



Proyecto #: RG-T2416

INFORME FINAL

**PERFIL DE RIESGO DE DESASTRES PARA BOLIVIA
ANTE INUNDACIONES Y DESLIZAMIENTOS EN
CUENCAS SELECCIONADAS**

Consultor



**Ingeniería Técnica y Científica S.A.S.
Calle 83 # 16A – 44 Oficina 606
Tel.: (57-1) 702 2947
Bogotá D.C., Colombia**

**Noviembre de 2015 (Primera entrega)
Mayo de 2016 (Versión final)**

Dirección y Coordinación de Grupos de Trabajo Técnico

Luis Eduardo Yamin
Dirección General del Proyecto

Natalia León B.
Coordinación Técnica

Álvaro Iván Hurtado
Ingeniero Especialista

Especialistas y Asesores

Mauricio F. Villazón
Ingeniero Especialista (BOL)

Mario Díaz-Granados O.
Ingeniero Especialista

Rodolfo de Jesús Franco
Geólogo Especialista

Julián Tristancho
Ingeniero Especialista

Juan Carlos Reyes
Ingeniero Especialista

Diego Alejandro Páez
Ingeniero Especialista

Daniela Rincón
Ingeniera Especialista

Diego Armando Inturias
Ingeniero de soporte técnico (BOL)

Fabio Alejandro Lagos
Asistente técnico

María Cristina Londoño
Asistente técnico

Andres Felipe Rojas
Asistente técnico

Carolina Herrera
Asistente técnico

Laura Lunita López
Ingeniera Especialista

Contenido

1	INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES	1
1.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PAÍS Y CONTEXTO PARA EL RIESGO	1
1.2	HIDROGRAFIA	3
1.3	INFORMACIÓN GENERAL SOBRE AMENAZAS NATURALES Y EVENTOS CATASTRÓFICOS EN BOLIVIA.....	5
1.3.1	Estadísticas generales	5
1.3.2	Eventos específicos relevantes	8
1.4	BASE DE DATOS DESINVENTAR	13
1.4.1	Información general	13
1.4.2	Eventos de inundación	18
1.4.3	Eventos de deslizamiento	21
1.5	INFORMACIÓN DISPONIBLE PARA EL ANÁLISIS DE AMENAZA Y RIESGO ...	26
1.6	INFORMACIÓN GENERAL DE CUENCAS A NIVEL PAÍS.....	32
2	ASPECTOS METODOLÓGICOS	35
2.1	METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE INUNDACIONES	35
2.2	METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS	38
2.3	METODOLOGÍA ESPECÍFICA PARA EL ANÁLISIS DE AMENAZA POR INUNDACIONES.....	40
2.3.1	Software utilizado en el análisis de amenaza de inundación.....	40
2.3.2	Amenaza de lluvia.....	42
2.3.3	Amenaza de inundación	43
2.3.4	Datos requeridos para el análisis	¡Error! Marcador no definido.
2.4	METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN PROBABILISTA DE RIESGO.....	43
2.4.1	Metodología general para la evaluación del riesgo	43
2.4.2	Evaluación probabilista del riesgo	44
2.4.3	Módulos de análisis para la evaluación del riesgo	45
2.4.4	Cálculo numérico básico	47
2.4.5	Incertidumbres.....	49
2.4.6	Estimadores puntuales del riesgo	49

2.4.7	Probabilidad de excedencia de valores de pérdida	50
2.4.8	Análisis para un solo escenario	50
3	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS SIMPLIFICADOS DE SUSCEPTIBILIDAD A LAS INUNDACIONES Y A LOS DESLIZAMIENTOS	51
3.1	EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LAS INUNDACIONES A NIVEL PAÍS	51
3.2	INDICADORES GENERALES DE RIESGO POR INUNDACIÓN.....	59
3.3	EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS.....	63
3.4	INDICADORES GENERALES DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS.....	69
4	SELECCIÓN DE CUENCAS PARA EL ANÁLISIS DEL RIESGO POR INUNDACIONES	75
4.1	GENERALIDADES.....	75
4.2	CONDICIONES DE AMENAZA Y RIESGO DE CUENCAS PRINCIPALES	78
4.2.1	Cuenca del Río Grande	78
4.2.2	Cuenca del Río Pirai.....	79
4.2.3	Cuenca del Río Rocha	80
4.2.4	Cuenca del Río Pilcomayo	80
4.2.5	Cuenca del Río Caine	80
4.2.6	Cuenca del Río Yapacaní	81
4.2.7	Cuenca del Río Mamoré.....	81
4.3	SELECCIÓN DE CUENCAS CRÍTICAS PARA EL ANÁLISIS	82
4.4	DESCRIPCIÓN DE CUENCAS Y TRAMOS CRÍTICOS PARA EL ANÁLISIS	84
4.4.1	Cuenca del Río Rocha	84
4.4.2	Cuenca del Río Grande	87
5	EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN EN TRAMOS CRÍTICOS	91
5.1	GENERALIDADES.....	91
5.2	AMENAZA DE LLUVIA EN CUENCAS SELECCIONADAS	91
5.2.1	Información de precipitación.....	91
5.2.2	Curvas PADF representativas en las cuencas.....	97
5.2.3	Escenarios estocásticos que representan la amenaza de lluvia.....	97
5.2.4	Figuras probabilistas de amenaza de lluvias	100
5.3	AMENAZA POR INUNDACIÓN.....	103

5.3.1	Información para el análisis de amenaza por inundación.....	103
5.3.2	Modelación hidrológica.....	103
5.3.3	Modelación hidráulica.....	105
5.4	CALIBRACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS	107
5.4.1	Implementación y calibración del modelo hidrológico HEC-HMS con datos de precipitación (SISMET - SENAMHI) en la cuenca del rio Rocha	107
5.4.2	Implementación y calibración del modelo hidrológico HEC-HMS con datos de precipitación (SISMET - SENAMHI) en la cuenca del río Grande	120
5.5	CALIBRACIÓN DE MODELOS HIDRÁULICOS	134
5.5.1	Análisis y reconstitución de series de tiempo de caudal	134
5.5.2	Calibración del modelo hidráulico HEC-RAS	142
5.5.3	Validación del modelo HEC-RAS	145
5.5.4	Delimitación y validación de las áreas de inundación.....	150
5.6	RESULTADOS DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN EN LOS TRAMOS CRÍTICOS.....	161
5.6.1	Archivos .AME de inundación.....	161
5.6.2	Amenaza de inundación probabilistas	161
6	ANÁLISIS DE EXPOSICIÓN Y DE VULNERABILIDAD DE COMPONENTES EXPUESTOS	166
6.1	GENERALIDADES.....	166
6.1.1	Introducción	166
6.1.2	Información básica requerida	167
6.1.3	Información integral en centros poblados	167
6.2	INFORMACIÓN DE COMPONENTES EXPUESTOS EN ZONAS URBANAS.....	168
6.2.1	Levantamiento de información para conformar la base de datos	168
6.2.2	Criterios de clasificación de los tipos de componentes expuestos	168
6.2.3	Conformación de bases de datos de exposición	174
6.2.4	Validación de la información de bases de datos de exposición.....	176
6.2.5	Tipos constructivos principales en cuencas de estudio	178
6.2.6	Criterios para valoración de tipos constructivos principales	182
6.2.7	Ocupación.....	183
6.2.8	Base de datos de información de exposición.....	185
6.3	VULNERABILIDAD FÍSICA.....	187

6.3.1	Generalidades	187
6.3.2	Funciones de vulnerabilidad para construcciones y zonas de cultivos.....	187
6.3.3	Información de vulnerabilidad de construcciones.....	189
6.3.4	Información de vulnerabilidad de tipos de cultivos	192
7	ANÁLISIS DEL RIESGO POR INUNDACIÓN	194
7.1	GENERALIDADES.....	194
7.2	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL RIESGO.....	194
7.2.1	Parámetros para la interpretación de los resultados del riesgo.....	194
7.2.2	Resultados del análisis de riesgo por cada componente para la cuenca del río Rocha	195
7.2.3	Resultados del análisis de riesgo por cada componente para la cuenca del río Grande	206
7.2.4	Resumen e integración de resultados del análisis de riesgo	216
7.2.5	Riesgo representativos.....	217
7.2.6	Otros impactos por inundación.....	219
8	CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS PARA INUNDACIONES FRECUENTES ..	232
8.1	MARCO GENERAL Y PROPÓSITO	232
8.2	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS	233
8.2.1	Agrupación temporal y espacial.....	233
8.2.2	Modelo de costos.....	234
8.2.3	Suposiciones básicas para el análisis.....	234
8.3	CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS POR INUNDACIONES	237
9	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	239
9.1	PERFIL GENERAL DE RIESGO DE INUNDACIONES A NIVEL PAÍS	239
9.2	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	240
9.3	LIMITACIONES EN LAS EVALUACIONES ANALÍTICAS	243
9.4	RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIÓN..	244
9.4.1	Identificación del riesgo	244
9.4.2	Zonificación de riesgos por inundación	245
9.4.3	Prevención y mitigación del riesgo por inundación	245
9.4.4	Sistemas de monitoreo y alarma en las cuencas críticas	246
9.4.5	Protección financiera.....	246

9.4.6	Planes de contingencia y atención de emergencias	246
10	REFERENCIAS	248
11	ANEXOS.....	253

ANEXO 1 - PROCEDIMIENTO ANALÍTICO PROPUESTO PARA LA EVALUACION DE LA AMENAZA POR INUNDACIONES PRODUCIDAS POR LLUVIAS INTENSAS

ANEXO 2 - RECORRIDOS DE CAMPO PARA EL LEVANTAMIENTO DE ELEMENTOS EXPUESTOS EN LA CUENCA DEL RÍO ROCHA

ANEXO 3 - FICHAS DE CARACTERIZACIÓN DE TIPOS CONSTRUCTIVOS

ANEXO 4 - FICHAS DE CARACTERIZACIÓN DE CULTIVOS

ANEXO 5 - DESCRIPCION DEL SOFTWARE UTILIZADO

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación general Bolivia.	1
Figura 2. Relieve de Bolivia.	2
Figura 3. Macrocuenas de Bolivia.	3
Figura 4. Ríos principales de Bolivia.	5
Figura 5. Afectación por evento de lluvias 2014.	9
Figura 6. Inundaciones en el departamento de Beni durante el 2014.	11
Figura 7. Inundaciones en el municipio de Trinidad, Beni.	12
Figura 8. Inundaciones en los departamentos de Beni y Santa Cruz en 2007 y 2008.	13
Figura 9. Número total de registros en DesInventar	17
Figura 10. Número de registros de inundación por año en Bolivia reportados en DesInventar 18	
Figura 11. Número total de registros de inundación reportados en DesInventar por municipio (1970-2012).	19
Figura 12. Número de registros de inundación por año 20	
Figura 13. Registros de inundaciones desagregados por meses de acuerdo a la década. 20	
Figura 14. Eventos de inundaciones promedios de décadas desagregados mes a mes (1970 – 2009) 21	
Figura 15. Número de registros por año para eventos de deslizamiento en Bolivia reportados en DesInventar 22	
Figura 16. Número de registros de deslizamientos registrados en DesInventar por municipio (1970-2012). 22	
Figura 17. Registros de deslizamientos reportados anualmente (1970-2012) por DesInventar 23	
Figura 18. Desagregación de la distribución de registros por década y para cada uno de los meses 24	
Figura 19. Número promedio de registros por décadas desde 1970 hasta 2000 y desde 1970 a 2012 24	
Figura 20. División administrativa de Bolivia. 26	
Figura 21. Principales ríos de Bolivia. 27	
Figura 22. Modelo de elevación digital. 27	
Figura 23. Usos del suelo y cuencas. 28	
Figura 24. Ubicación de estaciones del SENAMHI a lo largo del país. 28	
Figura 25. Centros poblados. 29	
Figura 26. Información por provincia de distribución de población. a) Distribución de población por provincia, b) Densidad poblacional por provincia, y c) Distribución de área construida por provincia, en Bolivia. 29	
Figura 27. Formaciones geológicas. 30	
Figura 28. Fisiografía. 30	
Figura 29. Procedimiento de análisis simplificado para identificación de zonas bajo amenaza de inundación. 37	
Figura 30. Programa HEC-HMS desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers) 41	
Figura 31. Programa HEC-RAS desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers) 42	
Figura 32. Funcionamiento del software IT-Inundación 1.0. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 33. Esquema general del análisis de riesgo probabilista. 45	

Figura 34. Ubicación de estaciones utilizadas para el análisis simplificado de inundaciones y deslizamientos.	51
Figura 35. Precipitación en Bolivia. Promedio diario más desviación estándar (mm).	52
Figura 36. Precipitación en Bolivia. Promedio mensual (mm).	52
Figura 37. Calificación de susceptibilidad	53
Figura 38. Zonas susceptibles a inundaciones en Bolivia.	54
Figura 39. Zonas susceptibles de inundación en la cuenca del Río Rocha.	55
Figura 40. Zonas susceptibles de inundación en la cuenca del Río Grande.	55
Figura 41. Zonas susceptibles de inundación en la cuenca Alta del Río Mamoré.	56
Figura 42. Zonas susceptibles de inundación en la cuenca Baja del Río Mamoré.	56
Figura 43. Zonas susceptibles de inundación en la cuenca del Río Yapacaní.	57
Figura 44. Zonas susceptibles de inundación en la cuenca del Río Itenez.	57
Figura 45. Población vs. Susceptibilidad a inundación.	59
Figura 46. Cuencas vs. susceptibilidad a inundación.	60
Figura 47. Usos del suelo vs. susceptibilidad a inundación.	60
Figura 48. Indicadores de riesgo por inundación en Bolivia.	62
Figura 49. Pendientes.	63
Figura 50. Escenarios estocásticos para el análisis.	65
Figura 51. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 1.	66
Figura 52. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 2.	66
Figura 53. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 3 escenario sísmico No. 1.	67
Figura 54. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 3 escenario sísmico No. 2.	67
Figura 55. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 3 escenario sísmico No. 3.	68
Figura 56. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 2 para las cuencas.	69
Figura 57. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 2, ciudad de Cochabamba.	70
Figura 58. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 2, ciudad de La Paz.	70
Figura 59. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 2, ciudad de Sucre.	71
Figura 60. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 2, ciudad de Santa Cruz.	71
Figura 61. Población en zonas susceptibles por deslizamientos por municipios para la condición 2 de análisis.	72
Figura 62. Zonas susceptibles a deslizamientos según uso del suelo para la condición 2 de análisis.	74
Figura 63. Cuencas y subcuencas de Bolivia.	76
Figura 64. Ríos principales.	78
Figura 65. Cuencas seleccionadas para el análisis	84
Figura 66. Ubicación geográfica de la zona expuesta en la cuenca del río Rocha.	85
Figura 67. Localización de zonas susceptibles a inundación y entorno de la Cuenca Río Rocha. ...	86
Figura 68. Susceptibilidad a las inundaciones para la cuenca del río Rocha	87
Figura 69. Ubicación geográfica de la zona expuesta en la cuenca del río Grande	88
Figura 70. Localización de zonas susceptibles a inundación y entorno de la cuenca Río Grande. ...	90
Figura 71. Susceptibilidad a las inundaciones de la cuenca del Río Grande	90

Figura 72. Precipitación media mensual multiestación en la cuenca del río Rocha.....	95
Figura 73. Precipitación media mensual multianual multiestación en la cuenca del río Grande	95
Figura 74. Precipitación media mensual en estaciones representativas en la cuenca del río Rocha .	96
Figura 75. Precipitación media mensual en estaciones representativas en la cuenca del río Grande	96
Figura 76. Curvas PADF para 1 día de duración – cuenca del río Rocha.....	97
Figura 77. Curvas PADF para 5 días de duración – cuenca del río Grande.....	97
Figura 78. Escenarios de lluvia para diferentes periodos de retorno - cuenca del río Rocha. Profundidad de precipitación en [mm]	98
Figura 79. Escenarios de lluvia para diferentes periodos de retorno – cuenca del río Grande. Profundidad de precipitación en [mm]	99
Figura 80. Distribución de amenaza probabilista de lluvias – Duración: 1 día - Cuenca del río Rocha. Profundidad de precipitación en [mm].....	100
Figura 81. Distribución de amenaza probabilista de lluvias – Duración: 5 días - Cuenca del río Grande. Profundidad de precipitación en [mm]	101
Figura 82. Distribución de amenaza probabilista de lluvias – Duración: 1 día – Periodo de retorno: 100 años – Cuenca del río Rocha. Profundidad de precipitación en [mm]	102
Figura 83. Distribución de amenaza probabilista de lluvias – Duración: 5 días – Periodo de retorno: 100 años – Cuenca del río Grande. Profundidad de precipitación en [mm].....	102
Figura 84. Modelo de elevación digital – Cuenca del río Rocha. Fuente: EarthExplorer USGS(2014) y Satellite Imaging Corporation	104
Figura 85. Modelo de elevación digital – Cuenca del río Grande. Fuente: EarthExplorer USGS (2014)	104
Figura 86. Modelos HEC-HMS de la cuenca de a) río Rocha y b) río Grande.....	105
Figura 87. Información ilustrativa disponible para el análisis de inundación en la cuenca del río Rocha.....	106
Figura 88. Información ilustrativa disponible para el análisis de inundación en la cuenca del río Grande.....	106
Figura 89. Zonas hidrológicamente homogéneas cuenca del río Rocha	108
Figura 90. Representación del sistema de la cuenca del río Rocha en el software HEC – HMS ...	111
Figura 91. Gráfica de almacenamiento de cuña.	114
Figura 92. Polígonos de Thiessen cuenca del río Rocha.....	117
Figura 93. Control de Specifications, HEC HMS	117
Figura 94. Hidrograma de salida de la cuenca del río Rocha Tr=50 años, Escenario A	119
Figura 95. Subcuencas de la Cuenca del Río Grande y Estaciones Meteorológicas cercanas, usados en el modelo	121
Figura 96. Métodos usados Subcuenca W990, para la modelación del Río Grande con el software HEC - HMS.....	122
Figura 97. Caudales de Abapó filtrados con la Herramienta Subflow Filtering del WETSPRO....	123
Figura 98. Selección de eventos independientes de los caudales de Abapó, obtenidos con la Herramienta POT Selection del WETSPRO	124
Figura 99. Esquema de la Cuenca del Río Grande cargado al HEC – HMS.....	125
Figura 100. Serie de tiempo de caudales Observados y Modelados: a) Escala Lineal y b) Escala Semi-logarítmica	127
Figura 101. Acumulados de Caudal Observados y Modelados.....	128
Figura 102. Scatter plot Modeling.....	128
Figura 103. Corrida en HEC-HMS, Estación Abapó	129
Figura 104. Corrida en HEC-HMS para un año (2006-2007), Estación Abapó.....	129
Figura 105. Serie de tiempo de caudales Observados y Modelados (Escala Lineal)	130
Figura 106. Serie de tiempo de caudales Observados y Modelados (Escala Semi-logarítmica).....	131

Figura 107. Acumulados de Caudal Observados y Modelados.....	131
Figura 108. Scatter plot Modeling.....	132
Figura 109. Corrida en HEC-HMS, Estación Pailas	132
Figura 110. Corrida en HEC-HMS para un año (2011-2012), Estación Pailas.....	133
Figura 111. Curvas de Descarga construidas a partir de aforos realizados por el LHUMSS: a) Puente Cajon y b) Puente Urkupiña	134
Figura 112. Variación temporal de la curva de descarga: a) Puente Pailas periodo 2010 – 2012, b) Abapó periodo 2005 - 2012.....	136
Figura 113. Comparación de las técnicas de Familia de curvas de descarga vs. una sola curva, estación Abapó: a) grafica de dispersión, b) distribución empírica de valores extremos	138
Figura 114. Series continuas de caudales diarios en la estación Abapó con los aforos instantáneos medidos por el SEARPI y el SENAMHI, periodos: a) 2005-2008, b) 2008-2012	139
Figura 115. Series continuas de niveles diarios en la estación Abapó con los niveles instantáneos registrados durante los aforos por el SEARPI y el SENAMHI, periodos: a) 2005-2008, b) 2008-2012.....	140
Figura 116. Series continuas diarias en la estación Puente Pailas con los aforos instantáneos por el SEARPI: a) caudales, b) niveles de agua	141
Figura 117. Hidrogramas de entrada al modelo HEC-RAS: a) Rio Rocha y b) Rio Grande	143
Figura 118. Geometría ingresada al HEC-RAS de las cuencas: a) Rio Rocha y b) Rio Grande.....	144
Figura 119. a) Curva de Descarga Puente Cajon (Aeropuerto-CBBA) vs. Sección 17970.05 y b) Sección 17970.05 (HEC-RAS)	146
Figura 120. a) Curva de Descarga Puente Urkupiña vs. Sección 6661.542 extendida y b) Sección 6661.542 (HEC-RAS)	147
Figura 121. a) Curva de Descarga Abapó (Paraíso) vs. Sección 483374.6 y b) Sección 483374.6 (HEC-RAS).....	149
Figura 122. a) Curva de Descarga Puente Pailas vs. Sección 298608.8 y b) Sección 298608.8 (HEC-RAS).....	150
Figura 123. Inundación 2011- Observada vs. Modelada, Rio Rocha.....	152
Figura 124. Secciones transversales tomadas en cuenta para la modelación hidráulica del Rio Rocha	153
Figura 125. Inundación 2011 vs. Inundación 2011 con tormenta de magnitud doble de dicho año (ambas modeladas), Rio Rocha.....	154
Figura 126. Inundación 2008- Modelada vs Observada, Rio Grande	156
Figura 127. Secciones transversales tomadas en cuenta para la modelación hidráulica del Rio Grande.....	157
Figura 128. Inundación 2008 vs. Inundación 2008 con tormenta de magnitud doble de dicho año (ambas modeladas), Rio Grande	158
Figura 129. Inundación Modelada 2008 vs. Inundaciones Observadas 2001, 2004 y 2008 (Rio Grande).....	159
Figura 130. Inundación probabilista en la cuenca del río Rocha para duración de 1 día. Profundidad de inundación en [m].....	163
Figura 131. Inundación probabilista para la cuenca del río Grande para duración de 5 días. Profundidad de inundación en [m].....	165
Figura 132. Fotografías representativas de los diferentes tipos identificados en la cuenca del río Rocha.....	172
Figura 133. Fotografías representativas de los diferentes tipos de componentes identificados en la cuenca del río Grande.....	173
Figura 134. Levantamiento de edificaciones expuestas en la cuenca del río Rocha	174
Figura 135. Levantamiento de edificaciones expuestas en la cuenca del río Grande	175

Figura 136. Municipios que componen la zona expuesta de la cuenca del río Grande.....	176
Figura 137. Gráfico de frecuencia de número de edificaciones según tipo constructivo – Cuenca del río Rocha.....	181
Figura 138. Gráfico de frecuencia de número de edificaciones según tipo constructivo – Cuenca del río Grande.....	181
Figura 139. Ocupantes por m ² en la Cuenca del río Rocha.....	183
Figura 140. Ocupantes promedio por m ² en la Cuenca del río Grande.....	184
Figura 141. Función de vulnerabilidad típica en la plataforma CAPRA	189
Figura 142. Funciones de vulnerabilidad para edificaciones con sus respectivas incertidumbres (la leyenda corresponde al ID presentado en la Tabla 53)	191
Figura 143. Funciones de vulnerabilidad para cultivos.....	193
Figura 144. Curva de pérdida máxima probable vs. periodo de retorno. Cuenca Río Rocha	196
Figura 145. Pérdidas esperadas para el escenario crítico. Cuenca Río Rocha	198
Figura 146. Lluvia que genera el escenario crítico de riesgo. Cuenca Río Rocha	198
Figura 147. Escenario crítico de inundación. Cuenca Río Rocha	199
Figura 148. Pérdidas esperadas para el escenario crítico en valor absoluto (US\$). Cuenca Río Rocha	199
Figura 149. Pérdidas esperadas para el escenario crítico con respecto al valor de reposición individual (%). Cuenca Río Rocha.....	199
Figura 150. Resultados de pérdidas para el portafolio de escenarios de inundación. Cuenca Río Rocha.....	200
Figura 151. Resultados para el escenario 505. Cuenca Río Rocha	201
Figura 152. Resultados para el escenario 575. Cuenca Río Rocha	202
Figura 153. Resultados para el escenario 592. Cuenca Río Rocha	203
Figura 154. Resultados para el escenario 594. Cuenca Río Rocha	204
Figura 155. Resultados para el escenario 595. Cuenca Río Rocha	205
Figura 156. Resumen de pérdidas esperadas por tipo de uso para cinco escenarios críticos en la cuenca río Rocha.....	206
Figura 157. Curva de pérdida máxima probable vs. periodo de retorno. Cuenca Río Grande.....	207
Figura 158. Pérdidas esperadas para el escenario crítico. Cuenca Río Grande.....	209
Figura 159. Lluvia que genera el escenario crítico de riesgo. Cuenca Río Grande.....	209
Figura 160. Escenario crítico de inundación. Cuenca Río Grande.....	210
Figura 161. Pérdidas esperadas para el escenario crítico en valor absoluto (US\$). Cuenca Río Grande.....	210
Figura 162. Pérdidas esperadas para el escenario crítico con respecto al valor de reposición individual (%). Cuenca Río Grande	210
Figura 163. Resultados de pérdidas para el portafolio de escenarios de inundación. Cuenca Río Grande.....	211
Figura 164. Resultados para el escenario 11. Cuenca Río Grande.....	212
Figura 165. Resultados para el escenario 16. Cuenca Río Grande.....	213
Figura 166. Resultados para el escenario 17. Cuenca Río Grande.....	214
Figura 167. Resultados para el escenario 18. Cuenca Río Grande.....	215
Figura 168. Resumen de pérdidas esperadas por tipo de uso para cinco escenarios en la cuenca del río Grande.....	216
Figura 169. Riesgo de inundaciones para el escenario crítico de análisis para la cuenca del río Rocha.....	217
Figura 170. Riesgo de inundaciones para el escenario crítico de análisis para la cuenca del río Grande.....	218
Figura 171: Corredores RVF. Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras (ABC)	220

Figura 172. Corredor Este-Oeste Bolivia.....	221
Figura 173. Desviación por inundación para el corredor Este-Oeste Bolivia	222
Figura 174. Trayecto 1: Pto. Suarez a Desaguadero. a) Trayecto sin considerar inundación; b) Desvío por inundación	223
Figura 175. Trayecto 2: Pto. Suarez a Tambo Quemado. a) Trayecto sin considerar inundación; b) Desvío por inundación	223
Figura 176. Trayecto 3: Pto. Suarez a Pisiga. a) Trayecto sin considerar inundación; b) Desvío por inundación	224
Figura 177. Trayecto 4: San Matías a Desaguadero. a) Trayecto sin considerar inundación; b) Desvío por inundación	224
Figura 178. Trayecto 5: San Matías a Tambo Quemado. a) Trayecto sin considerar inundación; b) Desvío por inundación	225
Figura 179. Trayecto 6: San Matías a Pisiga. a) Trayecto sin considerar inundación; b) Desvío por inundación	225
Figura 180. Pérdidas humanas vs. Número de afectados por inundación en Bolivia.....	228
Figura 181. No. de pérdidas humanas por cada 100,000 afectados por inundación en países de Suramérica.....	229
Figura 182. Pérdidas de vidas humanas vs. Número de eventos históricos en Bolivia.....	231
Figura 183. Porcentaje de eventos históricos de inundación con pérdidas humanas en Bolivia.....	231
Figura 184. Curva empírica de excedencia de pérdidas por eventos frecuentes de inundación en Bolivia.....	237
Figura 185. Curva empírica de excedencia de pérdidas por eventos frecuentes de deslizamiento en Bolivia.....	238

Índice de tablas

Tabla 1. Ríos principales de Bolivia. Fuente: Instituto Geográfico Nacional: http://www.igmbolivia.gob.bo/	4
Tabla 2. Eventos naturales con mayor afectación humana. Fuente: (PreventionWeb, 2011)	6
Tabla 4. Eventos naturales con mayores pérdidas económicas reportadas. Fuente: (PreventionWeb, 2011)	6
Tabla 6. Principales campos en la base de datos DesInventar	14
Tabla 7. Categorías de eventos y causas asociadas	15
Tabla 8. Características de los tipos de eventos más relevantes registrados en DesInventar- Bolivia	15
Tabla 9. Características de los registros de inundación y deslizamiento reportados en DesInventar Bolivia	17
Tabla 10. Eventos de inundación de mayor impacto registrados entre 1970 y 2012 en DesInventar Bolivia	19
Tabla 11. Eventos de deslizamiento de mayor impacto registrados entre 1970 y 2012 en DesInventar Bolivia	23
Tabla 12. Distribución de la población en ciudades susceptibles a inundación. Fuente: Capas shape de división política del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia y Capa raster de distribución espacial de población obtenida de WorldPop	31
Tabla 13. Características generales de las Regiones Hidrográficas de Bolivia. Fuente: Capas shape de cuencas y ríos del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia, Capa raster de distribución espacial de población obtenida de WorldPop y Capa raster de topografía obtenida de ASTER-GDEM	33
Tabla 14. Población en riesgo de inundación en las Regiones Hidrográficas de Bolivia. Fuente: Capas shape de cuencas y de división política del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia y Capa raster de distribución espacial de población obtenida de WorldPop	34
Tabla 15. Datos relevantes de las zonas susceptibles	58
Tabla 16. Indicadores de riesgo por inundación para zonas susceptibles principales	61
Tabla 17. Escenarios sísmicos considerados	64
Tabla 18. Indicadores de riesgo por deslizamientos a nivel departamental condición 2 de análisis	72
Tabla 19. Indicadores de riesgo por deslizamientos por municipio, condición 2 de análisis	73
Tabla 20. Información de interés de algunas de las cuencas más relevantes de Bolivia	77
Tabla 21. Matriz de calificación de selección de cuencas	83
Tabla 22. Información relevante de la cuenca del río Rocha	85
Tabla 23. Cuenca del Río Grande	89
Tabla 24. Características de las estaciones y periodos de tiempo con información disponible	92
Tabla 25. Escenarios de registro de lluvia	109
Tabla 26. Escenarios adoptados	110
Tabla 27. Datos de entrada HEC HMS subcuencas de la cuenca del río Rocha	115
Tabla 28. Parámetros de Muskingum Cunge	116
Tabla 29. Resumen caudales de salida $T_r = 50$ años	118
Tabla 30. Análisis comparativo de resultados con estudios previos	120
Tabla 31. Áreas de las Subcuencas de la Cuenca del Río Grande, usadas en el modelo	121
Tabla 32. Métodos usados en el software HEC – HMS, para la modelación del Río Grande	121
Tabla 33. Parámetros finales de la modelación de la Cuenca del Río Grande en el HEC–HMS, para Abapó y Pailas	125

Tabla 34. Valores Estadísticos de la calibración final del modelo HEC-HMS de la cuenca del Río Grande en la Estación Abapó	126
Tabla 35. Valores Estadísticos de la calibración final del modelo HEC-HMS de la cuenca del Río Grande en la Estación Pailas	130
Tabla 36. Parámetros estadísticos de evaluación de las técnicas de estimación de caudales horarios	137
Tabla 37. Archivos de amenaza de inundación generados para cada una de las cuencas analizadas	161
Tabla 38. Tipos de componentes principales en la zona expuesta de la cuenca del río Rocha	169
Tabla 39. Tipos de componentes principales en la zona expuesta de la cuenca del río Grande	169
Tabla 40. Resumen de la información contenida en los archivos de exposición	175
Tabla 41. Número de viviendas por municipio en la zona expuesta de la cuenca del río Grande ..	177
Tabla 42. Validación del número total de viviendas	177
Tabla 43. Número de habitantes por municipio en la zona expuesta en la cuenca del río Grande	177
Tabla 44. Validación del número total de habitantes	178
Tabla 45. Categorías de uso en la cuenca del río Rocha	178
Tabla 46. Número de viviendas por tipo constructivo en cada municipio de la zona expuesta en la cuenca del río Grande.....	179
Tabla 47. Principales tipos constructivos por municipio de la zona expuesta en la cuenca del río Grande	179
Tabla 48. Categorías de uso en la cuenca del río Grande.....	180
Tabla 49. Resumen de información de valoración económica disponible para tipos constructivos. (Valores indicativos)	182
Tabla 50. Resumen de información de valoración económica disponible para cultivos. (Valores indicativos).....	182
Tabla 51. Base de datos de exposición de edificaciones para el análisis (información indicativa)	185
Tabla 52. Resumen de la información contenida en las bases de datos de exposición	186
Tabla 53. Discriminación de daños por inundación en sistemas constructivos	189
Tabla 54. Relación de tipos de elementos expuestos y funciones de vulnerabilidad para la cuenca del río Rocha	192
Tabla 55. Relación de tipos de elementos expuestos y funciones de vulnerabilidad para la cuenca del río Grande.....	192
Tabla 56. Asignación de funciones por tipo de cultivo y estacionalidad	193
Tabla 57. Resultados generales de riesgo por inundación. Cuenca Río Rocha.....	196
Tabla 58. Escenario crítico de inundación. Cuenca Río Rocha	197
Tabla 59. Pérdidas esperadas por tipo de componente. Cuenca Río Rocha.....	197
Tabla 60. Resumen de pérdida esperada para algunos escenarios críticos de inundación. Cuenca Río Rocha.....	200
Tabla 61. Resultados generales de riesgo por inundación. Cuenca Río Grande	207
Tabla 62. Escenario crítico de inundación. Cuenca Río Grande	208
Tabla 63. Pérdidas esperadas por tipo de componente. Cuenca Río Grande	208
Tabla 64. Resumen de pérdida esperada para algunos escenarios críticos de inundación. Cuenca Río Grande.....	211
Tabla 65. Resumen de resultados del escenario crítico para las cuencas analizadas	216
Tabla 66. Impacto económico por afectación de cultivos en escenarios críticos	219
Tabla 67. Distancia, duración y costo de transporte para el corredor Este-Oeste sin inundación y en su desviación por inundación	226
Tabla 68. Costos de ayuda humanitaria y por afectación a cultivos en escenarios críticos	227
Tabla 69. Tasa de mortalidad por inundación para Bolivia y distintos países de Suramérica	229

Tabla 70. Posible pérdida de vidas humanas en escenarios críticos.....	230
Tabla 71. Criterios de agrupación temporal	233
Tabla 72. Modelo de costos.....	236
Tabla 75. Curva empírica de excedencia de pérdidas por eventos frecuentes de inundación en Bolivia.....	242
Tabla 76. Curva empírica de excedencia de pérdidas por eventos frecuentes de deslizamiento en Bolivia.....	242

1 INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PAÍS Y CONTEXTO PARA EL RIESGO

Bolivia se encuentra ubicada al centro-occidente de América del sur, más precisamente en latitud sur, longitud oeste, delimitada por los paralelos 9°38' y 22°53' y los meridianos 57°25' y 69°38'. Su superficie terrestre es de aproximadamente 1,098,580 km². Su división política consta de nueve departamentos, y su capital administrativa es Sucre mientras que su capital política es La Paz. El último censo (realizado en 2012) estimó la población del país en aproximadamente 10.1 millones de habitantes.



Figura 1. Ubicación general Bolivia.

Fuente: Capas shape de departamentos y fronteras internacionales obtenidos de www.diva-gis.org

Una de las características principales del territorio es la gran diversidad geográfica que se presenta a lo largo de éste. Bolivia es atravesada por dos cordilleras (la occidental y la oriental o real) que forman parte de la cadena montañosa de los Andes. Esto genera una subdivisión del país en seis principales regiones naturales: cordillera occidental, cordillera real, altiplano, sub andina, llanura Chaco y el escudo brasileño.



Figura 2. Relieve de Bolivia.

Fuente: (SkyBTech., 2014)

Debido a esta diversidad en el relieve, en el país se generan múltiples fenómenos climáticos y a su vez, estos fenómenos ocasionan una amenaza específica para cada región. En las regiones del altiplano, la llanura y el escudo brasileño se presentan constantemente inundaciones, sequías y deslizamientos, mientras que en las cordilleras y en la zona sub andina se presentan frecuentes deslizamientos, inundaciones y actividad sísmica moderada. Además de esto, estas diferencias en el relieve a lo largo del país ocasionan climas muy cambiantes en las diferentes regiones de manera que se encuentran lugares con nieves perpetuas, clima húmedo, y zonas áridas.

Las dos cordilleras que atraviesan el país controlan el clima de la zona ya que impiden el paso de aire húmedo que viene de las planicies generando climas secos al oeste del país. Además de esto, las praderas del altiplano se encuentran afectadas por sobre pastoreo por lo que se presenta altos efectos de erosión en esta zona. Por otro lado, en los valles ubicados entre la cadena montañosa se presentan graves problemas durante la época de sequía, que afecta el cultivo de papa, el cual es el alimento y medio de subsistencia básico de la población pobre e indígena. Por otro lado, la amenaza que afecta de forma más recurrente a la población boliviana son las inundaciones y sequías, de forma secundaria, los deslizamientos o remoción de masas ya que estos se observan principalmente después de la época de lluvias o durante la misma.

El Niño, también conocido como ENSO por sus siglas en inglés (El Niño Southern Oscillation), afecta al país de forma distinta a sus vecinos, Ecuador y Perú. En Bolivia, se presenta un aumento en la precipitación cercano al 25% con respecto a la normal climática en las regiones occidentales, mientras que en el altiplano se reduce la precipitación cerca de un 30% respecto a su media normal. Esto ocasiona situaciones de emergencia muy variadas a lo largo del territorio cuando se presenta este fenómeno, sequías en la parte oriental e inundaciones y deslizamientos en la parte occidental en la que se encuentra ubicada La Paz (SENAMHI, 2002).

Por otra parte, en Bolivia, similar a lo que ha venido ocurriendo en todos los países latinoamericanos en las últimas décadas, la población urbana ha presentado un alto crecimiento poblacional, llegando a representar cerca del 60% de la población total (The democracy Center, 2015). Esto, añadido con una falta de planeación y medidas adecuadas de control, ha ocasionado un deterioro de la vida urbana, profundizando la crisis económica, social y medio ambiental, tanto así que se ha estimado que cerca del 50% de la población Boliviana se encuentra en situación de vulnerabilidad social (Chipana, 2013). En la mayoría de ciudades, la capacidad gubernamental de proveer los servicios básicos a toda la población ha sido sobrepasada, lo que ocasiona la formación de asentamientos vulnerables a los diferentes fenómenos naturales. Desde finales del 2003 hasta la fecha, en Bolivia han fallecido más de 400 personas por causa de diversos fenómenos naturales.

1.2 HIDROGRAFIA

Bolivia se encuentra dividida en tres cuencas principales que son: la cuenca del Amazonas, del Plata y del Altiplano, las cuales desembocan sus aguas en las vertientes del Atlántico y del altiplano, y en menor medida en el Pacífico. En la Figura 3 se presenta la división de macrocuencas en el país.

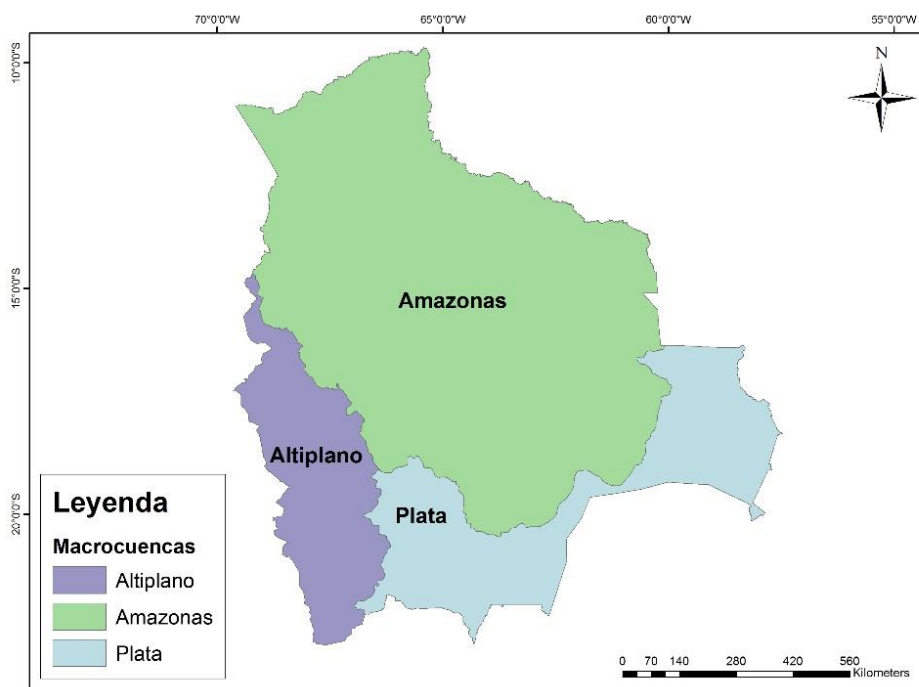


Figura 3. Macrocuencas de Bolivia.

Fuente: Capa shape de macrocuencas obtenida del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia (2014)

A continuación se describen las principales características de las macrocuencas de Bolivia:

Cuenca del Amazonas: también conocida como cuenca norte, tiene una extensión aproximada de 724,000 km^2 , es decir, ocupa cerca del 66% del territorio. Presenta una precipitación media anual cercana a los 1,800 mm/año. Los ríos que conforman esta cuenca tienen en su mayoría caudales altos y sinuosos, lo que ocasiona a su vez la formación de múltiples lagos. Los ríos principales de esta cuenca son: El río Mamoré (2,000 km), río Beni (1,113 km), el río Grande y el río Madera el cual se forma por la confluencia del río Mamoré y Beni y es el principal afluente del Amazonas. Otros ríos importantes de la cuenca son el río Orthon, Madre de Dios, Abuná, Yata e Iténez. Por otra parte, entre las principales formaciones lacustres se encuentran la laguna Murillo, el Rogaguado y el Rogagua.

Cuenca del Plata: también conocida como cuenca sur, tiene una extensión aproximada de 230,000 km^2 , es decir, ocupa cerca del 21% del territorio. Presenta una precipitación media anual cercana a los 850 mm/año por lo que tiene afluentes mucho menos caudalosos que los de la cuenca Norte. Los ríos principales de la cuenca son el río Paraguay, Pilcomayo y Bermejo, mientras que las lagunas más importantes son las de Uberaba y Mandioré.

Cuenca del Altiplano o Lacustre: también conocida como cuenca central, tiene una extensión aproximada de 145,000 km^2 , es decir, ocupa cerca del 13% del territorio. Presenta una precipitación media anual cercana a los 400 mm/año. Esta cuenca se caracteriza por la presencia de los grandes salares de Uyuni, el cual tiene cerca de 12,000 km^2 lo que lo convierte en el desierto de sal más grande del mundo y el salar de Coipasa de 2,200 km^2 de superficie. Además de esto, en la cuenca se encuentra ubicado el lago Titicaca, el lago más alto del mundo, ubicado a los 3,180 m.s.n.m., del cual nace el río más importante de la cuenca, el Desaguadero, de 436 km de longitud que desemboca en el lago Poopó. Los ríos de esta cuenca se caracterizan por que no vierten sus aguas en ningún océano ya que se encuentran encerrados por la cordillera de los Andes. Las lagunas Verde, Blanca y Colorada también forman parte de la cuenca, cuya importancia radica en sus múltiples atractivos turísticos.

En la Tabla 1 se presentan los ríos principales de Bolivia con sus respectivas longitudes. En la Figura 4 se indica la ubicación de dichos ríos en el país.

Tabla 1. Ríos principales de Bolivia.
Fuente: Instituto Geográfico Nacional: <http://www.igmbolivia.gob.bo/>

Río	Longitud (km)
Mamoré	2,000
Itonomas	1,493
Grande	1,438
Beni	1,130
Blanco	1,087

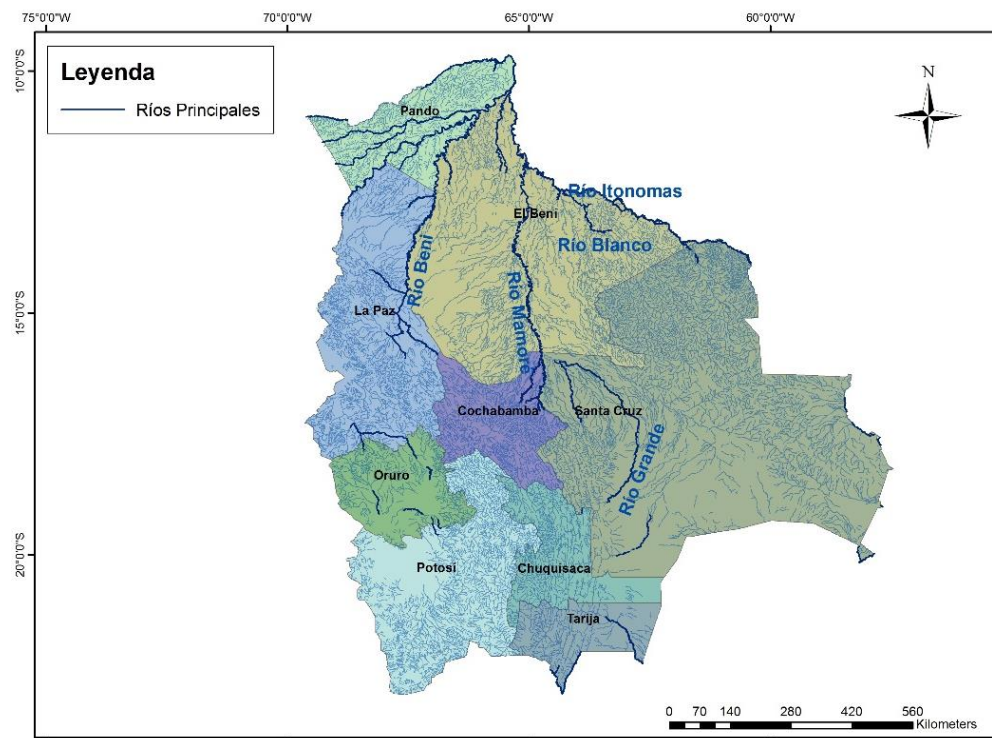


Figura 4. Ríos principales de Bolivia.

Fuente: Capas shape de ríos y delimitación departamental obtenidas del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia (2014)

1.3 INFORMACIÓN GENERAL SOBRE AMENAZAS NATURALES Y EVENTOS CATASTRÓFICOS EN BOLIVIA

1.3.1 Estadísticas generales

A continuación se presenta el consolidado de estadísticas generales de desastres asociados a eventos naturales en Bolivia, discriminadas según tipo de desastre. Inicialmente se encuentra el resumen de estadísticas principales obtenidos de Prevention Web (2011), para el periodo 1980 a 2010. Posteriormente se encuentran algunas estadísticas de eventos específicos de inundación y deslizamiento en cada año durante el periodo 1965 a 2013, según lo reportado por la base de datos de desastres EM-DAT (2014). Este análisis se realiza con el objetivo de identificar los tipos de eventos que históricamente han causado mayor impacto en el país.

En la Tabla 2 a Tabla 4 se presentan los principales eventos naturales con el mayor número de afectados, víctimas y pérdidas económicas dentro de la ventana de tiempo de 1980 a 2010.

Tabla 2. Eventos naturales con mayor afectación humana
Fuente: (PreventionWeb, 2011)

Amenaza natural	Fecha	Afectados (No. de personas)
Sequía	1983	1,583,049
Sequía	1983	1,500,000
Inundación	2007	485,000
Inundación	2001	357,250
Inundación	2007	339,495
Inundación	1986	310,000
Sequía	1990	283,160
Inundación	2010	227,860
Inundación	1997	190,000
Movimiento de tierra húmeda	1994	165,000

Tabla 3. Eventos naturales con mayor número de víctimas mortales
Fuente: (PreventionWeb, 2011)

Amenaza natural	Fecha	Víctimas (No. de personas)
Epidemia	1991	329
Inundación	1983	250
Terremoto*	1998	95
Inundación	2002	76
Inundación	2007	75
Movimiento tierras húmeda	2003	69
Inundación	2003	69
Epidemia	1989	67
Movimiento tierras húmeda	1998	60
Movimiento tierras húmeda	1992	49

* Incluye tsunami.

Tabla 4. Eventos naturales con mayores pérdidas económicas reportadas
Fuente: (PreventionWeb, 2011)

Amenaza natural	Fecha	Costo (US\$ Millones)
Sequía	1983	500
Inundación	2007	500
Sequía	1983	417
Inundación	1982	400
Movimiento tierras húmeda	1992	400
Inundación	2001	121
Inundación	2002	100
Inundación	1992	100
Inundación	1992	100
Sequía	2010	100

Por otro lado la Tabla 5 resume las estadísticas generales por evento en términos de víctimas mortales, personas afectadas y pérdidas económicas.

*Tabla 5. Estadísticas generales por eventos de inundación y deslizamiento.
Fuente: (EM_DAT, 2014)*

Tipo de desastre	Fecha	Ocurrencia	Muertos	Afectados	Heridos	Desplazados	Total afectados	Costo (US\$ Millones)
Inundación	1965	1	40	500	0	0	500	0
Inundación	1966	2	14	6,100	0	0	6,100	1
Inundación	1968	1	24	20,000	200	6000	26,200	3
Inundación	1974	1	31	18,000	0	0	18,000	11
Inundación	1977	1	10	70,000	0	20000	90,000	10
Inundación	1978	2	40	163,000	0	15000	178,000	0
Inundación	1980	1	0	15,000	0	0	15,000	0
Inundación	1982	1	0	30,000	0	0	30,000	400
Inundación	1983	1	250	50,000	0	0	50,000	48
Inundación	1984	1	0	3,000	0	0	3,000	0
Inundación	1985	1	0	0	0	475	475	0
Inundación	1986	1	29	260,000	0	50000	310,000	50
Inundación	1987	1	25	20,000	0	0	20,000	0
Inundación	1992	2	4	0	50	40000	40,050	200
Deslizamientos	1992	1	49	0	100	500	600	400
Deslizamientos	1994	1	0	165,000	0	0	165,000	0
Deslizamientos	1996	1	40	0	0	0	0	0
Inundación	1997	2	56	190,000	0	0	190,000	70
Deslizamientos	1998	1	60	0	23	0	23	0
Inundación	1999	1	0	1,000	0	600	1,600	0
Inundación	2000	2	30	7,000	10	0	7,010	0
Inundación	2001	1	41	357,250	0	0	357,250	121
Inundación	2002	1	76	5,000	146	0	5,146	100
Inundación	2003	3	74	47,500	29	10000	57,529	1
Deslizamientos	2003	1	69	690	11	300	1,001	0
Inundación	2006	2	25	126,550	50	0	126,600	35
Inundación	2007	2	115	824,495	0	0	824,495	590
Inundación	2009	1	0	63,000	0	0	63,000	0
Inundación	2010	1	26	227,860	0	0	227,860	0
Inundación	2011	1	52	88,825	0	0	88,825	20
Deslizamientos	2011	1	0	4,000	0	0	4,000	0
Inundación	2012	1	13	69,085	0	0	69,085	0
Inundación	2013	2	99	483,995	0	0	483,995	3
Deslizamientos	2013	1	19	0	29	0	29	0

Con respecto a inundaciones únicamente, la base de datos reporta un total de 37 eventos en el periodo comprendido entre 1965 y 2013. La valoración económica total de estos eventos está en el orden de los US\$ 2,000 millones. El número total de personas afectadas es del orden de 3 millones, el número total de víctimas mortales es del orden de 1,000 personas.

Sin duda las inundaciones conjuntamente con las sequías son eventos que generan cuantiosas pérdidas económicas para el país y por lo tanto cualquier esfuerzo que se realice en gestión del riesgo queda plenamente justificado. Adicionalmente, los deslizamientos o movimientos en masa son de gran relevancia en el país por su alta frecuencia de ocurrencia y por los impactos que generan social y económicamente, aunque sus impactos son mucho más localizados.

1.3.2 Eventos específicos relevantes

En el año 2014 se presentaron inundaciones en Bolivia de magnitudes nunca antes registradas. Los eventos históricos más catastróficos previamente registrados ocurrieron en 2007 y 2008. A continuación se presenta la descripción de estos eventos específicos relevantes con el objetivo de identificar los impactos generados por los mismos y las principales zonas afectadas.

Inundaciones en el 2014 (OPS/OMS Bolivia, 2014)

Entre diciembre de 2013 y febrero de 2014 se presentó un régimen de lluvias que trajo consigo consecuencias fatales para todo el país. El desborde de los ríos en Cochabamba, Beni y Santa Cruz inundó extensas zonas rurales y urbanas. Se registraron más de 85 municipios afectados, 24,036 familias damnificadas, 713 viviendas destruidas, 44 muertos, 352 hectáreas de cultivos afectadas y pérdidas en infraestructura nacional como puentes y carreteras. La Figura 5 ilustra la cuantificación de las diferentes pérdidas por departamento.

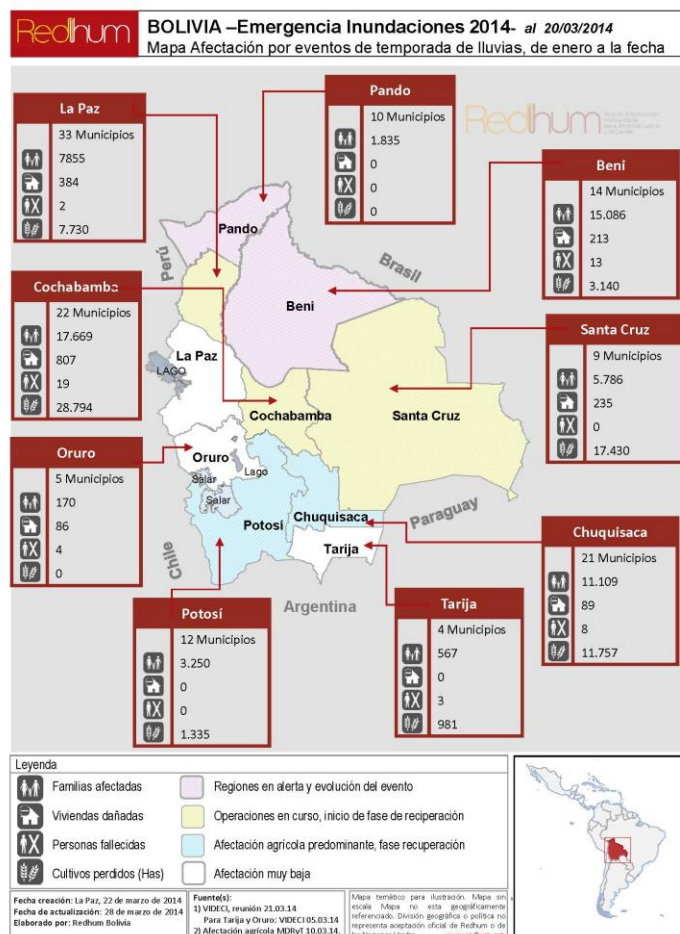


Figura 5. Afectación por evento de lluvias 2014.
Fuente: http://www.redhum.org/emergencia_detail/719

En el departamento de Beni la inundación del poblado de Reyes dejó 40 viviendas afectadas, el desbordamiento del río Beni ocasionó daños en la mayoría de viviendas de adobe. En San Ignacio de Moxos se registraron 600 familias damnificadas por una inundación que alcanzó los 20 centímetros. En San Borja el desbordamiento de los ríos Maniqui y Colorado dejó 180 familias afectadas entre familias indígenas y urbanas. En Santa Rosa de Yacuma el desborde del río Yacuma afectó a 134 familias. También se registraron daños por el desbordamiento del río Beni en Rurrenabaque y Riberalta; por el desbordamiento del río Mamoré en los municipios de San Andrés, Trinidad, Puerto Siles, Santa Ana de Yacuma y Exaltación y por el desbordamiento del río Iténez que ocasionó daños en Baures y Magdalena.

En Cochabamba se inundaron los municipios de Cliza, Omereque, Mizque, Colapirhua, Puerto Villaroel, Entre Ríos, Arani, Chimore, Toco, Tolata y Villa Tunari. En tan solo el mes de enero más de 6,600 hectáreas de cultivos de banano, cítricos, palta, coca, yuca y arroz quedaron dañados. Las lluvias intensas ocasionaron la crecida de ríos, el desborde de torrenteras, y el derrumbe de casas. En el municipio de Cliza

la afectación se valoró en más del 80%. El desbordamiento del río Rocha causó pérdidas graves en los municipios de Sipe Sipe, Quillacollo y Cochabamba.

En el departamento de La Paz se registraron afectaciones en los municipios de Ixiamas, San Buenaventura, Guanay, Tipuani y Palos Blancos. En la región de Calacoto, en la ciudad de La Paz, la crecida del río Achumani dejó dos personas heridas y una serie de pérdidas materiales.

En el departamento de Santa Cruz los municipios de Yapacaní, San Pedro, San Juan, Santa Rosa del Sara, Urubicha y Concepción fueron afectados. El desborde del Río Grande ocasionó la inundación de más de 50 comunidades del municipio de El Puente; se identificaron zonas prácticamente incomunicadas por vías terrestres; se declaró alerta naranja en los ríos Yapacaní e Ichilo con crecientes de más de 5.6 metros y 12 metros, respectivamente.

Los departamentos de Beni y La Paz fueron las regiones con mayor afección humanitaria y en el sur del país se registró una afección agrícola predominante, en especial en los departamentos de Potosí, Chuquisaca y Tarija. En Potosí los municipios afectados fueron Tupiza, Cotagaita y Vitachi. En Chuquisaca Monteagudo, Villa Vaca Guzmán, Huacaya, Zudañez, Presto, Icla y Yamparáez. En Tarija Padcaya, Entre Ríos, Uriondo y Yunchara. En el departamento de Oruro se registró la menor cantidad de familias y cultivos afectados.

La Figura 6 presentan las últimas inundaciones en Bolivia captadas por el Observatorio de inundaciones de Dartmouth en colaboración con la NASA.

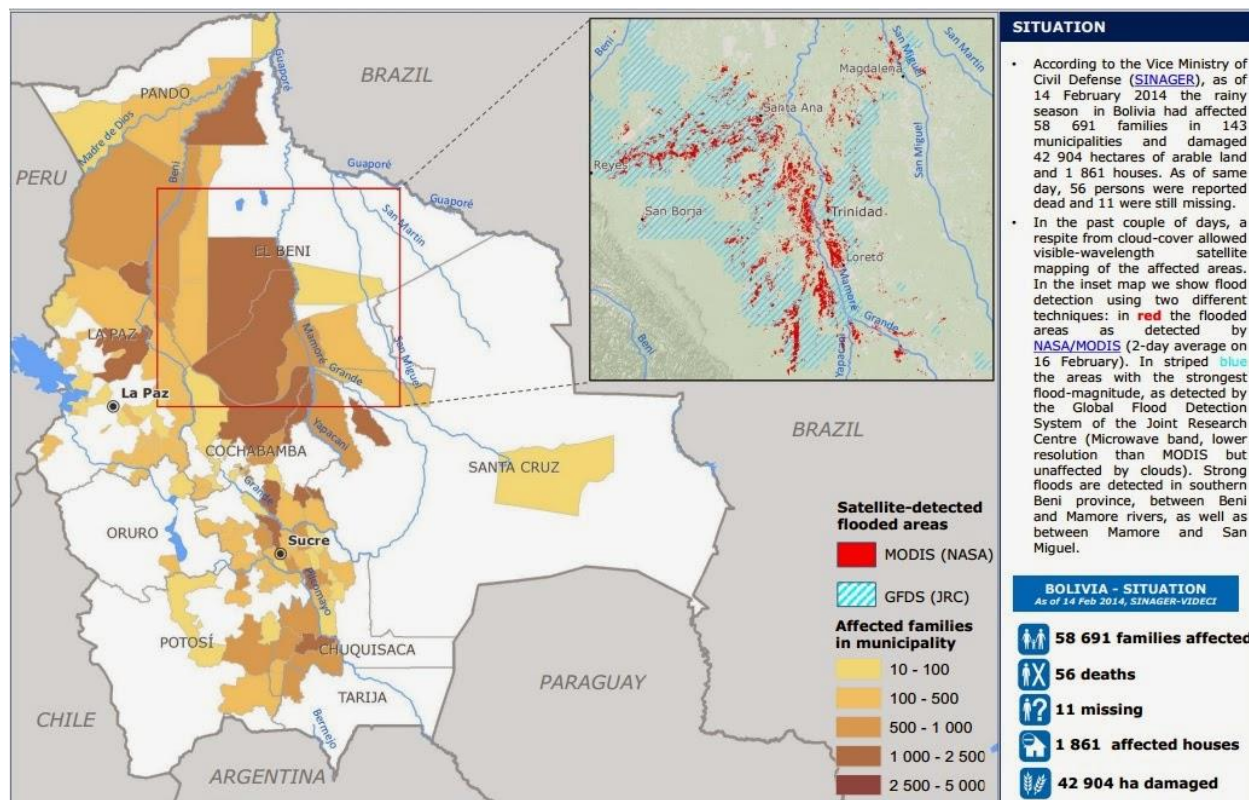


Figura 6. Inundaciones en el departamento de Beni durante el 2014.

Fuente: <http://floodobservatory.colorado.edu/RapidResponse/2014Bolivia4117/2014Bolivia.html>

Inundaciones en el 2008

Durante el primer trimestre de 2008 se repitieron los eventos de inundación del 2007 con intensidades aún mayores. Ambos eventos se atribuyeron a la ocurrencia del fenómeno de la Niña. Desde noviembre de 2007 a marzo de 2008 se registraron 67 muertes, 3 desapariciones y 94,000 familias afectadas por las lluvias intensas. El municipio de Trinidad en Beni fue nuevamente el más afectado, el nivel de agua superó en 10 cm los valores alcanzados en el año anterior. En Beni los municipios de San Ignacio, Loreto, San Andrés y San Javier sufrieron inundaciones. En el departamento de Santa Cruz el nivel del río Grande se elevó de 3 a 4,5 metros generando inundaciones en los municipios de San Julián y Cuatro Cañadas. Los municipios de Yapacaní y San Juan de Yapacaní también fueron afectados. Miles de familias fueron evacuadas. El Gobierno nacional declaró “Situación de Desastre Nacional” a través del Decreto Supremo No 29438, el 12 de febrero de 2008. El Gobierno logró disponer de un fondo de US\$ 50 millones para la atención de emergencias, gran parte de este fondo se destinó a la reconstrucción de viviendas en las regiones más afectadas. En Cochabamba 200 familias fueron reubicadas.

En la Figura 7 se presentan las inundaciones detectadas por satélite en la zona urbana de Trinidad, capital departamental del Beni. La imagen satelital fue captada el 8 de febrero 2008.

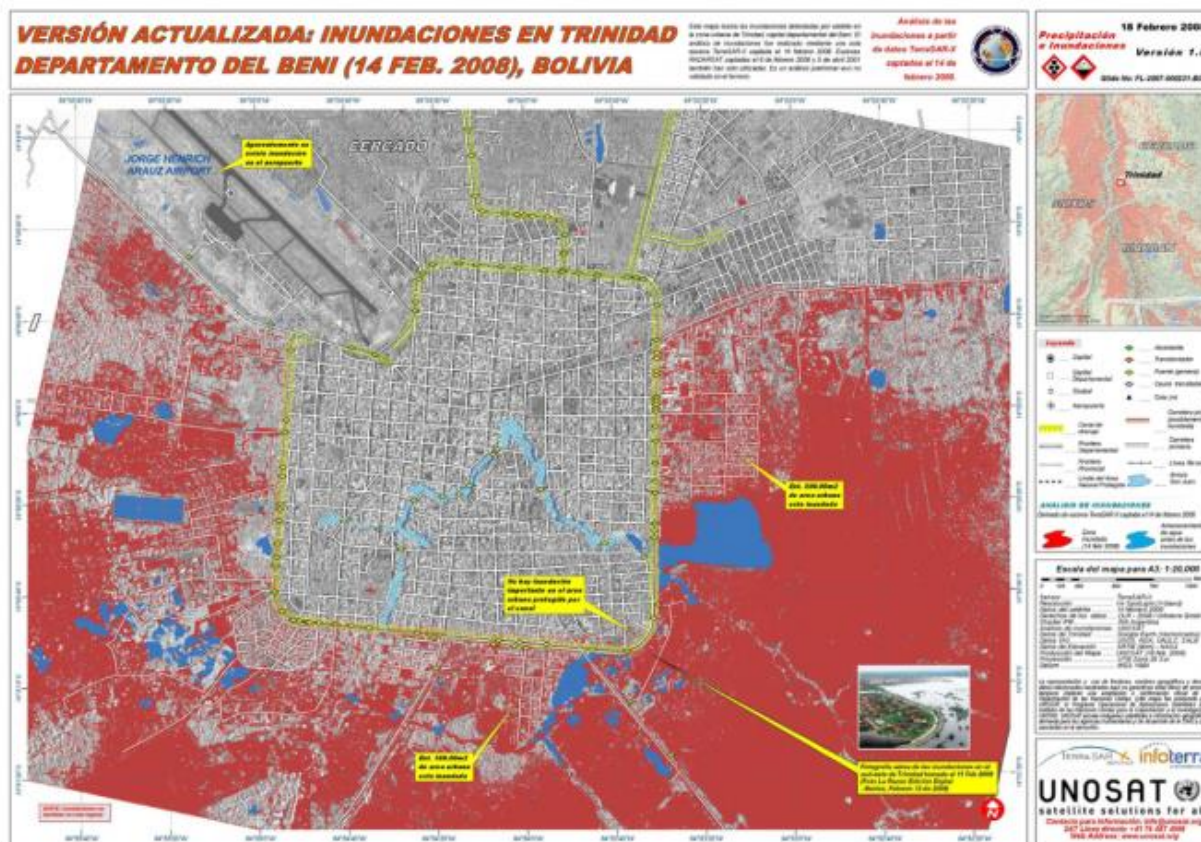


Figura 7. Inundaciones en el municipio de Trinidad, Beni.

Fuente: <http://reliefweb.int/map/bolivia/versi%C3%B3n-actualizada-inundaciones-en-trinidad-departamento-del-beni-14-feb-2008-bolivia>

Inundaciones en el 2007

Durante los meses de enero a marzo de 2007 Bolivia atravesó un periodo de fuertes inundaciones, heladas y granizadas que afectaron los departamentos de Beni, Santa Cruz, Cochabamba, Chuquisaca, La Paz, Tarija y Potosí. El municipio de Trinidad en el departamento de Beni fue uno de los más afectados. Las lluvias intensas ocasionaron el desborde de ríos, la pérdida de cosechas, la destrucción de viviendas y daños en la infraestructura vial. Se registraron más de 100,000 familias damnificadas, 50 muertes y más de 366,000 hectáreas de cultivos afectadas. Las pérdidas se avaluaron en US\$ 230 millones según la Cámara Nacional de Comercio de los cuales US\$ 100 millones correspondían a los daños ocasionados en el departamento del Beni.

Las inundaciones se calificaron como las peores de los últimos 25 años (UNICEF, 2014). La población afectada se enfrentó a condiciones precarias de saneamiento y acceso a agua potable que incrementaron el riesgo potencial epidémico de enfermedades diarreicas agudas (EDAs), infecciones respiratorias agudas (IRAs), dengue, malaria, leptospirosis y fiebre amarilla. La escasez de productos agrícolas y pecuarios conllevó al alza de los precios.

En la Figura 8 se ilustran las inundaciones detectadas por satélite en los Departamentos del Beni y de Santa Cruz. El análisis de inundaciones fue realizado por captaciones satelitales realizadas el 27 de septiembre 2007 y 13 de febrero 2008.

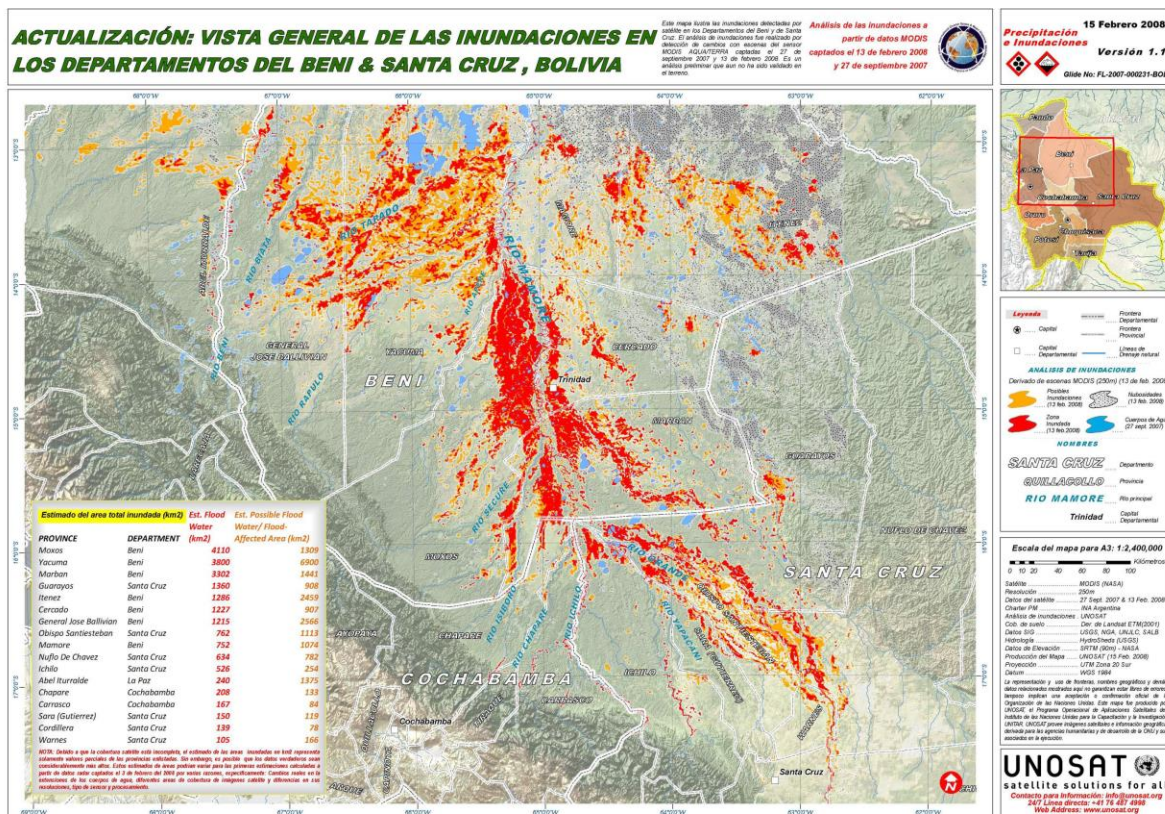


Figura 8. Inundaciones en los departamentos de Beni y Santa Cruz en 2007 y 2008.

Fuente: <http://reliefweb.int/map/bolivia/actualizaci%C3%B3n-vista-general-de-las-inundaciones-en-los-departamentos-del-beni-santa-cruz>

1.4 BASE DE DATOS DESINVENTAR

Por otro lado se analiza la información contenida en la base de datos de desastres DesInventar (DesInventar Project, 2013). Esta información resulta de gran utilidad para la selección de cuencas dado que permite identificar la distribución espacial de eventos históricos de inundación y deslizamiento, haciendo posible la determinación de las cuencas que son impactadas con mayor frecuencia y severidad por este tipo de eventos.

1.4.1 Información general

La Tabla 6 presenta la descripción de los principales campos de los registros de las bases de datos DesInventar. La base de datos reporta la información por municipio. Por lo cual para un mismo evento es posible encontrar varios registros específicos.

Tabla 6. Principales campos en la base de datos DesInventar

Campo	Descripción
Fecha inicio	Fecha del evento
Nombre geografía	Localización
Tipo evento	Tipo de Evento
Muertos	Número de personas fallecidas por causas directas. Cuando se dispone de datos oficiales finales se incluye este valor con las observaciones correspondientes, por ejemplo cuando haya diferencias entre las cifras oficialmente aceptadas y las de otras fuentes. Las presunciones sobre muertos, no verificados oficialmente, se registran en el campo -Observaciones de efectos- consignando la fuente de información.
Desaparecidos	Número de personas cuyo paradero a partir del desastre es desconocido. Incluye personas presumiblemente muertas sin evidencias físicas. Los datos de muertos y de desaparecidos son mutuamente excluyentes, por lo tanto no los mezcle.
Heridos, enfermos	Número de personas que resultaron afectadas en su salud o integridad física, sin ser víctimas mortales, por causa directa del desastre. Se deben incluir las personas que sufrieron lesiones y las que quedaron enfermas si se trata de una plaga o epidemia.
Damnificados	Número de personas que han sufrido grave daño directamente asociado al evento en sus bienes y/o servicios individuales o colectivos. Por ejemplo destrucción parcial o total de su vivienda y sus bienes; pérdidas en cultivos y/o en bodegas, etc. Se deben incluir también personas reubicadas.
Afectados	Número de personas que sufren efectos indirectos o secundarios asociados a un desastre. Corresponde al número de personas, diferentes a damnificados, que sufren el impacto de los efectos secundarios de los desastres por razones como deficiencias en la prestación de servicios públicos, en el comercio, o en el trabajo, o por aislamiento. Si la información aparece por familias, calcular el número de personas según indicadores disponibles.
Evacuados	Número de personas evacuadas temporalmente de sus viviendas, lugares de trabajo, colegios, hospitales, etc.
Reubicados	Número de personas que han sido trasladadas desde sus sitios de vivienda a nuevos emplazamientos permanentes.
Viviendas Destruídas	Número de viviendas arrasadas, sepultadas, colapsadas o deterioradas de tal manera que no son habitables.
Viviendas Afectadas	Número de viviendas con daños menores, no estructurales o arquitectónicos, que pueden seguir siendo habitadas, aun cuando requieran de acciones de reparación o de limpieza.
Valor pérdidas \$	Monto de las pérdidas directas causadas por el desastre en moneda local.
Valor pérdidas US\$	Equivalente en dólares (US\$) de las pérdidas en moneda local, según la tasa de cambio de moneda nacional en la fecha de ocurrencia del desastre.
Centros hospitalarios	Número de centros de salud, clínicas, hospitales locales y regionales destruidos y afectados directa o indirectamente por el desastre.
Centros de educación	Número de guarderías, escuelas, colegios, universidades, centros de capacitación, etc. destruidas y afectadas directa o indirectamente por el desastre. Incluye aquellos que han sido utilizados como albergues temporales.
Cultivos y bosques (Ha)	Número de áreas de cultivo, pastizales o bosques destruidas y afectadas. Si la información está en otra medida se deberá convertir a hectáreas.
Ganado	Número de unidades perdidas (bovinos, porcinos, caprinos, y avícolas) cualquiera sea el evento (inundación, sequía, epidemia, etc.).
Vías afectadas (m)	Longitud de redes viales destruidas y/o inhabilitadas en metros.

Por otro lado la base de datos incluye una serie de categorías y causas asociadas que se resumen esquemáticamente en la Tabla 7.

Tabla 7. Categorías de eventos y causas asociadas

Categoría	Eventos incluidos		
Tectónicos	Sismo	Tsunami	
Volcánicos	Actividad Volcánica		
Deslizamientos	Alud	Deslizamiento	
Huracanes	Huracán	Ciclón	
Hidrometeorológicos	Aluvión	Avenida torrencial	Cambio línea de costa
	Granizada	Helada	Inundación
	Lluvias	Marejada	Neblina
	Nevada	Onda fría	Tempestad
	Tormenta eléctrica	Tornado	Vendaval
Sequia	Ola de calor	Sequía	

La Tabla 8 resume las características de los tipos de eventos más relevantes registrados en la base de datos DesInventar para Bolivia.

