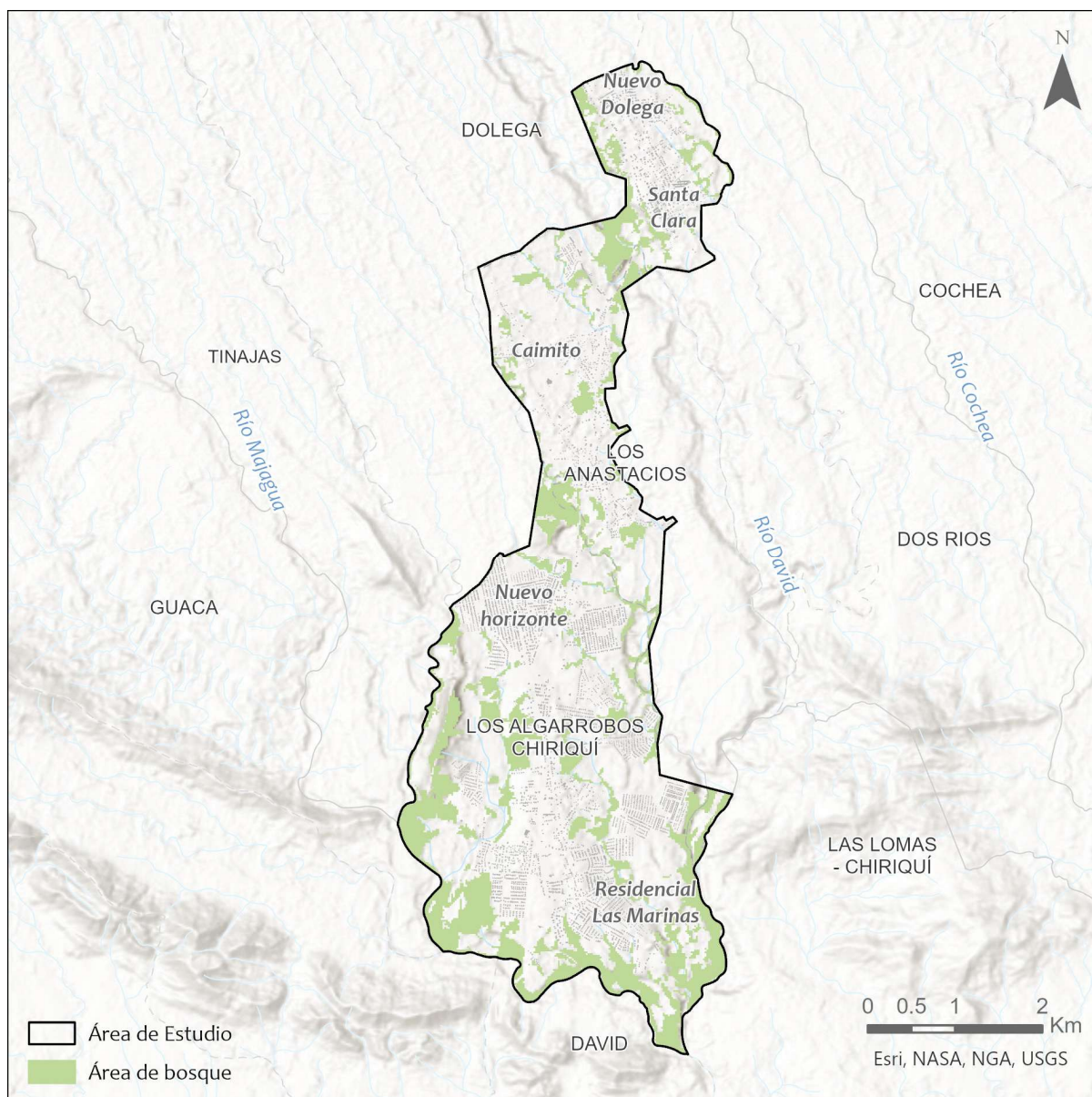


Figura 131. Áreas de bosque, áreas verdes y arbolado urbano en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024, con información de MiAMBIENTE, 2021.

En resumen, las ciudades sin áreas verdes y sin bosques están en mayor desventaja frente a las olas de calor porque carecen de los beneficios naturales que la vegetación proporciona para regular la temperatura, mejorar la calidad del aire y proteger a la población de los extremos climáticos. Esto resulta en un mayor estrés térmico, aumento de los costos energéticos, riesgos para la salud y una menor capacidad de adaptación al cambio climático.

