

INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA CIVIL – INDECI¹



**CENTRO DE ESTUDIOS, PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN E
INVESTIGACIÓN PARA LA GESTIÓN REACTIVA**

**COMISIÓN NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
AEROESPACIAL – CONIDA²**



**AGENCIA
ESPACIAL
DEL PERU
CONIDA**

DIRECCIÓN DE APLICACIONES ESPACIALES Y GEOMÁTICA

**ELEMENTOS EXPUESTOS Y PELIGRO POR
INUNDACIÓN FLUVIAL EN EL TRAMO DEL RÍO PIURA
PTE. AVELINO CÁCERES HASTA EL PTE. GRAU,
PROVINCIA DE PIURA.**

Equipo Responsable:

Investigador¹: Luisa Margarita Cortez Ormeño

Investigador²: Wilder Hans Caballero Haro

Diciembre 2022

**ELEMENTOS EXPUESTOS Y PELIGRO POR INUNDACIÓN FLUVIAL EN EL
TRAMO DEL RÍO PIURA PTE. AVELINO CÁCERES HASTA EL PTE. GRAU,
PROVINCIA DE PIURA.**

**Instituto Nacional de Defensa Civil
Unidad Funcional del Centro de Estudios, Procesamiento de Información
e Investigación en Gestión Reactiva - CEPIG**

Calle Dr. Ricardo Angulo Ramírez N° 694 Urb. Corpac, San Isidro, Lima-Perú.
Teléfono: (511) 224-3600
Sitio web: www.indeci.gob.pe

General de División (r) Carlos Manuel Yáñez Lazo
Jefe del INDECI

Econ. César Augusto Negrete Venegas
Secretario General

Ing. Carlos Pichilingue Sime
**Coordinador del Centro de Estudios, Procesamiento de Información e
Investigación en Gestión Reactiva**

Elaborado por:
Ing. Luisa Margarita Cortez Ormeño
**Analista para el Desarrollo de Investigaciones Aplicadas para la GRD en
INDECI - CEPIG**

Elaborado por:
Ing. Wilder Hans Caballero Haro
**Especialista en Procesamiento Digital de Imágenes Satelitales
CONIDA - DIAPG**

CONTENIDO

I. RESUMEN	7
II. INTRODUCCIÓN.....	8
III. JUSTIFICACIÓN	10
IV. OBJETIVOS.....	11
3.1. Objetivo General	11
3.2. Objetivos específicos.....	11
V. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	12
4.1. Hidrología.....	12
4.2. Hidráulica.....	12
4.3. Vertientes Hidrográficas.....	12
4.4. Ciclo Hidrológico	13
4.5. Cuenca hidrográfica.....	14
4.6. Precipitación	15
4.6.1. Variación temporal de la precipitación	15
4.6.2. Variación espacial de la precipitación	16
4.6.3. Lluvia media en una cuenca	16
3.7. Análisis de Consistencia	17
3.8. Tormenta de diseño	17
4.8.1. Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia- IDF	17
4.8.2. Hietogramas de precipitación.....	18
3.9. Periodo de retorno.....	19
3.10. Funciones de distribución de probabilidad	20
3.11. Pruebas de bondad de ajuste	20
3.12. Hidrograma de caudal	21
3.13. Producto PISCO	21
3.14. Fenómeno El Niño	22
3.15. Inundaciones	23
3.16. Peligro	25
3.17. Elementos en riesgo o expuestos.....	26
3.18. Centro Operaciones De Emergencia (COE)	26

3.19.	Sistema de Alerta Temprana	28
3.19.1.	Sistemas de Alerta Temprana para inundaciones	28
3.20.	Fundamento físico de la teledetección por satélite	35
3.21.	Modelamiento hidrológico	42
3.21.1.	Modelamiento hidrológico de cuencas con Hec-Hms	43
3.22.	Modelamiento hidráulico	45
3.22.1.	Modelamiento hidráulico de ríos con Hec-Ras	45
VI.	METODOLOGÍA	47
6.1	Análisis de consistencia	54
6.2	Pruebas de datos dudosos	58
6.3	Estaciones pluviométricas	59
6.4	Función de probabilidad y prueba de bondad de ajuste	60
6.5	Diseño de tormentas mediante relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia	60
6.6	Desarrollo de un Modelo hidrológico con HEC-HMS	61
6.7	Desarrollo de un Modelo hidráulico con HEC-RAS 2D	73
6.8	Determinación de los niveles de peligro	75
VII.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	76
7.1	Obtención de hietogramas	76
7.2	Resultados estadísticos de comparación	77
7.3	Obtención de caudales	80
7.4	Peligro por inundación fluvial	81
7.5	Elementos Expuestos	83
7.6	Registro de Emergencias	83
7.7	Impactos en función del peligro por inundación fluvial	88
7.8	Elementos expuestos en función de los niveles de riesgo	89
VIII.	CONCLUSIONES	96
IX.	RECOMENDACIONES	98
X.	ANEXOS	100
XI.	BIBLIOGRAFÍA	148

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Acciones ante lluvias intensas	30
Tabla 2. Acciones ante crecidas de ríos.....	31
Tabla 3. Acciones ante posible activación de quebradas.....	33
Tabla 4. Índices anuales del vector regional	57
Tabla 5. Valores de KN para la prueba de datos dudosos	59
Tabla 6. Estaciones pluviométricas	59
Tabla 7. Tipos de suelo y grupo hidrológico en el ámbito de las subcuencas del río Piura	62
Tabla 8. Cobertura vegetal por subcuencas.....	64
Tabla 9. Valores de CN ponderado por subcuenca	66
Tabla 10. Parámetros de pérdida en las subcuencas.....	68
Tabla 11. Tiempo de retardo	68
Tabla 12. Parámetros del método de Muskingum	69
Tabla 13. Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe.....	73
Tabla 14. Niveles de peligro en el tramo del río Piura	76
Tabla 15. Categorías de los periodos de retorno	76
Tabla 22. Indicadores Estadísticos para calibración.....	78
Tabla 23. Número de curva calibrado	79
Tabla 24. Caudales máximos instantáneos simulados para diferentes TR en la estación Sánchez Cerro.....	80
Tabla 25. Área de zona rural expuesta en función del nivel de peligro - Tr 100 años	83
Tabla 26. Elementos expuestos por niveles de peligro y periodos de retorno.....	90
Tabla 27. Área Rural Expuesta - Tiempo de Retorno 50 años	105
Tabla 28. Área Rural Expuesta - Tiempo de Retorno 25 años	105
Tabla 29. Área Rural Expuesta - Tiempo de Retorno 20 años	105
Tabla 30. Área Rural Expuesta - Tiempo de Retorno 10 años	105
Tabla 31. Área Rural Expuesta - Tiempo de Retorno 5 años	105

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vertientes Hidrográficas del Perú	13
Figura 2. El Ciclo Hidrológico	14
Figura 3. Divisoria de Aguas.....	15
Figura 4. Curvas I-D-F	18
Figura 5. Hietograma Tr 20 años Estación Morropón.....	19
Figura 6. Componente de un hidrograma de caudal durante una tormenta.....	21
Figura 7. Promedio mensual de las anomalías de TSM en el Pacífico en abril 2022.....	23
Figura 8. Vista panorámica de toda la ciudad de Piura inundada.....	24
Figura 9. Componentes del sistema de teledetección	36
Figura 10. Discriminación de la región visible	37
Figura 11. Propiedades de la materia: energía reflejada, absorbida y transmitidas.....	38
Figura 12. Firma espectral de la vegetación sana.....	39
Figura 13. Comportamiento espectral de cinco suelos minerales	40
Figura 14. Firmas espectrales típicas de distintas cubiertas	41
Figura 15. Clasificación orientada a objetos de la zona de estudio en Piura.....	42
Figura 16. Marco Metodológico del trabajo de investigación.....	49
Figura 17. Imágenes del PeruSAT-1, del año 2018.....	50
Figura 18 . Imágenes del PeruSAT-1 corregidas por mascara hazel o neblina, del año 2018	51
Figura 19. Imágenes del PeruSAT-1 corregidas por máscara de nubes, del año 2018.....	52
Figura 20. Imágenes del PeruSAT-1 en alta resolución, del año 2018.....	53
Figura 21. Modelo de Elevación Digital – Zona de estudio	53
Figura 22. Lluvias acumuladas anuales - Morropón	54
Figura 23. Suma de los índices anuales del vector regional.....	55
Figura 24. Índice anual del vector regional en función de la precipitación anual de las estaciones en la cuenca del río Piura y estaciones vecinas	56
Figura 25. Análisis de datos dudosos en la estación Chalaco	59
Figura 26. Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de lluvias SC1 - STA Chulucanas.....	60
Figura 27. Modelo cuenca del río Piura	61
Figura 28. Tiempo de concentración	67
Figura 29. Tramo del río Piura analizado Pte. Avelino Cáceres hasta el Pte. Grau	74
Figura 30. Hietograma para periodo de retorno de 100 años - Estación Chulucanas.....	77
Figura 31. Hidrograma Observado Vs Simulado	77
Figura 32. Resultados Estadísticos de Validación.....	79
Figura 33. Hidrograma obtenido a la salida del río en HecRas	80
Figura 34. Hidrograma de diseño Tr =100 años.....	81
Figura 35. Niveles de peligro ante inundación fluvial - Periodo de retorno de 100 años.....	82
Figura 36. Reportes de inundaciones por distrito - Registro Histórico 1972 al 2019	83
Figura 37. Reporte por años de inundaciones - Registro Histórico 1972 al 2019.....	84

Figura 38. Reporte por años y distritos afectados por inundaciones - Registro Histórico 1972 al 2019	84
Figura 39. Reporte por mes de inundaciones - Registro Histórico 1972 al 2019.....	85
Figura 40. Reporte por mes de inundaciones - Registro Histórico 1972 al 2019.....	85
Figura 41. Población por distritos con afectación ante inundaciones - Registro Histórico 1972 al 2019	86
Figura 42. Población por años afectada ante inundaciones - Registro Histórico	86
Figura 43. Población por años y distritos afectada ante inundaciones - Registro Histórico.	87
Figura 44. Viviendas por distritos con afectación ante inundaciones - Registro Histórico 1972 al 2019	87
Figura 45. Viviendas por años y distritos afectados por inundaciones - Registro Histórico 1972 al 2019	88
Figura 46. Población expuesta por niveles peligro – Periodo de retorno 100 años.....	92
Figura 47. Manzanas Expuestas por Niveles de Peligro - Periodo de retorno 100 años	93
Figura 48. Infraestructura expuesta por niveles de Peligro - Periodo de retorno 100 años..	94
Figura 49. Calles Expuestas (Km ²) por niveles de Peligro - Periodo de retorno 100 años ..	95
Figura 50. Peligro por inundación fluvial- Tiempo de Retorno 50 años.....	100
Figura 51. Peligro por inundación fluvial- Tiempo de Retorno 25 años.....	101
Figura 52. Peligro por inundación fluvial- Tiempo de Retorno 20 años.....	102
Figura 53. Peligro por inundación fluvial- Tiempo de Retorno 10 años.....	103
Figura 54. Peligro por inundación fluvial- Tiempo de Retorno 5 años.....	104
Figura 60. Población expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 50 años.....	106
Figura 61. Manzanas expuestas por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 50 años.....	107
Figura 62. Infraestructura expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 50 años.....	108
Figura 63. Calles expuestas (KM ²) por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 50 años.....	109
Figura 64. Población expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 25 años.....	110
Figura 65. Manzanas expuestas por distritos y niveles de peligro - Periodo de Retorno 25 años.....	111
Figura 66. Infraestructura expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 25 años.....	112
Figura 67. Calles expuestas (Km ²) por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 25 años.....	113
Figura 68. Población expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 20 años.....	114
Figura 69. Manzanas expuestas por distritos y niveles de peligro - Periodo de Retorno 20 años.....	115
Figura 70. Infraestructura expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 20 años.....	116

Figura 71. Calles expuestas por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 20 años	117
Figura 72. Población expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 10 años.....	118
Figura 73. Manzanas expuestas por distritos y niveles de peligro - Periodo de Retorno 10 años.....	119
Figura 74. Infraestructura expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 10 años.....	120
Figura 75. Calles expuestas (Km ²) por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 10 años.....	121
Figura 76. Población expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 5 años	122
Figura 77. Manzanas expuestas por distritos y niveles de peligro - Periodo de Retorno 5 años.....	123
Figura 78. Infraestructura expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 5 años.....	124
Figura 79. Calles expuestas (Km ²) por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 5 años.....	125
Figura 80. Ventana del HECRAS.....	126
Figura 81. Creación del nuevo proyecto.....	127
Figura 82. Asignación del sistema de coordenadas.....	127
Figura 83. Carga del DEM del área de estudio	128
Figura 84. Proceso exitoso de carga del DEM	128
Figura 85. Visualización del dem cargado en el RAS Mapper	129
Figura 86. Visualización de imagen satelital y dem de la zona urbana de Piura.....	129
Figura 87. Cargar los coeficientes de rugosidad.....	130
Figura 88. Se carga y asigna la categoría de los valores “n_manning”	130
Figura 89. Visualización valores “n_manning” cargados en el RAS Mapper.....	131
Figura 90. Opciones de geometría habilitadas	132
Figura 91. Delimitación del área de interés.....	132
Figura 92. Configuración del dominio del área de interés	133
Figura 93. Obtención del mallado del área de interés	133
Figura 94. Asociación de las variables en el RAS Mapper	134
Figura 95. Generación de eje del cauce del río Piura	134
Figura 96. Alineación del mallado al eje del cauce.....	135
Figura 97. Generación de la condición de contorno (aguas arriba).....	135
Figura 98. Se ingresa los valores del hidrograma.....	137
Figura 99. Ícono para acceder al plan de corrida.....	137
Figura 100. Ingresamos los datos del plan de corrida	138
Figura 101. Resultado de la modelación hidráulica, periodo de retorno 100 años.....	139
Figura 102. Interfaz del software Geomatica Banff.....	140
Figura 103. Creación del nuevo proyecto.....	140
Figura 104. Ventana Object Analyst	141

I. RESUMEN

El presente trabajo de investigación fue desarrollado en cooperación inter-institucional entre el Instituto Nacional de Defensa Civil – INDECI, por medio del Centro de Estudios, Procesamiento de Información e Investigación para la Gestión Reactiva – CEPIG y la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial – CONIDA a través de la Dirección de Aplicaciones Espaciales y Geomática – DIAPG.

El objetivo de este trabajo de investigación, consistió en elaborar un procedimiento para el análisis de elementos expuestos ante el peligro por inundación fluvial en el tramo del río Piura comprendido entre el Pte. Avelino Cáceres hasta el Pte. Grau, provincia de Piura, mediante la incorporación del uso combinado de información satelital, modelamiento hidrológico e hidráulico, y registros de daños que contribuya al componente “Conocimiento del Riesgo” de un Sistema de Alerta Temprana.

La primera fase del trabajo consistió en elaborar un modelo hidrológico para determinar caudales de diseño en la cuenca de influencia de la ciudad de Piura. Luego de ello se desarrolló un modelo hidráulico, que permitió determinar las potenciales áreas inundables para los periodos de retorno de 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años, en el tramo del río Piura que mide aproximadamente 7 km, abarca parte de los distritos de Catacaos, Veintiséis de Octubre, Piura y Castilla, pertenecientes a la provincia de Piura.

La segunda fase del trabajo consistió en determinar los niveles de peligro por inundación fluvial, para ello los umbrales entre los niveles de intensidad muy alta, alta, media y baja, fueron definidos considerando los valores de tirante del agua obtenidos del modelamiento en HECRAS 2D.

La tercera fase consistió en analizar el registro de emergencias reportadas por inundación para el tramo del río Piura comprendido entre el Pte. Avelino Cáceres hasta el Pte. Grau, correspondiente al periodo 1972 al 2019, contenidos en la base de datos del Sistema de Información Nacional para la Respuesta y Rehabilitación- SINPAD y en el Sistema de Inventario de Desastres- DesInventar quienes recopilan información sobre daños de diversos tipos de desastres.

En la cuarta fase del trabajo se obtuvo los elementos expuestos en función del peligro por inundación fluvial ante los diferentes periodos de retorno; asimismo, se describe un ejemplo de alerta de inundación por desborde de río, la cual permitiría tener una acción temprana.

II. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos naturales, representan por su grado de intensidad en un lugar y periodo determinado, amenazas para las poblaciones y la afectación de sus medios de vida, estos se ven influenciados por las actividades humanas que generan una presión considerable en el entorno, alterando el equilibrio natural y afectando a la población de mayor fragilidad.

Las inundaciones son uno de los fenómenos naturales más catastróficos a los que la humanidad ha tenido que enfrentarse. Según el Atlas de la OMM sobre mortalidad y pérdidas económicas debidas a fenómenos meteorológicos, climáticos e hidrológicos extremos (1970-2019), en todo el mundo se registraron más de 11 000 desastres atribuidos a esos peligros, que ocasionaron algo más de 2 millones de víctimas mortales y 3,64 billones de dólares en pérdidas. Los fenómenos relacionados con el agua, sequías, tormentas e inundaciones, son las principales catástrofes de los últimos 50 años, tanto en términos de pérdidas humanas como económicas, según la Organización Meteorológica Mundial (OMM). De las 10 principales catástrofes registradas durante ese periodo, las que han provocado la mayor cantidad de víctimas han sido las sequías con 650,000 muertes; seguidas por las tormentas, con 577,232; las inundaciones, con 58,700; y las temperaturas extremas, con 55,736 víctimas.

Perú es un país recurrente a los eventos de inundación, la región de la costa norte, se ve influenciada por eventos hidrometeorológicos extremos, que generan pérdidas en los diversos sectores del desarrollo. En la provincia de Piura, solo el fenómeno de inundación para el periodo 2003-2021, tuvo como impacto un total de 62 497 personas afectadas y 43 370 personas damnificadas; asimismo, ocasionó la destrucción de 7 075 viviendas y 13 618 viviendas afectadas y 652,995 soles el costo de la ayuda por el desastre de inundación.¹

La reducción de las pérdidas causadas por desastres es uno de los objetivos del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres adoptado por los Estados Miembros de las Naciones Unidas en 2015. Este Marco, incluye las alertas tempranas en una de sus siete metas mundiales: "Incrementar considerablemente la disponibilidad de los sistemas de alerta temprana sobre amenazas múltiples y de la información y las evaluaciones sobre el riesgo de desastres transmitidas a las personas, y el acceso a ellos, para 2030". Asimismo, considera como prioridad comprender el riesgo de desastres ya que, este conocimiento permite elaborar y

¹ En base a los registros históricos del Sistema de Información Nacional para la Respuesta y Rehabilitación-SINPAD-INDECI

aplicar las medidas adecuadas de preparación y respuesta eficaz para casos de desastre.

En el marco nacional, el reglamento de la Ley N° 29664 - Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), establece en el Art. 9 que el INDECI promueve la instalación y actualización de los Sistemas de Alerta Temprana y los medios de difusión y comunicación sobre emergencias y desastres a la población.

En los últimos años, Perú, para prepararse ante la ocurrencia de un evento hidrometeorológico viene implementando los Sistemas de Alerta Temprana – SAT para inundaciones a nivel comunitario principalmente, constituyéndose como un conjunto de capacidades, instrumentos y procedimientos articulados para generar y difundir información de alerta de manera oportuna, permitiendo analizar y actuar organizadamente sobre la base de sistemas de vigilancia y monitoreo del peligro de inundación, y en establecer y desarrollar las acciones y capacidades locales con el fin de permitir que las personas, comunidades y organizaciones expuestas al peligro se preparen y actúen de forma apropiada y anticipada para reducir o evitar la pérdida de vidas. Se salvan más vidas gracias a los Sistemas de Alerta Temprana ante inundaciones; sin embargo, el número de personas expuestas al riesgo de inundación aumenta por el crecimiento desordenado, ocupación en áreas ribereñas de los principales ríos y quebradas, para tener acceso al recurso agua de consumo y el desarrollo de actividades agrícolas; asimismo, se ve influenciado la colmatación de los cauces, factores que acentúan los efectos negativos que ocasionan los incrementos periódicos en los niveles de los ríos.

La elaboración del presente trabajo de investigación es transmitir la necesidad de acción concertada para hacer frente a peligro por inundación fluvial, con el fin de aportar técnicamente y contar con un procedimiento que sirva de consulta para los diversos actores locales y estén en condiciones de gestionar los riesgos en sus respectivos espacios geográficos.

En este contexto, el Instituto Nacional de Defensa Civil – INDECI, por medio del Centro de Estudios, Procesamiento de Información e Investigación para la Gestión Reactiva – CEPIG y la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial - CONIDA a través de la Dirección de Aplicaciones Espaciales y Geomática – DIAPG han desarrollado la investigación: Elementos expuestos y peligro por inundación fluvial en el tramo del río Piura Pte. Avelino Cáceres hasta el Pte. Grau, provincia de Piura, mediante la incorporación del uso combinado de información satelital, modelamiento hidrológico e hidráulico, elementos expuestos y registros de daños que permitirá contribuir con el componente Conocimiento del Riesgo” del Sistema de Alerta Temprana.

III. JUSTIFICACIÓN

Existe un marco nacional e internacional que reconoce la importancia de la investigación como eje clave para la implementación de la Gestión del Riesgo de Desastres, documentos como el Marco de Sendai, su antecesor el Marco de Acción de Hyogo e instrumentos como la Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres, realizada periódicamente por las Naciones Unidas, así como la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, los cuales concuerdan con la necesidad e importancia del desarrollo de investigación para comprender mejor el riesgo y alcanzar una respuesta óptima ante emergencias.

De acuerdo al marco normativo vigente, La Ley 29664, Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres – SINAGERD y su Reglamento, reconoce que la Gestión del Riesgo de Desastres está basada en la investigación científica, la misma que orientará a las políticas, estrategias y acciones en todos los niveles de gobierno y de la sociedad con la finalidad de proteger la vida de la población y el patrimonio de las personas y del estado, estableciendo como una de las funciones del Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI, el realizar estudios e investigaciones inherentes a los procesos de Preparación, Respuesta y Rehabilitación, para ello, cuenta con la Unidad Funcional del Centro del Centro de Estudios, Procesamiento de Información e Investigación para la Gestión Reactiva, creada con Resolución Jefatural N° 106- 2018- INDECI.

Para el fortalecimiento del proceso de descentralización del país, con el apoyo de la Presidencia del Consejo de Ministros se ha formulado una agenda para el desarrollo territorial de la región Piura, en dónde se identifica como uno de los principales problemas la presencia del fenómeno de El Niño y la inadecuada cultura de prevención y preparación.

Por su ubicación geográfica Piura está expuesta a fuertes lluvias estacionales (enero a marzo), principalmente en las cuencas media-altas. Esta condición climática cambia cuando se presenta el fenómeno El Niño, donde las lluvias se producen en toda la región, incluyendo la zona costera. El último evento El Niño 1997-1998, causó cuantiosas pérdidas económicas al Perú, principalmente por inundaciones fluviales, erosión de riberas y activación de quebradas por las cuales discurrieron flujos de detritos (huaicos). En la región después de 19 años, se presentó un evento excepcional denominado “Niño Costero”; percibido en la primera quincena del mes de enero (“Niño Costero débil”); pero a inicios del mes de marzo se declara la ocurrencia de un “Niño Costero moderado” acompañado con fuertes lluvias en las zonas medias y

bajas de las regiones Tumbes, Piura y Lambayeque, declinando su actividad a fines de abril. (INGEMMET, 2017)

En este sentido, la investigación: Elementos expuestos y peligro por inundación fluvial en el tramo del río Piura Pte. Avelino Cáceres hasta el Pte. Grau, provincia de Piura, considera que, la información sobre la evolución espacial y temporal de las inundaciones fluviales utilizando la noción de período de retorno, así como la sistematización de los eventos históricos registrados, y la identificación de los elementos expuestos por cada periodo de retorno, resulta de utilidad para implementar acciones específicas que permitan reducir los impactos de dichas inundaciones, incluso mediante la evacuación de personas y activos a áreas seguras antes de tales inundaciones; así como la emisión de alertas que consideren los potenciales impactos.

IV. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Elaborar un procedimiento para el análisis de elementos expuestos ante el peligro por inundación fluvial en el tramo del río Piura comprendido entre el Pte. Avelino Cáceres hasta el Pte. Grau, provincia de Piura.

3.2. Objetivos específicos

- Determinar los niveles de peligro en función de las potenciales áreas inundables para los periodos de retorno de 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años, en el tramo del río Piura comprendido entre el Pte. Avelino Cáceres hasta el Pte. Grau a través del modelamiento hidrológico e hidráulico.
- Explorar el uso de imágenes satelitales como insumo para determinar las potenciales áreas inundables.
- Analizar los datos históricos sobre los impactos de las inundaciones en el tramo del río Piura comprendido entre el Pte. Avelino Cáceres hasta el Pte. Grau.
- Proponer un modelo de alerta por inundación en base a la obtención de los elementos expuestos para los diferentes periodos de retorno del peligro.

V. FUNDAMENTO TEÓRICO

4.1. Hidrología

Es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos. (Aparicio, 1992)

También es conveniente mencionar la definición que plantea la Organización Meteorológica Mundial, donde destaca la importancia de la hidrología en relación con los recursos hidráulicos de la tierra y su aprovechamiento. “Hidrología es la ciencia que trata de los procesos que rigen el agotamiento y recuperación de los recursos de agua en las áreas continentales de la tierra y en las diversas fases del ciclo hidrológico”.

4.2. Hidráulica

Es una rama de la física y la ingeniería que se encarga del estudio de las propiedades mecánicas de los fluidos. Todo esto depende de las fuerzas que se interponen con la masa (fuerza) y empuje de la misma.

4.3. Vertientes Hidrográficas

Tal como se observa en la Figura N°1, en el Perú según el Sistema de codificación estándar internacional (Pfafstetter) existen un total de 159 unidades hidrográficas, distribuidas en tres vertientes:

Vertiente del pacífico: conformada por 62 ríos, los ríos se caracterizan porque solo transportan agua durante la época de lluvia, permaneciendo secos el resto del año. La precipitación media anual es de 600 mm, lo cual incluye a la costa y a la sierra, el 95% proviene de esta última.

Vertiente del Atlántico: conformada por 84 ríos, los ríos de esta vertiente se caracterizan por una gran longitud, baja pendiente, son ríos de gran magnitud, profundos, navegables y de caudal regular, desaguan en la gran amazona, que a su vez desemboca en el océano Atlántico. La precipitación media anual en esta vertiente es de 2400 mm.

Vertiente del Titicaca: conformada por 13 ríos dispuestos en forma radial y que confluyen en el Lago Titicaca. Son de recorrido corto y pequeñas pendientes. La precipitación media anual de esta vertiente es de 700 mm.

Figura 1. Vertientes Hidrográficas del Perú



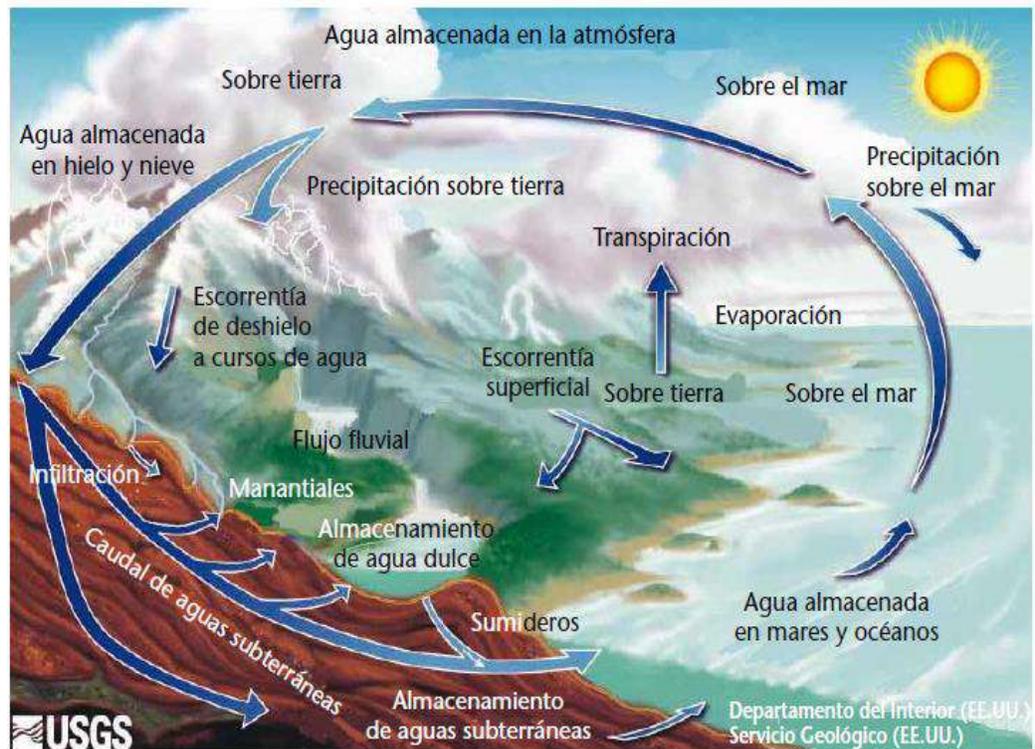
Fuente: Elaboración propia

4.4. Ciclo Hidrológico

El agua está presente en la tierra en cantidades considerables, en sus tres estados físicos: líquida, sólida y gaseosa. Está presente también en los principales medios de nuestro planeta a los que tienen fácil acceso los seres humanos: la atmósfera, los mares y océanos, y las masas terrestres. Dado que el agua puede desplazarse fácilmente de un medio a otro y cambiar de estado en respuesta a su entorno, constituye un medio físico dinámico, tanto en el espacio como en el tiempo. (OMM, 2020)

El sistema mundial de repositorios de almacenamiento de agua y las múltiples vías de comunicación entre todos ellos está considerado como un ciclo, como se indica en la Figura N°2. Tradicionalmente, las ciencias hidrológicas no han abarcado el ciclo hidrológico en su totalidad, sino que se han limitado a la parte terrestre del ciclo y a sus interacciones con los océanos y la atmósfera.

Figura 2. El Ciclo Hidrológico



Fuente: Tomada de guía de prácticas hidrológicas. OMM, 2020.

4.5. Cuenca hidrográfica

Territorio drenado por una única red de escorrentía superficial natural, cuyas aguas son conducidas al mar, lago o río, a través de un único colector denominado río principal. (WMO, UNESCO, 2012)

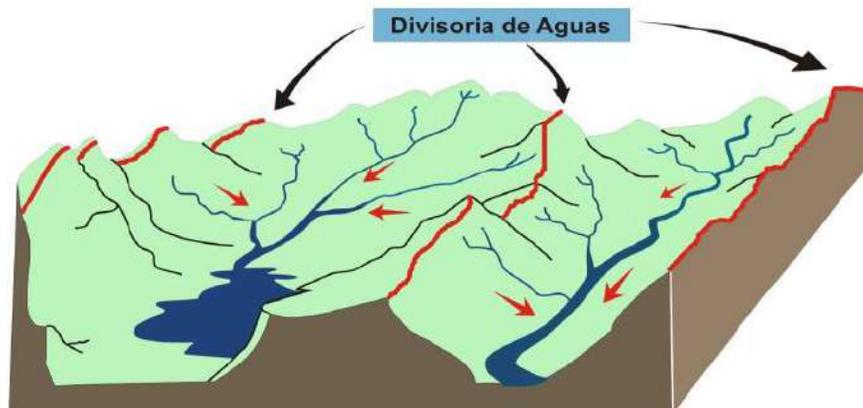
Es preciso diferenciar los términos de cuenca hidrológica e hidráulica, el (GWP, 2011), señala:

- Cuenca hidrográfica: Se refiere a la definición geográfica de la misma, es el contorno o límite de la misma que drena agua en un punto en común.

- Cuenca hidrológica: Se suele entender como una unidad para la gestión que se realiza dentro de la cuenca hidrográfica.

Para la delimitación de una cuenca hidrográfica se define y traza el límite de un espacio geográfico, siguiendo la línea que une puntos más elevados (divisoria de aguas), teniendo en cuenta que líneas de flujo son perpendiculares a curvas de nivel y hasta el punto emisor de aguas del río (punto de evacuación).

Figura 3. Divisoria de Aguas



Fuente: Foro Peruano para el Agua-GWP Perú, 2011

4.6. Precipitación

La precipitación es una parte importante del ciclo hidrológico del agua, responsable del depósito de agua dulce en el planeta, garantizando la vida en el planeta. La precipitación es generada por las nubes, cuando alcanzan un punto de saturación; en este punto las gotas de agua aumentan de tamaño hasta alcanzar el punto en que se precipitan por la fuerza de gravedad.

La precipitación se expresa en milímetros y se estima midiendo el agua que cae sobre un metro cuadrado de superficie durante 24 horas, expresando dicha cantidad en litros por metro cuadrado (lt/m^2).

Los instrumentos que se utilizan para determinar la cantidad de lluvia son: los pluviómetros (instrumento de lectura directa) y pluviógrafos (instrumento registrador).

4.6.1. Variación temporal de la precipitación

Las precipitaciones varían de acuerdo a ciertos ciclos temporales determinados por los movimientos de rotación y traslación terrestres y por la localización astronómica o geográfica de la zona. Esos ciclos pueden ser: diarios, mensuales

o estacionales o en ciclos anuales, en efecto, siempre hay meses en que las precipitaciones son mayores que en otros.

Para poder evaluar correctamente las características objetivas del clima, en el cual la precipitación, y en especial la lluvia, desempeña un papel muy importante, las precipitaciones mensuales deben haber sido observadas por un período de por lo menos 20 a 30 años.

La variación estacional de las precipitaciones, en especial de la lluvia, define el año hidrológico, definido como un periodo de doce meses durante el cual ocurre un ciclo anual climático completo, y que se escoge para permitir una comparación más significativa de los datos meteorológicos, que intenta reflejar adecuadamente el comportamiento de las precipitaciones sobre una determinada cuenca hidrográfica.

Se observa en las dos últimas décadas un incremento considerable en la cantidad de lluvia que precipita concentradamente en muy pocos días, contribuyendo a incrementar el riesgo de erosión del suelo, deslizamientos e inundaciones.

4.6.2. Variación espacial de la precipitación

La distribución espacial de la precipitación sobre los continentes es muy variada, así existen extensas áreas como los desiertos, donde las precipitaciones son extremadamente escasas, del orden 0 a 200 mm de precipitación por año, mientras que en las áreas próximas al Golfo de Darién entre Colombia y Panamá, la precipitación anual es superior a 3.000 mm.

La orografía del terreno influye fuertemente en las precipitaciones. Una elevación del terreno provoca muy frecuentemente un aumento local de las precipitaciones, al provocar la ascensión de las masas de aire saturadas de vapor de agua (lluvias orográficas).

Esta variabilidad espacial y temporal de las lluvias pueden ocasionar eventos hidroclimáticos extremos, tales como inundaciones y sequías. Estos eventos se han observado de manera más frecuente durante las últimas dos décadas, generando grandes pérdidas económicas y ambientales.

4.6.3. Lluvia media en una cuenca

El cálculo de la lluvia sobre un área o precipitación areal permite determinar la cantidad de lluvia sobre la superficie de cada subcuenca. La lluvia es medida en estaciones pluviométricas, las cuales están ubicadas en determinados puntos de la cuenca, por lo que solo se conoce la lluvia en estos puntos. Por lo tanto, las láminas de lluvia medidas en las estaciones deben distribuirse en toda la superficie de la cuenca. Existen diversos métodos para calcular la precipitación areal, entre ellos tenemos los siguientes:

- El método de la media aritmética, es un método sencillo. Consiste en promediar las láminas de precipitación de todas las estaciones contenidas dentro de cada subcuenca. Este método da resultados confiables solo si las estaciones están uniformemente distribuidas sobre el área y las mediciones no varían sustancialmente entre sí. Ya que este no es nuestro caso, no se puede aplicar este método.
- El método de Thiessen, en el cual se le asignan pesos relativos a cada estación para calcular la precipitación areal en cada subcuenca. Este método tiene en cuenta que algunas estaciones son más representativas que otras en el área en cuestión.
- El método de las isoyetas que vienen a ser líneas de igual lámina de precipitación. Las isoyetas se trazan de forma similar que las curvas de nivel; ubicando los puntos donde se encuentran las estaciones sobre el plano topográfico de la cuenca, y conocidos los valores promedios de precipitación de cada estación, se trazan las isoyetas mediante interpolación. Este método puede emplearse cuando se tiene un buen número de estaciones.

3.7. Análisis de Consistencia

La no homogeneidad e inconsistencia en secuencias hidrológicas representa uno de los aspectos más importantes del estudio de la hidrología, particularmente en lo relacionado a la conservación, desarrollo y control de los recursos hídricos. Los datos hidrológicos a nivel mensual, recopilados y automatizados, se procesan con el fin de determinar su confiabilidad y consistencia, la que consiste en determinar si la información hidrológica registrada en cada una de las estaciones es representativa de la zona y no presentan ningún tipo de error. (Araujo, 1983)

3.8. Tormenta de diseño

Una tormenta de diseño es un patrón de precipitación definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico. Usualmente la tormenta de diseño conforma la entrada al sistema, y los caudales resultantes a través de este se calculan utilizando procedimientos de lluvia-escorrentía y tránsito de caudales. (Villón, 2002a)

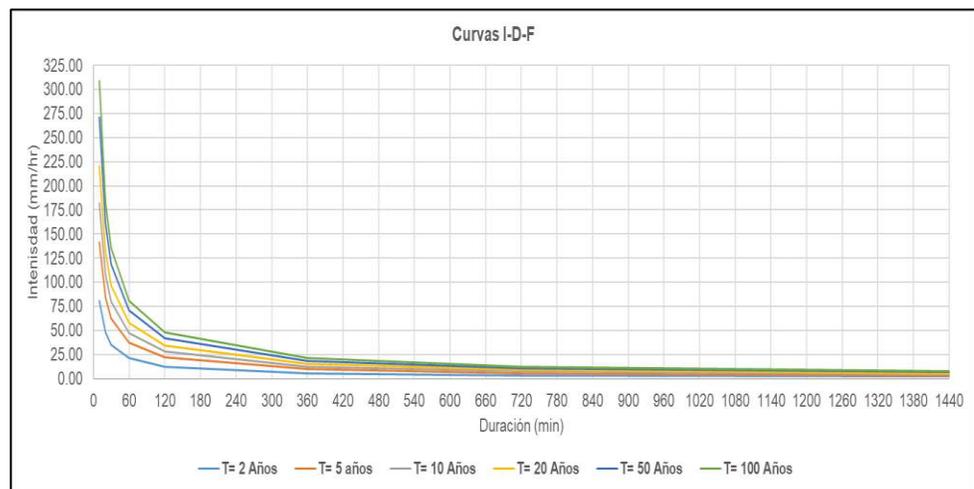
4.8.1. Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia- IDF

Los eventos de lluvia, se determinan haciendo uso de una tormenta de diseño o un evento que involucre una relación entre la intensidad de lluvia (o profundidad), la duración y las frecuencias o periodos de retorno apropiados para la obra o fenómeno a evaluar. (Villón, 2002a)

La intensidad es la tasa temporal de precipitación, es decir, la profundidad por unidad de tiempo (mm/h o pulg/h). Puede ser la intensidad instantánea o la intensidad promedio sobre la duración de la lluvia. (Villón, 2002a)

Se infiere que al aumentarse la duración de la lluvia disminuye su intensidad media, la formulación de esta dependencia es empírica y se determina caso por caso, con base a los datos observados directamente en el sitio de estudio o en otros sitios próximos con las características hidrometeorológicas similares.

Figura 4. Curvas I-D-F



Fuente: Elaboración propia

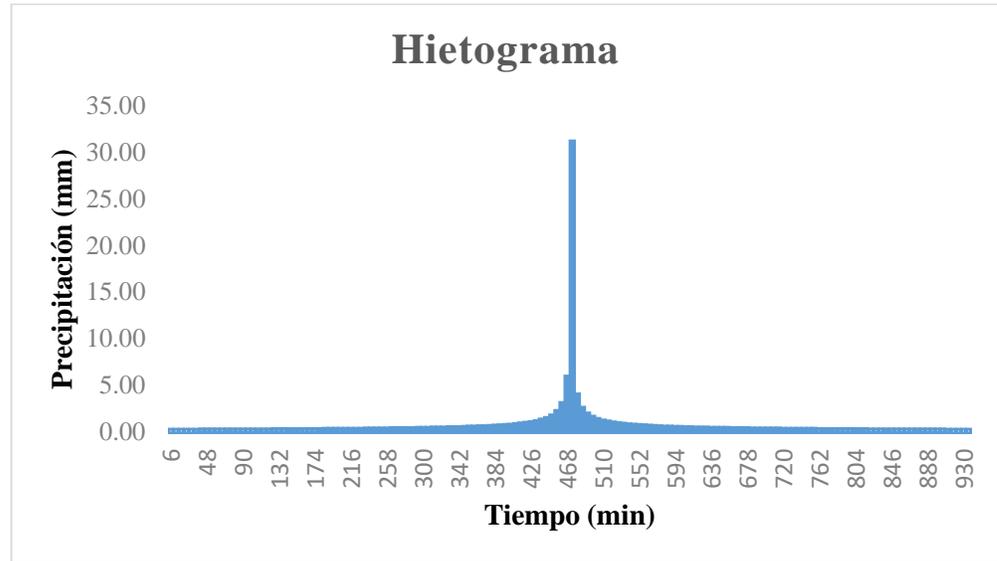
4.8.2. Hietogramas de precipitación

Un hietograma de precipitación es una distribución temporal de una intensidad de precipitación a lo largo de duración de la misma

El método del bloque alterno es según (Chow et al., 1994) una forma sencilla para desarrollar un hietograma de diseño utilizando una curva de intensidad-duración-frecuencia, especificando la profundidad de precipitación que ocurre en n intervalos de tiempo sucesivos de duración Δt sobre una duración total de $T_d = n\Delta t$. Después de seleccionar el periodo de retorno de diseño, la intensidad es leída en una curva IDF para cada una de las duraciones Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$, entre otros y la profundidad de precipitación correspondiente se encuentra al multiplicar la intensidad y la duración. Tomando diferencias entre valores sucesivos de profundidad de precipitación, se encuentra la cantidad de precipitación que debe añadirse por cada unidad adicional de tiempo Δt . Estos incrementos o bloques se reordenan en una secuencia temporal de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida T_d y que los demás bloques queden en orden descendente

alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para formar el hietograma de diseño.

Figura 5. Hietograma Tr 20 años Estación Morropón



Fuente: Elaboración propia

3.9. Periodo de retorno

El periodo de retorno T , se define como el intervalo promedio de tiempo en años, dentro de cual un evento de una determina magnitud puede ser igualado o excedido, por lo menos una vez en promedio. (Villón, 2002b). Estadísticamente el periodo de retorno es la inversa de la probabilidad de excedencia de un evento, es decir:

$$T = \frac{1}{P(X \geq x)} \dots \dots \dots (Ec1)$$

También puede ser representada por la probabilidad de no excedencia como se muestra a continuación:

$$T = \frac{1}{1 - P(X < x)} \dots \dots \dots (Ec2)$$

Donde:

- T = periodo de retorno
- $P(X \geq x)$ = probabilidad de excedencia

$P(X < x) =$ probabilidad de no excedencia

3.10. Funciones de distribución de probabilidad

La habilidad de un modelo probabilístico para ajustarse a los datos de precipitación depende de la flexibilidad y la naturaleza intrínseca de la forma de la función de distribución de probabilidades. Mientras más parámetros tenga un modelo, más versátil se vuelve su función de distribución de probabilidades y mejor se la puede ajustar a los datos. (Rivano, 2004)

Según (Chereque, 1989), no existe en hidrología ninguna base teórica sólida para justificar una función específica de distribución de probabilidades. Como no hay un procedimiento teórico para decidir qué modelo probabilístico es el "mejor" en un análisis de frecuencia particular, es habitual verificar y comparar la conveniencia o conformidad de muchas distribuciones candidatas y hacer una elección entre ellas basándose en consideraciones como ajuste de datos disponibles, facilidad computacional y consistencia con varios tamaños de muestra; sin embargo cabe precisar que por experiencia de expertos la mejor distribución para eventos de máximas avenidas es la distribución de Gumbel.

La distribución Gumbel, conocida como Distribución General de Valores Extremos Tipo I. En un conjunto de datos se seleccionan los valores máximos o mínimos que vienen a ser los valores extremos. Como ejemplo se puede considerar el caudal máximo en cierta estación en un determinado año; y a la vez, el conjunto de datos de caudales máximos para diferentes años, conforman una serie de valores extremos (Chow et al, 1994). La función se define en la Ecuación 3:

$$F(x) = \exp \left[- \left(1 - \frac{k(x - \mu)}{\alpha} \right)^{1/k} \right] \dots \dots \dots (Ec3)$$

Donde k , μ y α son los parámetros a determinar

3.11. Pruebas de bondad de ajuste

Las pruebas de bondad de ajuste son pruebas de hipótesis que permiten evaluar si un conjunto de datos es una muestra independiente de la distribución elegida. Los métodos de uso conocido en la teoría estadística, son la X^2 y la Kolmogorov – Smirnov. La Prueba Chi-cuadrado (X^2) fue propuesta por Karl Pearson en 1900, se aplica para verificar bondad de las distribuciones normales y log normales. (MTC, 2008). El método de Smirnov-Kolmogorov, consiste en comparar las diferencias existentes entre la probabilidad empírica de los datos de la muestra y la probabilidad teórica, tomando el máximo valor absoluto de la diferencia D entre el valor observado $F_o(X_m)$ y el valor de la

recta teórica del modelo es decir el valor estimado $F(X_m)$ (Ec4). Luego, se compara con un valor crítico “d” el cual depende de la cantidad de datos y del nivel de significación (confianza) escogido. Si $D < d$ se acepta la hipótesis nula.

$$D = \text{máx} |F_0(xm) - F(xm)| \dots \dots \dots (Ec4)$$

3.12. Hidrograma de caudal

Es la representación gráfica que permite observar el comportamiento del caudal acumulado durante la tormenta a través del tiempo de la misma.

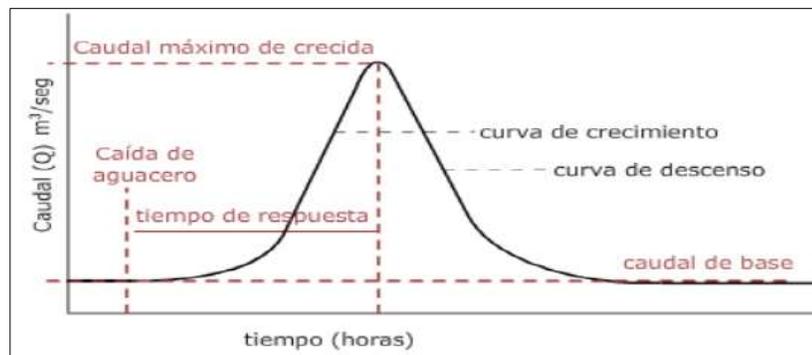
- **Hidrograma Unitario**

Es un método lineal propuesto por Sherman en 1932, es un hidrograma típico para la cuenca. Se denomina unitario puesto que, el volumen de escorrentía bajo el hidrograma se ajusta generalmente a 1 cm (ó 1 pulg).

- **Hidrograma Sintético**

Un hidrograma sintético se obtiene usando las características fisiográficas y parámetros de la cuenca de interés. Su finalidad es representar o simular un hidrograma representativo del fenómeno hidrológico de la cuenca, para determinar el caudal pico para diseñar.

Figura 6. Componente de un hidrograma de caudal durante una tormenta



Fuente: Adaptado de Chow, Maidment, Mays 1994: 13

3.13. Producto PISCO

En Perú, se ha generado un conjunto de datos cuadrículados de lluvia denominado producto Pisco, desarrollado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI. Este producto es el resultado de la combinación de datos de estaciones terrenas con climatologías, reanálisis y productos satelitales de estimación de lluvias para obtener una base de datos grillada a nivel nacional a una resolución espacial de 0.1°.

PISCO de precipitación

El producto Piscov2.1 en temporalidad diaria y mensual proporciona datos grillados estables de precipitación a nivel mensual y diarios para el periodo 1981-2016, facilitando de este modo mayor disponibilidad de los datos de precipitación para su uso en diferentes actividades ligadas al análisis hidrológico.

Producto PISCO_HyM_GR2M

Este producto hidrológico fue desarrollado empleando los datos grillados de precipitación y evapotranspiración a nivel mensual del producto PISCO y el modelo hidrológico GR2M, tiene cobertura en todo el territorio nacional, incluyendo cuencas trasfronterizas. Este producto en la versión 1.1, genera variables como precipitación, evapotranspiración, almacenamiento en el suelo, escorrentía de salida a escala de subcuenca y a escala de tramo de río genera el caudal acumulado para el periodo enero 1981 a marzo 2020.

3.14. Fenómeno El Niño

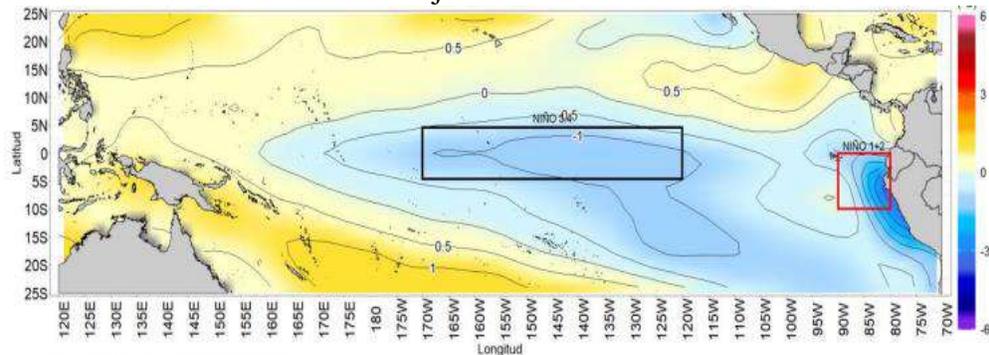
El significado del fenómeno El Niño ha ido cambiando a lo largo de los años. En algunos países de Sudamérica como Perú y Ecuador, se denomina “El Niño” al incremento de la Temperatura Superficial del agua del Mar (TSM) en el litoral de la costa oeste de Sudamérica con ocurrencia de lluvias intensas. (SENAMHI, 2014)

El Niño-Oscilación Sur (ENOS) es un evento natural de variabilidad climática en el que se interrelacionan el océano y la atmósfera (SENAMHI, 2014), caracterizado por la fluctuación de las temperaturas del océano en la parte central y oriental del Pacífico ecuatorial, asociada a cambios en la atmósfera. (OMM, 2014), siendo un modo de variabilidad de gran escala, cuya fase cálida puede ser llamada “El Niño global” dado que puede producir impactos remotos en todo el planeta, pero cuyo calentamiento del mar no ocurre necesariamente en la costa de Perú sino en el Pacífico ecuatorial central. (Takahashi, 2017)

En la costa norte del Perú, el 2017 se registró un FEN muy fuerte pero que no coincidió con un FEN Global, evento similar al que ocurrió en 1925 (Takahashi y Martínez, 2017). El origen del evento ocurrido el 2017 es diferente al del ENOS, por lo que el Estudio Nacional del Fenómeno del Niño (ENFEN) nombró al evento climático con altas temperaturas del mar en la costa norte como “El Niño Costero”, implica que el mar está caliente frente a Perú independientemente de lo que ocurra con ENOS, pero tampoco considera si ocurren lluvias e inundaciones en la costa. (Takahashi, 2017)

Figura 7. Promedio mensual de las anomalías de TSM en el Pacífico en abril 2022

La región Niño 3.4 está delimitada con el recuadro negro y la región Niño 1+2 está delimitada con el recuadro rojo



Fuente: (ENFEN, 2022)

3.15. Inundaciones

Las inundaciones son peligros generados por fenómenos de origen hidrometeorológico, donde eventualmente el agua ocupa un área seca en un momento y lugar determinado.

Este peligro es influenciado por la ocupación en áreas ribereñas de los principales ríos y quebradas, con la finalidad de tener acceso al recurso agua para consumo y para el desarrollo de actividades agrícolas o ganaderas; así como, por el crecimiento de las poblaciones y colmatación de los cauces, factores que acentúan los efectos negativos que ocasionan los incrementos periódicos en los niveles de los ríos.

Según (WMO, UNESCO, 2012) inundación es: “el desbordamiento del agua fuera de los confines normales de un río o cualquier masa de agua”. Asimismo, se define avenida como: “Una elevación rápida y habitualmente breve del nivel de las aguas en un río o arroyo hasta un máximo desde el cual dicho nivel desciende a menor velocidad”.

Según (INGEMMET, 2017) inundación fluvial es un peligro natural que se presenta excepcionalmente en la cuenca media y baja de los ríos Piura y Chira, a lo largo de terrazas bajas del río Huancabamba y en quebradas secas de gran extensión, cuando se presenta el fenómeno de El Niño, debido a que la gran cantidad de precipitación caída en zonas de montaña, colinas y pampa costanera, al concentrarse en los cursos de ríos y quebradas sobrepasan sus capacidades de carga, provocando desbordes e inundación de tierras adyacentes.

Los cursos de ríos y quebradas que atraviesan zonas de pendiente mínima (pampa costanera), desarrollan amplias terrazas y llanuras de inundación

donde el río divaga, para poder compensar la falta de pendiente y lograr que por él discurren los caudales excepcionales que transporta. El ensanchamiento del cauce de un río y la destrucción de parte de la llanura de inundación son resultados frecuentes durante la ocurrencia de estos fenómenos.

