



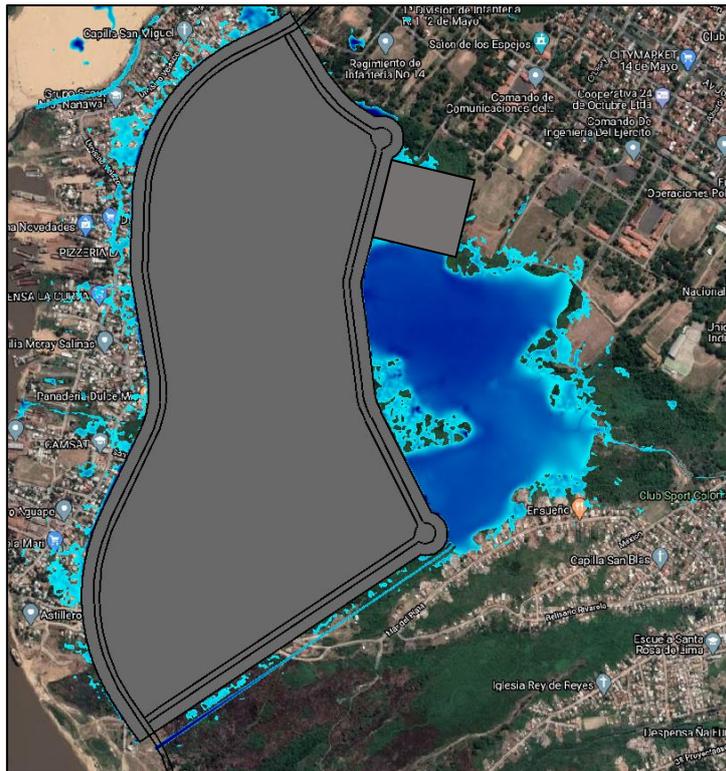
TETÁ REMBIAPO
HA MARANDU
Motenondcha
Ministerio de
OBRAS PÚBLICAS
Y COMUNICACIONES



ESTUDIOS COMPLEMENTARIOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS DEL BAÑADO SUR – BARRIO TACUMBÚ

PRODUCTO V

Diseño Preliminar



EQUIPO DE TRABAJO

Ing. Andrés Wehrle, PhD.
Ing. Benito Pereira, M.Sc.
Lic. Max Pasten
Lic. Fabiana Arévalos

Coordinador de Equipo
Especialista en Modelación Hidrológica e Hidráulica
Especialista en Modelación Climática
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

AGOSTO 2020

CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	1
1. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	2
2. MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT)	2
2.1 Trabajos de Campo	2
2.1.1 Relevamiento Topográfico.....	2
2.1.2 Tomas aéreas	4
2.2 Procesamiento en Gabinete	4
2.3 Resultados.....	5
3. BATIMETRÍA DE LA LAGUNA YRUPE.....	6
3.1 Generalidades	6
3.2 Metodología.....	6
3.2.1 Equipamiento para la Batimetría	6
3.2.1.1 GPS RTK Kólida K9	7
3.2.1.2 Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) Sontek S5.....	8
3.2.2 Equipamiento para el apoyo a la navegación	8
3.2.3 Montaje General de Equipos	9
3.2.4 Determinación del nivel de agua en la fecha de batimetría	9
3.3 Proceso de Levantamiento	10
3.4 Resultado de la Campaña	10
3.5 Conclusión de los trabajos de batimetría	11
4. CARACTERIZACIÓN DE LLUVIAS EXTREMAS Y NIVELES MÁXIMOS SOBRE EL RÍO PARAGUAY	13
4.1 Precipitación	13
4.2 Niveles del Río Paraguay.....	14
5. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....	17
5.1 Generalidades del Cambio Climático	17
5.2 Tendencias del Clima Global	18
5.2.1 Escenarios Futuros de Clima	18
6.2.1.1 Escenarios de Emisiones de CO ₂	19
5.3 Tendencias del Clima a Nivel Regional.....	20
5.3.1 Modelo Climático Regional (Modelo Eta)	21
5.3.2 Escenarios de Cambio Climático Analizados.....	22
5.3.2.1 Selección de la serie de datos de los modelos de la Plataforma PROECTA.....	22
5.3.2.2 Escenarios climáticos para la precipitación RCP 4.5 y RCP 8.5	26
5.4 Tormentas de diseño y los efectos del cambio climático	26

5.5	Elaboración de Curvas IDF Futuras	27
5.6	Hietogramas de diseño actual y futuro con efectos del cambio climático	28
5.7	Caudales y niveles del Río Paraguay bajo efectos del Cambio Climático	31
5.7.1	Introducción	31
5.7.2	Modelo de Grandes Bacias (MGB) de la Cuenca del Plata.....	31
5.7.3	Análisis de caudales máximos en la Estación Pilcomayo (Río Paraguay).....	33
6.	CARACTERIZACIÓN DE LA LAGUNA YRUPE	37
7.	ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE DISEÑO.....	40
7.1	Delimitación de cuencas	40
7.2	Estimación de parámetros de modelación hidrológica	41
7.2.1	Número de curva	41
7.2.2	Ancho equivalente de las cuencas	43
7.2.3	Almacenamiento en Depresiones.....	44
7.2.4	Precipitación de diseño	44
7.3	Resumen de parámetros y caudales de diseño obtenidos	44
8.	MODELACIÓN HIDRODINÁMICA 2D.....	50
8.1	Definición de geometría de canales y creación de MDT.....	50
8.2	Malla de simulación 2D y parámetros adoptados	55
9.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	56
9.1	Escenario Natural.....	56
9.2	Escenario con Canalizaciones.....	59
10.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	68
	ANEXOS	73
a.	Monografía del Mojón Base.....	74
b.	Características del Equipo ADCP Utilizado.....	75
c.	Hoja de Calibración del Equipo ADCP	76
d.	Curvas IDF	77
e.	Mapas de inundación para distintos escenarios.....	78
f.	Cortes esquemáticos de la implantación del canal sur.....	162

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Flujograma del proyecto	1
Figura 2 Área de estudio y trazado del proyecto Costanera Sur	2
Figura 3 Área de Estudio y GCPs levantados	4
Figura 4 Base de control del drone	4
Figura 5 Procesamiento de los datos de campo	5
Figura 6 Mosaico Ortorectificado	5
Figura 7 Modelo Digital de Elevación con Resolución de 7 cm	6
Figura 8 Esquema de Interconexión de los equipos (conexión directa o por cable).....	7
Figura 9 Calidad de los datos colectados durante el proceso de levantamiento	7
Figura 10 ADCP Sontek S5 ADCP y trasmitidos por el cable de conexión a la notebook para su visualización a través del Software “RiverSurveyor Live”	8
Figura 11 Proceso de preparación de equipo (Izq.) y Track de navegación de equipos (Der.)	8
Figura 12 Montaje de equipamiento	9
Figura 13 Puntos de Profundidad (A) y Puntos de Temperatura (B)	10
Figura 14 Puntos Levantados.....	11
Figura 15 MDT de la laguna Yrupe.....	12
Figura 16 Serie Registrada de Precipitación de la Estación AISP – Periodo: 1959 – 2019 (60 años)....	13
Figura 17 Precipitación Anual (1960 – 2019).....	13
Figura 18 Precipitación Media Mensual (Periodo: 1960 – 2019)	14
Figura 19 Curvas IDF de Asunción (Cuevas & Rolón, 2010).....	14
Figura 20 Niveles del Río Paraguay (Periodo: 1904 – 2019).....	15
Figura 21 Curva de permanencia del Río Paraguay (Puerto de Asunción)	15
Figura 22 Ajuste de las Distribuciones de Probabilidad Teórica Aplicadas a los Niveles del Río Paraguay	16
Figura 23 Esquema conceptual del dominio de un Modelo Climático Regional (MCR) utilizando como condición de borde un Modelo Climático Global	17
Figura 24 Escenarios de Emisión. Fuente: Relatório contendo a análise das simulações do modelo Eta-10 km para a região da Bacia do Prata, utilizando as condições do HadGEM2-ES RCP 4.5, para o período de 1961-2100	19
Figura 25 Localización del área de estudio a nivel regional. Fuente: Análisis Diagnóstico Transfronterizo (ADT) y programa de acciones estratégicas (PAE) (Maschinen et al., 2016)	20
Figura 26 Coordenadas utilizadas para la descarga de datos de los modelos climáticos de la plataforma PROJETA	22
Figura 27 Correlación entre la Precipitación Máxima Diaria Anual Observada en el Pluviómetro AISP y los distintos MCR	23
Figura 28 Serie de la Precipitación Máxima Diaria Mensual para todos los MCR	24
Figura 29 Precipitación Máxima Diaria para cada periodo de recurrencia: Serie Histórica (Considerada Escenario Actual), Escenario RCP 4.5 y 8.5. Modelo Eta alimentado por el MCG MIROC5.	24
Figura 30 Precipitación Máxima Diaria para cada periodo de recurrencia: Histórica (Considerada Escenario Actual), Escenario RCP 4.5 y 8.5. Modelo Eta alimentado por el MCG HADGEM2.	25
Figura 31 Precipitación Máxima Diaria para cada periodo de recurrencia: Histórica (Considerada Escenario Actual), Escenario RCP 4.5 y 8.5. Modelo Eta alimentado por el MCG CANES2.	25
Figura 32 Precipitación Máxima Diaria para cada periodo de recurrencia: Histórica (Considerada Escenario Actual), Escenario RCP 4.5 y 8.5. Modelo Eta alimentado por el MCG BESM.....	25

Figura 33 Anomalía para los escenarios RCP85, RCP45, modelo MIROC5 (2006-2099) con respecto a la línea base (1961-1990).....	26
Figura 34 Curvas IDF de Asunción bajo el escenario futuro de cambio climático RCP 4.5.....	28
Figura 35 Curvas IDF de Asunción bajo el escenario futuro de cambio climático RCP 8.5.....	28
Figura 36 Hietogramas de diseño para TR = 2 años	29
Figura 37 Hietogramas de diseño para TR = 5 años	29
Figura 38 Hietogramas de diseño para TR = 10 años	29
Figura 39 Hietogramas de diseño para TR = 25 años	30
Figura 40 Hietogramas de diseño para TR = 50 años	30
Figura 41 Hietogramas de diseño para TR = 100 años	30
Figura 42 Hietogramas de diseño para TR = 150 años	31
Figura 43 Mapa de ubicación de Estaciones pluviométricas.....	32
Figura 44 Distribuciones de Probabilidad Teórica y Empírica (Caudales Presentes: Serie 1960 - 1990)	34
Figura 45 Ajustes para las Distribuciones de Probabilidad Teórica utilizadas.....	34
Figura 46 Distribuciones de Probabilidad Teórica y Empírica (Caudales Futuros: Serie 2020 - 2099) .	35
Figura 47 Ajustes para las Distribuciones de Probabilidad Teórica (Caudales Futuros).....	35
Figura 48 Caudales Presentes y Futuros para distintos Tiempos de Recurrencia (TR).....	36
Figura 49 Corte transversal de la laguna Yrupe a lo largo de los puntos más bajos	37
Figura 50 Desagote actual de la Laguna Yrupe	38
Figura 51 Zonas de ingreso de agua en periodos de crecida (Río PY a cota 60,50 m)	38
Figura 52 Sistema de drenaje actual de la Laguna Yrupe (entrada de agua en azul oscuro y salida en celeste).....	39
Figura 53 Intervenciones sobre laguna Yrupe con la traza de la costanera sur y el refulado del barrio Tacumbú	39
Figura 54 Comparativo de la capacidad de almacenamiento de la laguna Yrupe para la situación actual y futura.....	40
Figura 55 Cuencas de aporte a la laguna Yrupe.....	41
Figura 56 Uso de suelo en las cuencas de estudio	42
Figura 57 Número de curva para el área de estudio	43
Figura 58 Subcuenca Urbana Tipo (izq.) y representación idealizada de sub-cuenca (Fuente: Manual SWMM 2016).....	43
Figura 59 Esquema conceptual del modelo SWMM.....	45
Figura 60 Caudales de diseño para la cuenca 02, 03, 04, 05, 06 y 07.....	46
Figura 61 Caudales de diseño para el Arroyo Paraguari (Salamanca) – Cuenca 08.....	46
Figura 62 Caudales de diseño para la cuenca 02, 03 04, 05, 06, 07. Escenario RCP 4.5.....	47
Figura 63 Caudales de diseño para el Arroyo Paraguari (Salamanca) – Cuenca 08. Escenario RCP 4.5.	47
Figura 64 Caudales de diseño para la cuenca 02, 03 04, 05, 06, 07. Escenario RCP 8.5.....	48
Figura 65 Caudales de diseño para el Arroyo Paraguari (Salamanca) – Cuenca 08. Escenario RCP 8.5.	48
Figura 66 Convolución de hidrogramas y caudal máximo que podría ingresar a la Laguna Yrupe (Línea punteada roja). TR = 100 años.	49
Figura 67 Sección transversal del Arroyo Salamanca (Paraguari) incorporado al MDT	50
Figura 68 Sección transversal utilizada para el desagote de la Laguna Yrupe	51
Figura 69 Curva de descarga del vertedero (Profundidades medidas sobre el fondo del vertedero que se encuentra a cota 59 msnm).....	51
Figura 70 Insumos para realizar el tránsito de hidrograma.....	52

Figura 71 Atenuación de hidrograma de diseño (TR = 100 años) en la Laguna Yrupe para las condiciones de vertido propuestas (Cálculo simplificado previo para definición de geometría del canal).....	52
Figura 72 Escenario Actual.....	53
Figura 73 Escenario con Costanera y Canal de Proyecto Referencial.....	53
Figura 74 Escenario con Costanera y Canal situado en línea de Talweg	54
Figura 75 Escenario con Costanera y Canal situado al sur de refulado (a pie de talud entre la costanera y la PTAR)	54
Figura 76 Malla de simulación 2D - Escenario con Costanera y Canal de Proyecto Referencial, con Canal situado en línea de Talweg y Canal situado al sur del refulado.....	55
Figura 77 Polígonos de rugosidad de Manning para los distintos escenarios.....	55
Figura 78 Caudal de salida de la laguna Yrupe para el escenario natural (Izq: transecta donde se evalúa el caudal erogado; Der: hidrograma de salida)	56
Figura 79 Cruce de línea de Talweg en la calle Urcisino Velazco (polígono verde), viviendas (polígonos rojos). Escenario para Cota + 59.67	57
Figura 80 Salida de agua en el cruce existente en la calle Urcisino Velazco	57
Figura 81 Nivel de Aguas Máxima en la Laguna Yrupe para el Escenario Natural.....	58
Figura 82 Evolución del Nivel de Agua en la laguna Yrupe para una tormenta asociada a un TR = 100 años (ESCENARIO ACTUAL)	58
Figura 83 Viviendas afectadas por una lluvia asociada a TR = 100 años y el Río Paraguay bajo.....	59
Figura 84 Caudal de salida de la Laguna Yrupe (en la embocadura del vertedero) para el escenario con la Costanera Sur implantada y el canal del proyecto referencial trabajando como vertedero	59
Figura 85 Caudal de salida de la Laguna Yrupe (en la embocadura del vertedero) para el escenario con la Costanera Sur implantada y el canal situado en la línea de talweg trabajando como vertedero	60
Figura 86 Caudal de salida de la Laguna Yrupe (en la embocadura del vertedero) para el escenario con la Costanera Sur implantada y el canal situado al sur del refulado (entre la costanera y la PTAR)	60
Figura 87 Geometría canal de la laguna Fuente: adaptado del proyecto referencial de costanera sur	60
Figura 88 Evolución del Nivel de Aguas en la alternativa propuesta para un TR = 100 años.....	61
Figura 89 Huellas de inundación para un TR = 100 años (Río Paraguay por debajo de cota +58.00) para un escenario climático actual	61
Figura 90 Huellas de inundación para un TR = 100 años (Río Paraguay por debajo de cota +58.00) contemplando un Escenario de Cambio Climático RCP 4.5.....	62
Figura 91 Huellas de inundación para un TR = 100 años (Río Paraguay por debajo de cota +58.00) contemplando un Escenario de Cambio Climático RCP 8.5.....	62
Figura 92 Situación del Barrio Tacumbú para una recurrencia de 2 años del Río Paraguay	64
Figura 93 Situación del Barrio Tacumbú para una recurrencia de 5 años del Río Paraguay	64
Figura 94 Situación del Barrio Tacumbú para una recurrencia de 10 años del Río Paraguay	65
Figura 95 Situación del Barrio Tacumbú para una recurrencia de 25 años del Río Paraguay	65
Figura 96 Situación del Barrio Tacumbú para una recurrencia de 50 años del Río Paraguay	66
Figura 97 Situación del Barrio Tacumbú para una recurrencia de 100 años del Río Paraguay	66
Figura 98 Situación del Barrio Tacumbú para una recurrencia de 150 años del Río Paraguay	67
Figura 99 Situación del Barrio Tacumbú para una recurrencia de 500 años del Río Paraguay	67
Figura 100 Traza de canal norte (celeste) vs. Viviendas existentes.....	68
Figura 101 Traza de canal central (celeste) vs. Viviendas existentes	69
Figura 102 Traza de canal sur (no hay viviendas)	69

Figura 103 Canal de desagote de laguna funcionando como vertedero. Fuente: adaptado del proyecto referencial de costanera sur.....	70
Figura 104 Ejemplo de canal de aguas bajas en el Arroyo Jaén	70
Figura 105 Criterios para la definición del Cordón de Protección.....	71
Figura 106 Cordón y zona de protección para la Laguna Yrupe	72
Figura 107 EscenarioActual_Natural_TR2	78
Figura 108 EscenarioActual_CanalNorte_TR2	79
Figura 109 EscenarioActual_CanalCentral_TR2.....	80
Figura 110 EscenarioActual_CanalSur_TR2	81
Figura 111 EscenarioRCP4.5_Natural_TR2	82
Figura 112 EscenarioRCP4.5_CanalNorte_TR2	83
Figura 113 EscenarioRCP4.5_CanalCentral_TR2.....	84
Figura 114 EscenarioRCP4.5_CanalSur_TR2	85
Figura 115 EscenarioRCP8.5_Natural_TR2	86
Figura 116 EscenarioRCP8.5_CanalNorte_TR2	87
Figura 117 EscenarioRCP8.5_CanalCentral_TR2.....	88
Figura 118 EscenarioRCP8.5_CanalSur_TR2	89
Figura 119 EscenarioActual_Natural_TR5	90
Figura 120 EscenarioActual_CanalNorte_TR5	91
Figura 121 EscenarioActual_CanalCentral_TR5.....	92
Figura 122 EscenarioActual_CanalSur_TR5	93
Figura 123 EscenarioRCP4.5_Natural_TR5	94
Figura 124 EscenarioRCP4.5_CanalNorte_TR5	95
Figura 125 EscenarioRCP4.5_CanalCentral_TR5.....	96
Figura 126 EscenarioRCP4.5_CanalSur_TR5	97
Figura 127 EscenarioRCP8.5_Natural_TR5	98
Figura 128 EscenarioRCP8.5_CanalNorte_TR5	99
Figura 129 EscenarioRCP8.5_CanalCentral_TR5.....	100
Figura 130 EscenarioRCP8.5_CanalSur_TR5	101
Figura 131 EscenarioActual_Natural_TR10	102
Figura 132 EscenarioActual_CanalNorte_TR10	103
Figura 133 EscenarioActual_CanalCentral_TR10.....	104
Figura 134 EscenarioActual_CanalSur_TR10	105
Figura 135 EscenarioRCP4.5_Natural_TR10	106
Figura 136 EscenarioRCP4.5_CanalNorte_TR10	107
Figura 137 EscenarioRCP4.5_CanalCentral_TR10.....	108
Figura 138 EscenarioRCP4.5_CanalSur_TR10	109
Figura 139 EscenarioRCP8.5_Natural_TR10	110
Figura 140 EscenarioRCP8.5_CanalNorte_TR10	111
Figura 141 EscenarioRCP8.5_CanalCentral_TR10.....	112
Figura 142 EscenarioRCP8.5_CanalSur_TR10	113
Figura 143 EscenarioActual_Natural_TR25	114
Figura 144 EscenarioActual_CanalNorte_TR25	115
Figura 145 EscenarioActual_CanalCentral_TR25.....	116
Figura 146 EscenarioActual_CanalSur_TR25	117
Figura 147 EscenarioRCP4.5_Natural_TR25	118
Figura 148 EscenarioRCP4.5_CanalNorte_TR25	119
Figura 149 EscenarioRCP4.5_CanalCentral_TR25.....	120

Figura 150 EscenarioRCP4.5_CanalSur_TR25	121
Figura 151 EscenarioRCP8.5_Natural_TR25	122
Figura 152 EscenarioRCP8.5_CanalNorte_TR25	123
Figura 153 EscenarioRCP8.5_CanalCentral_TR25.....	124
Figura 154 EscenarioRCP8.5_CanalSur_TR25	125
Figura 155 EscenarioActual_Natural_TR50	126
Figura 156 EscenarioActual_CanalNorte_TR50	127
Figura 157 EscenarioActual_CanalCentral_TR50.....	128
Figura 158 EscenarioActual_CanalSur_TR50	129
Figura 159 EscenarioRCP4.5_Natural_TR50	130
Figura 160 EscenarioRCP4.5_CanalNorte_TR50	131
Figura 161 EscenarioRCP4.5_CanalCentral_TR50.....	132
Figura 162 EscenarioRCP4.5_CanalSur_TR50	133
Figura 163 EscenarioRCP8.5_Natural_TR50	134
Figura 164 EscenarioRCP8.5_CanalNorte_TR50	135
Figura 165 EscenarioRCP8.5_CanalCentral_TR50.....	136
Figura 166 EscenarioRCP8.5_CanalSur_TR50	137
Figura 167 EscenarioActual_Natural_TR100	138
Figura 168 EscenarioActual_CanalNorte_TR100	139
Figura 169 EscenarioActual_CanalCentral_TR100.....	140
Figura 170 EscenarioActual_CanalSur_TR100	141
Figura 171 EscenarioRCP4.5_Natural_TR100	142
Figura 172 EscenarioRCP4.5_CanalNorte_TR100	143
Figura 173 EscenarioRCP4.5_CanalCentral_TR100.....	144
Figura 174 EscenarioRCP4.5_CanalSur_TR100	145
Figura 175 EscenarioRCP8.5_Natural_TR100	146
Figura 176 EscenarioRCP8.5_CanalNorte_TR100	147
Figura 177 EscenarioRCP8.5_CanalCentral_TR100.....	148
Figura 178 EscenarioRCP8.5_CanalSur_TR100	149
Figura 179 EscenarioActual_Natural_TR150	150
Figura 180 EscenarioActual_CanalNorte_TR150	151
Figura 181 EscenarioActual_CanalCentral_TR150.....	152
Figura 182 EscenarioActual_CanalSur_TR150	153
Figura 183 EscenarioRCP4.5_Natural_TR150	154
Figura 184 EscenarioRCP4.5_CanalNorte_TR150	155
Figura 185 EscenarioRCP4.5_CanalCentral_TR150.....	156
Figura 186 EscenarioRCP4.5_CanalSur_TR150	157
Figura 187 EscenarioRCP8.5_Natural_TR150	158
Figura 188 EscenarioRCP8.5_CanalNorte_TR150	159
Figura 189 EscenarioRCP8.5_CanalCentral_TR150.....	160
Figura 190 EscenarioRCP8.5_CanalSur_TR150	161
Figura 191 Sección transversal esquemática en embocadura	162
Figura 192 Sección transversal esquemática en zona de PTAR.....	163

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Lista de puntos levantados	3
Tabla 2 Coordenadas de los puntos de referencia levantados.....	9
Tabla 3 Planilla de resultados de puntos levantados (solo a nivel de referencia).....	10
Tabla 4 Niveles de referencia del Río Paraguay.....	15
Tabla 5 Cota del N.A del Río Paraguay para distintos periodos de recurrencia y distintas distribuciones de probabilidad teórica	16
Tabla 6 Evolución de los caudales medios sobre el río Paraguay (en naranja la estación Asunción que representa el trecho de estudio). Fuente: Adaptado de “Modelación hidrológica de la Cuenca del Río de la Plata utilizando el Modelo Hidrológico de las Grandes Cuencas MGB – IPH” (Collischonn et. al, 2015).	21
Tabla 7 Factores de ajuste de las curvas actuales para representar distintos escenarios futuros de cambio climático (MCR Eta alimentado por MCG MIROC5 – Escenario hasta 2100).....	27
Tabla 8 Resumen de indicadores de ajuste del Modelo Hidrológico. Fuente: Projeto Modelagem Hidrológica da Bacia do Prata utilizando o MGB-IPH - Produto N2: Impacto das Mudanças Climáticas na Bacia do Prata. Collischonn, et. al. 2015.	32
Tabla 9 Evolución del caudal medio (m ³ /s) del Río Paraguay y proyecciones a futuro (Simulación del MGB-IPH). Fuente: Projeto Modelagem Hidrológica da Bacia do Prata utilizando o MGB-IPH - Produto N2: Impacto das Mudanças Climáticas na Bacia do Prata. Collischonn, et. al. 2015.....	33
Tabla 10 Evolución del caudal mínimo (m ³ /s) del Río Paraguay y proyecciones a futuro (Simulación del MGB-IPH). Fuente: Projeto Modelagem Hidrológica da Bacia do Prata utilizando o MGB-IPH - Produto N2: Impacto das Mudanças Climáticas na Bacia do Prata. Collischonn, et. al. 2015.....	33
Tabla 11 Comparativo de caudales presentes y futuros	36
Tabla 12 Criterio utilizado para la asignación del Número de Curva (CN)	42
Tabla 13 Parámetros estimados	45
Tabla 14 Resumen de superficies de inundación para distintos TR's y Escenarios de Cambio Climático	63
Tabla 15 Resumen de cantidad de viviendas afectadas por inundación.....	68



RESUMEN EJECUTIVO

El presente documento se constituye en el Producto V de la consultoría denominada “Estudios Complementarios Hidrológicos e Hidráulicos del Bañado Sur – Barrio Tacumbú”. El Producto V consiste en un compendio de todos los trabajos efectuados en la consultoría, para llegar al objetivo de estos estudios propuestos en los TDRs que fue el de realizar un diseño preliminar del sistema de drenaje de la laguna Yrupé y su zona aledaña con el propósito de reducir los efectos de las obras de la Avenida Costanera y la rehabilitación del Barrio Tacumbú.

Para lograr el objetivo se diseñó el siguiente flujograma, el cual consistió en obtener la información de terreno e hidrometeorológica de la laguna y sus cuencas de aporte para luego de introducirlo en un modelo 2D y teniendo en cuenta el comportamiento actual de la laguna comparar con los escenarios futuros de manera a mantener las condiciones actuales de la misma

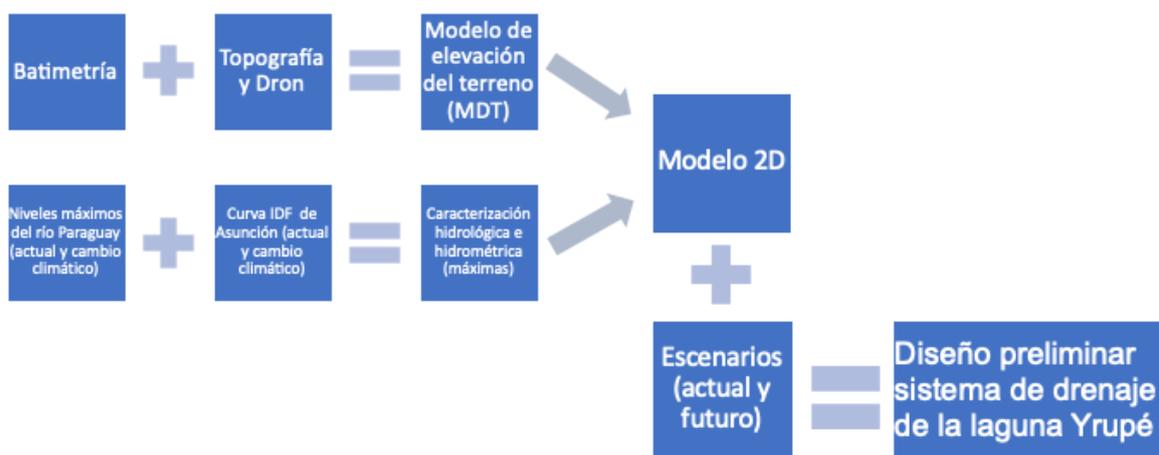


Figura 1 Flujograma del proyecto

Luego del presente estudio se cuenta con los siguientes productos los cuales son detallados en este informe

- ⇒ modelo digital del terreno (MDT)
- ⇒ Mosaico aéreo ortorectificado
- ⇒ Batimetría de la laguna Yrupe
- ⇒ Modelo hidrológico de las cuencas de aporte y modelo 2D de la laguna Yrupe y su conexión con el río Paraguay
- ⇒ Diseño preliminar del sistema de drenaje de la laguna Yrupé

Cabe señalar que el análisis realizado se basó en el estado actual de la laguna teniendo en cuenta que toda la zona ha sido antropogenizada, realizándose rellenos en los bañados y con ellos cambiando en el transcurso de los años el comportamiento de la laguna (contaminación del agua, presencia de residuos sólidos, arrastre de sedimentos, etc). En el marco del presente estudio se analizan las medidas hidráulicas necesarias para mantener el funcionamiento actual (línea base), razón por la cual, cuestiones relacionadas a la gestión integral de residuos sólidos, calidad de agua y arrastre de sedimentos de las cuencas de aporte quedan fuera del análisis. La futura gestión integral de los recursos hídricos urbanos (residuos sólidos, sedimentos, aguas servidas, inundaciones urbanas, etc.) en las cuencas aportantes, deben ser evaluadas eventualmente por especialistas de dichas disciplinas.



1. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio consiste en toda la zona de influencia de la Laguna Yrupe, la cual será intervenida por el proyecto Costanera Sur. El área de estudio aproximada se muestra en la siguiente figura.



Figura 2 Área de estudio y trazado del proyecto Costanera Sur

2. MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT)

En el presente apartado se resumen los trabajos realizados con el objetivo de obtener un mosaico aéreo ortorrectificado de alta resolución, y un modelo digital del terreno (MDT) que será empleado en el modelo hidrológico hidráulico de la zona de estudio.

Los trabajos realizados comprenden las etapas de relevamiento de los datos de campo, y posteriormente su procesamiento en gabinete para la generación de los productos mencionados.

2.1 Trabajos de Campo

Los trabajos de campo comprenden la identificación y relevamiento de puntos de control mediante técnicas de topografía “convencional”, así como la toma de imágenes aéreas que se emplean para la elaboración del mosaico.

2.1.1 Relevamiento Topográfico

Los trabajos de topografía se iniciaron en fecha 17 de diciembre de 2019. En primer lugar, se procedió a identificar un punto de referencia que permita georreferenciar correctamente el trabajo. Se escogió para ello el mojón ubicado en el predio de la Dirección del Servicio Geográfico Militar (DISERGEMIL), identificado como MR2 y cuya monografía se incluye en Anexos. En dicho punto se dejó estacionada



la base de un GPS GNSS de frecuencia doble. Una vez iniciada la base, se relevaron puntos de control en tierra o GCPs por sus siglas en inglés (Ground Control Points) que puedan ser identificables en las imágenes aéreas. Estos puntos se emplean más adelante para georreferenciar tanto el mosaico de imágenes aéreas como el modelo digital del terreno.

Los relevamientos fueron realizados mediante un GPS GNSS marca Trimble, modelo R8, mediante técnica de post procesamiento cinemático (PPK por sus siglas en inglés). El cálculo de las coordenadas fue realizado en gabinete empleando el Software Trimble Business Center (TBC).

En la **Tabla 1** se listan los GCPs relevados y sus coordenadas referidas a la proyección UTM Zona 21 Sur; las cotas por su parte corresponden al nivel medio del mar (NMM) obtenidas a partir del mojón MR2 antes mencionado.

Tabla 1 Lista de puntos levantados

#	Punto	Este (m)	Norte (m)	Elevación NMM (m)
1	PA-1 RM2	438190.873	7204045.416	78.651
2	banadosur	432918.473	7201617.356	64.316
3	puoi	433260.311	7201839.419	67.578
4	puoj	433644.846	7201627.74	75.186
5	costaneri	433321.987	7200040.305	59.805
6	costanerj	434725.954	7200963.052	86.635
7	costanerk	434755.496	7200154.295	63.28
8	costanerl	435157.979	7199588.583	62.085
9	costanerm	435453.913	7198926.173	62.976
10	RN-YRUPE1	433447.706	7200110.377	60.144

Se relevaron un total de 8 GCPs, en el área de estudio y sus proximidades, tal como se observa en la figura; se relevó además de la estaca ubicada en las cercanías de la Laguna Yrupé, y utilizada como base para los trabajos de batimetría. De esta forma, será posible relacionar las coordenadas levantadas mediante ambos relevamientos (batimetría y aerofotogrametría) y elaborar un modelo digital del terreno que incluya el fondo de la laguna.

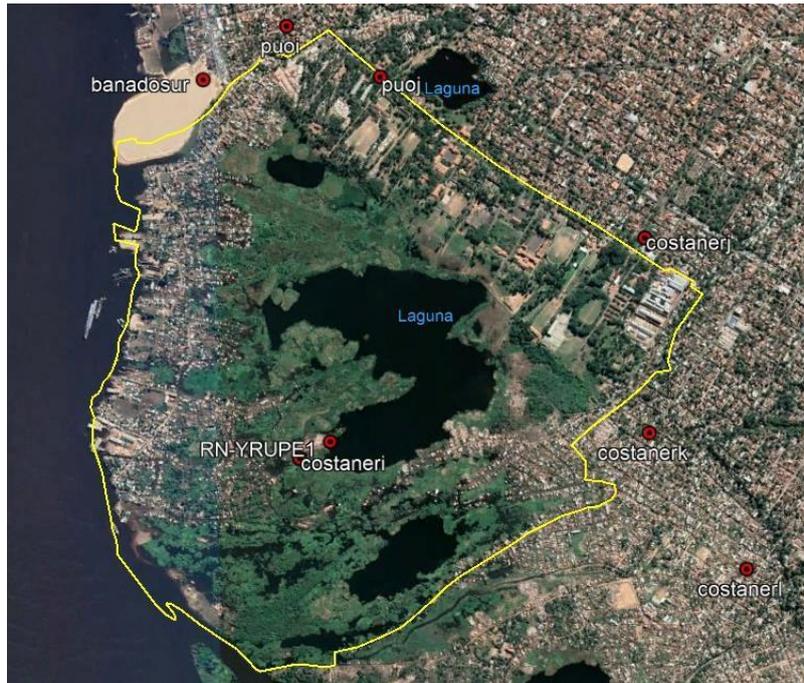


Figura 3 Área de Estudio y GCPs levantados

2.1.2 Tomas aéreas

Los días 19 y 20 de diciembre de 2019 se realizaron las tomas aéreas mediante un dron de ala fija, marca Sensefly, modelo eBee+.

El dron posee un software para planificación y control automático de vuelo, mediante una señal de radio transmitida desde una computadora en la base de vuelo, la que se observa en la **Figura 4**.



Figura 4 Base de control del dron

2.2 Procesamiento en Gabinete

Con los datos colectados en la campaña topográfica y las imágenes aéreas, se procedió al procesamiento del trabajo, para lo cual se empleó el software Pix4D Mapper Pro; una captura de la pantalla del procesamiento se muestra en la figura siguiente.



Figura 5 Procesamiento de los datos de campo

Como resultado se han obtenido los siguientes productos iniciales:

- Nube de puntos clasificada automáticamente por el software
- Mosaico aéreo ortorrectificado

La nube de puntos ya clasificada automáticamente por el software fue posteriormente revisada y editada en forma manual para eliminar los puntos incorrectamente clasificados. De esta manera se obtuvo una nube de puntos “filtrada”, que sirvió para generar el Modelo Digital del Terreno (MDT) mediante algoritmos en ambiente R¹.

2.3 Resultados

Como resultado de los trabajos, se han generado los siguientes productos:

- Mosaico aéreo ortorrectificado, con resolución de 7 centímetros por píxel, en formato jpg.



Figura 6 Mosaico Ortorectificado

¹ “R” es un lenguaje y ambiente para computación y análisis estadístico



- Modelo Digital del Terreno (MDT), en formato Geotiff.

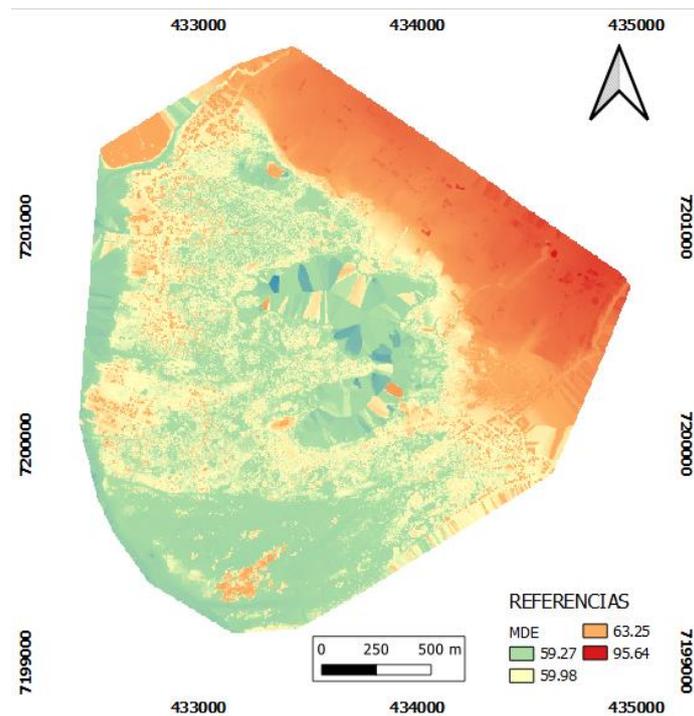


Figura 7 Modelo Digital de Elevación con Resolución de 7 cm

Tal como se observa en la figura anterior, el MDT no releva datos topográficos de la laguna. Por este motivo, se realiza una campaña de batimetría para incluir la información topográfica de la laguna Yrupe. Esto se muestra en el siguiente apartado.

3. BATIMETRÍA DE LA LAGUNA YRUPE

3.1 Generalidades

El trabajo de levantamiento de campo fue realizado en fecha 08 de enero de 2020. Las mediciones de campo se realizaron con un equipo “Acoustic Doppler Current Profiler” (ADCP) por sus siglas en inglés o “perfilador de corriente doppler acústico”, el cual es un instrumento que calcula las componentes de la velocidad del agua en diferentes capas de la columna de la misma, en las 3 direcciones, así como también la topografía del fondo. Para su determinación, se basa en el efecto Doppler, transmitiendo sonidos a una frecuencia fija y escuchando los ecos retornados por los reflectores en el agua. Estos reflectores son pequeñas partículas microscópicas de sedimentos o plancton presentes naturalmente en el agua, que se mueven a una velocidad igual que la misma. En el presente trabajo no se han considerado los vectores de velocidad, sino únicamente la batimetría de fondo.

3.2 Metodología

El presente apartado describe los procedimientos asociados al levantamiento propiamente dicho, a la configuración de los equipos utilizados.

3.2.1 Equipamiento para la Batimetría

El equipamiento utilizado es el ADCP Sontek S5 conectado directamente a una notebook y a un GPS RTK con placa de la marca Trimble con precisión centimétrica y corrección en cinética en tiempo real



(RTK). En la **Figura 8** se muestra el sistema de interconexión entre los equipos utilizados bajo un esquema directo o por cable.

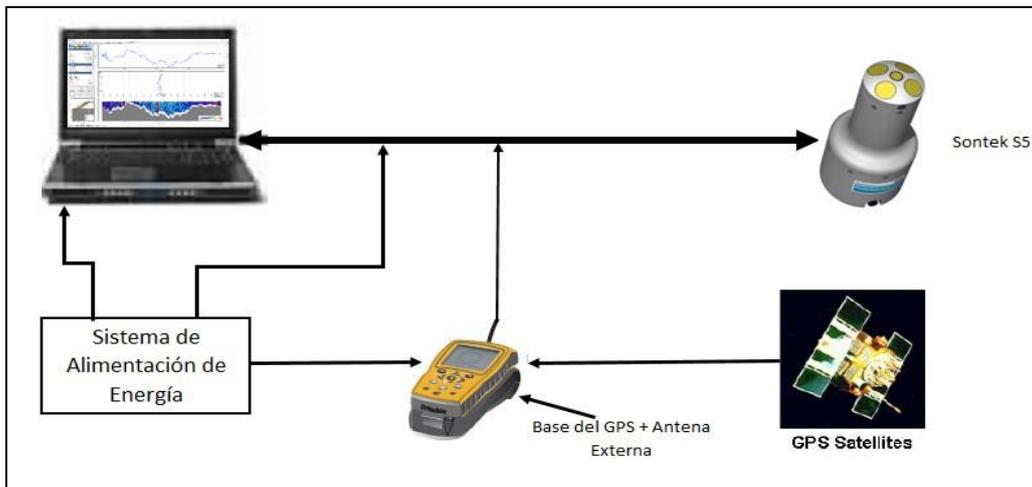


Figura 8 Esquema de Interconexión de los equipos (conexión directa o por cable)

El cable de interconexión del ADCP, en un extremo posee un conector macho (sub-acuático) de ocho pines con manga de bloqueo para evitar la desconexión del cable del ADCP, en el otro extremo posee tres terminales, una terminal serial de comunicación con la notebook, un cable serial de acoplamiento a GPS externo y una terminal de alimentación de energía.

Durante todo el proceso de levantamiento, tanto la notebook y el ADCP fueron alimentados por una batería externa, el GPS fue alimentado por su propia batería debiendo ser reemplazada en una oportunidad durante el proceso de levantamiento.

3.2.1.1 GPS RTK Kólide K9

Para el levantamiento se ha utilizado un GPS RTK Kólide K9 configurado para transmitir la cadena de datos GGA VTG al ADCP Sontek S5.

La referencia de velocidad por GPS GGA: GPVGA (GGA) se refiere a un protocolo NMEA-0183 específico para generar datos de posición GPS. El GPS transmite los datos de coordenadas UTM al ADCP referidas al Elipsoide WGS 1984. El máximo valor de HDOP alcanzado durante la medición fue de 1.1, valor que cae dentro de la mejor categoría, siendo esta de "Ideal".

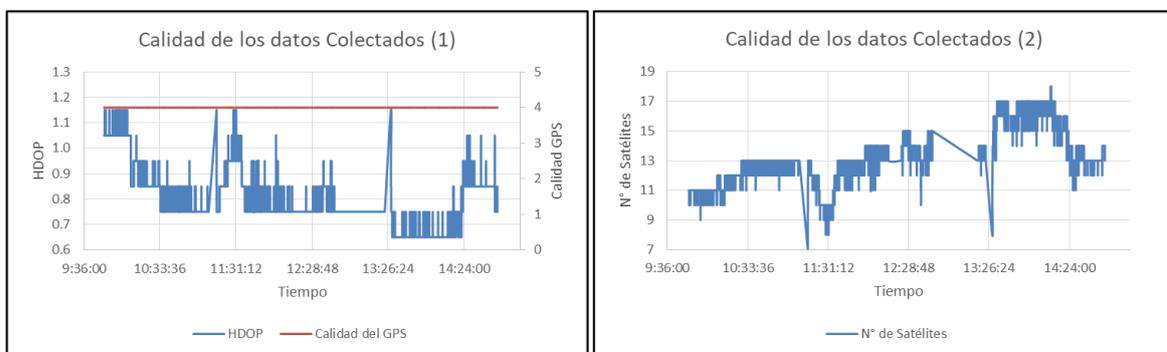


Figura 9 Calidad de los datos colectados durante el proceso de levantamiento

El HDOP permaneció entre 0.6 y 1.1, la calidad del GPS fue de 4, es decir RTK Fijo y el n° de satélites varió entre 7 y 18, con los valores más bajos durante el proceso de cambio de baterías.



3.2.1.2 Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) Sontek S5

Tiene cuatro transductores de medición de velocidad de 3.0 MHz en una configuración de Janus (un arreglo de transductores orientados en direcciones opuestas) que mide en un rango de entre 0.2 a 5.0 metros de profundidad. Un haz acústico vertical de 1.0 MHz (ecosonda) proporciona los datos de profundidad hasta una profundidad máxima de 15 metros, sensor de temperatura incorporado, brújula de dos ejes, tarjeta de memoria interna de 16GB y procesador electrónico. Todos los datos son procesados y almacenados por él.

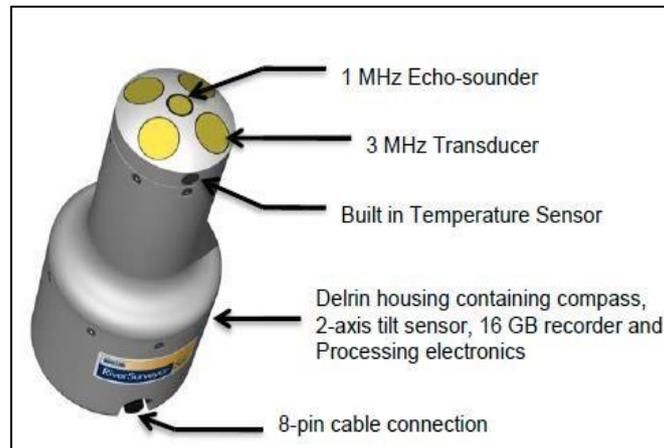


Figura 10 ADCP Sontek S5 ADCP y transmitidos por el cable de conexión a la notebook para su visualización a través del Software “RiverSurveyor Live”

El ADCP recibe el dato de ubicación mediante la cadena GGA y VTG de GPS al tiempo que mide la profundidad del lecho de la laguna mediante el “Vertical Beam” o Haz Vertical.

3.2.2 Equipamiento para el apoyo a la navegación

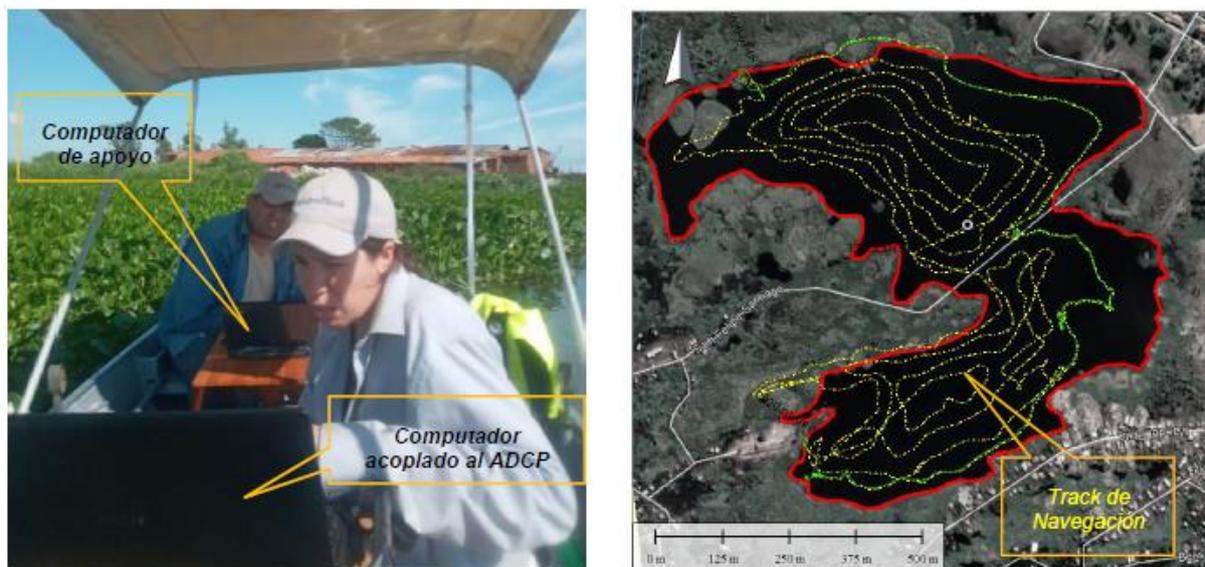


Figura 11 Proceso de preparación de equipo (Izq.) y Track de navegación de equipos (Der.)

Con el fin de conocer en todo momento el recorrido realizado por la embarcación y el área cubierta se montó un equipo independiente de navegación consistente en un GPS navegador de la marca Garmin 78SMap, con antena externa acoplado a una computadora con imagen satelital geo-



referenciada con el área a ser cubierta según la propuesta técnica donde en tiempo real el GPS grafica sobre la imagen el recorrido realizado (track).

3.2.3 Montaje General de Equipos

Tanto el equipamiento de batimetría y apoyo a la navegación fueron montados a bordo de la embarcación menor denominada PK15-17. La tripulación y la embarcación contaron con todos los elementos de seguridad y la instrucción necesaria para el desarrollo de las actividades. El ADCP fue montado en su plataforma de flotación independiente y ésta fue remolcada a estribor de la embarcación.

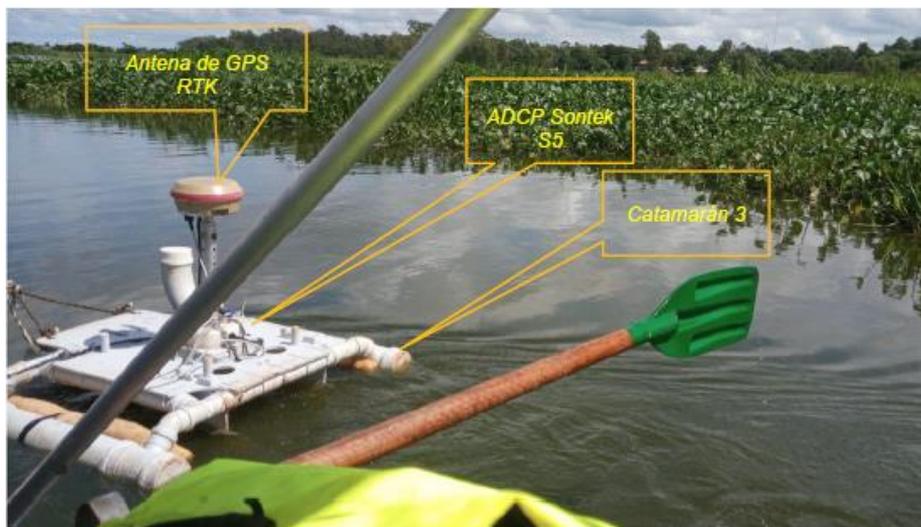


Figura 12 Montaje de equipamiento

La embarcación cuenta con la documentación emitida por la autoridad competente: matrícula, patente y carnet de conductor de embarcaciones menores².

3.2.4 Determinación del nivel de agua en la fecha de batimetría

El levantamiento batimétrico de las profundidades medias ha sido referido al datum del limnómetro de Asunción cuyo cero se encuentra en la cota 54.04 [m] sobre el nivel del Mar (ANNP, 1991). Las coordenadas Este, Norte y Cota de la estaca “RN-YRUPE1” han sido proveídas por el equipo de levantamiento de aerofotogrametría y se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2 Coordenadas de los puntos de referencia levantados

ID Punto	Este (Local) [m]	Norte (Local) [m]	Elevación (Local) [m]	Descripción
1	433447,706	7200110,377	60,144	RN-YRUPE1
2	433452,660	7200109,720	59,033	Pelo de Agua
ΔH RTK*			1,111	[m]
ΔH Nivelación Geométrica**			1,106	[m]
ΔH Nivelación Geométrica y ΔH RTK***			5,478	[mm]
Cota del Pelo de Agua Adoptado****			59,038	[m]

² “Embarcación Menor” es la categoría de la embarcación.



* Diferencia de nivel entre la estaca "RN-YRUPE1" y la estaca de Pelo de Agua, medida con GPS-RTK.
 **Diferencia de nivel entre la estaca "RN-YRUPE1" y la estaca de Pelo de Agua, medida con Nivelación Geométrica (lectura de la regla en la escala milimétrica).
 ***Diferencia entre los dos métodos anteriores.
 ****A la cota del Pelo de Agua Adoptado se resta la profundidad medida por el ADCP, para obtener la cota del fondo de la laguna.

3.3 Proceso de Levantamiento

El levantamiento fue realizado generando una "espiral", empezando el levantamiento bordeando el contorno navegable de la laguna y luego avanzando el contorno en forma paralela hacia el centro.

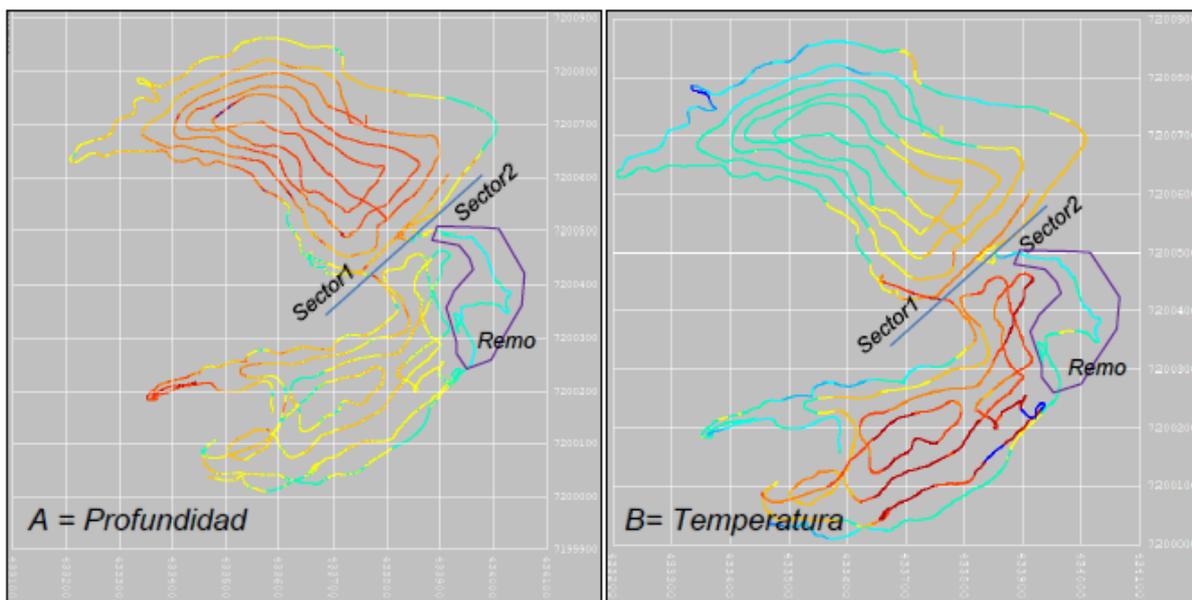


Figura 13 Puntos de Profundidad (A) y Puntos de Temperatura (B)

En primer lugar, se ha levantado el sector 1 y luego se ha levantado el sector 2. Puede observarse que el sector 2 es en general menos profundo que el sector 1, siendo rojo más profundo y cálido, que el azul. Los puntos encerrados en el polígono de color lila han sido levantados navegando a remo debido al poco calado para la navegación con motor.

3.4 Resultado de la Campaña

Se han levantado 14594 puntos con coordenadas UTM y mediciones de profundidad. La nube de puntos se ha amarrado al levantamiento de aerofotogrametría.

Tabla 3 Planilla de resultados de puntos levantados (solo a nivel de referencia)

Pto	Mínimo	7	4	30,5	0,6	Puntos Levantados		0,27	Cota P.A [m]
	Máximo	18	4	34,1	1,1			1,08	59,038
	Hora hh:mm:ss	N° de Satélites	Calidad del GPS	Temperatura del Agua [°C]	HDOP	UTM Este [m] Ajustado	UTM Norte [m] Ajustado	Profundidad [m]	Cota Ajustada
1	9:51:18	11	4	30,9	1	433467,51	7200038,61	0,65	58,388
2	9:51:19	11	4	30,9	1	433467,44	7200038,58	0,64	58,398
3	9:51:20	11	4	30,9	1	433467,36	7200038,54	0,65	58,388
4	9:51:21	11	4	30,9	1	433467,30	7200038,51	0,66	58,378
5	9:51:22	11	4	30,9	1	433467,24	7200038,48	0,65	58,388
6	9:51:23	11	4	30,9	1	433467,20	7200038,45	0,66	58,378
7	9:51:24	11	4	30,9	1	433467,15	7200038,44	0,65	58,388
8	9:51:25	11	4	30,9	1	433467,13	7200038,42	0,65	58,388



14584	14:49:19	14	4	33,2	0,7	433454,52	7200088,85	0,42	58,618
14585	14:49:21	13	4	33,2	0,8	433454,54	7200088,75	0,44	58,598
14586	14:49:22	13	4	33,2	0,8	433454,50	7200088,68	0,44	58,598
14587	14:49:23	13	4	33,2	0,8	433454,45	7200088,60	0,41	58,628
14588	14:49:26	14	4	33,2	0,7	433454,21	7200088,19	0,43	58,608
14589	14:49:27	14	4	33,2	0,7	433454,15	7200088,07	0,42	58,618
14590	14:49:28	14	4	33,2	0,7	433454,08	7200087,92	0,40	58,638
14591	14:49:30	14	4	33,2	0,7	433454,03	7200087,69	0,44	58,598
14592	14:49:31	14	4	33,2	0,7	433454,04	7200087,59	0,45	58,588
14593	14:49:32	14	4	33,2	0,7	433454,06	7200087,46	0,45	58,588
14594	14:49:33	14	4	33,2	0,7	433454,05	7200087,32	0,44	58,598

En la tabla anterior se muestran los datos colectados por punto. Por cada punto se ha colectado, la hora de levantamiento, el número de satélites, la calidad de la corrección, la Temperatura del agua, el HDOP, las coordenadas Este, Norte y Profundidad, y la cota fue calculada a partir de la cota del Pelo de Agua restándole a ésta, la profundidad.

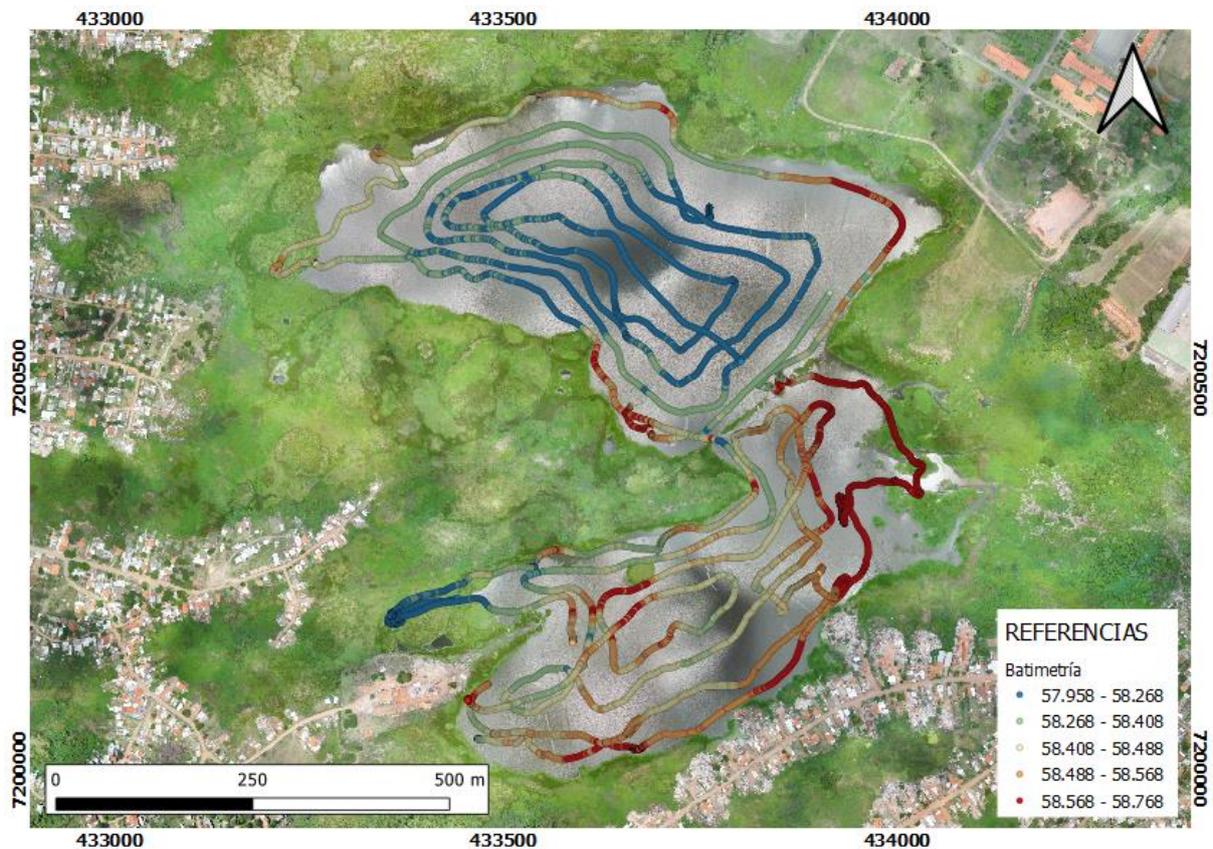


Figura 14 Puntos Levantados

3.5 Conclusión de los trabajos de batimetría

La campaña de medición fue ejecutada el 08 de enero de 2020, con condiciones climáticas favorables y con poco viento. Al contarse con corrección diferencial en la señal del GPS acoplado al ADCP, una buena medida de la calidad de los datos colectados es el HDOP cuyo valor puede variar entre 1 (mejor valor) y 50 (peor valor) siendo el máximo valor medido 1.1, el cual es catalogado como Ideal y de gran precisión por el manual de operación del ADCP, además el número de satélites utilizados por cada punto varió entre 7 y 18. Durante todo el levantamiento en ningún momento se perdió enlace con la base de tierra, es decir la calidad de GPS fue 4 (RTK).



Las profundidades medidas variaron entre 0.27 [m] y 1.08 [m]. durante todo el proceso de levantamiento, el nivel de la laguna permaneció invariante, la cual fue verificada mediante la lectura (al milímetro) de una regla auxiliar dejada para el efecto, siendo la lectura al inicio y fin del levantamiento 2350 [mm].

Las coordenadas de la estaca base "RN-YRUPE1" fueron proporcionadas por el equipo de levantamiento de aerofotogrametría. Las Coordenadas Horizontales (Latitud y Longitud o Norte y Este) están con Datum WGS84, Las Cotas están referidas al "Nivel Medio del Mar "(Origen: Puerto de Asunción = 54.04 Metros), mismo Sistema de Referencia de la Red de Nivelación Geométrica de Primer Orden.

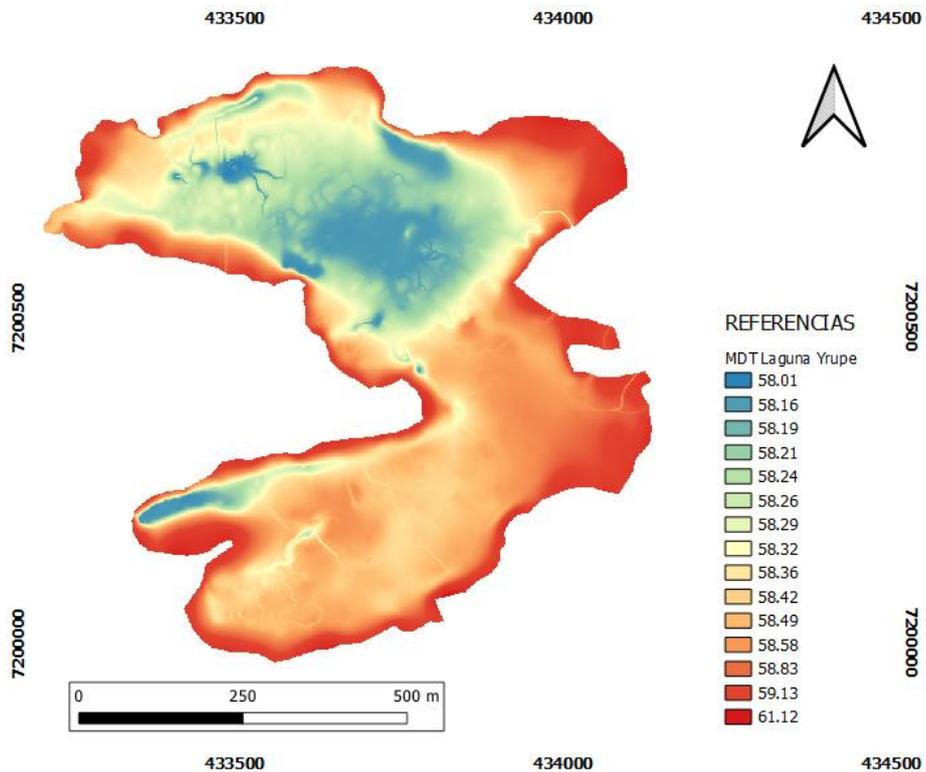


Figura 15 MDT de la laguna Yrupe



4. CARACTERIZACIÓN DE LLUVIAS EXTREMAS Y NIVELES MÁXIMOS SOBRE EL RÍO PARAGUAY

4.1 Precipitación

Los datos de lluvia utilizados son aquellos registrados en la estación situada en el Aeropuerto Internacional Silvio Pettirossi (AISP). Esta estación presenta la serie pluviométrica más extensa en Gran Asunción, tal como se muestra en la siguiente figura.

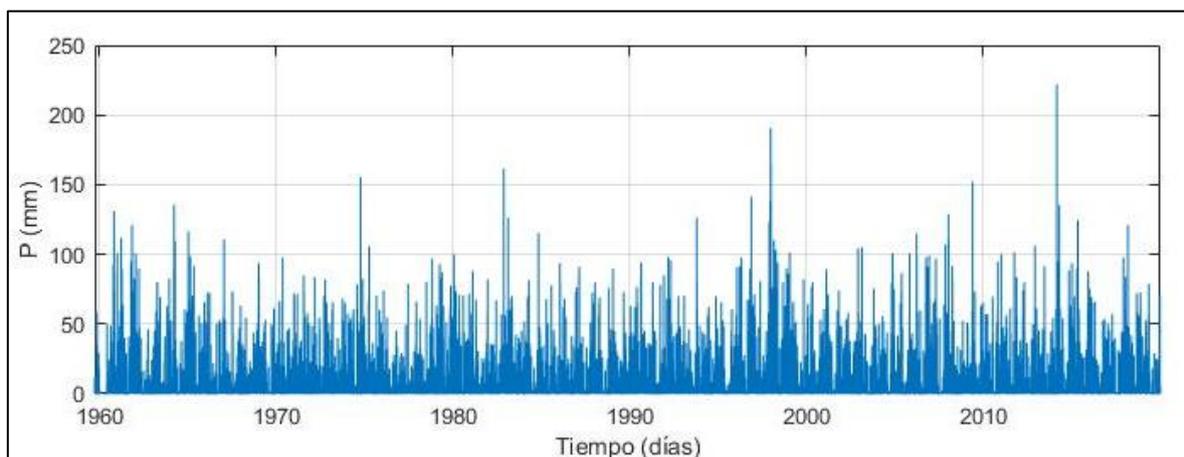


Figura 16 Serie Registrada de Precipitación de la Estación AISP – Periodo: 1959 – 2019 (60 años)

En promedio, la precipitación anual en Asunción es de 1385 mm (considerando los 60 años de datos disponibles). En la siguiente figura se observa la variación de la precipitación anual.

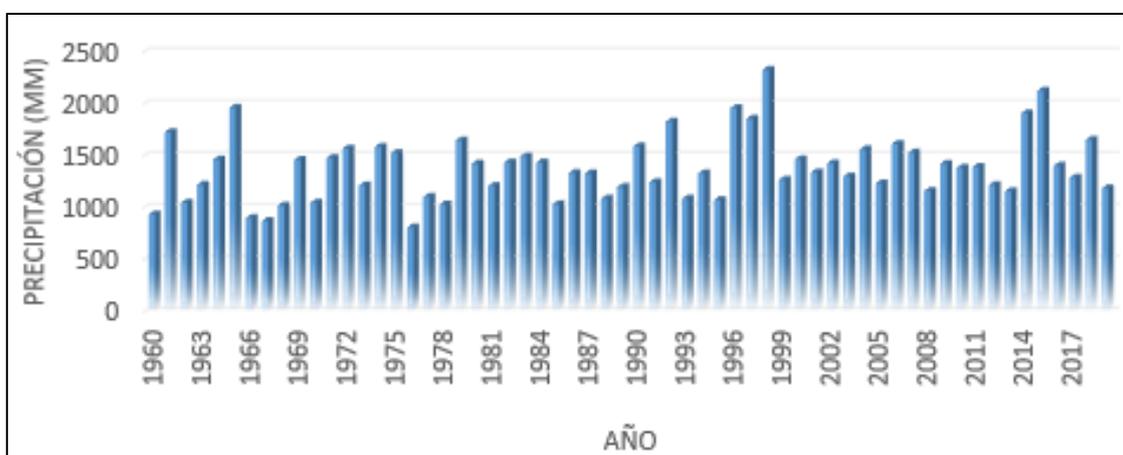


Figura 17 Precipitación Anual (1960 – 2019)

En cuanto a la variabilidad estacional en Asunción, se observó que los meses húmedos se dan en el periodo octubre - abril, y los periodos secos en el periodo mayo – septiembre, tal como se muestra en la siguiente figura.

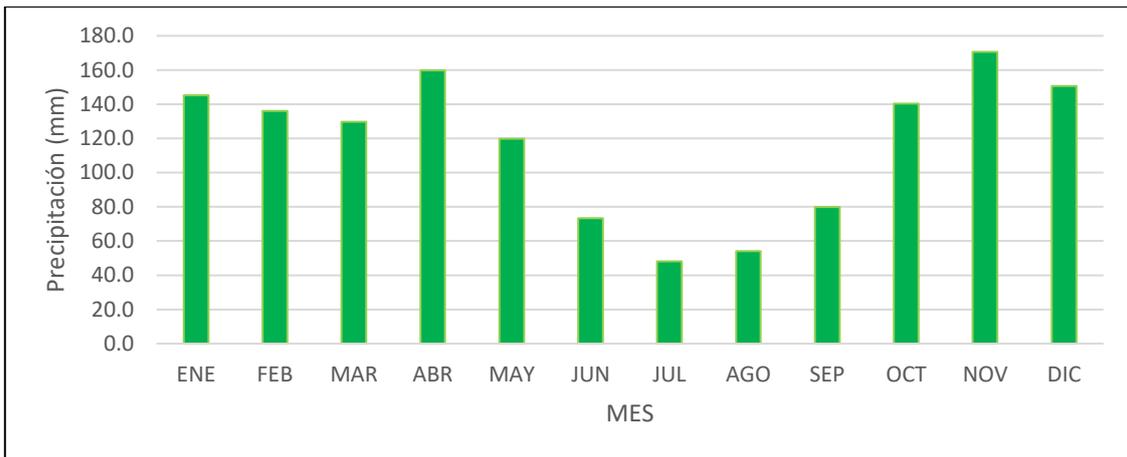


Figura 18 Precipitación Media Mensual (Periodo: 1960 – 2019)

En lo que respecta al diseño de obras de drenaje urbano, es necesario conocer las lluvias para intervalos inferiores al paso diario. Para ello, se utilizan las Curvas de Intensidad – Duración y Frecuencia de Excedencia (IDF). Estas curvas se obtienen mediante análisis estadísticos de series largas de un pluviógrafo. En este caso, se utilizan las curvas IDF desarrolladas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción (FIUNA) por los ingenieros (Cuevas & Rolón, 2010). Estas curvas se muestran en la siguiente figura.

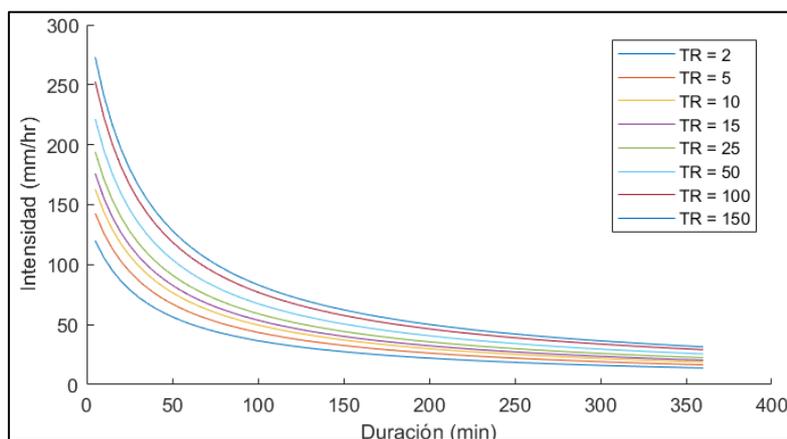


Figura 19 Curvas IDF de Asunción (Cuevas & Rolón, 2010)

4.2 Niveles del Río Paraguay

Los datos de niveles del Río Paraguay se registran en el Puerto de Asunción desde el año 1904. La cota del cero hidrométrico es 54.04 msnm (referido al mareógrafo de Mar del Plata = 0). Para la caracterización de los niveles se utiliza la serie comprendida entre 1904 – 2019 (115 años).