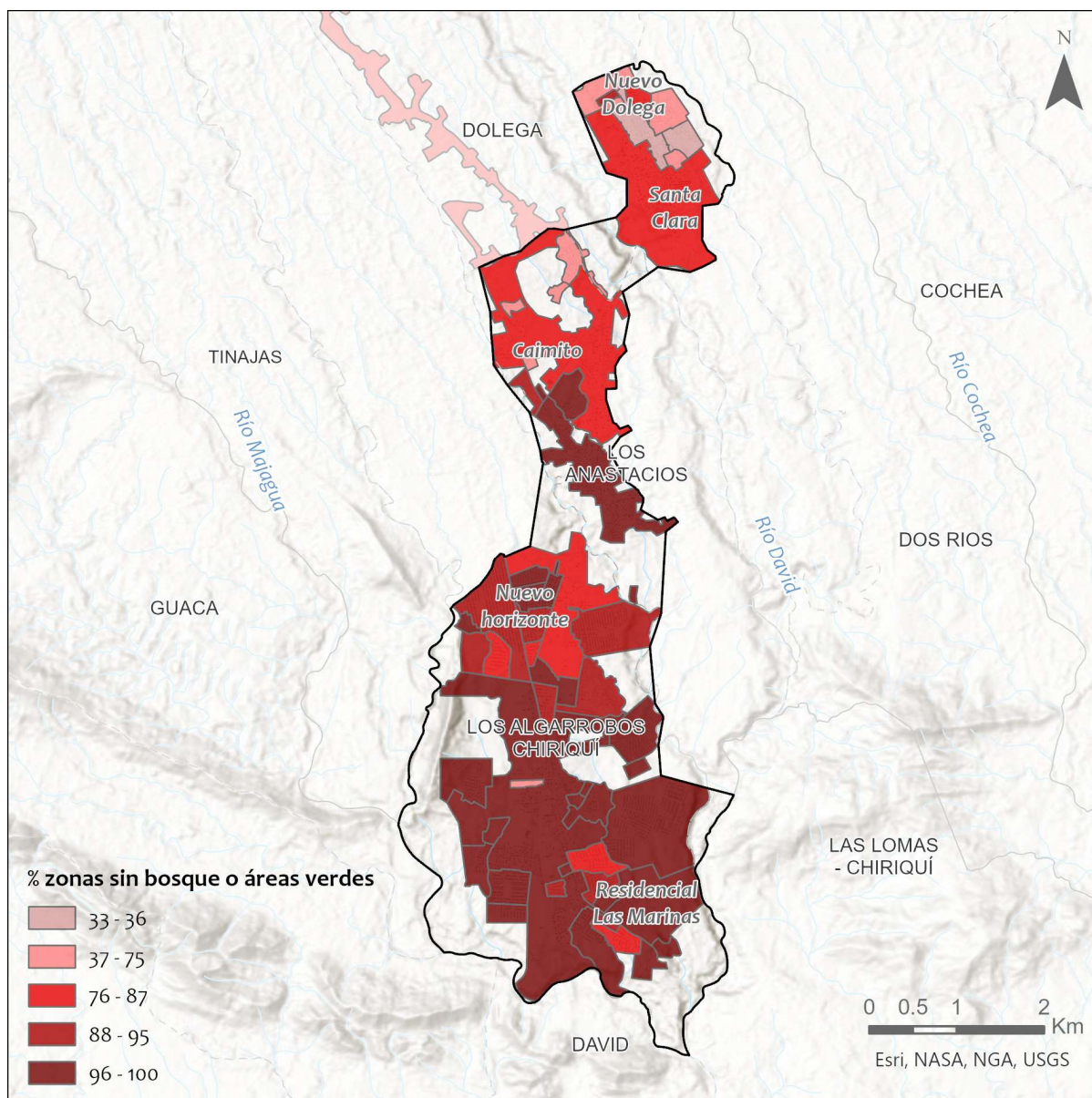


Figura 132. Porcentaje de áreas sin bosque o áreas verdes en el área de estudio. Fuente: IHCantabria, 2024.

10.3. Cálculo del riesgo

10.3.1. Metodología de obtención del riesgo estandarizado

Para el cálculo del riesgo estandarizado, en primer lugar, se obtienen los indicadores de riesgo estándar, a partir de los indicadores de amenaza y vulnerabilidad elaborados previamente. Estos suelen estar expresados en unidades y escalas diferentes (de menos infinito a infinito, de 0 a infinito, de 0 a 1), por lo que, antes de combinarlos, deben homogeneizarse en una escala de 0 a 1 utilizando una función de transformación. Para elegir la función de transformación, se establecen los valores que definen los umbrales de riesgo en cada contexto.

Por ejemplo, el índice que expresa la sensación térmica está en °C y va de 0 a infinito. La bibliografía indica que un valor mayor de 28°C comienza a tener cierto riesgo (umbral de riesgo bajo a medio) y que un valor mayor de 32°C ya supone un riesgo alto. Con estos criterios, se define la función con la

que se obtiene el riesgo estandarizado correspondiente, que otorga un valor de 0.33 al valor de 28°C y de 0.66 al de 32°C, interpolando o extrapolando para el resto de los valores.

NIVEL DE RIESGO	RANGOS DEL RIESGO ESTANDARIZADO (RE)
Muy bajo	$0 \leq RE < 0.2$
Bajo	$0.2 \leq RE < 0.4$
Medio	$0.4 \leq RE < 0.6$
Alto	$0.6 \leq RE < 0.8$
Muy alto	$0.8 \leq RE \leq 1$

Tabla 32. Niveles de riesgo considerados. Fuente: IHCantabria, 2024.

Una vez estandarizados los indicadores de amenaza y vulnerabilidad, a estos se les asigna un peso que determina la relevancia de este dentro del proceso de generación del riesgo y se combinan para obtener el indicador de riesgo. Los pesos deben estar equilibrados entre los componentes del riesgo (amenaza y vulnerabilidad) para que el indicador de riesgo sea coherente. Los umbrales y pesos adoptados se basan en juicio de experto, teniendo en cuenta las características y particularidades del área de estudio.

En la Tabla 33 se presentan cada uno de los indicadores empleados para la obtención del riesgo de ola de calor con sus umbrales y pesos asignados.

Indicador	Umbrales adoptados		Peso
	Riesgo bajo a medio	Riesgo medio a alto	
Sensación térmica media en °C (amenaza)	28	32	8
Densidad de población en hab./km ² (vulnerabilidad)	1000	3000	1
Porcentaje de población sensible (vulnerabilidad)	20%	30%	1
Porcentaje de mujeres (vulnerabilidad)	52%	55%	1
Índice agregado de NBI (vulnerabilidad)	20%	30%	2
Porcentaje de hogares sin aire acondicionado (vulnerabilidad)	14%	20%	1
Distancia a un centro de salud en km (vulnerabilidad)	1	5	1
Porcentaje de zonas sin bosques o áreas verdes (vulnerabilidad)	80%	90%	1

Tabla 33. Indicadores de amenaza y vulnerabilidad frente a las olas de calor. Fuente: IHCantabria, 2024.

10.3.2. Indicador de riesgo por ola de calor

Como resultado final se obtienen mapas con la distribución de los niveles de riesgo, a escala de barrio urbano o lugar poblado, para el área de estudio (Figura 133 y Figura 134) para los diferentes escenarios estudiados.