Figura 8. Vista panorámica de toda la ciudad de Piura inundada



Fuente: Foto Walac Noticias.

El (CENEPRED, 2015), considera que las inundaciones pueden clasificarse de acuerdo a su duración y origen de la siguiente manera:

a) Por su duración

▪ Inundaciones dinámicas o rápidas:

Se producen en ríos cuyas cuencas presentan fuertes pendientes, por efecto de las lluvias intensas. Las crecidas de los ríos son repentinas y de corta duración. Son las que producen los mayores daños en la población e infraestructura, debido a que el tiempo de reacción es casi nulo. Por ejemplo: los ríos de la cuenca del Océano Pacífico (La Leche, Tumbes, etc.).

▪ Inundaciones estáticas o lentas:

Generalmente se producen cuando las lluvias son persistentes y generalizadas, producen un aumento paulatino del caudal del río hasta superar su capacidad máxima de transporte, por lo que el río se desborda, inundando áreas planas cercanas al mismo, a estas áreas se les denomina llanuras de Inundación.

b) Por su origen

▪ Inundaciones pluviales:

Se produce por la acumulación de agua de lluvia en un determinado lugar o área geográfica sin que este fenómeno coincida necesariamente con el desbordamiento de un cauce fluvial. Este tipo de inundación se genera tras un régimen de lluvias intensas persistentes, es decir, por la concentración de un elevado volumen de lluvia en un intervalo de tiempo muy breve o por la incidencia de una precipitación moderada y persistente durante un amplio período de tiempo sobre un suelo poco permeable.

- **Inundaciones fluviales:**
Causadas por el desbordamiento de los ríos y los arroyos. Es atribuida al aumento brusco del volumen de agua más allá de lo que un lecho o cauce es capaz de transportar sin desbordarse, durante lo que se denomina crecida (consecuencia del exceso de lluvias).
- **Inundaciones por operaciones incorrectas de obras de infraestructura hidráulica o rotura:**
La rotura de una presa, por pequeña que ésta sea, puede llegar a causar una serie de estragos no sólo a la población sino también a sus bienes, infraestructura y al ambiente. La propagación de la onda de agua en ese caso resultará más dañina cuando mayor sea el caudal circulante, menor sea el tiempo de propagación y más importante sean los elementos existentes en la zona afectada (infraestructuras de servicios esenciales para la comunidad, núcleos de población, espacios naturales protegidos, explotaciones agropecuarias, etc.).

A veces, la obstrucción de cauces naturales o artificiales (obturación de tuberías o cauces soterrados) debida a la acumulación de troncos y sedimentos, también provoca desbordamientos. En ocasiones, los propios puentes suelen retener los flotantes que arrastra el río, obstaculizando el paso del agua y agravando el problema.

- **Inundaciones costeras:**
Tienen presencia cuando el nivel medio del mar asciende a la marea y permite que éste penetre en las zonas costeras generando inundación en grandes extensiones de terreno.(CENAPRED, 2004)

3.16. Peligro ²

Probabilidad de que un fenómeno físico, potencialmente dañino, de origen natural o inducido por la acción humana, se presente en un lugar específico, con una cierta intensidad y en un período de tiempo y frecuencia definidos.

² Definiciones de Peligro, elementos en riesgo o expuestos y riesgo de desastres, obtenidos del DS 048-2011-PCM - Reglamento de la Ley N° 29664.

3.17. Elementos en riesgo o expuestos

Es el contexto social, material y ambiental presentado por las personas y por los recursos, servicios y ecosistemas que pueden ser afectados por un fenómeno físico.

3.18. Centro Operaciones De Emergencia (COE)

Es un instrumento del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - SINAGERD y se constituye como órgano de las Entidades Públicas conformantes de éste, debiendo ser implementado en los tres niveles de Gobierno, por ello se cuenta con:

- Centro de Operaciones de Emergencia Nacional – COEN.
- Centro de Operaciones de Emergencia Sectorial – COES.
- Centro de Operaciones de Emergencia Regional – COER.
- Centro de Operaciones de Emergencia Local – COEL.
- COE Provincial – COEP
- COE Distrital – COED³

El Centro de Operaciones de Emergencia, proporciona información sobre el monitoreo de peligros, peligros inminentes, emergencias y desastres, para la toma de decisiones de las autoridades en acciones vinculadas a la gestión reactiva.

Los productos que elabora el Centro de Operaciones de Emergencia son:

- Reporte de peligro inminente
- Reporte de emergencia
- Informe de emergencia
- Notas de Prensa
- Inventario de Recursos
- Boletín informativo
- Reporte de monitoreo y alerta temprana
- Resumen ejecutivo de emergencia

Asimismo, los COE comparten información real y oportuna entre los COE en los tres niveles de gobierno, con la finalidad de coadyuvar a la toma de decisiones de las autoridades en sus respectivos ámbitos jurisdiccionales.

El Centro de Operaciones de Emergencia Nacional – COEN, proporciona información técnica disponible que requiera el Consejo Nacional de Gestión

³ Los COE de los centros poblados y comunidades se implementarán en el marco del artículo 53.4 del Reglamento de la Ley del SINAGERD y se rigen por los estándares de los lineamientos para el funcionamiento de los COE.

del Riesgo de Desastres para la toma de decisiones, para lo cual, a través del INDECI, propone al ente rector los criterios para la participación de las diferentes entidades públicas en éste y administra sus instalaciones. Asimismo, brinda el apoyo técnico y estratégico necesario a los Centros de Operaciones de Emergencia (COE).⁴

EL Centro de Operaciones de Emergencia Regional - COER, es responsable de coordinar e intercambiar información validada relacionada a peligros, peligros inminentes, emergencias y desastres con el COEN; así como, con los COEL de su jurisdicción. Se organizan en concordancia con sus competencias y tienen como mínimo las áreas de dirección, operativa y articulación.

El Centro de Operaciones de Emergencia Local - COEL, responde a los niveles de municipalidades provincial y distrital y tienen como mínimo las áreas dirección y operativa.

El Centro de Operaciones de Emergencia Provincial -COEP, es responsable de coordinar e intercambiar información validada relacionada a peligros, peligros inminentes, emergencias y desastres con el COER; así como, con los COED de su jurisdicción y el COEN.

El Centro de Operaciones de Emergencia Distrital -COED, es responsable de coordinar e intercambiar información validada relacionada a peligros, peligros inminentes, emergencias y desastres con el COEP; así como, con el COEN.

El monitoreo de peligros, peligros inminentes, emergencias y la administración de la información de los Centros Poblados y comunidades, mientras no cuenten con los recursos necesarios, será ejecutado y consolidado por los centros de Operaciones de Emergencia Distrital - COED, con la participación autoridades respectivas.

Los Centros de Operaciones de Emergencia Regional (COER) y/o Centros de Operaciones de Emergencia Distrital -COED administran los sistemas de difusión y comunicación de los Sistemas de Alerta Temprana que el INDECI proporcione, debiendo informar mensualmente al COEN sobre su funcionamiento.

⁴ RM N°258-2021-PCM

3.19. Sistema de Alerta Temprana

Un Sistema de Alerta Temprana (SAT) es el conjunto de capacidades, instrumentos y procedimientos articulados para generar y difundir información de alerta de manera oportuna, analizar y actuar organizadamente sobre la base de sistemas de vigilancia y monitoreo de peligros, así como en establecer y desarrollar las acciones y capacidades locales con el fin de permitir que las personas, comunidades y organizaciones expuestas a un peligro se preparen y actúen de forma apropiada y anticipada para reducir o evitar la pérdida de vidas. (PCM, 2015)

En Perú, el año 2015, mediante la R.M. N°173-2015/PCM, se aprobaron los “Lineamientos para la conformación y funcionamiento de la Red Nacional de Alerta Temprana (RNAT) y la conformación, funcionamiento y fortalecimiento de los Sistemas de Alerta Temprana (SAT). Este documento establece que un SAT se estructura sobre la base de cuatro componentes: 1. Conocimiento de los riesgos. 2. Seguimiento y alerta. 3. Difusión y Comunicación y 4. Capacidad de Respuesta.

Los SAT son implementados en zonas de recurrente afectación, ante la presencia de vulnerabilidad de la población y la ocurrencia de diversos peligros, que suceden en el territorio peruano. Estos son monitoreados a través de los Centro de Operaciones de Emergencia a nivel Nacional, Regional, Local o el que haga sus veces y son articulados a través de la Red Nacional de Alerta Temprana (RNAT).

La RNAT funciona a través de un Comité Técnico de Coordinación, integrado por los representantes de las entidades técnico científicas, universidades y sectores a propuesta del Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI quien lo integra y preside. (PCM, 2015)

Se entiende por ALERTA, al estado que se declara con el fin que las autoridades competentes, activen protocolos de acción para que la población tome precauciones específicas, debido a la posible ocurrencia de un peligro que afecte a una determinada zona. Al confirmarse la ocurrencia del evento se emite la comunicación de ALARMA, para la ejecución de los planes de contingencia y evacuación de la población.

3.19.1. Sistemas de Alerta Temprana para inundaciones

Según (PCM, 2020) las entidades con responsabilidad para la emisión de avisos, alertas y alarmas ante lluvias intensas y peligros asociados son las siguientes:

- a) Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI

- Realiza el monitoreo y pronóstico de los peligros meteorológicos e hidrológicos de manera permanente, confiable, oportuna y accesible a la población en general, basado en sistemas observacionales hidrometeorológicos; en el marco de sus competencias.
- Elabora avisos correspondientes en diferentes escalas temporales y espaciales.
- Emite y difunde los avisos sobre lluvias intensas, crecida de ríos y posible activación de quebradas para su respectivo análisis y oportuna aplicación por parte de las entidades correspondientes del SINAGERD.

b) Instituto Nacional de Defensa Civil – INDECI

El INDECI interviene a través del Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN), quien centraliza, analiza y procesa la información meteorológica e hidrológica de las entidades técnico-científicas, sobre las lluvias intensas y peligros asociados, para que en caso se determine si corresponde, proceder con la difusión de alertas o alarmas a los tres niveles de gobierno y población en general.

c) Gobiernos Regionales y Locales

Los gobiernos regionales y locales representados por sus Centros de Operaciones de Emergencia Regional, tienen la función de centralizar, analizar y procesan la información meteorológica e hidrológica de las entidades técnico-científicas, sobre la crecida de ríos y activación de quebradas, para que en caso se determine si corresponde, proceder con la difusión de alertas o alarmas a las entidades y población en general en su respectiva jurisdicción.

Los peligros considerados para la activación del SAT para inundaciones son:

- **Lluvias intensas:** Se refiere a sistemas de precipitaciones de alta intensidad, incluyendo granizo, así como ráfagas de viento y descargas eléctricas asociadas a tormentas, que pueden producir aniegos y daños a la infraestructura, cultivos o la integridad física.
- **Crecidas de los ríos:** Se refiere a la elevación del nivel del agua o caudal de los ríos que puede producir desbordes de estos, así como erosión y transporte de sedimentos, y otras manifestaciones físicas que puedan impactar las actividades, infraestructura, o integridad física de las personas.

- **Activación de las quebradas:** Se refiere a los flujos de agua y movimientos en masa rápidos encausados en quebradas o cuencas pequeñas resultantes de la acción de las lluvias precedentes y actuales y las condiciones geológicas, incluyendo los huaycos.

Acciones para la emisión de avisos, alertas y alarmas

Las acciones que se describen a continuación se aplican cuando se presentan lluvias intensas, crecidas de ríos y posible activación de quebradas.

Tabla 1. Acciones ante lluvias intensas

RESPONSABLES	INSUMO	ACCIONES	PRODUCTO
SENAMHI	<ul style="list-style-type: none"> -Datos de la red Nacional de Estaciones Meteorológicas y redes de terceros. -Detectores de rayos. -Satélites meteorológicos. -Radares meteorológicos. -Otras tecnologías. -Simulaciones y pronósticos numéricos meteorológicos. 	<ul style="list-style-type: none"> -Centralizar y procesar información meteorológica. -Realizar el seguimiento, monitoreo permanente y pronóstico de lluvias intensas. -Elaborar avisos de acuerdo al plazo correspondiente incluyendo zonas de posible afectación, así como, recomendaciones generales. -Emitir avisos de lluvias intensas al COEN, COES, COER Y COEL. 	<ul style="list-style-type: none"> Avisos meteorológicos: -Plazo extendido. -Corto Plazo. -Muy corto plazo.
INDECI-COEN COES, COER Y COEL (Provincial y Distrital)	<ul style="list-style-type: none"> -Aviso del plazo extendido. -Aviso de corto plazo. 	<ul style="list-style-type: none"> -Analizar los niveles de intensidad del aviso del SENAMHI e identificar las zonas de probable afectación. -Elaborar el boletín informativo y mensajes incorporado las recomendaciones a las autoridades locales y a la población en general. -Difundir el boletín y mensajes a través de los mecanismos de comunicación con los que se disponga. 	<ul style="list-style-type: none"> -Boletín informativo. -Mensajes SMS (COEN). -Mensajes vía EWBS (COEN).

	<ul style="list-style-type: none"> -Aviso de Muy corto plazo. -Aviso de plazo intermedio. 	<ul style="list-style-type: none"> -Analizar los niveles de intensidad del aviso del SENAMHI e identificar las zonas probable afectación. -El COEN comunica a los COEL, la información sobre las lluvias intensas a efecto de que se tomen las acciones pertinentes. 	<ul style="list-style-type: none"> -Enlace de comunicación del COEN a los COE.
INDECI - COEN Gobiernos regionales y locales.	<ul style="list-style-type: none"> -Aviso de Plazo extendido. -Aviso de corto plazo. 	<ul style="list-style-type: none"> -Analizar la información consolidada sobre avisos e identificar las zonas de probable afectación. -Elaborar y emitir alerta a las entidades y población en general en su jurisdicción. 	<ul style="list-style-type: none"> -Alerta vía EWBS (COEN). -Alerta mediante otros medios de comunicación disponibles.

Fuente: Protocolo para la emisión de avisos, alertas y alarmas ante lluvias intensas y peligros asociados.

Tabla 2. Acciones ante crecidas de ríos

FASE	RESPONSABLES	INSUMO	ACCIONES	PRODUCTO
1 Monitoreo pronóstico y emisión de avisos	SENAMHI	<ul style="list-style-type: none"> -Datos de la red Nacional de Estaciones hidrológicas y redes de terceros. -Aviso de lluvias intensas. -Datos de pronóstico de lluvias y temperaturas. -Satélites meteorológicos. -Datos de radares meteorológicos. -Datos de aforo. 	<ul style="list-style-type: none"> -Centralizar y procesar información meteorológica e hidrológica. -Realizar el seguimiento, monitoreo permanente y pronóstico de caudales y niveles. -Elaborar avisos de acuerdo al plazo correspondiente incluyendo zonas de posible afectación, así como, recomendaciones generales, donde se cuente con capacidad operativa. 	<ul style="list-style-type: none"> Avisos meteorológicos: -Plazo extendido. -Corto Plazo. -Muy corto plazo. -Plazo inmediato.

			-Emitir avisos de crecida de ríos al COEN, COES, COER Y COEL.	
2 Análisis de la información	INDECI-COEN COES, COER Y COEL (Provincial y Distrital)	-Aviso del plazo extendido. -Aviso de corto plazo.	-Analizar los umbrales del aviso del SENAMHI e identificar las zonas de probable afectación. -Elaborar el boletín informativo y mensajes incorporando las recomendaciones a las autoridades locales y a la población en general. -Difundir el boletín y mensajes a través de los mecanismos de comunicación con los que se disponga.	-Boletín informativo. -Mensajes SMS (COEN). - Mensajes vía EWBS (COEN).

3 Emisión de Alerta.	Gobiernos regionales y locales. INDECI - COEN	-Aviso de muy corto plazo.	<ul style="list-style-type: none"> -Analizar la información consolidada sobre avisos, SAT locales operativos y/u otra información relevante, identificar las zonas de probable afectación. -Elaborar y emitir alerta o alarma a las entidades y población en general en su jurisdicción según corresponda. -Verificar recepción de alerta o alarma. 	<ul style="list-style-type: none"> -Alerta o alarma vía EWBS (COEN). -Alerta o alarma vía SISMATE (COEN). -Alerta o alarma mediante otros medios de comunicación disponibles.
----------------------------	--	-------------------------------	--	--

Fuente: Protocolo para la emisión de avisos, alertas y alarmas ante lluvias intensas y peligros asociados.

Tabla 3. Acciones ante posible activación de quebradas

FASE	RESPONSABLES	INSUMO	ACCIONES	PRODUCTO
1 Monitoreo pronóstico y emisión de avisos	SENAMHI	<ul style="list-style-type: none"> ü Datos de la red Nacional de Estaciones Meteorológicas y redes de terceros. ü Datos generados por el Sistema de Monitoreo de Movimientos en Masa potenciales generados por Lluvias Intensas (SILVIA). ü Aviso de Lluvias 	<ul style="list-style-type: none"> ü Centralizar y procesar información meteorológica. ü Realizar el seguimiento, monitoreo permanente y pronóstico de lluvias intensas. ü Elaborar avisos de acuerdo al plazo correspondiente incluyendo zonas de posible afectación, así como, recomendaciones generales, donde se cuente con capacidad operativa. ü Emitir avisos de posible activación de 	<ul style="list-style-type: none"> ü Aviso de Corto Plazo.

		<ul style="list-style-type: none"> Intensas. üDatos de pronóstico de lluvias. üDatos de Satélites meteorológicos. üDatos de radares meteorológicos. 	quebradas al COEN, COES, COER Y COEL.	
	COEN	<ul style="list-style-type: none"> üAviso de corto plazo. üTabla de distritos de posible activación de quebrada. 	<ul style="list-style-type: none"> üDifundir el mensaje sobre posible activación de quebrada y recomendaciones a las autoridades locales, COER y COEL correspondientes, a través de los mecanismos de comunicación del COEN. 	<ul style="list-style-type: none"> üMensaje SMS.
2 Análisis de la información	Gobiernos regionales y locales INDECI - COEN	<ul style="list-style-type: none"> üAviso De corto plazo. üTabla de distritos de posible activación de quebrada. 	<ul style="list-style-type: none"> üAnalizar los umbrales del aviso del SENAMHI e identificar las zonas probable afectación. 	<ul style="list-style-type: none"> üBoletín con recomendaciones, emitido mediante los medios de comunicación disponibles.
3 Emisión de Alerta.	Gobiernos regionales y locales INDECI - COEN	<ul style="list-style-type: none"> üAviso De corto plazo. üBoletines, avisos u otros de las entidades técnico - científicas. üSAT. 	<ul style="list-style-type: none"> üAnalizar la información consolidada sobre avisos e identificar las zonas de probable afectación. üElaborar y emitir alerta a las entidades y población en general en su jurisdicción. ü Verificar recepción de alerta o alarma. 	<ul style="list-style-type: none"> üAlerta o alarma mediante los medios de comunicación disponibles.

Fuente: Protocolo para la emisión de avisos, alertas y alarmas ante lluvias intensas y peligros asociados.

3.20. Fundamento físico de la teledetección por satélite

Desde el punto de vista físico, la teledetección parte del principio de la existencia de una perturbación (la energía electromagnética), que el sistema observado produce en el medio. Esta energía se transmite al sistema receptor que capta una señal que será registrada, almacenada y posteriormente interpretada. Desde el punto de vista práctico, la teledetección tiene por objeto el reconocimiento de las características de la superficie terrestre y de los fenómenos que en ella tienen lugar a partir de los datos registrados por el sensor. (Sobrio, 2000).

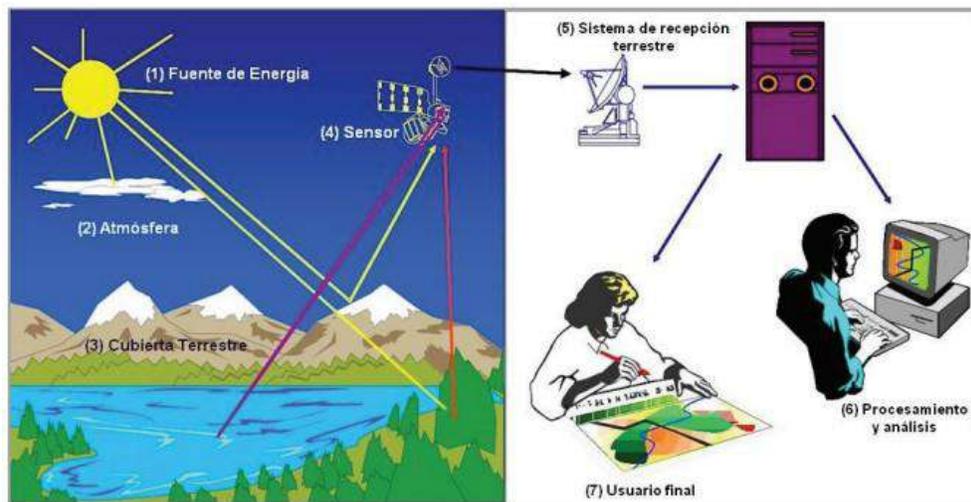
Componentes de un sistema de teledetección

El fenómeno de la teledetección es posible gracias a la interacción de la energía electromagnética con las cubiertas terrestres. Estas tienen un componente reflectivo variable, condicionado por factores externos (ambientales) como por sus propias características físico-químico en el momento de la toma de la imagen. (Pérez y Muñoz, 2006).

El primero de estos componentes es una fuente generadora de radiación electromagnética, el sol. La energía originada por esta fuente se refleja en las distintas cubiertas terrestres, y tras atravesar la atmósfera, es recogida por sensores ópticos-electrónicos situados a bordo de vehículos espaciales. (Pérez y Muñoz, 2006).

Dicha información es transmitida a Tierra, como una señal digital, en forma de matriz numérica. En los sistemas de recepción se lleva a cabo un primer tratamiento de la imagen, gracias al cual son depurados algunos errores de índole geométrico o radiométrico antes de ser distribuida a los usuarios (Figura N°9). Por último, la imagen en formato analógico o digital es analizada por los usuarios. Estos realizan procesos de tratamiento visual o digital, tras los cuales se obtienen unos nuevos datos que pueden cobrar forma de mapas temáticos o tablas estadísticas que recogen el comportamiento de una determinada variable espacial (Pérez, y Muñoz, 2006).

Figura 9. Componentes del sistema de teledetección



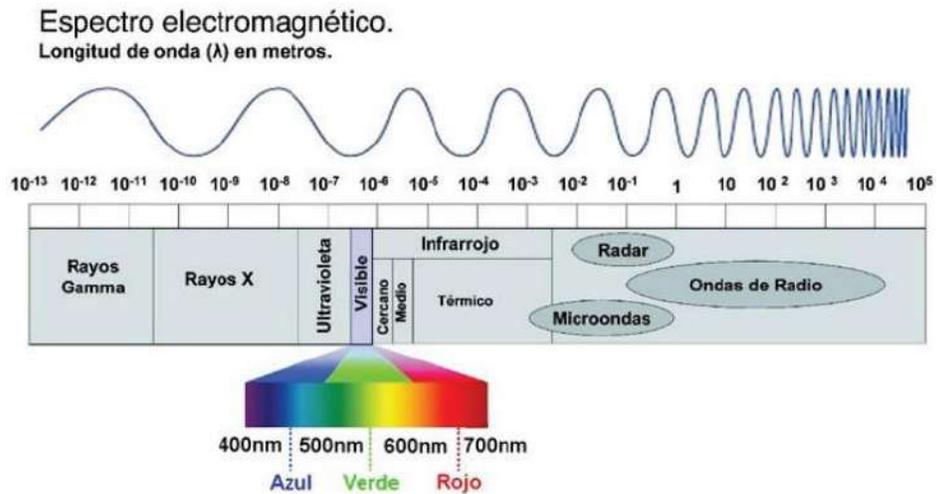
Fuente: Martínez, J. y Martín, P. Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente. 2010

El Espectro Electromagnético

Los sensores utilizados en los sistemas de teledetección permiten extender nuestro dominio de exploración desde el visible hasta las microondas. Debido a los mecanismos físicos de interacción de la radiación electromagnética con la materia son diferentes en los distintos intervalos espectrales, podemos por tanto pensar que la teledetección nos aportara informaciones suplementarias sobre el estado de los suelos y de la atmosfera.

La interacción de las ondas electromagnéticas con las superficies naturales y la atmosfera depende fuertemente de la frecuencia de las ondas. Las ondas en las diferentes bandas espectrales tienden a excitar los diferentes mecanismos de interacción electrónicos, moleculares o conductivos. La Figura N°10 representa el espectro electromagnético, los diferentes tipos de radiación se clasifican en función de su longitud de onda y su frecuencia. (Sobrino, 2000).

Figura 10. Discriminación de la región visible



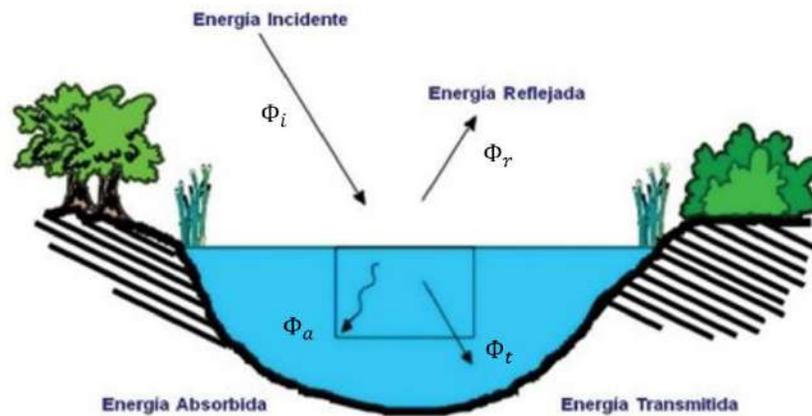
Fuente: <http://goo.gl/WQvS0G>

Características radiativas de la materia

Se analiza la interacción de la radiación electromagnética con la materia con la finalidad de caracterizar el sistema óptico de estudio. El modo de que la radiación interacciona con la materia depende del rango del espectro electromagnético que se considera.

Cuando un flujo de energía radiante, Φ_i alcanza la superficie de cualquier material, una parte de esta radiación es reflejada y, por tanto, es devuelta al medio del que procede, originando así un flujo reflejado, Φ_r . Otra parte es absorbida por el propio objeto, constituyendo un flujo Φ_a . Por último, una fracción del flujo incidente será transmitida Φ_t , normalmente en otras formas de energía. La Figura N° 11, muestra un esquema de la transformación que sufre el flujo incidente al interactuar con la superficie. (Sobrinó, 2000).

Figura 11. Propiedades de la materia: energía reflejada, absorbida y transmitidas



Fuente: Fundación Instituto de Ingeniería, curso Introducción a la Geomática. 2005. (Modificado)

De este modo, la radiación que recibe la superficie puede descomponerse en tres términos:

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t$$

Es habitual expresar la anterior ecuación en unidades relativas, para ello se divide por el flujo incidente, de forma que se llega a la relación:

$$1 = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} + \frac{\Phi_a}{\Phi_i} + \frac{\Phi_t}{\Phi_i} = \rho + \alpha + \tau$$

En la anterior expresión ρ , α y τ se conocen como reflectividad, absorptividad y transmisividad, respectivamente. El interés en la interacción solar con las superficies naturales para el análisis de los datos que capta un sensor exterior a ellas, que opera en el intervalo espectral de 0.3 a 3 μm , nos centraremos en la radiación reflejada en dicho intervalo por los distintos tipos de superficie.

Reflectividad

- **Reflectividad de la vegetación**

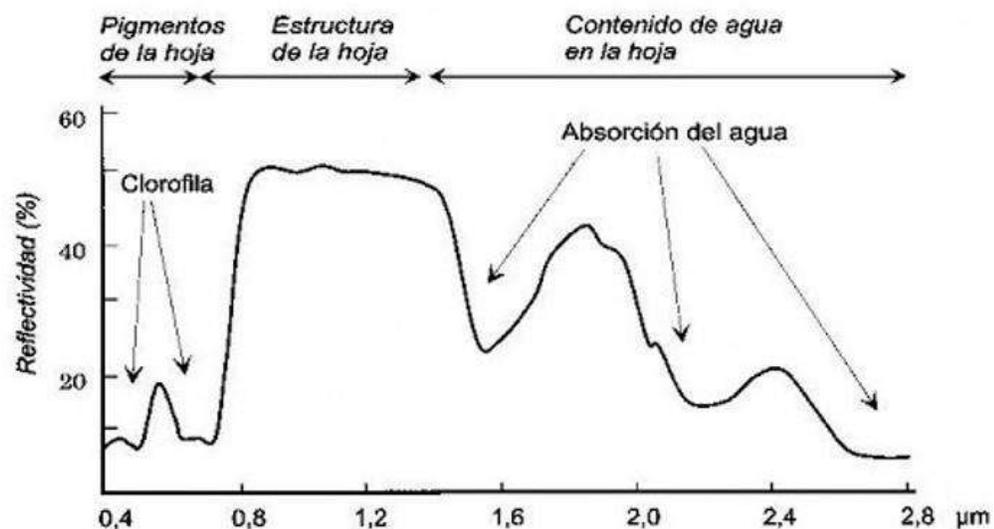
Para la vegetación sana (hojas verdes), la respuesta espectral típica puede verse en la figura 2.11 y se puede distinguir tres dominios espectrales.

Visible (0.4–0.7 μm), aquí la reflectividad es inferior al 10%. La mayor parte de la radiación es absorbida por la clorofila $\alpha_\lambda = 65\%$ que debido a sus bandas de absorción produce dos mínimos en la banda del azul (0.45 μm) y el rojo (0.66 μm). Por eso las hojas parecen verdes ya que su máxima relativo está en 0.55 μm (vegetación amarilla – verde). (Sobrino, 2000).

Infrarrojo próximo ($0.7 - 1.3\mu m$), en el intervalo la longitud de onda se absorbe muy poca radiación incidente ($\alpha_\lambda < 10\%$) debido a que los pigmentos fóliales y la celulosa que constituyen las parcelas celulares son transparentes, La radiación es por tanto reflejada o transmitida, la reflectividad pasa rápidamente de 1% a más de un 50%. Se dispersa (hacia arriba) entre el 40% y el 60% de la radiación incidente y el resto se transmite (hacia abajo).

Infrarrojo medio ($1.3 - 2.5\mu m$), esta zona se denomina hídrica ya que en ella las propiedades ópticas de las hojas vienen determinadas principalmente por su contenido en agua. Más allá de los $1.3\mu m$, existen fuertes bandas de absorción debido al agua ($1.45, 1.95$ y $2.5\mu m$).

Figura 12. Firma espectral de la vegetación sana



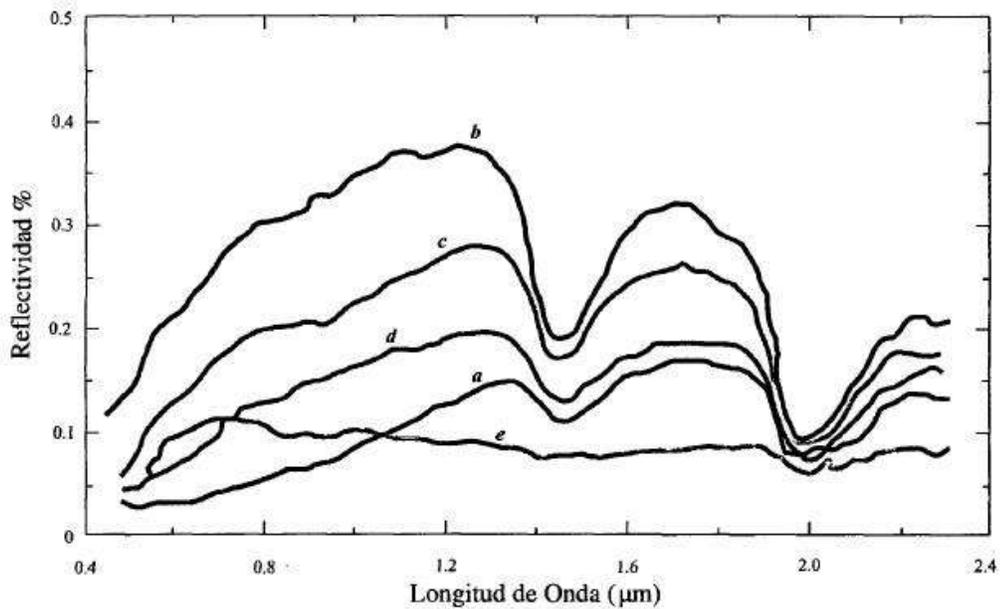
Fuente: Chuvieco, 2008

- **Reflectividad de los suelos**

Los suelos están compuestos por estratos denominados “horizontes” que se distinguen por sus diferencias en color, textura (distribución de tamaño de partícula) y estructura (distribución de partículas). En teledetección importa el estrato más superficial (el que se ve). Pero es esencial conocer las propiedades de los estratos más profundos sobre todo cuando tienen lugar procesos de erosión, ya que entonces el primer horizonte habrá desaparecido. Las curvas de reflectividad de los suelos son como veremos menos complejas que las de la vegetación debido a que en los suelos no existe transmisión. En general la reflectividad de los suelos aumenta con la longitud de onda. Sin embargo, la

textura, el contenido en agua, la cantidad de materia orgánica, el contenido en óxido de hierro y la rugosidad de los suelos hacen que varíen las curvas de reflectividad de los suelos (Figura N°13). Los suelos desnudos (sin vegetación) muestran una curva casi horizontal pero suavemente ascendente desde el visible al infrarrojo próximo. La respuesta espectral presenta cierta variabilidad según las propiedades físico-químico. (Sobrino, 2000).

Figura 13. Comportamiento espectral de cinco suelos minerales

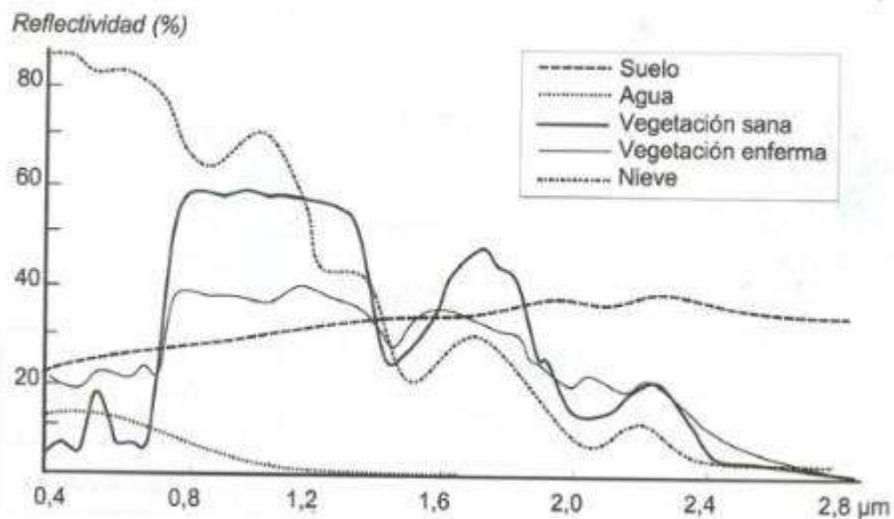


a) Alto contenido en material orgánica y fina estructura, b) bajo contenido en materia orgánica y bajo contenido en hierro, c) bajo contenido en materia orgánica, contenido medio en hierro, d) alto contenido orgánico, grado de textura medio, e) alto contenido en hierro, textura fina.
Fuente: Chuvieco, 2008

• Reflectividad del agua y nieve

Las superficies de agua absorben o transmiten la mayor parte de la radiación visible y prácticamente toda en longitudes de onda superiores a los $0.7 \mu m$. Las bandas del infrarrojo próximo resultan fundamentales para discriminar las superficies acuosas. La variabilidad en la reflectividad del agua depende de la profundidad, el contenido en materiales disueltos (clorofilas, arcillas, nutrientes) y la rugosidad de la superficie. La nieve posee una reflectividad muy alta en el visible (casi 100% en longitudes inferiores a los $0.8 \mu m$) y en el infrarrojo próximo, con valores próximos al 0% a partir de los $1.5 \mu m$. La reflectividad de la nieve disminuye con su edad, la nieve fresca tiene una reflectividad mayor que la nieve helada (Figura N°14). (Sobrino, 2000).

Figura 14. Firmas espectrales típicas de distintas cubiertas



Fuente: Chuvieco, 2008

Clasificación digital de imágenes

La clasificación de imágenes satelitales ha sido utilizada para diferentes propósitos, con un único objetivo: agrupar o zonificar los píxeles de una imagen, para delimitar una clase temática de interés a priori (Gamanya et al., 2009; Bock et al., 2005; Lewinski & Zaremski, 2004; Laliberte et al., 2004).

En los últimos años se han utilizado distintas tecnologías computacionales para la clasificación de imágenes como las redes neurales, los sistemas expertos y la lógica difusa. Según Weng (2009), categoriza los sistemas de clasificación de imágenes en cinco clasificadores basados: en píxel, en subpíxel, contextuales, por campo y los orientados a objetos. Para el proyecto usamos la clasificación orientada a objetos.

- **Clasificación Orientada a Objetos**

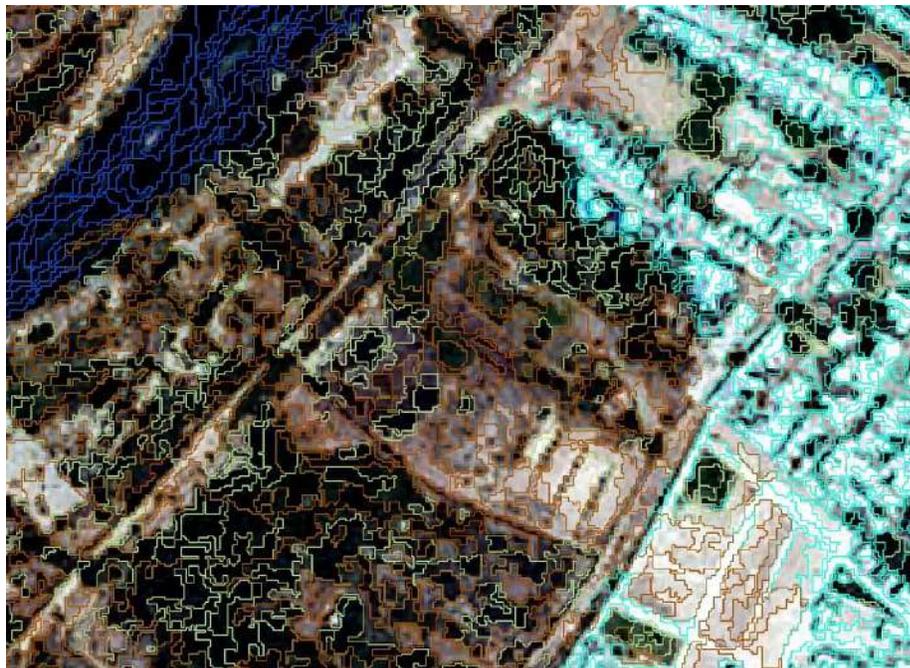
El análisis de imágenes basado en objetos (OBIA), se fundamenta en la percepción humana de la realidad como un todo compuesto de unidades básicas de información u objetos organizados y relacionados, más que como partes separadas y aisladas (Ardila et al., 2005).

La clasificación se realiza en base a objetos y no píxeles. Al estar la imagen formada por píxeles, el primer paso en OBIA es agrupar estos píxeles en regiones homogéneas que se denominan “objetos”. Se ha empleado un proceso de

segmentación, agrupando píxeles adyacentes mediante técnicas de regiones crecientes, para posteriormente clasificar los objetos extraídos.

Al trabajar con objetos en lugar de con píxeles el número de variables que se pueden emplear en la clasificación aumenta notablemente, permitiendo considerar criterios como el tamaño, la forma, las características espectrales (color), máximos y mínimos, proximidad a otros objetos, textura, etc. La segmentación reduce el número de objetos a clasificar, con lo cual el tiempo de procesado también disminuye. El criterio de parada en el proceso de la fusión de regiones se produce gracias al parámetro denominado “escala”, que puede ser definido por el usuario, es decir, mientras que valores más pequeños para dicho parámetro producen objetos más pequeños. La segmentación es una de las tareas más complejas de la clasificación basada en objetos y puede determinar el éxito o fracaso del análisis final. (Ferrón, 2011)

Figura 15. Clasificación orientada a objetos de la zona de estudio en Piura



Fuente: Elaboración propia

3.21. Modelamiento hidrológico

Si la cuenca se modela como un sistema hidrológico, el volumen en el espacio es el número total de caminos en la superficie y el suelo a través de los cuales el agua fluye desde el punto de entrada (precipitaciones) al punto de salida del sistema (caudales), mientras que la frontera es la superficie que encierra este volumen.

La modelación hidrológica es un proceso de representación del ciclo del agua mediante simplificaciones y aproximaciones de los procesos reales del sistema hidrológico. (Ochoa et al., 2022)

3.21.1. Modelamiento hidrológico de cuencas con Hec-Hms

El modelo HEC-HMS es uno de los modelos de simulación hidrológica de eventos más utilizado. Las siglas HEC significan "Hydrologic Engineering Center" (Centro de Ingeniería Hidrológica), el centro de investigación del "U.S. Army Corps of Engineers", ubicado en Davis, California; mientras que las siglas HMS significan "Hydrologic Model System" (Sistema de Modelación Hidrológica).

El Sistema de Modelización Hidrológica (HEC-HMS) está diseñado para simular los procesos hidrológicos completos de los sistemas de cuencas dendríticas. El software incluye muchos procedimientos tradicionales de análisis hidrológico como la infiltración de eventos, los hidrogramas unitarios y el trazado hidrológico⁵. El campo de aplicación del modelo HEC-HMS es muy amplio, ya que se puede utilizar para cuencas de diversos tamaños, y en zonas urbanas o rurales. Este modelo puede aplicarse en la realización de estudios de captación de agua, drenaje urbano, predicción de descargas, efectos de urbanización, diseño de reservorios, entre otras aplicaciones. En esta investigación, se ha aplicado este modelo para determinar caudales de diseño en la cuenca de influencia de la ciudad de Piura, con fines de alerta temprana.

El modelo HEC-HMS permite simular matemáticamente los procesos precipitación-escorrentía en una cuenca; es decir, simula la escorrentía superficial que resulta de una precipitación.

El HEC-HMS tiene tres grandes componentes, que son los siguientes:

- a) El modelo de la cuenca ("basin model")
- b) El modelo meteorológico ("meteorologic model")
- c) Especificaciones de control ("control specifications")

A continuación, se describen cada uno de estos componentes y su funcionamiento:

- a) Modelo de la cuenca

⁵ <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>

El modelo representa la cuenca física, que permite agregar y conectar elementos hidrológicos. (Villón, 2010). Cada componente modela un aspecto del proceso precipitación escorrentía dentro de cada subcuenca; entre estos componentes tenemos la escorrentía superficial en la subcuenca ("subbasin"), el tránsito en ríos o canales ("reach"), y los puntos de salida, análisis y combinación de hidrogramas ("junction"), que son los que se han empleado en el desarrollo del modelo de la cuenca de influencia del río Piura. Cada uno de estos componentes se representa por una serie de parámetros que especifican las características propias del mismo y las relaciones matemáticas que describen los procesos físicos que se llevan a cabo.

Los datos de entrada a este modelo son los registros de precipitación. El sistema hidrológico opera internamente sobre estas entradas a través de una serie de procesos. Los resultados finales o salidas del sistema son los hidrogramas de escorrentía directa y los hidrogramas de caudal de una o varias subcuencas en puntos predeterminados de la cuenca.

El componente de escorrentía superficial para cada subcuenca representa el movimiento del agua sobre la superficie del terreno hacia el cauce de los ríos. Para cada subcuenca, hay que especificar su área superficial. Los datos de entrada para este componente son los datos de precipitación. El exceso de precipitación se calcula restando las abstracciones de la precipitación total. El HEC-HMS contiene diversos métodos de entre los cuales podemos escoger para calcular las abstracciones, entre ellos está el método del número de curva del SCS, que es el que se ha empleado. Al utilizar este método, hay que especificar en cada componente los siguientes parámetros:

- La abstracción inicial (mm).
- El número de curva.
- El porcentaje de impermeabilidad.

Este último parámetro, incluido en los métodos para calcular las abstracciones en el HEC-HMS, es el porcentaje del área de la subcuenca en el cual no se presentan pérdidas por infiltración, evaporación u otros procesos. No obstante, los valores del número de curva que figuran en las tablas desarrolladas por el SCS ya incluyen implícitamente este porcentaje de impermeabilidad. Por lo tanto, si se adoptan estos valores, el porcentaje de impermeabilidad es cero.

En cada subcuenca, se hace la suposición de que la lluvia como las abstracciones están distribuidas uniformemente sobre ella. Luego, el exceso de precipitación se aplica al hidrograma unitario de la subcuenca para calcular el hidrograma de escorrentía directa. El HEC-HMS contiene diversos métodos de entre los cuales podemos escoger para calcular el hidrograma unitario, entre ellos está el método de SCS Unit Hydrograph, que

es el que se ha empleado. Al utilizar este método, hay que especificar en cada componente el tiempo de retardo (min)

Los puntos de salida, análisis y combinación de hidrogramas, también conocidos como puntos de confluencia, son puntos predefinidos en la cuenca (en este caso la estación Sánchez cerro), en los cuales se observan los hidrogramas producidos a través del modelo. En estos puntos confluyen los hidrogramas de dos o más subcuencas o ríos, se combinan, y el hidrograma resultante se transita aguas abajo. Este componente no requiere datos de entrada. En él, se supone que el flujo de salida en un instante determinado es igual a la suma de los flujos de entrada.

b) Modelo meteorológico

El modelo meteorológico permite calcular la precipitación areal sobre cada subcuenca. Luego de generar un modelo de cuenca se genera el modelo meteorológico donde se conectan los datos meteorológicos (Hietograma específico) por cada subcuenca.

c) Especificaciones de control

En las especificaciones de control se coloca cual será el intervalo de tiempo para que el HEC-HMS procese los cálculos. Se deberá especificar:

- Fecha y hora de inicio.
- Fecha y hora de término.
- Intervalo de tiempo $\Delta(t)$.

Cuando se hayan generado el modelo de la cuenca, el modelo meteorológico y las especificaciones de control, se puede hacer la simulación del modelo hidrológico.

3.22. Modelamiento hidráulico

3.22.1. Modelamiento hidráulico de ríos con Hec-Ras

HEC-RAS fue desarrollado en el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC), que es una división del Instituto de Recursos Hídricos (IWR), Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU, es un software que permite realizar sistemas hidráulicos de flujo constante unidimensionales; hidráulica fluvial de flujo inestable unidimensional y bidimensional; modelado de lecho móvil de transporte de sedimentos de flujo cuasi-inestable y completamente inestable; análisis de la temperatura del agua; y modelado generalizado de la calidad del agua (destino y transporte de nutrientes)(Brunner & CEIWR-HEC, 2016)

El modelamiento se puede realizar con flujo permanente y flujo no permanente gradualmente variado (U.S. Army Corps of Engineers, 2016). El

primero está basado en la ecuación de energía unidimensional, mientras que el segundo se fundamenta en la ecuación de continuidad y la ecuación de conservación de momento.

Se dice que un flujo es permanente o estacionario cuando en una sección del canal permanecen constantes con respecto al tiempo las características hidráulicas del flujo (caudal, velocidad media, tirante, etc.). Asimismo, un flujo es no permanente o no estacionario cuando en una sección del canal no permanecen constantes con respecto al tiempo las características hidráulicas del flujo.

Ecuación de Momento:

Si se considera una presión hidrostática basándonos en: que la longitud horizontal es mucho mayor que la longitud vertical, la ausencia de cambios en la densidad y la ausencia de fuerza del viento; se puede llegar a la conclusión, que los términos de velocidad en el eje z pueden ser despreciados, obteniendo de esta manera las ecuaciones de cantidad de momento (Chow, 1994).

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \dots \dots \dots (Ec5)$$

$\frac{\partial V}{\partial t}$: *Término de aceleración local*

$V \frac{\partial V}{\partial x}$: *Término de aceleración colectiva*

$g \frac{\partial y}{\partial x}$: *Término de fuerza de presión*

$g(S_0 - S_f)$: *Término de aceleración gravitacional y fricción*

Ecuación de la Energía:

Los perfiles de flujo son calculados resolviendo la ecuación de la energía entre dos secciones contiguas con un procedimiento iterativo llamado método del paso estándar. La ecuación de la energía se presenta en la ecuación 6 (Orellana, 2021)

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \dots \dots \dots (Ec6)$$

Donde, Z_1 y Z_2 son la elevación del cauce en la sección; Y_1 y Y_2 , la elevación del agua en la sección; V_1 y V_2 , las velocidades promedias; a_1 y a_2 , coeficientes de velocidad; g , la aceleración de la gravedad y; h_e , la pérdida de energía.

Ecuación de continuidad:

La ecuación de continuidad establece que, para diferentes secciones en un mismo canal, el caudal se mantiene constante en función del tiempo y del espacio; es decir, el caudal que entra a una sección de control debe ser igual al caudal que sale de dicha sección (Chow et al., 1994)

$$\frac{d}{dt} \iiint_{v.c.} \rho dV + \iint_{s.c.} \rho V \cdot dA = 0 \dots \dots (Ec7)$$

Donde:

$\frac{d}{dt} \iiint_{v.c.} \rho dV$: Representa la región espacial (Volumen de control) ocupada por el fluido

$\iint_{s.c.} \rho V \cdot dA$:

Representa las condiciones de entrada salida dentro de una sección de control

VI. METODOLOGÍA

Se obtuvo datos de estaciones pluviométricas (lluvia) e hidrométricas (nivel y caudal) contenidas en el portal del Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos - “Observatorio del Agua” de la Autoridad Nacional del Agua-ANA. Asimismo, la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial – CONIDA proporcionó un modelo digital de terreno de alta resolución, modelo digital de superficie, imagen óptica y ortofoto de la zona de intervención.

Se extrajo a través del lenguaje de programación RStudio, datos de precipitación a escala diaria y mensual, del producto grillado PISCO, desarrollado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI.

Posterior a la obtención y procesamiento de los datos disponibles de precipitaciones de 24 horas en las estaciones ubicadas dentro y alrededor de la cuenca del río Piura, se realizó un análisis de consistencia mediante el método de doble masa y el método del Vector Regional MVR para ello se utilizó el software Hydraccess, este análisis incluye la corrección, en caso de ser necesario, de los meses inconsistentes (que deben coincidir con los quiebres en el análisis del Doble índice del vector regional) en media y/o en

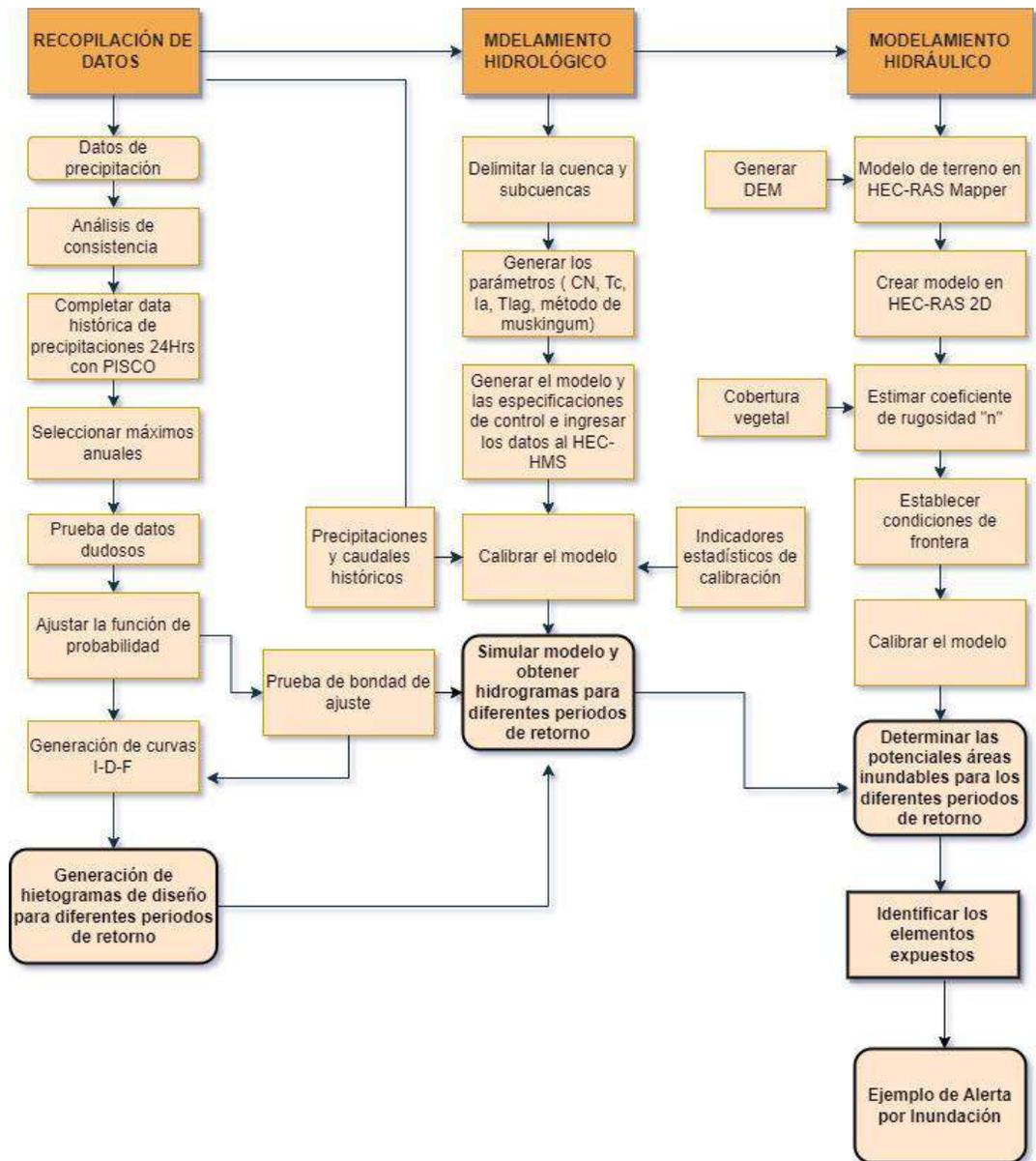
desviación típica, con el objetivo de obtener la mejor correlación mensual posible entre las estaciones del grupo de análisis.