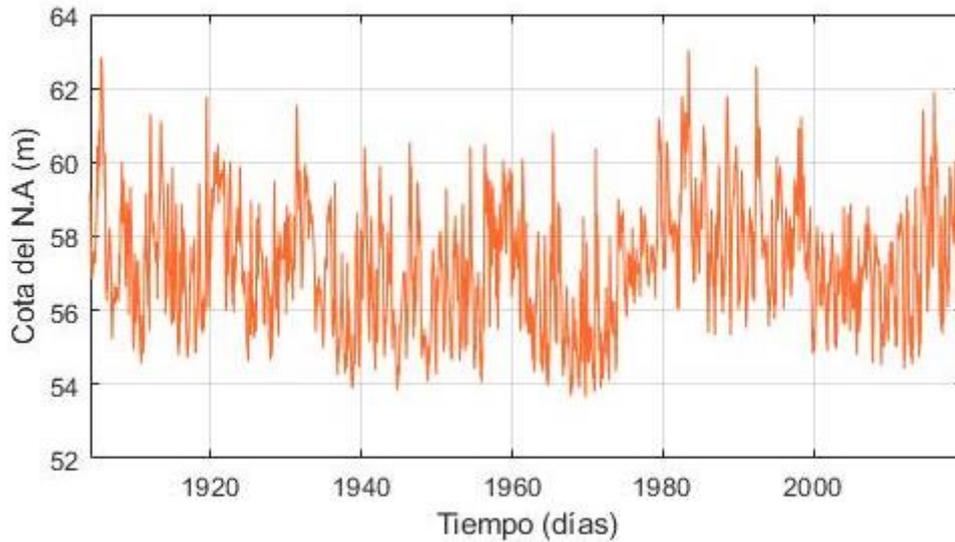


Figura 20 Niveles del Río Paraguay (Periodo: 1904 – 2019)

Según informaciones provistas por la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) de la DINAC, los niveles son clasificados de la siguiente manera:

Tabla 4 Niveles de referencia del Río Paraguay

SITUACIÓN	NIVEL (M)	COTA (M)
Alerta	5.00	59.04
Crítico	5.50	59.54
Desastre	6.50	60.54

En la siguiente gráfica se observa que los niveles de alerta se dan el 15 % del tiempo, nivel crítico el 10 % del tiempo y los niveles de desastre menos del 5 % del tiempo.

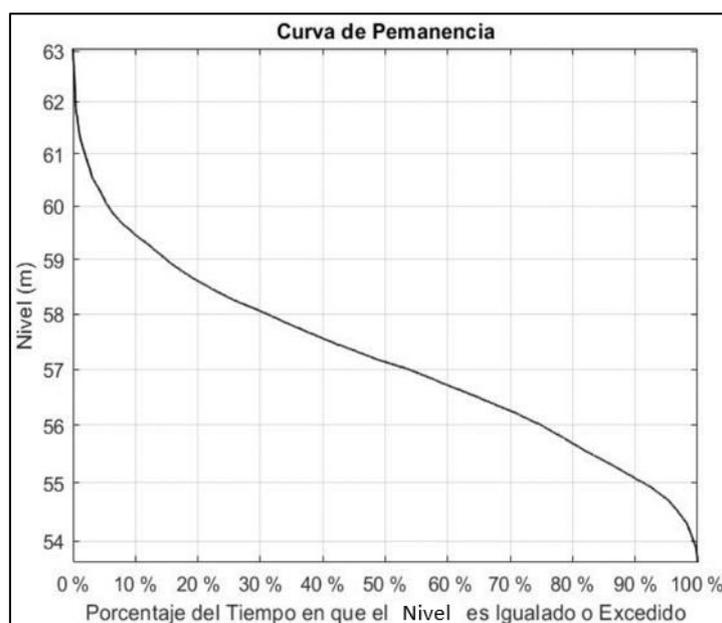


Figura 21 Curva de permanencia del Río Paraguay (Puerto de Asunción)



A los efectos de diseño, se aplican distribuciones de probabilidad teórica para asociar niveles a Periodos de Recurrencia (o Tiempo de Retorno TR), tal como se muestra en la siguiente figura.

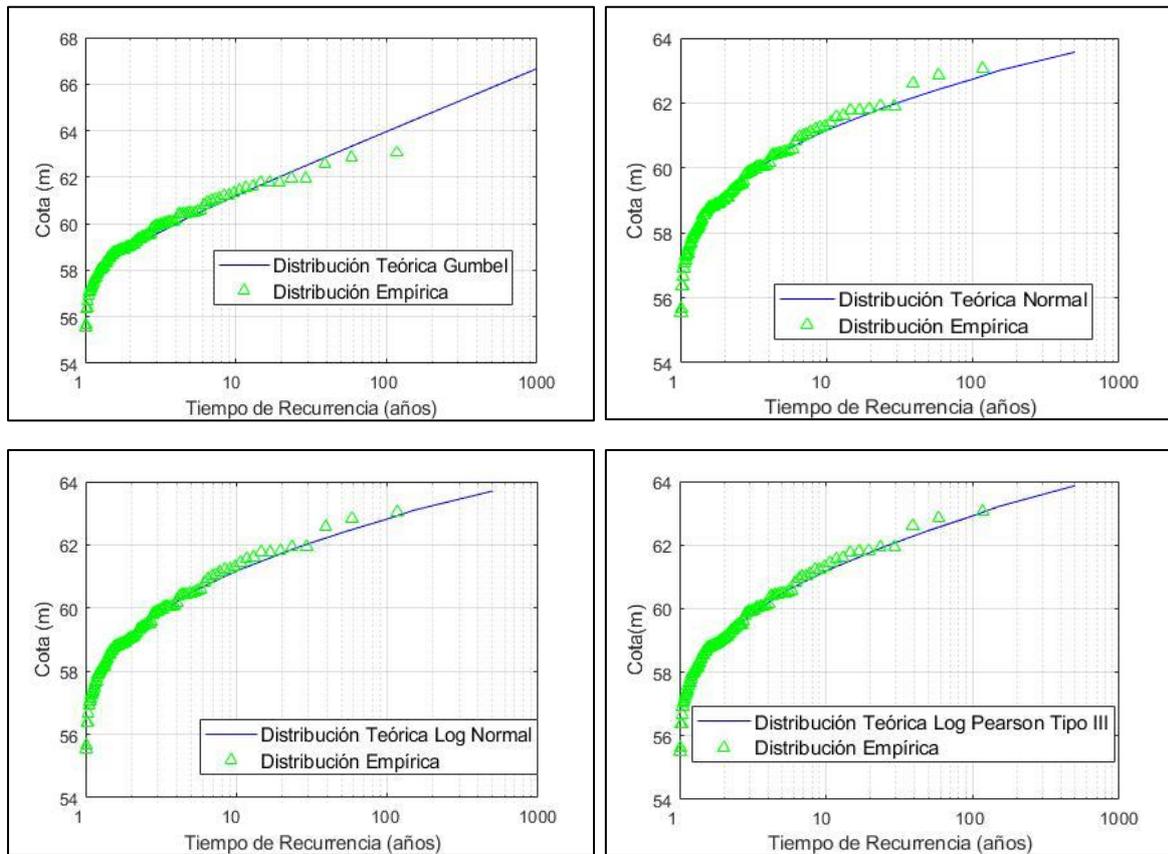


Figura 22 Ajuste de las Distribuciones de Probabilidad Teórica Aplicadas a los Niveles del Río Paraguay

En todos los casos, para los periodos de recurrencia inferiores a 20 años, los ajusten son muy buenos en la mayoría de las distribuciones, sin embargo, para periodos de recurrencia altos, del orden de 100 años (o más), se observa un mejor ajuste en la distribución Normal, por lo tanto, estos serán los valores empleados en la fase de modelación hidráulica. En la siguiente tabla se muestra un resumen de los niveles asociados a periodos de recurrencia para las distintas distribuciones de probabilidad teóricas utilizadas.

Tabla 5 Cota del N.A del Río Paraguay para distintos periodos de recurrencia y distintas distribuciones de probabilidad teórica

TR	GUMBEL	NORMAL	LOG NORMAL	LOG PEARSON TIPO III
2	58.99	59.23	59.21	59.19
5	60.32	60.50	60.49	60.49
10	61.20	61.16	61.17	61.19
25	62.31	61.87	61.91	61.95
50	63.14	62.33	62.39	62.45
100	63.96	62.74	62.82	62.91
150	64.44	63.00	63.10	63.21
500	65.85	63.57	63.71	63.87



5. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

En el presente apartado, se expone el proceso de generación de los datos de entrada (lluvias y niveles del río) de los modelos hidrológicos e hidráulicos, contemplando los posibles efectos del cambio climático.

Los efectos del cambio climático repercuten de cierta forma en las lluvias o tormentas de diseño futuras y en los niveles del Río Paraguay. Las tormentas de diseño se utilizarán como insumo para la modelación hidrológica, mientras que los niveles del Río Paraguay se constituyen en la condición de borde del modelo hidráulico 2D.

5.1 Generalidades del Cambio Climático

Sin lugar a dudas uno de los principales retos para la humanidad es hacer frente a las consecuencias del cambio climático, sus impactos en la sociedad, la economía y el ambiente. Para evaluar el impacto del cambio climático se utilizan los Modelos Climáticos Globales (MCG). En este informe se evalúa el cambio climático en Paraguay y sus posibles impactos que este podría tener sobre la precipitación en el área de Asunción y en los caudales del Río Paraguay.

Para evaluar los impactos del cambio climático se recurre a las proyecciones del clima teniendo en cuenta los escenarios futuros basados en las recomendaciones del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en Inglés) en su quinto reporte de evaluación (AR5).

Para poder resolver el problema de la resolución de los modelos globales y realizar estudios de cambio climático a nivel regional e incluso local, se utilizan los Modelos Climáticos Regionales (MCR). Estos modelos regionales, utilizan modelos climáticos globales como condición de contorno, tal como se muestra en la siguiente figura de forma esquemática.

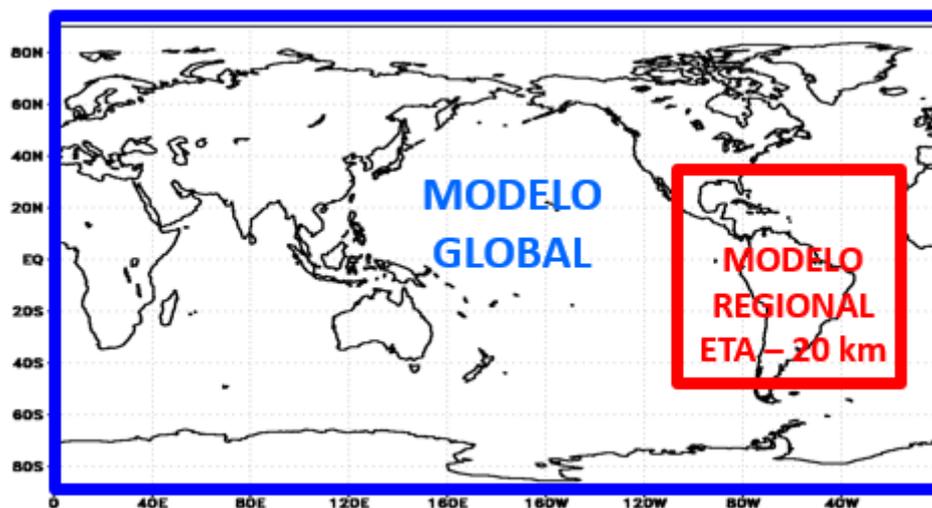


Figura 23 Esquema conceptual del dominio de un Modelo Climático Regional (MCR) utilizando como condición de borde un Modelo Climático Global

Los MCR son modelos físicos de atmósfera y superficie terrestre, que además contiene procesos importantes en el sistema climático como por ejemplo nubes, radiación, precipitación, humedad en suelo, etc.



En la actualidad los MCR son la mejor herramienta conocida para reducir la escala global a regional (downscaling) las características del clima, ya que permite obtener información más detallada de una región en particular. Entre las principales ventajas de usar los MCR, se puede encontrar; una simulación más realista del clima actual, debido a su alta resolución que permite interactuar con el terreno, predicciones a más detalle del cambio del clima futuro, representación de pequeñas áreas, mejor simulación y predicción en eventos extremos climáticos, generación de datos a detalle para el análisis y estudios de impactos a nivel local (Zhang et al., 2006).

Cuando se trabaja con escenarios climáticos hay que considerar la incertidumbre asociada a las estimaciones debido a las suposiciones con respecto a la sensibilidad climática en equilibrio (la cual implica a su vez una incertidumbre con respecto al calentamiento esperado para un escenario de estabilización de CO₂-eq dado). La incertidumbre con respecto al efecto retroactivo del ciclo del carbono implica también incertidumbre acerca de la trayectoria de emisiones necesaria para alcanzar un nivel de estabilización dado.

Para este estudio se analizaron los escenarios climáticos futuros para Paraguay, que se utilizaron como base científica para la caracterización del impacto del cambio climático en la precipitación en el departamento Central, constituyéndose en información importante para la toma de decisiones y la planificación futura.

El área de estudio corresponde a la zona del bañado sur, tal como se muestra en la siguiente figura.

5.2 Tendencias del Clima Global

Según el quinto informe de evaluación (AR5) del IPCC (IPCC, 2013) el calentamiento del sistema climático es inequívoco, esto queda demostrado por los incrementos de la temperatura media del aire y del nivel de los océanos, así como por el derretimiento de nieve y hielo, y el consecuente incremento del nivel medio del mar. Por este motivo, resulta imperiosamente necesario analizar cuáles pueden ser las consecuencias que este calentamiento podría causar en el clima a escalas regionales y locales, así como las repercusiones que implicaría en todos los aspectos del desarrollo de un país o región.

5.2.1 Escenarios Futuros de Clima

Para evaluar los impactos del Cambio Climático a nivel mundial y local se utilizan los escenarios climáticos, sus fuerzas originantes subyacentes y las opciones de respuesta, y esto ha sido siempre un componente importante de las actividades del IPCC.

Los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis.

Para realizar las proyecciones del clima futuro se utilizan los RCP (Trayectorias de Concentración Representativas, por sus siglas en Ingles), que describen cuatro trayectorias distintas de las emisiones y concentraciones de los GEI (Gases de Efecto Invernadero) en el siglo XXI. Dichas trayectorias incluyen un escenario de mitigación estricto (RCP2,6), dos escenarios intermedios (RCP4,5 y RCP6,0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8,5). Los RCP permiten poner en marcha simulaciones de modelos del clima con miras a desarrollar escenarios climáticos de utilidad en diversos tipos de investigaciones y evaluaciones relacionadas con el cambio climático, por lo que se compatibilizó con todos los escenarios de emisiones de estabilización, de mitigación y de referencia descritos en las publicaciones científicas actuales. Estos son un punto de partida para las investigaciones sobre como el cambio climático podría afectar una determinada



región o País. Sin embargo, es importante tener cuidado con sus usos y limitaciones. Estos no son predicciones ni recomendaciones políticas, pero son muy útiles para asignar una amplia gama de resultados climáticos.

6.2.1.1 Escenarios de Emisiones de CO₂

Las emisiones futuras de los gases de efectos invernaderos (GEI) son el producto de sistemas dinámicos complejos, determinados por fuerzas motrices tales como crecimiento demográfico, desarrollo socio-económico y cambio tecnológico. Las opciones sociales que definen las forzantes climáticas para el futuro están rodeadas por grandes incertezas. Escenarios de emisión representan varios caminos de desarrollo de cómo el futuro se podría desplegar. Estos escenarios ayudan en los análisis de cambio climático, incluyendo modelación del clima y evaluación de impactos, adaptación y mitigación. De acuerdo con el AR5, en resúmenes anteriores (TAR y AR4), los escenarios de emisiones de los SRES (“Special Report on Emission Scenarios” - IPCC, 2000) fueron usados como la principal forma de explorar la incerteza de la contribución antrópica en el clima futuro. Mientras tanto, investigaciones recientes están haciendo uso de los RCP’s³ (VAN VUUREN et al., 2011a, 2011b).

Los RCP’s son nuevos escenarios que especifican concentraciones y emisiones correspondientes, mas no están directamente basados en la revolución socio-económica, como los escenarios SRES. Los escenarios de RCP están basados en un abordaje diferente e incluyen gases de vida corta más consistente y cambios de uso de suelo. Estos no son, necesariamente, más capaces de representar la evolución futura de los escenarios SRES.

Los cuatro escenarios RCP’s (ver siguiente figura) son identificados por el pico o estabilización, en el siglo 21, del valor de la forzante radiativa (RF – “Radiative Forcing”). El escenario intermedio RCP 4.5 (THOMSON et al., 2011), así definido debido a un pico de la RF de 4.5 W m⁻² en torno de 2100, cuando se estabiliza, fue el escenario de emisión escogido para este trabajo.

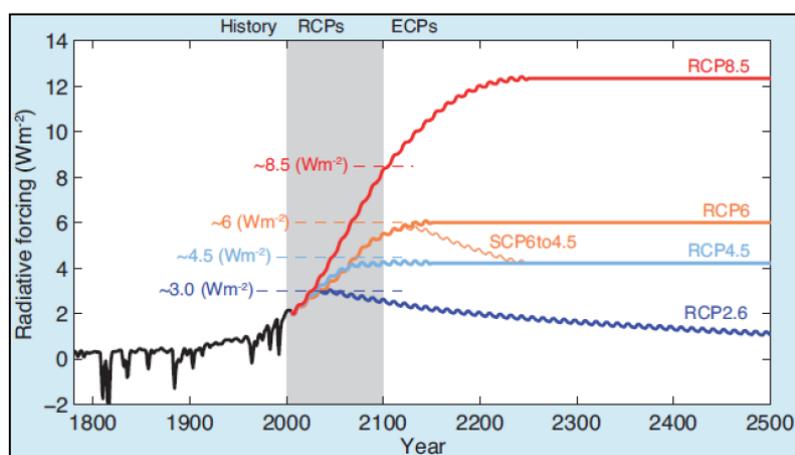


Figura 24 Escenarios de Emisión. Fuente: Relatório contendo a análise das simulações do modelo Eta-10 km para a região da Bacia do Prata, utilizando as condições do HadGEM2-ES RCP 4.5, para o período de 1961-2100

³ Representative Concentration Pathways



5.3 Tendencias del Clima a Nivel Regional

Para definir las tendencias del clima a nivel regional, se ubica a la república del Paraguay dentro de la Cuenca del Río de la Plata, siendo el único país que se encuentra completamente dentro de ella, tal como se muestra en la siguiente figura.

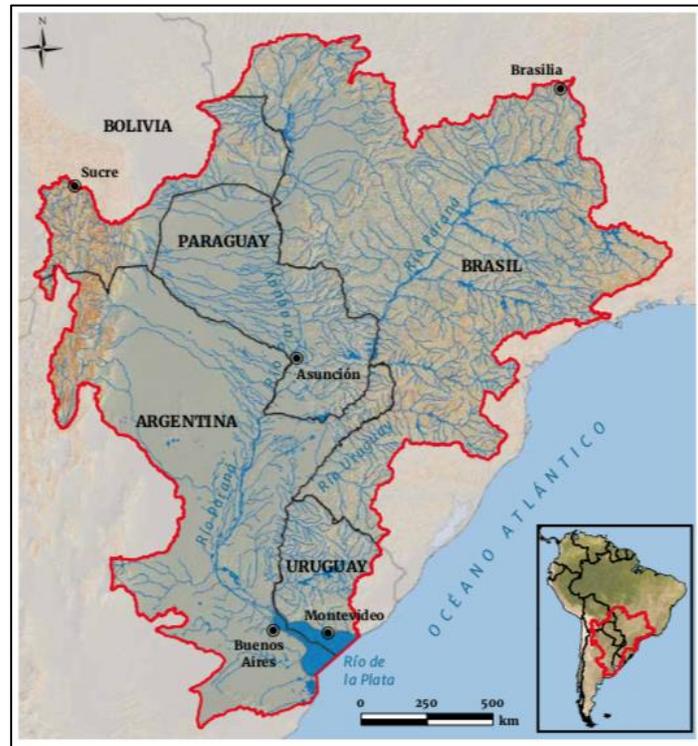


Figura 25 Localización del área de estudio a nivel regional. Fuente: Análisis Diagnóstico Transfronterizo (ADT) y programa de acciones estratégicas (PAE) (Maschinen et al., 2016)

Puntualmente, el área de estudio se encuentra dentro de la sub-cuenca del Río Paraguay la cual se extiende a lo largo de 2400 km hasta su confluencia con el Río Paraná. Su área de drenaje es de aproximadamente 1.000.000 km².

Las tendencias climáticas regionales presentadas a continuación son el resultado del proyecto denominado “Modelaje Hidrológica de la Cuenca del Plata utilizando el Modelo Hidrológico de Grandes Cuencas MGB – IPH – PN2: Impacto de las Mudanzas Climáticas en la Cuenca del Plata” (Collischonn et. al, 2015). En dicho documento, se hace referencia a un resumen del CPTEC⁴/INPE (Instituto de Pesquisas Espaciales) el cual concluye lo siguiente:

- Proyecciones de aumento en la temperatura de la cuenca de la plata, con incrementos que llegan hasta los 4 grados al norte de la cuenca.
- Con relación a la precipitación: los resultados de las proyecciones climáticas indican aumentos de la precipitación en la porción sur de la cuenca y una reducción de la misma en la porción norte. La reducción de la precipitación en la cuenca norte se da con más acentuación en el futuro cercano 2011 – 2040.

⁴ Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos



- Con relación a los caudales: la tendencia en lo referente a caudales medios es un descenso en el futuro más cercano (2011 – 2040) y un posterior aumento (2040 – 2099), tal como se resume en la siguiente tabla.

Tabla 6 Evolución de los caudales medios sobre el río Paraguay (en naranja la estación Asunción que representa el trecho de estudio). Fuente: Adaptado de “Modelación hidrológica de la Cuenca del Río de la Plata utilizando el Modelo Hidrológico de las Grandes Cuencas MGB – IPH” (Collischonn et. al, 2015).

Nombre del Local	Río	Área (km ²)	1960 a 1990	2010 a 2039	2040 a 2069	2070 a 2099
Cáceres	Paraguay	32625	539	394	453	468
Descalvados	Paraguay	47578	718	532	608	631
Porto Conceição	Paraguay	65200	678	496	551	579
Amolar	Paraguay	236000	1809	1180	1348	1470
Porto São Francisco	Paraguay	242680	1843	1214	1382	1509
Porto da Manga	Paraguay	297000	2225	1498	1700	1860
Porto Murtinho	Paraguay	581130	3109	2083	2347	2687
Asunción	Paraguay	791300	4960	3525	4118	4820
Puerto Bermejo	Paraguay	1135420	6354	4692	5618	6526

5.3.1 Modelo Climático Regional (Modelo Eta)

El modelo Eta fue desarrollado en la Universidad de Belgrado (MESINGER et al., 1988), fue utilizado operacionalmente en el National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (BLACK, 1994) y, actualmente, es usado en el CPTEC⁵ (CHOU et al. 2000) para predicción del tiempo. Dicho modelo fue modificado para simulaciones climáticas (BUSTAMANTE et al. 2002) y fue utilizado anteriormente en estudios de predicción estacional sobre América del Sur (BUSTAMANTE et al., 2006; ALVES et al., 2004; CHOU et al., 2005) mostrando buenos resultados, esto es, más próximos de las observaciones que el modelo global T062, usado como condiciones iniciales y de contorno.

El esquema de cálculo de radiación de onda larga se basa en el modelo de Fels y el esquema de cálculo de radiación de onda corta sigue el modelo de Lacis y Hansen (1974). Los dos esquemas son llamados cada dos horas de integración. Las tendencias de temperatura de la atmosfera asociadas a los efectos radiactivos son aplicadas después cada paso de tiempo. El modelo Eta usa un esquema de convección cúmulos desarrollado por Betts y Miller (1986). Esta parametrización trata tanto la convección rasa (no precipitante) cuanto a la profunda (precipitante). Este esquema es fundamentado en el ajuste de los perfiles de temperatura y humedad específica termodinámicamente inestable en la dirección de un perfil de referencia, con un tiempo de relajación prescrito. La microfísica de nubes es producida por el esquema de Zhao (ZHAO et al., 1997).

⁵ Centro de Predicción del Tiempo y Estudios Climáticos, por sus siglas en portugués



5.3.2 Escenarios de Cambio Climático Analizados

Se utilizan los escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5 basados en el análisis de los campos de precipitación y temperatura del aire simulados por la integración del modelo regional Eta/CPTEC que fue realizado en el CPTEC de Brasil. Si bien los TdR referentes al presente producto establecían el estudio de los escenarios RCP 6.0 y 8.5, la mayoría de las plataformas libres que disponibilizan datos futuros diarios solamente disponibilizan para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Por esta razón, se decide utilizar los escenarios 4.5 y 8.5. Cabe señalar que los escenarios RCP 4.5 y 6.0 corresponden a escenarios intermedios.

En este trabajo se utilizaron los datos generados por el CPTEC/INPE y disponibilizados en la plataforma PROJETA (Projeções de mudança do clima para a América do Sul regionalizadas pelo Modelo Eta), realizando simulaciones con el modelo regional Eta-20km para América del sur anidados por distintos modelos globales tales como: HadGEM2-ES (res. 20 km), MIROC5 (res. 20 km), CANESM2 (res. 20 km) y BESM (res. 20km). En el caso del CPTEC en el modelo Eta son utilizados 38 niveles en la vertical. Las condiciones iniciales y de contorno provenientes del modelo Eta-20 Km varían cada 6 horas (humedad específica, temperatura, presión al nivel medio del mar y superficie y viento horizontal).

5.3.2.1 Selección de la serie de datos de los modelos de la Plataforma PROJETA

Se analizan los datos obtenidos de la plataforma PROJETA⁶ para un pixel seleccionado en el área de estudio, cuyas coordenadas del centro se muestran en la siguiente figura. Los datos descargados son en escala diaria para los periodos actuales (que incluye la serie histórica desde 1960) y futuros en base a los distintos modelos.

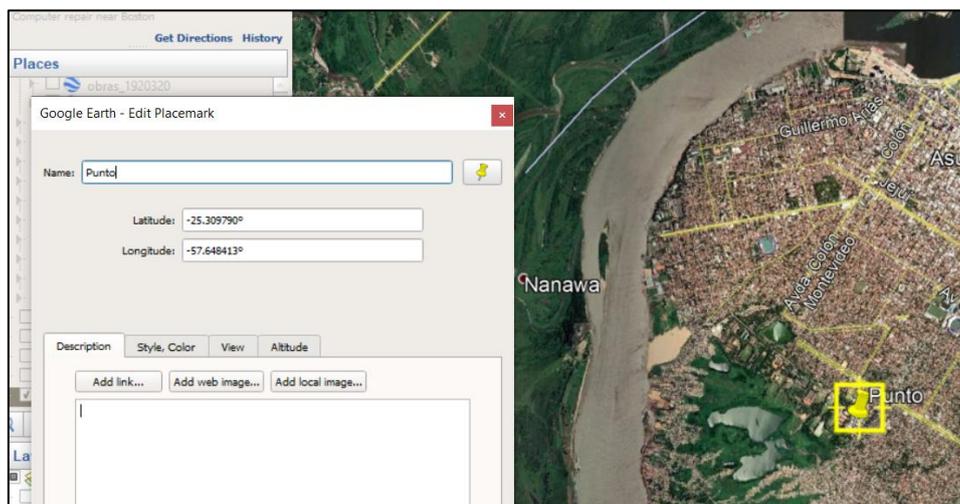


Figura 26 Coordenadas utilizadas para la descarga de datos de los modelos climáticos de la plataforma PROJETA

En general, estos modelos tienden a subestimar las precipitaciones para pasos de tiempo cortos como el paso diario. Sin embargo, al tratarse de la elaboración de curvas IDF, necesariamente se debe utilizar un intervalo de tiempo de al menos un día.

A los efectos de seleccionar una serie de lluvias futuras, se realiza un análisis comparativo de los datos diarios generados por el MCR Eta anidado a los distintos MCG. Teniendo en cuenta que para relacionar

⁶ <https://projeta.cptec.inpe.br/>



lluvias con periodos de recurrencia se utilizan las lluvias máximas diarias anuales, se realiza un análisis de correlación de los datos obtenidos con los distintos modelos mencionados y los valores observados en el pluviómetro de Asunción (AISP). Del análisis realizado se observa en la siguiente figura, que no existe correlación entre las precipitaciones máximas diarias anuales simuladas y observadas.

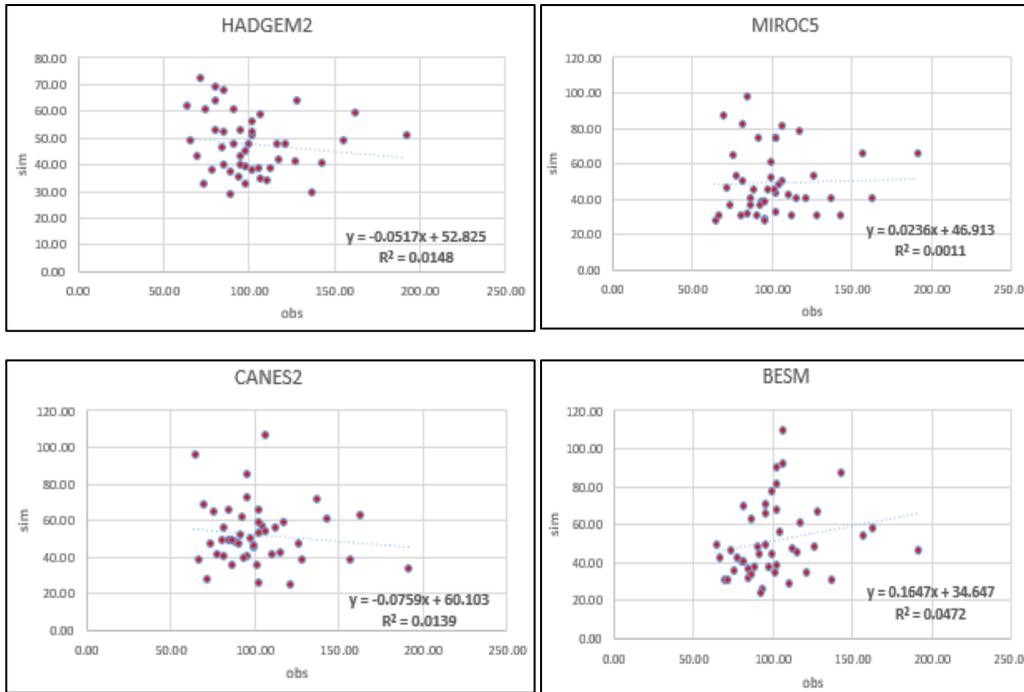
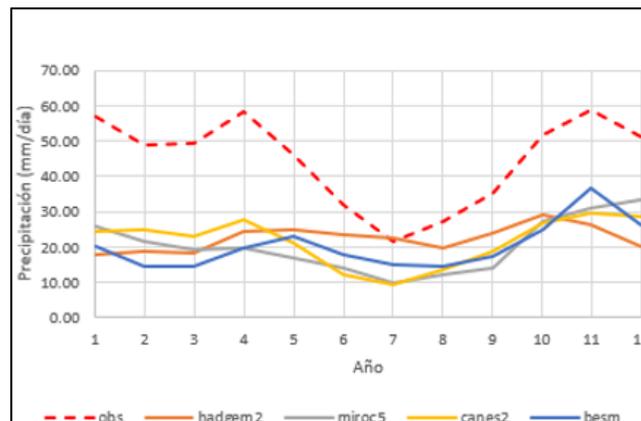


Figura 27 Correlación entre la Precipitación Máxima Diaria Anual Observada en el Pluviómetro AISP y los distintos MCR

Por otro lado, explorando la estacionalidad de los datos, se compara la distribución de las lluvias máximas diarias a lo largo del año. En promedio, se obtiene la distribución que se muestra en la siguiente figura.



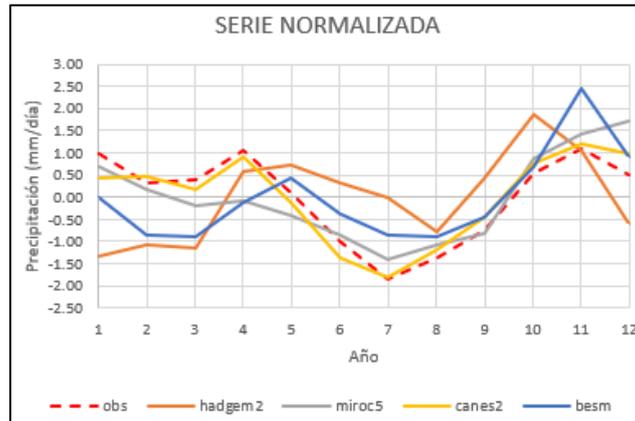


Figura 28 Serie de la Precipitación Máxima Diaria Mensual para todos los MCR

Como se observa en la figura anterior, la estacionalidad más fuerte se da con el modelo CANES2 con un $R^2 = 0.91$, seguido por el MIROC5 que presenta un $R^2 = 0.67$.

Considerando que los ajustes de la precipitación máxima diaria anual no presentan correlación, y básicamente es el insumo principal para la generación de curvas IDF, se opta por seleccionar la situación más desfavorable (a efectos de diseño), es decir, se selecciona aquel modelo que genere intensidades más altas en el futuro. Se utilizan los datos históricos del modelo regional Eta, alimentado con los modelos globales presentados (MIROC5, HADGEM2, CANES2, BESM) para determinar los periodos de recurrencia actuales para las lluvias máximas diarias. Posteriormente, se evalúan los datos futuros con los escenarios de cambio climático hasta el año 2100.

En las siguientes figuras se observa que el MCR Eta alimentado con el MCG MIROC5 genera los resultados más desfavorables, y por ende, más conservadores con el diseño de obras hidráulicas.

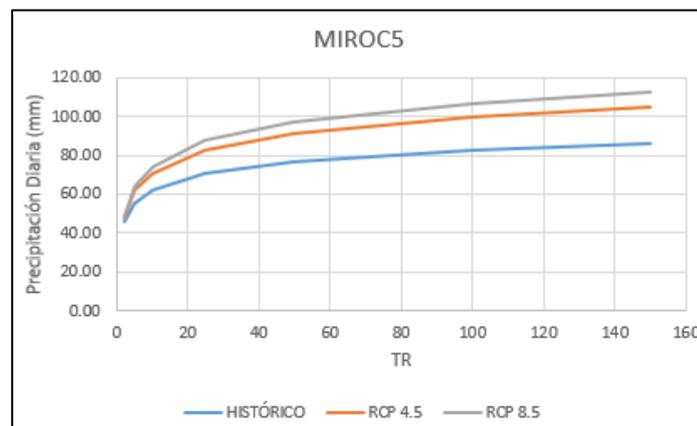


Figura 29 Precipitación Máxima Diaria para cada periodo de recurrencia: Serie Histórica (Considerada Escenario Actual), Escenario RCP 4.5 y 8.5. Modelo Eta alimentado por el MCG MIROC5.

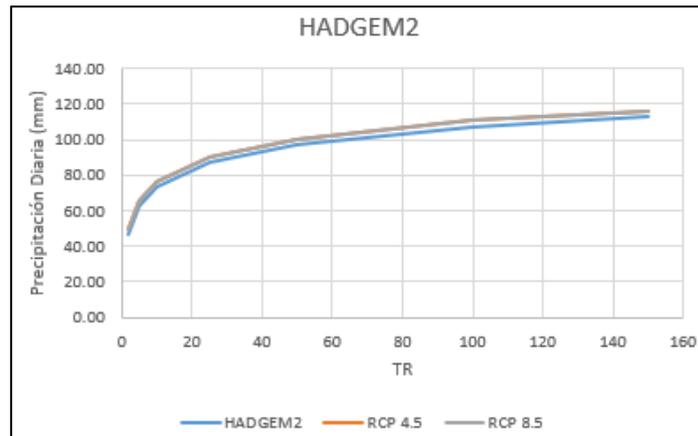


Figura 30 Precipitación Máxima Diaria para cada periodo de recurrencia: Histórica (Considerada Escenario Actual), Escenario RCP 4.5 y 8.5. Modelo Eta alimentado por el MCG HADGEM2.

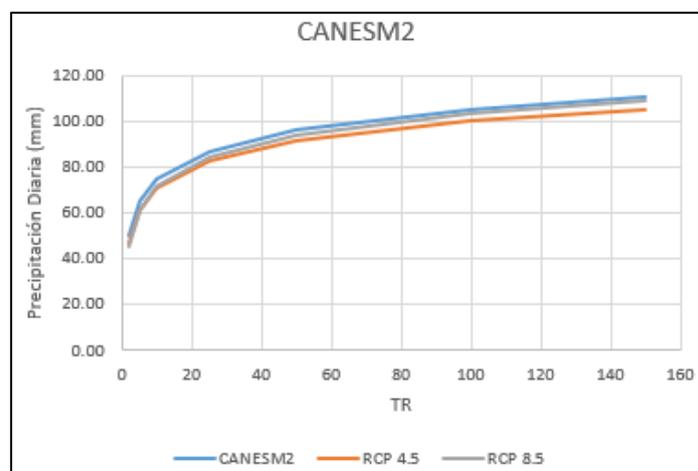


Figura 31 Precipitación Máxima Diaria para cada periodo de recurrencia: Histórica (Considerada Escenario Actual), Escenario RCP 4.5 y 8.5. Modelo Eta alimentado por el MCG CANES2.

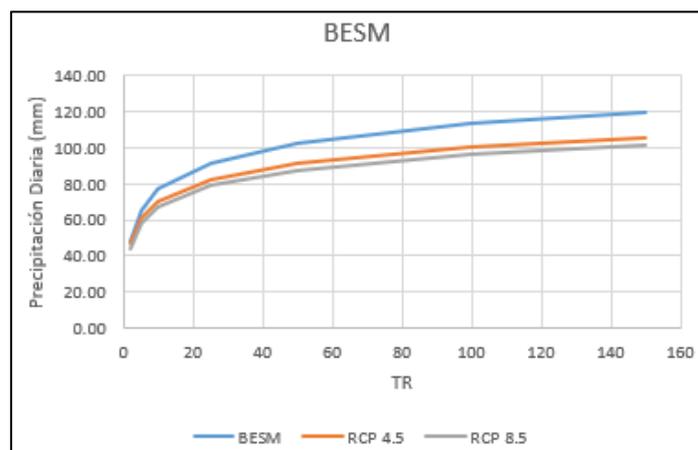


Figura 32 Precipitación Máxima Diaria para cada periodo de recurrencia: Histórica (Considerada Escenario Actual), Escenario RCP 4.5 y 8.5. Modelo Eta alimentado por el MCG BESM.



5.3.2.2 Escenarios climáticos para la precipitación RCP 4.5 y RCP 8.5

A continuación, se muestran las anomalías calculadas para el escenario RCP 8.5 que se extiende desde el 2006 - 2100, comparadas con el promedio del periodo 1961-1990.

Anomalía media anual para el modelo MIROC5.

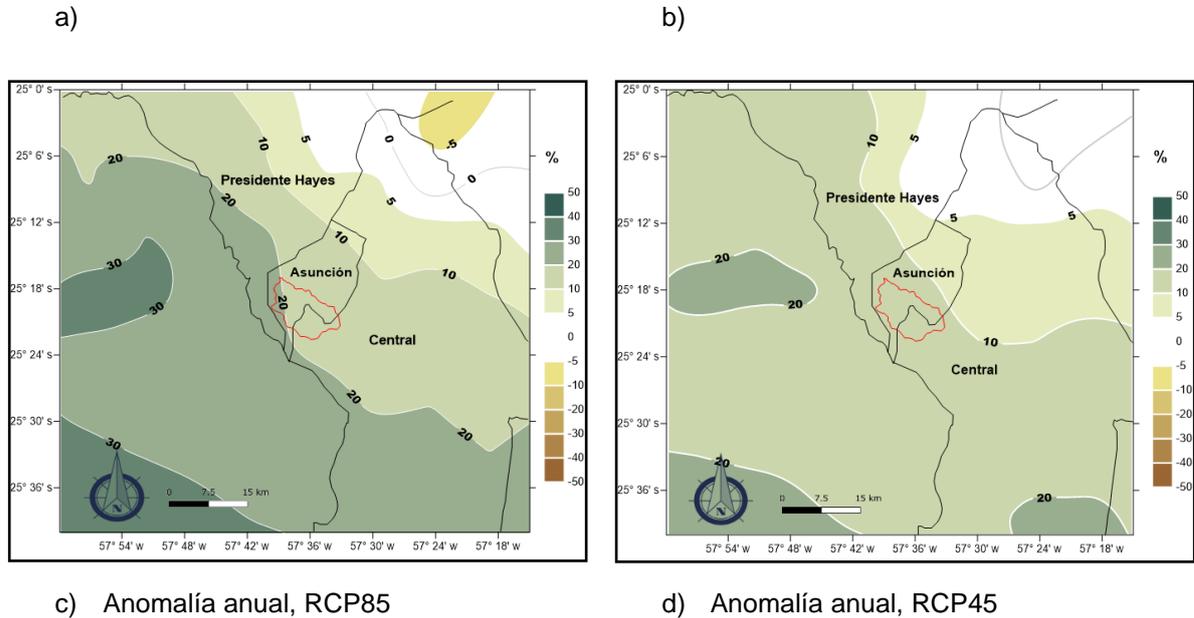


Figura 33 Anomalía para los escenarios RCP85, RCP45, modelo MIROC5 (2006-2099) con respecto a la línea base (1961-1990).

Tal como se mostró en las figuras anteriores, las anomalías son positivas en general, dicha anomalía oscila entre 5 y 20 % dependiendo de la época del año.

5.4 Tormentas de diseño y los efectos del cambio climático

Las tormentas de diseño consisten en lluvias sintéticas generadas con fines de diseño de obras hidráulicas. Estas tormentas son utilizadas como insumos en los modelos hidrológicos para la estimación de caudales que finalmente permiten dimensionar una obra hidráulica determinada.

Generalmente, para la confección de curvas IDF se requieren series históricas de precipitación con duraciones de tormenta en escala sub-diaria. En Paraguay, esto se torna en una limitación, siendo que los datos disponibles se presentan únicamente en escala diaria. Sin embargo, existen diversas metodologías para confeccionar curvas IDF a partir de datos diarios.

Como se mencionó anteriormente, en la actualidad se utilizan las curvas IDF desarrolladas por Cuevas y Rolón (2010) como insumo para la generación de las tormentas sintéticas (por el método de los bloques alternos). Para la generación de estas curvas, se utilizaron datos en el periodo de tiempo 1985 – 2009 (24 años). Estas curvas se mostraron en la **Figura 19**. Estas curvas fueron confeccionadas con informaciones obtenidas de fajas pluviográficas que tuvieron que ser digitalizadas (en parte) e incluían valores de lluvia en intervalos de hasta 5 minutos. Los autores explican con suficiente detalle que aislaron las tormentas más intensas para distintos intervalos de tiempo, y, además, explicaron que las curvas eran confiables hasta una duración de 360 minutos (6 horas). Teniendo en cuenta que estas curvas fueron confeccionadas con una calidad importante de información, se decide adoptar esta información como representativa de la situación actual.



5.5 Elaboración de Curvas IDF Futuras

En vista a la baja correlación existente entre los datos diarios generados por los distintos MCR analizados anteriormente, en donde solamente se verificó cierta estacionalidad a lo largo del año en las precipitaciones máximas, se opta por utilizar el método delta con el MCR Eta alimentado con el MCG MIROC5.

Al comparar las lluvias máximas diarias asociadas a distintos periodos de recurrencia para el presente y para el futuro, se pueden identificar factores de ajuste, que luego pueden ser aplicados a las curvas IDF oficiales de Asunción para representar el cambio climático para los escenarios RCP 4.5 y 8.5.

La aplicación de estos factores a toda la curva IDF, es decir, a distintas intensidades asociadas a distintos periodos de recurrencia y duraciones, se justifica en diversas observaciones de curvas IDF en el mundo. En Tucci (1993) se explica con suficiente detalle que existe una relación entre las distintas duraciones de tormenta. Esto se justifica en:

- a) Tendencia de curvas de probabilidades de diferentes duraciones a mantenerse paralelas entre sí (al ser graficadas en escala logarítmica);
- b) Para varias estaciones, existe una gran similitud entre las precipitaciones medias máximas de distintas duraciones (estas relaciones cambian ligeramente con el periodo de recurrencia).

El procedimiento adoptado se resume a continuación:

- **Escenario Actual:** Asociación de lluvias máximas diarias a distintos periodos de recurrencia, utilizando la serie histórica de precipitación diaria generada por el MCR Eta 20 km alimentado por el modelo climático global MIROC5 (Periodo de datos: 1960 – 2005).
- **Escenario Futuro:** Asociación de lluvias máximas diarias a distintos periodos de recurrencia, utilizando las series proyectadas de cambio climático bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5 generados por el Modelo Climático Regional Eta 20 km alimentado por el modelo climático global MIROC5 (Periodo de datos: 2006 – 2100).
- **Factores de Ajuste:** Analizando la variación de los valores diarios asociados a periodos de recurrencia para el escenario actual y futuro, se obtienen factores de ajuste que permitirán adecuar las curvas IDF actuales de Asunción para representar el escenario futuro contemplando los efectos del cambio climático.

Tabla 7 Factores de ajuste de las curvas actuales para representar distintos escenarios futuros de cambio climático (MCR Eta alimentado por MCG MIROC5 – Escenario hasta 2100)

TR	2	5	10	25	50	100	150
RCP 4.5	1.04	1.11	1.14	1.18	1.20	1.21	1.22
RCP 8.5	1.06	1.15	1.20	1.24	1.27	1.30	1.31

Aplicando los factores de ajuste generados, se obtienen las curvas IDF adaptadas al futuro para ambos escenarios de cambio climático.

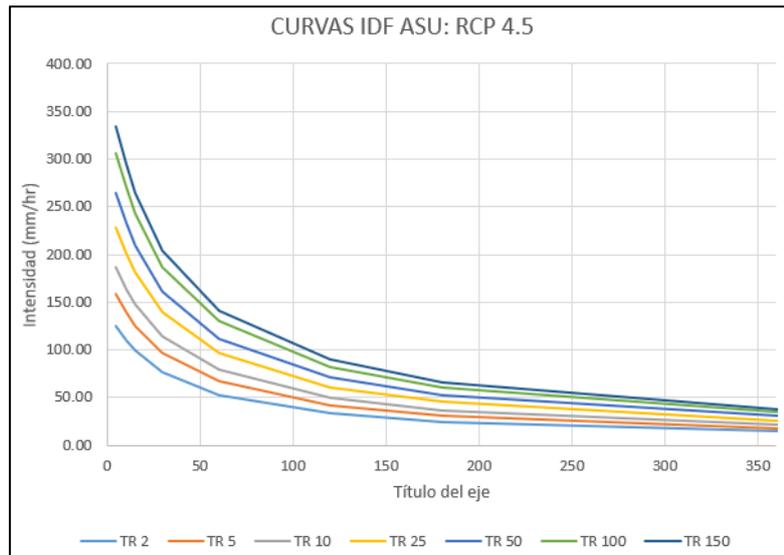


Figura 34 Curvas IDF de Asunción bajo el escenario futuro de cambio climático RCP 4.5

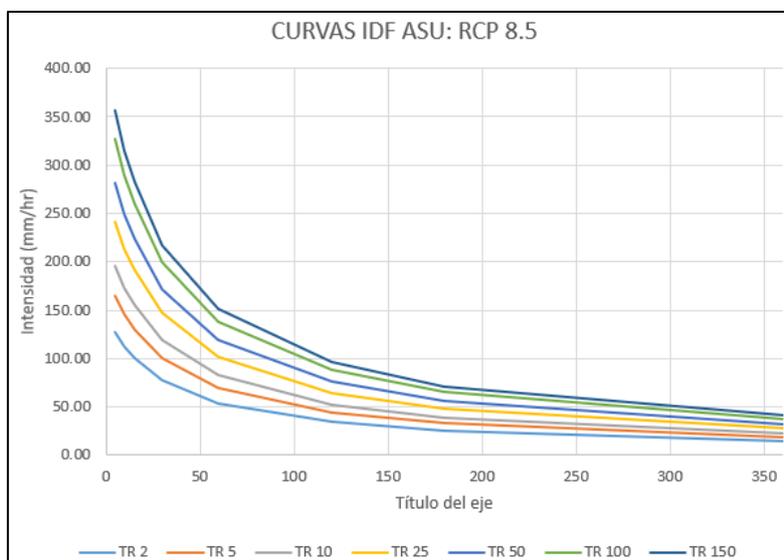


Figura 35 Curvas IDF de Asunción bajo el escenario futuro de cambio climático RCP 8.5

Obs: En anexo se incluyen las curvas IDF en formato tabular para todos los escenarios.

5.6 Hietogramas de diseño actual y futuro con efectos del cambio climático

En base a las curvas IDF calculadas, se estiman las tormentas de sintéticas a ser utilizadas para distintos periodos de recurrencia y distintos escenarios de cambio climático, las cuales servirán como insumo para la fase de modelación hidrológica e hidráulica de la presente consultoría. En el área de estudio la cuenca de aporte más grande es la del Ayo. Salamanca (o Paraguairí), la cual tiene un tiempo de concentración aproximado de 30 - 45 min, por lo que se decide ensamblar tormentas sintéticas de 1 hora de duración, tal como se muestra en las siguientes figuras

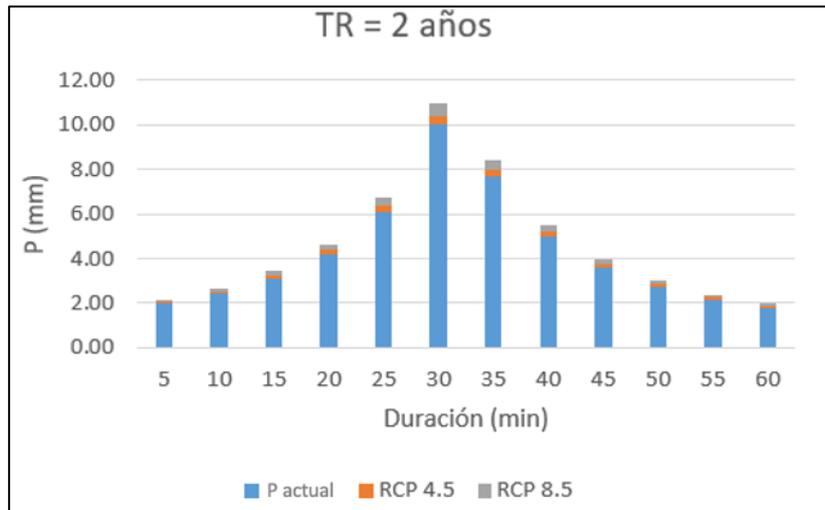


Figura 36 Hietogramas de diseño para TR = 2 años

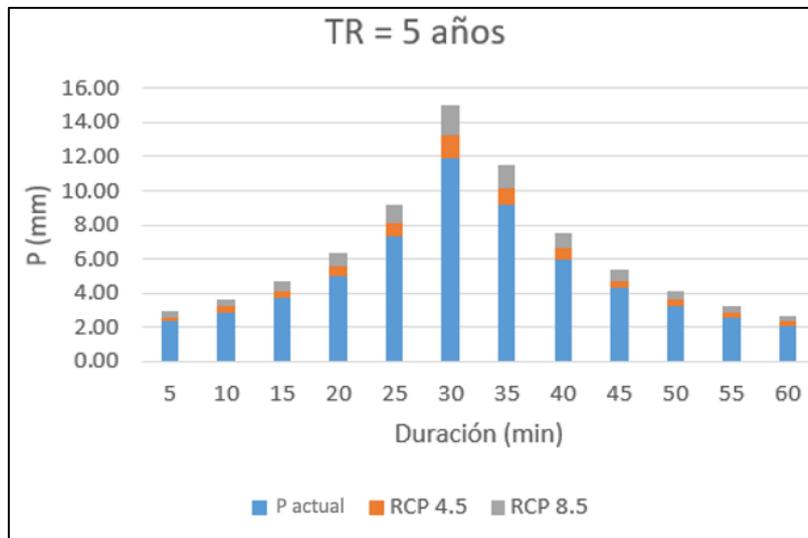


Figura 37 Hietogramas de diseño para TR = 5 años

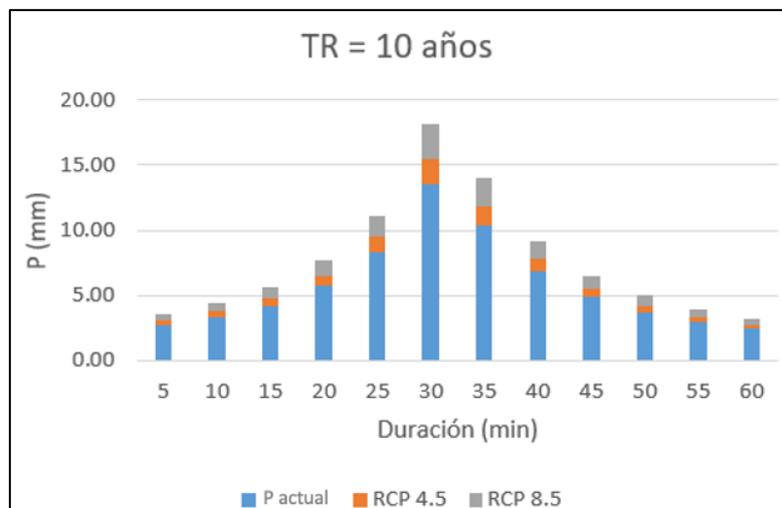


Figura 38 Hietogramas de diseño para TR = 10 años

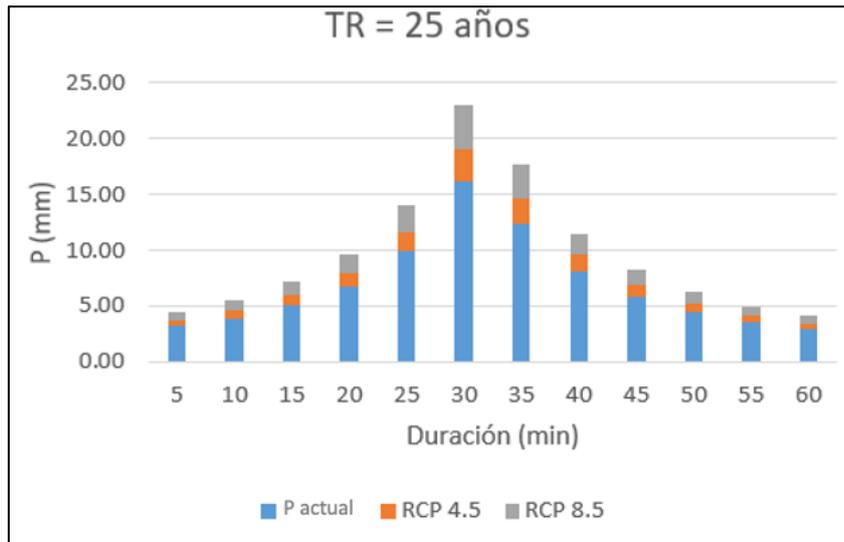


Figura 39 Hietogramas de diseño para TR = 25 años

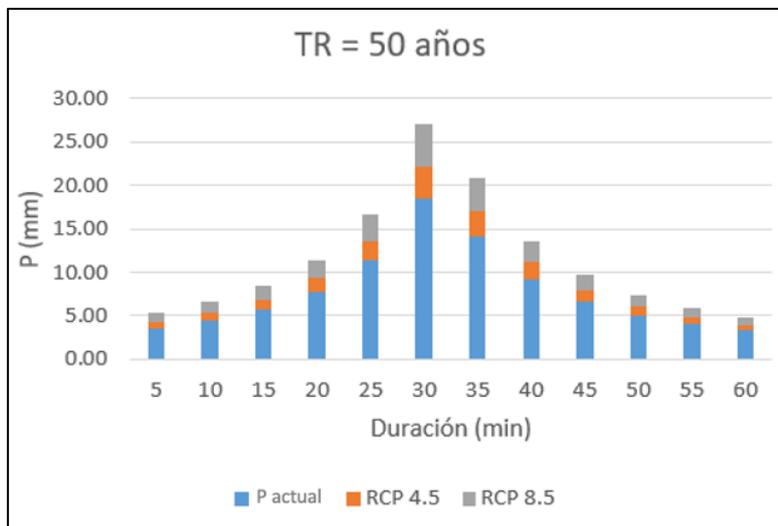


Figura 40 Hietogramas de diseño para TR = 50 años

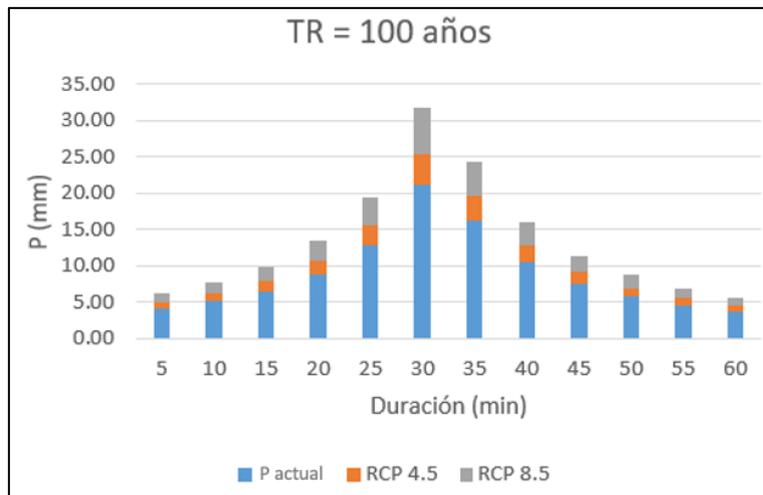


Figura 41 Hietogramas de diseño para TR = 100 años

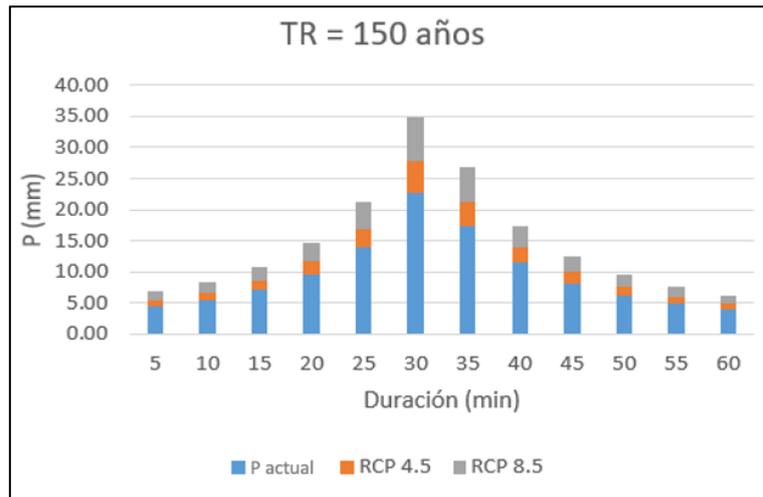


Figura 42 Hietogramas de diseño para TR = 150 años

5.7 Caudales y niveles del Río Paraguay bajo efectos del Cambio Climático

5.7.1 Introducción

En lo que se refiere a caudales y niveles del río Paraguay en Asunción teniendo en cuenta los efectos del cambio climático se utilizarán los productos obtenidos en el Programa Marco para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Plata, en Relación con los Efectos de la Variabilidad y el Cambio Climático desarrollado entre los años 2010-2015 entre todos los países de la cuenca.

5.7.2 Modelo de Grandes Bacias (MGB) de la Cuenca del Plata

A continuación, se presenta un resumen del informe “PROJETO: MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO PRATA UTILIZANDO O MODELO HIDROLÓGICO DE GRANDES BACIAS – MGB-IPH”(IPH,2015) y luego los análisis realizados con la información incluida en el para la ciudad de Asunción.

El informe del IPH presenta aspectos técnicos relacionados con el modelo MGB-IPH (procesos hidrológicos, metodología, calibración y simulación). El trabajo del IPH es uno de los primeros esfuerzos integrados de modelado hidrológico en la Cuenca del Plata, y posiblemente el más detallado realizado hasta la fecha, en relación con iniciativas anteriores de (Su y Lettenmaier, 2009 y Su et al., 2008).

La calibración del modelo MGB-IPH en la cuenca del Plata se realizó comparando los datos de caudal calculados por el modelo con los datos de caudal observados en diferentes estaciones de la cuenca aplicando diferentes medidas de rendimiento.

La calibración del modelo MGB-IPH se realizó para el período comprendido entre el 01/02/1998 y el 12/31/2004, elegidos de acuerdo con la disponibilidad de datos.

Luego de la calibración como dato de entrada del modelo MGB para el análisis de los cambios climáticos se utilizaron los datos de las proyecciones climáticas el MCR Eta (res. 20km) anidado al MCG HADGEM2, utilizando solamente el escenario RCP 4.5. Estas proyecciones utilizan un calendario hipotético, en el cual, cada año tiene 12 meses con 30 días cada mes, es decir, un calendario de 360 días por año.

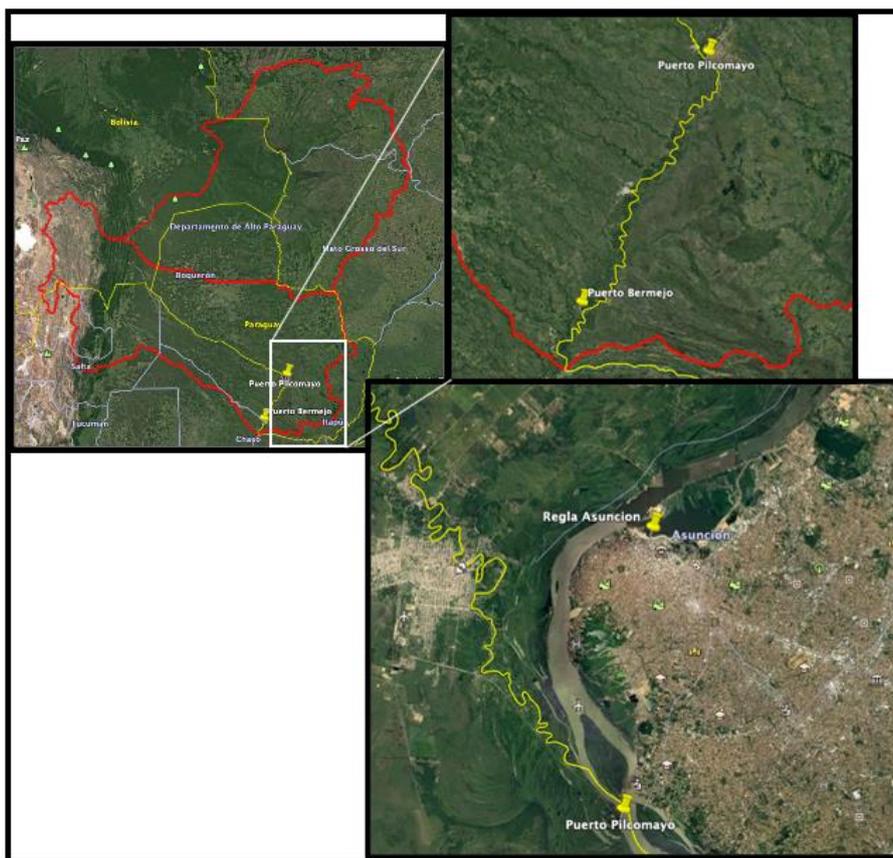


Figura 43 Mapa de ubicación de Estaciones fluviométricas

La estación más cercana al área de estudio que se utilizó para la calibración en el río Paraguay fue la de Puerto Pilcomayo donde encontraron un error de volumen relativamente bajo, pero las otras medidas de análisis no muestran un buen desempeño (**Tabla 8**). En la siguiente estación aguas abajo, Puerto Bermejo, los valores de los coeficientes Nash-Sutcliffe son ligeramente mejores, pero los errores de volumen indican que el MGB-IPH está sobreestimando el flujo en este punto (**Tabla 8**).

Tabla 8 Resumen de indicadores de ajuste del Modelo Hidrológico. Fuente: Projeto Modelagem Hidrológica da Bacia do Prata utilizando o MGB-IPH - Produto N2: Impacto das Mudanças Climáticas na Bacia do Prata. Collischonn, et. al. 2015.

Cod	Estación	ENS	ENSlog	ΔV	Q médio (m ³ /s)	Ad (km ²)	Q esp (l/s/km ²)
77	Puerto Pilcomayo ⁷	0.3	0.2	-0.7	3620	905940	4
79	Puerto Bermejo	0.4	0.3	16.2	4700	1135420	4.1

Luego de tener el modelo calibrado se simuló los diferentes periodos de análisis, los cuales tienen 30 años de datos y se definieron en las siguientes ventanas de tiempo:

⁷ La calibración del Modelo Hidrológico MGB – IPH fue realizada en la estación Pilcomayo (no con la estación Asunción). Por ello, las pruebas de bondad de ajuste fueron realizadas solamente para la estación Pilcomayo.



- 1) Clima actual: período de enero de 1960 a diciembre de 1990.
- 2) Clima futuro cercano (Futuro 1): período de enero de 2011 a diciembre de 2040.
- 3) Clima futuro medio (Futuro 2): período de enero de 2041 a diciembre de 2070.
- 4) Clima futuro lejano (Futuro 3): período de enero de 2071 a noviembre de 2099.

En la tabla se muestran los valores de caudal medio calculados por el modelo MGB-IPH basado en el clima simulado por el modelo Eta HADGEM2 RCP 4.5.

Tabla 9 Evolución del caudal medio (m^3/s) del Río Paraguay y proyecciones a futuro (Simulación del MGB-IPH). Fuente: Projeto Modelagem Hidrológica da Bacia do Prata utilizando o MGB-IPH - Produto N2: Impacto das Mudanças Climáticas na Bacia do Prata. Collischonn, et. al. 2015.

Estación	1960 a 1990	2010 a 2039	2040 a 2069	2070 a 2099
Puerto Bermejo	6355	4692	5618	6526
Asunción	4960	3525	4118	4820

En el informe también se presentan los cambios en los caudales mínimos, estos se obtuvieron de las estimaciones de caudal con un 90% de permanencia (Q90) en todos los puntos, obtenidos de una curva de permanencia de flujo en un intervalo de tiempo diario.

Tabla 10 Evolución del caudal mínimo (m^3/s) del Río Paraguay y proyecciones a futuro (Simulación del MGB-IPH). Fuente: Projeto Modelagem Hidrológica da Bacia do Prata utilizando o MGB-IPH - Produto N2: Impacto das Mudanças Climáticas na Bacia do Prata. Collischonn, et. al. 2015.

Estación	Q90 Actual	Q90 Fut1	Q90 Fut2	Q90 Fut3
Puerto Bermejo	3271	2107	2956	3513
Asunción	2490	1480	2260	2530

Del informe se puede concluir primeramente que los caudales simulados están sobrestimados en la cuenca baja del río Paraguay, y por otro lado, los caudales medios en la ciudad de Asunción no sufrirán aumentos en el futuro, sino más bien una disminución en los futuros de corto y mediano plazo (Futuro 1 y 2) esto también se observa que ocurrirá en toda la cuenca del río Paraguay (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). También se observa que ocurre lo mismo en el río Paraguay para los caudales medios mensuales (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

En lo que se refiere a caudales máximos, en el informe de Cuenca del Plata no se presenta ningún resultado específico, pero si se tienen los caudales diarios simulados para la estación Pilcomayo, los cuales serán utilizados para este estudio.

5.7.3 Análisis de caudales máximos en la Estación Pilcomayo (Río Paraguay)

Se cuenta con la serie de caudales simulados en la estación Puerto Pilcomayo para los periodos Actual y Futuros, descritos en el informe (IPH,2015), los cuales serán analizados para determinar lo que acontecerá con los caudales en Asunción, específicamente en la zona del Bañado Sur (zona de



estudio). El análisis se realiza para los caudales máximos ya que los demás caudales (medios y mínimos) fueron analizados en el proyecto del IPH-UFRGS (ya presentados).

Con la serie de caudales se asocian estos a distintos periodos de retorno para el periodo actual (periodo 1960-1990) y para el periodo futuro (periodo 2020-2099) para ver qué ocurrirá en el futuro, es decir si los caudales (y por ende los niveles) en la sección del río Paraguay ubicada en la Estación Pilcomayo aumentaran o disminuirán. Se trabaja con los caudales ya que este valor es el determinado en el modelo MGB, con lo cual se evita cualquier sesgo en la determinación de la distribución de probabilidades por parte de la curva HQ (trasformación de caudales a niveles).

Se aplica distribuciones de probabilidad teórica para asociar caudales a Periodos de Recurrencia (o Tiempo de Retorno TR), primero para la serie de caudales actuales tal como se muestra en la siguiente figura.

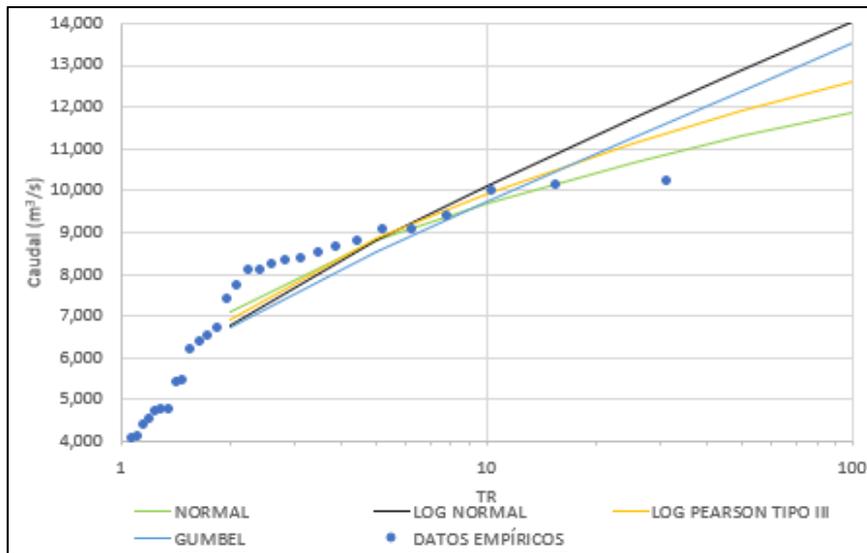


Figura 44 Distribuciones de Probabilidad Teórica y Empírica (Caudales Presentes: Serie 1960 - 1990)

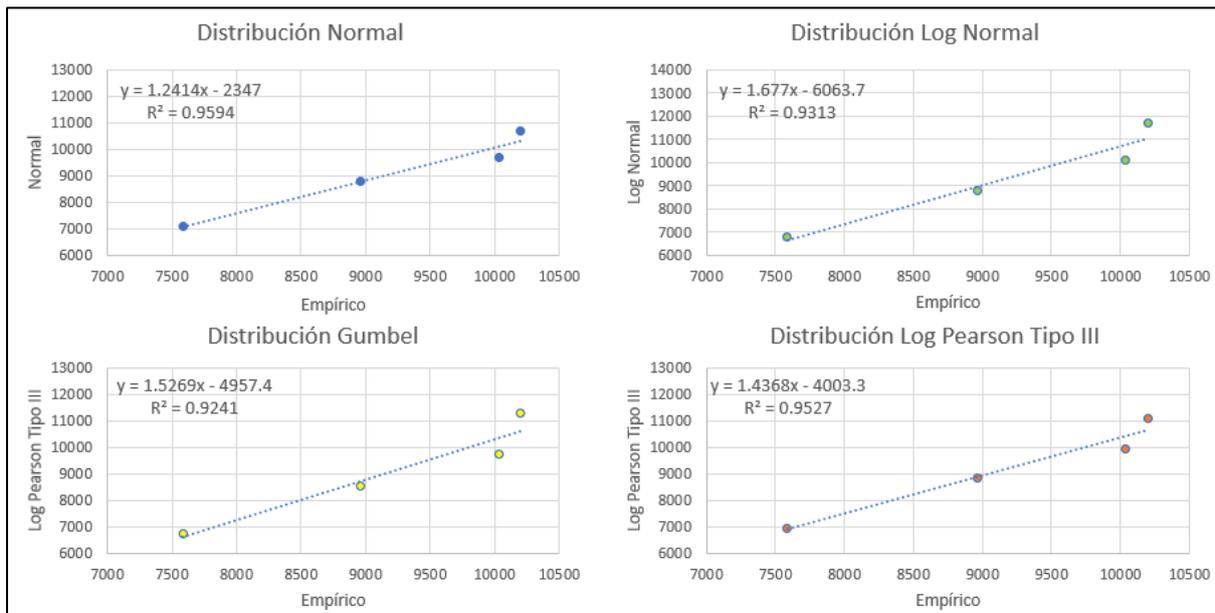


Figura 45 Ajustes para las Distribuciones de Probabilidad Teórica utilizadas



En todos los casos, los ajustes son muy buenos en la mayoría de las distribuciones, sin embargo, se observa un mejor ajuste de la distribución Normal comparando con la distribución empírica, por lo tanto, estos serán los valores utilizados. Se realiza el mismo ejercicio de recurrencia para los caudales futuros, obteniéndose el mejor ajuste en la distribución normal.