Tabla 8. Características de los tipos de eventos más relevantes registrados en DesInventar- Bolivia

Categoría	Evento	Número de registros	% de registros	Periodo de registro	Fuentes relevantes
Biológico	Biológico	11	0.0023	1996-2011	El Diario, Defensa Civil ,RAD BN
	Contaminación	44	0.92%	2008	El Diario, Defensa Civil, Presencia, RAD ,Stria URI
	Epidemia	241	5.01%	2010	Defensa Civil; Stria 931/10; INF VAL 059/10, MIN DE SALUD- EL DIARIO, Ministerio de Salud Pública, Presencia, La Razon, Min Salud y Deportes; Vigilancia Epidemiologica NSVE
	Plaga	26	0.54%	1976-2012	El Diario, IBTA, La Razon, Defensa Civil ,HTD, El Diario Ed Digital, RAD
Deslizamiento	Alud	1	0.02%	2007	La Razon
	Deslizamiento	409	8.51%	1974-2011	El Diario, Quipus, Defensa Civil, Presencia , La Razon, COEM - La Paz La Razón Ed Digital, GOB-LP, GAM-LP, EDAN, VALI, CBBA
	Flujo Lodo	9	0.19%	2008-2012	Defensa Civil; DGEA BD-2008, Prefectura, La Razón La Paz, Prensa, Stria 0360/09, INF VAL 032/09, EDAN 029/11 INF AT 036/11, GOB-LP, EDAN, VALI
Hidrometeorológico	Aluvión	43	0.89%	1971-2007	El Diario, La Razon
	Helada	187	3.89%	1976-2012	El Diario ,La Razon, Defensa Civil ,Opinion; Cbba; Ed Digital ,Stria, RAD, EDAN, GOB-PT, VALI, Agencia Boliviana de Información (ABI), HTD,
	Granizada	448	9.32%	2009	El Diario, La Razon, Defensa Civil; DGEA BD, HTD, RAD, VMDR MDRA y MA, DDDC Chuquisaca, Cuadro Resumen Entregas realizadas; El País, Los Tiempos, HAM-Villa Serrano, COED-Cbba, UAT-Gobernación de La Pa, VALI-078/12-0, EDAN

Categoría	Evento	Número de registros	% de registros	Periodo de registro	Fuentes relevantes
	Inundación	1948	40.52%	1970-2012	El Diario, Quipus- Defensa Civil, Informe D.D.D.C. Beni-Datos04, Cronología de Desastres, Red 04-Los Tiempos, Datos L.P. CIN-El Diario, La Prensa, SENADECI, Informe D.D.D.C. CBBA., HTD 1344, EDAN, UGR; Prefectura, INF Riberalta del 14-04-2011, DGEA BD-2008, Gral Patzi, RAD, VMDR MDRA y MA, Emb Italia; Ag EFE, Prefectura La Paz, Luis Terrazas; Strio Educación Pueblos Indígenas Río Ichilo, El Diario Ed Digital, VALI-126/12-0, RAD, INF Reg San Julian, RAD y FAX, EDAN
	Lluvias	81	1.68%	1970-2007	El Diario, Presencia, La Razon
	Nevada	28	0.58%	1972-2011	El Diario, La Razon, Defensa Civil, INF VAL, Stria, RAD, Inf Tec DGEA
	Riada	228	4.74%	1971-2012	El Diario, La Razon, Stria, Defensa Civil, INF EDAN, INF AT, INF VAL, Unid Alerta Temprana; Prefectura El Diario; Ed Digital del 10/02/2010, UGR, HAM Tarija, UGR, GAM de Ichoca Red ERBOL, GAM de Yanacachi Red ERBOL, El Potos, VALI, GOB-LP
	Tempestad	8	0.17%	1976-2007	El Diario, La Razon
	Tormenta eléctrica	27	0.56%	1990-2012	El Diario, La, Razon, Defensa Civil, RADGOB-LP, PTDDC, Erbol
	Tornado	3	0.06%	2010-2011	Defensa Civil, Stria, INF VAL, RAD, COE - El Alto, El Diario Ed Digital
	Vientos fuertes	104	2.16%	1970-2012	El Diario, Defensa Civil, La Razon, HTD, DGEA, Parte Diario, Opinión, INF EDAN, INF AT, INF Dptal, Stria, RAD, DDDC Tarija, El Diario Ed Digital, INF VAL, GOB-LP
Otro	Accidente	16	0.33%	1990-2007	El Diario, Presencia, La Razon
	Escape	2	0.04%	1971-1997	El Diario
	Explosión	30	0.62%	1970-2008	El Diario, La Razon
	Incendio	140	2.91%	1971-2012	El Diario, Presencia, La Razon, Defensa Civil, Stria, CITE UDC, INF VAL, RAD, El Diario Ed Digital 01-04-10, Sociedad, Red ERBOL, EDAN, RIBER
	Incendio forestal	210	4.37%	1970-2012	El Diario, La Razon, Defensa Civil, HTD, DGEA BD, El Deber, Stria, RAD, INF VAL, INF EDAN, Boletín COED-Sta Cruz del 07-09-2010, INF AT, INF Ampliatorio, El Diario Ed Digital, El Nacional Ed Digital, La Voz Cbba, Los Tiempos Cbba, Correo del Sur, El Deber, El País; Tarija Ed Digital, Opinion Ed Digital, VALI
	Otro	5	0.10%	2010-2012	Defensa Civil, Stria, INF VAL, INF EDAN; INF AT
	Pánico	1	0.02%	2007	La Razon
Sequía	Ola de Calor	5	0.10%	1997-2010	El Diario, Defensa Civil, El Diario Ed Digital
	Sequia	479	9.96%	1970-2012	El Diario, Presencia, Defensa Civil, DGEA BD, VMDR MDRA y MA, HTD, RAD, DDDC Chuquisaca, RAD, DRDC Camiri, INF EDAN, INF VAL, INF AT, Stria, VALI, GOB-LP, CAMIR
Tectónico	Colapso estructural	49	1.02%	2008-2011	La Razón, Defensa Civil, Estudio identificación de riesgos del IRD, GAM-LP, DGEA BD-2008; Prensa, RAD, GAM-LP
	Sismo	25	0.52%	1979-2011	El Diario, Documento Crónica de desastres, Crónica de Desastres Terremoto, La Razón Ed Digital
Total		4808	100%		

La base de datos se ha construido con base en la información reportada en eventos históricos y por lo tanto no es completa para todos los periodos de tiempo. En algunos casos se cuenta con registros desde principios del siglo XX o incluso anteriores. Sin embargo, se generan discontinuidades en los registros,

principalmente debidos a la falta de información disponible o al costo de recopilarla. Debido a lo anterior es necesario definir el periodo a procesar para lo cual se presenta la Figura 9, que incluye el número de registros por año de la base de datos disponible y el número de registros acumulados correspondiente.

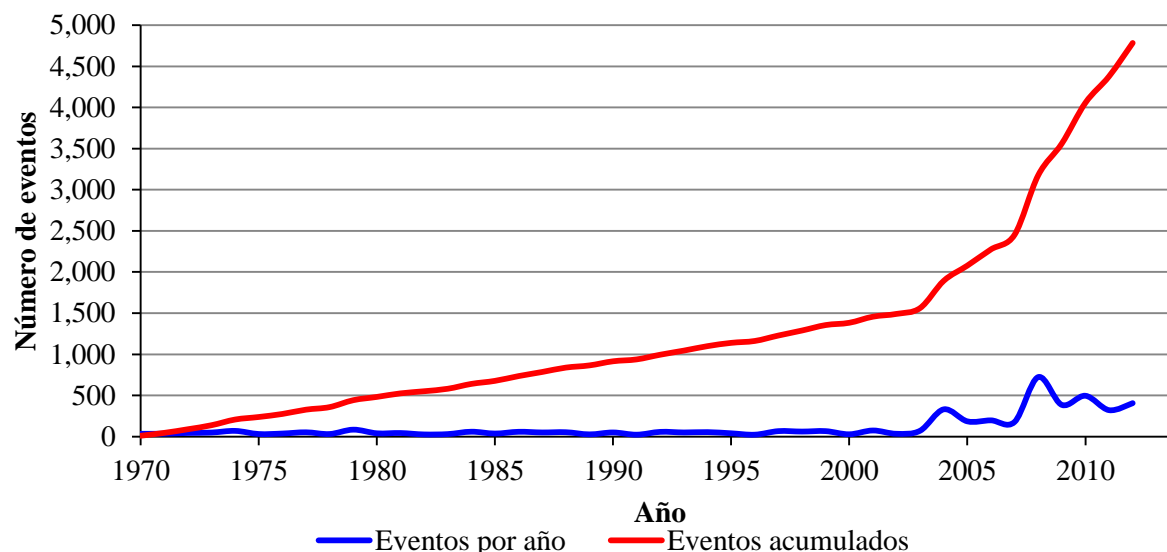


Figura 9. Número total de registros en DesInventar

De acuerdo con esta información el periodo de análisis seleccionado en el presente estudio es desde 1970 hasta 2012 para un total de 43 años de registro, dado que desde esta fecha puede considerarse que hay mayor completitud en el registro de información. En este periodo de tiempo la base de datos genera un total de 4,808 registros individuales a nivel del país con lo cual se obtiene un promedio general de 112 registros de desastre por año. La información disponible indica que a partir del año 2003-2004 se presenta un aumento en la tasa de registros por años lo cual puede estar asociado a una mejor calidad de información de la base de datos y/o a un aumento efectivo en la frecuencia de eventos por año. Para el caso específico de inundación y deslizamiento se presentan las estadísticas relevantes en la Tabla 9.

Tabla 9. Características de los registros de inundación y deslizamiento reportados en DesInventar Bolivia.

	Inundación	Deslizamiento
Número de registros reportados	1,948	409
Periodo de tiempo	1970-2012 (43 años)	1970-2012 (43 años)
Número total de registros con pérdidas económicas reportadas	16	2
Número total de registros con información de viviendas afectadas o destruidas	1,948	409
Número total de registros con información de víctimas	1,948	409
Pérdidas económicas totales reportadas (US\$)	579,218,670	33,214,215
Número total de personas afectadas	1,994,070	83,583

Número medio de registros por año	45	10
-----------------------------------	----	----

1.4.2 Eventos de inundación

En la base de datos de DesInventar se reportan un total de 1,948 registros de tipo inundación. De estos, hay 73 registros para los cuales solo se conoce el año de ocurrencia. En la Figura 10 se presenta el número de registros por año para eventos de inundación en Bolivia.

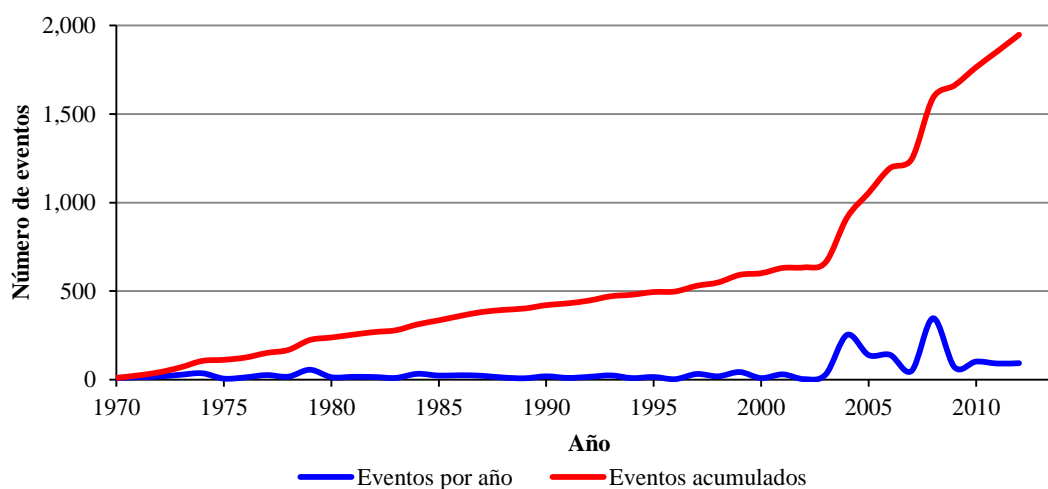


Figura 10. Número de registros de inundación por año en Bolivia reportados en DesInventar

En la Figura 11 se presenta la distribución geográfica por municipio del número total de registros de inundación reportados en la base de datos DesInventar para Bolivia durante el periodo 1970 – 2012.

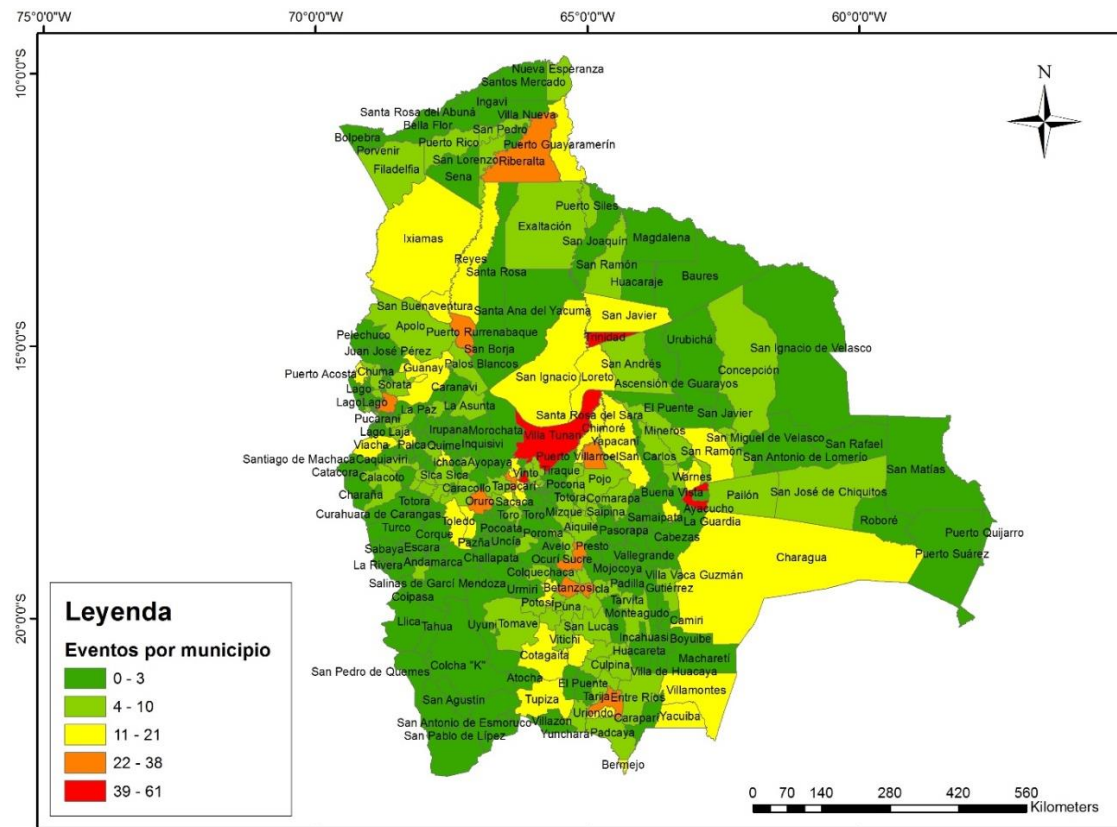


Figura 11. Número total de registros de inundación reportados en DesInventar por municipio (1970-2012).
Fuente: Capa shape de delimitación municipal obtenida del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia

Del análisis de la información disponible en la base de datos DesInventar se establece que los eventos de inundación de mayor impacto en el país son los que se indican en la Tabla 10. Eventos de inundación de mayor impacto registrados entre 1970 y 2012 en DesInventar Bolivia.

Tabla 10. Eventos de inundación de mayor impacto registrados entre 1970 y 2012 en DesInventar Bolivia

Nombre (ID)	Fecha Inicio	Zonas Mayor Impacto Dpto/Provincia/Municipio	Otros Impactos	Pérdidas económicas estimadas (US\$ Millones)
2004-0118	08/01/2004	Santa Cruz/Obispo Santistevan/Montero	35,000 Hectáreas de cultivos afectadas	30
2005-0171	21/11/2005	Santa Cruz/Sara	30,000 Hectáreas de cultivos afectadas	25
2006-0078	08/01/2006	Santa Cruz/Obispo Santistevan/Mineros	45,000 Hectáreas de cultivos afectadas	38
2007-0068	28/02/2007	Santa Cruz	Un número total de 1290 personas evacuadas y 210,000 Hectáreas de cultivos afectadas	178
2007-0137	06/12/2007	Santa Cruz/Ichilo/San Juan	20,000 Hectáreas de cultivos afectadas y hubo damnificados	17

En la Figura 12 se presenta el número de registros de inundación por año reportados lo cual indica un aumento significativo a partir del año 2004.

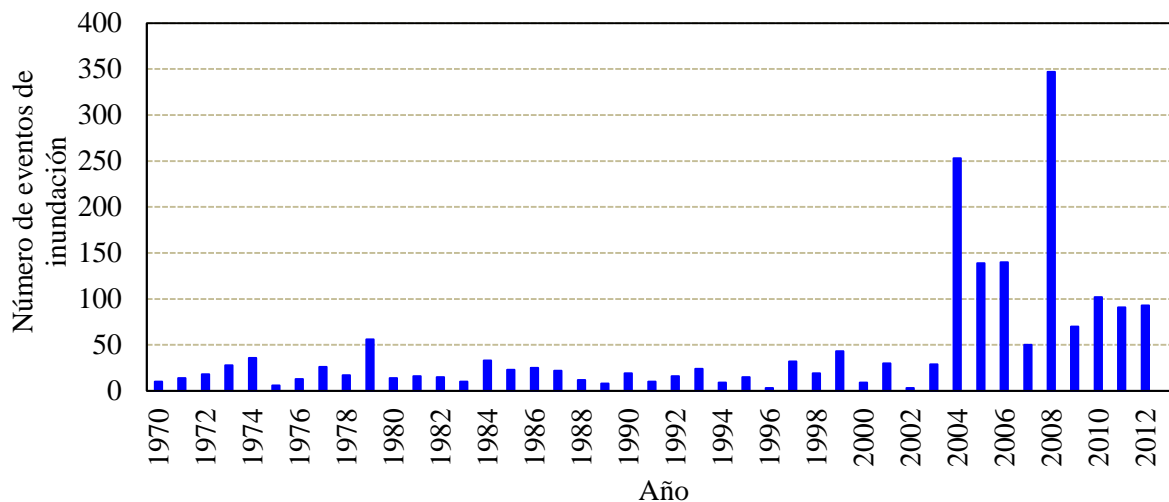


Figura 12. Número de registros de inundación por año

De la figura se observa que en el año 2008 se reportaron el mayor número de eventos con un total de 347 registros. Seguido por el año 2004 con un total de 253 y 2010 donde se encuentra un total de 102 registros.

Adicionalmente en la Figura 13 se presenta la desagregación de la distribución de registros por década y para cada uno de los meses.

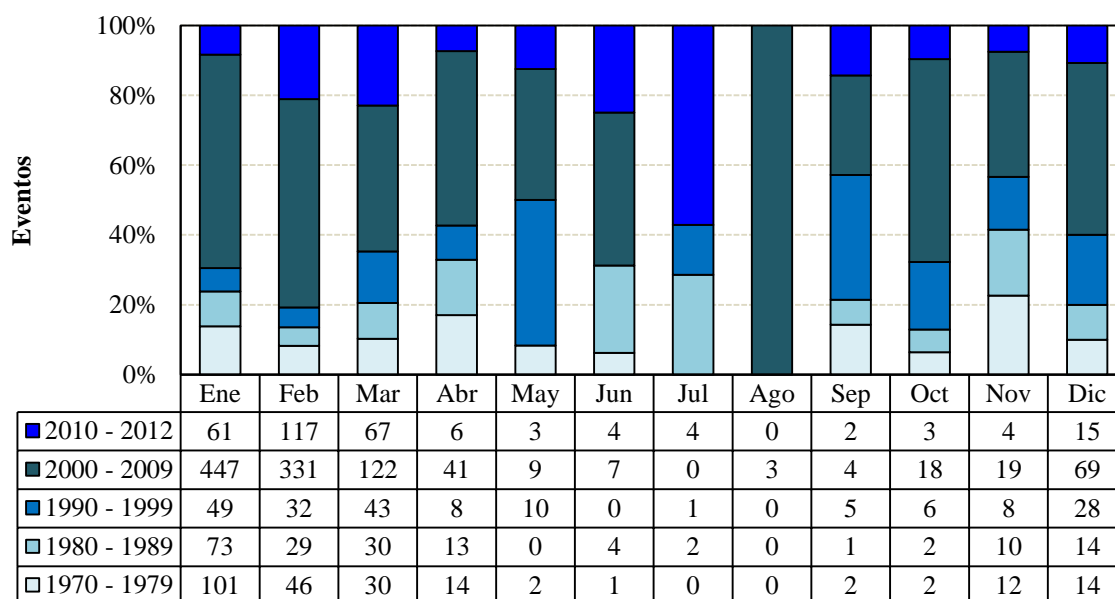


Figura 13. Registros de inundaciones desagregados por meses de acuerdo a la década

De esta figura se concluye que la frecuencia de registros de inundación se concentra en la década del 2000 al 2009, especialmente en los meses en que se concentran la alta intensidad de lluvias para el país. También se encuentra que en la década que empieza en el 2010, el número de registros sigue con una frecuencia similar al de la década anterior.

En la Figura 14 se presenta el número promedio de eventos en cada mes en el periodo 1970 a 2009.

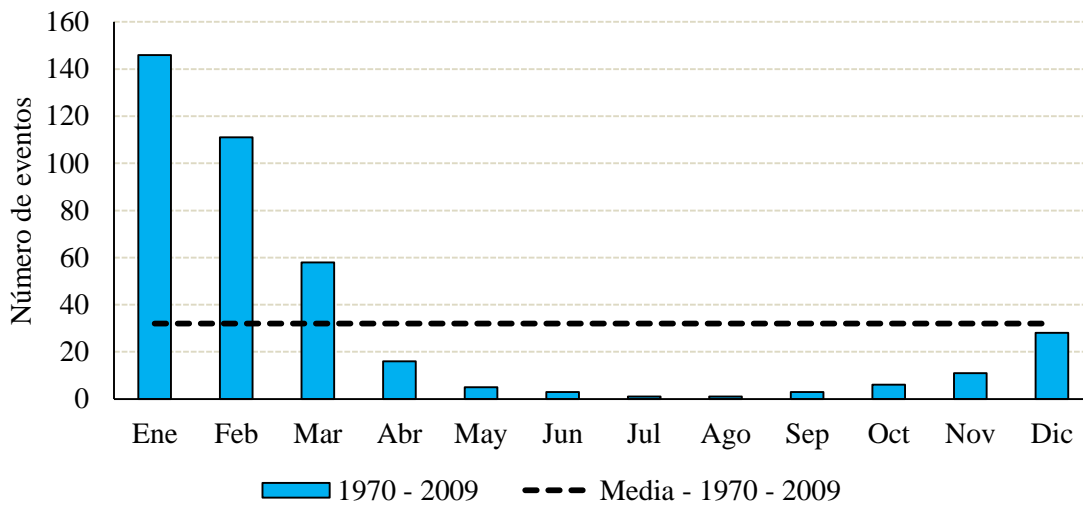


Figura 14. Eventos de inundaciones promedios de décadas desagregados mes a mes (1970 – 2009)

De la figura anterior se observa que los 3 primeros meses del año siempre están por encima de la media del número de registros por décadas. Además se encuentra que el régimen pluviométrico coincide con la aparición de eventos de inundación en el país, dado que en el mes de noviembre comienzan las precipitaciones, las cuales se incrementan en el mes de enero y se mantienen hasta el mes de marzo. Dado que en su mayoría se trata de inundaciones con velocidades de escurrimiento muy bajas, éstas se mantienen hasta aproximadamente el mes de mayo y junio, cerrando así el ciclo anual.

1.4.3 Eventos de deslizamiento

En la base de datos de DesInventar se encontraron un total de 409 registros de deslizamientos, de los cuáles para 10 registros solo se conoce el año en que ocurrieron, y para 24 registros no se indica el día del evento. En la Figura 15 se presenta el número de registros por año para eventos de deslizamiento en Bolivia.

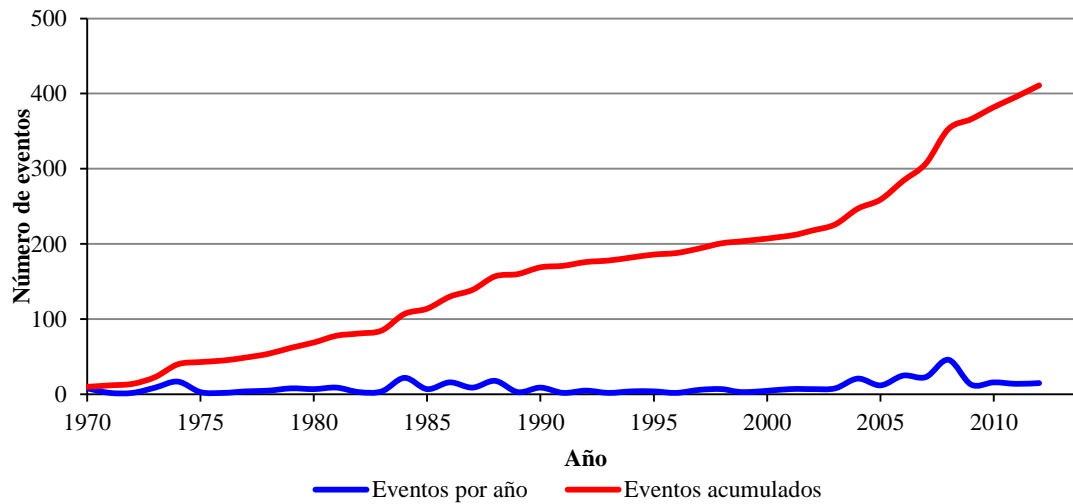


Figura 15. Número de registros por año para eventos de deslizamiento en Bolivia reportados en DesInventar

En la Figura 16 se presenta la ubicación de deslizamientos reportados en DesInventar durante el periodo 1970 - 2012.

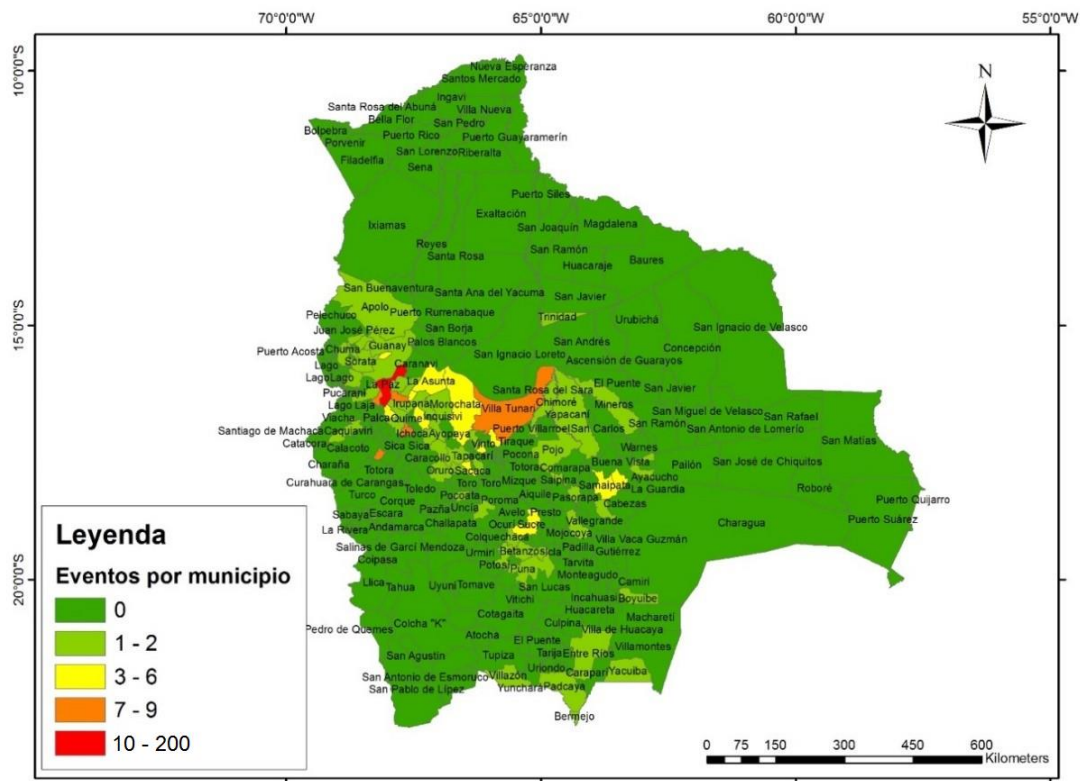


Figura 16. Número de registros de deslizamientos registrados en DesInventar por municipio (1970-2012).
Fuente: Capa shape de delimitación municipal obtenida del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia

Del análisis de la información disponible en la base de datos DesInventar se establece que los registros de deslizamientos de mayor impacto en el país son los que se indican en la Tabla 11.

Tabla 11. Eventos de deslizamiento de mayor impacto registrados entre 1970 y 2012 en DesInventar Bolivia

Nombre (ID)	Fecha Inicio	Zonas de Mayor Impacto Dpto/Provincia/Municipio	Personas Afectadas	Número Muertos	Viviendas Destruídas	Otros Impactos	Pérdidas económicas estimadas (US\$ Millones)
1996-0007	09/04/1996	La Paz/Murillo/ Nuestra Señora De La Paz	> 0	11	80	52 viviendas afectadas y 1,070 damnificados	0.95
2003-0029	30/03/2003	La Paz/Larecaja/ Tipuani	> 0	24	116	33 viviendas afectadas, 690 damnificados y 145 desaparecidos	1.27
2009-0056	23/01/2009	La Paz/Sur Yungas/ La Asunta	0	2	106	151 Hectáreas de cultivos afectadas	1.21
2011-0100	26/02/2011	La Paz/Murillo/ Nuestra Señora De La Paz	0	0	600	800 viviendas afectadas, 5,230 damnificados y 223 hectáreas de cultivos afectadas	9.75
2012-0117	25/02/2012	Cochabamba/ Ayopaya/ Morochata	0	0	0	2,415 damnificados y 2,500 hectáreas de cultivos afectadas	2.13

En la Figura 17 mostrada a continuación se presenta el número de registros de deslizamiento por año reportado por DesInventar.

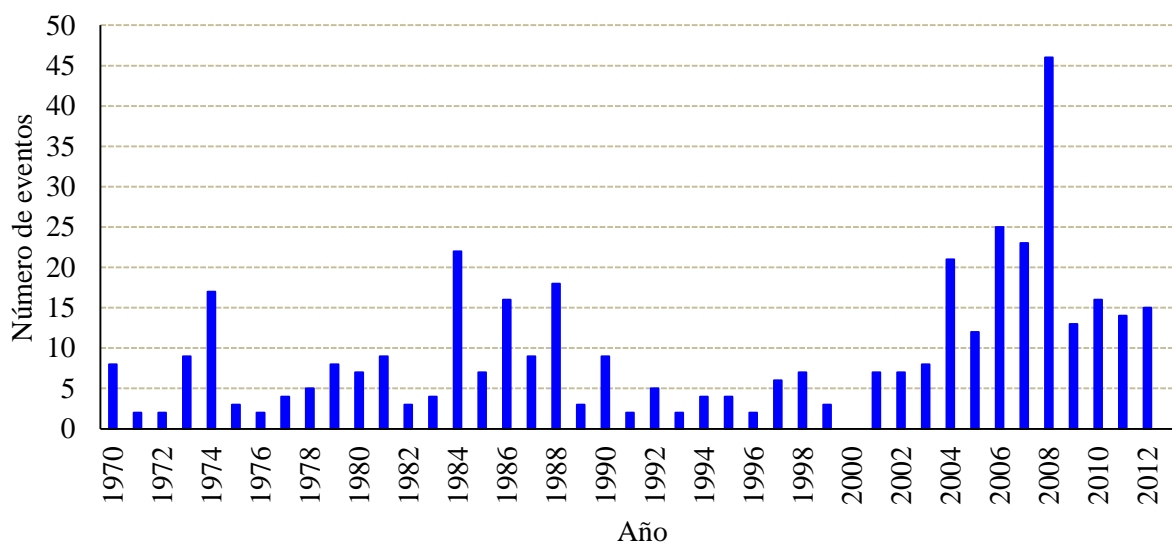


Figura 17. Registros de deslizamientos reportados anualmente (1970-2012) por DesInventar

De la Figura anterior se observa que en el año 2008 se reportaron el mayor número de registros con un total de 46. Seguido por el año 2006 con 25 eventos y 2007 donde se reportaron un total de 23 registros.

También es evidente un ligero aumento en el número de eventos por año a partir del año 2004. En la Figura 18 se presenta la desagregación de la distribución de registros por década y para cada uno de los meses.

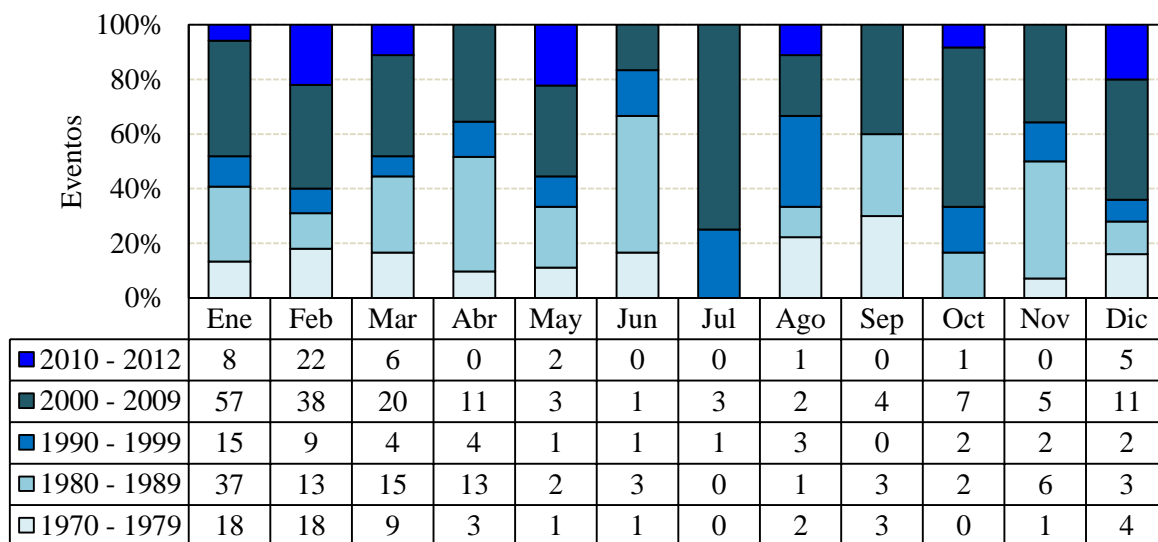


Figura 18. Desagregación de la distribución de registros por década y para cada uno de los meses

En la Figura 19 se presenta el número promedio de registros en cada mes en el periodo comprendido entre 1970 y 2009.

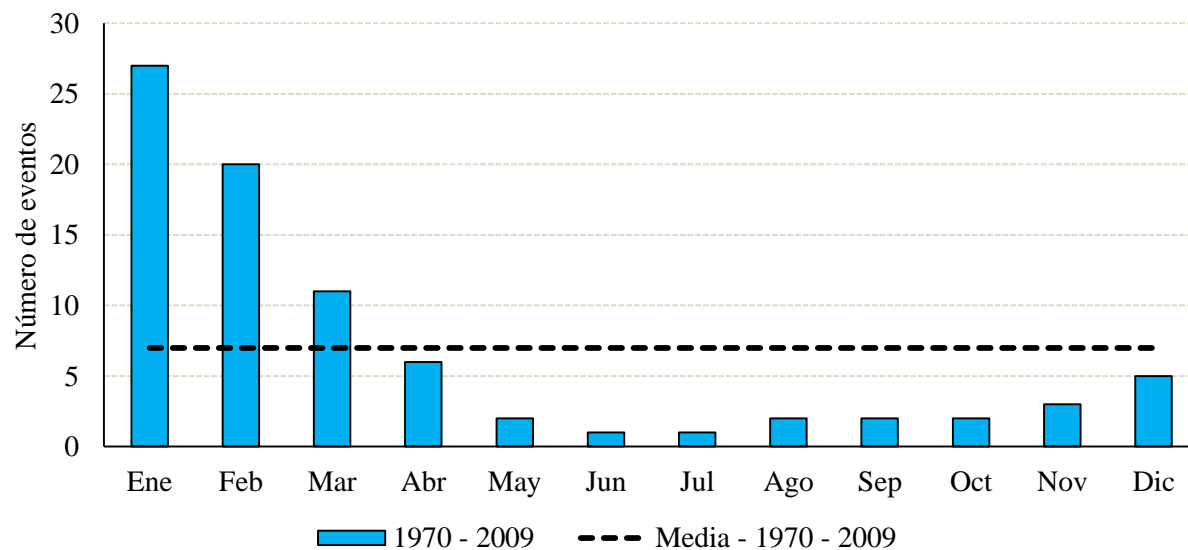


Figura 19. Número promedio de registros por décadas desde 1970 hasta 2000 y desde 1970 a 2012

De la figura anterior se observa que los tres primeros meses del año siempre están por encima de la media del número de registros por décadas. Además se encuentra que la ocurrencia de eventos de deslizamiento coincide con la frecuencia e intensidad de lluvias, dado que en el mes de noviembre comienzan las precipitaciones, la cuales se incrementan en el mes de enero y se mantienen hasta el mes de marzo.

1.5 INFORMACIÓN DISPONIBLE PARA EL ANÁLISIS DE AMENAZA Y RIESGO

A continuación se presenta el inventario de información disponible para los análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo:

- Figura 20: División administrativa de Bolivia.
- Figura 21: Principales ríos de Bolivia.
- Figura 22: Modelo de elevación digital.
- Figura 23: Usos de suelo y cuencas.
- Figura 24: Ubicación de estaciones del SENAMHI.
- Figura 25: Centros poblados.
- Figura 26: Información por provincia de distribución de población. a) Distribución de población por provincia, b) Densidad poblacional por provincia, y c) Distribución de área construida por provincia, en Bolivia. (Fuente: BID, 2011).
- Figura 27: Formaciones geológicas.
- Figura 28: Fisiografía.

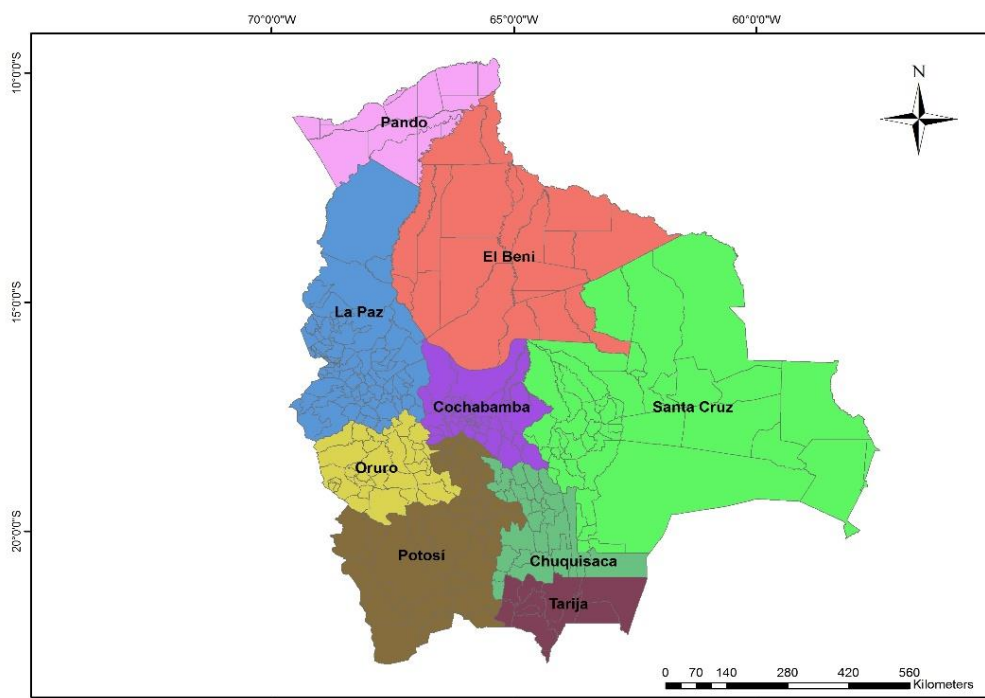


Figura 20. División administrativa de Bolivia.

Fuente: Capas shape de departamentos y municipios obtenidas del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia (2014)

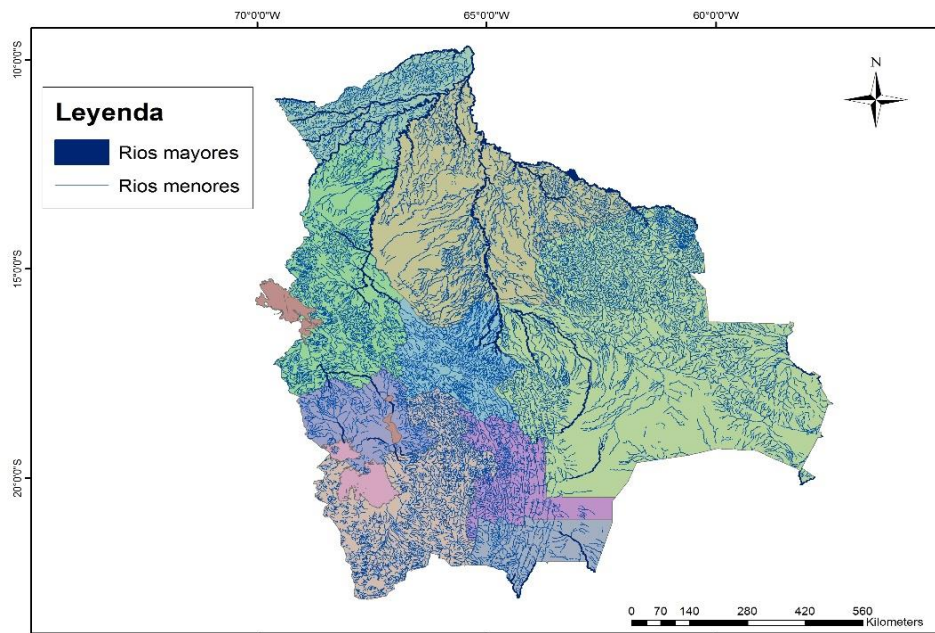


Figura 21. Principales ríos de Bolivia.

Fuente: Capa shape de ríos obtenida del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia (2014)

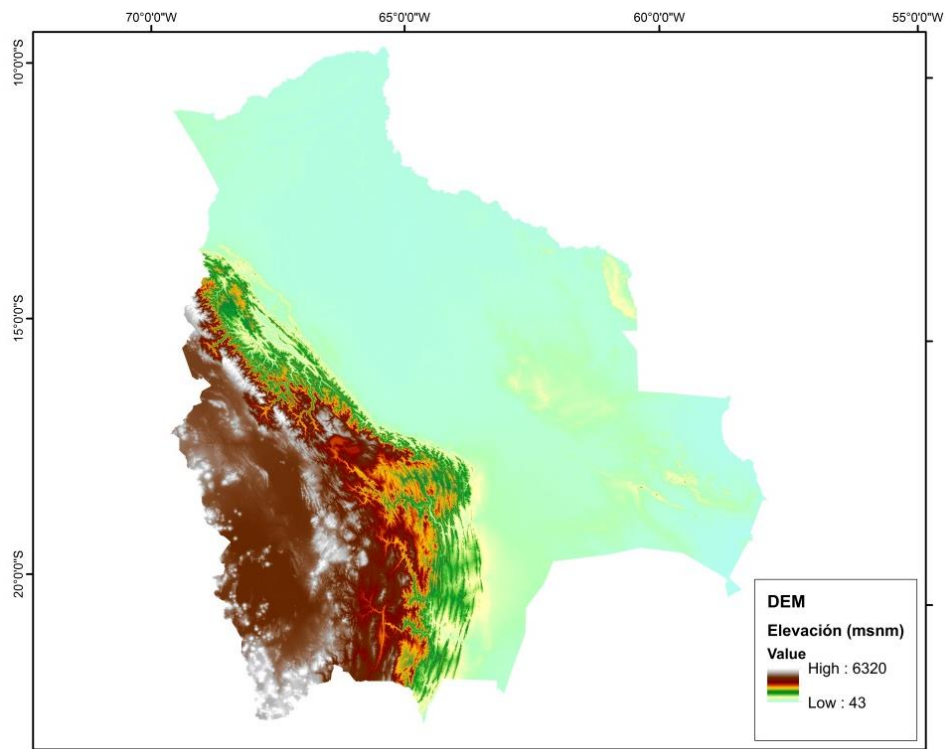


Figura 22. Modelo de elevación digital.

Fuente: Capa raster de topográfica obtenida de ASTER-GDEM (2014)

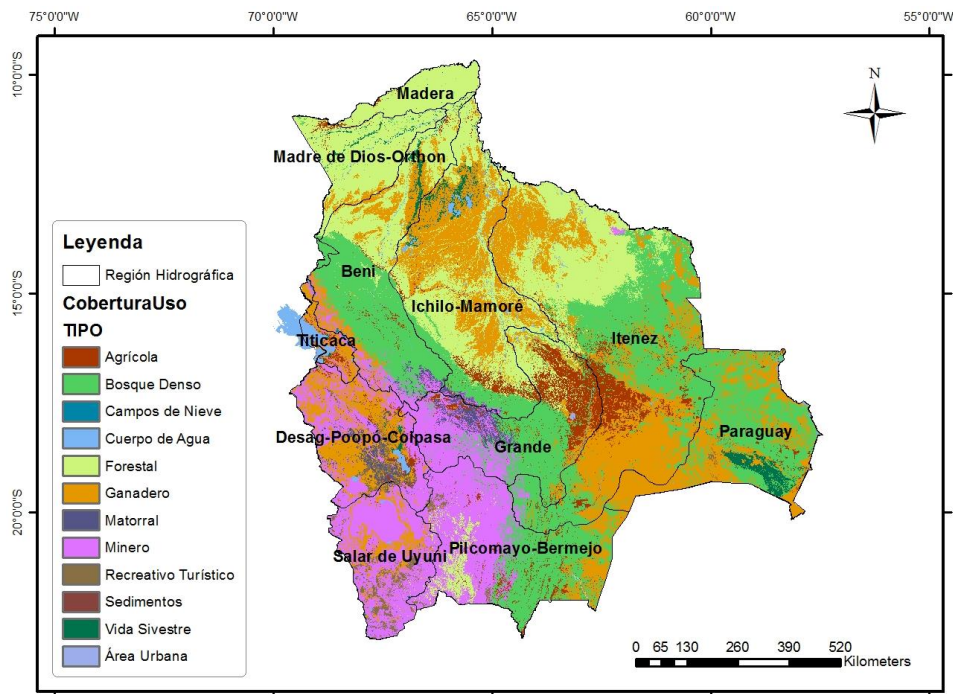


Figura 23. Usos del suelo y cuencas.

Fuente: Capas shape de cuencas y usos del suelo obtenidas del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia (2014)

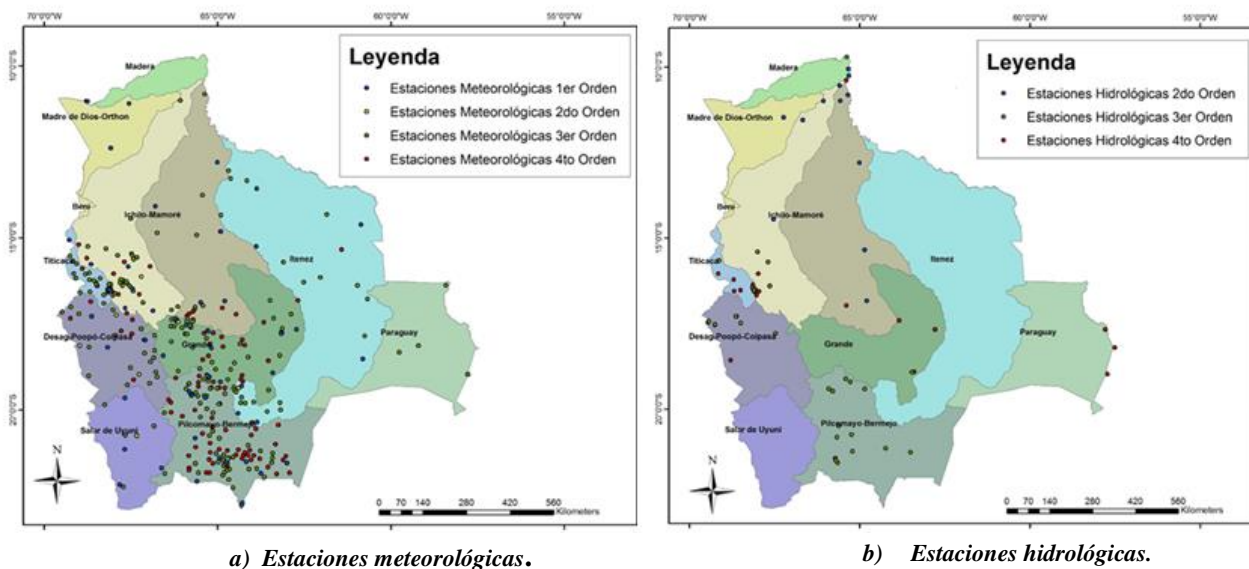


Figura 24. Ubicación de estaciones del SENAMHI a lo largo del país.

Fuente: Capa shape de cuencas obtenida de GeoBolivia (2014)

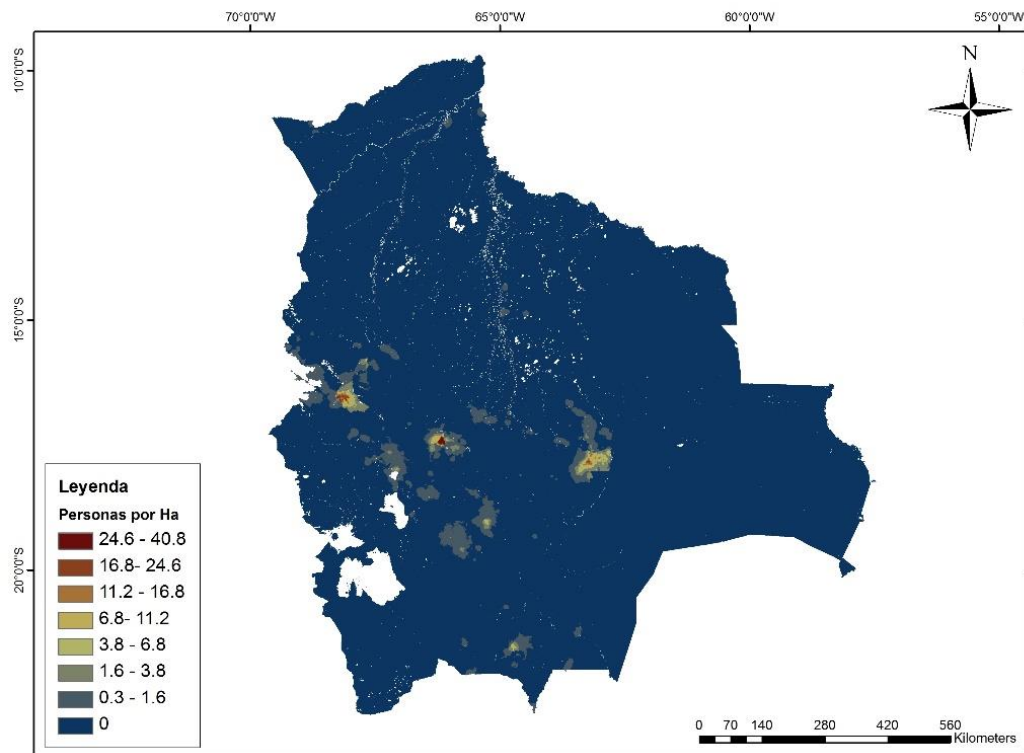


Figura 25. Centros poblados.

Fuente: Capa raster de distribución espacial de población obtenida de WorldPop (2014)

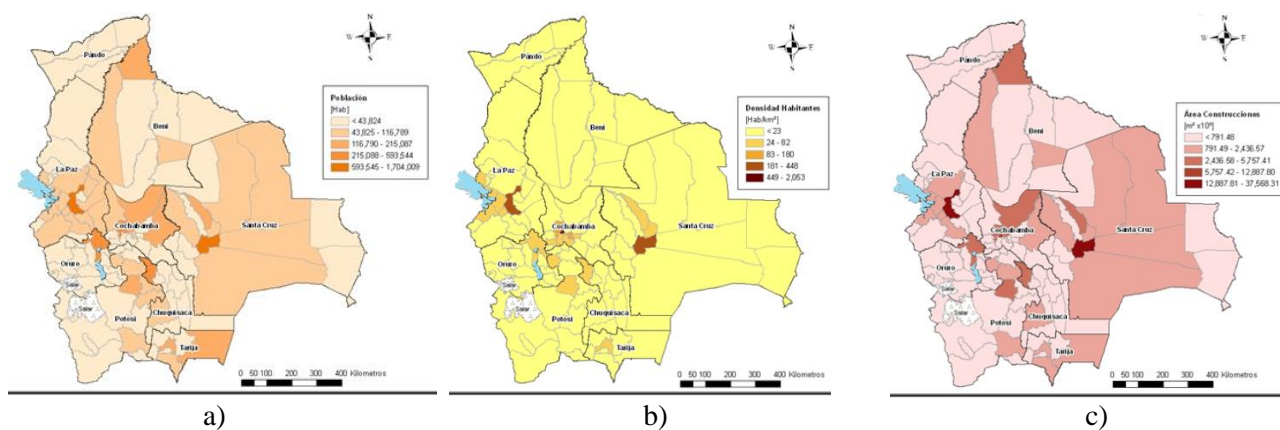


Figura 26. Información por provincia de distribución de población. a) Distribución de población por provincia, b) Densidad poblacional por provincia, y c) Distribución de área construida por provincia, en Bolivia.

Fuente: BID, 2011

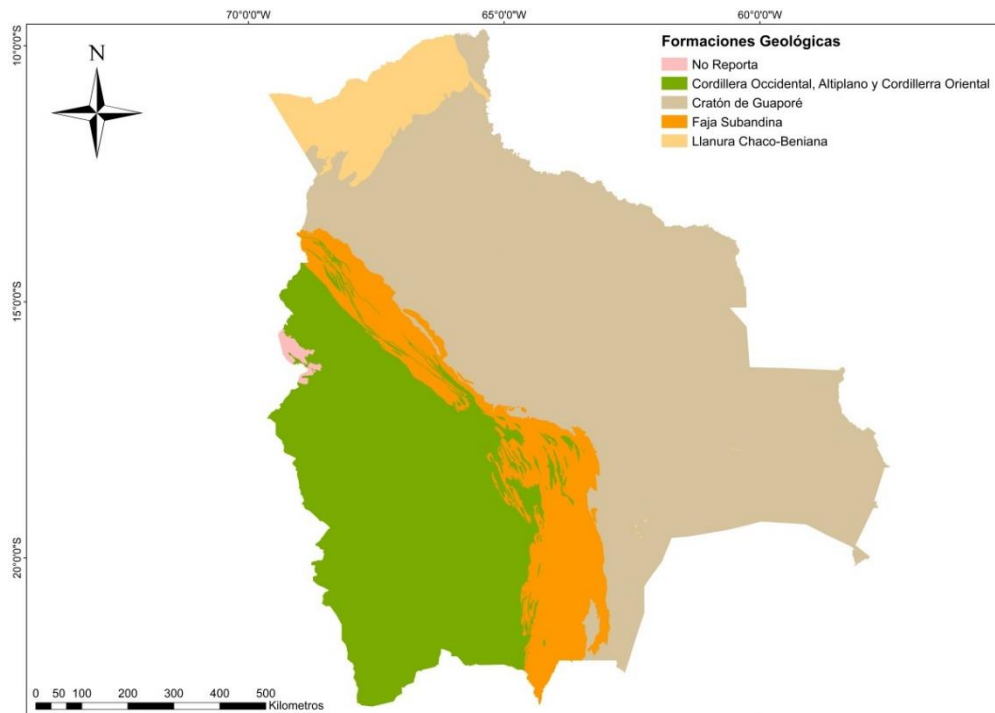


Figura 27. Formaciones geológicas.

Fuente: Capa shape de formaciones geológicas obtenida del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia (2014)

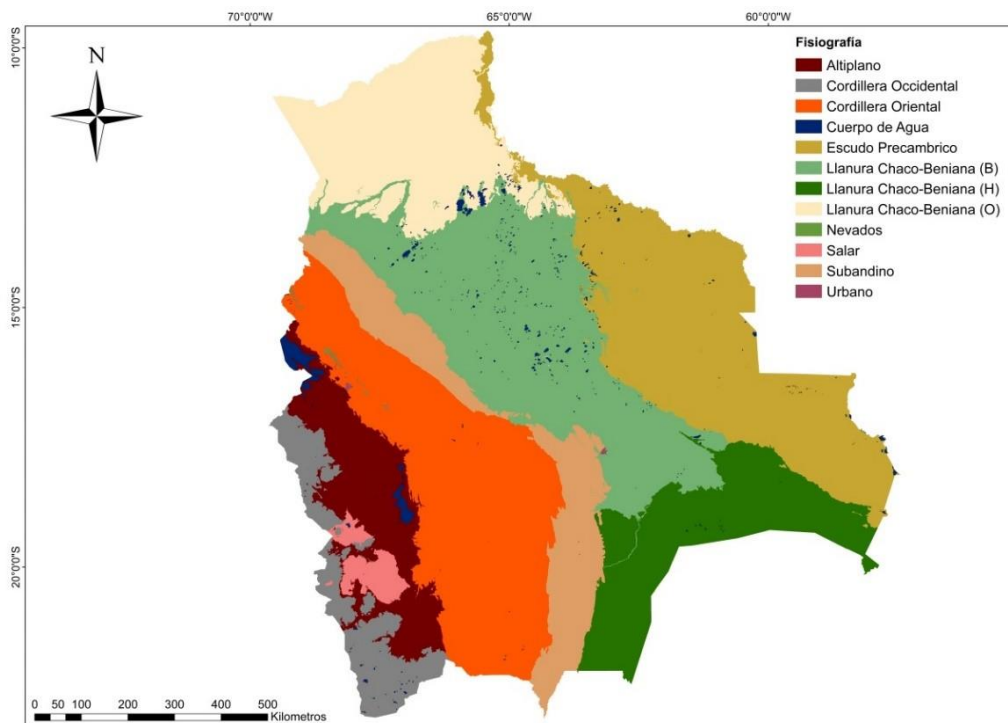


Figura 28. Fisiografía.

Fuente: Capa shape de fisiografía obtenida del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia (2014)

Adicionalmente la Tabla 12 presenta el listado de las principales poblaciones ubicadas en zonas susceptibles a inundación clasificadas por Departamento.

Tabla 12. Distribución de la población en ciudades susceptibles a inundación.
Fuente: Capas shape de división política del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia (2014) y Capa raster de distribución espacial de población obtenida de WorldPop (2014)

Departamento	Provincia	Municipio	Área km2	Población
Beni	Iténez	Baures	21,494	11,563
Beni	Yacuma	Exaltación	25,148	7,545
Beni	Vaca Diez	Magdalena	13,798	8,299
Beni	Mamoré	Puerto Siles	2,122	1,796
Beni	José Ballivian	Reyes	11,764	18,298
Beni	Vaca Diez	Riberalta	12,817	76,406
Beni	José Ballivian	Rurrenabaque	2,839	8,784
Beni	Marban	San Andrés	10,057	18,688
Beni	José Ballivian	San Borja	8,628	32,075
Beni	Moxos	San Ignacio de Moxos	25,120	36,727
Beni	Yacuma	Santa Ana de Yacuma	21,303	17,891
Beni	Cercado	Trinidad	1,754	41,295
Chuquisaca	Zudañez	Icla	828	7,467
Chuquisaca	Hernando Siles	Monteagudo	3,378	18,967
Chuquisaca	Zudañez	Presto	1,316	9,345
Chuquisaca	Luis Calvo	Villa Vaca Guzmán	3,855	5,283
Chuquisaca	Yamparáez	Yamparáez	616	12,594
Cochabamba	Arani	Arani	214	10,291
Cochabamba	Carrasco	Chimoré	2,753	23,220
Cochabamba	German Jordan	Cliza	55	13,225
Cochabamba	Cercado	Cochabamba	287	610,950
Cochabamba	Quillacollo	Colcapirhua	26	23,881
Cochabamba	Mizque	Mizque	1,873	26,572
Cochabamba	Campero	Omereque	886	4,743
Cochabamba	Carrasco	Puerto Vllaroel	1,975	41,290
Cochabamba	Quillacollo	Quillacollo	571	99,931
Cochabamba	Chapare	Sacaba	714	78,995
Cochabamba	Quillacollo	Sipe Sipe	503	116,055
Cochabamba	German Jordan	Toco	63	8,872
Cochabamba	German Jordan	Tolata	75	11,460
Cochabamba	Chapare	Villa Tunari	11,249	148,611

Departamento	Provincia	Municipio	Área km2	Población
La Paz	Larecaja	Guanay	6,839	63,979
La Paz	Abel Iturralde	Ixiamas	37,355	14,526
La Paz	Sud Yungas	Palos Blancos	3,458	48,237
La Paz	Abel Iturralde	San Buenaventura	2,877	4,183
La Paz	Larecaja	Tipuani	282	2,871
Potosí	Nor Chichas	Cotagaita	6,437	31,851
Potosí	Sur Chichas	Tupiza	6,106	49,658
Potosí	Nor Chichas	Vitichi	1,721	10,287
Santa Cruz	Ñuflo de Chávez	Concepción	29,990	51,377
Santa Cruz	Andrés Ibañez	Cotoca	625	314,576
Santa Cruz	Ñuflo de Chávez	El Puente	2,079	15,621
Santa Cruz	Obispo Santistevan	Mineros	5,350	108,388
Santa Cruz	Chiquitos	San José de Chiquitos	22,506	34,182
Santa Cruz	Ñuflo de Chávez	San Ramón	7,094	33,113
Santa Cruz	Sara	Santa Rosa del Sara	2,986	21,571
Santa Cruz	Ñuflo de Chávez	Urubicha	13,748	24,693
Santa Cruz	Ichilo	Yapacani	9,410	41,203
Tarija	Burnet O'Connor	Entre Ríos	6,077	30,326
Tarija	Arce	Padcaya	4,603	43,185
Tarija	Avilez	Uriondo	809	18,328
Tarija	Gran Chaco	Villamontes	10,692	61,373
Tarija	Avilez	Yunchara	1,858	8,272
Total			370,980	2,582,916

1.6 INFORMACIÓN GENERAL DE CUENCAS A NIVEL PAÍS

A partir de la información anterior y con base en el análisis de datos hidrológicos oficiales reportados por el SENAMHI y el SEARPI, es posible establecer los parámetros y características principales de las cuencas más importantes a nivel del país y en las cuales existe clara susceptibilidad a que se presenten eventos de inundación con afectación a la población, a la infraestructura expuesta o a las áreas productivas. La Tabla 13 presenta las características y parámetros principales asociados a cada una de éstas y la Tabla 14 presenta las poblaciones principales con riesgo de inundación en cada región hidrográfica.

Tabla 13. Características generales de las Regiones Hidrográficas de Bolivia.

Fuente: Capas shape de cuencas y ríos del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia, Capa raster de distribución espacial de población obtenida de WorldPop (2014) y Capa raster de topográfica obtenida de ASTER-GDEM (2014)

Región Hidrográfica	Área total (km ²)	Población total	Área cultivada (km ²)	Área plana* (km ²)	Área montañosa* (km ²)	Ríos Principales
Beni	122,884	1,874,360	52,569	60,952	61,933	Beni, Kaka, Coroico, Boopi, La Paz, Biata y Madidi.
Desag-Poopó-Coipasa	74,426	678,355	6,872	60,762	13,664	Desaguadero, Lauca, Caranguilla, Marques y Khayma.
Grande	102,062	3,998,260	55,133	54,110	47,953	Grande, Yapacani, Caine, Mizque, Chayanta, Piray, Rocha y Zudañez.
Ichilo-Mamoré	153,399	594,544	21,551	137,624	15,775	Mamoré, Ichilo, Chapare, Ibare, Yata, Chimoré y Mamorecillo.
Itenez	267,125	477,472	102,714	253,130	13,995	Itenez, Parapeti, Blanco, Baures, Paragua y Guarayos.
Madera	24,959	25,652	303	24,941	18	Abuna y Negro.
Madre de Dios-Orthon	51,378	77,471	3,176	49,599	1,779	Orthon, Madre de Dios, Manuripi y Tahuamanu.
Paraguay	99,232	113,803	50,150	95,450	3,782	Paraguay, Pando, Curiche y Negro
Pilcomayo-Bermejo	116,193	1,330,430	42,699	52,931	63,261	Pilcomayo y Salado.
Salar de Uyuni	62,990	54,292	327	49,702	13,288	Puca Mayu, Quetena, Kollpa Mayu y Cumbre Mayu.
Titicaca	13,192	794,169	1,337	9,512	3,680	Colorado, Tuni y Seco.

* Área plana corresponde a zonas con pendiente menor al 15%, y área montañosa a zonas con pendiente mayor al 15%.

Tabla 14. Población en riesgo de inundación en las Regiones Hidrográficas de Bolivia.
Fuente: Capas shape de cuencas y de división política del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia y Capa raster de distribución espacial de población obtenida de WorldPop (2014)

Región Hidrográfica	Principales poblaciones con riesgo de inundación	Habitantes de poblaciones principales en zonas de alto riesgo	Área susceptible (km2)
Beni	Ixiamas, Reyes, Riberalta, San Buenaventura, Guanay, Tipuani, Palos Blancos y Rurrenabaque.	245,816	61,231
Desag-Poopó-Coipasa	-	-	-
Grande	Sipe Sipe, Quillacollo, Colcapirhua, Cochabamba, Sacaba, Tolata, Cliza, Toco, Arani, Mizque, Omereque, Presto, Yapacaní, Santa Rosa del Sara, Mineros y San Ramón.	1,476,439	24,487
Ichilo-Mamoré	Exaltación, Riberalta, Santa Ana del Yacuma, Puerto Siles, San Borja, Rurrenabaque, Villa Tunari, San Ignacio de Moxos, Chimoré, Puerto Villarroel, San Andrés y Trinidad.	408,550	115,765
Itenez	San José de Chiquitos, Concepción, San Ramón, Urubichá, Monteagudo, Villa Vaca Guzmán, Baures, Magdalena, San Andrés y Trinidad.	177,121	105,652
Madera	-	-	-
Madre de Dios-Orthon	Ixiamas y Riberalta	4,972	14,574
Paraguay	San José de Chiquitos	8,165	6,428
Pilcomayo-Bermejo	Cotagaita, Vitichi, Tupiza, El Puente, Yunchará, Padcaya, Entre Ríos, Villamontes, Villa Vaca Guzmán, Uriondo, Icla y Yamparáez.	286,206	42,444
Salar de Uyuni	-	-	-
Titicaca	-	-	-

2 ASPECTOS METODOLÓGICOS

2.1 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE INUNDACIONES

Se realiza un análisis simplificado de susceptibilidad a las inundaciones a nivel país el cual tiene como propósito identificar las principales zonas inundables y aquellas de mayor potencialidad de daños en relación a impactos en la población, cultivos y zonas productivas. La metodología propuesta incluye las siguientes actividades específicas:

- Análisis general de información de lluvias a nivel país utilizando para el efecto las estaciones más importantes y que tengan la información de mayor calidad. Con la información principal se elabora un mapa general de isohietas simplificado a nivel país con el fin de identificar aquellas zonas en que se producen los mayores niveles de precipitación. Se genera información a nivel diario.
- Identificación preliminar de posibles zonas susceptibles de inundación: con base en el modelo de elevación digital (DEM) disponible, el mapa general de cuencas y la cartografía de los ríos principales se elaboran mapas de zonas susceptibles de inundación (zonas planas en cercanía a ríos caudalosos).
- Se realiza una evaluación simplificada de la profundidad de inundación representativa en cada celda a partir del caudal que potencialmente puede acumular y de su pendiente. Para esto se utiliza la fórmula de Manning (Saldarriaga, 2007) (Ecuación 1), la cual permite relacionar la profundidad de flujo con la pendiente y el caudal para flujo uniforme. A partir de esta ecuación se deriva una expresión que permita conocer dicha profundidad en función del caudal y la pendiente de la zona. A pesar que no existe una solución explícita para la profundidad de la ecuación de Manning, es posible hacer aproximaciones numéricas de tipo potencial para un rango de caudales y pendientes determinado. Los resultados de este análisis arrojan que la profundidad se puede estimar mediante una función potencial de la pendiente y el caudal en donde los exponentes promedio para cada una de estas variables son -0.3 y 0.6 para la pendiente y el caudal respectivamente. El procedimiento propuesto se resume en la Figura 29.

$$Q = \frac{1}{n} * by * \left(\frac{by}{b + 2y} \right)^{2/3} * S^{1/2} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde, Q es el caudal, y es la profundidad del flujo, n es el coeficiente de rugosidad de Manning del canal, b es el ancho del canal, y S es su pendiente.

- Identificación de zonas susceptibles a las inundaciones a partir de los resultados del análisis simplificado.
- El mapa de susceptibilidad a las inundaciones se cruza con el mapa de distribución de la población por celdas para identificar las zonas de mayor riesgo potencial por inundaciones en relación a afectación de la población.
- Simultáneamente el mapa de susceptibilidad a las inundaciones se cruza con el mapa de usos del suelo con el fin de identificar las zonas del país con mayor riesgo potencial por inundaciones en relación a la afectación de zonas productivas.
- Finalmente se obtienen estadísticas para cada una de las cuencas y ríos importantes del país en relación a la extensión geográfica de las zonas potencialmente inundables, la población y las zonas productivas expuestas. Con base en esto se plantea una zonificación preliminar de riesgo indicativo por inundación para el país.
- Con base en la zonificación propuesta se definen las cuencas con mayor potencial de riesgo por inundación en relación a posibles impactos sobre los centros poblados, zonas de desarrollo crítico para el país o zonas de alta productividad agrícola y económica.

La anterior metodología fue aplicada haciendo uso del sistema de información geográfica **ArcGIS**. Complementariamente a esto se realiza un análisis de los eventos históricos para los cuales exista información con el fin de tener una validación general de los resultados.

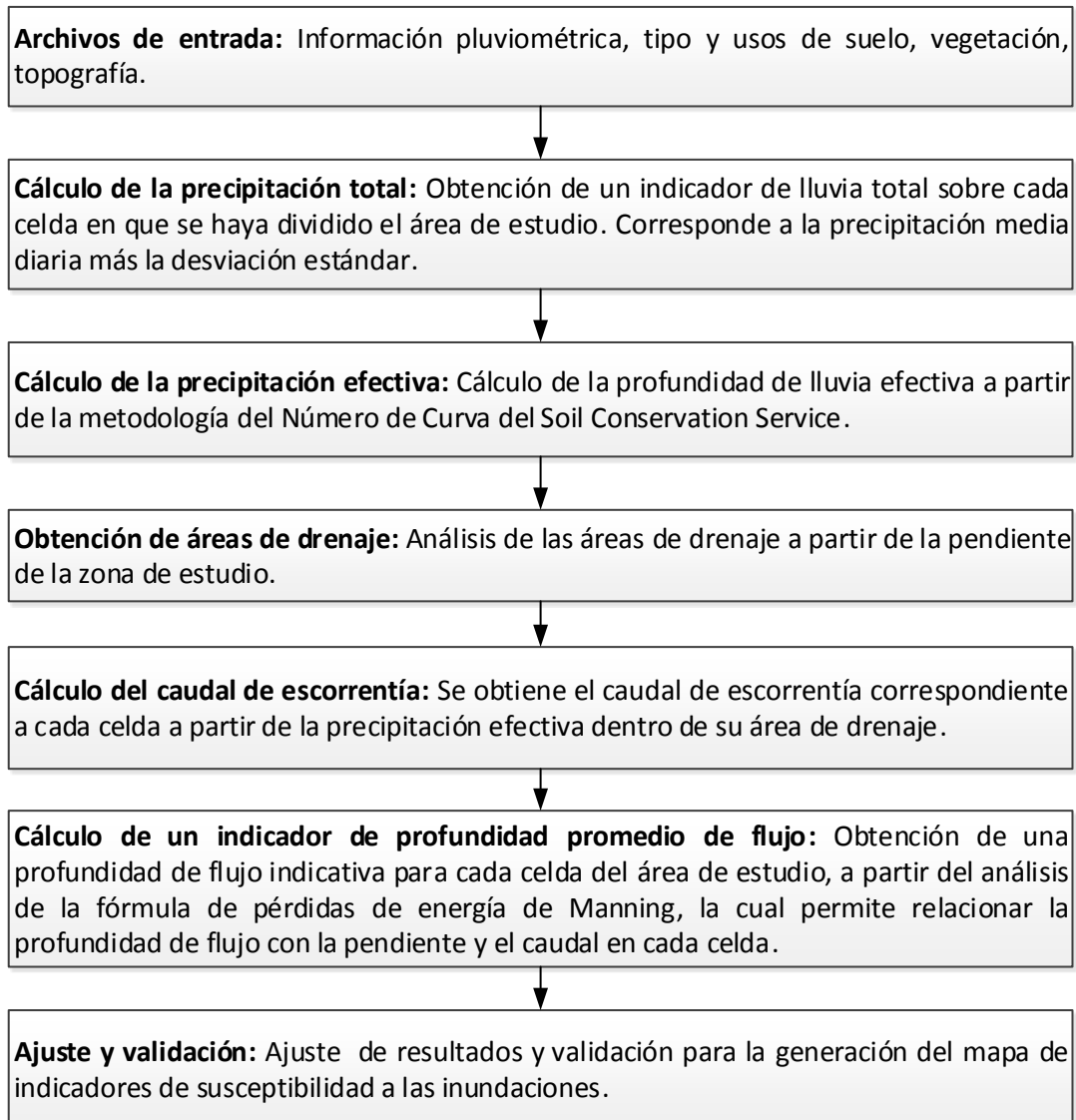


Figura 29. Procedimiento de análisis simplificado para identificación de zonas bajo amenaza de inundación.

2.2 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS

Se realiza un análisis simplificado de susceptibilidad a los deslizamientos el cual tiene como propósito principal identificar las principales zonas con alta potencialidad de daños en relación a impactos en la población, en zonas productivas y en el sector vial y de transporte. La metodología utilizada en este análisis incluye las siguientes actividades específicas:

- Análisis general de información de lluvias a nivel país utilizando para el efecto las estaciones más importantes y que tengan la información de mayor calidad. Con la información principal se elabora un mapa general de isohietas simplificado a nivel país con el fin de identificar aquellas zonas en que se producen los mayores niveles de precipitación. Se genera información a nivel mensual y anual.
- Análisis simplificado de la amenaza sísmica del país con el fin de estudiar la potencialidad de sismos por regiones como detonantes de eventos de deslizamientos.
- Análisis de las formaciones geológicas superficiales y caracterización preliminar de susceptibilidad de acuerdo con información geotécnica complementaria y conceptos geológico-geotécnicos. Esta actividad se realiza con el apoyo de un geólogo especialista y se apoya en la interpretación de imágenes de satélite y fotografías aéreas.
- Análisis general de susceptibilidad a los deslizamientos utilizando el software *IT-Deslizamientos* el cual considera el modelo de elevación digital del país, la información geológica y geotécnica e información complementaria para realizar un análisis simplificado de factores de seguridad a la falla.
- Análisis de susceptibilidad a los deslizamientos para diferentes escenarios de análisis de precipitación y de sismicidad.
- Propuesta de zonificación general del país en zonas de susceptibilidad a los deslizamientos en las diferentes cuencas y zonas geográficas principales del país.
- La información anterior se cruza con la información de poblaciones con el fin de identificar las zonas importantes del país en las cuales se concentra el riesgo de las poblaciones con respecto a eventos de inundaciones. El análisis también puede aplicarse a otros componentes de infraestructura como la red vial primaria y secundaria o las zonas de cultivos con el fin de evaluar el impacto económico de este tipo de eventos.
- Con base en la zonificación propuesta se definen las cuencas con mayor potencial de riesgo por deslizamientos en relación a posibles impactos sobre los centros poblados, zonas de desarrollo crítico para el país o zonas de alta productividad agrícola y económica, red vial e infraestructura.

Complementariamente a lo anterior se realiza un análisis de los eventos históricos para los cuales exista información con el fin de tener una validación general de los resultados. Igualmente se utiliza la información de zonas inestables que resulte de la interpretación de imágenes y de información complementaria para efectos de validación.

Para el análisis se cuenta con la siguiente información básica:

- Modelo de elevación digital del terreno
- Información de la geología superficial
- Mapa de ríos y cuerpos de agua
- Mapa de vías principales y secundarias
- Mapa de usos del suelo
- Informes e inventario de eventos previos y zonas inestables

El procedimiento específico que utiliza el software *IT- Deslizamientos* para el análisis de los factores de seguridad incluye los siguientes pasos principales:

- (1) Conformación y adecuación de toda la información requerida, incluyendo la información topográfica basada en el modelo de elevación digital (DEM), información geológica y geomorfológica, información de suelos, información de usos de la tierra, aguas freáticas o subterráneas, coberturas del suelo, etc.
- (2) Selección de las áreas críticas en función de la densidad de eventos en el pasado y según la susceptibilidad geológico-geotécnica. Los principales factores a tomar en cuenta para la zonificación son:
 - Evidencia de deslizamientos pasados.
 - Presencia de rocas arcillosas y lutíticas con desarrollo de perfiles de meteorización paralelos al terreno, así como perfiles de meteorización local de mayor profundidad en algunas unidades de lutita (falla rotacional).
 - Existencia de rocas de mayor dureza (areniscas, conglomerados), tanto del Cretácico como del Terciario, que presenten mecanismos de ruptura dominados por la configuración estructural (diaclasas, buzamiento desfavorable). Este mecanismo puede presentarse también en lutitas y arcillolitas con buzamiento desfavorable.
 - Presencia de depósitos coluviales que puedan originar fallas de tipo rotacional y también planar en el contacto con la roca.
 - Factores detonantes primordiales, como por ejemplo el efecto de cortes en tramos viales, la acción del agua y erosión/socavación.
 - Evidencias y efectos de deforestación intensiva, y sobrecargas excesivas en la corona de los taludes.
 - Características adicionales de las formaciones geológicas encontradas.

- Mapa de pendientes topográficas.
- (3) Evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos con el método de falla plana con aplicación tridimensional mediante el software *IT-Deslizamientos*.
 - (4) Seleccionar las condiciones de humedad (nivel freático) y sus frecuencias anuales de ocurrencia.
 - (5) Seleccionar el conjunto de eventos sísmicos estocásticos detonantes calculados a partir de las condiciones de amenaza sísmica.
 - (6) Evaluar la susceptibilidad a los deslizamientos en la zona de estudio para los diferentes eventos detonantes y para las condiciones de niveles freáticos seleccionados.

2.3 METODOLOGÍA ESPECÍFICA PARA EL ANÁLISIS DE AMENAZA POR INUNDACIONES

Para el análisis de amenaza por inundación en cuencas específicas se adopta una metodología novedosa la cual incluye los siguientes aspectos básicos:

- Modelación probabilista
- Modelación hidrológica detallada de la cuenca con varios puntos posibles de salida de hidrogramas compatibles con cada una de las tormentas de lluvia estocásticas.
- Modelación hidráulica detallada de la cuenca en las zonas potencialmente inundables considerando los hidrogramas de entrada compatibles con cada una de las tormentas estocásticas consideradas.
- Generación de escenarios de inundación para cada tormenta de lluvia estocástica en la cuenca con análisis de interacción entre diferentes afluentes al cauce principal.
- Consideración en el modelo del cauce principal y diferentes subcauces alternos en escenarios de inundación.

A continuación se presenta en forma resumida la metodología de análisis de la amenaza por inundación adoptada para el presente estudio. Adicionalmente, el procedimiento analítico detallado se presenta en el Anexo 1.

2.3.1 Software utilizado en el análisis de amenaza de inundación

2.3.1.1 Análisis hidrológico

Para la evaluación de la amenaza por inundación la estimación de los caudales se realiza mediante la utilización del modelo hidrológico HEC-HMS. El programa HEC-HMS fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los

EE.UU. (US Army Corps of Engineers). Este modelo es empleado para la simulación procesos de lluvia-escorrentía en cuencas de drenaje dendríticas. Permite la modelación de un amplio rango de áreas geográficas para la solución de diferentes problemas. El programa incluye gran variedad de modelos matemáticos para la representación de cada uno de los diferentes procesos hidrológicos involucrados.