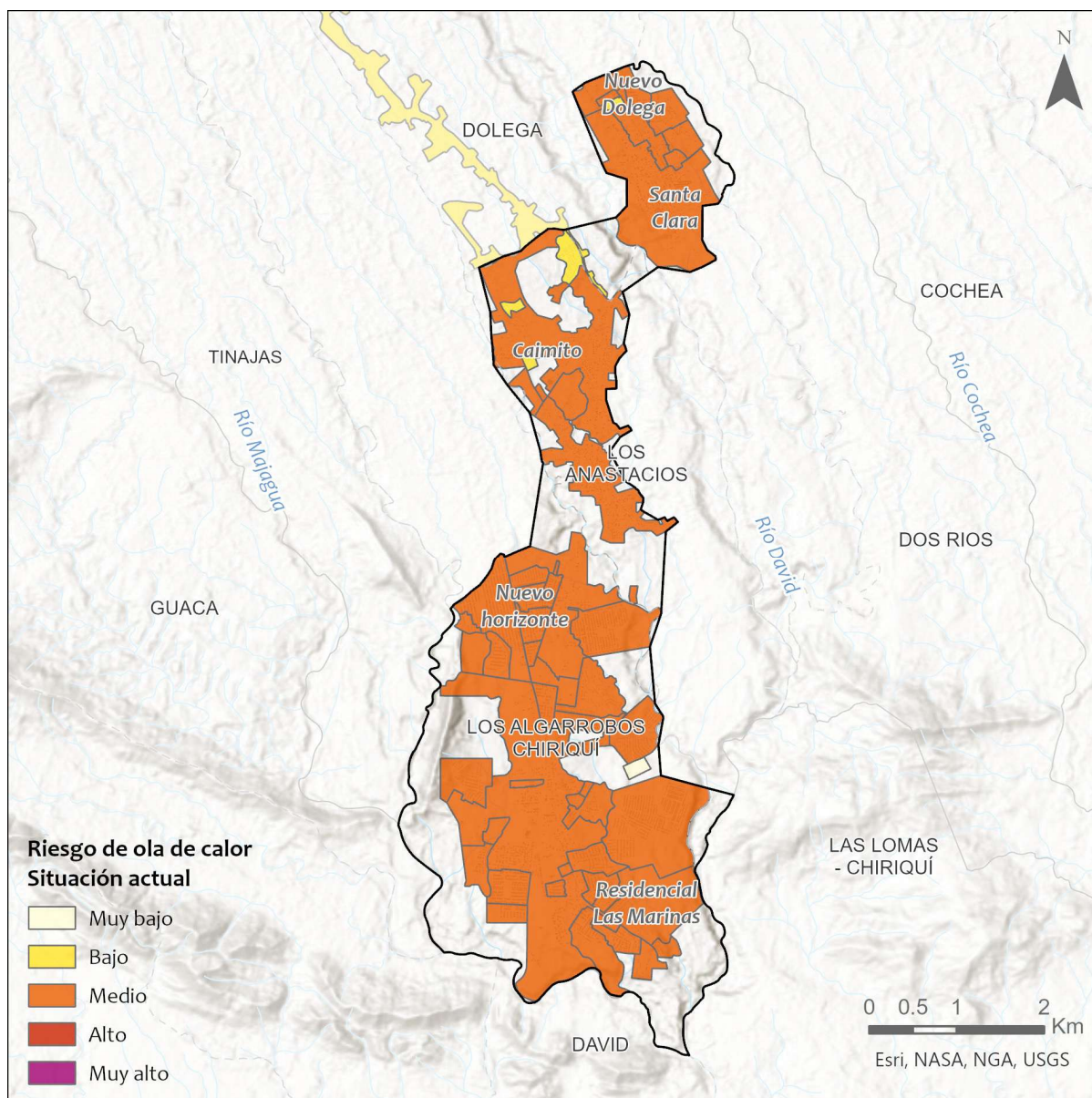


Figura 133. Riesgo por ola de calor en el área de estudio en la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

Como se puede observar en los mapas, el riesgo de ola de calor en la situación actual se encuentra en un nivel medio prácticamente en todo el área de estudio. Esta zona es un área en rápido crecimiento en el que no se está construyendo con una tipología de vivienda adaptada para altas temperaturas (la mayoría sin techos rasos) y en la que no se están planteando suficientes espacios verdes que puedan mitigar los efectos de las olas de calor para la población.

Para el horizonte 2050, éste incrementa debido al aumento de la sensación térmica, hasta alcanzar un riesgo alto en determinados barrios urbanos: la mayoría de los del corregimiento de Los Algarrobos, al sur de Los Anastacios y en el centro de Dolega Cabecera.

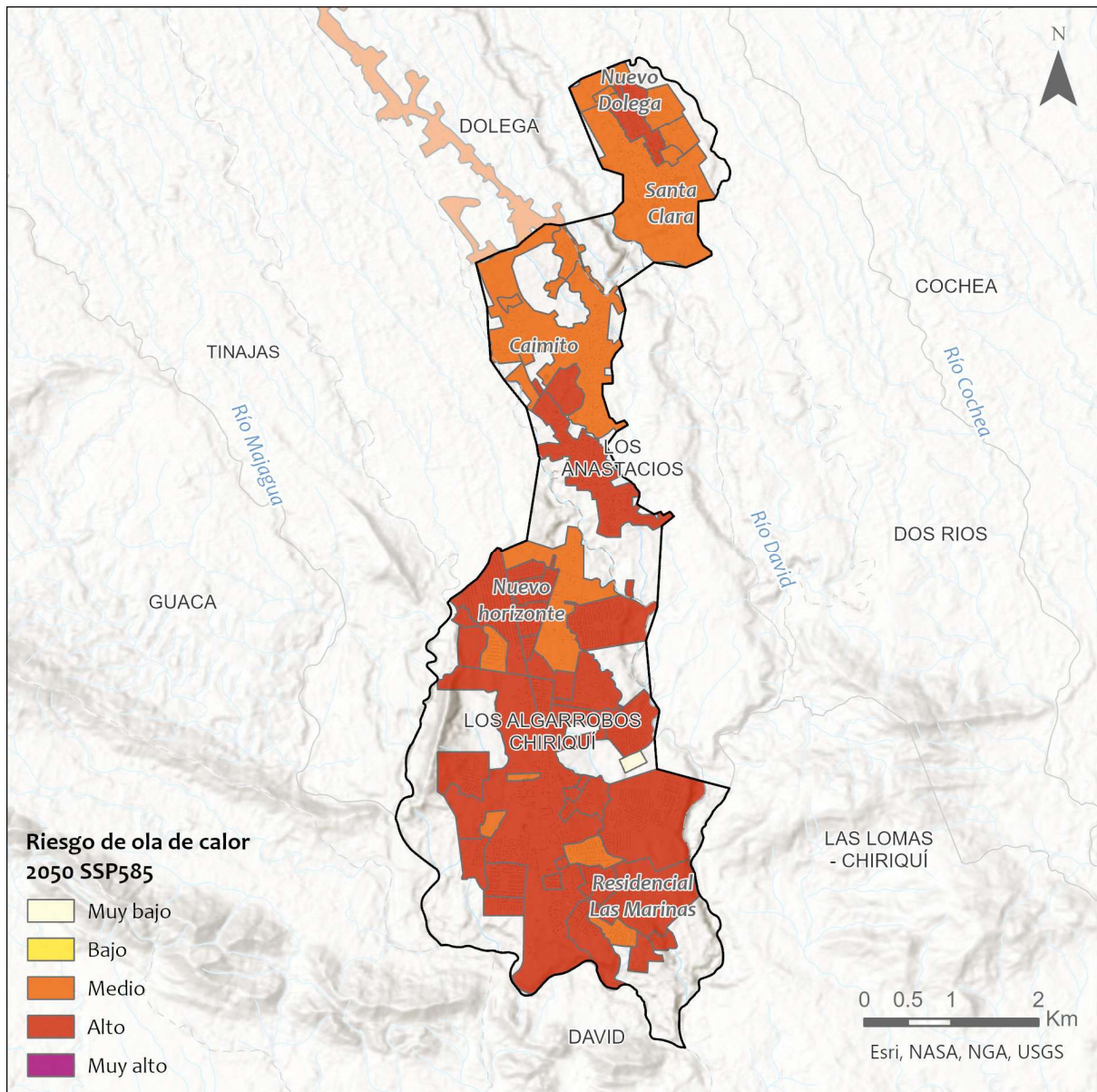


Figura 134. Riesgo por ola de calor en el área de estudio para el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