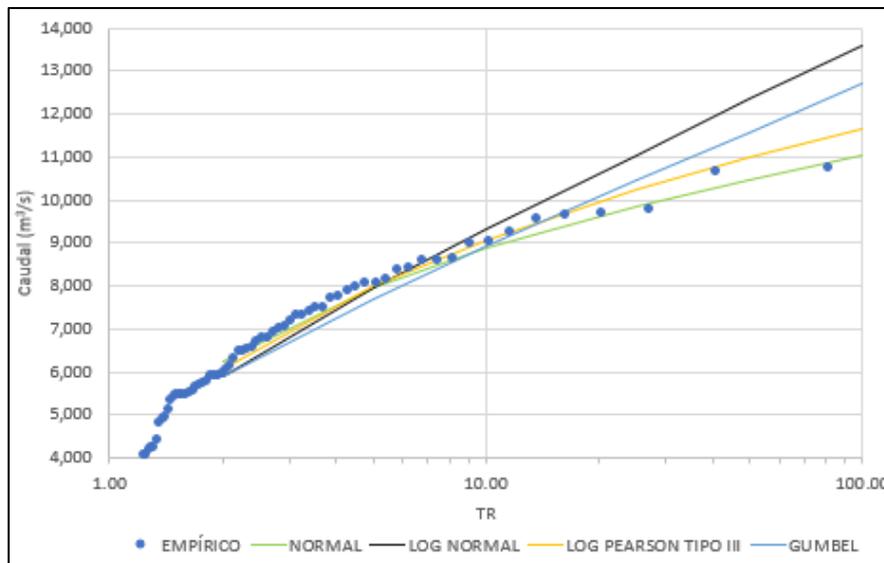


Figura 46 Distribuciones de Probabilidad Teórica y Empírica (Caudales Futuros: Serie 2020 - 2099)

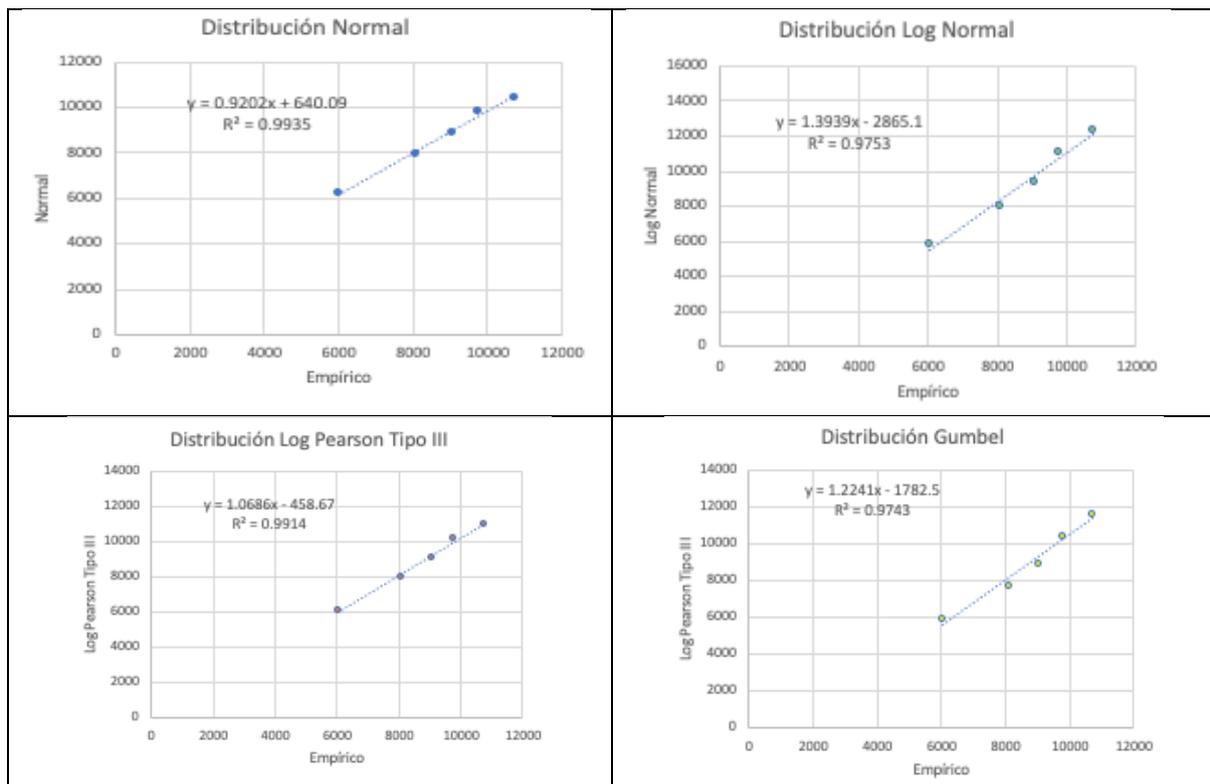


Figura 47 Ajustes para las Distribuciones de Probabilidad Teórica (Caudales Futuros)

Posteriormente se comparan los caudales (actual y futuro) para diferentes TR donde se observa una disminución de los caudales en el futuro.



Tabla 11 Comparativo de caudales presentes y futuros

TR	DIST. NORMAL ACTUAL	DIST. NORMAL FUTURO	RELACIÓN
2	7083	6240	0.88
5	8808	7973	0.91
10	9710	8879	0.91
25	10672	9844	0.92
50	11293	10467	0.93
100	11850	11027	0.93
150	12207	11385	0.93
500	12982	12163	0.94

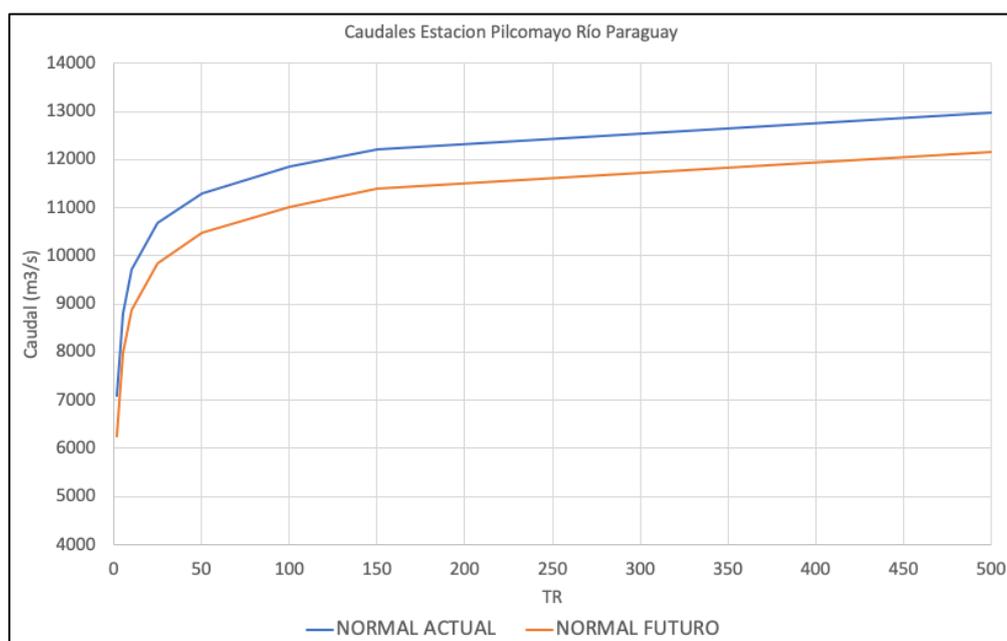


Figura 48 Caudales Presentes y Futuros para distintos Tiempos de Recurrencia (TR)

En conclusión, se tiene que los caudales del río Paraguay en el trecho ubicado entre las ciudades de Asunción y Clorinda no presentará aumento en el futuro por efectos del cambio climático, por el contrario, se presentará una pequeña disminución. Teniendo en cuenta esto, se concluye que los niveles altos en Asunción no serán mayores a los determinados actualmente para diferentes tiempos de retorno, con lo cual pueden utilizarse los mismos valores para el cálculo de inundaciones en Asunción.



6. CARACTERIZACIÓN DE LA LAGUNA YRUPE

Actualmente, la laguna recibe aportes del arroyo Paraguari y de un área urbana incremental situada al norte del arroyo Paraguari. En épocas de crecida del Río Paraguay, existe una conexión permanente con la laguna (para cotas superiores a +59.00). La cota de fondo de la laguna podría considerarse en promedio en +58.10, mientras que el borde de la laguna a partir del cual se genera un rebose se encuentra en cota +59.00 aproximadamente. En la siguiente figura se muestra un corte transversal de la laguna.

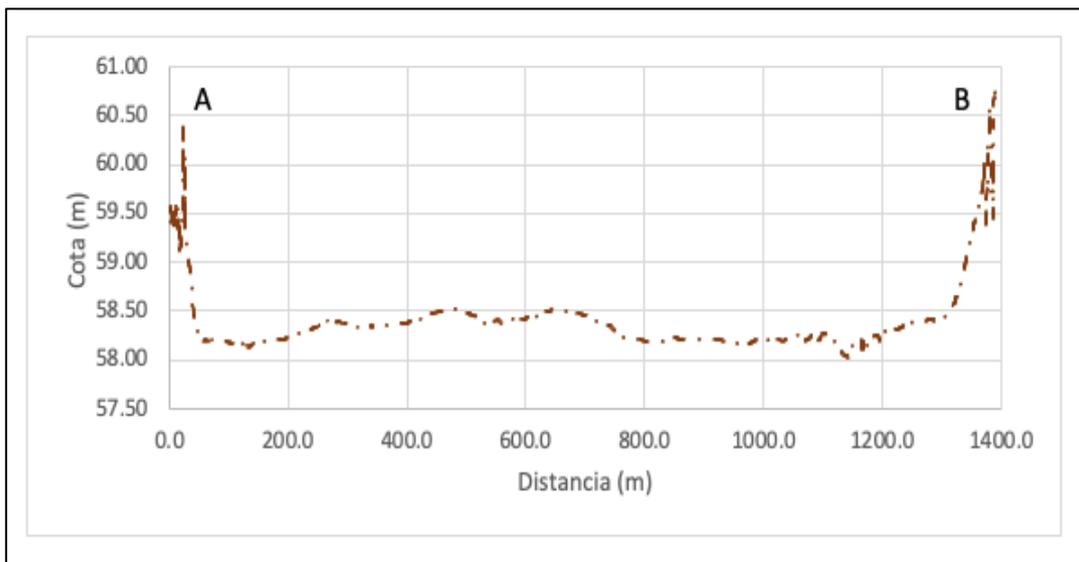


Figura 49 Corte transversal de la laguna yrupe a lo largo de los puntos más bajos



El drenaje actual de la laguna se da por **la línea de talweg** formada en la zona central del cuerpo de la laguna y el bañado, desagotando al Río Paraguay. También existe un drenaje lateral en zonas aledañas donde el agua queda acumulada a lo largo del bañado. En la figura se observa el MDE de la zona de la laguna y alrededores, donde se observa la línea de talweg y las zonas más bajas donde se acumula agua y luego se conecta con el río. Cuando los niveles del río suben por encima de 60, la conexión entre el río y la laguna también ocurre por el sur.

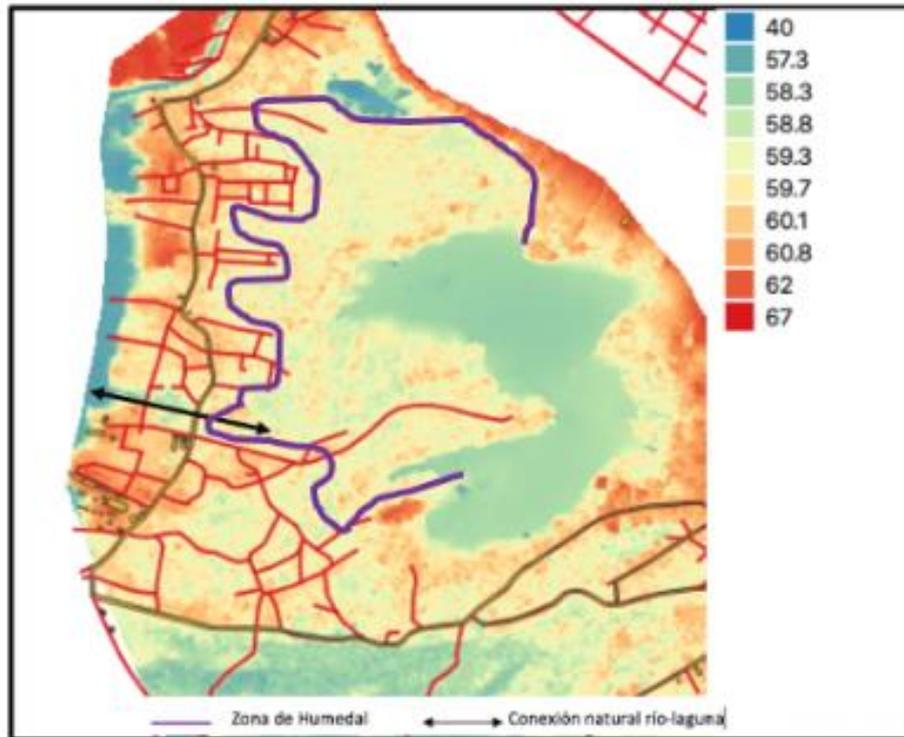


Figura 50 Desagote actual de la Laguna Yrupe



Figura 51 Zonas de ingreso de agua en periodos de crecida (Río PY a cota 60,50 m)

En líneas generales, el sistema de drenaje conceptual de la Laguna Yrupe se muestra en la siguiente figura.

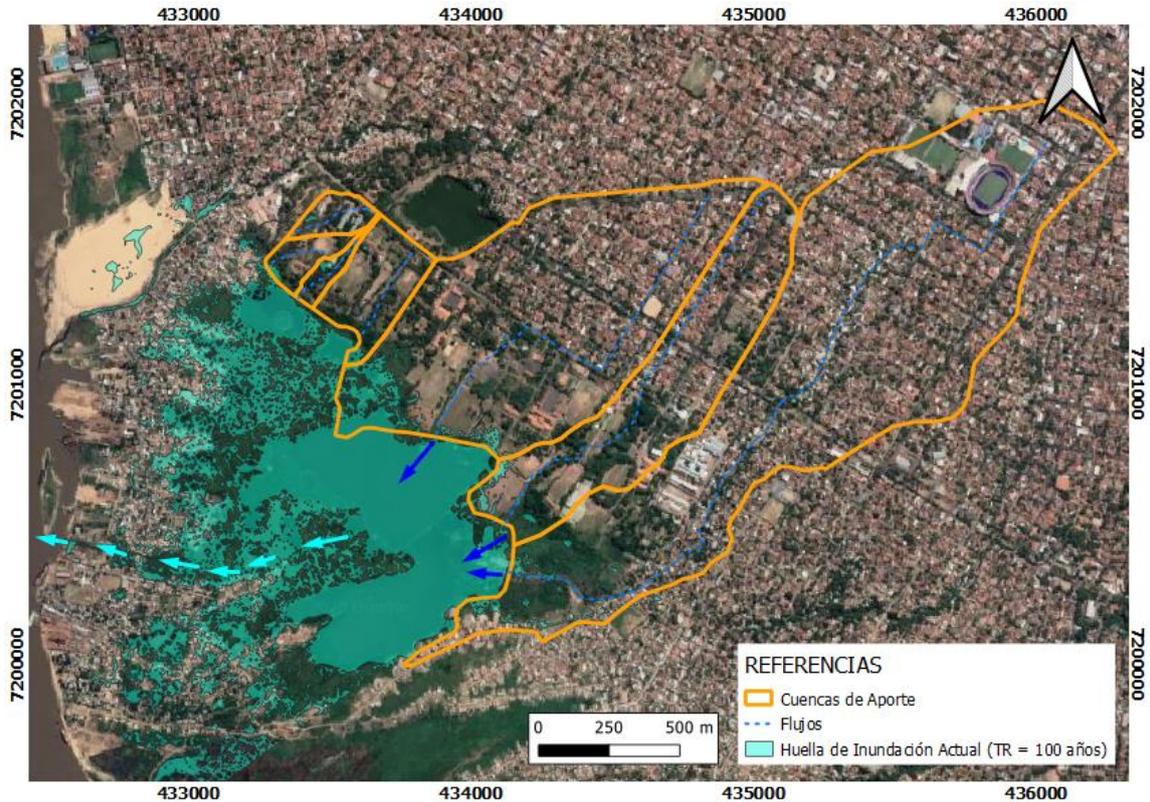


Figura 52 Sistema de drenaje actual de la Laguna Yrupe (entrada de agua en azul oscuro y salida en celeste)

El objetivo principal de este estudio consiste en evaluar los impactos hidrológicos e hidráulicos que serán generados en la Laguna Yrupe con la incorporación de la Costanera Sur. La implantación de la costanera y posterior refulado a ser realizado para la relocalización de viviendas, disminuirá el volumen de almacenamiento de la Laguna Yrupe. Aproximadamente el 30 % de la superficie de la laguna será eliminada por el refulado proyectado, tal como se muestra en la siguiente figura.

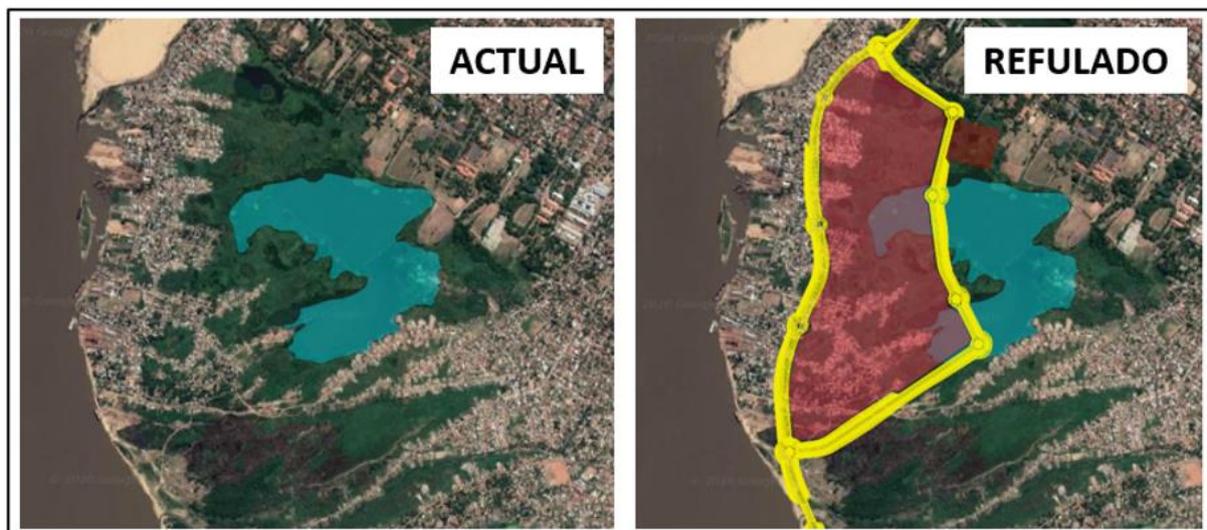


Figura 53 Intervenciones sobre laguna Yrupe con la traza de la costanera sur y el refulado del barrio Tacumbú



Esto afecta directamente en la capacidad de almacenamiento por la pérdida de superficie del humedal y de la laguna. Para comparar esta capacidad, se generan y muestran en la siguiente figura, curvas Cota/Área/Volumen que básicamente establece el volumen de agua que puede ser almacenado para cada nivel y la superficie que inunda.

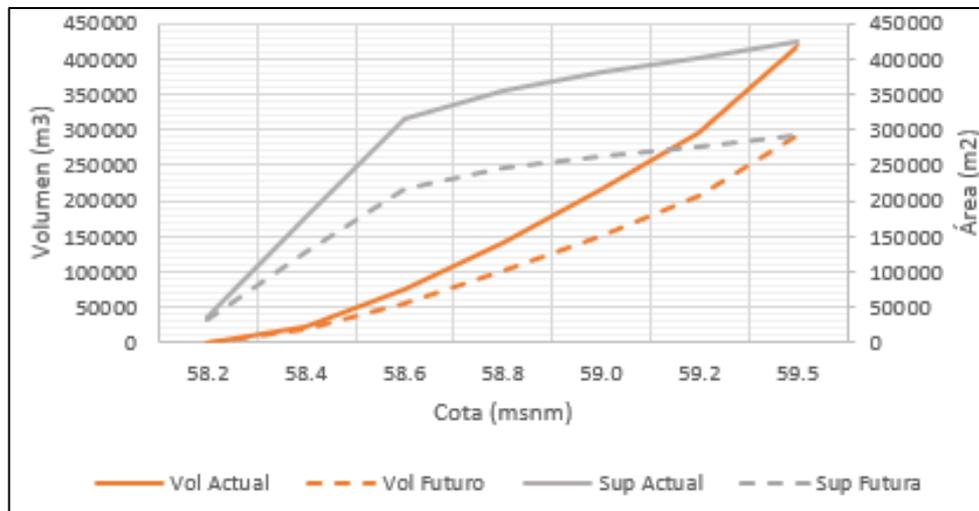


Figura 54 Comparativo de la capacidad de almacenamiento de la laguna Yrupe para la situación actual y futura

Como se observa en la figura anterior, la capacidad de la laguna se reduce aproximadamente en un 30 % con la implantación de la costanera sur y refulado.

7. ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE DISEÑO

Para la estimación de los caudales de diseño, se utiliza el software SWMM (Storm Water Management Model) desarrollado por la EPA (Environmental Protection Agency) de los Estados Unidos. Este software consiste en un modelo Hidrológico/Hidráulico ampliamente utilizado para el dimensionamiento de drenaje urbano. Este modelo permite estimar caudales y transitarlos a lo largo de una red de drenaje con el método hidrodinámico, que básicamente consiste en aproximaciones numéricas a las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento (unidimensional).

En el presente apartado se resumen los criterios adoptados para la estimación de parámetros en base a las características de las subcuencas del área de estudio, los cuales repercuten directamente en los caudales a ser calculados. Para simular la transformación de precipitación en escorrentía se requiere la información que se detalla en los siguientes ítems.

7.1 Delimitación de cuencas

Básicamente, **existen 7 cuencas de aporte principales directo a la laguna Yrupe**, las cuales se muestran en la siguiente figura.

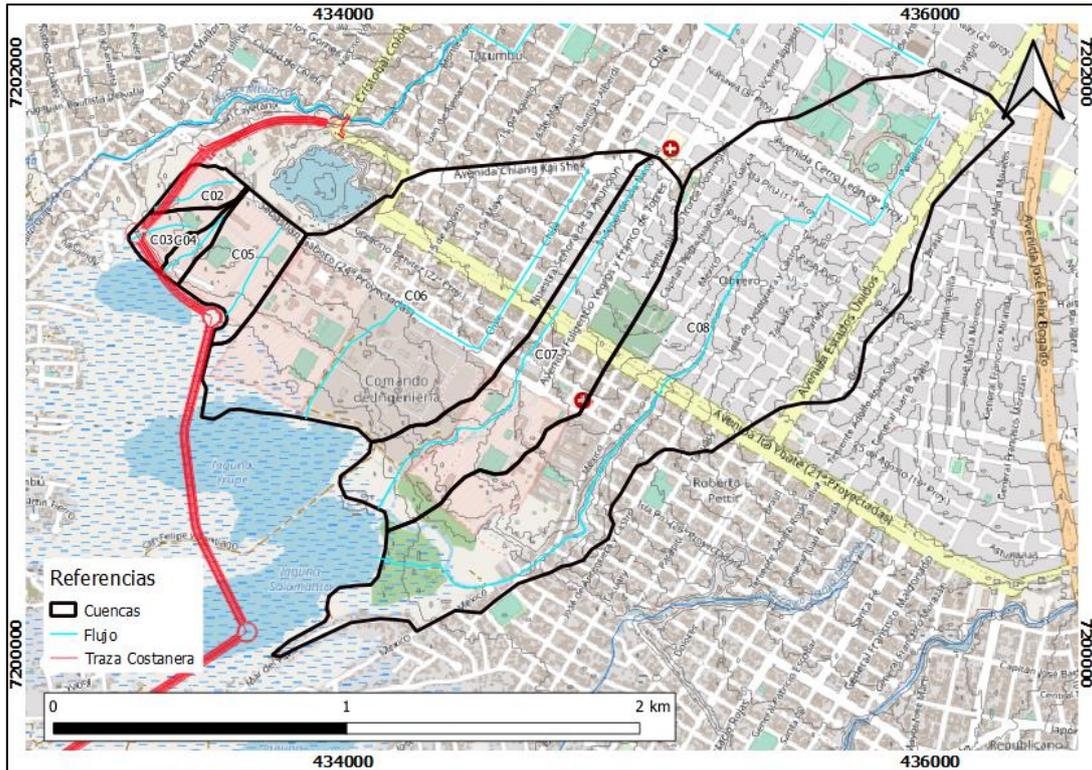


Figura 55 Cuencas de aporte a la laguna Yrupe

7.2 Estimación de parámetros de modelación hidrológica

7.2.1 Número de curva

Los insumos necesarios para estimar el Número de Curva son el Tipo y Uso de Suelo existente en la zona de estudio. Con respecto al tipo de suelo, se utiliza la clasificación del Soil Conservation Service de los Estados Unidos, que básicamente clasifica los mismo en 4 grandes grupos: A, B, C y D. Los suelos más arenosos y permeables inician con el Tipo A, variando su permeabilidad y tornándose arcillosos y poco permeables en el Tipo D (los suelos tipo B y C consisten en valores intermedios). Para este caso de estudio, se asume un suelo de textura variable entre franco arenosa, limosa y arcillosa, razón por la cual se asume un Tipo de Suelo C (Clasificación del SCS).

Con respecto a la cobertura de suelo, se realizó una clasificación supervisada que se muestra en la siguiente figura.



Figura 56 Uso de suelo en las cuencas de estudio

Las clasificaciones realizadas se agrupan en dos grupos: i) Zonas relativamente permeables son denominadas “Zonas Verdes” (espacios abiertos, jardines, etc.); ii) Zonas impermeables como tejados, techos de chapa y calles). Existen diversos criterios que pueden ser utilizados para determinar el número de curva; para este estudio se optó por utilizar la Tabla de CN expuesta en el Libro de Drenaje Urbano (Tucci, 1995). Acotando la tabla para el tipo y cobertura de suelo del presente proyecto, se tiene la siguiente asignación de Número de Curva.

Tabla 12 Criterio utilizado para la asignación del Número de Curva (CN)

USO DE SUELO	Tipo de Suelo del SCS			
	A	B	C	D
Zonas verdes: espacios abiertos, jardines, etc.	39	61	74	80
Zonas Imp.: tejados, estacionamiento, calles pavimentadas	98	98	98	98

Los valores de CN para cada subcuenca se obtienen promediando los valores que existen dentro de cada una de ellas. En la siguiente figura se muestra la distribución del CN para el área de estudio.

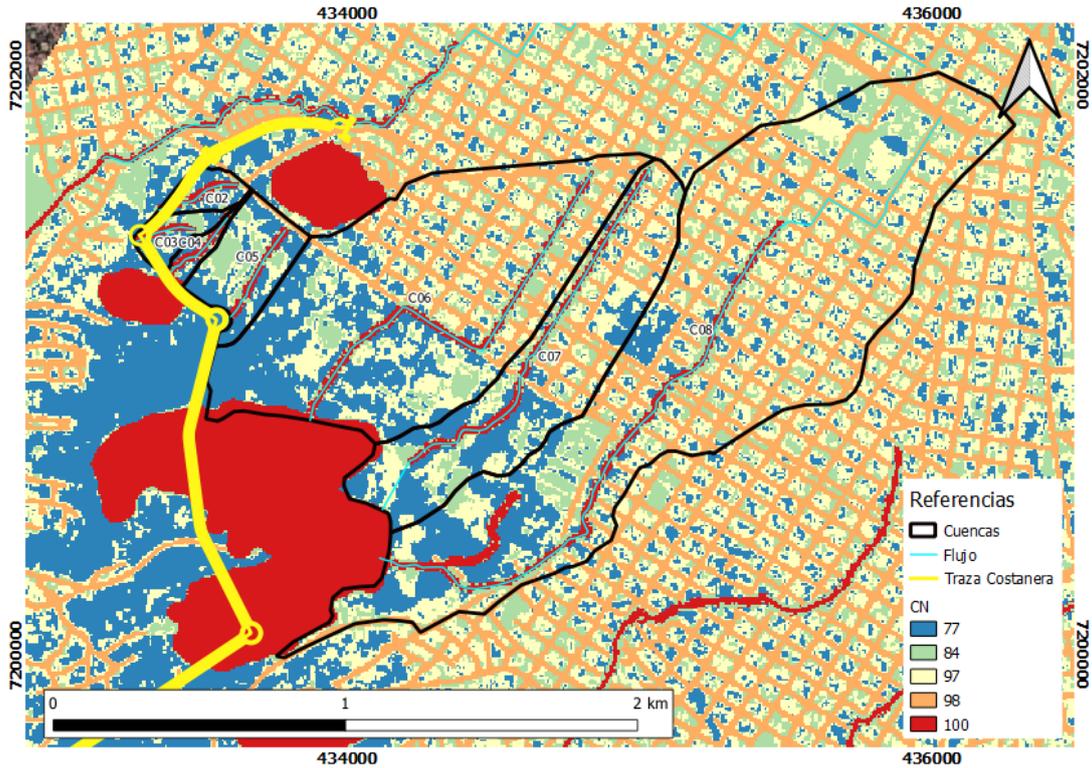


Figura 57 Número de curva para el área de estudio

Los valores medios de CN obtenidos para cada cuenca se muestran en la **Tabla 13**.

7.2.2 Ancho equivalente de las cuencas

El Ancho Equivalente (W) es el parámetro con mayor influencia en el caudal calculado, por lo tanto, se debe tener sumo cuidado con su estimación, y en lo posible, realizar un control cruzado, verificación aproximada contra observación en campo, etc. El mismo consiste en una medida de la idealización de una Cuenca irregular a una forma rectangular, tal como se muestra en la Figura 58.

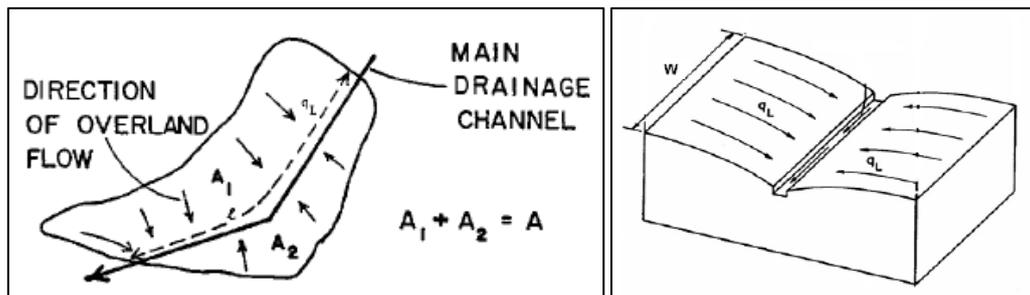


Figura 58 Subcuenca Urbana Tipo (izq.) y representación idealizada de sub-cuenca (Fuente: Manual SWMM 2016)

Diversas metodologías son utilizadas para el cálculo del ancho equivalente (W). Para el presente trabajo se utiliza el criterio de Guo & Urbonas (2007), ya que tiene mayor fundamentación y utiliza la idea de los “Factores de Forma” para convertir una cuenca natural a una cuenca idealizada (Figura 58). Las ecuaciones involucradas en el cálculo de ancho equivalente se muestran a continuación:

$$Z = A_m / A \quad (1)$$

donde:



$Z =$ factor de sesgo, $0.5 \leq Z \leq 1$

$A_m =$ superficie mayor entre las áreas de la subcuenca a los costados del canal

$A =$ área total

Factor de Forma 1
$$X = A/L^2 \quad (2)$$

donde: A (Área de la Subcuenca); L (Longitud del Flujo Principal de la Subcuenca)

Factor de Forma 2
$$Y = 2X(1.5 - Z)(2K - X)/(2K - 1) \quad (3)$$

donde: K (Límite Superior del Factor de Forma – Varía entre 4 y 6)

Ancho Equivalente
$$W = YL \quad (4)$$

- Pendiente Media de las Cuencas

Guo y Urbonas (2007), quienes propusieron la fórmula de ancho equivalente, sugieren calcular la pendiente media de la cuenca con la siguiente expresión empírica:

$$S = S_o L / (\frac{A}{YL} + YL) \quad (5)$$

donde: S_o es la pendiente del flujo principal de la subcuenca.

- Coeficiente de Rugosidad de Manning (n) para el caudal superficial de calle

Tomando como base las recomendaciones del Manual de Usuario del SWMM (2016) en su Tabla 3-5 (Pág. 75), se utilizó un valor medio de $n = 0.017$ considerando las condiciones de asfalto y empedrado.

7.2.3 Almacenamiento en Depresiones

De acuerdo con lo que se indica en la Tabla 3-6 (Pág. 78) del Manual de SWMM (2016), este parámetro solo tiene un efecto significativo en tormentas de bajo volumen, lo cual no es el caso en este estudio, puesto que se utilizan tormentas de diseño (de grandes volúmenes e intensidad), por lo tanto, se mantiene el valor asumido por defecto en el SWMM (2 mm para zonas impermeables y 5 mm para zonas permeables).

7.2.4 Precipitación de diseño

Como se mencionó anteriormente, la base datos utilizada a nivel nacional para ensamblar una tormenta sintética son las Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) desarrolladas en la FIUNA (Cuevas & Rolón, 2010). Los hietogramas o tormentas de diseño se muestran en el capítulo 6 (Inciso 6.6).

7.3 Resumen de parámetros y caudales de diseño obtenidos

Para definir la duración de tormenta a ser utilizada, primeramente, debe ser determinado el tiempo de concentración (T_c) de las cuencas. El T_c fue hallado utilizando la ecuación de Carter:

$$T_c = 0,0977 \cdot L^{0.6} \cdot S^{-0.3} \quad (6)$$

donde:

T_c : tiempo de concentración en horas

L : longitud en km

S : pendiente en m/m



En la siguiente tabla se resumen los parámetros estimados en base a los criterios definidos en los ítems anteriores.

Tabla 13 Parámetros estimados

Subcuenca	Área (ha)	L (km)	Tc (min)	Z	X	k	Y	Width (Guo & Ubornas, 2007)	S cuenca (%)	CN
C02	3.31	0.32	9.40	0.501	0.329	4	0.721	229	1.87	84.65
C03	3.50	0.23	6.07	0.617	0.682	4	1.258	285	2.69	80.49
C04	2.00	0.31	7.67	0.511	0.206	4	0.454	141	4.60	87.28
C05	10.73	0.37	8.86	0.664	0.804	4	1.381	505	1.81	82.11
C06	82.76	1.62	22.27	0.669	0.313	4	0.572	929	2.91	86.75
C07	41.80	1.65	21.86	0.751	0.154	4	0.258	426	4.19	86.61
C08-2 (Paraguari)	90.87	1.62	21.88	0.515	0.345	4	0.743	1206	2.86	91.02
C08-1 (Paraguari)	47.76	1.50	26.69	0.590	0.211	4	0.428	643	1.66	86.09

Los parámetros que se mostraron en la tabla anterior se ingresaron al modelo hidrológico/hidráulico SWMM. La duración de tormenta utilizada es de 1 hora, teniendo en cuenta que le mayor tiempo de concentración (para el Ayo. Paraguari) es de aproximadamente 50 min. El esquema conceptual del modelo se muestra en la siguiente figura.

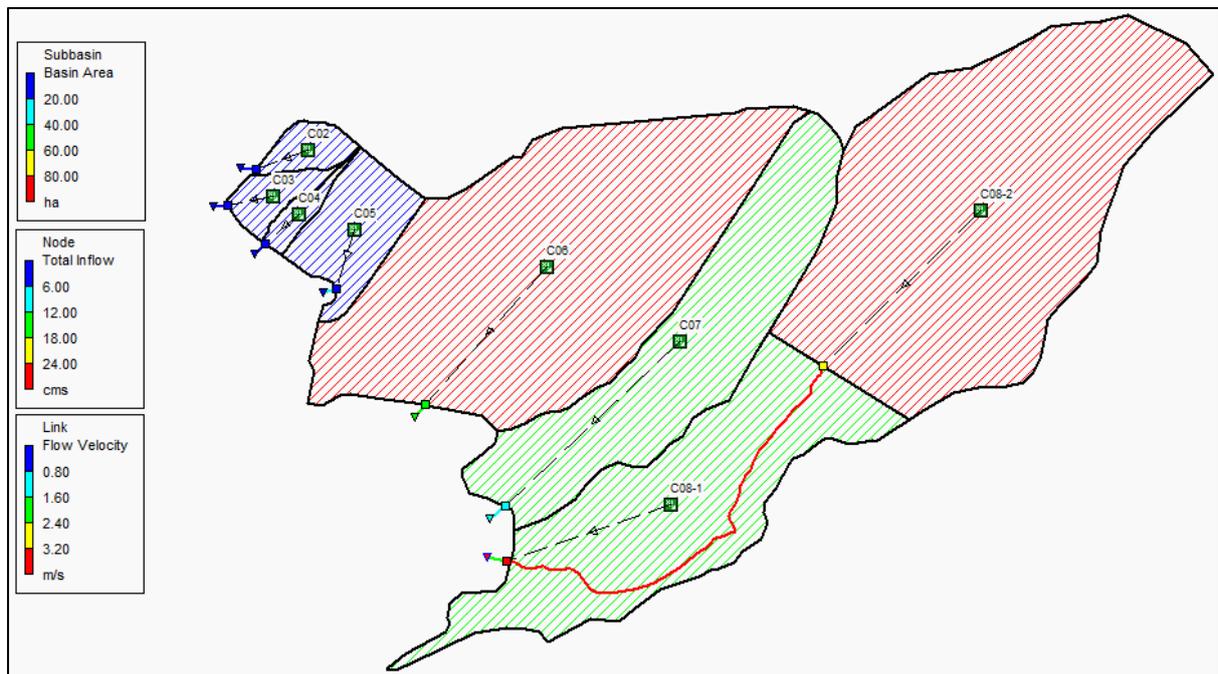


Figura 59 Esquema conceptual del modelo SWMM

Los caudales de diseño obtenidos para distintos periodos de recurrencia y escenarios de cambio climático se muestran a continuación:



- **Caudales de diseño para la situación actual**

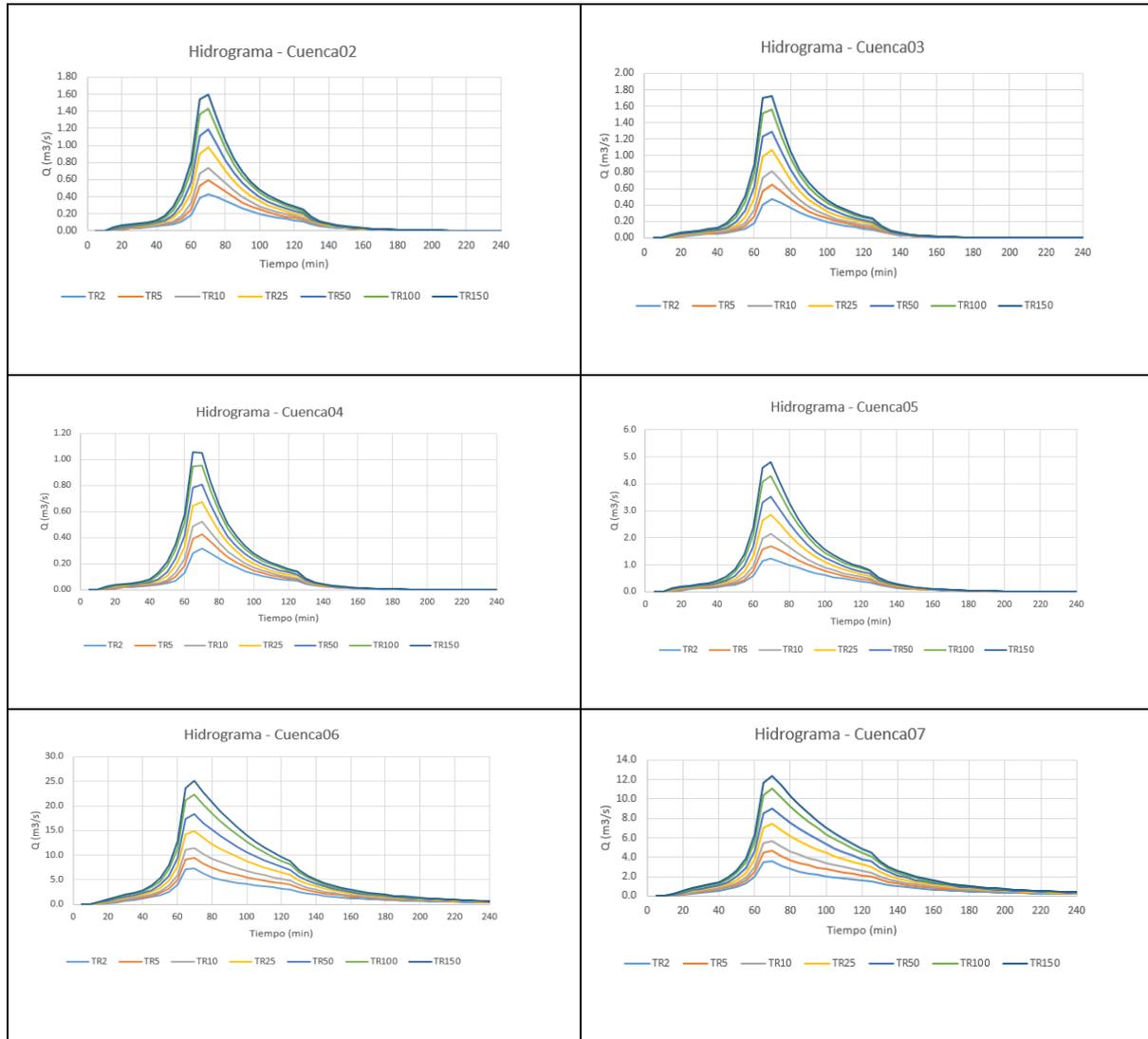


Figura 60 Caudales de diseño para la cuenca 02, 03, 04, 05, 06 y 07

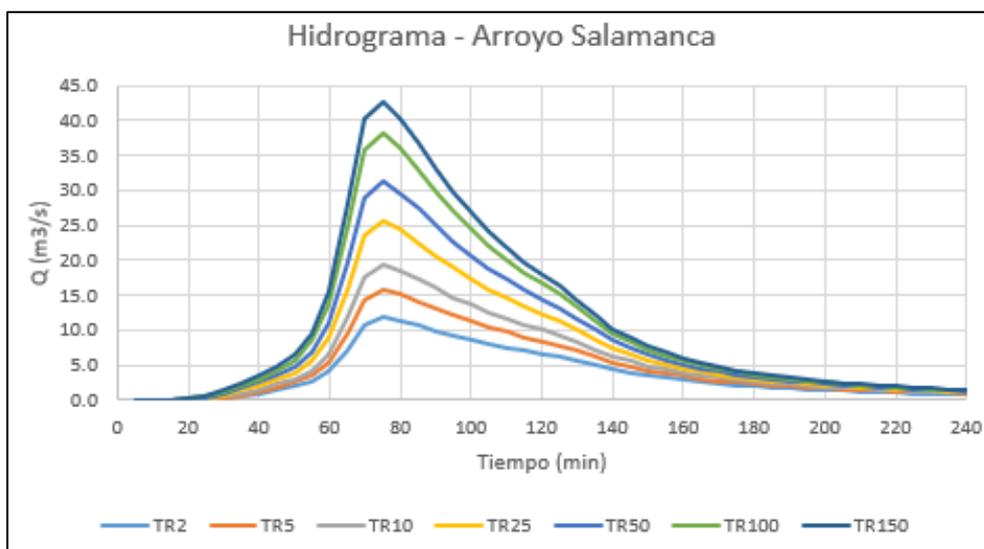


Figura 61 Caudales de diseño para el Arroyo Paraguari (Salamanca) – Cuenca 08



● **Caudales de diseño para el escenario de cambio climático RCP 4.5:**

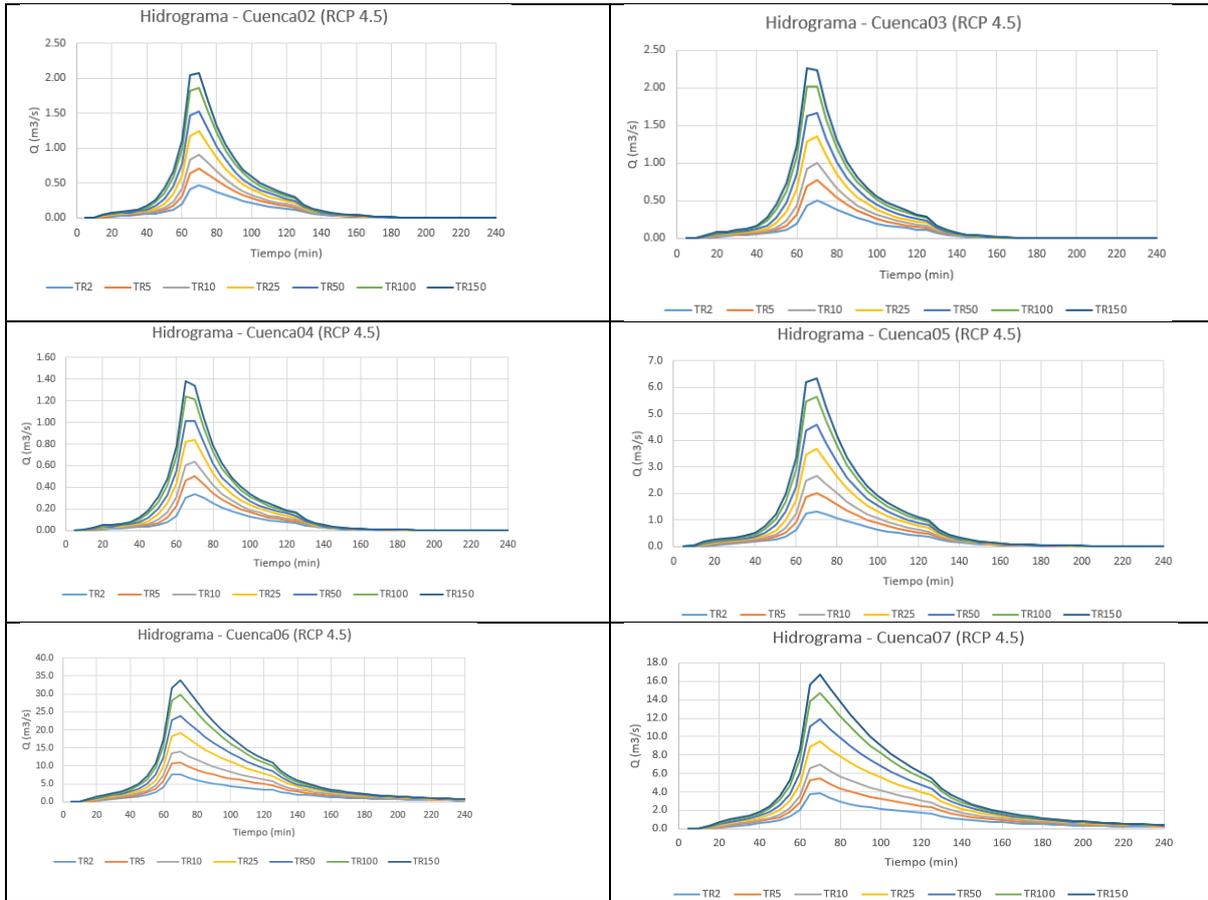


Figura 62 Caudales de diseño para la cuenca 02, 03 04, 05, 06, 07. Escenario RCP 4.5.

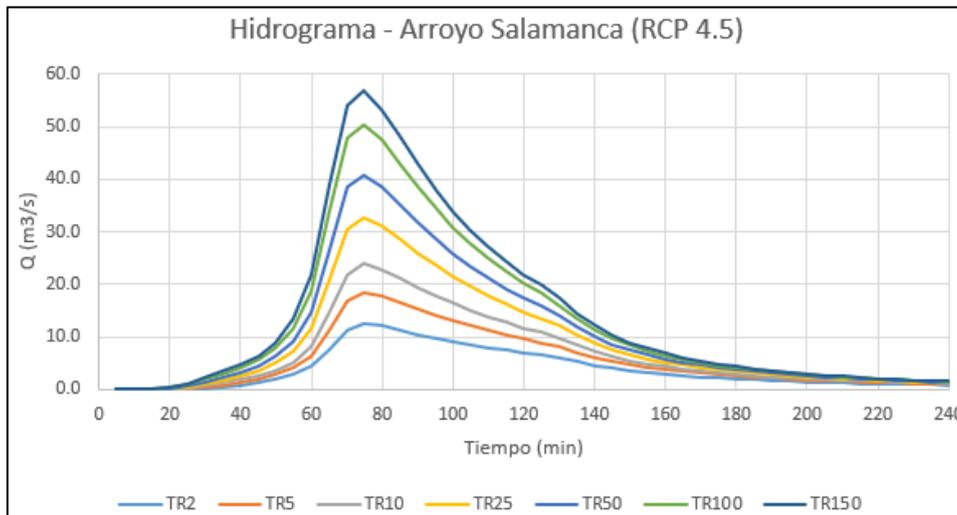


Figura 63 Caudales de diseño para el Arroyo Paraguari (Salamanca) – Cuenca 08. Escenario RCP 4.5.



- **Caudales de diseño para el escenario de cambio climático RCP 8.5:**

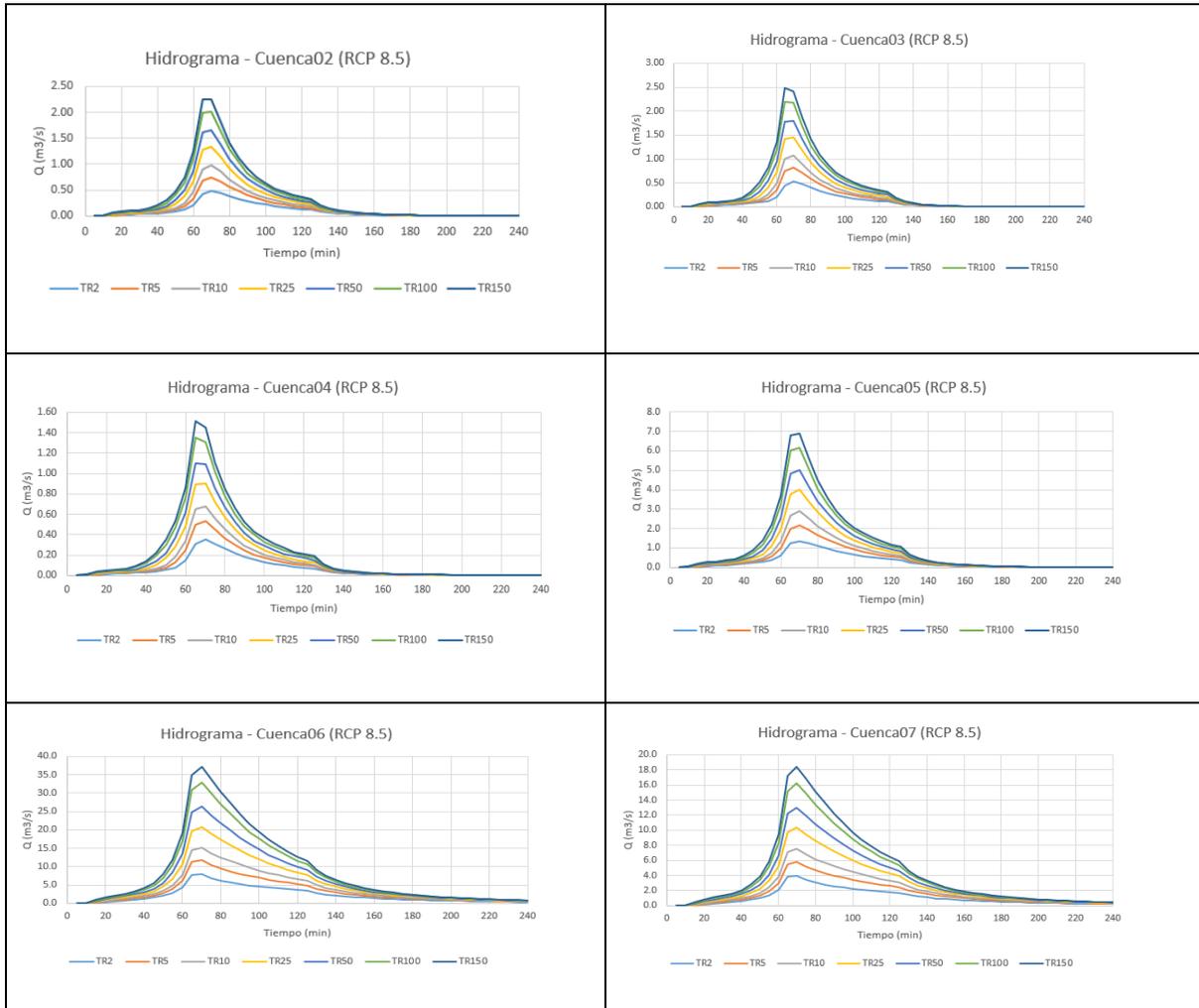


Figura 64 Caudales de diseño para la cuenca 02, 03 04, 05, 06, 07. Escenario RCP 8.5.

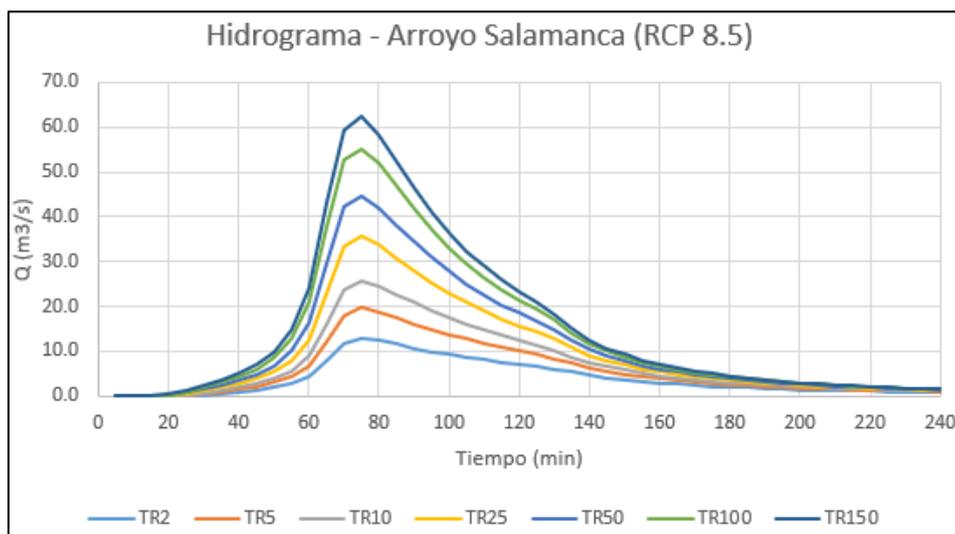


Figura 65 Caudales de diseño para el Arroyo Paraguari (Salamanca) – Cuenca 08. Escenario RCP 8.5.



En definitiva, el caudal máximo calculado para la laguna Yrupe es de 80 m³/s, asociado a un TR = 100 años. Este valor se obtiene mediante la convolución de los hidrogramas que ingresan a la laguna, tal como se muestra en la siguiente figura.

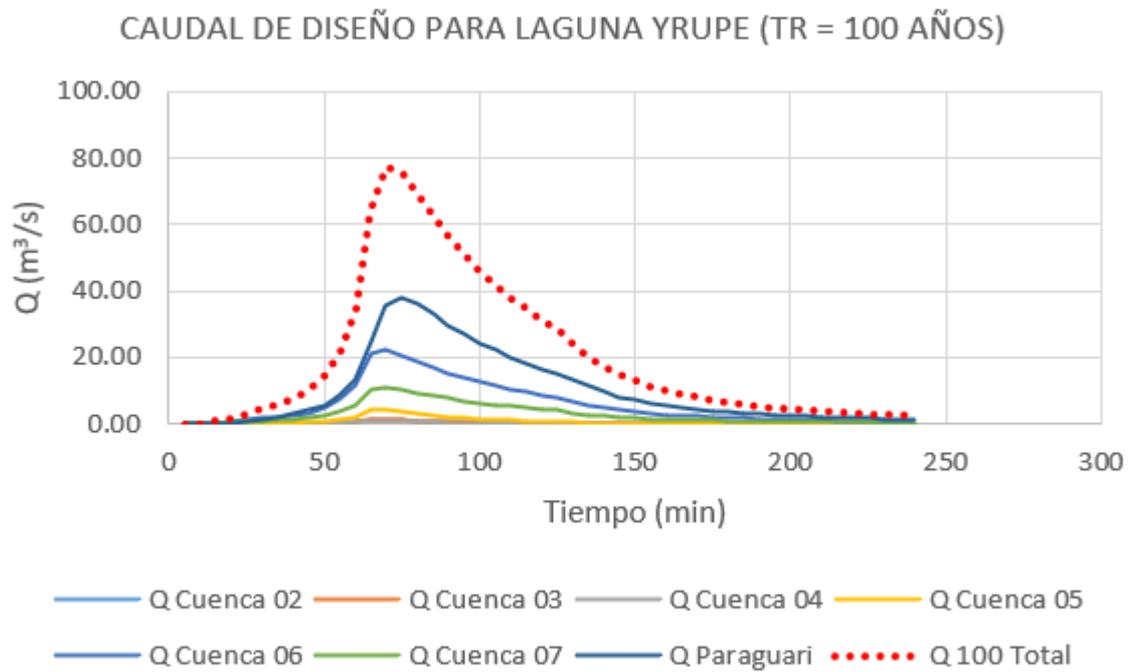


Figura 66 Convolución de hidrogramas y caudal máximo que podría ingresar a la Laguna Yrupe (Línea punteada roja). TR = 100 años.



8. MODELACIÓN HIDRODINÁMICA 2D

Con los insumos determinados en capítulos anteriores, se ensambla un modelo hidráulico para operarlo en régimen no permanente bidimensional. Para el efecto, se utiliza el software HEC-RAS, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE) del Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC). Este software presenta buenas capacidades para el modelado hidráulico y es ampliamente utilizado y aceptado a nivel mundial.

En lo referente a modelación hidráulica 2D, es de suma importancia representar de la mejor manera posible los Modelos Digitales de Terreno (MDT). Esto se justifica en la necesidad de representar correctamente los cambios topográficos que condicionará la dirección de flujo y los vectores de velocidad del agua.

8.1 Definición de geometría de canales y creación de MDT

El MDT base fue obtenido a partir de una campaña de aerofotogrametría, cuyos resultados se explicaron con suficiente detalle en el Producto II de la presente consultoría. A este MDT, es importante incorporarle los cauces y canalizaciones existentes para transportar adecuadamente el agua a la laguna Yrupe. Básicamente, se tienen dos canales importantes a ser incorporados al MDT: el ingreso del arroyo Paraguarí al bañado y el canal futuro de desagote de la laguna Yrupe.

Con respecto al A° Paraguarí, se utilizó la sección transversal del proyecto de canalización de este en la zona de la calle 32 Proyectadas, tal como se muestra en la siguiente figura. Esta sección se incluye al modelo hidráulico 2D para ingresar el caudal de diseño del arroyo Paraguarí.

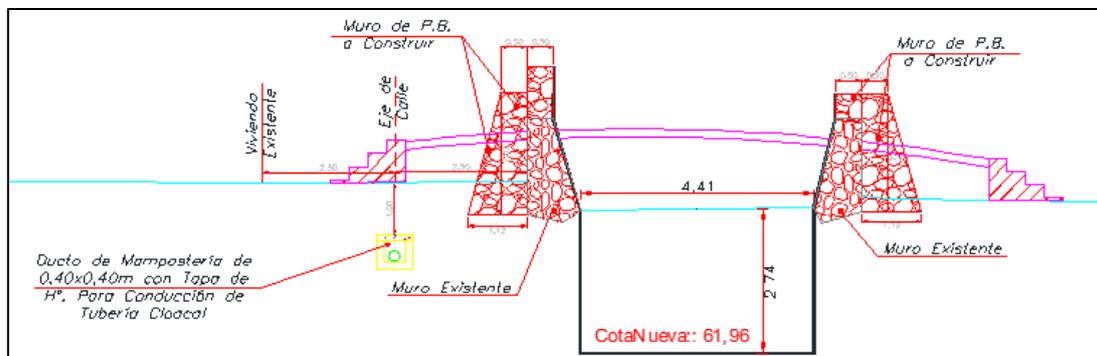


Figura 67 Sección transversal del Arroyo Salamanca (Paraguarí) incorporado al MDT

Como para los escenarios futuros se debe incorporar el canal de desagote de la laguna, se define una geometría preliminar del mismo con una embocadura tipo vertedero por rebose, se utiliza la sección del canal propuesto en el proyecto referencial de la costanera sur (**Figura 68**). Para la descarga por el vertedero se utiliza la ecuación de Manning obteniéndose la curva de descarga según la profundidad:

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (6)$$

donde:

Q: Caudal (m³/s)

R: Radio Hidráulico (m)

S: Pendiente (m/m)



El ancho del canal del proyecto costanera es variable de 8 a 10 metros. Teniendo en cuenta que la descarga actual de la laguna se da aproximadamente al superarse la cota 59 msnm, se establece como fondo de canal esta misma cota, a modo de mantener el mismo comportamiento. En la Figura 68 se muestra una sección esquemática del canal de desagote.

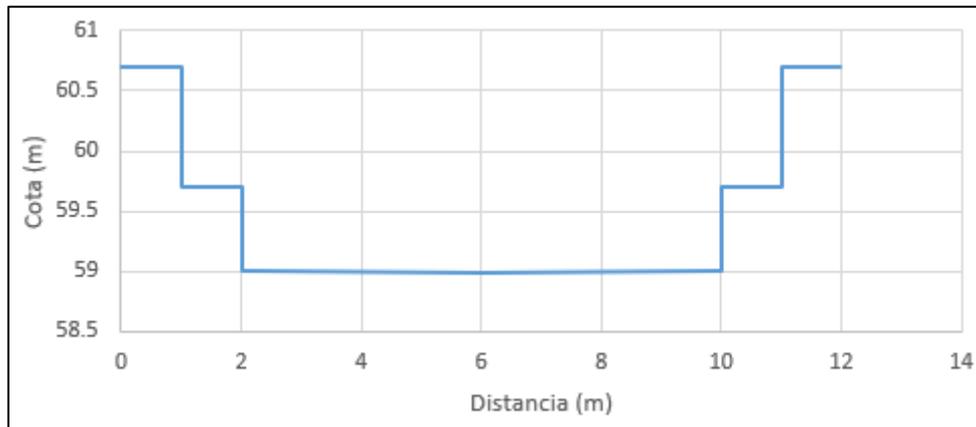


Figura 68 Sección transversal utilizada para el desagote de la Laguna Yrupe

En base a la sección que se muestra arriba, se estima la curva de descarga con la ecuación de Manning (6), tal como se muestra en la siguiente figura. Esta curva representa el tirante de agua que se genera sobre el canal, es decir, a partir de la cota 59 msnm. Teniendo en cuenta el MDT y la ubicación de las viviendas aledañas a la laguna se establece como máximo nivel del agua la cota 60 msnm es decir una profundidad de 1 metro en el canal.

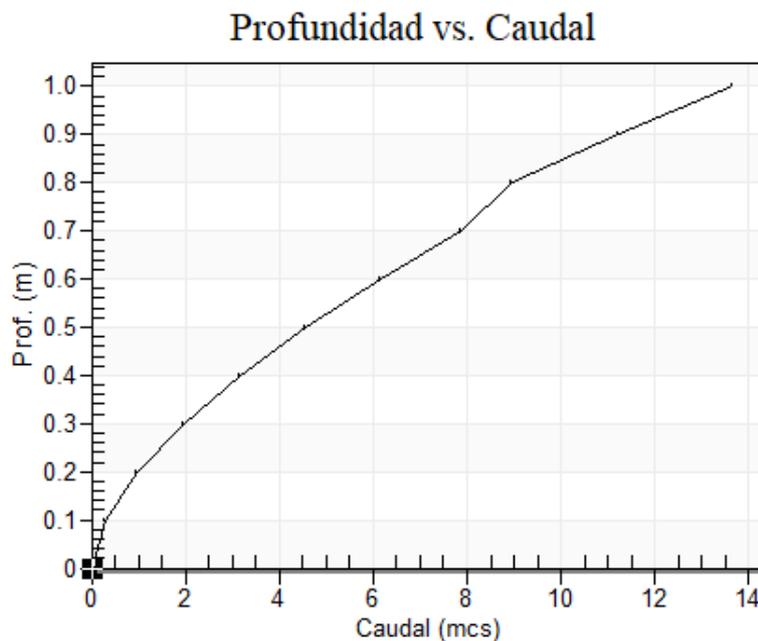


Figura 69 Curva de descarga del vertedero (Profundidades medidas sobre el fondo del vertedero que se encuentra a cota 59 msnm)

Para realizar un tránsito en reservorio, se utiliza el software denominado HydraulicToolBox (desarrollado por la FHA). Se asume un nivel de agua situado en 59 msnm como condición inicial; luego se ingresa:



- El hidrograma de diseño (80 m³/s obtenido en el capítulo anterior)
- Para definir el almacenamiento disponible se ingresa la curva de almacenamiento de la laguna
- Para definir la descarga se utiliza la curva de descarga del canal.

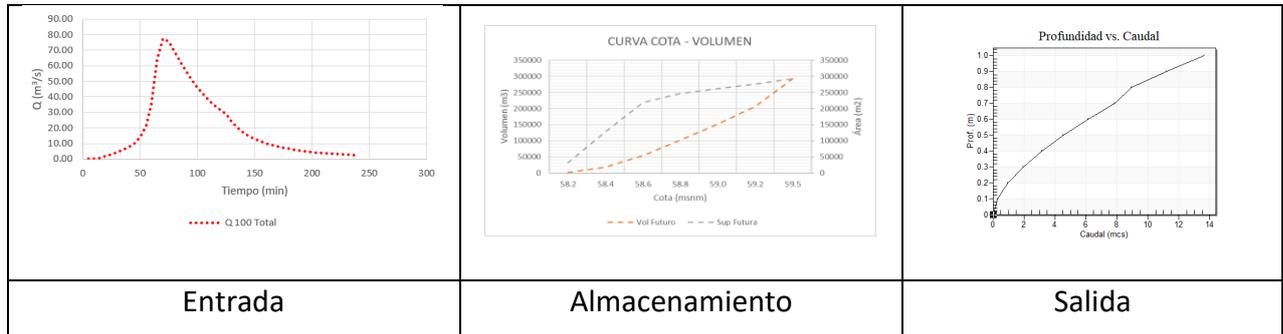


Figura 70 Insumos para realizar el tránsito de hidrograma

Hidrograma Transitado

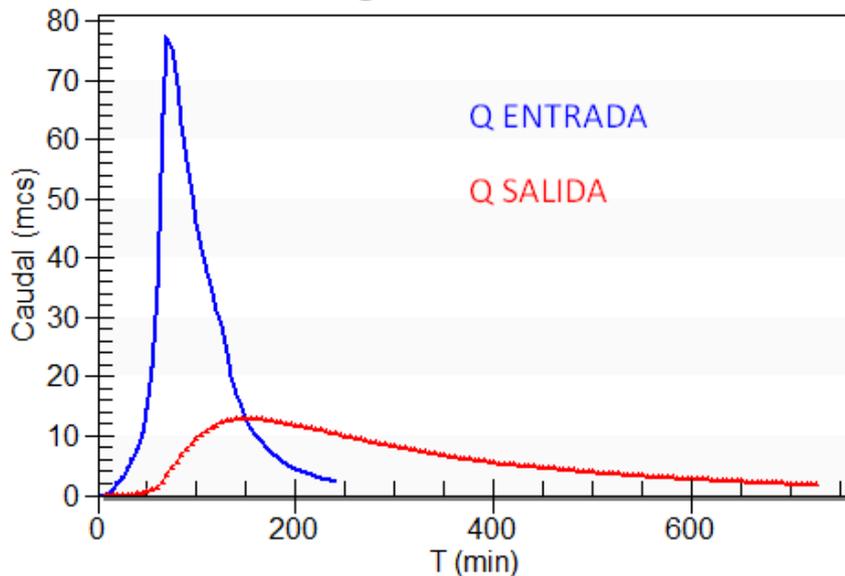


Figura 71 Atenuación de hidrograma de diseño (TR = 100 años) en la Laguna Yrupe para las condiciones de vertido propuestas (Cálculo simplificado previo para definición de geometría del canal)

Para la obtención de los resultados finales, la sección que se muestra en la la Figura 68 fue implantada en el MDT para todas las alternativas de canales, variando solamente la localización del canal. Se adoptan cuatro situaciones distintas: a) Situación Actual; b) Situación Futura (Pyto. Completo de la Costanera Sur⁸) + Canal propuesto en proyecto referencial del MOPC; c) Situación Futura (Costanera Sur) + Canal propuesto por la línea de talweg; d) Situación Futura (Costanera Sur) + Canal (propuesto en proyecto referencial del MOPC) a pie de talud al sur de la laguna. Para este último caso el canal pasará entre la costanera sur y la PTAR proyectada, desagotando finalmente en las inmediaciones del puente situado en la zona de descarga del arroyo zanja Moroti. En las siguientes figuras se muestran los MDT generados.

⁸ Si bien existen dos fases de refulado, a los efectos de cálculos hidráulicos necesariamente debe ser considerada la situación final.

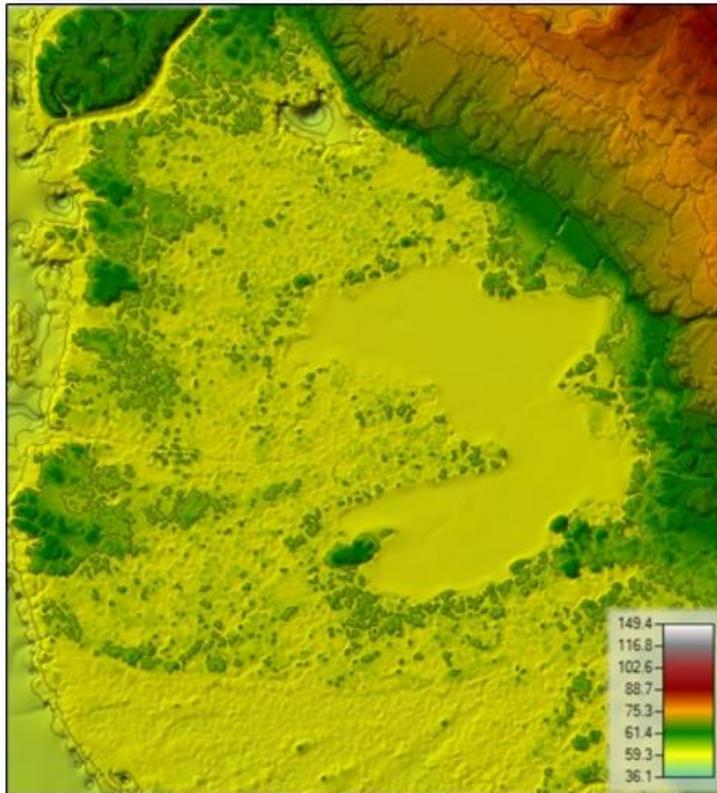


Figura 72 Escenario Actual

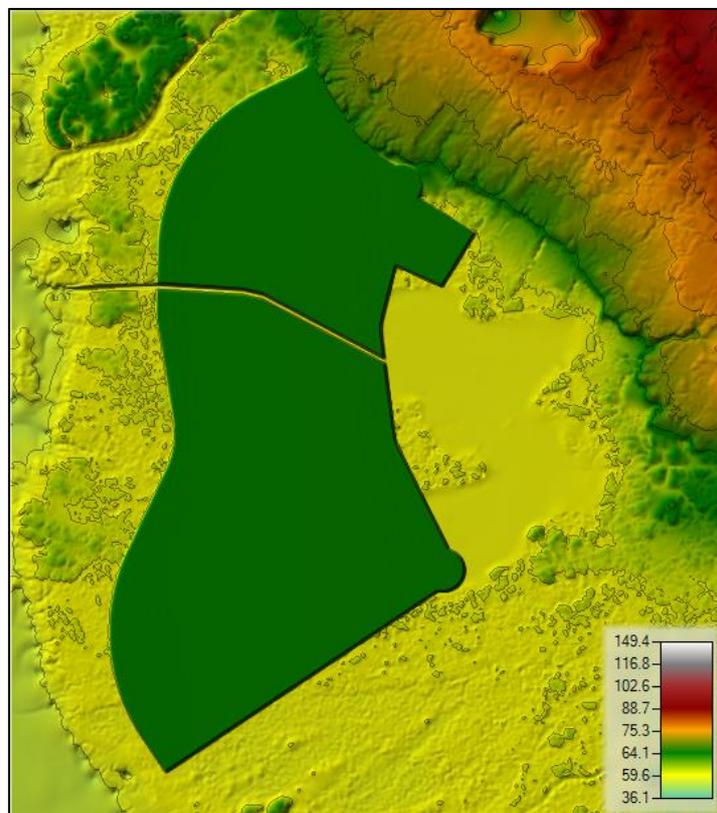


Figura 73 Escenario con Costanera y Canal de Proyecto Referencial

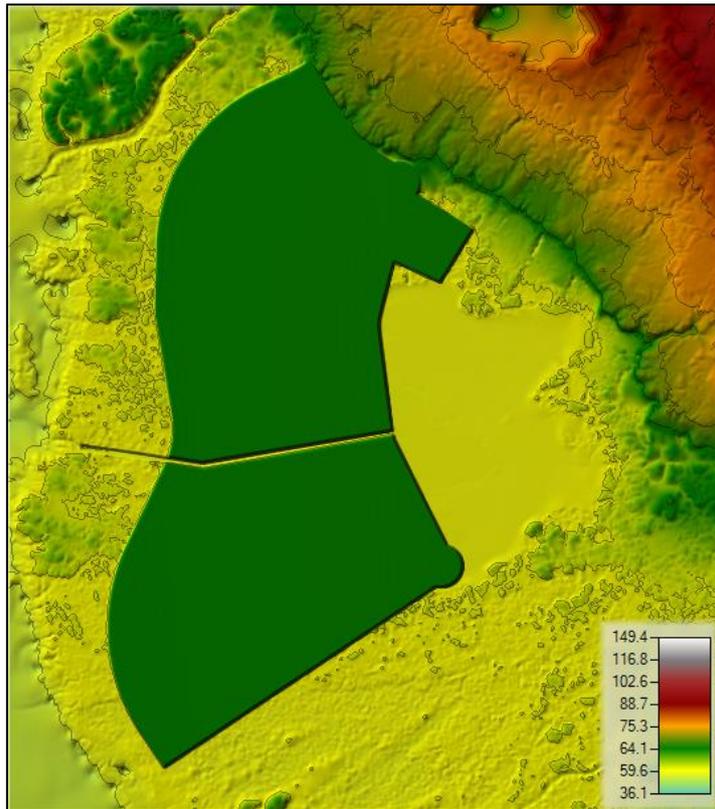


Figura 74 Escenario con Costanera y Canal situado en línea de Talweg

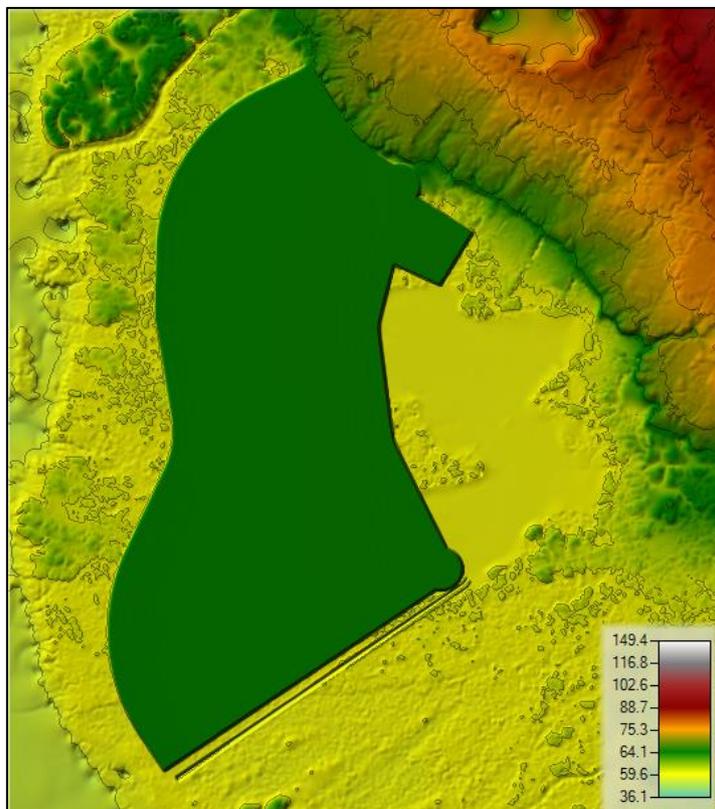


Figura 75 Escenario con Costanera y Canal situado al sur de refulado (a pie de talud entre la costanera y la PTAR)



8.2 Malla de simulación 2D y parámetros adoptados

Para la simulación en 2D es importante definir la extensión de la malla en donde se realizará la modelación. En la siguiente figura se muestran las distintas mallas utilizadas en cada caso. En líneas generales la malla tiene una extensión de 10 x 10 m en cada celda, en donde el software computa una curva cota/volumen para realizar las aproximaciones.