El modelo hidrológico de la cuenca de estudio realizado en HEC-HMS es usado como un parámetro de entrada por el programa *IT-Inundación 1.0* (ver Anexo 5) de tal manera que para cada escenario contenido en el AME de lluvia, el programa ejecuta una corrida de HEC-HMS a fin de realizar la transformación de lluvia a escorrentía que se lleva a cabo en la cuenca, asociada a cada escenario de precipitación y así obtener los los hidrogramas de entrada a lo largo del tramo estudiado.

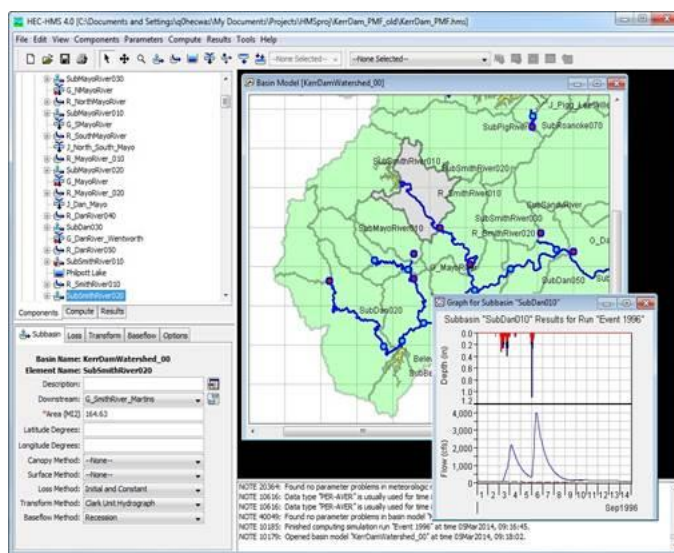


Figura 30. Programa HEC-HMS desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers)

2.3.1.2 Análisis hidrodinámico - Programa HEC-RAS

Para realizar la simulación de las huellas de inundación asociadas al tránsito de avenidas por cauces, canales o ríos se utiliza el modelo hidráulico del programa HEC-RAS desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers). Este modelo numérico permite realizar el análisis del flujo no permanente unidimensional en lámina libre.

La primera versión de HEC-RAS (Versión 1.0.0) fue liberada en julio de 1995. Desde ese entonces han existido una serie de mejoras en el programa, lo que se ha traducido en diferentes versiones, hasta llegar a la actual (versión 4.1.0, ver Figura 31) liberada en enero de 2010 y que es la que se utiliza en el software *IT-Inundación 1.0*. El modelo hidráulico del tramo inundable realizado en HEC-RAS es usado como un parámetro de entrada por el programa *IT-Inundación 1.0*, de tal manera que para cada escenario contenido en el AME de lluvia, el programa ejecuta una corrida de HEC-RAS a fin de realizar el tránsito hidráulico

de los hidrogramas asociados a cada escenario de precipitación y así obtener los niveles y velocidades a lo largo del tramo estudiado.

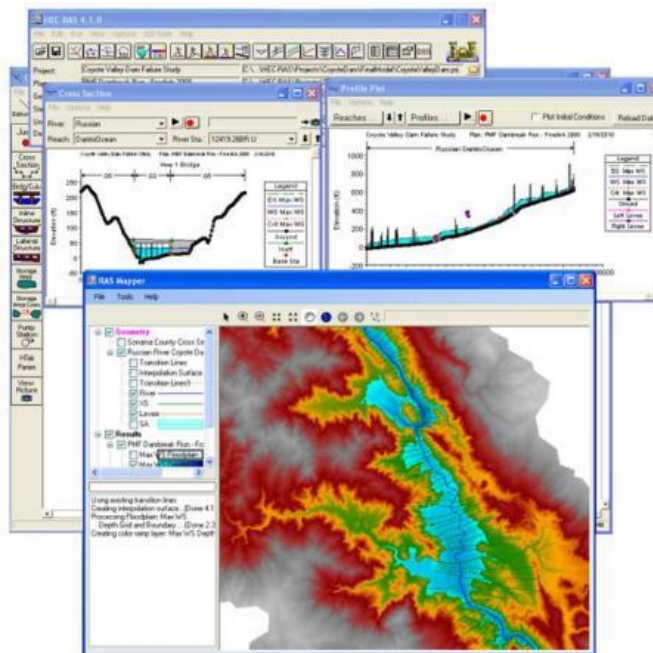


Figura 31. Programa HEC-RAS desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers)

Para mayor información sobre el programa HEC-RAS se sugiere que el usuario revise y descargue la información relacionada con el programa incluyendo el Manual del Usuario, el Manual de Referencia y las Aplicaciones, la cual se puede encontrar en <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation.aspx>.

2.3.2 Amenaza de lluvia

En el presente estudio se realiza inicialmente el análisis de amenaza de lluvias con toda la información disponible en las estaciones hidrometeorológicas que cuentan con registros a lo largo de las cuencas de interés.

Para desarrollar el modelo de amenaza se requiere analizar la información pluviométrica mediante el software *IT-Precipitación* (ver Anexo 5), para luego mediante el software *IT-LluviaNH* (ver Anexo 5) generar las curvas Profundidad – Área – Duración- Frecuencia (PADF) características para cada una de las cuencas de análisis y a su vez generar un conjunto de eventos estocásticos basados en la información histórica que se resume en las PADF con ubicaciones, formas y distribución de intensidades aleatorias . A partir del conjunto de eventos estocásticos se genera un hietograma permitiendo así modelar la

distribución de la intensidad en el tiempo. El resultado es un archivo “.AME” que contiene la variabilidad de los campos de precipitación en la cuenca de análisis

2.3.3 Amenaza de inundación

En general, la magnitud de una inundación provocada por procesos de origen meteorológico depende de la intensidad de las lluvias, de su distribución en el espacio y tiempo, del tamaño de las cuencas hidrológicas afectadas, de las características del suelo y del drenaje natural o artificial de las cuencas.

En el presente análisis se utiliza la metodología establecida en el software *IT-Inundación 1.0* (ver Anexo 5) para el análisis de inundaciones fluviales o por desbordamiento, utilizando una metodología de evaluación de amenazas probabilista. El método detallado de análisis probabilístico de amenaza planteado en IT-Inundación 1.0 se basa en el uso de un modelo hidrológico (usando el programa HEC-HMS) y uno hidrodinámico (usando el programa HEC-RAS).

El resultado del programa es un archivo “.AME” que contiene la amenaza de inundación de la cuenca de análisis.

Las principales fuentes de incertidumbre en el análisis de inundación son: la incertidumbre proveniente de los datos u observaciones, que corresponde a la aproximación en las variables hidrometeorológicas medidas y que son usadas como datos de entrada o datos de calibración (precipitación, temperatura, caudales etc.); incertidumbre paramétrica que se produce por la calibración imperfecta del modelo; incertidumbre estructural de modelo que es el resultado de la inhabilidad del modelo para esquematizar de manera precisa los procesos físicos (Michele et al. 2011)

2.4 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN PROBABILISTA DE RIESGO

2.4.1 Metodología general para la evaluación del riesgo

Una de las actividades fundamentales de la gestión del riesgo de desastres a nivel de país es la evaluación del riesgo de catástrofe, o de eventos extremos, para lo cual es necesario aplicar metodologías confiables que permitan una adecuada estimación y cuantificación del potencial de pérdidas en un tiempo de exposición determinado. No obstante, aunque se han desarrollado a nivel internacional diversas metodologías para la evaluación detallada del riesgo para diferentes tipos de amenazas naturales, pocas metodologías permiten realizar un análisis a nivel país por dos razones principales: primero, la falta de información detallada que impide la conformación de bases de datos robustas para describir la exposición y, segundo, la falta de metodologías que permitan modelar de manera integrada las amenazas, la vulnerabilidad de los elementos expuestos y el riesgo que se deriva de su respectiva integración y convolución.

Para alcanzar, entonces, el objetivo general de identificar y cuantificar el riesgo de catástrofe de un país, es necesario desarrollar un método que permita tener en cuenta las amenazas naturales en forma integral,

que incluya de la manera más completa posible la exposición de los bienes de infraestructura –teniendo en cuenta sus principales características–, que considere la vulnerabilidad específica de cada componente de dicha infraestructura y que finalmente permita la evaluación del riesgo mediante un proceso de cálculo probabilista apropiado teniendo en cuenta las incertidumbres propias de un proceso de este tipo, las inevitables limitaciones en la información y la capacidad de cómputo electrónico.

En la mayoría de los casos es necesario utilizar ciertos enfoques o criterios de simplificación y agregación de información, debido a la ausencia de datos o a la inherente baja resolución de la información. Esta circunstancia en ocasiones significa sacrificar algunas características técnico-científicas o econométricas, como la exactitud y la completitud, consideradas en general como deseables e incluso como ineludibles cuando de riesgo se trata.

Este informe presenta la evaluación del riesgo catastrófico por inundación para dos cuencas prioritarias en Bolivia. La metodología probabilista utilizada es considerada la más robusta para este tipo de modelación e identifica los aspectos más importantes del riesgo de catástrofe con fines de orientación de prioridades del país en materia de gestión del riesgo de desastres en general.

2.4.2 Evaluación probabilista del riesgo

La frecuencia de eventos catastróficos es particularmente baja por lo cual la información histórica, es en general muy limitada. Considerando las posibilidades de eventos de alta capacidad destructiva en el futuro, la estimación del riesgo debe enfocarse en modelos probabilistas los cuales pueden utilizar la limitada información histórica disponible para pronosticar, de la mejor manera posible, las consecuencias de futuros eventos considerando en forma simultánea las inevitables altas incertidumbres involucradas en los análisis.

La estimación del riesgo debe ser prospectiva, anticipando eventos científicamente posibles que pueden ocurrir en el futuro. Para el caso de eventos de precipitaciones se utiliza la información meteorológica disponible, por registros pluviográficos o pluviométricos disponibles de la zona de estudio. Debido a las altas incertidumbres inherentes a los modelos de análisis con respecto a la severidad y a la frecuencia de ocurrencia de los eventos, el modelo de riesgo se basa en formulaciones probabilistas que incorporan dicha incertidumbre en la evaluación del riesgo. El modelo de riesgo probabilista, construido a partir de una secuencia de módulos, cuantifica las pérdidas potenciales tal como se esquematiza en la Figura 32. Los resultados del análisis de riesgo permiten realizar una serie de actividades relacionadas con la gestión del riesgo entre las cuales se incluyen la reducción y mitigación del riesgo, la protección financiera y la preparación de planes de emergencia y de reconstrucción en caso de desastre.

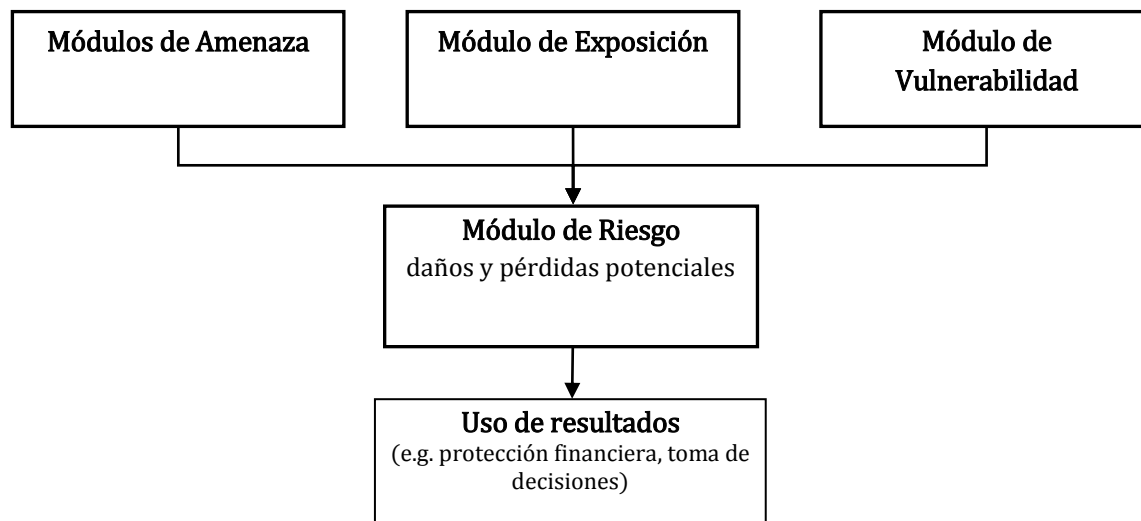


Figura 32. Esquema general del análisis de riesgo probabilista

2.4.3 Módulos de análisis para la evaluación del riesgo

Los módulos de análisis de amenazas, de exposición, de vulnerabilidad y de riesgo tienen las siguientes funciones específicas:

- a) **Módulo de amenazas:** este módulo permite calcular la amenaza asociada a todos los eventos factibles que podrían ocurrir, a un grupo de eventos seleccionados, o incluso, a un solo evento relevante. Para cada tipo de fenómeno natural, usando este módulo, es posible calcular el valor máximo probable de la intensidad que lo caracteriza para diferentes tasas de ocurrencia o períodos de retorno. En este módulo se produce, para cada tipo de amenaza, un archivo tipo AME (.ame de amenaza), en el cual se incluyen múltiples mallas, sobre el territorio estudiado, de los diferentes parámetros de intensidad de los fenómenos considerados. Cada malla es un escenario del nivel de intensidad alcanzado por eventos históricos o eventos generados en forma estocástica, con sus respectivas frecuencias de ocurrencia. Para este caso el parámetro de intensidad de inundaciones seleccionado corresponde al tirante máximo de inundación o profundidad máxima de inundación en cada ubicación geográfica.
- b) **Módulo de exposición:** este módulo da cuenta de la descripción de los elementos o activos expuestos que pueden ser afectados. Se basa en archivos en formato tipo “shape” que corresponden a la infraestructura expuesta que va a ser incluida en el análisis de riesgo. La información requerida para estos archivos es la siguiente:
 - Identificación del tipo de elementos expuestos

- Localización
- Valor expuesto
- Tipificación del elemento para posteriormente asociarle una función de vulnerabilidad

En este caso el módulo de exposición son las bases de datos de elementos expuestos que incluyen vivienda, edificaciones y zonas cultivadas.

- c) Módulo de vulnerabilidad: este módulo permite la generación de funciones de vulnerabilidad con base en la modificación o utilización directa de funciones ya existentes que se seleccionan a partir de una librería de funciones, o mediante la generación de nuevas funciones a partir de información específica de la clase de estructura, activo o elemento expuesto considerado incluyendo para el presente caso las zonas de cultivos. La asignación de la función de vulnerabilidad a cada uno de los componentes de la base de datos de exposición se realiza sobre el archivo en el formato “shape” procesado en el módulo de exposición.
- d) Módulo de riesgo: este módulo realiza la integración-convolución de la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de evaluar el riesgo o las consecuencias o efectos potenciales. El riesgo puede expresarse en términos de daño e impactos físicos, pérdida económica absoluta o relativa, efectos sobre la población y eventuales impactos en zonas de cultivo.

Una vez estimado el daño físico esperado (valor potencial promedio y su dispersión) en porcentaje o en valor absoluto para cada uno de los activos o componentes expuestos incluidos en el análisis, es posible realizar estimativos de diferentes parámetros o métricas útiles para el análisis propuesto, resultado de obtener la curva de probabilidad de excedencia de pérdidas (LEC o Loss Exceedance Curve en inglés). Este estudio se concentra en la evaluación del riesgo por inundaciones en cuencas seleccionadas y valoraciones aproximadas a nivel país utilizando como medida de riesgo principal la Pérdida Máxima Probable (PML o Probable Maximum Loss en inglés) para diferentes periodos de retorno y la Pérdida Anual Esperada (AAL o Average Annual Loss en inglés) también conocida como prima técnica de riesgo. Con base en estos resultados, se estima la concentración del riesgo y se realizan análisis e interpretaciones adicionales útiles en la gestión del riesgo de desastre. Los valores de PML y AAL son los principales resultados de este informe. Estas medidas o métricas son de especial importancia para establecer una estrategia integral de gestión del riesgo por inundaciones que incluyan actividades de prevención, mitigación, estrategias de manejo y protección financiera para cubrir la responsabilidad fiscal del Estado y atención de emergencias principalmente.

La metodología para la evaluación del riesgo en las cuencas críticas seleccionadas incluye los siguientes aspectos:

- a) Evaluación de la amenaza por lluvias no huracanadas mediante métodos probabilistas: con base en los registros de intensidad de lluvias disponibles se generan una serie de tormentas estocásticas que simulan la intensidad y frecuencia de los eventos críticos.

- b) Evaluación de la amenaza por inundaciones mediante modelos especializados: los eventos estocásticos de lluvia permiten generar la distribución de intensidades de inundación mediante modelos especializados hidrológicos y de tránsito de crecientes.
- c) Inventario de bienes expuestos: se realiza mediante el levantamiento de información a través de imágenes de satélite y fotografías aéreas y mediante trabajos de levantamiento de información en campo. El nivel de resolución es predio a predio en algunos casos y zonas uniformemente pobladas en los casos en que se dificulta el levantamiento de la información por problemas de accesibilidad.
- d) Funciones de vulnerabilidad: los diferentes tipos constructivos identificados en las zonas críticas de estudio se caracterizan mediante una función de vulnerabilidad que da cuenta de la capacidad de las edificaciones para resistir la acción de los diferentes eventos considerados. Estas funciones de vulnerabilidad representan el comportamiento esperado de las edificaciones de cada tipo estructural particular, por lo que su uso es adecuado en términos estadísticos cuando existe un inventario amplio de activos expuestos. También se desarrollan funciones de vulnerabilidad para los diferentes tipos de cultivos en las zonas expuestas a inundación.
- e) Evaluación del riesgo: la evaluación del riesgo se lleva a cabo mediante la asociación de las amenazas consideradas sobre el inventario de activos expuestos con las funciones de vulnerabilidad relacionadas. Para el efecto se emplea la herramienta de evaluación de riesgo CAPRA-GIS. Se evalúa, entonces, el porcentaje de daños esperado en cada una de las edificaciones y zonas de cultivo expuestas para cada uno de los escenarios planteados y para el análisis probabilista integral. La valoración del riesgo se presenta en términos de:
 - Porcentaje de afectación física de las construcciones.
 - Pérdidas anuales esperadas aproximadas por predio.
 - Pérdidas económicas máximas probables para el portafolio de construcciones.
 - Pérdidas y porcentaje de daño esperado para escenarios específicos.
 - Pérdidas económicas esperadas y máximas probables en zonas de cultivos.

2.4.4 Cálculo numérico básico

Considerando el objetivo básico del análisis probabilista del riesgo expuesto anteriormente, es necesario plantear entonces la metodología específica de cálculo de las frecuencias de ocurrencia de niveles específicos de pérdidas asociados a los activos expuestos en lapsos determinados de tiempo y ante la ocurrencia de amenazas naturales.

El riesgo por amenazas naturales es comúnmente descrito mediante la llamada curva de excedencia de pérdidas (“loss curve”) que especifica las frecuencias, usualmente anuales, con que ocurrirán eventos en que se excedan un valor especificado de pérdidas. Esta frecuencia anual de excedencia se conoce también

como tasa de excedencia, y puede calcularse mediante la siguiente ecuación, que es una de las múltiples formas que adopta el teorema de la probabilidad total:

$$\nu(p) = \sum_{i=1}^{\text{Eventos}} \Pr(P > p | \text{Evento } i) F_A(\text{Evento } i) \quad \text{Ecuación 2}$$

En la ecuación anterior $\nu(p)$ es la tasa de excedencia de la pérdida p y $F_A(\text{Evento } i)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del evento i , mientras que $\Pr(P > p | \text{Evento } i)$ es la probabilidad de que la pérdida sea superior a p , dado que ocurrió el i -ésimo evento. La suma en la ecuación anterior se hace para todos los eventos potencialmente dañinos. El inverso de $\nu(p)$ es el periodo de retorno de la pérdida p , identificado como Tr .

Como se verá más adelante, la curva de pérdidas contiene toda la información necesaria para describir en términos de probabilidad el proceso de ocurrencia de eventos que produzcan pérdidas.

La pérdida p a que se refiere la ecuación anterior es la suma de las pérdidas que acontecen en todos los elementos expuestos. Conviene hacer notar lo siguiente:

- La pérdida p es una cantidad incierta, cuyo valor, dada la ocurrencia de un evento, no puede conocerse con precisión. Debe, por tanto, ser vista y tratada como una variable aleatoria y deben preverse mecanismos para conocer su distribución de probabilidad, condicionada a la ocurrencia de cierto evento.
- La pérdida p se calcula como la suma de las pérdidas que se presentan en cada uno de los bienes expuestos. Cada uno de los sumandos es una variable aleatoria y entre ellos existe cierto nivel de correlación, que debe ser incluido en el análisis.

En vista de la Ecuación 2, la secuencia de cálculo probabilista de riesgo es la siguiente:

1. Para un escenario, determinar la distribución de probabilidades de la pérdida en cada uno de los bienes expuestos.
2. A partir de las distribuciones de probabilidad de las pérdidas en cada bien, determinar la distribución de probabilidad de la suma de estas pérdidas, tomando en cuenta la correlación que existe entre ellas.
3. Un vez determinada la distribución de probabilidad de la suma de las pérdidas en este evento, calcular la probabilidad de que esta exceda un valor determinado, p .
4. La probabilidad determinada en el inciso anterior, multiplicada por la frecuencia anual de ocurrencia del evento, es la contribución de este evento a la tasa de excedencia de la pérdida p .

El cálculo se repite para todos los eventos, con lo que se obtiene el resultado indicado por la Ecuación 2.

Es interesante señalar también que en la Ecuación 2 no se hace distinción entre eventos que pertenezcan a diferentes amenazas. En efecto, la suma en esa ecuación podría incluir, por ejemplo, sismos y huracanes o sismos y erupciones volcánicas. Esto puede hacerse porque se ha supuesto que tanto los eventos asociados a una misma amenaza como los eventos asociados a distintas amenazas no ocurren simultáneamente. Sin embargo, algunos fenómenos potencialmente dañinos sí ocurren simultáneamente,

por lo que en estos casos hay que tomar previsiones especiales para la determinación de la distribución de probabilidad de p , tal como se analiza en el siguiente numeral.

2.4.5 Incertidumbres

Como se observa en la Ecuación 2, y como se planteó anteriormente, la pérdida que se presenta en un grupo de bienes expuestos durante un escenario es una cantidad incierta que debe ser tratada como variable aleatoria.

Generalmente es impráctico determinar de manera directa la distribución de probabilidad de la pérdida en un bien expuesto condicionada a la ocurrencia de un escenario. En otras palabras, por ejemplo, es impráctico determinar la distribución de probabilidad de la pérdida en un edificio, dado que en un sitio localizado a 100 km de distancia ocurrió un sismo con magnitud 6.

Por razones metodológicas, la probabilidad de excedencia de la pérdida p , dado que ocurrió un evento, suele expresarse de la siguiente manera:

$$\Pr(P > p | Evento) = \int_I \Pr(P > p | I) f(I | Evento) dI \quad \text{Ecuación 3}$$

El primer término del integrando, $\Pr(P > p | I)$, es la probabilidad de que la pérdida exceda el valor p dado que la intensidad local fue I ; este término, por tanto, toma en cuenta la incertidumbre que hay en las relaciones de vulnerabilidad. Por otro lado, el término $f(I | Evento)$ es la densidad de probabilidades de la intensidad, condicionada a la ocurrencia del evento; este término toma en cuenta el hecho de que, dado que ocurrió un evento, la intensidad en el sitio de interés es incierta.

2.4.6 Estimadores puntuales del riesgo

Como se indicó anteriormente, la curva calculada aplicando la Ecuación 2 tiene toda la información necesaria para caracterizar el proceso de ocurrencia de eventos que produzcan pérdidas. Sin embargo, en ocasiones es impráctico utilizar una curva completa, por lo que conviene utilizar estimadores puntuales del riesgo que permitan expresarlo con un solo número. Se presentan a continuación los dos estimadores puntuales más comúnmente utilizados.

- a) Pérdida anual esperada (PAE): se trata del valor esperado de la pérdida anual. Es una cantidad importante puesto que indica, por ejemplo, que si el proceso de ocurrencia de eventos dañinos fuera estacionario de aquí a la eternidad, su costo equivaldría a haber pagado la PAE cantidad anualmente. Por tanto, en un sistema simple de seguro, la pérdida anual esperada sería la prima pura anual justa. La PAE puede obtenerse por integración de $v(p)$ o mediante la siguiente expresión:

$$P_{AE} = \sum_{i=1}^{Eventos} E(P | Evento i) F_A(Evento i) \quad \text{Ecuación 4}$$

- b) Pérdida máxima probable (PML por las iniciales en inglés de Probable Maximum Loss): se trata de una pérdida que ocurre con muy poca frecuencia. No existen estándares universalmente aceptados para definir qué quiere decir “muy poca frecuencia”. De hecho, la elección de un periodo de retorno u otro para tomar cierta decisión depende de la aversión al riesgo de quien la está tomando. En la industria aseguradora, por ejemplo, los periodos de retorno utilizados para definir la PML varían entre 200 y al menos 1500 años. Para el caso de análisis de inundaciones no es usual en general realizar análisis para periodos de retorno de más de 200 o 250 años ya que en general los fenómenos hidrometeorológicos son más recurrentes, es decir, se repiten entre cada veinte o cincuenta años.

2.4.7 Probabilidad de excedencia de valores de pérdida

La curva de pérdidas, $v(p)$, calculada con la Ecuación 2 indica con qué frecuencia ocurrirán eventos que producirán pérdidas iguales o superiores a una dada, p . Si suponemos que el proceso de ocurrencia de eventos en el tiempo obedece a un proceso de Poisson, entonces es posible calcular la probabilidad de que la pérdida p sea excedida en un lapso T , es decir, en los próximos T años, con la siguiente expresión:

$$Pe(p, T) = 1 - e^{-v(p)T} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde, $Pe(p, T)$ es la probabilidad de que la pérdida p sea excedida en los próximos T años.

2.4.8 Análisis para un solo escenario

El análisis probabilista de riesgo se realiza normalmente para el conjunto completo de escenarios especificados en las diferentes amenazas. Sin embargo, si así se desea, el análisis puede realizarse para un solo escenario (uno solo de los sumandos en la Ecuación 2). Si se hace que la frecuencia anual de ocurrencia de este escenario sea 1, la aplicación de la Ecuación 2 nos conduciría a las probabilidades de excedencia (ya no frecuencias anuales de excedencia) de valores de pérdida p , dado que el escenario en cuestión ocurrió.

Este caso tiene aplicaciones importantes en el campo de la planeación territorial, ya que sus resultados, mapeados por ejemplo en términos del valor esperado de la pérdida, son fácilmente incorporables en los planes de ordenamiento territorial.

51

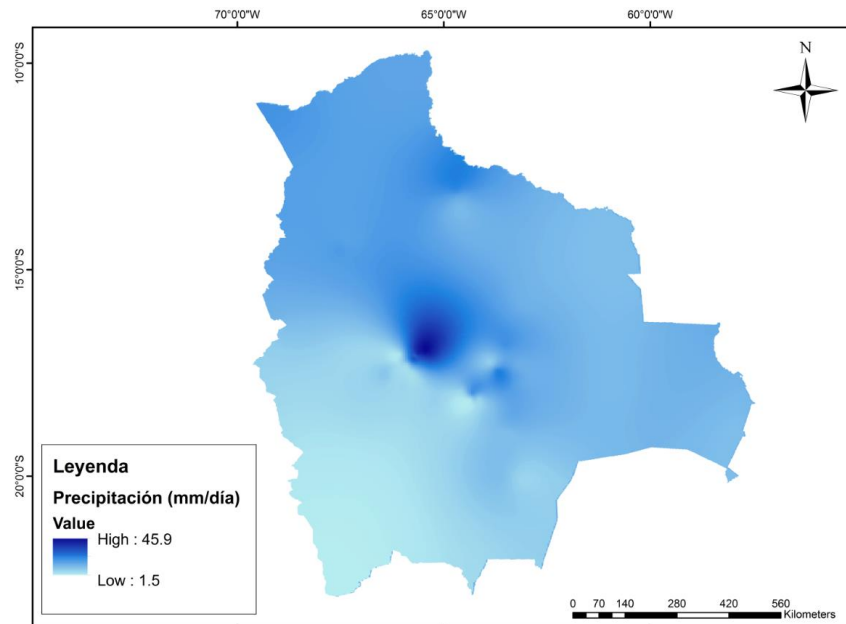


Figura 34. Precipitación en Bolivia. Promedio diario más desviación estándar (mm).
Fuente: Información pluviométrica obtenida de registros en estaciones del SENAMHI (2014)

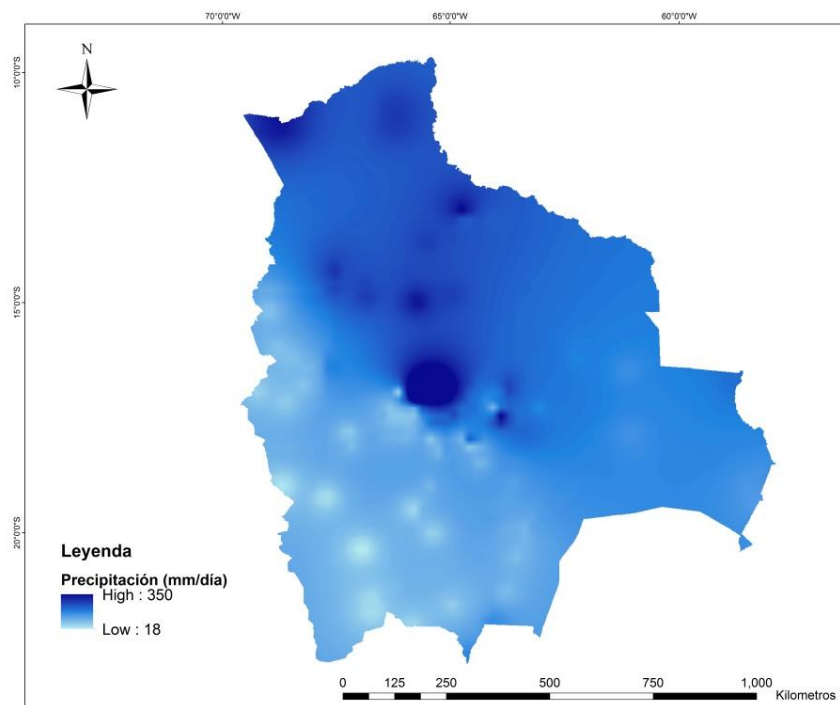


Figura 35. Precipitación en Bolivia. Promedio mensual (mm).
Fuente: Información pluviométrica obtenida de registros en estaciones del SENAMHI (2014). Figura 33 presenta la calificación general de susceptibilidad a las inundaciones que se obtiene con la metodología explicada anteriormente

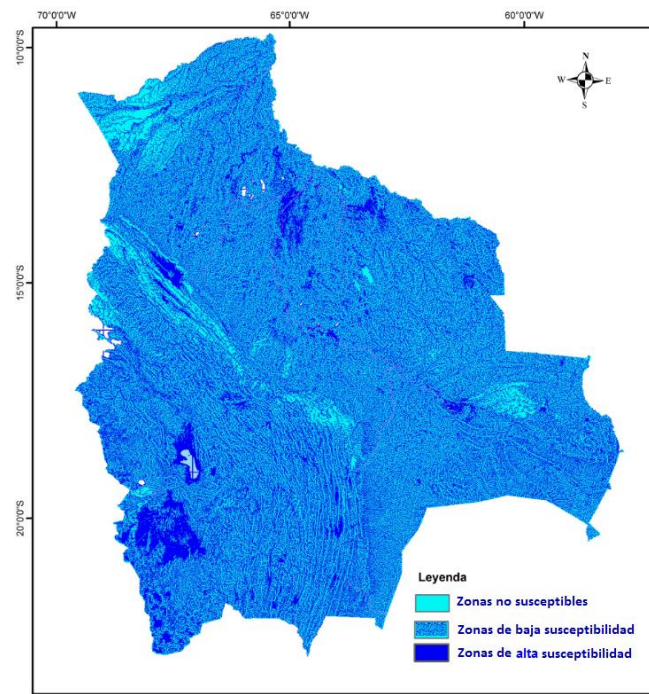


Figura 36. Calificación de susceptibilidad

La figura obtenida al aplicar el procedimiento del análisis simplificado permite identificar zonas susceptibles a inundación ubicadas en zonas bajas de las cuencas y en planicies. Por lo anterior, áreas de gran extensión donde la pendiente podría considerarse nula, tales como el salar de Uyuni son clasificadas como “zonas susceptibles” por la metodología simplificada. Por esta razón, se realiza un proceso de validación de la figura inicial, donde se eliminan este tipo de zonas. La Figura 37 presenta la figura final propuesta de susceptibilidad a las inundaciones.

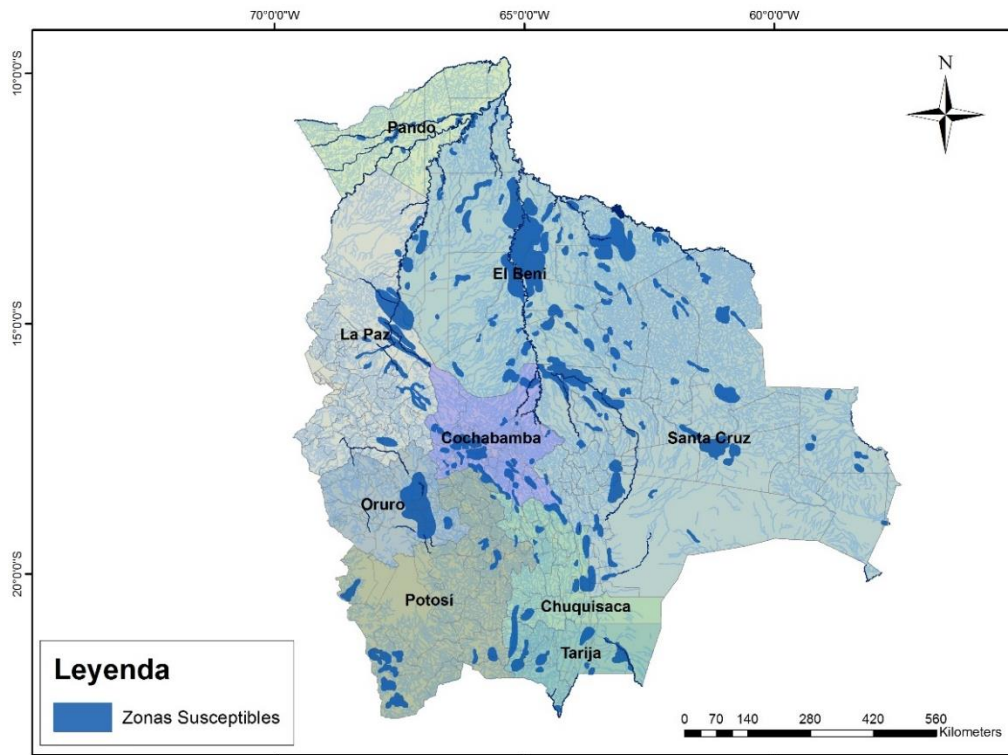


Figura 37. Zonas susceptibles a inundaciones en Bolivia.

Fuente: Capas shape de ríos y municipios obtenidas del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia (2014)

La Figura 38 y Figura 39 presentan el detalle de las zonas inundables correspondientes al río Rocha y río Grande, respectivamente. Adicionalmente de la Figura 40 a la Figura 43 se presenta la información correspondiente para otras cuencas de interés.



Figura 38. Zonas susceptibles de inundación en la cuenca del Río Rocha.
Fuente: Imagen satelital obtenida de Google Earth 7.1



Figura 39. Zonas susceptibles de inundación en la cuenca del Río Grande.
Fuente: Imagen satelital obtenida de Google Earth 7.1

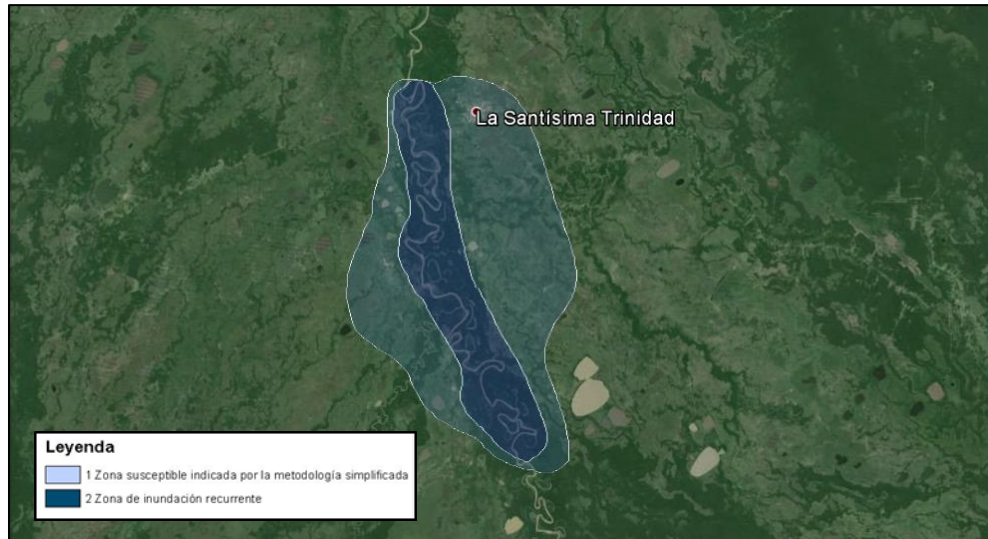


Figura 40. Zonas susceptibles de inundación en la cuenca Alta del Río Mamoré.
Fuente: Imagen satelital obtenida de Google Earth 7.1



Figura 41. Zonas susceptibles de inundación en la cuenca Baja del Río Mamoré.
Fuente: Imagen satelital obtenida de Google Earth 7.1



Figura 42. Zonas susceptibles de inundación en la cuenca del Río Yapacaní.
Fuente: Imagen satelital obtenida de Google Earth 7.1



Figura 43. Zonas susceptibles de inundación en la cuenca del Río Itenez.
Fuente: Imagen satelital obtenida de Google Earth 7.1

En la Tabla 15 se resumen algunos datos relevantes correspondientes a los resultados de la metodología simplificada de inundaciones, para los ríos Rocha y Grande y otros ríos de interés que pueden resultar críticos.

Tabla 15. Datos relevantes de las zonas susceptibles

	Río Rocha	Río Grande	Cuenca Alta Río Mamoré	Cuenca Baja Río Mamoré	Río Yapacaní	Río Itenez
Área de la zona susceptible cercana al cauce (km²)	75	3,408	1,080	1,452	130	1,528
Municipios y zonas susceptibles	Quillacollo, Cochabamba, Sipe Sipe, Sacaba y Cliza	El Puente, San Ramón, Mineros, Puerto Pailas, Cultivos aledaños al río	Trinidad, Loreto y San Ignacio.	Puerto Siles, Exaltación, San Joaquín, San Ramón.	Yapacaní, El Puente, Cultivos aledaños al río.	San José de Chiquitos, Cultivos aledaños al río.
Departamento	Cochabamba	Santa Cruz	Beni	Beni	Santa Cruz	Santa Cruz
Habitantes	70,620	41,166	45,831	6,594	16,500	4,005

3.2 INDICADORES GENERALES DE RIESGO POR INUNDACIÓN

La figura de susceptibilidad a las inundaciones se cruza con información de exposición correspondiente a la distribución geográfica de la población, ubicación de cuencas y de grupos de uso del suelo (ver Figura 44 a Figura 46).

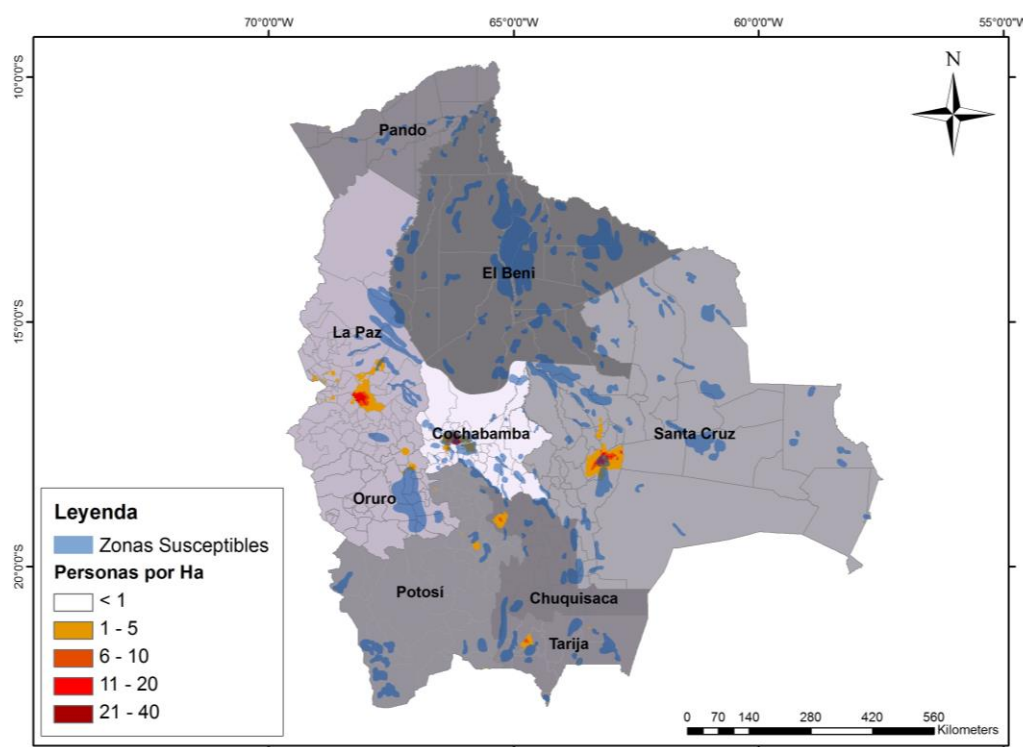


Figura 44. Población vs. Susceptibilidad a inundación.

Fuente: Capa shape de municipios obtenida del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia (2014)

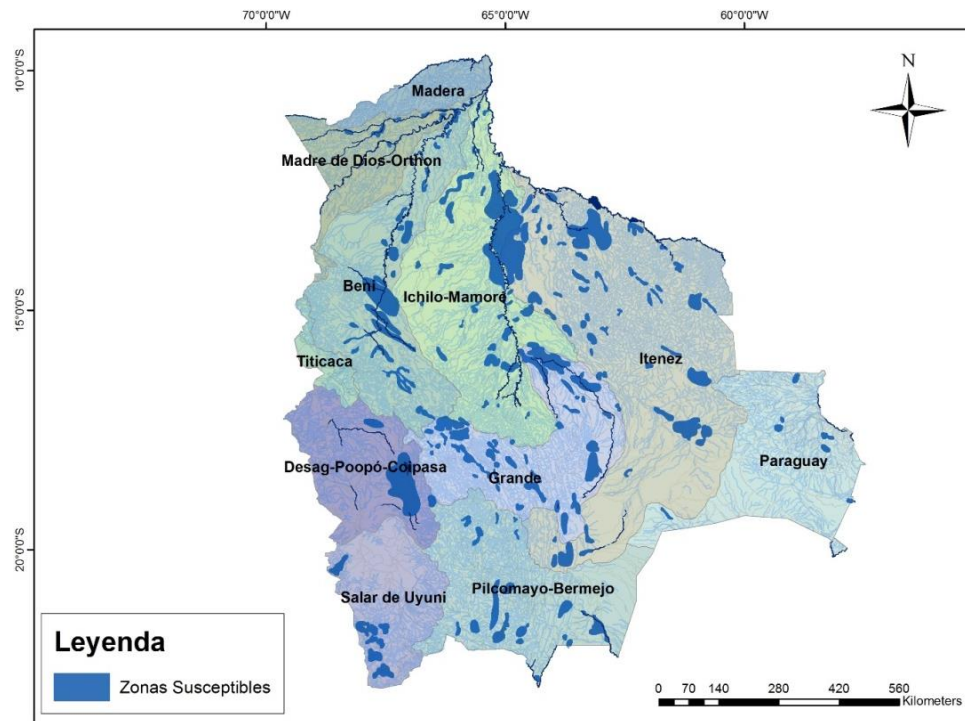


Figura 45. Cuencas vs. susceptibilidad a inundación.

Fuente: Capas shape de ríos y cuencas obtenidas del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia (2014)

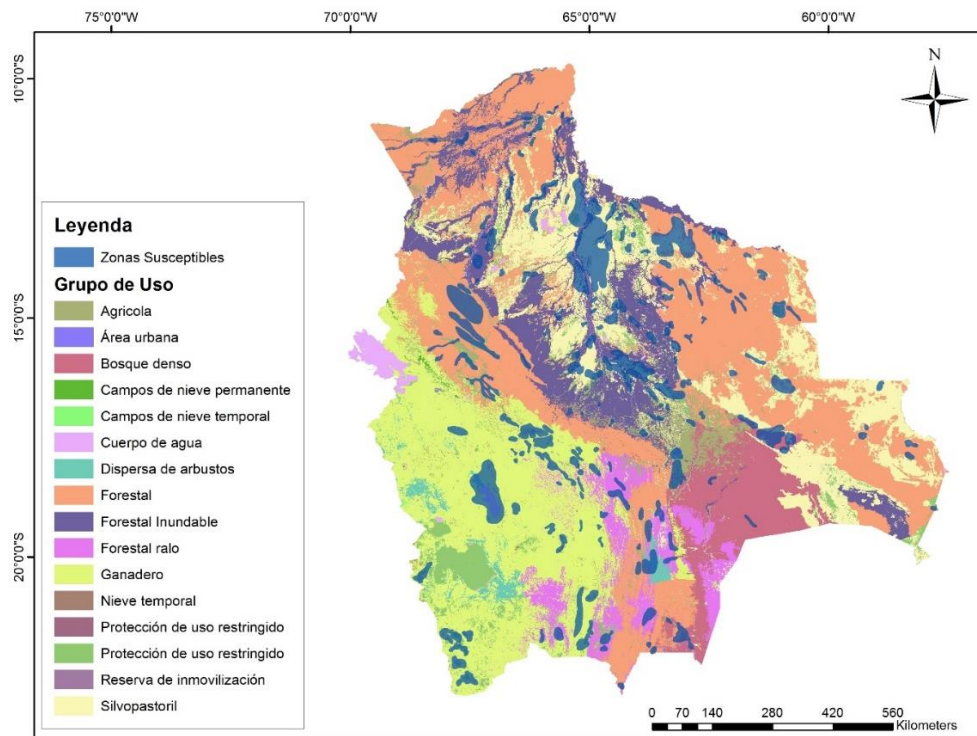


Figura 46. Usos del suelo vs. susceptibilidad a inundación.

Fuente: Capa shape de usos del suelo obtenida del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia (2014)

Las figuras anteriores presentan el cruce de información correspondiente con base en el cual se obtienen las estadísticas que se presentan en la Tabla 16, para las zonas susceptibles identificadas por la metodología simplificada de mayor relevancia en el país.

Tabla 16. Indicadores de riesgo por inundación para zonas susceptibles principales

Zona o Municipio	Departamento	Río	Población expuesta	Área susceptible (km ²)	Cultivos expuestos (m ²)
Mizque	Cochabamba	Caine	800	3.5	250,000
Cochabamba y Quillacollo	Cochabamba	Rocha	12,000	15.0	1,000,000
Villamontes	Tarija	Pilcomayo	140,000	17.5	--
Trinidad	Beni	Mamoré	50,000	5.0	--
El Puente	Santa Cruz	Grande	700	1.0	--
Puerto Pailas y Cultivos Río Grande	Santa Cruz	Grande	4,500	12.0	--
Santa Rosa del Sara	Santa Cruz	Pirafí	1,000	2.25	--
Yapacaní	Santa Cruz	Yapacaní	1,300	5.15	2,700,000
El Choro y Toledo	Oruro	Desaguadero	18,874	2,273	-

De acuerdo con lo anterior, la Figura 47 presenta una zonificación general de municipios a nivel país de acuerdo con su potencialidad de impacto a la población y a las zonas productivas.

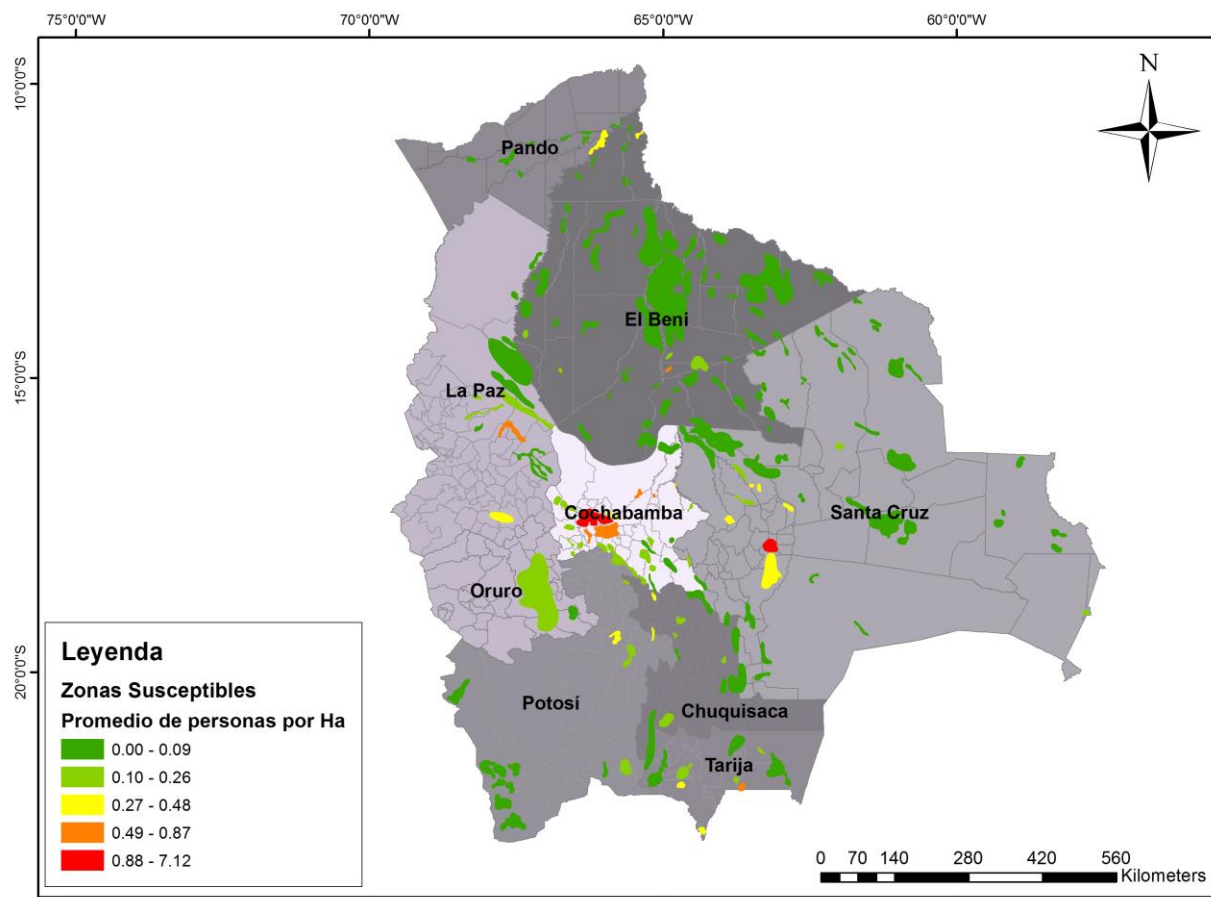


Figura 47. Indicadores de riesgo por inundación en Bolivia.

Fuente: Capa shape de municipios obtenida del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia. Información de población obtenida de WorldPop (2014)

A partir de los resultados presentados anteriormente, obtenidos al aplicar la metodología simplificada de riesgo por inundación se concluye que el departamento con mayor nivel de riesgo corresponde a Cochabamba, en las laderas del río Rocha a la altura del municipio de Cochabamba, dado su alto nivel de población. Le siguen en orden de importancia las cuencas de Oruro y Santa Cruz que también presentan zonas de alta susceptibilidad. Por otra parte, a pesar de que el departamento de Beni es el que mayor cantidad de zonas susceptibles presenta, las cuales en su mayoría corresponden a las laderas del río Mamoré, la población expuesta es poca en comparación con las zonas mencionadas anteriormente.

3.3 EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS

Para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos se utiliza la metodología indicada en el numeral 2.2 para lo cual se requiere la siguiente información básica:

- Modelo de elevación digital del terreno
- Mapa de formaciones geológico-geotécnicas principales (incluyendo los parámetros geotécnicos indicativos)
- Condiciones de humedad del suelo
- Eventos detonantes como son las lluvias y terremotos localizados.

La Figura 48 presenta las pendientes que se han generado a partir del modelo de elevación digital (ver Figura 22 arriba). Por otro lado la Figura 27 presenta las formaciones geológico-geotécnicas que se utiliza en análisis.

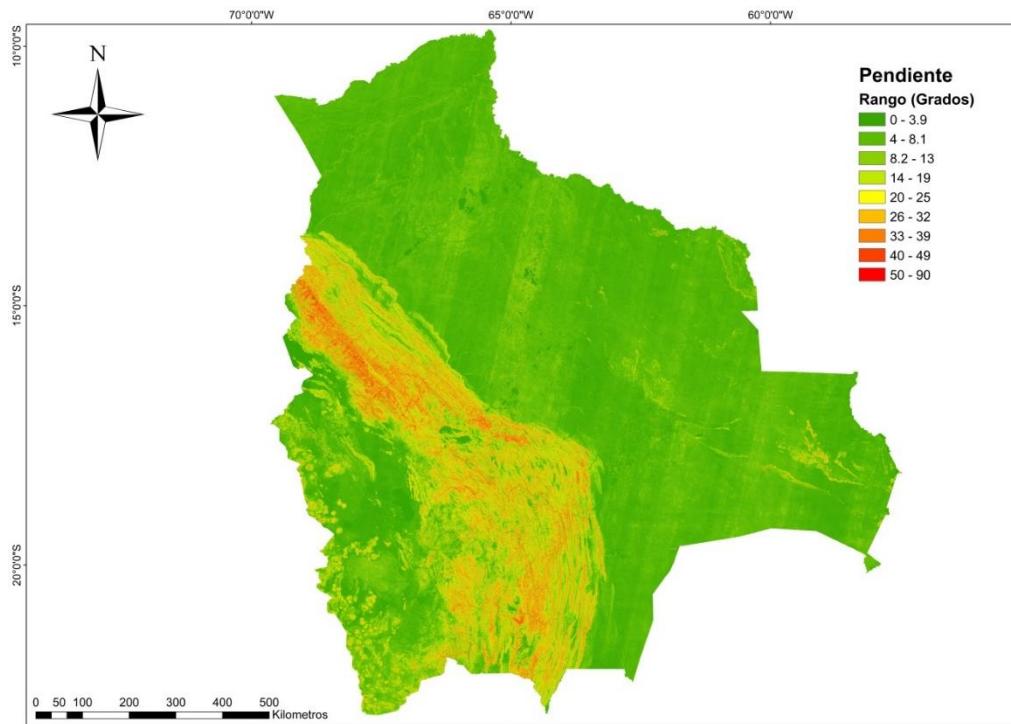


Figura 48. Pendientes.
Fuente: Información de elevación obtenida de ASTER-GDEM (2014)

Con respecto a posibles eventos detonantes se utiliza la figura de isohietas generado para intensidades de 30 días (ver Figura 34). Para este tipo de intensidad se genera una distribución de condiciones de nivel freático variable entre depósito totalmente saturado, cuando la intensidad de lluvia acumulada de 30 días

sobrepasa un valor de 400 mm, y depósito sin nivel freático cuando la intensidad es inferior a los 100 mm para 30 días.

Adicionalmente, con respecto a eventos sísmicos detonantes de deslizamientos, la Figura 49 presenta la distribución geográfica de algunos escenarios estocásticos representativos que se utilizan para el análisis de susceptibilidad en condiciones sísmicas. Estos escenarios se han definido con base en la información de fallas activas del país y en las magnitudes máximas representativas de sismos que pueden llegar a ocurrir en la zona. Se considera para el análisis tres diferentes eventos sísmicos históricos reportados en la base de datos de la USGS (“United States Geological Survey” por su siglas en inglés), estos tres eventos reportan magnitudes entre 6 – 7.5 Mb (Magnitud de Ondas de Cuerpo). Los eventos seleccionados se encuentran en tres diferentes zonas a lo largo del país, zona norte, centro y sur.

Los escenarios sísmicos corresponden a tres escenarios con diferente localización y magnitud. En la Tabla 17 se resume la descripción de cada uno de los escenarios sísmicos considerados.

Tabla 17. Escenarios sísmicos considerados

Escenario sísmico	Localización	Magnitud (Mb)
No. 1	Norte del país	6.8
No. 2	Centro del país	7.2
No. 3	Sur del país	6.5

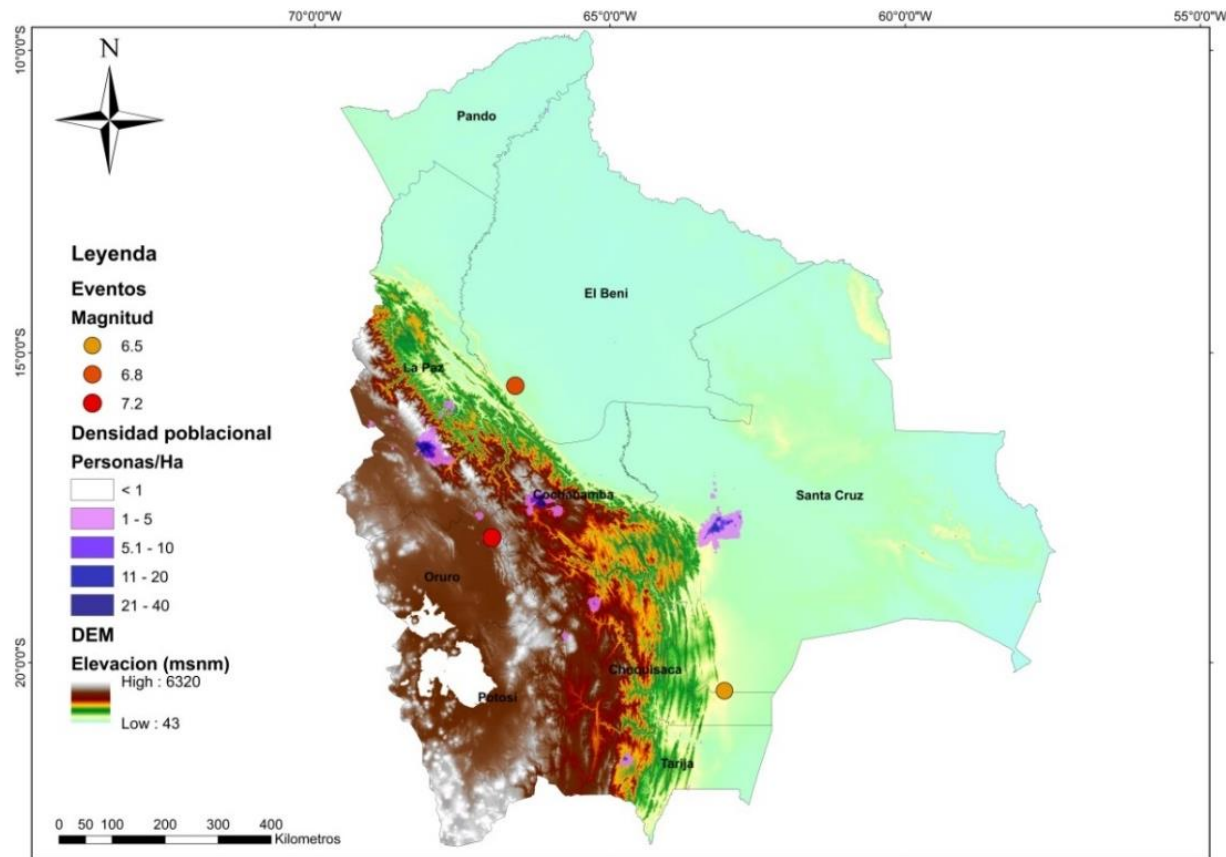


Figura 49. Escenarios estocásticos para el análisis.

Fuente: Capa shape de elevación obtenida de ASTER-GDEM. Información de población obtenida de WorldPop (2014)

Con base en la información anterior y en la metodología expuesta anteriormente se generan figuras de susceptibilidad a los deslizamientos para las siguientes condiciones de análisis:

- Condición 1: sin nivel freático y sin sismo
- Condición 2: con nivel freático según lo indicado anteriormente y sin sismo
- Condición 3: con nivel freático y con cada uno de los tres escenarios sísmicos considerados

La Figura 50 a Figura 54 presentan los resultados del análisis.

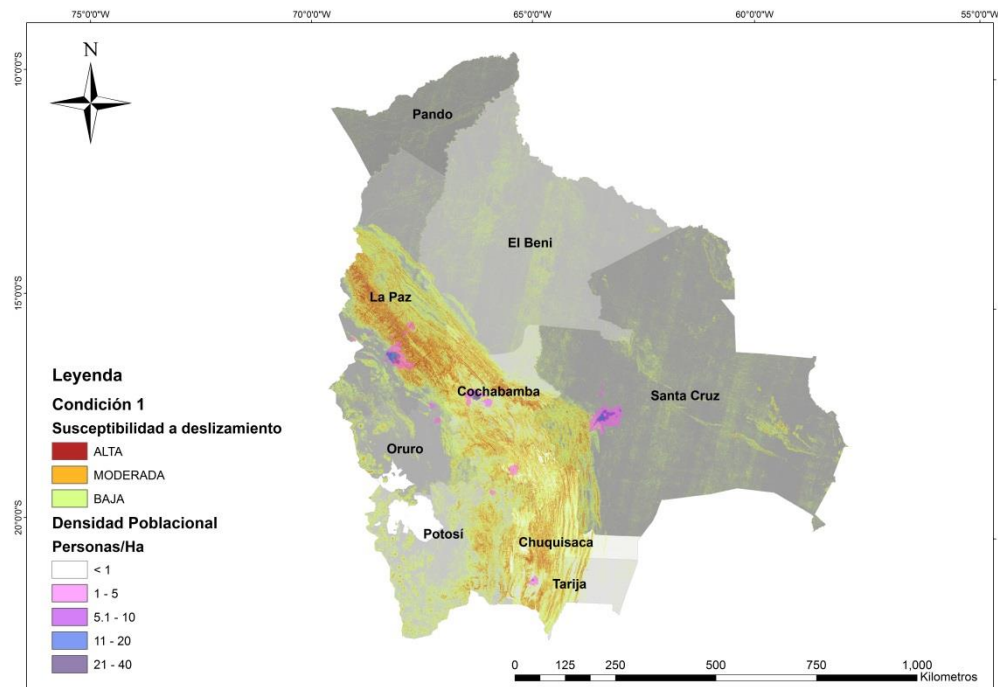


Figura 50. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 1.
Fuente: Capa shape de departamentos obtenida de GeoBolivia. Información de población obtenida de WorldPop (2014)

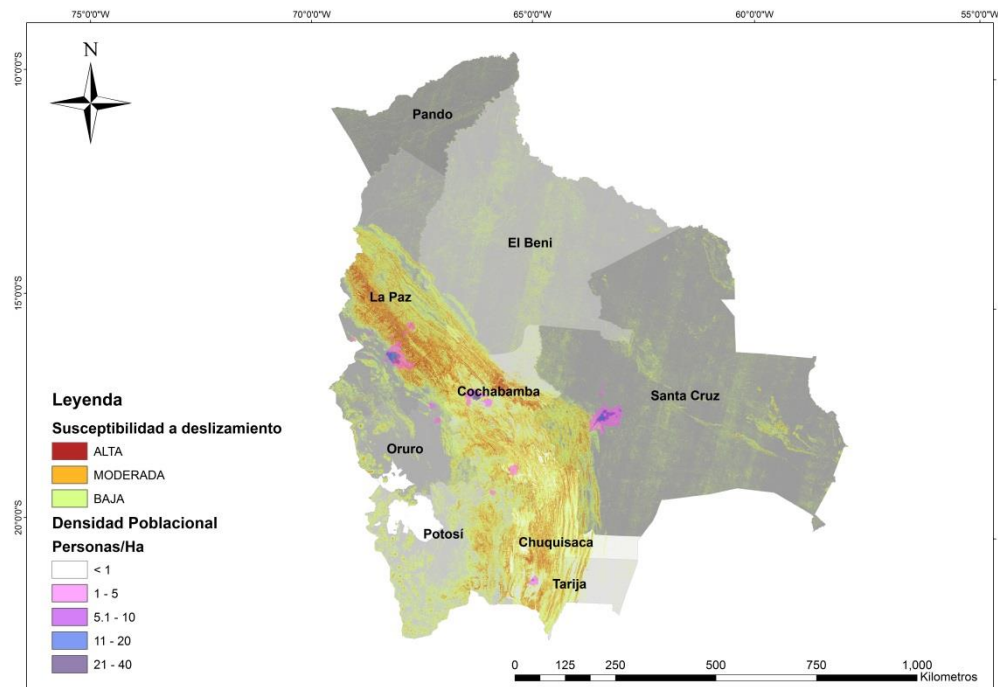


Figura 51. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 2.
Fuente: Capa shape de departamentos obtenida de GeoBolivia. Información de población obtenida de WorldPop (2014)

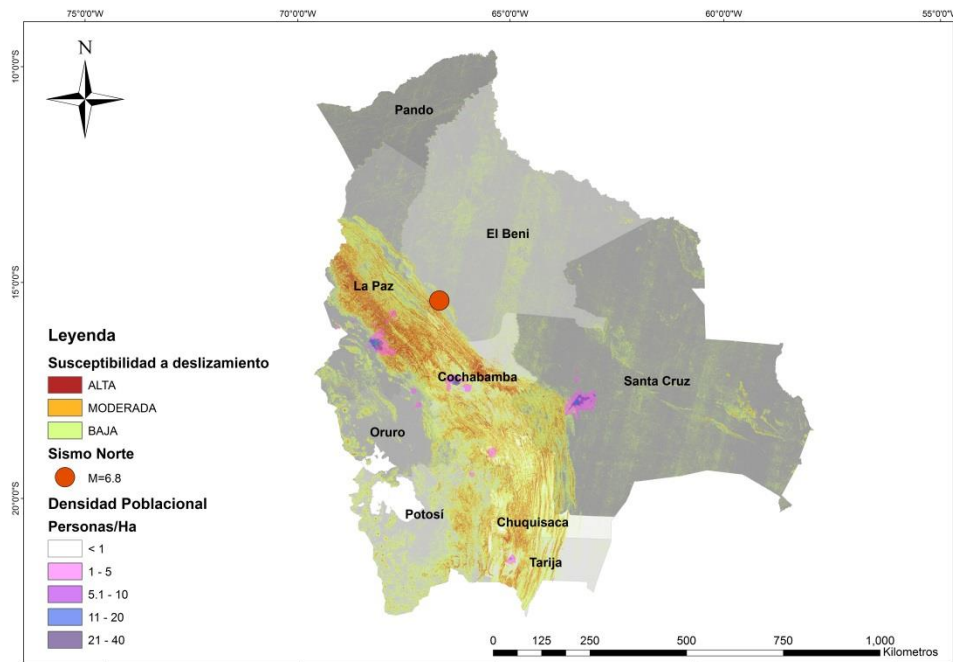


Figura 52. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 3 escenario sísmico No. 1.
Fuente: Capa shape de departamentos obtenida de GeoBolivia. Información de población obtenida de WorldPop (2014)

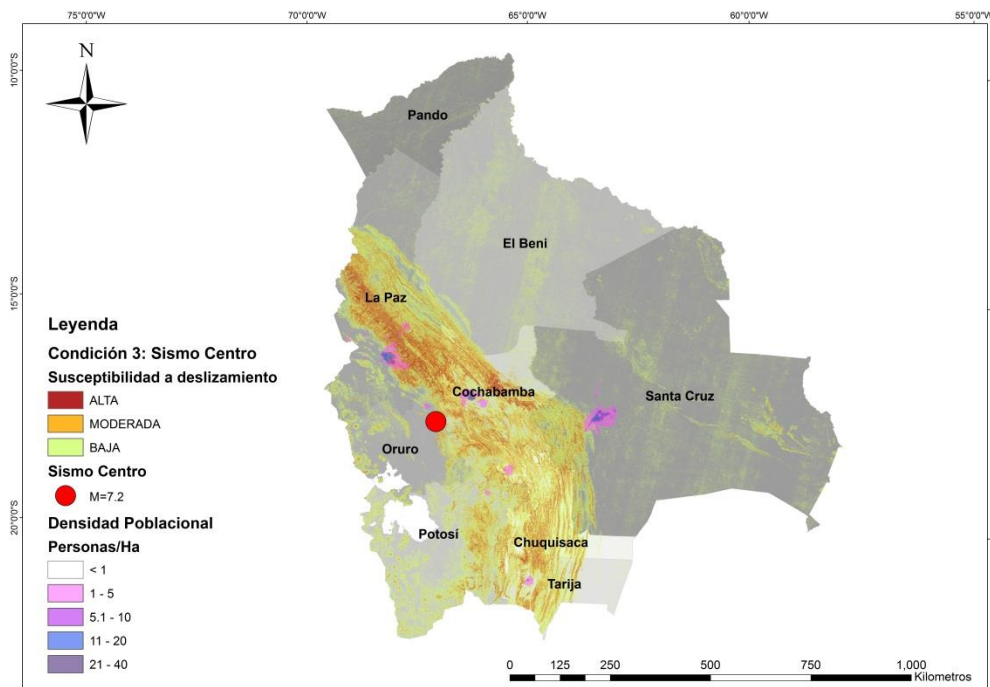


Figura 53. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 3 escenario sísmico No. 2.
Fuente: Capa shape de departamentos obtenida de GeoBolivia (2014). Información de población obtenida de WorldPop (2014). Información sismológica obtenida de USGS (2014)

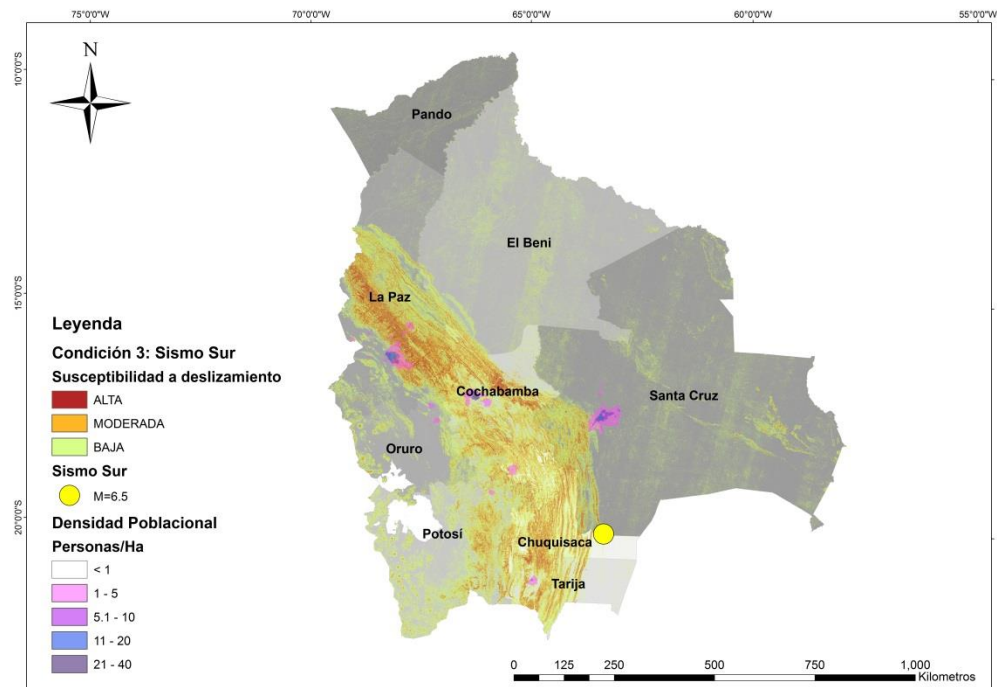


Figura 54. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 3 escenario sísmico No. 3.
Fuente: Capa shape de departamentos obtenida de GeoBolivia (2014). Información de población obtenida de WorldPop (2014). Información sísmológica obtenida de USGS (2014)

3.4 INDICADORES GENERALES DE RIESGO POR DESLIZAMIENTOS

La figura de susceptibilidad a los deslizamientos se cruza con información de exposición correspondiente a la distribución geográfica de la población (ver Figura 25, Distribución geográfica de la población en Bolivia). El análisis también puede realizarse para cuantificar el riesgo en otros componentes tales como la infraestructura de la red vial principal del país o el nivel de riesgo para las zonas de cultivos en las diferentes regiones del país.

El análisis de indicadores de riesgo por deslizamiento se realiza en el marco del presente proyecto únicamente para la exposición de la población y para la condición 2, o sea en condiciones de saturación pero sin escenario sísmico. Esto debido a que los análisis para las condiciones sísmicas pueden presentar situaciones altamente catastróficas y extraordinarias que serían objeto de análisis complementarios. Un análisis más general de susceptibilidad se realiza entonces para la condición 2 y los resultados se presentan en la Figura 55.

Por otro lado la Figura 56 a Figura 59, presentan de manera aproximada la susceptibilidad a deslizamientos para las cuatro principales ciudades de Bolivia; La Paz, Cochabamba, Sucre y Santa Cruz, para la condición 2.