Luego de ello, se completó el registro de precipitaciones a través de la base de datos, PISCO, se seleccionó las precipitaciones máximas anuales y se realizó la prueba de datos dudosos. Luego, se ajustó las series de tiempo a una distribución de probabilidad. El último paso fue obtener la lluvia de diseño, que permitió obtener los hietogramas para los diferentes periodos de retorno.

Posteriormente para determinar los hidrogramas se utilizó el modelo HEC-HMS, mediante el cual se delimitó la cuenca y subcuencas; asimismo se generaron los parámetros que deben ser ingresados al modelo como son: La curva número (CN), el tiempo de concentración (T_c), el tiempo de retardo (T_{lag}) y el método de muskingum, se ingresaron los datos, se calibró el modelo y se obtuvieron los hidrogramas para los diferentes periodos de retorno. Seguidamente, se creó el modelo en HEC-RAS 2D, el cual fue calibrado permitiendo obtener las potenciales áreas inundadas para los diferentes periodos de retorno.

Asimismo, se identificó los elementos expuestos por cada uno de los periodos de retorno de 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años como la población, instituciones educativas, establecimientos de salud, comisarías, entre otros; por último, se propone un ejemplo de alerta por inundación.

Figura 16. Marco Metodológico del trabajo de investigación



Cabe precisar que, los principales materiales utilizados para la investigación, son las imágenes satelitales estéreo del PeruSAT-1, y el uso de software especializados para el procesamiento como el PCI Geomática y para el análisis espacial el software libre QGIS.

6.1 Proceso para generar el Modelo Digital de Elevación (DEM)

Para generar el modelo digital de elevación, se desarrollaron las siguientes fases:

Pre procesamiento

a) Correcciones:

Se mejoró la imagen óptica a través de los procesamientos de corrección radiométrica, atmosférica y geométrica.

Corrección Radiométrica y Atmosférica

Se eliminó los efectos atmosféricos y del terreno para recuperar los parámetros físicos de la superficie terrestre incluyendo la reflectancia de la superficie, la visibilidad del suelo y la temperatura. Dicha corrección es especialmente importante en este caso en donde es necesario comparar y analizar imágenes diferentes. Se aplicó el modelo ATCOR que ayudo a calcular los valores de reflectancia a nivel del suelo con el fin de eliminar los efectos atmosféricos sobre las imágenes de satélites, preparando las imágenes para su análisis bajo diferentes condiciones atmosféricas. Se muestra a continuación el resultado para la imagen DIM_PER1_20180919153746 (Multiespectral y Pancromática).

Figura 18 . Imágenes del PeruSAT-1 corregidas por mascara hazel o neblina, del año 2018

ATCORCorrected - Multiespectrales
DIM_PER1_20180919153746_SEN_MS_000041



ATCORCorrected - Pancromática
DIM_PER1_20180919153746_SEN_P_000041

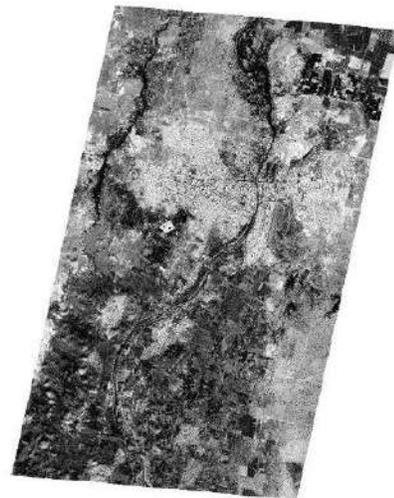
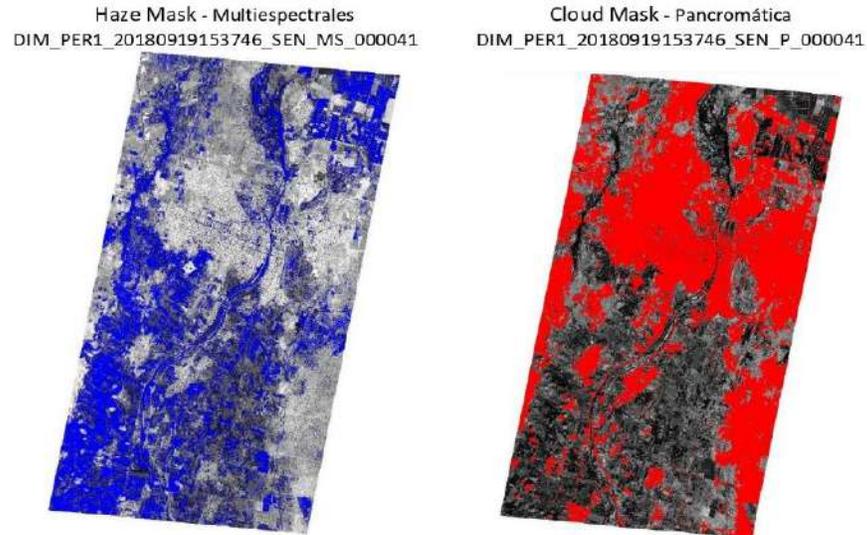


Figura 19. Imágenes del PeruSAT-1 corregidas por máscara de nubes, del año 2018



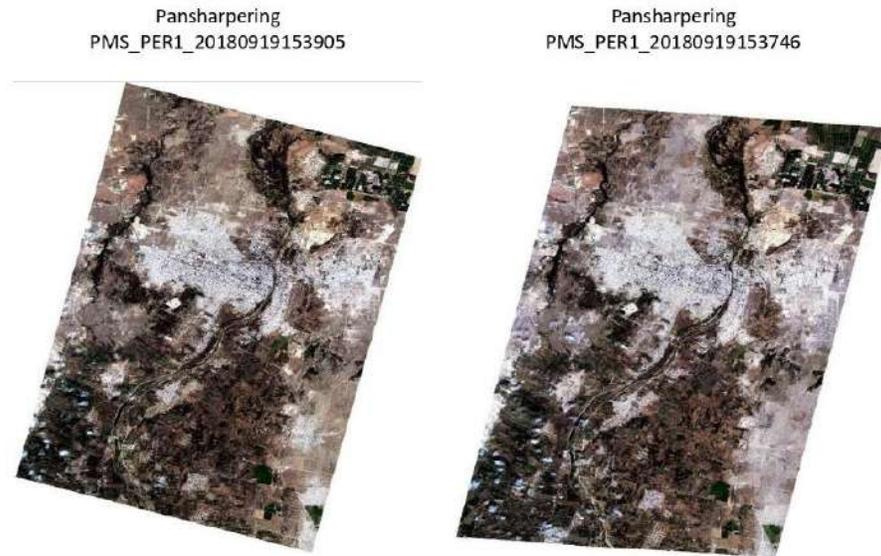
Corrección Geométrica

Se realizó la corrección de la posición de las imágenes satelitales para que cada elemento geográfico en la zona de estudio tenga una posición en las coordenadas X y Y.

b) Pansharpening:

Se fusionó la imagen multiespectral de baja resolución de 2.8 metros y la pancromática de alta resolución de 0.7 metros juntas para crear una imagen de color de alta resolución realzada. La imagen en color de alta resolución conserva la fidelidad del color original y permite mejorar la visualización e interpretación, con una resolución final de 0.7 metros.

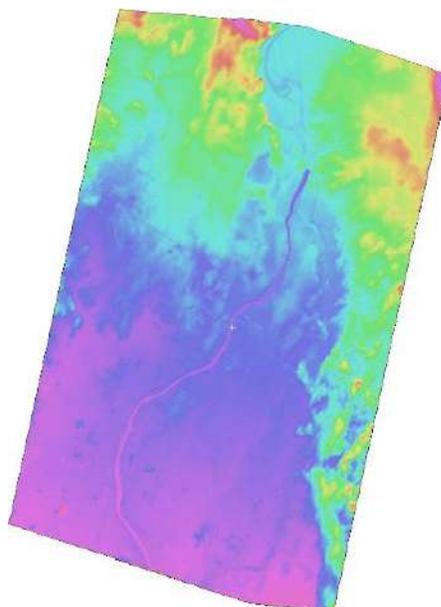
Figura 20. Imágenes del PeruSAT-1 en alta resolución, del año 2018



Generación del Modelo de Elevación Digital (DEM)

Se procesó las imágenes estéreo para generar un modelo de elevación digital (DEM) con una resolución teórica de 0.7 metros, para caracterizar las formas del relieve y los elementos geográficos u objetos presentes en la zona de estudio.

Figura 21. Modelo de Elevación Digital – Zona de estudio



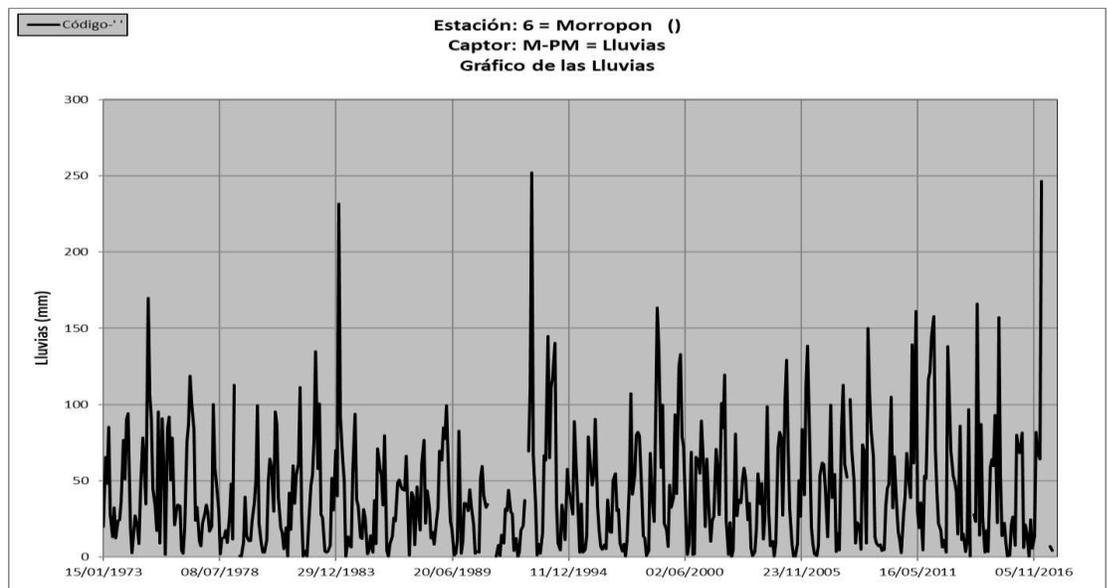
Para la obtención de las zonas potencialmente inundadas, se siguieron las siguientes fases:

6.2 Análisis de consistencia de los datos de precipitación

La identificación o detección, descripción y eliminación de no homogeneidad e inconsistencia son aspectos importantes del análisis de series de tiempo. Son más confiables si los cambios están respaldados por pruebas estadísticas y por evidencia y justificación física o histórica.

En primer lugar, se realizó el análisis exploratorio de datos, que permite reconocer posibles valores dudosos en la serie histórica de datos. En la Figura N°22 se observa los valores de precipitación acumulada anual de la estación Morropón, donde los años 1973, 1983, 1992, 1998 y 2017, registraron picos de precipitación.

Figura 22. Lluvias acumuladas anuales - Morropón



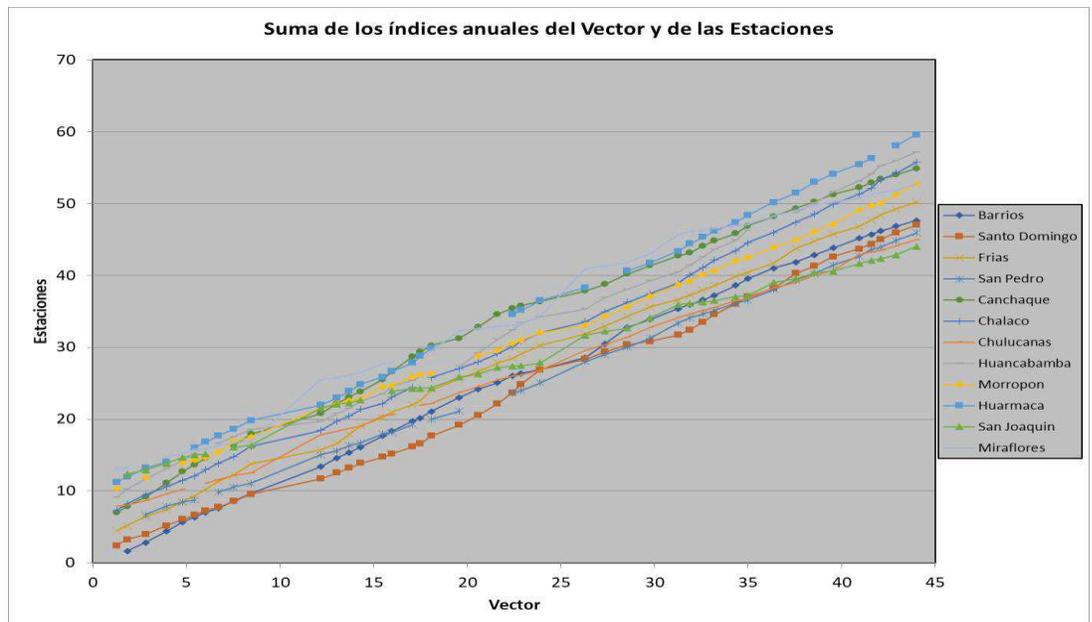
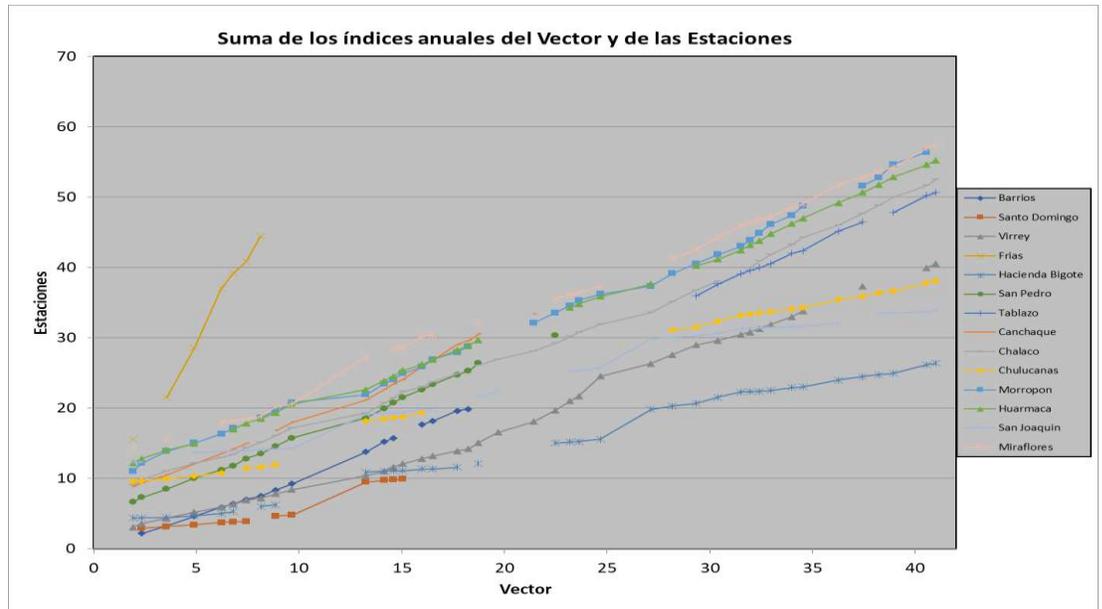
Fuente: Elaboración propia, con el software Hydracces

Completación de datos

Posterior a realizar el análisis de consistencia, se buscó obtener series completas de precipitación a escala diaria con una temporalidad mayor a 30 años, para ello se consideró oportuno obtener información proveniente de productos satelitales con información de precipitación diaria, como es el Peruvian Interpolated data of the SENAMHI Climatological and Hydrological Observations. El propósito del uso del producto PISCO fue completar la

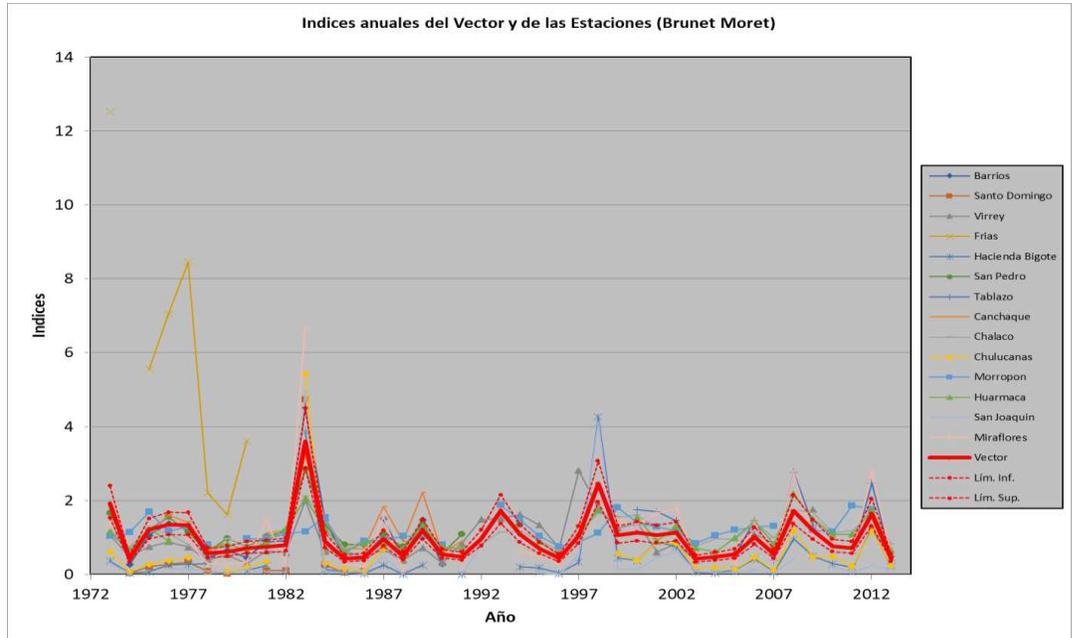
información de precipitación diaria de las estaciones del ámbito de la cuenca del río Piura para las series en las que no se cuenta con información observada. En la Figura N°23 se muestra la suma de los índices anuales del vector antes (figura superior) y después (figura inferior) de la consistencia y en la Figura N°24 se muestra los índices anuales del vector antes (figura superior) y después (figura inferior) de haberse completado y realizado la consistencia.

Figura 23. Suma de los índices anuales del vector regional

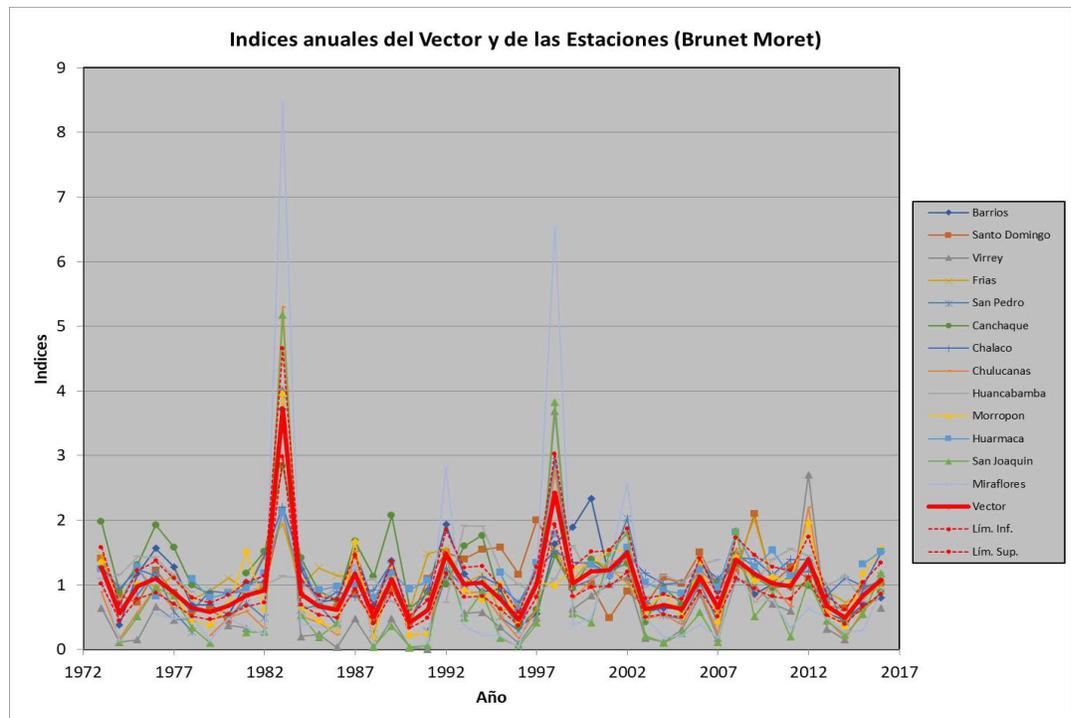


Fuente: Elaboración propia

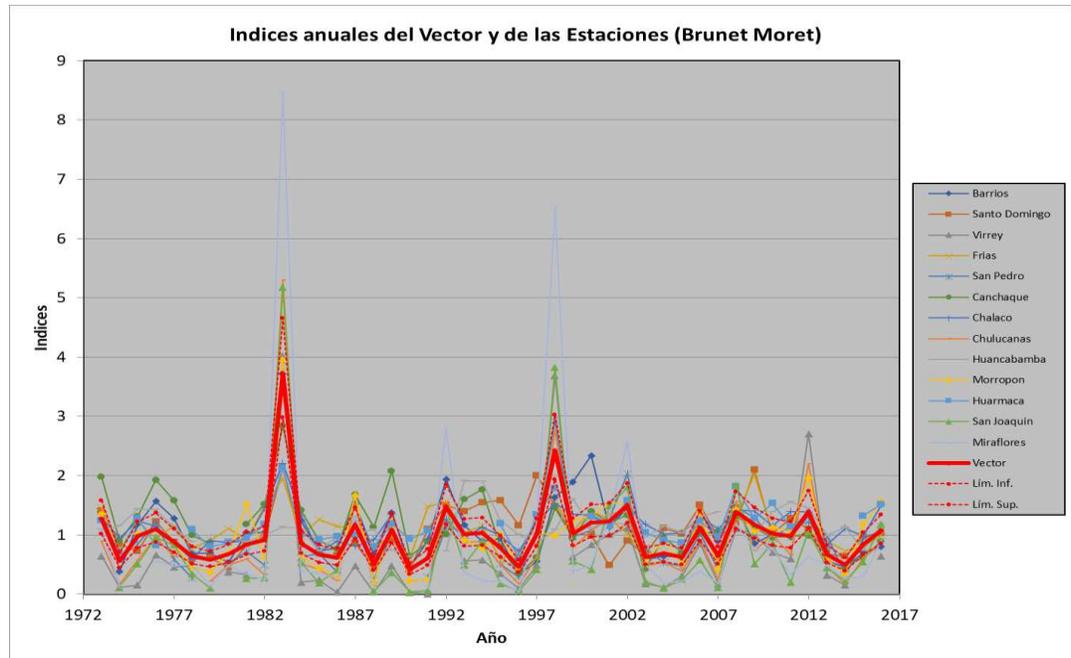
Figura 24. Índice anual del vector regional en función de la precipitación anual de las estaciones en la cuenca del río Piura y estaciones vecinas



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia



El análisis de doble masa del vector o suma de índice del vector permite evaluar la tendencia de la precipitación, en donde las estaciones deben presentar una tendencia lineal, detectando posibles inconsistencias.

El análisis de doble masa del vector o suma de índice del vector regional de la información consistenciada no muestra la existencia de quiebres en todas las estaciones, lo cual es indicativo de que el análisis de consistencia de precipitación se realizó correctamente. Finalmente, la correlación entre la estación y el vector muestran que las estaciones pertenecen a un mismo grupo climático, tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Índices anuales del vector regional

Estación	N° Años	Correlación. Estación/Vector
Barrios	43	0.856
Santo Domingo	44	0.593
Virrey	40	0.917
Frías	44	0.666
San Pedro	38	0.962
Canchaque	43	0.687
Chalaco	43	0.791
Chulucanas	42	0.971
Morropón	41	0.855
Huarmaca	38	0.824
San Joaquín	41	0.953
Miraflores	41	0.932

Fuente: Elaboración propia

6.3 Pruebas de datos dudosos

En base al registro de precipitación máxima de 24 horas completa por mes, para el periodo 1973-2016, se realizó la prueba de datos dudosos, por el método del Water Resources Council. Este método recomienda analizar los datos dudosos que vienen a ser puntos de los datos de precipitación que se alejan significativamente de la tendencia de la información restante. De acuerdo con (U.S. Water Resources Council, 1981), si la asimetría (coeficiente de sesgo) de estación es mayor que +0.4, primero se consideran las pruebas para detectar datos dudosos altos; si la asimetría de estación es menor que -0.4, primero se consideran pruebas para detectar datos dudosos bajos. Cuando la asimetría de la estación esta entre -0.4 y +0.4, deben aplicarse pruebas para detectar datos dudosos altos y bajos antes de eliminar cualquier dato dudoso del conjunto de datos.

Estas pruebas consideran un nivel de significancia para obtener un valor de K_n que varía de acuerdo al número de datos analizados, por ejemplo, para 20 valores, le corresponde un K_n igual a 2.385 (Tabla 5). A continuación, se muestran las ecuaciones para determinar los umbrales máximo y mínimo para una serie de precipitaciones:

La ecuación 5 permite determinar el umbral de datos dudosos altos X_H

$$x_H = \bar{X} + k_N \cdot S \dots \dots \dots (Ec8)$$

En ese sentido, el valor de la precipitación máxima aceptada, se determina por ecuación 9

$$P_H = 10^{X_H} \dots \dots \dots (Ec9)$$

Los picos de las inundaciones que superen los umbrales máximos deberían ser comparados con los datos históricos de las inundaciones y la información de inundaciones en sitios cercanos, en este caso las estaciones analizadas no presentaron datos que superaran el umbral máximo.

La ecuación 10 permite determinar el umbral de datos dudosos bajos X_L

$$x_L = \bar{X} - k_N \cdot S \dots \dots \dots (Ec10)$$

Se obtiene el valor de la precipitación mínima aceptada, por ecuación 10

$$P_L = 10^{X_L} \dots \dots \dots (Ec11)$$

Donde:

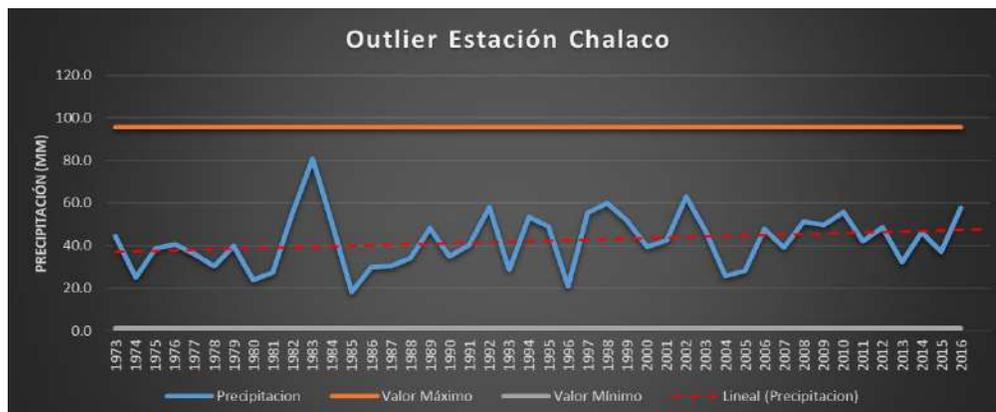
\bar{X} : Promedio de los logaritmos de los datos

s : Desviación estándar de los logaritmos

k_N : Constante dependiente del tamaño de la muestra

A continuación, en la Figura N°15 se observa gráficamente el análisis de datos dudosos para el periodo 1973-2016

Figura 25. Análisis de datos dudosos en la estación Chalaco



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Valores de K_n para la prueba de datos dudosos

Tamaño de muestra n	K_n						
10	2.036	24	2.467	38	2.661	60	2.837
11	2.088	25	2.486	39	2.671	65	2.866
12	2.134	26	2.502	40	2.682	70	2.893
13	2.175	27	2.519	41	2.692	75	2.917
14	2.213	28	2.534	42	2.700	80	2.940
15	2.247	29	2.549	43	2.710	85	2.961
16	2.279	30	2.563	44	2.719	90	2.981
17	2.309	31	2.577	45	2.727	95	3.000
18	2.335	32	2.591	46	2.736	100	3.017
19	2.361	33	2.604	47	2.744	110	3.049
20	2.385	34	2.616	48	2.753	120	3.078
21	2.408	35	2.628	49	2.760	130	3.104
22	2.429	36	2.639	50	2.768	140	3.129
23	2.448	37	2.650	55	2.804		

Fuente: U.S Water Resources Council 1981. Esta tabla contiene valores de K_n de un lado con un nivel de significancia del 10% para la distribución normal.

6.4 Estaciones pluviométricas

En base a las estaciones que resultaron con un buen análisis de consistencia, se identificó la estación representativa para cada una de las 9 subcuencas obtenidas en el modelo HEC-HMS.

Tabla 6. Estaciones pluviométricas

ID	Estación	Subcuenca	Coordenadas UTM		Altitud	PP anual (mm)
			X	Y		
1	Chalaco	SC2	633951.30	9443127.90	2276	639.70
2	Chulucanas	SC1	592367.70	9436222.10	29	414.40
3	Huarmaca	SC5	662824.60	9384125.40	2178	663.20
4	Miraflores	SC9	542113.90	9428531.50	30	229.80
5	Morropón	SC4	613045.90	9427347.90	150	473.90
6	Virrey	SC6	612981.60	9388652.90	230	408.90
7	Huancabamba	SC3	642219.50	9419555.20	1950	509.90

8	Sto Domingo	SC7	623788.90	9443545.30	1475	762.90
9	San Pedro	SC8	607150.60	9438044.10	254	584.50

Fuente: Elaboración propia

6.5 Función de probabilidad y prueba de bondad de ajuste

La distribución usada en el análisis de frecuencia hidrológico fue la distribución general de valores extremos, conocida como Gumbel, la cual ha sido ampliamente utilizada para representar el comportamiento de crecientes y sequías.

El ajuste de distribución de probabilidades se realizó por el método de Kolmogorov – Smirnov, esta prueba de ajuste consistió en comparar las diferencias existentes entre la probabilidad empírica de los datos de la muestra y la probabilidad teórica, tomando el valor máximo del valor absoluto, de la diferencia entre el valor observado y el valor de la recta teórica del modelo. Presentaron un buen ajuste las 9 estaciones evaluadas.

6.6 Diseño de tormentas mediante relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia

Se debe diseñar los hietogramas de tormenta, este proceso consiste en disgregar la P24 en partes por hora; para ello existen diferentes métodos, entre los cuales se utilizó el método de los bloques alternos. Los hietogramas fueron diseñados directamente con la P24 de cada estación representativa para cada subcuenca, identificadas en base al polígono de Thiessen, este método permite asignar a cada estación un peso proporcional a su área de influencia.

Coeficientes para las relaciones a la lluvia de duración 24 horas

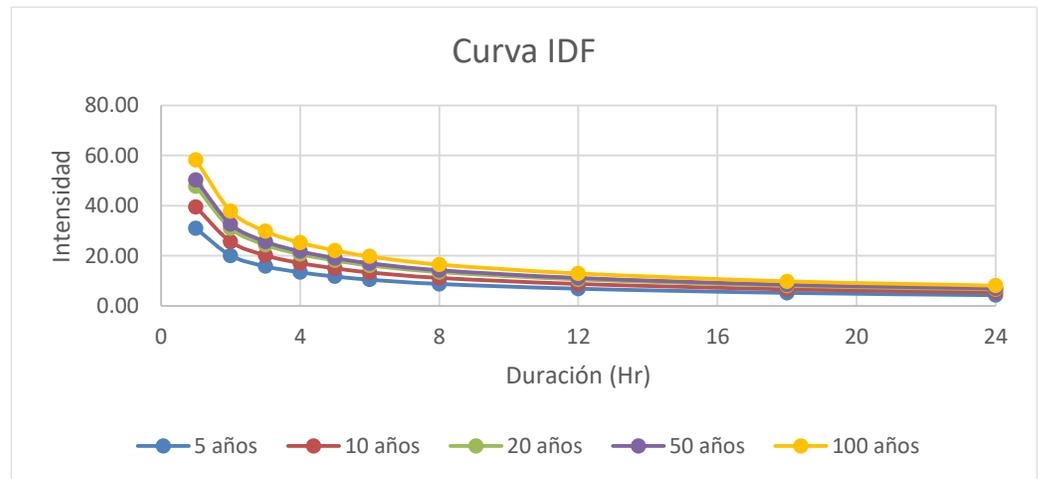
Factores de desagregación									
1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
0.30	0.39	0.46	0.52	0.57	0.61	0.68	0.80	0.91	1.00

Fuente: D. F. Campos A., 1978

La precipitación obtenida en el paso anterior fue transformada en intensidades media, esto se hace para las diferentes duraciones menores a 24 horas y para todos los periodos de retorno considerados. Seguidamente, los resultados que relacionan la intensidad, duración y frecuencia se deben de ajustar a la ecuación que se muestra en la Ecuación 12

$$I = \frac{P \text{ [mm]}}{t_{\text{duración}} \text{ [hr]}} \dots \dots \dots (Ec12)$$

Figura 26. Precipitaciones máximas para diferentes tiempos de duración de lluvias SC1 - STA Chulucanas



Fuente: Elaboración propia

6.7 Desarrollo de un Modelo hidrológico con HEC-HMS

En el HEC-HMS, se realizó la delimitación de la cuenca hidrológica, para ello se descargó y procesó el DEM de resolución 12.5 m proveniente del satélite Alos Palsar.

Figura 27. Modelo cuenca del río Piura



Fuente: Elaboración propia

Los parámetros ingresados en el HEC-HMS fueron:

- Curva Number (CN)
- Tiempo de concentración (T_c)
- Pérdidas iniciales (I_a)
- Método del retardo (T_{lag})
- Tránsito de caudales (método de Muskingum)

A continuación, se describe el proceso de obtención de cada uno de los parámetros:

a) Modelo del número de curva del SCS (SCS curva number)

El Número de Curva (CN) relaciona la lluvia total y la escorrentía directa. Al realizar la representación gráfica de la profundidad de precipitación (P) y la profundidad de exceso de precipitación (Pe) pudieron observarse curvas que se estandarizaron en un número adimensional CN que oscila entre 0 y 100, estos valores pueden ser:

- CN = 0 para superficies donde no existe escurrimiento.
- CN < 100 para superficies naturales.
- CN = 100 para superficies impermeables o superficies de agua.

El análisis para la obtención del número de curva puede realizarse en tres condiciones diferentes:

- Condición I: Se aplica para condiciones de humedad normales.
- Condición II: Se aplica para condiciones secas.
- Condición III: Se aplica para condiciones húmedas.

Para generar el raster del Número de Curva (CN) se utilizó la extensión HEC-GeoHMS para ArcGIS 10.4, se siguieron los siguientes pasos:

- i. Se utilizó el Modelo Digital de Elevación – DEM, este raster fue corregido con la herramienta fill para eliminar las celdas nulas.
- ii. Para determinar los tipos de suelo y cobertura vegetal correspondientes a cada subcuenca, se ha superpuesto los mapas de cobertura vegetal y suelos obtenidos del MINAM sobre el mapa de subcuencas del río Piura.
- iii. Se determinó el tipo hidrológico de suelo de acuerdo a la metodología del SCS considerando las características de permeabilidad se asignó un tipo que en este caso va desde “A” hasta “C”.

Tabla 7. Tipos de suelo y grupo hidrológico en el ámbito de las subcuencas del río Piura

Subcuencas	Símbolo	Tipo de suelo	Grupo Hidrológico	Área (km ²)
SC1 San Francisco	CMe-VRe	Cambisol éutrico - Vertisol éutrico	C	107.25
	ARh-SCh	Arenosol háplico - Solonchak háplico	A	281.87
	FLe-RGe	Fluvisol éutrico - Regosol éutrico	B	10.34

SC2 Corrales	CMe-VRe	Cambisol éútrico - Vertisol éútrico	C	359.02
	ARh-SCh	Arenosol háplico - Solonchak háplico	A	5.48
SC3 Bigote	CMe-VRe	Cambisol éútrico - Vertisol éútrico	C	683.30
SC4 Unidad 13784	CMe-VRe	Cambisol éútrico - Vertisol éútrico	C	101.94
	ARh-SCh	Arenosol háplico - Solonchak háplico	A	890.38
	FLe-RGe	Fluvisol éútrico - Regosol éútrico	B	14.00
SC5 Alto Piura	CMe-VRe	Cambisol éútrico - Vertisol éútrico	C	904.84
	LPe-R	Leptosol éútrico - Afloramiento lítico	B	34.59
	RGe-CLh	Regosol éútrico - Calcisol háplico	C	222.43
SC6 Medio Alto Piura	CMe-VRe	Cambisol éútrico - Vertisol éútrico	C	409.06
	ARh-SCh	Arenosol háplico - Solonchak háplico	A	92.43
SC7 Medio Piura	CMe-VRe	Cambisol éútrico - Vertisol éútrico	C	240.98
	ARh-SCh	Arenosol háplico - Solonchak háplico	A	91.32
	FLe-RGe	Fluvisol éútrico - Regosol éútrico	B	1.80
SC8 Medio Bajo Piura	CMe-VRe	Cambisol éútrico - Vertisol éútrico	C	650.17
	ARh-SCh	Arenosol háplico - Solonchak háplico	A	714.77
	FLe-RGe	Fluvisol éútrico - Regosol éútrico	B	372.53
SC9 Bajo Piura	CMe-VRe	Cambisol éútrico - Vertisol éútrico	C	58.82
	ARh-SCh	Arenosol háplico - Solonchak háplico	A	76.60
	ARh-SCh	Arenosol háplico - Solonchak háplico	A	743.45
	FLe-RGe	Fluvisol éútrico - Regosol éútrico	B	500.01

Fuente: Elaboración propia en base a información del MINAM

- iv. Se generó la clasificación de la cobertura vegetal en las subcuencas. A todo lo que es agua se le asigna el valor de 1, a la cobertura relacionada con medio residencial le corresponde el valor de 2, a los bosques se le da el valor de 3 y a los cultivos una clasificación de 4.

Tabla 8. Cobertura vegetal por subcuencas

Subcuencas	Cobertura Vegetal	Landuse	Área (km ²)
SC1 San Francisco	Agricultura costera y andina	4	113.14
	Bosque seco de colina alta	3	41.75
	Bosque seco de colina baja	3	8.23
	Bosque seco de montaña	3	95.34
	Bosque seco tipo sabana	3	140.98
	Río	1	0.03
SC2 Corrales	Agricultura costera y andina	4	228.12
	Bosque montano occidental andino	3	8.42
	Bosque seco de montaña	3	98.27
	Matorral arbustivo	4	25.13
	Páramo	4	4.55
SC3 Bigote	Agricultura costera y andina	4	304.62
	Área urbana	2	0.36
	Bosque seco de montaña	3	244.74
	Matorral arbustivo	4	109.24
	Páramo	4	21.13
	Río	1	3.22
SC4 Unidad 13784	Agricultura costera y andina	4	61.92
	Área urbana	2	3.37
	Bosque seco de colina alta	3	97.16
	Bosque seco de colina baja	3	12.37
	Bosque seco de piedemonte	3	45.37
	Bosque seco tipo sabana	3	786.13
SC5 Alto Piura	Agricultura costera y andina	4	370.47
	Área urbana	2	0.94
	Bosque montano occidental andino	3	1.14
	Bosque seco de montaña	3	624.22
	Matorral arbustivo	4	141.26
	Páramo	4	15.95
	Río	1	7.88

SC6 Medio Alto Piura	Agricultura costera y andina	4	44.46
	Área urbana	2	0.90
	Bosque seco de colina alta	3	84.56
	Bosque seco de montaña	3	341.85
	Bosque seco de piedemonte	3	21.09
	Bosque seco tipo sabana	3	4.68
	Río	1	3.95
SC7 Medio Piura	Agricultura costera y andina	4	171.02
	Área urbana	2	1.38
	Bosque montano occidental andino	3	11.12
	Bosque seco de colina alta	3	8.29
	Bosque seco de colina baja	3	7.96
	Bosque seco de montaña	3	104.73
	Bosque seco de piedemonte	3	0.06
	Matorral arbustivo	4	20.61
	Páramo	4	6.69
	Río	1	2.23
SC8 Medio Bajo Piura	Agricultura costera y andina	4	731.51
	Área urbana	2	4.73
	Bosque montano occidental andino	3	21.67
	Bosque seco de colina baja	3	24.77
	Bosque seco de montaña	3	325.65
	Bosque seco tipo sabana	3	573.33
	Matorral arbustivo	4	36.38
	Páramo	4	14.32
	Río	1	5.10
SC9 Bajo Piura	Agricultura costera y andina	4	641.82
	Área urbana	2	5.26
	Bosque seco de colina alta	3	16.14
	Bosque seco de colina baja	3	37.12
	Bosque seco de lomada	3	80.98
	Bosque seco de montaña	3	5.13
	Bosque seco tipo sabana	3	584.27
	Río	1	8.16

Fuente: Elaboración propia en base a información del MINAM

- v. Se interseco la información temática de cobertura vegetal y mapa de suelos, de acuerdo a la clasificación indicada en el Tabla 07 y 08, generando un shapefile de polígono, denominado CN_Poly.

- vi. Se generó y rellenó los siguientes campos en la tabla de atributos del CN_Poly: SoilCode, Pcta, Pctb, Pctc, Pctd y Landuse. El primero (SoilCode) es el código para identificar el tipo de suelo, los cuatro siguientes indican el porcentaje de cada tipo de suelo y el último es un código para indicar la cobertura vegetal. La ventaja de este método está en que se puede considerar que un tipo de suelo está formado por una combinación de distintos grupos del suelo.
- vii. Se creó la tablaCLookUp en ArcGis y se guardó como archivo “.dbf”
- viii. Utilizando la herramienta HEC-GeoHMS, desde el menú Utility se cargó Generate CN GRID, en la ventana que aparece se carga el modelo digital de elevación corregido (Fill), el Shape “CN_Poly” y la tabla “NCLookUp” creados anteriormente.
- ix. Una vez realizados los pasos indicados, se calculó los valores de CN para las condiciones antecedentes de humedad, condición I (Normal), condición II (Seca) y condición III (húmedas) en cada subcuenca.

Tabla 9. Valores de CN ponderado por subcuenca

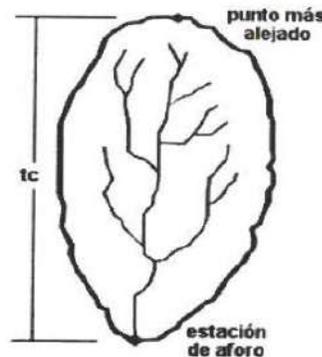
Subcuencas	Área (%)	CN II	CN I	CN III
Subcuenca1	5%	44.22	24.98	64.59
Subcuenca2	5%	78.81	60.96	89.53
Subcuenca3	9%	78.78	60.93	89.52
Subcuenca4	13%	35.20	18.58	55.54
Subcuenca5	15%	76.48	57.72	88.20
Subcuenca6	7%	64.64	43.43	80.79
Subcuenca7	4%	66.69	45.68	82.16
Subcuenca8	23%	57.56	36.29	75.73
Subcuenca9	18%	48.51	28.35	68.42

Fuente: Elaboración propia

b) Tiempo de concentración (Tc)

El tiempo de concentración es el tiempo requerido por una gota de agua para fluir desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de salida de la misma.

Figura 28. Tiempo de concentración



Fuente: (Villón, 2002a)

Para calcular el tiempo de concentración se utilizó la fórmula de Pennsylvania. La cual se describe en la ecuación 12

$$T_c = 2.2 * \left(\frac{L * L_c}{\sqrt{\text{Slope}_{10-85}}} \right)^{0.3} \dots \dots \dots (Ec12)$$

Donde:

T_c = Tiempo de Concentración (hrs)

L = Trayectoria de flujo más largo (min)

L_c = Recorrido del fujo central (min)

Slope_{10-85}

= Pendiente media de la trayectoria del fujo representada por el 10

al 85% de la trayectoria más larga del flujo(pies/min)

c) Pérdidas o abstracciones iniciales (Ia)

El SCS, después de estudiar un gran número de pequeñas cuencas, estableció una relación para estimar S , a partir del número de curva CN , mediante la siguiente ecuación:

$$S = \frac{25400 - 254 * CN}{CN} \dots \dots \dots (Ec13)$$

Las pérdidas o sustracciones iniciales, en mm, son definidas como la precipitación acumulada hasta el inicio de la escorrentía y es una función de la intercepción, almacenamiento en depresiones e infiltración antes del comienzo de la escorrentía.

$$Ia = 0,2S \dots \dots (Ec14)$$

Tabla 10. Parámetros de pérdida en las subcuencas

Subcuencas	CN	S (mm)	la
Subcuenca1	64.59	139.28	27.86
Subcuenca2	89.53	29.70	5.94
Subcuenca3	89.52	29.74	5.95
Subcuenca4	55.54	203.32	40.66
Subcuenca5	88.20	33.97	6.79
Subcuenca6	80.79	60.41	12.08
Subcuenca7	82.16	55.16	11.03
Subcuenca8	75.73	81.42	16.28
Subcuenca9	68.42	117.23	23.45

Fuente: Elaboración propia

d) Método del retardo:

Es el método más simple de tránsito de caudales, que consiste en trasladar las coordenadas del hidrograma de entrada un tiempo determinado para determinar el hidrograma de salida. El flujo no es atenuado, por lo que la forma del hidrograma no cambia.

El tiempo de retardo, se puede estimar mediante el tiempo de concentración, con la siguiente relación:

$$Tlag = 0.6 \times T_c \dots \dots (Ec15)$$

Tabla 11. Tiempo de retardo

Subcuencas	Tc (min)	Tiempo de Retardo (Tlag)
Subcuenca1	616	369.6
Subcuenca2	510	306.0
Subcuenca3	505	303.0
Subcuenca4	938	562.8
Subcuenca5	598	358.8
Subcuenca6	538	322.8
Subcuenca7	539	323.4
Subcuenca8	728	436.8
Subcuenca9	1304	782.4

Fuente: Elaboración propia

e) Tránsito de caudales-Método de Muskingum

Este método se basa en el principio de que una onda de crecida que se desplaza por un río se amortigua a causa de la fricción del fondo y de las

márgenes, así como por los almacenamientos naturales en el lecho de inundación, y para aplicarlo, son necesarios dos hidrogramas registrados al mismo tiempo en dos estaciones próximas del río. (García & Rodriguez, 2016)

Este método fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos y aplicado al río Muskingum, por lo que lleva su nombre.

Este método se basa en la ecuación de continuidad en su forma discreta y en la ecuación de almacenamiento.

Las variables de entrada al modelo son K y X. La K es la relación entre almacenamiento y descarga y tiene dimensiones de tiempo. K es aproximadamente igual al tiempo de viaje de la onda a través del tramo y X es una variable de peso que expresa la influencia relativa de las entradas y las salidas del almacenamiento en el tramo, cuyo valor fluctúa entre 0 y 0.3, y tiene un valor típico de 0.2.

En la simulación hidrológica, el tránsito de avenidas se utiliza para calcular el efecto del almacenamiento temporal en un canal natural. Este almacenamiento hidráulico no solo se da en el cauce, sino también en el movimiento mismo del agua.

$$K = 0.18 \left(\frac{\Delta X}{S^{0.25}} \right)^{0.76} \dots \dots \dots (Ec16)$$

Donde:

ΔX = distancia máxima, en Km

S = Pendiente máxima de la subcuenca

Tabla 12. Parámetros del método de Muskingum

Tramos de río	Longitud del río (Km)	Pendiente	K (Hrs)	X
Río 1	70.83	0.0345	8.696	0.25
Río 2	55.68	0.0256	7.666	0.25
Río 3	18.95	0.0275	3.333	0.25
Río 4	24.4	0.0320	3.923	0.25

Fuente: Elaboración propia

Descripción del modelo hidrológico

Modelo de cuenca: El primer paso fue crear un proyecto nuevo en HMS donde se generó la cuenca y subcuencas en base al DEM de Alos Palsar,

así como las uniones, cauces y salidas. Cabe mencionar que se creó un proyecto para cada periodo de retorno a analizar. Los submodelos considerados que componen el modelo de la cuenca del río Piura incluyen: modelo de pérdidas (método del número de curva del SCS), modelo de transformación de precipitación efectiva en escorrentía (método del hidrograma unitario de la SCS), modelo de flujo base (no se consideró flujo base en eventos de avenida)

Modelo meteorológico: Para el modelo meteorológico se ingresaron los hietogramas específicos de avenidas generados por el método de la curva IDF. Los periodos de retorno considerados fueron: de 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años.

Especificaciones de Control: En este componente se especificó el intervalo de tiempo para que el HEC-HMS procesé los cálculos, para ello se definió la fecha de inicio fecha de inicio el 01 de enero de 2000 a las 00:00 horas y termino el 04 de enero de 2000 a las 00:00, las cuales no influyen en los cálculos. Dado que la cuenca a modelar es relativamente grande, las crecidas en el punto de control se observan aproximadamente después de más de 24 horas de iniciadas las tormentas; por lo que convenientemente se fijó una duración de 3 días para observar el comportamiento completo del hidrograma.

Ingreso de datos a HEC-HMS

Se ingresan de manera manual los parámetros de Muskingum K y X, así como los hietogramas de 3 horas para cada subcuenca. Las especificaciones de control para la simulación se configuraron como fecha de inicio el 01 de enero de 2000 a las 00:00 horas y termino el 04 de enero de 2000 a las 00:00 horas con un intervalo de cómputo de 30 minutos.

Validación del modelo

La validación del modelo hidrológico desarrollado empleando el HEC-HMS, es un proceso que consistió en ajustar los valores de diversos parámetros del modelo, básicamente los valores del número de curva y Muskingum, que tienen mayor influencia en la variación del caudal, hasta que los resultados obtenidos a través del mismo se ajusten lo mejor posible a la información histórica.

Para realizar la calibración del modelo se tomó como punto de control la estación hidrométrica Sánchez Cerro, perteneciente al PECHP (Proyecto Especial Chira Piura) cuenta con registros de caudales que permitió verificar el ajuste del modelo hidrológico.

El proceso iterativo de calibración, a lo que se le conoce también como optimización, consistió en lo siguiente:

- Recopilación de registros históricos de precipitación y caudales, tomando como referencia las avenidas de marzo 2017, se consideró los días 26, 27 y 28.
- Especificación de los valores iniciales de los parámetros.
- Simulación del proceso de precipitación-escorrentía a través del modelo hidrológico para obtener los hidrogramas.
- Comparación entre los hidrogramas observados y calculados.
- Verificación del ajuste entre los resultados obtenidos y la información histórica. Si los resultados no son satisfactorios, se modifican los valores de los parámetros y se repite el proceso hasta que se tenga el mejor ajuste posible.

Indicadores estadísticos de comparación

Para la validación presentada se ha optado por utilizar el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y el sesgo (BIAS) definidos por Pielke (1984) y Stauffer y Seaman (1990), así como la Eficiencia de Nash-Sutcliffe, estos estadísticos permiten medir la precisión de la simulación. Por precisión se entiende el promedio del grado de correspondencia entre pares individuales de valores estimados y valores observados.