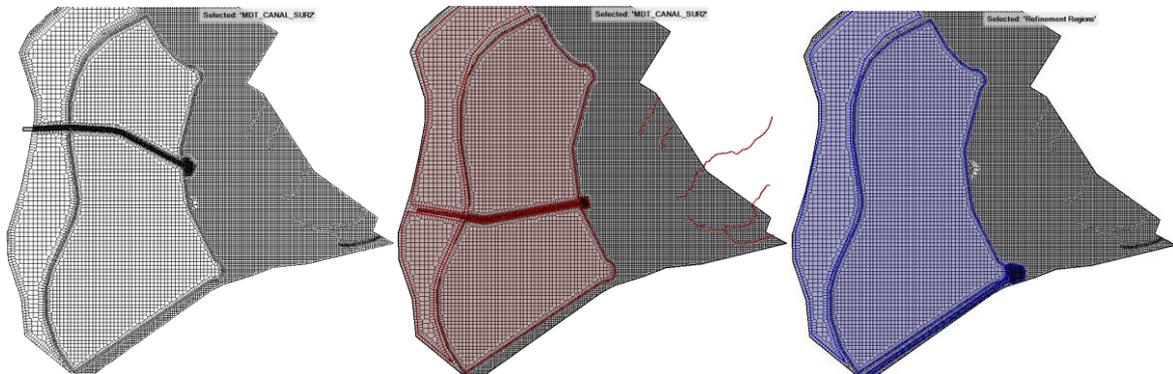


Figura 76 Malla de simulación 2D - Escenario con Costanera y Canal de Proyecto Referencial, con Canal situado en línea de Talweg y Canal situado al sur del refulado.

Adicionalmente, se definen polígonos de rugosidad para cada sector de la superficie en donde se realiza la modelación. En la siguiente figura se observa la distribución del coeficiente de rugosidad de Manning.

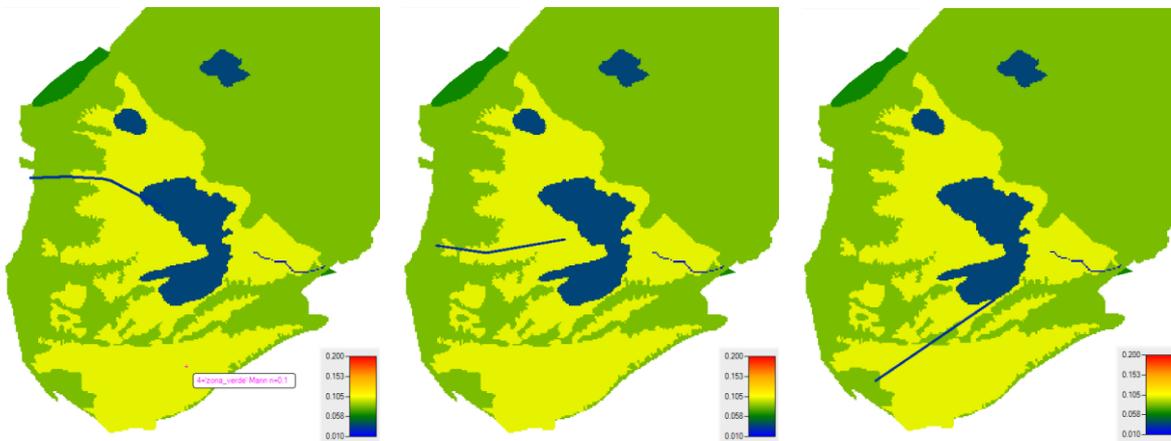


Figura 77 Polígonos de rugosidad de Manning para los distintos escenarios



9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente apartado, se muestran los resultados relevantes obtenidos para el diseño de obras de infraestructura. El escenario considerado más desfavorable es aquel en donde el nivel del Río Paraguay se encuentra por debajo de la cota +58.00 y se da una lluvia asociada a un periodo de recurrencia de 100 años. Como condición inicial de la laguna Yrupe se asume que la misma está a cota +59.00, este nivel también es el que tiene la descarga actual que cruza la calle Urcisino Velazco la cual se considera una cota relativamente estable, incluso en periodos secos.

9.1 Escenario Natural

La simulación del escenario actual muestra que para una tormenta con recurrencia de 100 años y la laguna Yrupe inicialmente en cota +59.00, se eroga aproximadamente un máximo de 3.2 m³/s, asumiendo que el río Paraguay se encuentra por debajo de la cota +58.00.

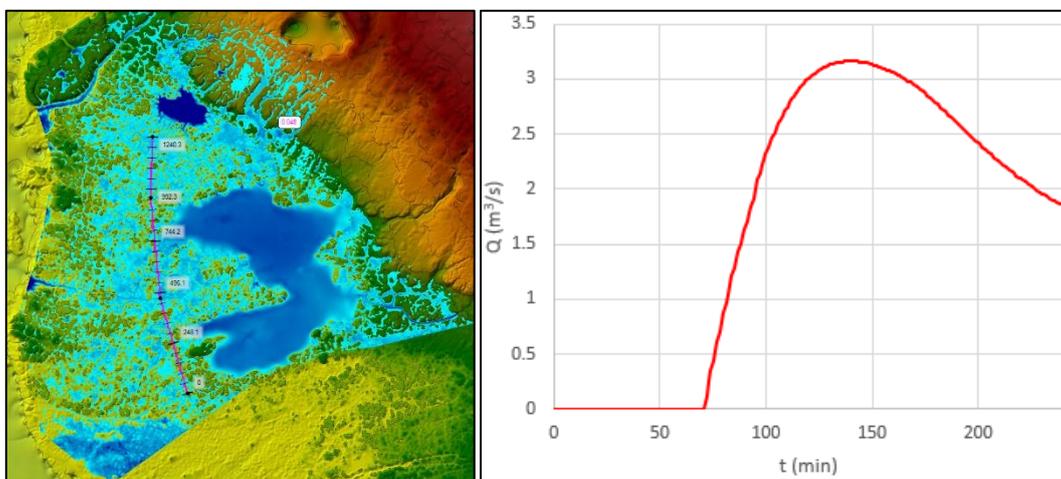


Figura 78 Caudal de salida de la laguna Yrupe para el escenario natural (Izq: transecta donde se evalúa el caudal erogado; Der: hidrograma de salida)

En el hidrograma se observa la gran capacidad de detención que existe en el bañado, pues gran parte del agua queda almacenada y laminada. La porción de agua que logra salir lo hace a través de la línea de talweg existente, que eventualmente cruza la calle Urcisino Velazco (ver polígono rojo de la siguiente figura).

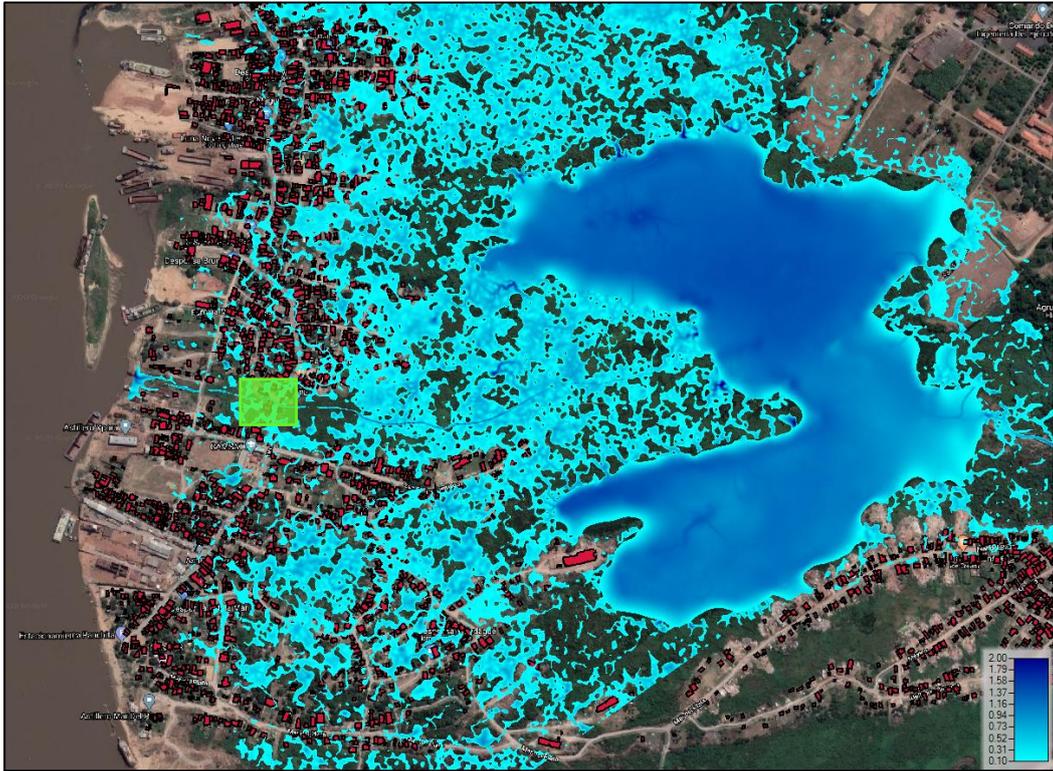


Figura 79 Cruce de línea de Talweg en la calle Urcisino Velazco (polígono verde), viviendas (polígonos rojos). Escenario para Cota + 59.67



Figura 80 Salida de agua en el cruce existente en la calle Urcisino Velazco

Para estas condiciones (Lluvia para TR = 100 años), se obtiene un N.A.M en la laguna de +59.67, tal como se muestra en la siguiente figura.

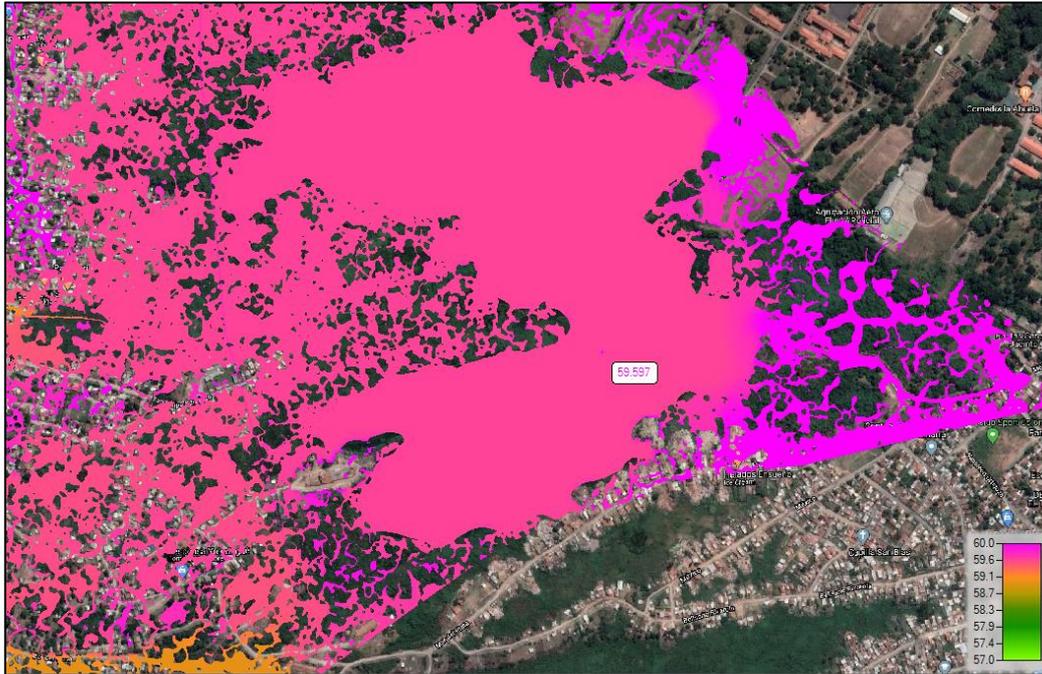


Figura 81 Nivel de Aguas Máxima en la Laguna Yrupe para el Escenario Natural

Por otro lado, además de considerar solamente el nivel de aguas máxima alcanzado, también es importante definir el tiempo de subida y bajada de la laguna ante un evento como el simulado (TR = 100 años). En la siguiente figura se muestra este efecto.

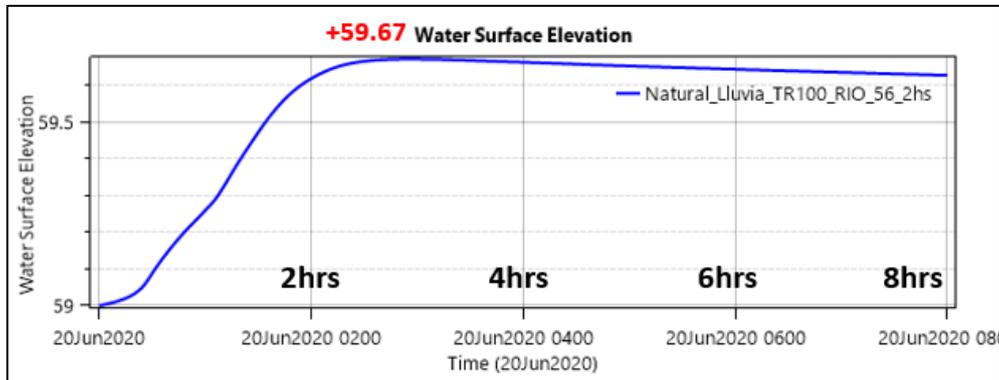


Figura 82 Evolución del Nivel de Agua en la laguna Yrupe para una tormenta asociada a un TR = 100 años (ESCENARIO ACTUAL)

Asumiendo una misma tasa de descenso, y por la gran capacidad de almacenamiento del bañado, luego de alcanzar el pico el nivel seguiría bajando por 3 días (valor aproximado) hasta llegar nuevamente a cota +59.00, esta información también fue señalada por los vecinos de la zona en la visita realizada a campo, en la Figura 83 se observan las viviendas afectadas por la inundación pluvial con TR=100 años, en la situación actual son alrededor de unas 1060 viviendas.

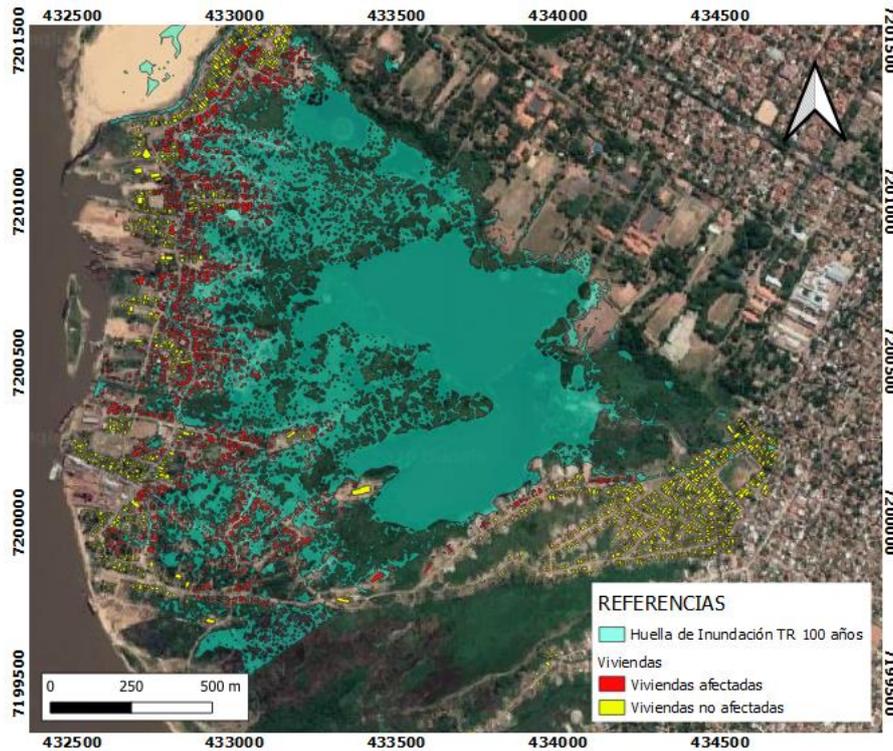


Figura 83 Viviendas afectadas por una lluvia asociada a TR = 100 años y el Río Paraguay bajo

9.2 Escenario con Canalizaciones

La geometría de la canalización propuesta para evacuar el exceso de agua de la laguna Yrupe es la misma para las tres alternativas (**Figura 68**). Para todos los casos, la entrada (desde la Laguna) al canal se sitúa en cota +59.00, admitiendo una inundación máxima a cota +59.80, cota a la cual ya afectará a viviendas en la cercanía de la laguna, para el escenario de una lluvia con recurrencia de 100 años y el río Paraguay bajo (cota inferior a +58.00). Así mismo, para todos los casos se adopta una pendiente de canal de 0.5 %. Los resultados se muestran a continuación:

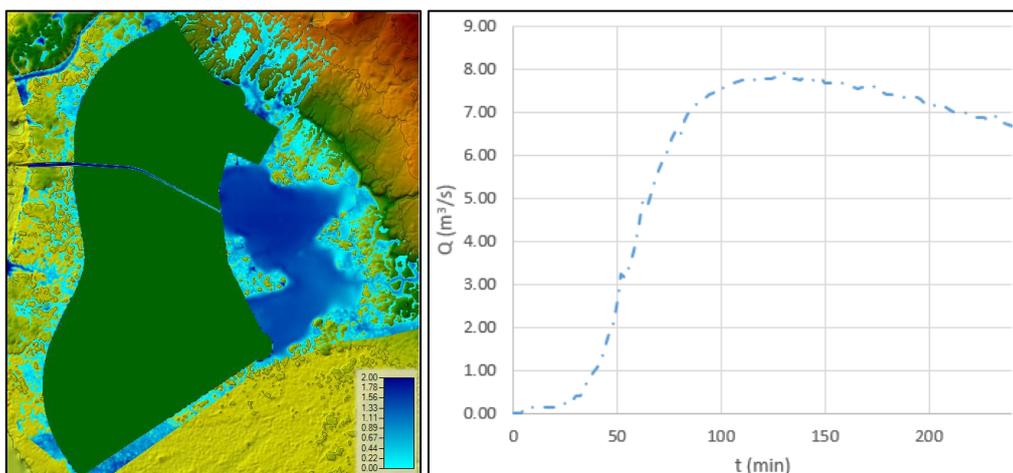


Figura 84 Caudal de salida de la Laguna Yrupe (en la embocadura del vertedero) para el escenario con la Costanera Sur implantada y el canal del proyecto referencial trabajando como vertedero

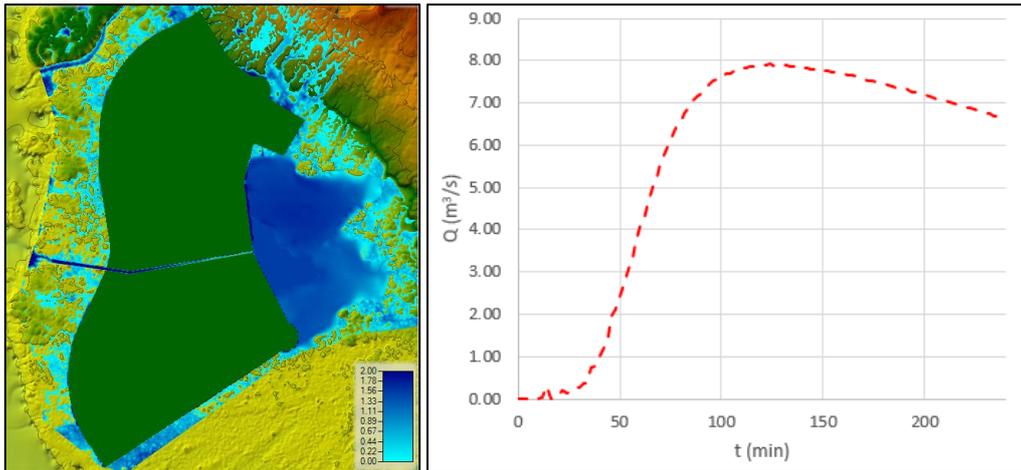


Figura 85 Caudal de salida de la Laguna Yrupe (en la embocadura del vertedero) para el escenario con la Costanera Sur implantada y el canal situado en la línea de talweg trabajando como vertedero

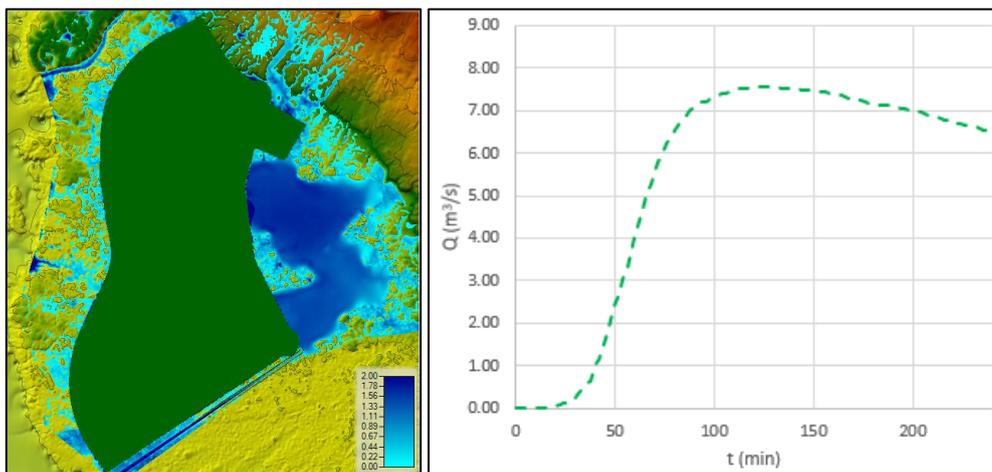


Figura 86 Caudal de salida de la Laguna Yrupe (en la embocadura del vertedero) para el escenario con la Costanera Sur implantada y el canal situado al sur del refulado (entre la costanera y la PTAR)

Tal como se muestra en los resultados anteriores, independientemente de la ubicación del canal, la tasa de erogación del exceso de agua será aproximadamente la misma para un mismo evento de precipitación considerando la geometría del canal que se observa en la **Figura 87**, con un nivel de agua máximo de 59.8 msnm.

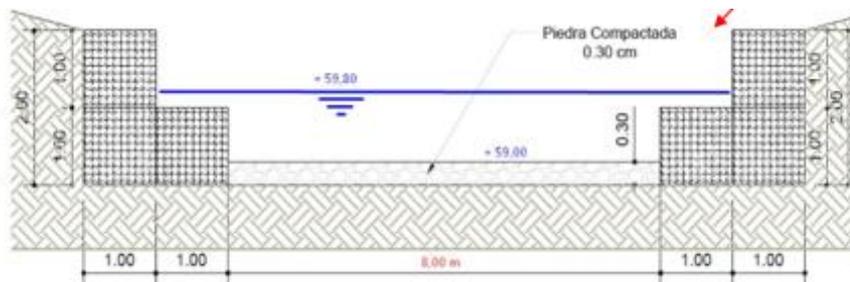


Figura 87 Geometría canal de la laguna Fuente: adaptado del proyecto referencial de costanera sur



Asumiendo una tasa de descenso constante luego de la llegada al pico, el nivel de agua seguiría bajando por 14 horas (valor aproximado) hasta estabilizarse nuevamente en cota +59.00.

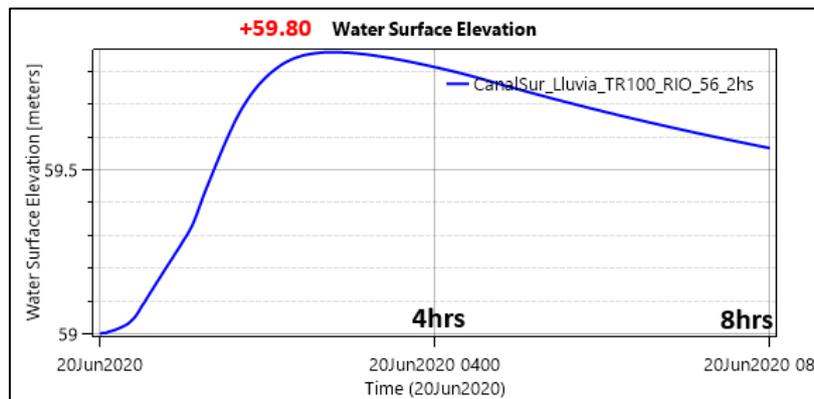


Figura 88 Evolución del Nivel de Aguas en la alternativa propuesta para un TR = 100 años

Por otro lado, con respecto a la superficie inundada en el Barrio Tacumbú (aguas arriba de la costanera sur), para todas las alternativas estudiadas se obtienen resultados semejantes, salvo la alternativa con el canal por la línea de talweg, que necesariamente debe considerar la limpieza del lecho de la laguna para garantizar salida de agua (**Figura 74**), lo cual deriva en un ligero aumento de la superficie inundada.

En términos hidráulicos, todas las alternativas generan una huella de inundación similar (entre 1.00 y 2.00 hectáreas más), tal como se muestra en la siguiente figura.

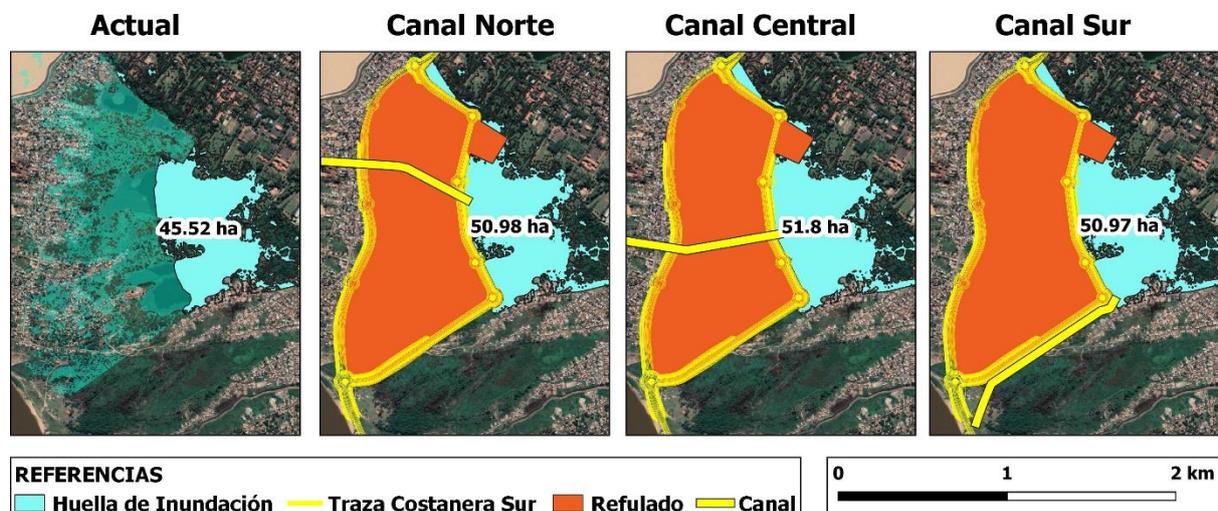


Figura 89 Huellas de inundación para un TR = 100 años (Río Paraguay por debajo de cota +58.00) para un escenario climático actual

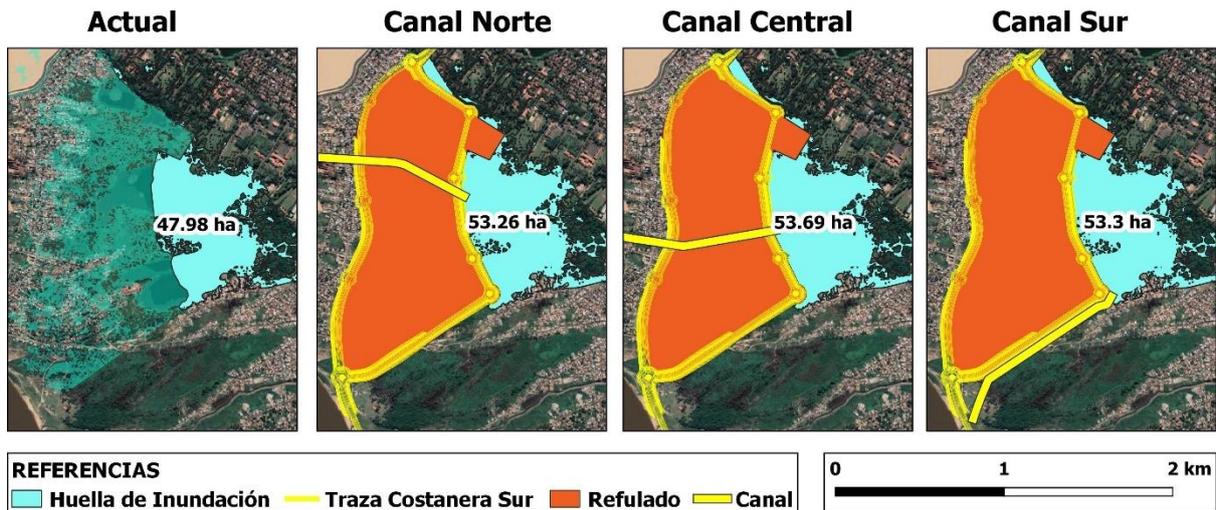


Figura 90 Huellas de inundación para un TR = 100 años (Río Paraguay por debajo de cota +58.00) contemplando un Escenario de Cambio Climático RCP 4.5

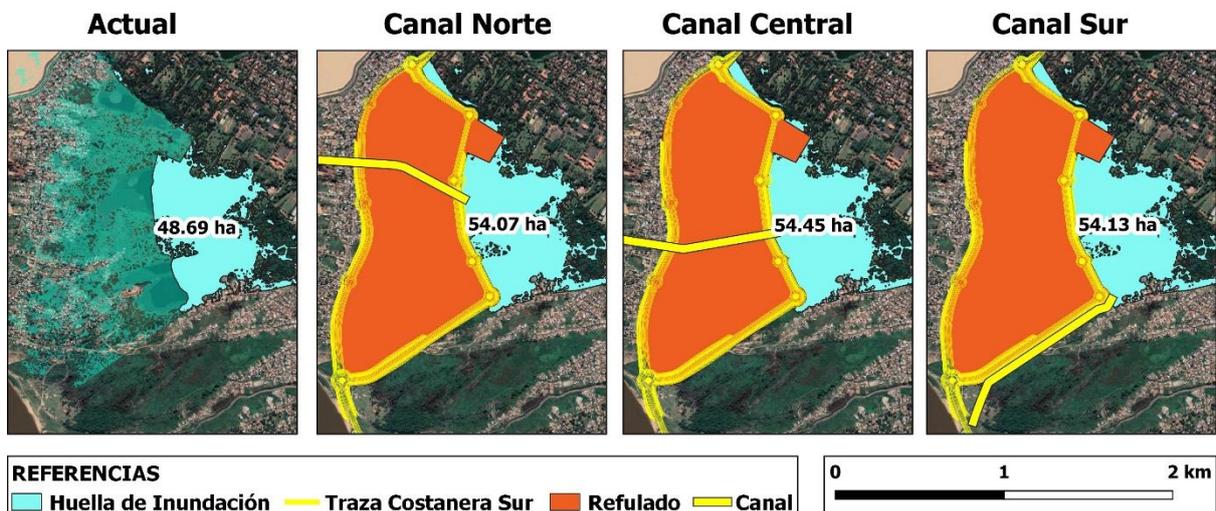


Figura 91 Huellas de inundación para un TR = 100 años (Río Paraguay por debajo de cota +58.00) contemplando un Escenario de Cambio Climático RCP 8.5

Lo que se muestra en las figuras anteriores consisten en las situaciones más desfavorables, adoptadas como condición de diseño. Sin embargo, también se realizaron diversas corridas para TR = 2, 5, 10, 25, 50 años. Adicionalmente, se incorporan estos periodos de recurrencia asociados a los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5. La superficie de inundación para todas estas combinaciones de escenarios se resume en la siguiente tabla.



Tabla 14 Resumen de superficies de inundación para distintos TR's y Escenarios de Cambio Climático

Geometría	TR (años)	SUPERFICIE INUNDADA AGUAS ARRIBA DE COSTANERA (HA)		
		Escenario Climático Actual	RCP 4.5	RCP 8.5
CanalCentral	TR10	48.3	49.2	49.6
CanalNorte	TR10	46.3	47.5	48.0
CanalSur	TR10	46.2	47.5	48.1
Natural	TR10	41.1	42.2	42.8
CanalCentral	TR100	51.8	53.7	54.5
CanalNorte	TR100	51.0	53.3	54.1
CanalSur	TR100	51.0	53.3	54.1
Natural	TR100	45.5	48.0	48.7
CanalCentral	TR150	52.5	54.6	55.3
CanalNorte	TR150	51.9	54.3	55.2
CanalSur	TR150	51.9	54.5	55.2
Natural	TR150	46.5	49.0	49.7
CanalCentral	TR2	46.4	46.6	46.7
CanalNorte	TR2	43.9	44.2	44.3
CanalSur	TR2	44.1	44.4	44.5
Natural	TR2	39.3	39.5	39.6
CanalCentral	TR25	49.6	50.8	51.3
CanalNorte	TR25	48.0	49.8	50.5
CanalSur	TR25	48.0	49.8	50.5
Natural	TR25	42.6	44.4	45.0
CanalCentral	TR5	47.5	48.1	48.5
CanalNorte	TR5	45.2	46.0	46.4
CanalSur	TR5	45.2	46.0	46.5
Natural	TR5	40.2	40.9	41.3
CanalCentral	TR50	50.6	52.2	52.8
CanalNorte	TR50	49.4	51.6	52.3
CanalSur	TR50	49.5	51.7	52.4
Natural	TR50	43.9	46.3	46.9

Adicionalmente, se realizó un análisis de inundación del Río Paraguay y la cantidad de casas que se ven afectadas en el Barrio Tacumbú. La determinación de los niveles de agua del río para distintos periodos de recurrencia se mostró en el capítulo 5 del presente informe (**Tabla 11**). Para el presente análisis, se evaluaron las casas afectadas dentro de un universo considerado parte del Barrio Tacumbú (polígono verde de las siguientes figuras). En dicho universo existen un total aproximado de 3,597 viviendas.

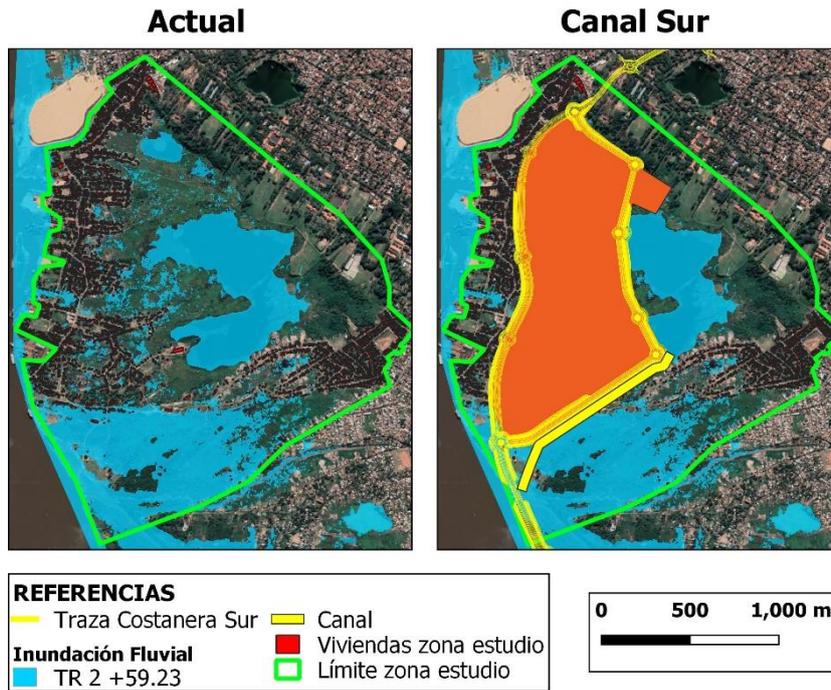


Figura 92 Situación del Barrio Tacumbú para una recurrencia de 2 años del Río Paraguay

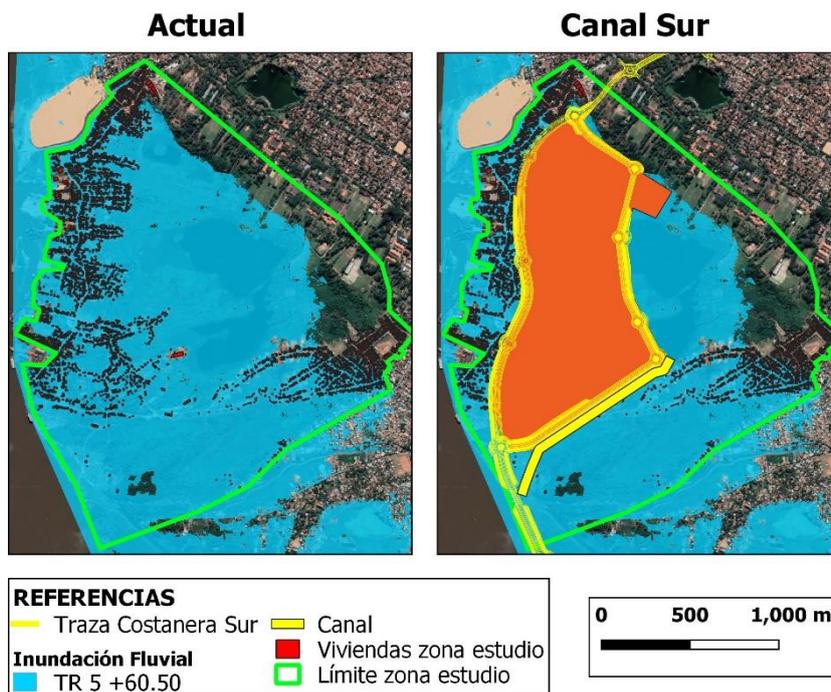


Figura 93 Situación del Barrio Tacumbú para una recurrencia de 5 años del Río Paraguay

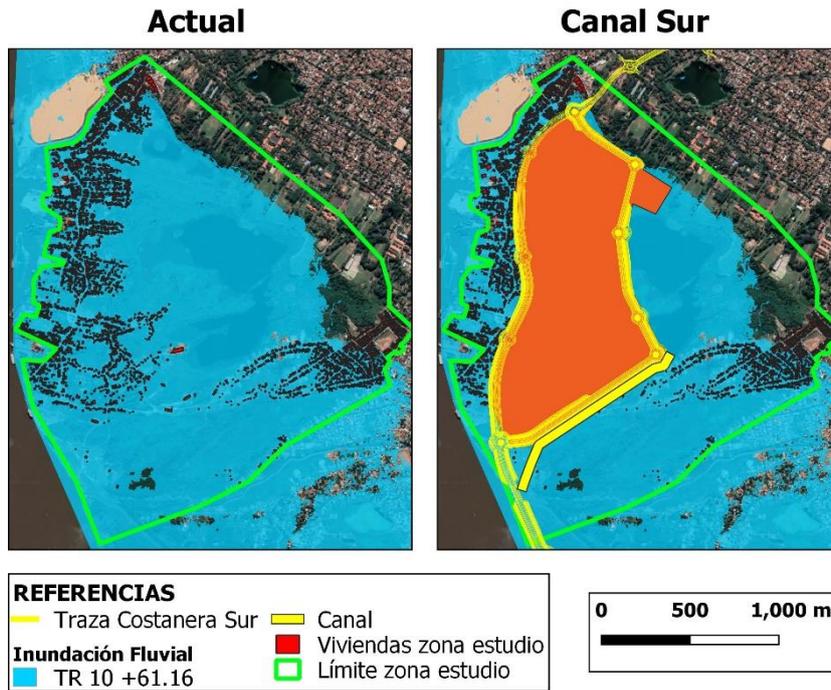


Figura 94 Situación del Barrio Tacumbú para una recurrencia de 10 años del Río Paraguay

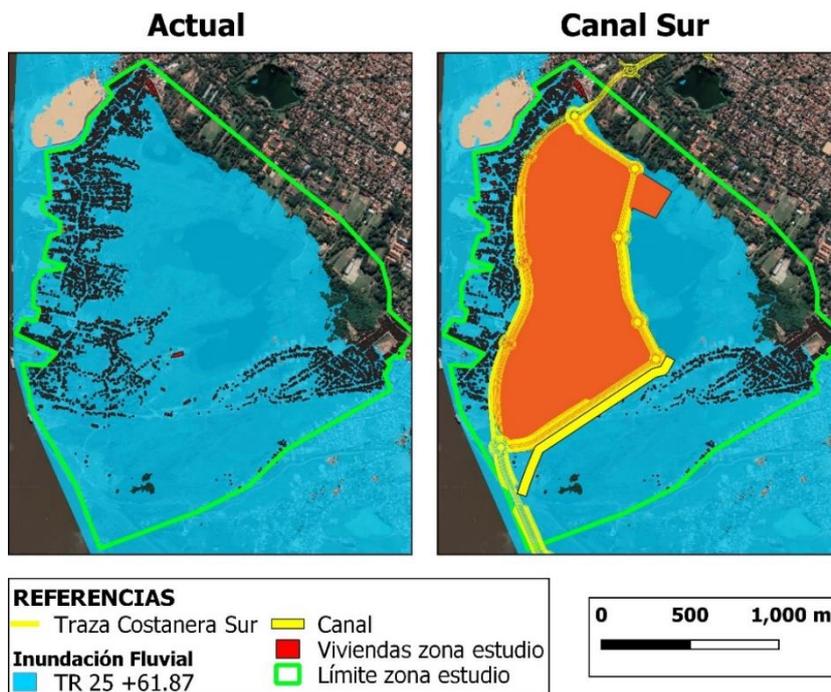


Figura 95 Situación del Barrio Tacumbú para una recurrencia de 25 años del Río Paraguay

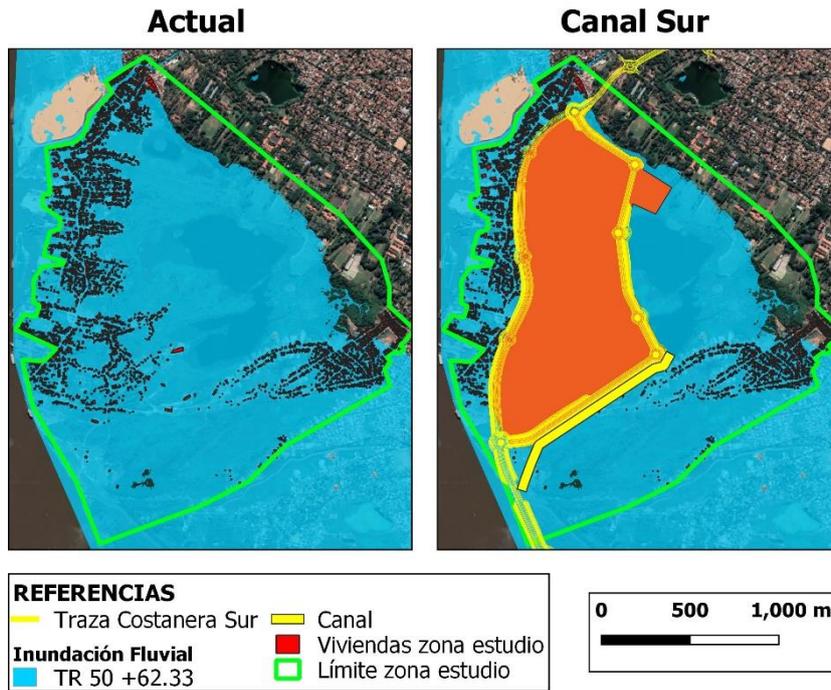


Figura 96 Situación del Barrio Tacumbú para una recurrencia de 50 años del Río Paraguay

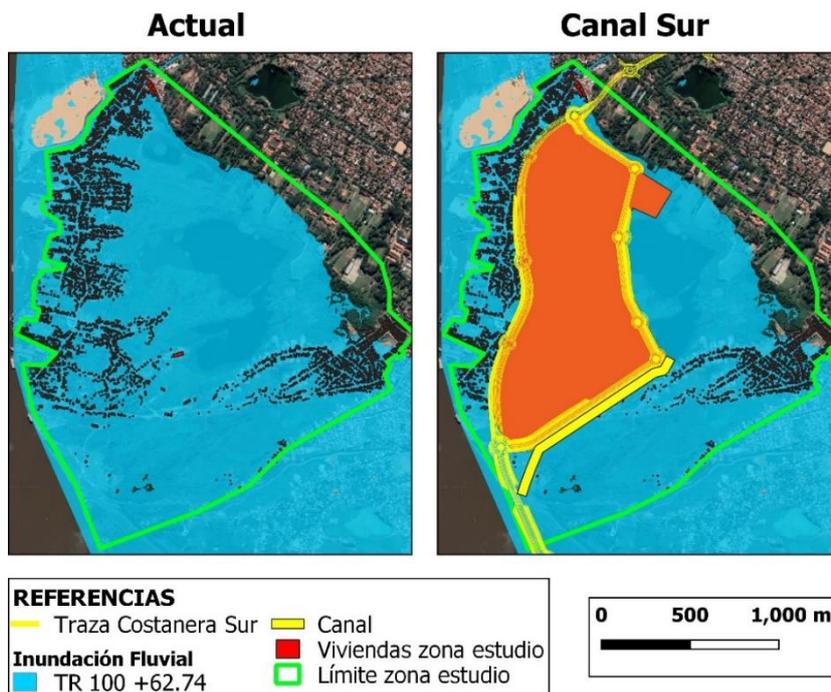


Figura 97 Situación del Barrio Tacumbú para una recurrencia de 100 años del Río Paraguay

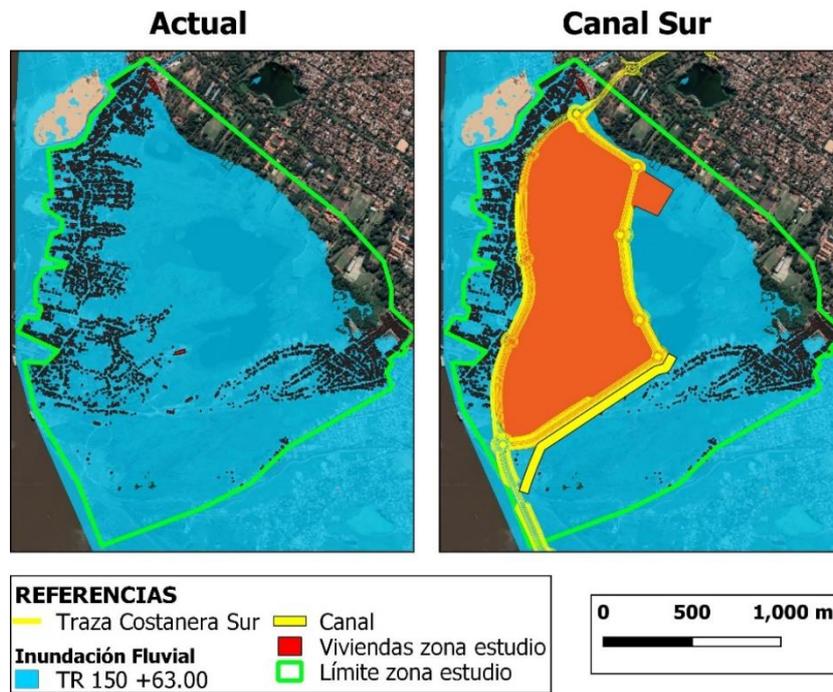


Figura 98 Situación del Barrio Tacumbú para una recurrencia de 150 años del Río Paraguay

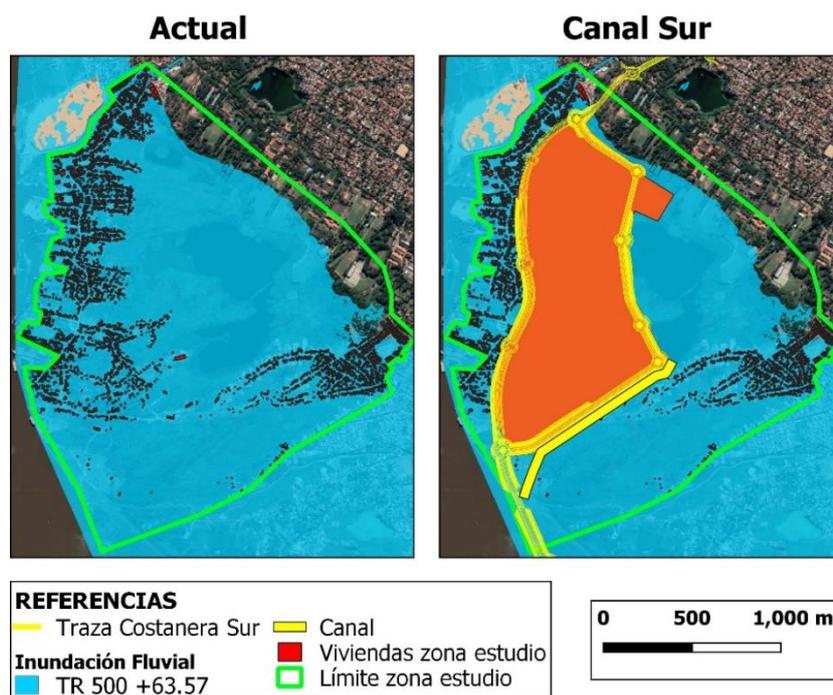


Figura 99 Situación del Barrio Tacumbú para una recurrencia de 500 años del Río Paraguay

Los resultados del análisis se resumen en la siguiente tabla.



Tabla 15 Resumen de cantidad de viviendas afectadas por inundación

Tiempo de Retorno (Años)	Cota del Río PY	Cantidad de Viviendas Afectadas por Inundación	% de Viviendas Inundadas
2	59.23	187	5%
5	60.50	2880	80%
10	61.16	3253	90%
25	61.87	3369	94%
50	62.33	3434	95%
100	62.74	3460	96%
150	63.00	3486	97%
500	63.57	3524	98%

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a las alternativas analizadas, se observa que la traza de canal planteado en el proyecto referencial de costanera ubicada al norte no es la óptima desde el punto de vista social/económico por el hecho de que atraviesa sitios vulnerables de viviendas y no desagota por la línea de talweg natural, es decir, requerirá mayor excavación. Por otro lado, si bien la línea de talweg es la traza preferencial de flujo actualmente, en un futuro, igualmente se requerirá un canal al sur (entre la costanera y la PTAR) por las posibilidades de extensión del refulado. Es importante mencionar que el área de estudio no es precisamente natural, puesto que existen asentamientos ilegales que fueron ganando terreno y ocupando áreas conocidamente inundables. En las siguientes figuras se muestra la afectación de viviendas con las alternativas de canal norte y central, no se tiene afectación de viviendas con el canal sur propuesto.

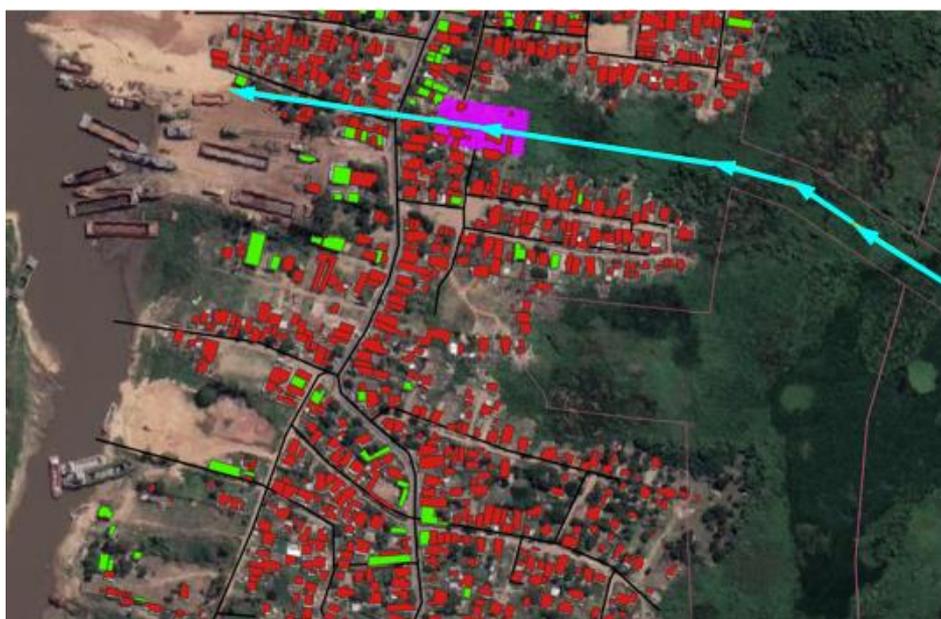


Figura 100 Traza de canal norte (celeste) vs. Viviendas existentes



Figura 101 Traza de canal central (celeste) vs. Viviendas existentes



Figura 102 Traza de canal sur (no hay viviendas)

Por lo expuesto anteriormente, en el marco de la presente consultoría se recomienda realizar el desagote por rebose al sur del refulado, a través de un vertedero con cota de solera +59.00. Se recomienda aumentar el ancho del canal propuesto en el marco del proyecto referencial de la costanera sur adoptando el siguiente diseño.

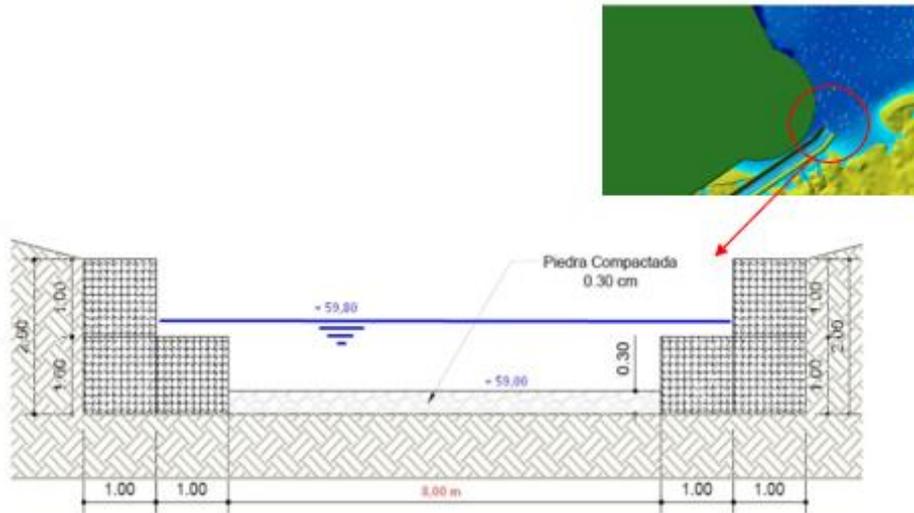


Figura 103 Canal de desagote de laguna funcionando como vertedero. Fuente: adaptado del proyecto referencial de costanera sur

Adicionalmente, se recomienda tener en cuenta para la elaboración del Proyecto Ejecutivo de la costanera sur lo siguiente:

- Mantener una pendiente longitudinal de entre 0.3 a 0.5 % en los canales de desagote de la Laguna Yrupe.
- **Evaluar la necesidad de incorporación de un canal de aguas bajas, con el objetivo de garantizar velocidades de escurrimiento más altas durante descargas poco significativas** (para evitar disposición de sedimentos).



Figura 104 Ejemplo de canal de aguas bajas en el Arroyo Jaén

- Evaluar alternativas de materiales a ser utilizados para la construcción del canal (lecho y márgenes).
- Contemplar en la fase de diseño ejecutivo la embocadura de ingreso al canal de desagote.



- Adicionalmente, se recomienda mantener un margen permitido de urbanización, con el objetivo de evitar asentamientos ilegales en la cercanía del humedal de la Laguna Yrupe. El criterio de ubicación preliminar del cordón obedece a los máximos niveles de inundación, tanto pluvial como fluvial, tal como se muestra en la siguiente figura. El cordón no debería constituirse en una barrera física, sino más bien en un sitio de esparcimiento, como por ejemplo un parque lineal o bicisenda. Se sugiere un cordón de protección a la Laguna Yrupe y que la zona (30 ha) comprendida entre la Laguna y dicho cordón se constituya en un área protegida, evitándose así cualquier tipo de urbanización en las zonas aledañas.

Para definir el cordón de protección de la Laguna Yrupe se utilizaron los siguientes criterios:

- a. La Cota 63 del Rio Paraguay (línea azul).
- b. Predios militares con zonas verdes (línea verde).
- c. Viviendas ubicadas al sur de la Laguna Yrupe (línea rosada).

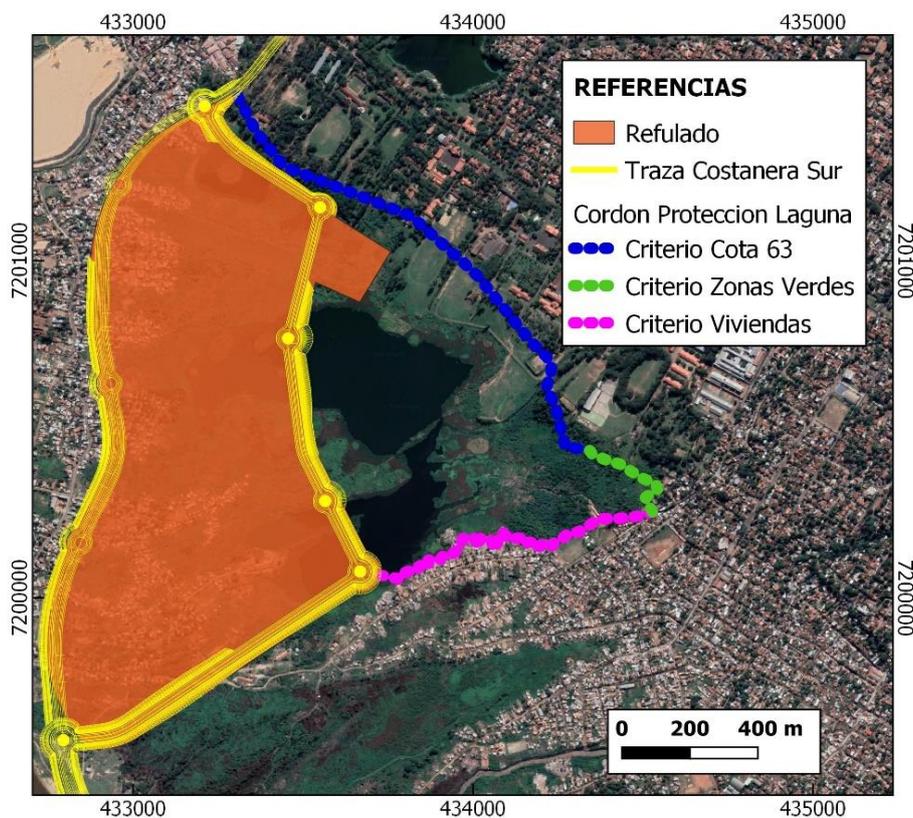


Figura 105 Criterios para la definición del Cordón de Protección



ANEXOS



a. Monografía del Mojón Base

GPS STATION PHOTOS OF STATION MARKERS	
PROJECT: PARAGUAY MAPPING PROJECT	LOCATION: PARAGUAY
STATION ID: GPS PA-1	
STAMPING ON STATION MARKER GPS PA-1 1991	
RM # 1	RM # 2
LAT. 25° 16' 43.3935 S. LONG. 57° 36' 49.0742 W.	LATTUD 25° 16' 43,476" S LONGITUD 057° 36' 50,054 W COTA ELIPSOIDE 93,83 M COTA GEOIDE 76,48 M COTA NMM 78,651 M
COTA: 97.73	
Stamping on reference mark GPS PA-1 RM-1 1992 (100050)	Stamping on reference mark GPS PA-1 RM-2 1992 (100100)



b. Características del Equipo ADCP Utilizado

Especificación	S5:
Rango de perfiles - Distancia	0,06 a 5 metros
Rango de perfiles ¹ - Velocity	± 20 m / s
Velocidad ¹ - Precisión	± 0,25% de la velocidad medida
	± 0,2 cm / s
Velocidad - Resolución	0.001 m / s
Número de células	Hasta 128
Tamaño de la célula	0,02 a 0,5 M
Configuración del transductor	Cinco (5) Transductores
	4-haz de 3,0 MHz
	Janus 25 ° de ángulo inclinado
	Ecosonda haz vertical de 1,0 MHz
Rango de profundidad	0,20 a 15 m
Profundidad - Precisión	1%
Profundidad - Resolución	0,001 m
Rango de medición de descarga - Bottom-Track	0,3 a 5 metros
Rango de medición de descarga - RTK GPS	0,3 a 15 m
Medición de descarga - Cálculos	Interno



c. Hoja de Calibración del Equipo ADCP



9940 Summers Ridge Road
San Diego, CA 92121
Tel: (858) 546-8327
support@sontek.com

Certificate of Calibration

TEST REPORT

Serial Number	1873
System Type	S5
System Orientation	Down
Compass Type	Sontek
Compass Offset (degrees)	N/A
Communications Output	RS232
Recorder Size (GB)	8
Firmware Version	1.02
Date Tested	1/28/2011

POWER TEST

Command Mode (W):	0.15	Range : 0.00 – 0.3W
Sleep Mode (W):	N/A	Range : N/A
Ping Mode - 18V (W):	1.97	Range : 1.50 – 3.50 W
Power Check		PASS

NOISE TEST

Beam 1 – 3.0 MHz (counts)	102
Beam 2 – 3.0 MHz (counts)	102
Beam 3 – 3.0 MHz (counts)	102
Beam 4 – 3.0 MHz (counts)	102
Beam Vertical – 1.0MHz (counts)	97
Noise Test	PASS

VERIFICATION

Velocity Check	PASS
Transmit Output	PASS
Sensitivity	PASS
Temperature Sensor	PASS
Compass Heading Check	PASS
Compass Level Check	PASS
Burn-in (24 hrs)	PASS
Load Default Parameters	DONE

OPTIONS

Bottom Track	Installed
SmartPulse HD™	Enabled
Stationary	Disabled

Verified by: ale

This report was generated on 3/4/2011.



d. Curvas IDF

Curvas IDF de Asunción – ACTUAL

D (min)	TR 2	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100	TR 150
5	120.00	142.86	163.01	194.08	221.45	252.69	272.96
10	106.04	126.25	144.06	171.51	195.70	223.30	241.22
15	95.16	113.29	129.27	153.90	175.61	200.38	216.45
30	73.21	87.16	99.45	118.40	135.10	154.16	166.53
60	50.80	60.48	69.02	82.17	93.76	106.98	115.56
120	32.21	38.35	43.76	52.10	59.45	67.83	73.28
180	23.91	28.46	32.48	38.67	44.12	50.34	54.38
360	13.84	16.48	18.81	22.39	25.55	29.15	31.49
720	7.91	10.02	11.41	13.17	14.47	15.77	16.52
1440	4.65	5.89	6.71	7.75	8.51	9.28	9.72

Curvas IDF de Asunción – RCP 4.5

D (min)	TR 2	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100	TR 150
5	124.76	158.40	186.24	228.26	264.95	306.67	333.71
10	110.25	139.98	164.58	201.72	234.14	271.01	294.90
15	98.93	125.61	147.68	181.01	210.10	243.18	264.63
30	76.11	96.64	113.62	139.26	161.64	187.09	203.59
60	52.82	67.06	78.85	96.64	112.17	129.83	141.28
120	33.49	42.52	50.00	61.28	71.13	82.33	89.59
180	24.86	31.56	37.10	45.48	52.79	61.10	66.48
360	14.39	18.27	21.49	26.33	30.57	35.38	38.50
720	8.23	11.10	13.03	15.49	17.32	19.14	20.20
1440	4.84	6.53	7.67	9.11	10.19	11.26	11.88