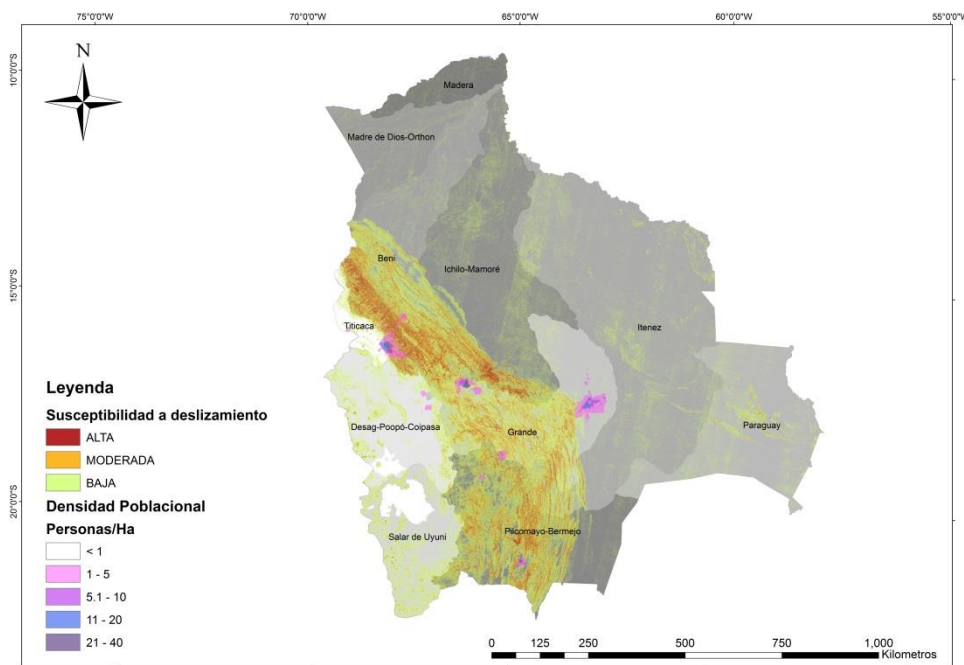


Figura 55. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 2 para las cuencas.
Fuente: Capa shape de departamentos obtenida de Centro Digital de Recursos Naturales. Información de población obtenida de WorldPop (2014)

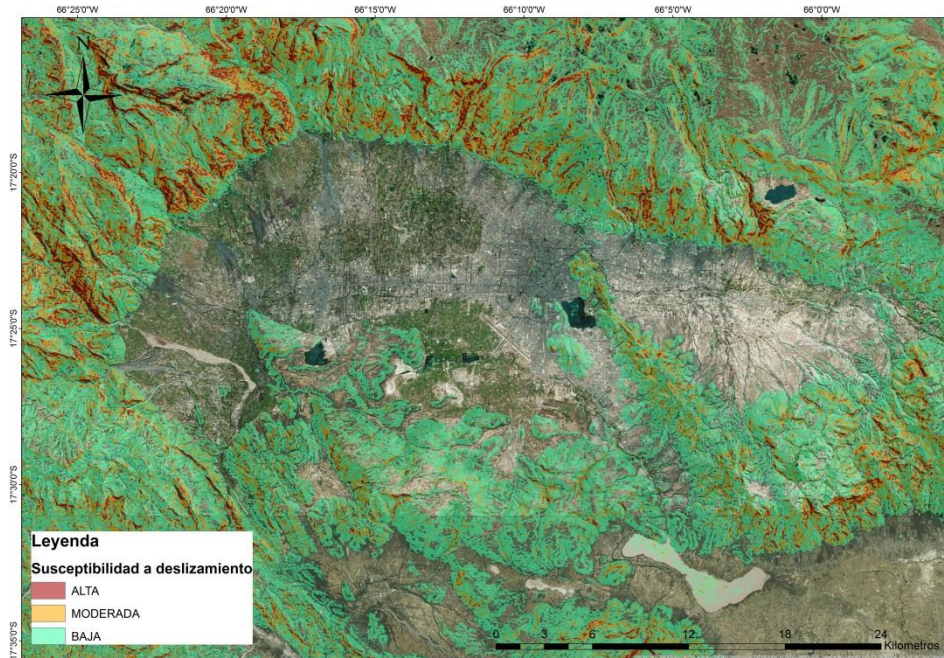


Figura 56. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 2, ciudad de Cochabamba.
Fuente: Imagen satelital obtenida de Google Earth 7.1

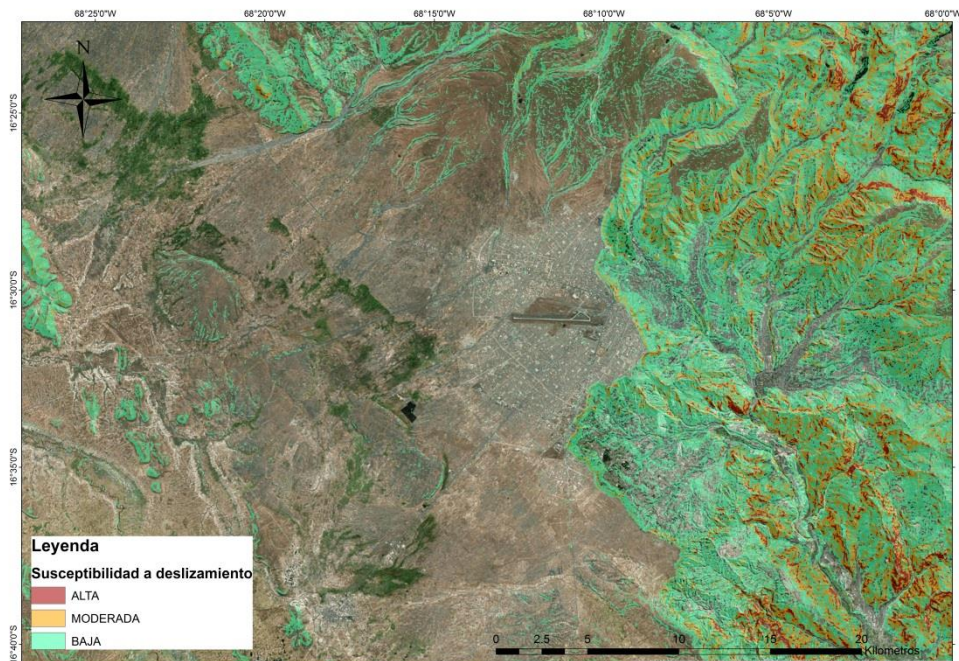


Figura 57. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 2, ciudad de La Paz.
Fuente: Imagen satelital obtenida de Google Earth 7.1

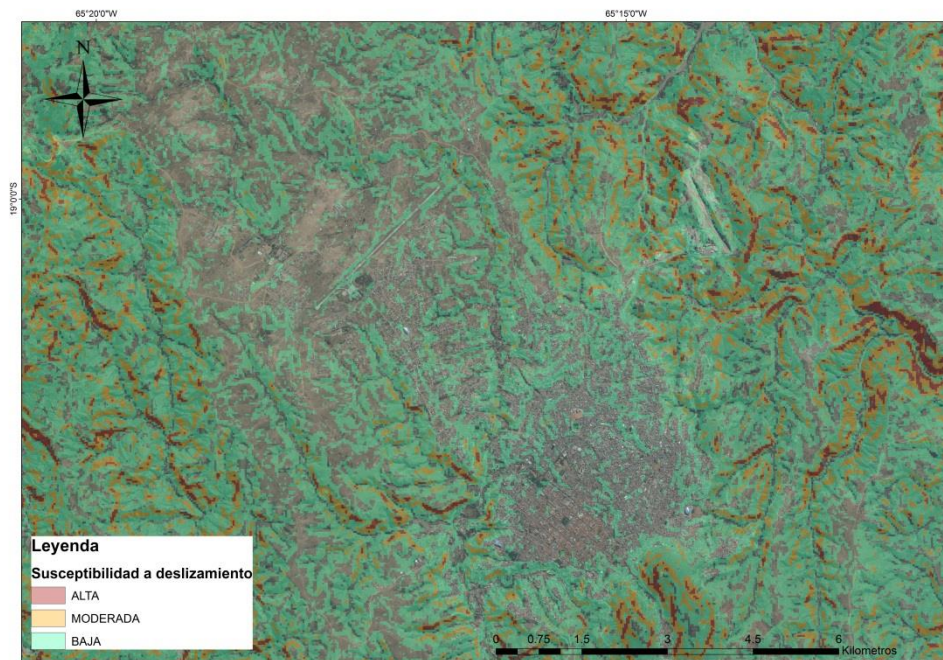


Figura 58. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 2, ciudad de Sucre.
Fuente: Imagen satelital obtenida de Google Earth 7.1

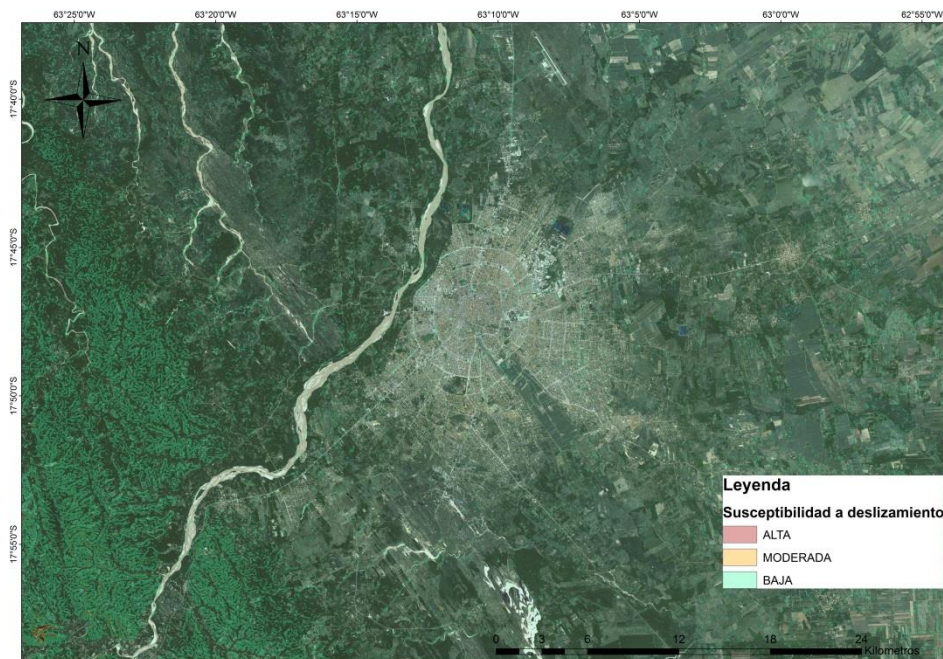


Figura 59. Resultados típicos de análisis de susceptibilidad a los deslizamientos condición 2, ciudad de Santa Cruz.
Fuente: Imagen satelital obtenida de Google Earth 7.1

Con base en las figuras anteriores se obtienen las estadísticas que se presentan para la condición 2 de análisis. Se seleccionó esta condición ya que es la más representativa por considerar las condiciones del nivel freático del terreno con base en el régimen pluviométrico del país. Por lo anterior, la condición 2 es la que presenta más zonas susceptibles a deslizamientos a lo largo del país. La Tabla 18 resume las estadísticas de población en zonas susceptibles a deslizamientos a nivel departamental. La Figura 60 presenta la población en zonas susceptibles a deslizamiento a nivel municipal.

Tabla 18. Indicadores de riesgo por deslizamientos a nivel departamental condición 2 de análisis

Departamento	Población			Área (km ²)		
	Susceptible	Total	Porcentaje	Susceptible	Total	Porcentaje
La Paz	731,987	2,219,381	32.98%	33,940	126,565	26.82%
Cochabamba	290,256	1,425,190	20.37%	20,607	54,050	38.13%
Santa Cruz	66,342	2,168,538	3.06%	12,377	359,545	3.44%
Potosí	209,654	666,662	31.45%	22,932	108,786	21.08%
Chuquisaca	191,679	464,814	41.24%	20,264	51,075	39.67%
Tarija	81,037	384,722	21.06%	8,637	37,337	23.13%
Oruro	28,509	403,127	7.07%	2,762	45,696	6.04%
El Beni	7,110	379,071	1.88%	3,027	214,460	1.41%
Pando	77	90,277	0.09%	38	62,704	0.06%
Total	1,606,651	8,201,782	20%	124,585	1,060,219	12%

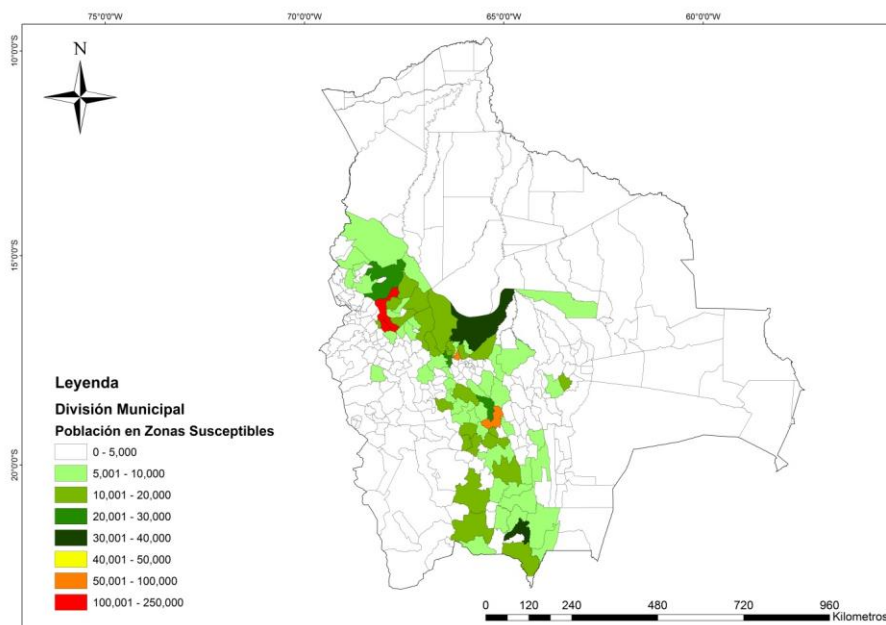


Figura 60. Población en zonas susceptibles por deslizamientos por municipios para la condición 2 de análisis.
Fuente: Capa shape de departamentos obtenida del Centro Digital de Recursos Naturales. Información de población obtenida de WorldPop (2014)

Finalmente, en la Tabla 19 se presentan las estadísticas de los indicadores de riesgo para los 15 municipios con mayor número de personas en zonas susceptibles a deslizamiento para los resultados de la condición 2 del análisis.

Tabla 19. Indicadores de riesgo por deslizamientos por municipio, condición 2 de análisis

Departamento	Municipio	Población			Area (km ²)		
		Susceptible	Total	Porcentaje	Susceptible	Total	Porcentaje
La Paz	La Paz	236,593	526,015	44.98%	1,222	1,983	61.63%
La Paz	Mecapaca	120,293	224,635	53.55%	283	504	56.16%
La Paz	Palca	102,227	173,609	58.88%	460	731	62.91%
Chuquisaca	Sucre	57,790	145,917	39.60%	836	1,781	46.94%
Cochabamba	Cochabamba	51,027	499,438	10.22%	43	284	15.11%
Cochabamba	Villa Tunari	36,284	122,038	29.73%	3,594	11,168	32.18%
Tarija	Tarija	31,836	155,473	20.48%	779	2,052	37.98%
La Paz	Guanay	26,708	52,789	50.59%	3,600	6,690	53.81%
Cochabamba	Sipe Sipe	23,447	94,730	24.75%	177	502	35.28%
Chuquisaca	Poroma	23,042	43,158	53.39%	766	1,393	54.98%
Santa Cruz	El Torno	19,313	136,495	14.15%	217	962	22.60%
La Paz	Achocalla	19,006	190,869	9.96%	26	226	11.39%
Potosí	Potosí	17,824	68,577	25.99%	345	1,252	27.56%
La Paz	Coroico	17,612	23,777	74.07%	785	1,052	74.61%
La Paz	Caranavi	17,145	44,489	38.54%	954	2,367	40.31%

Con base a los resultados observados se obtiene que los municipios con mayor número de personas en zonas susceptibles corresponden a La Paz y a Mecapaca, lo cual presenta buena correlación con el historial de eventos de deslizamientos reportados en la base de datos de DesInventar presentados en el numeral 1.4.

Finalmente, la Figura 61 presenta un indicativo de zonas susceptibles a deslizamientos en relación a la clasificación de usos del suelo a nivel país.

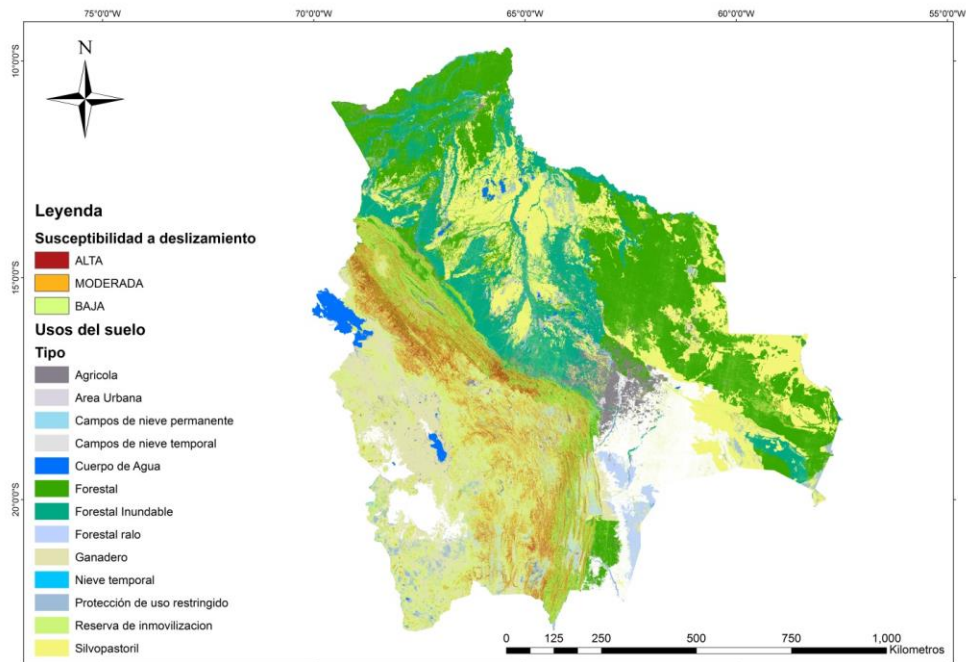


Figura 61. Zonas susceptibles a deslizamientos según uso del suelo para la condición 2 de análisis.
Fuente: Capa shape de uso del suelo obtenida del Centro Digital de Recursos Naturales (2014)

El análisis de esta figura permite establecer que las zonas con alta susceptibilidad a los deslizamientos se ubican principalmente en zonas con usos ganadero, forestal y agrícola.

4 SELECCIÓN DE CUENCAS PARA EL ANÁLISIS DEL RIESGO POR INUNDACIONES

4.1 GENERALIDADES

La selección de las cuencas para el análisis en el marco del presente proyecto se realiza teniendo en cuenta los siguientes factores principales:

- Importancia relativa de la cuenca para el país.
- Tipo de cuenca y representatividad para futuras aplicaciones en el país.
- Nivel de amenaza y susceptibilidad a inundaciones.
- La historia de pérdidas por eventos de inundación.
- Nivel de riesgo en zonas pobladas y en zonas productivas
- Información existente que permita un análisis de buena calidad.
- Características de los tramos críticos para los análisis.

Con base en la información general del país que se presenta en el numeral 1.1 y en los resultados del análisis general de susceptibilidad a las inundaciones presentado anteriormente se llega a la conclusión de que la problemática de riesgo por inundaciones se concentra en la parte norte y central del país.

En la Figura 62 se presentan diferentes niveles de división de cuencas, a partir de las cuales se realizará la selección de cuencas correspondientes a las zonas con mayor riesgo de deslizamientos determinadas por el análisis simplificado. La Tabla 20 presenta algunos datos de interés de las cuencas asociadas a las zonas susceptibles de inundación más relevantes, identificadas por medio de la metodología simplificada.

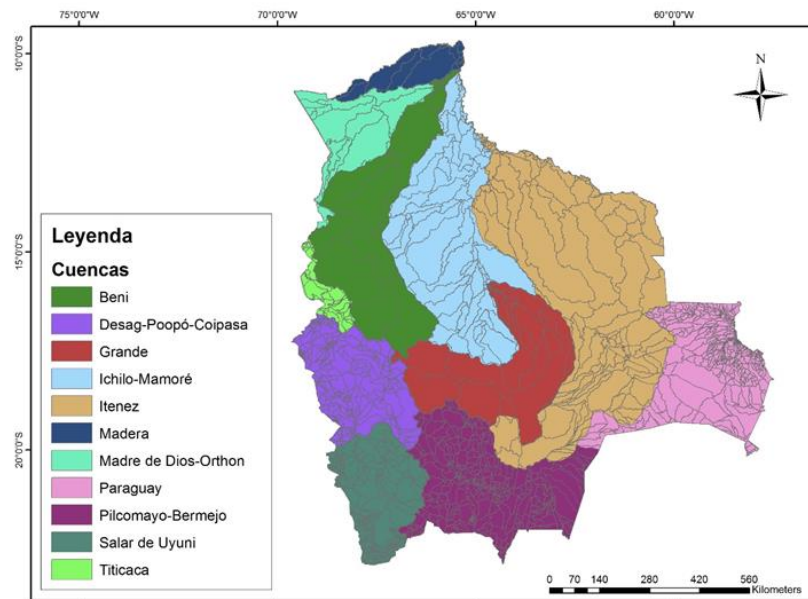


Figura 62. Cuencas y subcuencas de Bolivia.

Fuente: Capas shape de cuencas y subcuencas obtenidas del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia (2014)

Tabla 20. Información de interés de algunas de las cuencas más relevantes de Bolivia

Municipios o zonas susceptibles	Cuenca	Deptos.	Área ^a (km ²)	No. Provincias	No. Municipios	Población (censo de 2001) ^b	No. de estaciones meteorológicas	No. de eventos históricos	
								(DesInventar 1970- 2012) ^d	
								Inundac.	Dezlizam.
El Puente, San Ramón, Mineros, Puerto Pailas, y cultivos aledaños al río	Río Grande	Chuquisaca, Cochabamba, El Beni, La Paz, Oruro, Potosí y Santa Cruz	102,602	41	109	3,223,111	69	459	31
Santa Rosa del Sara	Río Piraí	Santa Cruz	13,466	8	22	326,550	4*	171	9
Cochabamba, Quillacollo, y Sipe Sipe	Río Rocha	Cochabamba	5,000	7	16	888,506	9	93	14
Villamontes	Río Pilcomayo	Potosí, Chuquisaca, Tarija	96,270	14	35	914,696	16	235	18
Mizque	Río Caine	Cochabamba y Potosí	9,500	16	42	1,117,544	18	344	39
Yapacaní	Río Yapacaní	Santa Cruz	11,608	7	16	79,303	6	74	10
Trinidad	Río Mamoré	Santa Cruz, Cochabamba	241,660	12	27	419,640	9	195	21

a. Tomado del valor de área reportado en el Shape de subcuencas realizado por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua y el Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego de Bolivia, en 2010. Disponible en http://essm.tamu.edu/bolivia/info_geoespacial_vector_es.htm

b. Calculado con base en el Shape de centros poblados realizado por el Instituto Nacional de Estadística de Bolivia (INE), a partir del censo poblacional de 2001. Disponible en http://essm.tamu.edu/bolivia/info_geoespacial_vector_es.htm

c. Calculado con base en el Shape de estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología (SENAMHI) para 2011. Disponible en http://geo.gob.bo/download/?w=mddryt&l=ucr_Estaciones_meteorologicas_SENAMHI.

d. Tomado de la base de datos Desinventar para Bolivia 1970 – 2010, con base en los eventos ocurridos en los municipios contenidos por cada cuenca. Disponible en http://online.desinventar.org/desinventar/#BOL-1248983224-bolivia_inventario_historico_de_desastres

* 4 estaciones manejadas por el SENAMHI y 33 por el SEARPI que depende de la gobernación de Santa Cruz.

4.2 CONDICIONES DE AMENAZA Y RIESGO DE CUENCAS PRINCIPALES

A continuación se hace una breve descripción de cada una de las cuencas principales del país y de los aspectos relacionados con amenaza, riesgo y disponibilidad de información en cada una de ellas.

En la Figura 63 se resaltan las cuencas de los principales ríos que se analizan más adelante.

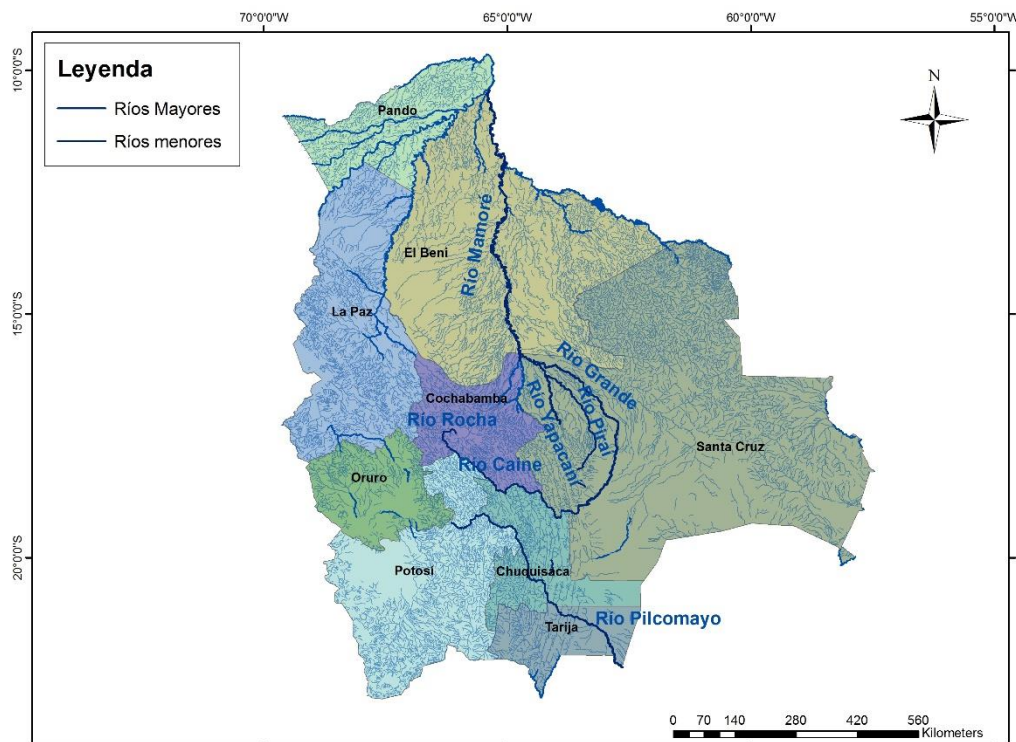


Figura 63. Ríos principales.

Fuente: Capas shape de ríos y departamentos obtenidas del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia (2014)

4.2.1 Cuenca del Río Grande

El río Grande también conocido como río Guapay nace en la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes, cerca de Cochabamba donde las alturas oscilan entre los 3,500 y 5,200 m.s.n.m.. Su cuenca drena una superficie de 101,902 km², dividida en cuenta alta (59,000 km²) y cuenca baja (42,000 km²) y hace parte de la Gran Cuenca del río Amazonas, la mayor de las tres grandes macro cuencas que componen Bolivia. Fluye principalmente por el departamento de Santa Cruz y funciona como límite entre los departamentos de Chuquisaca y Cochabamba. La cuenca del río Grande contiene la subcuenca del río Caine en su parte alta y las subcuencas del Pirá y Yacarán en su parte baja.

A través de 1,438 km desciende rápidamente por terrenos muy escarpados, fluye por una planicie a los 400 m.s.n.m. y a los 148 m.s.n.m. desemboca en el río Mamoré. En su recorrido desde la cordillera

oriental, el río Grande atraviesa parte de la zona Andina, Subandina y la llanura Chaqueña zonas con condiciones geomorfológicas y climatológicas particulares que difieren en cuanto a relieve, clima, cobertura vegetal y tipos de roca.

Su cuenca se enfrenta a inundaciones recurrentes que ocasionan pérdidas humanas y económicas que en daño a la infraestructura y afectaciones a la producción agrícola representan un gasto anual tanto para campesinos como para el gobierno. Estudios anteriores atribuyeron los desbordamientos e inundaciones a la expansión de la frontera agrícola hacia los márgenes del río, a la eliminación de la cobertura arbórea antes existente en las riberas del río y a la acumulación de sedimentos que vienen desde la zona alta del río. En cuanto a la zona baja, vale la pena resaltar que las invasiones urbanas y agropecuarias dentro de las llanuras de inundación naturales son una causa y agravante grave de las inundaciones.

Adicionalmente, esta cuenca es objeto de estudio actual por motivo de la construcción de la central hidroeléctrica Rositas sobre el río Grande en Abapó. Este es un proyecto de gran importancia que pretende impulsar la generación de energía eléctrica, generar condiciones favorables que fomenten las actividades agropecuarias y agrícolas, controlar la irrigación y sirve como control a inundaciones y crecientes.

4.2.2 Cuenca del Río Piráí

La cuenca del río Piráí contenida en el departamento de Santa Cruz, tiene una superficie de 15,249 km² y una longitud de 457 km. Hace parte de la cuenca baja del río Grande y en esta medida de la Gran Cuenca Amazónica. El río Piráí nace donde confluyen los ríos Bermejo y Piojeras a 1,642 m.s.n.m. y desemboca en el río Yapacaní a 200 m.s.n.m. aproximadamente. Esta es una cuenca de gran importancia en términos de riesgo ya que atraviesa la ciudad más grande y poblada de Bolivia, Santa Cruz de Sierra, considerada como la ciudad más importante desde el punto de vista productivo, industrial y financiero. El río Piráí fluye a través de los municipios del Torno, La Guardia, Warnes, Montero y Portachuelo entre otros y es un atractivo turístico en época de verano.

Sus elevadas pendientes, su geología y el patrón de lluvias que rige en la región hacen de esta cuenca un área especialmente propicia a la erosión. La cuenca del Piráí es conocida por los repetidos eventos en los que sus desajustes hidro-geológicos ocasionaron inundaciones en la ciudad y en las áreas peri-urbanas y agrícolas que rodean su cauce motivo por el cual, en 1983, con la creación del Servicio de Encauzamiento de Aguas y Regularización del Río Piráí (SEARPI), se impulsó la ejecución de obras de contención que resultaron en una reducción directa de los eventos de inundación de alto impacto en la ciudad de Santa Cruz. Adicionalmente, la cuenca presenta problemáticas ambientales como la contaminación de aguas superficiales y subterráneas y el uso inadecuado de los suelos.

La cuenca del río Piráí ha sido caso de estudio en diferentes investigaciones y en esta medida se cuenta con una gran cantidad de información que puede facilitar la evaluación del riesgo y cuenta con 28 estaciones hidrométricas de monitoreo.

4.2.3 Cuenca del Río Rocha

La cuenca del río Maylanco-Rocha contenida en el departamento de Cochabamba hace parte de la cuenca alta del río Grande, tiene una superficie de 1,150 km² que abarca cinco provincias: Chapare, Cercado, Capinota, Tapacaré y Quillacollo y comprende 11 municipios. El río Rocha nace en la Cordillera de los Andes al este de la ciudad de Sacaba a 2,635 m.s.n.m., atraviesa las ciudades de Cochabamba y Quillacollo en dirección oeste y posteriormente confluye con el río Arque para formar el río Caine a una altitud de 2,350 m.s.n.m. Su longitud total es de 115 km. El río drena zonas de clima subhúmedo a seco cuyo régimen hidrológico incluye crecidas intempestivas de corta duración que arrastran gran cantidad de sólidos y modifican las condiciones del cauce.

La cuenca del río Rocha es de gran importancia pues atraviesa la ciudad de Cochabamba, cuarta ciudad más grande de Bolivia, cuya población supera el millón de habitantes y fluye a través de un valle en explosión demográfica donde predomina la invasión ilegal en zonas de inundación que contribuye a la contaminación del agua superficial y subterránea, del aire y del suelo, aumenta la demanda de agua y la escorrentía. La falta de encausamiento y de regulación de la cuenca genera desbordes e inundaciones en la parte baja del valle, en especial en la ciudad de Quillacollo ubicada a 13 km de Cochabamba afectando familias, viviendas y cultivos.

4.2.4 Cuenca del Río Pilcomayo

El río Pilcomayo a diferencia de los ríos anteriores, hace parte de la macro cuenca del río de la Plata y fluye a través de Bolivia, Paraguay y Argentina. Su cuenca drena 270,000 km² y tiene una longitud de 2,426 km. Nace a 3,900 m.s.n.m. en un lugar conocido como Chiurpkho Pampa en el límite entre los departamentos de Oruro y Potosí sobre la cordillera de los Andes en Bolivia. Desde allí discurre en dirección este y sudeste por los departamentos de Potosí, Chuquisaca y Tarija donde desempeña un papel importante dentro de la actividad pesquera de la región. El 31% del área de la cuenca se encuentra en Bolivia, el 44% en Paraguay y el 25% en Argentina y la población total dentro del área es de aproximadamente 1.5 millones de habitantes de los cuales 950,000 residen en Bolivia.

La problemática principal del río se basa en el transporte de sedimentos y productos de la explotación minera hacia las llanuras del Chaco en Argentina y Paraguay donde el taponamiento del curso genera constantes cambios de cauce y el derrame de productos tóxicos contamina las aguas y los suelos. En esta medida el análisis de amenaza por inundación y deslizamientos no es el principal objeto de estudio de este río.

4.2.5 Cuenca del Río Caine

La cuenca del río Caine está contenida dentro de la cuenca del río Grande, en la parte alta de esta última. Fluye a través de los departamentos de Cochabamba y Potosí y drena un área de 9,500 km² en una longitud de 162 km. El río Caine nace a 2,350 m.s.n.m. cerca de la población de Capinota donde

confluyen el río Rocha y el río Arque y se une con el río San Pedro para formar el Río Grande. La cuenca alberga una población de 1,117,544 habitantes que practican la agricultura a pequeña escala y la actividad pecuaria. Los cultivos principales son de maíz, maní, guayaba, chirimoya, cítricos y verduras. La ganadería en la región es de subsistencia. Para esta área no existen proyectos de investigación previos que involucren la modelación hidrológica o hidrodinámica. Adicionalmente, no hay información de estaciones hidrométricas que sirva como punto de partida para el análisis.

4.2.6 Cuenca del Río Yapacaní

La cuenca del río Yapacaní contenida en el departamento de Santa Cruz drena un área de 11,608 km² a través de 7 provincias y 16 municipios con una altitud media de 1,473 m.s.n.m. Nace en las formaciones subandinas del Parque Nacional Amboró donde confluyen los ríos Alturas del Yapacaní y el Surutú, a 2,759 m.s.n.m. y desciende en sus 335 km hasta los valles cruceños en la provincia de Ichilo a 187 m.s.n.m. donde desemboca en la parte baja del río Grande. Funciona como frontera entre los municipios de San Juan y Yapacaní. Es de gran importancia económica por su potencial pesquero y constituye una zona de riesgo en época de crecidas. Cuenta con cuatro estaciones hidrométricas de monitoreo y la mayor parte de su información está asociada a proyectos realizados con base en el río Pirai.

4.2.7 Cuenca del Río Mamoré

El río Mamoré es un río amazónico que recorre gran parte del territorio boliviano y parte del territorio brasileño y es la principal vía de transporte pluvial pues es navegable durante todo el año en 1,507 km desde el puerto Villarroel en hasta Guayaramerín. Su cuenca tiene una superficie de 241,660 km² que va desde su nacimiento donde confluyen los ríos Chapare y Marmorecillo y continua su curso en dirección norte hasta su desembocadura donde confluye con el río Beni para formar el río Madeira, uno de los principales afluentes del Amazonas. Es el río más importante de Bolivia y abarca parte de los departamentos del Beni, Santa Cruz, Cochabamba, Potosí y Chuquisaca. Tiene una longitud real de 1,319 km que por ser un río meándrico aumenta hasta llegar a un total de 2,853 km. Recibe un elevado número de afluentes dentro de los cuales destacan el río Grande, el río Yata, el río Isiboro y el Río Iténez o Guaporé que marca la frontera entre Bolivia y Brasil. Este último se inunda periódicamente en el periodo de crecidas.

El río Mamoré es un río muy grande lo que dificulta la modelación detallada y el desarrollo de un análisis exhaustivo que permita cuantificar las pérdidas por inundación y deslizamientos. La eventual modelación de un río como el Mamoré requiere del trabajo previo de evaluación de las amenazas por inundación en sus principales afluentes.

4.3 SELECCIÓN DE CUENCAS CRÍTICAS PARA EL ANÁLISIS

De acuerdo con el alcance establecido para el presente estudio, se debe seleccionar unas cuencas críticas representativas para efectos de un análisis de riesgo por inundación con mayor detalle que el presentado anteriormente. Para realizar una selección de cuencas objetiva, se diseñó una matriz de calificación, la cual considera una serie de criterios que permiten identificar las cuencas más adecuadas. Se consideran las 7 cuencas principales descritas en el numeral anterior (cuenca del río Grande, Piraí, Rocha, Pilcomayo, Caine, Yapacaní, y Mamoré). A cada una de éstas se le asignó una calificación numérica de 1 a 3 según cada uno de los criterios considerados, donde 1 corresponde a la peor calificación (cuenca poco apta para ser analizada) y 3 a la mejor (cuenca muy apta para ser analizada). Finalmente se suman las calificaciones de todos los criterios para cada una de las cuencas y se seleccionan las 2 con mayor puntaje.

Los criterios que se han definido para realizar la elección de las cuencas hidrográficas que serán analizadas bajo el perfil de riesgo son:

1. Población: las cuencas con mayor cantidad de habitantes tendrán prioridad por considerar que en éstas se dan una mayor cantidad de afectados en caso de un evento natural extremo. A las cuencas con mayor población se asigna una calificación de 3 y a las de menor población una calificación de 1. La información de población proviene del censo de 2011.
2. Eventos históricos de inundación: la cantidad de eventos históricos de inundación que se han presentado en la cuenca da una idea general de la magnitud de la amenaza por inundación que tiene la misma. A mayor número de eventos históricos de inundación, mayor calificación se asigna a una cuenca. La información de eventos históricos de inundación proviene de la base de datos DesInventar (DesInventar, 2013).
3. Susceptibilidad de inundación: la susceptibilidad de la cuenca a eventos de inundación depende de los usos del suelo, el relieve y el clima. Una cuenca con grandes espacios antrópicos, afectados por el hombre, con alta precipitación y bajo relieve, presenta grandes riesgos de inundación. Por lo anterior a mayor porcentaje de área susceptible, mayor calificación recibe la cuenca. La información de susceptibilidad proviene principalmente de los resultados del análisis simplificado presentado en el Capítulo 3 de este informe.
4. Disponibilidad de información: este criterio permite determinar la cantidad de información disponible con la que se cuenta en cierta cuenca a fin de llevar a cabo el proyecto. A mayor cantidad y calidad de información disponible, mayor calificación recibe la cuenca. Esta calificación se asigna con base al conocimiento de expertos locales.
5. Accesibilidad a la zona: hace referencia a si la zona de modelación es fácilmente asequible o no para realizar levantamiento topográficos y de características de las edificaciones, cultivos y población expuesta. A mayor accesibilidad a la zona inundable, mayor calificación recibe la cuenca. Esta calificación se asigna con base al conocimiento de expertos locales.
6. Concepto de expertos locales: indica según el criterio de los expertos locales involucrados en el proyecto el nivel de importancia de la cuenca en cuanto a eventos de inundación, la recurrencia

con la que éstos se presentan y el impacto económico y social que dichos eventos generan. Los expertos locales son los consultores especialistas que hacen parte del equipo del estudio.

El análisis de la información disponible con los criterios indicados permiten plantear las siguientes tres cuencas para el análisis de riesgo indicativo que se adelante en el presente estudio: Cuenca del Río Rocha, cuenca del Río Grande, y cuenca del Río Piraí. De estas se seleccionan inicialmente las dos primeras para ser incluidas en el estudio.

Tabla 21. Matriz de calificación de selección de cuencas

	GRANDE	PIRAÍ	ROCHA	PILCOMAYO	CAÍNE	YAPACANÍ	MAMORÉ
Población total en la cuenca	3	1	2	2	3	1	1
Número de eventos históricos de inundación	3	1	1	1	2	1	1
Susceptibilidad a la inundación	3	1	2	3	1	1	2
Disponibilidad de información	2	3	3	1	1	1	2
Accesibilidad a la zona	1	2	3	1	1	1	1
Concepto de expertos locales	3	2	3	2	2	2	2
TOTAL	15	10	14	10	10	7	9

A partir de la matriz de calificación anterior, se eligen las cuencas del río Grande y del río Rocha para efectos de una modelación de mayor detalle por fenómenos de inundación.

4.4 DESCRIPCIÓN DE CUENCAS Y TRAMOS CRÍTICOS PARA EL ANÁLISIS

La Figura 64 destaca la ubicación de las cuencas seleccionadas para el análisis detallado.

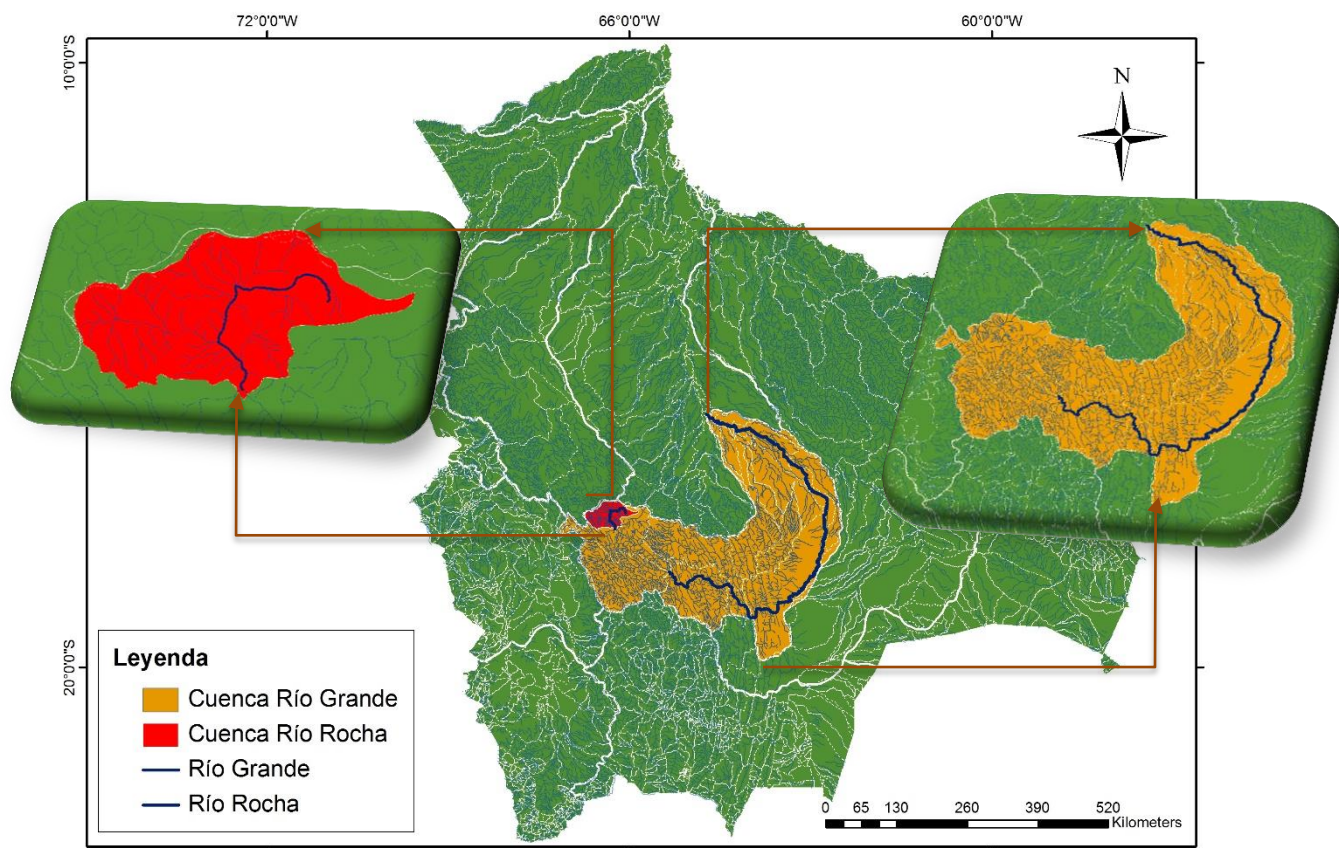


Figura 64. Cuencas seleccionadas para el análisis

Fuente: Capas shape de cuencas y subcuencas obtenidas del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia (2014)

4.4.1 Cuenca del Río Rocha

La cuenca del río Rocha resalta por su proximidad a las ciudades de Cochabamba y Quillacollo donde la invasión ilegal de las zonas naturales del río es una de las mayores problemáticas. La falta de regulación en la cuenca se traduce en una mayor amenaza ante inundaciones y deslizamientos, afectando simultáneamente los factores de exposición y vulnerabilidad. En general la población de Quillacollo es la más vulnerable, pues allí llegan personas del área rural buscando las oportunidades laborales que ofrecen los centros urbanos y se instalan junto al cauce del río en viviendas construidas bajo condiciones deficientes de seguridad que se ven fácilmente afectadas en la temporada de lluvias. Esta cuenca cuya altitud supera los 2,600 m.s.n.m. tiene precipitaciones de 1,200 mm en las cabeceras y 540 mm en los valles, donde predomina la agricultura de pequeña escala, vinculada al uso de agua para riego que en

terrenos pendientes con poca cobertura vegetal incrementan las tasas erosivas y el flujo de sedimentos a través del río. La Figura 65 presenta la ubicación geográfica de la zona expuesta en la cuenca del río Rocha.

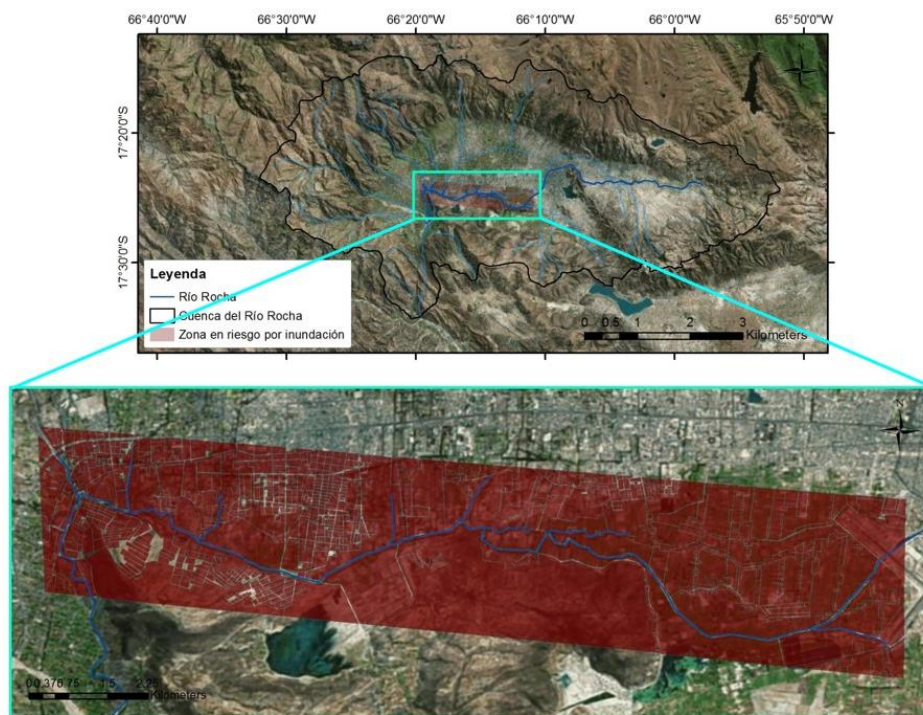


Figura 65. Ubicación geográfica de la zona expuesta en la cuenca del río Rocha

En la Tabla 22 se presentan la información relevante de la cuenca del Río Rocha en relación a cada uno de los criterios de selección descritos en el numeral 6.3.

Tabla 22. Información relevante de la cuenca del río Rocha

COCHABAMBA - CUENCA DEL RÍO ROCHA		
Población total en la cuenca (habitantes)	888,506	
Número de eventos históricos de inundación	93	
Número de eventos históricos de deslizamiento	14	
Pérdida estimada por inundación (US\$)	16,198,194	
Pérdida estimada por deslizamiento (US\$)	486,600	
Precipitación total anual promedio multianual (mm)	671.75	
Población susceptible a inundación (habitantes)	716,899	
Población susceptible a deslizamientos (habitantes)	119,717	
Disponibilidad de información	Mapa de usos del suelo	Disponible
	Información de predios y construcciones en zonas inundables	A solicitar en la gobernación de Cochabamba
	Información de predios y construcciones en zonas susceptibles de deslizamientos	Debe ser levantada en campo

COCHABAMBA - CUENCA DEL RÍO ROCHA		
	Estaciones pluviométricas con mínimo 30 años de registro diario	9
	Mapa de vegetación	A solicitar en la gobernación de Cochabamba
	Mapa de ríos	A solicitar en la gobernación de Cochabamba
	Mapa de geología	A solicitar en la gobernación de Cochabamba
	DEM	AsterGDEM 30m x 30m
	Ríos y estaciones con mediciones de caudales diarios, fechas de medición y calidad y completitud de la información disponible	Shape estaciones SENAMHI
	Información geométrica de estructuras hidráulicas presentes en el cauce y/o cauces a evaluar	Debe ser levantada en campo
Accesibilidad a la zona	De fácil accesibilidad por su cercanía con la ciudad de Cochabamba	
Concepto de expertos locales	Gran relevancia a nivel nacional dado que presenta inundaciones recurrentes en zonas agrícolas de la ciudad de Cochabamba, y zonas urbanas de los municipios de Quillacollo y Sipe Sipe.	

En la Figura 66 se presenta la cuenca del río Rocha indicando los ríos principales, los municipios a lo largo de los cauces y las zonas susceptibles de inundación de acuerdo con lo explicado anteriormente. La Figura 67 presenta las zonas de susceptibilidad a las inundaciones de la cuenca del Río Rocha.

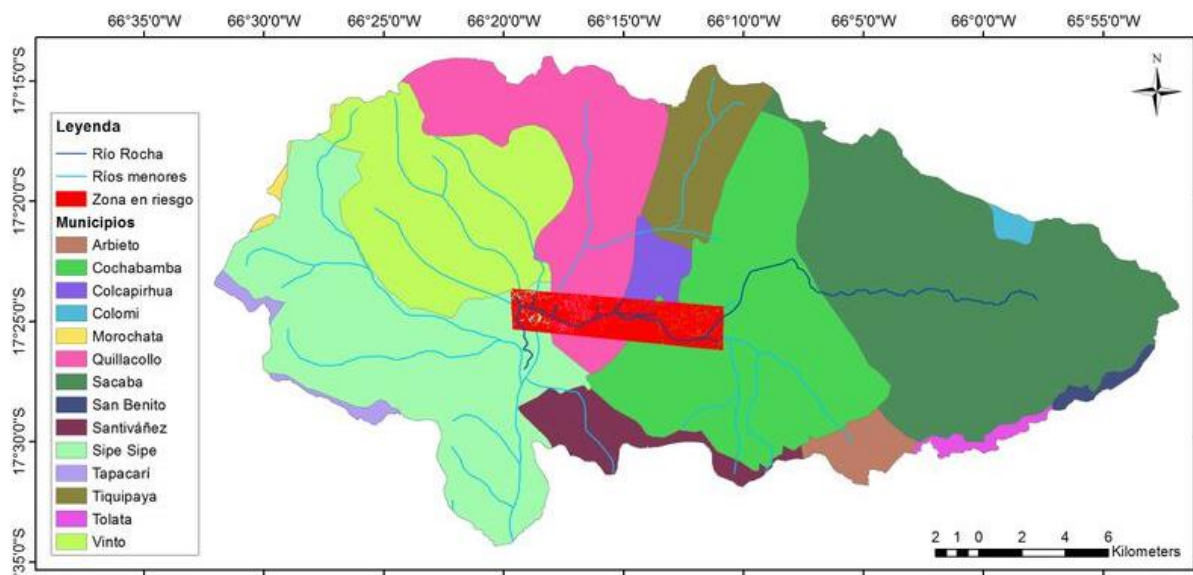


Figura 66. Localización de zonas susceptibles a inundación y entorno de la Cuenca Río Rocha.
Fuente: Capa shape de municipios obtenida del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia (2014)



Figura 67. Susceptibilidad a las inundaciones para la cuenca del río Rocha

4.4.2 Cuenca del Río Grande

La cuenca del río Grande, ubicada en la parte central del territorio boliviano se distribuye en cinco departamentos: Potosí, Cochabamba, Chuquisaca, Santa Cruz y Oruro y en 104 municipios. Cubre cerca del 10% del país y contiene cerca del 30% de su población. Se compone por dos zonas marcadamente diferenciadas, una montañosa, la parte alta, donde predominan los suelos arenosos con altas tasas de erosión asociadas a las pendientes del terreno y a la escasez de vegetación, las tierras de cultivo son bastante reducidas. La parte baja, es una zona plana donde la precipitación es más alta y la vegetación más densa.

La cuenca es la más poblada del país y la de mayor volumen de producción agropecuaria donde conviven un gran potencial de desarrollo y una gran problemática ambiental. Contiene zonas como los valles interandinos del Cono Sur de Cochabamba, los valles de Chuquisaca y los valles Cruceños de importante potencial agroproductivo donde se presentan acelerados procesos de degradación del suelo. También, dentro de la cuenca baja, en la región del Chaco Cruceño, principal en cuanto a producción agroindustrial y alimenticia, la amenaza por las inundaciones frecuentes y por la acumulación de sedimentos juega un papel importante. Las malas prácticas de cultivo y de ocupación del territorio afectan la fertilidad de los suelos, la deforestación, el sobrepastoreo y la actividad agrícola aumentan la erosión y pérdida de suelo, causan desertificación y vulnerabilidad ante la variación climática.

Las altas tasas de erosión en la cuenca alta generan una gran carga de sedimentos en el río Grande que se depositan en la parte baja de la cuenca y forman elevaciones en el cauce del río ocasionando inundaciones. Según datos recopilados por las Naciones Unidas (FAO, 2007), casi 18 mil familias del departamento de

Santa Cruz se vieron afectadas por dichas inundaciones. Once (11) personas murieron y se cuantificaron US\$ 44 millones en pérdidas materiales. Entre 1997 y 2007 ocurrieron ocho eventos de inundaciones catastróficas lo que implica que cada dos años se presenta uno de estos eventos. Los estudios realizados dentro del marco del proyecto de la hidroeléctrica Rositas estiman los costos promedio asociados a las inundaciones en el río Grande en US\$100 millones anuales (CEDLA, 2010).

La cuenca del río Grande es una región en crecimiento donde miles de familias procedentes del altiplano y del valle se han asentado en los últimos años, en zonas de alta exposición a amenazas naturales. Fue seleccionada en función de su carácter estratégico nacional, su complejidad ambiental, social y económica, la recurrencia de desastres a la cual son vulnerables las poblaciones en su cuenca y en función de la calidad y la cantidad de información hidrológica disponible.

En la Tabla 23 se presenta la caracterización de la cuenca del río Grande respecto a cada uno de los criterios de selección descritos en el numeral 6.3 y en la Figura 68 se presenta la ubicación geográfica de la zona expuesta en la cuenca.

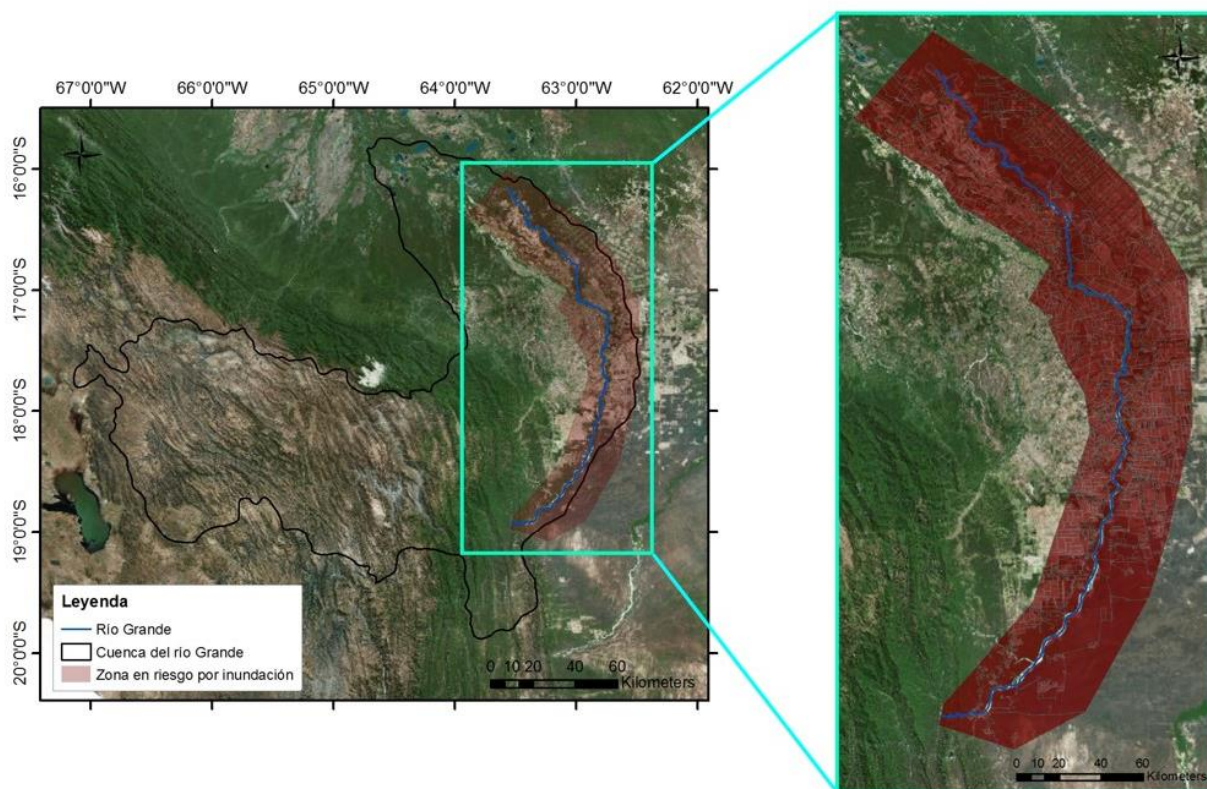


Figura 68. Ubicación geográfica de la zona expuesta en la cuenca del río Grande

Tabla 23. Cuenca del Río Grande

ZONAS CULTIVADAS Y PUERTO PAILAS - CUENCA DEL RÍO GRANDE		
Población total en la cuenca (habitantes)	3,223,111	
Número de eventos históricos de inundación	459	
Número de eventos históricos de deslizamiento	31	
Pérdida estimada por inundación (US\$)	152,165,072	
Pérdida estimada por deslizamiento (US\$)	5,304,015	
Precipitación total anual promedio multianual (mm)	1039.11	
Población susceptible a inundación (habitantes)	1,348,088	
Población susceptible a deslizamientos (habitantes)	403,801	
Disponibilidad de información	Mapa de usos del suelo	Existe mapa realizado por la Gobernación de Santa Cruz en 2012
	Información de predios y construcciones en zonas inundables	Debe ser levantada en campo
	Información de predios y construcciones en zonas susceptibles de deslizamientos	Debe ser levantada en campo
	Estaciones pluviométricas con mínimo 30 años de registro diario	73
	Mapa de vegetación	Existe mapa realizado por la Gobernación de Santa Cruz en 2012
	Mapa de ríos	A solicitar en la gobernación de Santa Cruz
	Mapa de geología	Existe mapa realizado por la Gobernación de Santa Cruz en 2012
	DEM	AsterGDEM 30m x 30m
	Ríos y estaciones con mediciones de caudales diarios, fechas de medición y calidad y completitud de la información disponible	
	Información geométrica de estructuras hidráulicas presentes en el cauce y/o cauces a evaluar	No hay información disponible
Accesibilidad a la zona	Muy accesible	
Concepto de expertos locales	La cuenca es de gran relevancia en el país dado que anualmente presenta pérdidas por inundación en extensas áreas de cultivos y ciertas poblaciones localizadas en las laderas del río.	

En la Figura 69 se presenta la cuenca del río Grande indicando los municipios a lo largo de los cauces y las zonas susceptibles de inundación de acuerdo con lo explicado anteriormente. La Figura 70 presenta las zonas de susceptibilidad a las inundaciones en la cuenca del Río Grande.

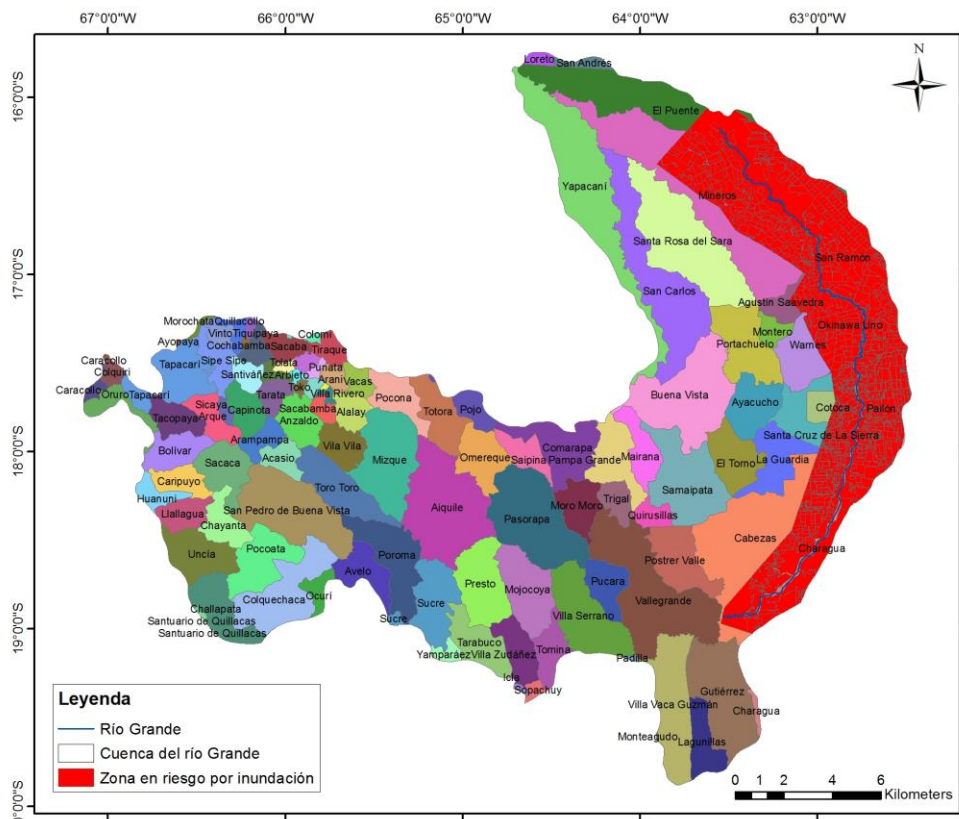


Figura 69. Localización de zonas susceptibles a inundación y entorno de la cuenca Río Grande.
Fuente: Capa shape de municipios obtenida del Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia (2014)



Figura 70. Susceptibilidad a las inundaciones de la cuenca del Río Grande

5 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN EN TRAMOS CRÍTICOS

5.1 GENERALIDADES

El clima de Bolivia presenta una alta variabilidad asociada principalmente a la elevación. La temporada de lluvias va generalmente de noviembre a marzo. Las inundaciones históricas en el país han ocurrido en tiempos diversos durante dicho periodo invernal. Este capítulo presenta la metodología y los resultados de los análisis de amenaza de inundación.

La evaluación de la amenaza por inundación con métodos probabilistas incluye los siguientes componentes principales:

- Amenaza de lluvias la cual se representa mediante un conjunto estocástico de eventos de precipitación en el cual un evento se define como la distribución espacial de intensidad y duración de lluvias.
- Modelación hidrológica para transformar la intensidad de lluvias a caudales en el cauce de los ríos.
- Modelación hidráulica de la inundación que define la extensión espacial de las zonas inundables para diferentes niveles de intensidad de lluvias.

El resultado principal de un modelo de amenaza por inundaciones es la delimitación de las áreas sometidas a inundación para un determinado periodo de retorno o frecuencia de ocurrencia. La determinación de las áreas susceptibles a inundación requiere conocimiento de los eventos históricos que permitan la calibración de los modelos hidrológicos e hidráulicos. La delimitación de las áreas inundadas y la distribución de las intensidades de los eventos para cada uno de los eventos estocásticos definidos, conjuntamente con la información de exposición y vulnerabilidad, permiten la evaluación probabilista del riesgo en las zonas de análisis. (Ver Capítulo 2).

5.2 AMENAZA DE LLUVIA EN CUENCAS SELECCIONADAS

5.2.1 Información de precipitación

La Tabla 24 resume la información disponible para el análisis de amenaza de lluvia en cada una de las cuencas de análisis. La tabla indica para cada una de las estaciones pluviométricas del SENAMHI y del SEARPI los periodos de tiempo en que se cuenta con información.

Tabla 24. Características de las estaciones y periodos de tiempo con información disponible

Cód.	Nombre	Entidad	Depto.	Cuenca	Longitud (°)	Latitud (°)	Elev. (msnm)	Info. desde	Info. hasta
58	Abapó	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-63.40445	-18.91972	445	01/07/1975	16/04/2013
106	Actara	SENAMHI	Potosí	Grande	-65.96	-19.0708	3440	01/06/1976	31/12/2012
18	Aiquile	SENAMHI	Cochabamba	Grande	-65.17806	-18.20333	2254	01/10/1943	31/03/2013
37	Angostura	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.568056	-18.16639	1174	01/01/1972	28/02/2013
5	Anzaldo	SENAMHI	Cochabamba	Grande	-65.93278	-17.78361	3034	01/05/1943	30/03/2013
7	Arani	SENAMHI	Cochabamba	Rocha	-65.75444	-17.57361	2836	01/02/1956	30/03/2013
83	Asencion De Guarayos	SENAMHI	El Beni	Grande	-63.16917	-15.91528	230	01/09/1946	30/04/2013
105	Ayoma	SENAMHI	Potosí	Grande	-66.1333	-18.8667	3470	01/06/1976	31/12/2012
38	Bermejo	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.633333	-18.1	1144	07/11/1975	28/02/2013
123	Bolivar	SENAMHI	Oruro	Grande	-66.8381	-18.4792	419	31/10/1968	30/12/1994
43	Camiri Aeropuerto	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-63.52584	-20.00667	795	17/01/1946	30/04/2013
53	Campamento Espejos	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.397118	-17.97386	518	01/01/1976	28/02/2013
17	Capinota	SENAMHI	Cochabamba	Rocha	-66.26056	-17.71667	2395	01/01/1944	30/03/2013
14	Cochabamba Aeropuerto	SENAMHI	Cochabamba	Rocha	-66.17445	-17.41611	2561	08/11/1942	30/04/2013
4	Colomi	SENAMHI	Cochabamba	Rocha	-65.87084	-17.33611	3284	01/09/1977	30/03/2013
48	Colonia San Carlos	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.283333	-17.96667	602	18/10/1975	31/12/2012
47	Colonia San Juan	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.311457	-18.00669	611	01/01/1976	31/12/1999
24	Comarapa	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-64.52973	-17.91361	1832	01/01/1953	30/11/2012
54	Concepcion_sc	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-62.0275	-16.13833	503	08/11/1942	30/04/2013
55	Cristal Mayu	SENAMHI	Cochabamba	Grande	-65.64334	-17.00778	494	01/02/1973	30/03/2013
21	El quíne	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-64.35	-18.08333	2011	01/06/1975	30/11/2012
112	El Reloj	SENAMHI	Chuquisaca	Grande	-65.2431	-19.0381	2840	01/10/1994	30/04/2011
28	El Sillar	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.566667	-18.13611	1596	01/01/1976	31/12/2012
119	El Villar	SENAMHI	Chuquisaca	Grande	-64.3069	-19.6311	2080	01/01/1977	31/03/2011
45	Elvira	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.466667	-18.05	620	01/01/1976	24/10/2012
20	Empinado (Las Chacras)	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.8	-18.55	2070	01/01/1976	19/09/2012
50	Florida	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-63.37917	-18.56556	581	01/07/1977	31/07/2012
35	Granja Espejos	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.571389	-17.975	1341	13/11/1975	28/02/2013
41	Gutierrez	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-63.5275	-19.42083	949	01/01/1981	31/01/2013
57	Km 15 (Club Social)	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.292897	-17.87749	459	01/01/1976	31/12/1999
70	La Bélgica - Ingenio	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.216667	-17.55	352	01/01/1970	30/01/2013
69	La Bélgica - Puente	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.216667	-17.53333	353	01/01/1976	28/02/2013
56	La Guardia	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.316667	-17.86667	483	01/11/1975	30/12/2012

Cód.	Nombre	Entidad	Depto.	Cuenca	Longitud (°)	Latitud (°)	Elev. (msnm)	Info. desde	Info. hasta
81	La Jota (Chimore)	SENAMHI	Cochabamba	Grande	-65.17139	-16.995	235	01/02/1974	27/02/2013
52	La Junta	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.668333	-19.085	519	01/01/1976	31/12/2012
107	La Punilla	SENAMHI	Chuquisaca	Grande	-65.3083	-18.9833	3300	09/11/1976	31/03/2011
12	La Tamborada	SENAMHI	Cochabamba	Rocha	-66.13556	-17.44861	2583	01/06/1974	31/12/2012
11	La Violeta	SENAMHI	Cochabamba	Rocha	-66.23167	-17.34722	2607	01/01/1979	30/03/2013
39	Los Tojos	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.630701	-18.22652	1131	01/01/1976	31/12/1999
36	Mairana	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.951929	-18.11944	1322	01/01/1970	31/12/2000
33	Mataral	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-64.21667	-18.11667	1392	01/01/1977	31/07/2012
79	Minero (Unagro)	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-63.24167	-17.11	248	01/01/1976	31/03/2013
22	Mizque	SENAMHI	Cochabamba	Grande	-65.33778	-17.94278	2004	02/01/1948	30/03/2013
6	Monte Puncu	SENAMHI	Cochabamba	Grande	-65.30001	-17.58333	2840	01/03/1977	30/03/2013
73	Montero_Muyurina	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-63.25556	-17.34333	299	01/05/1991	31/12/2012
2	Morochata	SENAMHI	La Paz	Rocha	-66.966667	-17.21667	3817	20/08/1943	30/06/1999
122	Muyupampa	SENAMHI	Chuquisaca	Grande	-63.7828	-19.8806	1130	01/01/1975	31/10/2008
116	Nuevo Mundo	SENAMHI	Chuquisaca	Grande	-64.2928	-18.9961	2220	01/09/1975	30/04/2011
78	Okinawa I	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-62.88333	-17.21667	251	01/11/1975	30/09/2012
104	Oruro - Aeropuerto	ASSANA	Oruro	Grande	-67.1167	-17.9667	3702	01/01/1943	31/12/2012
10	Pairumani	SENAMHI	Cochabamba	Rocha	-66.31861	-17.36611	2615	01/01/1987	31/03/2013
46	Parabanó	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.4475	-18.09389	615	01/01/1976	31/12/2012
16	Parotani	SENAMHI	Cochabamba	Rocha	-66.34362	-17.56611	2475	01/09/1971	30/03/2013
30	Peña Colorada	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.804722	-18.18333	1522	01/01/1976	30/01/2013
113	Puente Arce	SENAMHI	Chuquisaca	Grande	-65.1558	-18.6114	2514	01/01/1982	27/02/2010
103	Quillacas	SENAMHI	Oruro	Grande	-66.9617	-19.2336	3730	01/08/1975	31/03/2010
31	Quirusillas	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.95	-18.33333	1508	01/01/1976	15/01/2013
1	Ramadas	SENAMHI	Cochabamba	Rocha	-66.25	-17.21667	4137	22/11/1971	30/04/2003
109	Ravelo	SENAMHI	Potosí	Grande	-65.5119	-18.8047	3200	01/01/1953	31/12/2012
115	Redencion Pampa	SENAMHI	Chuquisaca	Grande	-64.6161	-18.825	2460	01/01/1975	30/04/2011
74	Salsipuedes	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.166667	-17.23333	283	01/10/1963	23/05/2012
34	Samaipata	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.95	-18.16667	1365	01/11/1963	31/12/2012
9	San Benito	SENAMHI	Cochabamba	Rocha	-65.9039	-17.52639	2708	01/01/1966	30/03/2013
49	San Francisco_Sc	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-63.13333	-20.01667	598	01/11/1975	30/09/2012
51	San Javier	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-62.47084	-16.27139	532	10/04/1947	30/04/2013
29	San Juan de Yapacaní	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-64.28917	-17.96306	1558	01/01/1974	28/02/2013
76	San Juan Del Potrero	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-63.83333	-17.25	271	01/01/1986	31/12/2012
32	San Juan del Rosario	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.8	-18.3	1469	01/01/1976	31/12/2012
80	San Julian	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-62.62583	-16.91583	241	01/04/1973	31/12/2012

Cód.	Nombre	Entidad	Depto.	Cuenca	Longitud (°)	Latitud (°)	Elev. (msnm)	Info. desde	Info. hasta
65	San Pedro de Terevinto	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.383333	-17.71667	409	01/01/1976	30/01/2013
84	San Pedro_Sc	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-63.48334	-16.81667	215	01/01/1980	31/03/2013
27	Santa Ana - Santa Cruz	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-64.15	-18.08333	1647	01/10/1981	31/10/2012
66	Santa Cruz - Oficina	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.160123	-17.75328	408	11/11/1975	31/12/2000
62	Santa Cruz SENAMHI	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-63.16667	-17.78333	419	17/01/1971	30/09/2012
63	Santa Cruz-Universidad	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.187963	-17.77184	417	18/01/1971	28/02/2013
15	Santivañez	SENAMHI	Cochabamba	Rocha	-66.24917	-17.565	2537	01/06/1978	30/01/2013
13	Sarco	SENAMHI	Cochabamba	Rocha	-66.17555	-17.38417	2569	01/11/1989	31/03/2013
118	Sopachuy	SENAMHI	Chuquisaca	Grande	-64.4675	-19.4817	2100	01/01/1975	31/03/2011
111	Sucre - Aeropuerto	ASSANA	Chuquisaca	Grande	-65.2939	-19.0097	2904	01/03/1944	31/12/2012
108	Tarabuco		Chuquisaca	Grande	-64.9133	-19.1806	3284	25/09/1942	31/12/2012
8	Tarata	SENAMHI	Cochabamba	Rocha	-66.02278	-17.60861	2750	01/09/1957	31/03/2012
44	Tarumá	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.433333	-18.08333	654	01/10/1975	30/01/2013
61	Terevinto	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.379985	-17.71902	420	01/01/1976	31/12/1999
3	Tiraque	SENAMHI	Cochabamba	Rocha	-65.72444	-17.42528	3295	01/10/1953	29/04/2012
120	Toro Toro	SENAMHI	Potosí	Grande	-65.6833	-18.95	2080	01/07/1977	30/03/2008
59	Trompillo Aeropuerto	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-63.17806	-17.805	433	08/11/1942	30/05/2013
121	Urriolagoitia	SENAMHI	Chuquisaca	Grande	-64.2642	-19.1697	1980	01/09/1975	30/04/2011
25	Vallecito	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.804722	-18.24694	1712	01/01/1976	31/12/2012
26	Vallecito UAGRM	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.804722	-18.24694	1712	01/01/1976	31/12/2012
23	Vallegrande Aeropuerto	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-64.10806	-18.48194	2003	31/05/1975	30/04/2013
117	Villa Serrano	SENAMHI	Chuquisaca	Grande	-64.3225	-19.1183	2108	01/01/1953	31/12/2012
68	Viru Viru	SENAMHI	Santa Cruz	Grande	-63.13889	-17.64861	382	31/07/1984	30/04/2013
40	Volcanes	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.654722	-18.08472	976	01/01/1976	30/11/2012
72	Warnes	SEARPI	Santa Cruz	Grande	-63.133333	-17.5	336	01/01/1976	31/01/2013
110	Yamparaez	SENAMHI	Chuquisaca	Grande	-65.1206	-19.1833	3100	01/10/2005	30/04/2011
114	Zudañez	SENAMHI	Chuquisaca	Grande	-64.7033	-19.1189	2475	01/01/1973	31/03/2011

Por otro lado, la Figura 71 y Figura 72 resumen los registros de intensidad promedio mensual multianual de lluvia en las estaciones pluviométricas en las cuencas del río Rocha y del río Grande respectivamente.

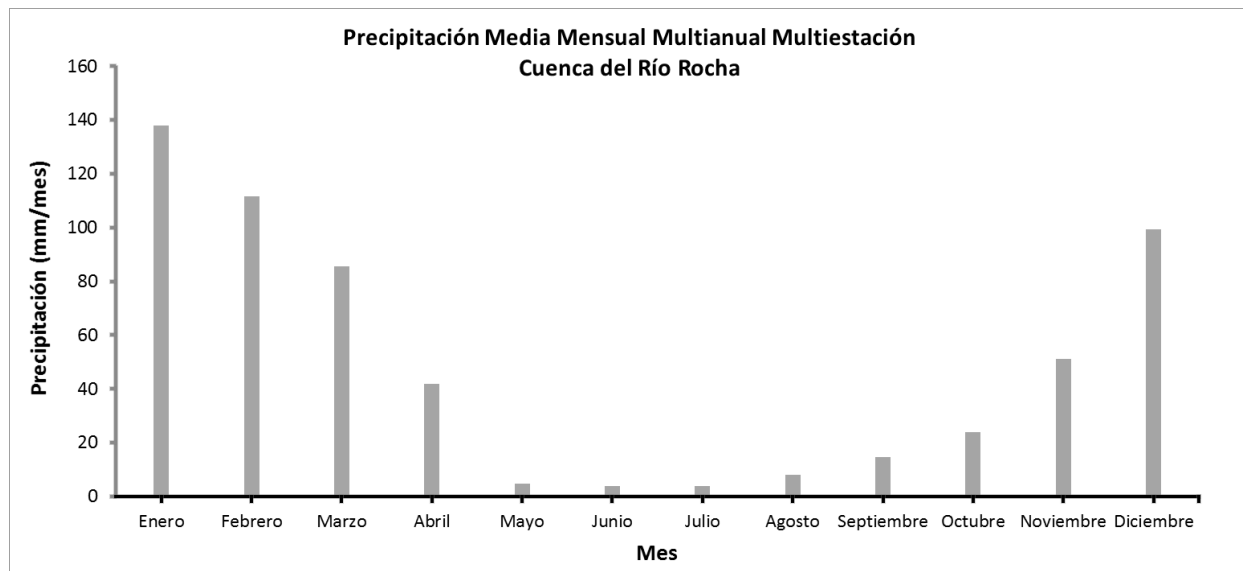


Figura 71. Precipitación media mensual multiestación en la cuenca del río Rocha

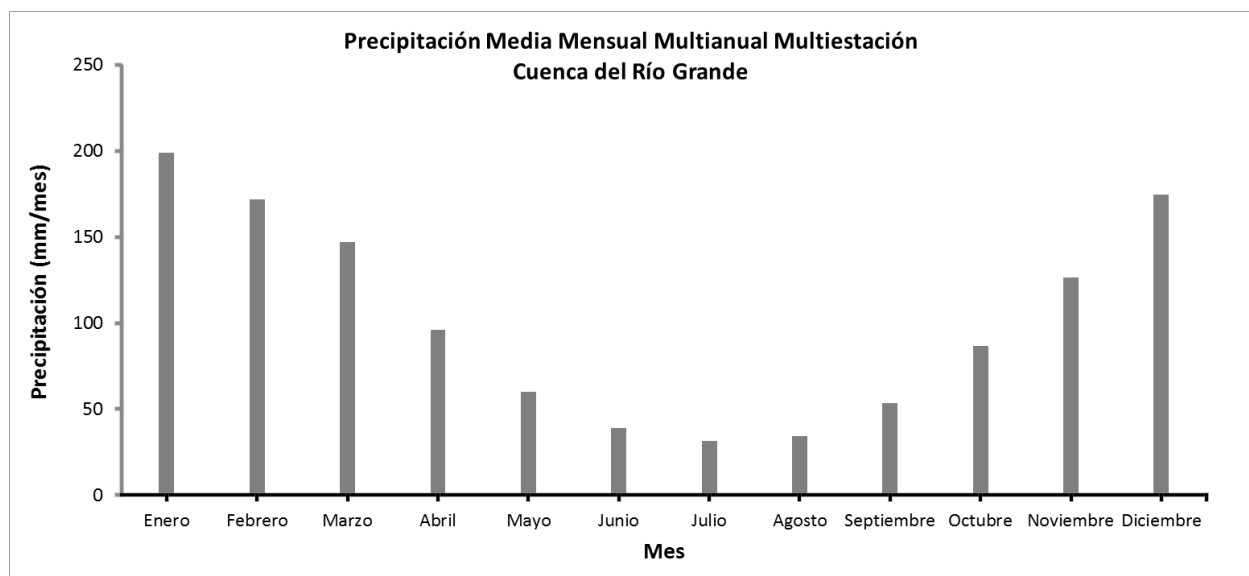


Figura 72. Precipitación media mensual multianual multiestación en la cuenca del río Grande

Adicionalmente, en la Figura 73 y Figura 74 se presentan los promedios mensuales en diferentes estaciones representativas en cada una de las cuencas de análisis. Para la cuenca del río Rocha se han seleccionado las estaciones Parotani, Pairumani, La Violeta y La Tamborada mientras que para la cuenca del río Grande se seleccionaron las estaciones de Tarata, Aiquile, Abapó, Trompillo Aeropuerto y San Julián.