RMSE (root mean squared error)

El error cuadrático medio, es un indicador estadístico de dispersión, el cual manifiesta el error global entre dos sets de datos; mientras el RSME se acerca más a cero, indica que el modelo matemático se ajusta mejor a la realidad. A continuación, se muestra la ecuación para calcularlo. (Pielke, 1984)

$$RSME \text{ (m}^3\text{/s)} = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Exp - Obs)^2\right)}$$

Donde:

n : número de datos

Exp: Valor simulado del Hec-Hms

Obs: Caudales observados

MAE (mean absolute error)

El error medio absoluto es igualmente un indicador estadístico de dispersión, el cual manifiesta el error absoluto medio entre dos sets de datos. La diferencia entre el RMSE y el MAE radica en la sensibilidad que tienen para errores grandes. Es decir, el RMSE al elevar al cuadrado los errores y después promediarlos, da mayor peso a grandes errores que el MAE. Al igual que en el estadístico RMSE, el MAE debe acercarse a cero para afirmar que el modelo matemático se ajusta a la realidad. A continuación, se muestra la fórmula para calcular el MAE.

$$MAE(m3/s) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Exp - Obs|$$

Donde:

n: numero de datos

Exp: Valor simulado del Hec-Hms

Obs: Caudales observados

0

Sesgo (BIAS)

El sesgo, nos proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable. El BIAS, nos cuantifica el error sistemático del modelo. Se le expresa con unidades y porcentajes, en este caso se utilizó el porcentaje. A continuación, se muestra la fórmula para calcular el BIAS.

$$BIAS(\%) = \frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Exp - Obs)\right)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Obs)} * 100$$

Donde:

n: numero de datos

Exp: Valor simulado del Hec-Hms

Obs: Caudales observados

Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E)

El criterio de Nash-Sutcliffe es uno de los indicadores estadísticos más usados en hidrología. Se define como:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, $E=1$; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces $E=0$. Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la siguiente tabla.

Tabla 13. Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe

E	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno
0.6-0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

Fuente: *Molnar, 2011.*

6.8 Desarrollo de un Modelo hidráulico con HEC-RAS 2D

El desarrollo del modelo hidráulico, permitió determinar las áreas potencialmente inundables para los periodos de retorno de 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años, en el tramo del río Piura que mide aproximadamente 7 km, abarca parte de los distritos de Catacaos, Veintiséis de Octubre, Piura y Castilla, pertenecientes a la provincia de Piura.

Descripción del tramo en estudio

El tramo en estudio mide aproximadamente 7 kilómetros y comprende la zona urbana y rural: desde aguas arriba del puente Avelino Cáceres hasta inmediatamente aguas abajo del puente Grau (Carretera Panamericana). En el área aledaña al río, aparte de viviendas, se encuentra infraestructura como centros de salud, instituciones educativas, plaza de armas de Piura, entre otros; que en inundaciones anteriores se han visto seriamente afectados. Por otro lado, el tramo en estudio presenta estructuras hidráulicas como puentes y defensas ribereñas. En total se contabilizan cinco puentes: Avelino Cáceres, Eguiguren, Sánchez Cerro y Bolognesi y Grau, cada uno con diferente forma y estructura de funcionamiento. Además, una parte de la data topográfica incluye los drenes pluviales Sechura 13-08 que recorren en dirección del río. (Ver Figura 29).

Descripción del modelo

El tramo en estudio del río Piura se simuló con el software de modelamiento numérico HEC-RAS. Este software permitió modelizar el flujo del cauce natural en régimen no permanente para determinar los caudales ante diferentes periodos de retorno. El modelo no estacionario en 2D se fundamenta en la ecuación de continuidad y la ecuación de conservación de momento.

Datos geométricos

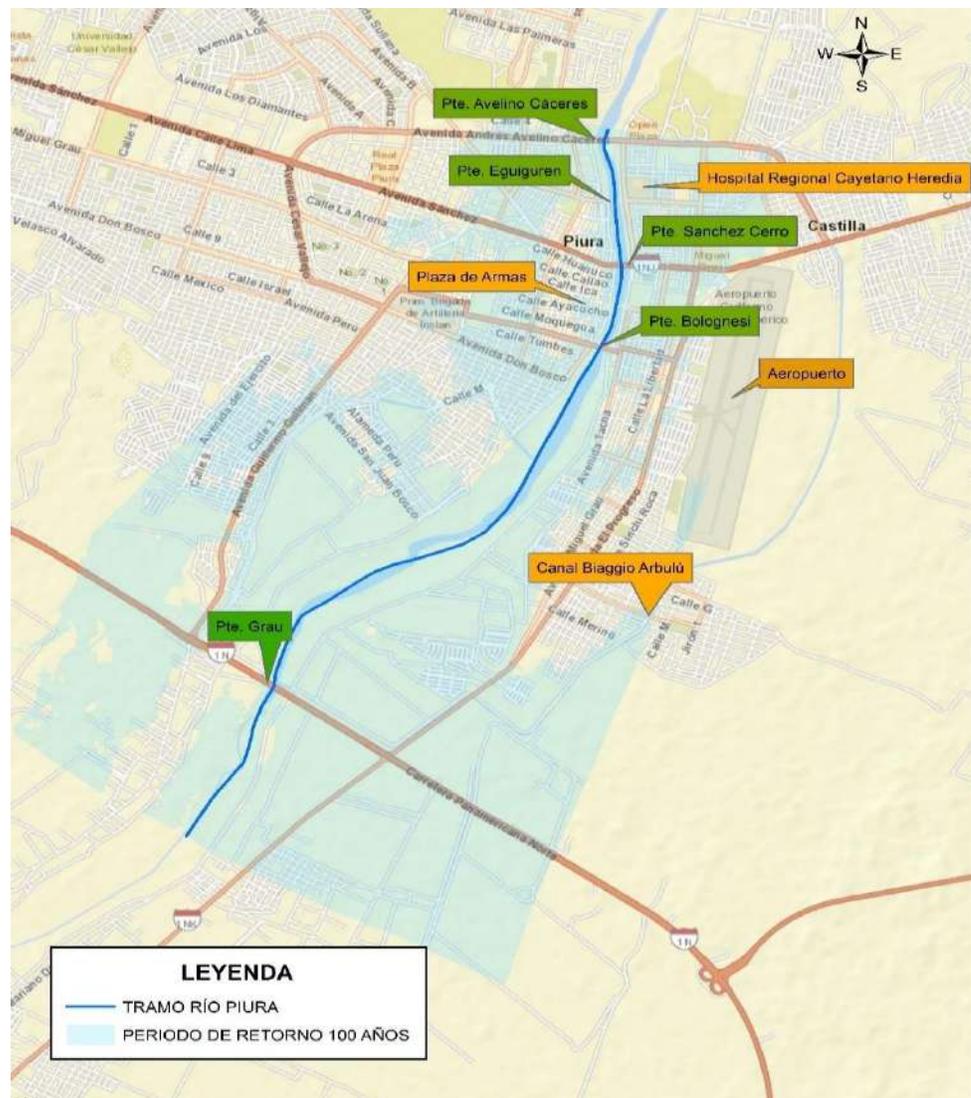
El dato geométrico en formato Tiff utilizado fue entregado por la CONIDA, quién lo generó en base al DSM de imágenes satelitales Perusat1 (estéreo)

utilizando 9 puntos GPS, se añade el DSM a través de la herramienta RasMapper dentro del Hec-Ras.

Caudales de diseño

La simulación hidráulica se realizó con los caudales máximos para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25 y 50 años, obtenidos del análisis con el modelo hidrológico HEC-HMS. Para el ingreso de los datos de flujo se consideró realizar el análisis en régimen no permanente, por ello los datos de ingreso fueron el hidrograma de aguas arriba y una condición de contorno aguas abajo.

Figura 29. Tramo del río Piura analizado Pte. Avelino Cáceres hasta el Pte. Grau



Fuente: Elaboración propia

En el anexo N° 04 se presenta un manual con el detalle de los pasos realizados para la modelación hidrodinámica usando el modelo HEC RAS 2D.

Los pasos generales para realizar el modelado 2D en HEC-RAS, son los siguientes:

1. Se abre el programa HECRAS y se crea un nuevo proyecto, para ello entrar a la pestaña File/newProject, en este paso se considera en el menú options, las unidades del sistema internacional.
2. Se desarrolla un modelo de terreno en HEC-RAS Mapper. El modelo de terreno es un requisito para el modelado 2D, ya que se utiliza para establecer las propiedades geométricas e hidráulicas de la celda 2D.
3. Se crea un conjunto de datos de clasificación de tierras dentro de HEC-RAS Mapper para establecer los valores n de Manning dentro de las áreas de flujo 2D. También, HEC-RAS tiene la opción de polígonos definidos de la clasificación de tierras que se pueden usar en reemplazo de los predefinidos o como zonas de calibración.
4. En el editor de geometría se dibuja un polígono límite para cada una de las áreas de Flujo 2D que se modelarán.
5. Usando el editor de área de flujo 2D, se crea la malla computacional 2D para cada área de flujo y se edita la malla del área de flujo 2D para mejorarla.
6. Ejecutar el preprocesador geométrico 2D de RAS Mapper para crear las tablas de propiedades hidráulicas.
7. Luego desde el editor de datos geométricos, se dibuja cualquier línea de condición de contorno externa a lo largo del perímetro de las áreas de flujo 2D.
8. En la ventana simulación de flujo no estacionario, se configuran las opciones necesarias para las áreas de flujo 2D.
9. Se ejecuta la simulación de flujo no estacionario.

6.9 Determinación de los niveles de peligro

El peligro está en función de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno y de su intensidad. La intensidad a su vez se puede definir en función de la profundidad, así como de la duración de las inundaciones.

Al determinar el nivel de peligro en el tramo del río Piura, se dispone de una visión general de la exposición y de los grupos de población preocupante en distritos afectados para apoyar la toma de decisiones.

Los umbrales entre los niveles de intensidad muy alta, alta, media y baja, han sido definidos considerando los valores de tirante del agua obtenidos del

modelamiento en HECRAS 2D, considerando el peligro que un determinado nivel de agua puede significar para la infraestructura o las viviendas y la vida de los pobladores; así como la referencia de los tirantes de agua registrados en el evento extremo de marzo 2017.

En la siguiente tabla se presentan los niveles de peligro definidos en base a la profundidad del flujo o tirante de agua.

Tabla 14. Niveles de peligro en el tramo del río Piura
Pte. Avelino Cáceres hasta el Pte. Grau

Nivel de Peligro	Profundidad del flujo (H) (m)
Muy alto	$H > 1.50$ m
Alto	$0.75 < H < 1.50$ m
Medio	$0.50 < H < 0.75$ m
Bajo	$H < 0.50$ m

Propia en base a INDECI, 2011

La frecuencia o recurrencia de inundaciones, periodo de retorno de la inundación o cada cuanto se inunda una determinada zona dependerá esencialmente de la frecuencia de precipitaciones excepcionalmente fuertes generando el aumento del caudal en el tramo del río Piura comprendido entre el Pte. Avelino Cáceres hasta el Pte. Grau.

Los períodos de retorno se establecieron en cuatro categorías que son:

Tabla 15. Categorías de los periodos de retorno

Nivel de Recurrencia	Periodos de Retorno (Años)
Muy alta	$1 < T < 5$ años
Alta	$5 < T < 20$ años
Media	$20 < T < 50$ años
Baja	$50 < T < 100$ años

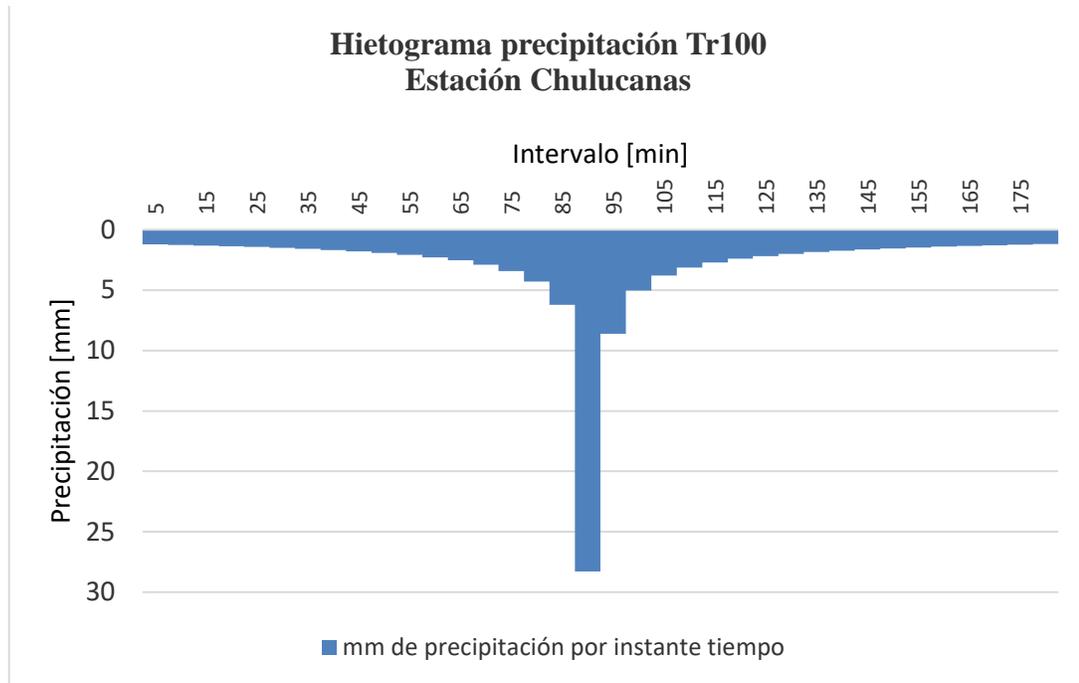
INDECI, 2011

VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1 Obtención de hietogramas

Los cálculos para generar los hietogramas de los diferentes periodos de retorno para las 9 estaciones evaluadas, se realizaron en Excel por el método de los bloques alternos. Los resultados para la estación Chulucanas se muestra en la Figura 30.

Figura 30. Hietograma para periodo de retorno de 100 años - Estación Chulucanas



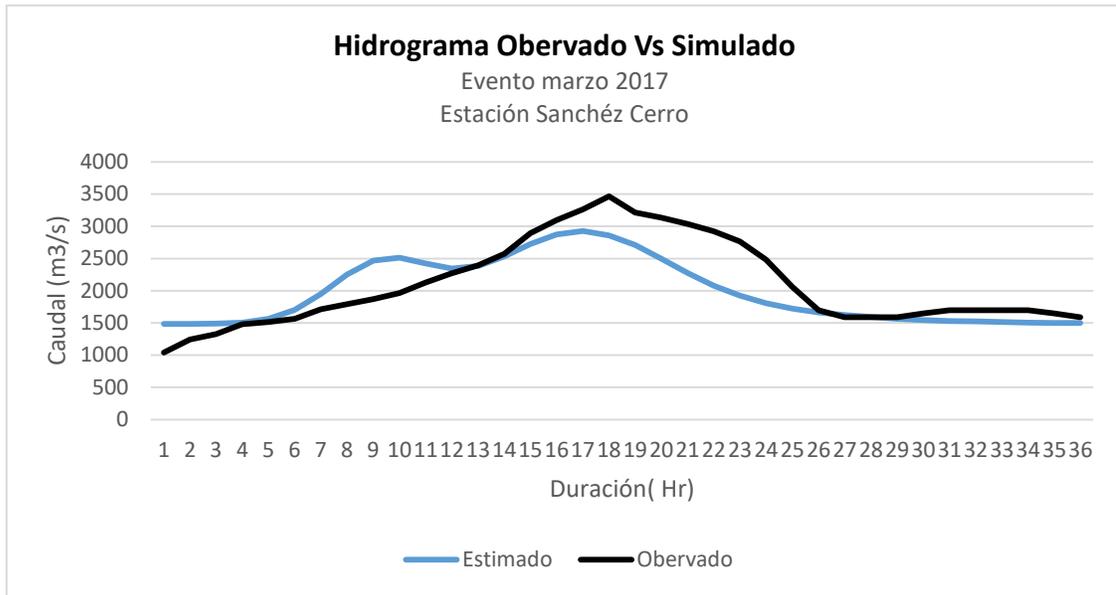
Fuente: Elaboración propia

7.2 Resultados estadísticos de comparación

Para generar los hidrogramas de avenida en la estación Sánchez Cerro, se calibró el modelo hidrológico; para ello se consideró el evento histórico registrado en la ciudad de Piura, el 27 marzo del 2017, las precipitaciones que generaron esta avenida se produjeron días anteriores, por lo que, para analizar su comportamiento, se consideró los valores horarios de los días previos y posteriores a la ocurrencia de este evento.

En la Figura 31 se muestra una comparación entre los caudales observados los días 26, 27 y 28 de marzo y el hidrograma generado luego de ajustar los valores de CN y K en HEC-HMS. La curva de color negro representa el hidrograma real, con un pico de $3,468 \text{ m}^3/\text{s}$ a las 12:00 hrs del 27 de marzo, mientras que la línea de color azul representa el hidrograma generado con un pico de $2,925 \text{ m}^3/\text{s}$ a las 10:00 hrs del 27 de marzo.

Figura 31. Hidrograma Observado Vs Simulado



Fuente: Elaboración propia

Los indicadores estadísticos de comparación que se utilizaron para validar los datos observados y simulados son: el Error Cuadrático Medio (RMSE), el Error Absoluto Medio (MAE), el Sesgo (BIAS) y Eficiencia de Nash-Sutcliffe.

Tabla 16. Indicadores Estadísticos para calibración

Indicador	Valor
Eficiencia de Nash-Sutcliffe	0.66
Sesgo (BIAS)	5.03 %
Error Cuadrático Medio (RMSE)	334.77
Error Absoluto Medio (MAE)	251.30

Fuente: Elaboración propia

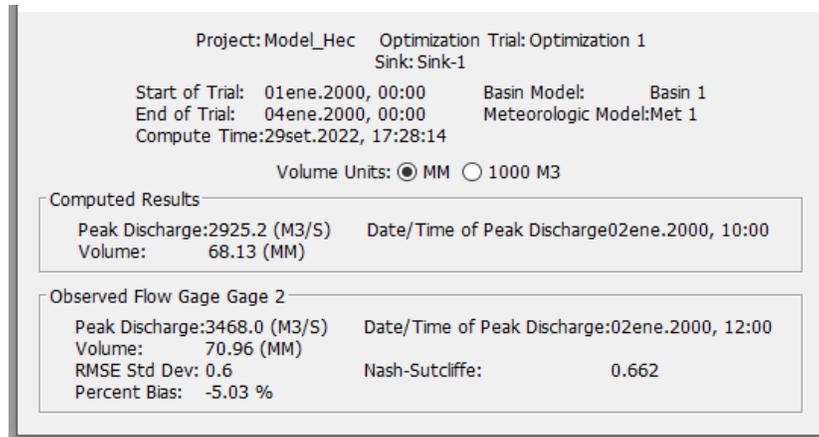
A continuación, se describe los resultados de los indicadores estadísticos utilizados para la calibración.

- El error medio absoluto, indicador estadístico de dispersión, manifiesta que el error absoluto medio es de 251.30 m³/s entre los datos de caudales observados y simulados.
- El sesgo nos muestra la tendencia del modelo a subestimar el caudal simulado en 5.03 %.

- La variabilidad de las observaciones explicada por la simulación, tiene un buen ajuste, en base al resultado obtenido por el indicador Eficiencia de Nash-Sutcliffe (0.66).

Como se puede inferir a través del análisis estadístico, la simulación del evento histórico se generó de manera aceptable.

Figura 32. Resultados Estadísticos de Validación



Fuente: Propia, obtenido del modelo HEC-HMS

El número de curva calibrado para cada subcuenca y la variación respecto al valor inicial se muestra en el Tabla 23.

Tabla 17. Número de curva calibrado

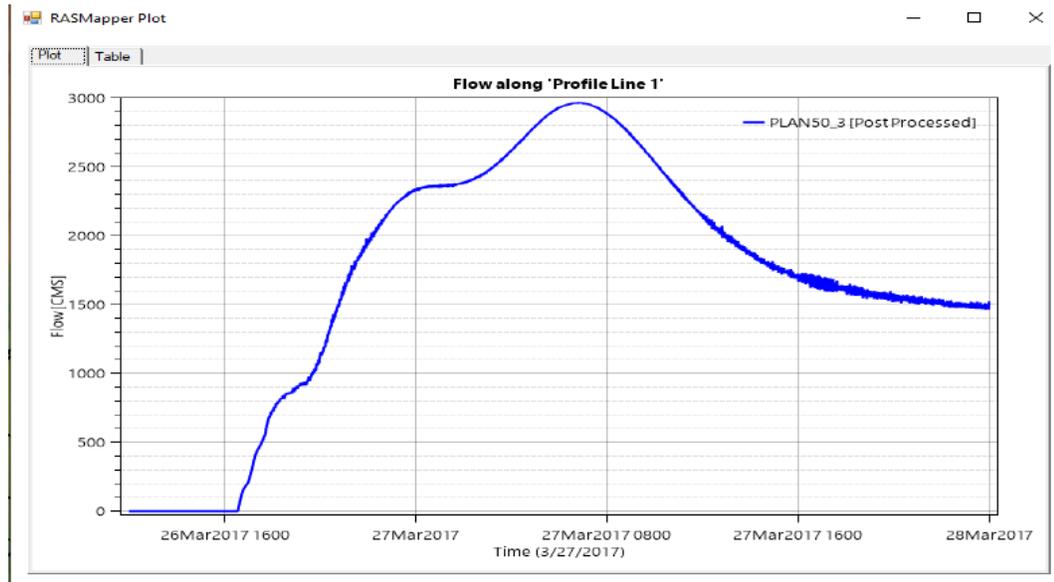
Subcuenca	CN inicial	CN calibrado	Diferencia
Subcuenca 1	44.22	52.67	8.445
Subcuenca 2	78.81	76.68	-2.134
Subcuenca 3	78.78	96.33	17.551
Subcuenca 4	35.2	46.62	11.421
Subcuenca 5	76.48	98.05	21.574
Subcuenca 6	64.64	72.77	8.126
Subcuenca 7	66.69	54.41	-12.276
Subcuenca 8	57.56	39.67	-17.895
Subcuenca 9	48.51	44.09	-4.425

Previo a simular los escenarios para diferentes periodos de retorno se procedió a calibrar el modelo hidráulico. Para ello se simuló el evento histórico del 27 de marzo de 2017, donde el río Piura alcanzó un caudal pico de 3,468 m³/s y como resultado se inundaron los distritos de Piura y Castilla.

La calibración se basó principalmente en ajustar los valores iniciales de Manning en el cauce principal de tal manera que el nivel de agua alcanzado en las secciones de los puentes Cáceres y Sánchez Cerro corresponda con los valores observados,

durante el proceso de calibración se verificó constantemente el perfil longitudinal de nivel de agua a lo largo del tramo modelado, asimismo se verificó que el hidrograma ingresado sea similar al hidrograma en la salida del tramo estudiado, lo cual manifiesta que los resultados son aceptables.

Figura 33. Hidrograma obtenido a la salida del río en HecRas



Fuente: Elaboración propia, obtenida del HEC RAS 2D

7.3 Obtención de caudales

El Tabla 24 resume los caudales máximos instantáneos para diferentes periodos de retorno que presentaría el río Piura en la estación Sánchez Cerro.

Tabla 18. Caudales máximos instantáneos simulados para diferentes TR en la estación Sánchez Cerro

TR (años)	Q _{máx} (m ³ /s)
5	899.6
10	1279.3
20	1815.4
25	2044.6
50	2925.2
100	4452.5

Fuente: Elaboración propia

El modelo hidrológico configurado registra lluvia en todas las subcuencas simultáneamente y con una intensidad determinada por el método de los bloques alternos, se infiere que la realidad pueda ser diferente, principalmente en que la duración de la lluvia sea menor o mayor a 24 horas y que no llueva en todas las subcuencas simultáneamente; sin embargo, con la metodología aplicada, y los

resultados satisfactorios de la calibración, el modelo hidrológico logra justificar los resultados obtenidos.

De los resultados de la Tabla 24, se puede afirmar que en el FEN 1983 de (3200 m³/s) y 2017 (3468 m³/s) el río Piura presentó un caudal de magnitud similar a un evento de 50 años de tiempo de retorno, en comparación con el FEN 1998 cuyo caudal máximo presentado (4424 m³/s) hace referencia a un evento de 100 años.

Figura 34. Hidrograma de diseño Tr = 100 años



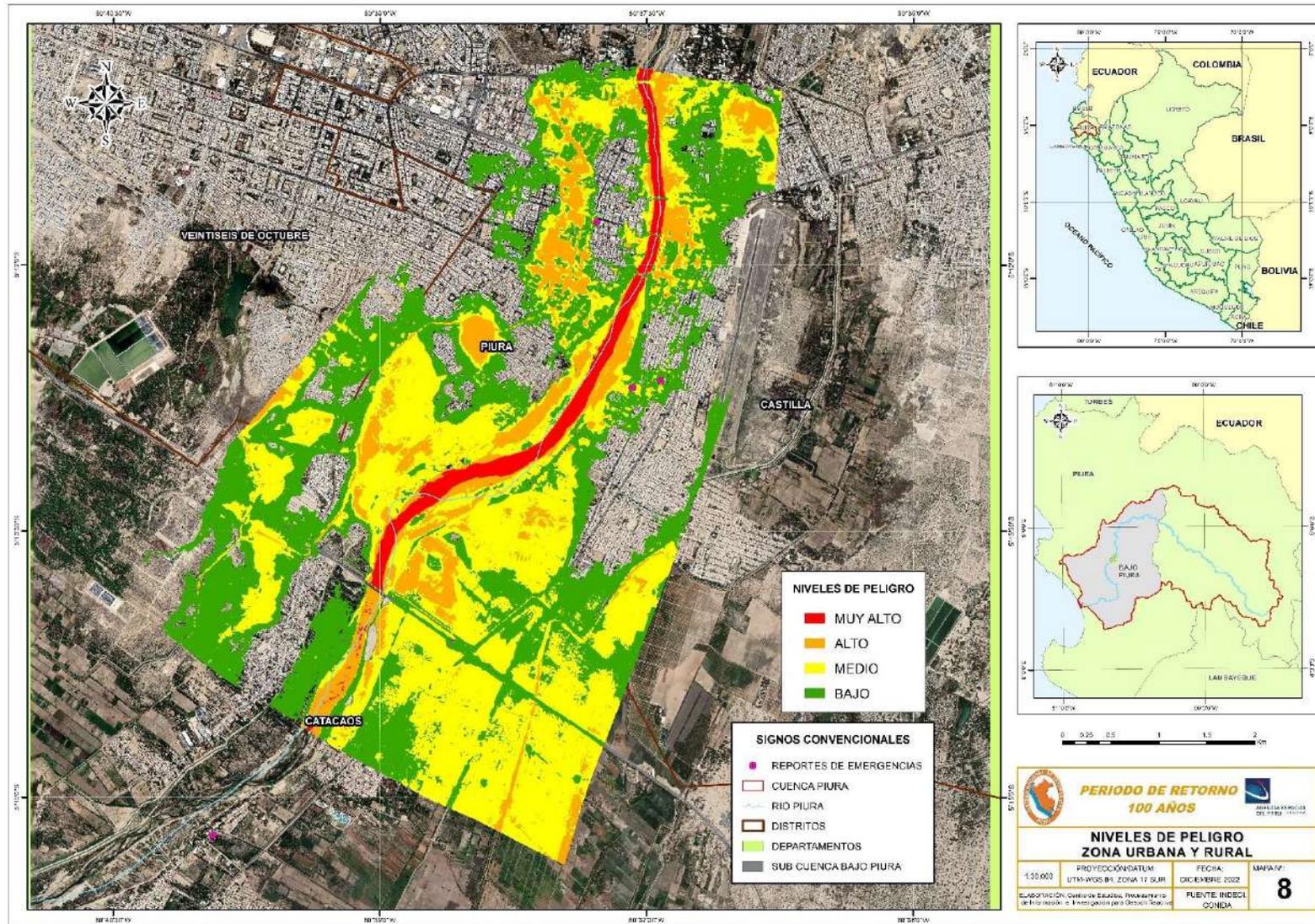
Fuente: Elaboración propia

7.4 Peligro por inundación fluvial

Para determinar los niveles de peligro por inundación fluvial correspondiente a cada uno de los periodos de retorno analizados, se ha considerado los valores de tirante del agua obtenidos del modelamiento en HECRAS 2D.

En el anexo N°01 se muestran los resultados del peligro de inundación para los periodos de retorno de 50, 25, 20, 10 y 5 años.

Figura 35. Niveles de peligro ante inundación fluvial - Periodo de retorno de 100 años



7.5 Elementos Expuestos

Los elementos expuestos identificados corresponden a la zona urbana los cuales han sido agrupados según la dimensión social en cantidad de población vulnerable, centros de salud y centros educativos, comisarías, calles expuestas.

Se considera también como elemento expuesto la zona rural del ámbito de afectación por el peligro de inundación.

Tabla 19. Área de zona rural expuesta en función del nivel de peligro - Tr 100 años

DISTRITO	VALLE	PREDIO	TR 100	Área (km ²)	Área (Ha)
Castilla	Atuno Bajo	Chiclayito	Alto	1.075	107.526
Castilla	Bajo Piura	Chiclayito	Medio	2.561	256.067
Castilla	Bajo Piura	Chiclayito	Bajo	1.921	192.058

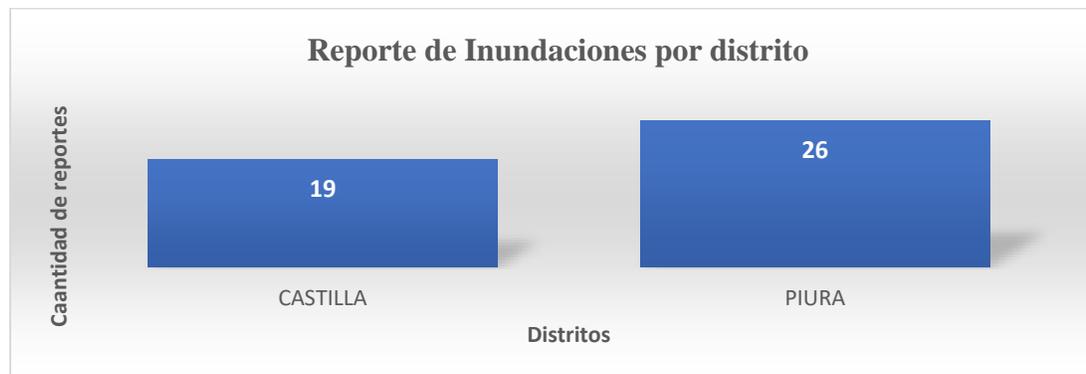
Fuente: Elaboración propia

7.6 Registro de Emergencias

Se ha analizado registros de emergencia para el tramo del río Piura comprendido entre el Pte. Avelino Cáceres y el Pte. Grau, correspondiente al periodo 1972 al 2019, contenidos en la base de datos del Sistema de Información Nacional para la Respuesta y Rehabilitación-SINPAD y en el Sistema de Inventario de Desastres-DesInventar quienes recopilan información sobre daños de diversos tipos de desastres.

En la Figura 36 se muestra que la mayor cantidad de emergencias reportadas por inundaciones para el tramo del río Piura analizado corresponden a los distritos de Piura y Castilla con 26 y 19 reportes registrados respectivamente.

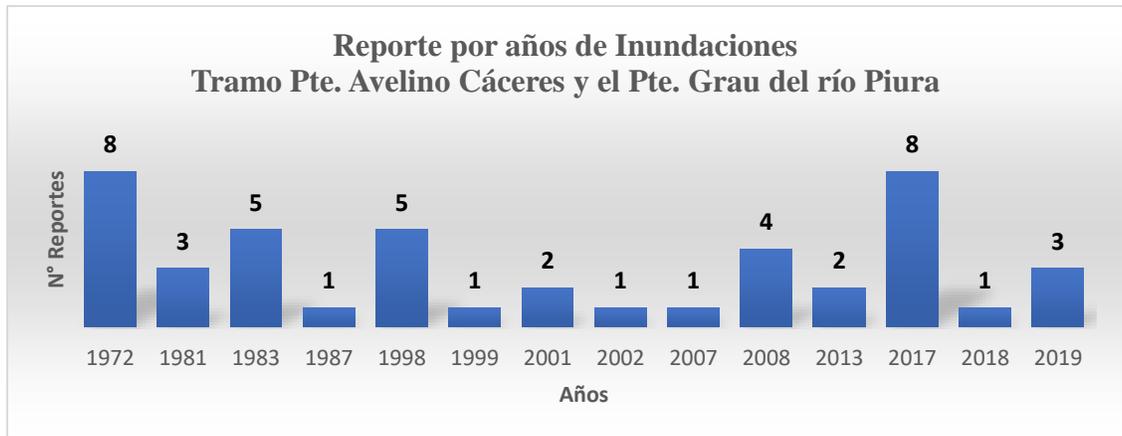
Figura 36. Reportes de inundaciones por distrito - Registro Histórico 1972 al 2019



Fuente: Propia en base a SINPAD y DesInventar

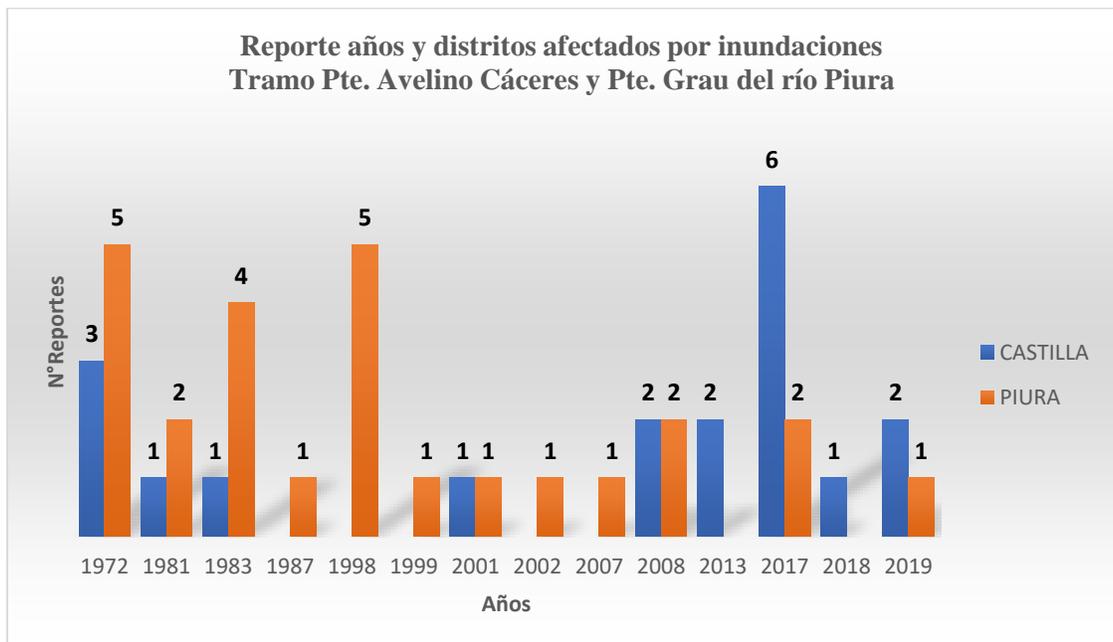
El 2017 se registraron 8 reportes por inundaciones en el tramo Pte. Avelino Cáceres y el Pte. Grau del río Piura, siendo la mayor cantidad de reportes en los últimos 45 años (Figura 37), del cual la mayor afectación se presentó en el distrito de Castilla. (Figura 38)

Figura 37. Reporte por años de inundaciones - Registro Histórico 1972 al 2019



Fuente: Propia en base a SINPAD y DesInventar

Figura 38. Reporte por años y distritos afectados por inundaciones - Registro Histórico 1972 al 2019

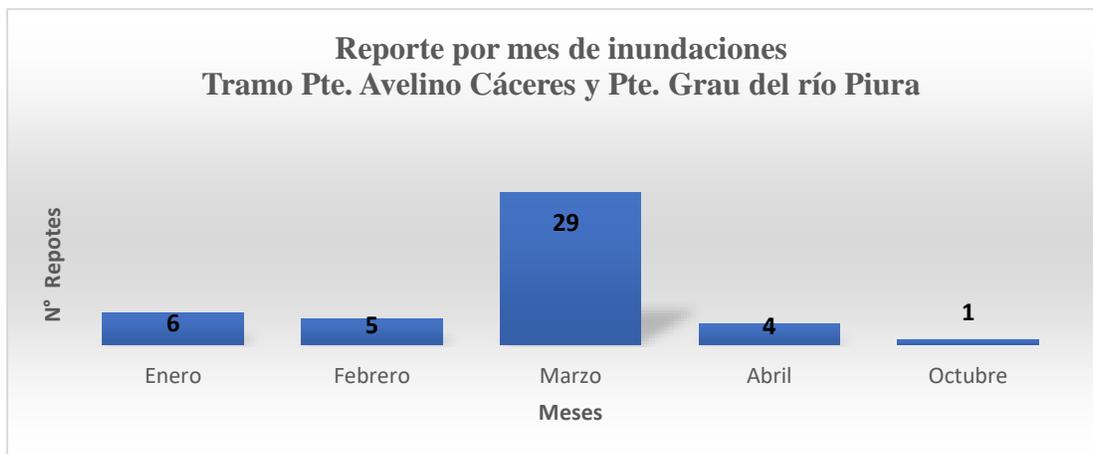


Fuente: Propia en base a SINPAD y DesInventar

La Figura 39, muestra el análisis del registro de inundaciones del SINPAD y DesInventar en los últimos 45 años, entre 1972 – 2019 para el tramo seleccionado

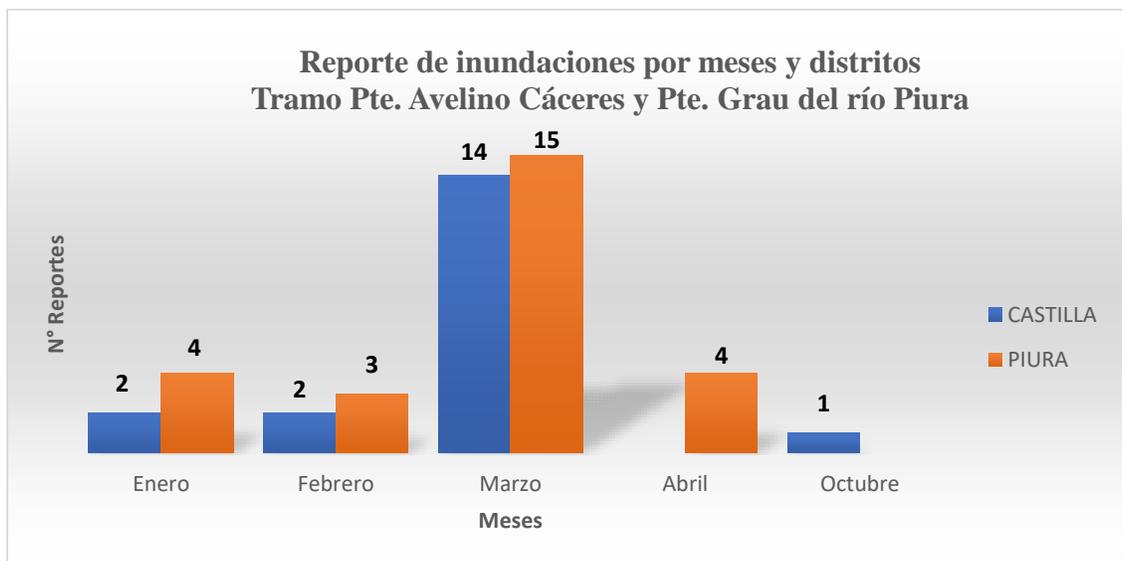
del río Piura, donde más del 66% de estas se han generado en el mes de marzo. Se observa que esta estacionalidad guarda una marcada relación con el periodo de avenida en el territorio peruano. Asimismo, en la Figura 40 se visualiza que los distritos donde se registraron estas emergencias fueron Castilla y Piura.

Figura 39. Reporte por mes de inundaciones - Registro Histórico 1972 al 2019



Fuente: Propia en base al SINPAD y DesInventar

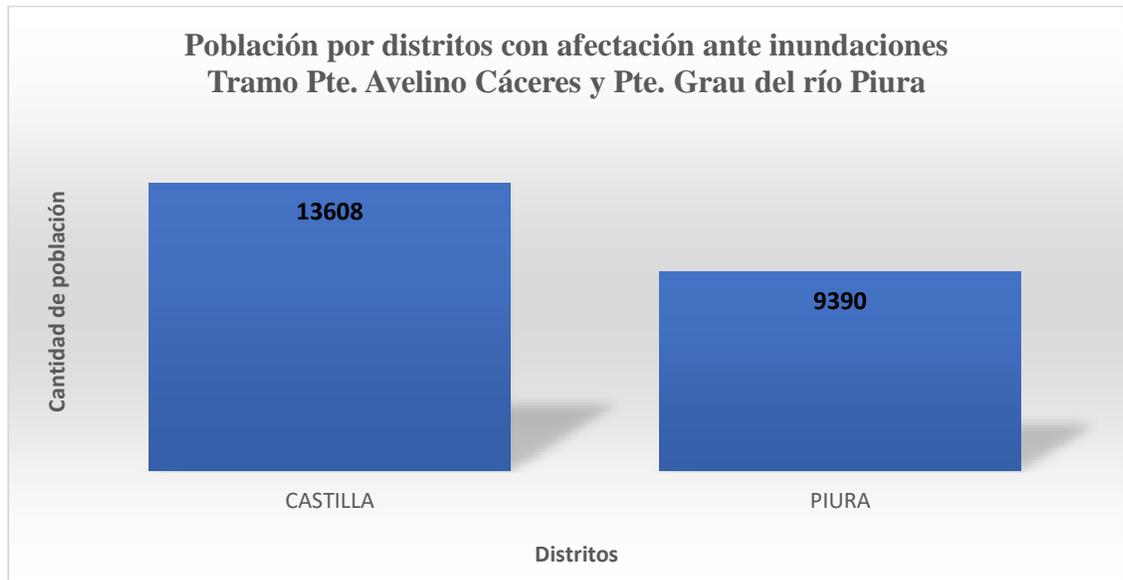
Figura 40. Reporte por mes de inundaciones - Registro Histórico 1972 al 2019



Fuente: Propia en base al SINPAD y DesInventar

En base a la disponibilidad de información en la Figura 41 se muestra el total de población que tuvo algún tipo de afectación ante la ocurrencia de inundaciones registrados por distritos.

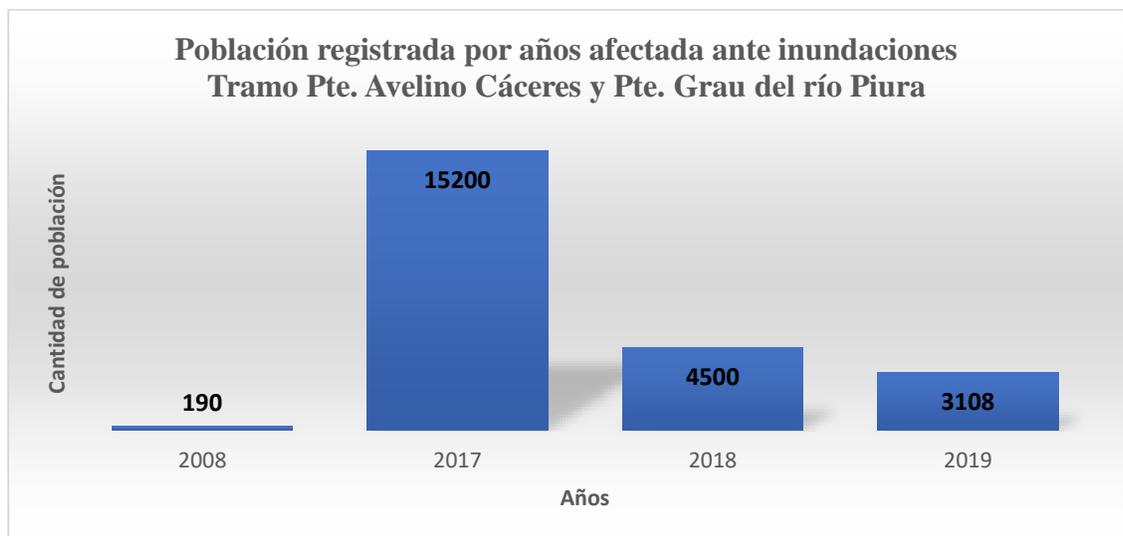
Figura 41. Población por distritos con afectación ante inundaciones - Registro Histórico 1972 al 2019



Fuente: Propia en base al SINPAD

El año 2017 se registraron 15 200 personas con algún tipo de afectación ante la ocurrencia de inundaciones. (Figura 42)

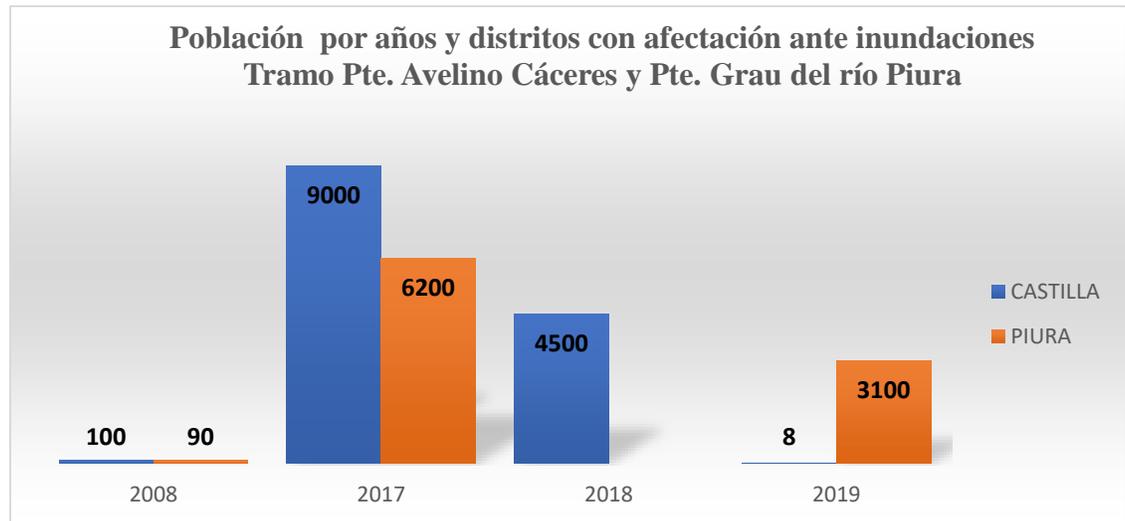
Figura 42. Población por años afectada ante inundaciones - Registro Histórico



Fuente: Propia en base a SINPAD

La Figura 43 muestra que el año 2017, el distrito de Castilla registró la mayor cantidad de personas con algún tipo de afectación ante la ocurrencia de inundaciones.

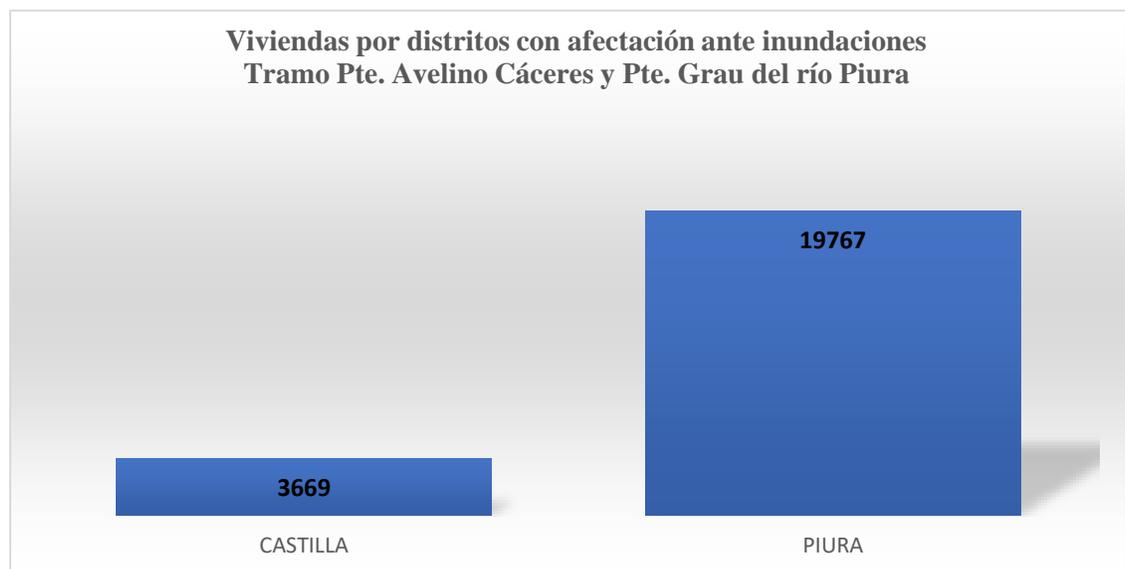
Figura 43. Población por años y distritos afectada ante inundaciones - Registro Histórico



Fuente: Propia en base a SINPAD

En la Figura 44 se muestra el total de viviendas que tuvieron algún tipo de afectación ante la ocurrencia de inundaciones registrados por distritos.

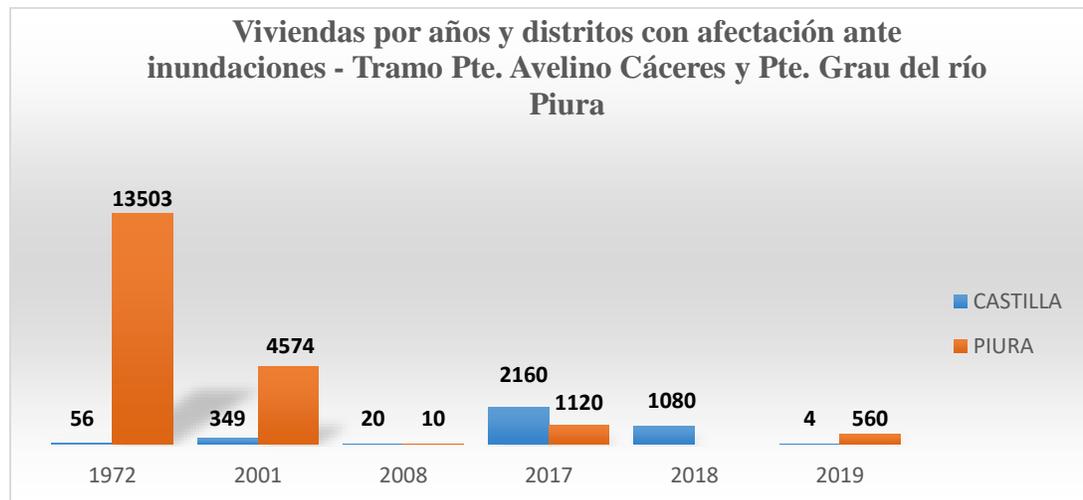
Figura 44. Viviendas por distritos con afectación ante inundaciones - Registro Histórico 1972 al 2019



Fuente: Propia en base a SINPAD

En la Figura 45 se muestra el total de viviendas que tuvieron algún tipo de afectación por años y distritos ante la ocurrencia de inundaciones.

Figura 45. Viviendas por años y distritos afectados por inundaciones - Registro Histórico 1972 al 2019



Fuente: Propia en base a SINPAD

7.7 Impactos en función del peligro por inundación fluvial

El análisis de los niveles de peligro, permitió identificar potenciales impactos a las personas y elementos expuestos como instituciones educativas y centros de salud, entre otros, en el tramo del río Piura comprendido entre el Pte. Avelino Cáceres hasta el Pte. Grau.

A continuación, se describe un ejemplo de alerta de inundación por desborde de río, que considera los potenciales impactos, la cual permitiría tener una acción temprana.

En la costa norte del Perú, subcuenca bajo Piura en el tramo de río Piura que inicia en el Pte. Avelino Cáceres hasta el Pte. Grau, con un horizonte de recurrencia de 100 años incrementaría el nivel del río Piura superando los 1.50 metros, en el mes de marzo, con alta probabilidad de ocurrencia de impactos como:

- Inundación en parte de los distritos de Castilla, Piura, Catacaos y Veintiséis de Octubre.
- 2677 niños menores de 14 años y 2872 adultos mayores de 65 años con riesgo alto de ser afectados en su salud y/o vida.
- 103 y 398 manzanas expuestas a un riesgo alto y medio respectivamente.
- 2 y 2 establecimientos de salud expuestos a un riesgo alto y medio respectivamente.
- 11 y 36 instituciones educativas expuestas a un riesgo alto y medio respectivamente.

7.8 Elementos expuestos en función de los niveles de peligro

Los elementos expuestos identificados corresponden a la zona urbana los cuales han sido agrupados según la dimensión social en cantidad de población, centros de salud, centros educativos, manzanas expuestas, entre otros.