Curvas IDF de Asunción – RCP 8.5

D (min)	TR 2	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100	TR 150
5	126.98	164.61	195.32	241.45	281.63	327.27	356.85
10	112.21	145.47	172.61	213.37	248.88	289.21	315.35
15	100.69	130.54	154.89	191.46	223.33	259.52	282.97
30	77.46	100.43	119.16	147.30	171.81	199.66	217.70
60	53.76	69.69	82.69	102.22	119.23	138.56	151.08
120	34.09	44.19	52.43	64.82	75.60	87.86	95.80
180	25.30	32.80	38.91	48.10	56.11	65.20	71.09
360	14.65	18.99	22.53	27.85	32.49	37.76	41.17
720	8.37	11.54	13.67	16.38	18.41	20.42	21.60
1440	4.92	6.79	8.04	9.64	10.83	12.01	12.71



e. Mapas de inundación para distintos escenarios

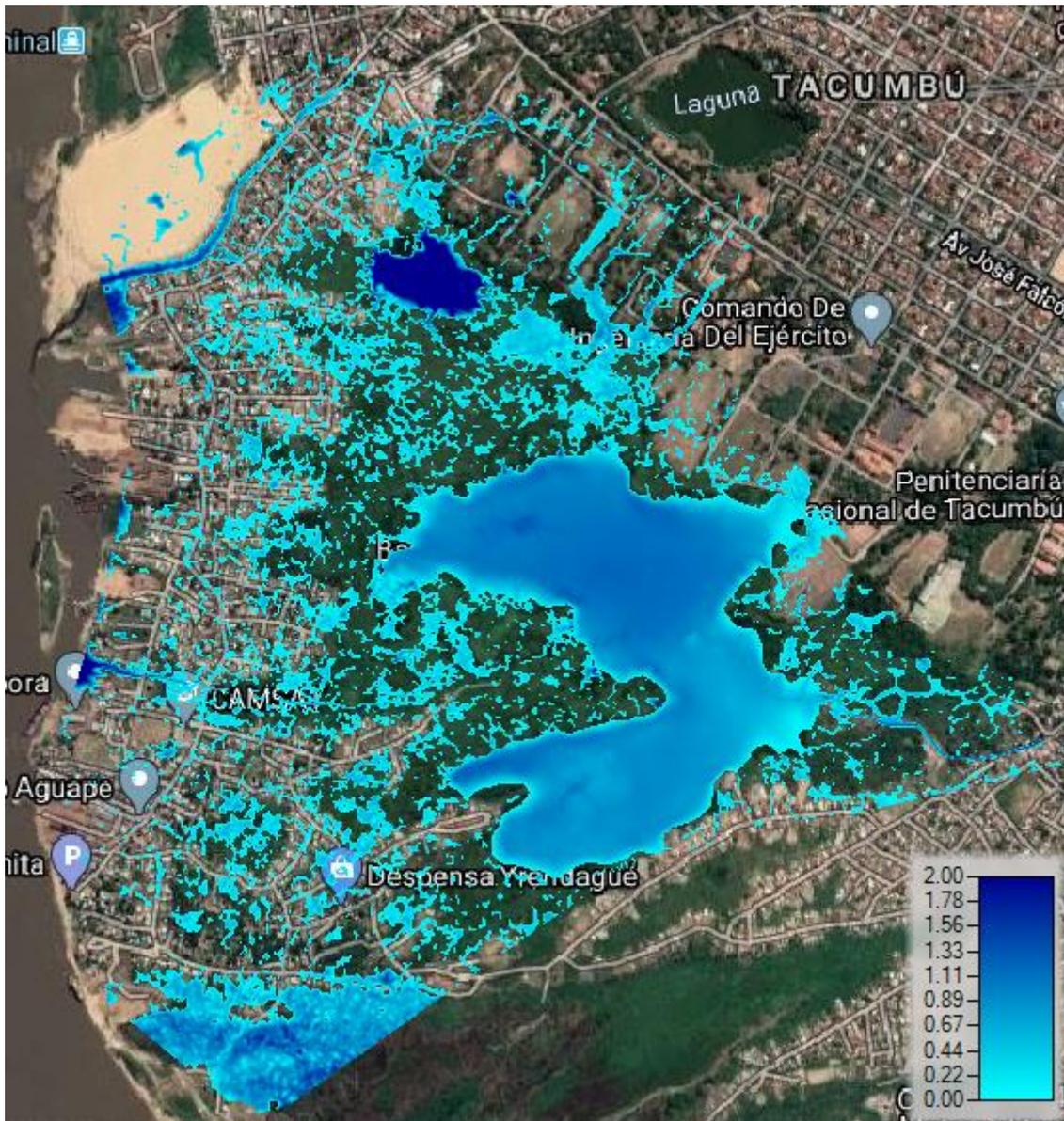


Figura 107 EscenarioActual_Natural_TR2

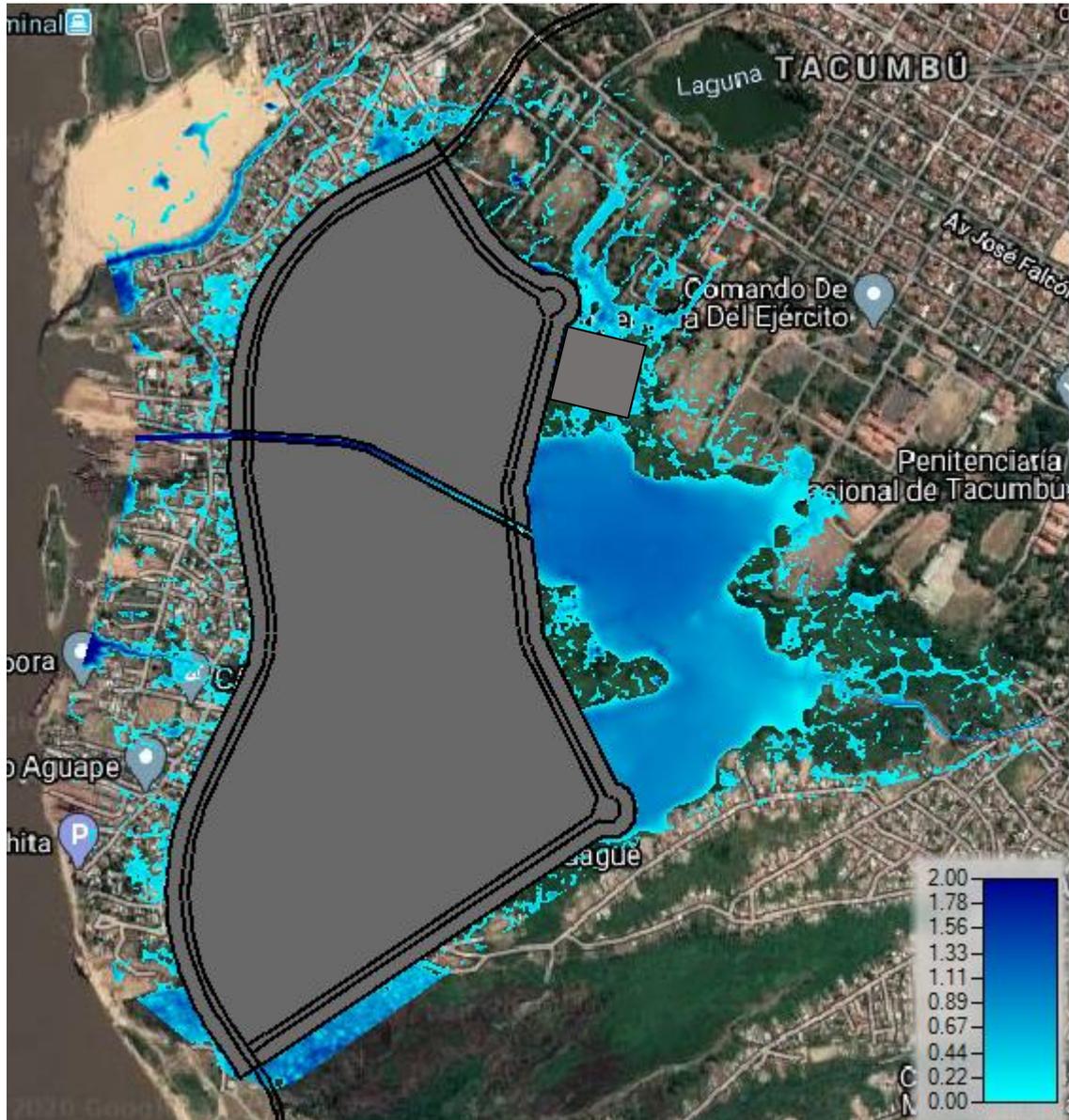


Figura 108 EscenarioActual_CanalNorte_TR2

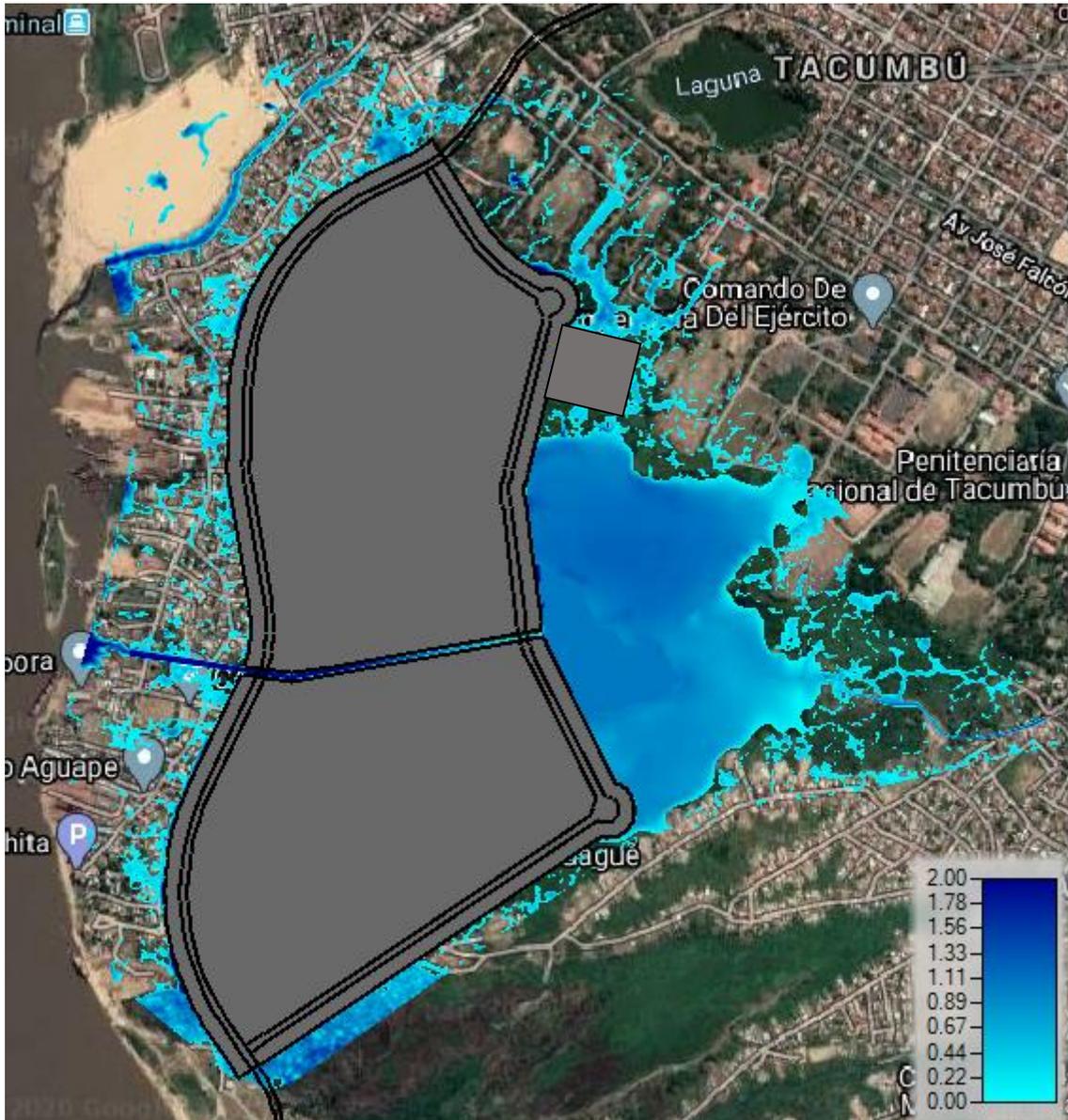


Figura 109 EscenarioActual_CanalCentral_TR2

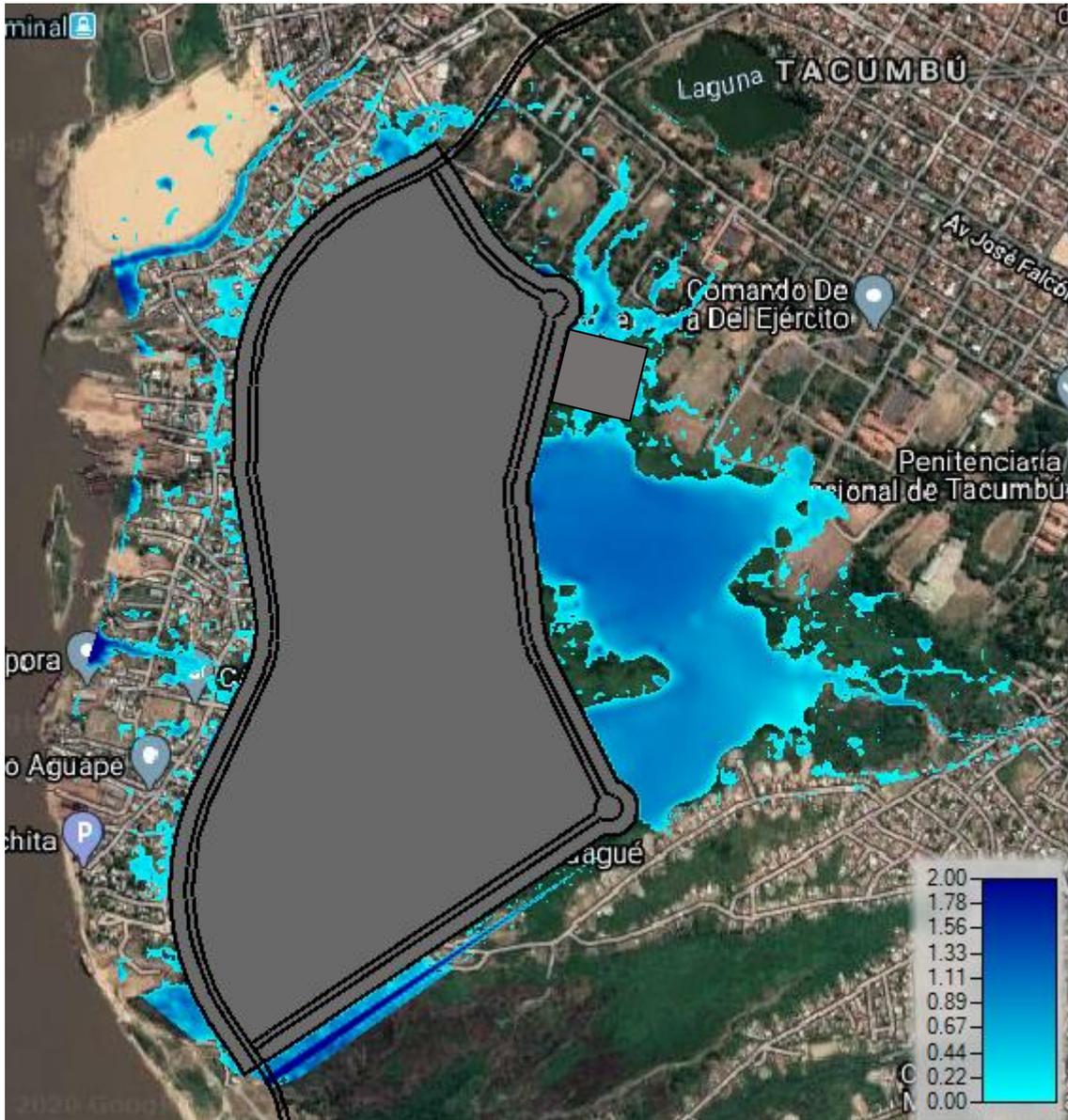


Figura 110 EscenarioActual_CanalSur_TR2

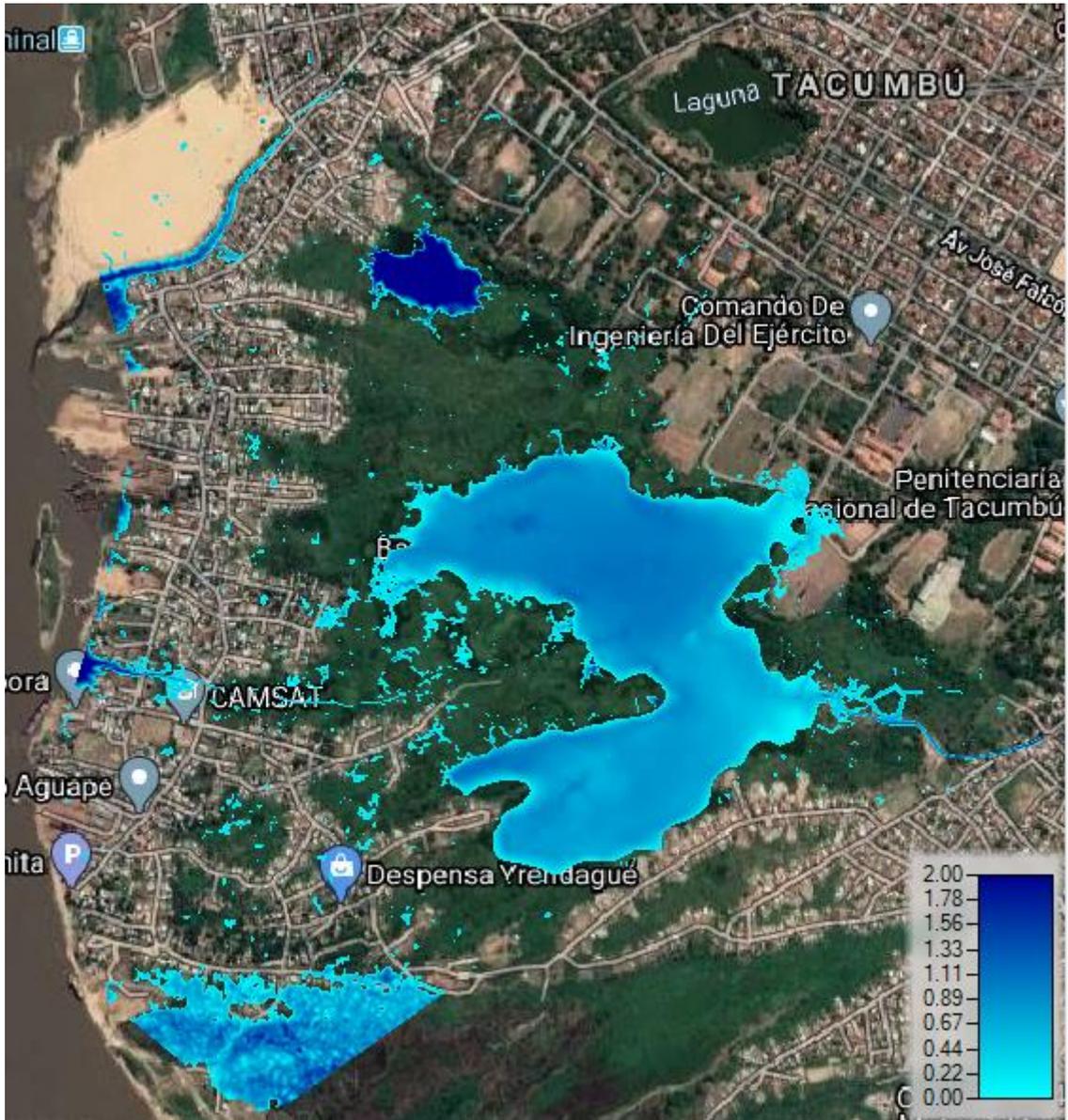


Figura 111 EscenarioRCP4.5_Natural_TR2

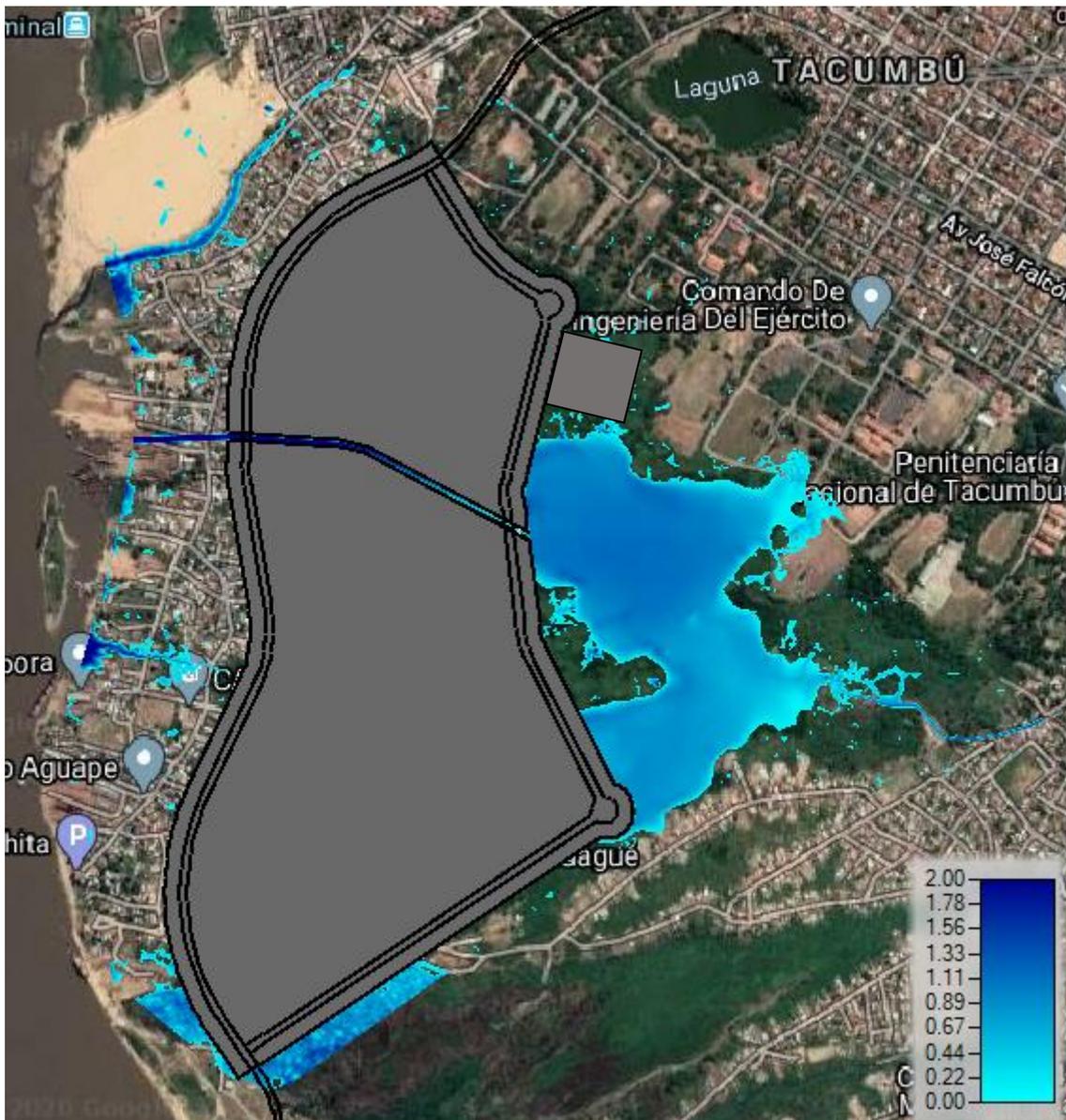


Figura 112 EscenarioRCP4.5_CanalNorte_TR2



Figura 113 EscenarioRCP4.5_CanalCentral_TR2

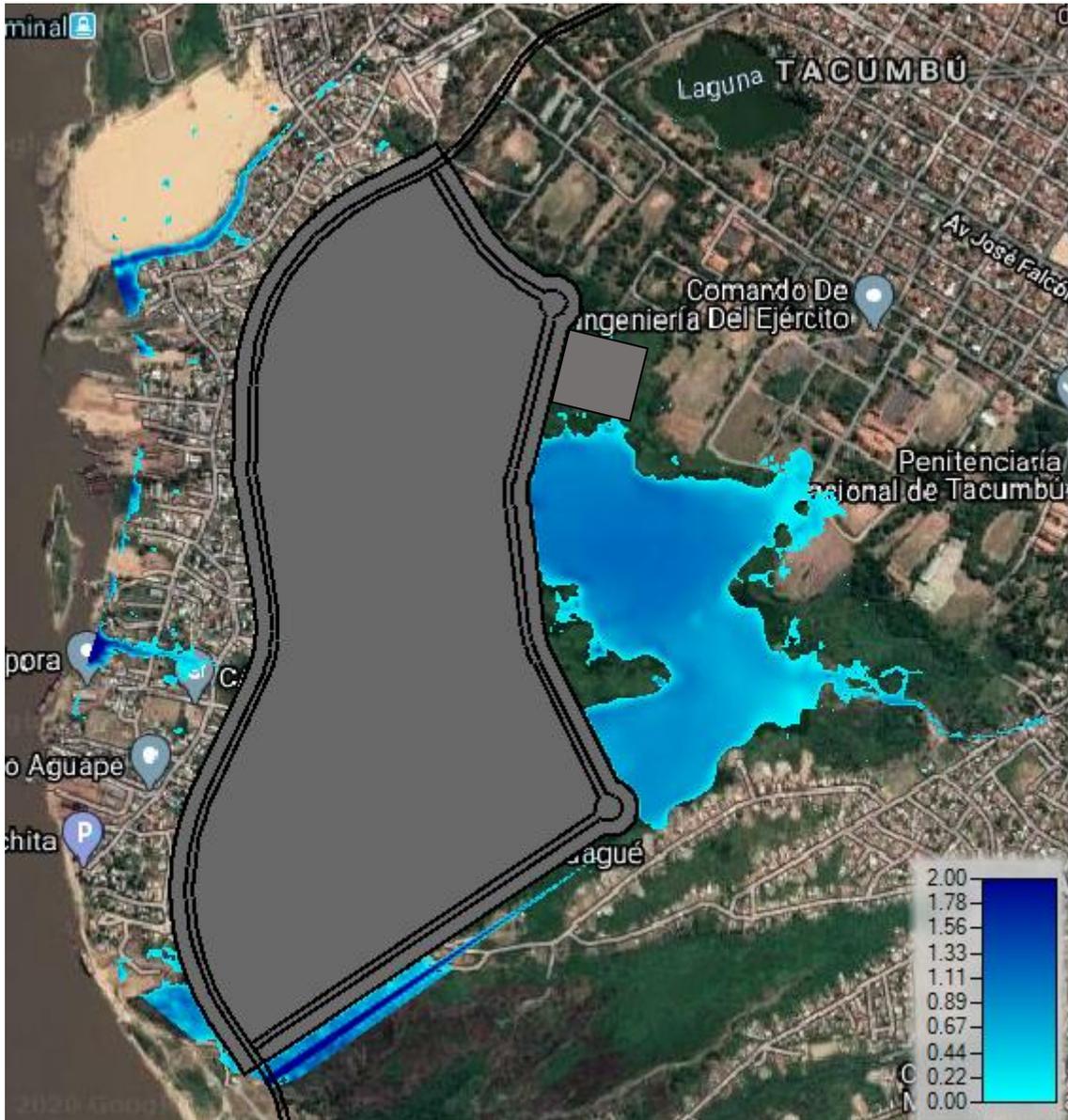


Figura 114 EscenarioRCP4.5_CanalSur_TR2

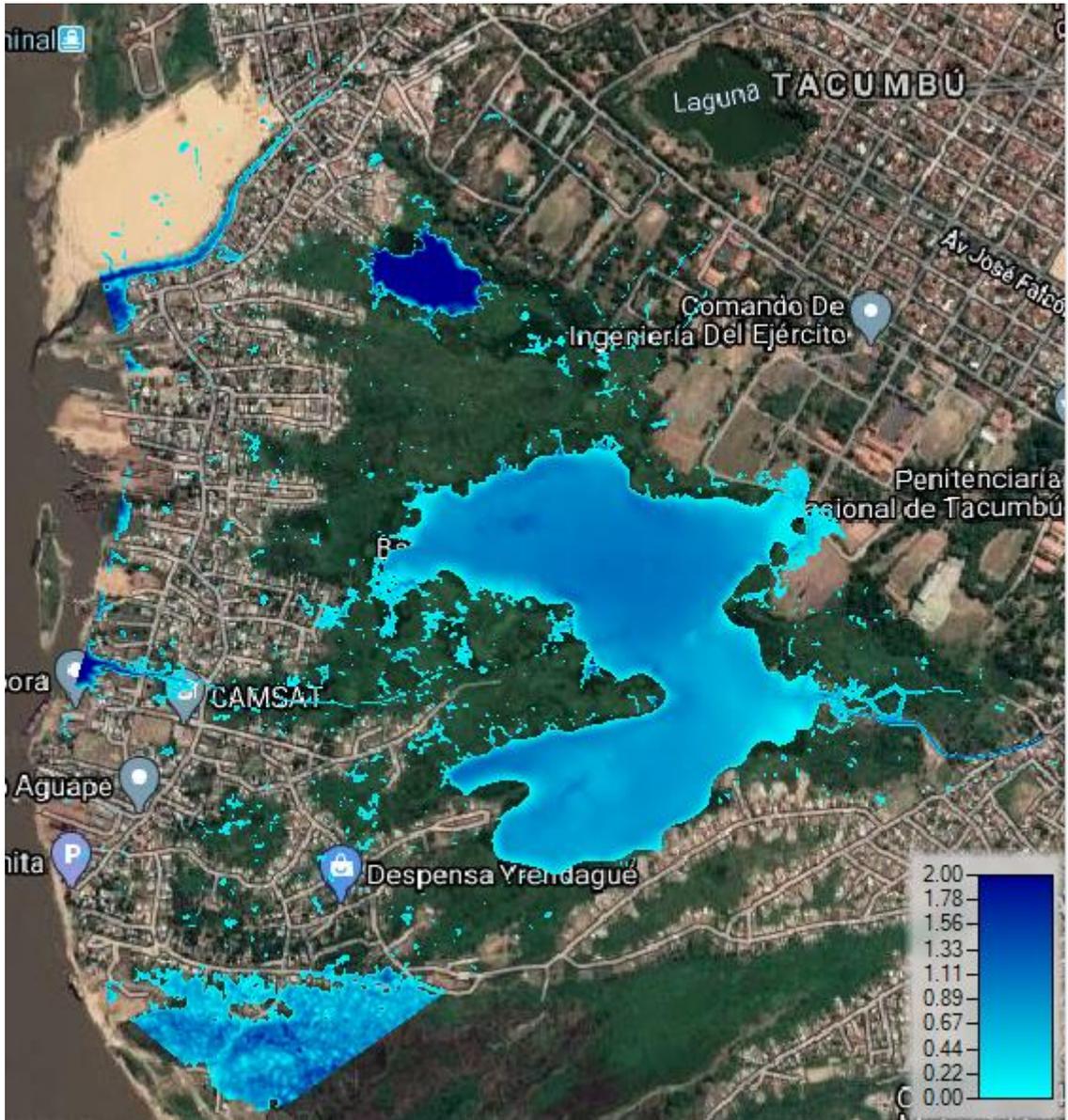


Figura 115 EscenarioRCP8.5_Natural_TR2

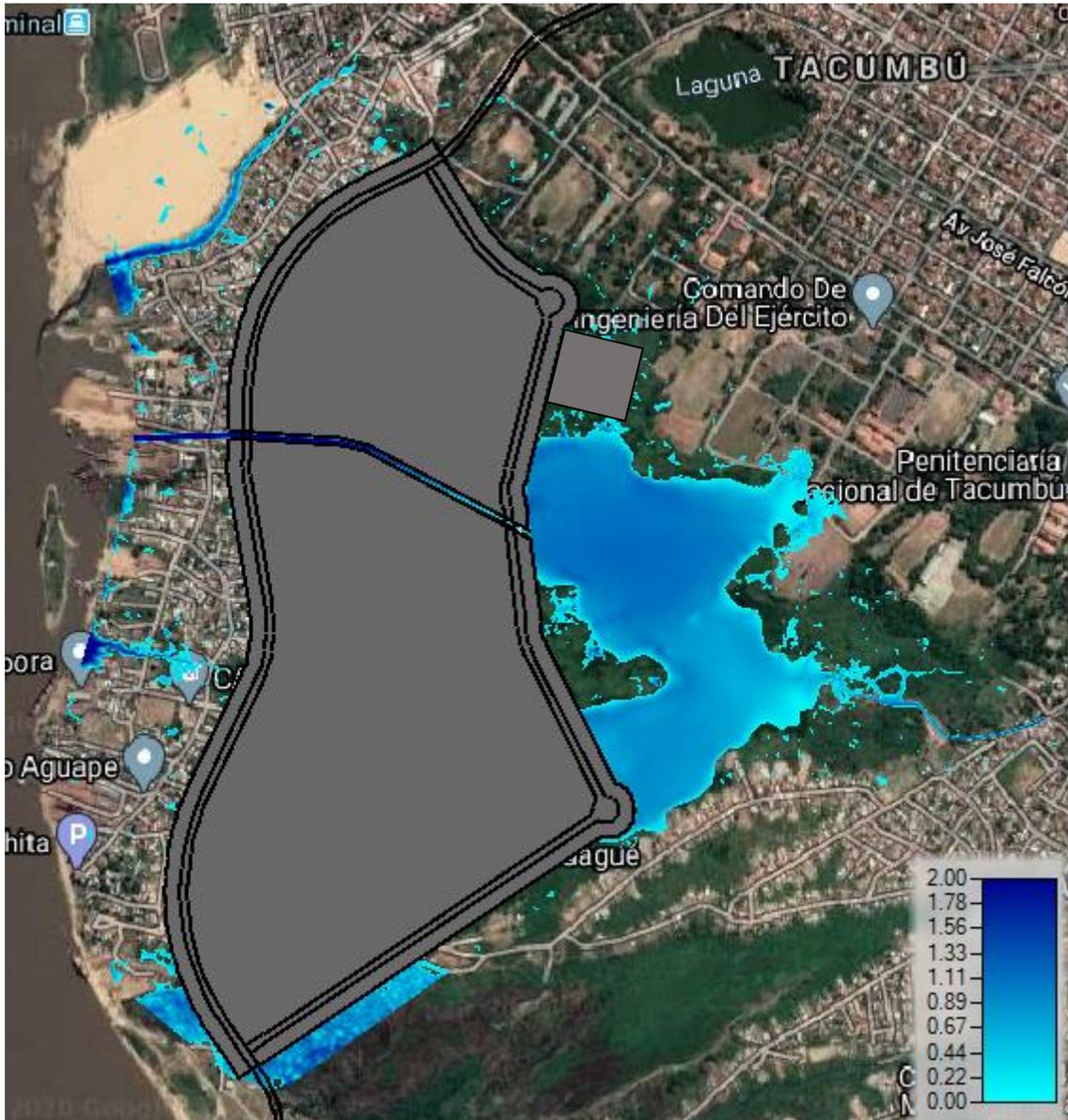


Figura 116 EscenarioRCP8.5_CanalNorte_TR2



Figura 117 EscenarioRCP8.5_CanalCentral_TR2

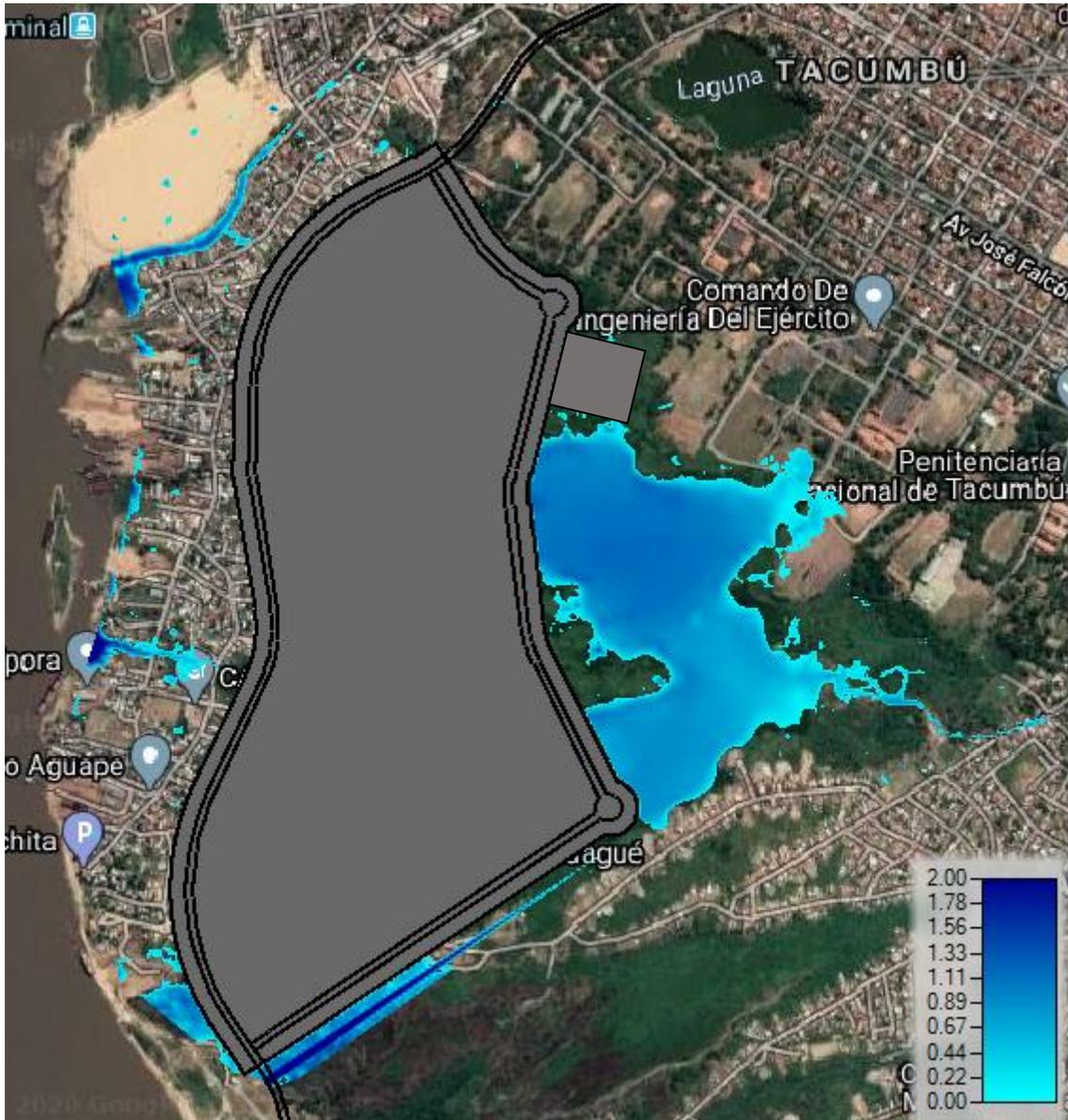


Figura 118 EscenarioRCP8.5_CanalSur_TR2

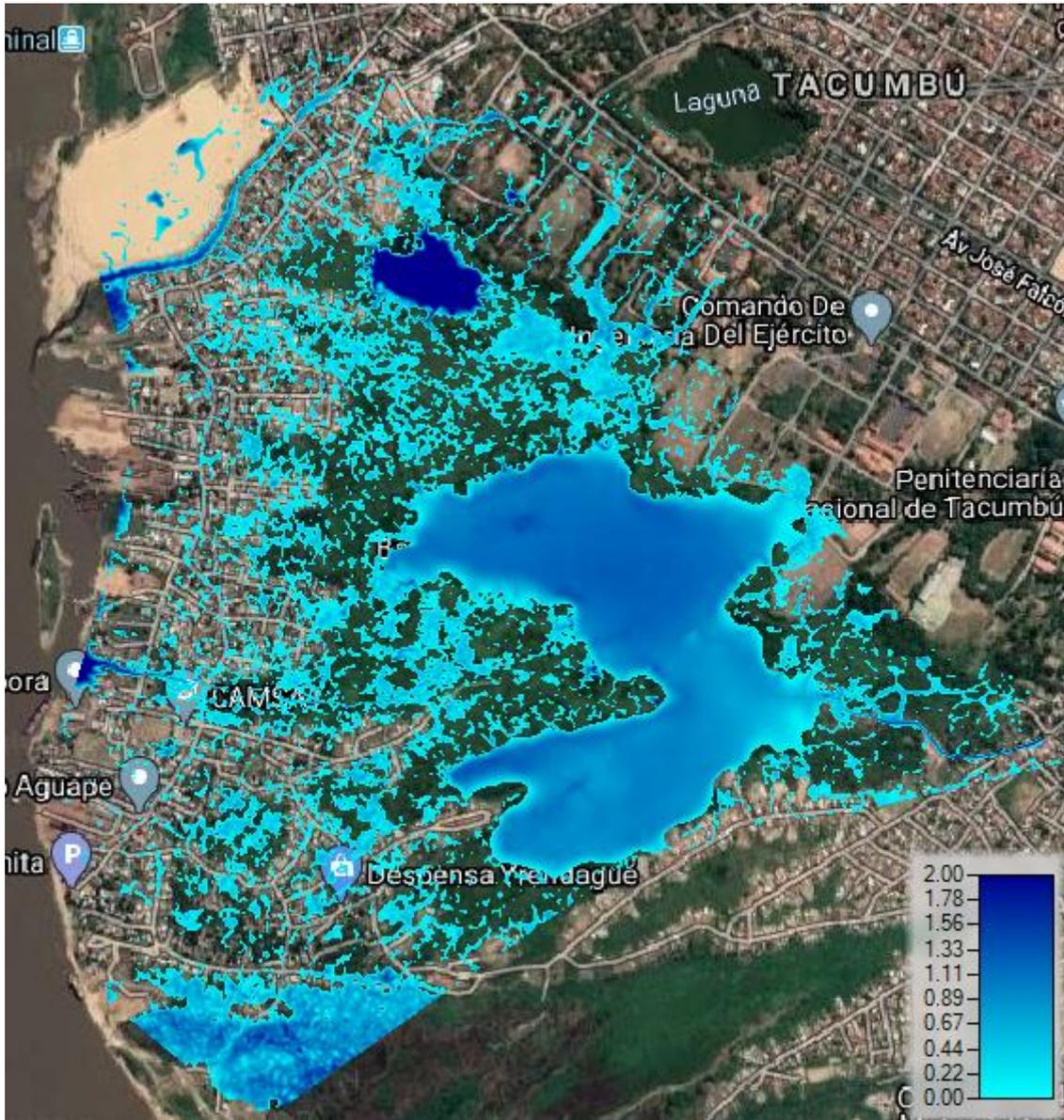


Figura 119 EscenarioActual_Natural_TR5

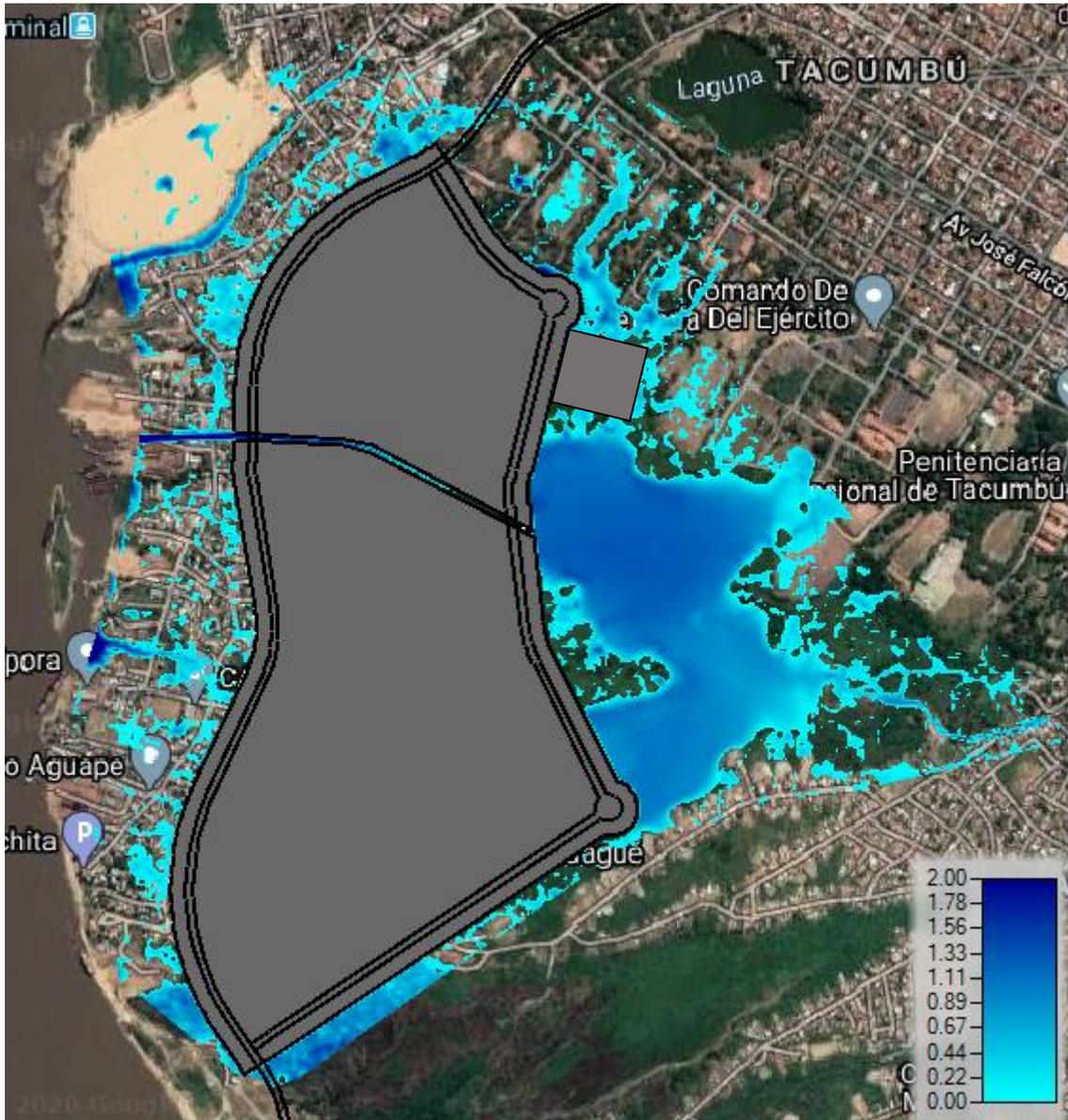


Figura 120 EscenarioActual_CanalNorte_TR5



Figura 121 EscenarioActual_CanalCentral_TR5

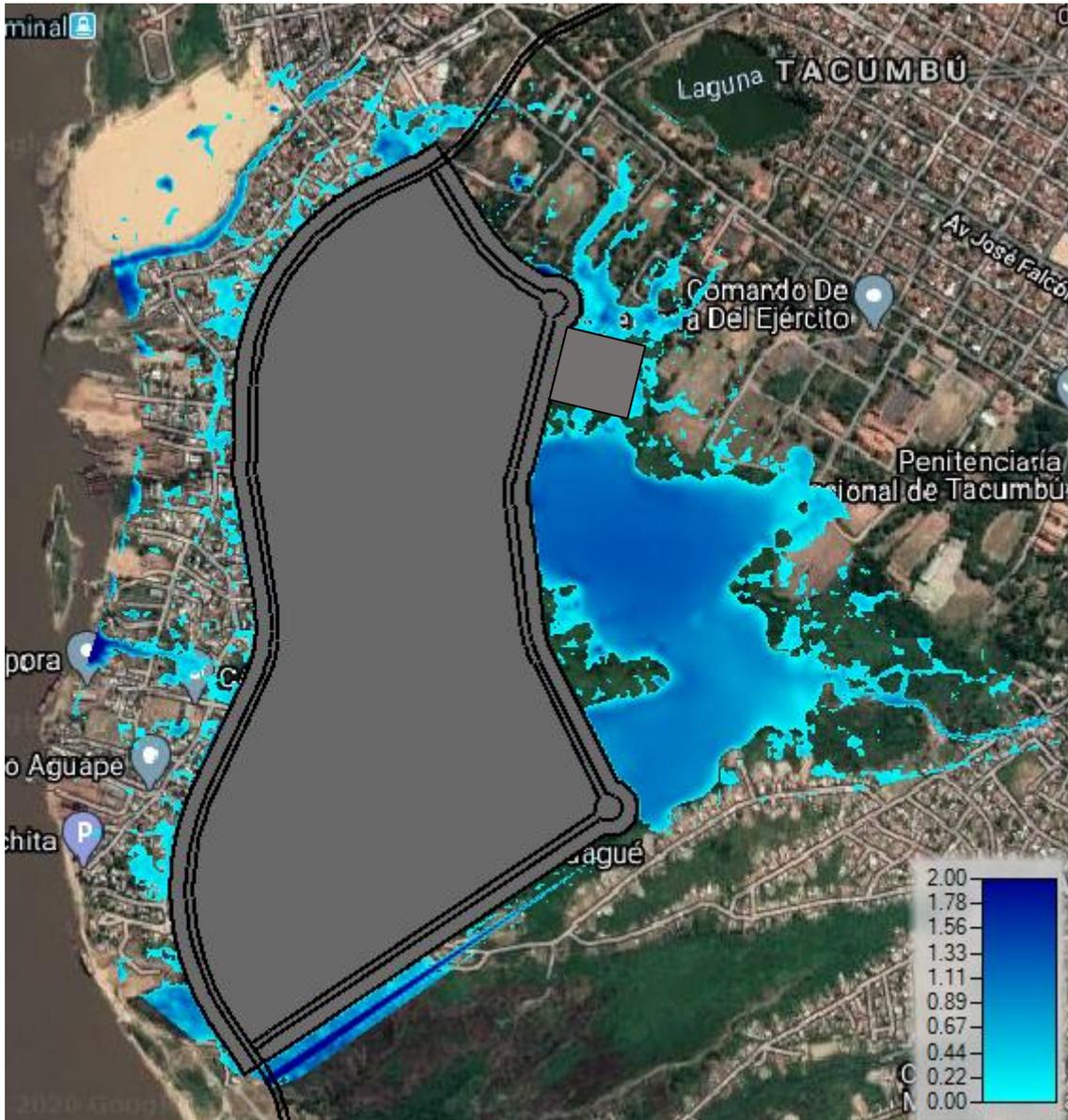


Figura 122 EscenarioActual_CanalSur_TR5

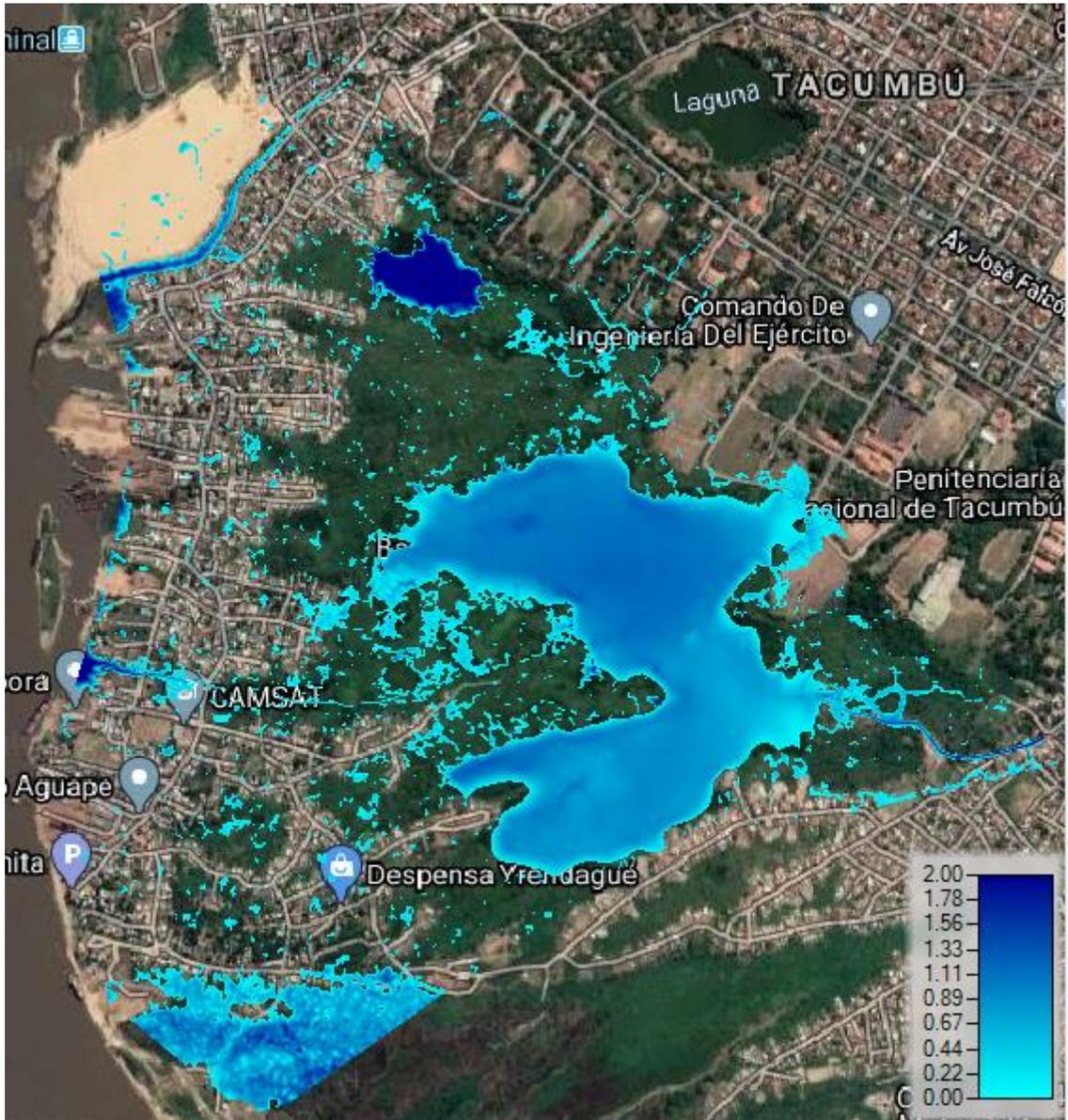


Figura 123 EscenarioRCP4.5_Natural_TR5