11. ESTUDIO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS

El distrito de Gualaca es un área en el que es frecuente que ocurran deslizamientos que causen pérdidas materiales en viviendas, cortes en vías de comunicación que conectan con otros distritos y provincias, pérdidas en terrenos que afectan a la ganadería, afectación a infraestructuras públicas como escuelas, estaciones de policía, infraestructura de abastecimiento de agua, e incluso, pérdida de vidas humanas.

Uno de los últimos eventos tuvo lugar en 2020 durante el Huracán Eta, lo que provocó el corte de la carretera de Hornito, única vía de comunicación entre Chiriquí y Bocas del Toro. Además, se ha dado dos casos de deslizamiento cerca de la represa del Lago Fortuna, infraestructura de gran importancia.

Por este motivo, aprovechando la información disponible generada en anteriores estudios, el distrito de Gualaca es el área seleccionada para analizar este fenómeno.

11.1.1. Metodología de obtención del índice estandarizado de susceptibilidad por deslizamientos

El Índice de Susceptibilidad al Deslizamiento (ISD) es una medida utilizada para evaluar la estabilidad de un terreno y la predisposición a sufrir deslizamientos. Su utilidad se centra en identificar áreas vulnerables a deslizamientos, lo que es fundamental para la planificación territorial y la gestión de riesgos.

La metodología empleada para la caracterización de la susceptibilidad por deslizamientos es la empleada en el Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Generación del Atlas Interactivo de Visualización de los Resultados para la República de Panamá, desarrollada por IHCantabria para Banco Interamericano para el Desarrollo (BID), del que se extraen los resultados para el distrito de Gualaca que se presentan en este estudio. A continuación, se presenta un resumen de este proceso, para más información sobre las fuentes de datos y metodología empleada para la obtención y análisis de las variables climáticas se puede consultar el producto 3 del estudio citado.

El producto final, el índice estandarizado de susceptibilidad por deslizamientos, se ha generado a partir de la siguiente información:

- Información de precipitación media anual, valores de precipitación media durante la estación seca y valores de precipitación media durante la estación húmeda obtenida tras el proceso de downscaling estadístico reconstruidas espacialmente en una malla de 1 km establecida en el marco del trabajo.
- Pendientes obtenidas a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT) 5x5m proporcionado por MiAMBIENTE y cuya fuente es el IGNTG.
- Red hídrica oficial 1:50,000 de Panamá proporcionada por el IGNTG.
- Mapa de coberturas y usos de suelo oficiales de Panamá proporcionados por MiAMBIENTE.
- Mapa de geología proporcionado por el IMHPHA/MiAMBIENTE y reescaladas a una malla de 100 metros de nuevo mediante métodos estadísticos de GIS.
- Mapa de geomorfología proveniente del Atlas Ambiental de la República de Panamá 2010, IGNTG.

Una vez seleccionadas las capas que se incorporan al análisis, se definen los criterios para la asignación de pesos relativos y se combinan de forma ponderada como sigue:

$$\text{IPSD} = 0.7 * [(5 * \text{PEND} + 4 * \text{GEOL} + 3 * \text{COBV} + 2 * \text{FALL} + 1 * \text{RIOS}) / 15] + (0.15 \text{ PREC} + 0.15 \text{ DWT})$$

Esta definición está en línea con lo propuesto en el estudio previo del Canal de Panamá (BID, 2022), en el sentido de que se consideran factores causales preparatorios, por una parte, y factores causales desencadenantes por otra. La ponderación de cada una de las capas que intervienen es la siguiente:

- Efectos causales preparatorios 70 %
 - o [PEND] Pendientes 5/15
 - o [GEOL] Geología 4/15
 - o [COBV] Cobertura vegetal 3/15
 - o [FALL] Fallas (geología estructural) 2/15
 - o [RIOS] Quebradas y ríos 1/15
- Efectos causales desencadenantes 30%
 - o [PREC] Precipitación media anual 15%
 - o [DWT] Diferencia de precipitaciones entre estación húmeda y seca 15%

En el caso de las precipitaciones se han considerado dos efectos concomitantes:

- La precipitación media anual, de modo similar a lo realizado en estudios previos
- La diferencia de precipitaciones entre estación húmeda y seca, dado que las oscilaciones estacionales de los valores de humedad suponen un deterioro de la estructura geomecánica del terreno, lo que favorece los procesos de inestabilidad de ladera. Esta variable ha sido incorporada al modelo v.1.2 (escenario climático histórico) y al modelo v.2.0 (cambio climático).

Una vez obtenido el Índice Preliminar de Susceptibilidad frente a Deslizamientos [ISD-P] se ha procedido a su normalización, de tal modo que el valor máximo del mismo en el territorio nacional de Panamá sea de 1 y que el mínimo correspondiente sea de valor nulo, 0.

De este modo se obtiene el Índice Normalizado de Susceptibilidad frente a Deslizamientos [ISD-N].

Para el escenario futuro de cambio climático (horizonte 2050 SSP5-8.5) se emplea la misma definición del índice de susceptibilidad anteriormente señalado, considerando en este caso los valores climáticos correspondientes al escenario de cambio climático.

11.1.2. Índice estandarizado de susceptibilidad por deslizamientos

Para facilitar la comprensión de los mapas de susceptibilidad resulta habitual presentar también un mapa semafórico. La elección de los valores de umbral es discrecional (Tabla 34), buscando que el

usuario pueda diferenciar, del modo más sencillo y nítido posible, la situación existente en cada zona en términos de susceptibilidad al deslizamiento.