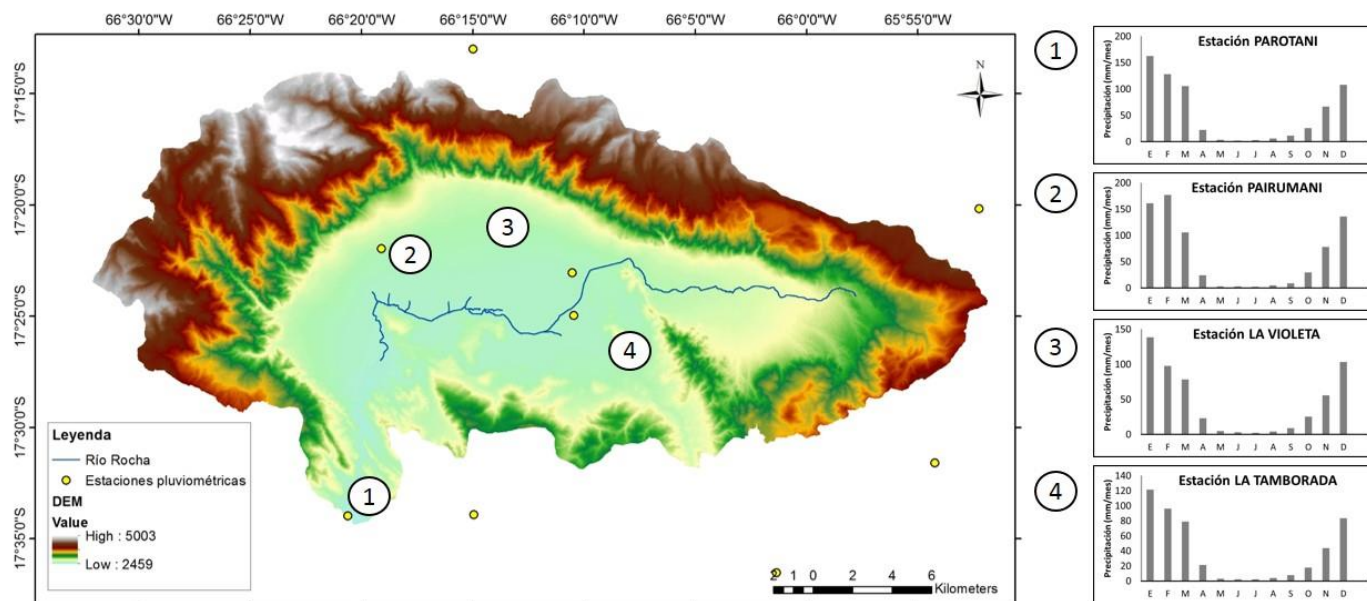


Figura 73. Precipitación media mensual en estaciones representativas en la cuenca del río Rocha

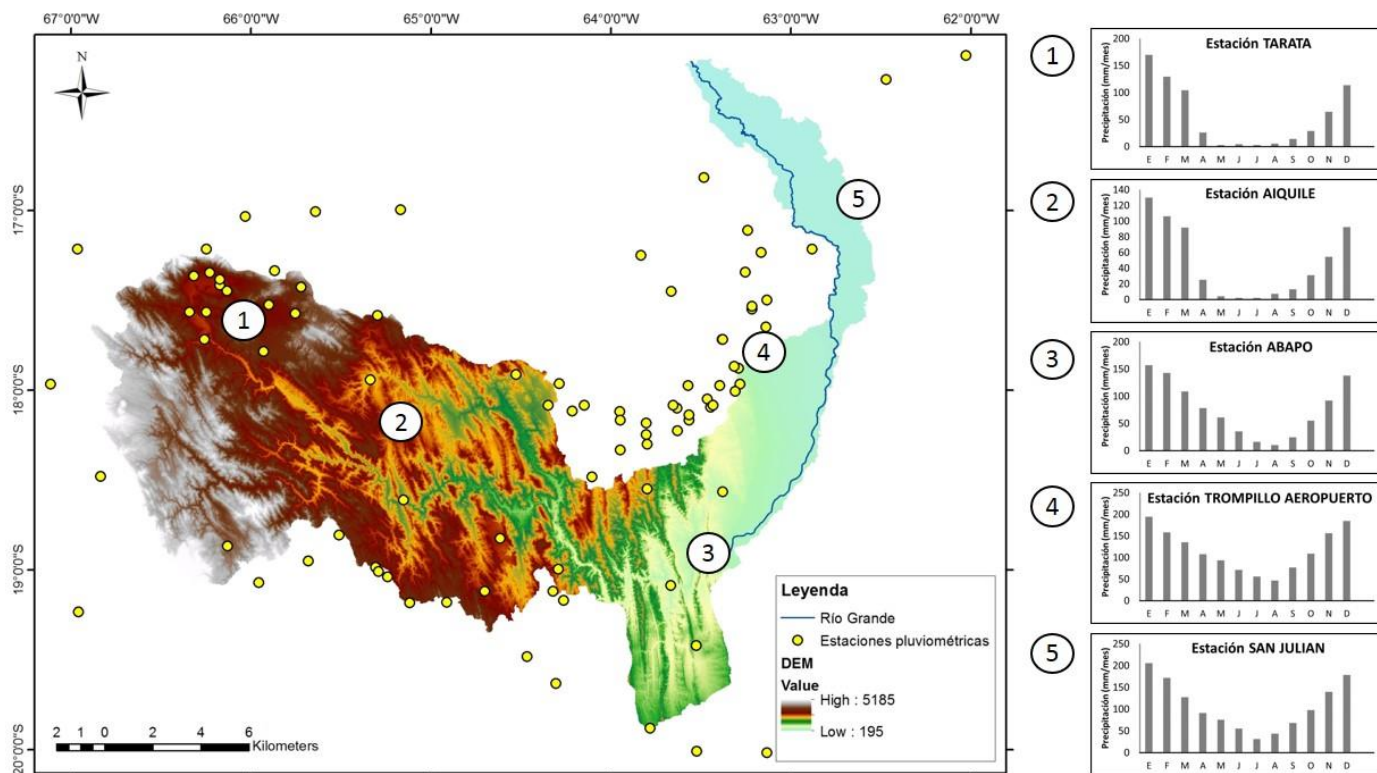


Figura 74. Precipitación media mensual en estaciones representativas en la cuenca del río Grande

5.2.2 Curvas PADF representativas en las cuencas

En la Figura 75 y Figura 76 se presentan las curvas PADF para cada una de las cuencas de estudio. Por las características de las cuencas se selecciona una duración de 1 día para la cuenca del río Rocha y de 5 días para la cuenca del río Grande.

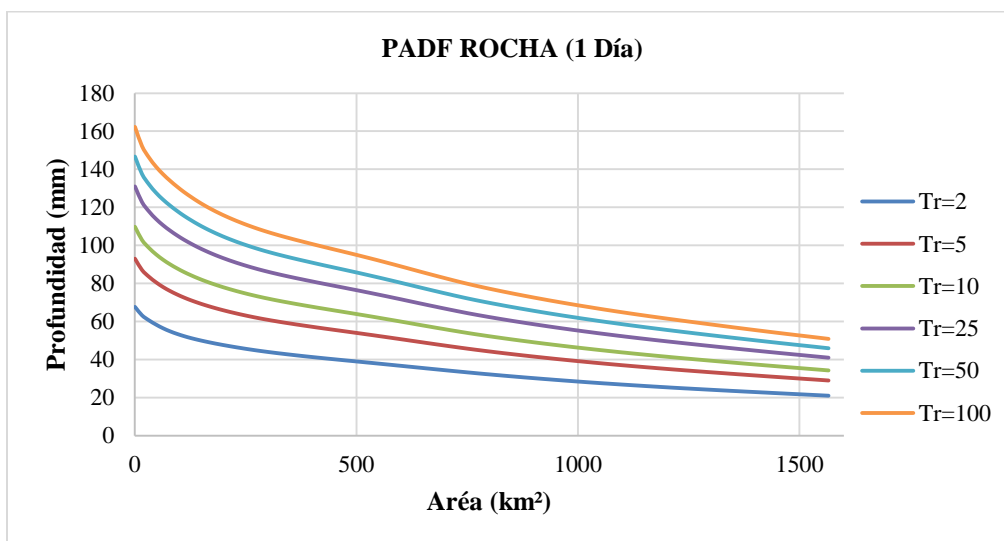


Figura 75. Curvas PADF para 1 día de duración – cuenca del río Rocha

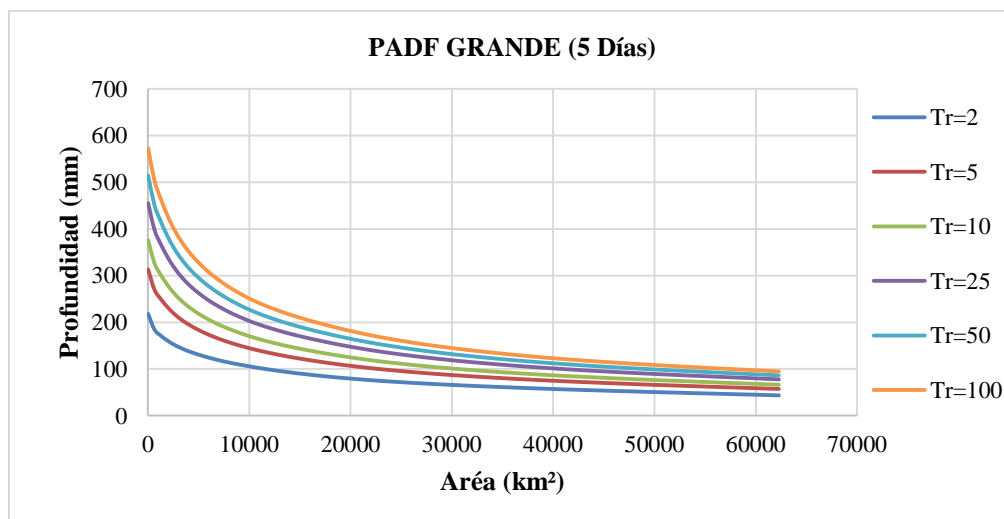


Figura 76. Curvas PADF para 5 días de duración – cuenca del río Grande

5.2.3 Escenarios estocásticos que representan la amenaza de lluvia

El análisis de la amenaza de lluvia se lleva a cabo utilizando el software *IT-LluviaNH*, el cual permite obtener una serie de eventos estocásticos que en conjunto representan la amenaza de lluvia en cada una de las cuencas de análisis. En la Figura 77 y Figura 78 se presentan algunos escenarios representativos en cada una de las cuencas de análisis. El conjunto completo de escenarios se almacena en los siguientes

archivos, compatibles con el software CAPRA por lo cual para su visualización debe utilizarse el software CAPRA-GIS-V2.0:

- AMELluvia_Rocha_1dia.ame
- AMELluvia_Grande_5dias.ame

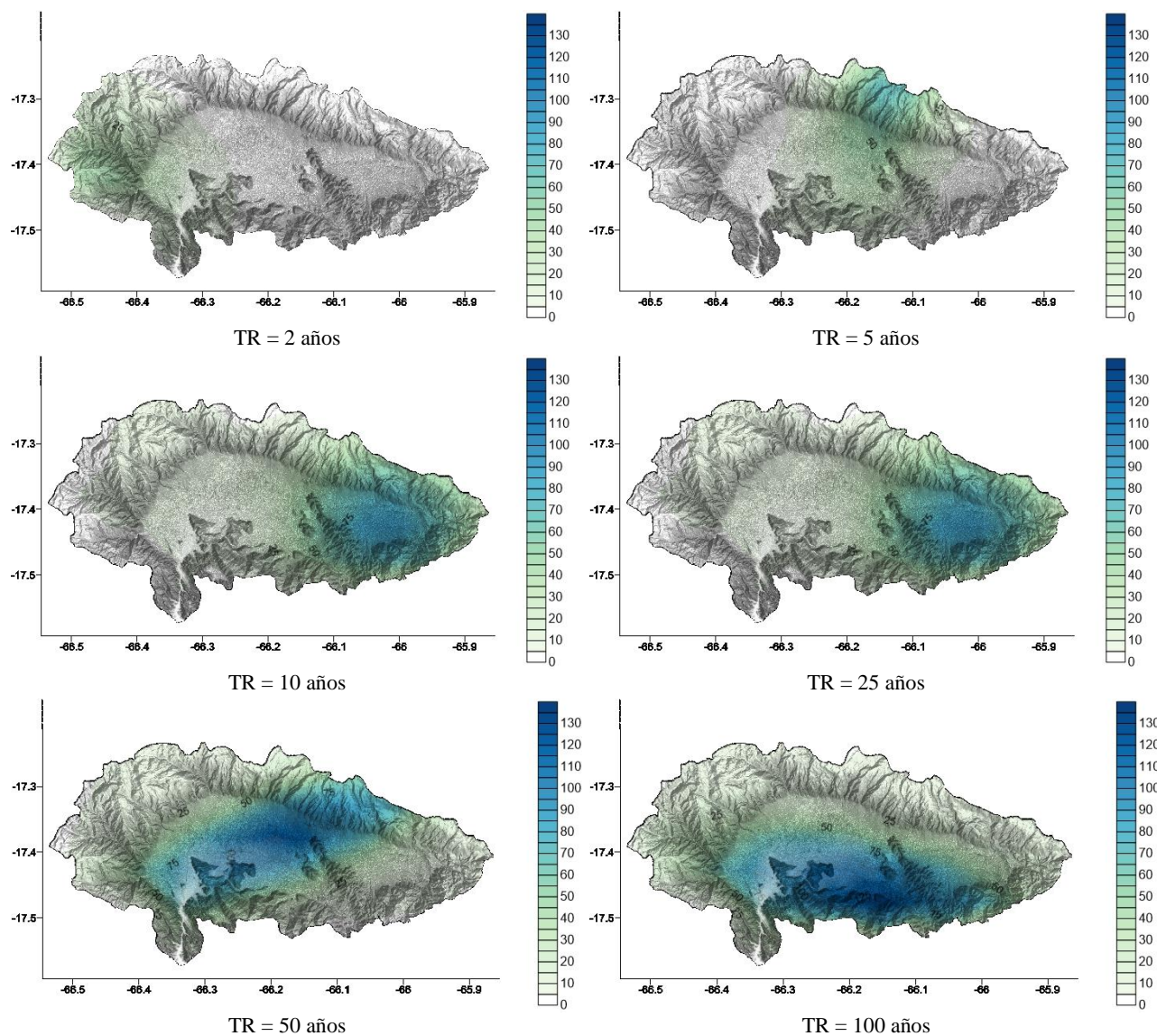


Figura 77. Escenarios de lluvia para diferentes periodos de retorno - cuenca del río Rocha. Profundidad de precipitación en [mm]

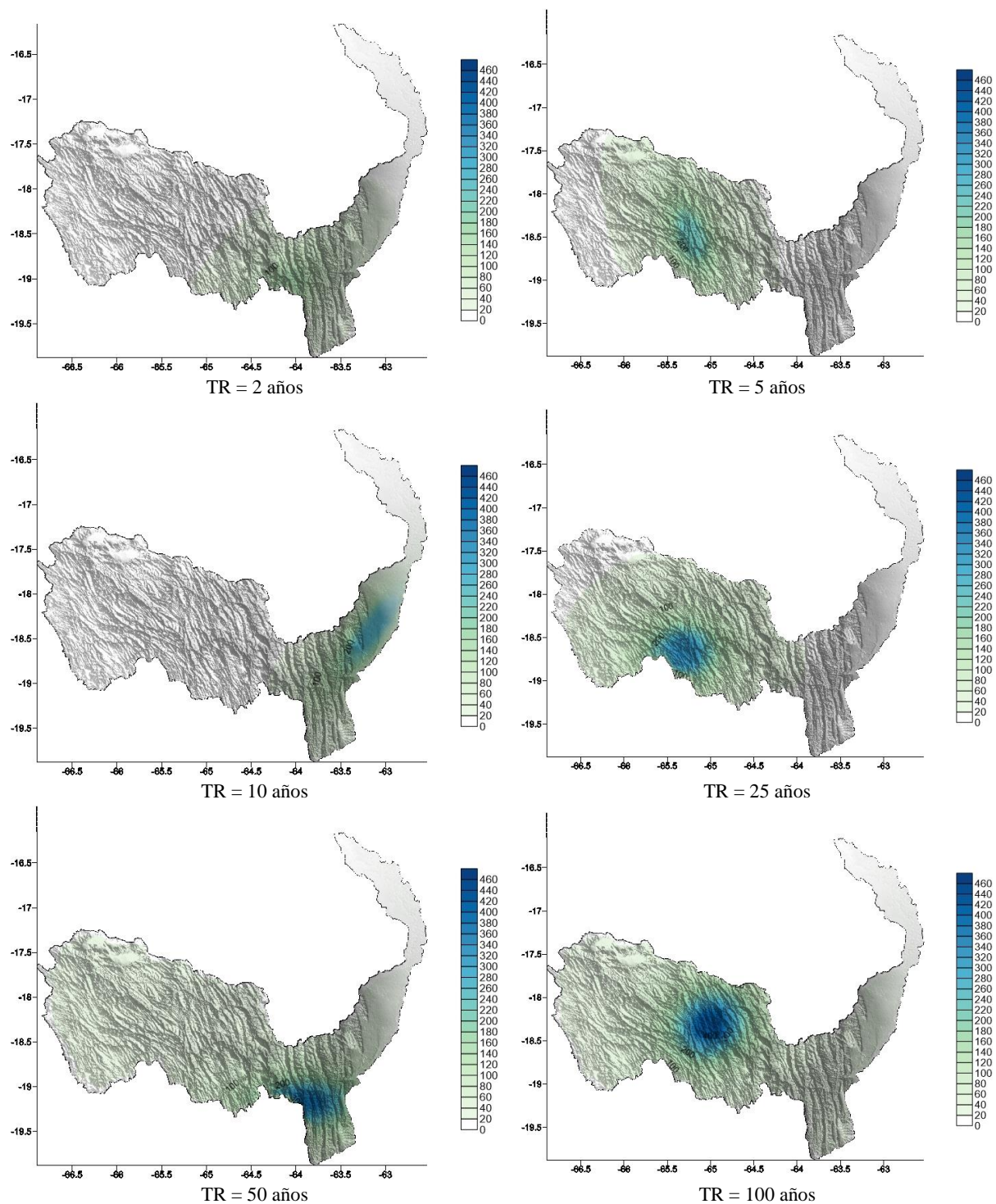


Figura 78. Escenarios de lluvia para diferentes periodos de retorno – cuenca del río Grande. Profundidad de precipitación en [mm]

5.2.4 Amenaza probabilista de lluvias

Adicionalmente, se presentan las distribuciones espaciales de amenaza probabilista de lluvia en la Figura 79 y Figura 80, los cuales representan la distribución geográfica de intensidades de lluvias para diferentes periodos de retorno (PR= 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años) en cada una de las cuencas de análisis.

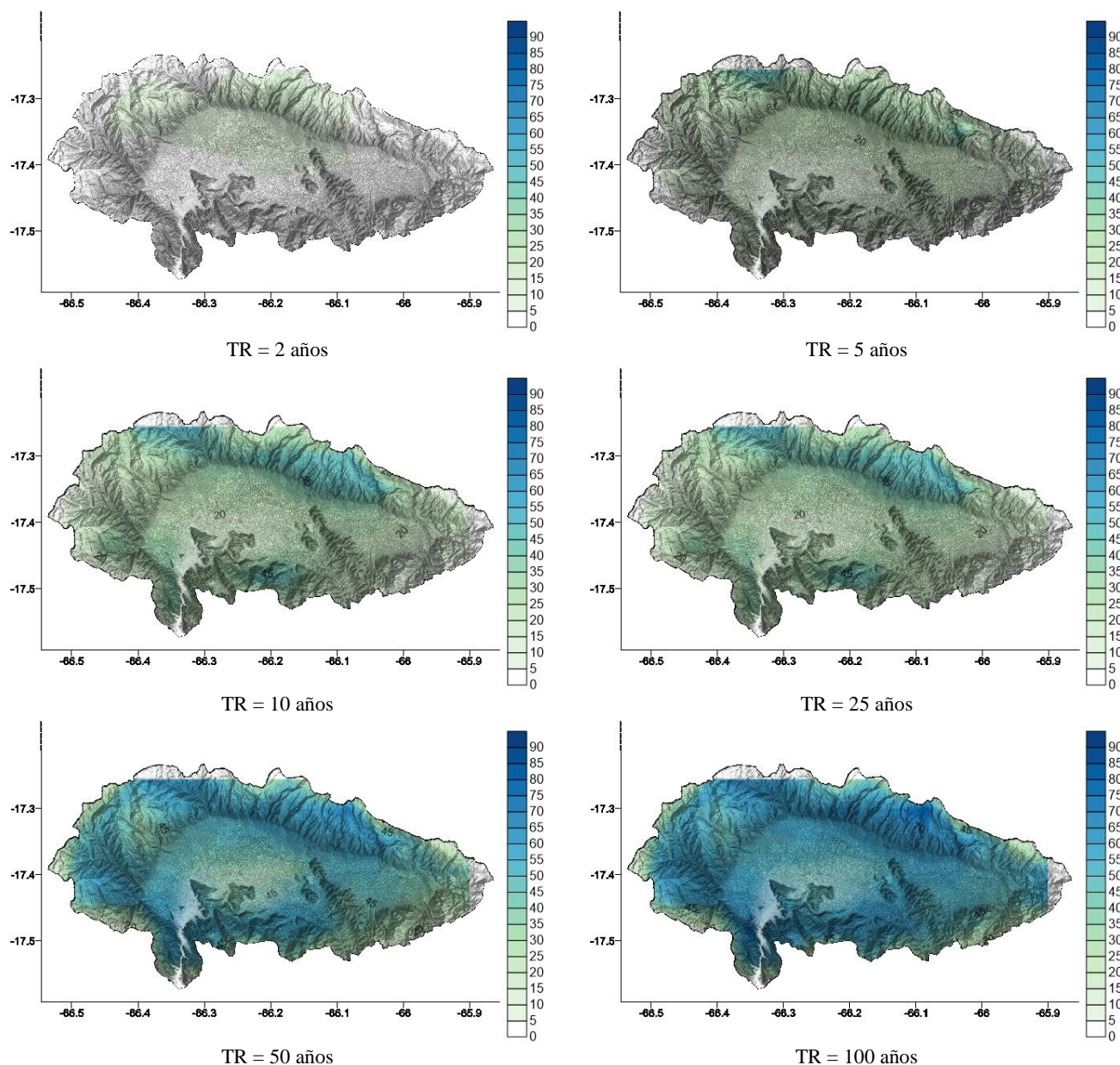


Figura 79. Distribución de amenaza probabilista de lluvias – Duración: 1 día - Cuenca del río Rocha. Profundidad de precipitación en [mm]

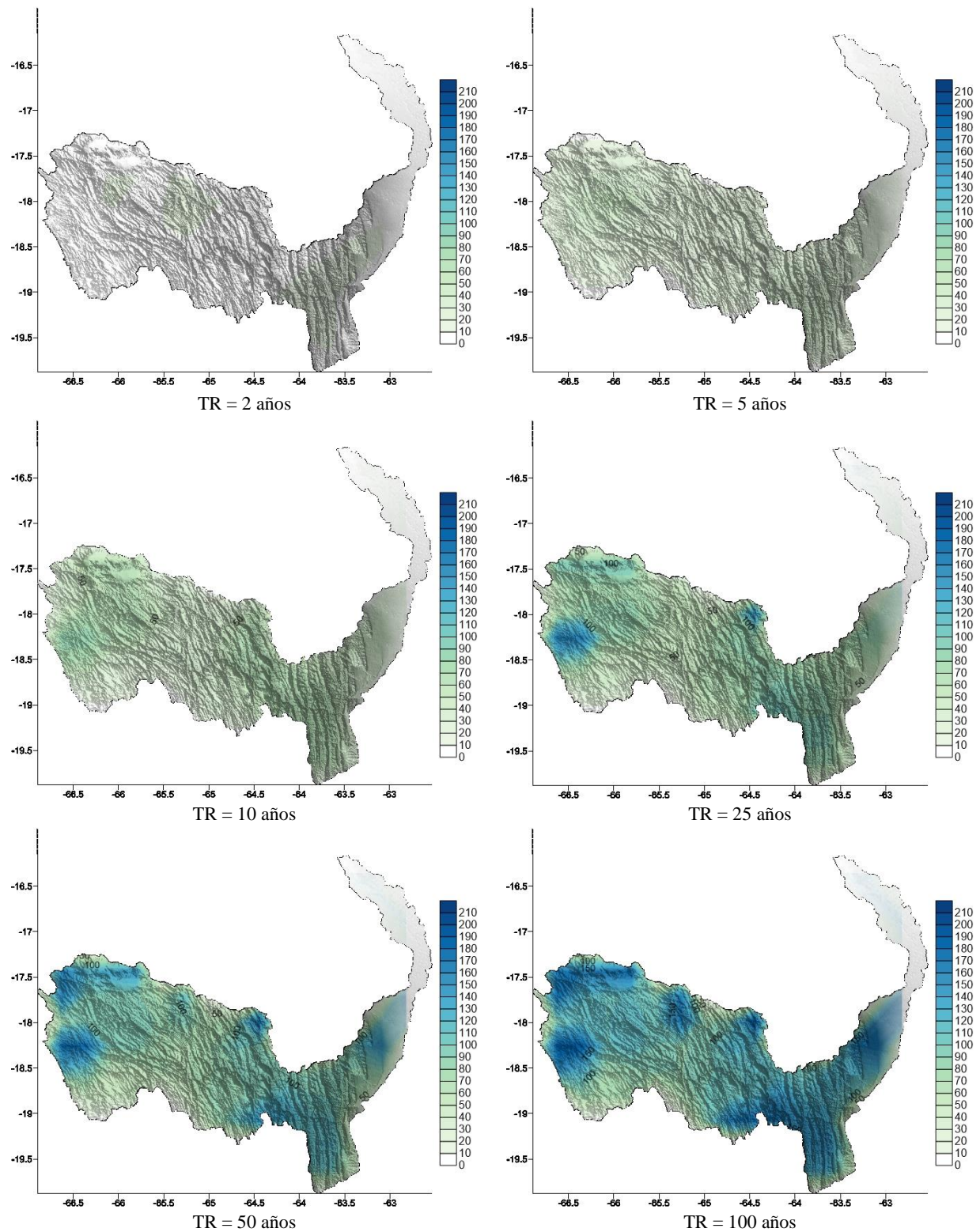


Figura 80. Distribución de amenaza probabilista de lluvias – Duración: 5 días - Cuenca del río Grande. Profundidad de precipitación en [mm]

La Figura 81 y la Figura 82 presentan las distribuciones espaciales de amenaza probabilista de lluvia para 100 años de periodo de retorno para la cuenca del río Rocha y la cuenca del río Grande respectivamente.

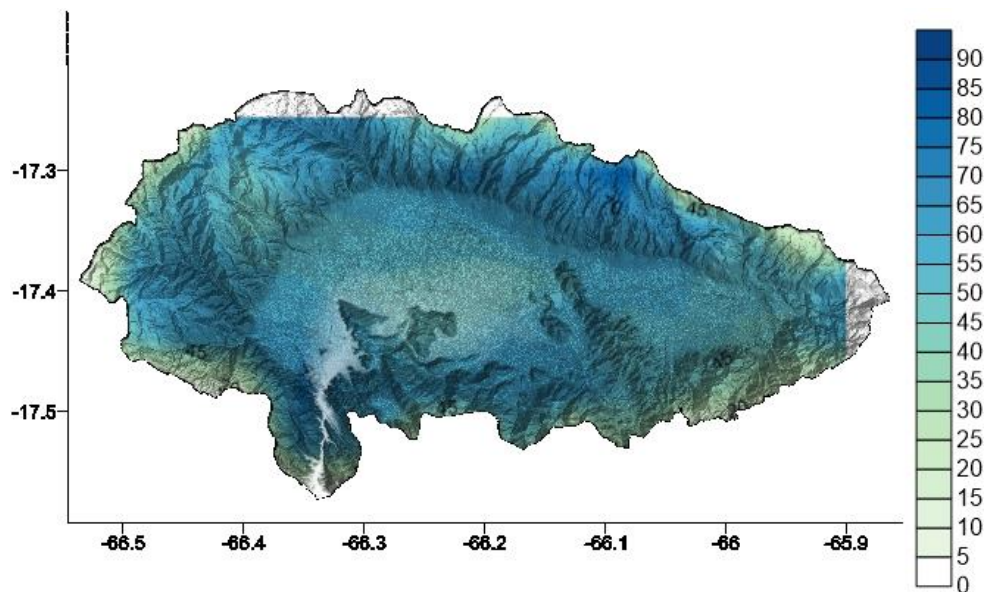


Figura 81. Distribución de amenaza probabilista de lluvias – Duración: 1 día – Periodo de retorno: 100 años – Cuenca del río Rocha. Profundidad de precipitación en [mm]

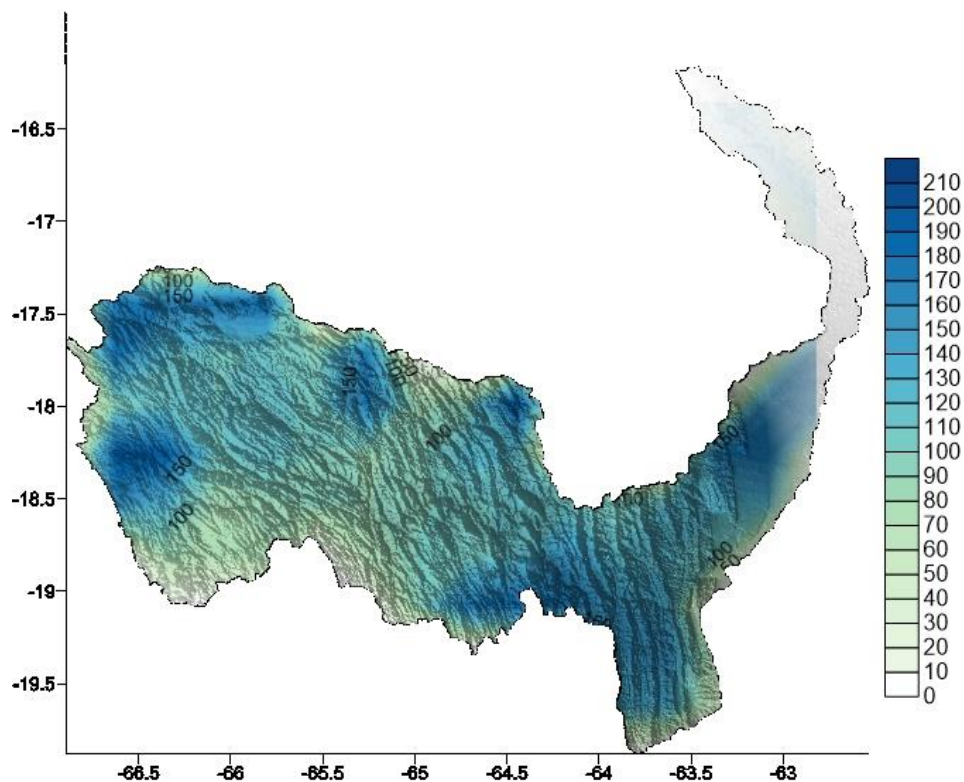


Figura 82. Distribución de amenaza probabilista de lluvias – Duración: 5 días – Periodo de retorno: 100 años – Cuenca del río Grande. Profundidad de precipitación en [mm]

5.3 AMENAZA POR INUNDACIÓN

5.3.1 Información para el análisis de amenaza por inundación

Para el análisis de amenaza por inundación se requiere la información de amenaza de lluvia, la cual está contenida en los archivos “.AME” de lluvia tal como se explicó anteriormente. Simultáneamente se requiere la identificación de los tramos o zonas críticas de inundación con el fin de evaluar las condiciones hidrológicas en las cuencas aferentes a cada uno de estos tramos.

Una vez identificados los tramos críticos y con el fin de realizar el análisis hidrológico en HEC-HMS se hace necesario contar como mínimo con el modelo de elevación digital o información topográfica de la cuenca. Adicionalmente, es importante contar con registros de caudales con fines de calibración. Por otro lado se hace necesario generar un proyecto HEC-RAS para el tramo inundable de análisis. Para esto se requiere la geometría detallada del cauce y secciones transversales, la geometría de estructuras hidráulicas y otras interferencias en el cauce, definir parámetros hidráulicos tales como los coeficientes de rugosidad n de Manning y los coeficientes de contracción y expansión.

Toda la información utilizada para el análisis de amenaza por inundación de las zonas críticas requerida para los análisis se presenta en anexo digital.

5.3.2 Modelación hidrológica

La delimitación de las cuencas de estudio y la división de las mismas en subcuencas se realizó a partir de los DEM correspondientes, los cuales se presentan en la Figura 83 y Figura 84, para la cuenca del río Rocha y del río Grande, respectivamente. Por otra parte, en la Figura 85 se presentan los modelos HEC-HMS de cada una de las cuencas de estudio.

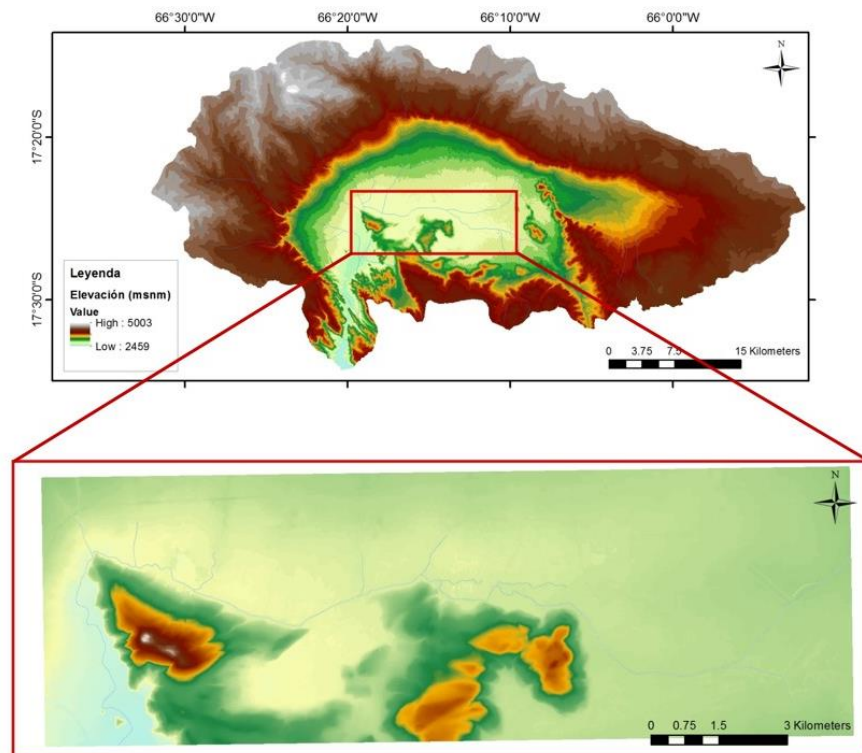


Figura 83. Modelo de elevación digital – Cuenca del río Rocha. Fuente: EarthExplorer USGS(2014) y Satellite Imaging Corporation

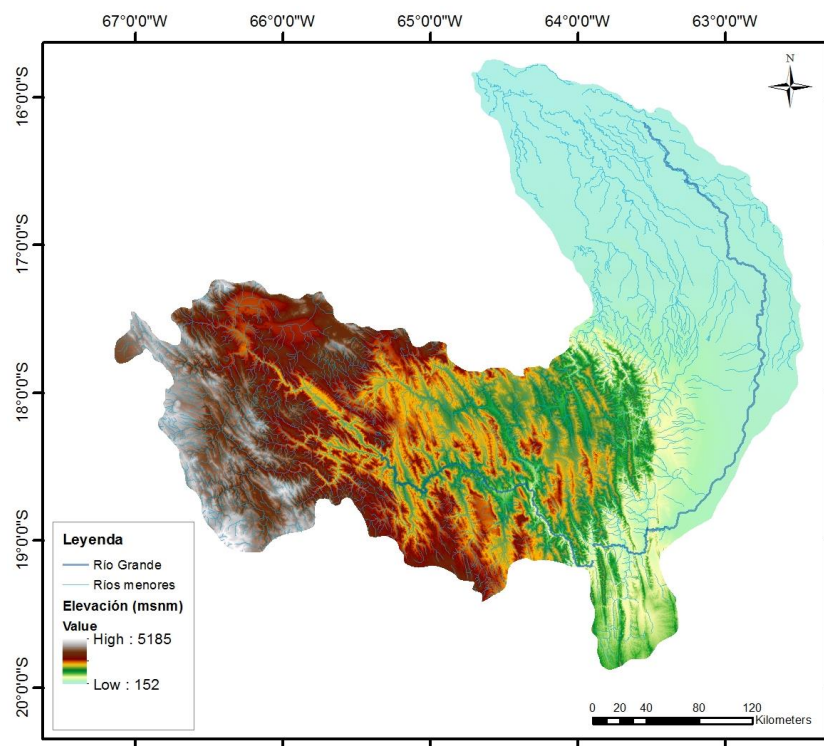
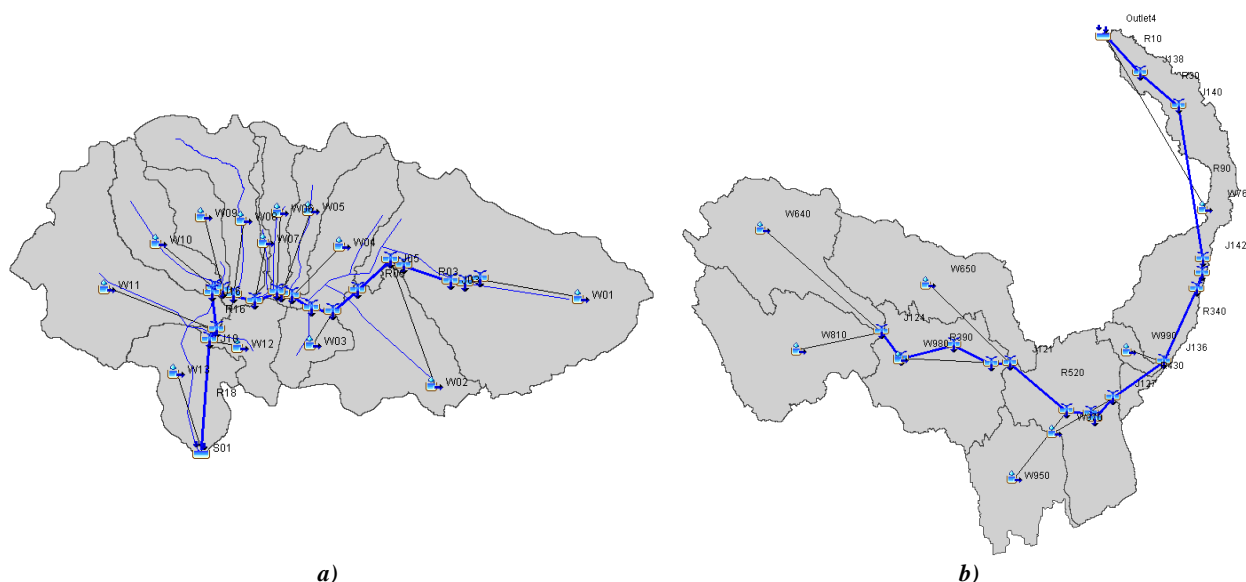


Figura 84. Modelo de elevación digital – Cuenca del río Grande. Fuente: EarthExplorer USGS (2014)

Para la cuenca del río Rocha se requirió la obtención de información topográfica de alta precisión dada la escala del modelo, el cual es considerablemente menor que el del río Grande, por lo cual se requiere mayor detalle. Para este fin se adquirió una imagen Pleiades-1 Stereo Bundled con resolución de 2m x 2m y error vertical menor a 1m generada por la empresa *Satellite Imaging Corporation*, con sede en Texas, EEUU. Por otra parte, en el caso de la cuenca del río Grande se empleó el modelo de elevación digital obtenido por la misión *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de la NASA, disponible en línea en: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Este modelo tiene una resolución de 30m x 30m con un error vertical de aproximadamente 7m.



a) b)
Figura 85. Modelos HEC-HMS de la cuenca de a) río Rocha y b) río Grande

El modelo hidrológico de la cuenca del río Grande emplea los métodos del Número de Curva del SCS, el hidrograma unitario del SCS, y constante mensual para los procesos de pérdidas por infiltración, transformación y flujo base en las subcuencas. Y el método de Muskingum-Cunge para el proceso de tránsito hidráulico en los tramos de río. Por otra parte, el modelo del río Rocha emplea los métodos del Número de Curva del SCS, el hidrograma unitario de Clark para los procesos de pérdidas y transformación y el método de Muskingum-Cunge para simular el tránsito hidráulico a través de los tramos de río. La calibración de los parámetros correspondientes a cada uno de los métodos utilizados se describe en el numeral 5.4.

5.3.3 Modelación hidráulica

El modelo geométrico de los tramos de análisis para cada una de las cuencas se determinó mediante interpretación directa de los modelos de elevación digital disponibles. Para la conformación de los modelos, en ambos casos se siguió una aproximación quasi-bidimensional (quasi-2D), en la cual las planicies de inundación se modelan por medio de un sistema hidrodinámico unidimensional conformado por una red de cauces ficticios vinculados al río principal a través de vertederos laterales (Villazón &

Willems, 2009). Esta aproximación se utiliza con el fin de simular adecuadamente el flujo de agua del cauce hacia la planicie de inundación, dada la gran extensión e irregularidad de las secciones en los modelos estudiados. Adicionalmente, permite la consideración de diferencias de nivel de agua entre el cauce principal y la planicie, y tiene en cuenta el efecto del momentum en estas últimas a diferencia de una aproximación que emplee áreas de almacenamiento en lugar de cauces ficticios.

En la Figura 86 y Figura 87 se presenta de manera esquemática la información disponible para el análisis hidrodinámico que permite establecer las huellas de inundación para cada uno de los escenarios estocásticos de lluvias para la cuenca del río Rocha y del río Grande, respectivamente.

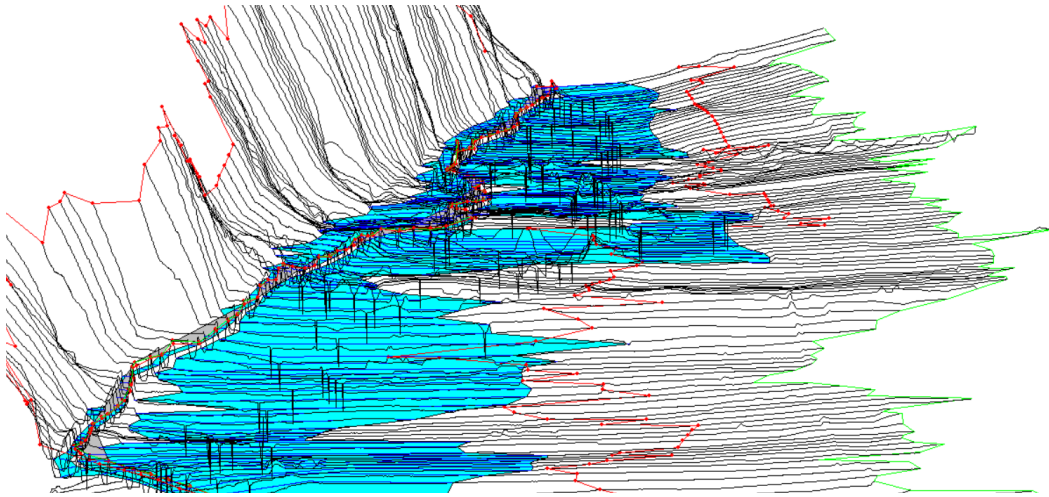


Figura 86. Información ilustrativa disponible para el análisis de inundación en la cuenca del río Rocha

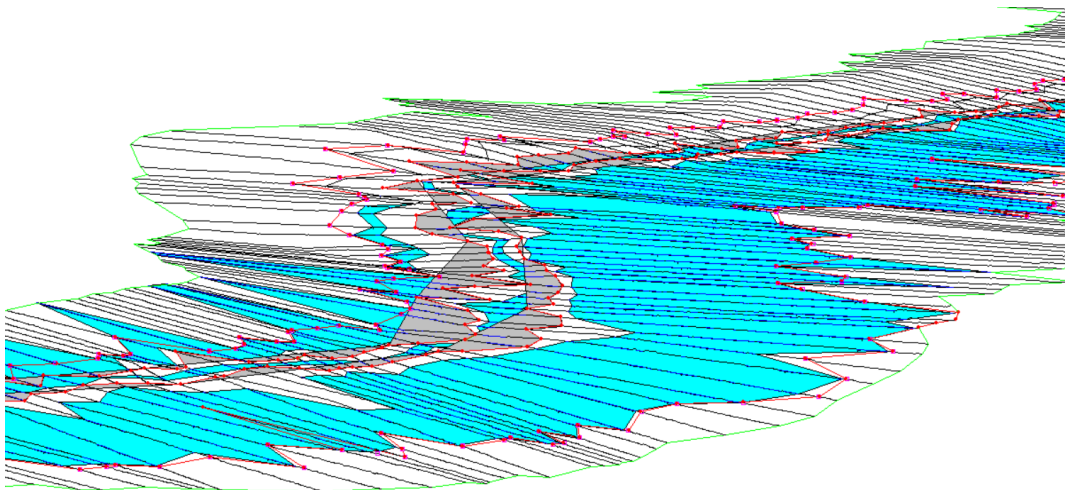


Figura 87. Información ilustrativa disponible para el análisis de inundación en la cuenca del río Grande

5.4 CALIBRACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS

Previo a la implementación y calibración del modelo hidrológico HEC-HMS para ambas cuencas se han realizado actividades de procesamiento de las series de tiempo para las estaciones hidrológicas y meteorológicas que se encuentran ubicadas dentro las cuencas del Río Rocha y Río Grande. Para lo cual, se ha recopilado la información de las estaciones hidrometeorológicas correspondiente a las instituciones del Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología (SENAMHI), y Servicio de Encausamiento de Aguas y Regularización del Río Pirá (SEARPI).

El Sistema de Modelación Hidrológica (HEC-HMS) está diseñado para simular los procesos de precipitación-escorrentía, procesos de tránsito de avenidas tanto controlados como naturales, en sistemas dantropoe cuencas dendríticas. Está diseñado para ser aplicable en un amplio rango de áreas geográficas para así poder resolver la mayor cantidad de problemas posibles, relacionados al suministro de agua o problemas de inundación de grandes cuencas, o aspectos relativos al drenaje y escurrimientos de pequeñas áreas urbanas o microcuencas.

Para simular la respuesta hidrológica de una cuenca, el HEC-HMS utiliza los siguientes componentes: modelo de la cuenca, modelo meteorológico, especificaciones de control y datos de entrada.

Una simulación calcula la transformación de lluvia a caudal en el modelo de la cuenca, dada la entrada del modelo meteorológico.

La implementación y calibración del modelo hidrológico para la cuenca del río Rocha está basada en el tesis de grado de Bautista y La Fuente, (2014).

5.4.1 Implementación y calibración del modelo hidrológico HEC-HMS con datos de precipitación (SISMET - SENAMHI) en la cuenca del río Rocha

La implementación y calibración del modelo lluvia escurrimiento para la cuenca del río Rocha tiene el gran problema de la falta de datos hidrométricos, no se registraron caudales de crecida. Por lo tanto esta calibración se basa en la asunción de escenarios de lluvia donde se generan lluvias sintéticas en diferentes áreas de la cuenca.

5.4.1.1 Escenarios para la modelación hidrológica

Según el SCS, la cuenca del río Rocha es clasificada como una cuenca grande, debido a que presenta un área de 1,616 km² aproximadamente, por lo que la probabilidad de que ocurra una lluvia general en toda la cuenca es baja. Es así que se tiene la necesidad de plantear escenarios hidrológicos que permitan simular el comportamiento de las lluvias en la cuenca del río Rocha.

Se realizó un análisis del comportamiento de las estaciones pluviométricas durante eventos extraordinarios de crecidas ocurridas en el área de estudio. Este método fue utilizado en el estudio Dragado del río Rocha,

elaborado por el LHUMSS- Montenegro (2004). Se observó una tendencia general entre las estaciones dando como resultado la identificación de zonas que presentan un comportamiento similar.

Estas zonas presentan las siguientes características:

Zona I, Comprende las subcuencas de la Cordillera del Tunari

Zona II, Abarca la subcuenca de Sacaba que es dividida naturalmente por un estrechamiento presente en la Zona de la Muyurina.

Zona III, Comprende las subcuencas localizadas al sud del río Rocha más descarga de la presa La Angostura

Zona IV, Corresponde a la subcuenca Seca, localizada antes del puente del Ferrocarril de Parotani.

La Figura 88 muestra la delimitación de las zonas en la cuenca del río Rocha.

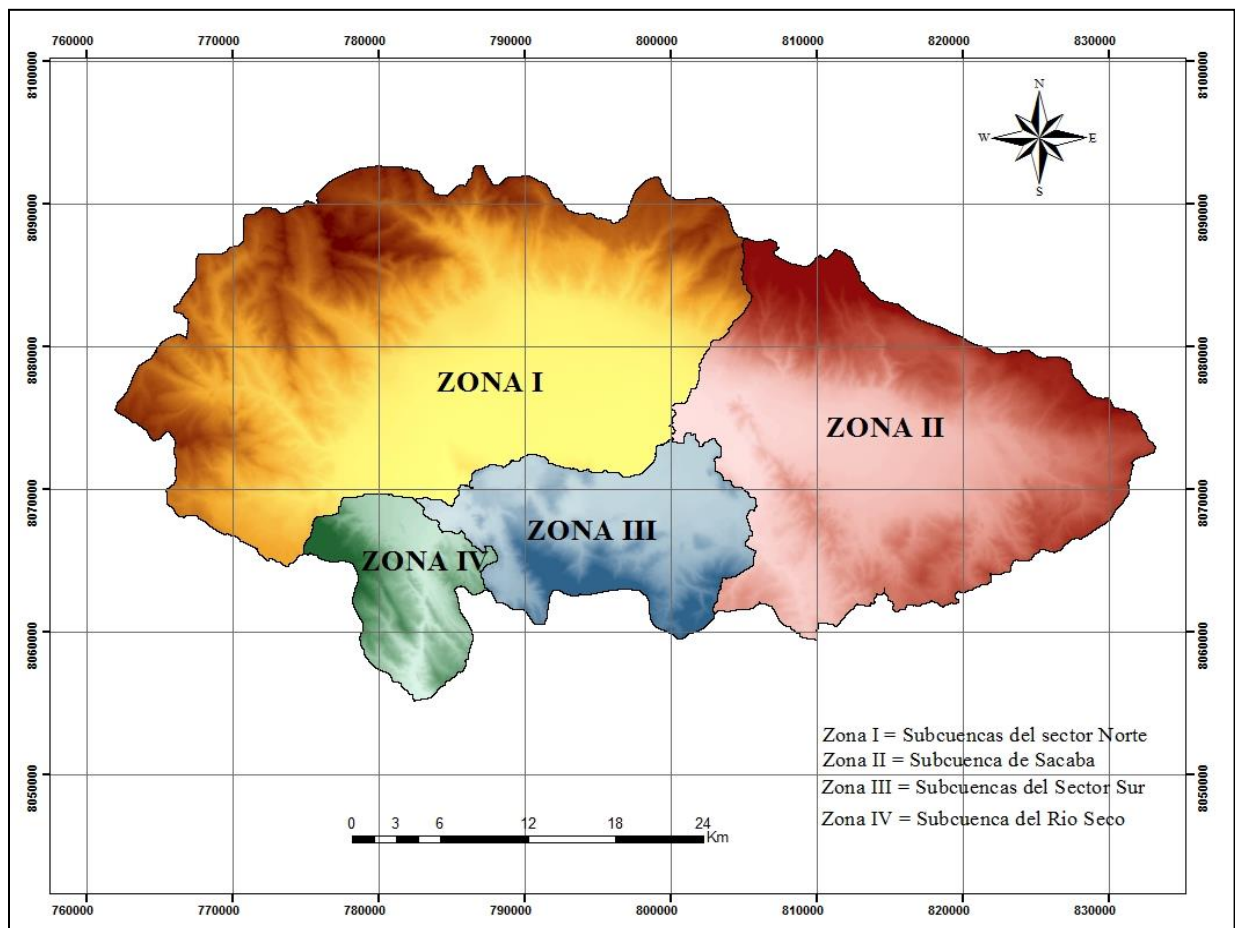


Figura 88. Zonas hidrológicamente homogéneas cuenca del río Rocha

5.4.1.2 Análisis de escenarios

Se adoptaron 5 escenarios diferentes (A, B, C, D y E), los cuales se basan en el análisis de los registros de lluvia de los pluviómetros del área de estudio durante la ocurrencia de un evento extremo máximo. En la siguiente tabla se encuentra la fecha de evento asignada a cada escenario, las estaciones que registraron lluvias durante el evento, la precipitación registrada durante 24 horas así como su nivel de precipitación y finalmente la zona de contribución a la que pertenece:

Tabla 25. Escenarios de registro de lluvia

ESCENARIO	Fecha del evento	Estaciones	Precipitación en 24 hrs (mm)	Nivel de precipitación	Zona de contribución a la que pertenece
A	16-dic-79	Assana	30,4	Alta	III
		Janko Kala	35,0	Alta	I
		La Violeta	11,0	Media	I
		Pairumani	33,3	Alta	I
		Parotani	4,2	Baja	IV
		La Tamborada	29,7	Alta	III
		Sacaba	29,0	Alta	II
		Morochata	12,3	Media	I
		Ramada	51,5	Alta	IV
		Chimboco	29,0	Alta	II
B	23-dic-84	Assana	27,1	Alta	III
		Janko Kala	19,0	Alta	I
		La Violeta	0,6	Baja	I
		Pairumani	53,3	Alta	I
		Parotani	16,2	Alta	IV
		La Tamborada	24,0	Alta	III
		Sarco	11,0	Media	I
C	04-ene-86	Assana	31,5	Alta	I
		Janko Kala	3,0	Baja	I
		La Violeta	22,0	Alta	I
		Pairumani	40,0	Alta	I
		Parotani	15,3	Media	IV
		Titiri	52,3	Alta	I
		Vinto	43,0	Alta	I
		Sarco	38,0	Alta	I

D	21-ene-75	Assana	35,3	Alta	III
		Janko Kala	26,0	Alta	I
		Pairumani	35,0	Alta	I
		Santivañez	13,0	Media	IV - III
		Sacaba	28,5	Alta	II
		Titiri	51,3	Alta	I
		Ramada	51,5	Alta	IV
		Vinto	40,0	Alta	III
E	09-mar-01	Assana	6,5	Baja	III
		La Violeta	10,5	Media	I
		Parotani	12,0	Media	IV
		La Tamborada	5,9	Media	III
		Santivañez	14,5	Alta	III - IV
		Sarco	10,3	Media	III

5.4.1.3 Adopción de escenarios sintéticos

La situación más desfavorable se podría dar con el aporte de las zonas I, III y IV debido a que son las zonas con mayor aporte de caudal, por lo cual el escenario “B” es considerada como la situación más desfavorable, debido a que históricamente cuando las zonas I y II aportan un caudal significativo, las compuertas de la presa Angostura son manejadas de manera tal que la zona III no contribuye con un caudal importante.

Tabla 26. Escenarios adoptados

Escenario	Zonas de aporte			
	I	II	III	IV
A	X	X	X	
B	X		X	X
C	X			X
D	X	X		
E		X	X	X

Utilizando esta zonificación se generaron los 5 escenarios siguientes:

- Escenario A, Llueve en la Zona I, Zona II y en la Zona III simultáneamente y con tormentas generadas correspondientes periodo de retorno de 50 años, mientras que a la Zona IV se le asignó un periodo de retorno de 2 años.
- Escenario B, Llueve en la Zona I, Zona III y en la Zona IV simultáneamente y con tormentas generadas correspondientes periodo de retorno de 50 años, mientras que a la Zona II se le asignó un periodo de retorno de 2 años.

- 111

El número de curva (CN) es un parámetro desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) a partir de un método empírico para el cálculo de la transformación de lluvia-escorrentía, el cual se basa en la estimación directa de la escorrentía superficial de una lluvia aislada. Para esto toma en cuenta las características de cobertura de suelo y uso de suelo. Adicionalmente, estima la precipitación excedente como una función de precipitación acumulativa.

El SCS desarrolló una relación empírica para determinar **la pérdida inicial (I_a)** y **la retención potencial máxima (S)** usando las siguientes ecuaciones:

$$I_a = 0.2S \quad \text{Ecuación 6}$$

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{Ecuación 7}$$

Dónde:

P_e = Profundidad del exceso de precipitación o escorrentía directa.

P = Precipitación Total, $P_e < P$

I_a = Abstracción inicial o cantidad de precipitación inicial para la cual no existe escorrentía.

S = Es la retención potencial máxima, que se evalúa de la siguiente manera:

$$S = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1000 - 10CN}{CN} (\text{foot - poundsystem}) \\ \frac{25400 - 254CN}{CN} (\text{sistema internacional}) \end{array} \right\} \quad \text{Ecuación 8}$$

CN = Es el Numero de Curva evaluado desde 100 para cuerpos macizos e impermeables hasta 30 para suelos bastante permeables y con gran infiltración.

Los valores del CN se pueden encontrar en tablas publicadas por el SCS en el reporte técnico 55 (comúnmente llamado TR55). Para cuencas consistentes de un gran número de tipos y usos de suelo se puede estimar un CN compuesto:

$$CN_{composite} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i} \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

A_i = Área de drenaje de la subdivisión i.

CN_i = CN para la subdivisión i.

➤ Método de conversión de lluvia en escorrentía

Hidrograma Unitario (HU) de Clark

El método de Clark se basa en la distribución de la superficie de la cuenca entre curvas isócronas, las cuales son curvas que unen puntos de la cuenca con mismo tiempo de viaje. Este método establece que el hidrograma total es la suma de los hidrogramas aportados por las subcuencas. Adicionalmente dicho método considera el retardo causado por el tránsito a través de la cuenca.

Los parámetros que intervienen en la definición del método de Clark son el tiempo de concentración (T_c) y el coeficiente de almacenamiento (R), cuyos valores deben ser definidos por el usuario o por medio de la calibración. El coeficiente de almacenamiento, expresado en unidades de tiempo, es un índice del almacenamiento temporal de la precipitación excedente en el interior de la cuenca que drena hacia el punto de salida de la misma. Clark (1945) indicó que (R) puede ser calculada como el flujo en el punto de inflexión en la extremidad de caída del hidrograma dividido por la derivada del tiempo de flujo.

➤ Pendiente de los ríos

El cálculo de la pendiente media del río se realizó utilizando el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGIS10.0.

A partir de las curvas de nivel digitalizadas de la cuenca se genera un Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Este último, junto con el trazado del río previamente digitalizado, permite generar el perfil del río.

Siguiendo esta metodología se obtuvo la pendiente media para los diferentes tramos y afluentes del Río Rocha. Este cálculo se realizó utilizando la siguiente expresión:

$$S = \frac{\sum_{i=0}^n S_i \cdot L_i}{L} \quad \text{Ecuación 10}$$

Dónde:

- S: Pendiente media del río (m/m).
- L: longitud total del río (m/m).
- S_i : Pendiente del tramo i (m/m).
- L_i : Longitud del tramo i (m/m).

➤ Tiempo de Concentración

Se entiende por tiempo de concentración (T_c) de una cuenca el tiempo que le toma a una gota de agua hacer el recorrido desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de control o de salida.

Existe en la literatura muchos métodos para estimar este tiempo de concentración, uno de los más utilizados es la ecuación de Kirpich:

$$T_c = 0.9545 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \quad \text{Ecuación 11}$$

Dónde:

Tc: Tiempo de concentración (horas).

L: Progresiva (km).

H: Diferencia de cotas (m).

➤ **Tránsito de hidrogramas Muskingum – Cunge.**

El modelo de enrutamiento Muskingum Cunge, utiliza una simple aproximación por diferencias finitas de la ecuación de continuidad:

$$\left(\frac{I_{t-1}+I_t}{2}\right) - \left(\frac{O_{t-1}+O_t}{2}\right) = \left(\frac{S_t-S_{t-1}}{\Delta t}\right) \quad \text{Ecuación 12}$$

El almacenamiento en el cauce se modela como la suma de almacenamiento de prisma y de almacenamiento de cuña.

Como se muestra en la siguiente figura, el almacenamiento prisma es el volumen definido por un perfil de la superficie del agua en flujo permanente, mientras que el almacenamiento de cuña es el volumen adicional bajo el perfil de la onda de flujo. Durante el aumento de etapas de la inundación, el almacenamiento de cuña en un positivo se añade a la de almacenamiento de prisma. Durante las etapas de la caída de una inundación, el almacenamiento de cuña es negativo y se resta de la de almacenamiento de prisma.

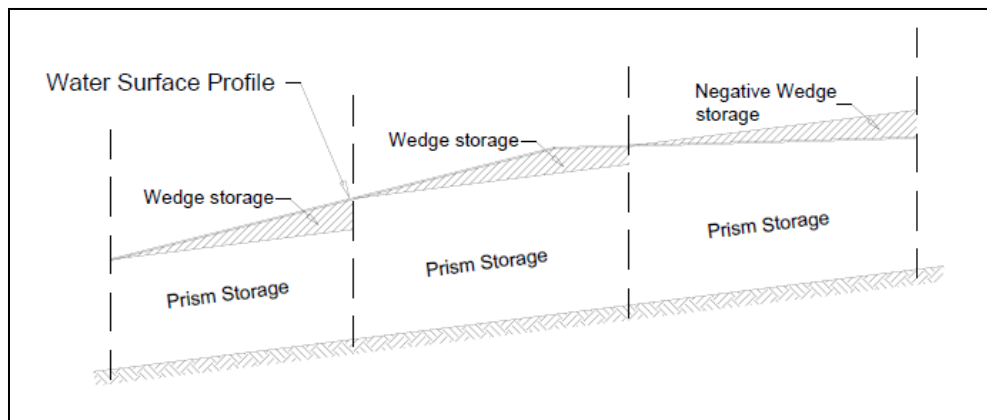


Figura 90. Gráfica de almacenamiento de cuña.
Fuente: HEC HMS Technical Reference Manual, 2000

El volumen de almacenamiento de prisma es la tasa de flujo de salida (O), multiplicado por el tiempo de viaje a través del tramo (K). El volumen de almacenamiento de cuña es una diferencia ponderada entre entrada y salida, multiplicada por el tiempo de viaje (K). Por lo tanto, el modelo Muskingum define el almacenamiento como:

$$S_t = KO_t + KX(I_t - O_t) = K[XI_t + (1 - X)O_t] \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:

S = almacenamiento en el tramo considerado de un cauce.

I = caudal de entrada en ese tramo.

O = caudal de salida de ese tramo.

K, X = constantes para ese tramo de cauce.

La cantidad $X I_t + (1-X)O_t$ es una descarga ponderada. Si el almacenamiento en el canal se controla por las condiciones aguas abajo, de tal manera que el almacenamiento y el flujo de salida están altamente correlacionados, entonces $x = 0$. Si $x = 0.5$ entonces se iguala la entrada y la salida, y el resultado es una onda uniformemente progresiva que no se atenúa a medida que avanza a través del tramo de río.

Si se reemplaza la Ecuación 12 en la 13 y el resultado se reordena para aislar los valores desconocidos en el tiempo t el resultado es:

$$O_t = \left(\frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \right) I_t + \left(\frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \right) I_{t-1} + \left(\frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t} \right) O_{t-1} \quad \text{Ecuación 14}$$

Las pérdidas iniciales fueron estimadas aplicando el método de SCS el cual tiene como dato de ingreso el Número de Curva (CN).

El método de transformación de lluvia en escurrimiento aplicado es el Hidrograma Unitario de Clark, cuyas variables de ingreso son el tiempo de concentración de cada subcuenca considerada.

En la siguiente tabla se muestran los valores introducidos al software HEC –HMS.

Tabla 27. Datos de entrada HEC HMS subcuencas de la cuenca del río Rocha

Subcuenca	Nombre	Área (km2)	CN	Tc(horas)
W1	Sacaba	450,9	78,2	10,4
W2	Tamborada	165,3	76,5	6,0
W3	Laguna Pampa	49,4	80,1	3,0
W4	Canal Rocha	107,1	74,6	5,1
W5	Pampa Mayu	76,5	73,7	8,1
W6	Chijllawiri	54,3	72,1	4,6
W7	Wayculi	15,3	76,0	4,0
W8	Tacata	125,3	76,1	4,1
W9	Chulla	59,2	71,6	4,8
W10	Khora	90,6	71,3	5,5
W11	Viloma	249,7	79,1	8,4
W12	Khullkumayu	36,8	78,2	3,2
W13	Seco	105,6	74,5	8,1

Subcuenca	Nombre	Área (km ²)	CN	Tc(horas)
W14	s/a	21,6		

Al considerarse toda la cuenca del río Rocha como un sistema, es preciso realizar el tránsito de los hidrogramas a través del río principal. Para este acometido se aplicó el método de Muskingum Cunge, el cual requiere parámetros físicos del río para su cálculo. En la siguiente tabla se muestra los valores utilizados para cada tramo del río.

Tabla 28. Parámetros de Muskingum Cunge

Nº	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Manning	Tipo de sección	Ancho base (m)	Pendiente talud (Xh : 1V)
1	11775,31	0,002	0,03	Trapezoidal	20	1,5
2	3705,44	0,0093	0,03	Trapezoidal	20	1,5
3	5887,12	0,0065	0,027	Trapezoidal	20	1,3
4	1554,85	0,0084	0,027	Trapezoidal	40	1,3
5	5343,98	0,0069	0,03	Trapezoidal	40	1,5
6	4055,25	0,0015	0,03	Trapezoidal	50	1,5
7	2315,47	0,0009	0,025	Trapezoidal	35	1,2
8	3577,3	0,0006	0,025	Trapezoidal	40	1,2
9	1736,16	0,0007	0,04	Trapezoidal	27	1,5
10	480,53	0,0004	0,04	Trapezoidal	27	1,5
11	1428,31	0,0004	0,03	Trapezoidal	30	1,5
12	3903,82	0,0008	0,03	Trapezoidal	30	1,5
13	1619,95	0,0012	0,03	Trapezoidal	30	1,2
14	1089,87	0,0009	0,09	Trapezoidal	30	1,5
15	1082,44	0,0055	0,09	Trapezoidal	30	1,5
16	4762,76	0,0029	0,03	Trapezoidal	30	1,5
17	148,86	0,0003	0,03	Trapezoidal	80	1,5
18	15476,93	0,001	0,03	Trapezoidal	40	1,5

En el modelo meteorológico se introdujo la ponderación de los polígonos de Thiessen para cada subcuenca conforme fueron afectadas por las estaciones pluviométricas, de acuerdo a la Figura 91.

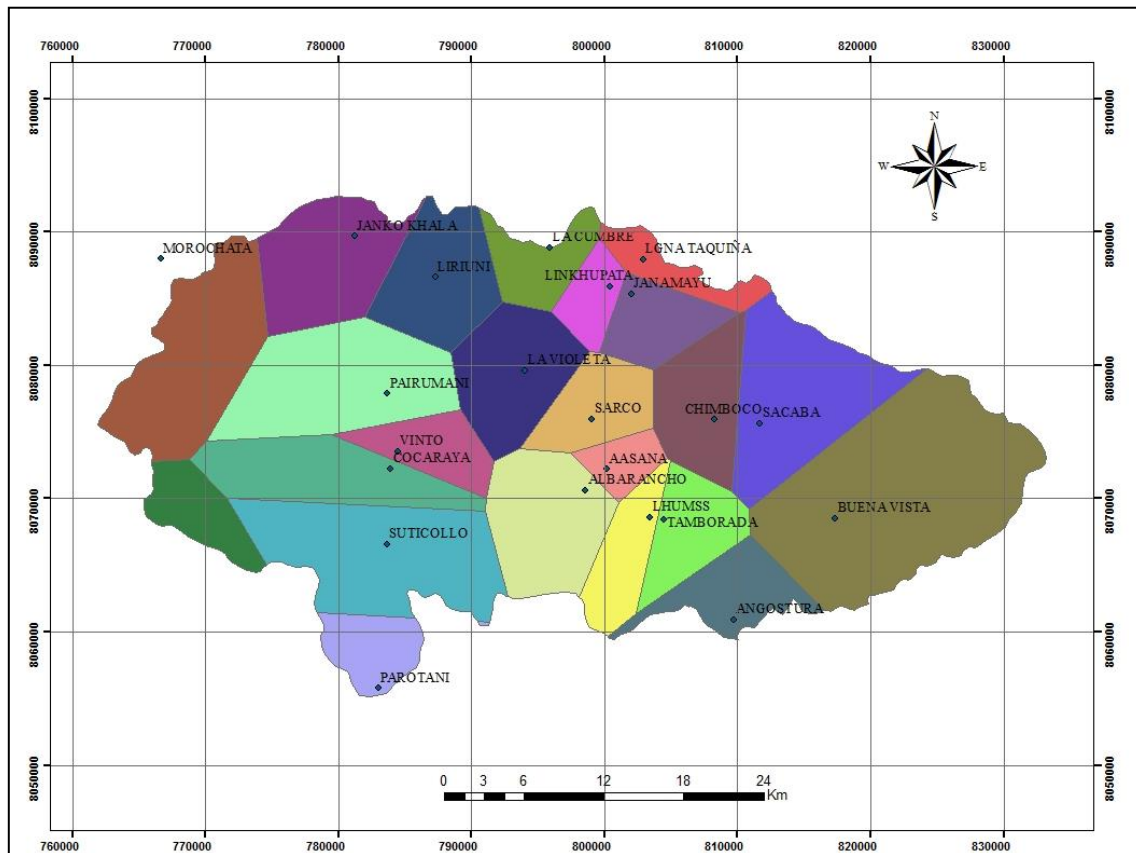


Figura 91. Polígonos de Thiessen cuenca del río Rocha

Posteriormente se introdujeron las diferentes precipitaciones consideradas en el área de estudio con la opción *Precipitación Gages*.

Una vez finalizados todos los pasos anteriores, se procede a realizar la simulación de la cuenca del río Rocha especificando la duración de la simulación con la herramienta *Control de Specifications*, que es el elemento donde se incluyen las fechas, horas de inicio y fin de la simulación e intervalo de tiempo para el cálculo del hidrograma de escurrimiento, como se puede ver en Figura 92.

Figura 92. Control de Specifications, HEC HMS

Finalmente se realiza la ejecución de la simulación y se obtienen los hidrogramas de salida de cada subcuenca y a lo largo del río principal en las uniones que han sido definidas. A continuación se presentan los caudales de salida de la simulación y el hidrograma resultante a la salida de la cuenca para cada escenario.

Tabla 29. Resumen caudales de salida Tr= 50 años

N°	Río	Tramo	Caudales (m³/s)			
			Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D
1	Canal Valverde	Valverde	11.65	25.65	25.65	25.6
2	Río Chijllahuiri	Chijllahuiri	7.58	13.82	13.82	13.8
3	Río chulla	Chulla	21.96	41.21	41.21	41.2
4	Río Kora	Kora	16.97	31.4	31.4	31.4
5	Río Pampamayu	Pampamayu	6.59	11.74	11.74	11.7
6	Río Tamborada	Tamborada	19.72	41.21	35.24	35.2
7	Río Wayculi	Wayculi	4.06	7.47	7.47	7.5
8	Río Tacata	Tacata	39.21	102.33	102.33	102.3
9	Río rocha	Tramo sacaba	55.95	36.6	20.98	58.7
10	Río rocha	Tramo 2	75.67	71.84	56.22	93.9
11	Río rocha	Tramo 3	87.32	97.49	81.87	119.5
12	Río rocha	Tramo 4	93.91	109.23	93.61	131.2
13	Río rocha	Tramo 5	101.49	123.05	107.43	145
14	Río rocha	Tramo 6	105.55	130.52	114.49	152.5
15	Río rocha	Tramo 7	144.76	232.85	217.23	254.8
16	Río rocha	Tramo 8	166.72	274.06	258.44	296
17	Río rocha	Tramo 9	384.4	305.46	289.84	327.4

En la siguiente figura se encuentra, a modo de ejemplo, el hidrograma para el Escenario A.

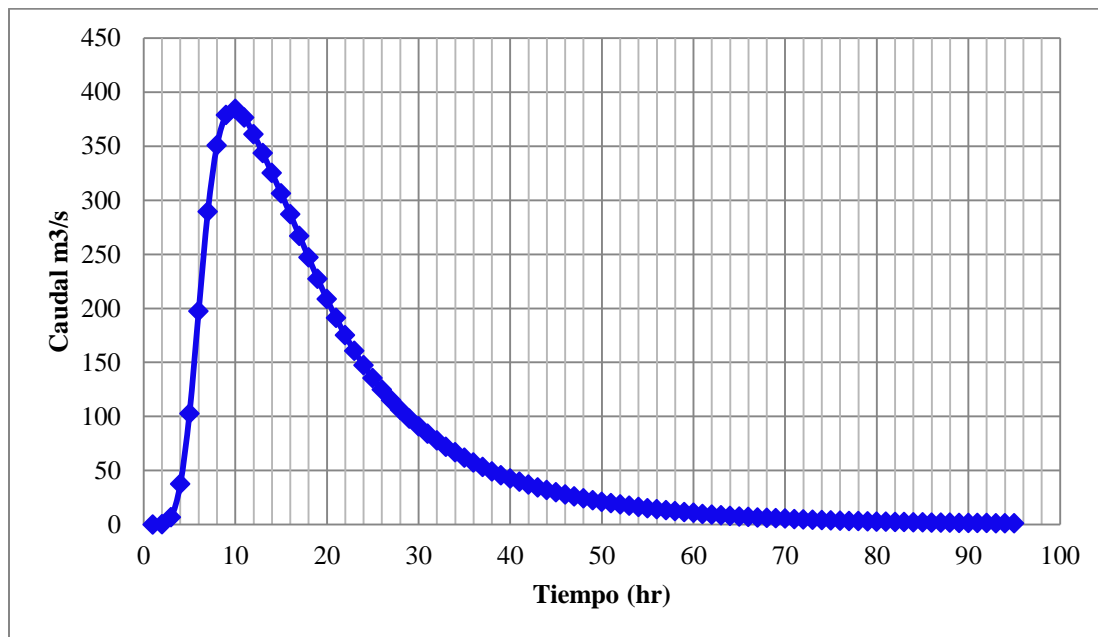


Figura 93. Hidrograma de salida de la cuenca del río Rocha Tr=50 años, Escenario A

5.4.1.6 Análisis de resultados

La cuenca del río Rocha se constituye en una de las cuencas más estudiadas en el departamento de Cochabamba, en este entendido se tuvo la oportunidad de recopilar resultados puntuales de algunos estudios.

Se tomó como estudio comparativo el Dragado del río rocha (L.H.U.M.S.S, 2004), el cuál es un proyecto desarrollado para la gobernación de Cochabamba, ya que presenta parámetros muy similares a los utilizados en la presente modelación (número de estaciones utilizadas, área de la cuenca, duración de la tormenta).

Como se puede observar en la Tabla 30, los caudales a la salida de la cuenca del estudio previo (2004) y de la modelación actual (2015) para el Escenario A, son similares; 498.1 m³/s y 384.4 m³/s respectivamente.

Adicionalmente se obtuvieron los datos de un aforo realizado el 25 de enero del año 2014 en el tramo canalizado Puente Muyurina- Puente Cajón, cuyo resultado es caudal de 75.2 m³/s. En la modelación actual se obtuvo un caudal muy similar de 75.6 m³/s para el mismo tramo.

Tabla 30. Análisis comparativo de resultados con estudios previos

Parámetros de Comparación	PERIODO DE RETORNO 50 AÑOS	
	Dragado río Rocha - LHUMSS 2004	Modelación actual 2015 (Escenario A)
Caudal a la salida de la Cuenca (m ³ /s)	498.1	384.4
Nro. de estaciones utilizadas	25	23
Área de la Cuenca (km2)	1,616	1,616.63
Duración de la tormenta (horas)	4	4

De acuerdo a un estudio elaborado por el Laboratorio de Hidráulica, ese valor corresponde a un periodo de retorno de 10 años, y en relación al elaborado por el Servicio Departamental de Cuencas se tiene una capacidad hidráulica máxima asumida de 300 m³/s para la cuenca de Sacaba.

5.4.2 Implementación y calibración del modelo hidrológico HEC-HMS con datos de precipitación (SISMET - SENAMHI) en la cuenca del río Grande

A diferencia de la cuenca del río Rocha, el río Grande cuenta con estaciones hidrométricas que permiten realizar una modelación continua a nivel diario. Para la calibración se utilizaron datos registrados en las estaciones Abapó y Pailas. La estación hidrométrica de Abapó se encuentra ubicada en el puente Abapó, que se ubica en el punto de transición entre el Sub-andino y la Llanura Chaco-Beniana, en donde se da un cambio significativo en la pendiente del curso del río.

El periodo de Calibración del modelo de la cuenca del Rio Grande para la estación Abapó es del 01-sep-2002 al 31-dic-2012 y para la estación Pailas es del 01-oct-2009 al 31-dic-2012.

Para la configuración del modelo Precipitación – Caudal con el programa HEC-HMS, se ha dividido la cuenca en 8 subcuencas, cuyo esquema se muestra en la Figura 94, esta figura además muestra la distribución de las Estaciones Meteorológicas tomadas en cuenta en el modelo. Las áreas para cada Subcuenca y sus respectivas nominaciones para el modelo se muestran en la Tabla 31.