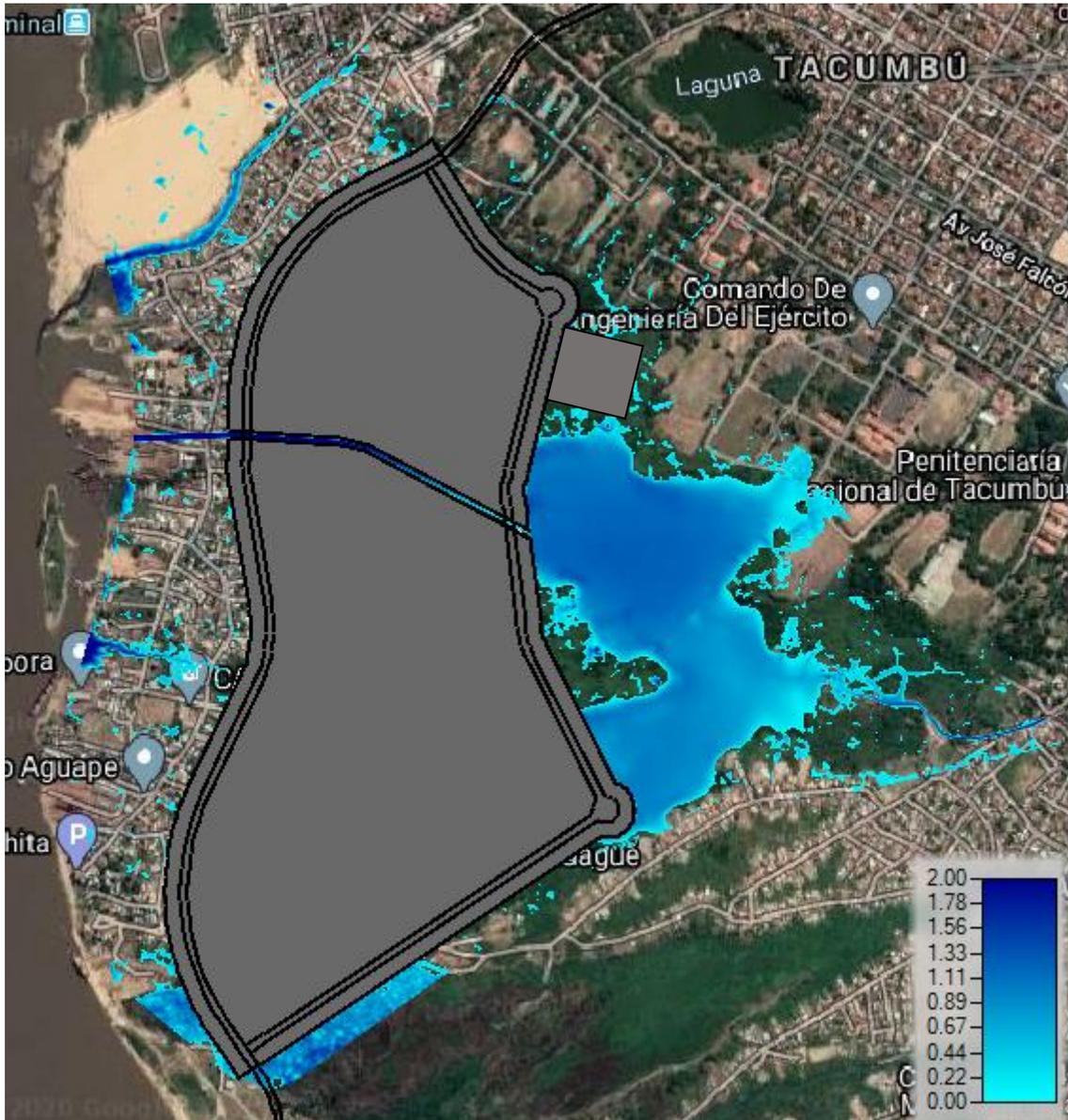


Figura 124 EscenarioRCP4.5_CanalNorte_TR5



Figura 125 EscenarioRCP4.5_CanalCentral_TR5

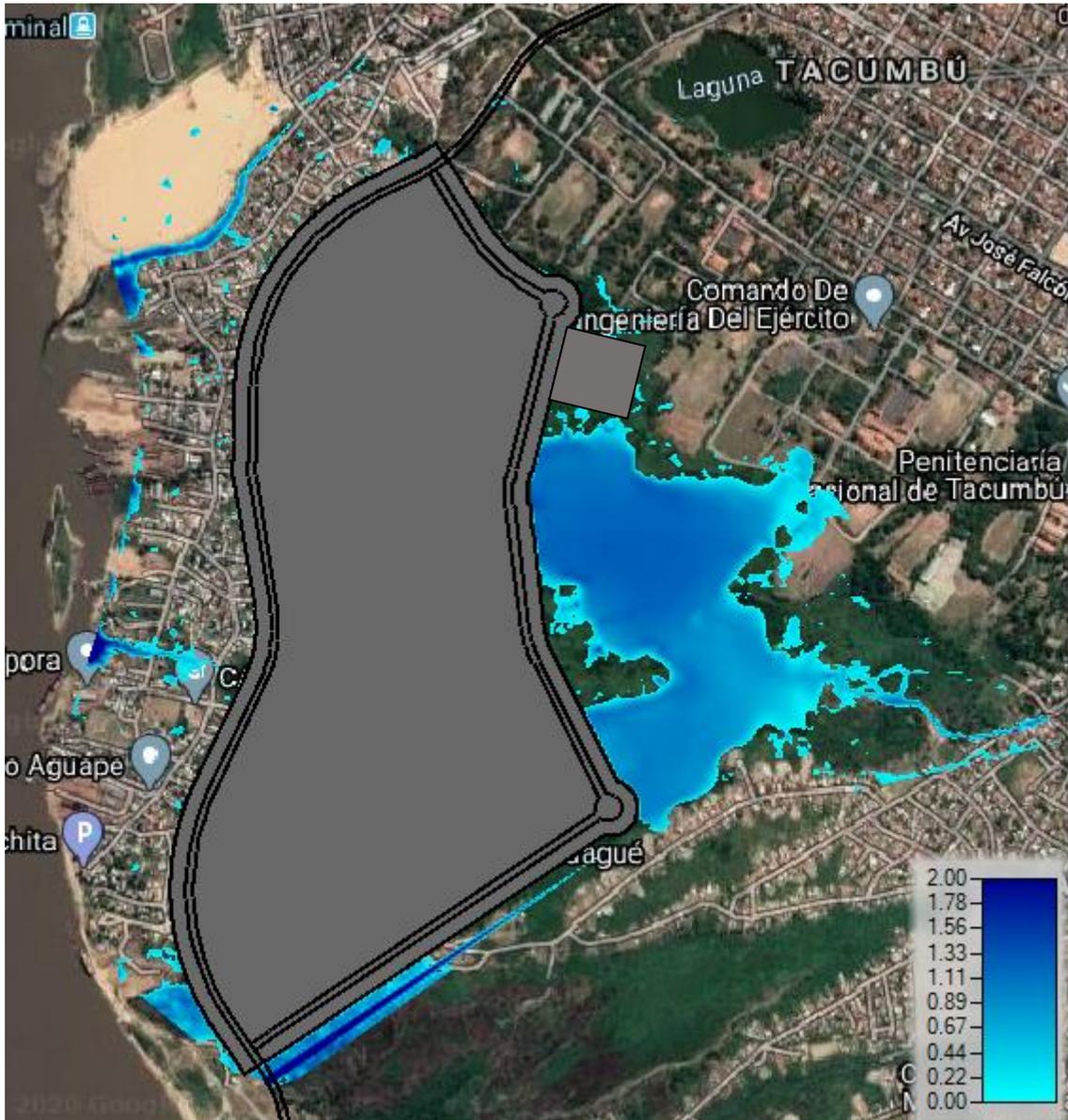


Figura 126 EscenarioRCP4.5_CanalSur_TR5

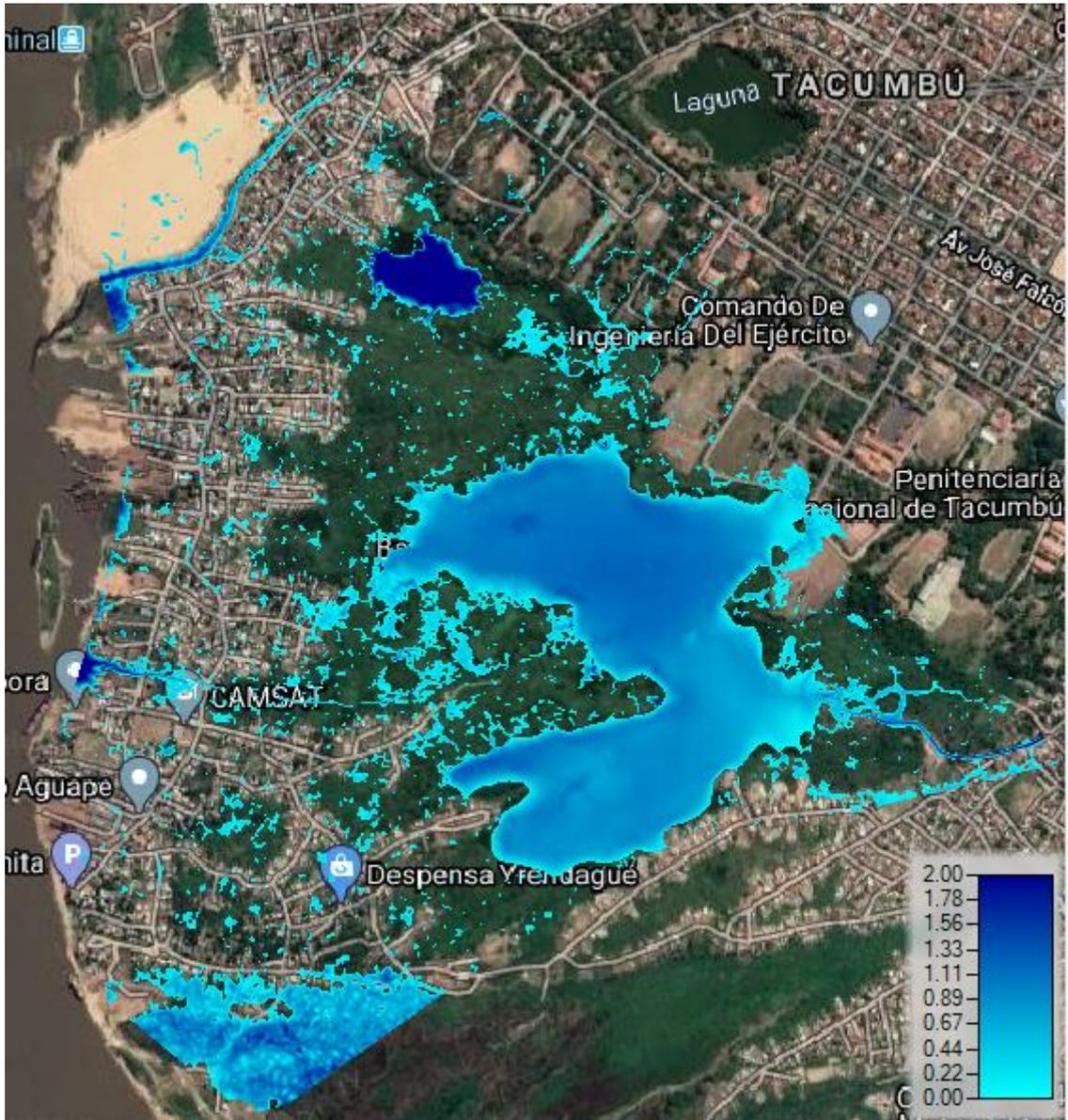


Figura 127 EscenarioRCP8.5_Natural_TR5

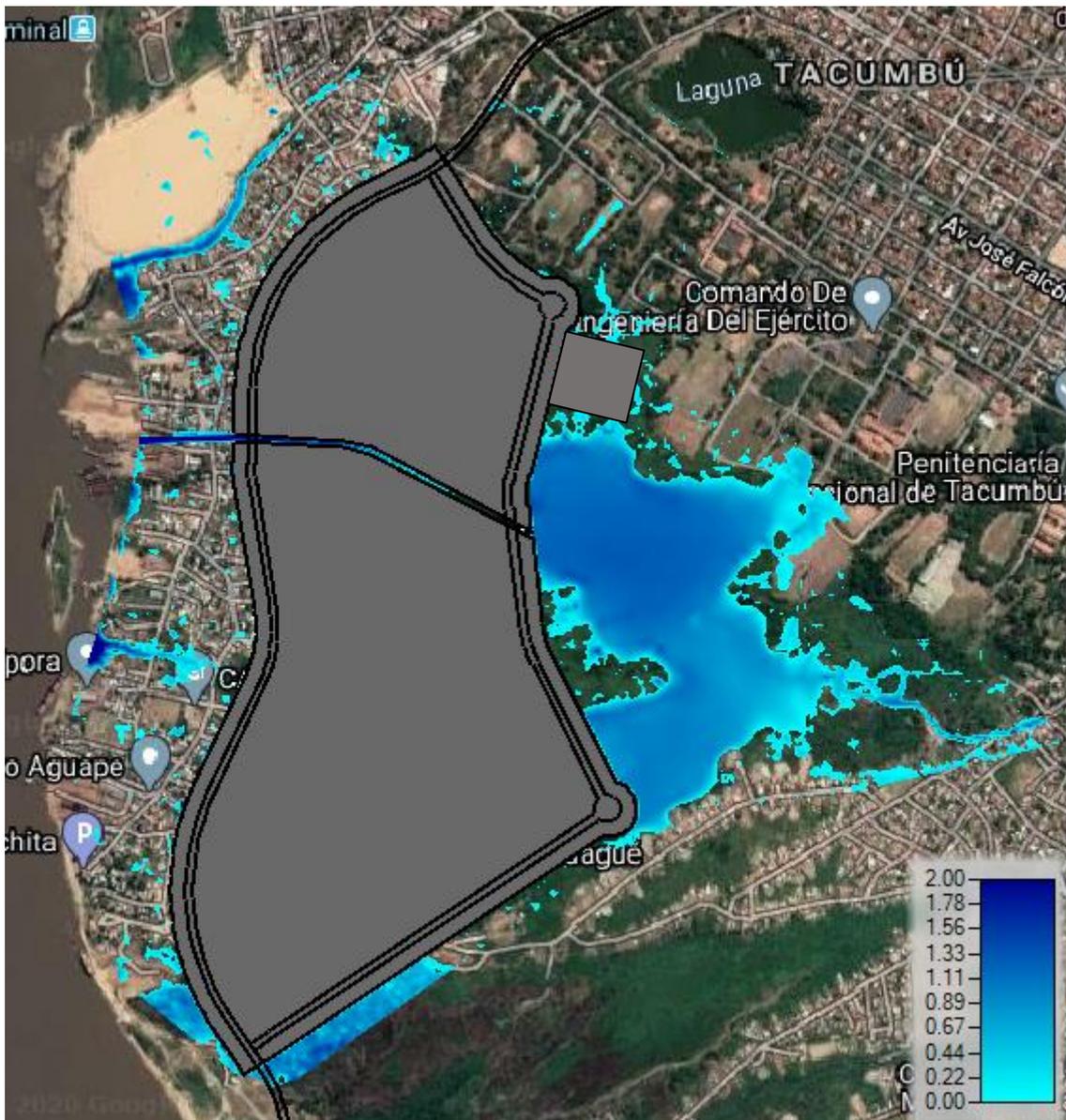


Figura 128 EscenarioRCP8.5_CanalNorte_TR5

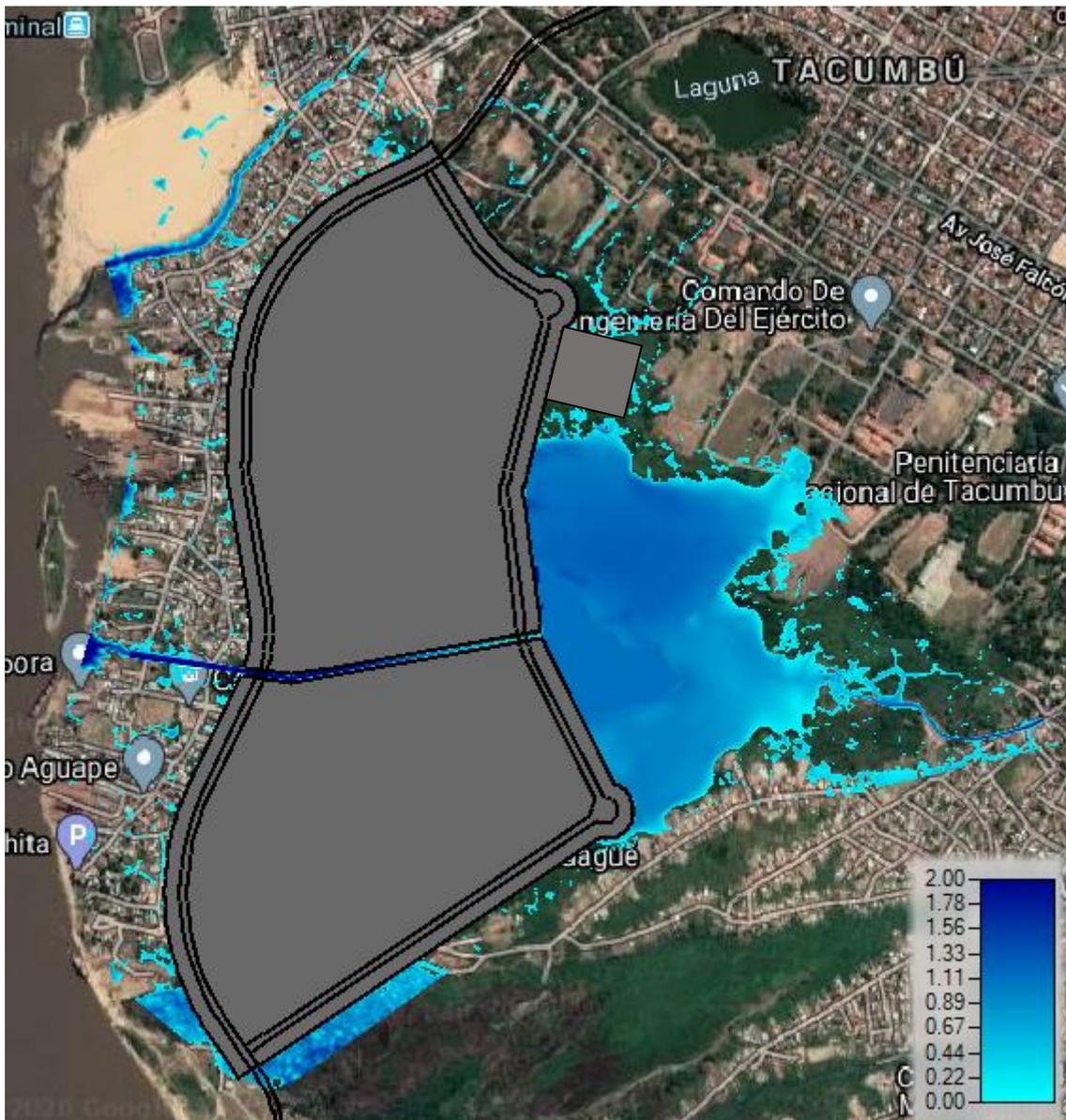


Figura 129 EscenarioRCP8.5_CanalCentral_TR5

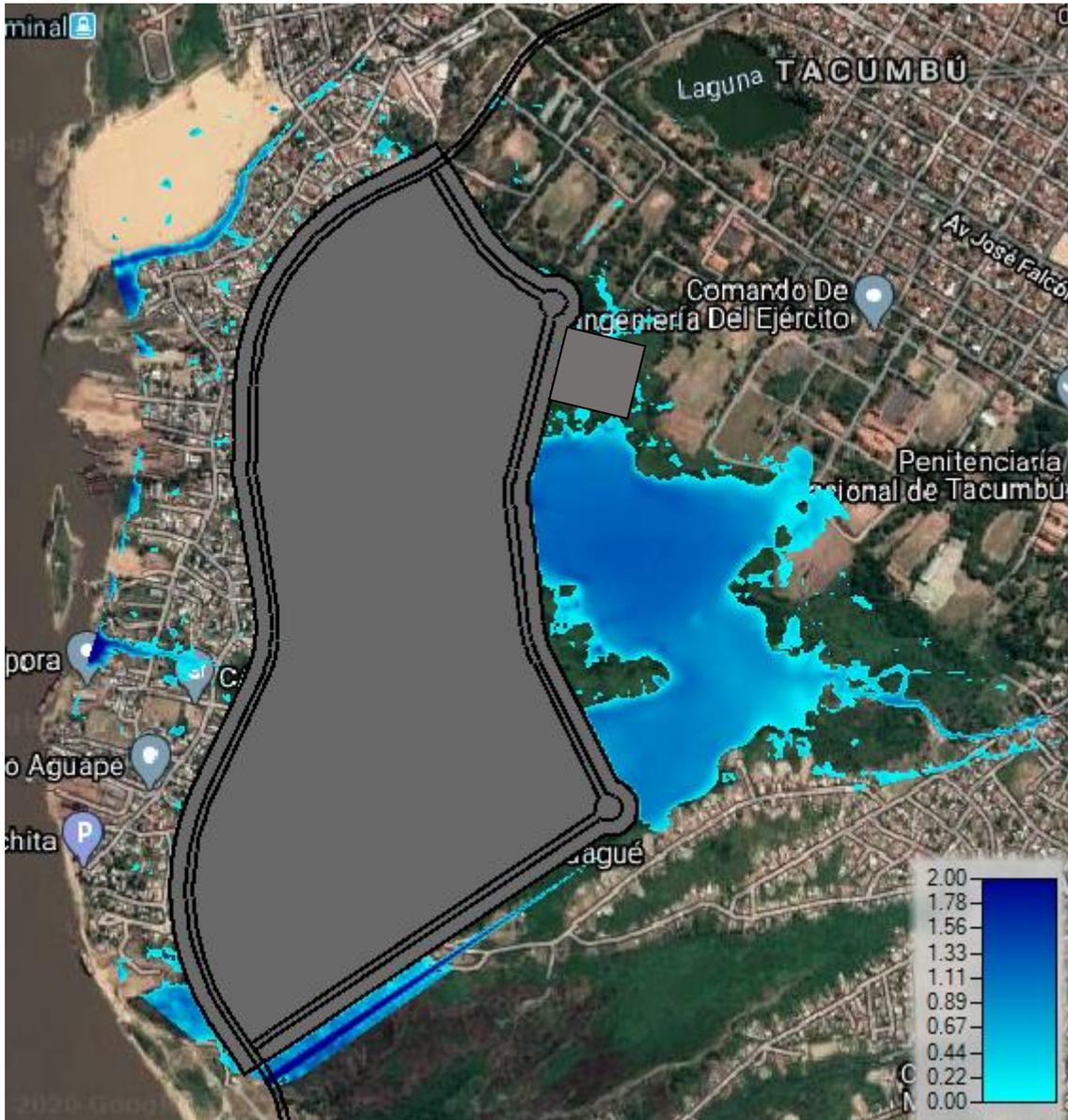


Figura 130 EscenarioRCP8.5_CanalSur_TR5

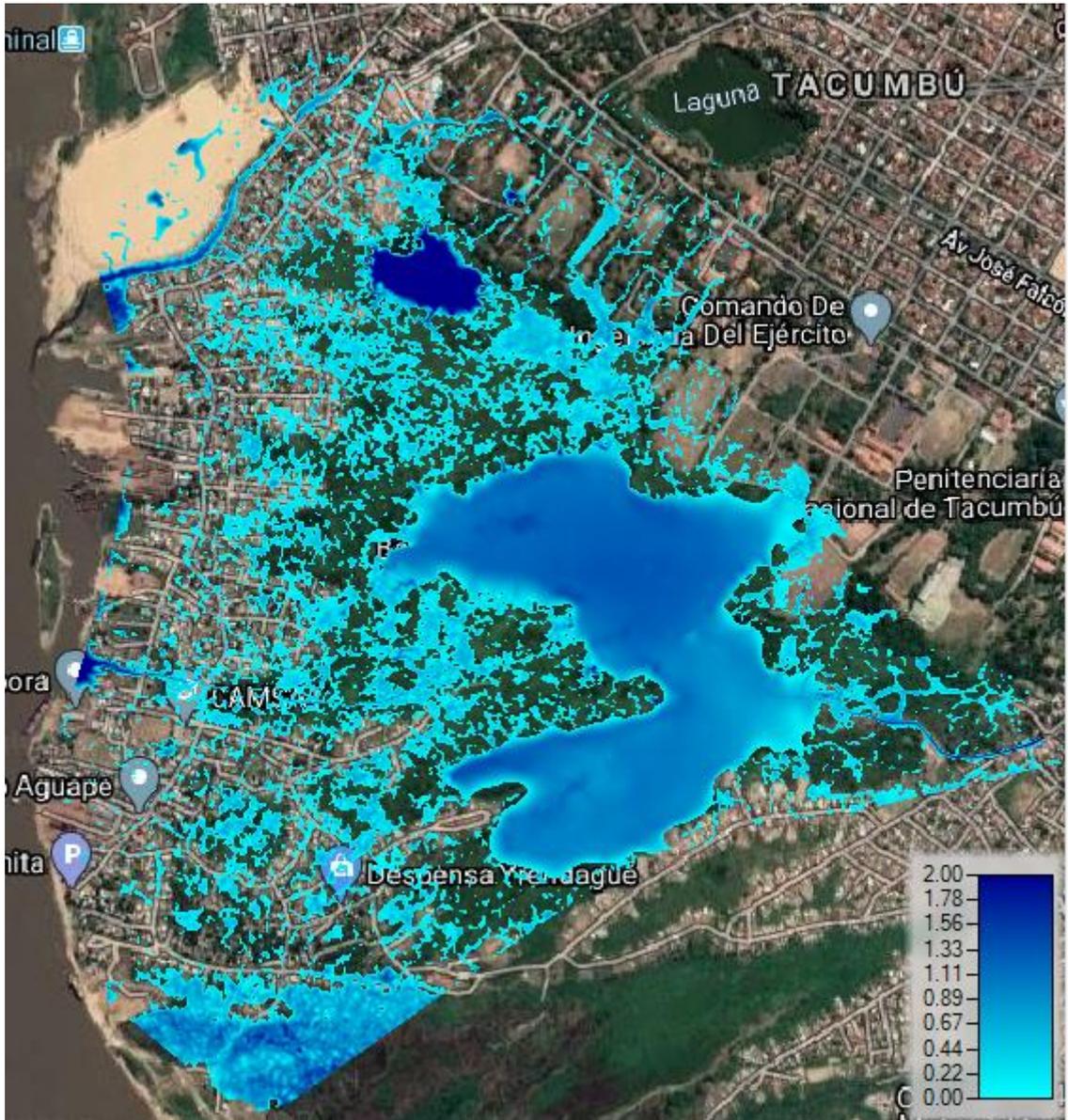


Figura 131 EscenarioActual_Natural_TR10

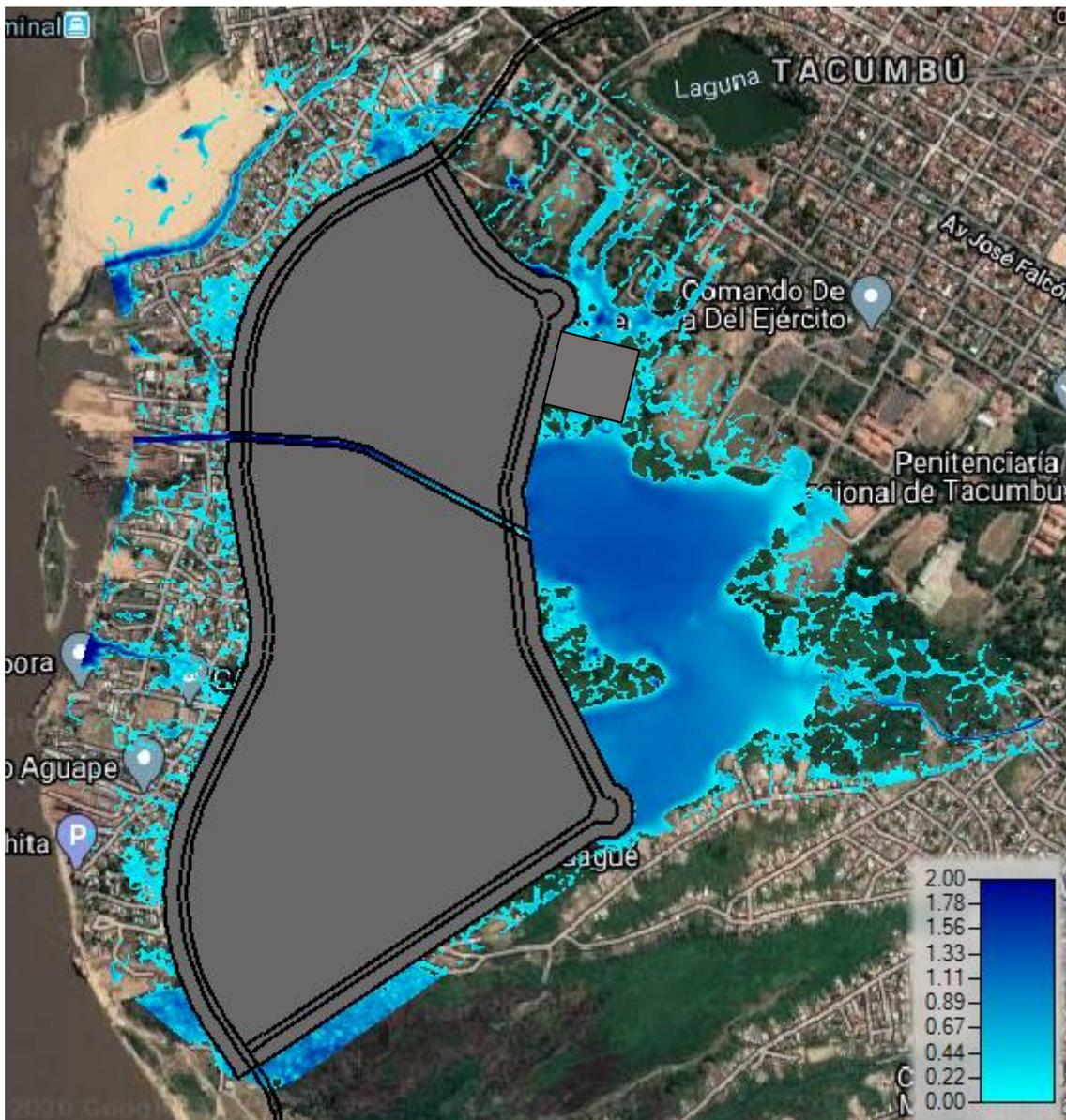


Figura 132 EscenarioActual_CanalNorte_TR10

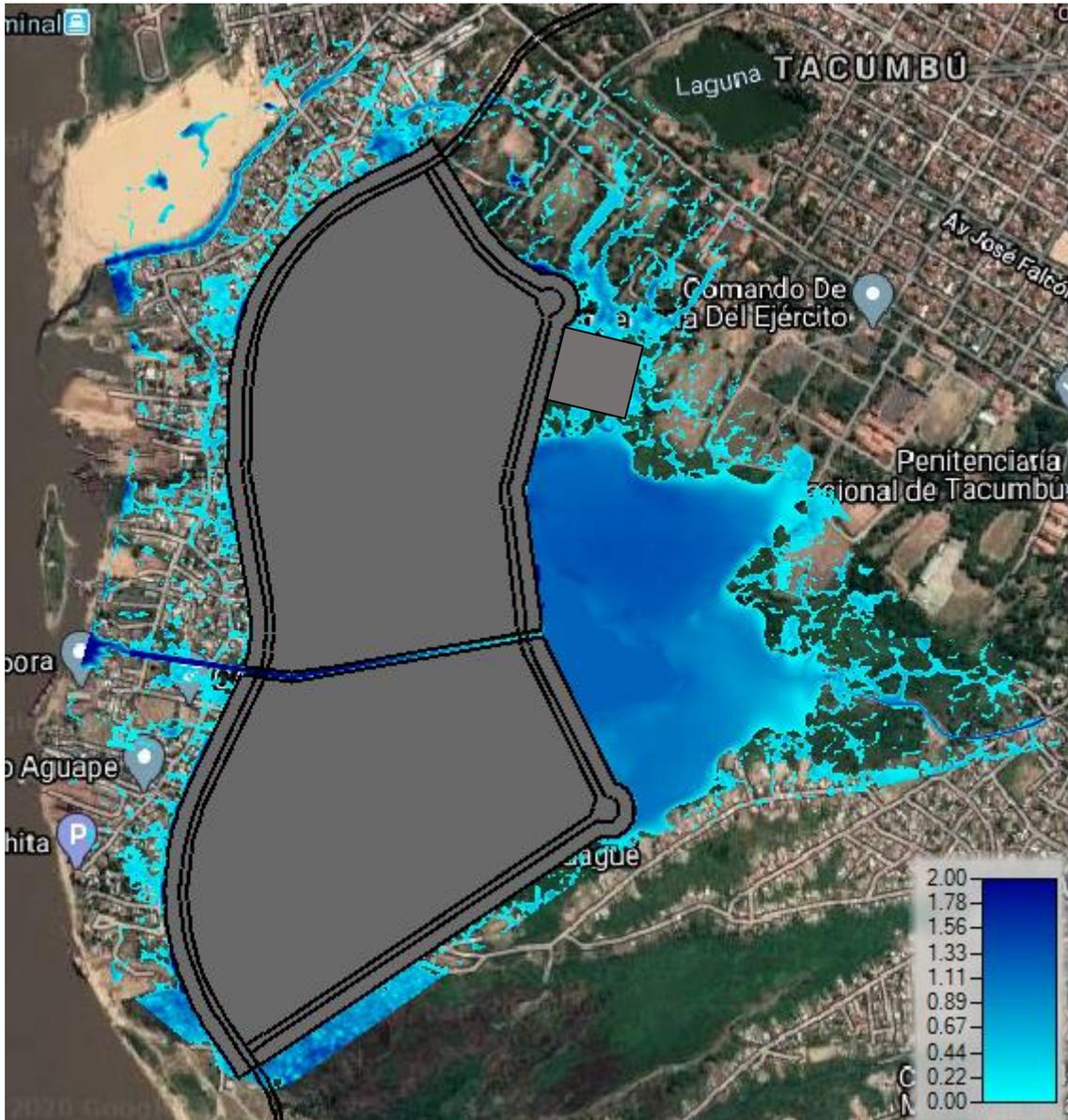


Figura 133 EscenarioActual_CanalCentral_TR10

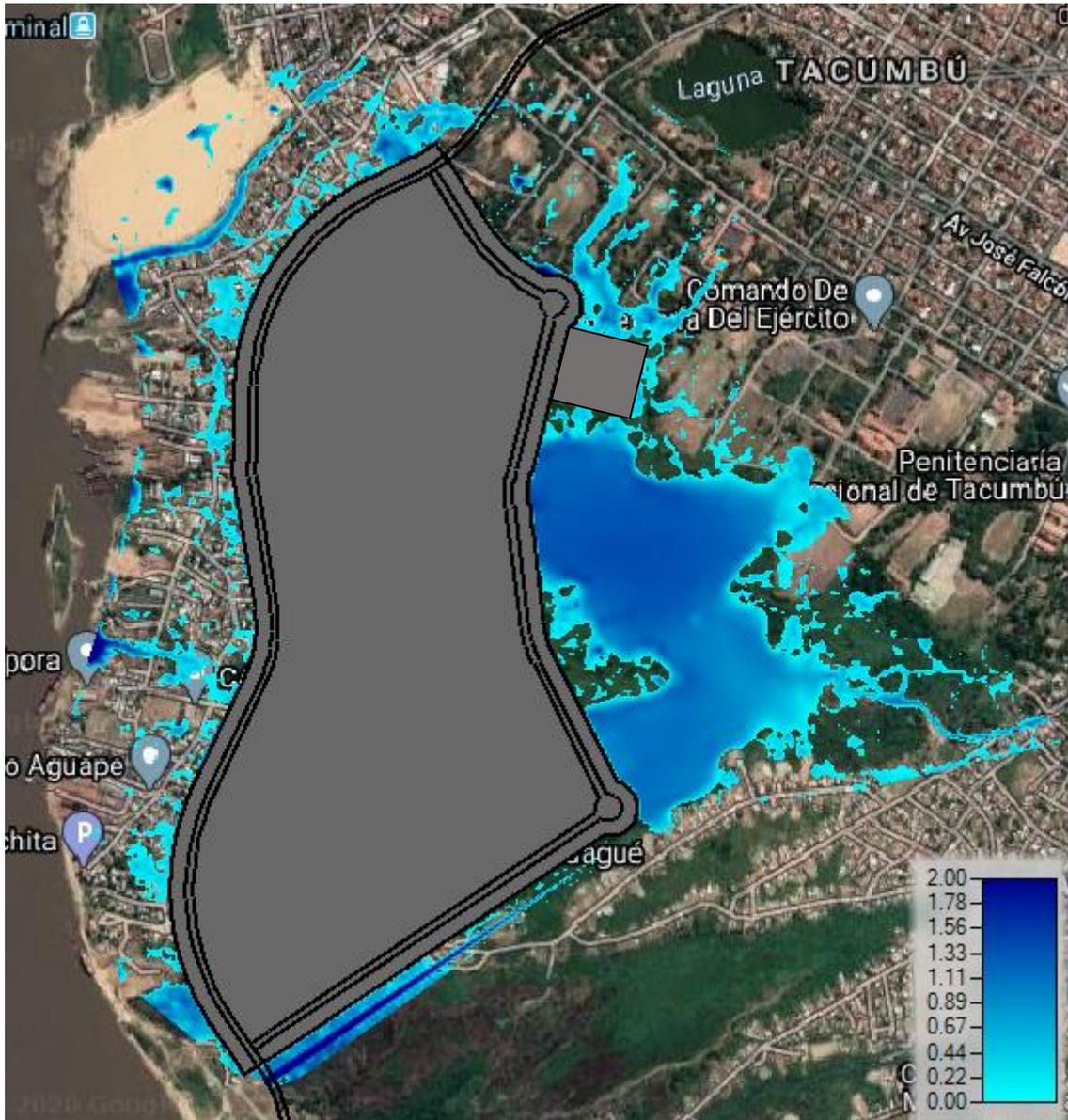


Figura 134 EscenarioActual_CanalSur_TR10

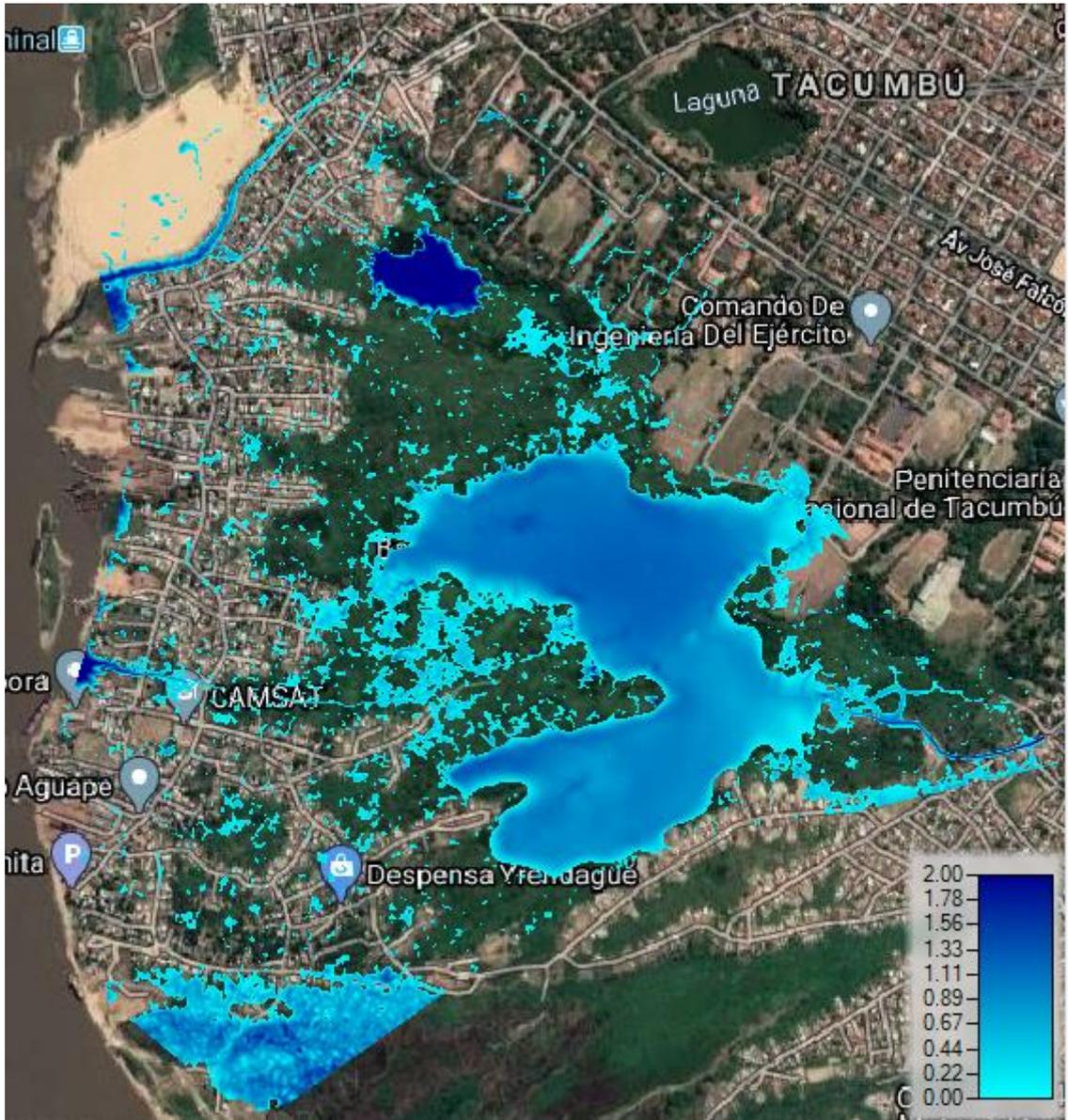


Figura 135 EscenarioRCP4.5_Natural_TR10

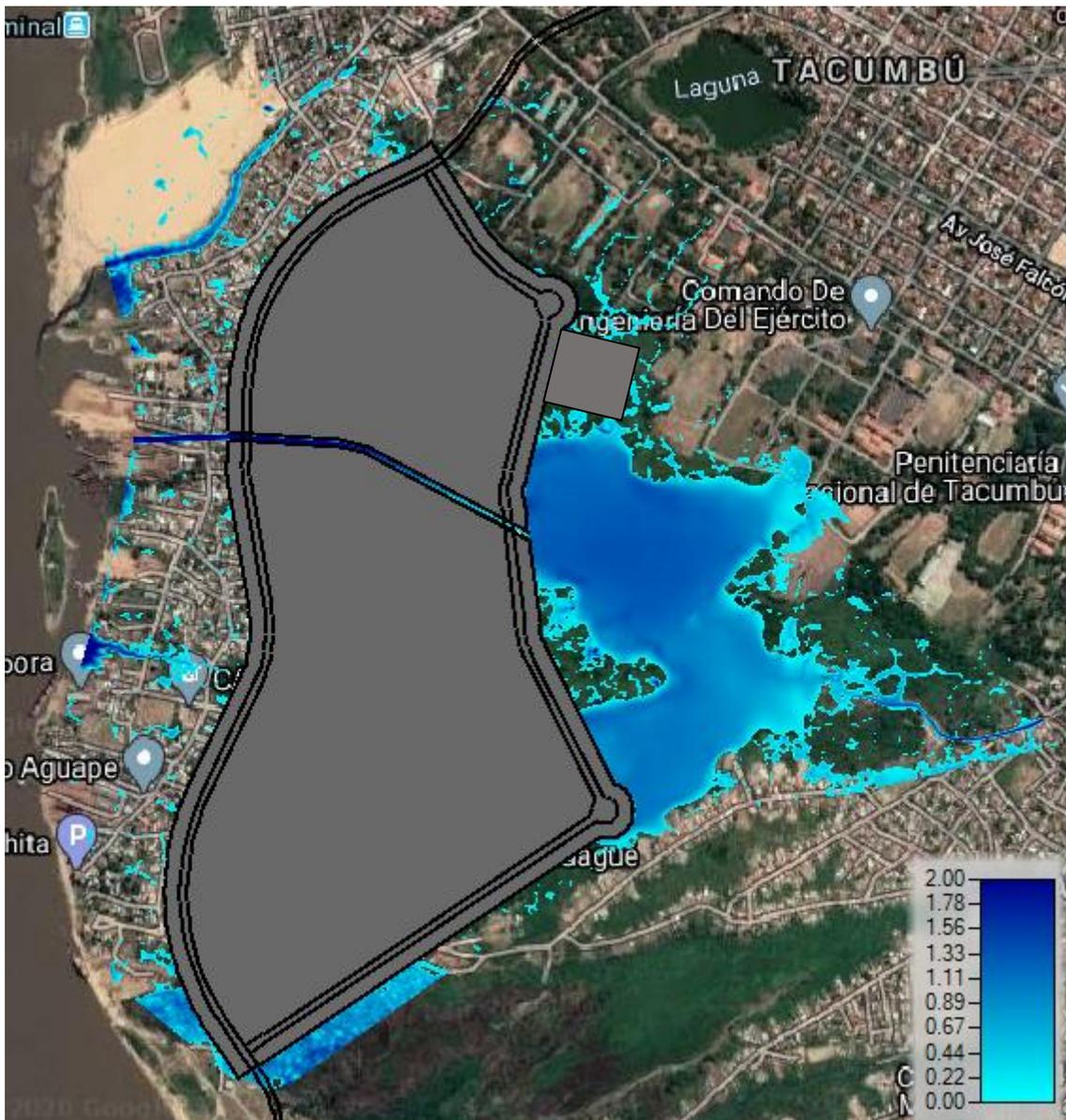


Figura 136 EscenarioRCP4.5_CanalNorte_TR10



Figura 137 EscenarioRCP4.5_CanalCentral_TR10

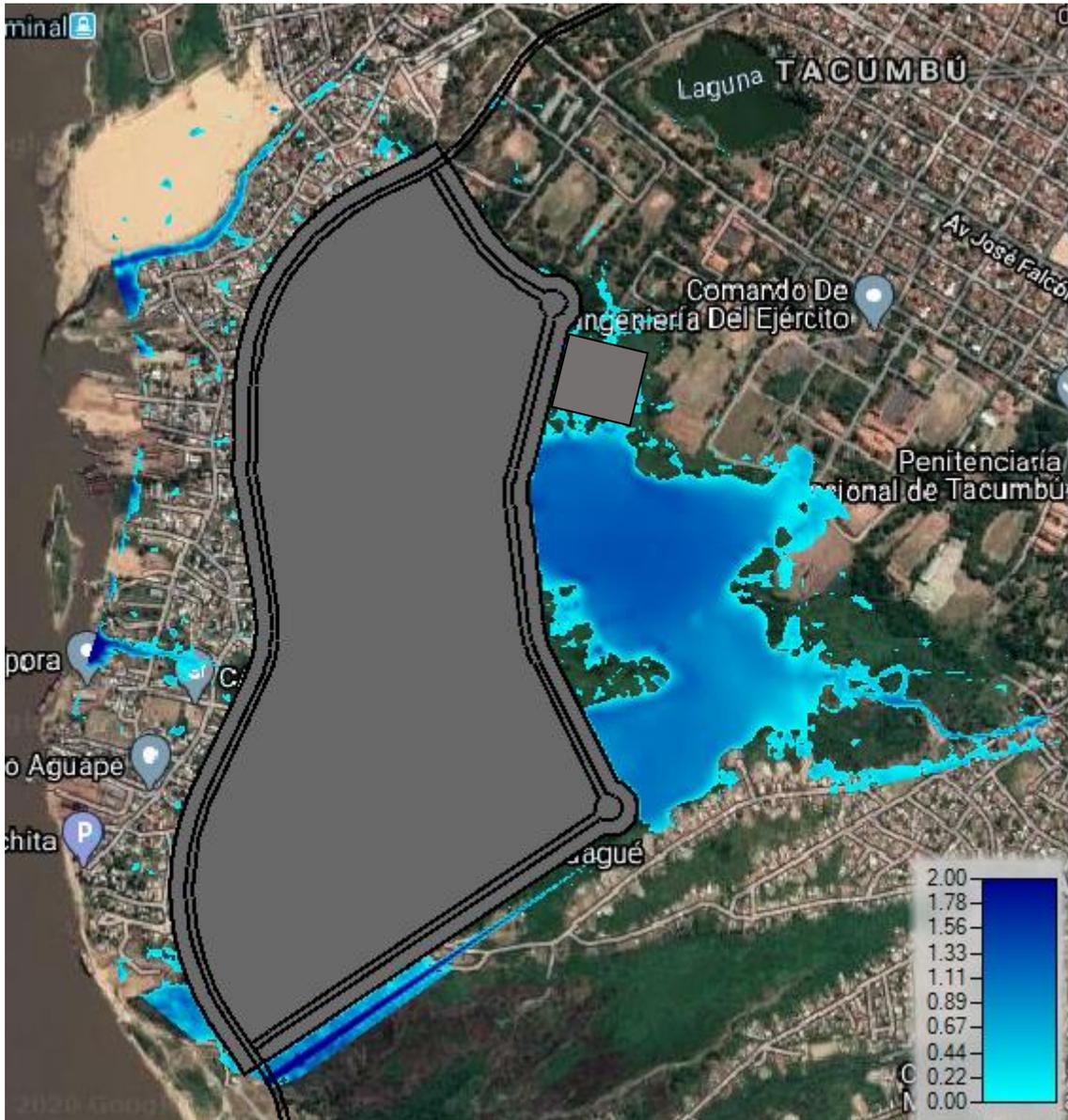


Figura 138 EscenarioRCP4.5_CanalSur_TR10

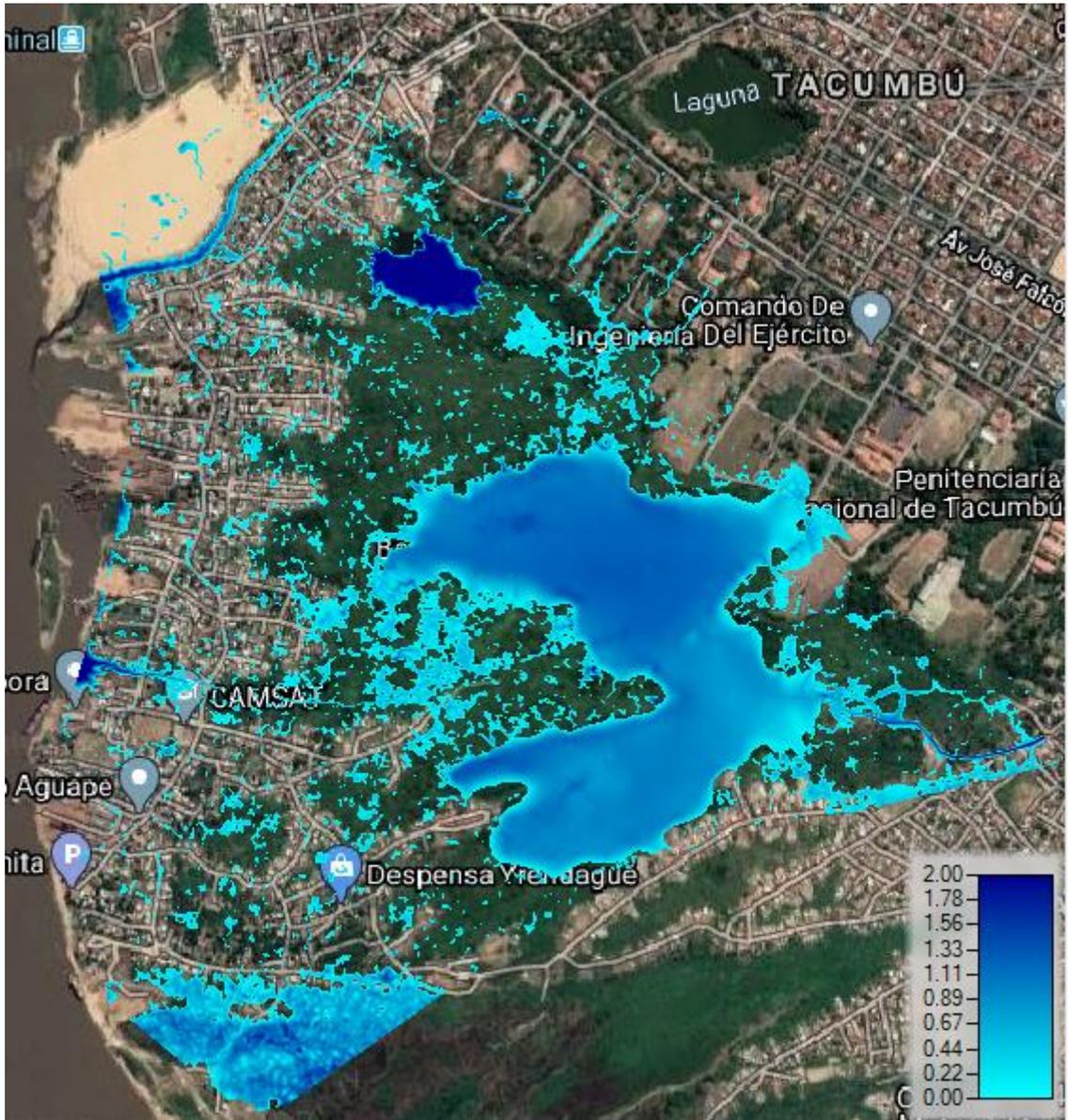


Figura 139 EscenarioRCP8.5_Natural_TR10

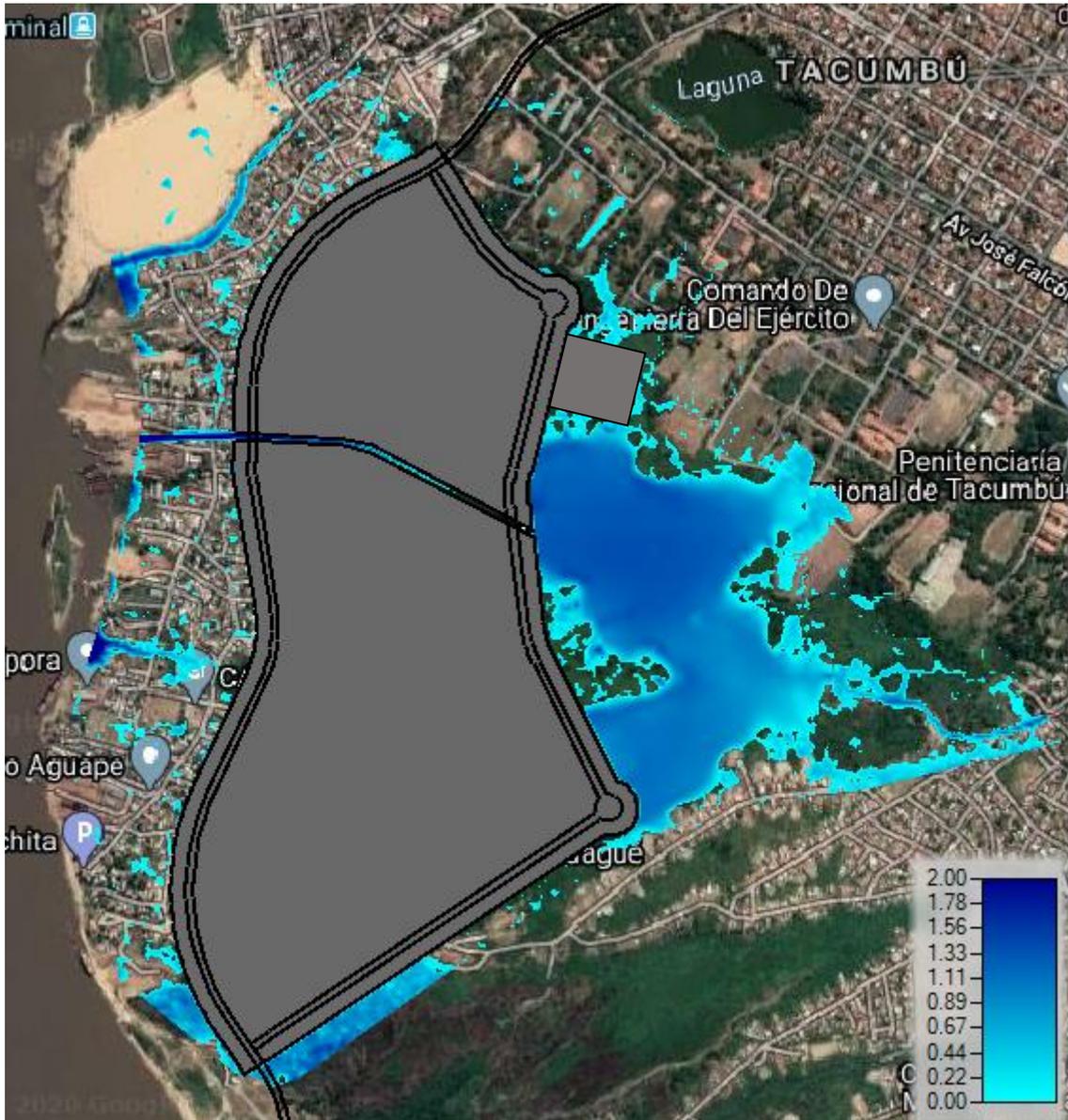


Figura 140 EscenarioRCP8.5_CanalNorte_TR10

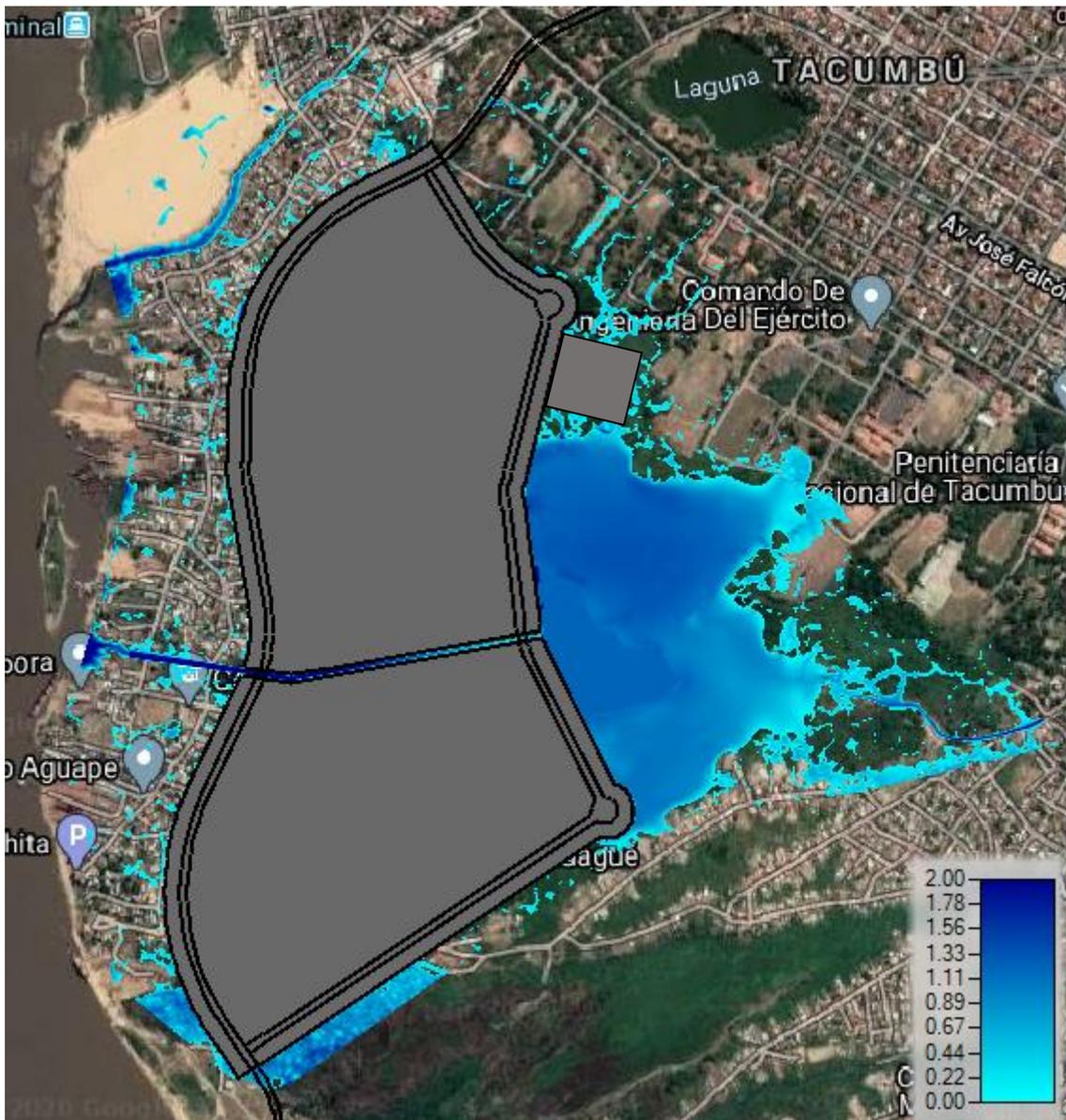


Figura 141 EscenarioRCP8.5_CanalCentral_TR10

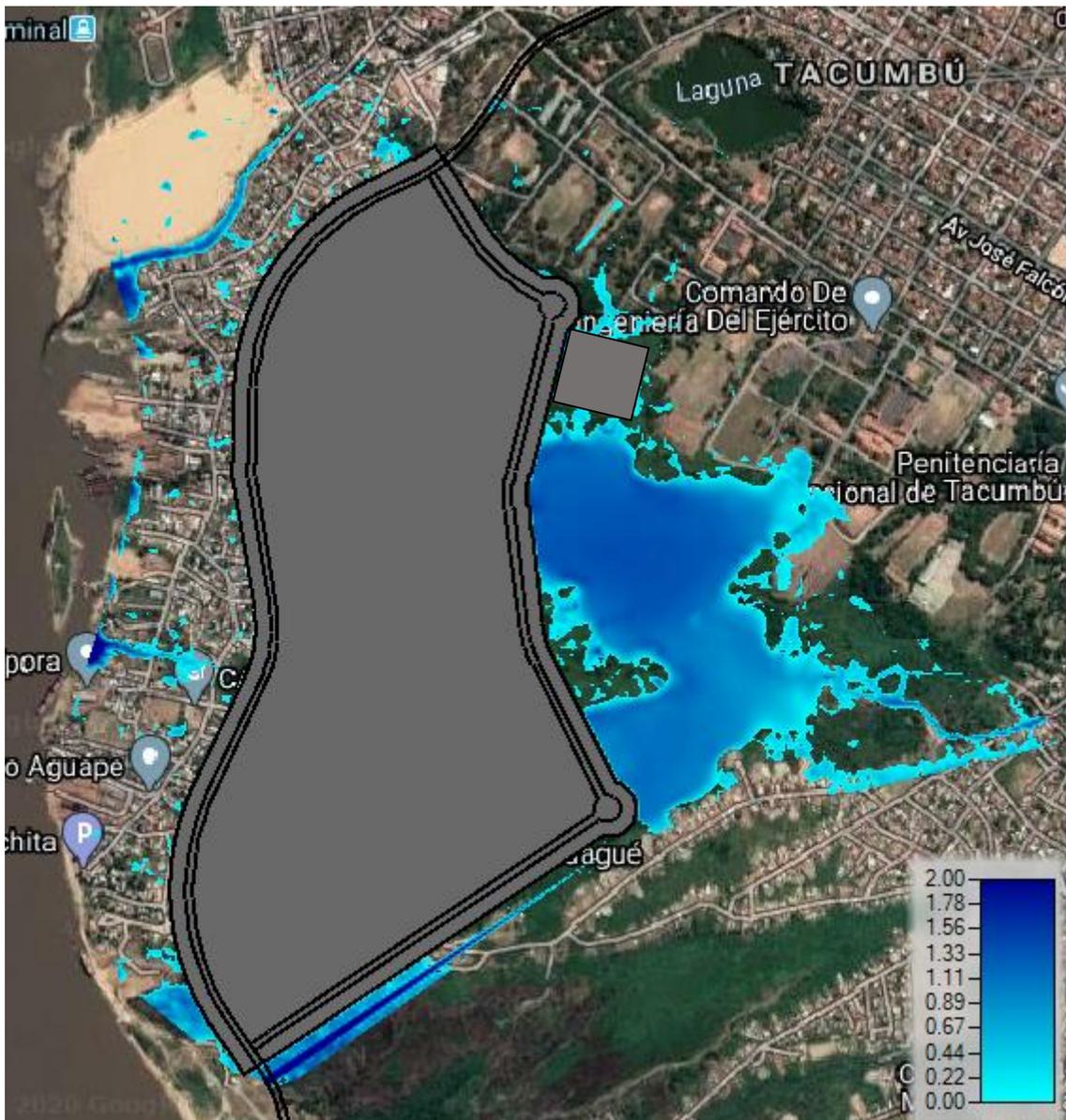


Figura 142 EscenarioRCP8.5_CanalSur_TR10

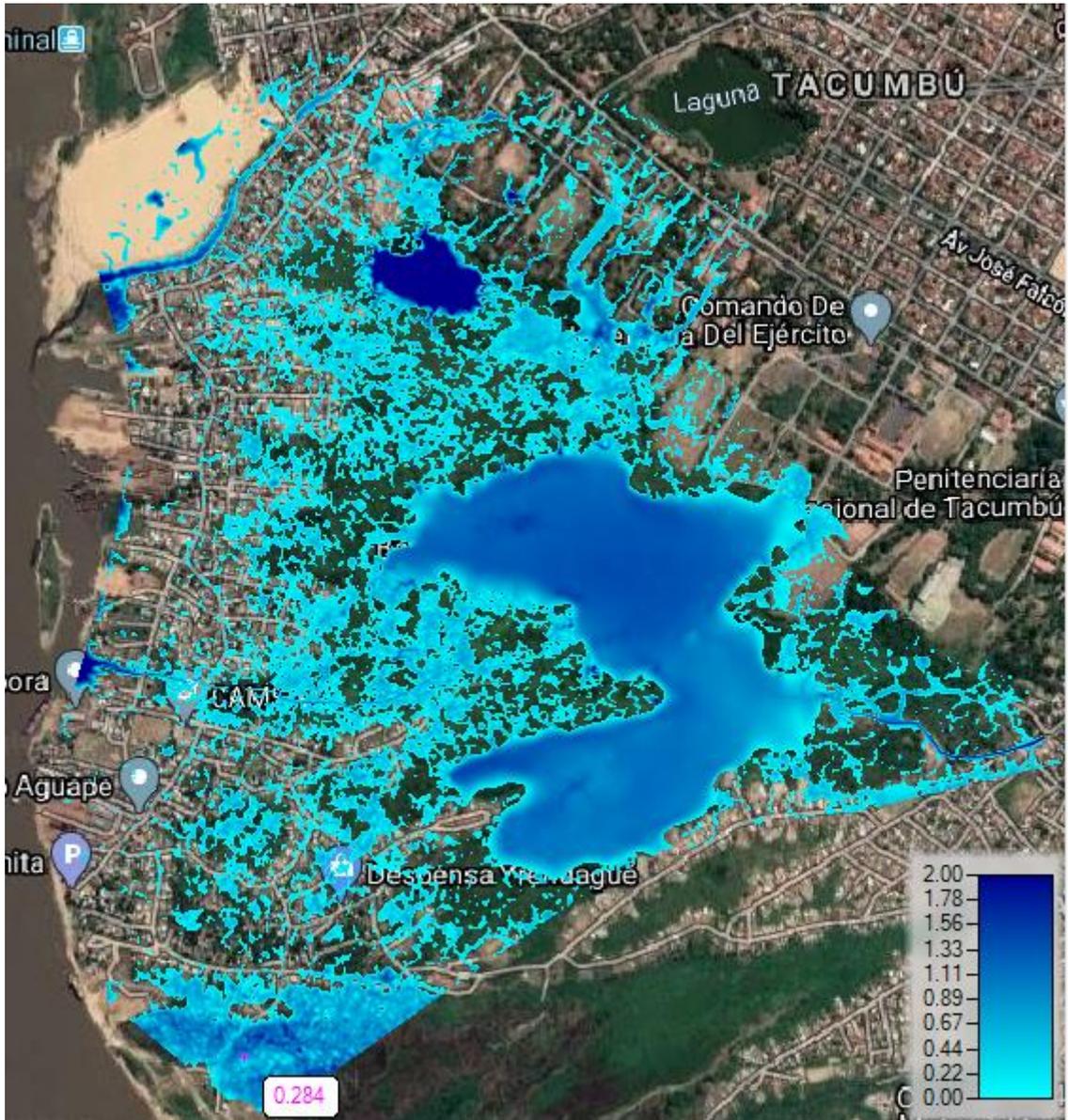


Figura 143 EscenarioActual_Natural_TR25

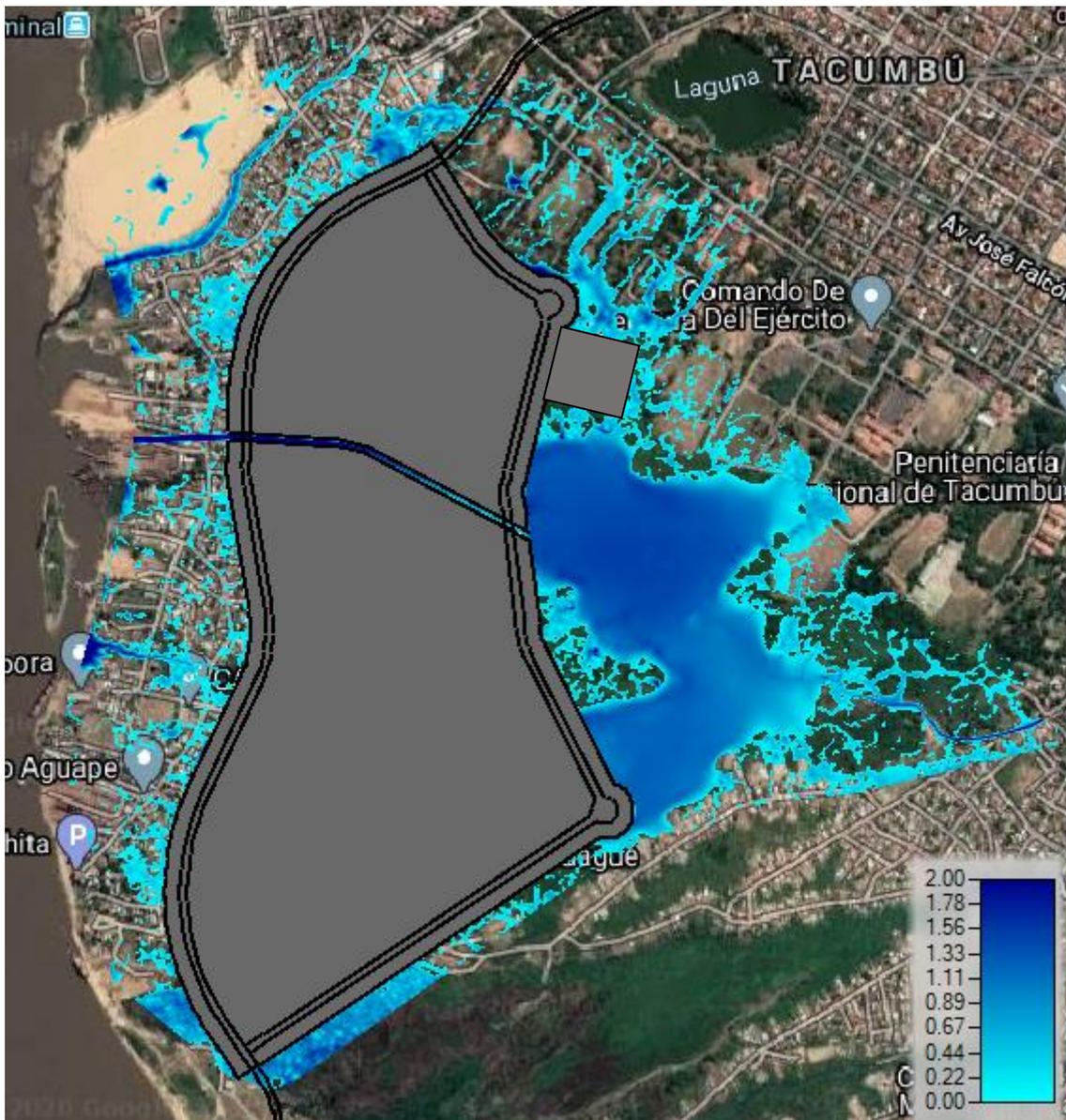


Figura 144 EscenarioActual_CanalNorte_TR25

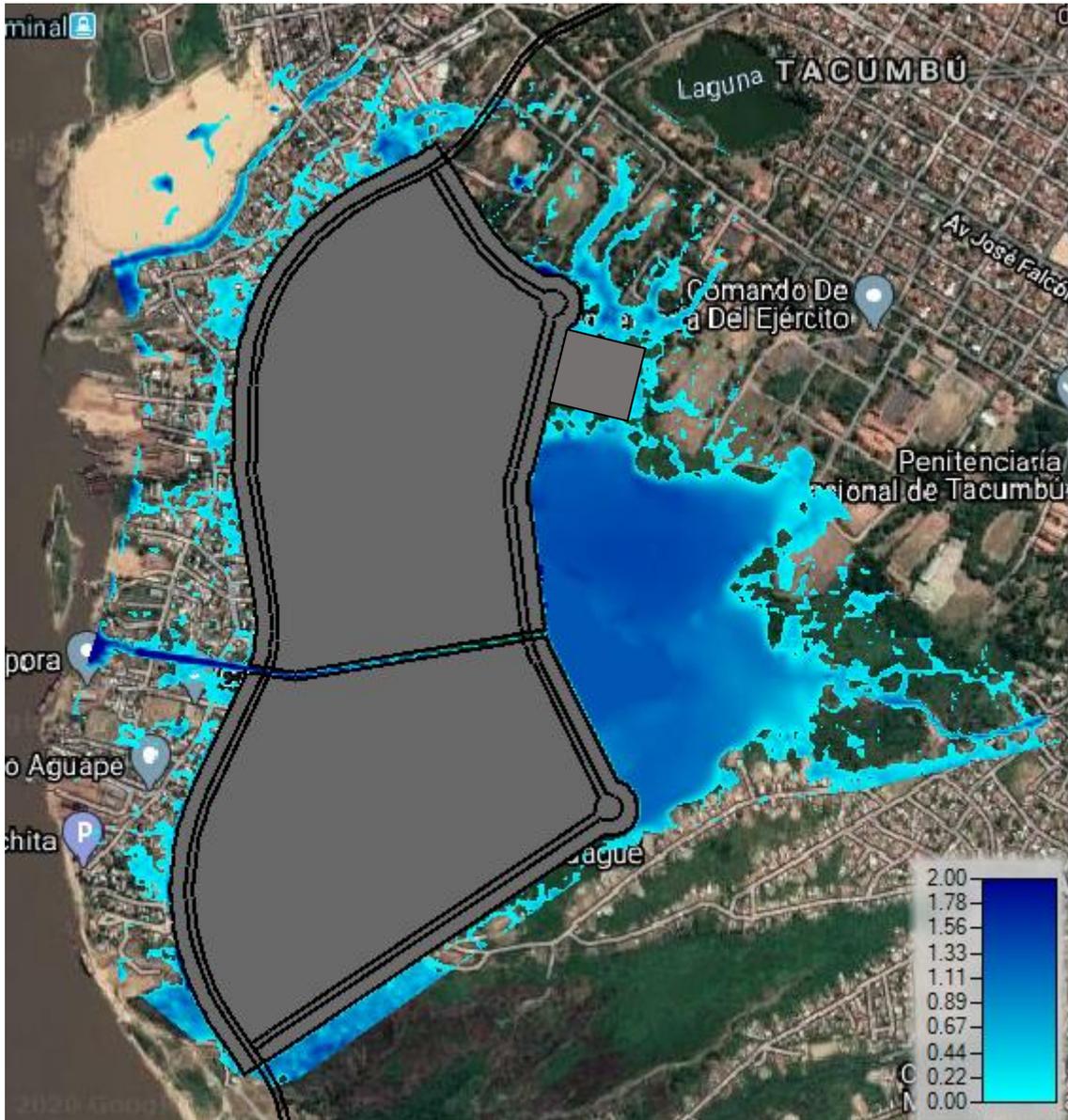


Figura 145 EscenarioActual_CanalCentral_TR25

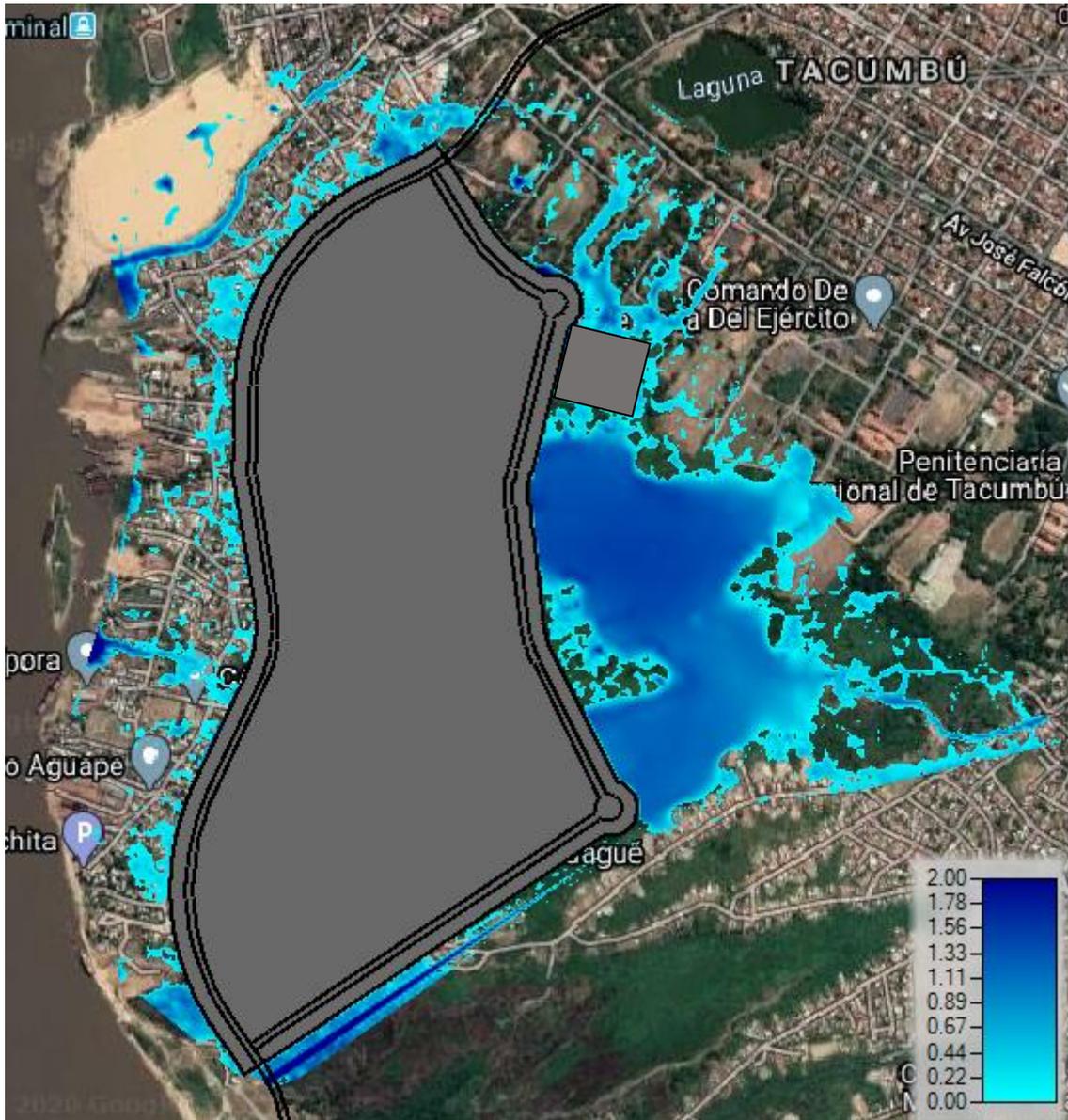


Figura 146 EscenarioActual_CanalSur_TR25

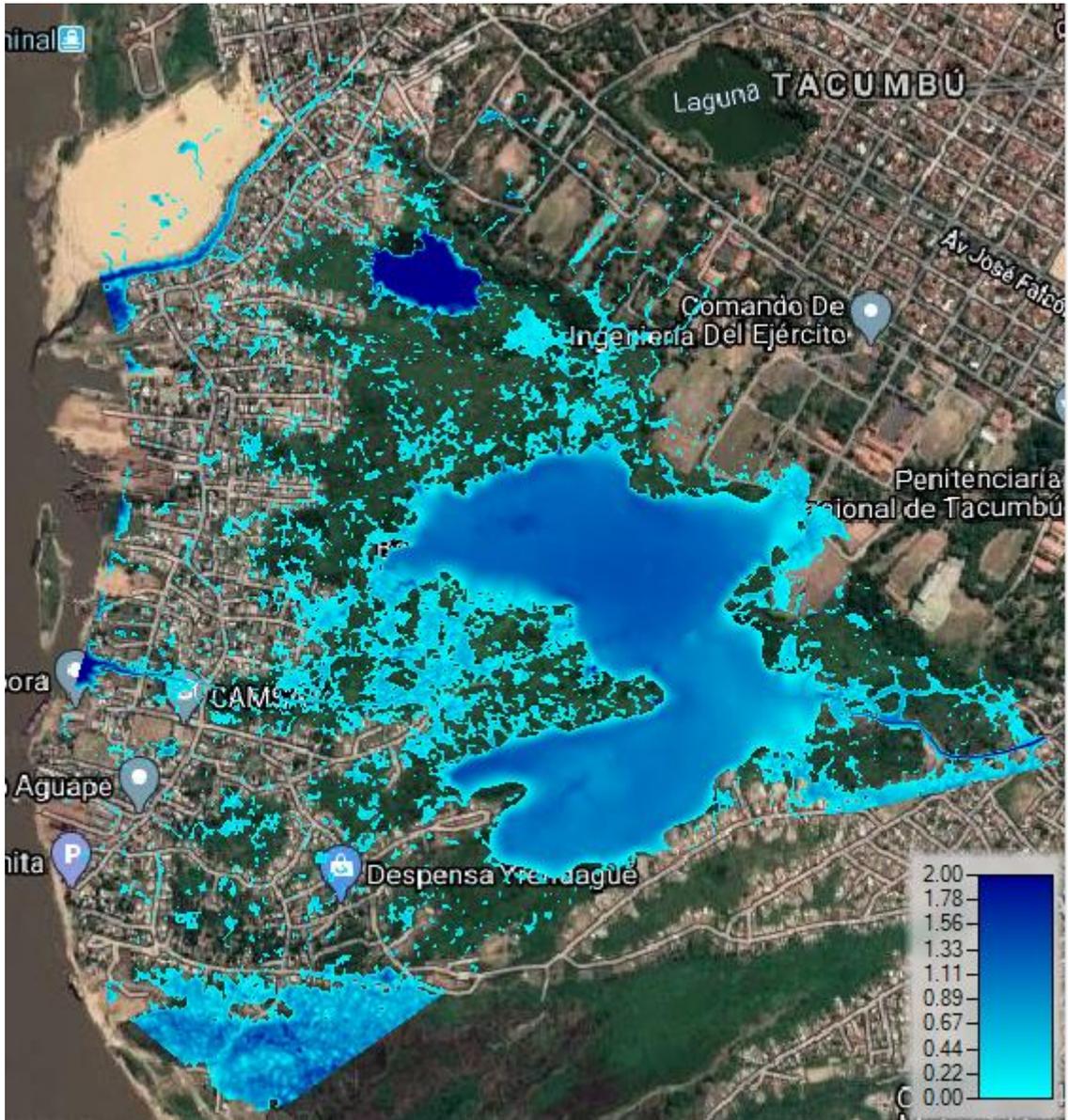


Figura 147 EscenarioRCP4.5_Natural_TR25