Tabla 20. Elementos expuestos por niveles de peligro y periodos de retorno

Nivel de Riesgo	ALTO								MEDIO								BAJO							
Distrito	Elementos expuestos																							
	Población	1/Población		2/Manzanas	8/Establecim. de salud	4/Insti. Educativas	Comisarias	Calles (km2)	Población	1/Población		2/Manzanas	3/Establecim. de salud	4/Insti. Educativas	Comisarias	Calles (km2)	Población	1/Población		2/Manzanas	3/Establecim. de salud	4/Insti. Educativas	Comisarias	Calles (km2)
		Niños <14 años	Adultos >65 años							Niños <14 años	Adultos >65 años							Niños <14 años	Adultos >65 años					
TIEMPO DE RETORNO 100 AÑOS																								
Castilla	3797	916	948	37	2	2		1.43	19967	4615	4493	128	2	13		4.82	21268	5044	5481	151	1	18		7.68
Piura	7824	1741	1897	64		9		4.83	24742	6766	4411	185		23	1	9.66	21844	5842	4472	192	2	28		9.52
Catacaos									1678	491	582	26				1.46	2882	741	891	50		3		1.92
Veintiséis de Octubre	65	20	27	2					3031	786	1144	59				0.47	7822	1930	2721	123		1		2.68
Total	11686	2677	2872	103	2	11	0	6.25	49418	12658	10630	398	2	36	1	16.42	53816	13557	13565	516	3	50	0	21.79
TIEMPO DE RETORNO 50 AÑOS																								
Castilla	3186	716	696	32	2	3		1.40	13012	3089	2989	93	2	12		3.69	22874	5369	5854	143	1	11		7.97
Piura	7685	1847	1449	61		6	1	3.89	21259	5715	4222	165		25		9.31	18861	5232	3918	160	1	17		7.19
Catacaos									1453	435	495	20				1.79	2789	720	861	49		2		1.11
Veintiséis de Octubre									2653	684	1003	46				0.58	7310	1825	2598	122				2.45
Total	10871	2563	2145	93	2	9	1	5.28	38377	9923	8709	324	2	37	0	15.36	51834	13146	13231	474	2	30	0	18.72
TIEMPO DE RETORNO 25 AÑOS																								
Castilla	3295	887	613	27		2		0.80	8275	1834	2080	66		6		3.05	17087	4129	4521	119	3	11		8.2
Piura	9897	2664	1464	60		9	1	3.38	16911	4054	3810	152		25		9.59	16689	5002	3548	133		9		5.4
Catacaos									1114	335	374	15				1.29	3019	790	953	52		2		1.6
Veintiséis de Octubre									387	94	159	9					8026	2011	2931	138				1.8

Total	13192	3551	2077	87	0	11	1	4.18	26687	6317	6423	242	0	31	0	13.92	44821	11932	11953	442	3	22	0	17.0	
TIEMPO DE RETORNO 20 AÑOS																									
Castilla	1908	516	350	17		4		1.87	10537	2594	2782	71	2	8		2.80	10111	2290	2564	86	2	4			3.95
Piura	4911	1213	861	43		6	1	2.73	13060	3044	2776	121		17		6.06	20135	5864	3953	135		19			7.91
Catacaos									786	234	296	11				0.76	2587	670	786	44		1			1.48
Veintiséis de Octubre									145	38	49						4601	1139	1729						1.10
Total	6819	1729	1211	60	0	10	1	4.61	24528	5910	5903	203	2	25	0	9.62	37434	9963	9032	265	2	24	0	14.44	
TIEMPO DE RETORNO 10 AÑOS																									
Castilla	283	114	32	2	1	1		0.25	6473	1574	1592	50	2	7		3.71	16146	3806	4153	121		10			4.67
Piura	3717	832	951	26		5		1.69	16207	4160	3091	117		16		7.13	16374	4586	3110	137		20	1		7.07
Catacaos									320	98	122	5		1		0.56	2848	762	896	46					1.48
Veintiséis de Octubre												3					4296	1052	1612	83					1.10
Total	4000	946	983	28	1	6	0	1.93	23000	5832	4805	175	2	24	0	11.40	39664	10206	9771	387	0	30	1	14.32	
TIEMPO DE RETORNO 5 AÑOS																									
Castilla	283	114	32	2				0.11	5349	1299	1220	48	1	6		3.56	10021	2332	2746	74	2	6			2.54
Piura	3496	775	917	25		4		1.43	9542	2650	1656	77		12		5.17	19465	5001	3560	144		23	1		7.92
Catacaos									468	137	167	7		1		0.63	1248	360	432	20					0.58
Veintiséis de Octubre																	410	98	143	7					0.41
Total	3779	889	949	27	0	4	0	1.54	15359	4086	3043	132	1	19	0	9.36	31144	7791	6881	245	2	29	1	11.44	

Fuente: INDECI.

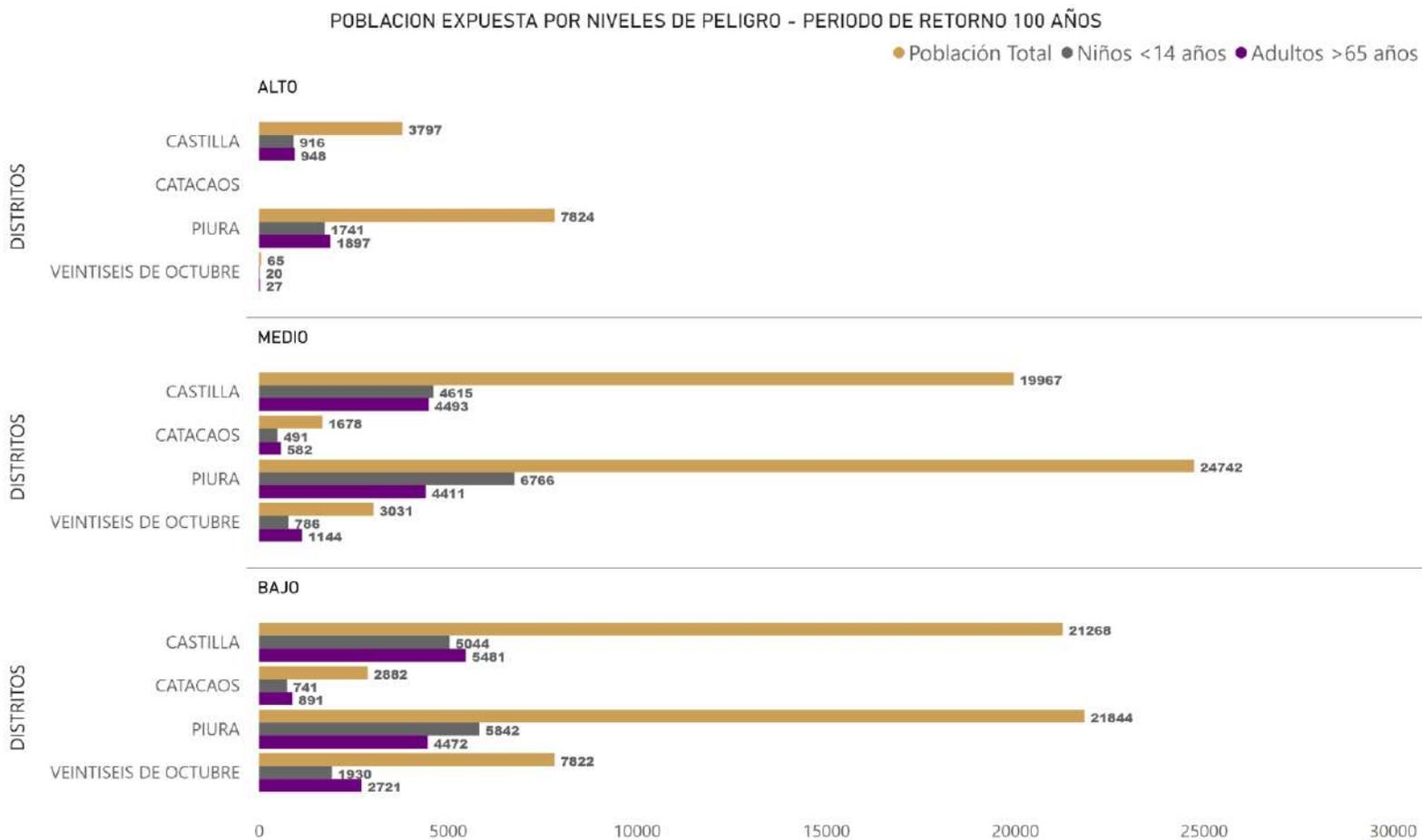
¹ y ² INEI: Cálculo de la población de mayor vulnerabilidad según Censo Nacionales 2017: XII de Población y VII de vivienda.

³ MINSA: Base RENIPRESS, 2018.

⁴ Instituciones Educativas – CENEPRED

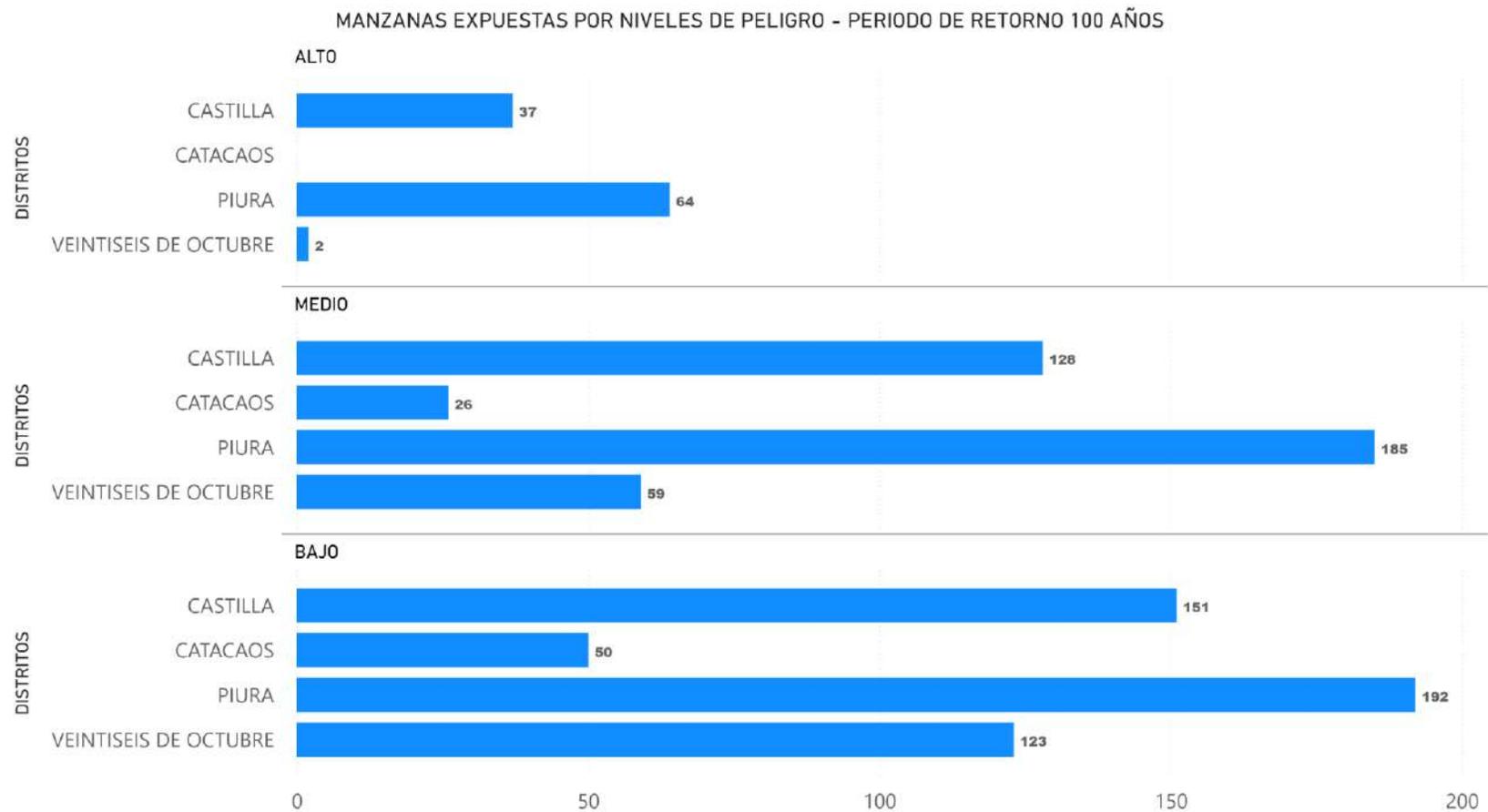
En la Figura 46 se muestra el total de población vulnerable expuesta por niveles de peligro y distritos ante la ocurrencia de inundaciones fluviales, para un tiempo de retorno de 100 años, de donde se infiere que el mayor impacto lo registraría el distrito de Piura con 1741 niños menores de 14 años y 1897 adultos mayores de 65 años para un nivel de peligro alto.

Figura 46. Población expuesta por niveles peligro – Periodo de retorno 100 años



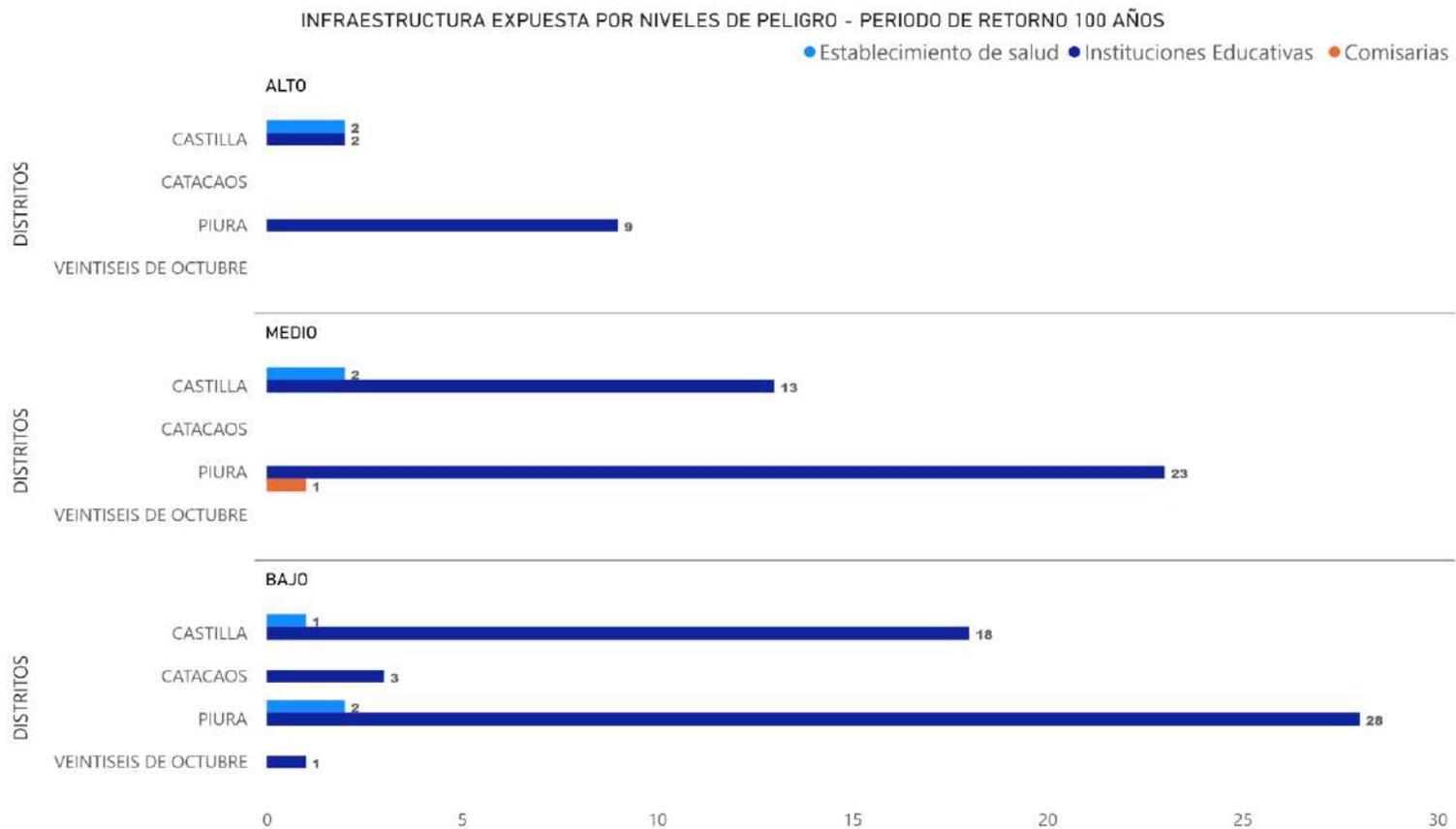
En la Figura 47 se muestra que 185 y 64 manzanas del distrito de Piura, estarían expuestas a un peligro medio y alto respectivamente, así como en el distrito de Castilla 128 y 37 manzanas estarían expuestas a un peligro medio y alto respectivamente.

Figura 47. Manzanas Expuestas por Niveles de Peligro - Periodo de retorno 100 años



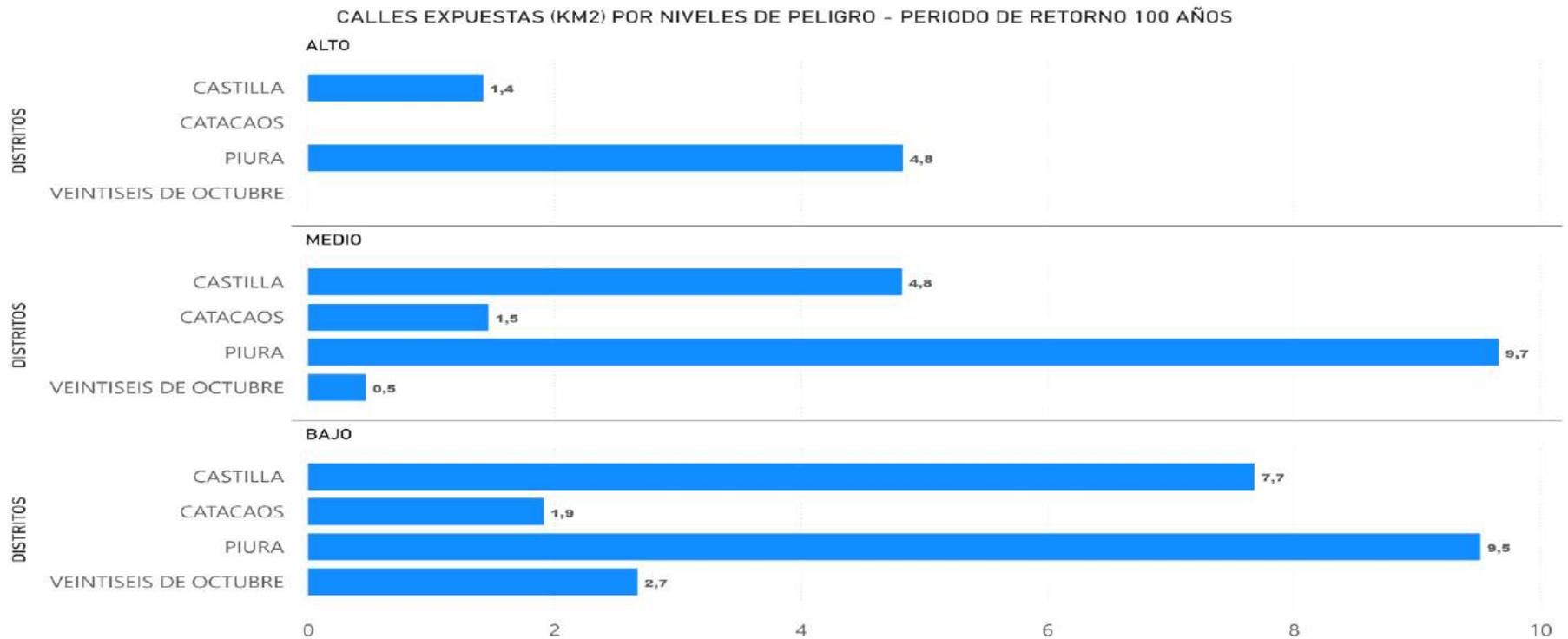
En la Figura 48 se muestra que 23 y 9 instituciones educativas del distrito de Piura, estarían expuestas a un peligro medio y alto respectivamente, así como en el distrito de Castilla 13 y 2 instituciones educativas estarían expuestas a un peligro medio y alto respectivamente. Se observa también que 2 establecimientos de salud estarían expuestos a un peligro medio y alto respectivamente.

Figura 48. Infraestructura expuesta por niveles de Peligro - Periodo de retorno 100 años



En la Figura 49 se muestra que 9.7 y 4.8 km² de caminos en el distrito de Piura, estarían expuestos a un peligro medio y alto respectivamente, así como en el distrito de Castilla 4.8 y 1.4 instituciones educativas estarían expuestas a un peligro medio y alto respectivamente.

Figura 49. Calles Expuestas (Km²) por niveles de Peligro - Periodo de retorno 100 años



En el anexo N°04, se adjuntan las gráficas de los elementos expuestos por niveles de peligro correspondientes a los periodos de retorno de 50, 20, 25, 10 y 5 años.

VIII. CONCLUSIONES

- El modelamiento hidrológico de la cuenca del río Piura con salida en la ciudad de Piura resulta complejo, principalmente por la cantidad de subcuencas y todos sus parámetros que su gran extensión demanda a caracterizar; sin embargo, se infiere a través del análisis estadístico, que la simulación del evento histórico tiene un buen ajuste, por el resultado obtenido con el indicador Eficiencia de Nash-Sutcliffe (0.66), indicador estadístico más usado en hidrología.
- El modelamiento hidráulico y el análisis de potenciales áreas de inundación en la ciudad de Piura se llevaron a cabo con HEC-RAS 2D. El modelo hidráulico se calibró en función a los caudales que se registraron durante el evento histórico del 27 de marzo de 2017, obteniendo una concordancia aceptable entre los caudales observados y simulados. En base a estos resultados para los periodos de retorno de 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años, en el tramo del río Piura comprendido entre el Pte. Avelino Cáceres hasta el Pte. Grau, se obtuvo los niveles de peligro los cuales han sido definidos considerando los valores del tirante del agua o profundidad del flujo.
- De acuerdo a los resultados obtenidos en el modelamiento hidrológico e hidráulico se puede concluir que las inundaciones de marzo del 2017 ((Fenómeno El Niño Costero) con un caudal de 3468 m³/s, y la de 1983 (Fenómeno de El Niño) con un caudal de 3200 m³/s fue similar a un evento de 50 años de tiempo de retorno, en comparación con el FEN 1998 cuyo caudal máximo presentado fue de 4424 m³/s el cual hace referencia a un evento de 100 años.
- Se determinó los niveles de peligro en función de las potenciales áreas inundables para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años, en el tramo del río Piura comprendido entre el Pte. Avelino Cáceres hasta el Pte. Grau a través de modelamiento hidrológico e hidráulico.
- Se analizaron los registros de emergencia para el tramo del río Piura comprendido entre el Pte. Avelino Cáceres hasta el Pte. Grau, correspondiente al periodo 1972 al 2019, contenidos en la base de datos del Sistema de Información Nacional para la Respuesta y Rehabilitación-SINPAD y en el

Sistema de Inventario de Desastres- DesInventar quienes recopilan información sobre daños de diversos tipos de desastres.

- Se indican impactos probables en función del peligro por inundación fluvial y los elementos expuestos en su área de influencia ante los diferentes periodos de retorno; corresponden a la zona urbana los cuales han sido agrupados según la dimensión social en cantidad de población, centros de salud, centros educativos, manzanas expuestas, entre otros.
- Se describe un ejemplo de alerta de inundación por desborde de río, que considera los potenciales impactos, la cual permitiría tener una acción temprana.
- Para el nivel de peligro alto, los resultados muestran que para un periodo de retorno de 100 años se obtiene 916 niños menores de 14 años y 948 adultos con más de 65 años que son las personas más vulnerables por ser dependientes económicamente o por desplazarse con ayuda o asesoría de otras personas (familiares) y un total de población expuesta de 3797 personas, en comparación con los resultados obtenidos para un periodo de retorno de 5 años que muestran 114 niños menores a 14 años y 32 adultos de más de 65 años y un total de población expuesta de 283 personas, esto se debe a la extensión de territorio inundado para cada escenario. Por lo que podemos inferir que al ejecutar medidas estructurales y no estructurales (SAT, entre otros) debemos considerar el escenario más extremo lo que ayudará a futuro a reducir los impactos negativos de personas fallecidas de presentarse este escenario, y no sufrir grandes pérdidas económicas por destrucción, atención y en el proceso de reconstrucción. Estos resultados son estimados para los distritos de Castilla, Piura, Catacaos y Veintiséis de Octubre, siendo el distrito de Piura el que sufriría la mayor afectación.
- Para el nivel de peligro alto y medio, los resultados muestran que, para un periodo de retorno de 100 años, habría 02 EESS y 11 IE con nivel de peligro alto, y 2 EESS y 36 IE con nivel de riesgo medio, en comparación con el escenario para un periodo de retorno de 5 años que muestra 04 IE con nivel de peligro alto y 1 EESS y 19 IE con nivel de peligro medio. Respecto a los Establecimientos de Salud-EESS e Instituciones Educativas-IE su destrucción o daño parcial por ser elementos esenciales afectaría el adecuado funcionamiento de la zona urbana, el primero dejaría de atender a pacientes que reciben tratamiento, personas heridas debido a la inundación o depósito de fallecidos, el segundo afectaría los puestos de trabajo del personal administrativo, docente y de servicio de limpieza, así como dejar de impartir

educación a la población educativa, por lo que hay que considerar acciones en los planes de contingencia y continuidad operativa para que estos puedan seguir funcionando.

- A partir de los resultados las imágenes satelitales Spot6 ayudaron a generar cartografía temática de coberturas en la zona de estudio, al aplicar el método de clasificación orientada a objetos obteniendo las áreas correspondientes como la agrícola con 15 974.95 Ha, árboles con 3894.27 Ha, suelo con 19221.19 Ha, zona urbana con 5295.21 Ha, río y cuerpos de agua con 448.56 Ha.
- Las imágenes estéreo Perusat1 con resolución espacial de 0.7 m, ayudaron a generar un DEM que sirve de insumo principal para el modelamiento por inundación en la zona de estudio.

IX. RECOMENDACIONES

- El Gobierno Regional o Local podrá emplear el presente estudio como referencia para la elaboración de estudios e investigaciones en otras subcuencas, para lo cual podrá pedir asesoramiento técnico a la UF-CEPIG del INDECI y a la Agencia Espacial del Perú -CONIDA.
- La calibración del modelo hidráulico puede ser empleada en eventos extremos como el Fenómeno de El Niño de 1983 y 1988, considerando la disponibilidad de información de caudales históricos registrados.
- El Gobierno Regional puede emplear el procedimiento presentado en el presente estudio; ya que contribuiría con la generación del conocimiento del riesgo para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana ante inundaciones ocasionadas por desborde de río.
- El Gobierno Regional o Local, ante un desastre de gran magnitud ocasionado por inundación debe registrar la información de los daños de manera eficiente; diferenciando impactos primarios (consecuencias directas del peligro) y secundarios (consecuencias indirectas del peligro), así como la intensidad es decir la profundidad del flujo de agua a la que llega la inundación.

- El ejemplo de alerta por inundación puede ser empleado en los planes de preparación, contingencia y operaciones de emergencia del Gobierno Regional y/o Local; así como protocolos de alerta y/o alarma ante inundaciones.
- Replicar el procedimiento para comparar los resultados obtenidos en las diversas regiones del territorio para determinar los umbrales de peligro y definir las características más idóneas de las imágenes de satélite a utilizar.
- Realizar fortalecimiento del personal de las subgerencias u oficinas de defensa civil y gestión del riesgo de desastres, explicando el procedimiento técnico para su réplica.

X. ANEXOS

ANEXO N° 01: RESULTADOS DE PELIGRO POR INUNDACIÓN FLUVIAL

Figura 50. Peligro por inundación fluvial- Tiempo de Retorno 50 años

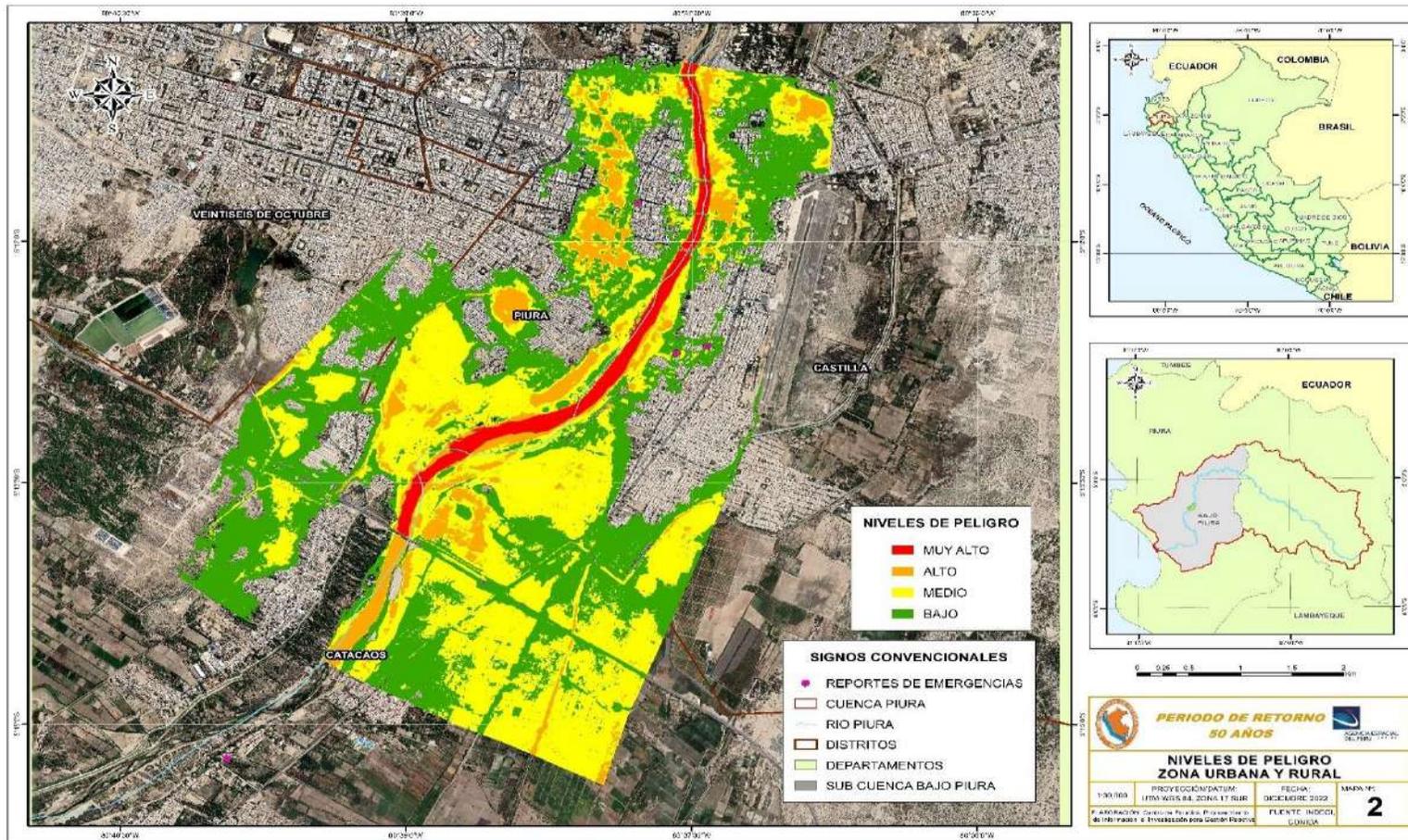


Figura 51. Peligro por inundación fluvial- Tiempo de Retorno 25 años

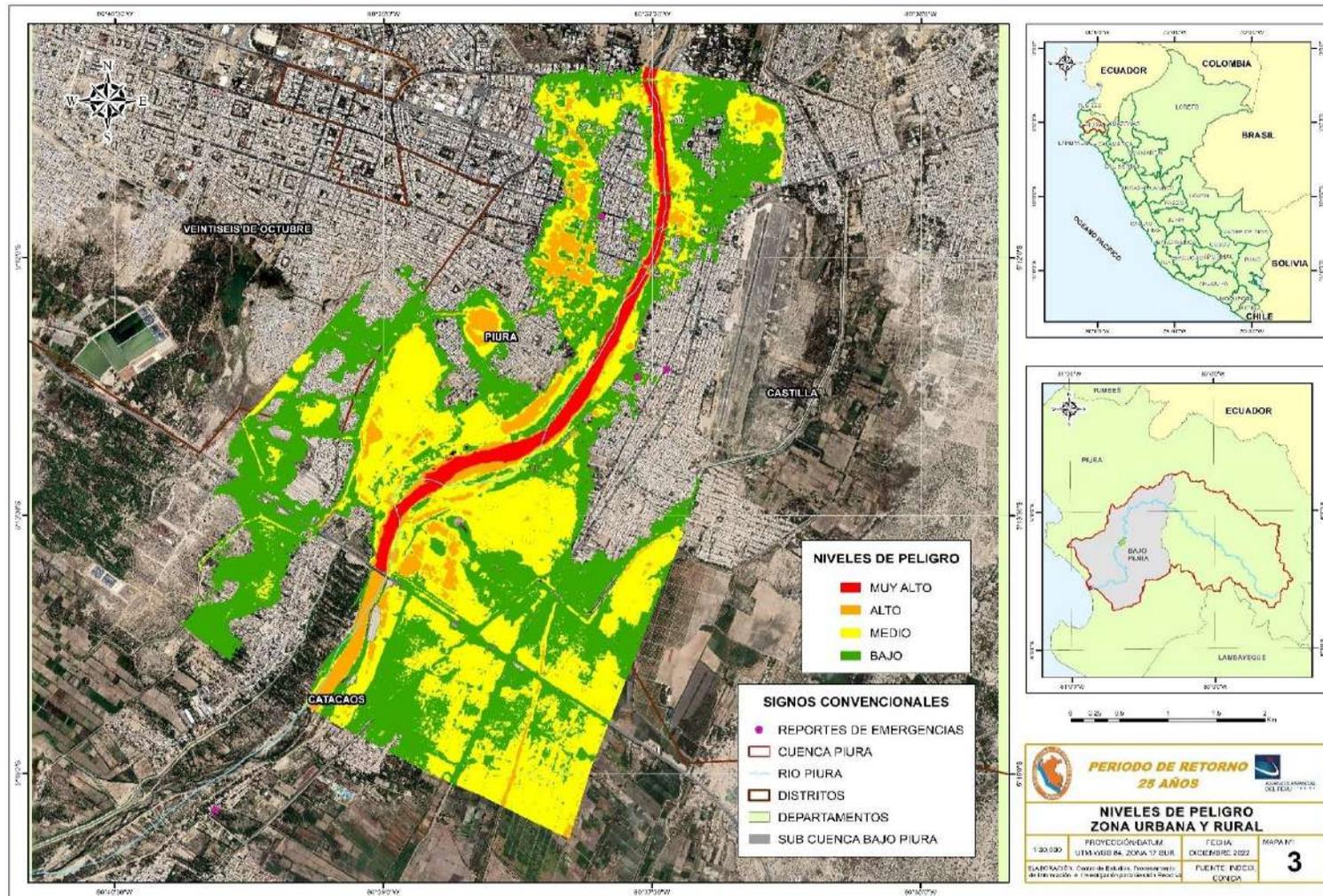


Figura 52. Peligro por inundación fluvial- Tiempo de Retorno 20 años

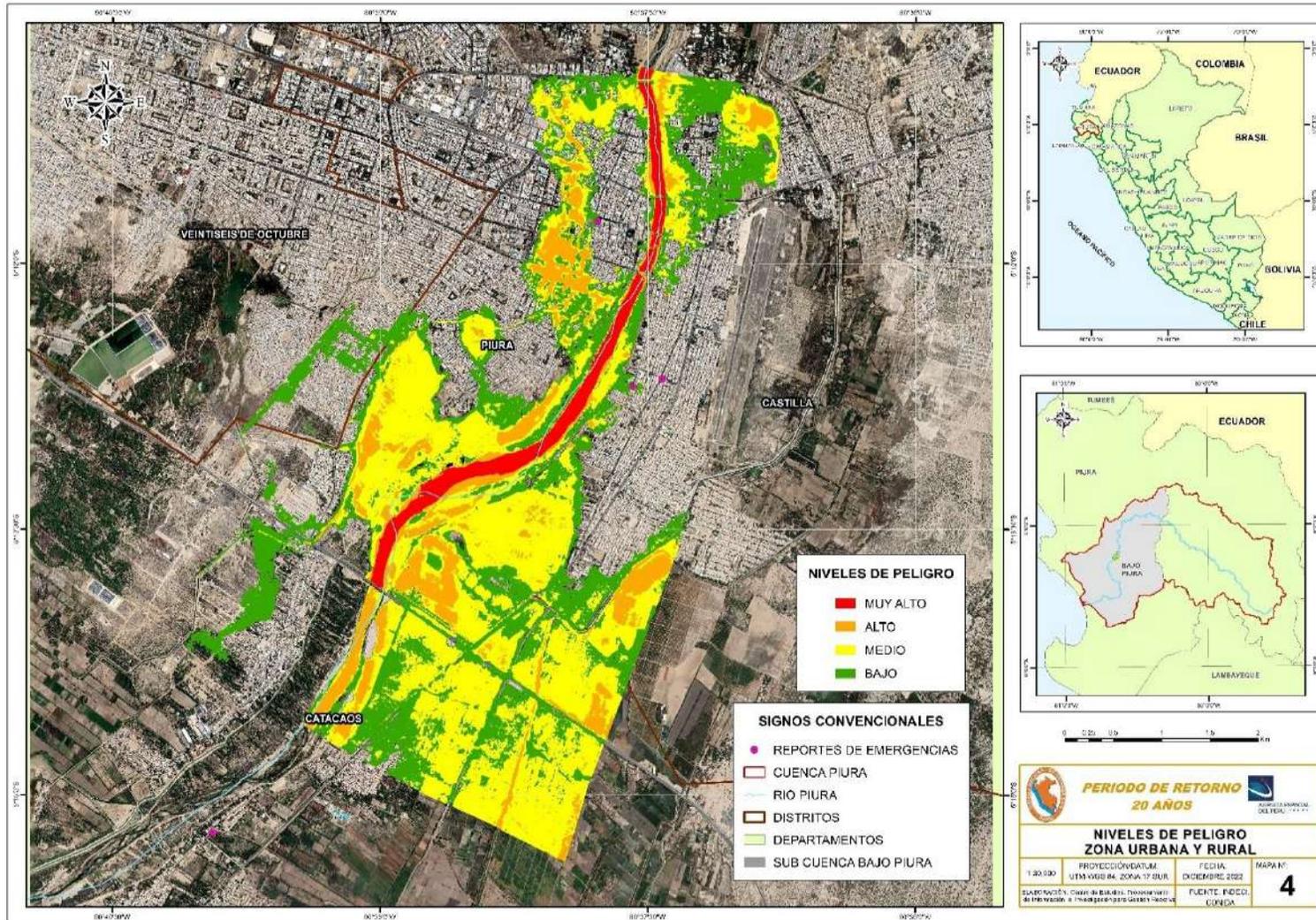


Figura 53. Peligro por inundación fluvial- Tiempo de Retorno 10 años

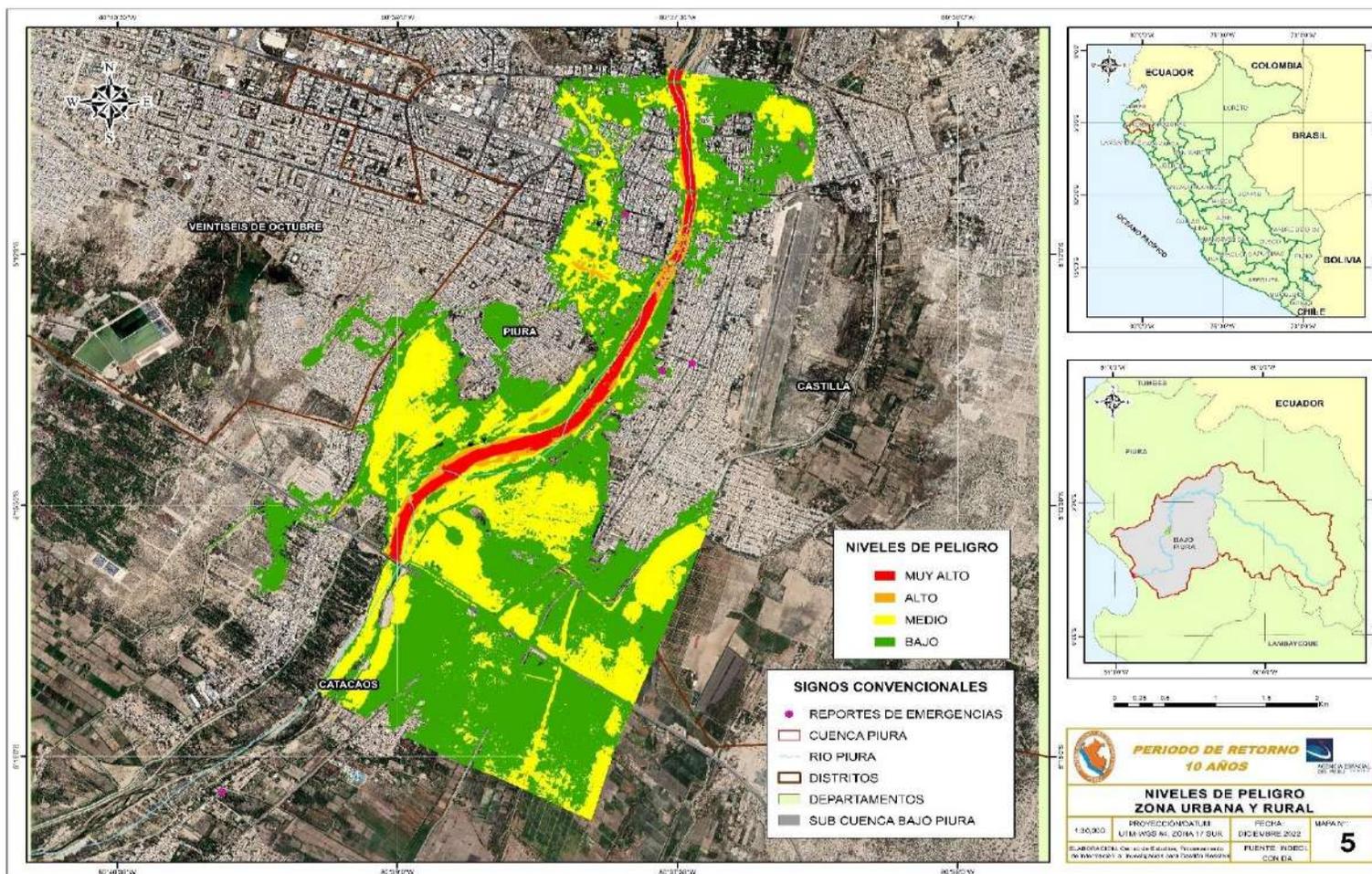
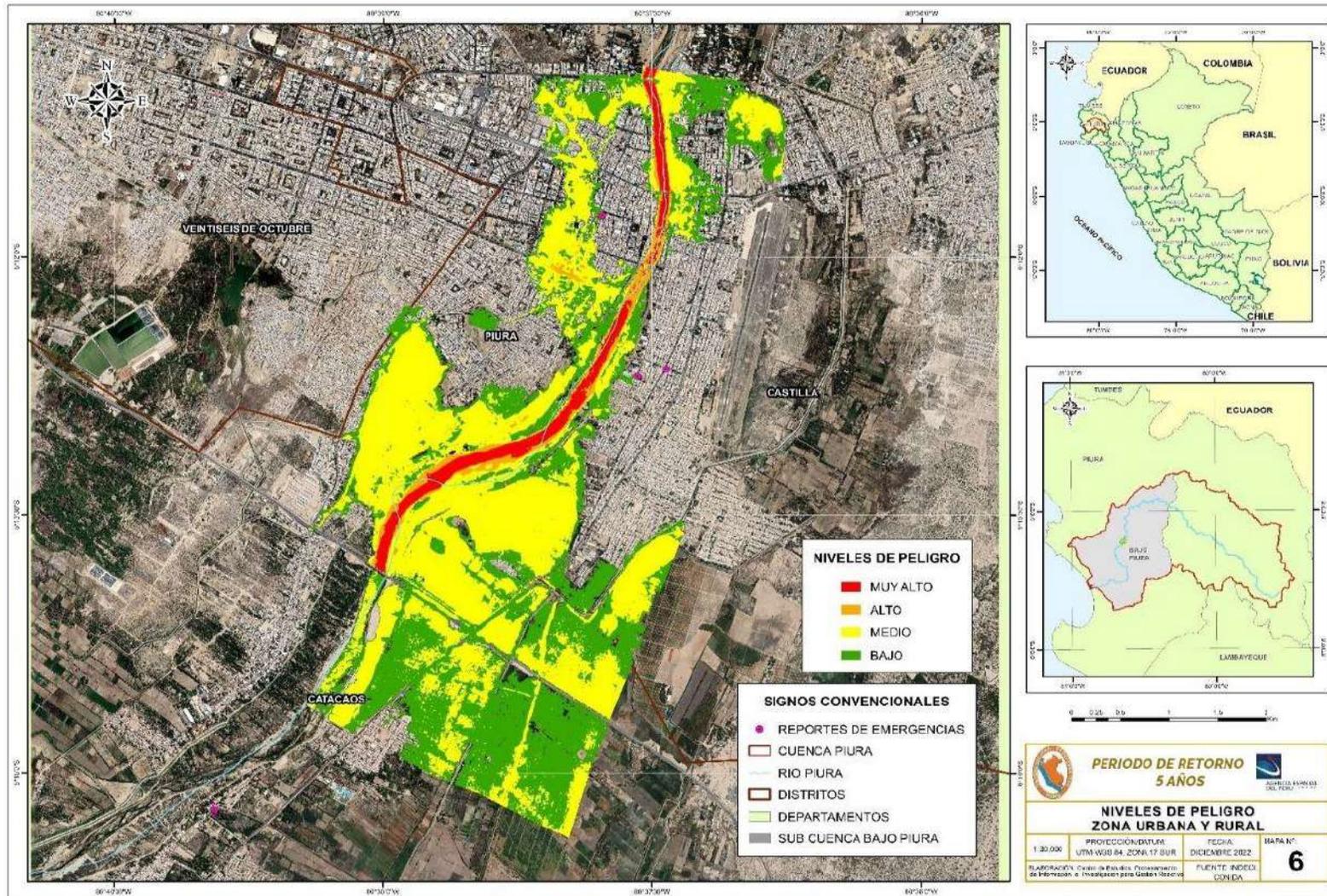


Figura 54. Peligro por inundación fluvial- Tiempo de Retorno 5 años



ANEXO N° 02: ÁREA RURAL EXPUESTA EN FUNCIÓN A LOS NIVELES DE PELIGRO DE INUNDACIÓN FLUVIAL

Tabla 21. Área Rural Expuesta - Tiempo de Retorno 50 años

DISTRITO	VALLE	PREDIO	Nivel Peligro (TR 50 años)	Área (km ²)	Área (Ha)
CASTILLA	BAJO PIURA	CHICLAYITO	ALTO	0.760	76.061
CASTILLA	BAJO PIURA	CHICLAYI	BAJO	2.384	238.471
CATACAOS	ATUNO BAJO	COSCOMBA	MEDIO	2.409	240.979
CATACAOS	BAJO PIURA	PUYUNTALA LOTE N° 03	NO EXPUESTO	0.001	0.137

Tabla 22. Área Rural Expuesta - Tiempo de Retorno 25 años

DISTRITO	VALLE	PREDIO	Nivel Peligro (TR 25 años)	Área (km ²)	Área (Ha)
CASTILLA	BAJO PIURA	CHICLAYITO	ALTO	0.640	64.020
CASTILLA	BAJO PIURA	CHICLAYI	BAJO	2.147	214.697
CASTILLA	ATUNO BAJO	CHICLAYITO	MEDIO	2.751	275.103
CATACAOS	BAJO PIURA	PUYUNTALA LOTE N° 03	NO EXPUEST	0.018	1.830

Tabla 23. Área Rural Expuesta - Tiempo de Retorno 20 años

DISTRITO	VALLE	PREDIO	Nivel Peligro (TR 20 años)	Área (km ²)	Área (Ha)
CASTILLA	BAJO PIURA	CHICLAYITO	ALTO	0.784	78.406
CASTILLA	BAJO PIURA	CHICLAYI	BAJO	1.868	186.843
CASTILLA	ATUNO BAJO	CHICLAYITO	MEDIO	2.854	285.486
CATACAOS	BAJO PIURA	LOS MEDANOS	NO EXPUESTO	0.049	4.914

Tabla 24. Área Rural Expuesta - Tiempo de Retorno 10 años

DISTRITO	VALLE	PREDIO	Nivel Peligro (TR 10)	Área (km ²)	Área (Ha)
CASTILLA	BAJO PIURA	CHICLAYI	BAJO	2.679	267.938
CASTILLA	ATUNO BAJO	CHICLAYITO	MEDIO	2.770	276.960
CATACAOS	BAJO PIURA	LOS MEDANOS	NO EXPUEST	0.108	10.753

Tabla 25. Área Rural Expuesta - Tiempo de Retorno 5 años

DISTRITO	VALLE	PREDIO	Nivel Peligro (TR 5)	Área (km ²)	Área (Ha)
CATACAOS	BAJO PIURA	SANTA MARTHA	ALTO	0.081	8.064
CASTILLA	BAJO PIURA	CHICLAYITO	BAJO	2.743	274.304
CASTILLA	ATUNO BAJO	CHICLAYI	MEDIO	2.620	261.958
CATACAOS	BAJO PIURA	LOS MEDANOS	NO EXPUEST	0.113	11.324

ANEXO N° 03: ELEMENTOS EXPUESTOS EN FUNCIÓN A LOS NIVELES DE PELIGRO DE INUNDACIÓN FLUVIAL

Figura 55. Población expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 50 años

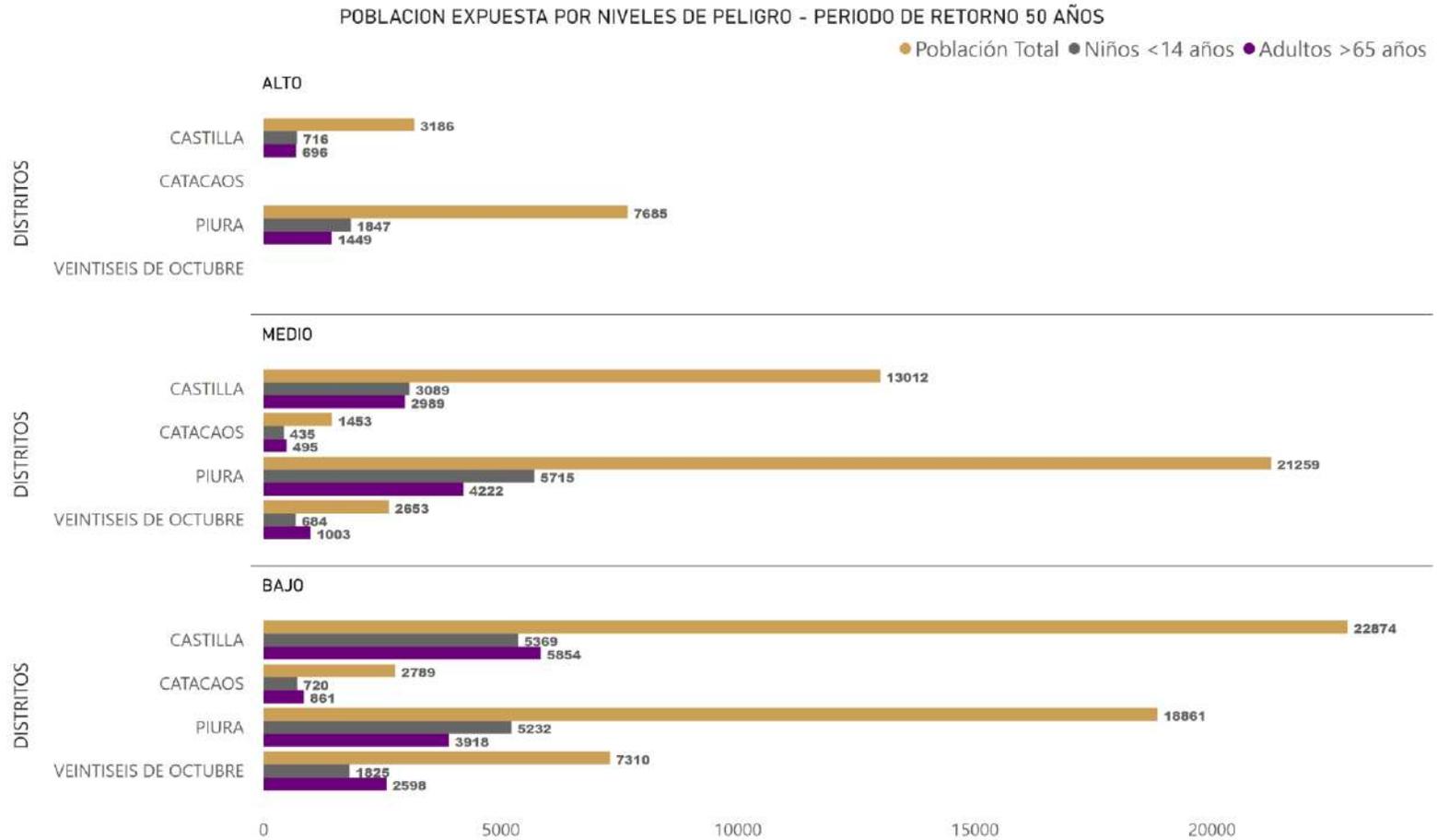


Figura 56. Manzanas expuestas por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 50 años