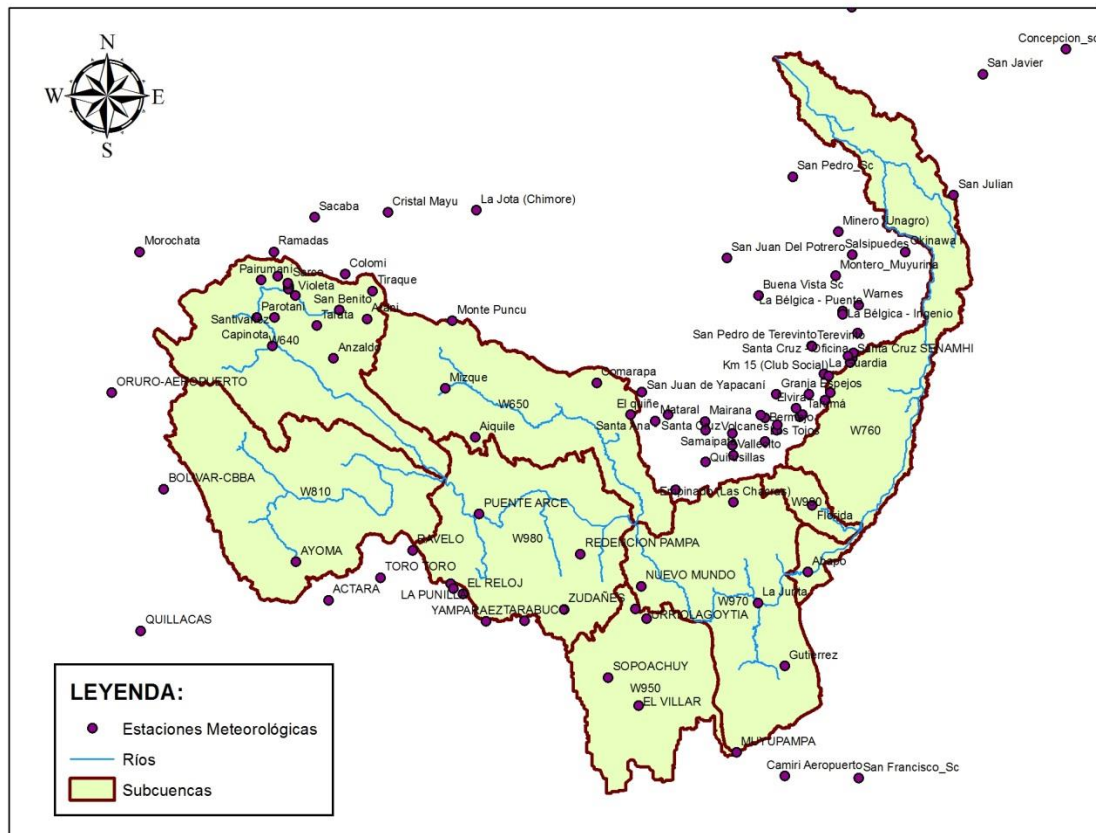


Figura 94. Subcuencas de la Cuenca del Río Grande y Estaciones Meteorológicas cercanas, usados en el modelo
Tabla 31. Áreas de las Subcuencas de la Cuenca del Río Grande, usadas en el modelo

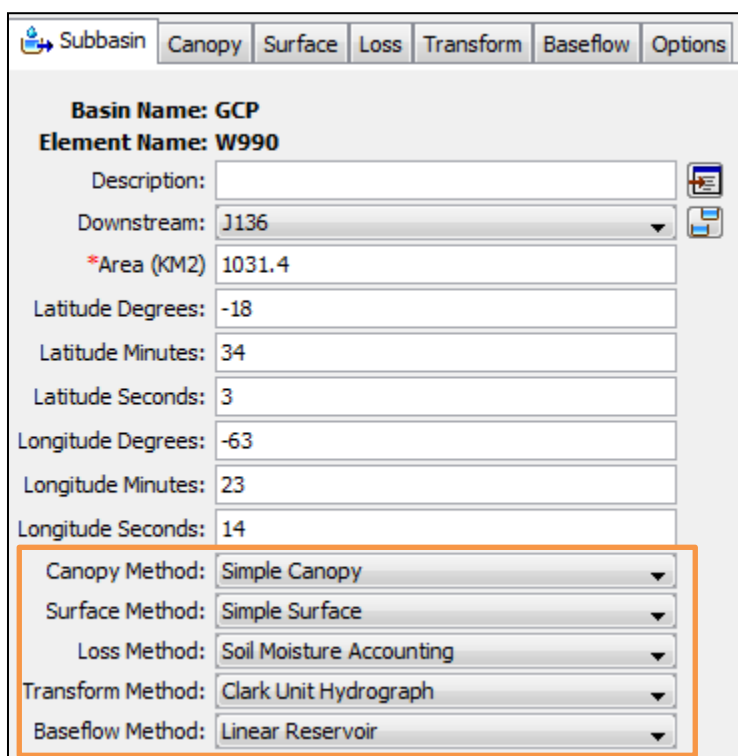
Nº	Subcuenca	Area (Km2)
1	W640	10,223.11
2	W650	9,805.29
3	W760	11,850.68
4	W810	11,263.07
5	W970	10,124.06
6	W980	10,019.00
7	W990	1,031.42
8	W950	6,564.72

La Tabla 32 y la Figura 95 muestran los métodos usados en la modelación de la Cuenca del Río Grande.

Tabla 32. Métodos usados en el software HEC – HMS, para la modelación del Río Grande

Tipo de Cálculo	Método
Canopy	Simple Canopy
Surface	Simple Surface
Loss	Soil Moisture Accounting
Transform	Clark Unit Hydrograph

Tipo de Cálculo	Método
Baseflow	Linear Reservoir
Precipitation	Inverse Distance
Evapotranspiration	Monthly Average



Subbasin Canopy Surface Loss Transform Baseflow Options

Basin Name: GCP
Element Name: W990

Description:

Downstream: J136

*Area (KM2) 1031.4

Latitude Degrees: -18
Latitude Minutes: 34
Latitude Seconds: 3

Longitude Degrees: -63
Longitude Minutes: 23
Longitude Seconds: 14

Canopy Method: Simple Canopy
Surface Method: Simple Surface
Loss Method: Soil Moisture Accounting
Transform Method: Clark Unit Hydrograph
Baseflow Method: Linear Reservoir

Figura 95. Métodos usados Subcuenca W990, para la modelación del Rio Grande con el software HEC - HMS

Para el componente de flujo base se utilizó el **reservorio lineal** que es el indicado cuando se corre el HEC - HMS con **Inventario de Humedad de Suelo**; para ello se realizó un filtrado a las series de caudal observados para Abapó y Pailas con la herramienta del WETSPRO (Water Engineering Time Series PROCesing tool) (Willems, 2009) **Subflow Filtering**, obteniendo los parámetros de recesión que son empleados como parámetros iniciales en el modelo. Estos parámetros son ajustados debido a la configuración de reservorios en línea y paralelo. Para un coeficiente de recesión encontrado por el filtrado de series igual a 60 días se inserta un parámetro en el HEC-HMS igual a 1,440 horas. La Figura 96 muestra los resultados de los caudales filtrados.

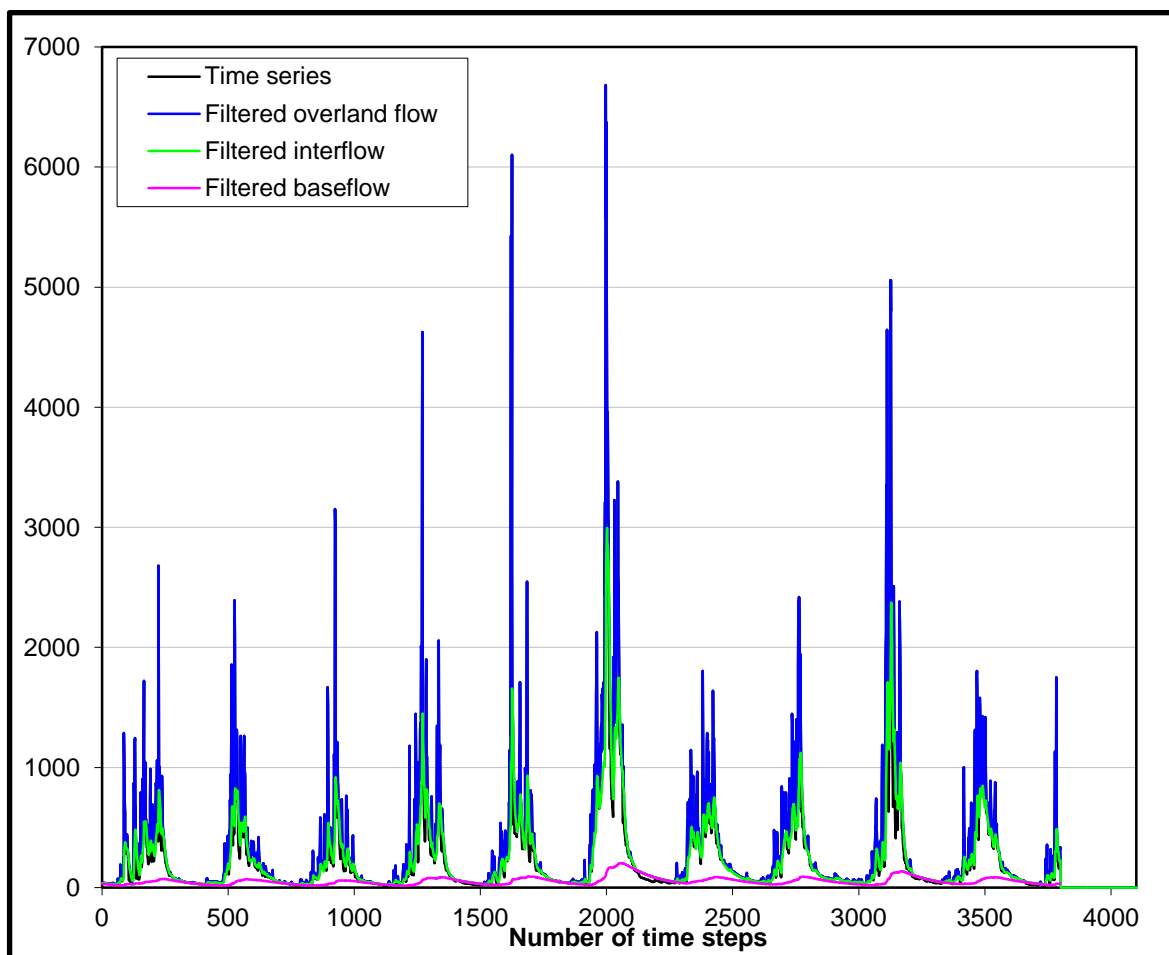


Figura 96. Caudales de Abapó filtrados con la Herramienta Subflow Filtering del WETSPRO

También se utilizó el WETSPRO para realizar la selección de eventos independientes con su herramienta **POT Selection**. De este modo se obtienen únicamente los caudales picos de cada día, los cuales se utilizarán en la calibración.

La Figura 97 muestra los resultados de la selección de eventos independientes.

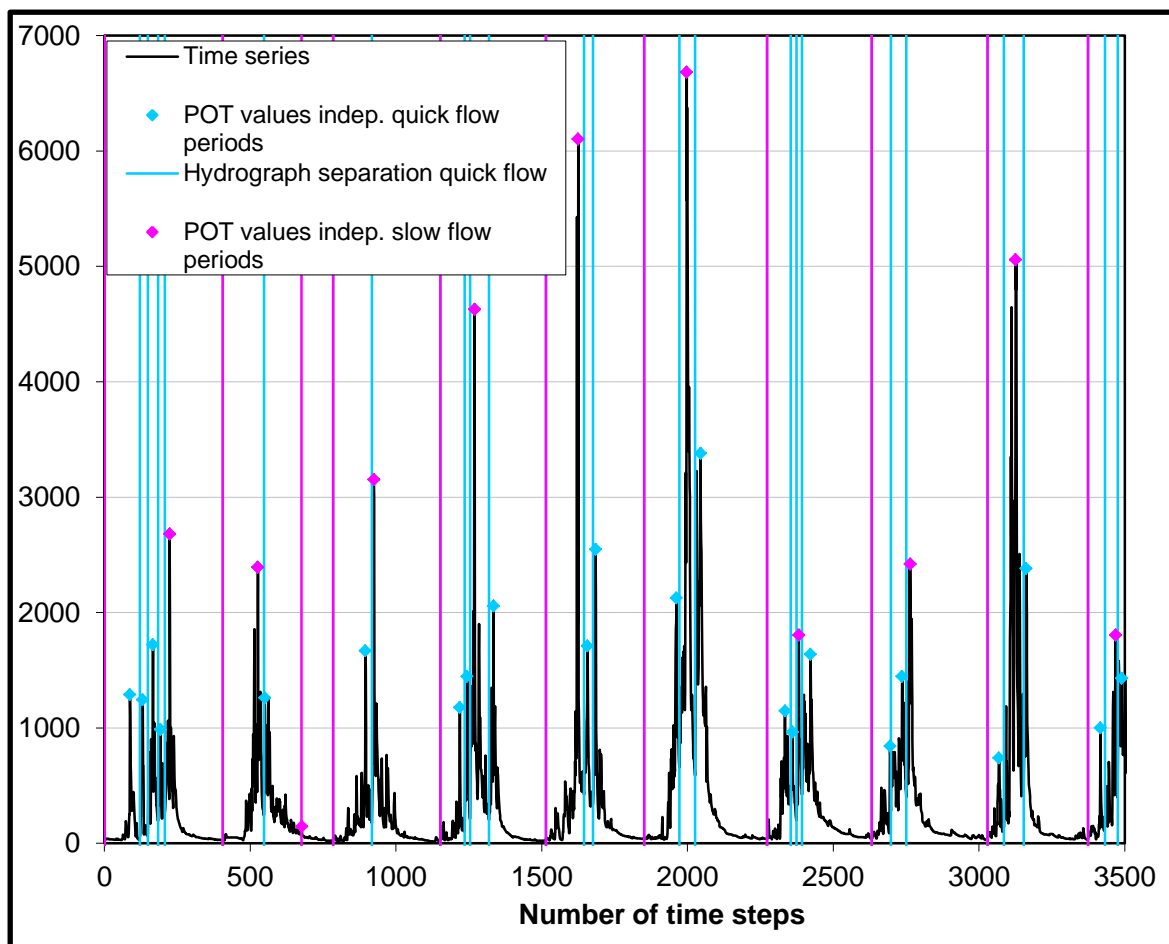


Figura 97. Selección de eventos independientes de los caudales de Abapó, obtenidos con la Herramienta POT Selection del WETSPRO

Para todas las Subcuencas, se ha utilizado el método de Inventario de Humedad del Suelo (Soil Moisture Accounting o SMA) para el cálculo de la precipitación efectiva y del balance de humedad del suelo.

Para el componente de flujo superficial, se ha utilizado el concepto de transformación del HU de Clark, tomando como tiempo de concentración 12 horas y 6 horas como coeficiente de almacenamiento. Sin embargo, al estar corriendo un modelo a paso diario y sabiendo que estos tiempos son menores a 1 día estos parámetros dejan de jugar un rol importante en la calibración.

Para el cálculo de la precipitación de la Cuenca del Río Grande se usó el Método de la Distancia Inversa en *Meteorologic Model*.

La Figura 98 muestra un esquema de la cuenca del Rio Grande cargado al software HEC – HMS; además en esta figura pueden verse las 8 subcuencas.

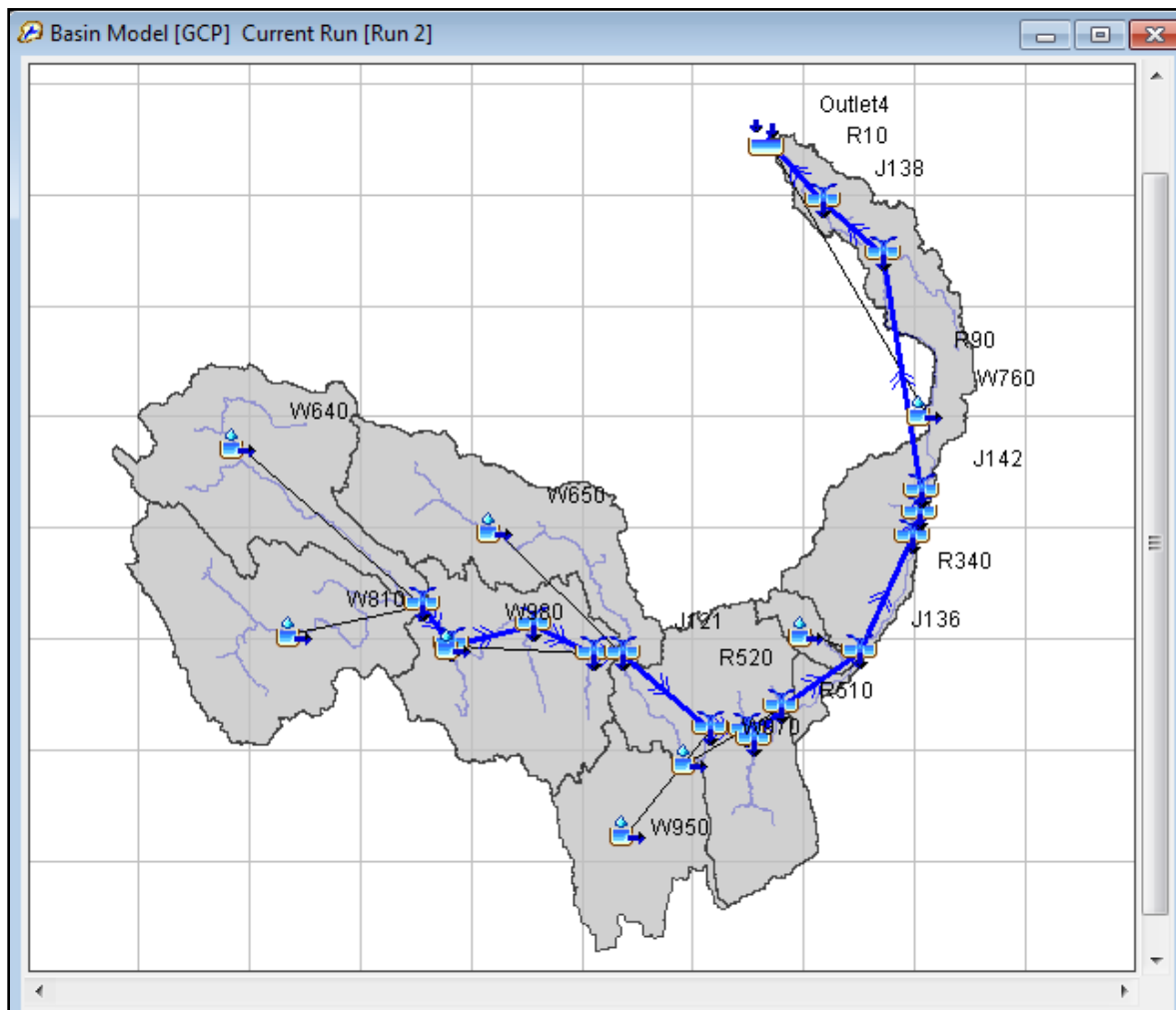


Figura 98. Esquema de la Cuenca del Rio Grande cargado al HEC – HMS

El ajuste y la calibración del modelo precipitación-escorrentía de la cuenca del Rio Grande se realizó con el software CALITool (Calibration Tool) (Villazón, 2010), cuyos parámetros finales ajustados como resultado del proceso de calibración son los mostrados en la Tabla 33.

Tabla 33. Parámetros finales de la modelación de la Cuenca del Rio Grande en el HEC–HMS, para Abapó y Pailas.

Parameter	Value
Modelo	HMS+Eto_Pend_OK
Cano Ini Stora %	10
Cano Max Stora mm	10
Soil%	10
GrouWate1%	5
GrouWate2%	5
Max Infil mm/hr	0.5
Imperv %	20

Parameter	Value
Soil Stora mm	20
Tension Stora mm	10
Soil perco mm/hr	0.258
GW1 stora mm	150
GW1 perco mm/hr	3
GW1 Coeffi hr	100
GW2 stora mm	51
GW2 perco mm/hr	3
GW2 Coeffi hr	100
BF GW1 init m3/s	0.3
BF GW1 Coeffi	220
BF GW1 Reserv	1
BF GW2 init m3/s	0.2
BF GW2 Coeffi	2000
BF GW2 Reserv	1
SUR Ini Stor	10
SUR Max Stor	75
Coef Evapo	0.5

5.4.2.1 Estación Abapó

Tabla 34. Valores Estadísticos de la calibración final del modelo HEC-HMS de la cuenca del Rio Grande en la Estación Abapó

Statistics	Set 22
MAE (Mean Absolute Error)	151.76
STD (Standard Deviation)	309.02
RMSE (Root Mean Squared Error)	308.99
EF (Efficiency)	0.676
CD (Coefficient of determination)	1.332
R or CC (Linear Goodness of Fit)	0.823
Model Skill	0.899
CR1 (Model Bias)	-0.009
CR4 (Natural Log Nash-Sutcliffe)	0.697
CR5 (Adapted Nash-Sutcliffe)	0.757

Los resultados de la calibración del modelo hidrológico, con respecto a los datos obtenidos de la estación Abapó, muestran una eficiencia de 0.676. A partir de eficiencias de 0.6, la calibración se toma como satisfactoria. A continuación se presentan las figuras obtenidas en la corrida o Set 22 (parámetros finales del modelo) del CALITool para el modelo de la cuenca del Rio Grande en la estación Abapó, en donde se puede evidenciar una similitud entre los resultados de caudales observados (líneas negras punteadas) y

los caudales simulados (líneas azules continuas). La primera figura se encuentra en escala lineal, y la segunda figura en escala logarítmica con el fin de observar los periodos de recesión o secos.

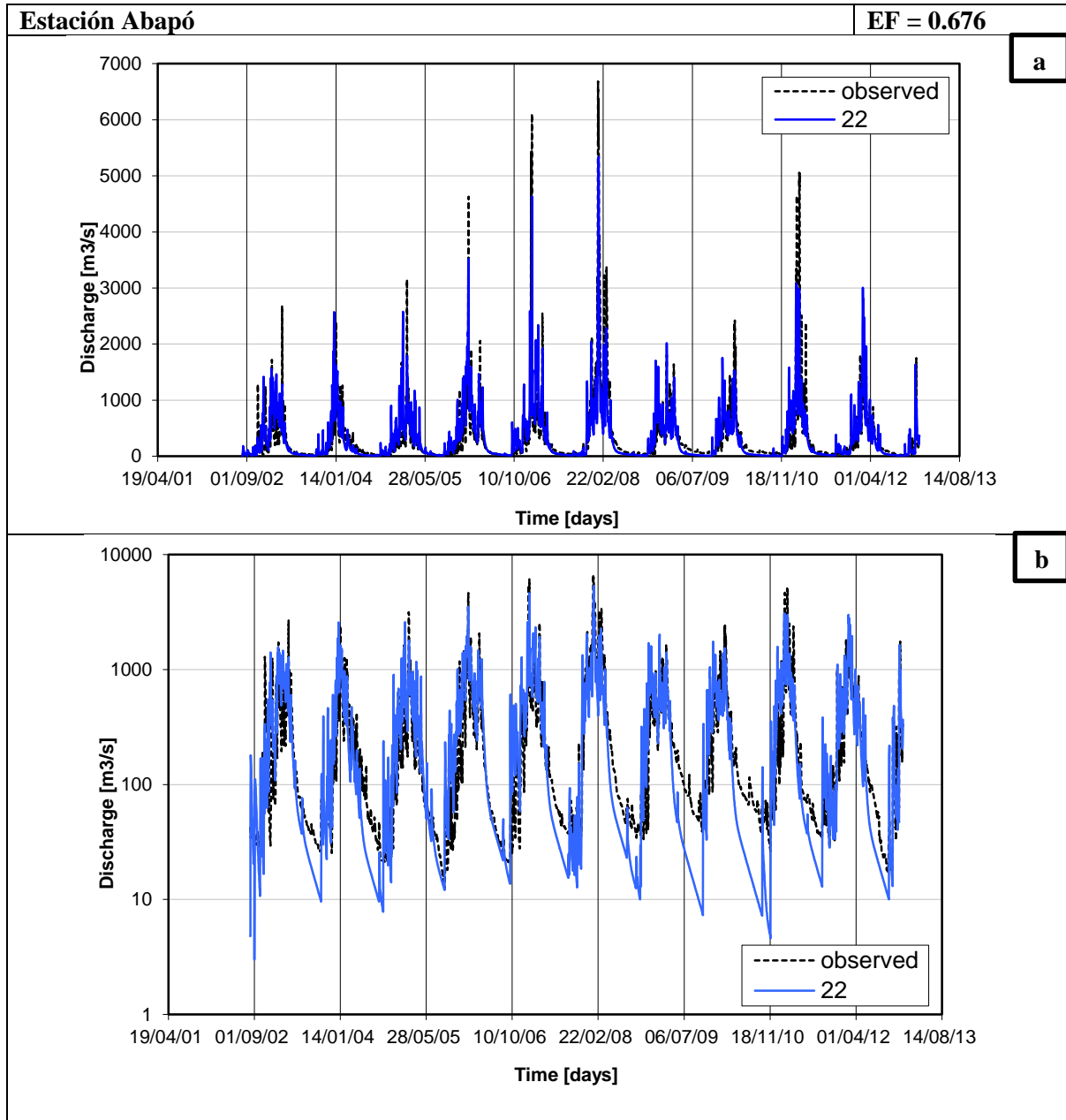


Figura 99. Serie de tiempo de caudales Observados y Modelados: a) Escala Lineal y b) Escala Semi-logarítmica

En la siguiente figura se encuentran los caudales acumulados, en donde igualmente se puede evidenciar una gran similitud entre los resultados observados (líneas negras punteadas) y los simulados (líneas azules continuas).

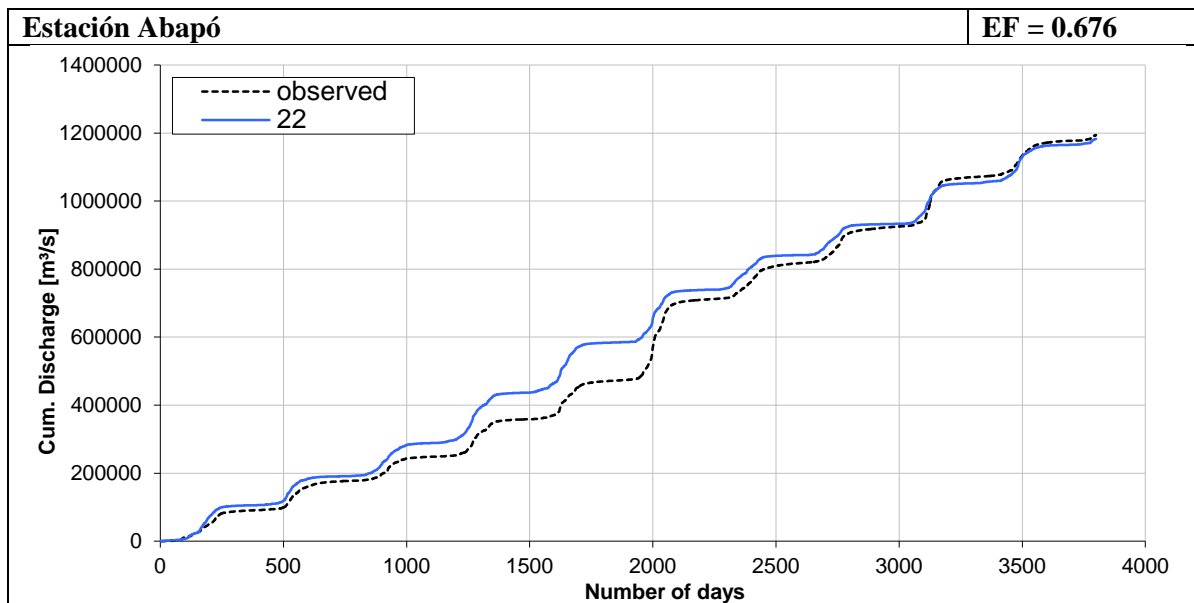


Figura 100. Acumulados de Caudal Observados y Modelados

En la siguiente figura se observa la dispersión de los datos obtenidos mediante la simulación y los observados.

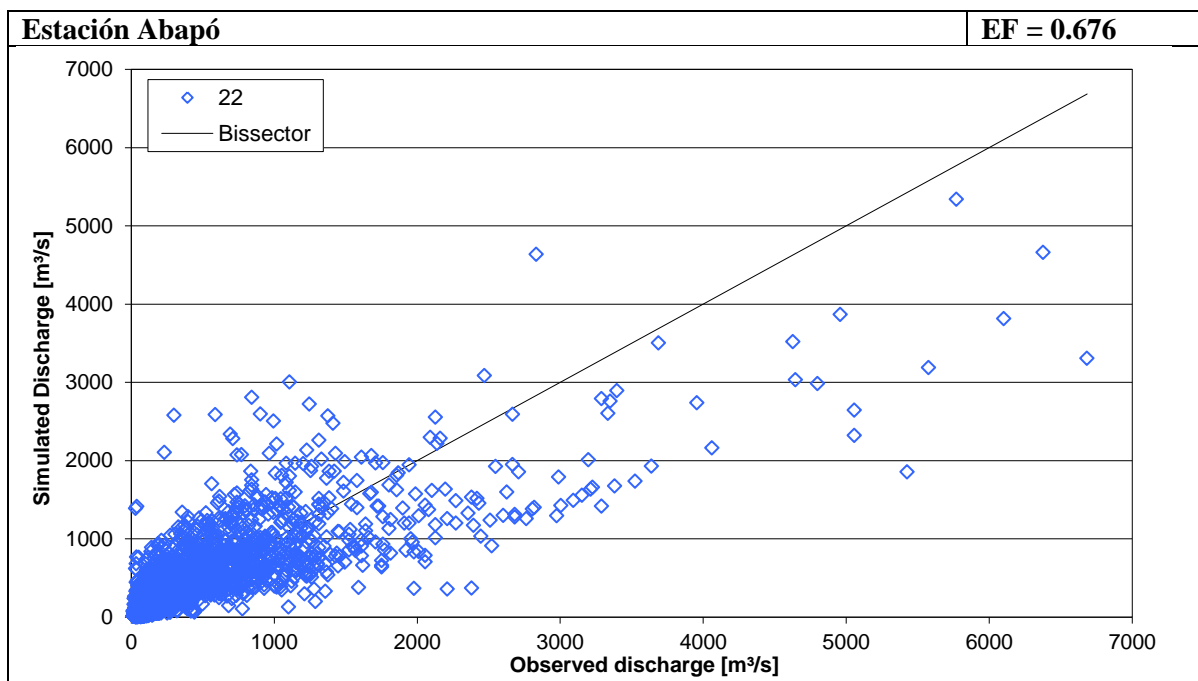


Figura 101. Scatter plot Modeling

A continuación se muestra la corrida del modelo HEC-HMS en el punto de control de la Estación Abapó, en donde se puede evidenciar una gran similitud entre los caudales observados (líneas negras) y los simulados (líneas azules).

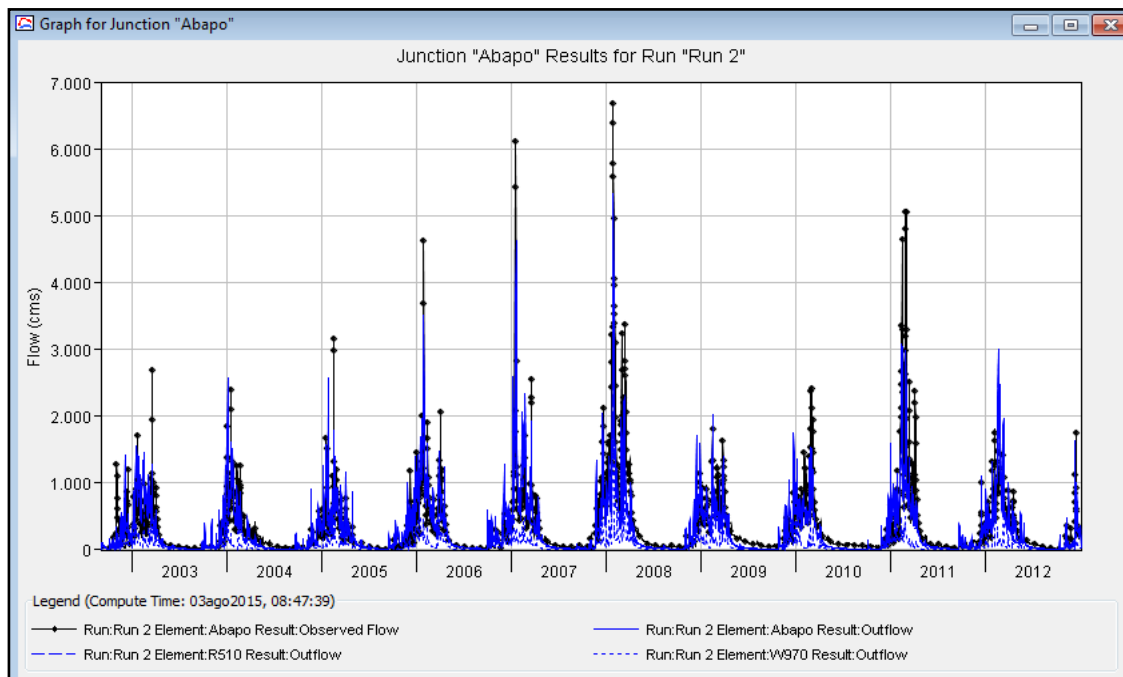


Figura 102. Corrida en HEC-HMS, Estación Abapó

Para una mejor observación, en la siguiente figura se muestran los resultados graficados para un solo año.

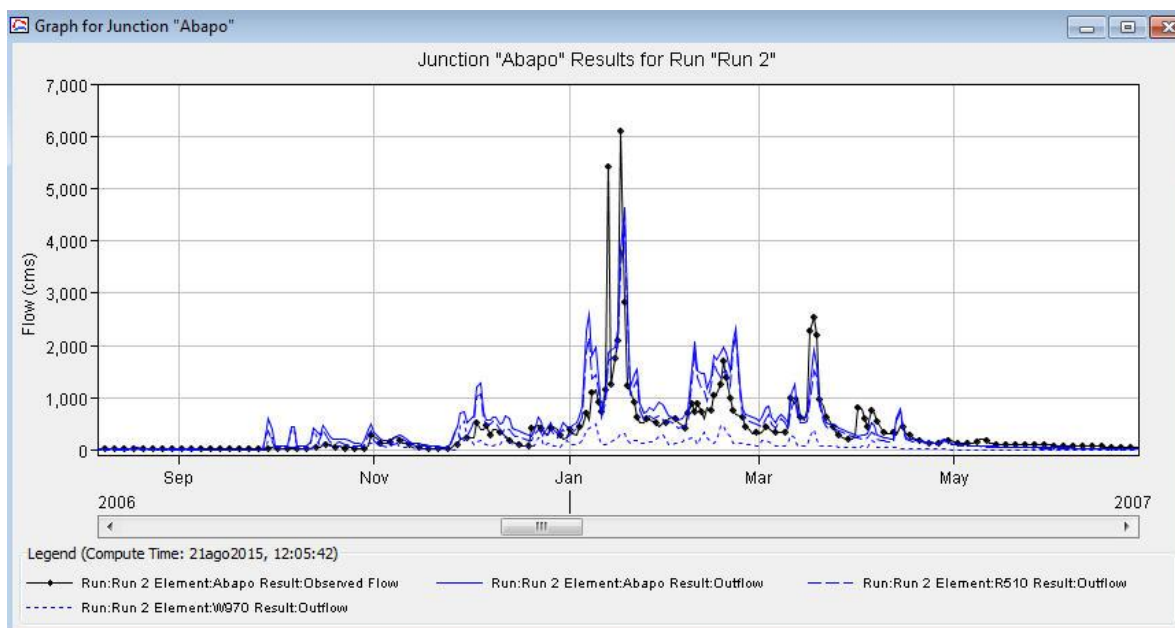


Figura 103. Corrida en HEC-HMS para un año (2006-2007), Estación Abapó

5.4.2.2 Estación Pailas

Tabla 35. Valores Estadísticos de la calibración final del modelo HEC-HMS de la cuenca del Rio Grande en la Estación Pailas

Statistics	Set 13
MAE (Mean Absolute Error)	195.92
STD (Standard Deviation)	397.88
RMSE (Root Mean Squared Error)	409.59
EF (Efficiency)	0.622
CD (Coefficient of determination)	2.136
R or CC (Linear Goodness of Fit)	0.816
Model Skill	0.853
CR1 (Model Bias)	-0.246
CR4 (Natural Log Nash-Sutcliffe)	0.769
CR5 (Adapted Nash-Sutcliffe)	0.608

Los resultados de la calibración del modelo hidrológico, con respecto a los datos obtenidos de la estación Pailas, muestran una eficiencia de 0.622.

A continuación se presentan las figuras obtenidas en el Set 13 (parámetros finales del modelo) del CALITool para el modelo de la cuenca del Rio Grande en la estación Pailas.

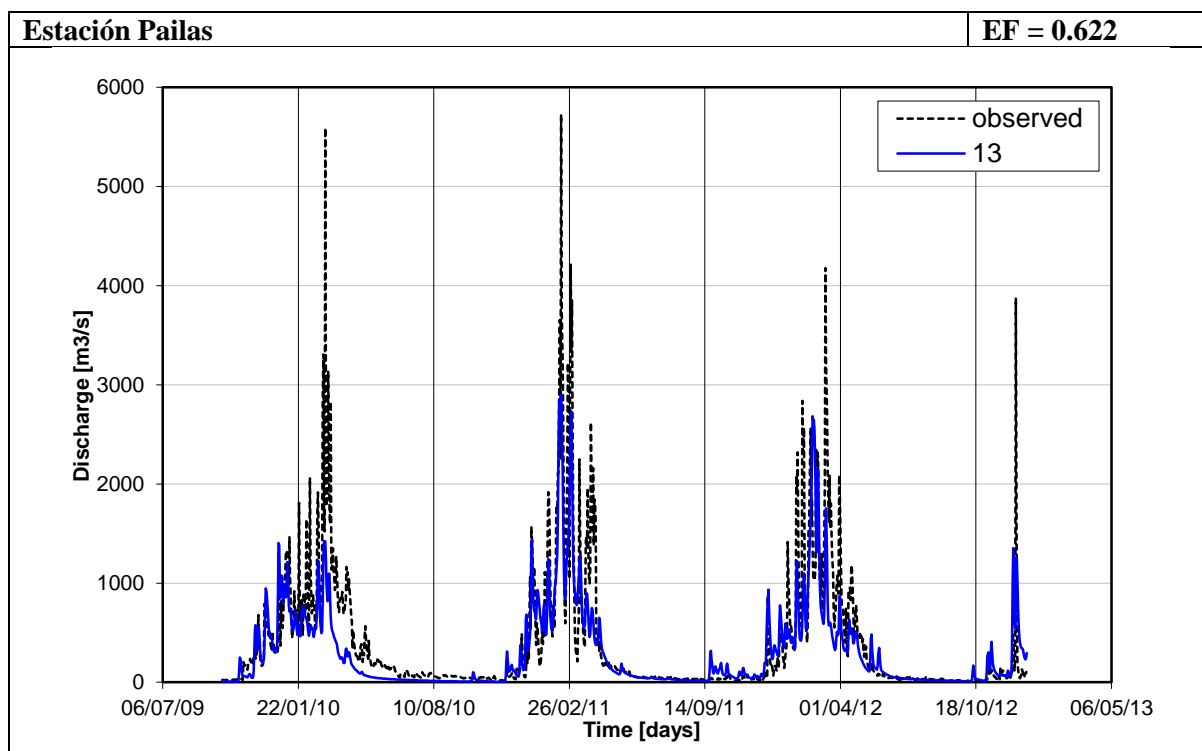


Figura 104. Serie de tiempo de caudales Observados y Modelados (Escala Lineal)

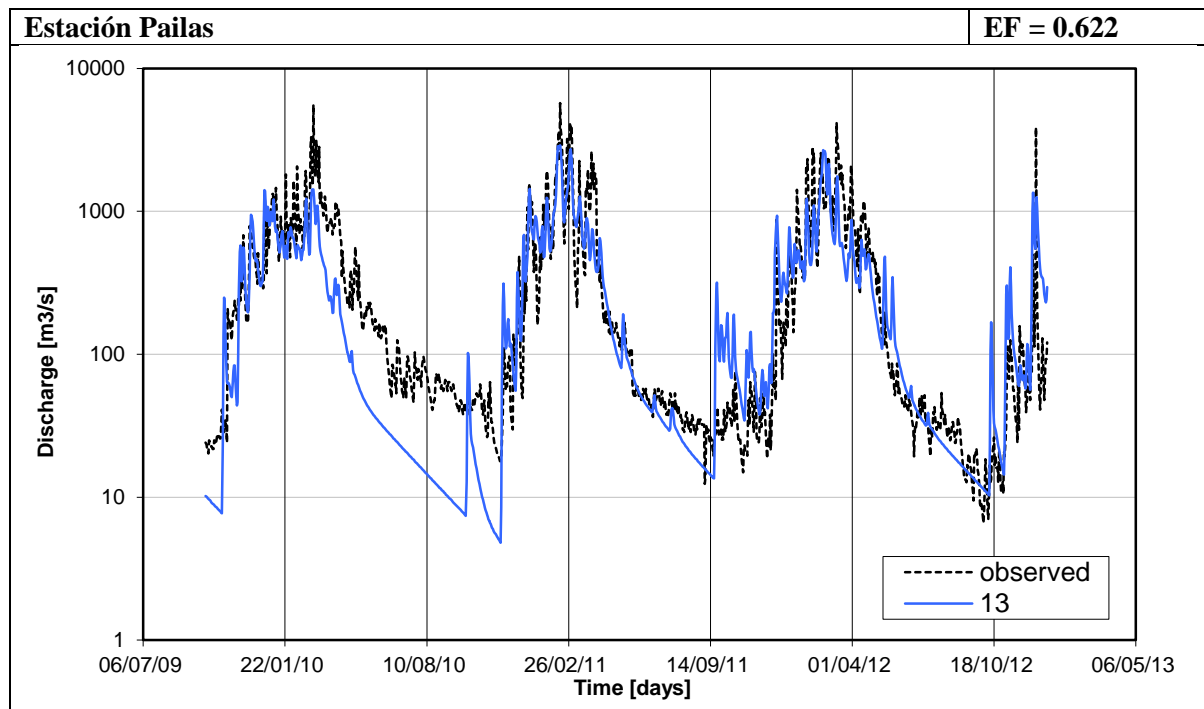


Figura 105. Serie de tiempo de caudales Observados y Modelados (Escala Semi-logarítmica)

En la siguiente figura se encuentran los caudales acumulados, en donde igualmente se puede evidenciar una gran similitud entre los resultados observados (líneas negras punteadas) y los simulados (líneas azules continuas).

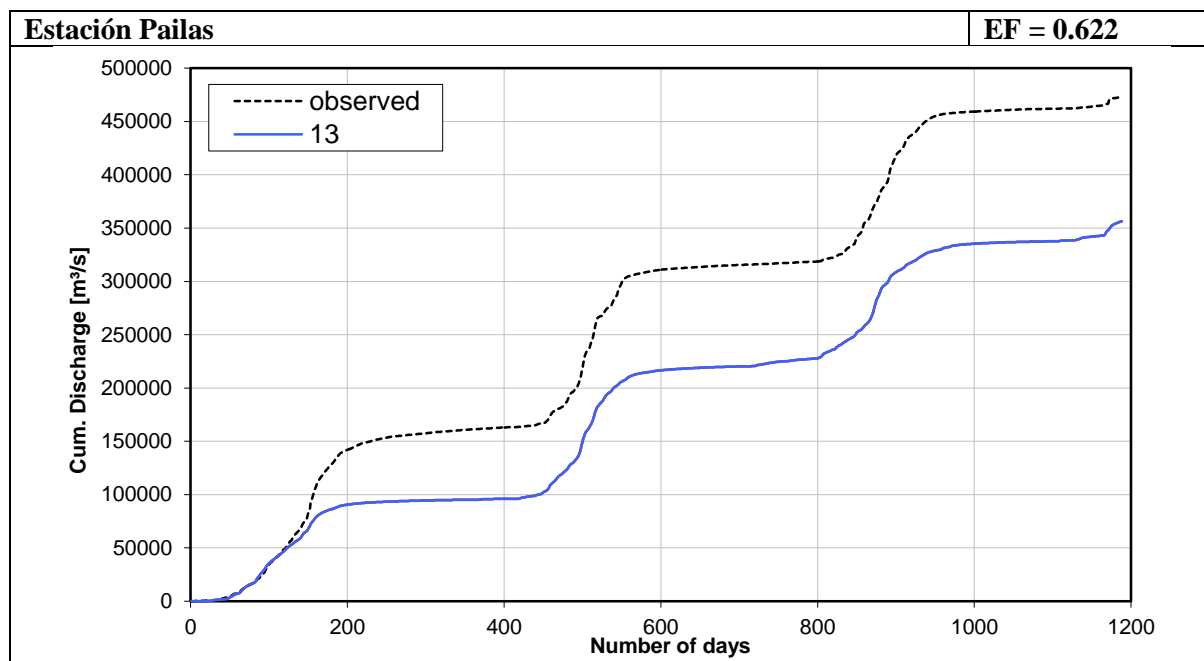


Figura 106. Acumulados de Caudal Observados y Modelados

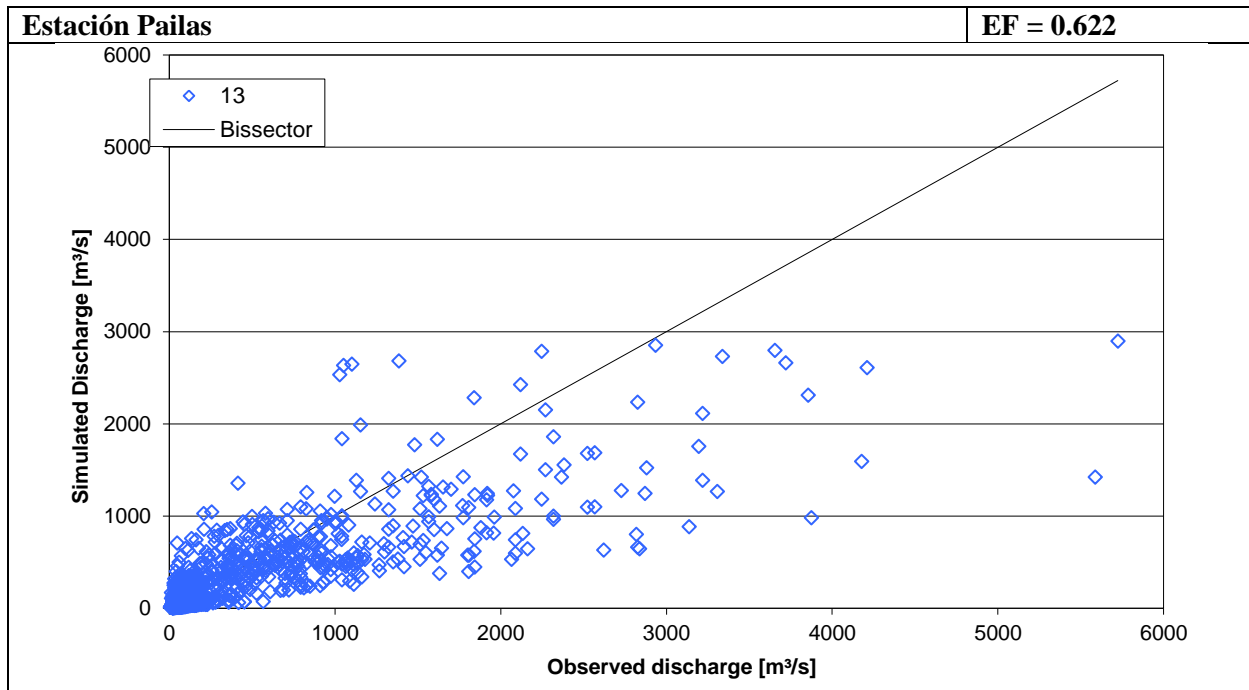


Figura 107. Scatter plot Modeling

A continuación se muestran la corrida del modelo HEC-HMS en el punto de control de la Estación Pailas, en la cual se evidencia una similitud entre los caudales observados (líneas negras) y los simulados (líneas azules).

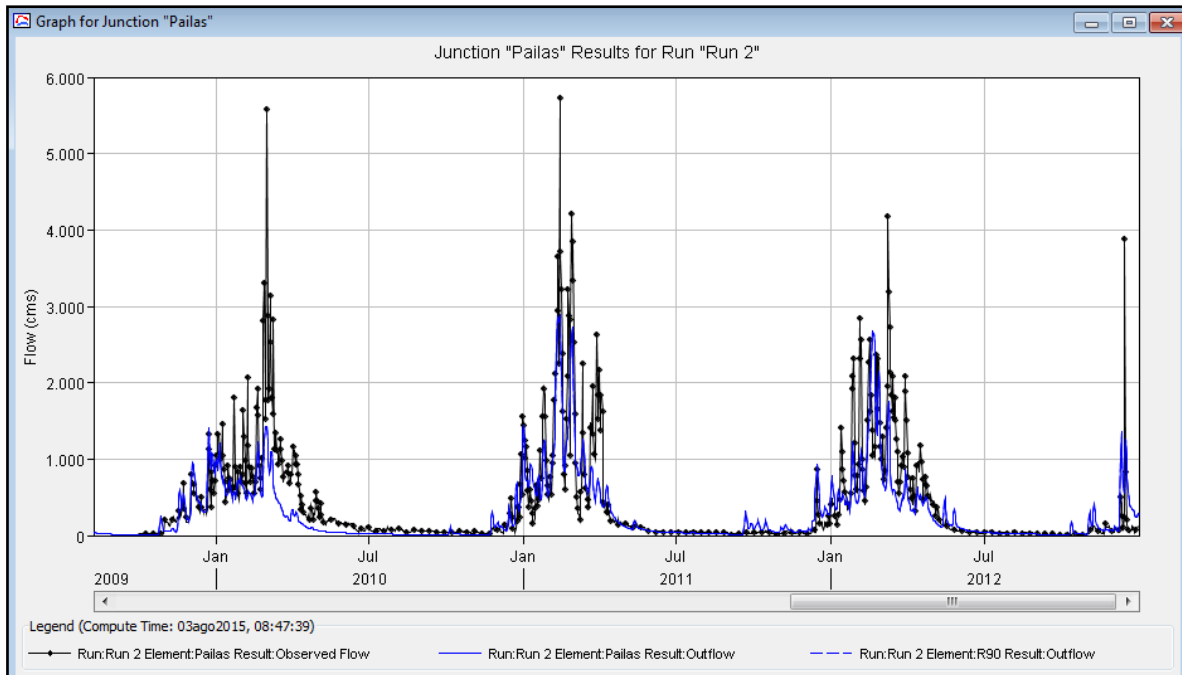


Figura 108. Corrida en HEC-HMS, Estación Pailas

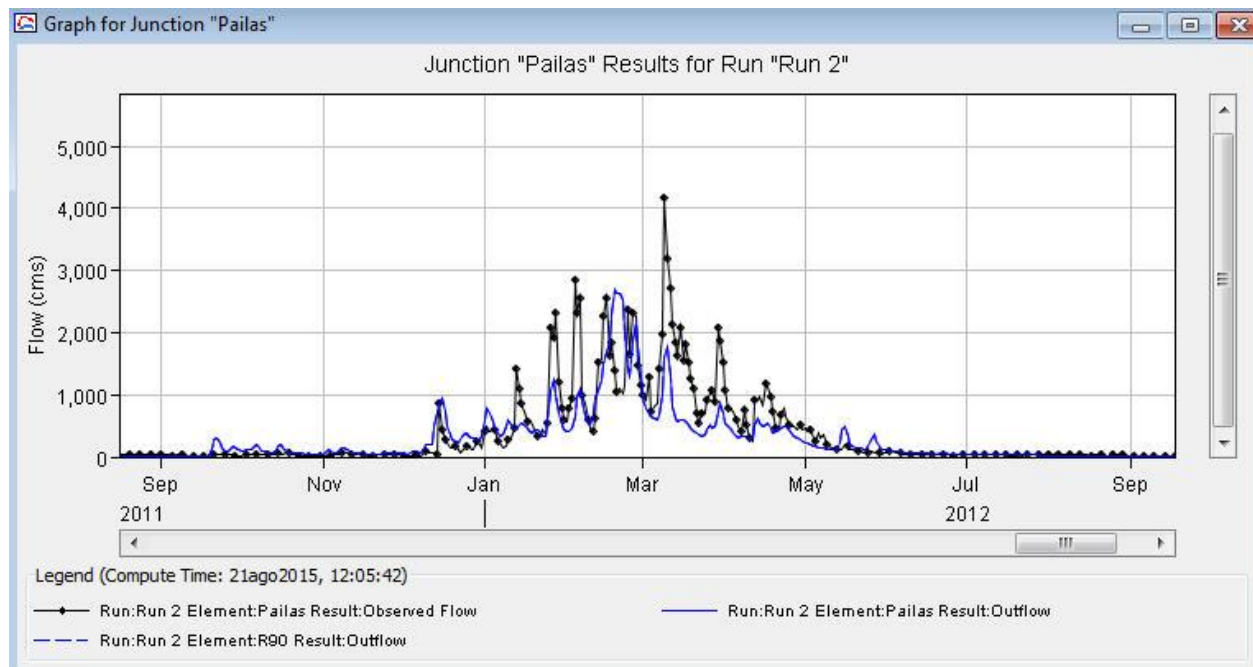


Figura 109. Corrida en HEC-HMS para un año (2011-2012), Estación Pailas

Las Eficiencias obtenidas se pueden ver en la siguiente tabla:

Estación	Periodo de Calibración	Eficiencia
Abapó	01/09/2002 – 31/12/2012	0.676
Pailas	01/10/2009 – 31/12/2012	0.622

5.4.2.3 Conclusiones

Pese a los problemas en escasos de datos hidrométricos y de aforos en la cuenca del río Rocha se puede contar con un modelo hidrológico eventual de transformación de lluvia en caudal, considerando aforos máximos y estudios previos realizados. Comparando el estudio previo del 2004 con el modelo actual, se encontraron valores similares de caudal.

Para el caso del río Grande, los resultados obtenidos satisfacen las expectativas, ya que para una cuenca de ese tamaño y considerando una modelación continua a nivel diario, se pudo representar los caudales observados en los últimos 12 años en la estación Abapo (Paraiso) y los últimos 4 años en la estación Pailas, los cuales mostraron una gran similitud. Se obtuvieron eficiencias en las calibraciones mayores a 0.6 para ambas estaciones.

5.5 CALIBRACIÓN DE MODELOS HIDRÁULICOS

5.5.1 Análisis y reconstitución de series de tiempo de caudal

5.5.1.1 Cuenca del Rio Rocha

Como se mencionó en el numeral 5.4.1 en la cuenca del Rio Rocha no se cuenta con datos de series históricas continuas de descarga, por lo cual la calibración del modelo hidrológico de la cuenca del Rio Rocha se realizó por escenarios (Bautista & La Fuente, 2014).

Como información de caudal importante para la Calibración del modelo Hidrodinámico de la cuenca del Rio Rocha se cuentan con aforos realizados por el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Mayor de San Simón-LHUMSS. Las campañas de aforo realizadas en el río Rocha dieron como resultado evaluaciones del comportamiento del caudal respecto al tirante de agua (Curvas de Descarga) en las secciones de control establecidas a lo largo del río, en dos puntos de control: Puente Cajón (Sector Aeropuerto) y Puente Urkupiña (en Quillacollo), dichas curvas de descarga para las secciones de control se las presenta en la Figura 110; considerando variaciones mínimas en las secciones de control.

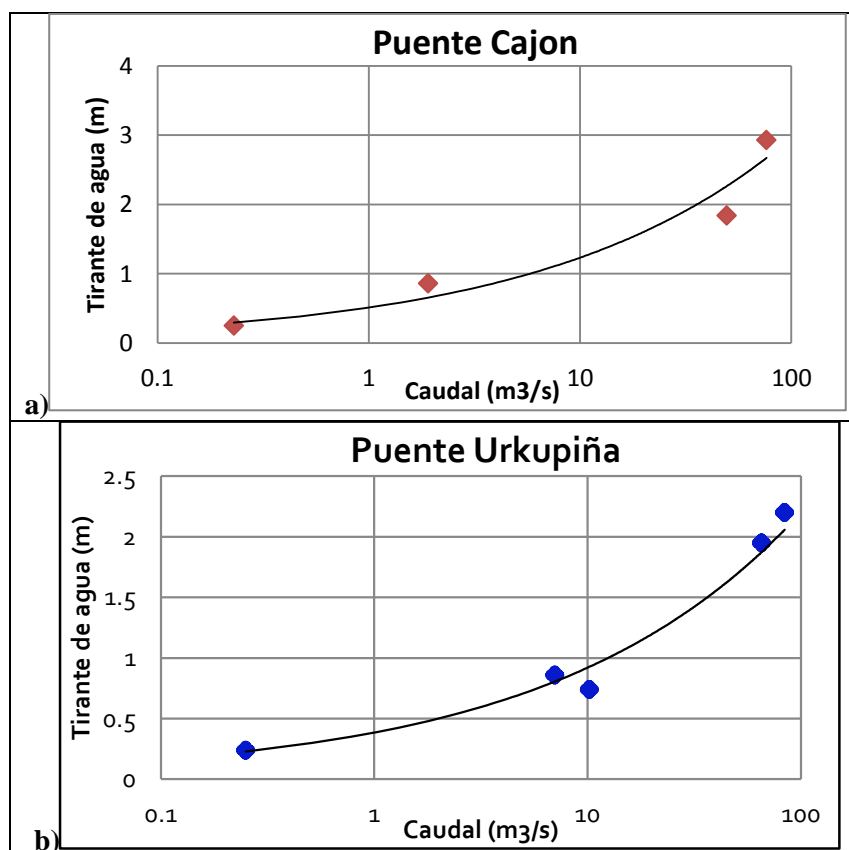


Figura 110. Curvas de Descarga construidas a partir de aforos realizados por el LHUMSS: a) Puente Cajón y b) Puente Urkupiña

5.5.1.2 Cuenca del Rio Grande

Proporcionado por la base de datos del SEARPI se cuenta con registros de niveles de agua en las estaciones de Abapó (Paraíso) y Puente Pailas. En la estación de Abapó, el SEARPI tiene registros de aforos desde el año 2001 hasta el año 2011 y el SENAMHI tiene registros desde el año 2002 pero en campamento Paraíso, aguas arriba de Abapó. Además en los registros del SENAMHI a partir del año 2005 se tienen lecturas conjuntas de nivel de agua tanto en la regla de Paraíso como en la de Abapó.

Las curvas de descarga se calibraron con los datos de aforos medidos por el SEARPI y se validaron con los registros del SENAMHI para la estación de Abapó.

El nivel del agua se mide en dos estaciones de medición con una frecuencia de nueve lecturas al día pudiendo llegar hasta doce en eventos de crecida. Con estas series se procedió a utilizar una interpolación lineal para llegar a tener una serie continua a nivel diario.

La reconstitución de la serie de tiempo de descarga a nivel diario se realiza en base a los registros de aforo puntual (Q_{medido}) y el nivel de agua en el momento del aforo (H_{medido}). Campañas de aforo frecuentes fueron realizadas en el período 2001 - 2011 por SEARPI y en el periodo 2002 - 2012 por SENAMHI, ambos en Abapó.

En Puente Pailas se tiene registros de aforos desde el 2009. El análisis de estas mediciones produjo curvas de descarga, que como consecuencia de los cambios morfológicos del río y los cambios de dispositivo de medición son válidos sólo durante un determinado período de tiempo (Villazón et al., 2009). A esta técnica la llamamos **Familia de Curvas de Descarga**.

El modelo más común para las curvas de descarga es trazar los puntos de nivel-caudal en una escala logarítmica para los caudales (Dose et al., 2001). Esta expresión potencial es representada por la siguiente ecuación:

$$Q = a(H - S_o)^b \quad \text{Ecuación 15}$$

dónde: Q es el caudal medido en m³/s o Lt/s, H es el nivel del agua medido en m o cm, S_o , a y b , son constantes que se determinan utilizando los datos observados de nivel de agua y descarga. El valor de S_o es el nivel de agua que corresponde a un caudal de cero, que es un parámetro hipotético y no se puede medir en campo.

El problema en la utilización de métodos de optimización de parámetros (ajuste de curvas) como mínimos cuadrados es que los errores durante el ajuste de la curva de descarga pueden producir unas curvas de descarga capaces de predecir correctamente las descargas bajas, pero para descargas de mayor magnitud se puede dar lugar a una tremenda sobre o sub estimación de la descarga. La precisión de la curva de descarga depende en gran medida del caudal más alto medido para cada subconjunto. Para reducir esta influencia, se propone un método gráfico utilizando un punto de partida que corresponde al caudal

máximo medido en todas las series de datos. Esta medición se supone ocurrió cuando la sección sufrió la máxima erosión (Villazón, 2011). La curva de gastos es forzada a pasar a través o muy cerca del punto máximo. La Figura 111 muestra el proceso de ajuste en Puente Pailas y Abapó.

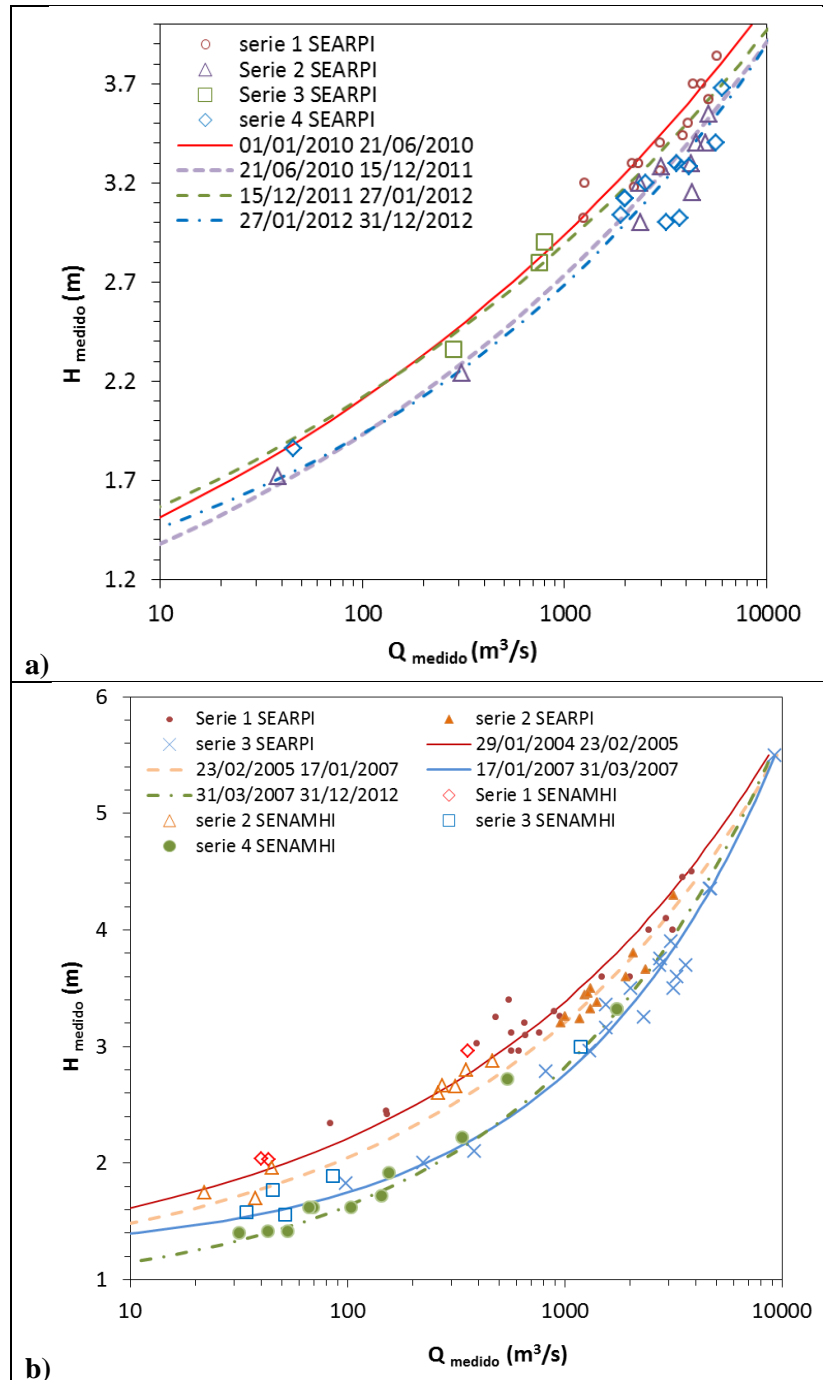


Figura 111. Variación temporal de la curva de descarga: a) Puente Pailas periodo 2010 – 2012, b) Abapó periodo 2005 - 2012

Para una correcta validación de la técnica de *Familia de Curvas*, se evaluaron los caudales estimados comparándolos con una técnica clásica de estimación de una sola curva de descarga ajustada con método de optimización de parámetros. La Figura 112 muestra la evaluación de las curvas de descarga calibradas para la estación de Abapó. En la gráfica de dispersión de calculados versus observados (Figura 112a) vemos que la técnica de familia de curvas se aproxima de mejor manera a la bisectriz y en la Figura 113b podemos ver que cuando se calcula la probabilidad empírica de ocurrencia en términos de periodo de retorno los extremos son mucho mejor estimados por la familia de curvas de descarga.

Los parámetros estadísticos de la evaluación de las técnicas se encuentran en la Tabla 36. La Eficiencia de Nash & Sutclift alcanza un valor de 0.937, que nos permite concluir que las curvas de descarga calculadas representan fielmente los caudales observados.

Tabla 36. Parámetros estadísticos de evaluación de las técnicas de estimación de caudales horarios

Parámetros estadísticos	Una curva	Familia de curvas
MAE (Error absoluto medio)	494.23	279.60
STD (Desviación estándar)	774.81	420.48
RMSE (Raíz del error medio al cuadrado)	767.33	423.64
EF (Eficiencia)	0.792	0.937
CD (Coeficiente de determinación)	0.831	0.961
R or CC (Coeficiente de correlación)	0.909	0.970

Una vez calculadas las familias de curvas de descarga para las dos estaciones hidrométricas de nuestra área de estudio se procedió a encontrar las series continuas horarias. En la estación Abapó se incluyeron los aforos realizados por el SENAMHI en la estación Paraíso ya que esta se encuentra a menos de 1 km de distancia aguas arriba y se puede asumir que el caudal que pasa por Paraíso es muy similar al que pasaría por Abapó. La Figura 113 muestra la serie continua horaria de caudales en la estación Abapó esta fue derivada a partir de los niveles diarios registrados en esta estación (Figura 114). En ambas Figuras se observa que los aforos puntuales de caudal realizados tanto por el SEARPI como por el SENAMHI se ajustan a la serie tanto en magnitud como en tiempo de ocurrencia.

Para la estación Pailas se realizó el mismo ajuste y se puede observar que esta estación presenta cambios morfológicos importantes que hacen que el ajuste de las curvas sea un proceso más complicado. En la Figura 115 se puede ver la serie continua de caudal derivada de los niveles diarios y las curvas de descarga. También se puede concluir que los picos de los caudales en Abapó se reproducen en una magnitud muy similar en puente Pailas.

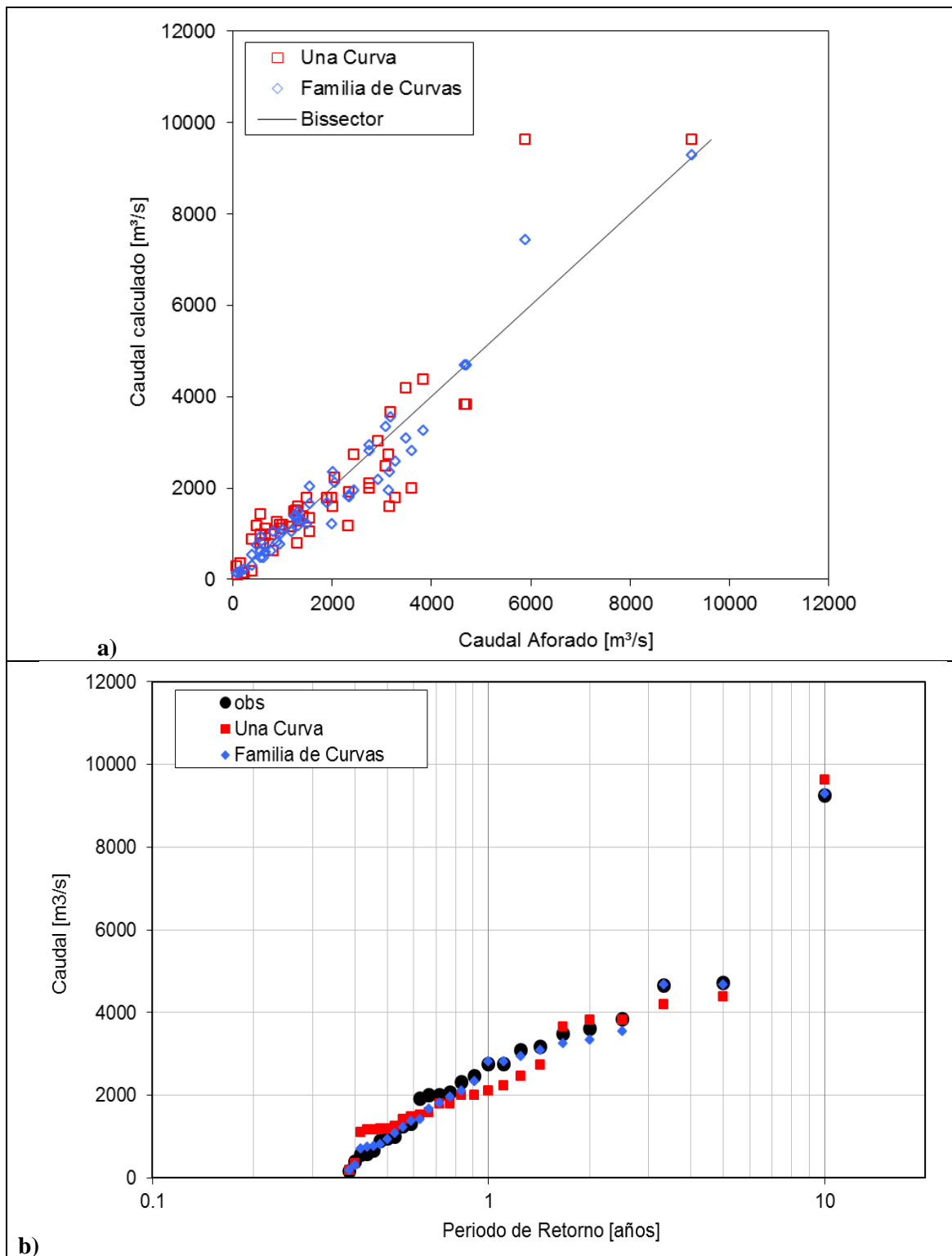


Figura 112. Comparación de las técnicas de Familia de curvas de descarga vs. una sola curva, estación Abapó: a) grafica de dispersión, b) distribución empírica de valores extremos

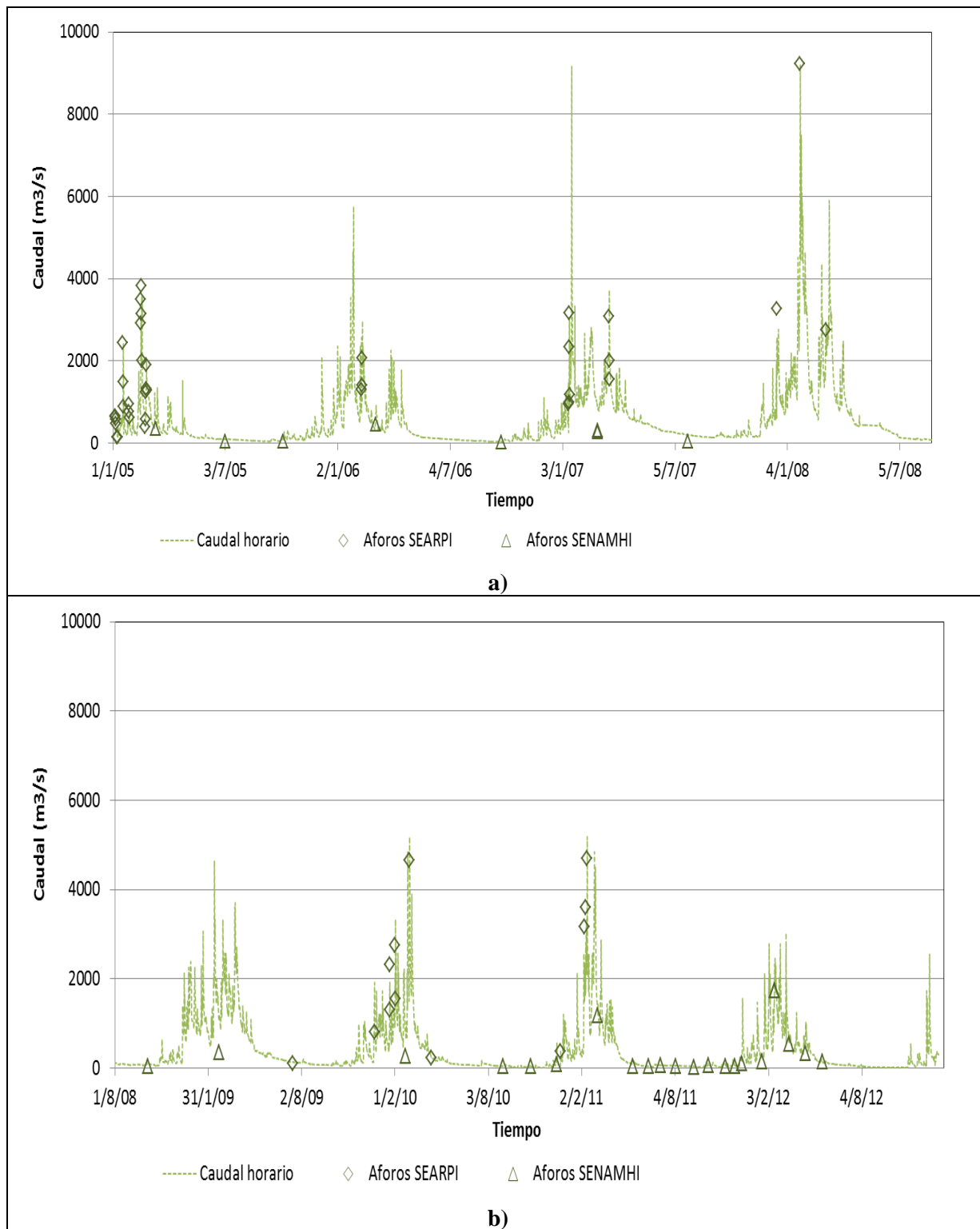


Figura 113. Series continuas de caudales diarios en la estación Abapó con los aforos instantáneos medidos por el SEARPI y el SENAMHI, periodos: a) 2005-2008, b) 2008-2012

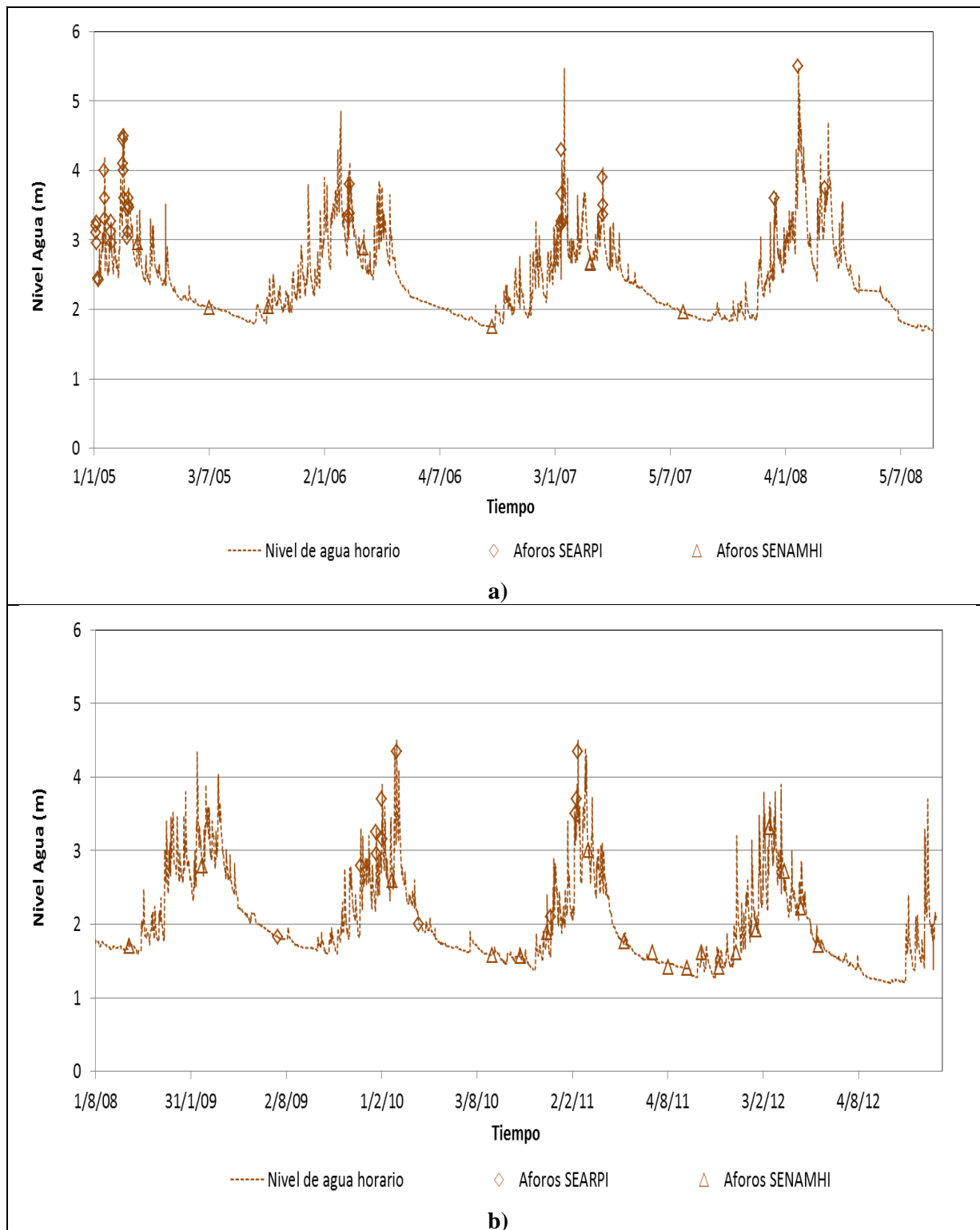


Figura 114. Series continuas de niveles diarios en la estación Abapó con los niveles instantáneos registrados durante los aforos por el SEARPI y el SENAMHI, periodos: a) 2005-2008, b) 2008-2012

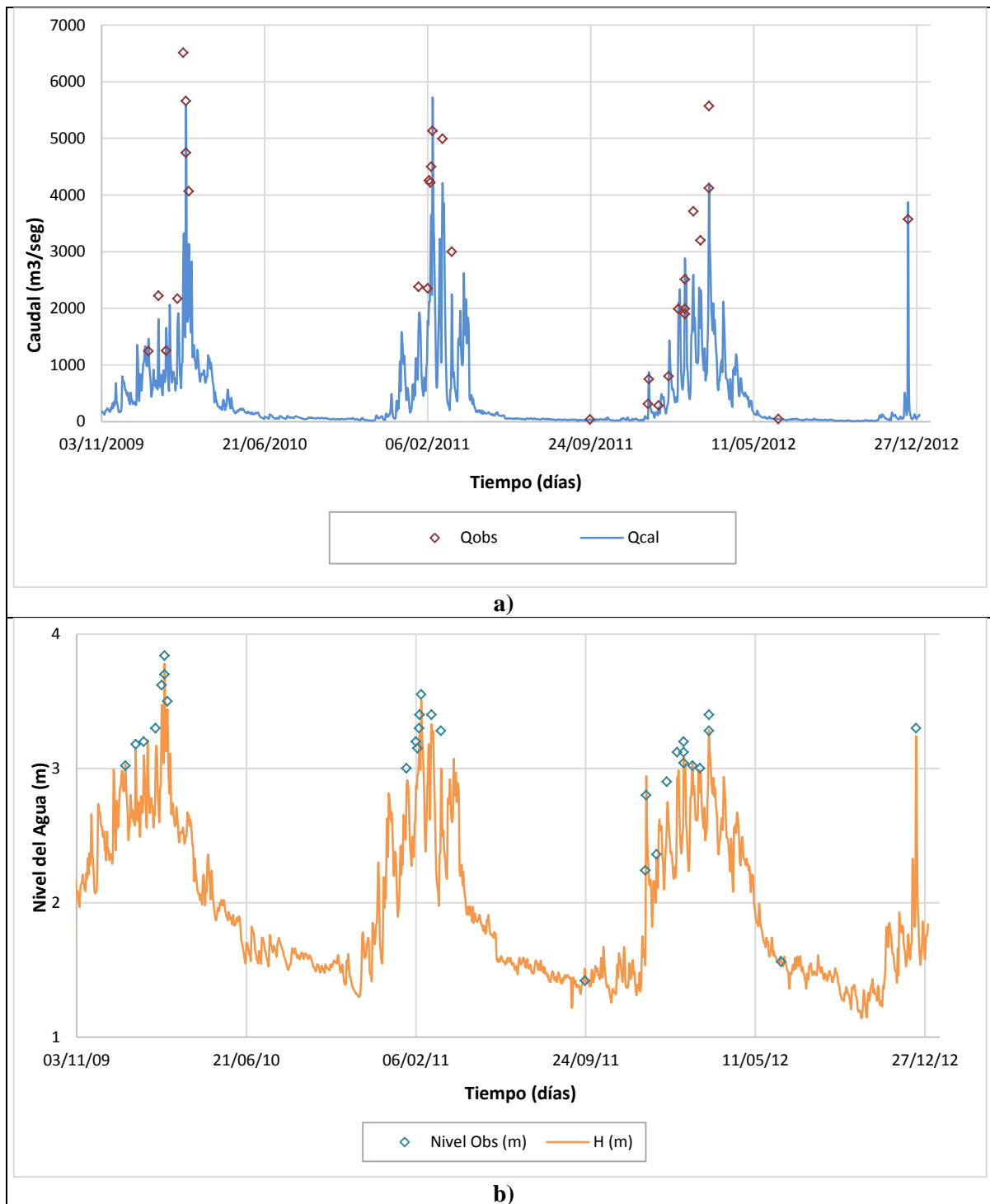


Figura 115. Series continuas diarias en la estación Puente Pailas con los aforos instantáneos por el SEARPI: a) caudales, b) niveles de agua

5.5.2 Calibración del modelo hidráulico HEC-RAS

El modelo hidráulico permite realizar el tránsito de los hidrogramas obtenidos por medio del modelo hidrológico a través de los tramos críticos obteniendo así los niveles de inundación en los alrededores de los cauces analizados.