VALOR DEL ISD-N	SUSCEPTIBILIDAD
0.00 - 0.40	Muy baja
0.40 - 0.60	Baja
0.60 - 0.70	Media
0.70 - 1.00	Alta

Tabla 34. Clasificación cualitativa de los valores del Índice Normalizado de Susceptibilidad frente a Deslizamientos. Fuente: IHCantabria, 2024.

Este mapa semafórico para el distrito de Gualaca del Índice de Susceptibilidad al Deslizamiento Normalizado es el que se presenta en la Figura 135 y la Figura 136, para la situación actual y para el horizonte 2050 con cambio climático (SSP5-8.5) respectivamente.

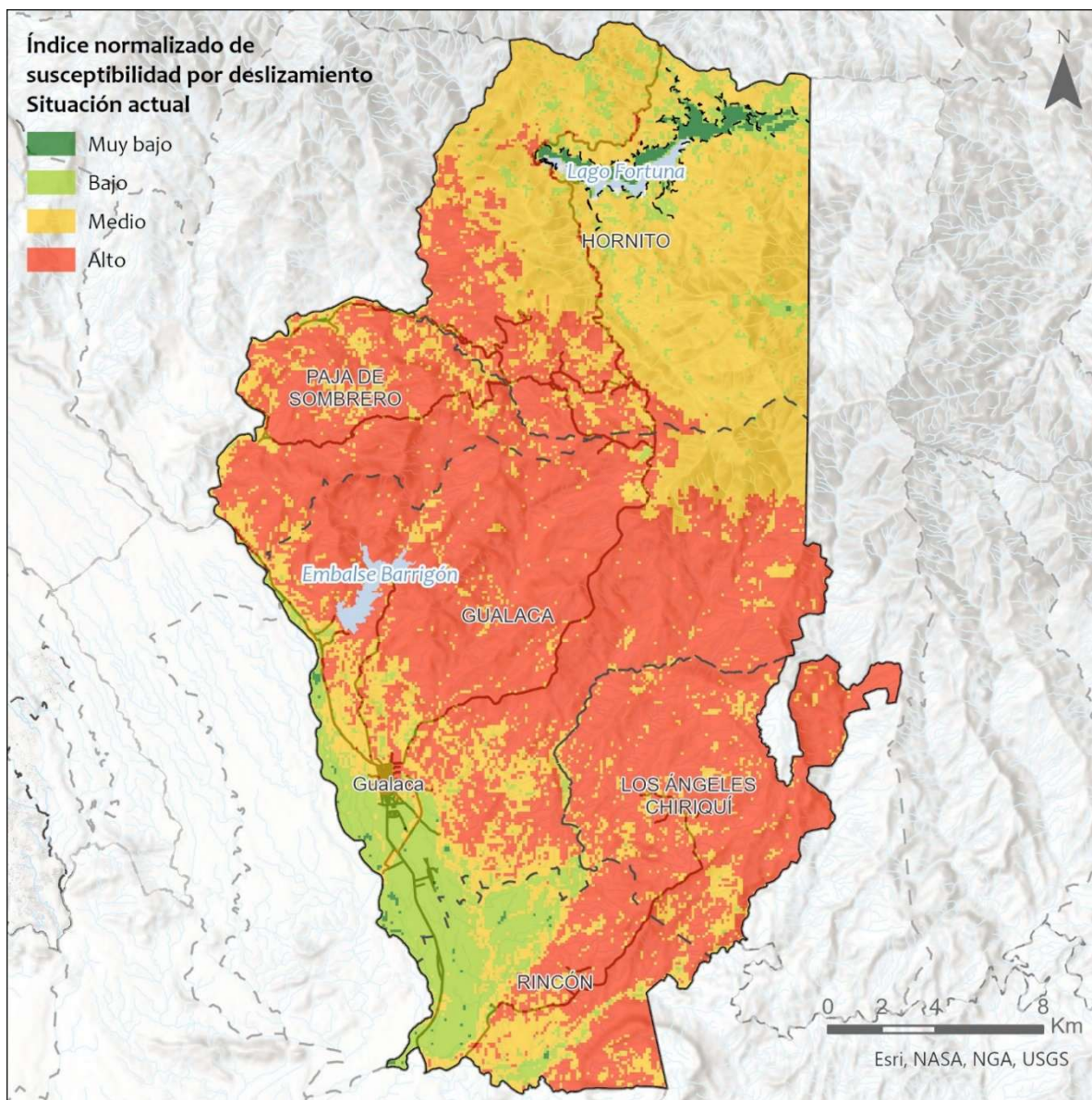


Figura 135. Índice normalizado de susceptibilidad por deslizamiento en el distrito de Gualaca para la situación actual. Fuente: IHCantabria, 2024.

En el mapa de resultados para la situación actual se observa que gran parte de los corregimientos de Gualaca Cabecera, Paja de Sombrero y Los Ángeles, así como el sur de Hornito y noreste de Rincón, se encuentran en zonas de alta susceptibilidad a deslizamiento.

Asimismo se puede observar que, efectivamente, hay varias infraestructuras críticas localizadas en zonas de alta susceptibilidad, en Hornito la represa del Lago Fortuna y la carretera que comunica Chiriquí con Bocas del Toro; y en Gualaca Cabecera, la represa del Lago Barrigón, varias escuelas que se localizan próximas a la carretera o situadas en taludes, como en Calabazal, Los Planes y Bella Vista, y la toma de la planta de tratamiento de agua potable que conduce el agua desde el Embalse Barrigón.

En términos generales, el efecto del cambio climático consistiría en una elevación de los valores de susceptibilidad frente al deslizamiento, existiendo zonas donde ese incremento sería más palpable, como por ejemplo en el corregimiento de Hornito.