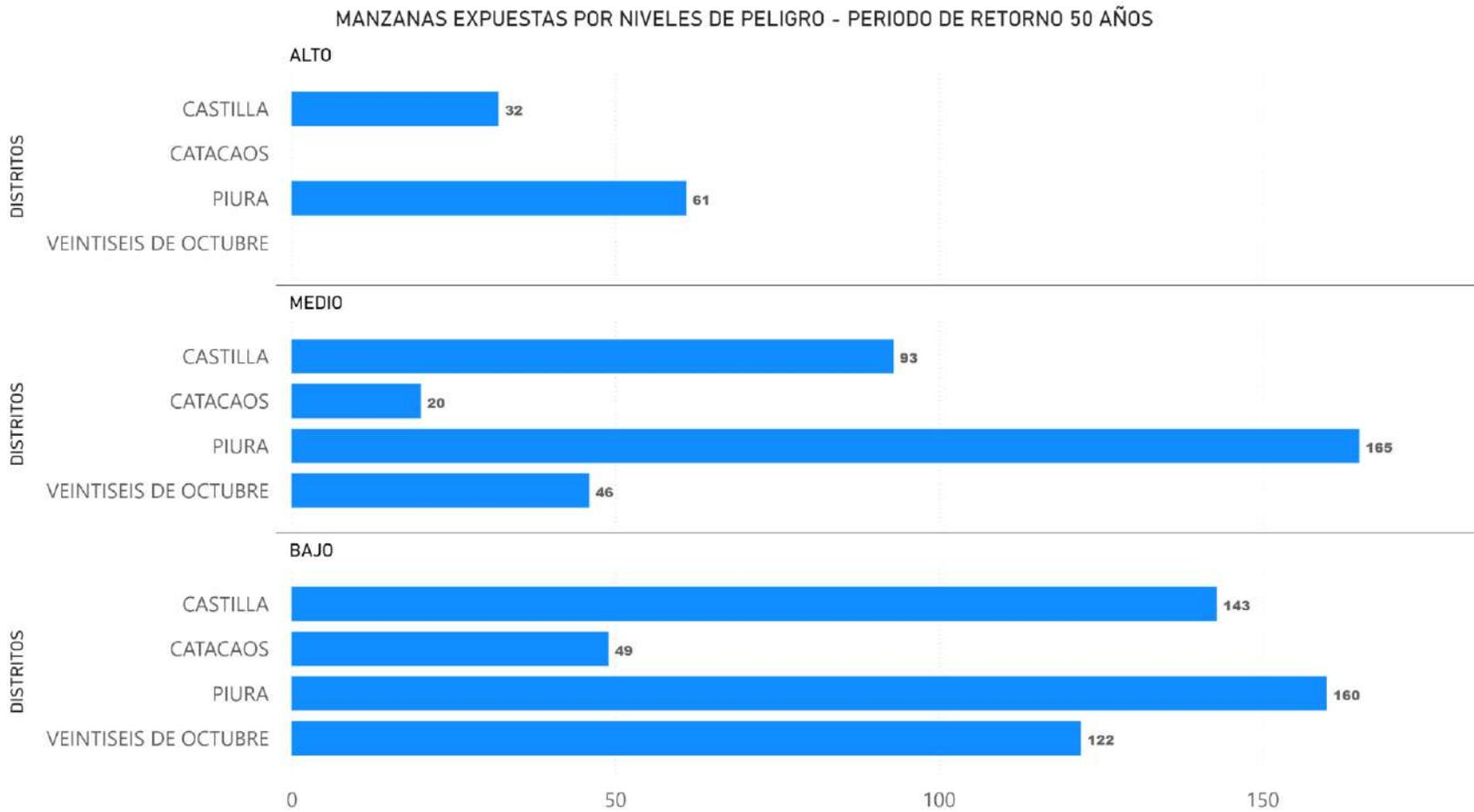


Figura 57. Infraestructura expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 50 años

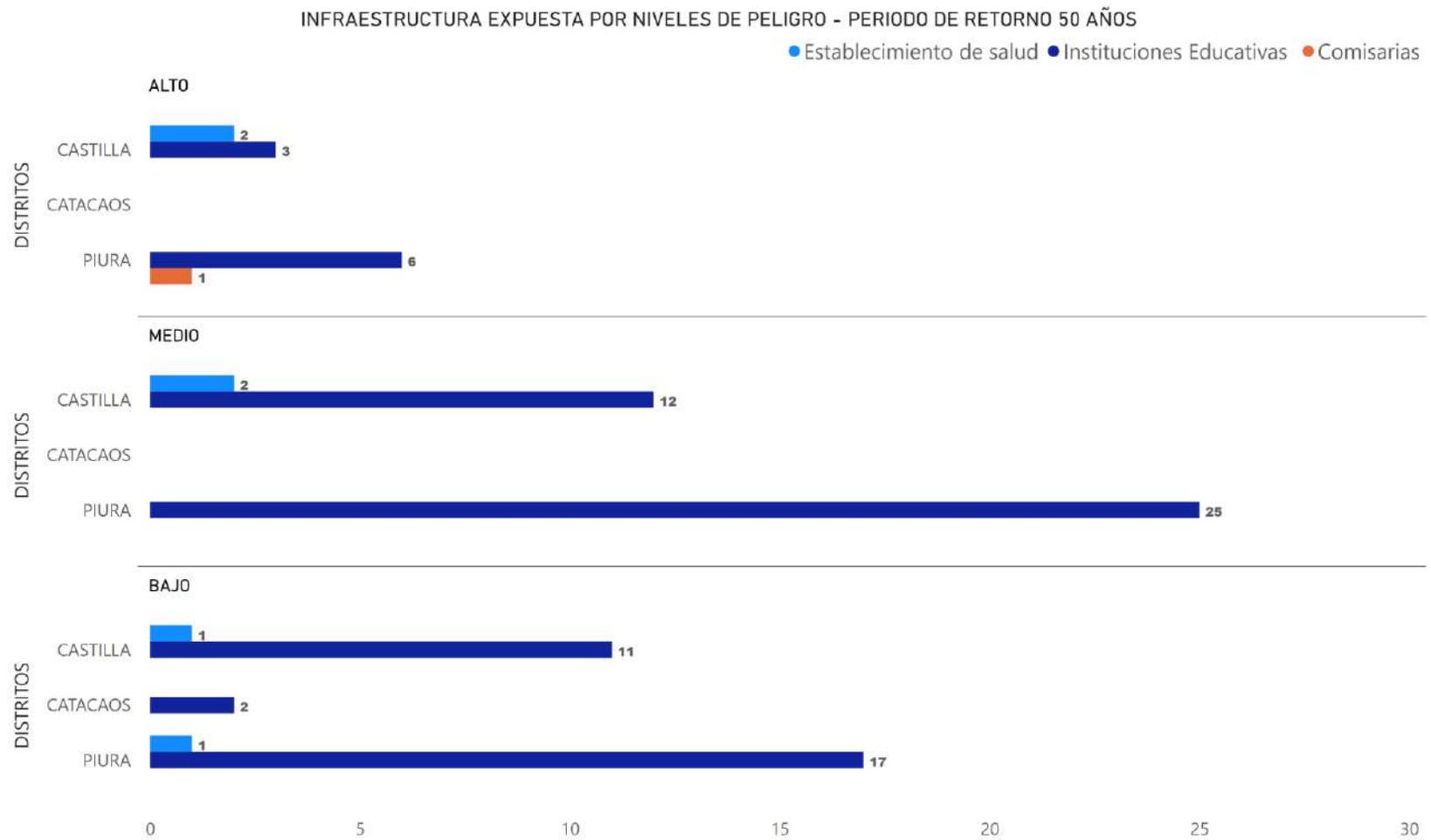


Figura 58. Calles expuestas (KM²) por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 50 años

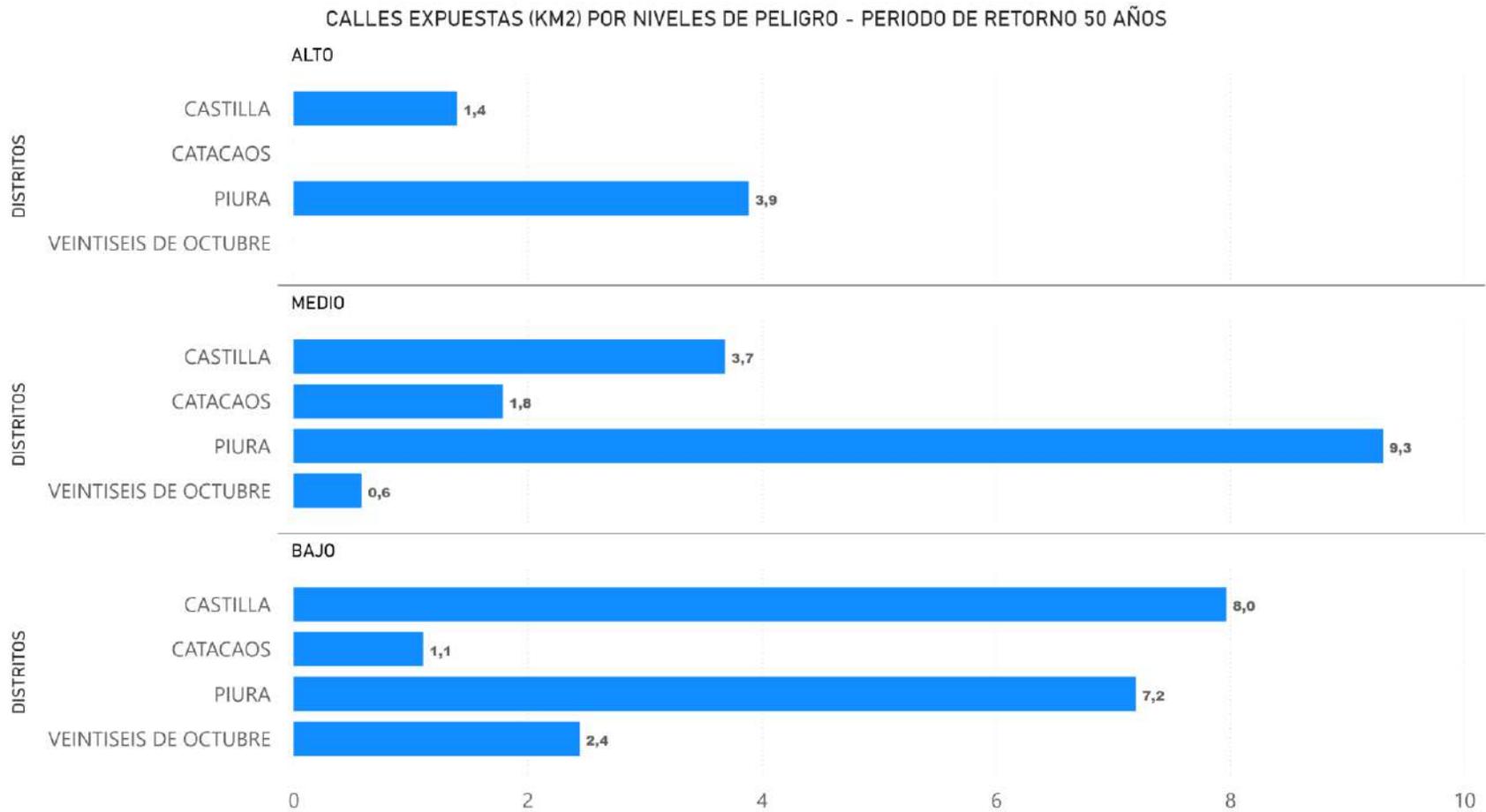


Figura 59. Población expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 25 años

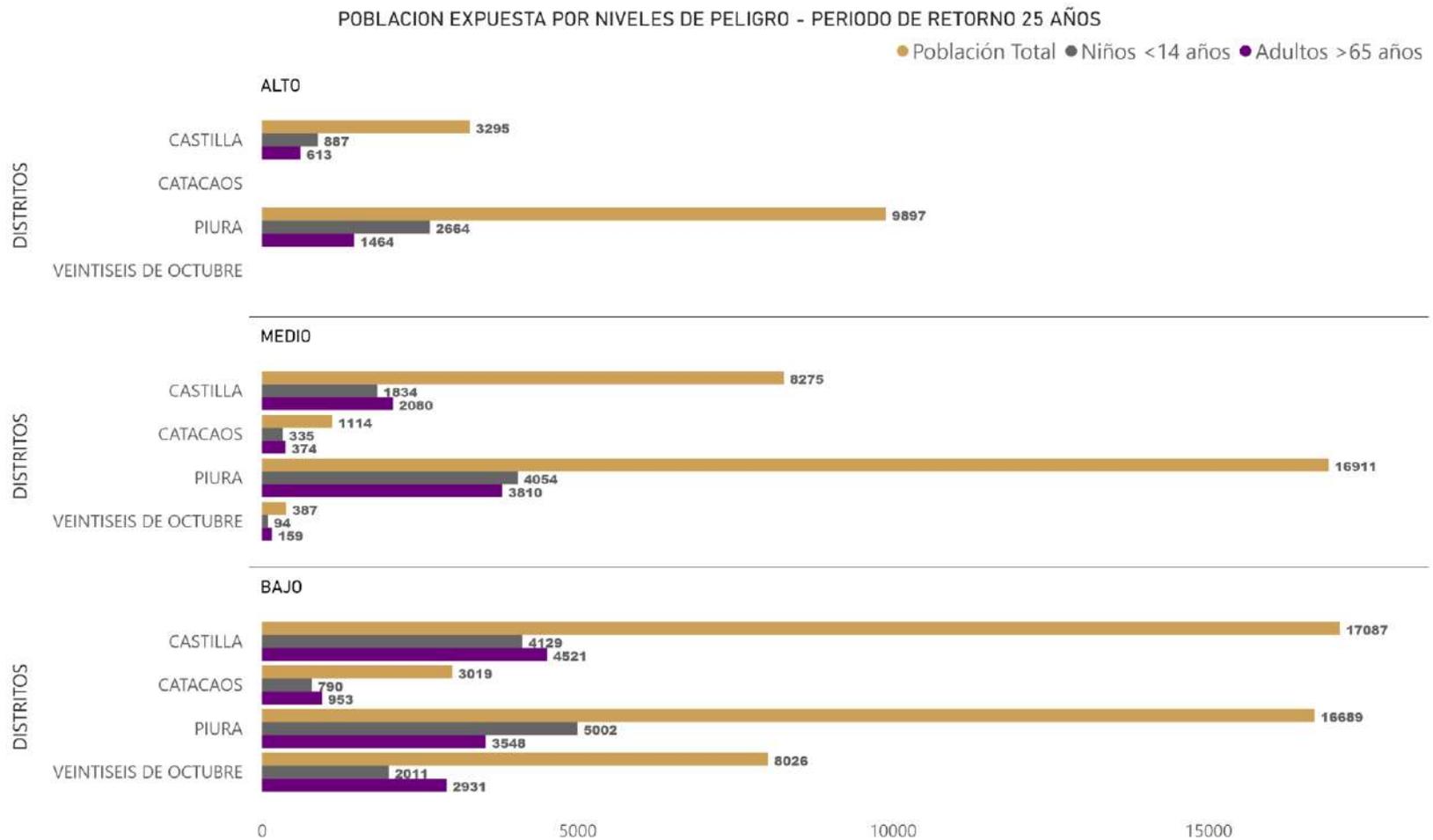


Figura 60. Manzanas expuestas por distritos y niveles de peligro - Periodo de Retorno 25 años

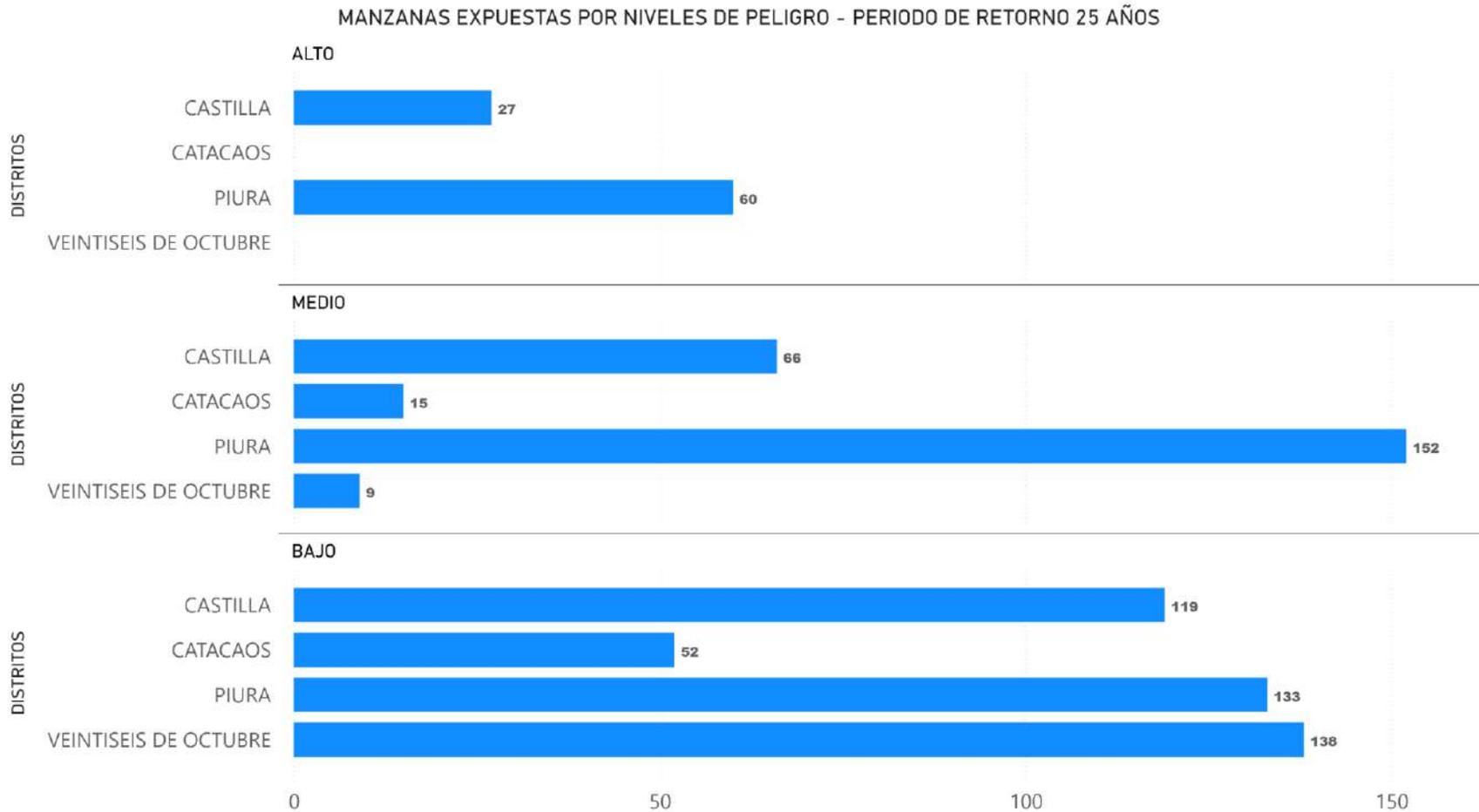


Figura 61. Infraestructura expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 25 años

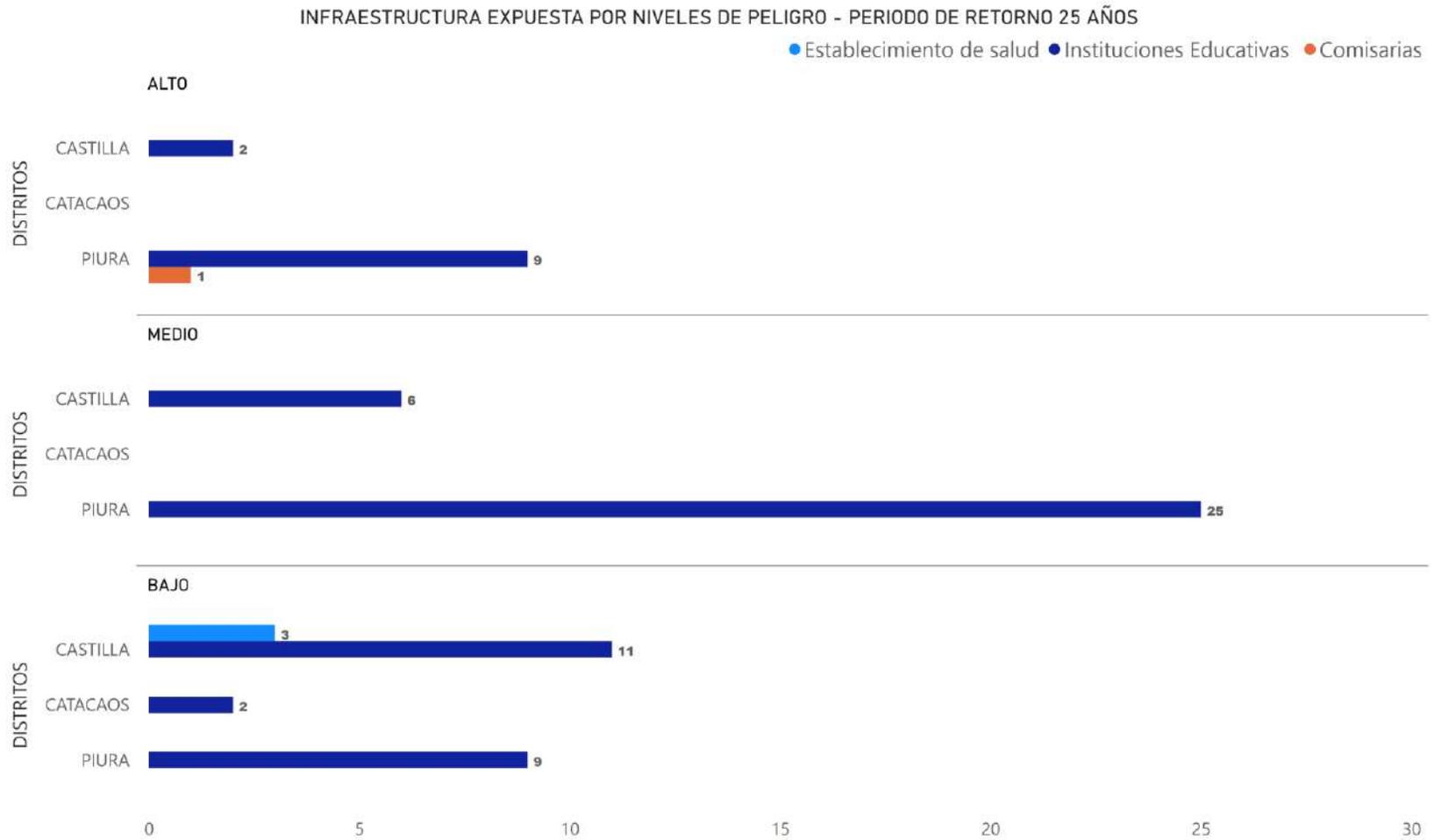


Figura 62. Calles expuestas (Km²) por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 25 años

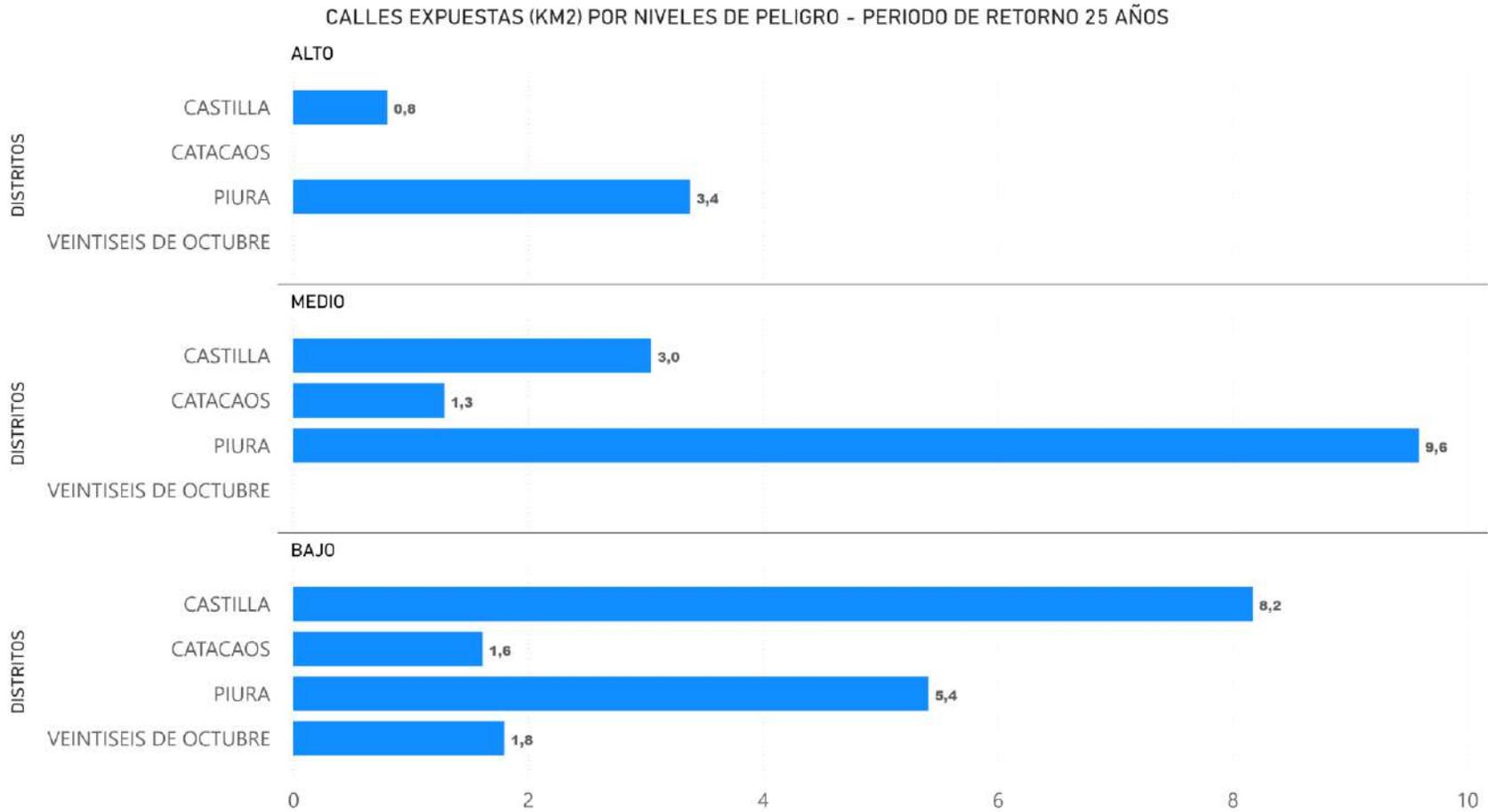


Figura 63. Población expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 20 años

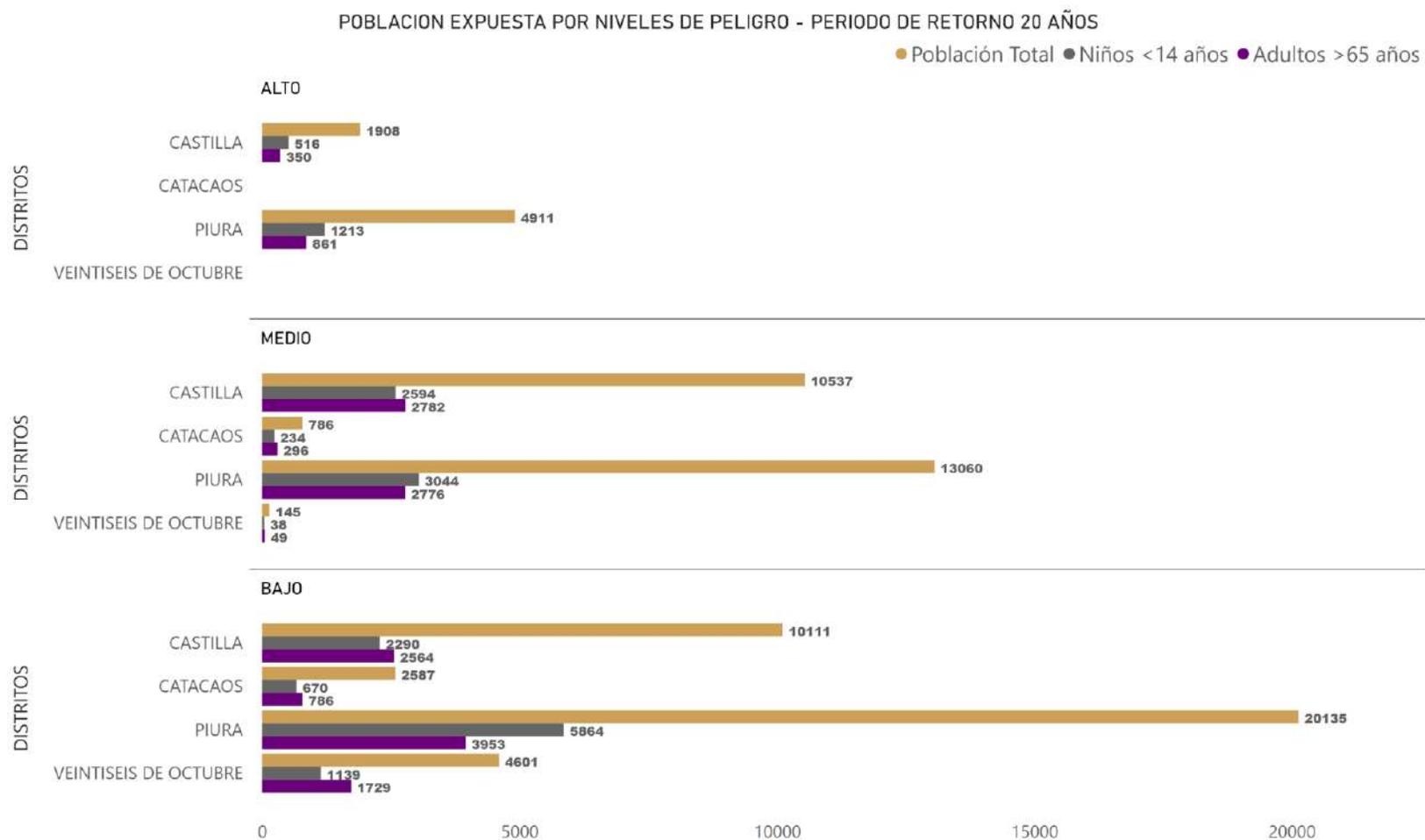


Figura 64. Manzanas expuestas por distritos y niveles de peligro - Periodo de Retorno 20 años

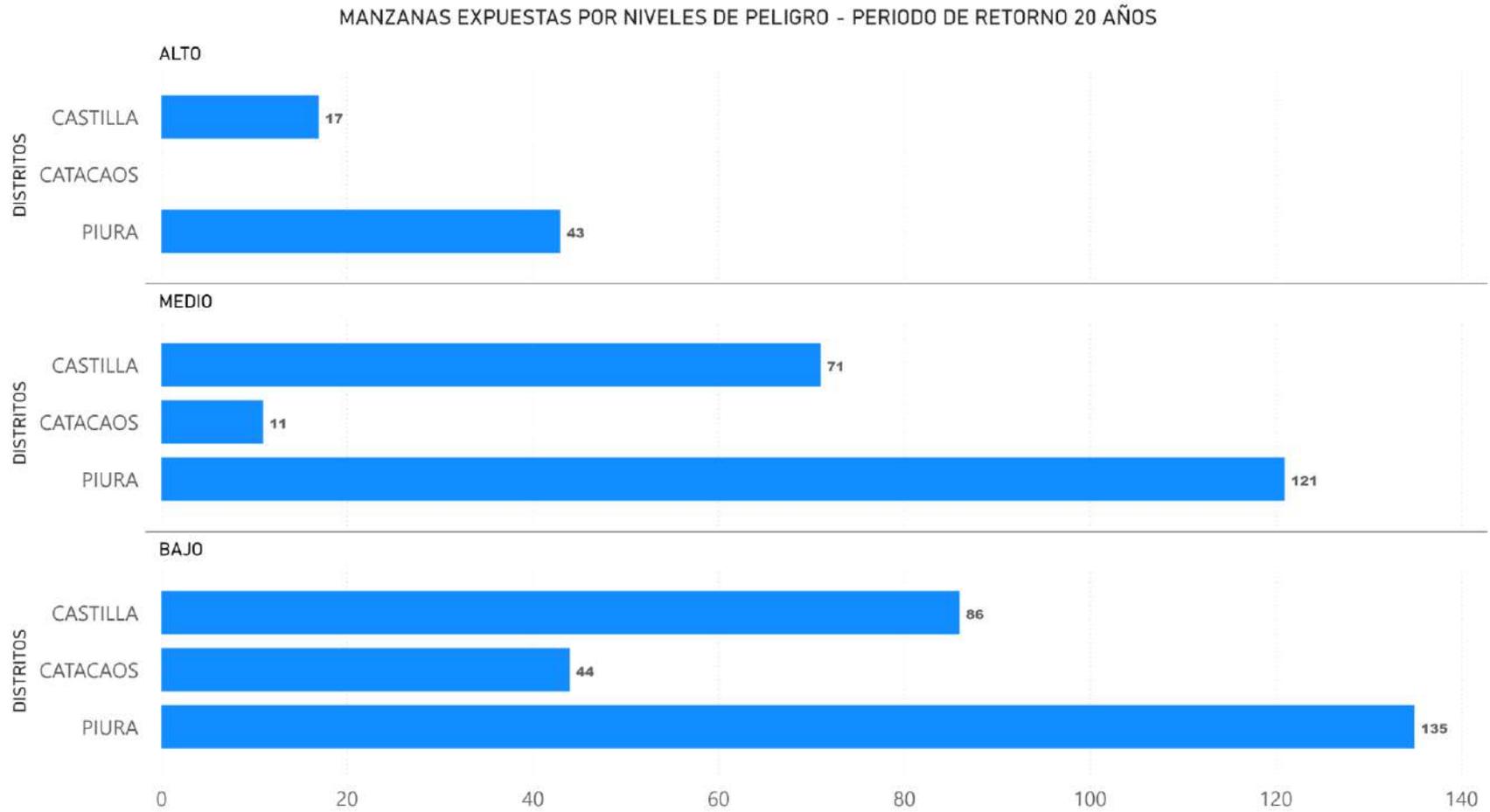


Figura 65. Infraestructura expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 20 años

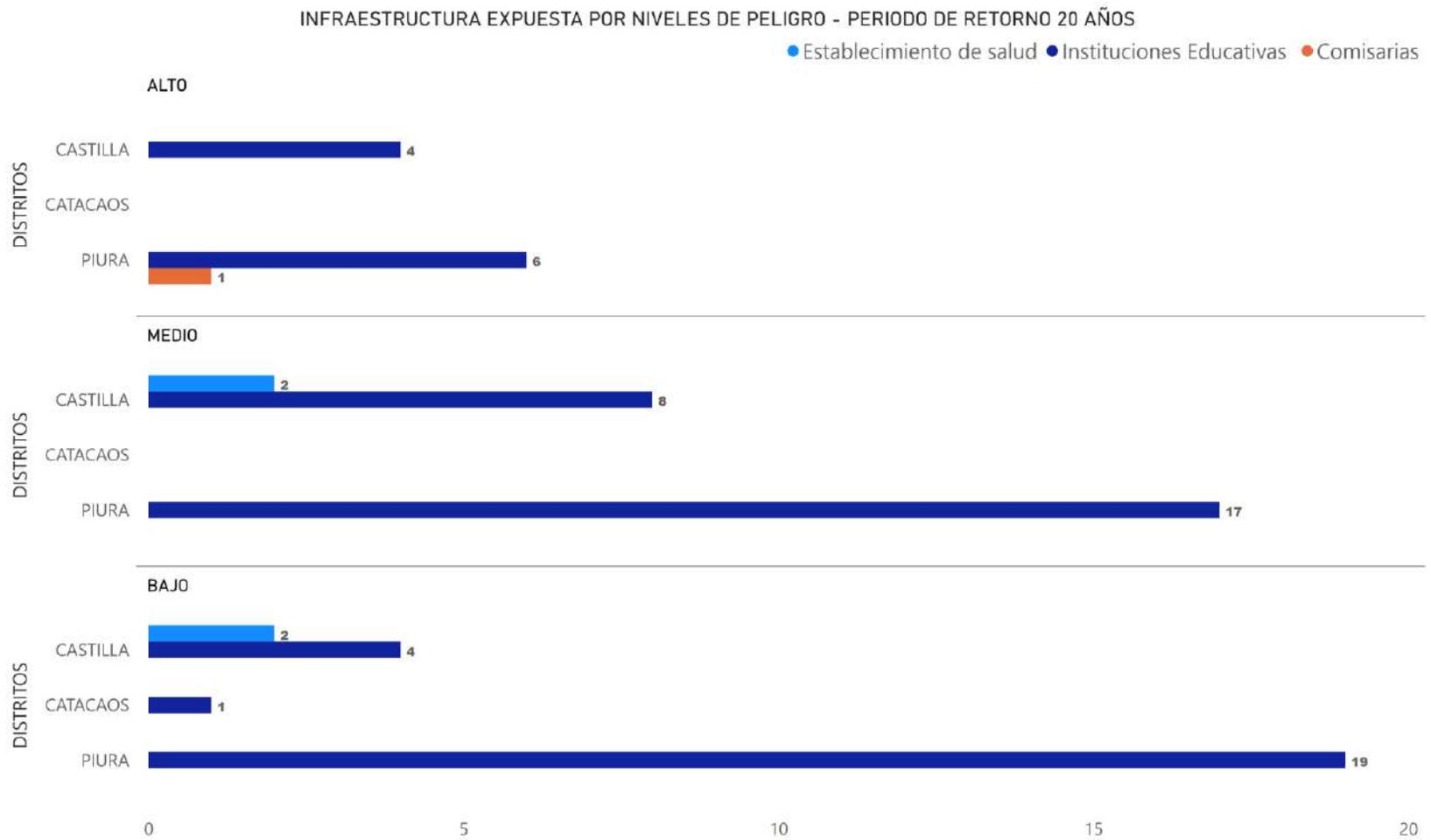


Figura 66. Calles expuestas por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 20 años

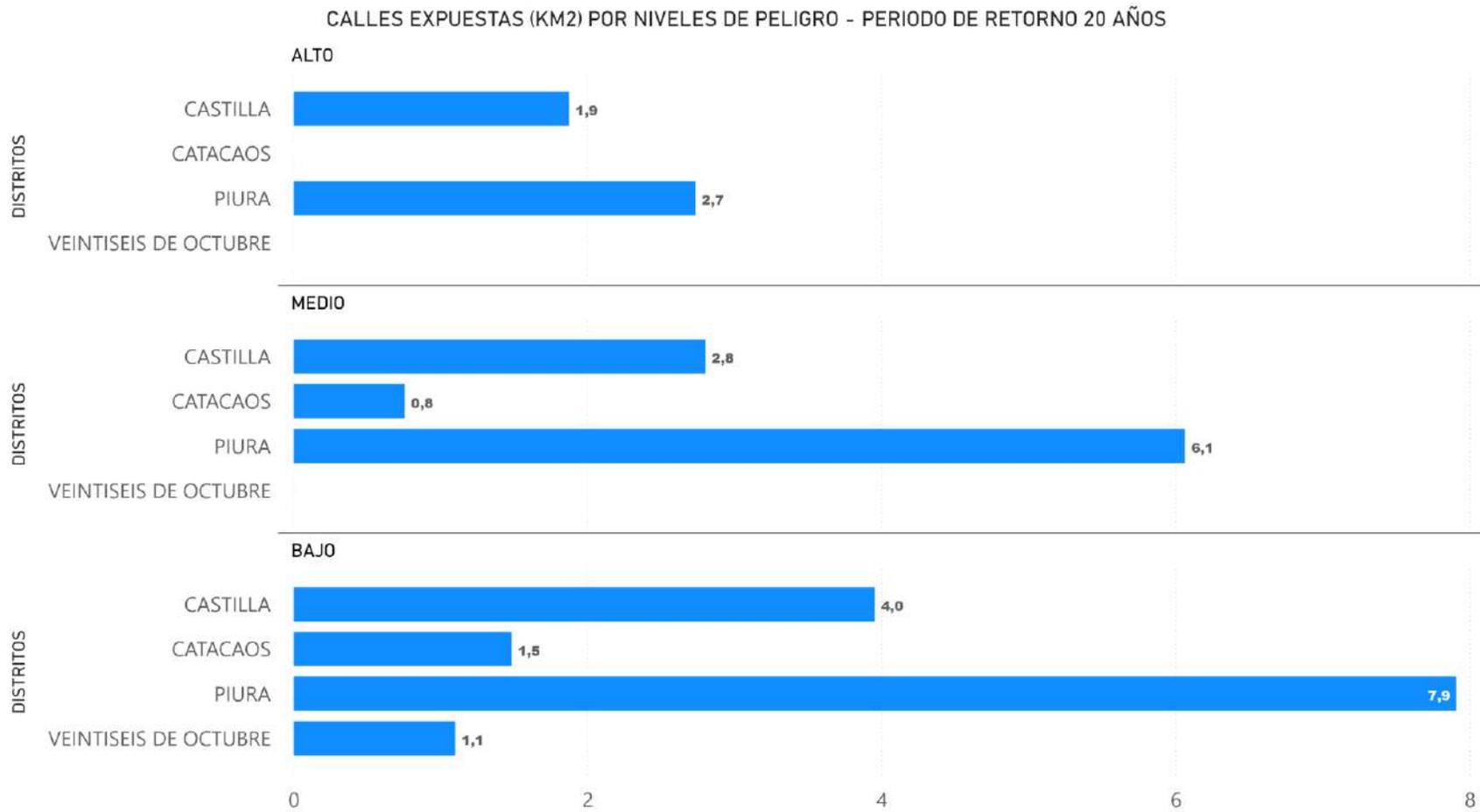


Figura 67. Población expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 10 años

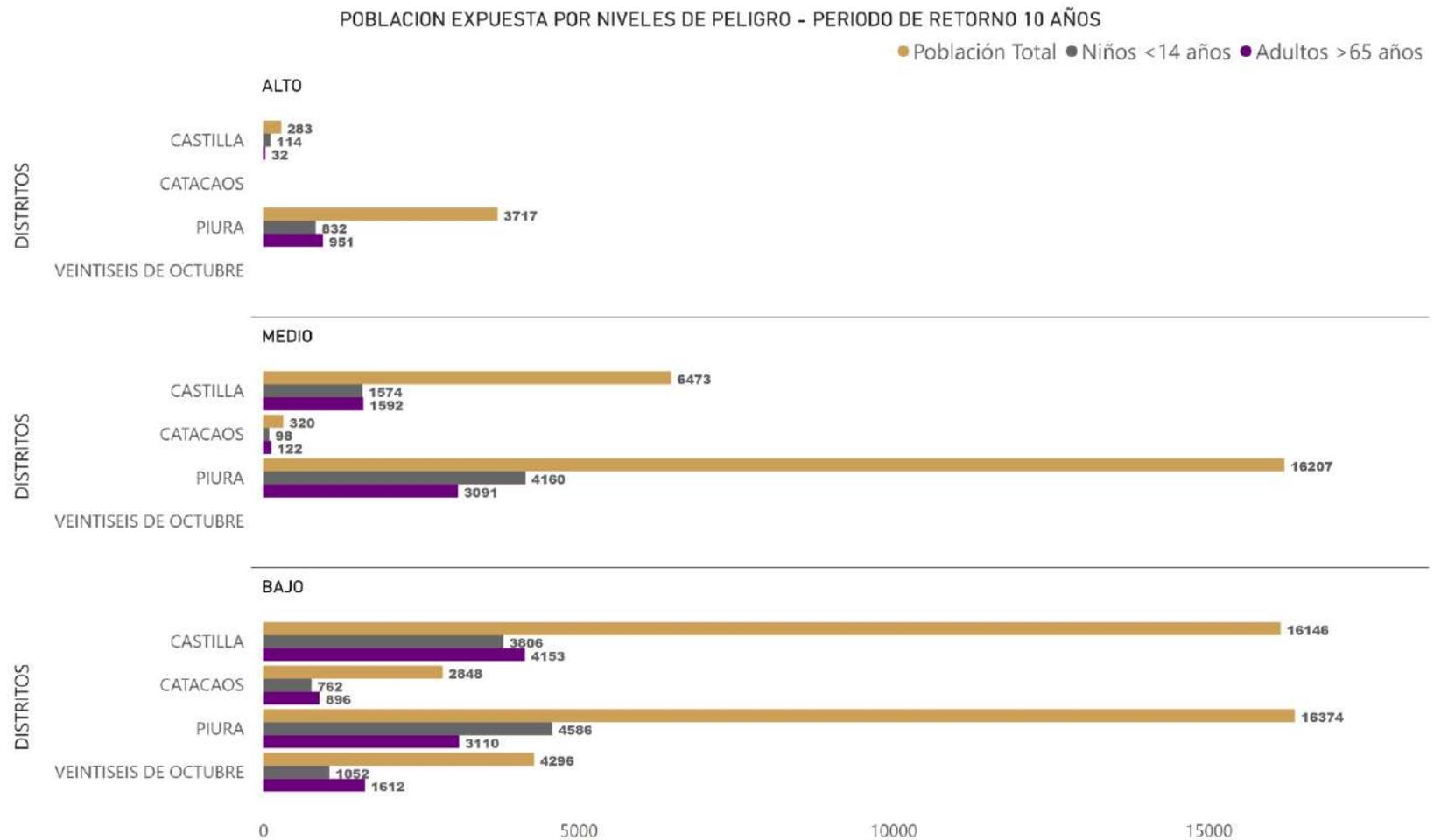


Figura 68. Manzanas expuestas por distritos y niveles de peligro - Periodo de Retorno 10 años

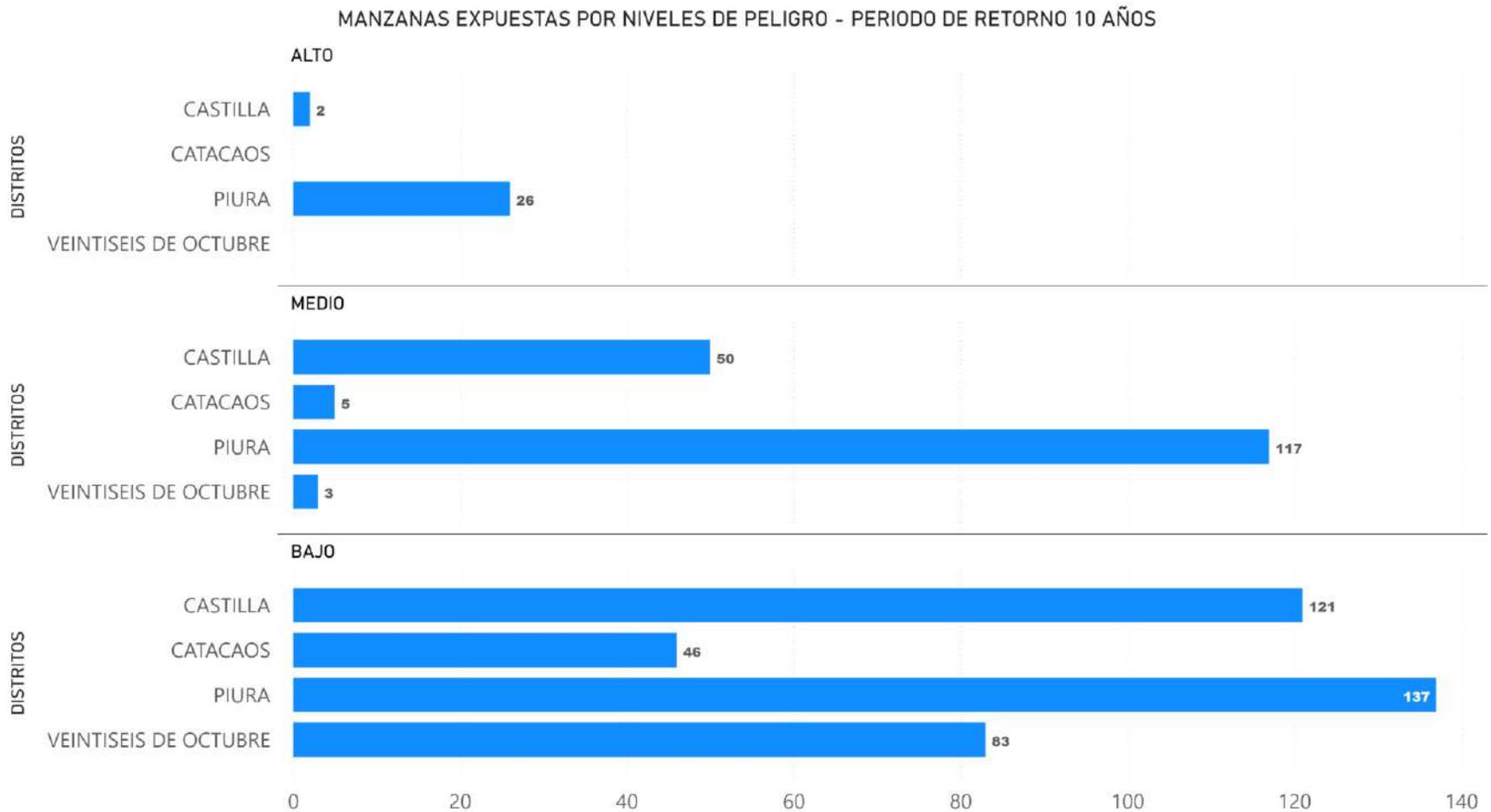


Figura 69. Infraestructura expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 10 años

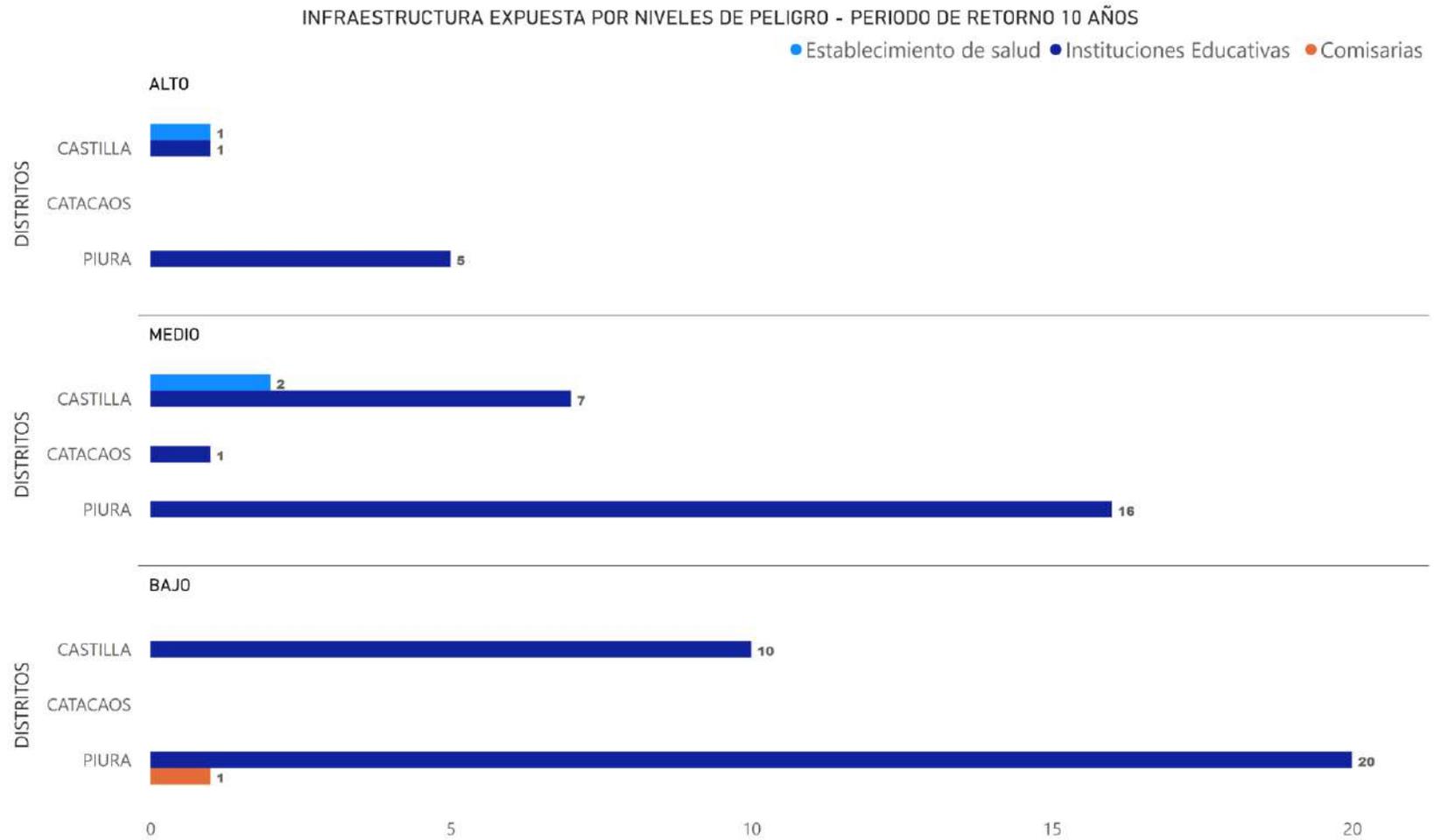


Figura 70. Calles expuestas (Km²) por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 10 años