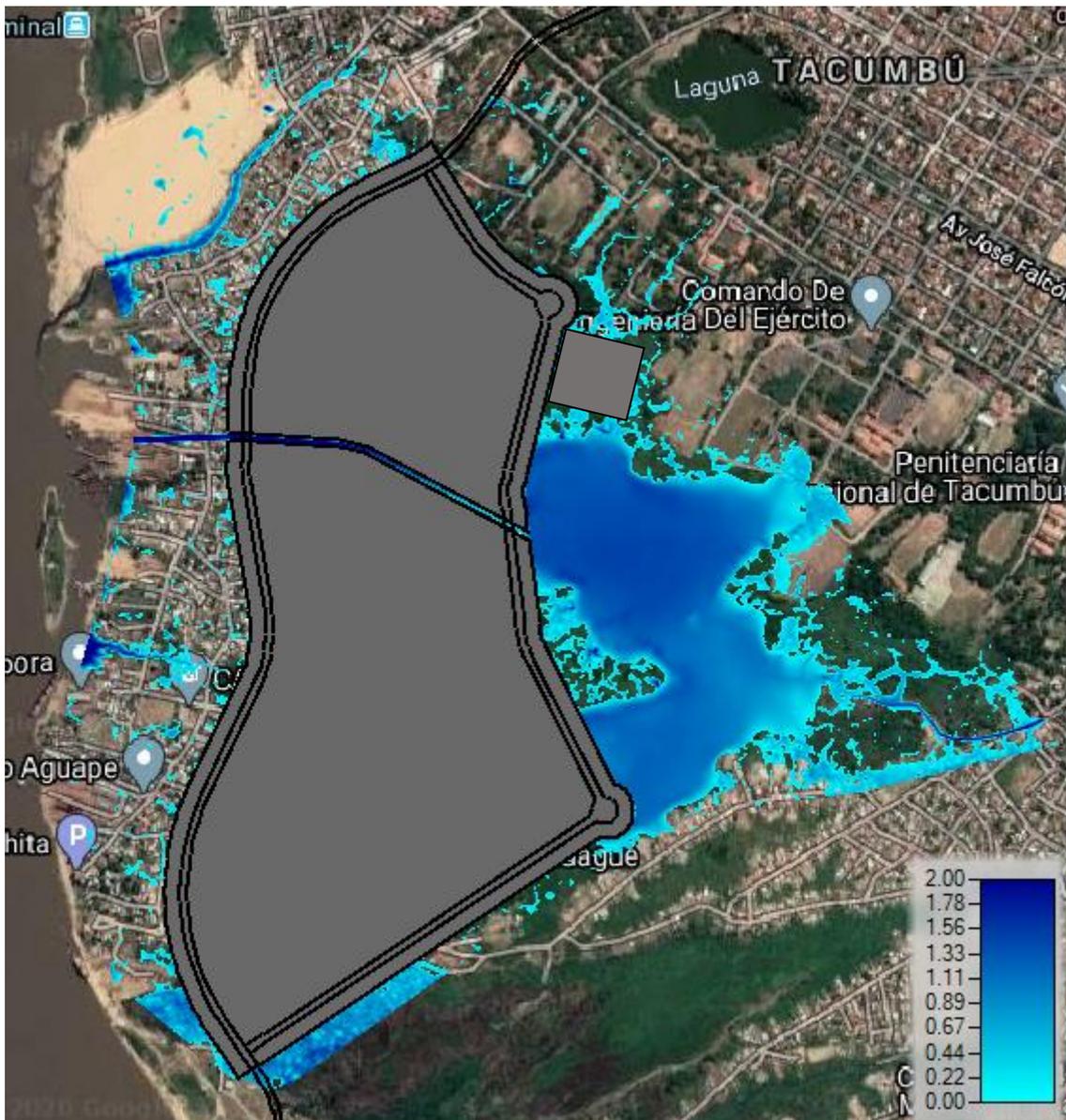


Figura 148 EscenarioRCP4.5_CanalNorte_TR25

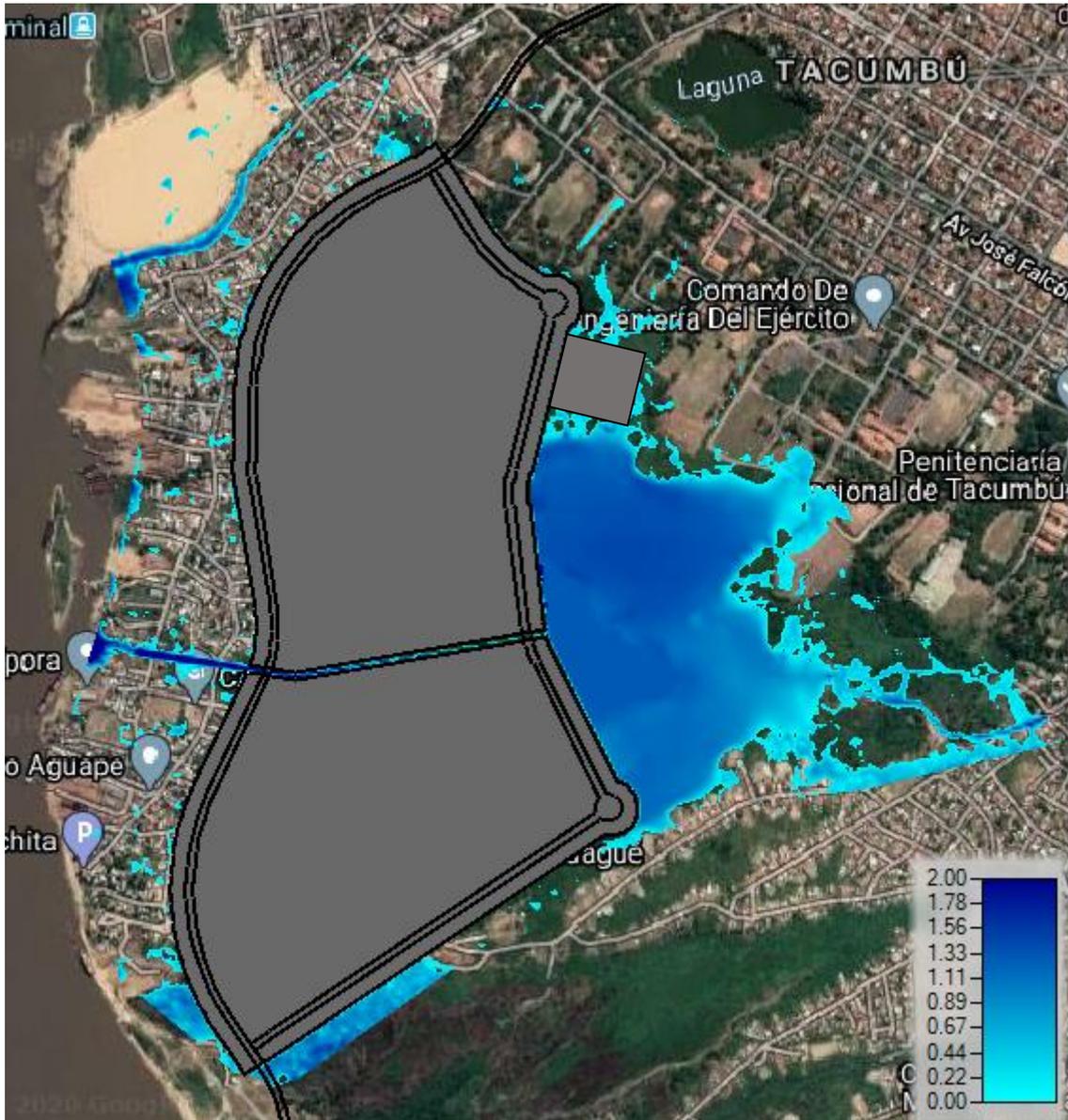


Figura 149 EscenarioRCP4.5_CanalCentral_TR25

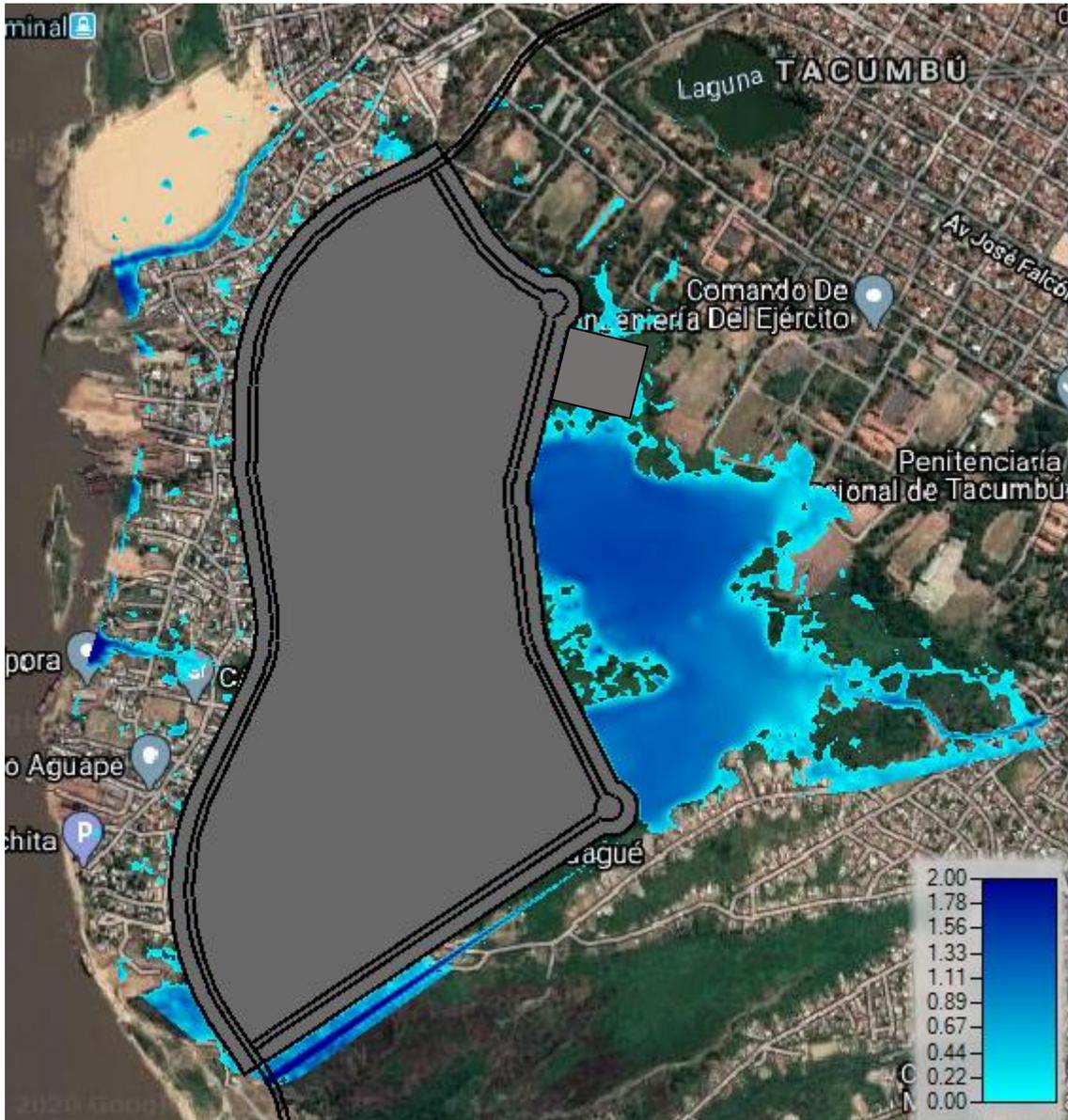


Figura 150 EscenarioRCP4.5_CanalSur_TR25

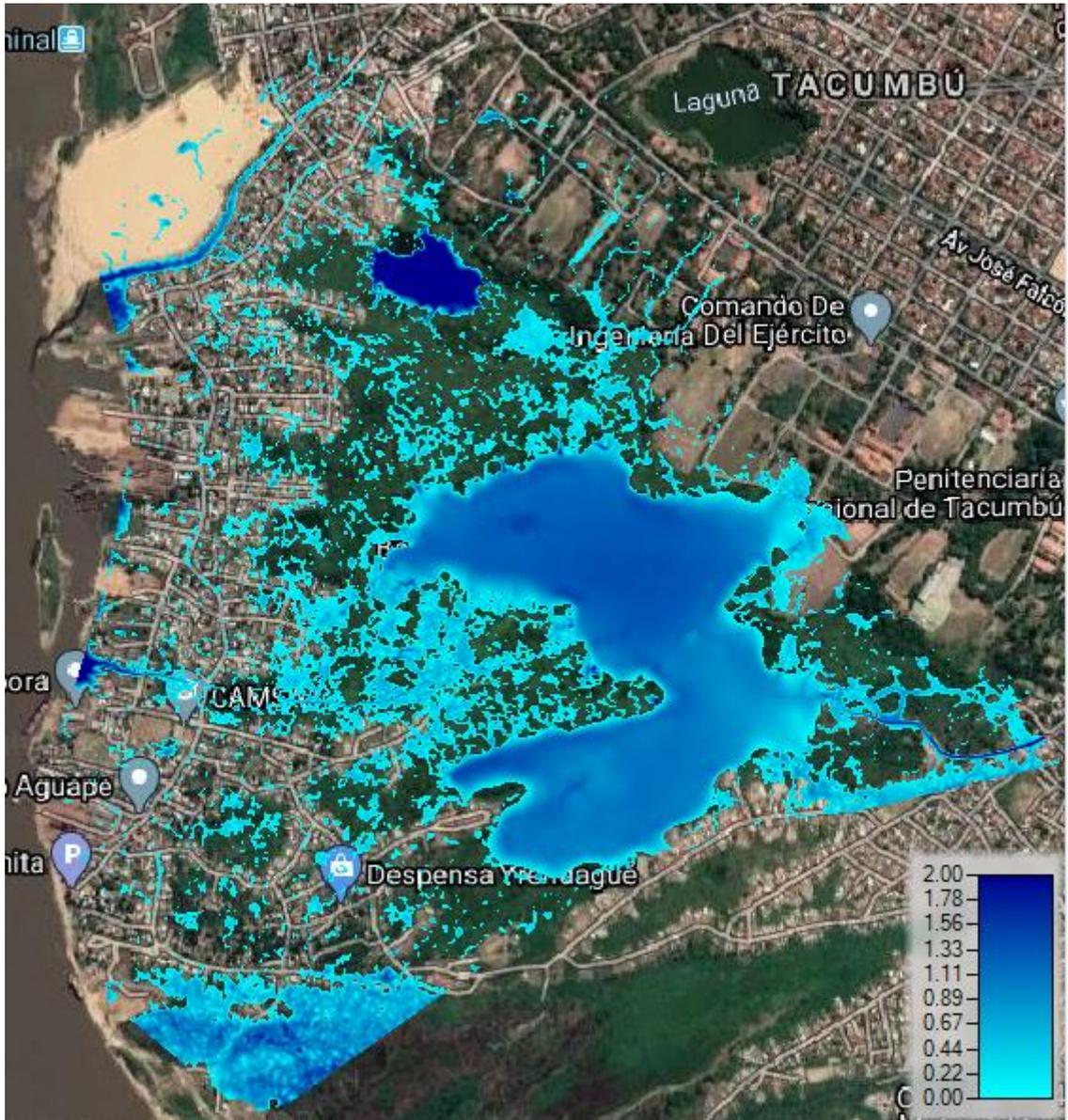


Figura 151 EscenarioRCP8.5_Natural_TR25

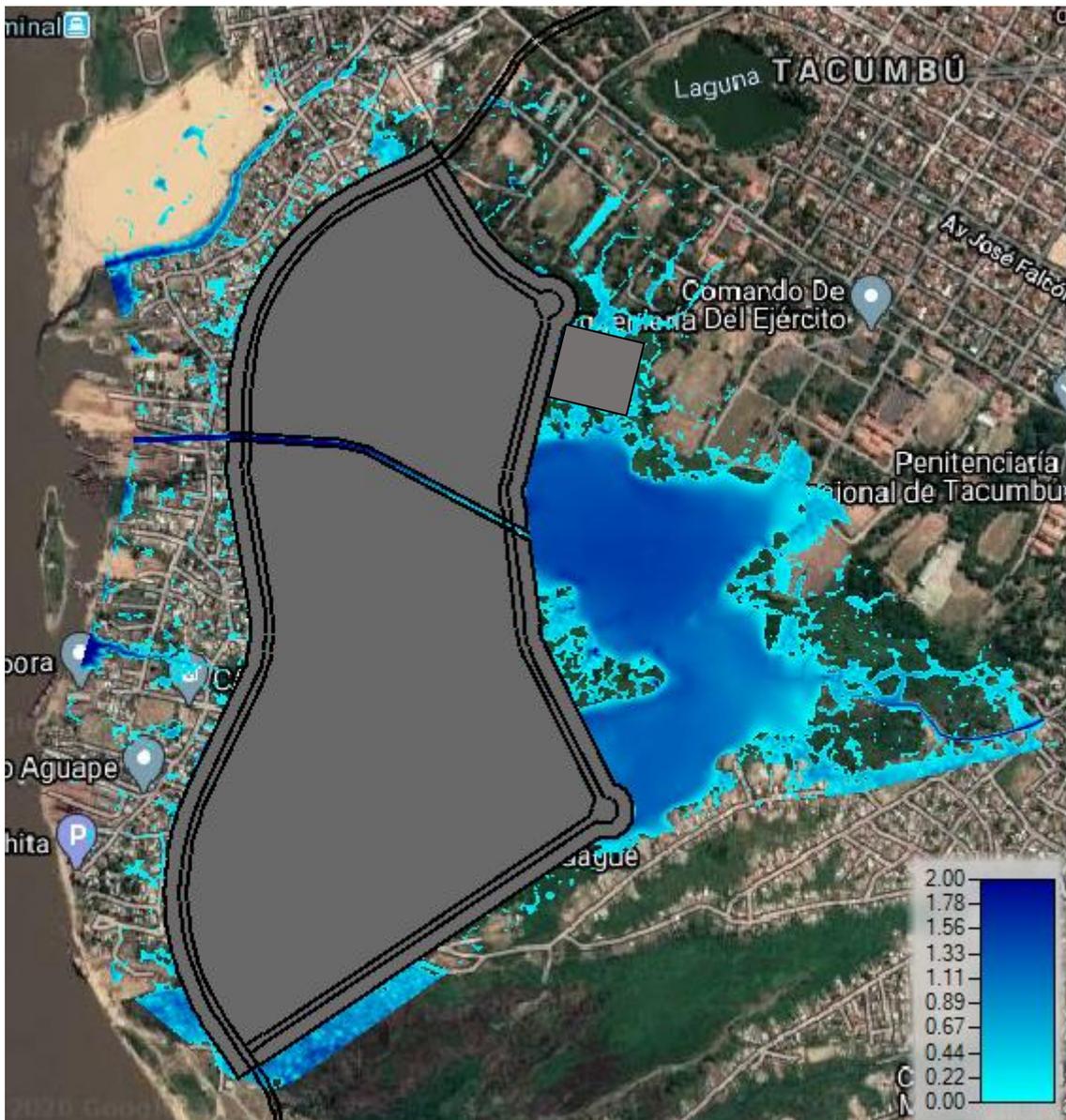


Figura 152 EscenarioRCP8.5_CanalNorte_TR25

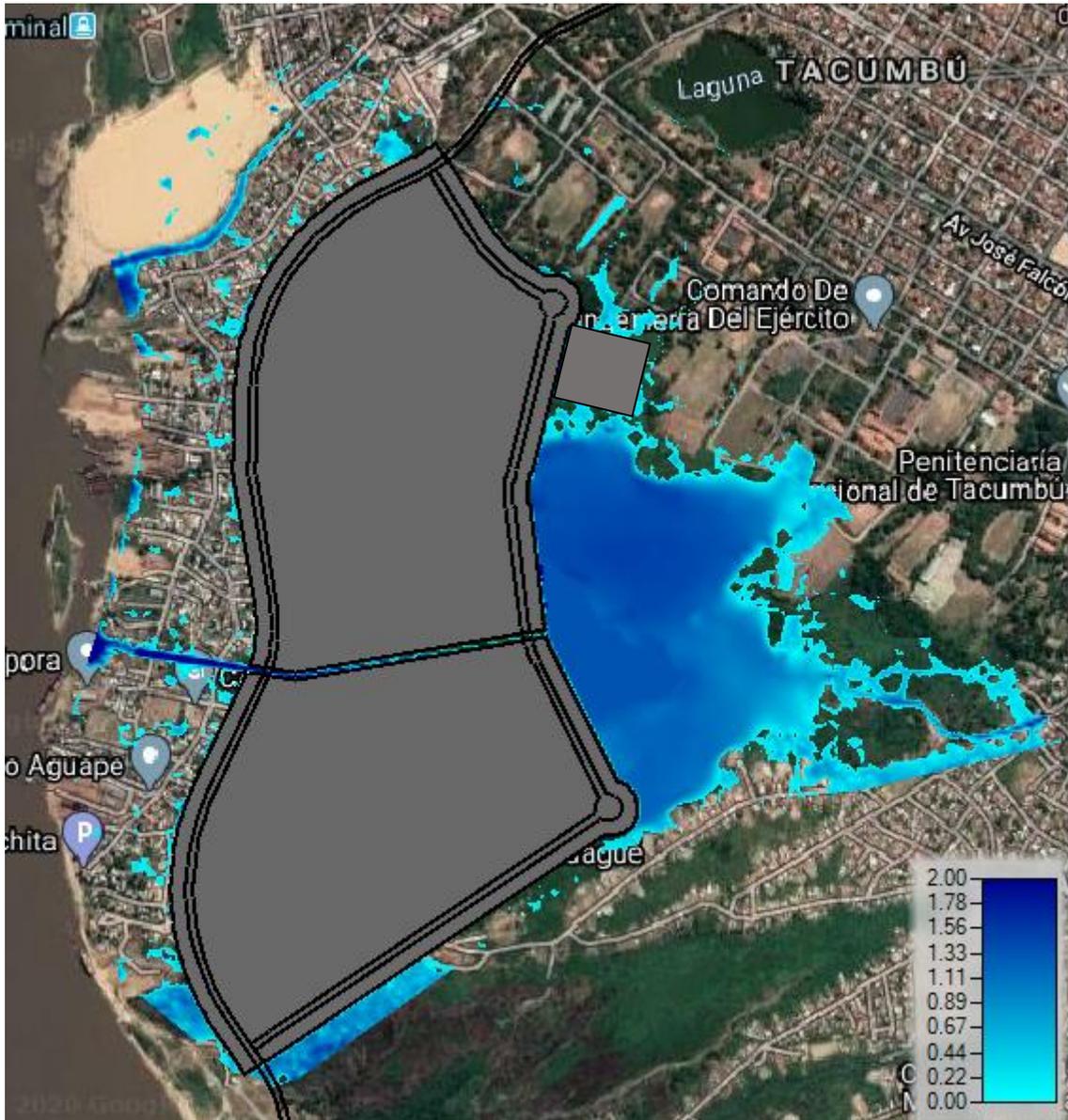


Figura 153 EscenarioRCP8.5_CanalCentral_TR25

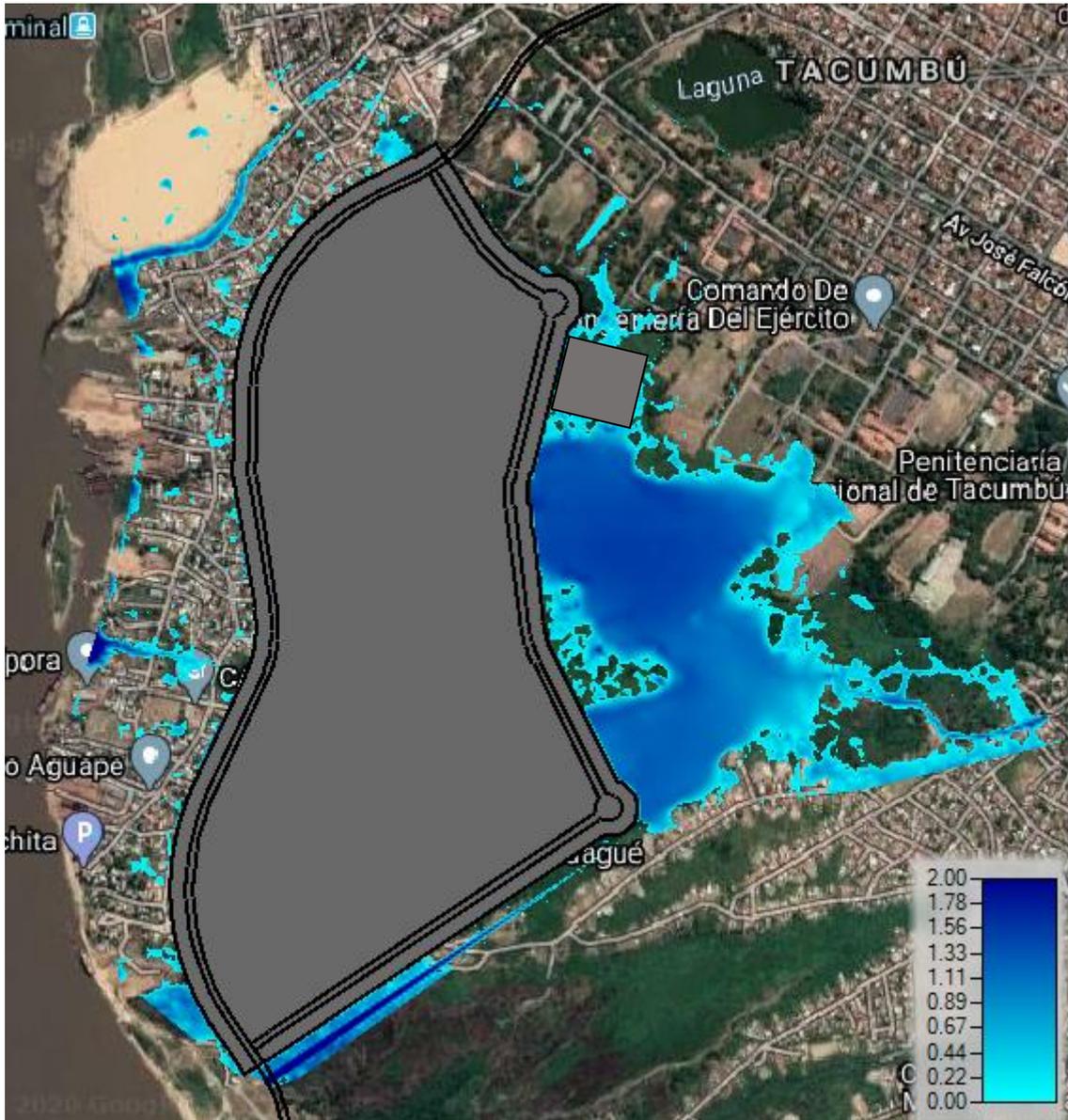


Figura 154 EscenarioRCP8.5_CanalSur_TR25

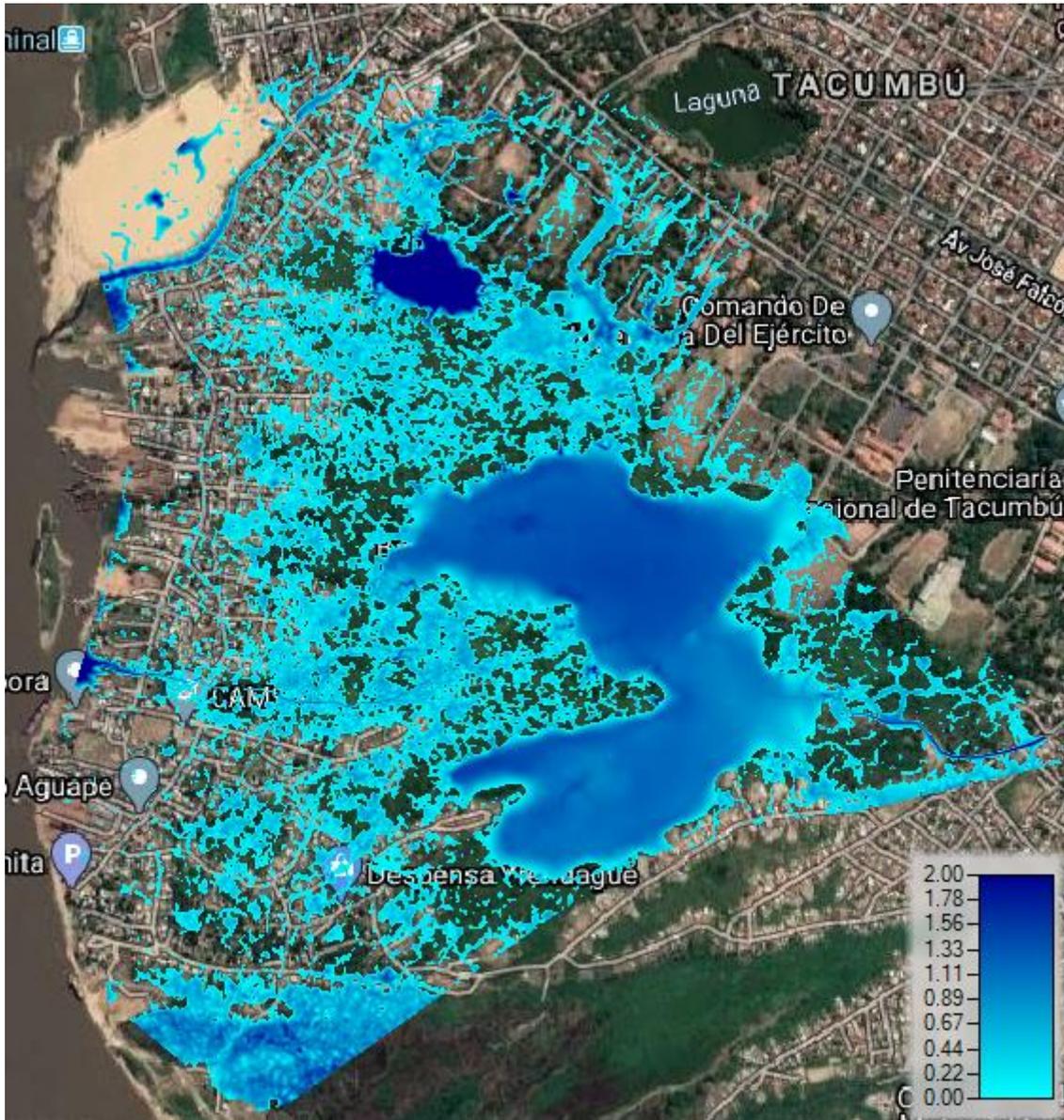


Figura 155 EscenarioActual_Natural_TR50

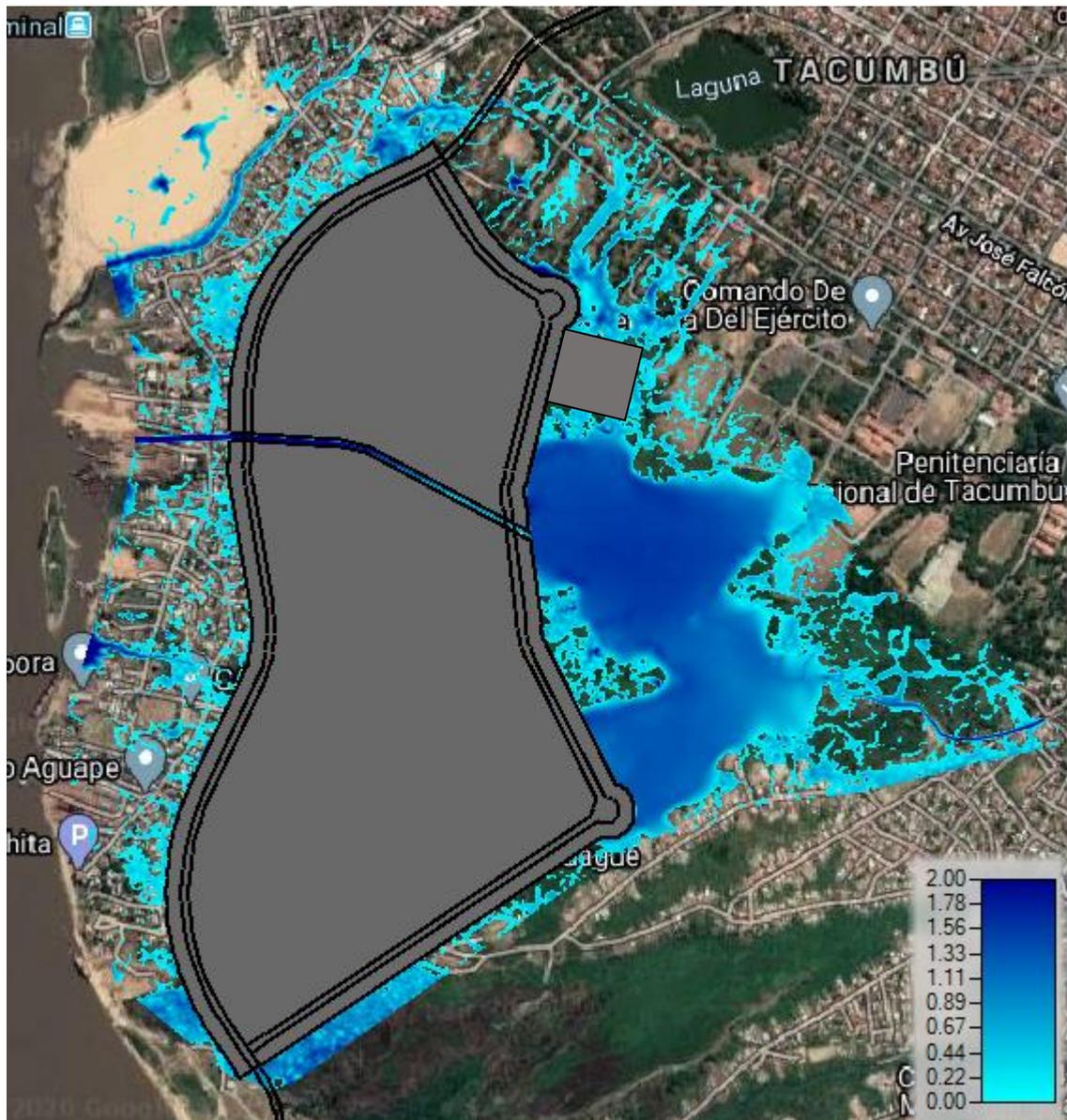


Figura 156 EscenarioActual_CanalNorte_TR50

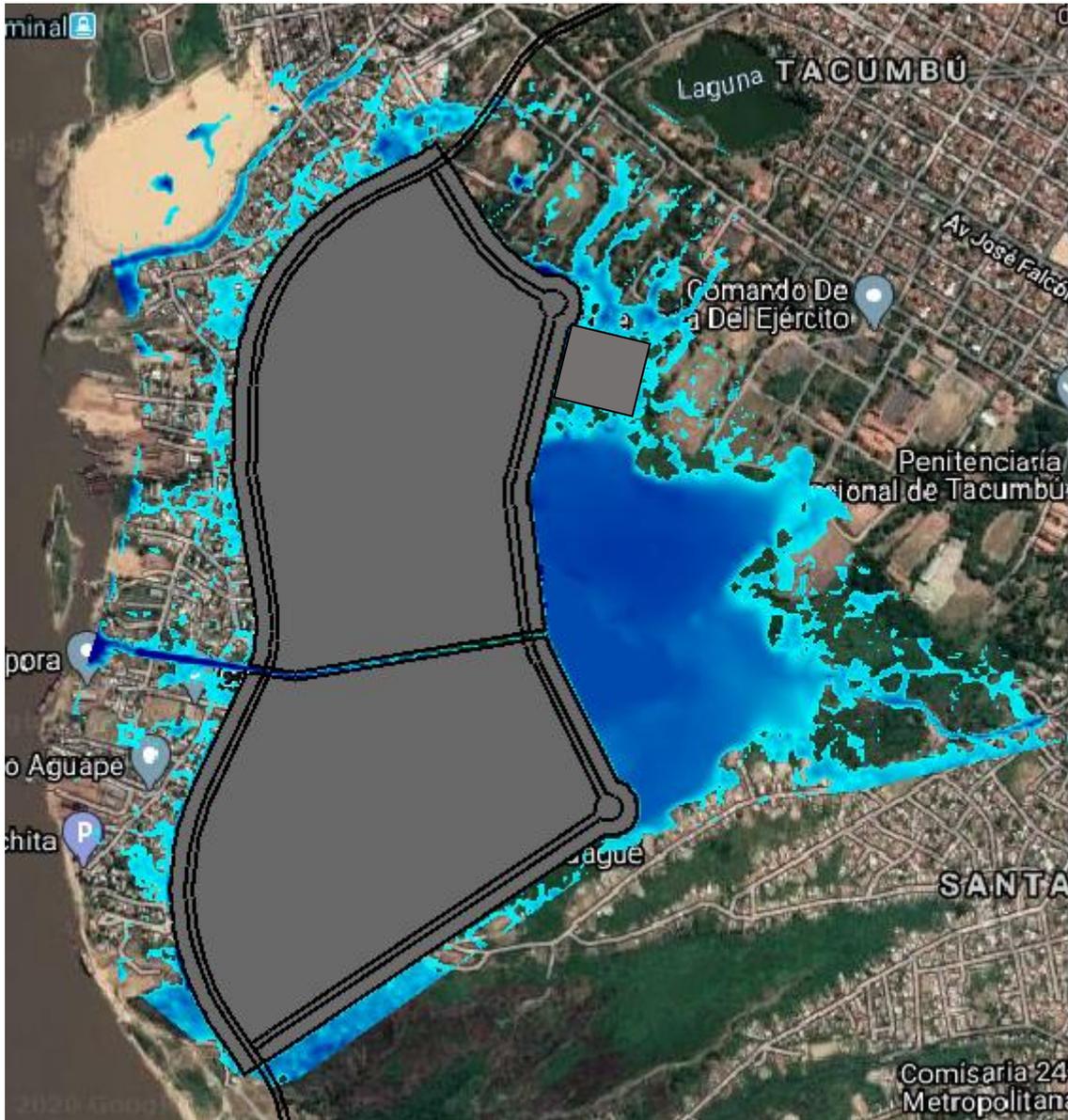


Figura 157 EscenarioActual_CanalCentral_TR50

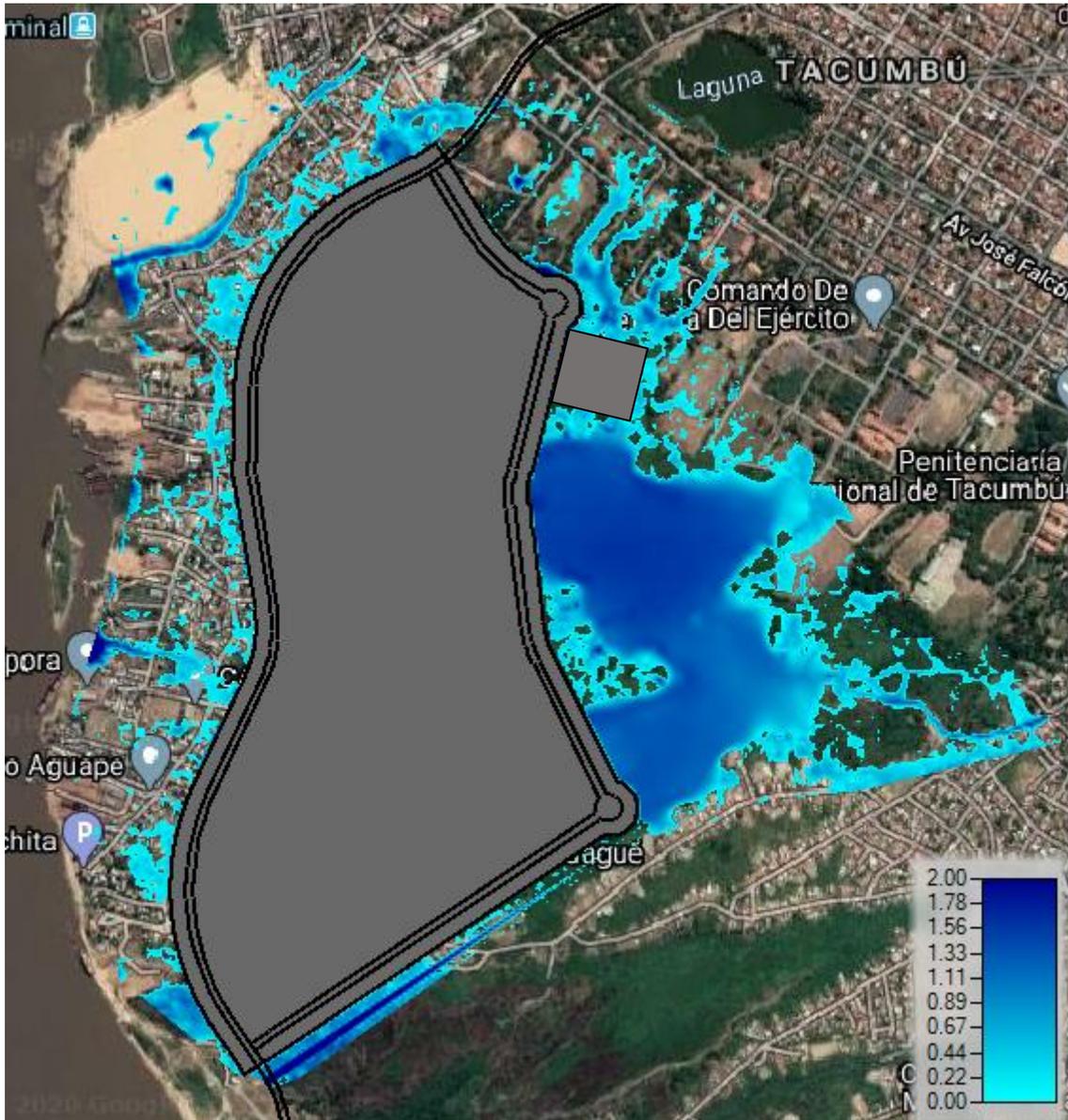


Figura 158 EscenarioActual_CanalSur_TR50

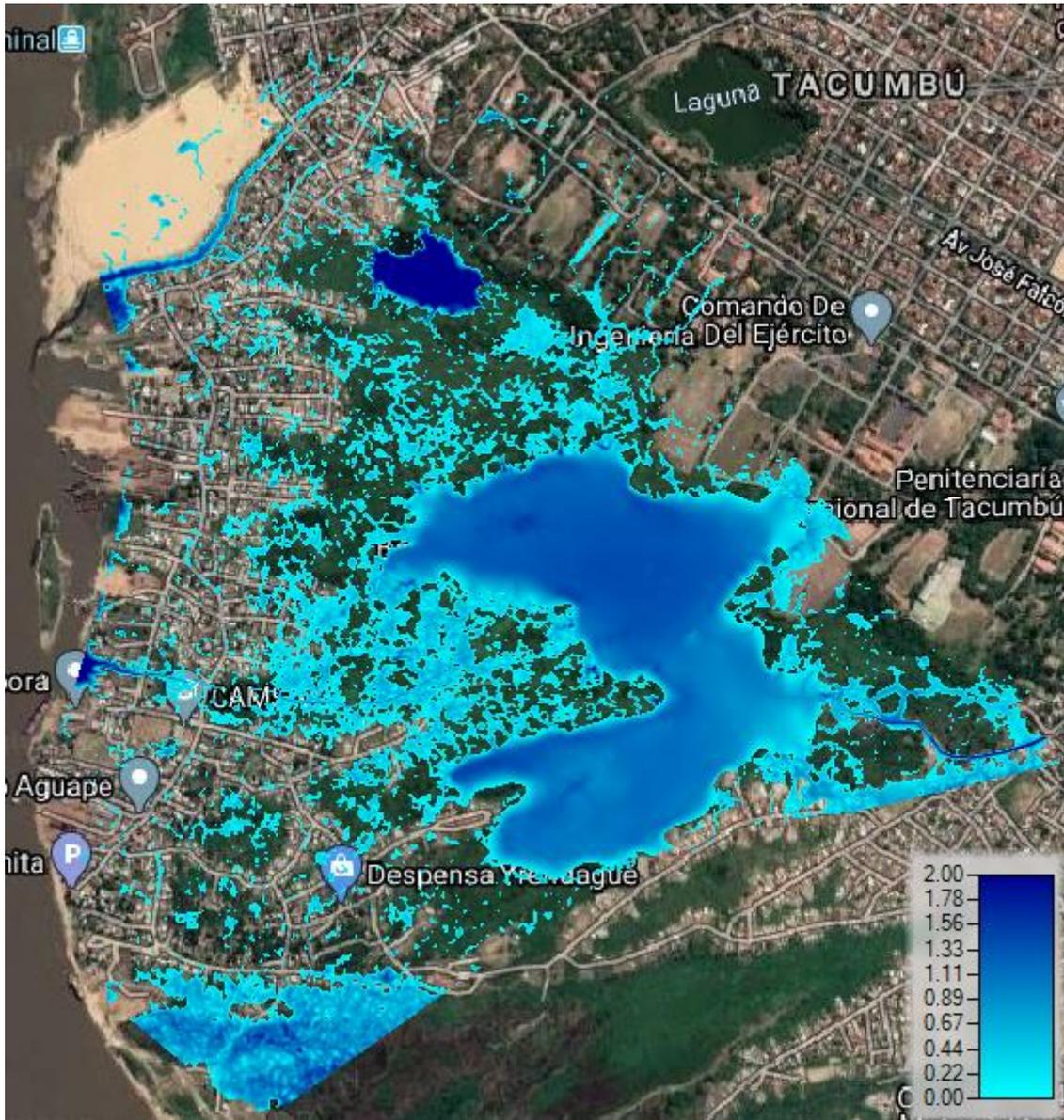


Figura 159 EscenarioRCP4.5_Natural_TR50

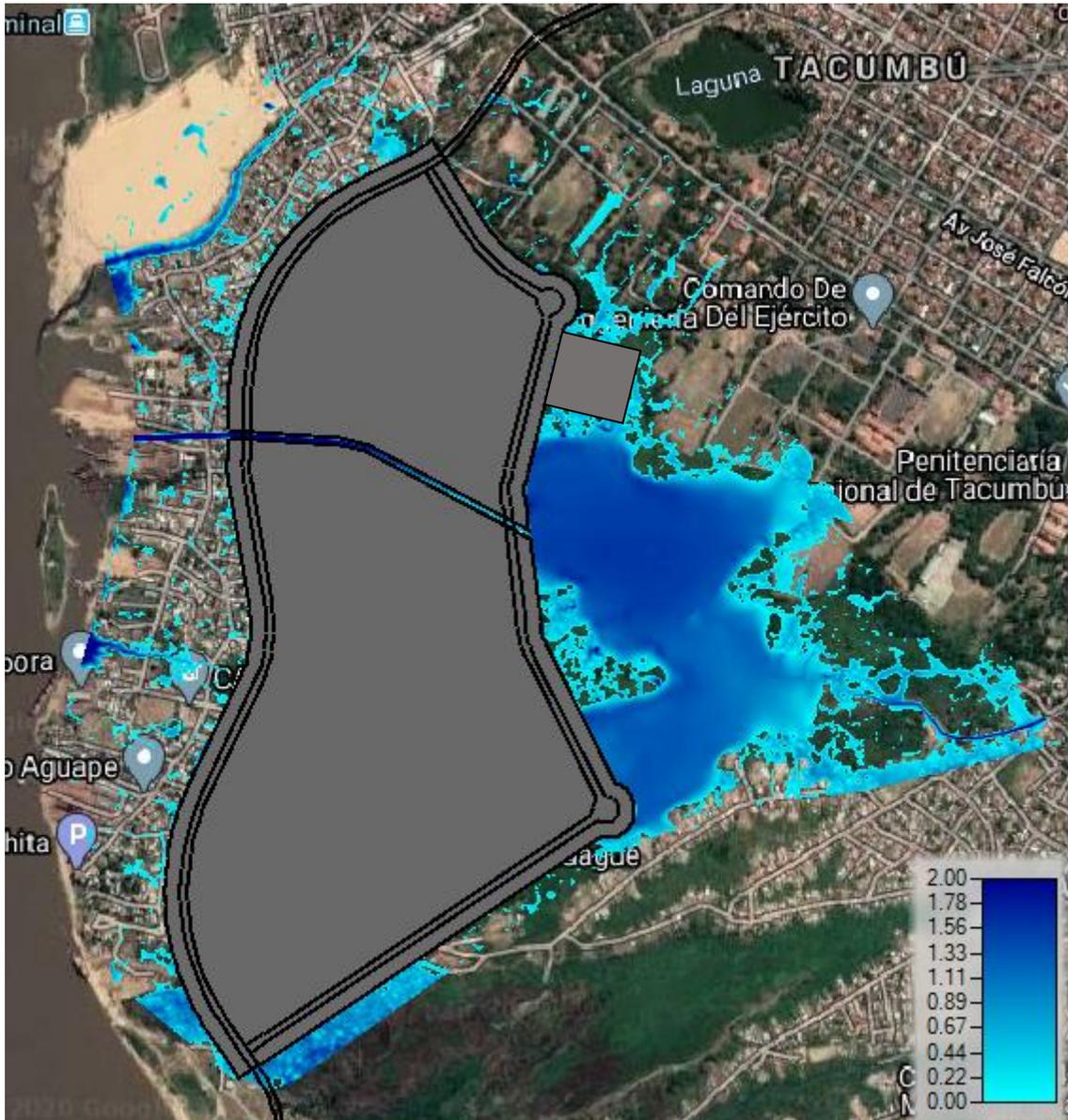


Figura 160 EscenarioRCP4.5_CanalNorte_TR50

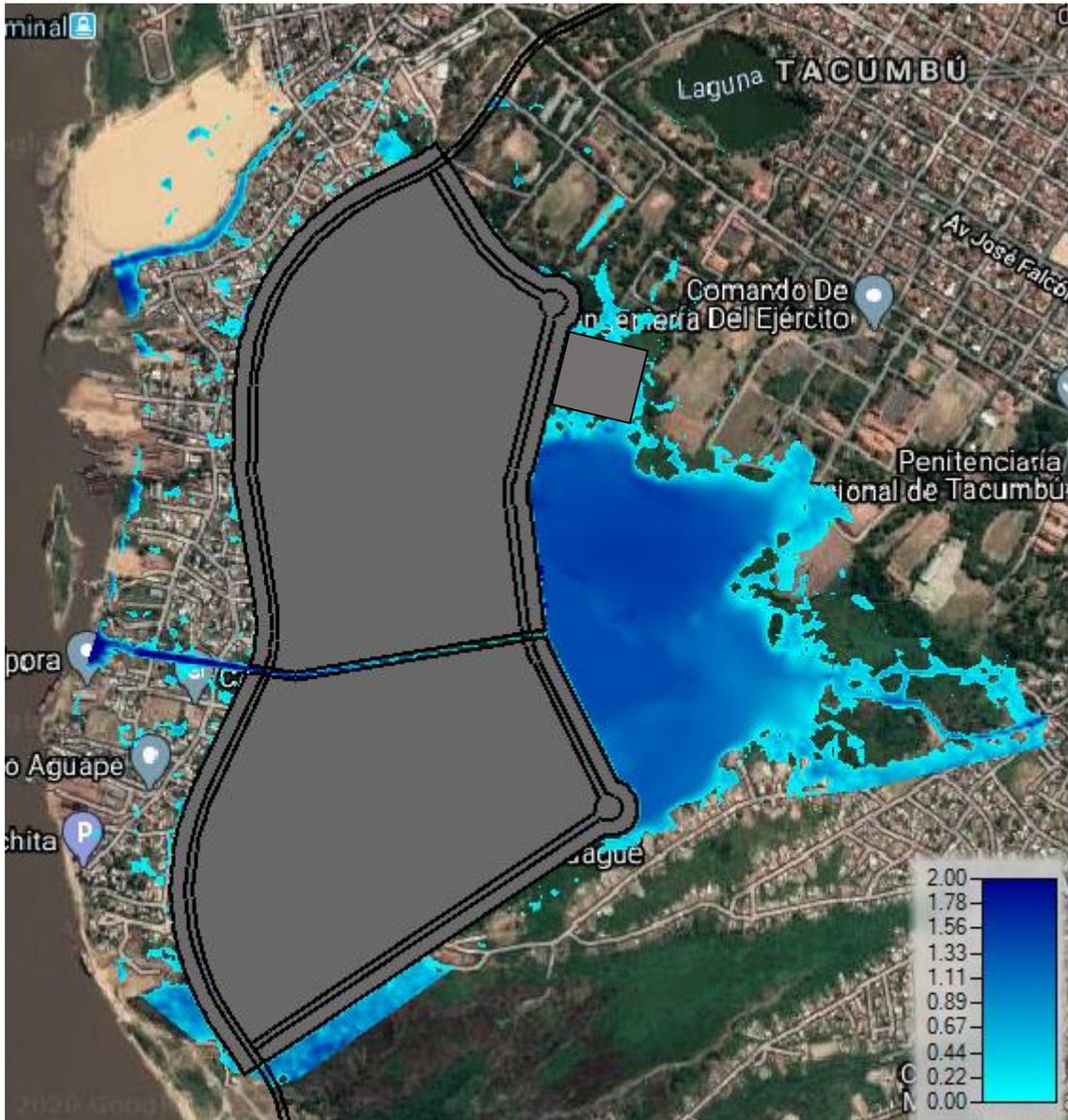


Figura 161 EscenarioRCP4.5_CanalCentral_TR50

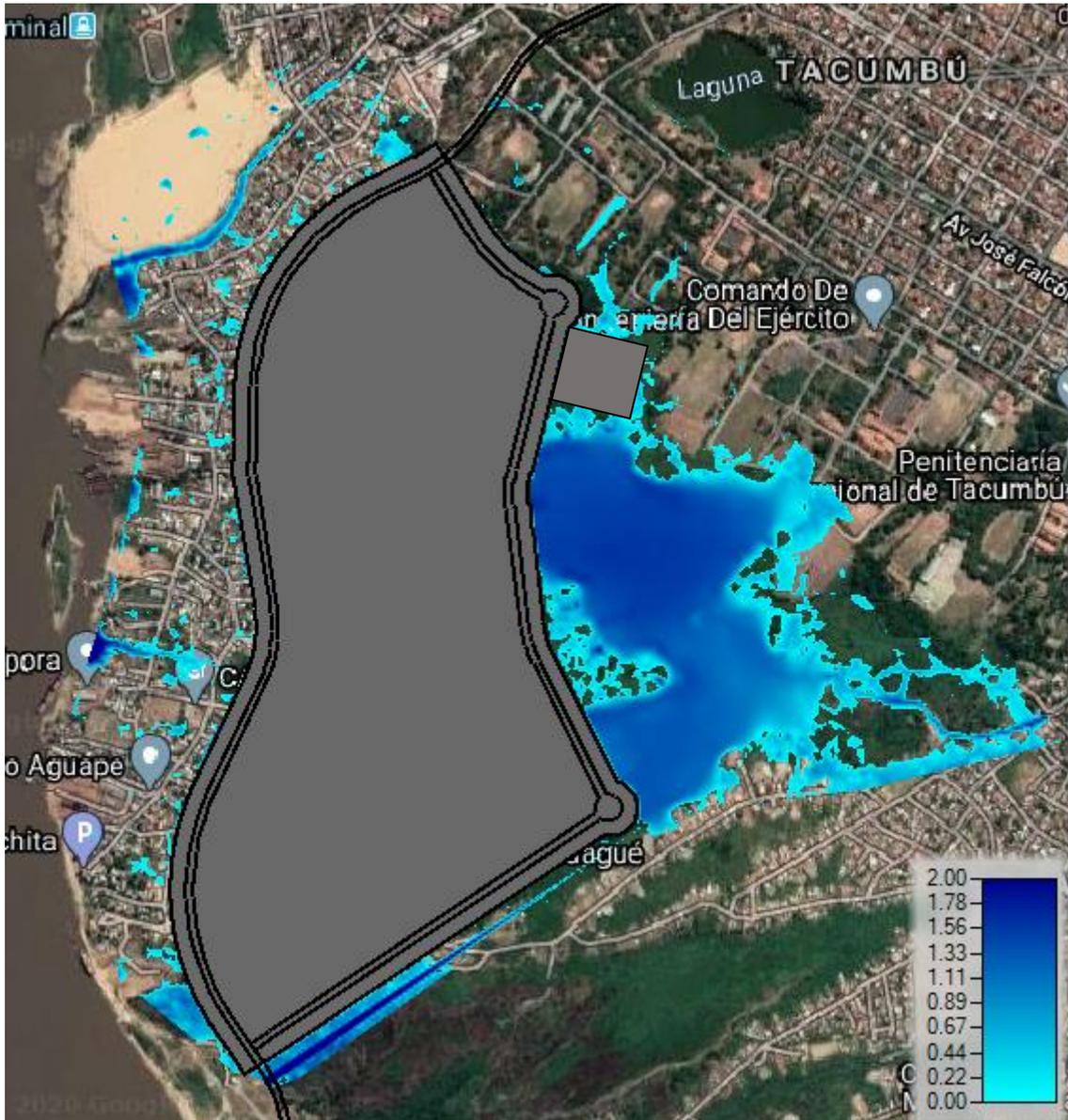


Figura 162 EscenarioRCP4.5_CanalSur_TR50

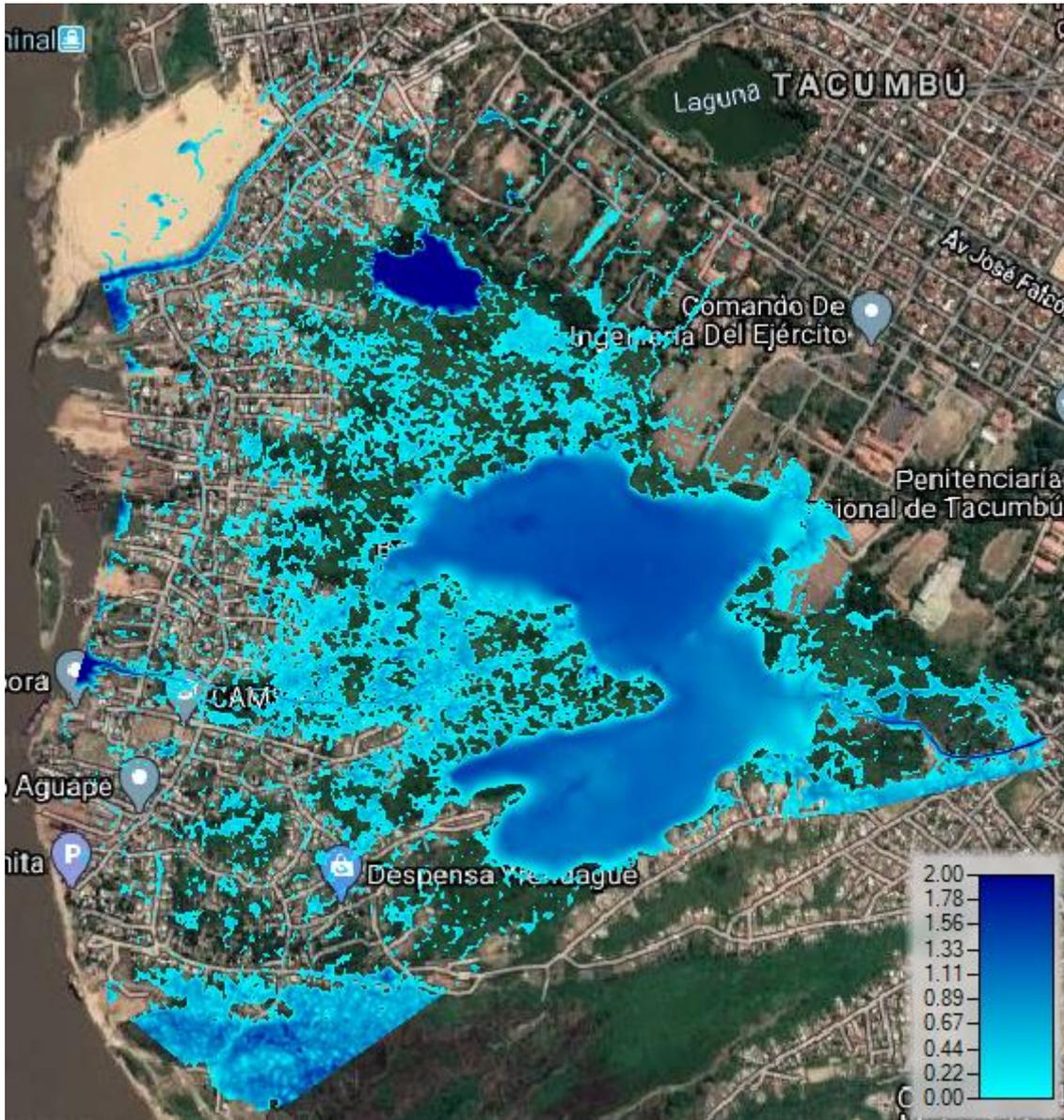


Figura 163 EscenarioRCP8.5_Natural_TR50

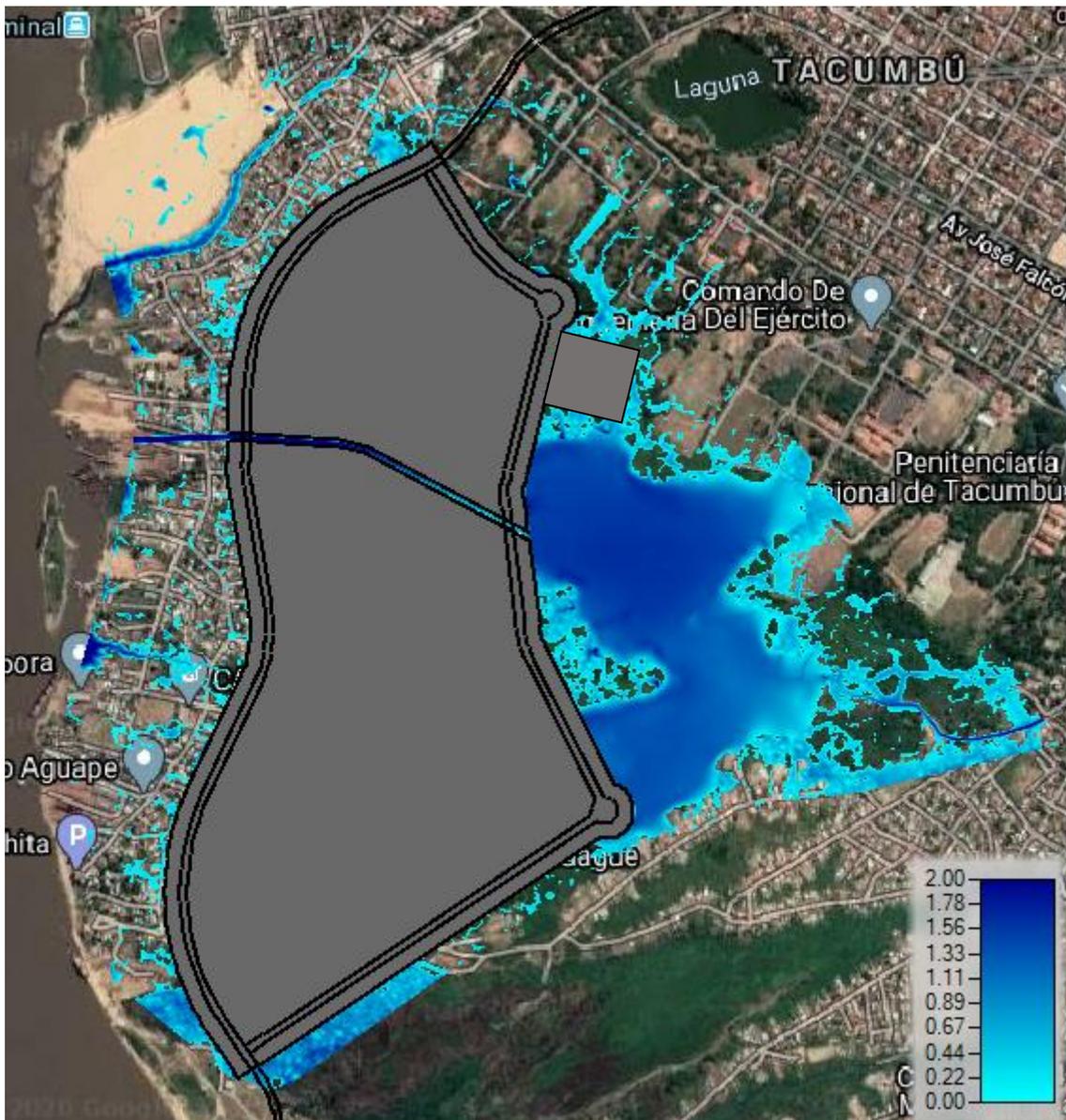


Figura 164 EscenarioRCP8.5_CanalNorte_TR50

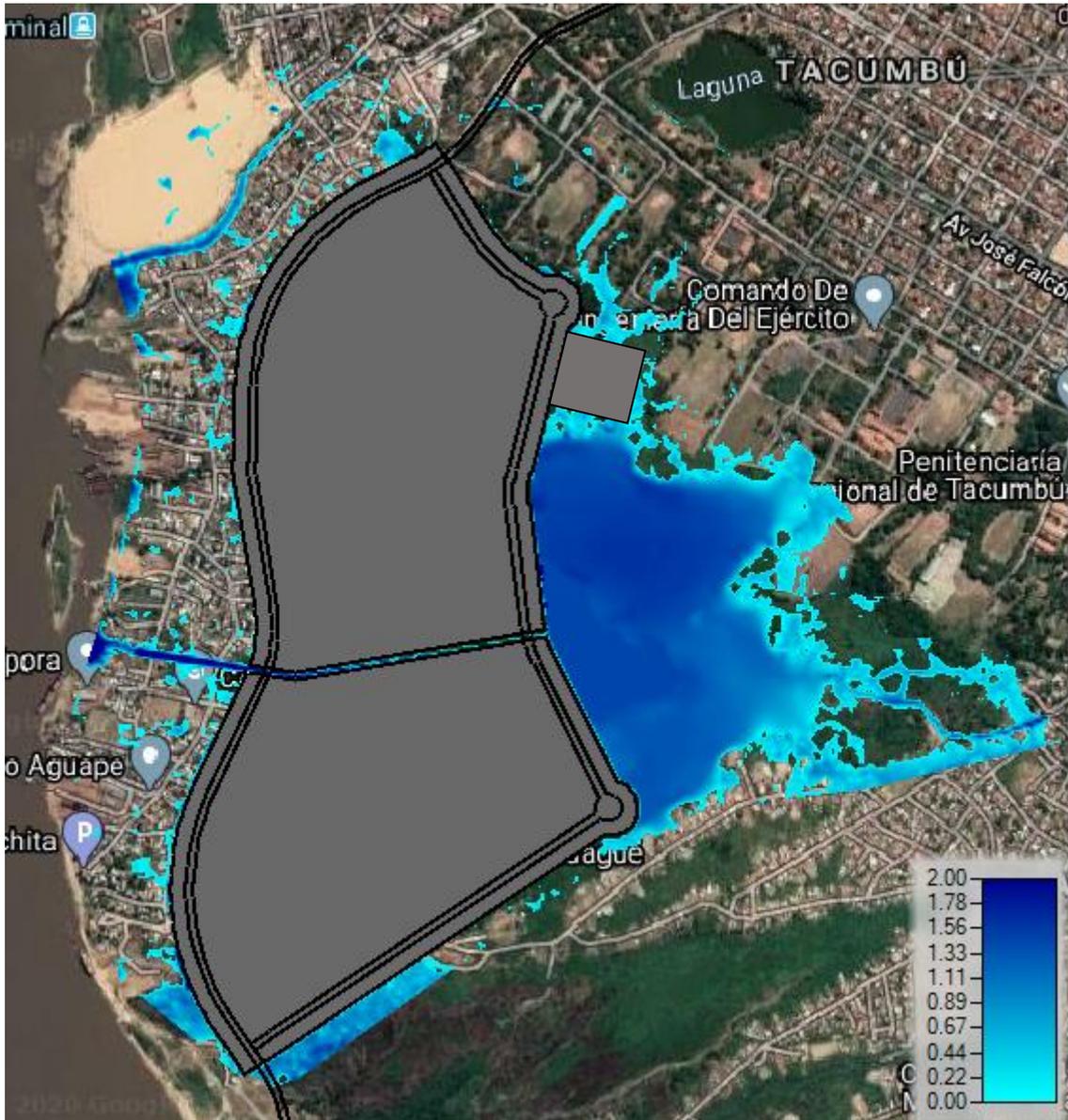


Figura 165 EscenarioRCP8.5_CanalCentral_TR50

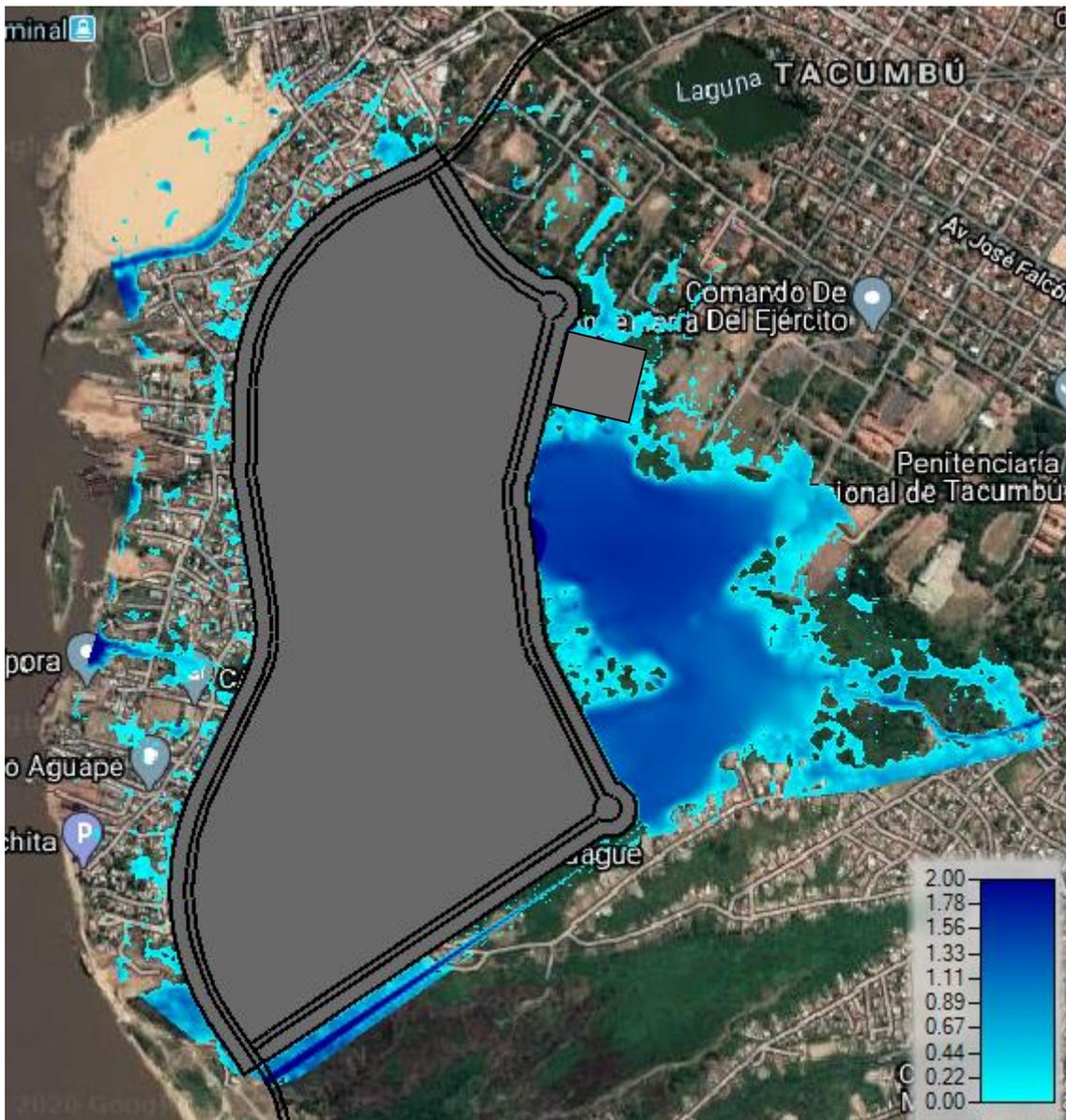


Figura 166 EscenarioRCP8.5_CanalSur_TR50

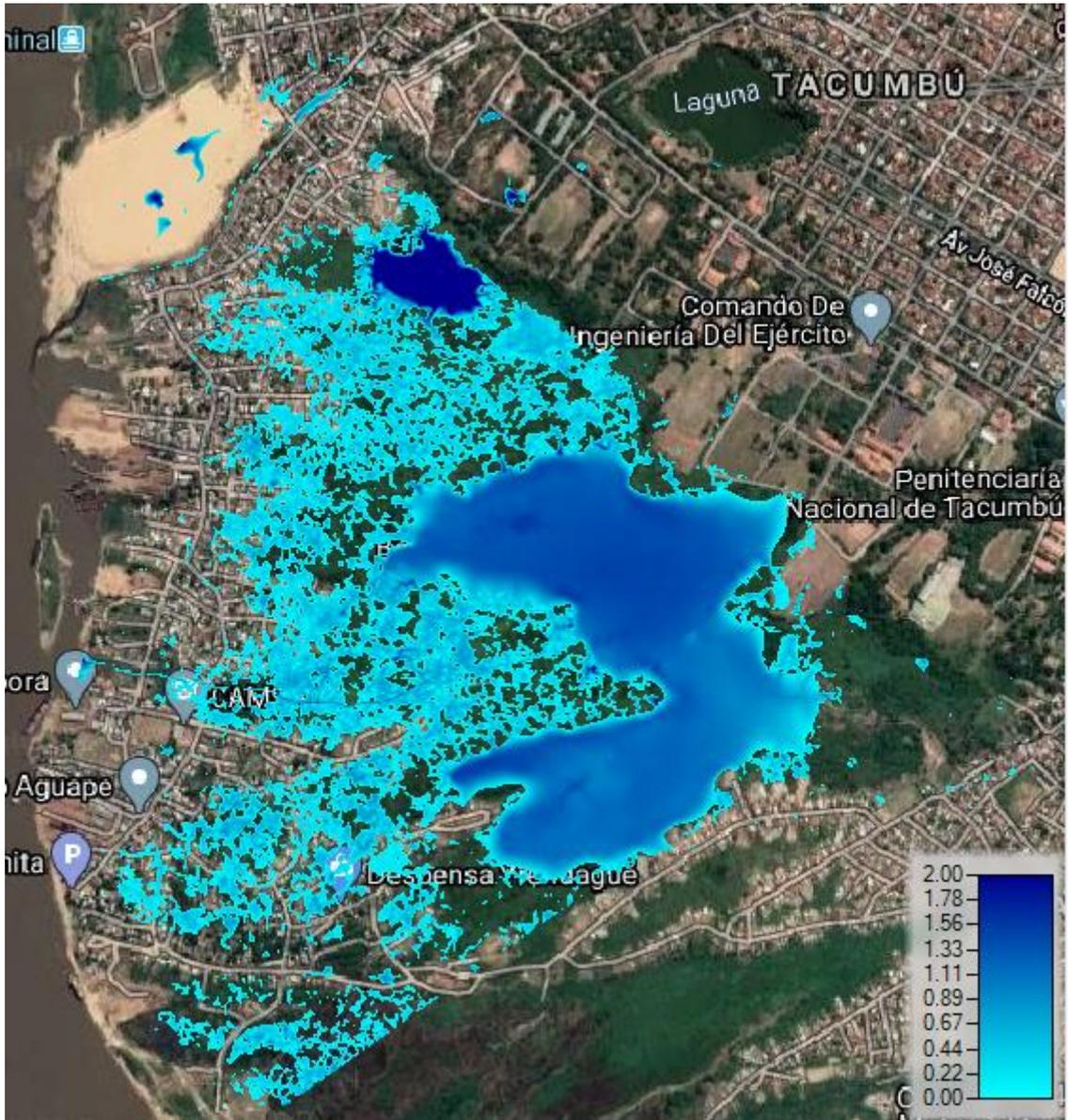


Figura 167 EscenarioActual_Natural_TR100



Figura 168 EscenarioActual_CanalNorte_TR100

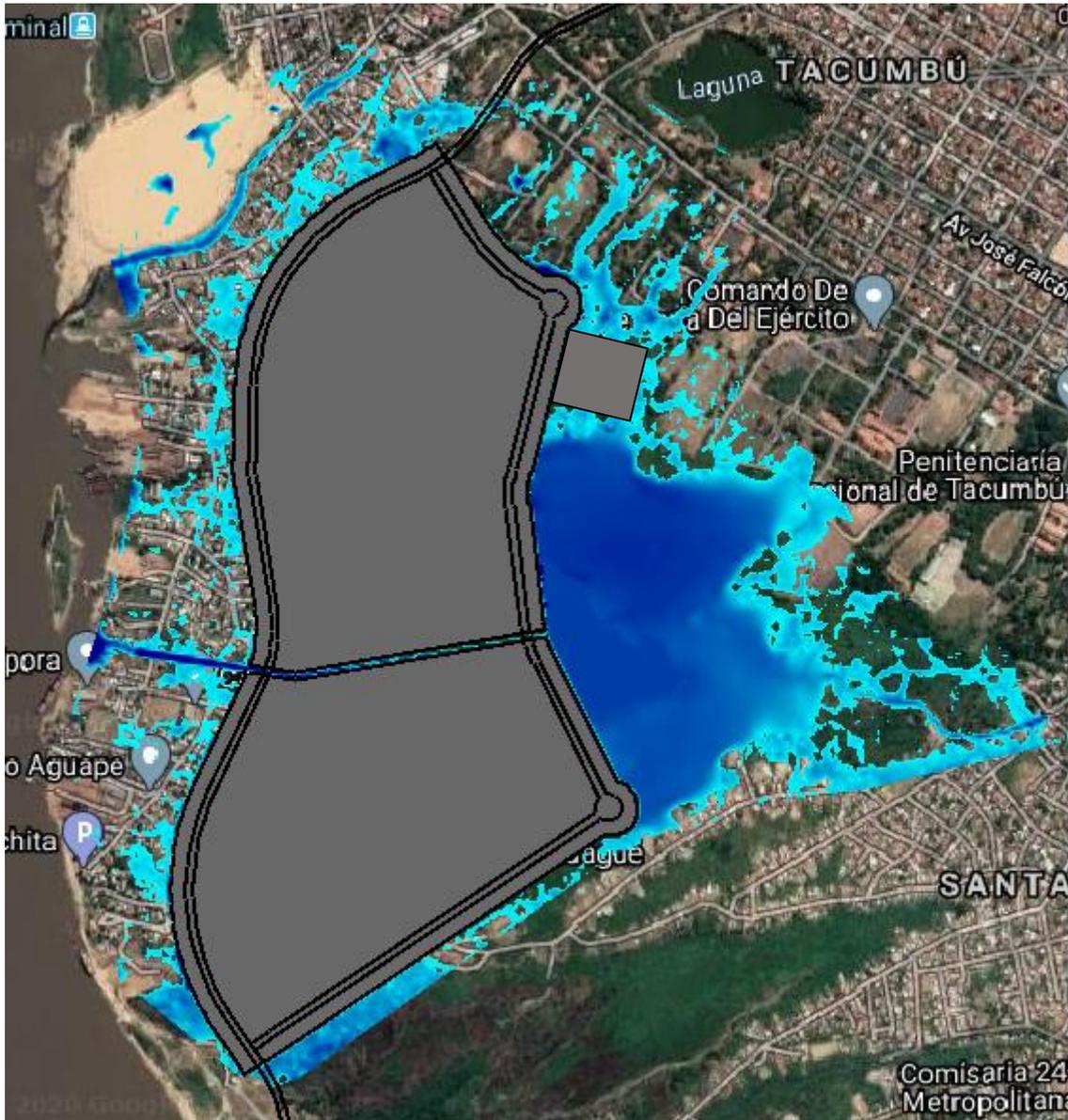


Figura 169 EscenarioActual_CanalCentral_TR100

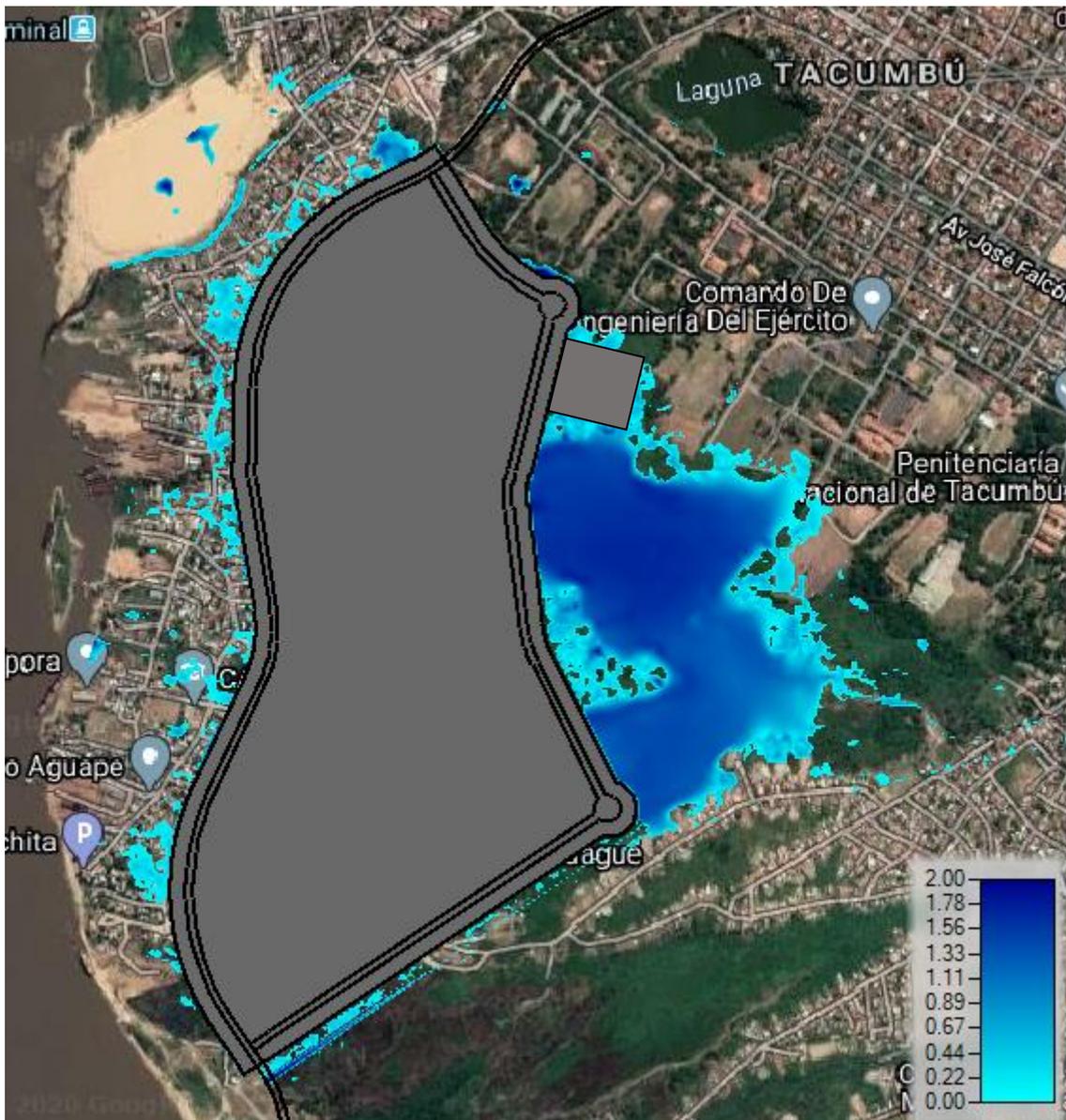


Figura 170 EscenarioActual_CanalSur_TR100