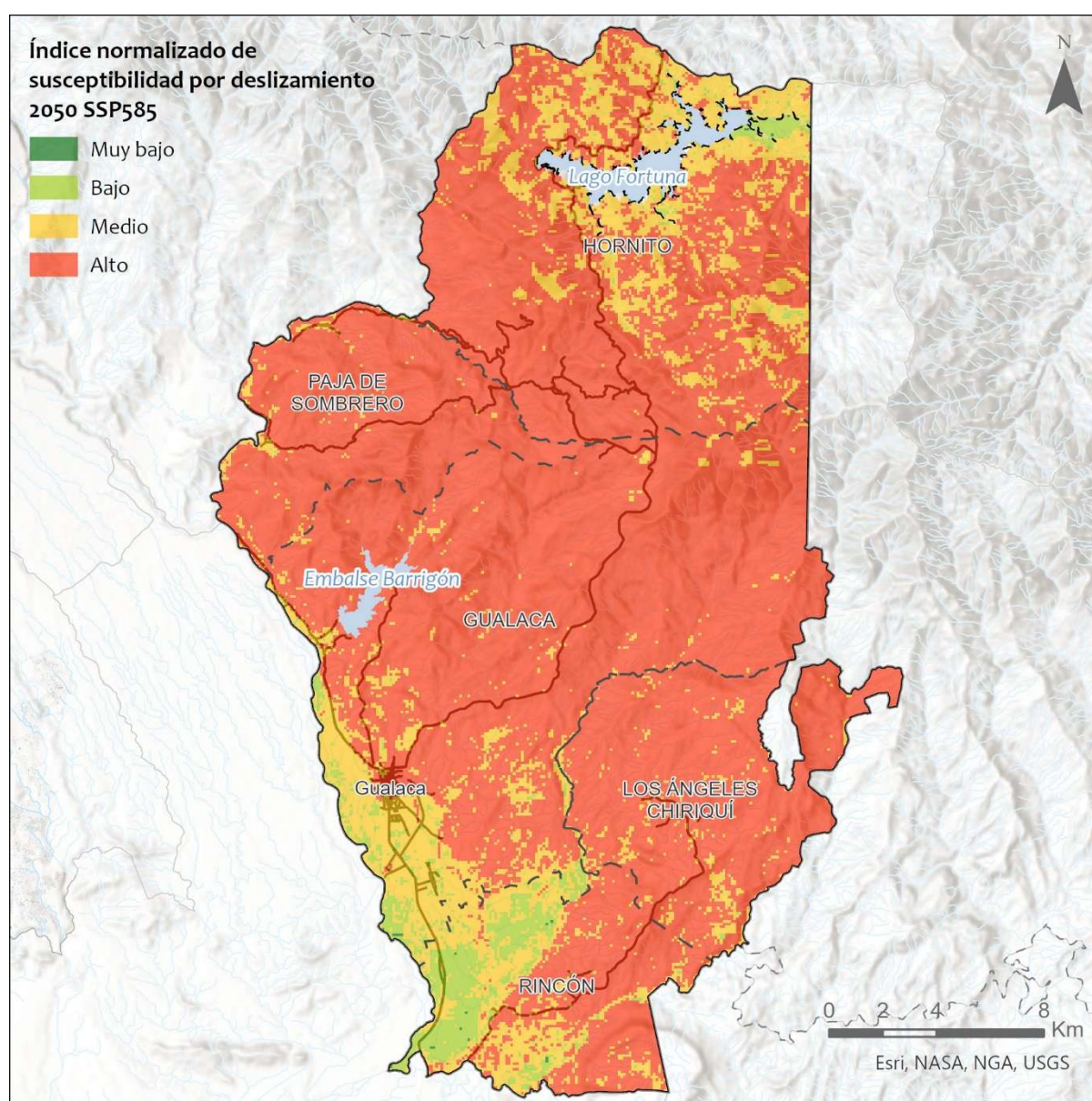


Figura 136. Índice normalizado de susceptibilidad por deslizamiento en el distrito de Gualaca para para el horizonte 2050 SSP585. Fuente: IHCantabria, 2024.

12. CONCLUSIONES

12.1. Evaluación de los ecosistemas clave para la provisión de servicios a la ciudad

El bosque latifoliado mixto maduro en el área de los distritos de Boquete, Dolega y Gualaca se destaca como un ecosistema fundamental para la regulación hidrológica, ofreciendo servicios ecosistémicos esenciales tanto frente a inundaciones como a sequías. Este ecosistema actúa en la interceptación y almacenamiento de agua, lo que permite una significativa reducción de la escorrentía superficial. Además, su sistema radicular y la capa de materia orgánica generan condiciones que facilitan la infiltración, lo que contribuye a la recarga de acuíferos subterráneos durante períodos de escasez hídrica.

En este contexto, entorno al 10% de las llanuras de inundación modeladas proporcionan el servicio ecosistémico de regulación hidrológica, con más de un 70% en conservación pasiva, cerca de un 7% en conservación activa, menos del 10% en restauración activa y un 15% en restauración intensiva. Esto evidencia la importancia de conservar los bosques presentes en llanuras de inundación, pero también en la importancia de las medidas de restauración y reforestación para mejorar la gestión del agua.

Además, se reporta que más del 85% del bosque latifoliado mixto maduro en ladera contribuye al control de escorrentía. De este porcentaje, cerca del 95% está destinado a conservación pasiva, en torno a un 2% a conservación activa y otro 2% a restauración activa. Respecto a las áreas de restauración intensiva, suponen más de un 35% del bosque ya existente que proporciona servicio. Estos datos destacan la necesidad de implementar estrategias de manejo que fortalezcan estos ecosistemas para mejorar su efectividad en la mitigación de inundaciones, pero también en la importancia de las medidas de restauración y reforestación.

En cuanto al servicio de captura y almacenamiento de agua, apenas el 10% del bosque maduro proporciona este servicio, de este porcentaje, más del 90% está destinado a conservación pasiva, cerca de un 5% a conservación activa, casi un 5% a restauración activa. Respecto a las áreas de restauración intensiva, suponen apenas un 1% del bosque ya existente que proporciona servicio. Esta distribución resalta la importancia de implementar estrategias de manejo que fortalezcan estos ecosistemas para mejorar su efectividad en la mitigación de inundaciones.

12.2. Estudio de riesgo por escasez de recursos hídricos

En el área de estudio en Boquete hay suficiente recuso hídrico superficial para garantizar las demandas existentes, tanto en el escenario climático actual, como en los horizontes 2030 y 2050 considerando el efecto del cambio climático. El riesgo de escasez de recursos hídricos, por tanto, es bajo.

Ahora bien, la realidad en Boquete, según lo recopilado en los talleres de validación de resultados con actores locales, es que existen varios problemas en la red de distribución e infraestructura de abastecimiento de agua potable que no permiten que el agua llegue a toda la población de Boquete. Además, hay zonas como El Francés y Alto Boquete, que en verano debido al turismo crecen considerablemente y no se cuenta con los medios para abastecer a estas poblaciones.

En el área de estudio en Dolega, se pueden distinguir dos zonas dentro del análisis, el área poblada en el corregimiento de Dolega Cabecera, que se abastece del río Cochea, y la ubicada en los

corregimientos de Los Anastacios y Los Algarrobos, cuya planta de tratamiento también abastece a David y toma agua del río Majagua.

Para la situación actual, analizada con datos históricos, a pesar de que hay cierto déficit en la planta de tratamiento de Los Algarrobos, todo el área de estudio se encuentra en un nivel de riesgo bajo.