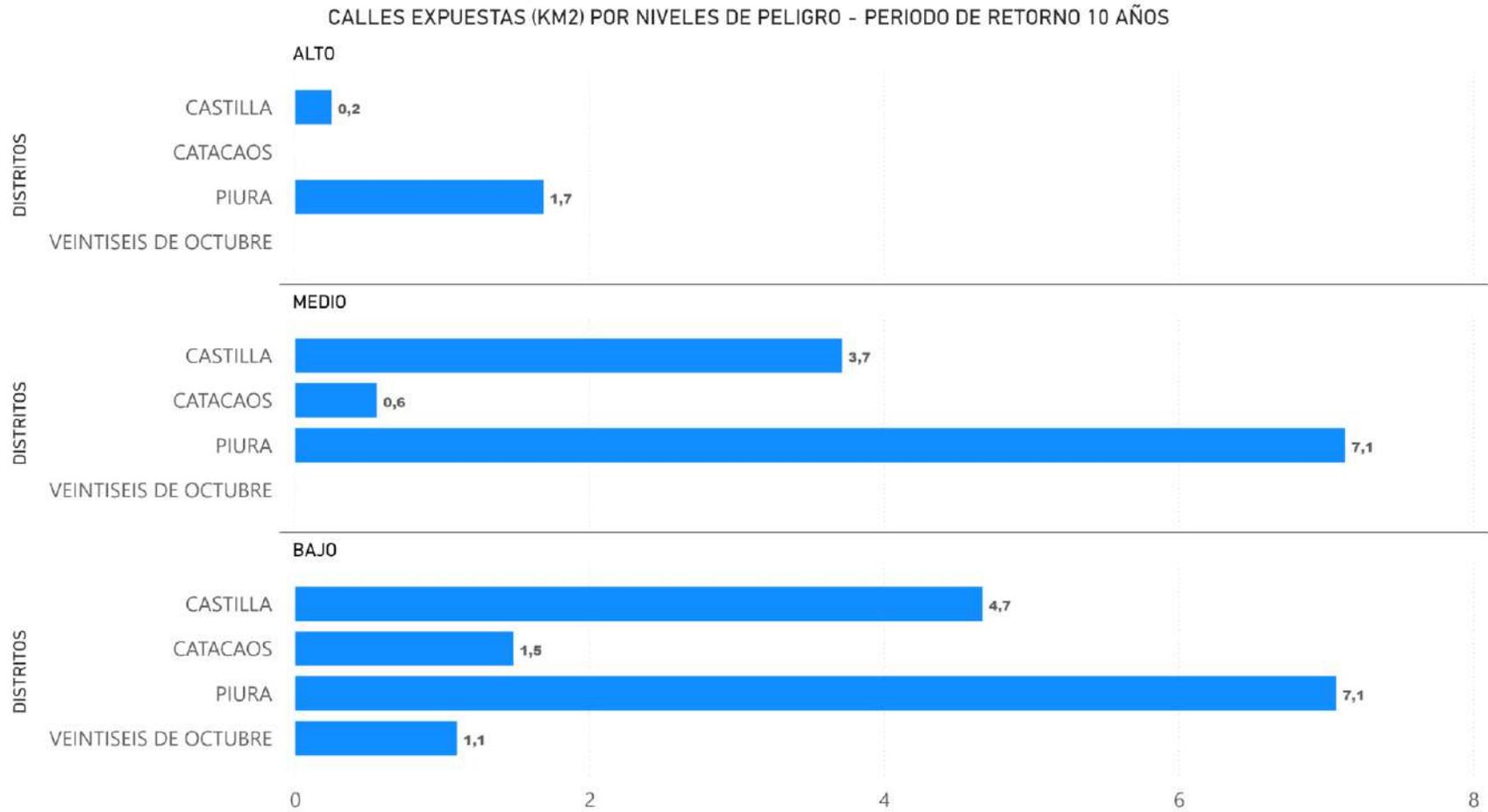


Figura 71. Población expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 5 años

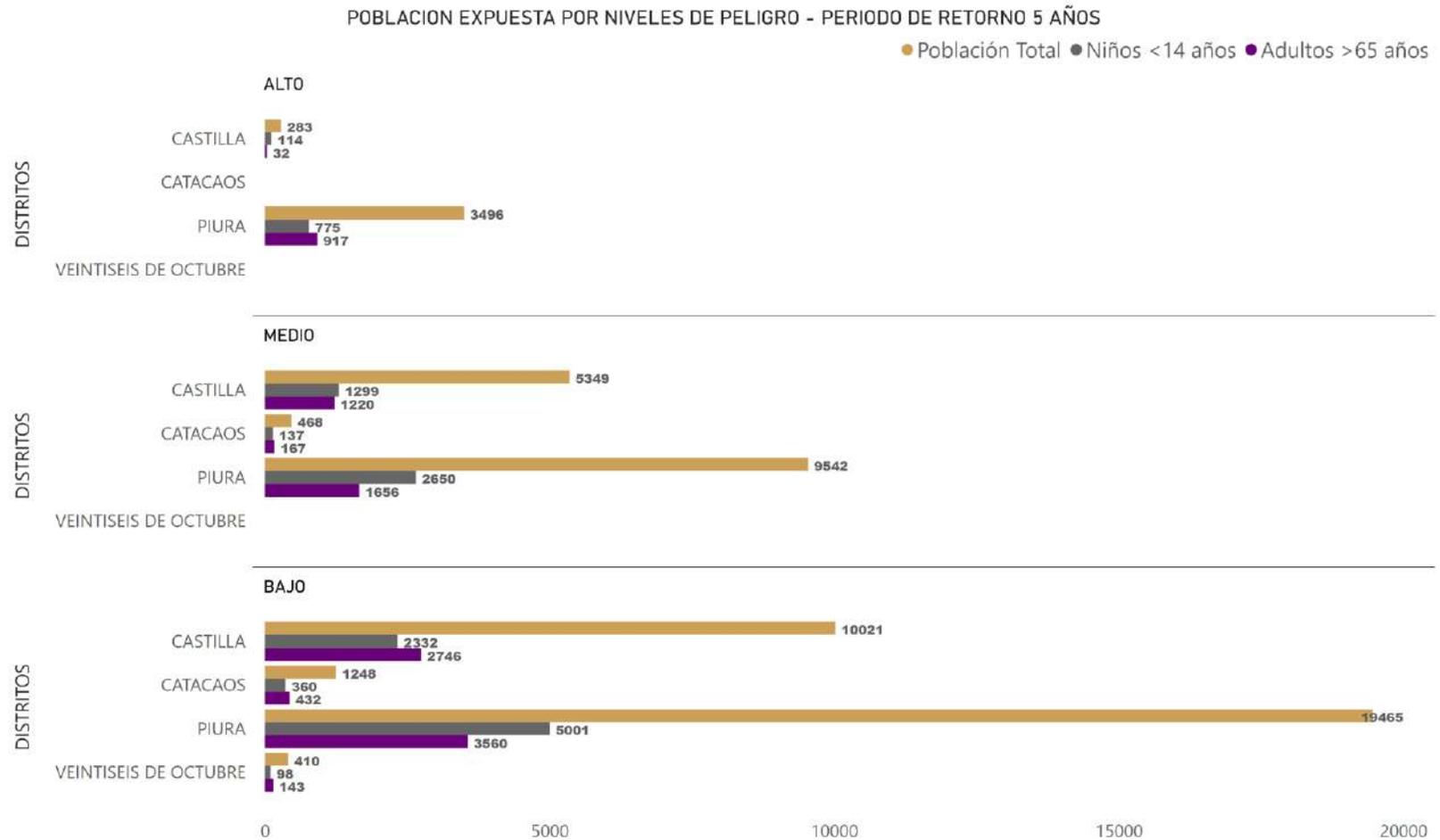


Figura 72. Manzanas expuestas por distritos y niveles de peligro - Periodo de Retorno 5 años

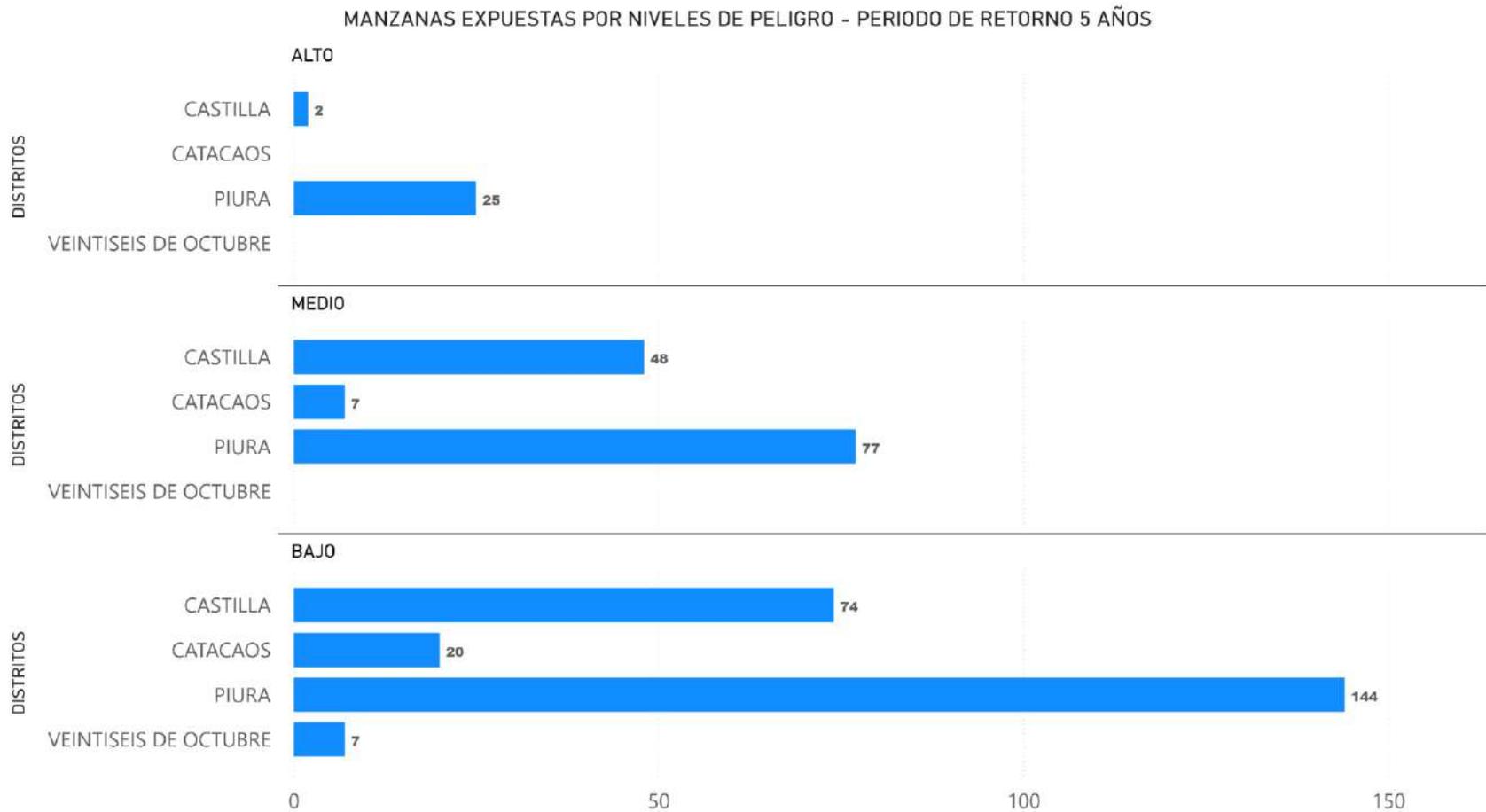


Figura 73. Infraestructura expuesta por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 5 años

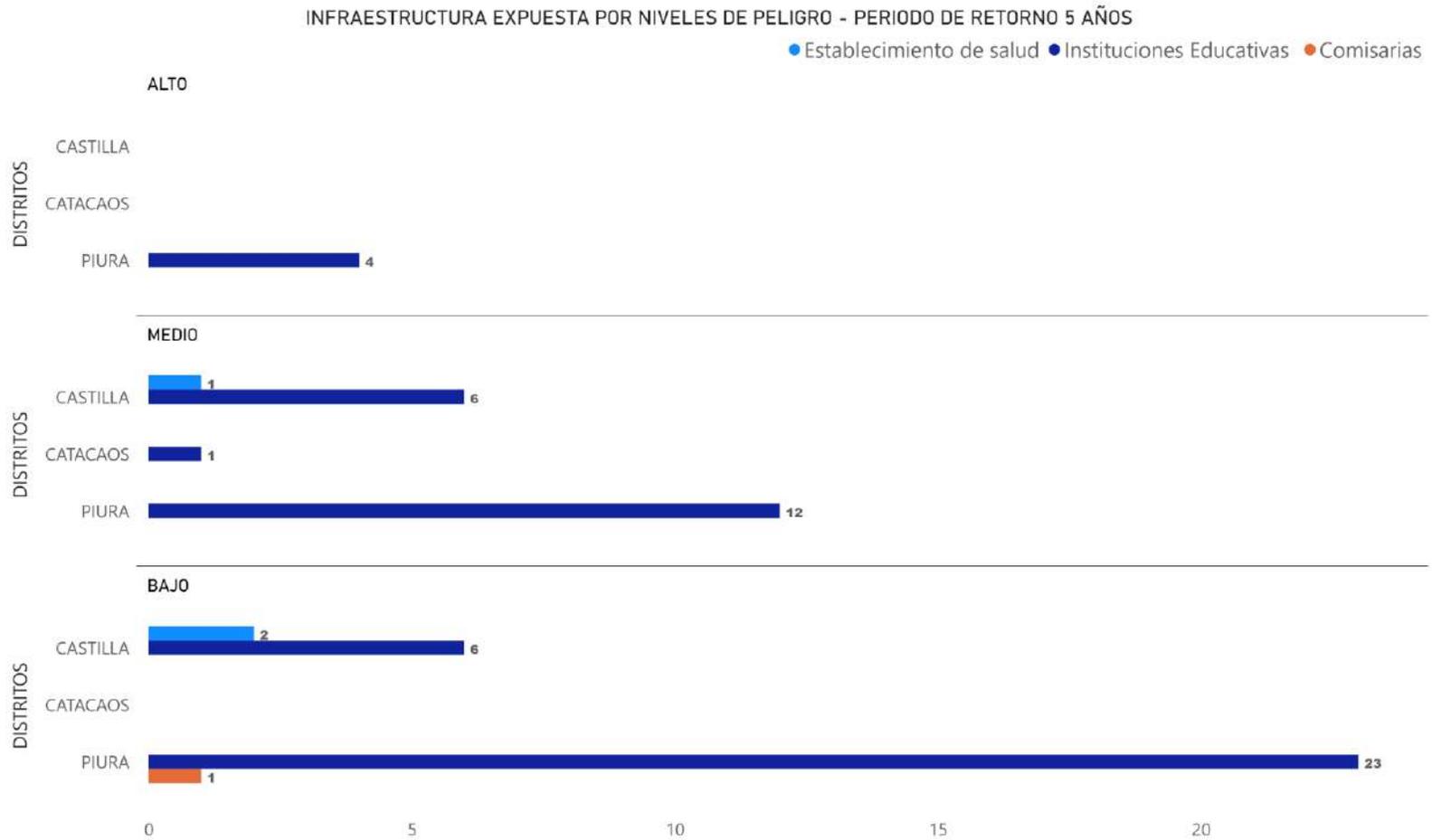
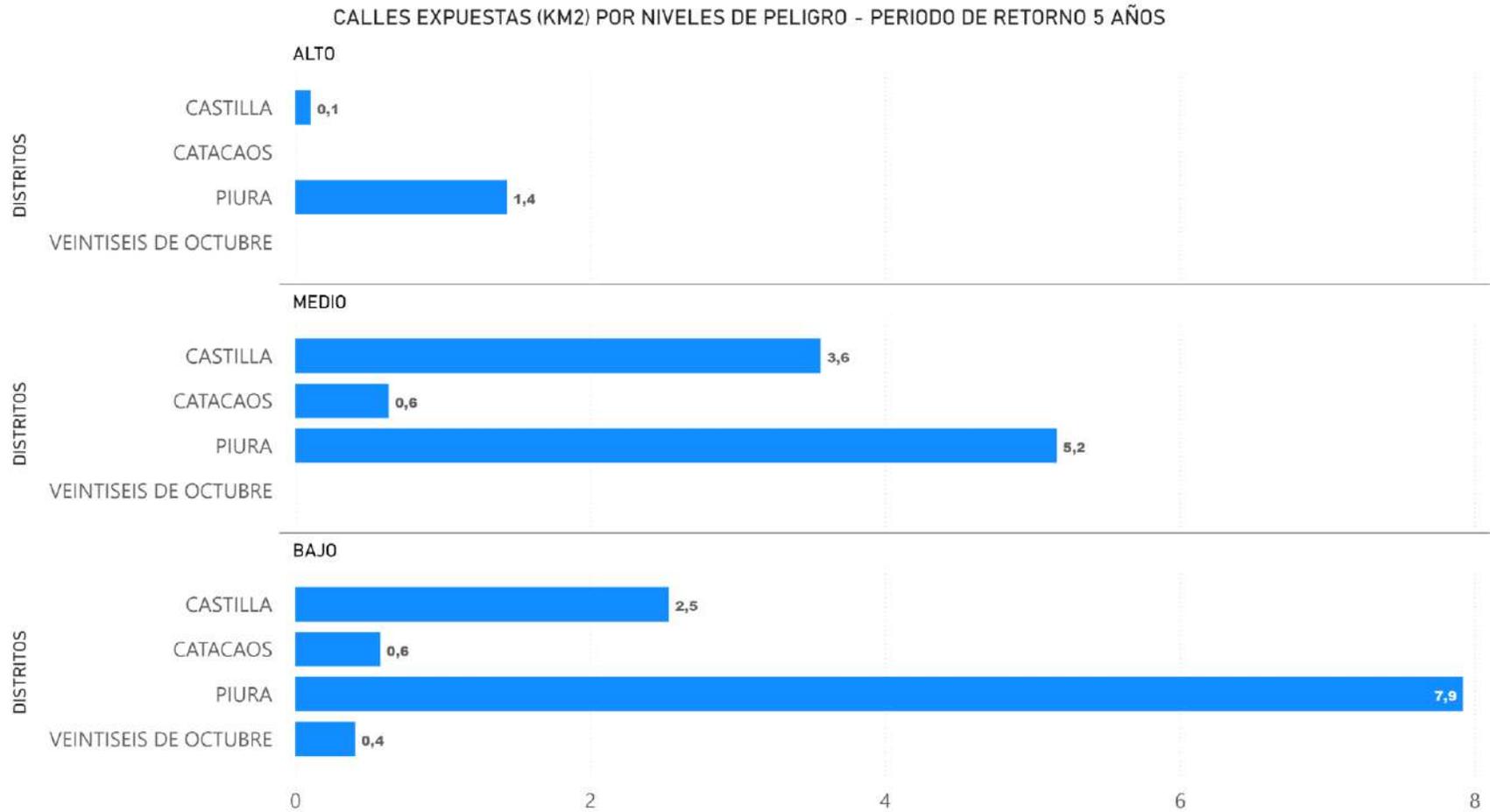


Figura 74. Calles expuestas (Km²) por distritos y niveles de peligro – Periodo de Retorno 5 años

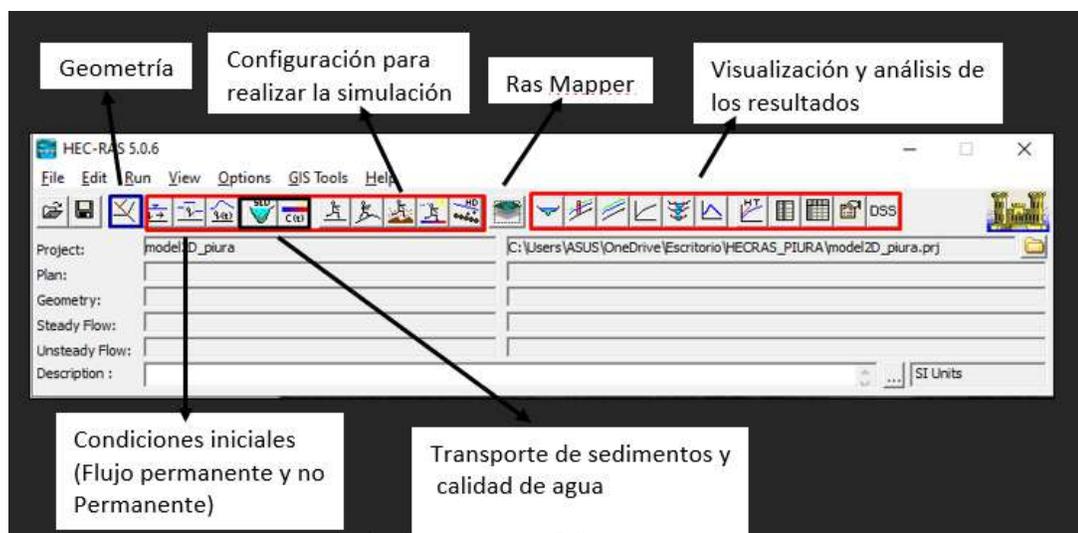


ANEXO N° 04: MANUAL PARA LA MODELACIÓN HIDRODINÁMICA USANDO EL MODELO HEC RAS 2D

En el presente manual se utiliza el modelo HEC-RAS, para la realización de la modelación hidráulica, programa desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica dentro del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EUA (US Army Corps of Engineers). El enlace para su descarga <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>, disponible de forma gratuita.

El programa abierto, es como se muestra en la figura 80, donde se muestra la pantalla inicial del HEC-RAS con todas sus herramientas.

Figura 75. Ventana del HECRAS



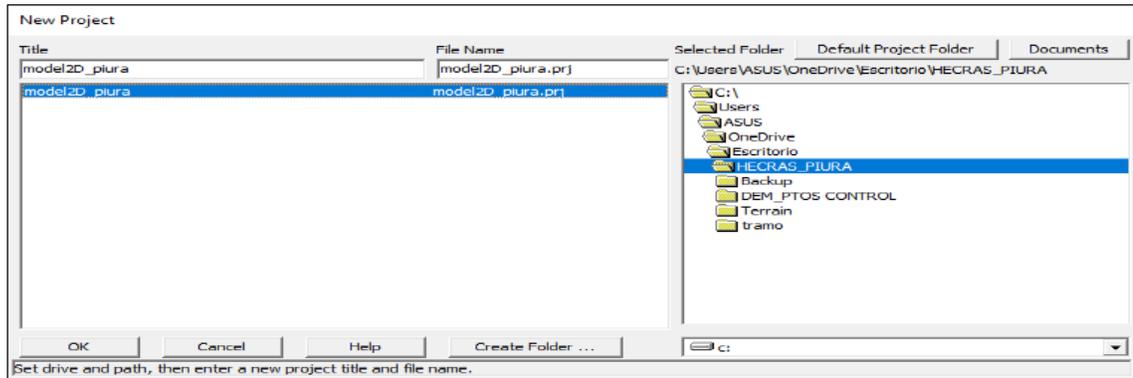
Para realizar el ejemplo de aplicación, se requiere lo siguiente:

- Software de modelación hidrodinámica – HEC RAS
- Modelo digital del terreno en formato .tif
- Vector que contenga los coeficientes de rugosidad
- Hidrogramas para los diferentes periodos de retorno

A continuación, se detallarán los pasos para obtener las áreas inundables

1. Creamos en HEC-RAS un nuevo proyecto, nos vamos a “file”, “new project”, ubicamos la carpeta de trabajo y en “title” le asignamos un nombre.

Figura 76. Creación del nuevo proyecto

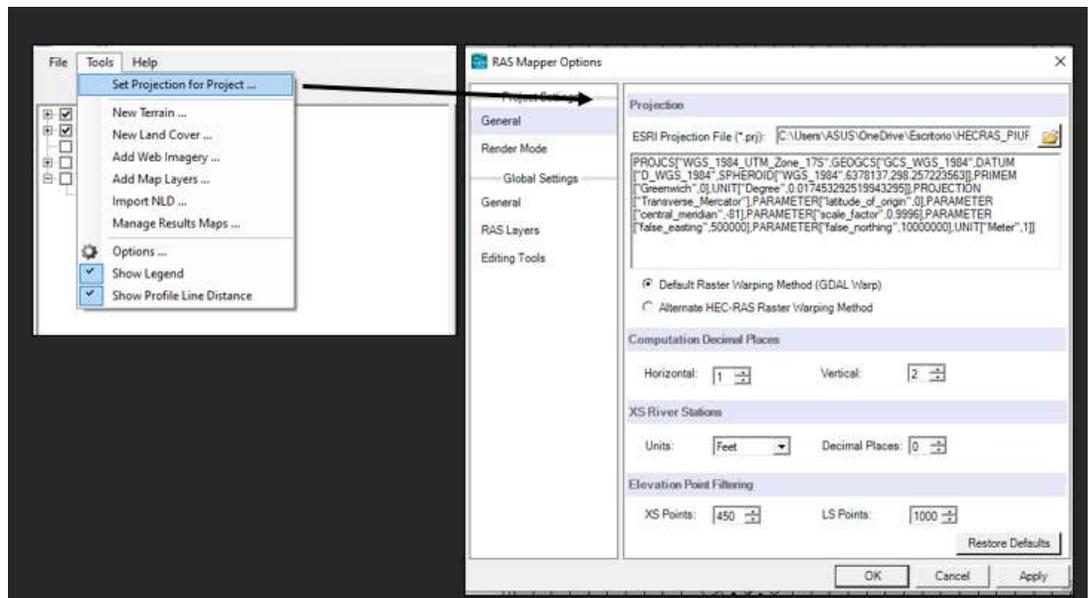


2. Abrir RAS Mapper

Esta herramienta permite adicionar datos topográficos, crear la geometría que será procesada y visualizar los resultados.

En la figura 82, se muestra los pasos para definir el sistema de referencia para proyectar el modelo, “Tools” “Set Projection for Project”. Este archivo de referencia tiene el formato. prj y se obtuvo del dem de nuestro proyecto.

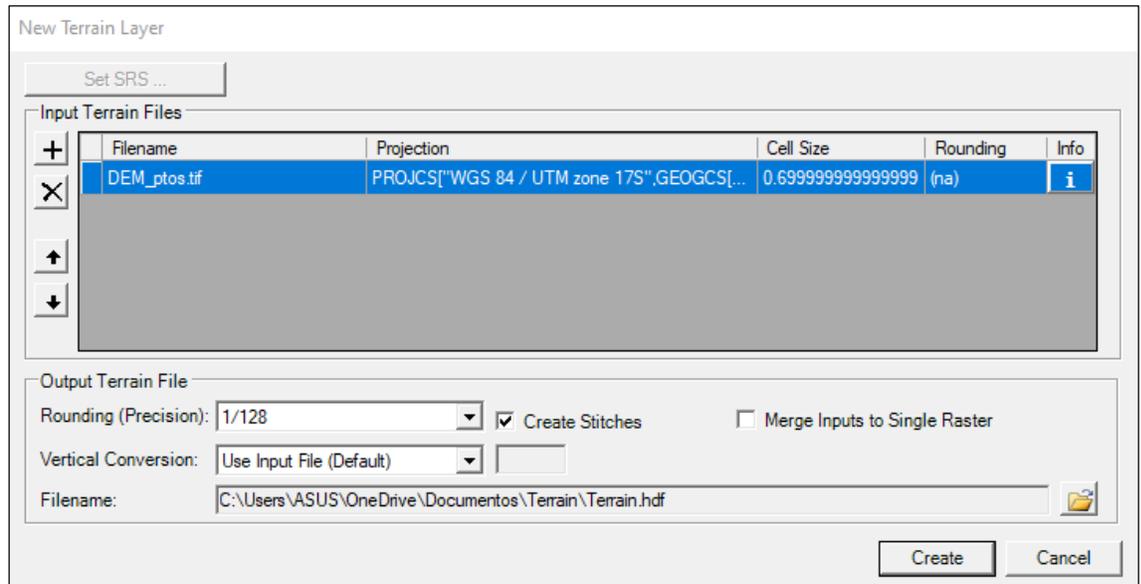
Figura 77. Asignación del sistema de coordenadas



3. Cargar el DEM

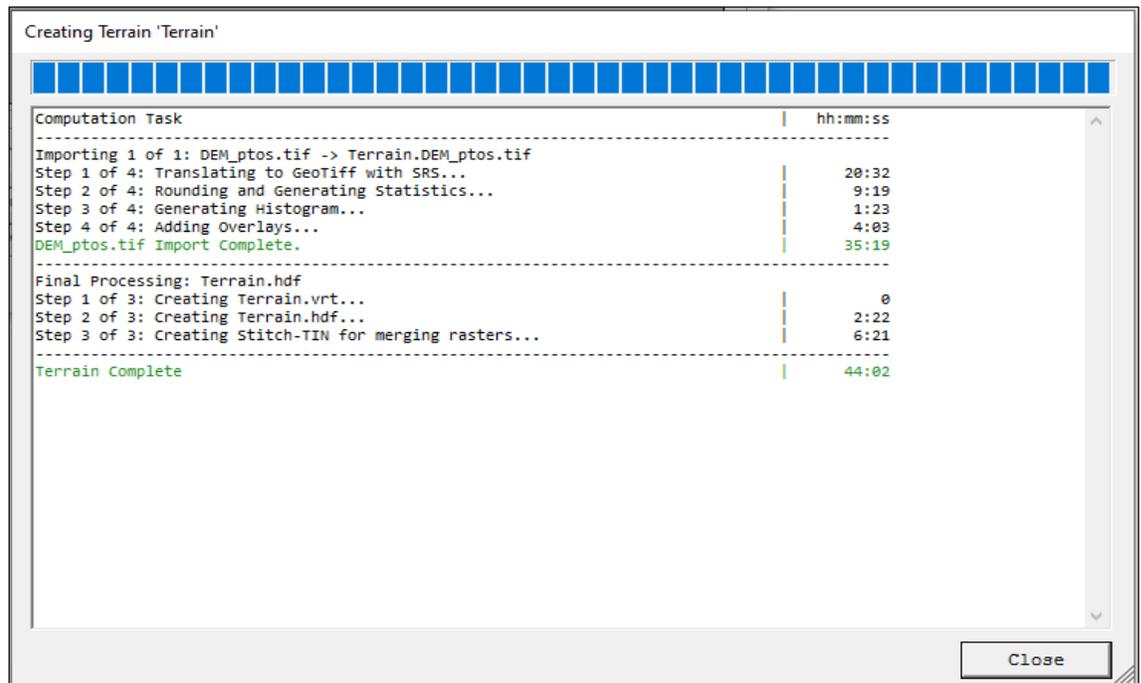
Adicionar el DEM_ptos.tif del área de estudio, para ello se selecciona la herramienta “Terrain”, que habilitará una nueva ventana en la cual se selecciona el símbolo (+) que nos permitirá escoger el archivo, que se muestra en la figura 83.

Figura 78. Carga del DEM del área de estudio



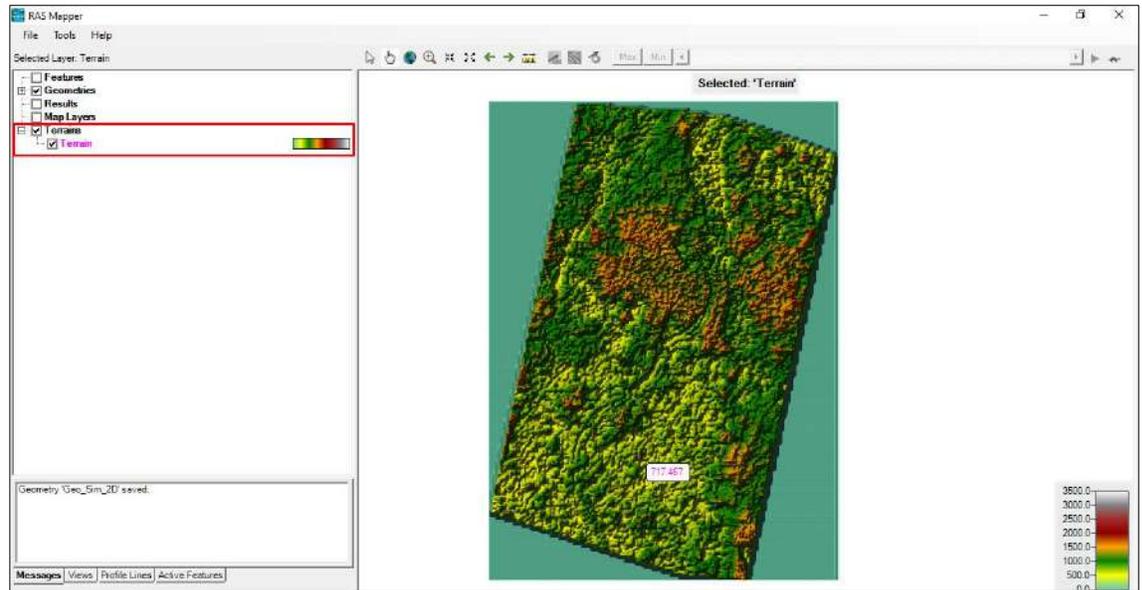
Se presione en “Create”, y se obtiene DEM.tif cargado en el software.

Figura 79. Proceso exitoso de carga del DEM



Se obtiene el mapa topográfico del área de estudio, como se observa en la figura 85.

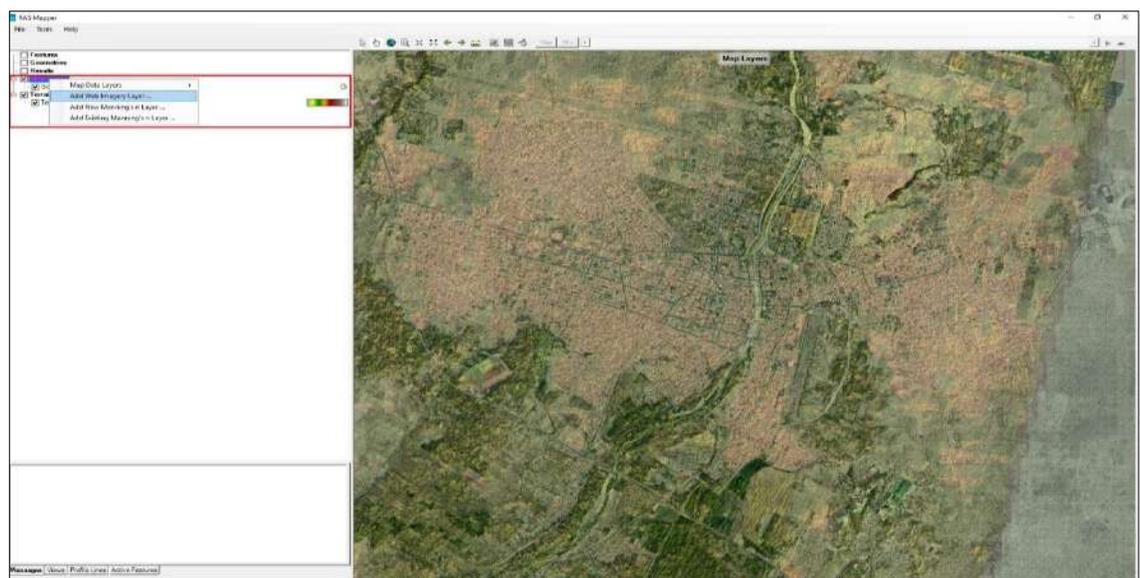
Figura 80. Visualización del dem cargado en el RAS Mapper



4. Cargar imagen satelital

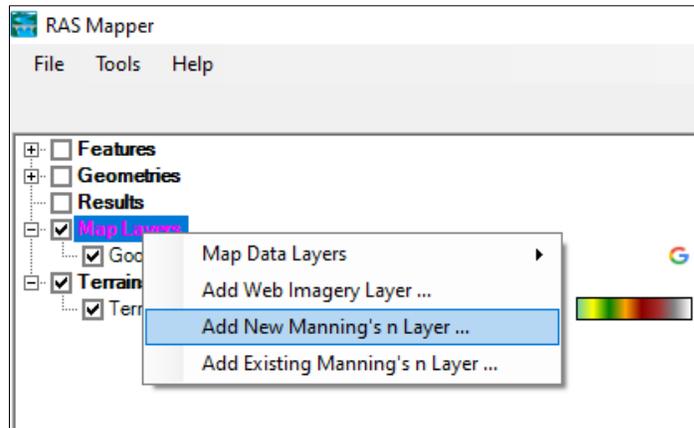
Adicionar una imagen satelital de fondo para el área de estudio, para ello damos click derecho en la herramienta “Map Layers”, que habilitará una nueva ventana en la cual se selecciona “Add Web Imagery Layer” nos permitirá escoger la imagen como se muestra en la figura 86.

Figura 81. Visualización de imagen satelital y dem de la zona urbana de Piura



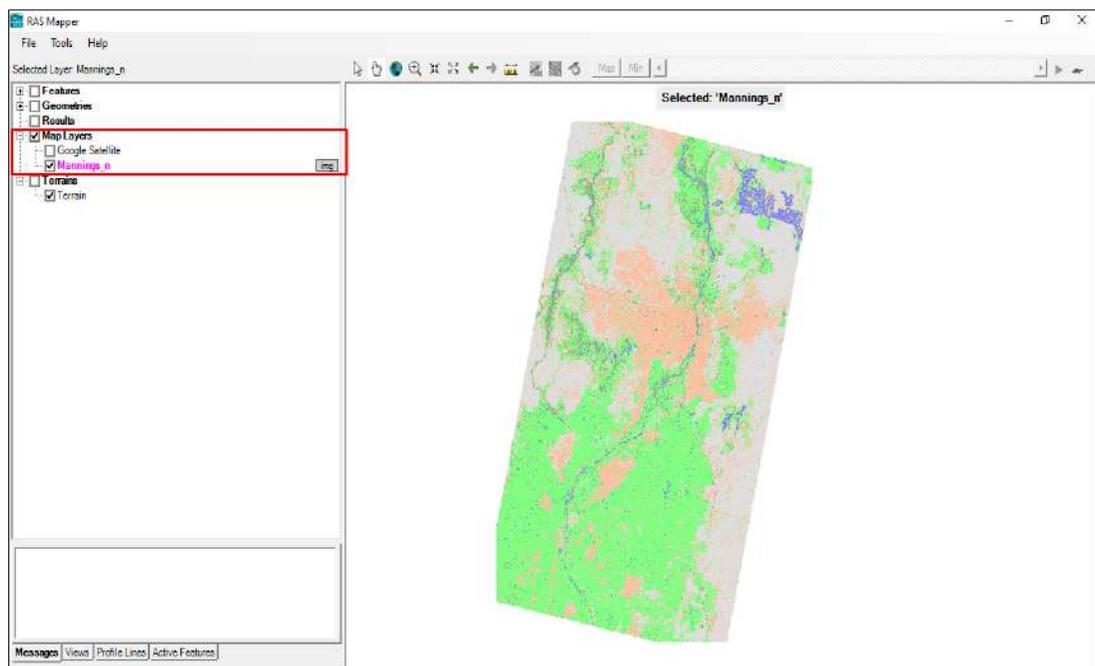
5. Cargamos los coeficientes de rugosidad
 - 5.1. Los coeficientes de rugosidad, representados por los valores de n Manning, se han extraído de una capa de cobertura del terreno, tomando como base imágenes satelitales del Spot 6, proporcionadas por la Agencia Espacial del Perú – CONIDA.

Figura 82. Cargar los coeficientes de rugosidad



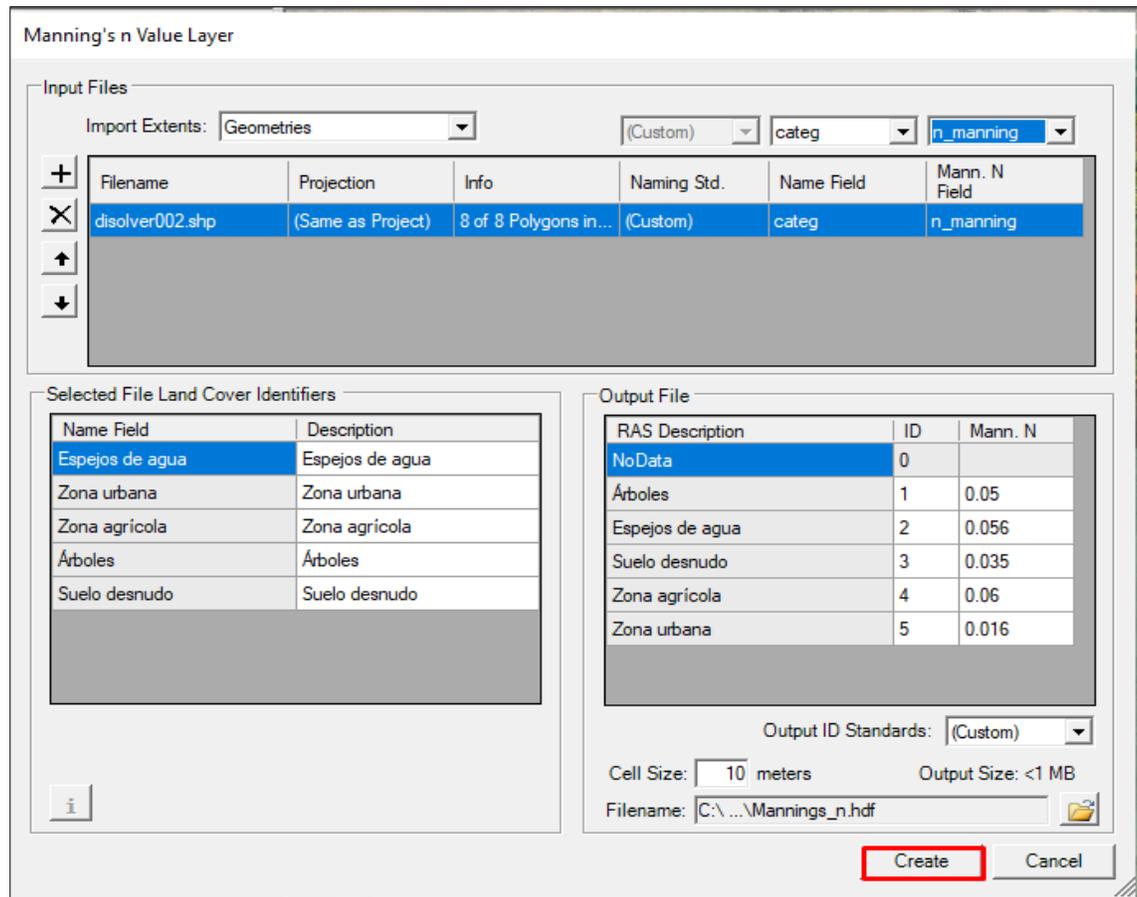
- 5.2. El shape se añadirá a la tabla de valores de Manning's n . La introducción de estos coeficientes de rugosidad tendrá prioridad sobre los valores del conjunto de datos de cobertura del suelo ("ManningsN").

Figura 83. Se carga y asigna la categoría de los valores "n_manning"



5.3. La capa de Valores finales n se utiliza para visualizar lo que el modelo está utilizando. Para los modelos 2D, la capa será la combinación de la capa de Cobertura del Terreno (que tiene Polígonos de Clasificación) y las Regiones de Calibración.

Figura 84. Visualización valores “ n_{manning} ” cargados en el RAS Mapper

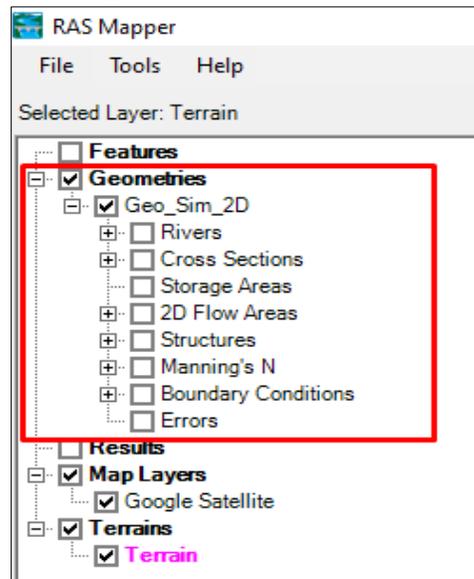


6. Definir la geometría

6.1. El primer paso para definir la geometría es crear un archivo donde se guardan todas las especificaciones de la geometría que serán utilizadas para las simulaciones.

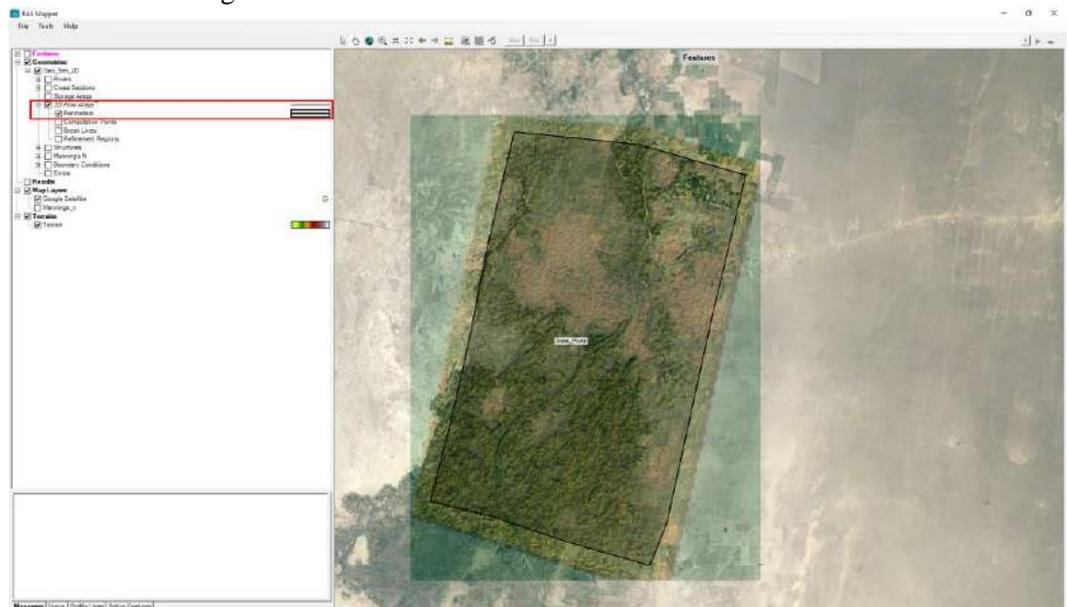
Se selecciona la herramienta “*Geometries/ Add New Geometry*” dentro del Ras Mapper. En la figura 90 se observa la serie de opciones habilitadas que permiten iniciar con la creación de la geometría.

Figura 85. Opciones de geometría habilitadas



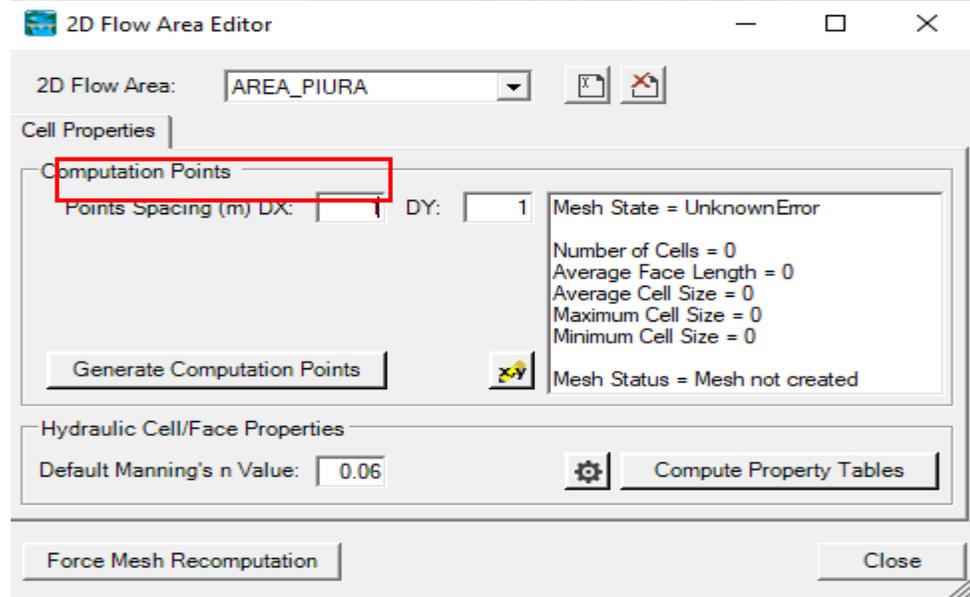
6.2. Como segundo paso, se debe delimitar el área de interés, que será el dominio que el modelo utilizará para propagar los hidrogramas. Se selecciona dentro de las opciones de geometría la herramienta “2D Flow Area” /Perimeters/ Edit Geometry”. Una vez seleccionada la herramienta se habilitarán las opciones de edición. La figura 91 muestra el polígono “Área_Piura”, delimitada para nuestra área de estudio.

Figura 86. Delimitación del área de interés



6.3. Se debe configurar y especificar el dominio, en relación al tamaño de las celdas. Para esto, se debe dar “click” derecho en la opción de 2D Flow Area y seleccionar *Edit 2D Area properties*.

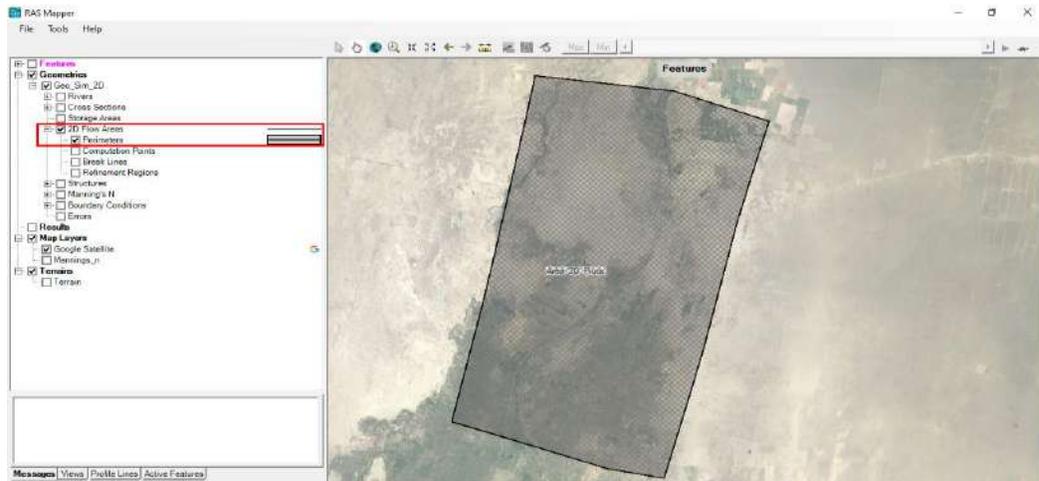
Figura 87. Configuración del dominio del área de interés



6.4. Obtenemos el mallado

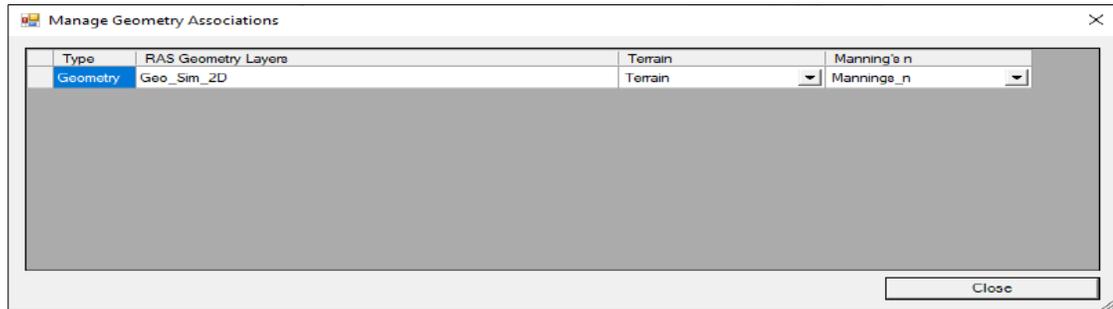
Obtenemos una malla regular para el área de estudio, en cada celda se obtiene las propiedades hidráulicas.

Figura 88. Obtención del mallado del área de interés



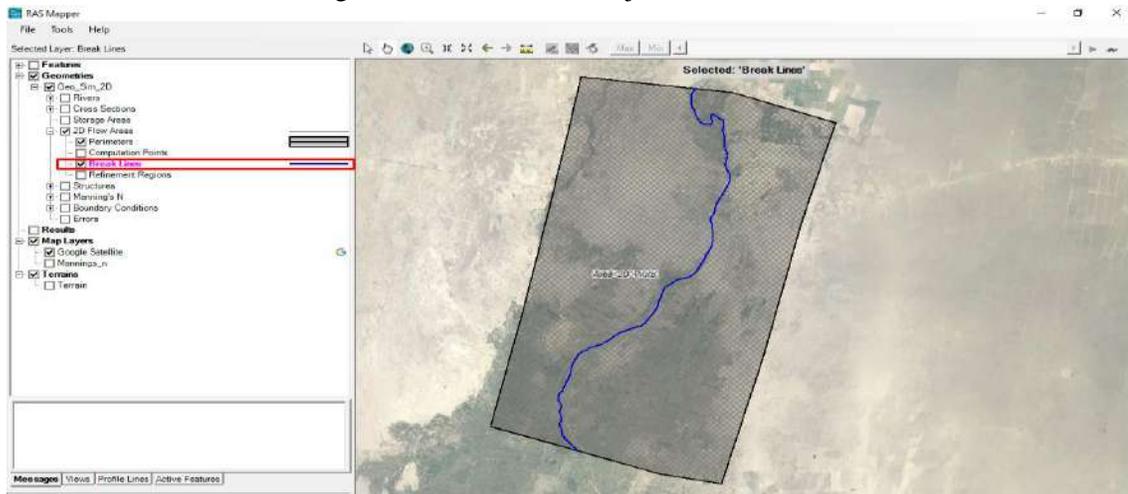
7. Asociamos la geometría con el “Terrain” y los valores de “Manning”

Figura 89. Asociación de las variables en el RAS Mapper



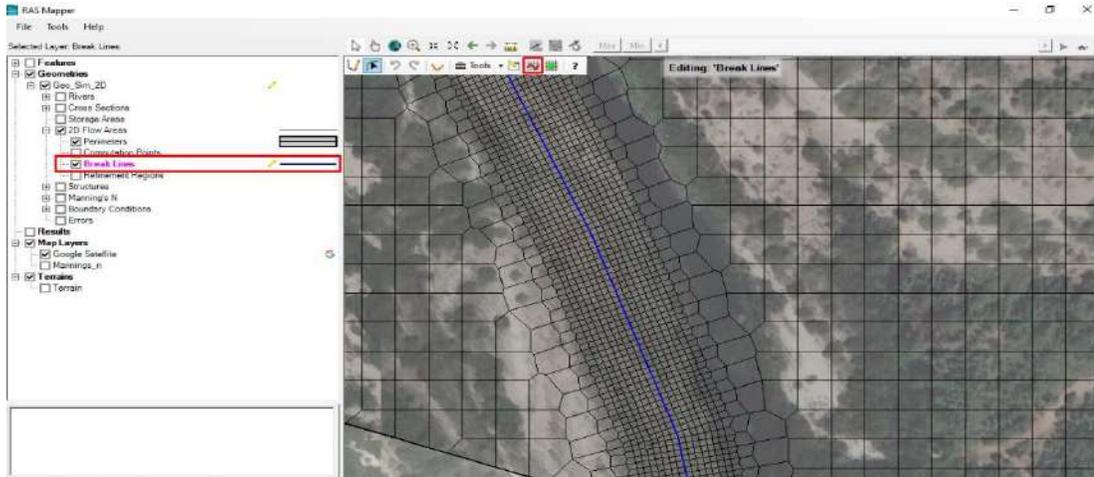
8. Se define la línea de cauce, para ello damos “click” en “break lines”, luego de generado el eje de cauce, se detiene la edición.