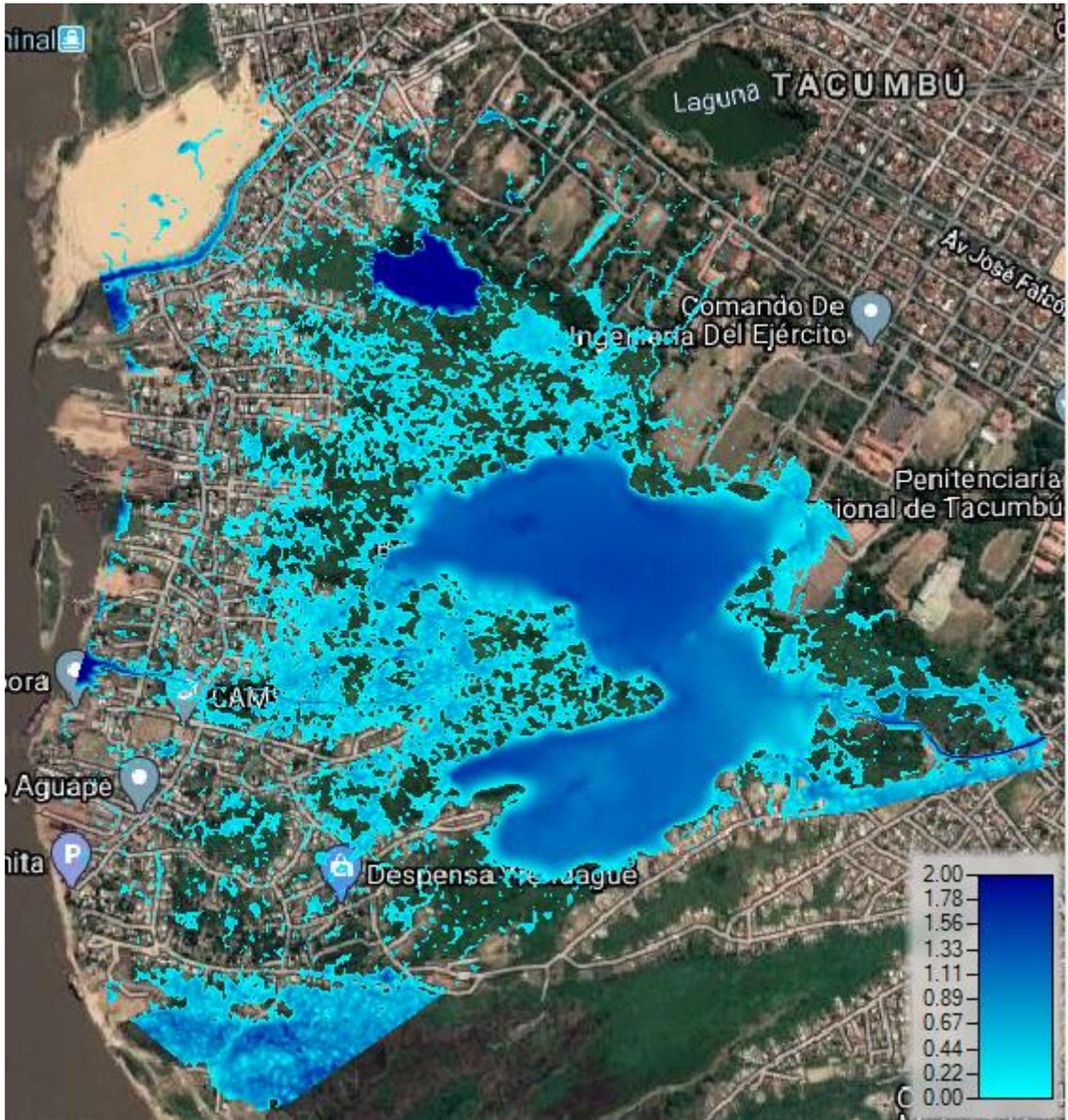


Figura 171 EscenarioRCP4.5_Natural_TR100

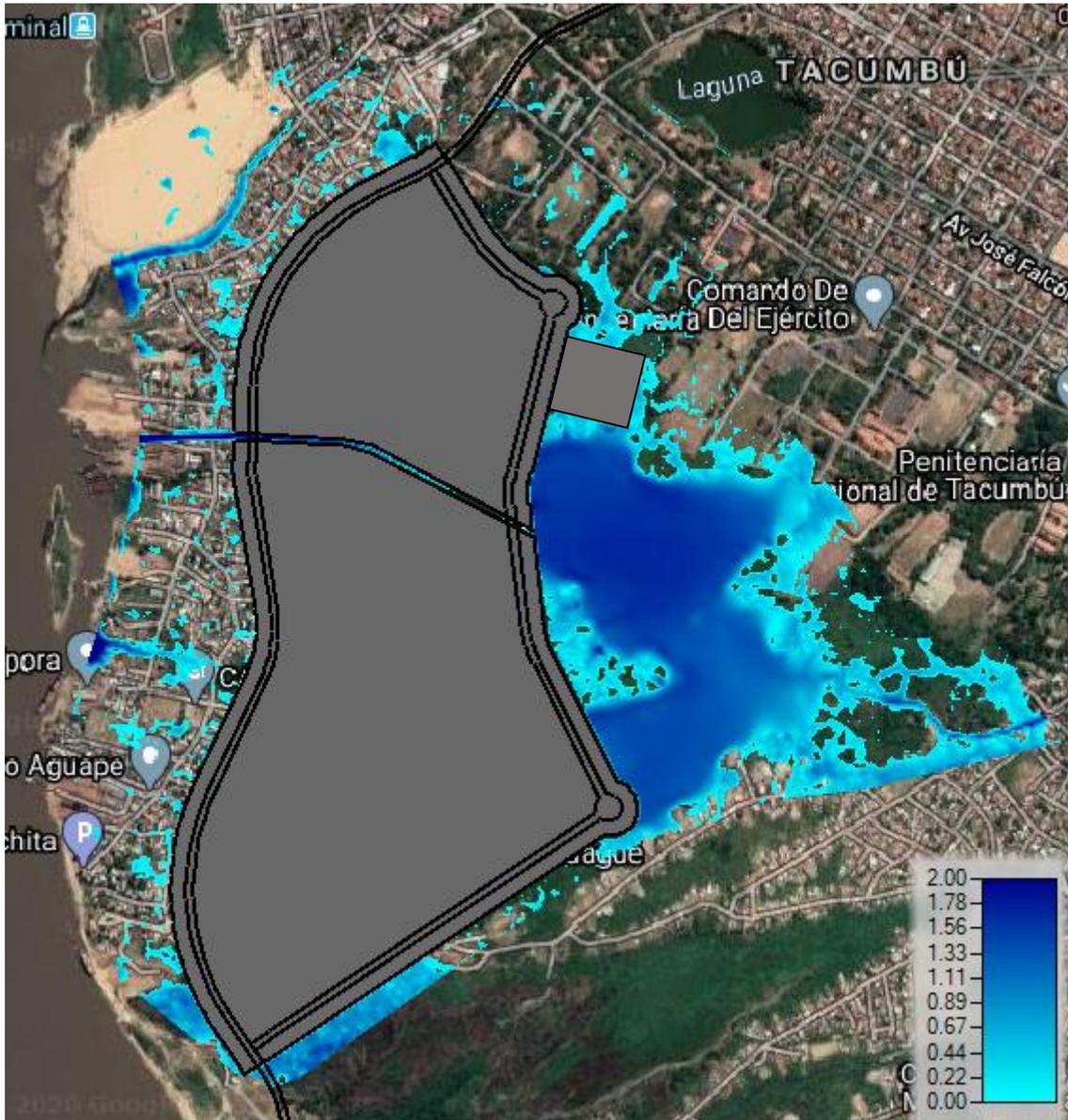


Figura 172 EscenarioRCP4.5_CanalNorte_TR100

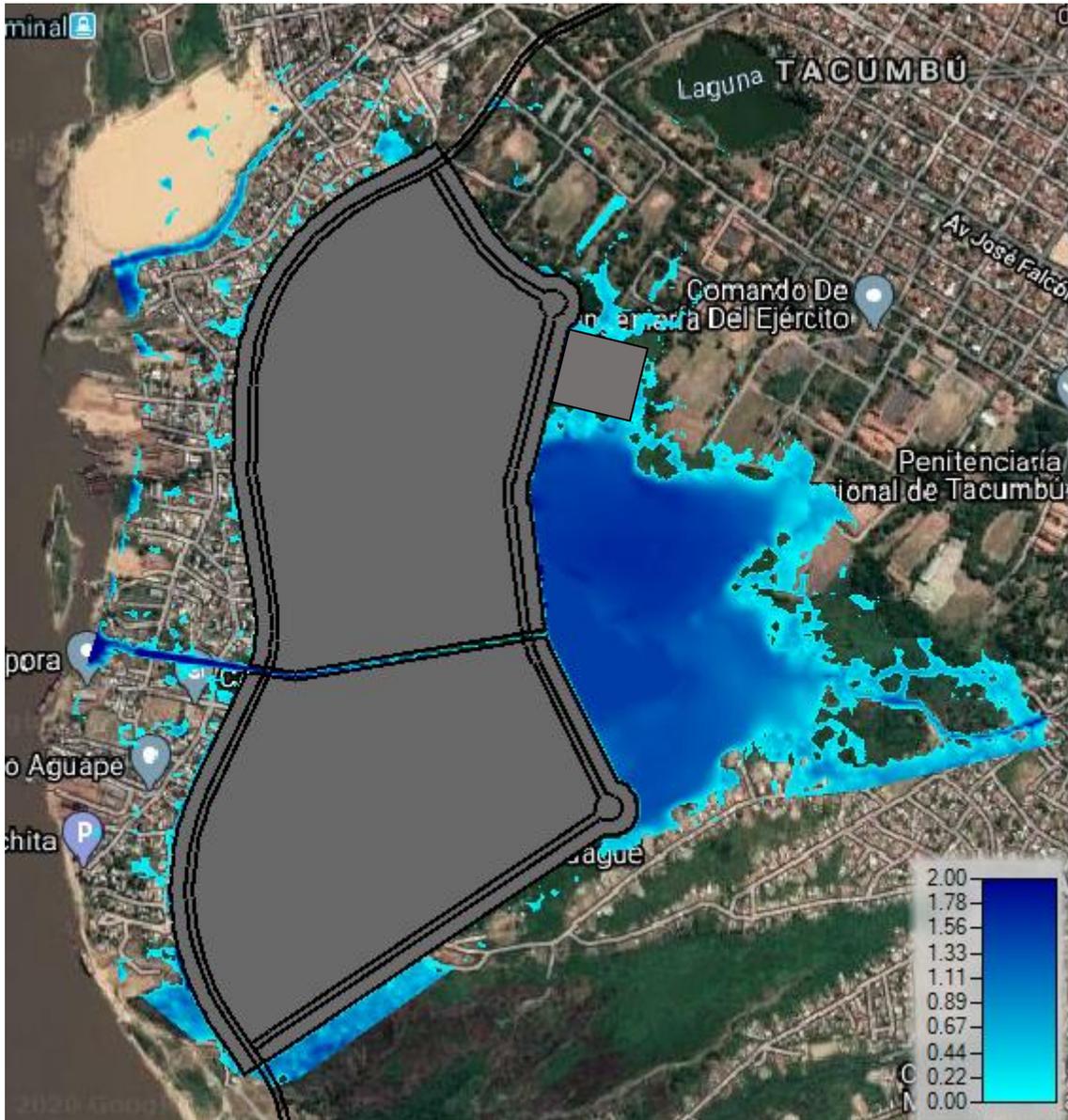


Figura 173 EscenarioRCP4.5_CanalCentral_TR100

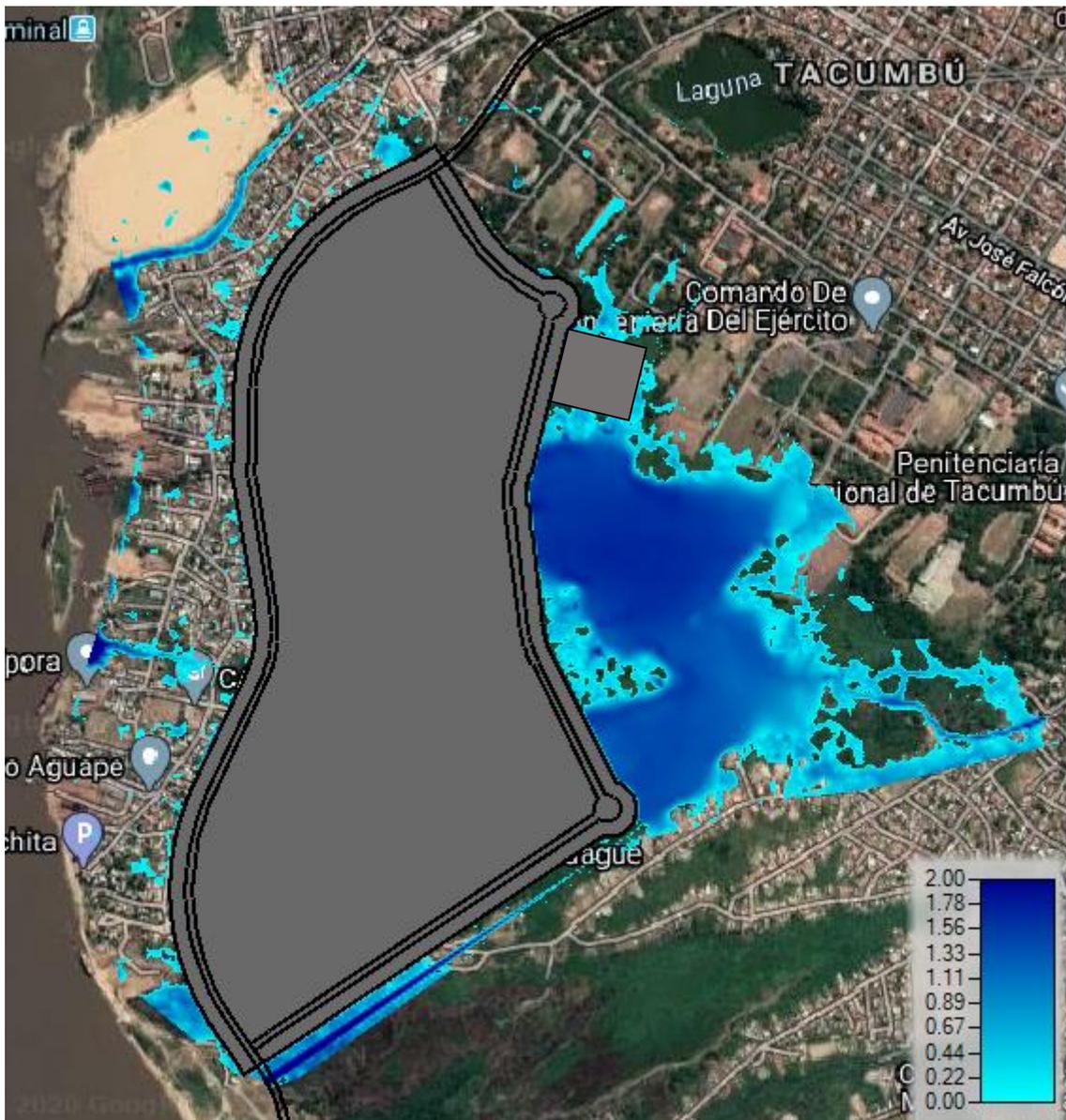


Figura 174 EscenarioRCP4.5_CanalSur_TR100

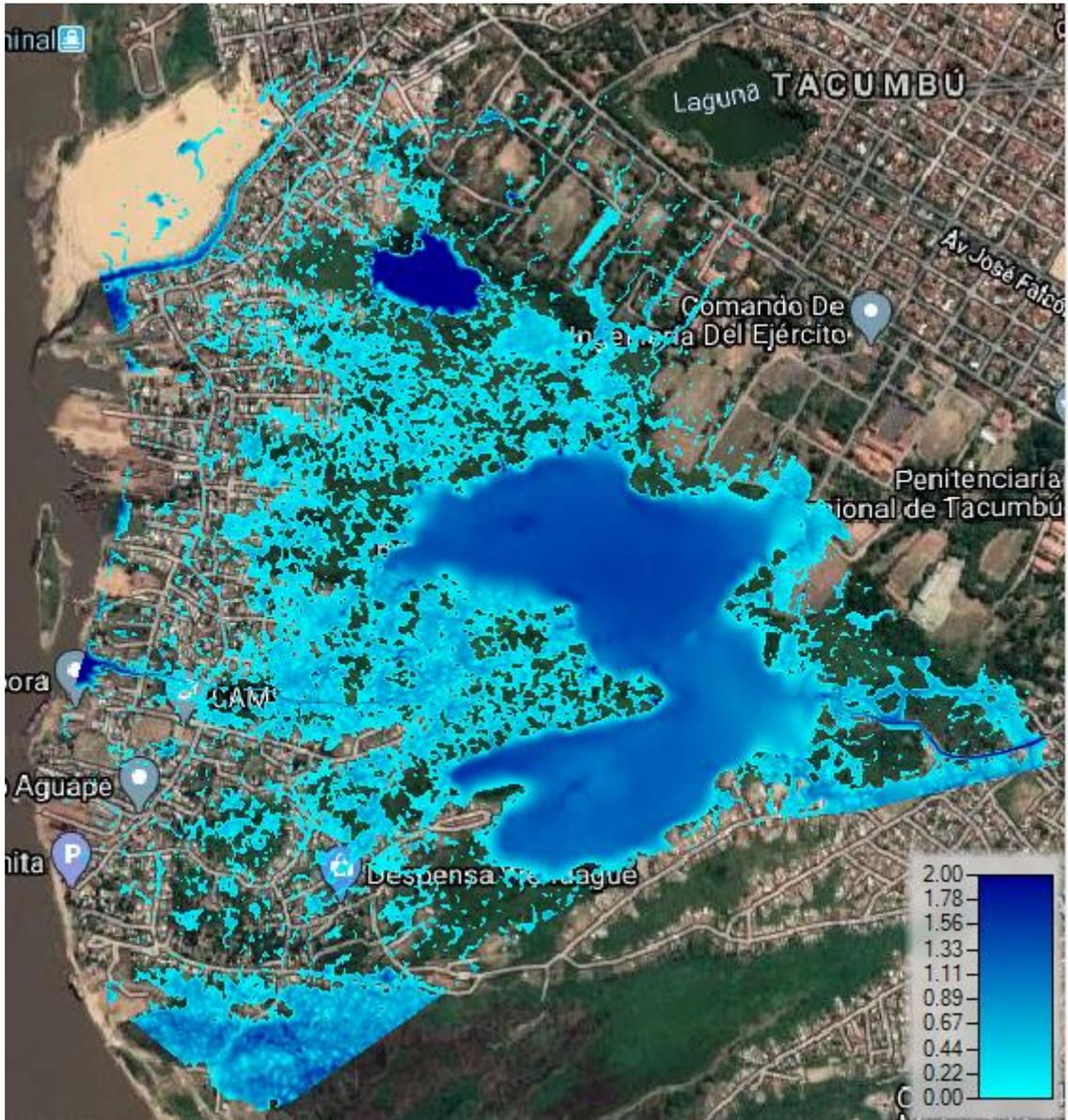


Figura 175 EscenarioRCP8.5_Natural_TR100



Figura 176 EscenarioRCP8.5_CanalNorte_TR100

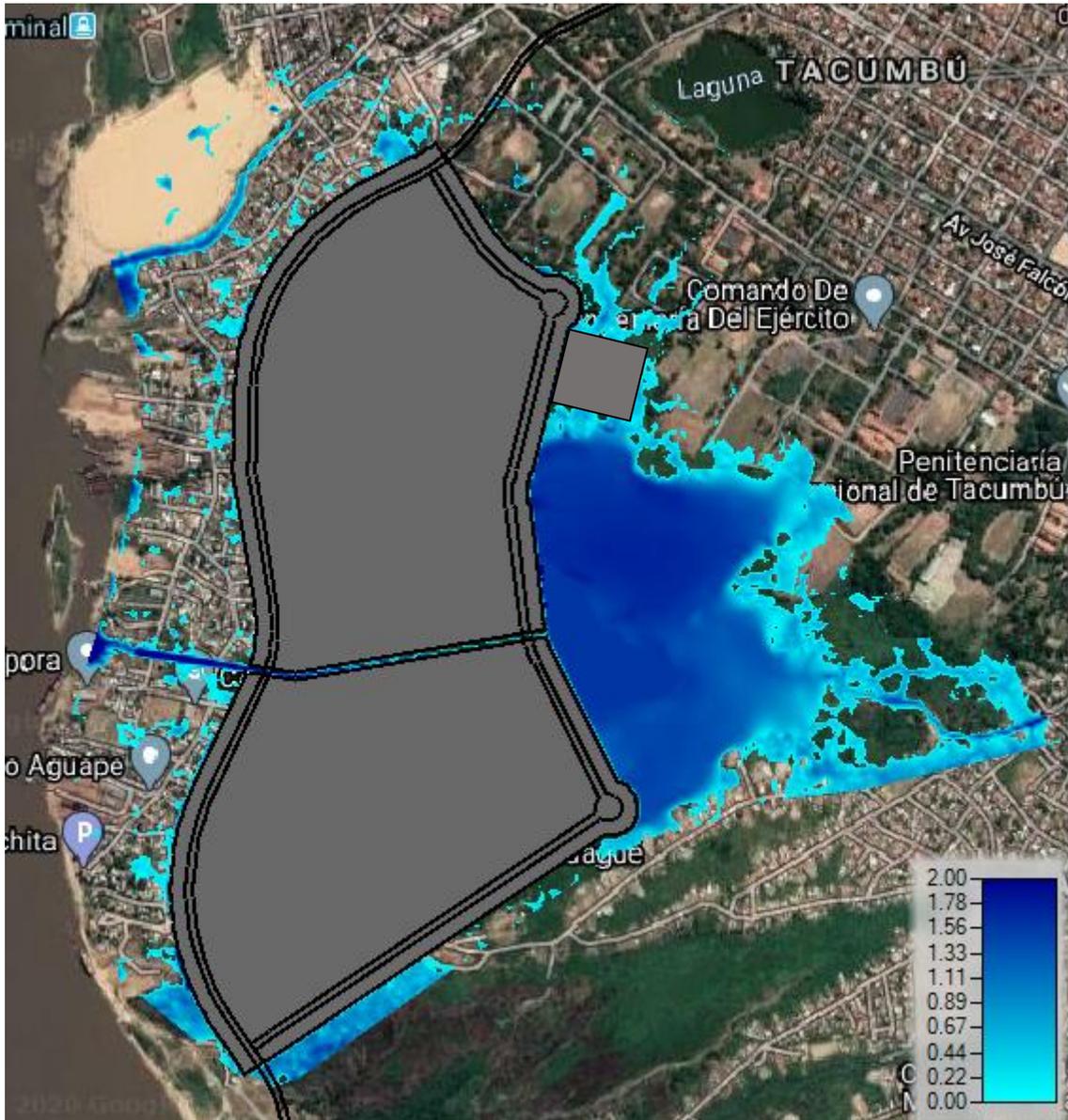


Figura 177 EscenarioRCP8.5_CanalCentral_TR100

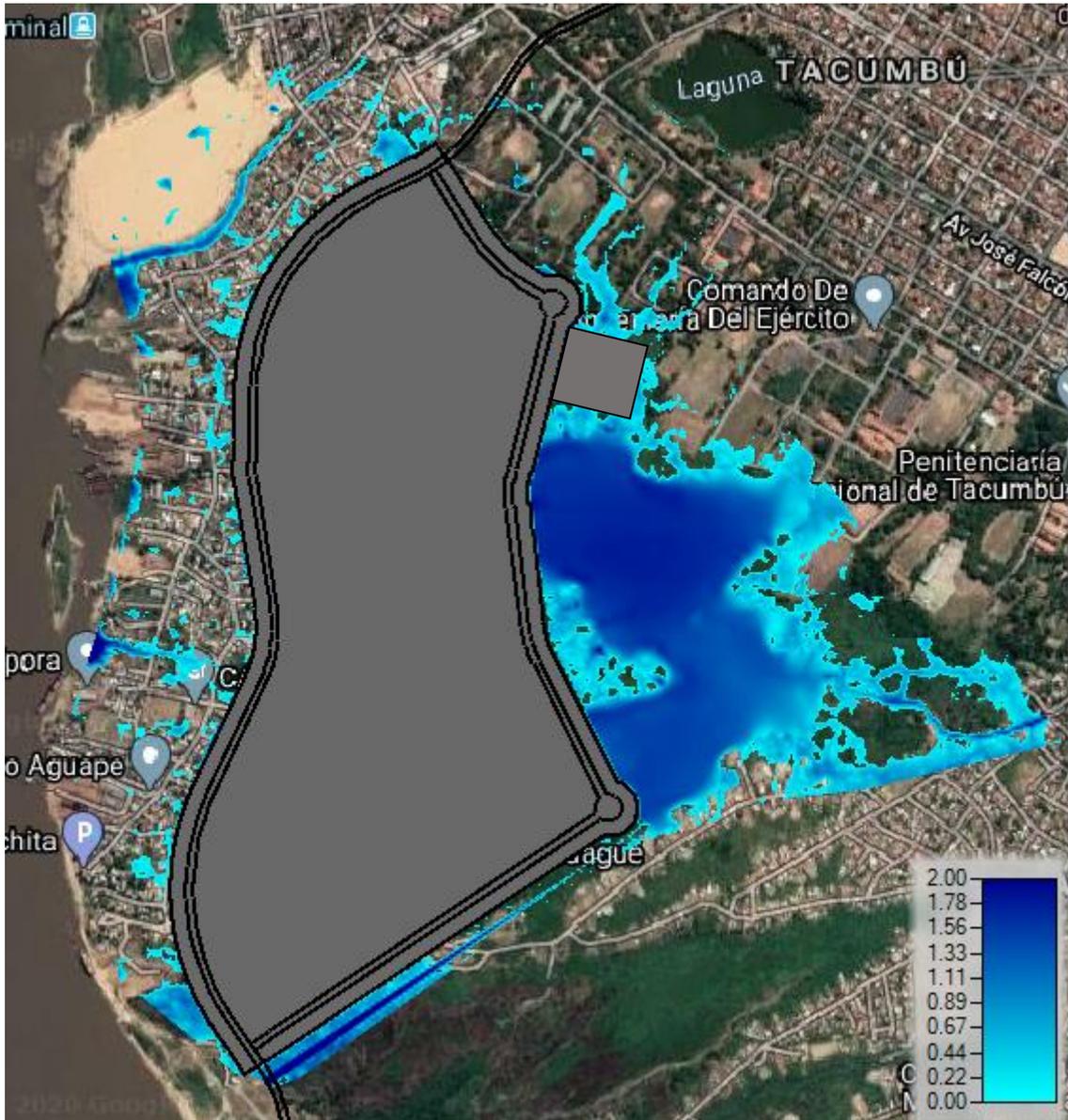


Figura 178 EscenarioRCP8.5_CanalSur_TR100

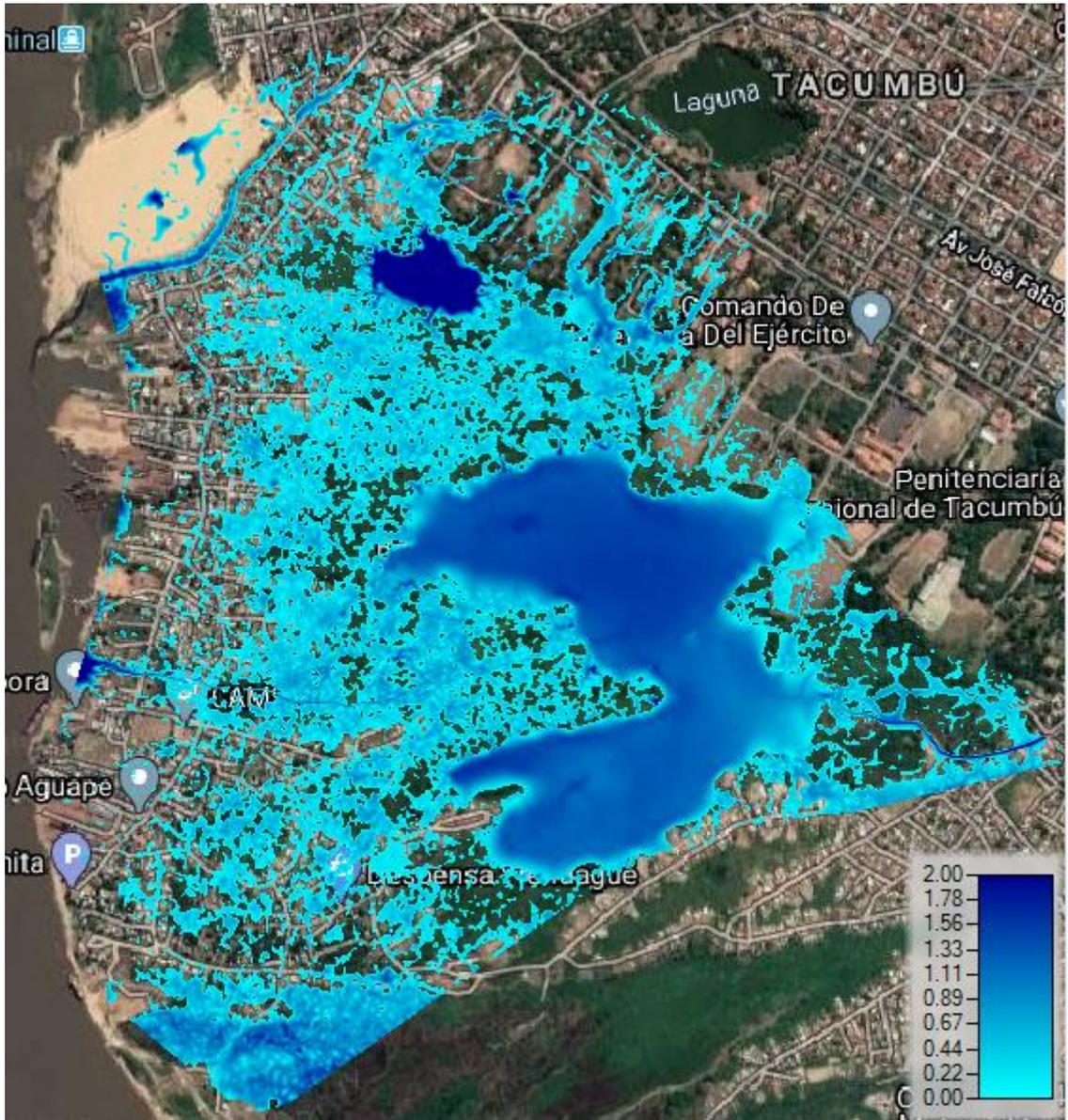


Figura 179 EscenarioActual_Natural_TR150

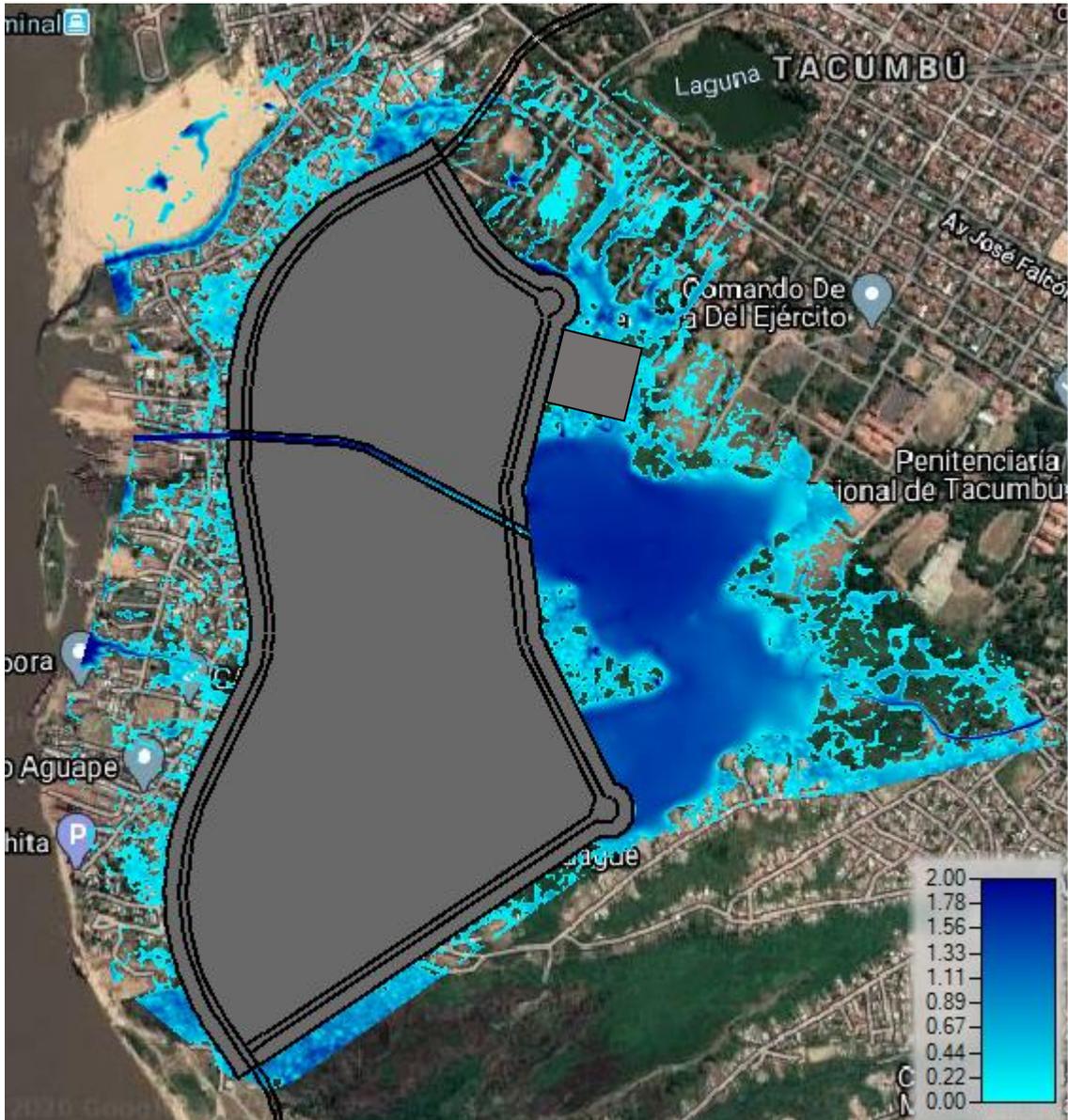


Figura 180 EscenarioActual_CanalNorte_TR150

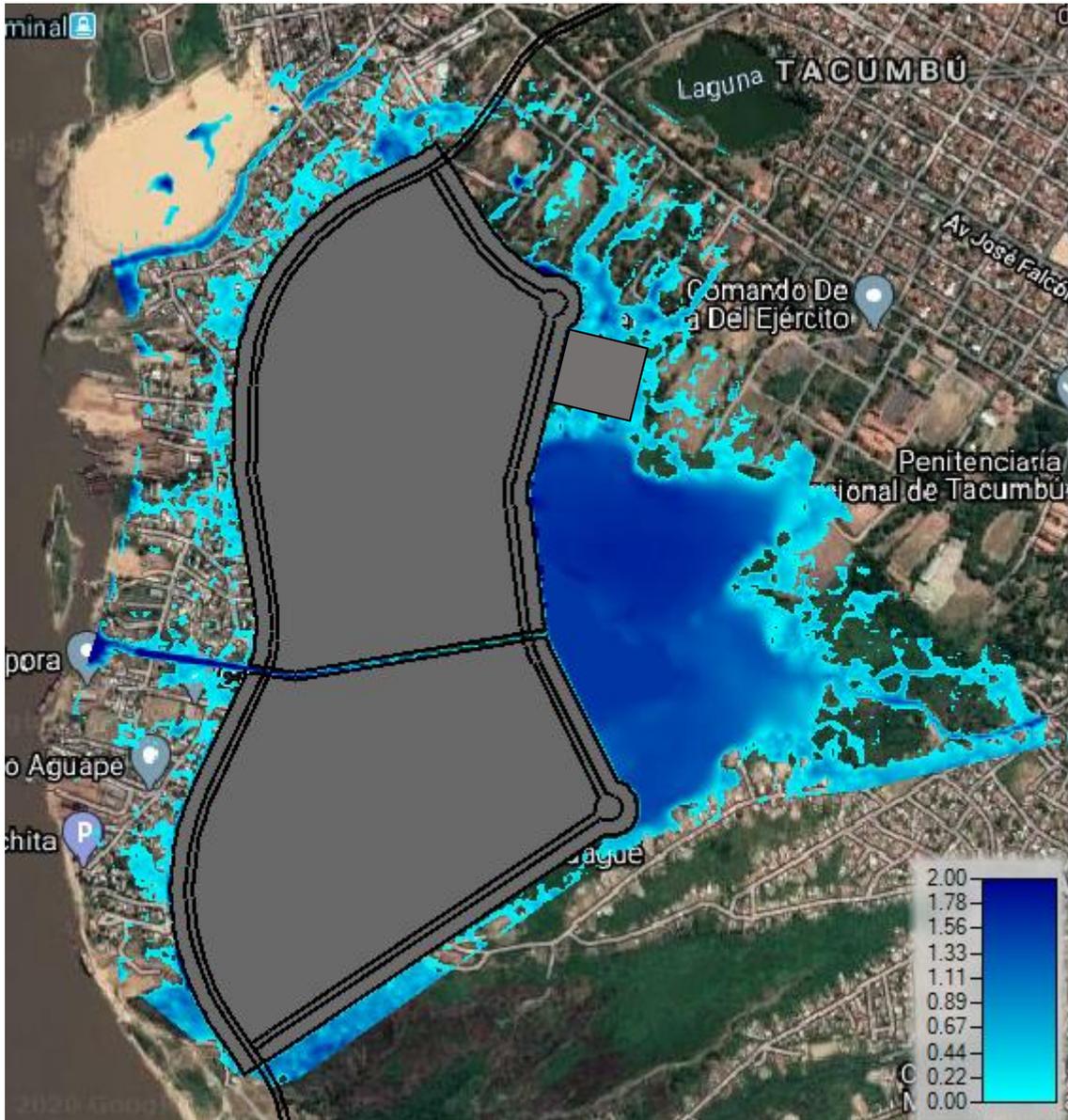


Figura 181 EscenarioActual_CanalCentral_TR150

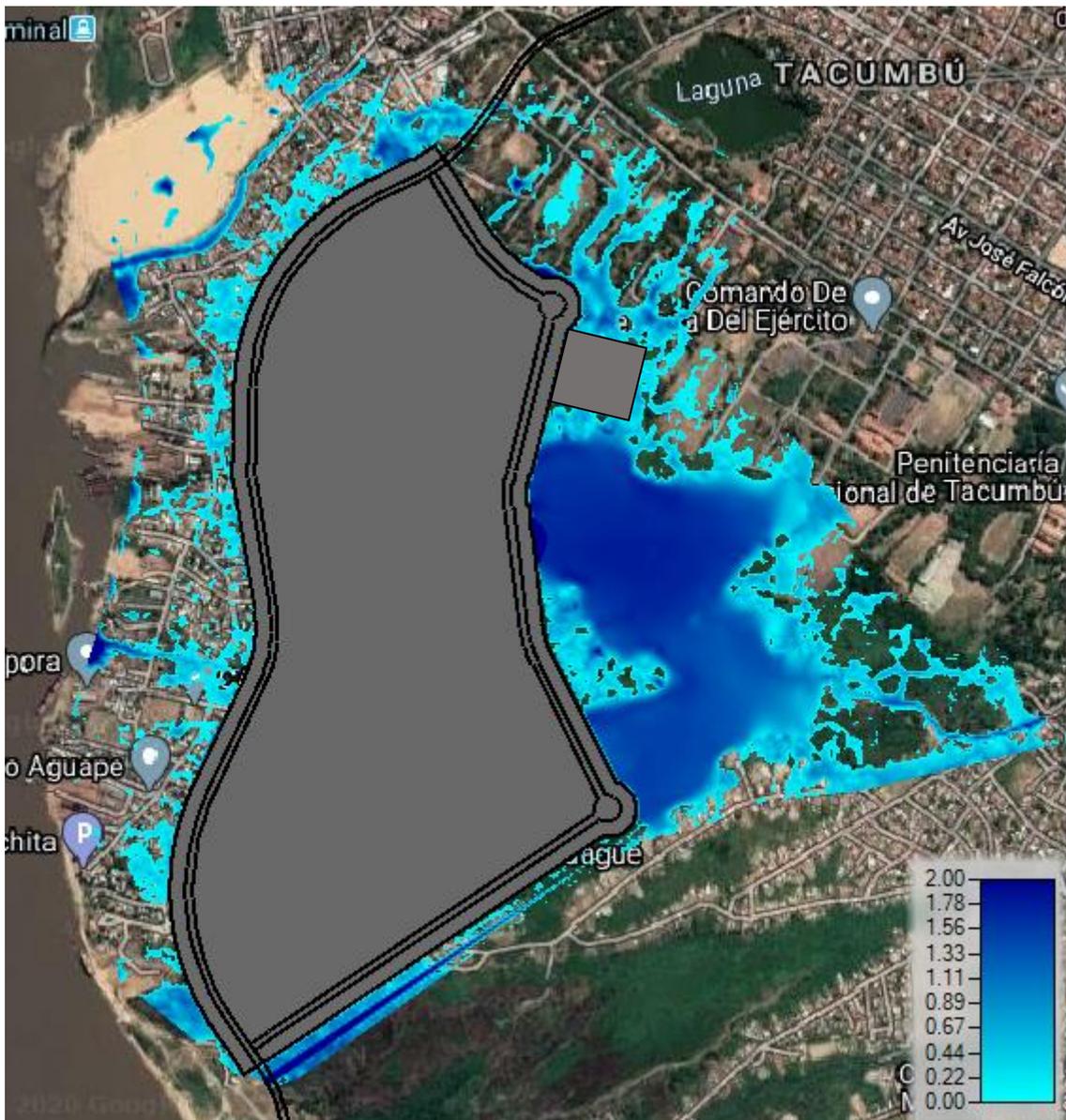


Figura 182 EscenarioActual_CanalSur_TR150

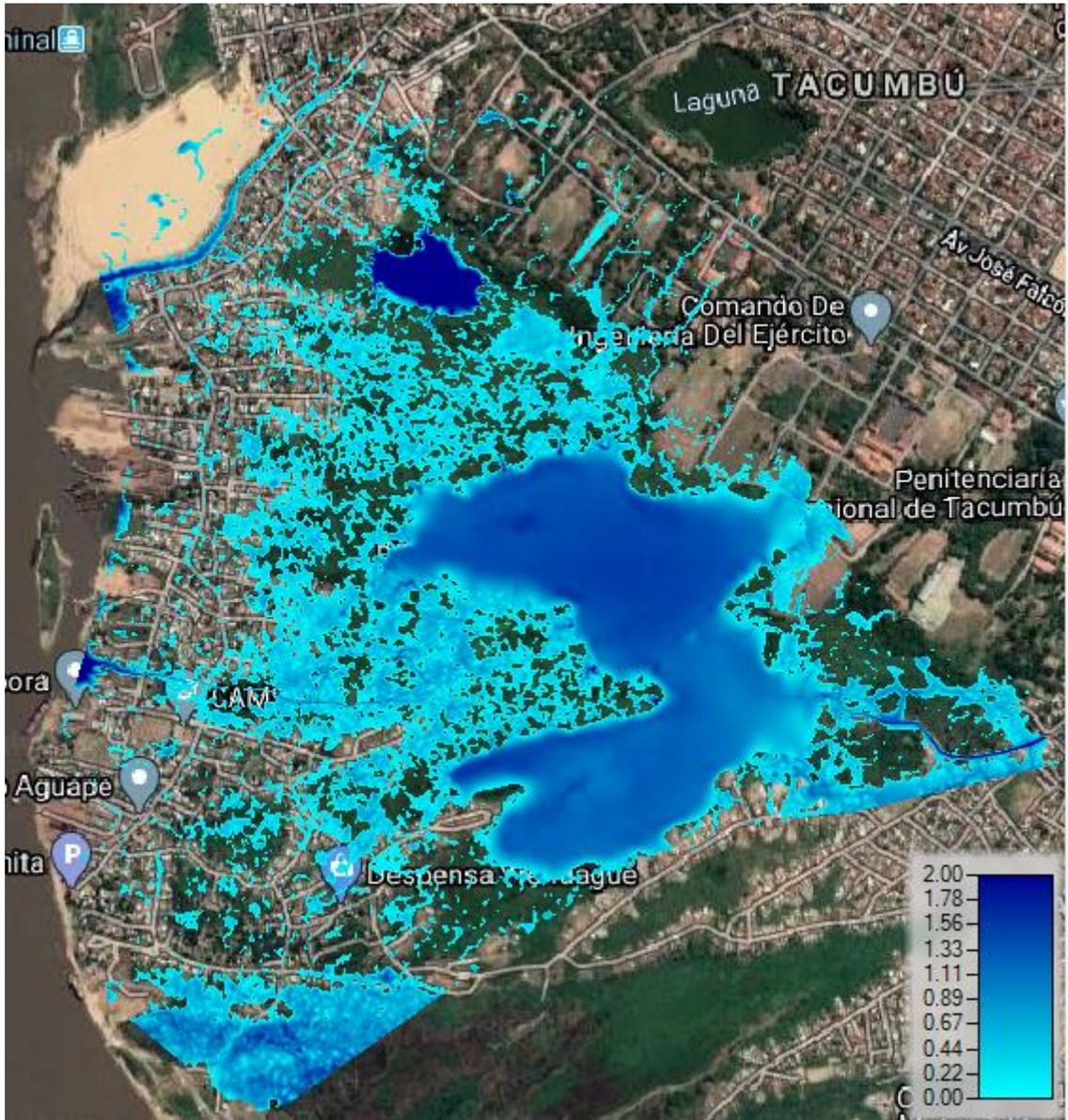


Figura 183 EscenarioRCP4.5_Natural_TR150

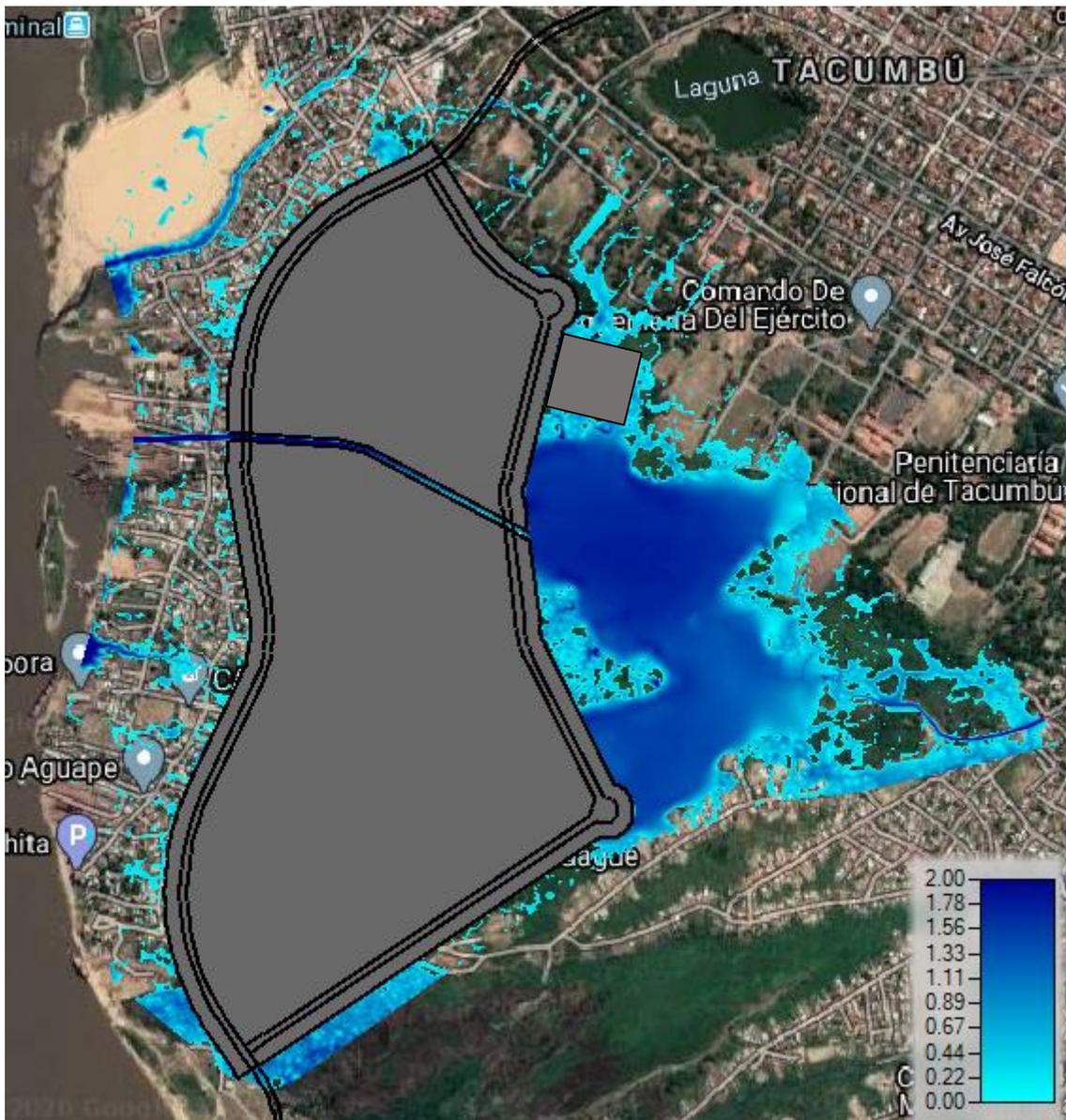


Figura 184 EscenarioRCP4.5_CanalNorte_TR150

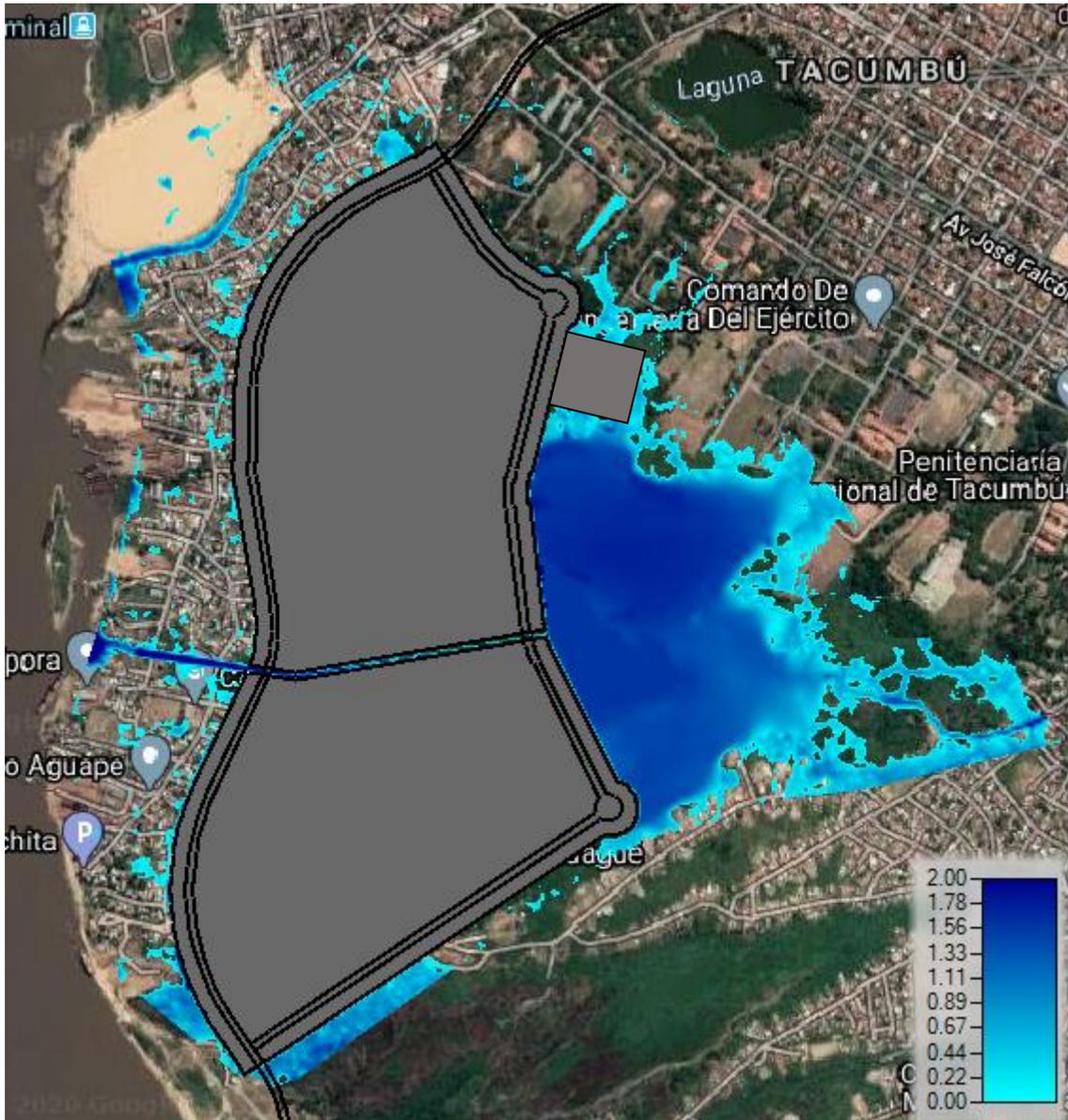


Figura 185 EscenarioRCP4.5_CanalCentral_TR150

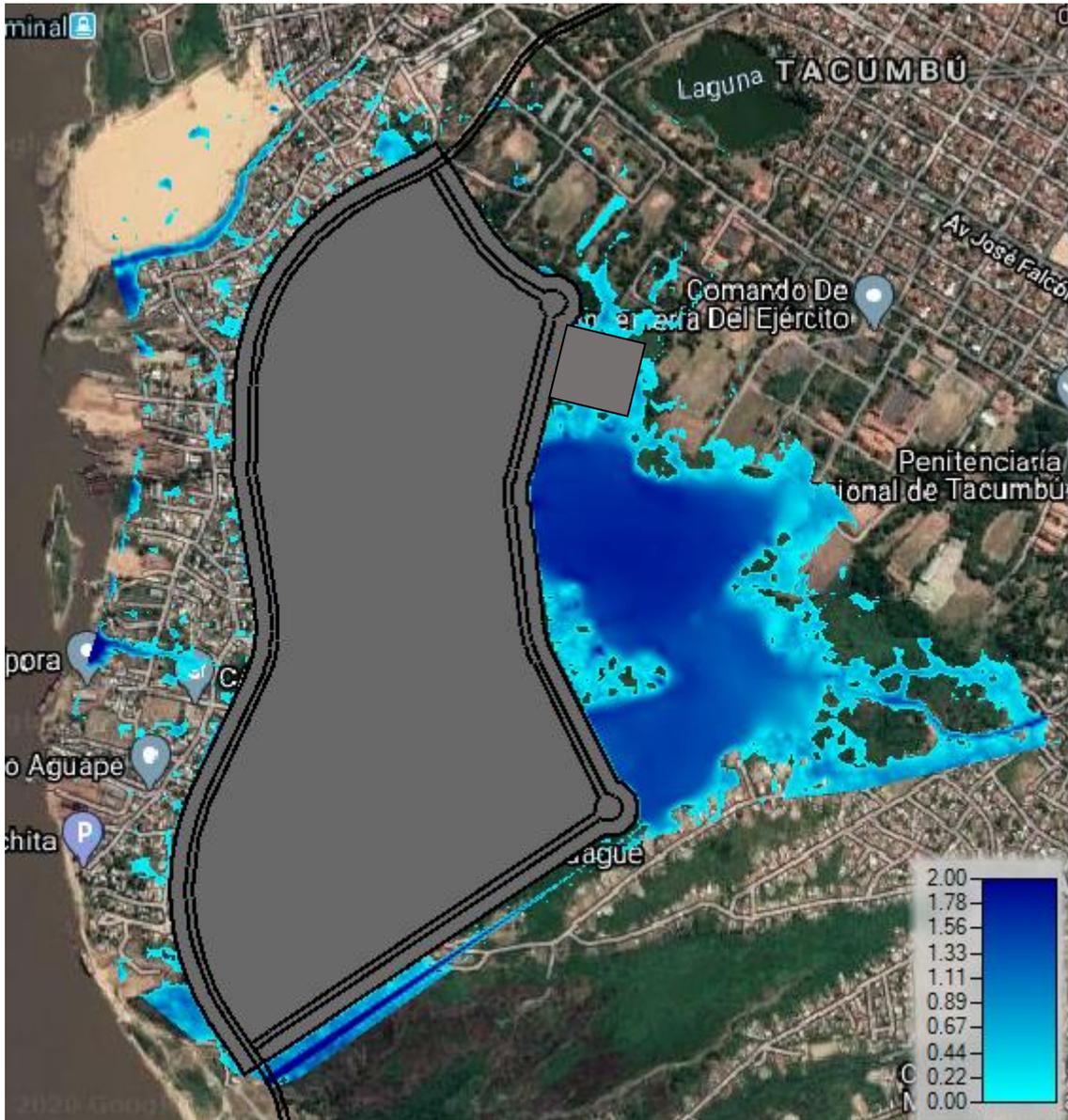


Figura 186 EscenarioRCP4.5_CanalSur_TR150

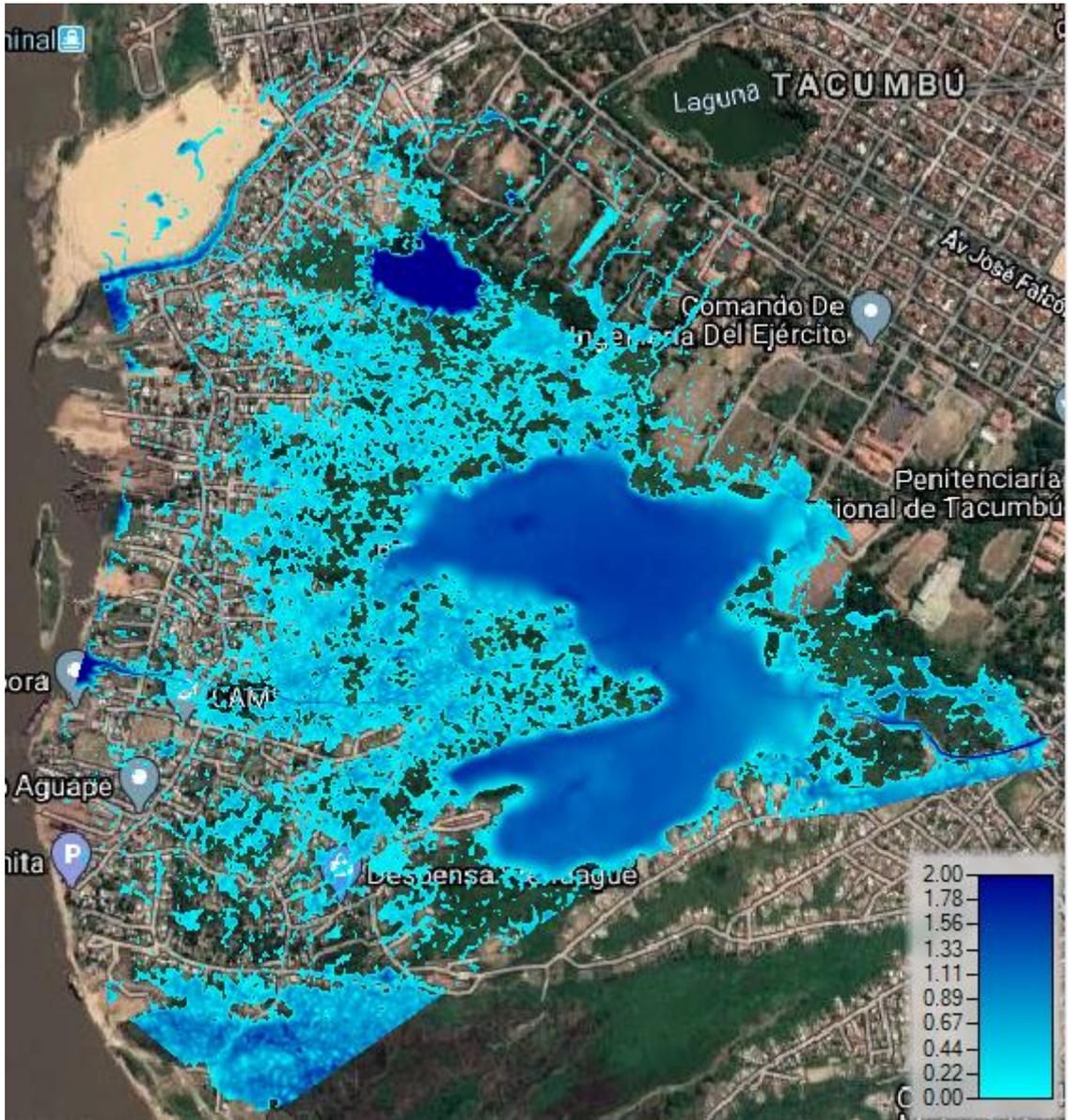


Figura 187 EscenarioRCP8.5_Natural_TR150

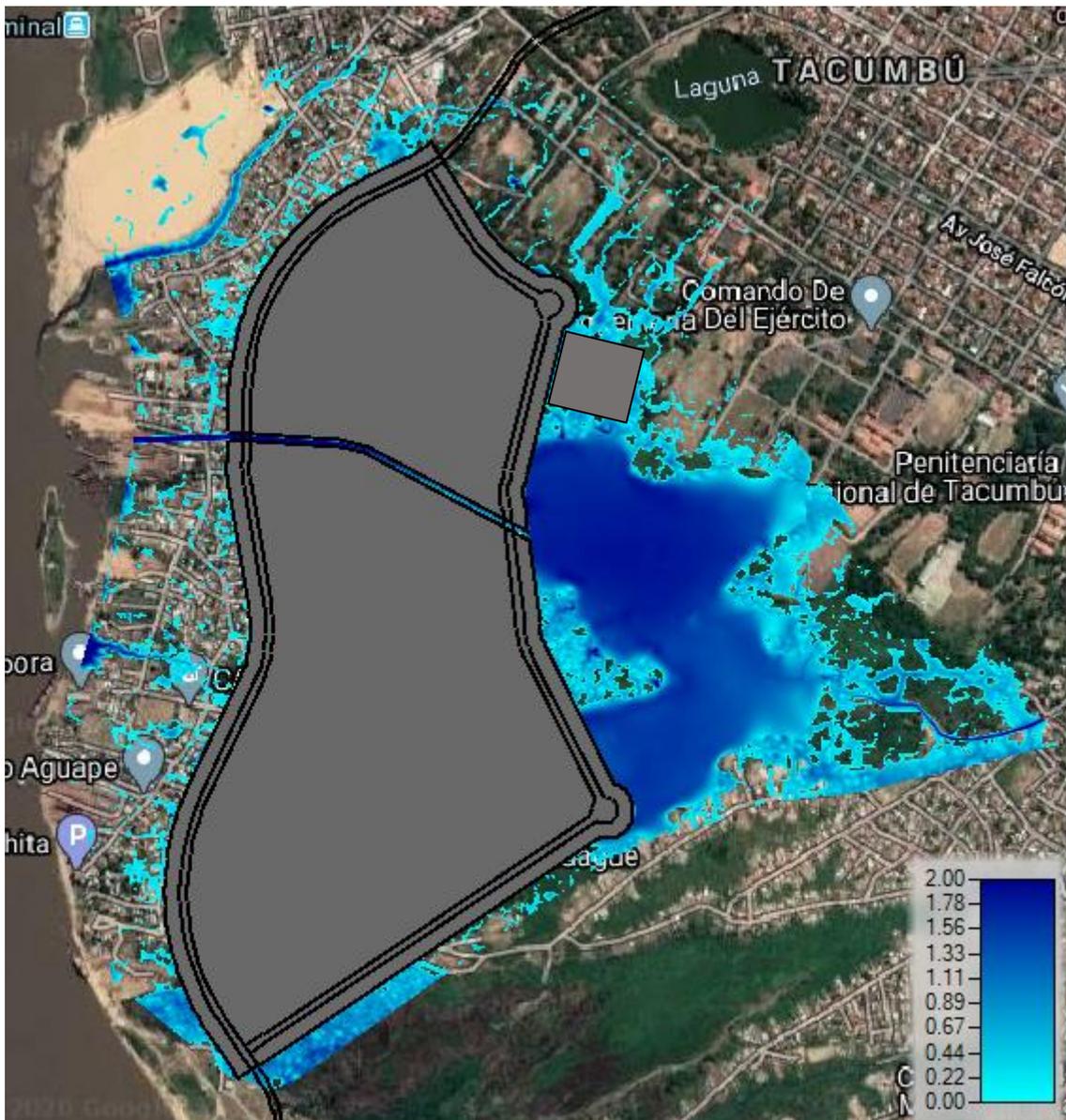


Figura 188 EscenarioRCP8.5_CanalNorte_TR150

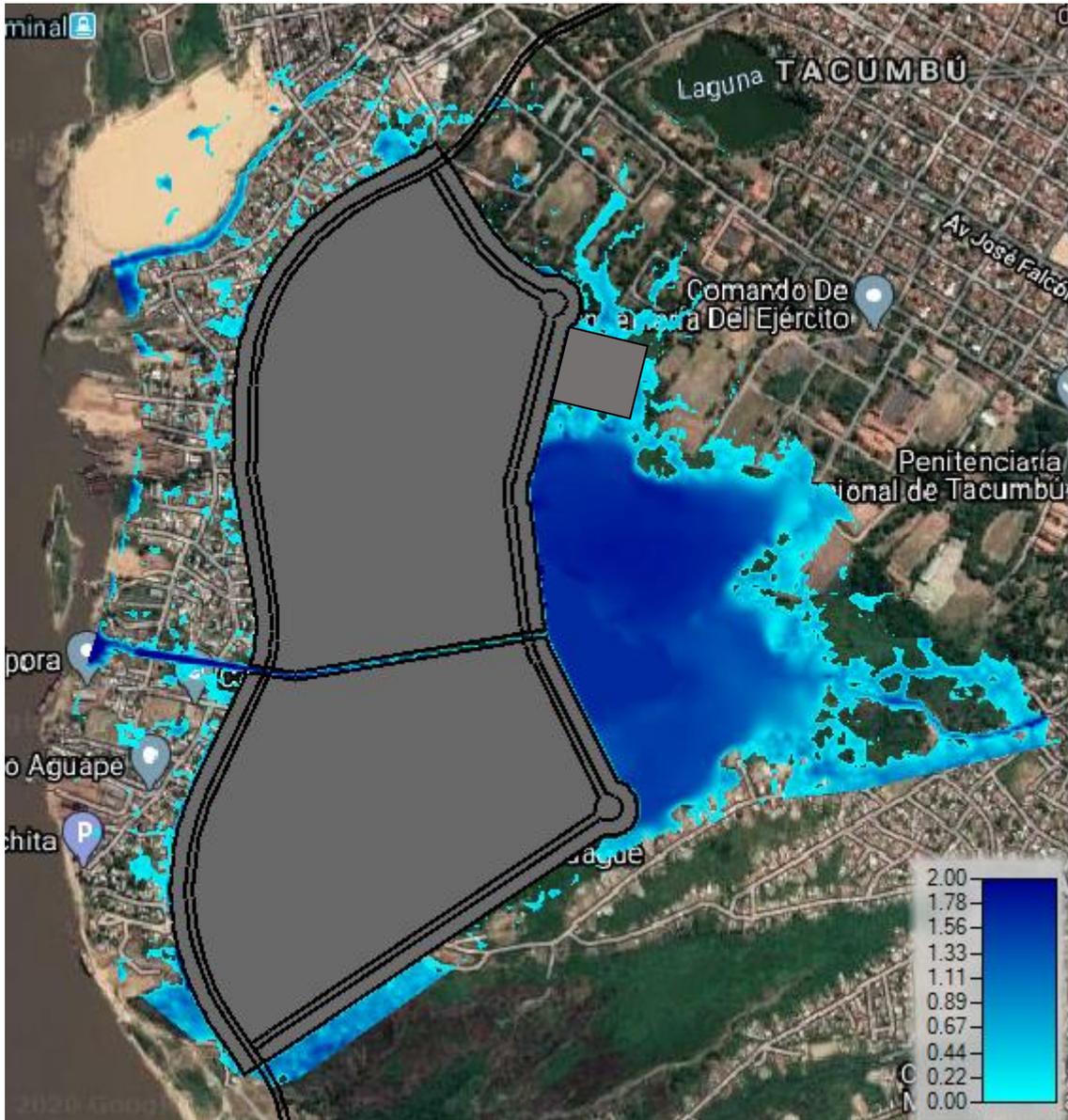


Figura 189 EscenarioRCP8.5_CanalCentral_TR150

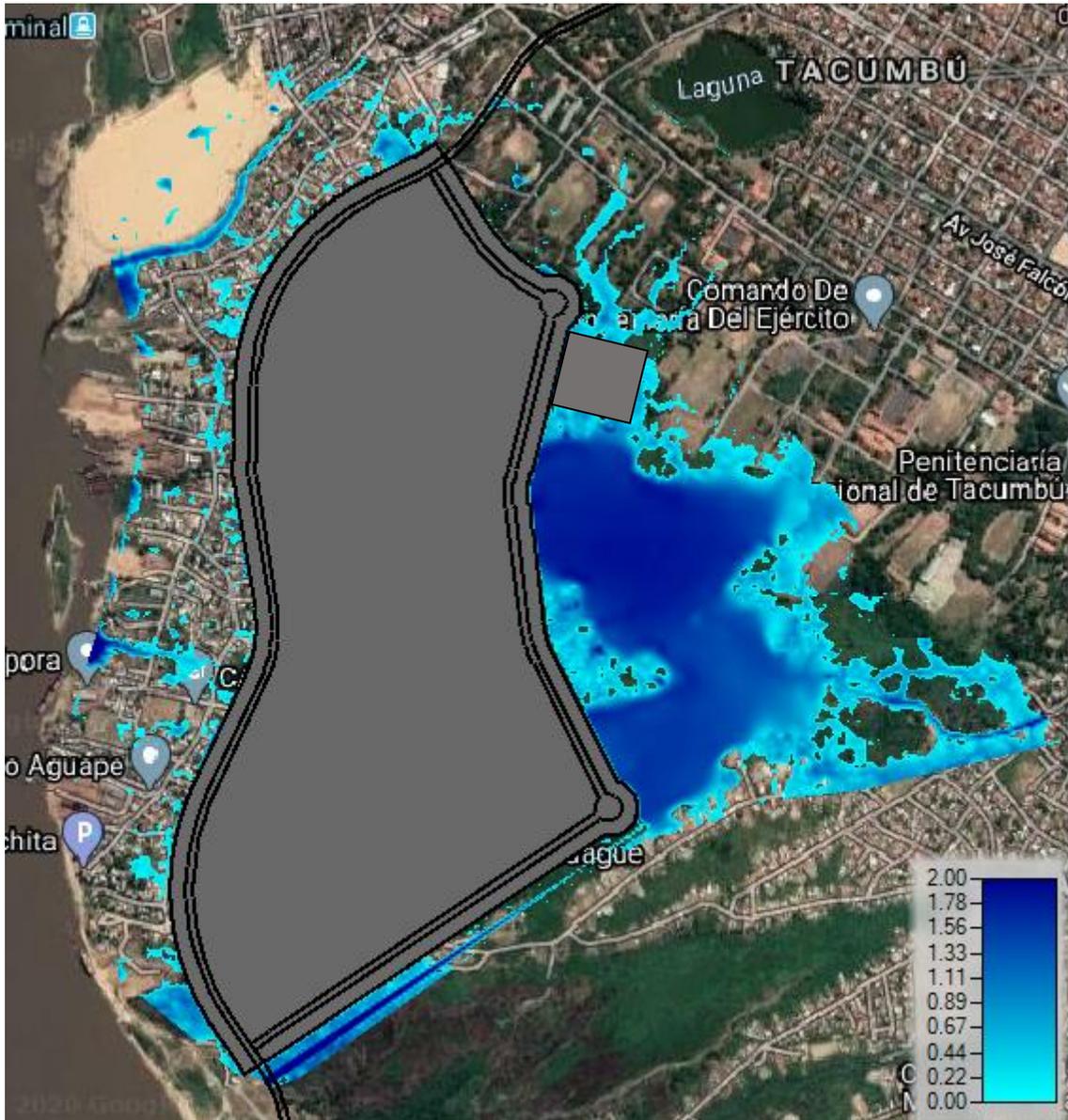


Figura 190 EscenarioRCP8.5_CanalSur_TR150



f. Cortes esquemáticos de la implantación del canal sur

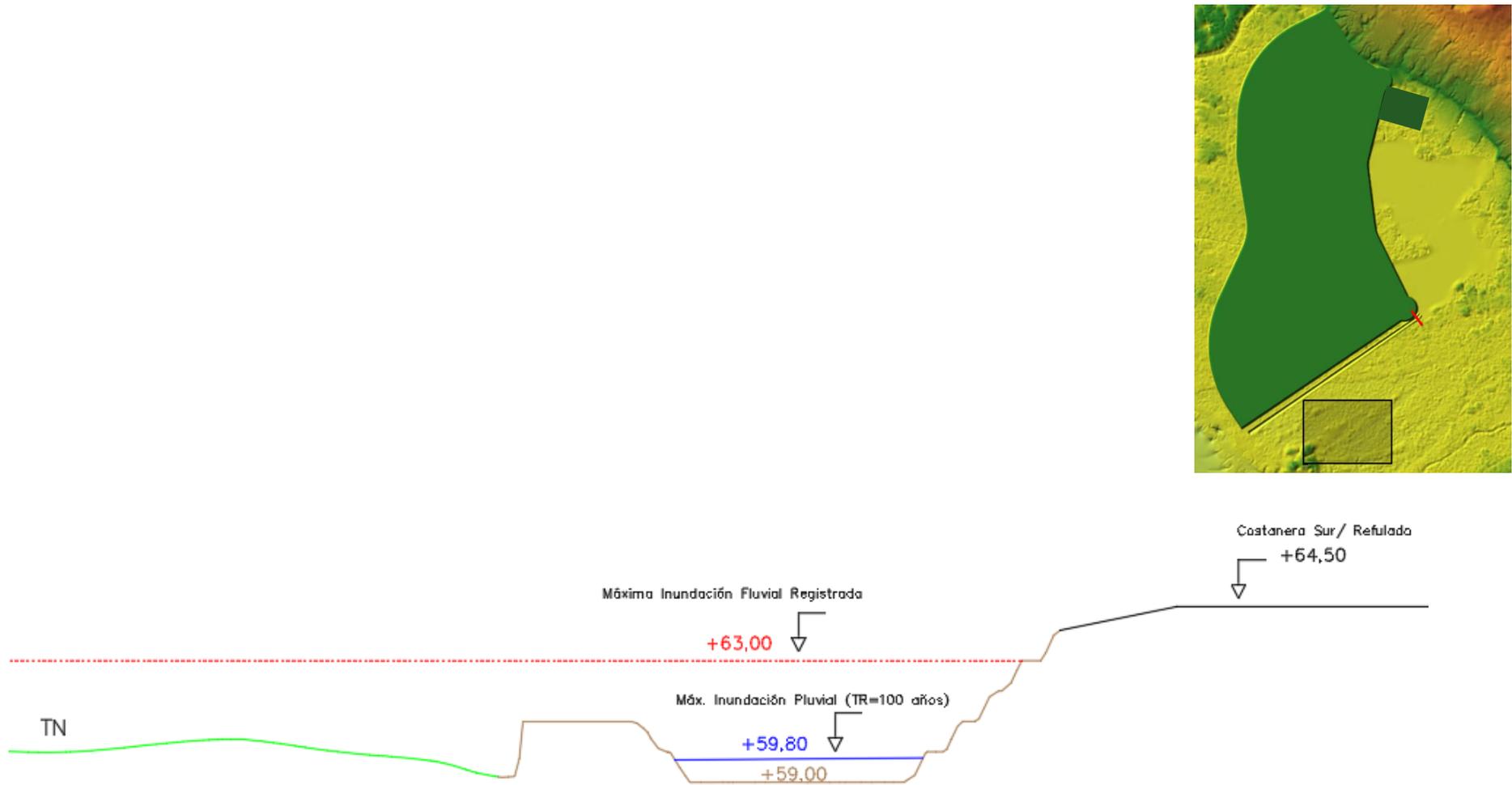


Figura 191 Sección transversal esquemática en embocadura

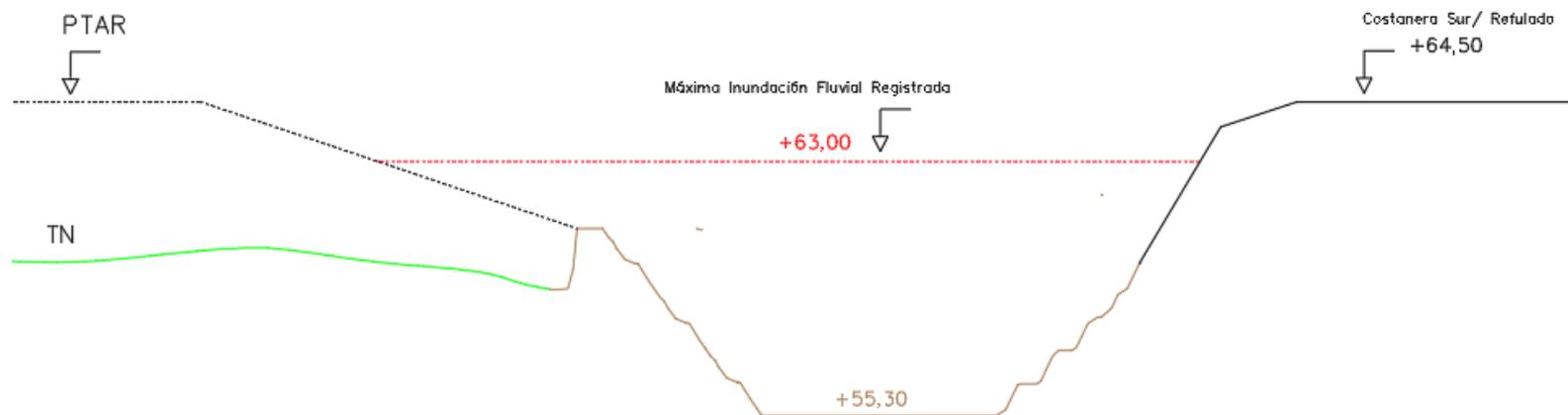


Figura 192 Sección transversal esquemática en zona de PTAR