En los talleres se concluyó que en la actualidad no hay un problema de recurso hídrico disponible, sino de capacidad de la infraestructura y planteamiento del sistema de distribución. Los Anastacios y Los Algarrobos son áreas en rápido crecimiento que comparten sistema de abastecimiento con un gran núcleo urbano, David, que recibe en torno al 90% del agua que se trata en la planta potabilizadora.

En los escenarios futuros el riesgo en la zona abastecida por la planta de Los Algarrobos va incrementando progresivamente conforme lo hace el déficit hídrico. La combinación de disminución en las precipitaciones y el ascenso en las temperaturas, reducen la producción de agua superficial en la cuenca disponible para consumo. En el área de Dolega cabecera se mantiene un nivel de riesgo bajo.

Para el horizonte 2030, los corregimientos de Los Algarrobos y Los Anastacios se encuentra en riesgo medio y alto, y para el horizonte 2050, prácticamente todos los barrios en ellos se encuentran en riesgo alto.

El área de estudio en Gualaca el análisis de riesgo por escasez de recursos hídricos resulta en un nivel bajo para los tres escenarios analizados, ya que no se produce déficit hídrico en ninguno de ellos. El recurso en el Lago Barrigón es suficiente para abastecer la demanda de la planta de tratamiento.

Según la información recopilada en los talleres, en Gualaca el principal problema es la capacidad de tratamiento de la planta, que no se adecua a las necesidades de la población a la que abastece. La planta, que es gestionada en gran medida por la Junta Comunal, no dispone de los medios para poder dar un servicio continuo, especialmente en verano cuando el consumo incrementa.

Además de la falta de capacidad de la red, también se dan en época de lluvias problemas de sedimentación en la toma que capta el agua del Lago Barrigón y en la planta.

12.3. Estudio de riesgo por inundación fluvial

El estudio de riesgo por inundación fluvial realizado indica que las inundaciones en el área de estudio de Boquete se localizan en la zona de Los Naranjos y Bajo Boquete, donde el río desborda a su paso por el área urbana. Con el clima actual, para un evento de 100 años de periodo de retorno, se encontrarían afectadas 2 ha de edificaciones residenciales (4% del total edificado), 8 infraestructuras críticas y alrededor de 340 personas.

Se espera que por efecto del cambio climático los eventos extremos de precipitación sean algo más intensos, dando lugar a un pequeño incremento del riesgo por inundación, donde los daños económicos asociados al evento de 100 años de periodo de retorno ascenderán de los 0.87 MUSD \$, estimados para la situación actual, a 1.19 MUSD \$ en el horizonte 2030 en el escenario más desfavorable con cambio climático (SSP5-8.5). Asimismo, la pérdida anual esperada (PAE) asociada al riesgo de inundación ascenderá de 0.08 MUSD \$ hasta los 0.11 MUSD \$.

12.4. Estudio de riesgo por ola de calor

En Chiriquí, el distrito de Dolega es el más afectado por las olas de calor, por lo que es el área seleccionado para analizar este fenómeno y el riesgo que trae aparejado para la población.

Como se puede observar en los mapas de resultados, el riesgo de ola de calor en la situación actual se encuentra en un nivel medio prácticamente en todo el área de estudio. Esta zona es un área en rápido crecimiento en el que no se está construyendo con una tipología de vivienda adaptada para altas temperaturas (la mayoría sin techos rasos) y en la que no se están planteando suficientes espacios verdes que puedan mitigar los efectos de las olas de calor para la población.

Para el horizonte 2050, éste incrementa debido al aumento de la sensación térmica, hasta alcanzar un riesgo alto en determinados barrios urbanos: la mayoría de los del corregimiento de Los Algarrobos, al sur de Los Anastacios y en el centro de Dolega Cabecera.

12.5. Estudio de susceptibilidad a deslizamientos

El distrito de Gualaca es un área en el que es frecuente que ocurran deslizamientos que causen pérdidas materiales en viviendas, cortes en vías de comunicación que conectan con otros distritos y provincias, pérdidas en terrenos que afectan a la ganadería, afectación a infraestructuras públicas como escuelas, estaciones de policía, infraestructura de abastecimiento de agua, e incluso, pérdida de vidas humanas.

Los resultados para la situación actual indican que gran parte de los corregimientos de Gualaca Cabecera, Paja de Sombrero y Los Ángeles, así como el sur de Hornito y noreste de Rincón, se encuentran en zonas de alta susceptibilidad a deslizamiento.

Asimismo se puede observar que, efectivamente, hay varias infraestructuras críticas localizadas en zonas de alta susceptibilidad, en Hornito la represa del Lago Fortuna y la carretera que comunica Chiriquí con Bocas del Toro; y en Gualaca Cabecera, la represa del Lago Barrigón, varias escuelas que se localizan próximas a la carretera o situadas en taludes, como en Calabazal, Los Planes y Bella Vista, y la toma de la planta de tratamiento de agua potable que conduce el agua desde el Embalse Barrigón.

En términos generales, el efecto del cambio climático consistiría en una elevación de los valores de susceptibilidad frente al deslizamiento, existiendo zonas donde ese incremento sería más palpable, como por ejemplo en el corregimiento de Hornito.

13. RECOMENDACIONES

El proceso llevado a cabo para la evaluación de ecosistemas y riesgos hidroclimáticos en el área urbana del distrito de Chiriquí ha dado lugar a la identificación de una serie de carencias en la información disponible y recomendaciones para futuros estudios de la misma naturaleza que se enumeran a continuación:

- Para la correcta caracterización de los caudales fluyentes, tanto en régimen medio como en régimen extremal, en los cauces del área de estudio sería conveniente contar con una mayor densidad de aforos y pluviómetros que permitan calibrar mejor el modelo hidrológico de las cuencas con largas series de datos observados.
- Respecto al análisis de la provisión de Servicios Ecosistémicos clave a la ciudad por parte de los ecosistemas del entorno y de la cuenca drenante, es conveniente disponer de la información más detallada posible de usos y ocupación del suelo. Concretamente, es aconsejable para futuros análisis tener información explícita sobre la localización del bosque de ribera o galería.
- En cuanto al modelo de gestión de usos del agua, ha faltado disponer información detallada de las demandas de agua para el consumo humano en las zonas que se encuentran fuera de la red del IDAAN, en su mayoría abastecidas por JAARs y pozos de los cuales no se tiene información concreta. De igual manera, existen vacíos de información sobre otros usos del agua existentes en la cuenca.
- El modelado de la inundación fluvial se ha realizado con la mejor información topográfica disponible, de acuerdo con la naturaleza del fenómeno, obteniendo los mejores resultados posibles dadas las características del proyecto. Sin embargo, si en futuros pudiera invertirse en la generación de datos más detallados la calidad de los resultados incrementaría considerablemente, ya que este tipo de información es fundamental en la caracterización de las amenazas de inundación.
- Otro aspecto que podría abordarse en futuros estudios de mayor alcance, y en la medida que se disponga de más información, es la estimación de los daños indirectos por inundación asociados a las infraestructuras críticas, que, además de sufrir daños directos, causan daños indirectos o sistémicos derivados de la interrupción de los flujos o servicios que prestan.

14. BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez-Martínez, J. y otros, 2018. Modelling the area of occupancy of habitat types with remote sensing.. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(3), pp. 580-593.
- Arenas-Castro, S., Regos, A. & González-Moreno, P., 2018. Modelos de distribución de especies en ecosistemas. En: *Geomática, Teledetección y Modelos Espaciales Aplicados a la Gestión de Sistemas Forestales*. s.l.:GEOFOREST, p. Capítulo 18.
- Beleño, E., Bolívar, G. & Jiménez-Pitre, I., 2022. Riesgos relacionados con el cambio climático de la flora y fauna asociada a bosques de manglar en el Caribe colombiano. *Intropica*, pp. 290-300.
- BID, 2019. *Bases generales para el desarrollo de estudios de reducción de riesgos hidrológicos en ciudades: lecciones aprendidas de la iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles ante el reto del cambio climático en Latinoamérica y el Caribe*. s.l.:Eduardo García, Ginés Suárez, Maricarmen Esquivel, Avelina Ruiz, Daniela Zuloaga, Ophelie Chevalier.
- BID, 2022. *Diagnóstico integral de la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá*, s.l.: s.n.
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F. & Marchi, L., 2013. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments.. *Geomorphology*, Volumen 188, pp. 31-41.
- Chausson, A. y otros, 2020. Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation. *Global Change Biology*, 26(11), pp. 6134-6155.
- Cutler, D. y otros, 2007. Random forests for classification in ecology.. *Ecology*, 11(88), pp. 2783 - 2792.
- Daily, G. y otros, 1997. Ecosystem Services: Benefits Supplied to Human Societies by Natural Ecosystems. *Issues in Ecology - Spring*, 1(2), pp. 1-18.
- De Groot, R., Wilson, M. & Boumans, R., 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological economics*, 41(3), pp. 393-408.
- Dunne, T., Zhang, W. & Abury, B., 1991. Effects of Rainfall, Vegetation, and Microtopography on Infiltration and Runoff. *Water resources research*, 27(9), pp. 2271-2285.
- Espinosa-Zuñiga, J., 2020. Aplicación de algoritmos Random Forest y XGBoost en una base de solicitudes de tarjetas de crédito. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 21(3).
- ETESA, 2008. *Resumen técnico análisis regional de crecidas máximas de Panamá, periodo 1971-2006*, Panamá: ETESA.
- Gaitan, J. y otros, 2021. La variación temporal del índice NDVI predice los cambios temporales de la cobertura vegetal en las tierras secas de la Patagonia argentina. *Ecosistemas*, 30(3).
- Ghofrani, Z., Sposito, V. & Faggian, R., 2017. A comprehensive review of blue-green infrastructure concepts. *International Journal of Environment and Sustainability*, 6(1).
- Guisan, A. & Thuilleer, W., 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8(9), pp. 993-1009.
- Guo, L. y otros, 2020. Revealing the fingerprint of climate change in interannual NDVI variability among biomes. *Remote Sensing*, 12(8).
- Hein, L., Van Koppen, K., de Groot, R. & van Earland, E., 2006. Spatial scales, stakeholders and the valuation of ecosystem services. *Ecological Economics*, 57(2), pp. 209-228.
- Hernández-Romero, G. y otros, 2022. From forest dynamics to wetland siltation in mountainous landscapes: A RS-based framework for enhancing erosion control. *Remote Sensing*, 14(8).
- Hopp, L. & McDonnell, J., 2009. Connectivity at the hillslope scale : Identifying interactions between storm size , bedrock permeability , slope angle and soil depth. *Journal of Hydrology*, Volumen 376, pp. 378-391.
- IDOM-IHCantabria, 2016. *Estudios de desarrollo urbano y cambio climático para el Área Metropolitana de Panamá Pacífico*, s.l.: s.n.
- IHCantabria, 2024. *Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Generación del Atlas Interactivo de Visualización de los Resultados para la República de Panamá*, s.l.: s.n.
- Jonkman, S. N., Vrijling, J. K. & Vrouwenvelder, A. C. W. M., 2008. *Methods for the estimation of loss of life due to floods: a literature review and a proposal for a new method*. s.l.:s.n.
- Maetens, W. y otros, 2012. Effects of land use on annual runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean: A meta-analysis of plot data.. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 36(5).
- MOP, 2007. *Atlas Nacional de la República de Panamá*, Panamá: s.n.
- Parruelo, J., Epstein, H., Lauenroth, W. & Burke, I., 1997. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. *Ecology*, 78(3), pp. 953-958.
- Pekel, J., Cottam, A., Gorelick, N. & Belward, A., 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, Volumen 540, pp. 418-422.

- Pérez-Silos, I., Álvarez-Martínez, J. & Barquín, J., 2021. Large-scale afforestation for ecosystem service provisioning: learning from the past to improve the future. *Landscape Ecology*, Volumen 36, pp. 3329-3343.
- Ponce, B. & Hawkings, R., 1996. Runoff curve number: Has it reached maturity?. *Hydrological Engineering*, Volumen 1.
- Sekercioglu, C., 2014. Ecosystem functions and services. En: N. Sodhi & P. Ehrlich, edits. *Conservation Biology for all*. Oxford: Oxford University Press, pp. 45-72.
- Sinha, P. y otros, 2019. Assessing the spatial sensitivity of a random forest model: Application in gridded population modeling.. *Computers, Environment and Urban Systems*, Volumen 75, pp. 132-145.
- Ward, R., Friess, D., Day, R. & McKenzie, R., 2016. Impacts of climate change on mangrove ecosystems: a region by region overview. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2(4).
- Zhong, Z., Li, J., Clausi, D. & Wong, A., 2019. Generative adversarial networks and conditional random fields for hyperspectral image classification.. *IEEE transactions on cybernetics*, 50(7), pp. 3318-3329.