El proceso de calibración del modelo hidráulico del río Rocha y del río Grande en el paquete HEC-RAS, por separado, se lo realizó en flujo no-permanente. Ya que en una modelación de régimen no-permanente se reproduce de forma más adecuada la realidad; además se necesitan como requerimiento indispensable hidrogramas calibrados para las cuencas de aporte. La modelación se la realizó con un armado cuasi-bidimensional (Villazón & Willems, 2008) donde se toma en cuenta la interacción del flujo horizontal que sale del cauce principal hacia las playas de inundación y viceversa (Villazón et al. 2013), ver Figura 117. La Figura 116 muestra los hidrogramas de entrada para las cuencas del Río Rocha (a) y Río Grande (b), respectivamente.

La calibración de los modelos hidráulicos fue realizada para el año 2007-2008 en el caso de la cuenca del Río Grande y para el año 2011-2012 en el caso de la cuenca del Río Rocha. Ya que se cuenta con datos de caudal máximos observados en estos años. Para la cuenca del Río Grande se tiene observado un caudal máximo de aprox. 7,000 m³/s y para la cuenca del Río Rocha se tiene observado un caudal máximo de aprox. 76 (m³/s) en un evento del 2014 con magnitud inferior pero similar al que ocasiono las inundaciones del 2011-2012; por esta razón se conformaron los hidrogramas con picos cercanos a estos valores mencionados y se los muestra en la Figura 116 para las cuencas del Río Rocha (a) y Río Grande (b), respectivamente.

La Figura 117 muestra ventanas de la geometría ingresada al modelo HEC-RAS de las zonas del contorno y de las secciones del río, para la cuenca del Río Rocha (a) y para la cuenca del Río Grande (b).

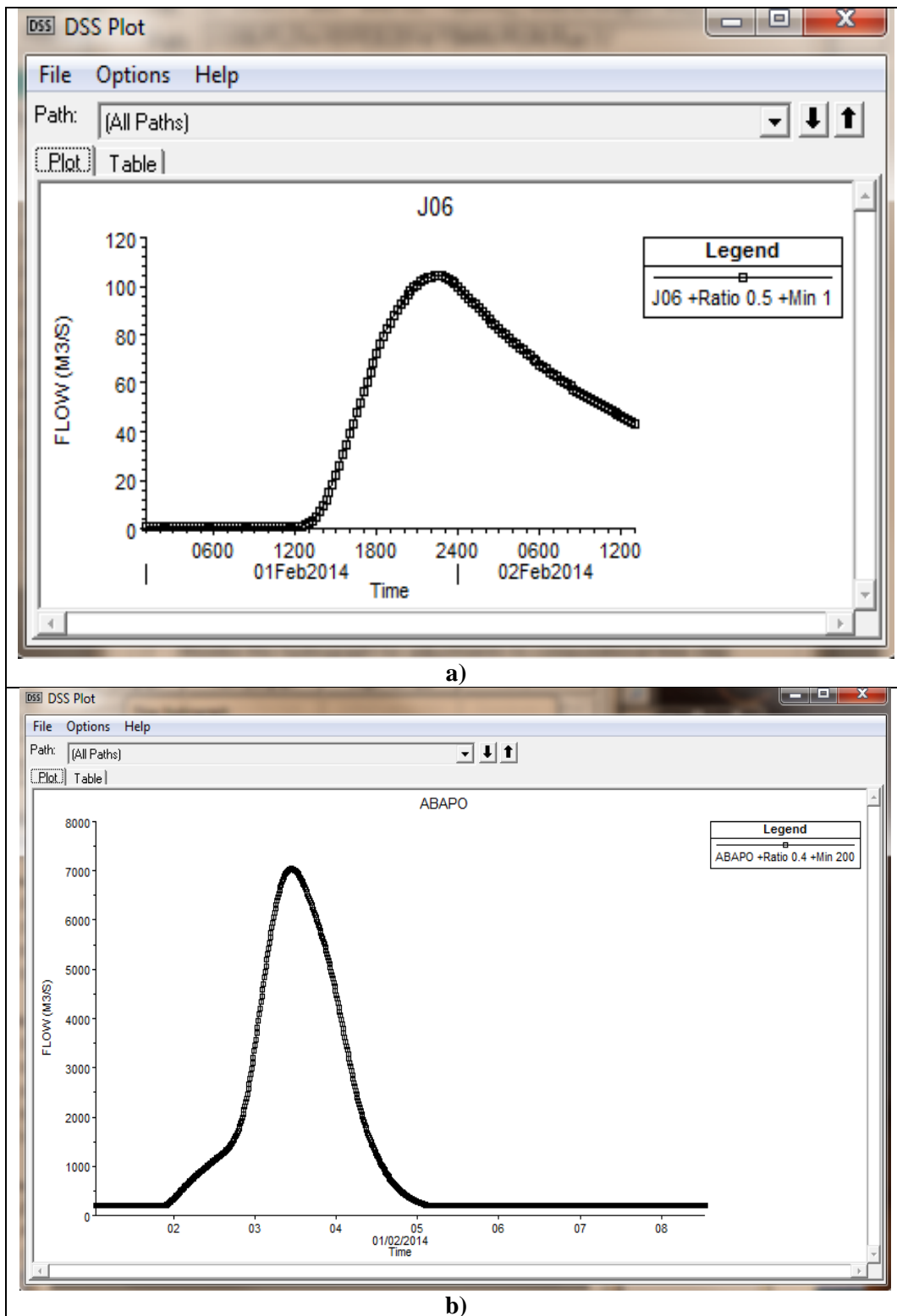
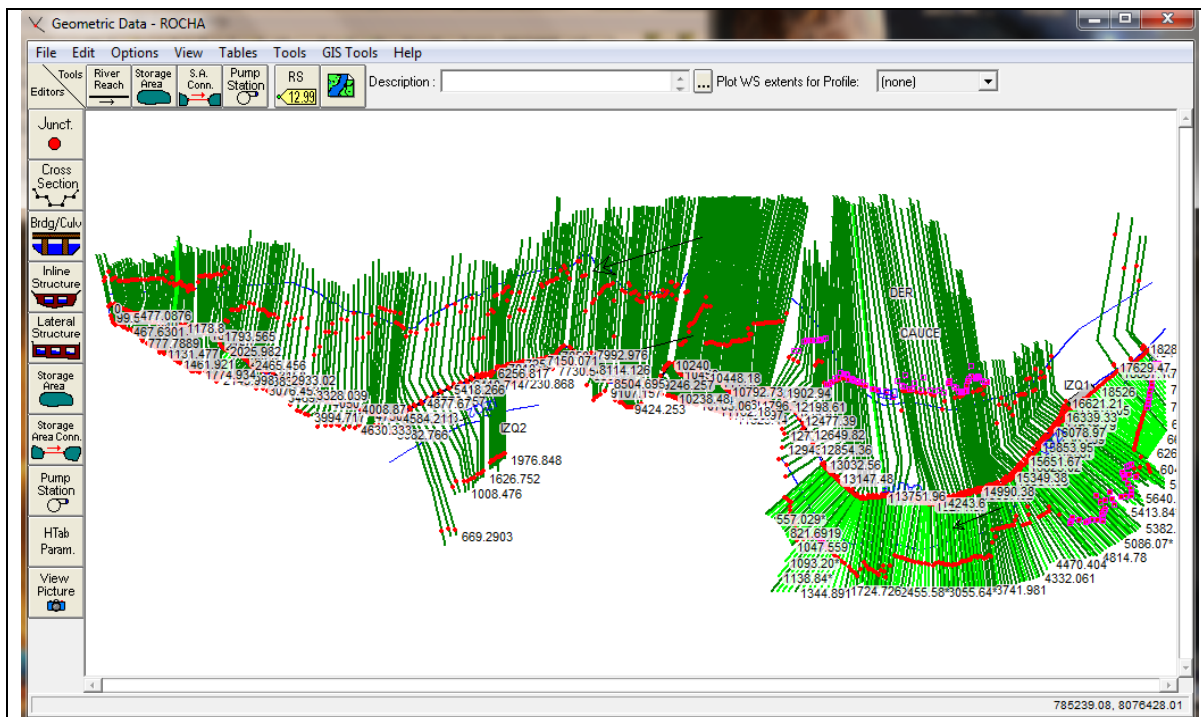
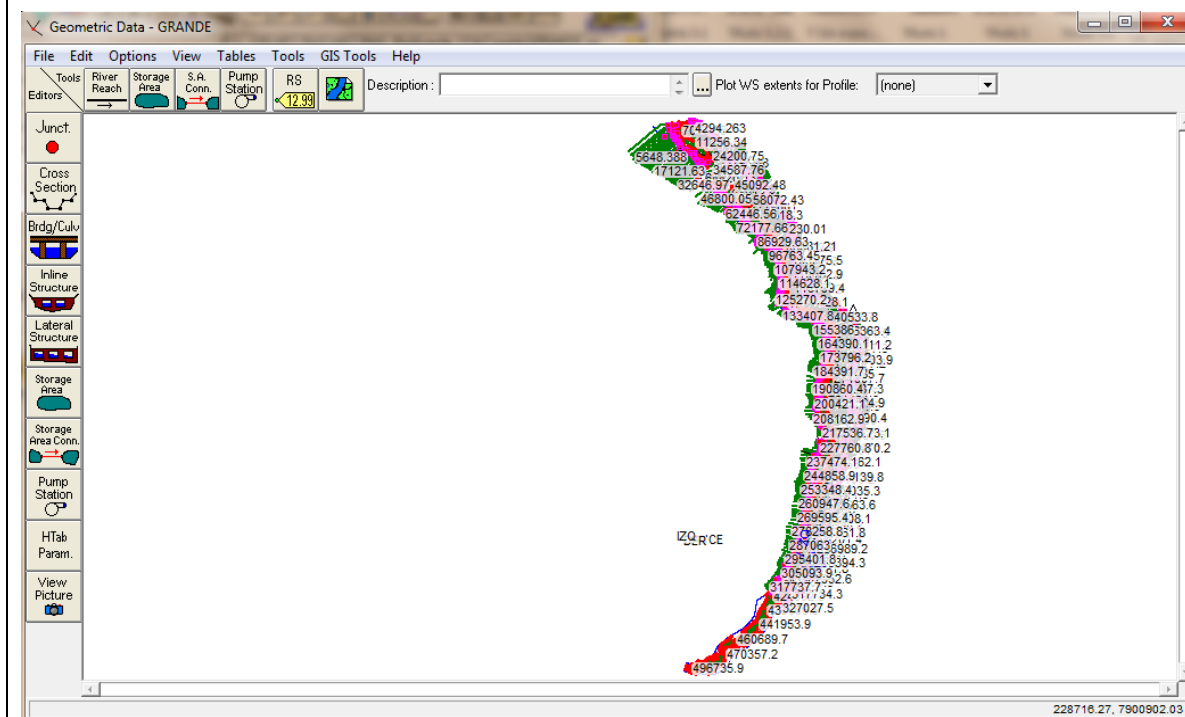


Figura 116. Hidrogramas de entrada al modelo HEC-RAS: a) Rio Rocha y b) Rio Grande



a)



b)

Figura 117. Geometría ingresada al HEC-RAS de las cuencas: a) Rio Rocha y b) Rio Grande

5.5.3 Validación del modelo HEC-RAS

La metodología empleada para la validación del modelo hidrodinámico de las cuencas del Rio Grande y Rio Rocha, consiste en la comparación grafica de las curvas de descarga elaboradas con los niveles de agua y caudal simulados por el modelo con los datos de caudal y niveles de agua observados obtenidos por aforos realizados en las secciones de control.

Las secciones de control para la cuenca del Rio Grande son las cercanas a la zona del Puente Abapó (Paraíso) y Puente Pailas. Así mismo, las secciones de control para la cuenca del Rio Rocha son las cercanas al Puente Cajon y al Puente Urkupiña. A continuación se describe los resultados de la validación grafica del modelo hidrodinámico para las cuencas del Rio Rocha y del Rio Grande, respectivamente.

5.5.3.1 Cuenca del Rio Rocha

La Figura 118 (a) muestra la comparación de la curva de descarga generada por los resultados del modelo en la Sección 17970.05 con los valores de caudal y nivel de agua observados para el Puente Cajon (Aeropuerto-CBBA). Y la Figura 118 (b) muestra la Sección 17970.05 en el modelo HEC-RAS de la cuenca del Rio Rocha.

La Figura 119 (a) muestra la comparación de la curva de descarga generada por los resultados del modelo en la Sección 6661.542 con los valores de caudal y nivel de agua observados para el Puente Urkupiña. Y la Figura 119 (b) muestra la Sección 6661.542 en el modelo HEC-RAS de la cuenca del Rio Rocha. La curva de descarga de la Figura 119 (a) fue extendida o extrapolada para poder realizar mejor la comparación gráfica.

Como se puede ver en la Figura 118 (a) y Figura 119 (a), las curvas de descarga de las secciones simuladas por el HEC-RAS se ajustan bastante bien a los valores de la gráfica de caudales vs niveles de agua observados; por lo tanto el modelo hidrodinámico de la cuenca del Rio Rocha ha sido validado.

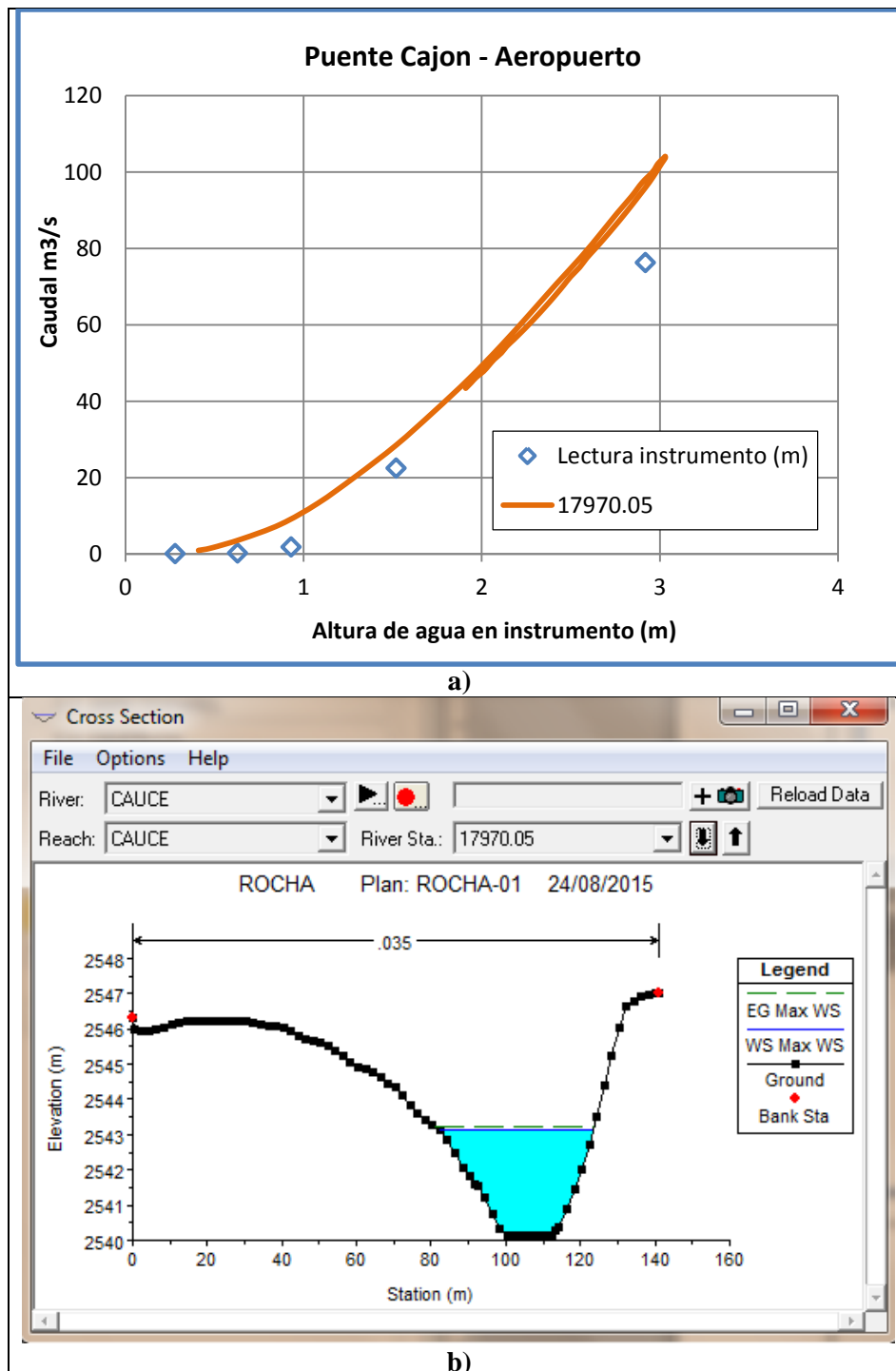


Figura 118. a) Curva de Descarga Puente Cajon (Aeropuerto-CBBA) vs. Sección 17970.05 y b) Sección 17970.05 (HEC-RAS)

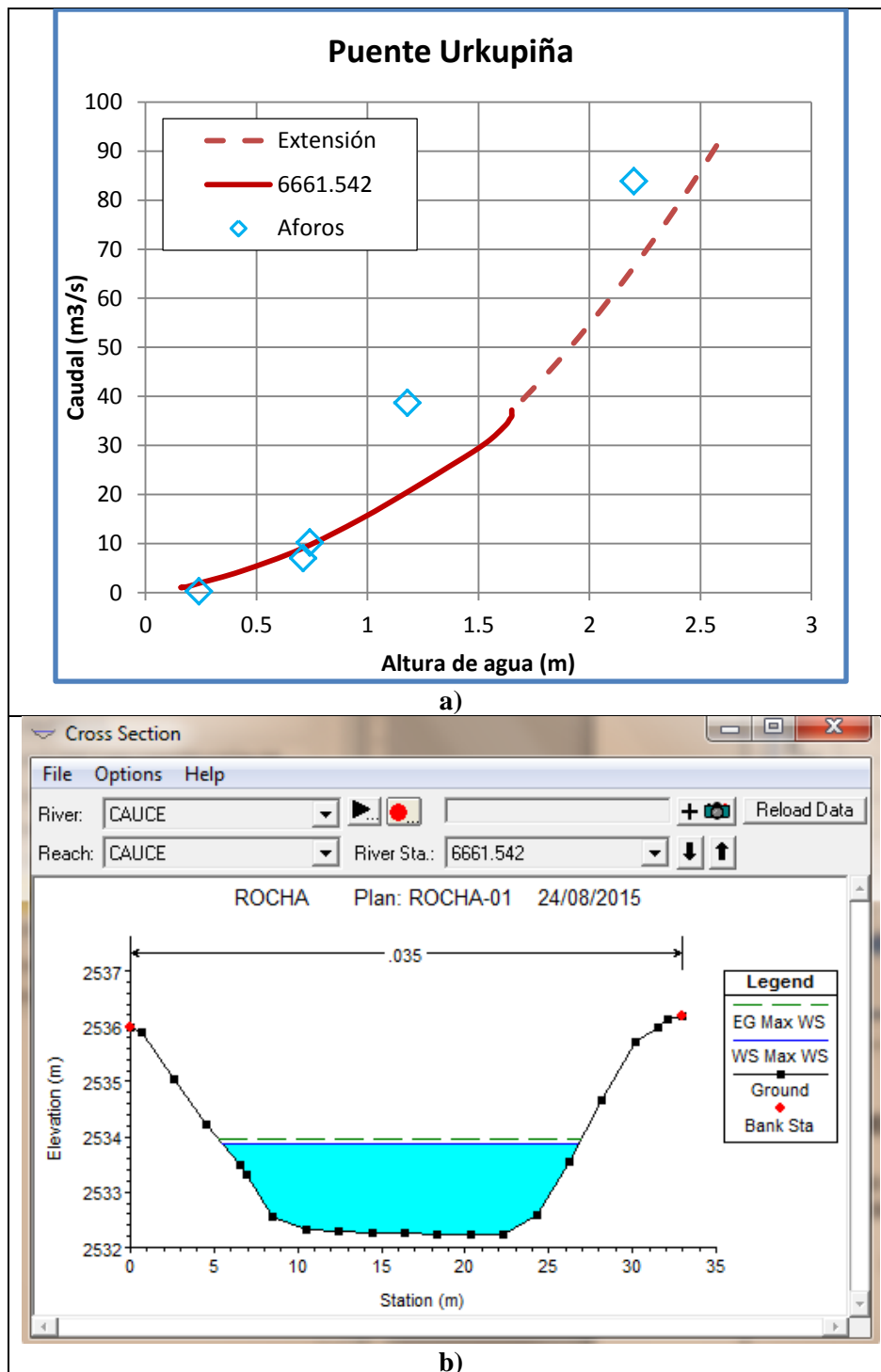


Figura 119. a) Curva de Descarga Puente Urkupiña vs. Sección 6661.542 extendida y b) Sección 6661.542 (HEC-RAS)

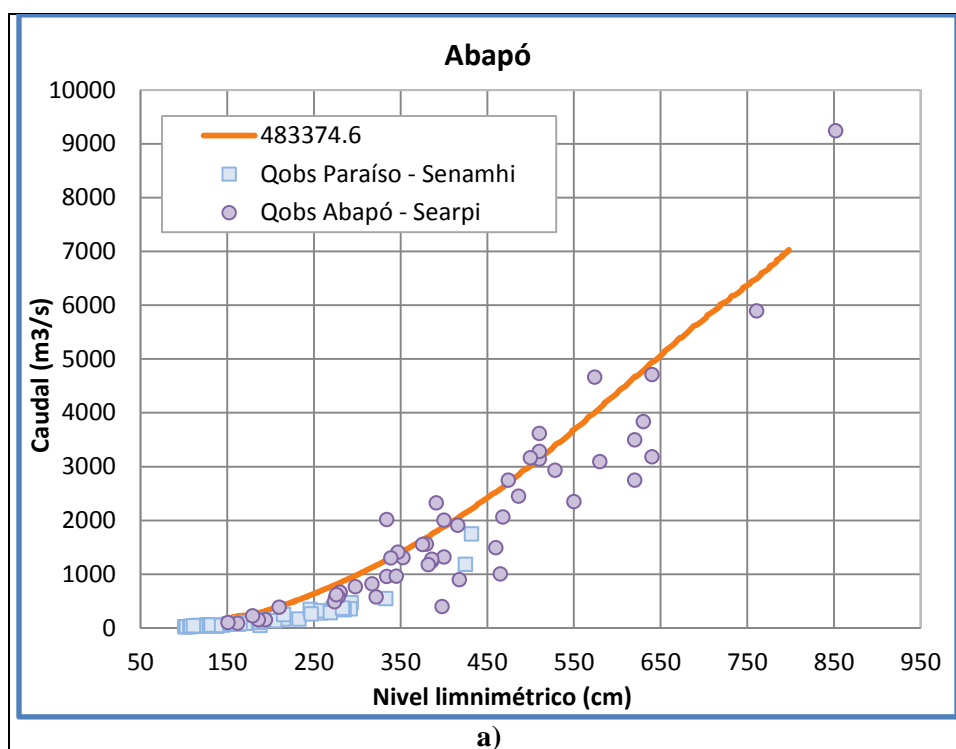
Otra forma de verificar los resultados del modelo hidrodinámico es realizando una validación de las áreas de inundación simuladas y observadas.

5.5.3.2 Cuenca del Rio Grande

La Figura 120 (a) muestra la comparación de la curva de descarga generada por los resultados del modelo en la Sección 483374.6 con los valores de caudal y nivel de agua observados para el Puente Abapó (Paraíso). Y la Figura 120 (b) muestra la Sección 483374.6 en el modelo HEC-RAS de la cuenca del Rio Grande.

La Figura 121 (a) muestra la comparación de la curva de descarga generada por los resultados del modelo en la Sección 298608.8 con los valores de caudal y nivel de agua observados para el Puente Pailas. Y la Figura 121 (b) muestra la Sección 298608.8 en el modelo HEC-RAS de la cuenca del Rio Grande.

Como se puede ver en la Figura 120 (a) y Figura 121 (a), las curvas de descarga de las secciones simuladas por el HEC-RAS se ajustan bastante bien a los valores de la gráfica de caudales vs niveles de agua observados; por lo tanto el modelo hidrodinámico de la cuenca del Rio Grande ha sido validado.



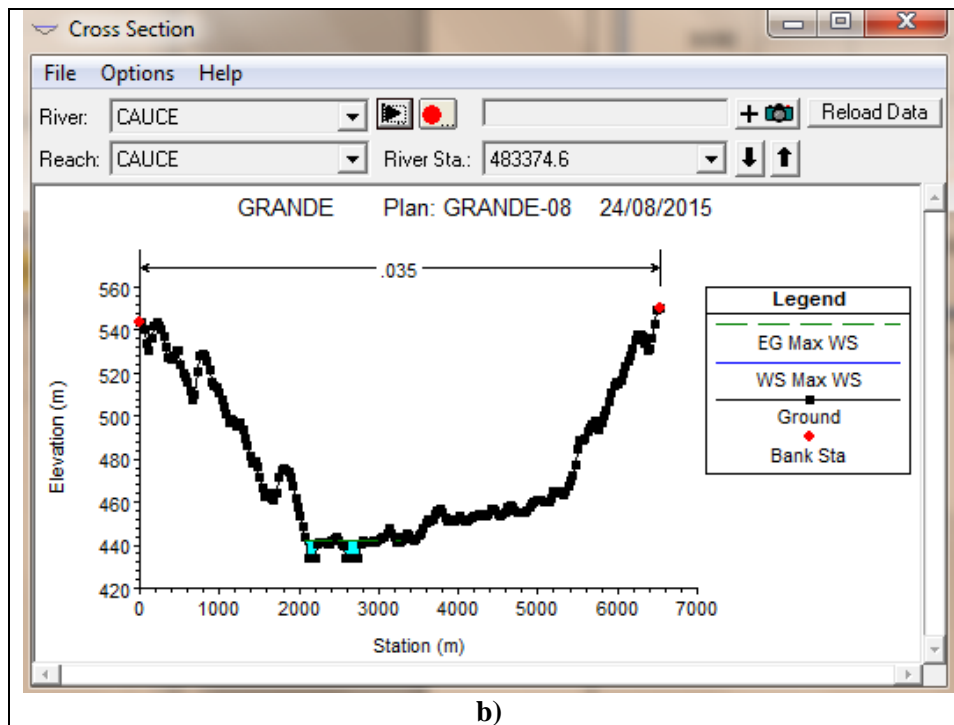
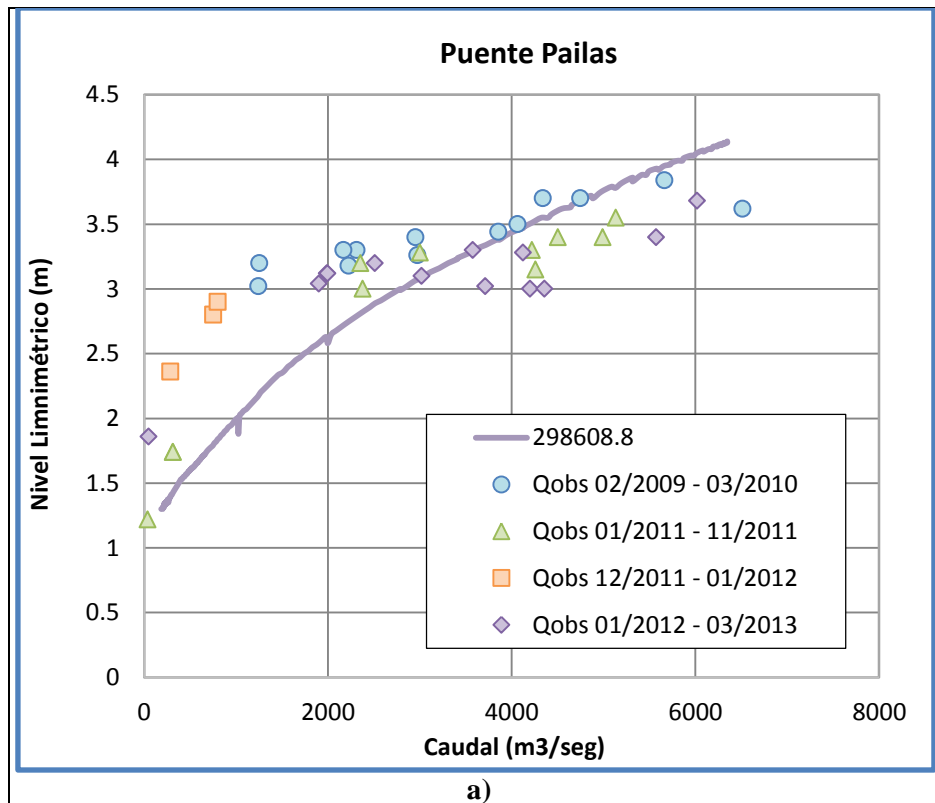


Figura 120. a) Curva de Descarga Abapó (Paraíso) vs. Sección 483374.6 y b) Sección 483374.6 (HEC-RAS)



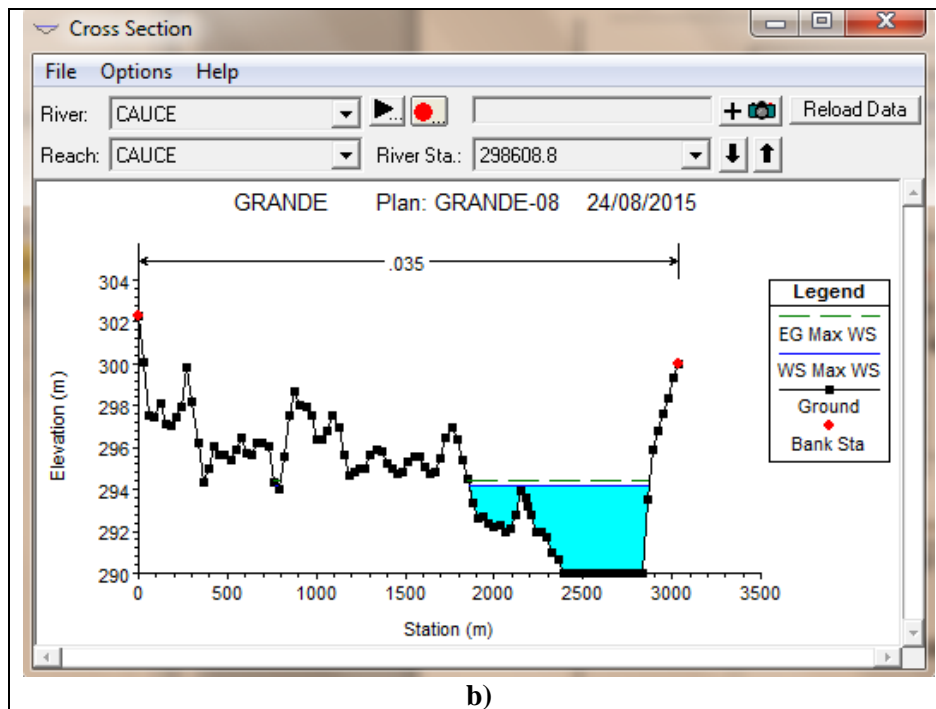


Figura 121. a) Curva de Descarga Puente Pailas vs. Sección 298608.8 y b) Sección 298608.8 (HEC-RAS)

5.5.4 Delimitación y validación de las áreas de inundación

La determinación de las áreas de inundación se las realizó con la herramienta *RAS Mapper* del HEC-RAS.

La metodología que se sigue para la validación de las áreas de inundación consiste en elaborar figuras comparativas de las inundaciones simuladas con el HEC-RAS vs. Inundaciones observadas.

5.5.4.1 Cuenca del Rio Rocha

Para la cuenca del Rio Rocha el año que sirve de comparación entre lo observado y lo simulado es el del 2011-2012, ya que para este periodo se cuenta con datos observados de inundaciones. También para el mismo evento de inundación se cuenta con áreas de inundación producidas por la gobernación de Cochabamba, las cuales marcan zonas inundadas importantes. Cabe recalcar que el objetivo del trabajo de la gobernación no fue delimitar todas las áreas inundadas, por lo que muchas zonas pueden haber quedado fuera de la delimitación.

La Figura 122 muestra la comparación de la inundación del año 2011-2012 simulada por el modelo vs la inundación observada del 2011-2012. Además esta figura muestra la variación de las profundidades en el área de inundación modelado que llegan hasta aproximadamente 4.75 m de profundidad de inundación. Esta figura muestra como las áreas de inundación observadas-2011-2012 son muy bien representadas por las áreas de inundación del modelo hidráulico del Rio Rocha. Solo hay dos manchas de inundación

observadas que el modelo no pudo representar; porque en ese sector durante el evento del 2011 no se contaba con la canalización de tramos importantes que hoy en día están implementadas. Es importante tener en cuenta que la topografía utilizada para el modelo hidrodinámico es del 2015. En la Figura 122 se puede apreciar la totalidad de la inundación del Rio Rocha, debido a que las secciones tomadas en cuenta para el modelo hidrodinámico son extensas y cubren las áreas inundables como se puede ver en la Figura 123.

La Figura 124 muestra la comparación de la inundación modelada-2011 vs una inundación amplificada al doble en magnitud que la del 2011. Como se puede ver el área de inundación aumenta considerablemente y con una tormenta de este tipo se llegan a afectar una gran parte de la población que vive cerca de la ribera del Rio Rocha, significando pérdidas económicas de gran magnitud en infraestructura, cultivos, ganado, etc.

Se puede observar en las figuras mencionadas del Rio Rocha que las áreas de inundación modeladas simulan muy bien las áreas de inundación observadas el año 2011; por lo que podemos afirmar que las áreas de inundación modeladas han sido validadas, y que el modelo HEC-RAS ha sido calibrado y validado para la cuenca del Rio Rocha.

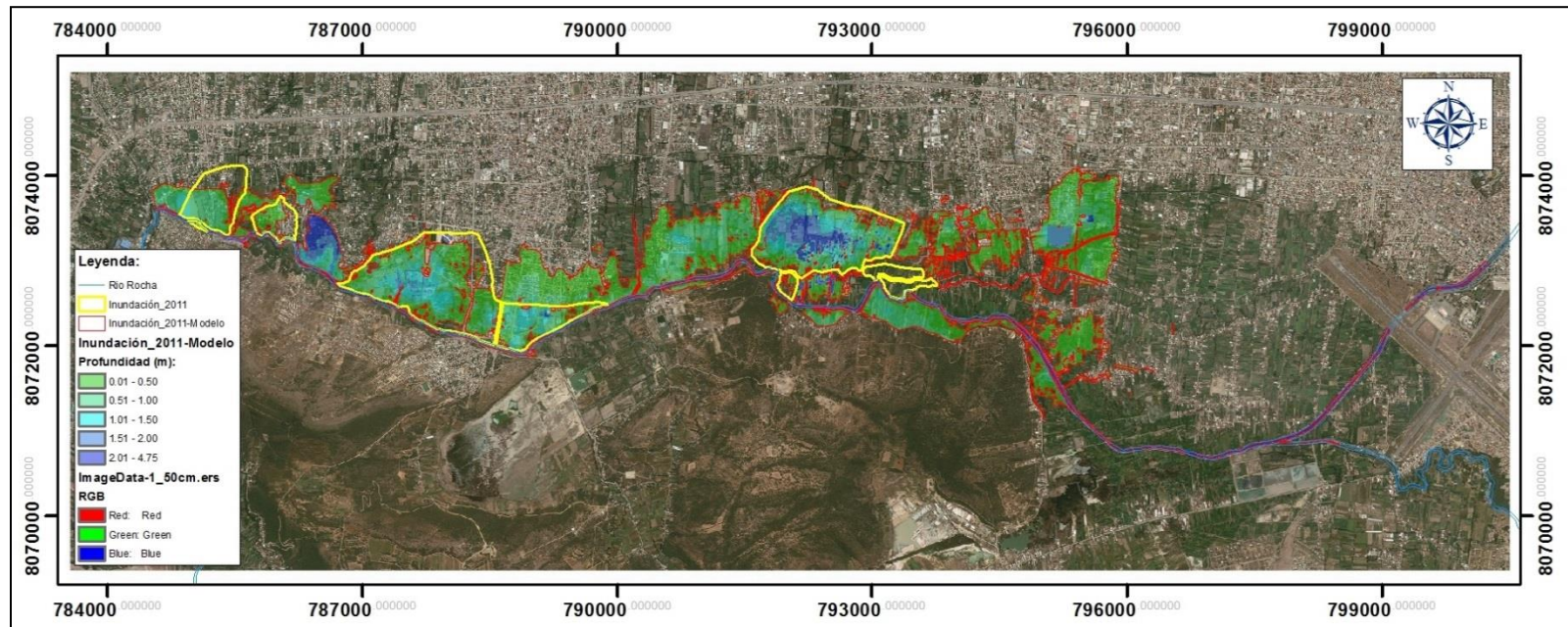


Figura 122. Inundación 2011- Observada vs. Modelada, Rio Rocha

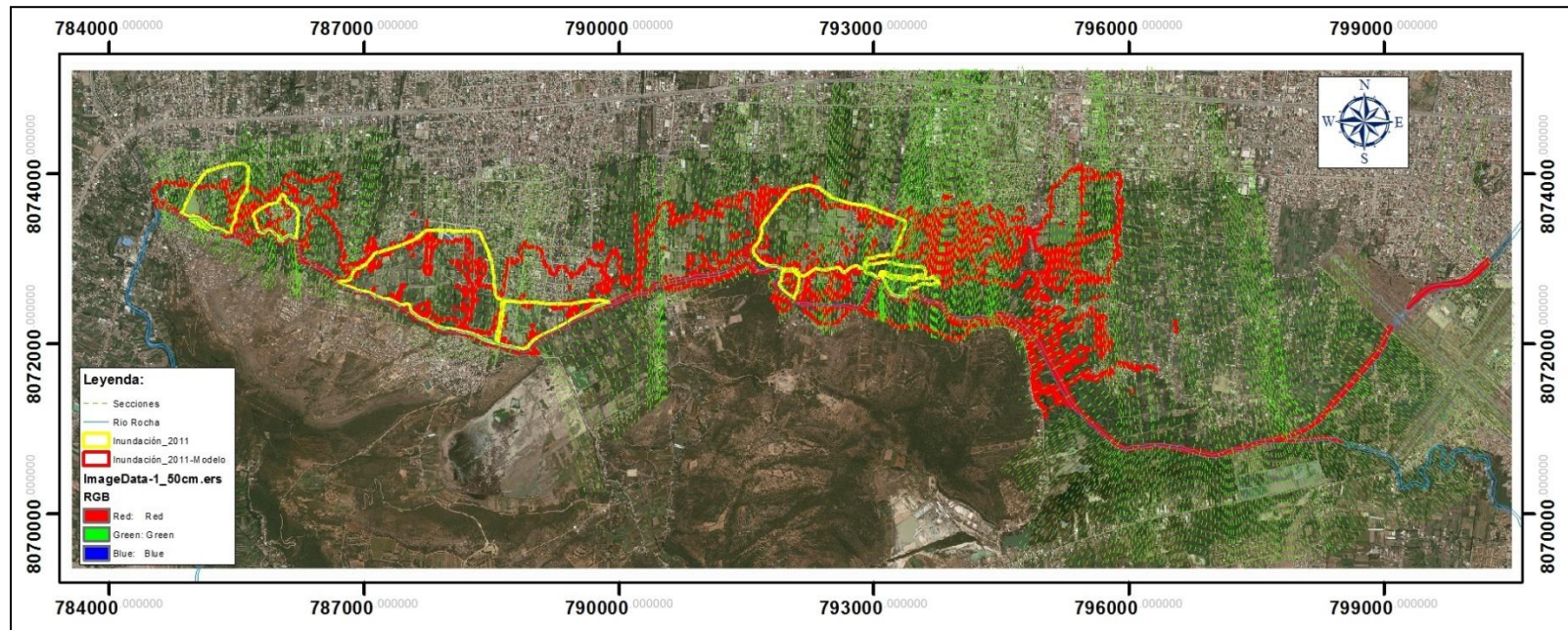


Figura 123. Secciones transversales tomadas en cuenta para la modelación hidráulica del Rio Rocha

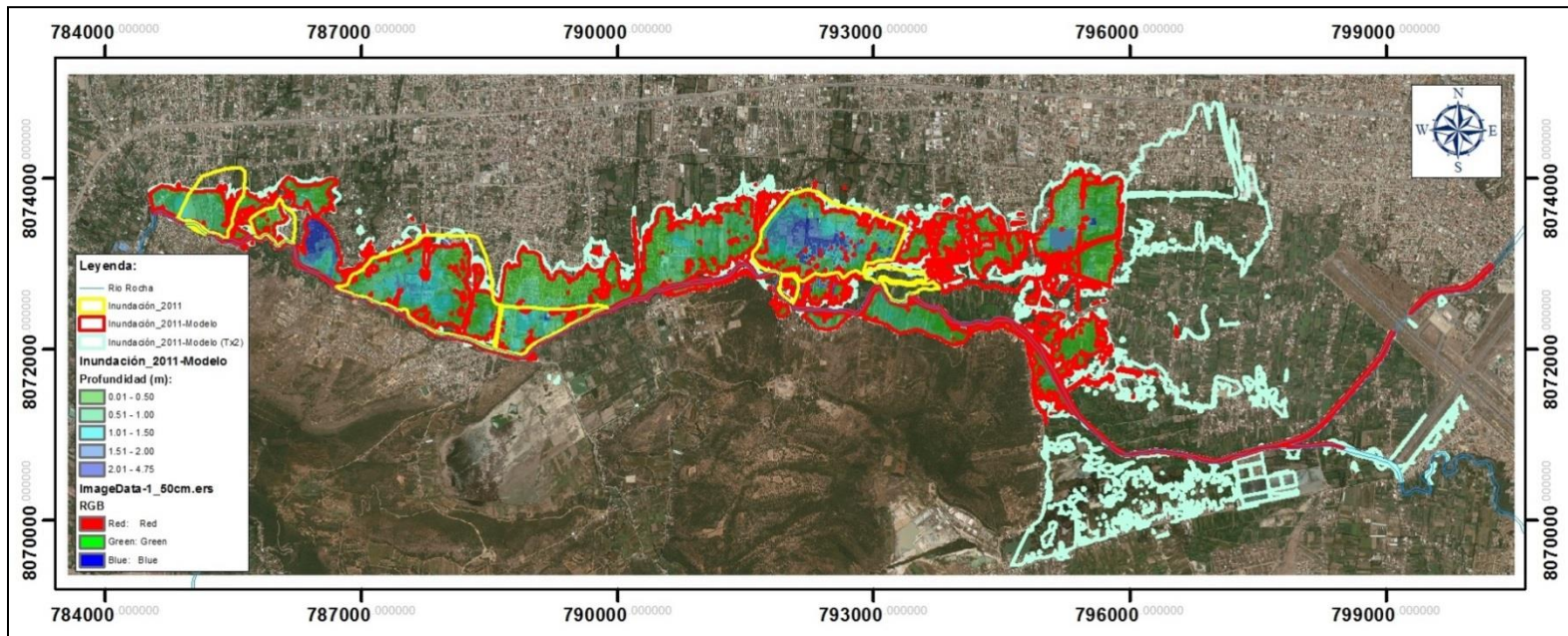


Figura 124. Inundación 2011 vs. Inundación 2011 con tormenta de magnitud doble de dicho año (ambas modeladas), Rio Rocha

5.5.4.2 Cuenca del Rio Grande

El año de inundación que sirve de comparación entre lo observado y lo simulado es el del 2008 para la cuenca del Rio Grande, ya que es este año el que se corrió en el modelo HEC-RAS y se cuenta con datos observados de dicho año.

La Figura 125 muestra la comparación de la inundación del año 2008 simulada por el modelo vs la inundación observada. Además esta figura muestra la variación de las profundidades en el área de inundación modelado que llegan hasta aproximadamente 10 m de profundidad de inundación (ocurrida en el cauce).

En la Figura 125 no se puede apreciar la totalidad de la inundación del Rio Grande, debido a las limitaciones del campo computacional, donde las secciones tomadas en cuenta para el modelo hidrodinámico no llegan a cubrir las inundaciones históricas, esto debido a la complejidad del sistema y a la magnitud del área en estudio (Figura 126).

La Figura 127 muestra la comparación de la inundación modelada-2008 vs una inundación amplificada al doble que la del 2008; como se puede ver las áreas de inundación están suscritas dentro las área observadas.

La Figura 128 muestra la comparación de la inundación modelada 2008 vs. Inundaciones observadas los años 2001, 2004 y 2008.

Aunque se tuvo este problema del ancho de las secciones, se puede ver en las figuras del Rio Grande que las áreas de inundación modeladas caen dentro de las áreas de inundación observadas para los diferentes años; por lo que podemos mencionar que las áreas de inundación modeladas han sido validadas.

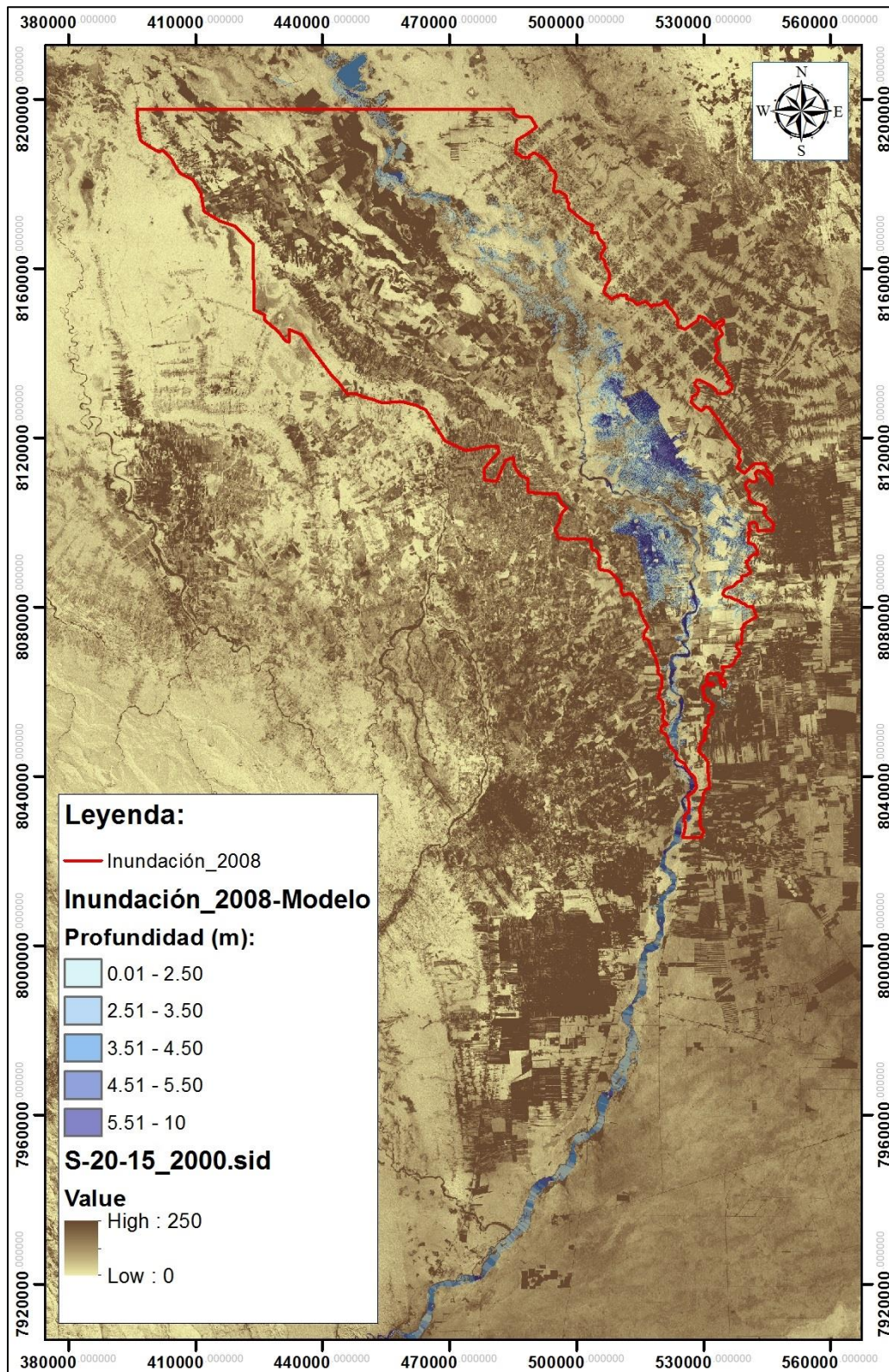


Figura 125. Inundación 2008- Modelada vs Observada, Rio Grande

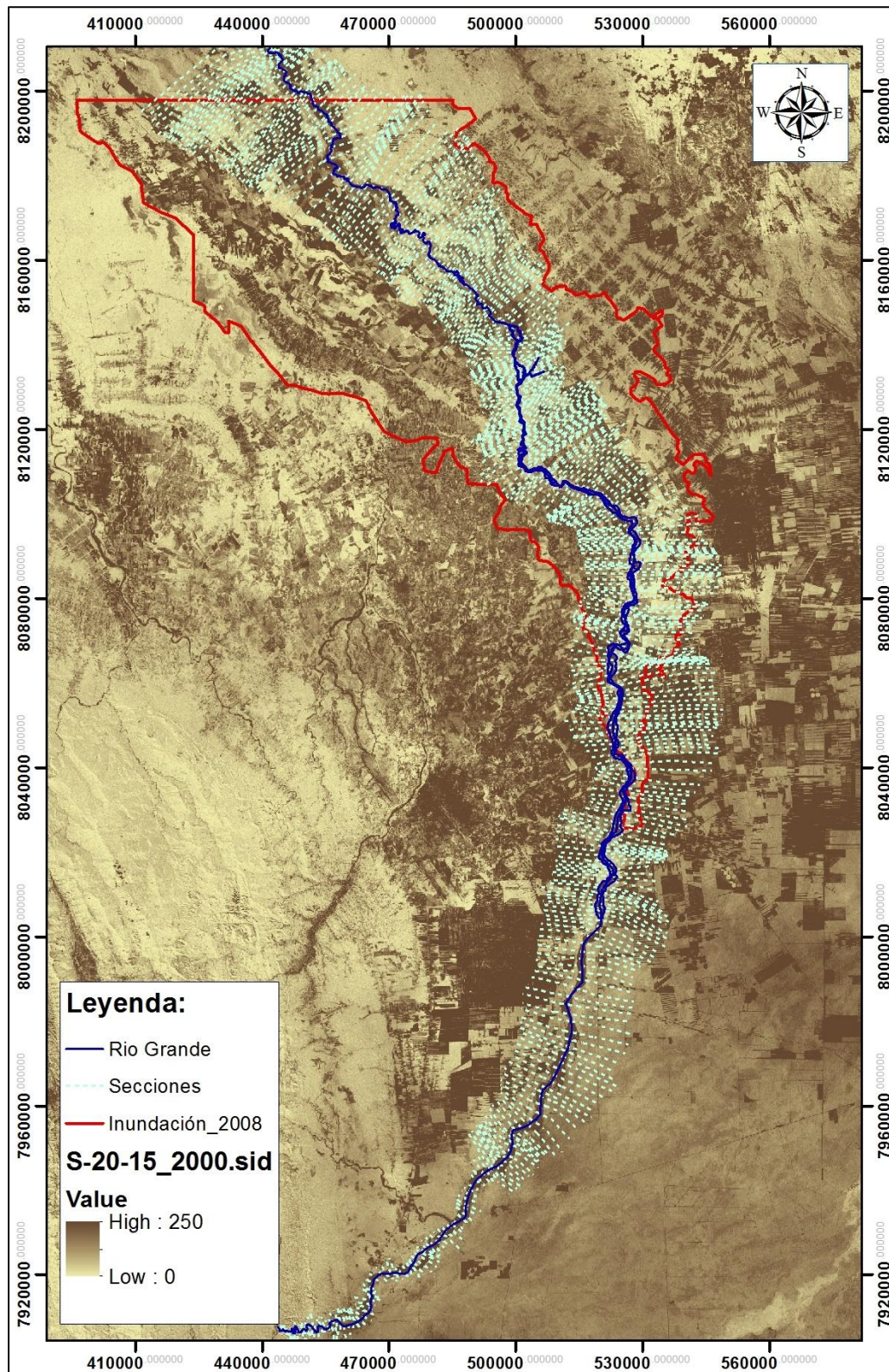


Figura 126. Secciones transversales tomadas en cuenta para la modelación hidráulica del Rio Grande

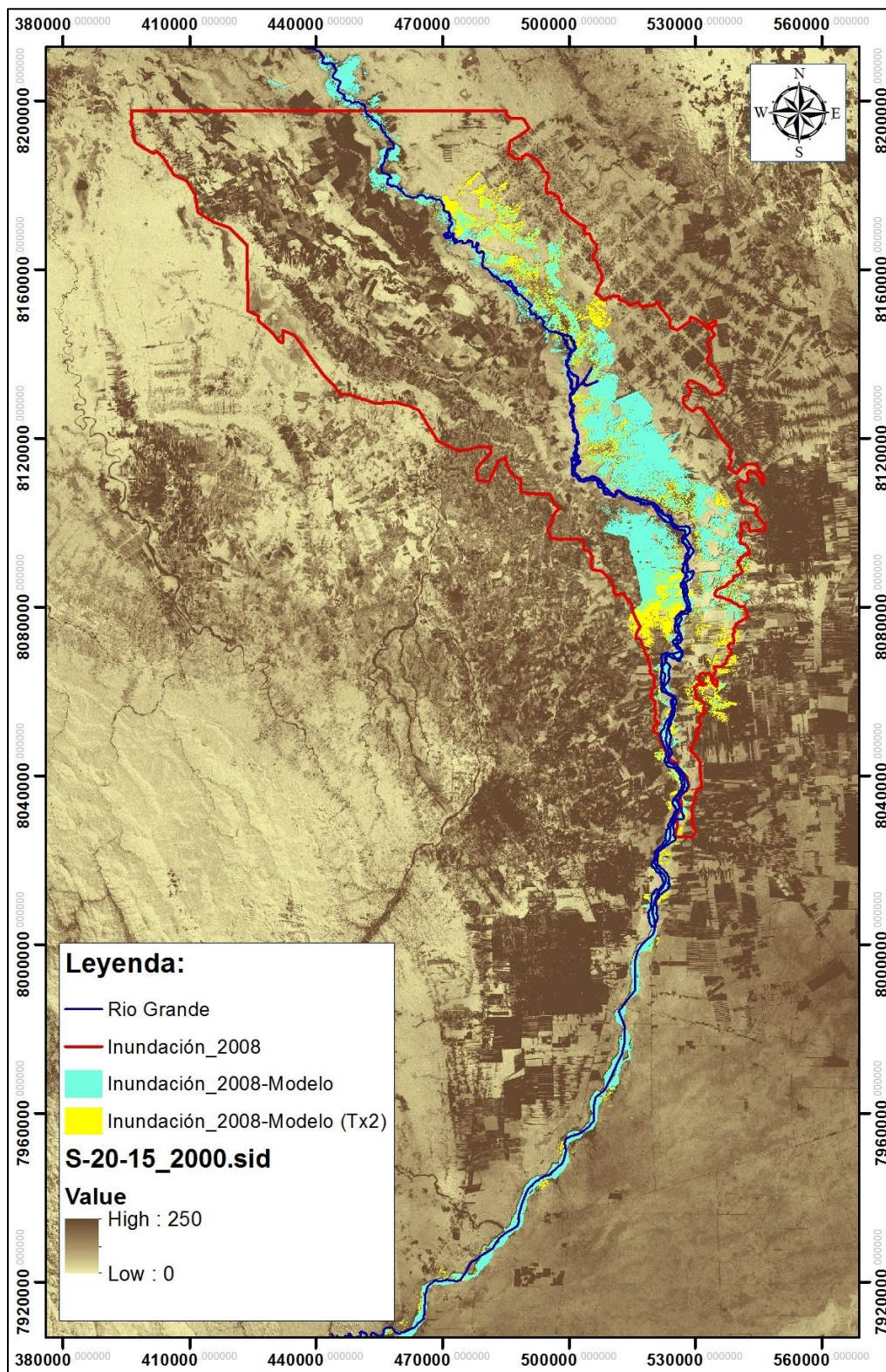


Figura 127. Inundación 2008 vs. Inundación 2008 con tormenta de magnitud doble de dicho año (ambas modeladas), Rio Grande

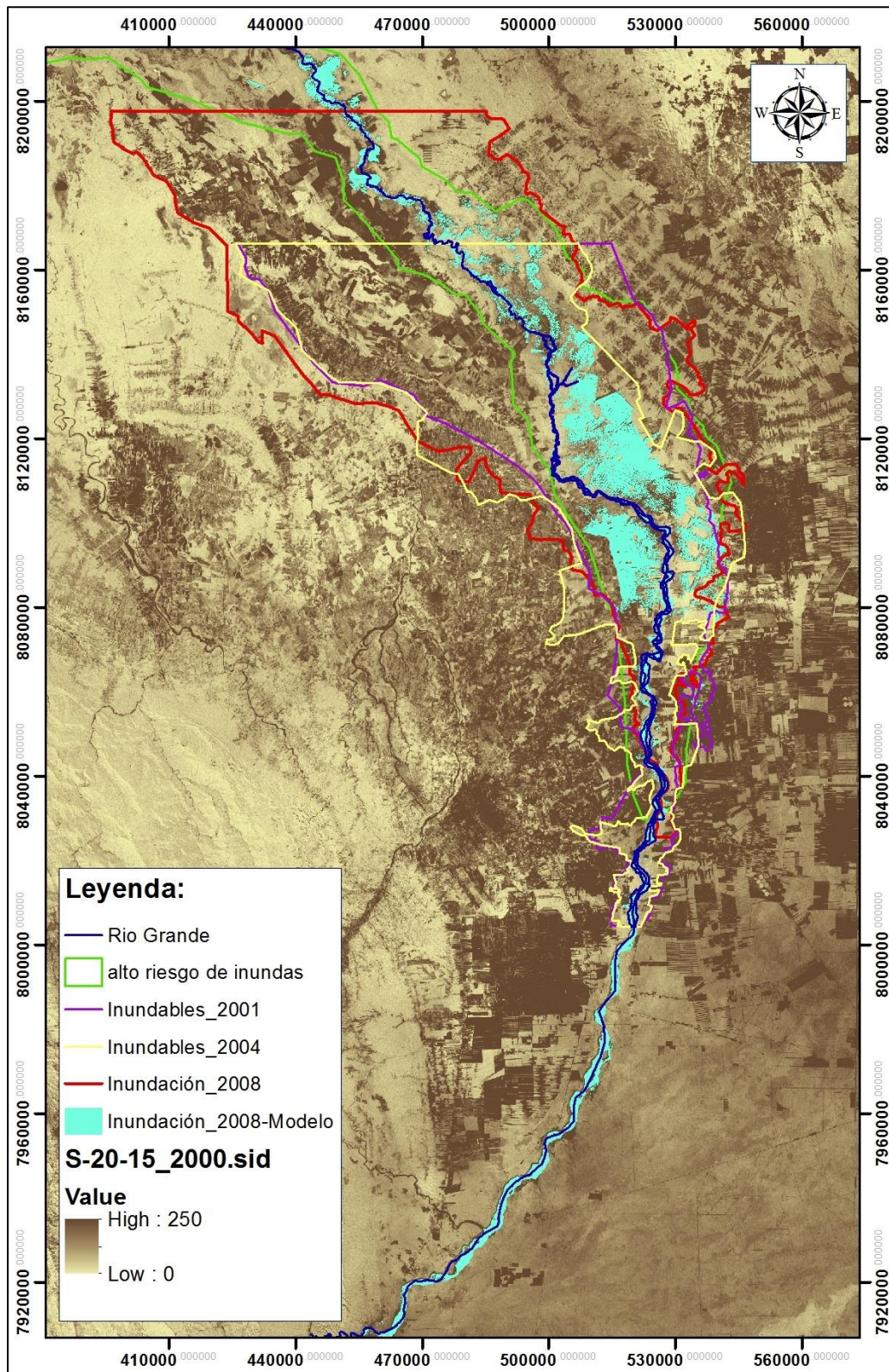


Figura 128. Inundación Modelada 2008 vs. Inundaciones Observadas 2001, 2004 y 2008 (Rio Grande)

La aplicación del modelo HEC-RAS a las cuencas del Rio Rocha y del Rio Grande brindo resultados muy satisfactorios ya que la validación del modelo para ambas cuencas mediante la comparación de curvas de descarga en dos secciones de control por cuenca, Puente Cajon (Aeropuerto-CBBA) y Puente Urkupiña para la cuenca del Rio Rocha y Puente Abapó (Paraíso) y Puente Pailas para la cuenca del Rio Grande, presentó un muy buen ajuste entre las descargas medidas por aforos y la curva de descarga generada por el modelo hidráulico en todas las secciones de control.

Pese al problema del ancho de las secciones del modelo hidráulico del Rio Grande, los resultados obtenidos en cuanto a las áreas de inundación generadas por el modelo son satisfactorios para el evento de inundación del 2008, pues las manchas de inundación modeladas caen dentro de las franjas de inundación observadas. En este caso el modelo de simulación está representando únicamente la zona de mayor impacto por inundaciones. Para una simulación más completa se requiere la implementación de un modelo bidimensional con mayor resolución que el utilizado en el presente estudio. Este problema no se presentó en el modelo hidráulico del Rio Rocha, los resultados obtenidos de la comparación de las áreas de inundación modeladas y observadas para el Rio Rocha, muestran que el modelo representa satisfactoriamente el evento de inundación del 2011-2012.

Mediante estos dos métodos se pudo realizar la validación satisfactoria de los modelos hidráulicos para las cuencas del Rio Rocha y Rio Grande.

5.6 RESULTADOS DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN EN LOS TRAMOS CRÍTICOS

5.6.1 Archivos .AME de inundación

Utilizando como base la información de amenaza de lluvias, sumado a la información de los modelos hidrológicos e hidráulicos ya calibrados de acuerdo con el numeral anterior, se genera la información de amenaza por inundación en cada uno de los tramos críticos de análisis. Los análisis se realizan utilizando el software *IT-Inundación 1.0* el cual genera los archivos “.AME” de inundación. Adicionalmente y con el software *CAPRA-GIS V2.0* se pueden obtener las figuras de amenaza probabilistas de inundación en los cuales se presenta la distribución geográfica de las profundidades de inundación para varios periodos de retorno de análisis en cada una de las zonas consideradas. Los archivos de amenaza de inundación generados son los indicados en la Tabla 37.

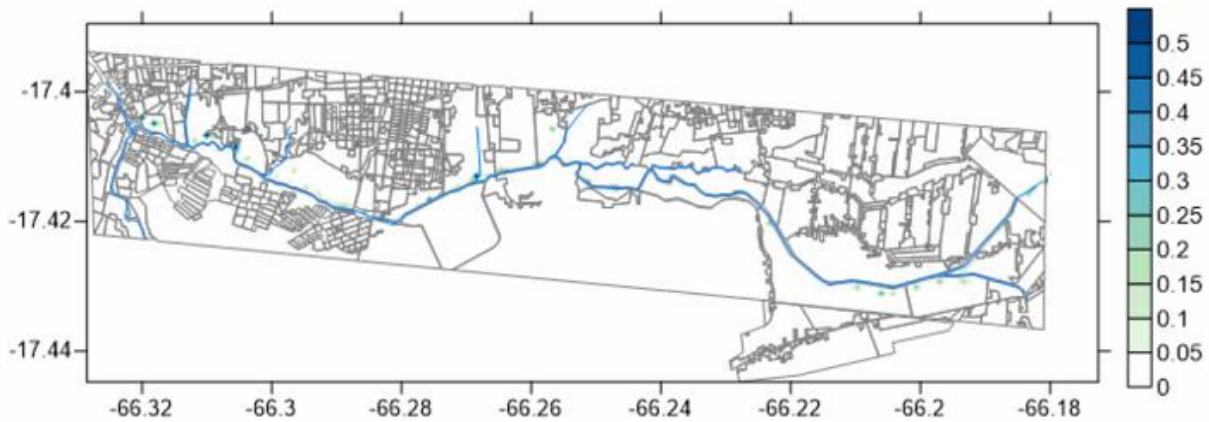
Tabla 37. Archivos de amenaza de inundación generados para cada una de las cuencas analizadas

CUENCA	Amenazas de lluvia utilizada para el análisis	Nombre del archivo “.AME” de inundación	Número de eventos estocásticos de inundación
ROCHA	Análisis estocástico de lluvias no-huracanadas	AMEInundacion_Rocha_1dia.ame	600
GRANDE		AMEInundacion_Grande_5dias.ame	18

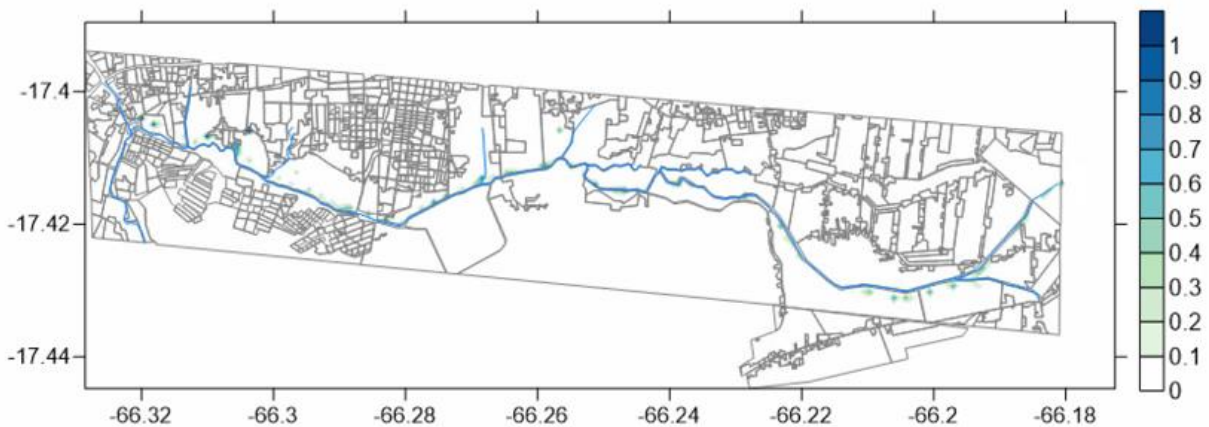
Estos archivos se utilizan directamente para el análisis del riesgo tal como se explica más adelante en el informe.

5.6.2 Amenaza de inundación probabilistas

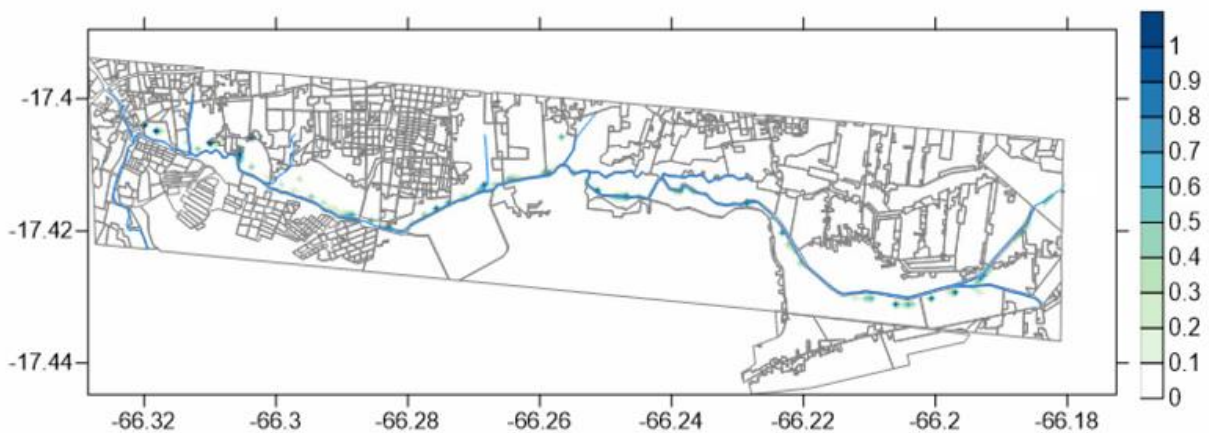
En la Figura 129 y Figura 130 se presentan las amenazas por inundación probabilistas para la cuenca del río Rocha y del río Grande, considerando duraciones (D) de 1 día y 5 días, respectivamente, y periodos de retorno (TR) de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.