Figura 90. Generación de eje del cauce del río Piura



9. Se deberá alinear “Break Lines” mallado en las márgenes del río Piura.

Figura 91. Alineación del mallado al eje del cauce



10. Generamos las condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo del eje de cauce del río Piura. Para ello nos vamos a “Boundary Condition Lines”. Se debe cargar la línea de corte vinculándola con el área de estudio, al editar se señala que es una conexión interna “Internal” para el caso de aguas arriba y “External” para el caso de aguas abajo. Finalmente se debe guardar y detener la edición.

Figura 92. Generación de la condición de contorno (aguas arriba)

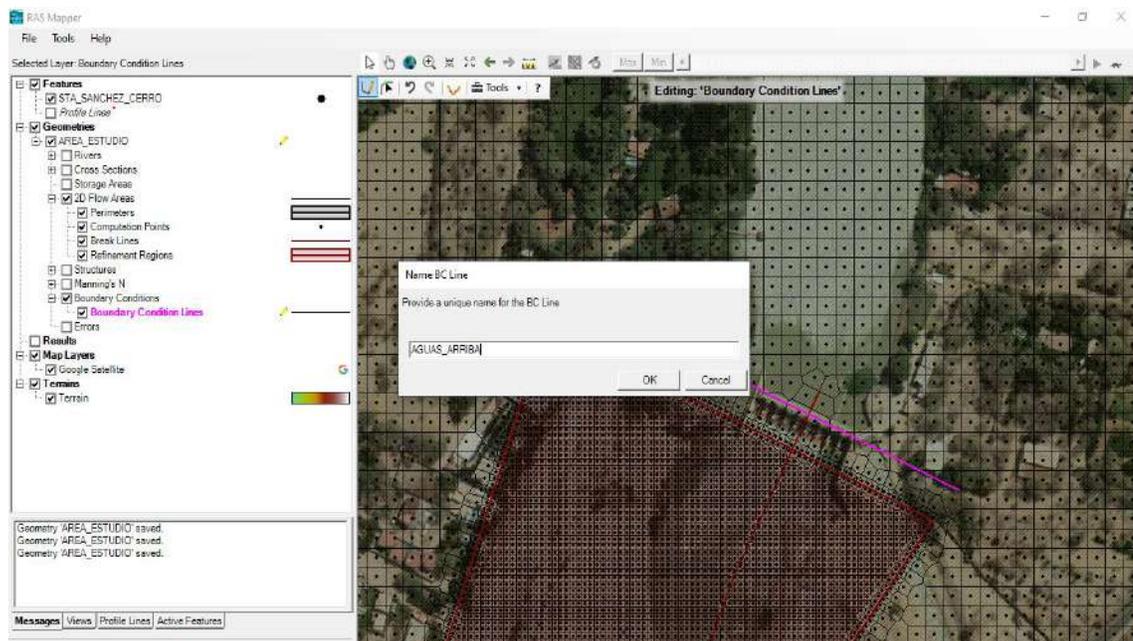
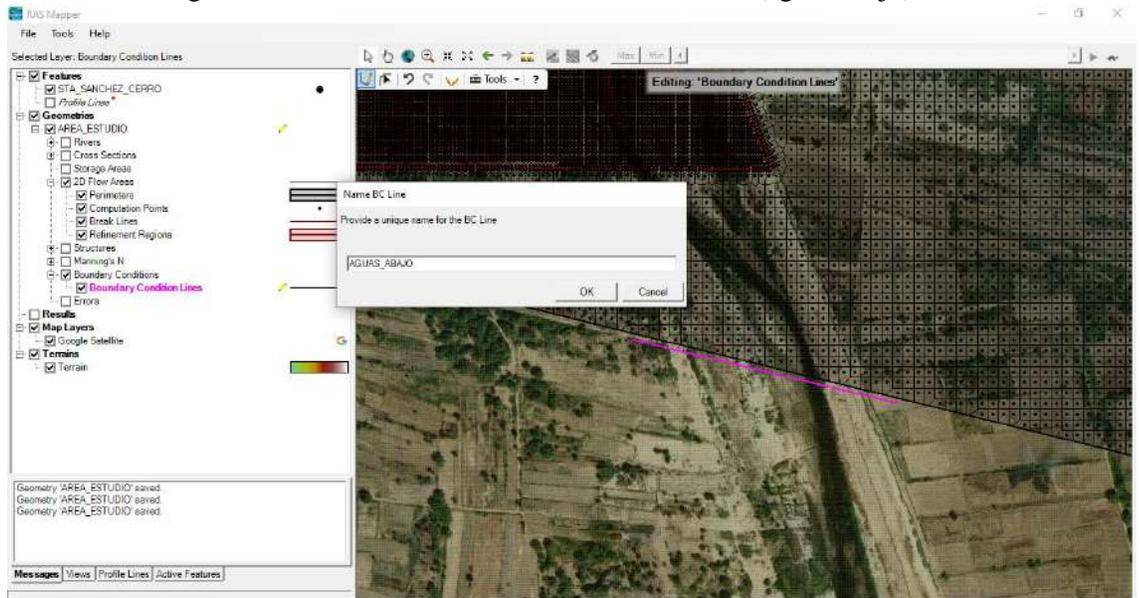


Figura 1. Generación de la condición de contorno (aguas abajo)

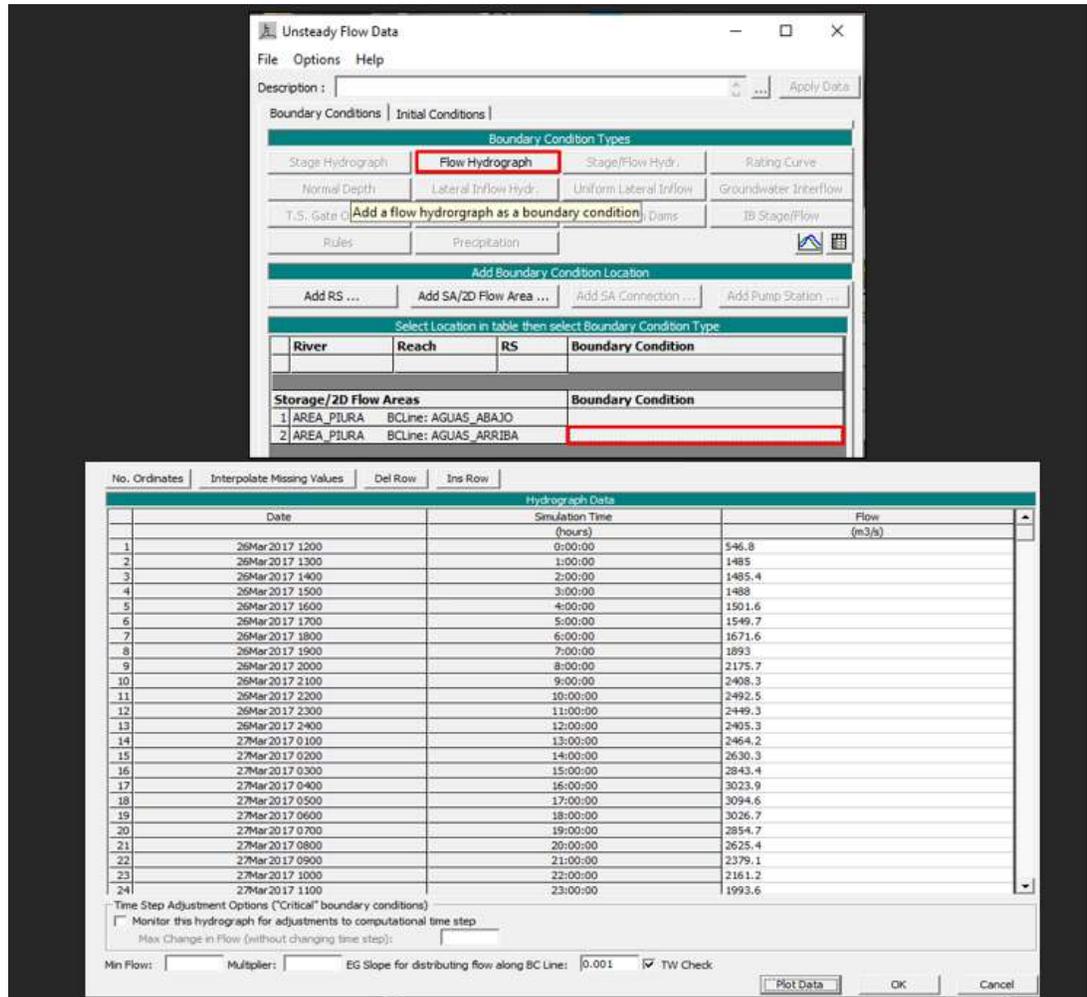


11. Ahora ingresamos los datos de caudal para ello nos dirigimos a la opción “View/Edit unsteady Flow data”, con ello configuramos los valores para la corrida en flujo inestable.

Figura 2. Ícono para ingreso de los caudales



Figura 93. Se ingresa los valores del hidrograma



12. Generamos el plan de corrida para ello nos dirigimos a la opción Unsteady Flow Analysis

Figura 94. Ícono para acceder al plan de corrida

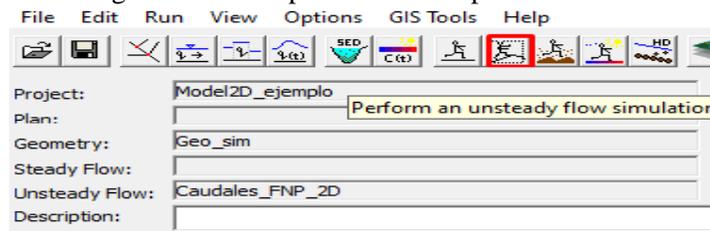


Figura 95. Ingresamos los datos del plan de corrida

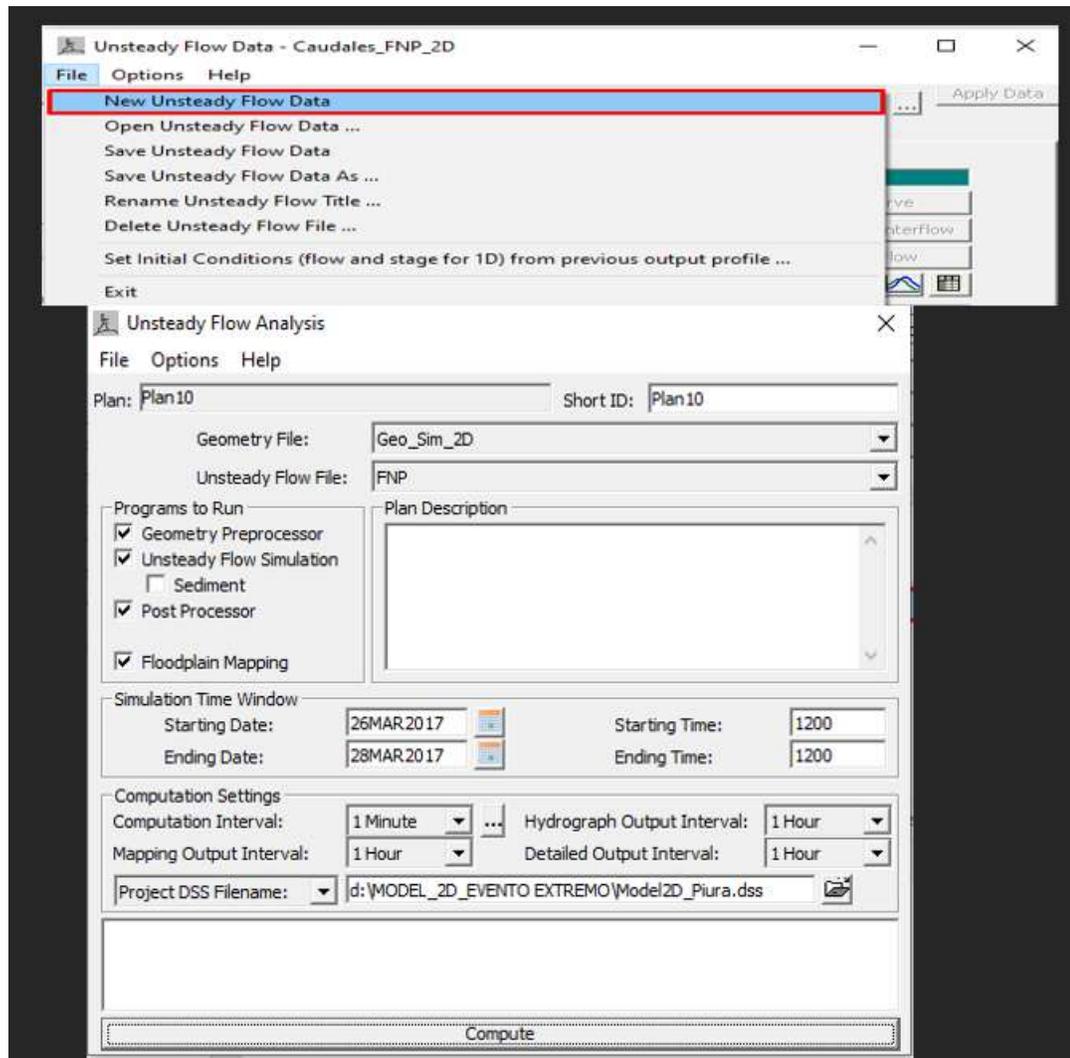


Figura 96. Resultado de la modelación hidráulica, periodo de retorno 100 años

HEC-RAS Finished Computations

Write Geometry Information
Layer: COMPLETE

Geometry Processor
River: RS:
Reach: Node Type: Storage Area
IB Curve: Finished

Unsteady Flow Simulation
Simulation: Finished
Time: 24.0000 07SEP2008 12:00:00 Iteration (1D): Iteration (2D): 0
Unsteady Flow Computations

Stored Map Generation
Map:

Computation Messages

06SEP2008 16:26:18	AREA_2D	Cell #	2689	133.86	0.017	21
06SEP2008 16:26:20	AREA_2D	Cell #	2689	133.86	0.005	20

Overall Volume Accounting Error in 1000 m³: 0.06538
Overall Volume Accounting Error as percentage: 0.000501
Please review "Computational Log File" output for volume accounting details

Writing Results to DSS

Finished Unsteady Flow Simulation

ID Post Process Skipped (simulation is all 2D)

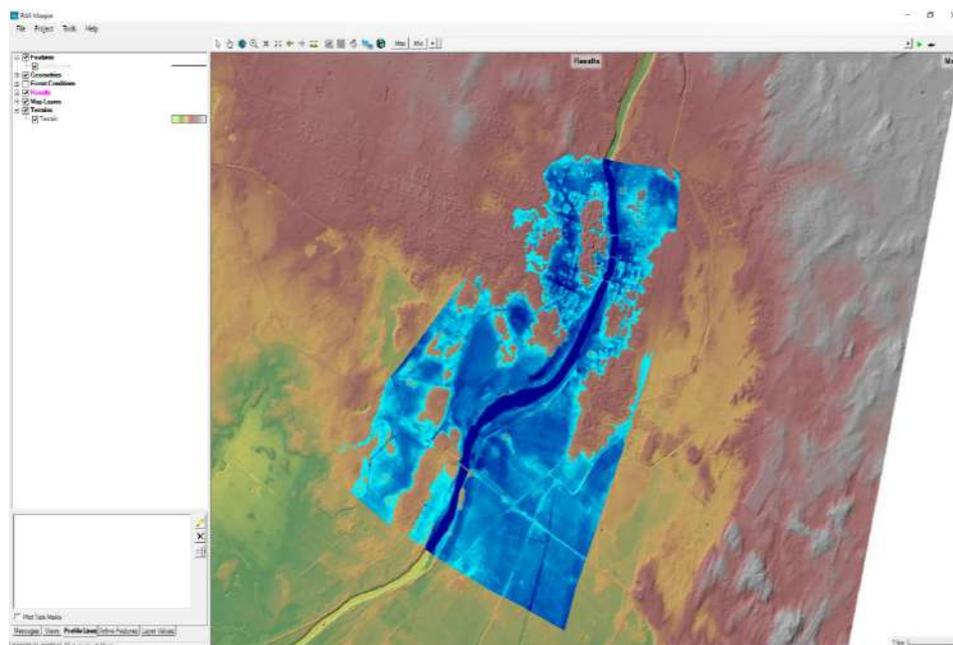
Computing Stored Results Maps
0 Maps generated for "Model2D_ejemplo.p01.hdf"

Computations Summary

Computation Task	Time(hh:mm:ss)
Completing Geometry	1
Preprocessing Geometry	<1
Completing Event Conditions	<1
Unsteady Flow Computations	18:32
Computing Maps	<1
Complete Process	18:35

Computation Speed	Simulation/Runtime
Unsteady Flow Computations	77.7x
Complete Process	77.5x

Pause Make Snapshot of Results Close

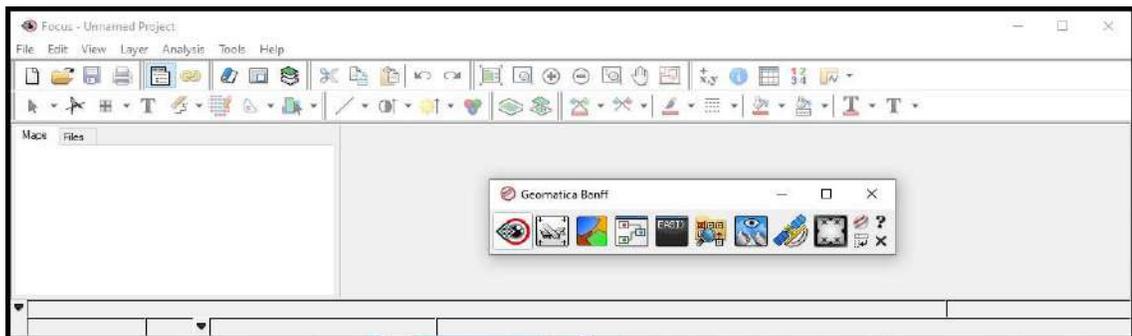


ANEXO N° 04: MANUAL PARA CLASIFICACION ORIENTAD POR OBJETOS DE LA ZONA DE ESTUDIO

En el presente manual se utiliza el software Geomatica Banff, para procesar la imagen satelital y realizar la clasificación orientada por objetos.

El programa abierto, es como se muestra en la figura 102, donde se muestra la interfaz del software con todas sus herramientas.

Figura 97. Interfaz del software Geomatica Banff



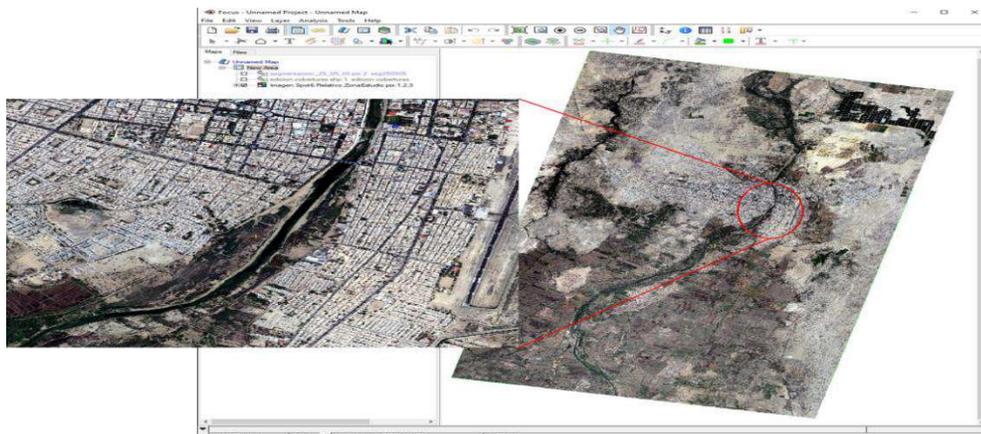
Para realizar el ejemplo de aplicación, se requiere lo siguiente:

- Procesar la imagen Spot6 de la zona de estudio:
 - Corrección radiométrica
 - Corrección atmosférica
 - Fusionar la imagen
 - Corrección geométrica
- La imagen Spot terminada de procesar debe estar en formato .pix o tif

A continuación, se detallarán los pasos para obtener la clasificación

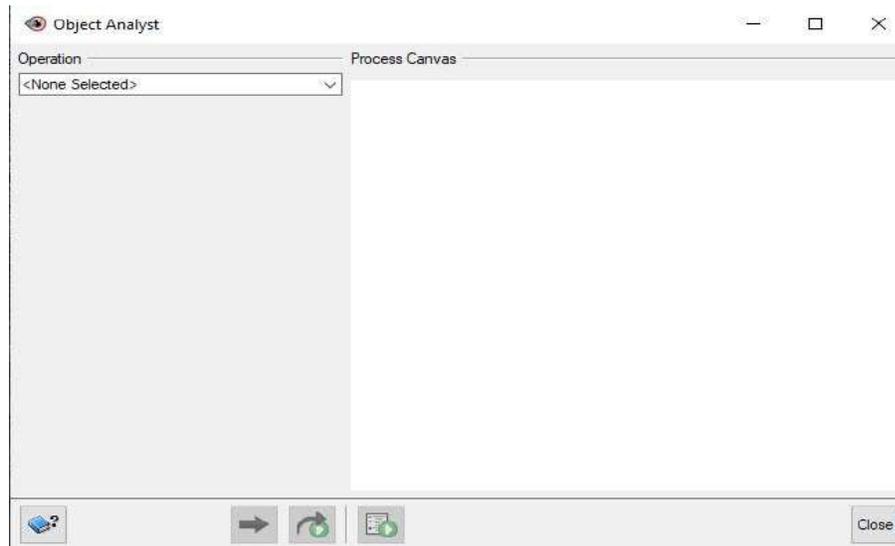
13. Abrir el software, crear un nuevo proyecto y cargar la imagen Spot6.

Figura 98. Creación del nuevo proyecto

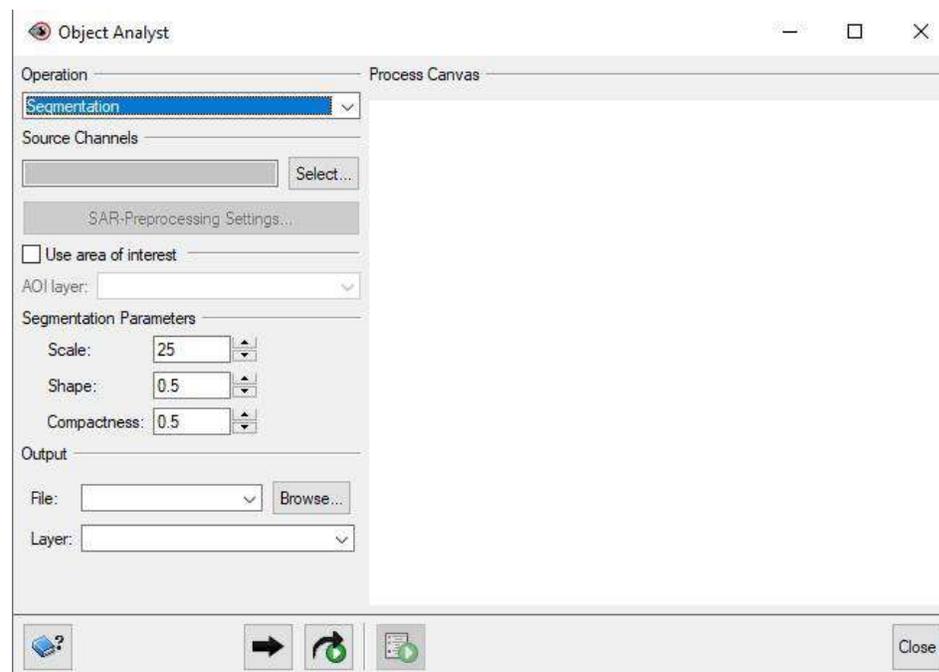


14. Ir al menú principal y seleccionar *Analysis* → *Object Analys*. Aparecerá la siguiente pantalla.

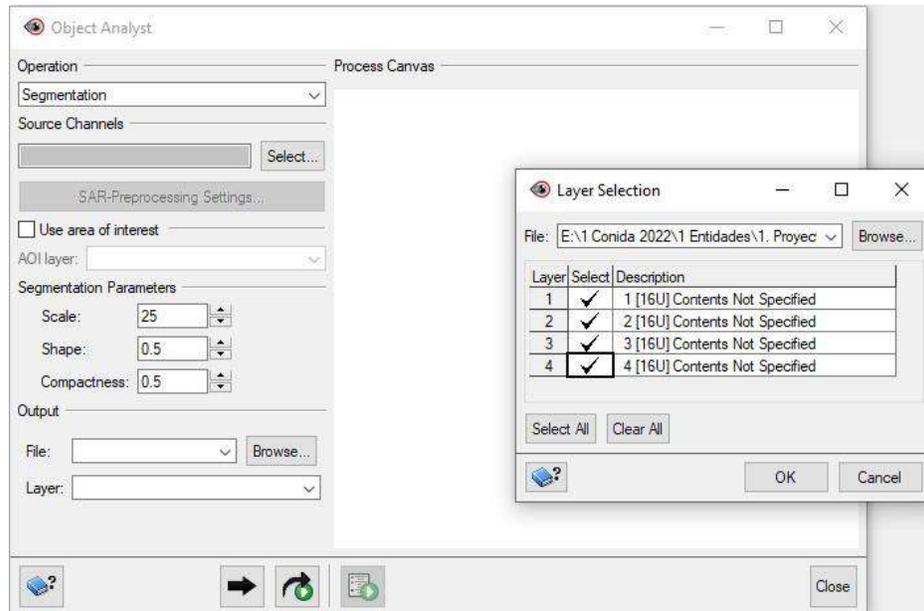
Figura 99. Ventana *Object Analyst*



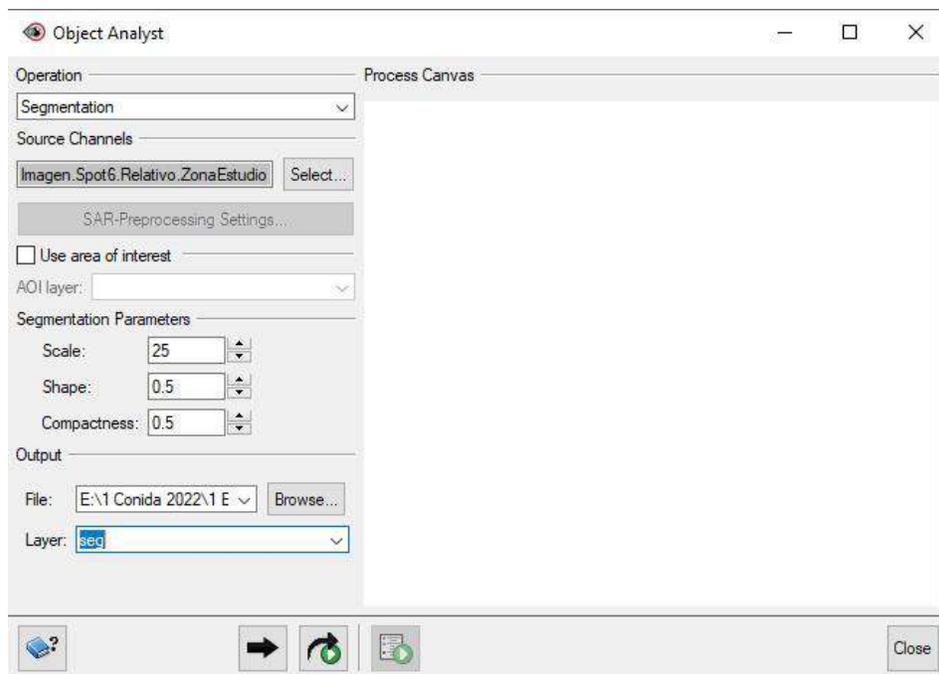
15. En *Operation* desplegamos las opciones y seleccionamos *Segmentation*



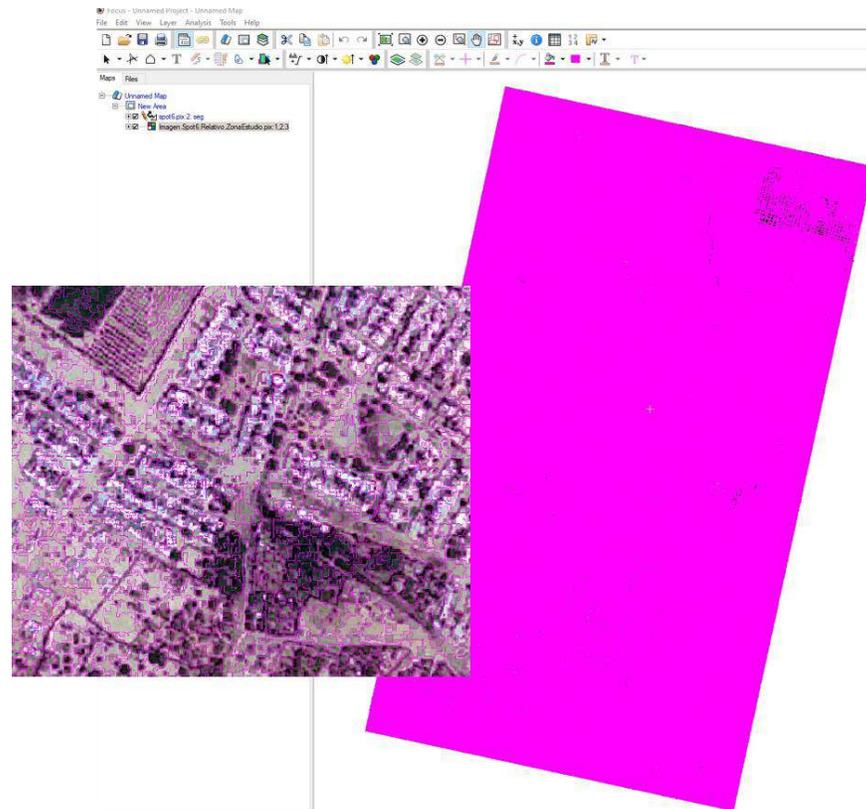
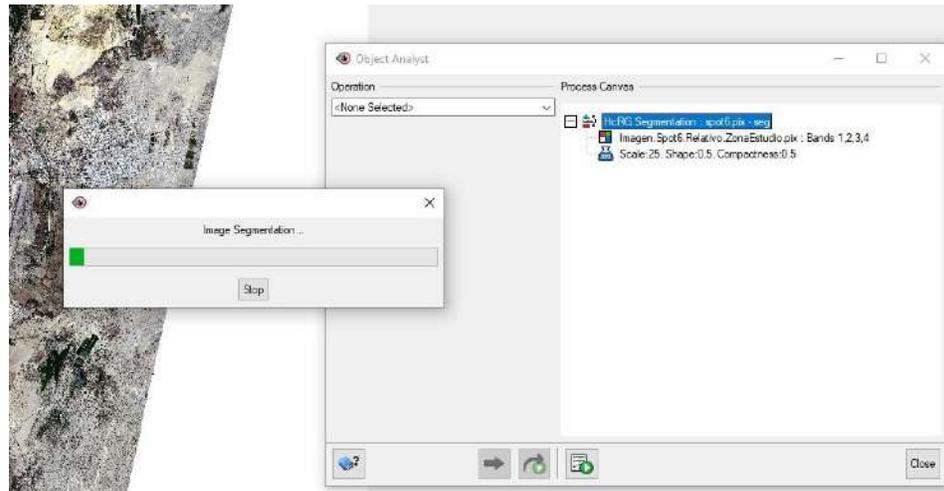
En la opción *Select...* se busca la imagen Spot6 y se seleccionan las bandas



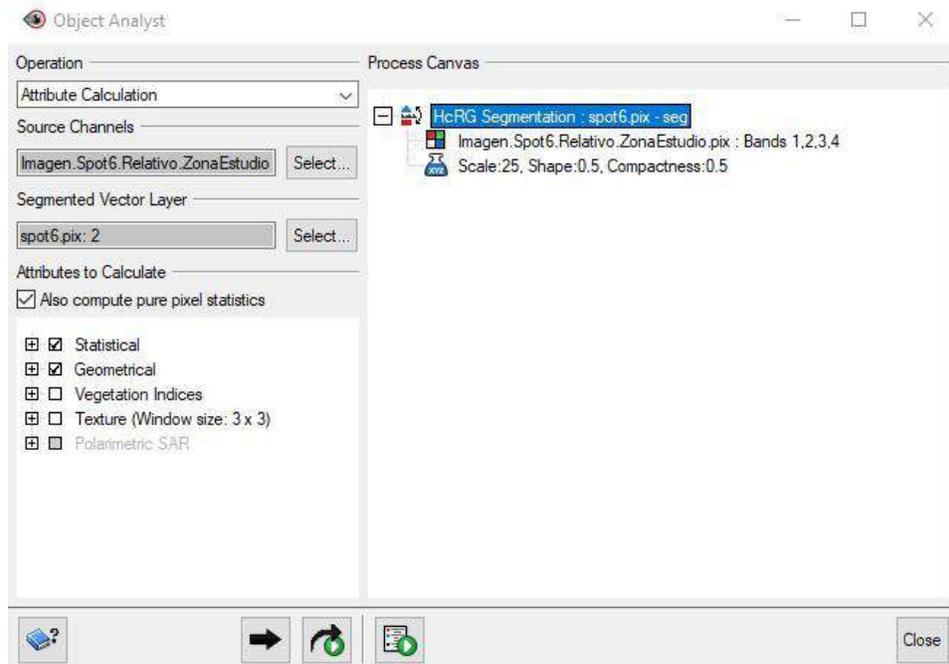
16. En la opción *Segmentation Parameters*, se dejan por defecto la *Scale*, *Shape* y *Compactness*. En la opción *Output* se busca la ruta para guardar los resultados y le damos nombre al *Layer*.



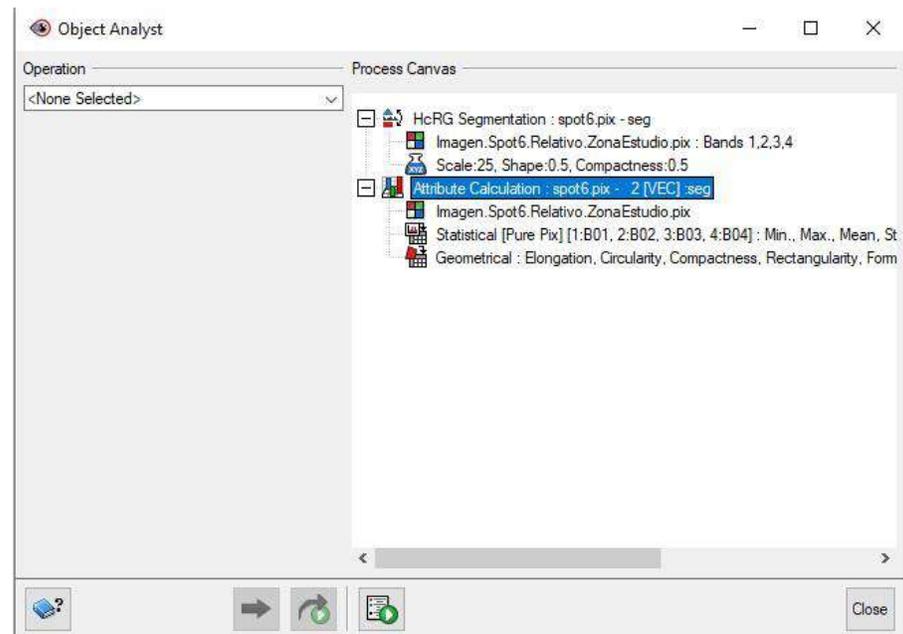
Se hace clic en Add and Run



17. En la opción *Operation* seleccionamos *Attribute Calculation*. Se marca la casilla de *Also compute pure pixel statistics*, y se marca las casillas *Statistical* y *Geometrical*. Finalmente se hace click *Add and Run*.

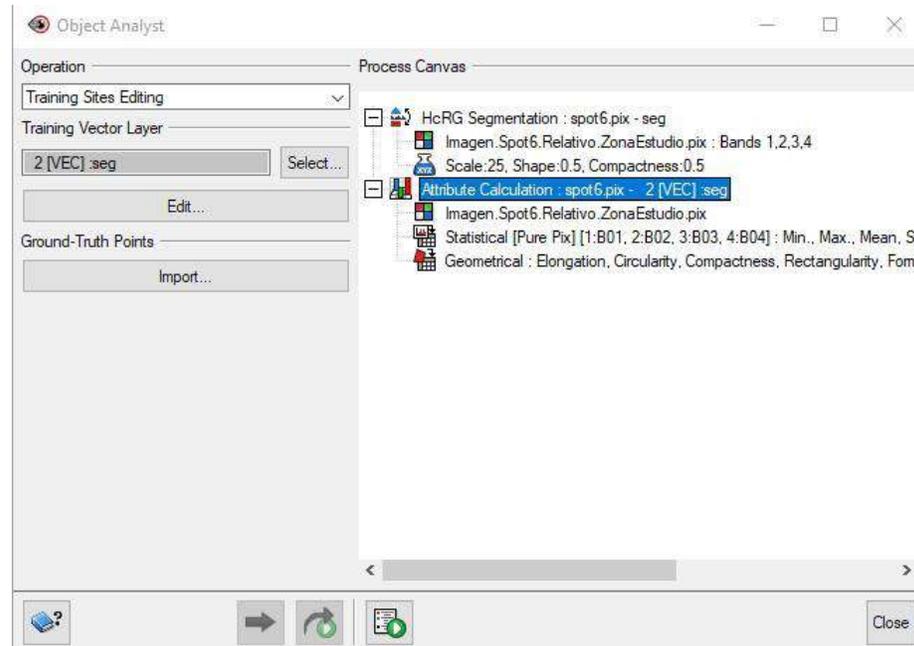


Se genera las estadísticas en la tabla de atributos

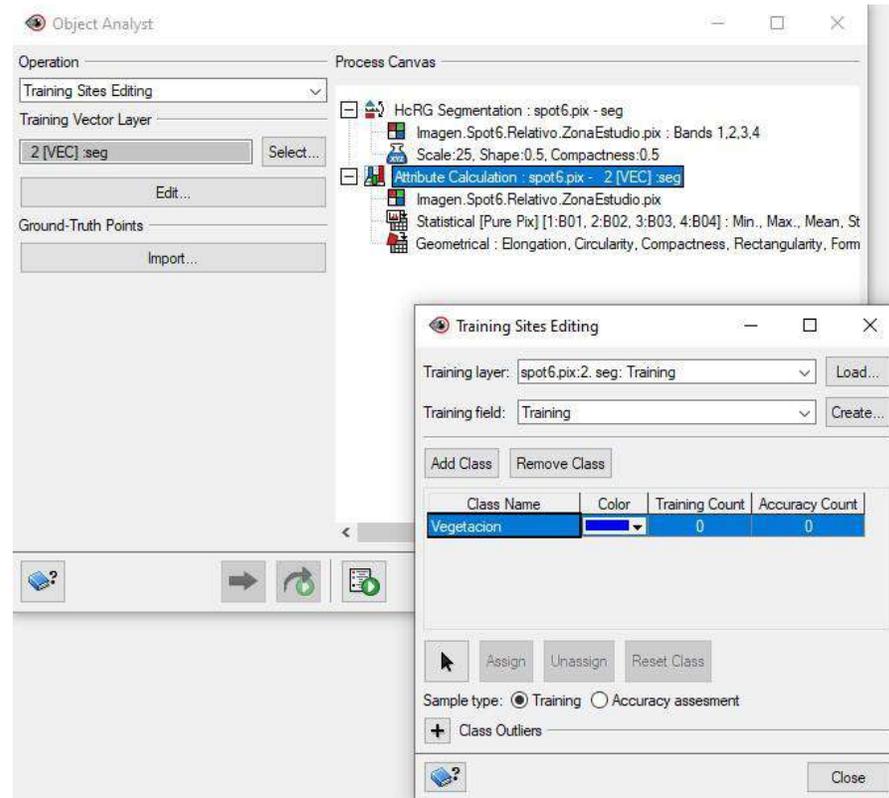


Area	Area (sq m)	Perimeter (m)	Min_B01	Max_B01	Mean_B01	StdV_B01	Min_B02	Max_B02	Mean_B02
0	131.425	101.379	688.000000	847.000000	758.711853	25.895068	715.000000	833.000000	770.000000
1	187.066	92.5104	559.000000	836.000000	723.053345	62.227112	602.000000	839.000000	770.000000
2	8.91016	11.9406	410.000000	536.000000	467.780000	56.133026	473.000000	585.000000	525.000000
3	340.816	176.036	796.000000	1030.000000	892.803894	43.845681	815.000000	1016.000000	895.000000
4	111.379	104.22	863.000000	962.000000	905.419983	22.434566	850.000000	952.000000	901.000000
5	22.2754	20.9827	242.000000	622.000000	452.100006	127.447113	330.000000	664.000000	517.000000
6	66.8271	44.6325	708.000000	891.000000	794.966675	41.932198	723.000000	868.000000	793.000000
7	22.2754	20.9829	392.000000	561.000000	494.799988	60.725403	444.000000	591.000000	517.000000
8	44.5518	26.8373	607.000000	777.000000	678.750000	50.773830	629.000000	781.000000	720.000000
9	75.7333	44.806	537.000000	754.000000	659.911743	53.203915	580.000000	773.000000	660.000000
10	91.3311	65.6574	705.000000	873.000000	814.282664	51.210857	740.000000	887.000000	800.000000
11	44.5518	35.9951	205.000000	630.000000	457.299988	135.224901	293.000000	661.000000	517.000000
12	84.6455	85.1932	487.000000	712.000000	611.210510	60.185818	536.000000	730.000000	660.000000
13	64.5967	53.6747	901.000000	977.000000	937.517212	18.776163	885.000000	955.000000	925.000000
14	84.6475	50.7184	367.000000	600.000000	487.342102	60.827305	447.000000	649.000000	550.000000
15	311.855	161.082	800.000000	1012.000000	889.578552	39.490292	824.000000	976.000000	900.000000
16	69.0537	44.606	550.000000	767.000000	647.741943	57.063103	597.000000	788.000000	660.000000
17	57.915	50.6606	416.000000	696.000000	547.846130	72.218941	467.000000	714.000000	615.000000
18	40.0967	32.8076	783.000000	849.000000	818.222225	19.132835	796.000000	857.000000	826.000000
19	463.327	292.312	436.000000	810.000000	685.557578	75.271790	488.000000	879.000000	770.000000

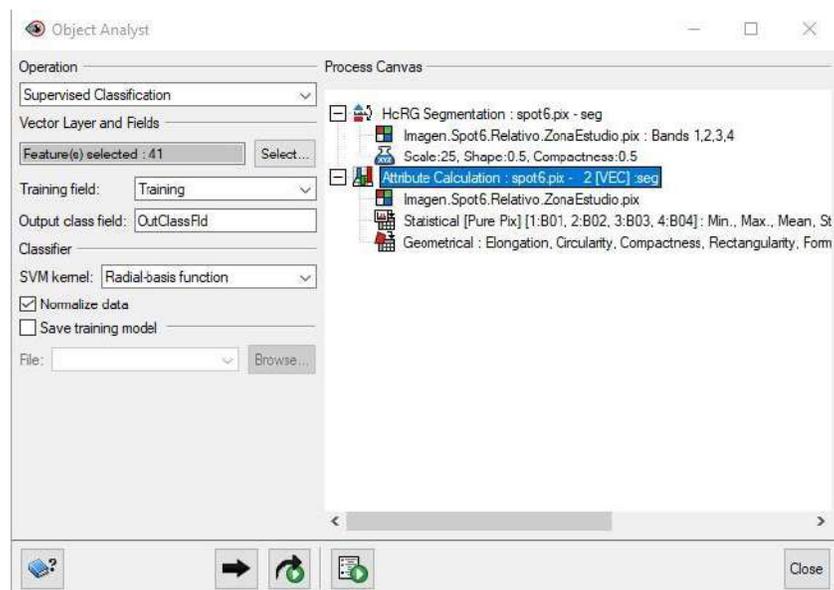
18. En la opción *Operation* seleccionamos Training Sites Editing, para la selección de las muestras para iniciar la clasificación.



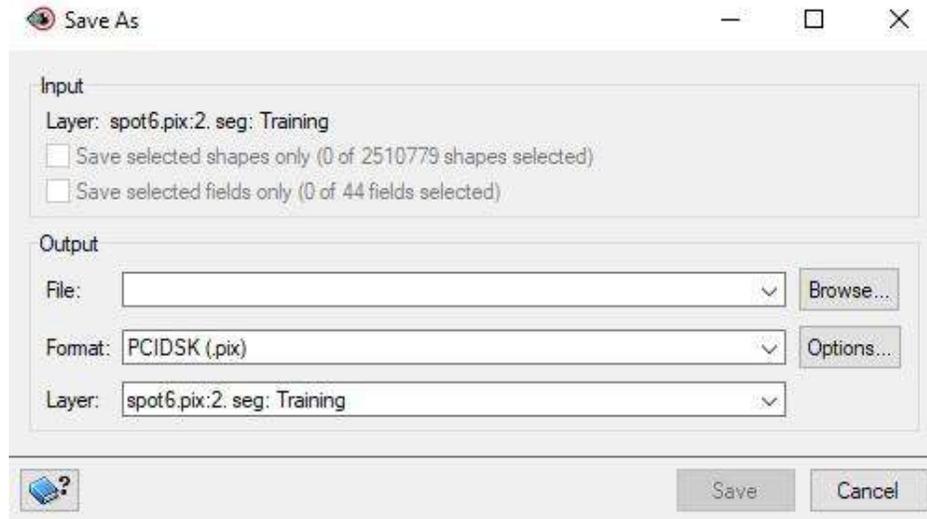
Al hacer click en Edit..., aparecerá la ventana en la cual se introducirá las categorías identificadas en la imagen.



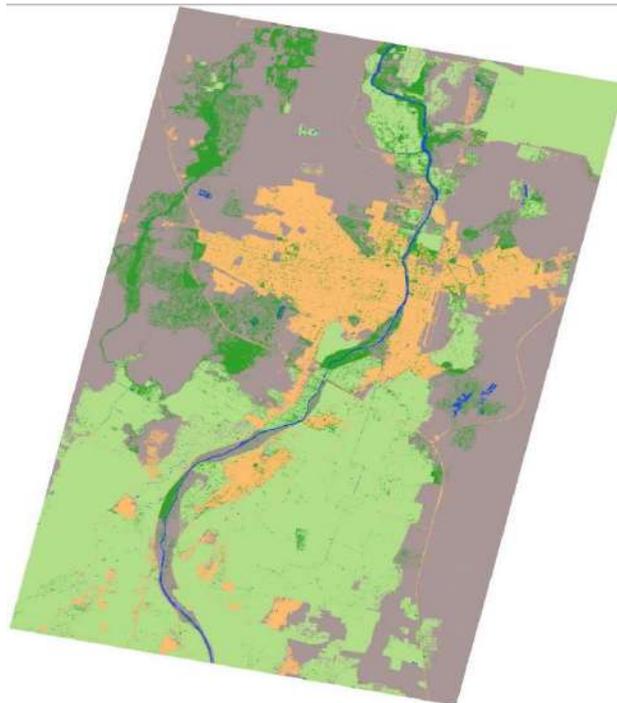
19. Luego en la opción *Operation* seleccionar *Supervised Classification* y indicas la ruta para guardar el resultado.



20. Luego se guarda el resultado en formato shapefile, se selecciona la capa y se hace click derecho y se selecciona Save As... Par editar el resultado se usa un software libre como el QGIS.



21. Resultado final



XI. BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Limusa, SA. de C.V.
- Araujo, A. (1983). *Tratamiento de datos hidrometeorológicos*.
- Ardila, J., Espejo, O. y Herrera, J. (2005). Validación de una metodología de clasificación de imágenes satelitales en un entorno Orientado a Objetos. P.61-69.
- Brunner, G., & CEIWR-HEC. (2016). *HEC-RAS. Sistema de análisis de ríos, manual de usuario modelado 2D*.
- Bock, M., Xofis, P., Mitchley, J., Rossner, G. y Wissen, M. (2005). Object-oriented methods for hábitat mapping at multiple scales – Case studies from Northern Germany and Wye Downs, UK. *Journal for Nature Conservation*, v.13, n.2-3, p 75-89.
- CENAPRED. (2004). *Fascículo de inundaciones*.
- CENEPRED. (2015). *Manual para la Evaluación de Riesgos originados por Fenómenos Naturales—2da Versión*.
- Chereque, W. (1989). *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil* (2da edición).
- Chow, V. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*.
- Chow, V., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Nomos S. A.
- ENFEN. (2022). *Comunicado oficial de El Estudio Nacional del fenómeno «El Niño» N°05-2022*.
<http://enfen.gob.pe/download/comunicado-oficial-enfen-n-05-2022/?wpdmdl=1730&ind=1652491965348>
- García, J., & Rodríguez, M. (2016). *Método de muskingum para el estudio de tránsito de crecientes en el río Atrato entre las estaciones “el siete y Gindrama” en el departamento del chocó*.
- GWP. (2011). *Cartilla técnica: ¿Qué es una cuenca Hidrológica?*
- INDECI. (2011). *Manual de Estimación del Riesgo ante inundaciones fluviales*.

- INGEMMET. (2017). Evaluación geológica de las zonas afectadas por El Niño Costero 2017 en la región Piura.
- MTC. (2008). *Manual de hidrología, hidráulica y drenaje*.
- Ochoa, B., Cuadros, J., Arapa, E., Aste, N., Ochoa, E., & Bonnesoeur, V. (2022). *Guía de modelación hidrológica Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica para la infraestructura natural*. Esta publicación fue posible gracias al apoyo de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y el Gobierno de Canadá.
- OMM. (2014). *El Niño/Southern Oscillation*. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=16749#.Yn1cy-hBzIV
- OMM. (2020). *Guía de prácticas hidrológicas*.
- Orellana, R. (2021). *Modelamiento Hidrológico e Hidráulico para el análisis de inundaciones en la ciudad de Piura utilizando HEC-HMS y HEC-RAS*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- PCM. (2015). *Lineamientos para la Conformación y Funcionamiento de la Red Nacional de Alerta Temprana—RNAT Y la Conformación, Funcionamiento y Fortalecimiento de los Sistemas de Alerta Temprana—SAT*. <https://www.gob.pe/institucion/indeci/informes-publicaciones/1093212-resolucion-ministerial-n-173-2015-pcm>
- PCM. (2020). *Protocolo para la emisión de avisos, alertas y alarmas ante lluvias intensas y peligros asociados*. <https://www.gob.pe/institucion/pcm/normas-legales/441862-049-20020-pcm>
- Pérez, C. y Muñoz, A. (2006), *Teledetección Nociones y Aplicaciones*. Copy-righted Material – España.
- Pereyra, L. (2013). *Hydracces—Manual de usuario básico*.
- *Protocolo para la emisión de avisos, alertas y alarmas ante lluvias intensas y peligros asociados. Resolución Ministerial N° 049-2020-PCM*. (2020).
- Rivano, F. (2004). *Análisis de eventos extremos de precipitación y su efecto en el diseño de drenaje superficial de tierras agrícolas del sur de Chile*.
- SENAMHI. (2014). *El Fenómeno de El Niño en el Perú*.

- Sobrino, J. (2000). *Teledetección*. Universitat de Valencia. España.
- Takahashi, K. (2017). *Artículo de divulgación científico. Fenómeno El Niño: «Global» vs «Costero»*. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5101>
- U.S. Water Resources Council. (1981). *Guidelines for Determining «Flood Flow Frequency»*.
- Villón. (2002a). *Hidrología* (Segunda Edición). Villón.
- Villón. (2002b). *Hidrología Estadística* (Segunda Edición). Villón.
- Villón, M. (2010). *HEC-HMS Ejemplos* (2da Edición).
- WMO, UNESCO. (2012). *International glossary of hydrology. Switzerland: World Meteorological Organization*.