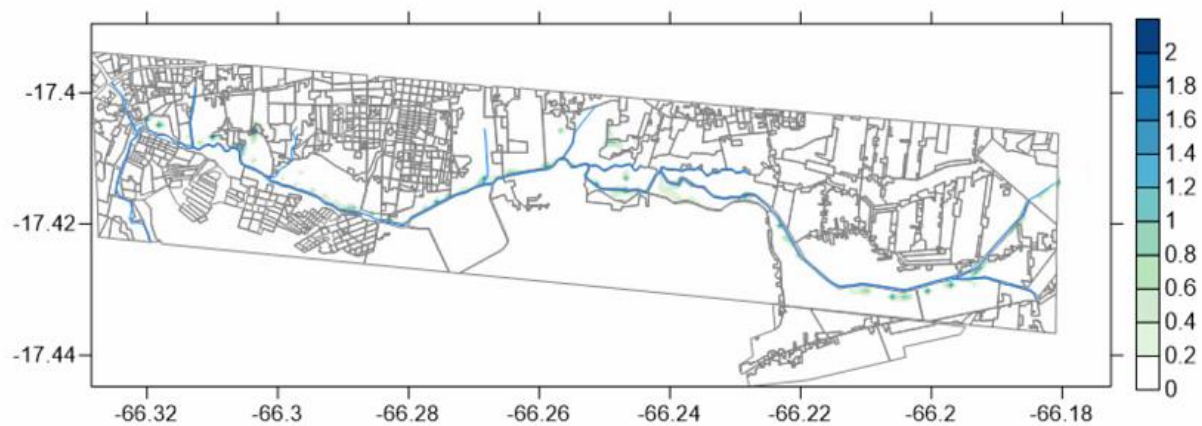
TR = 2 años



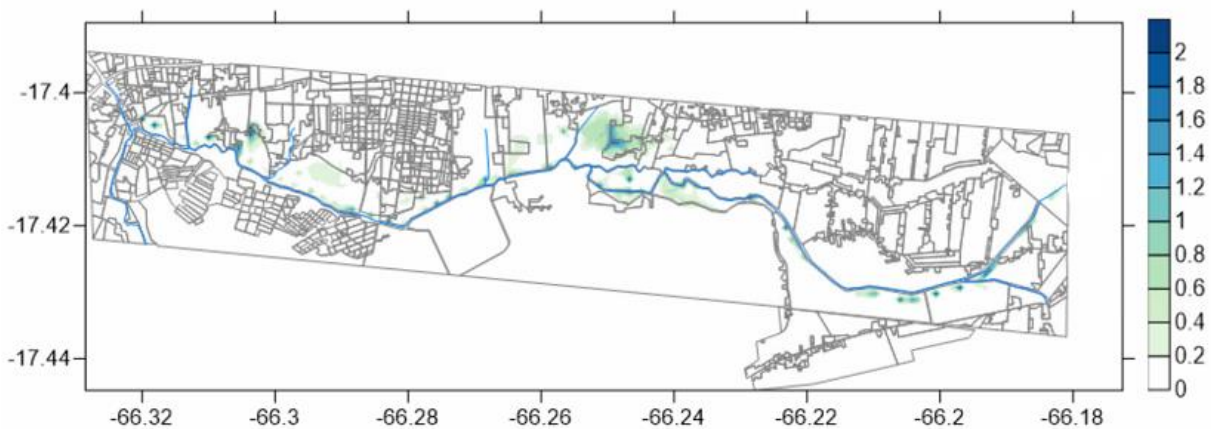
TR = 5 años



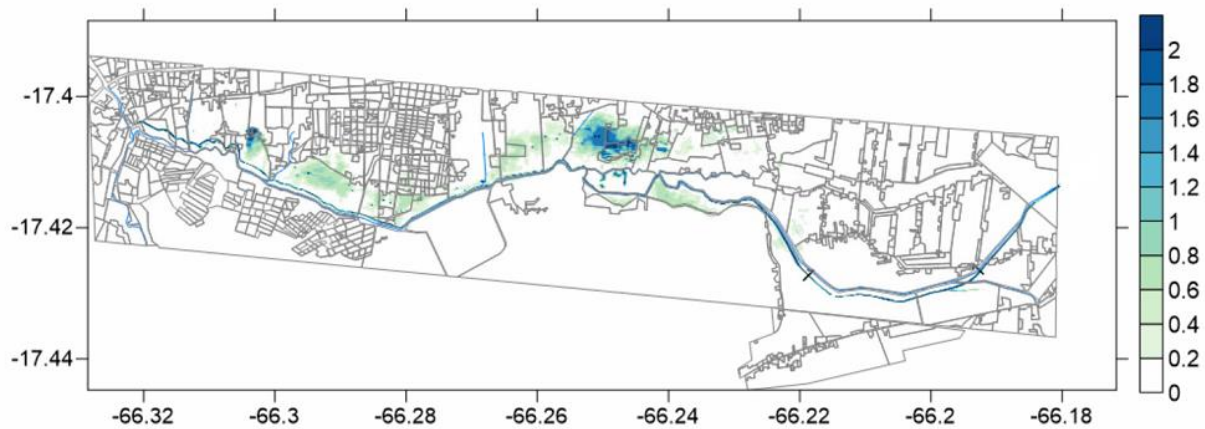
TR = 10 años



TR = 25 años

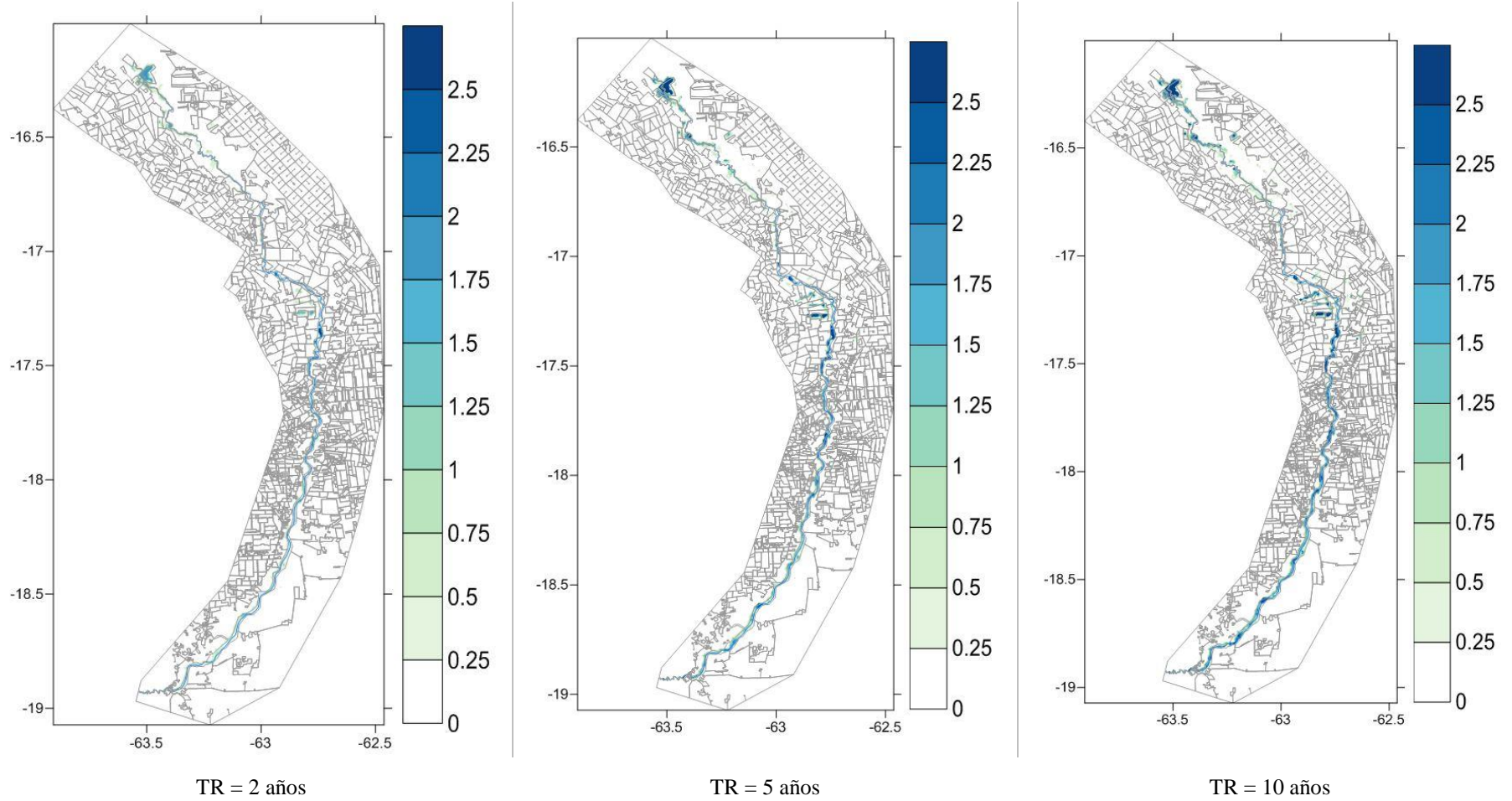


TR = 50 años



TR = 100 años

Figura 129. Inundación probabilista en la cuenca del río Rocha para duración de 1 día. Profundidad de inundación en [m]



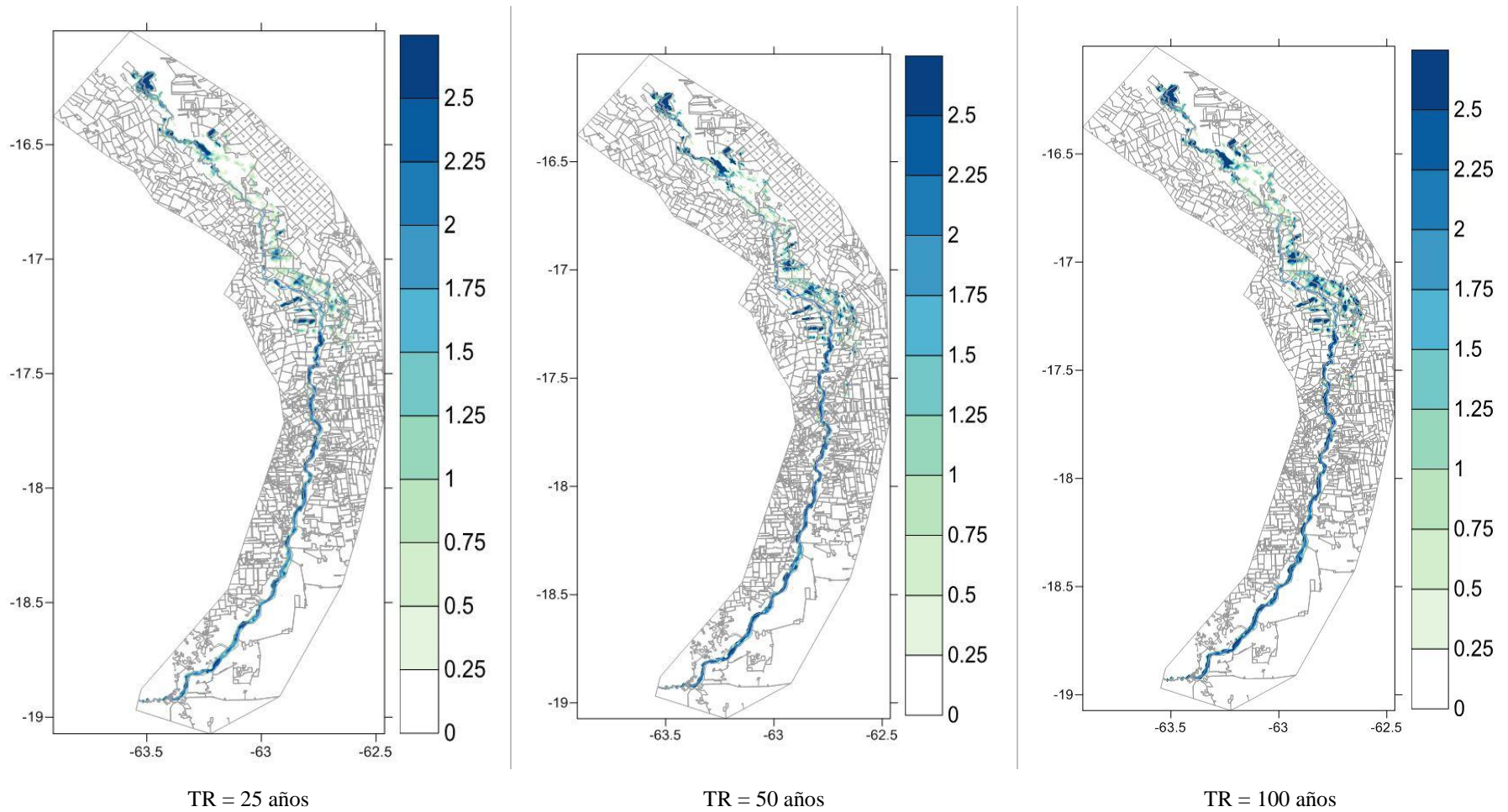


Figura 130. Inundación probabilista para la cuenca del río Grande para duración de 5 días. Profundidad de inundación en [m]

6 ANÁLISIS DE EXPOSICIÓN Y DE VULNERABILIDAD DE COMPONENTES EXPUESTOS

6.1 GENERALIDADES

6.1.1 Introducción

La valoración del riesgo de infraestructura expuesta exige la conformación de una adecuada base de datos geo-referenciada de componentes en las zonas identificadas como de mayor susceptibilidad y en la cual se cuente con información de amenaza de uno o varios de los fenómenos naturales que puedan producir daño o afectación. La calidad, extensión, completitud y resolución de la información de exposición requerida depende del tipo de resultados de riesgo que se desee obtener y de las aplicaciones específicas en temas de gestión del riesgo.

En particular, el inventario de componentes expuestos debe incluir información referente a los siguientes temas específicos:

- Ubicación en términos de coordenadas geográficas.
- Caracterización geométrica en planta del componente mediante un archivo en formato Shape (puntos, polilíneas, polígonos). Esta información se utiliza principalmente para visualización de datos y resultados y para definición de la intensidad del fenómeno amenazante.
- Valoración económica del componente (valor de reposición).
- Ocupación humana. (pueden considerarse diferentes escenarios).
- Tipificación del componente por medio de parámetros que permiten la posterior caracterización de la vulnerabilidad del bien.

En primera instancia se conforman bases de datos de los componentes expuestos con ciertos parámetros generales que permiten caracterizar su geometría y su vulnerabilidad y posteriormente se asignan una serie de parámetros complementarios que permiten caracterizar las variables de medición del riesgo.

La información disponible debe permitir la caracterización del riesgo en términos de afectación económica directa y en los contenidos, posible cálculo de pérdidas asociadas a la interrupción del funcionamiento y la estimación de la afectación de los ocupantes en términos de fatalidades, personas heridas que requieren servicios médicos especializados y personas afectadas (por ejemplo en términos de personas sin vivienda o sin lugar de trabajo).

6.1.2 Información básica requerida

La plataforma CAPRA está diseñada de manera que el nivel de resolución del análisis de riesgo depende de la resolución de la información disponible, específicamente en relación a la exposición. En caso de adoptar un análisis que se basa en elementos individuales que representan la exposición, se debe definir una información mínima para cada uno de estos elementos. Los requerimientos mínimos de información en este caso son los siguientes:

- Número de referencia (ID)
- Ubicación geográfica en coordenadas (Sistema de proyección WGS-84)
- Tipo constructivo para asignación de función de vulnerabilidad
- Referencia de la función de vulnerabilidad humana
- Valoración económica (Valor de reposición)
- Ocupación humana

Con estos datos y con la información correspondiente a las amenazas y la información asociada a una función de vulnerabilidad determinada de daño físico y una función de vulnerabilidad de afectación humana, quedan definidos de manera integral los parámetros para la evaluación del riesgo.

Dentro de los activos expuestos pueden incluirse diversos componentes de infraestructura incluyendo cualquier tipo de edificación y componentes tales como tramos viales, puentes, túneles, componentes del sistema eléctrico, componentes de sistema de comunicaciones, tramos de sistemas de tuberías de acueductos o alcantarillados, presas, diques, muros o cualquier componente de estructuras de contención, y en general cualquier otro componente que pueda presentar daño ante la acción del fenómeno amenazante. En el presente caso y de acuerdo con el alcance establecido para el presente proyecto se considera únicamente edificaciones ubicadas en las zonas de alta susceptibilidad de inundación y zonas de cultivo en las planicies de inundación de los ríos. Estas zonas se definen mediante áreas con un tamaño y resolución definidas de acuerdo con la calidad de la información básica disponible.

6.1.3 Información integral en centros poblados

Para construir la base de datos de edificaciones en centros poblados se utiliza principalmente la información disponible a nivel local, la información de censos recientes y un levantamiento con base en fotografías aéreas e imágenes de satélite disponibles. Considerando que la información disponible rara vez incluye todos los datos relevantes requeridos, es necesario aplicar unos algoritmos de complementación y ajuste de información que permitan contar con una base de datos completa y consistente. La información normalmente utilizada para la base de datos de edificaciones es la siguiente:

- ID Elemento
- Nombre
- Descripción
- Ubicación geográfica, a través de mapas en formato Shape (puntos, poli-líneas o polígonos).
- Número de pisos
- Área de construcción
- Uso predominante
- Tipo constructivo

- Material y tipo de fachada
- Tipo y materiales de cubierta
- Tipo y clasificación de contenidos
- Estado actual de la construcción
- Estrato socioeconómico
- Irregularidades y defectos
- Valoración económica de la estructura, elementos no estructurales y contenidos
- Ocupación máxima de la construcción en número de personas
- Información de funciones de vulnerabilidad por tipo de amenaza

Con respecto a la valoración de cada componente se debe tener en cuenta que se trata del valor de reposición y se debe en general tener información sobre:

- Valor de la estructura misma (columnas, vigas, placas, muros estructurales)
- Valor de acabados internos (muros divisorios, fachadas, cielo rasos, pisos, etc.)
- Valor de cubierta
- Valor de fachadas
- Valor de contenidos

Finalmente la ocupación a cada componente del análisis se asigna para un escenario definido por el usuario. Debe ser compatible con los índices regionales de densidad de población. Normalmente se consideran escenarios diurnos y nocturnos aunque esto es a elección del usuario. En el caso que se requiera identificar únicamente escenarios críticos se utiliza la ocupación máxima en cada componente.

6.2 INFORMACIÓN DE COMPONENTES EXPUESTOS EN ZONAS URBANAS

6.2.1 Levantamiento de información para conformar la base de datos

Para conformar la base de datos de componentes expuestos se realizaron una serie de trabajos con participación local, los cuales incluyeron las siguientes actividades:

- Recopilación de información en cada uno de los sectores seleccionados, principalmente en cada una de las alcaldías locales.
- Levantamiento de información de campo: a partir de la digitación de zonas uniformes de viviendas en zonas de interés mediante herramienta en Google Earth (ver Numeral 6.2.3).
- Validación de la información: mediante visitas de campo y validación de información en el sitio.
- Complementación y validación de la información: mediante el análisis por parte de especialistas en trabajo de oficina y utilizando para el efecto los resultados del censo de población y otros informes disponibles.

6.2.2 Criterios de clasificación de los tipos de componentes expuestos

Luego de las visitas de inspección se realizó una clasificación de los tipos de componentes expuestos que incluyen tanto tipos constructivos de viviendas y edificaciones principales, como zonas con otros usos como cultivos, bosques y otros. Las Tabla 38 y Tabla 39 resumen los tipos de componentes principales

que resultan del análisis de la información de campo en la cuenca del río Rocha y del río Grande respectivamente.

Tabla 38. Tipos de componentes principales en la zona expuesta de la cuenca del río Rocha

Sistema No.	Tipo de componentes	Descripción
1	Bodega	Edificaciones construidas con estructura de acero; con techo de lámina metálica o lámina de asbesto.
2	Adobe	Viviendas construidas con bloques macizos de tierra sin cocer secados al sol; con techo de teja o lámina metálica.
3	Mampostería simple	Viviendas construidas con paredes de mampostería estructural sin refuerzo; con techo de teja, lámina metálica o de asbesto.
4	Mampostería confinada	Viviendas construidas con paredes de mampostería estructural con elementos de concreto reforzado (vigas y columnas) en su perímetro; con techo de teja, lámina de asbesto o fibrocemento.
5	Pórticos de concreto	Viviendas construidas con pórticos de concreto reforzado; con techo de lámina de asbesto o fibrocemento o losa de concreto.
6	Precario	Viviendas construidas con paredes de paja, desecho, madera o lámina metálica; con techos de paja, desecho o lámina metálica.
7	Cultivo	Predios cultivados.
8	Lote	Predios inhabitados no cultivados.

Tabla 39. Tipos de componentes principales en la zona expuesta de la cuenca del río Grande

Sistema No.	Tipo de componente	Descripción
1	Bosque	Zona no intervenida cubierta por árboles.
2	Zona de reserva	Zona no intervenida cubierta por árboles o cuerpos de agua, protegida para la conservación del hábitat natural.
3	Cultivo heterogéneo	Zona productiva con diferente patrón y tipo de cultivo.
4	Cultivo homogéneo	Zona productiva con el mismo patrón y tipo de cultivo.
5	Cultivo semihomogéneo	Zona productiva con algunas porciones homogéneas y algunas porciones heterogéneas de cultivo.
6	Construcciones - Adobe	Zona urbana con edificaciones construidas con bloques macizos de tierra sin cocer secados al sol.
7	Construcciones - Madera	Zona urbana con edificaciones construidas con estructura de madera.
8	Construcciones - Mampostería	Zona urbana con edificaciones construidas con paredes de mampostería estructural.
9	Construcciones - Precario	Zona urbana con edificaciones construidas con paredes y techos de paja, desecho, madera o lámina metálica.
10	Centro productivo	Zona de edificaciones dedicadas a la producción industrial.
11	Galpones	Edificaciones simples dedicadas a la cría de animales o al almacenamiento de materiales o productos agrícolas.

En la Figura 131 y Figura 132 se presentan algunas fotografías representativas de los tipos de componentes definidos en las bases de datos.



Adobe



Bodega



Mampostería confinada



Mampostería simple



Pórticos de concreto



Precario



Cultivos



Lotes

Figura 131. Fotografías representativas de los diferentes tipos identificados en la cuenca del río Rocha



Bosque



Zona de reserva



Cultivo heterogéneo



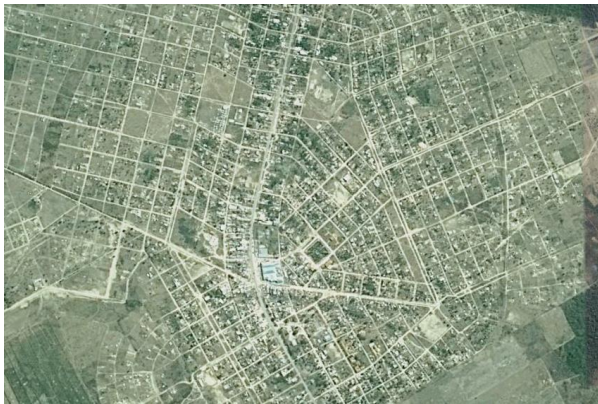
Cultivo homogéneo



Cutivo semihomogéneo



Galpones



Zona urbana



Centro productivo

Figura 132. Fotografías representativas de los diferentes tipos de componentes identificados en la cuenca del río Grande

6.2.3 Conformación de bases de datos de exposición

En la Figura 133 y Figura 134 se presentan las zonas estudiadas en la cuenca del río Rocha y en la cuenca del río Grande, de las cuales la mayor parte fueron levantadas haciendo uso de imágenes satelitales y completadas con las fotografías tomadas en las visitas de campo (ver Anexo 2). Dichas figuras muestran la distribución espacial de los diferentes tipos constructivos que fueron encontrados en las áreas levantadas.

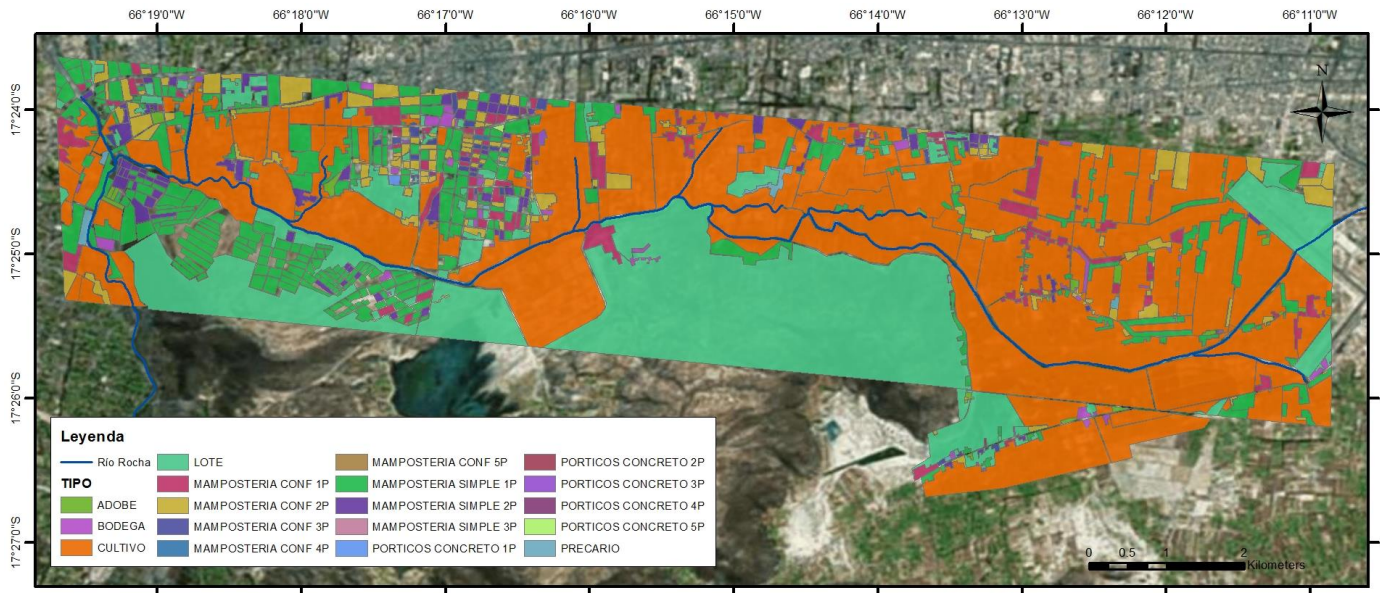


Figura 133. Levantamiento de edificaciones expuestas en la cuenca del río Rocha

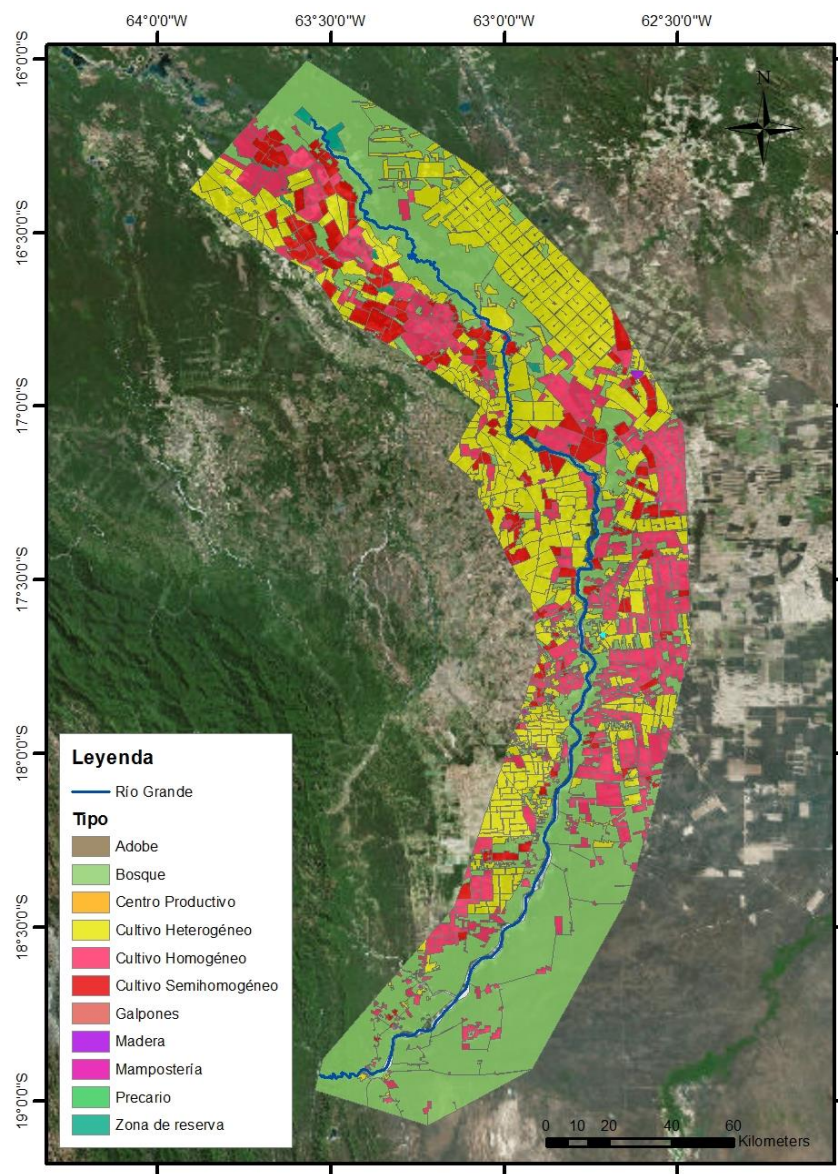


Figura 134. Levantamiento de edificaciones expuestas en la cuenca del río Grande

La base de datos conformada en formato tipo Shape se presenta como anexo digital al informe. La Tabla 40 resume la información contenida en cada uno de los archivos de exposición conformados.

Tabla 40. Resumen de la información contenida en los archivos de exposición

Cuenca	Archivo	Área zona expuesta (km ²)	Área cultivada (km ²)	Área construida en planta (km ²)	Longitud a lo largo del río (km)	Número de habitantes en la zona	Número de edificaciones en la zona
Rocha	Rocha_Exposicion.shp	49	25	2.23	55	77,894	13,635
Grande	Grande_Exposicion.shp	19,164	11,153	6.86	464	365,369	40,067

6.2.4 Validación de la información de bases de datos de exposición

Dada la magnitud de la zona de estudio en la cuenca del río Grande y ante la imposibilidad de llevar a cabo visitas e inspecciones de campo detalladas, la base de datos de exposición para esta cuenca se construyó a partir de imágenes satelitales, obtenidas de WorldPop, y se consideró importante validar la información utilizando el Censo de Población y Vivienda de 2012. (INE, 2012). Se identificaron los municipios que conforman el área de estudio y se calculó el porcentaje de área total de cada municipio que está dentro de la zona expuesta (ver Figura 135). En la Tabla 41 la información del censo se ponderó respecto a dichos porcentajes para así relacionarla con la base de datos de componentes expuestos. El municipio de Santa Cruz de la Sierra se excluyó del análisis ya que la ciudad de Santa Cruz se encuentra fuera del área de estudio y por ende los valores de número total de viviendas y número total de habitantes de este municipio pueden distorsionar el análisis.

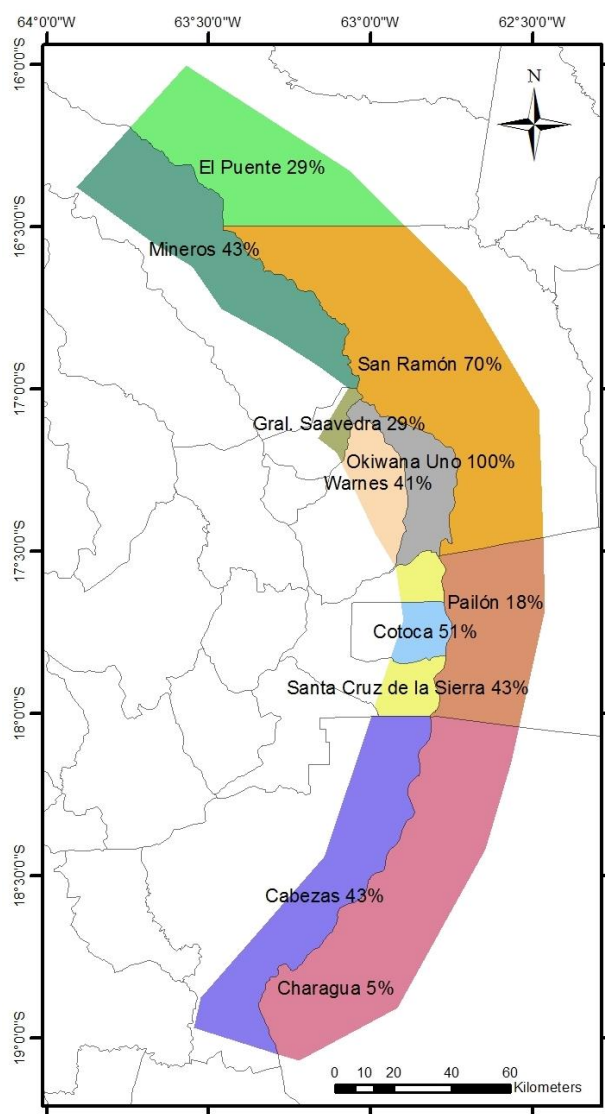


Figura 135. Municipios que componen la zona expuesta de la cuenca del río Grande

Tabla 41. Número de viviendas por municipio en la zona expuesta de la cuenca del río Grande

Municipio	No. Viviendas (Censo 2012)	No. Viviendas ponderado en la zona expuesta
Cotoca	11,254	5,791
Warnes	25,579	10,561
Okinawa Uno	2,843	2,839
Pailón	7,663	1,380
Charagua	6,893	357
Cabezas	6,248	2,690
Gral. Saavedra	3,590	1,053
Mineros	5,817	2,476
San Ramón	1,902	1,322
El Puente	4,973	1,462
Total	76,762	29,931

Se comparó el número de viviendas ponderado total de la Tabla 41 con el número total de edificaciones del levantamiento realizado con imágenes satelitales excluyendo en ambos casos la información del municipio de Santa Cruz de la Sierra.

Tabla 42. Validación del número total de viviendas

Total de viviendas del censo ponderado	29,930
Total de viviendas del levantamiento	32,350

La Tabla 42 demuestra que ambos totales están en el mismo orden de magnitud y en esta medida corroboran la información del levantamiento. Es importante considerar que las zonas urbanas no están distribuidas de forma homogénea en el territorio y por ende determinar el número de viviendas por municipio que están contenidas dentro de la zona de estudio a partir de una ponderación del área es tan sólo una aproximación para validar la información.

Este procedimiento se replicó para la información del número de habitantes. La Tabla 43 y la Tabla 44 presentan los resultados obtenidos.

Tabla 43. Número de habitantes por municipio en la zona expuesta en la cuenca del río Grande

Municipio	No. Habitantes (censo 2012)	No. Habitantes estimado
Cotoca	45,519	23,422
Warnes	96,406	39,803
Okinawa Uno	12,482	12,465
Pailón	37,866	6,819
Charagua	32,186	1,668

Municipio	No. Habitantes (censo 2012)	No. Habitantes estimado
Cabezas	26,434	11,383
Gral. Saavedra	14,209	4,167
Mineros	23,251	9,896
San Ramón	7,490	5,206
El Puente	14,205	4,177
Total	310,048	119,007

Tabla 44. Validación del número total de habitantes

Total de habitantes del censo estimado	119,000
Total de habitantes del levantamiento	163,820

Nuevamente, los totales están en el mismo orden de magnitud, las diferencias se atribuyen a la heterogeneidad de la distribución espacial de la población y se valida la información del levantamiento.

6.2.5 Tipos constructivos principales en cuencas de estudio

Como parte del levantamiento de información se cuenta con un atributo que clasifica el tipo constructivo de las edificaciones incluidas en la base de datos de cada una de las cuencas. Para la cuenca del río Rocha la definición de los tipos constructivos principales se basó en el análisis de las imágenes satelitales y de las visitas de inspección e imágenes tomadas en campo. En la Tabla 45 se presentan los tipos constructivos identificados, el área cubierta construida o área de terreno construido por cada uno de ellos y el número total de edificaciones de cada tipo.

Tabla 45. Categorías de uso en la cuenca del río Rocha

Tipo de elemento	Área cubierta construida (m ²)	% Área construida con respecto al total	No. Edificaciones en el área	% Edificaciones de cada tipo
Bodega	113,825	5.09	348	2.55
Mampostería simple - 1 piso	1,051,437	47.01	6,809	49.94
Mampostería confinada - 1 piso	278,717	12.46	1,648	12.09
Mampostería confinada - 2 pisos	429,525	19.21	2,333	17.11
Mampostería simple - 2 pisos	205,227	9.18	1,509	11.07
Pórticos de concreto - 2 pisos	6,420	0.29	38	0.28
Pórticos de concreto - 3 pisos	10,796	0.48	49	0.36
Precario	21,027	0.94	128	0.94
Mampostería confinada - 3 pisos	58,207	2.60	361	2.65
Pórticos de concreto - 4 pisos	3,651	0.16	20	0.15
Mampostería confinada - 5 pisos	2,200	0.10	20	0.15

Tipo de elemento	Área cubierta construida (m ²)	% Área construida con respecto al total	No. Edificaciones en el área	% Edificaciones de cada tipo
Mampostería confinada - 4 pisos	2,885	0.13	20	0.15
Adobe	43,508	1.95	340	2.49
Pórticos de concreto - 5 pisos	1,461	0.07	6	0.04
Pórticos de concreto - 1 piso	6,731	0.30	1	0.01
Mampostería simple - 3 pisos	855	0.04	5	0.04
Total	2,236,471	100	13,635	100

Para la definición de los tipos constructivos principales en la cuenca del río Grande se utilizó la información por municipio sobre características de viviendas recopilada por el Censo de Población y Vivienda de 2012 registrada en la Tabla 46. (INE, 2012).

Tabla 46. Número de viviendas por tipo constructivo en cada municipio de la zona expuesta en la cuenca del río Grande

Municipio	Mampostería	Adobe tapial	Precario	Piedra	Madera	Caña palma tronco
Cotoca	9,282	358	140	7	225	25
Warnes	20,231	786	483	13	1,044	207
Okinawa Uno	1,681	308	221	9	146	132
Pailón	5,122	379	250	10	1,253	25
Charagua	2,236	1,593	2,184	5	205	14
Cabezas	3,483	802	641	9	596	10
Gral. Saavedra	2,198	385	94	1	246	117
Mineros	3,961	291	24	3	616	190
San Ramón	883	138	241	3	305	48
El Puente	601	546	141	22	2,710	208

En la Tabla 47 se seleccionaron los tipos constructivos más comunes en cada municipio. De esto se obtuvo que los cuatro tipos más representativos en la zona son: mampostería, madera, adobe y precario. Estos tipos se asignaron aleatoriamente a las edificaciones del levantamiento lo cual permite tener en cuenta las diferentes vulnerabilidades en el análisis, de forma aproximada.

Tabla 47. Principales tipos constructivos por municipio de la zona expuesta en la cuenca del río Grande

Municipio	Primer tipo constructivo	Segundo tipo constructivo	Tercer tipo constructivo
Santa Cruz de la Sierra	Mampostería	Madera	Adobe
Cotoca	Mampostería	Adobe	Madera
Warnes	Mampostería	Madera	Adobe

Municipio	Primer tipo constructivo	Segundo tipo constructivo	Tercer tipo constructivo
Okinawa Uno	Mampostería	Adobe	Precario
Pailón	Mampostería	Madera	Adobe
Charagua	Mampostería	Precario	Adobe
Cabezas	Mampostería	Adobe	Precario
Gral. Saavedra	Mampostería	Adobe	Madera
Mineros	Mampostería	Madera	Adobe
San Ramón	Mampostería	Madera	Precario
El Puente	Madera	Mampostería	Adobe

La Tabla 48 presenta los tipos constructivos definidos para la cuenca del río Grande, el área cubierta construida o área de terreno construido por cada uno de ellos y el número total de edificaciones de cada tipo.

Tabla 48. Categorías de uso en la cuenca del río Grande

Tipo de elemento	Área cubierta construida (m ²)	% Área construida con respecto al total	No. Edificaciones en el área	% Edificaciones de cada tipo
Mampostería	4,511,522	65.8	28,197	70.4
Madera	796,800	11.6	5,312	13.3
Adobe	254,500	3.7	2,545	6.4
Galpones	1,023,998	14.9	1,024	2.6
Precario	176,190	2.6	2,517	6.3
Centro productivo	94,400	1.4	472	1.2
Total	6,857,410	100	40,067	100

Finalmente, las Figura 136 y Figura 137 presentan gráficamente la información de número de edificaciones por tipo constructivo, en cada una de las dos cuencas.

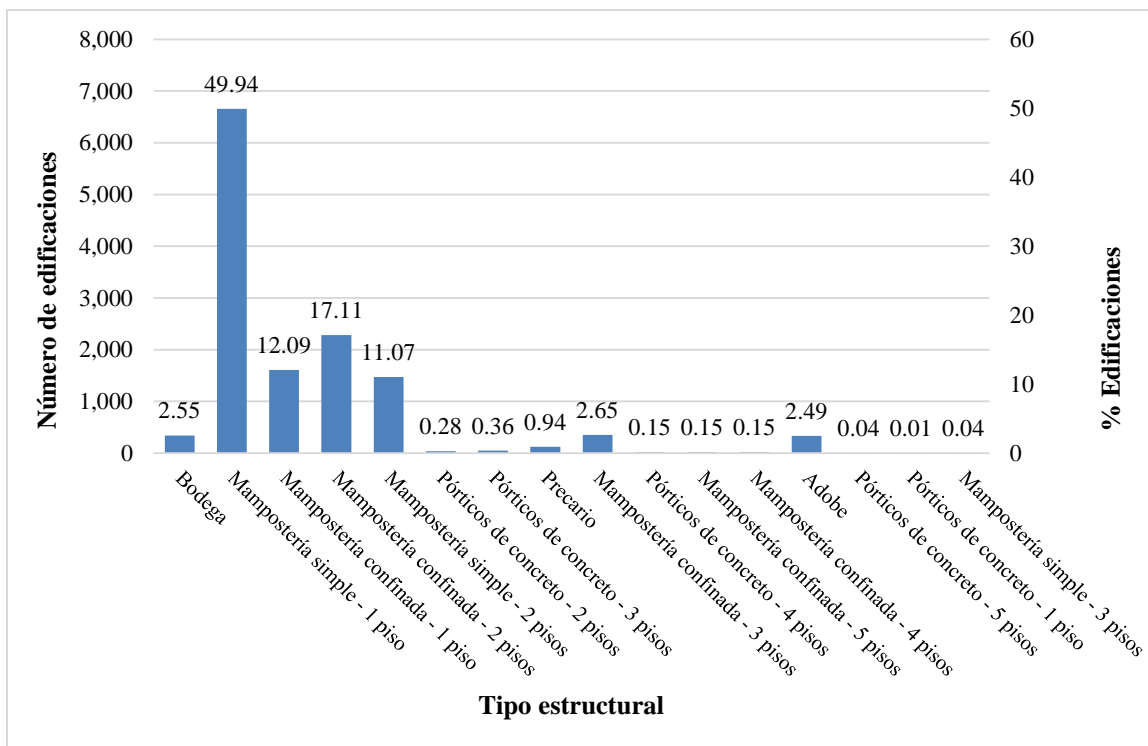


Figura 136. Gráfico de frecuencia de número de edificaciones según tipo constructivo – Cuenca del río Rocha

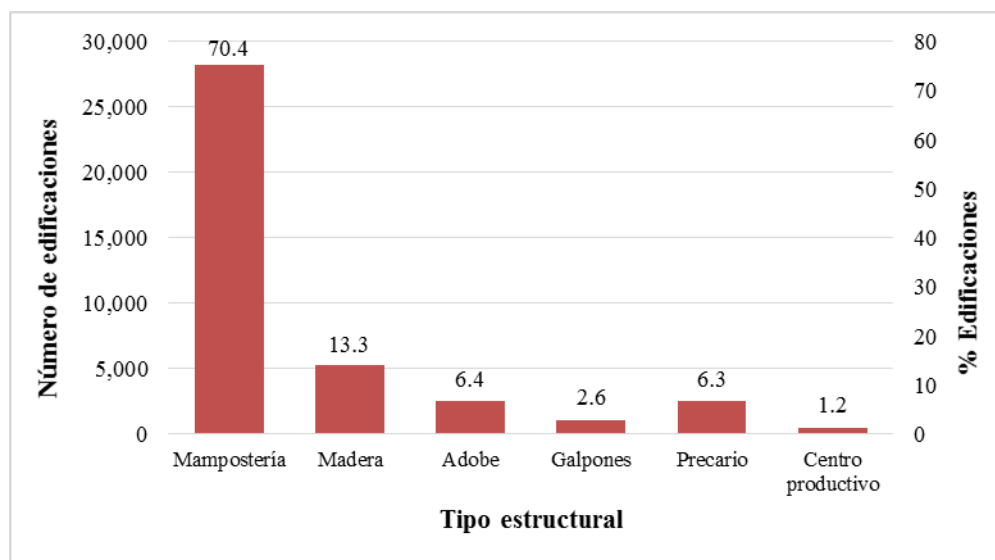


Figura 137. Gráfico de frecuencia de número de edificaciones según tipo constructivo – Cuenca del río Grande

6.2.6 Criterios para valoración de tipos constructivos principales

La información recopilada en campo, como se describe en el numeral 6.2.1, y en registros de información de los censos de 2008 y 2012 (INE, 2012) permite establecer una valoración económica de los tipos constructivos principales.

La Tabla 49 y Tabla 50 resumen la valoración económica para los tipos de elementos y cultivos expuestos principales, encontrados en las cuencas del río Rocha y del río Grande. A partir de esta información indicativa se establece la valoración completa del portafolio de análisis con base en las áreas construidas asignadas a cada una de las edificaciones que hacen parte del inventario. Para asignar valores de reposición indicativos acordes con la realidad se consultaron las siguientes diferentes fuentes de información. Para el caso de cultivos se consultaron valores de referencia publicados por la FAO (FAO, 2007) (Agrobit) (FAO, 2012). Para el caso de edificaciones se consultaron las siguientes fuentes: Opinión, 2012, Página Siete, 2015, Banco Central de Bolivia, 2013.

Tabla 49. Resumen de información de valoración económica disponible para tipos constructivos. (Valores indicativos)

Tipo de elemento	Valor (US\$/m ²)	Área construida de referencia (m ²)	Valoración construcción sin el terreno (US\$)	Valoración contenidos (US\$)	Valor total (US\$)
Adobe	200	100	15,000	5000	20,000
Centro Productivo	540	200	64,800	43,200	108,000
Galpones	360	1000	234,000	126,000	360,000
Madera	300	150	22,500	22,500	45,000
Mampostería Confinada	500	120	45,000	15,000	60,000
Mampostería Simple	450	100	33,750	11,250	45,000
Pórticos de concreto	600	300	108,000	72,000	180,000
Precario	50	70	2,800	700	3,500

Tabla 50. Resumen de información de valoración económica disponible para cultivos. (Valores indicativos)

Tipo de elemento	Cultivo típico	Costo (US\$/Ha)	Rendimiento (ton/Ha)	Ingreso Neto (US\$/Ha)	Valor total de reposición (US\$/Ha)
Cultivo Heterogéneo	Maíz	539	3	643	1,182
Cultivo Homogéneo	Soya	657	2.5	163	820
Cultivo Semihomogéneo	Mixto	656	2.75	402	1,058

6.2.7 Ocupación

Para evaluar la ocupación aproximada de las construcciones en las zonas estudiadas se recurre a información espacial de densidad de población recopilada por el proyecto *WorldPop* disponible en línea para las zonas de interés en: <http://www.worldpop.org.uk/>.

Los resultados de este análisis indican la ocupación promedio mediante el número de ocupantes por km^2 que se presentan en la Figura 138 y la Figura 139. Esta información fue corroborada anteriormente con el número de personas por municipio reportado en el censo de 2012. (INE, 2012)

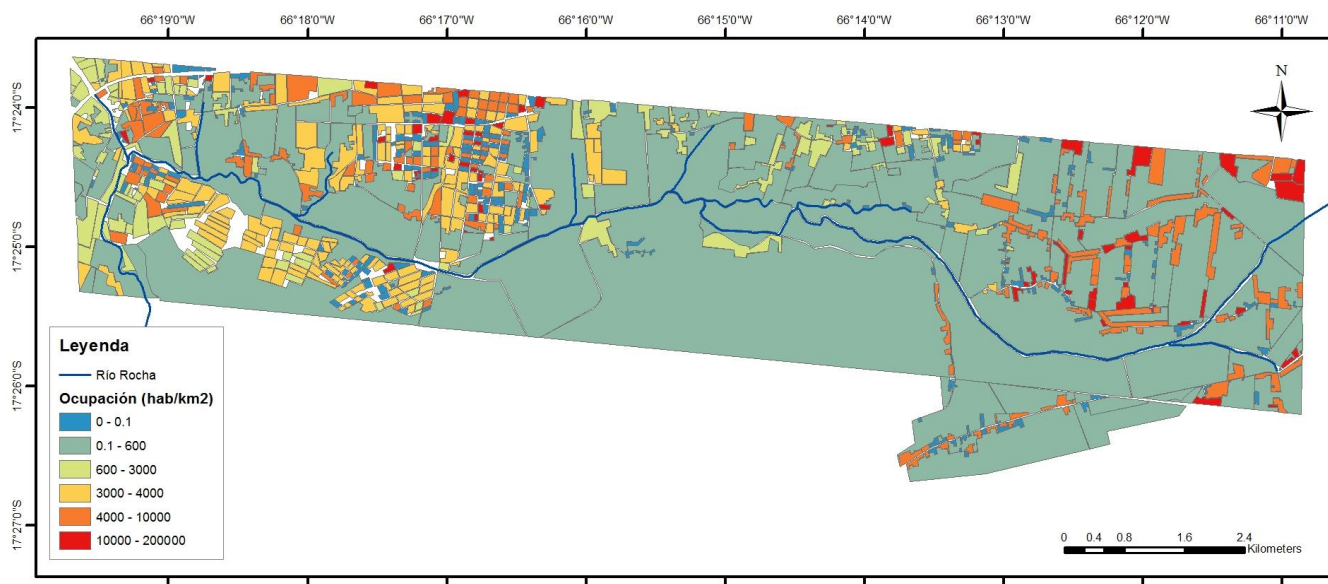


Figura 138. Ocupantes por m^2 en la Cuenca del río Rocha

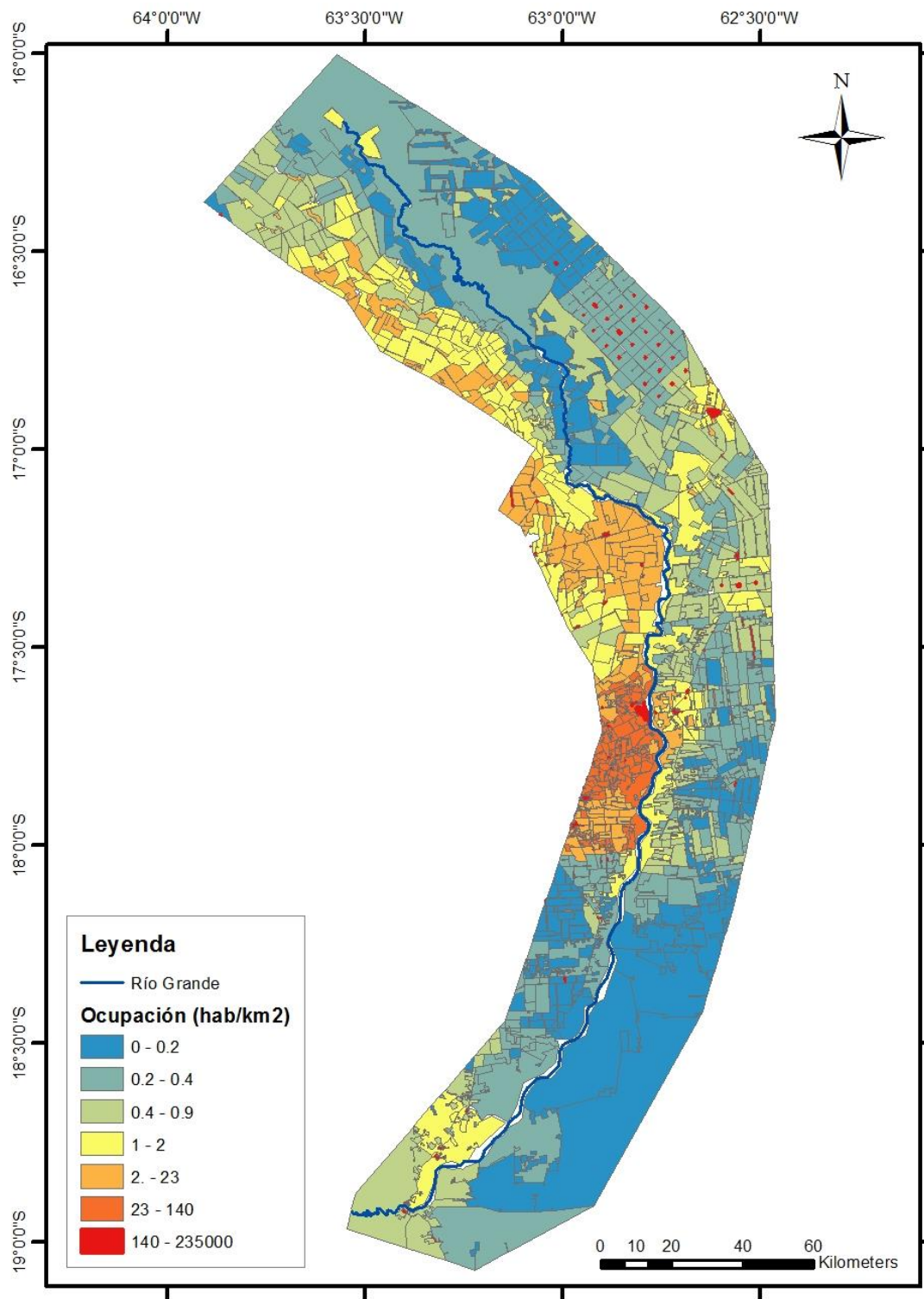


Figura 139. Ocupantes promedio por m² en la Cuenca del río Grande

6.2.8 Base de datos de información de exposición

Para cada una de las zonas de análisis se conforman bases de datos de exposición que incluyen los siguientes campos principales:

- ID
- Descripción
- Número de edificaciones
- Tipo estructural
- Estado de la edificación
- Número de pisos
- Área en (m²)
- Identificación del tipo constructivo para efectos de vulnerabilidad
- Valor humano
- Valor Físico (incluye construcción y contenidos)

La Tabla 51 presenta una información indicativa de una de las bases de datos conformada para el análisis. En los anexos digitales del proyecto se encuentran las bases de datos completas para cada una de las cuencas analizadas.

Tabla 51. Base de datos de exposición de edificaciones para el análisis (información indicativa)

ID	Descripción	No. Edificaciones	Tipo Estructural	Estado edificación	No. Pisos	Área (m ²)	SE_INUNDA	VALHUM	VALFIS
1	Edificación	10	Adobe	Medio	1	5,237	ADOBE_1	18	150,000
2	Bodega	10	Bodega	Medio	1	4,013	BODEGA_1	81	0
7	Edificación	5	Mamp. Confinada	Medio	1	8,142	MAMP_CONF_1	29	150,000
8	Edificación	20	Mamp. Confinada	Medio	2	30,748	MAMP_CONF_2	135	960,000
9	Edificación	10	Mamp. Confinada	Bueno	3	9,908	MAMP_CONF_3	233	1,250,000
10	Edificación	15	Mamp. Confinada	Medio	4	4,842	MAMP_CONF_4	160	2,400,000
11	Edificación	20	Mamp. Confinada	Bueno	5	6,995	MAMP_CONF_5	200	3,750,000
12	Edificación	15	Mamp. Simple	Medio	1	8,597	MAMP_SIMP_1	28	405,000
13	Edificación	10	Mamp. Simple	Bueno	2	9,105	MAMP_SIMP_2	72	540,000
14	Edificación	5	Mamp. Simple	Bueno	3	2,552	MAMP_SIMP_3	35	675,000
17	Edificación	1	Pórticos de Concreto	Bueno	1	17,308	PORT_CONC_1	16	3,000,000
18	Edificación	20	Pórticos de Concreto	Bueno	2	12,454	PORT_CONC_2	490	1,440,000
19	Edificación	4	Pórticos de Concreto	Bueno	3	6,947	PORT_CONC_3	1,100	1,200,000
20	Edificación	10	Pórticos de Concreto	Bueno	4	7,420	PORT_CONC_4	399	3,600,000
21	Edificación	5	Pórticos de Concreto	Medio	5	7,367	PORT_CONC_5	210	1,200,000
22	Edificación	10	Precario	Bajo	1	10,140	PRECARIO_1	43	25,000
...

En la Tabla 52 se resumen algunas estadísticas claves que resultan de las bases de datos de exposición de cada una de las cuencas.

Tabla 52. Resumen de la información contenida en las bases de datos de exposición

Cuenca	Extensión total de la cuenca (km ²)	Extensión área susceptible a inundación (km ²)	Longitud a lo largo del río (km)	Área cultivada expuesta (Ha)	Número total de construcciones expuestas	Número total de personas expuestas	Valor de exposición de área cultivada (millones US\$)	Valor de exposición de construcciones (millones US\$)	Valor total expuesto en zona susceptible (millones US\$)
Río Rocha	1,609	49	55	2,479	13,635	77,966	7	1,031	1,039
Río Grande	64,317	19,164	464	1,115,300	40,067	365,369	1,166	2,546	3,713

6.3 VULNERABILIDAD FÍSICA

6.3.1 Generalidades

La caracterización de la vulnerabilidad de un componente cualquiera del inventario de activos se hace mediante la asignación directa de la función de vulnerabilidad correspondiente. Para el efecto se asignan funciones de vulnerabilidad únicas para la afectación física y para la afectación humana.

Con respecto a la función de vulnerabilidad física, ésta debe incluir de ser necesario, la ponderación respectiva de los porcentajes de afectación y los valores relativos correspondientes a:

- Pérdidas directas
- Pérdidas en los contenidos

La valoración global del daño se calcula teniendo en cuenta las pérdidas directas y de contenidos sin desagregación de costos.

Para efectos de caracterizar la vulnerabilidad ante eventos de inundación se requiere la siguiente información:

- Tipo de material de la estructura principal.
- Tipo de material de muros divisorios, fachadas y acabados.
- Tipo de material de pisos.
- Número de pisos
- Calidad y fragilidad de los contenidos.
- Edad y estado de la edificación

Para los cultivos se requiere información relacionada con el tipo de cultivo, la periodicidad de cosechas, la fragilidad del cultivo a la duración y profundidad de inundación y los costos asociados a la producción, la utilidad esperada y demás condiciones económicas.

Con respecto a la vulnerabilidad humana, para el presente caso el análisis se orienta a determinar el número de personas afectadas por cada uno de los escenarios estocásticos de inundación y que corresponden a las personas que ocupan los componentes o las zonas de cultivo que quedan ubicadas dentro de las manchas de inundación.

6.3.2 Funciones de vulnerabilidad para construcciones y zonas de cultivos

Las funciones de vulnerabilidad dentro de la plataforma CAPRA (www.ecapra.org) relacionan el valor medio del daño medida en porcentaje con respecto al valor de exposición como función de la intensidad que se seleccione para el análisis.

La función de vulnerabilidad ante una inundación se debe desarrollar para los diferentes tipos constructivos característicos, en función de dos parámetros principales: la profundidad de las aguas de inundación y la velocidad máxima del flujo.

En las zonas donde se espera la ocurrencia de inundaciones lentas el parámetro de intensidad que se utiliza normalmente en los análisis es la profundidad máxima de inundación reportada en el modelo de análisis para cada uno de los escenarios considerados. Por otro lado cuando la inundación se produce por efectos de un flujo torrencial de alta velocidad, es evidente que, adicionalmente a los daños asociados al incremento en el nivel del agua, se generan una serie de daños asociados a la velocidad máxima del flujo de agua, lo cual puede generar daño estructural significativo. Estas áreas están clasificadas como áreas de amenaza por tránsito de flujos torrenciales y para su análisis se requiere de información de amenazas relacionada con la profundidad de agua de inundación y con la velocidad máxima del flujo en cada sector. Las observaciones recientes permiten establecer que, en general, en las áreas de alta velocidad de flujo el daño sobre la infraestructura expuesta es prácticamente total, especialmente para construcciones de tipo informal. También se puede establecer que usualmente para ciertos tipos de componentes el daño se presenta en consideración a la ocurrencia o no de inundación en el sitio y no tanto en relación a la velocidad máxima del flujo alcanzado. Para el presente caso y considerando las condiciones reales de los eventos de inundación que pueden presentarse se utiliza la profundidad de inundación como variable de control para el daño. En esta consideración y para efectos de construir las curvas de vulnerabilidad correspondientes se considera hasta cierto punto que la ocurrencia de una determinada profundidad de inundación está acompañada también por una cierta velocidad del flujo.

Las funciones de vulnerabilidad o daño por inundación se asignan a construcciones con diferentes usos teniendo en cuenta el número de pisos. Estas funciones no consideran los daños provocados por socavación, falta de resistencia por reblandecimiento del suelo o deficiencia de la cimentación que pueden producir el colapso de las estructuras.

La Figura 140 presenta la forma indicativa de las funciones de vulnerabilidad. En el presente caso se desarrollan funciones de vulnerabilidad tanto para edificaciones como para cada uno de los tipos de cultivo identificados.

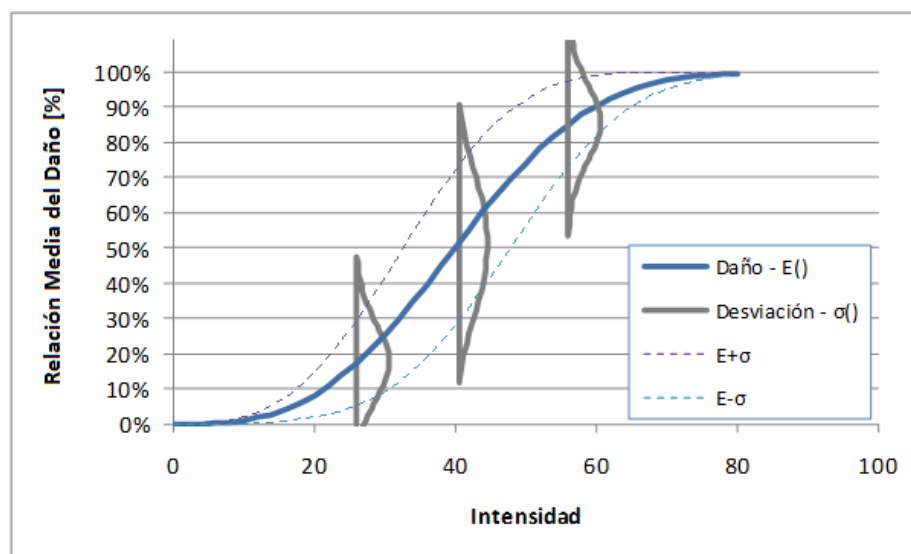


Figura 140. Función de vulnerabilidad típica en la plataforma CAPRA

6.3.3 Información de vulnerabilidad de construcciones

En este numeral se presentan los resultados de la aplicación de una metodología desarrollada para obtener funciones de vulnerabilidad por inundación incluyendo las eventuales pérdidas en las construcciones mismas como en los contenidos en el caso de edificaciones, y las pérdidas de producción y costo de oportunidad en el caso de cultivos. Se proponen diferentes configuraciones y valores de los contenidos y elementos no estructurales para diferentes tipos de inmuebles identificados que incluyen viviendas de adobe, mampostería simple y confinada, pórticos de concreto, materiales precarios, y bodegas, entre otros, en las cuencas del río Rocha y del río Grande. En la calificación de los valores y de los niveles de daño fue necesario recurrir al criterio de expertos y a las observaciones de impactos en eventos pasados en las zonas de estudio ya que no se cuenta con información experimental o de casos históricos debidamente documentada. En el Anexo 3 se presentan las diferentes fichas que resumen la información disponible para cada uno de los tipos de edificaciones evaluados. La Tabla 53 resume las características de la valoración de daños para cada uno de los sistemas constructivos típicos.

Tabla 53. Discriminación de daños por inundación en sistemas constructivos

Sistema Constructivo	Rango de pisos	ID	Descripción	Estructura			Contenidos		
				Valor [%]	Daño [%]	Cota [m]	Valor [%]	Daño [%]	Cota [m]
Precario	1	PREC	No tiene ningún sistema estructural	80	100	0.1	20	100	0.1
Adobe	1	ADOB	Muros en adobe o tapia	75	100	0.1	25	100	0.1
Madera	1 a 2	W_L	Pórticos de madera	50	35	0.3	50	100	0.1

Sistema	Rango	ID	Descripción	Estructura			Contenidos		
Bodega	1	BOD	Bodegas con estructura mixta	65	20	0.1	35	100	0.1
Mamposterías	1	MAM_L	Sistema estructural de mampostería simple, confinada y/o reforzada	75	30	0.2	25	100	0.1
	2 a 3	MAM_M		75	20	0.2	25	100	0.1
	4 a 5	MAM_H		75	15	0.2	25	50	0.1
Pórticos de concreto	1 a 2	C1_L	Sistema de pórticos de concreto reforzado resistentes a momento	60	20	0.3	40	80	0.1
	3+	C1_M		60	10	0.3	40	40	0.1

En la Figura 141 se presentan las funciones de vulnerabilidad seleccionadas para los diferentes tipos constructivos identificados en las dos cuencas de estudio conjuntamente con las incertidumbres asignadas en cada caso. Las funciones de daño se expresan en porcentaje medio de daño en función de la intensidad de amenaza seleccionada y cada una está acompañada por una curva que representa la varianza de la información para niveles crecientes de intensidad. Las funciones de daño tienen en cuenta el tipo de material en que están construidos las edificaciones, el tipo de contenidos representativo, y el número de pisos. Estos valores han sido establecidos mediante criterio de expertos, observaciones de impactos para diferentes intensidades de acuerdo con observaciones en eventos pasados y valoraciones similares en proyectos similares.

El inicio en la ocurrencia en los daños para intensidades crecientes de la amenaza se toma para un valor de profundidad de inundación de 0.1 m. Este valor se ha seleccionado con base en los siguientes criterios:

- Profundidad mínima a la cual se presentan daños estructurales de consideración. En general para zonas con alta frecuencia de ocurrencia de eventos de poca intensidad, si la profundidad de inundación es menor, simplemente se requiere una labor de limpieza ya que las personas ubicadas en estas zonas tienen sus propios planes de contingencia para minimizar los daños en electrodomésticos y enseres.
- Incertidumbre asociada a la estimación de las profundidades en los análisis de amenaza.
- Variabilidad e incertidumbre en la información topográfica que genera una sobreestimación de la profundidad de inundación al considerar que cualquier elemento que esté en contacto con la huella de inundación ya que da sujeto a una inundación determinada.

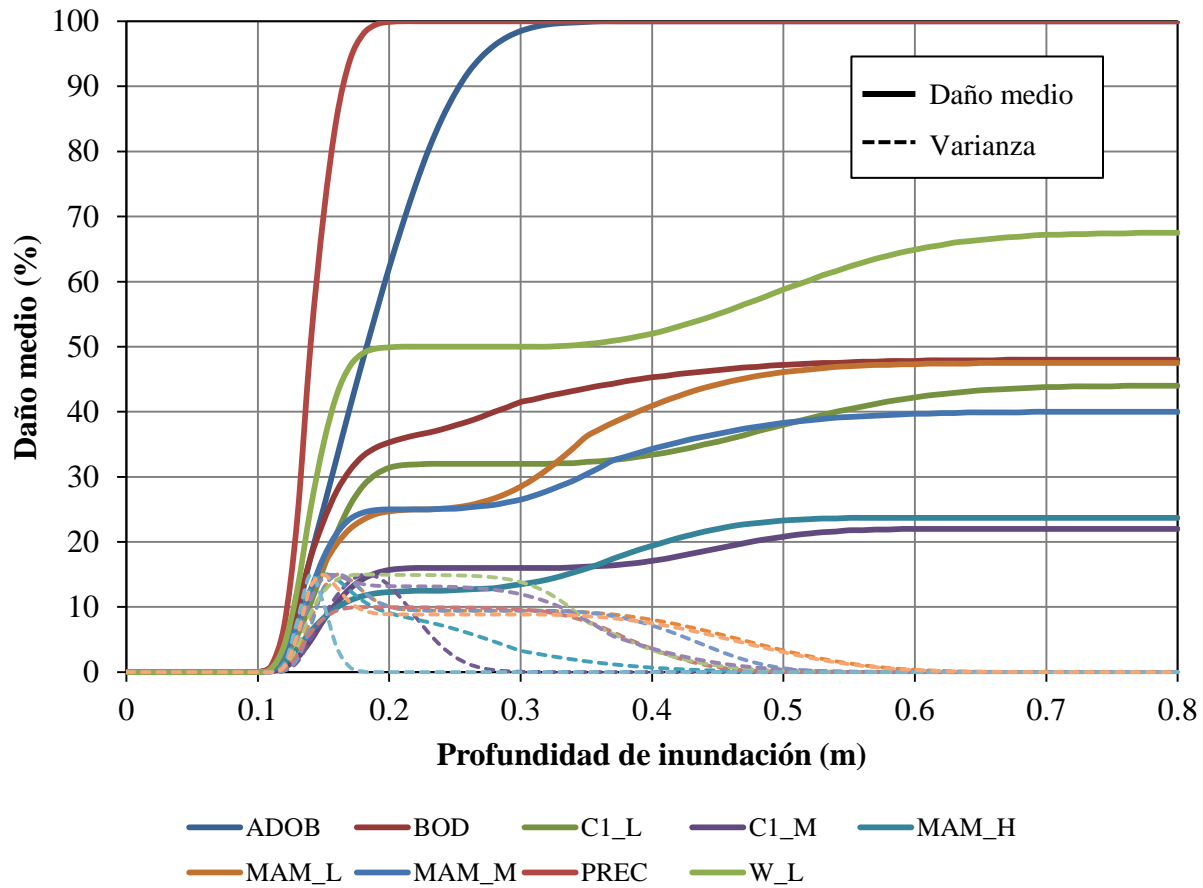


Figura 141. Funciones de vulnerabilidad para edificaciones con sus respectivas incertidumbres (la leyenda corresponde al ID presentado en la Tabla 53)

En las siguientes tablas se presenta la relación de las funciones de vulnerabilidad y los tipos de elementos expuestos encontrados en cada una de las cuencas de estudio que pueden llegar a generar pérdidas económicas directas.

Tabla 54. Relación de tipos de elementos expuestos y funciones de vulnerabilidad para la cuenca del río Rocha

Tipo de elemento expuesto	Función de vulnerabilidad
Adobe – 1 piso	ADOBE
Bodega – 1 piso	BODEGA
Mampostería confinada – 1 piso	MAM_L
Mampostería confinada – 2 pisos	MAM_M
Mampostería confinada – 3 pisos	MAM_M
Mampostería confinada – 4 pisos	MAM_H
Mampostería confinada – 5 pisos	MAM_H
Mampostería simple – 1 piso	MAM_L
Mampostería simple – 2 pisos	MAM_M
Mampostería simple – 3 pisos	MAM_M
Pórticos de concreto – 1 piso	C1_L
Pórticos de concreto – 2 pisos	C1_L
Pórticos de concreto – 3 pisos	C1_M
Pórticos de concreto – 4 pisos	C1_M
Pórticos de concreto – 5 pisos	C1_M
Precario – 1 piso	PRECARIO

Tabla 55. Relación de tipos de elementos expuestos y funciones de vulnerabilidad para la cuenca del río Grande

Tipo de elemento expuesto	Función de vulnerabilidad
Adobe	ADOBE
Galpón	BODEGA
Madera	W_L
Mampostería	MAM_L
Precario	PRECARIO
Centro productivo	C1_L

6.3.4 Información de vulnerabilidad de tipos de cultivos

Para determinar las funciones de vulnerabilidad de cultivos se recurre a la información disponible para los diferentes tipos de cultivos y a la opinión de expertos locales consultados quienes juzgan cuales podrían ser los niveles de daño esperados en los diferentes tipos de cultivos en función directa de la altura máxima de las aguas de inundación y para diferentes tiempos de desarrollo de la cosecha. No se ha tenido en cuenta directamente la velocidad del flujo en la determinación de las funciones de vulnerabilidad ya que en el presente caso la mayoría de las inundaciones en zonas de cultivos son lentas. En el Anexo 4 se encuentran las diferentes fichas que resumen la información disponible para cada uno de los tipos de cultivos evaluados en las dos cuencas de estudio.

La Figura 142 presenta las funciones de vulnerabilidad resultantes de este análisis.

Tabla 56. Asignación de funciones por tipo de cultivo y estacionalidad

Cultivo	Estacionalidad 1 - ID	Estacionalidad 2 - ID
Maíz	CM_E1	CM_E2
Soja	CS_E1	CS_E2
Mixtos	CMX_E1	CMX_E2

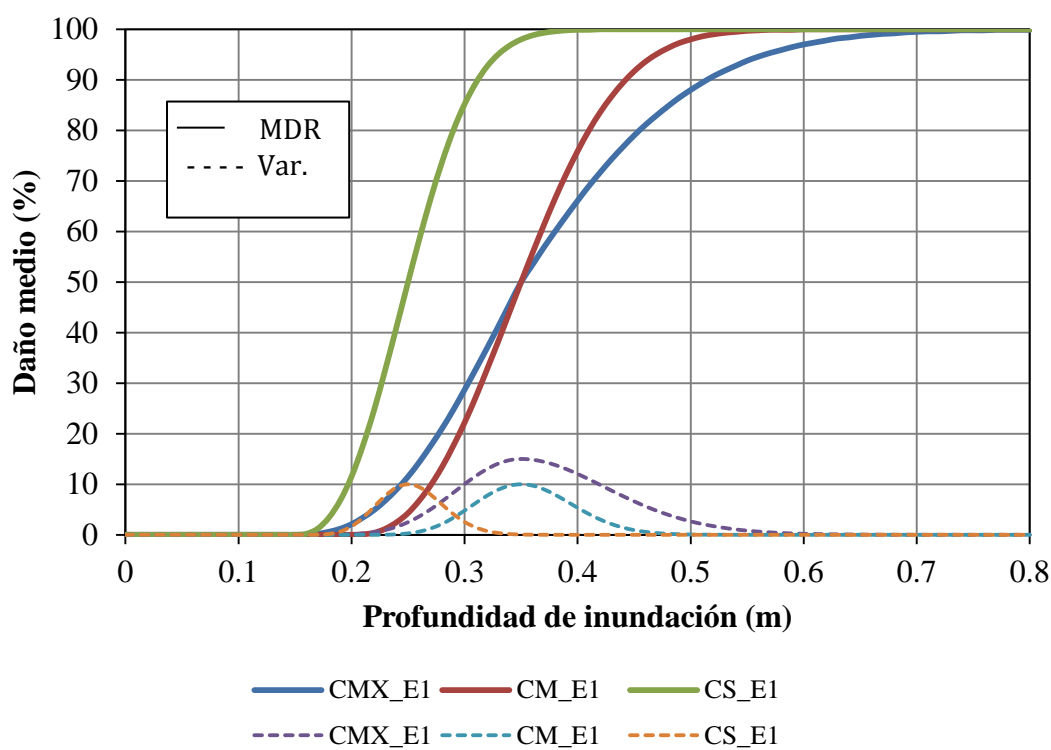


Figura 142. Funciones de vulnerabilidad para cultivos

7 ANÁLISIS DEL RIESGO POR INUNDACIÓN

7.1 GENERALIDADES

El análisis probabilista del riesgo tiene como objetivo fundamental determinar la distribución de probabilidad de las pérdidas que se pueden llegar a presentar en los componentes expuestos, como consecuencia de la ocurrencia de amenazas naturales, integrando de manera racional las incertidumbres que existen en las diferentes partes del proceso. Adicionalmente se requiere conocer la frecuencia con que pueden presentarse diferentes valores de pérdidas económicas o humanas.

Puesto que la frecuencia de los eventos catastróficos es particularmente baja, no es posible estimar dichas pérdidas mediante la formulación de modelos puramente empíricos del proceso de ocurrencia de estos eventos. Debe recurrirse por lo tanto a la construcción de modelos probabilistas para la estimación del riesgo. El procedimiento de cálculo probabilista consiste en evaluar las pérdidas en el grupo de componentes expuestos durante cada uno de los escenarios que colectivamente describen la amenaza. Con base en esto se pueden integrar probabilísticamente los resultados obtenidos con el fin de obtener la frecuencia de ocurrencia de diferentes niveles de pérdida económica y las frecuencias anuales esperadas, la cual se estima mediante la ponderación de las pérdidas de cada escenario con las frecuencias anuales de ocurrencia promedio de cada evento.

Para el análisis de riesgo se requiere contar con la evaluación de la amenaza de inundación descrita en el Capítulo 5, la base de datos de componentes expuestos que se presentó en el Capítulo 6 conjuntamente con las funciones de vulnerabilidad presentadas en el numeral 6.3.

En este numeral se presentan los resultados principales del análisis de riesgo para cada una de las cuencas de análisis.

7.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL RIESGO

7.2.1 Parámetros para la interpretación de los resultados del riesgo

Los resultados de riesgo se presentan para una duración de tormentas de 1 día para el río Rocha y para 5 días en el caso de río Grande. Estas duraciones se consideran adecuadas en cada caso debido a lo siguiente:

- Corresponden a las tormentas de mayor recurrencia y las más representativas de cada zona.
- Los resultados indican que una vez que se sobrepasan los umbrales para que se produzcan inundaciones, unas duraciones mayores difícilmente generarán un aumento significativo en los

impactos. Este análisis sin embargo puede requerir un tratamiento más detallado en el caso de la cuenca del río Grande dada su gran extensión.

Considerando la calidad y confiabilidad de la información disponible, los análisis se limitan hasta periodos de retorno de 100 años.

Los resultados del análisis de riesgo se presentan para cada una de las cuencas de acuerdo con lo siguiente:

- Una tabla que resume el valor total expuesto, la pérdida anual esperada (PAE) en US\$ y los valores de pérdida máxima probable (PML) expresada como pérdida económica absoluta en US\$ para diferentes periodos de retorno.
- La curva de pérdidas máximas probables (PML) para diferentes periodos de retorno.
- El escenario que presenta la pérdida económica máxima con la siguiente información complementaria:
 - o Pérdida económica esperada en US\$.
 - o Tabla con las estadísticas principales de afectación con el número de edificaciones, personas y hectáreas de cultivos afectados por el escenario crítico.
 - o Tabla y gráfico de barras con distribución relativa de pérdidas esperadas para los diferentes tipos de componentes. .
 - o Distribución geográfica de las pérdidas en términos de valores económicos absolutos y relativos.

Complementariamente a lo anterior y de manera ilustrativa se cuantifican las pérdidas por interrupción de flujos económicos debido a la afectación de cultivos en las zonas inundadas, a la interrupción de vías de comunicación y a los eventuales gastos relacionados con ayuda humanitaria e indemnizaciones. También se presentan unos estimativos de pérdida de vidas humanas en caso de eventos catastróficos en las cuencas estudiadas. La metodología y el resumen de resultados resultantes de estas estimaciones se presentan en detalle en el numeral 7.2.5.

7.2.2 Resultados del análisis de riesgo por cada componente para la cuenca del río Rocha

La evaluación del riesgo por inundación en la cuenca del río Rocha corresponde a lo siguiente:

- Archivo de amenaza: AMEInundacion_Rocha_TR100_ID_V2_RES2K_600ESCS.AME
- Shape de exposición: Edificaciones Cuenca Rio Rocha
- Duración de tormenta: 1 día
- Escenario crítico de pérdidas económicas: tormenta 99 con periodo de retorno de 100 años
- Total de escenarios generados: 600

La Tabla 57 y la Figura 143 presentan los resultados generales del análisis de riesgo para la cuenca del río Rocha.

Tabla 57. Resultados generales de riesgo por inundación. Cuenca Río Rocha

Resultados		
Valor Expuesto en la zona de análisis	US\$	1,038,666,698
Pérdida anual esperada	US\$	1,258,802
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	US\$	% de valor expuesto en la zona de análisis
2	876,157	0.08
5	1,125,706	0.11
10	1,374,303	0.13
25	2,032,334	0.20
50	9,010,558	0.87
100	17,114,121	1.65

Curva de pérdidas globales

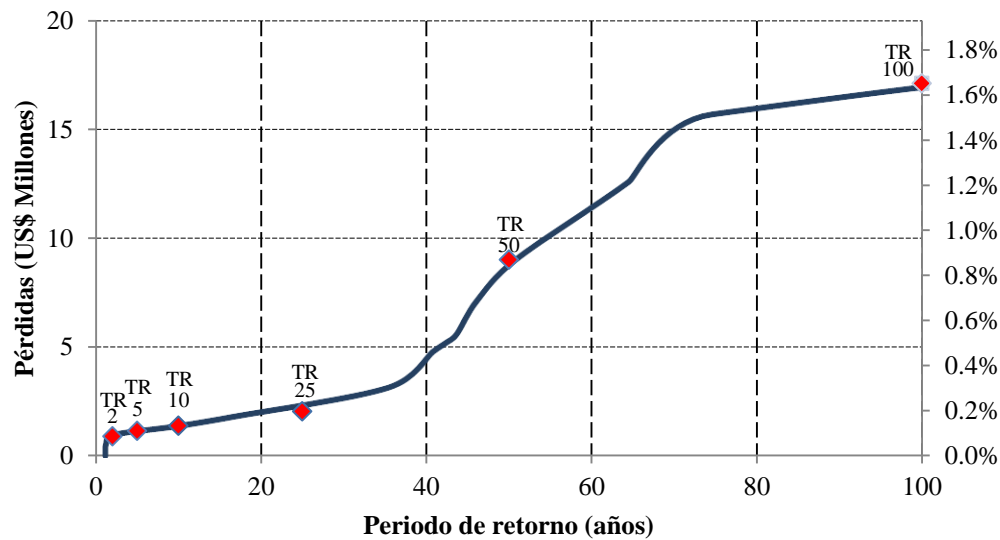


Figura 143. Curva de pérdida máxima probable vs. periodo de retorno. Cuenca Río Rocha

Por otro lado se presenta la siguiente información para el escenario crítico de inundación. La Tabla 58 y la Tabla 59 presentan las características y pérdidas económicas por grupo de uso para el escenario crítico de inundación. La Figura 145 presenta la distribución de intensidades de lluvia que genera el escenario crítico de riesgo y la Figura 146, Figura 147 y Figura 148 presentan el escenario crítico de inundación, las pérdidas económicas esperadas y las pérdidas esperadas en porcentaje respectivamente.

Tabla 58. Escenario crítico de inundación. Cuenca Río Rocha

Archivo AME de inundación		AMEINUNDACION_ROCHA_TR100_1D_V2_RES 2K_600ESCS[ESC_600_INT_1_MOM].grd
Escenario crítico		No. 600 - Tormenta 99 con periodo de retorno de 100 años
Intensidad máxima de lluvias		143.4 mm
Localización del centro de tormenta aproximado		Latitud -17.4434° Longitud -66.1441 °
No. Edificaciones afectadas		28,391
No. Personas afectadas		8,807
No. Pérdidas humanas		2
Hectáreas de cultivo afectadas		963
Pérdidas económicas (US\$)		65,212,754
Flujo económico (US\$)	Cultivos	230,758
	Ayuda humanitaria	135,628
	Indemnización a agricultores	139,635

Tabla 59. Pérdidas esperadas por tipo de componente. Cuenca Río Rocha

Grupo de uso	Valor expuesto (US\$)	Pérdida escenario crítico (US\$)
Adobe	8,434,460	1,686,254
Bodega	-	-
Cultivo	7,187,657	1,694,165
Mampostería confinada 1 piso	115,417,244	8,285,799
Mampostería confinada 2 piso	310,124,387	20,171,337
Mampostería confinada 3 piso	67,978,073	2,788,656
Mampostería confinada 4 piso	4,615,486	-
Mampostería confinada 5 piso	5,498,810	-
Mampostería simple 1 piso	363,321,995	17,966,963
Mampostería simple 2 piso	115,839,080	9,449,138
Mampostería simple 3 piso	962,102	206,786
Pórticos de concreto 1 piso	4,038,461	1,712,498
Pórticos de concreto 2 piso	6,163,448	379,207
Pórticos de concreto 3 piso	15,632,196	348,083
Pórticos de concreto 4 piso	8,761,548	-
Pórticos de concreto 5 piso	3,640,392	-
Precario	1,051,360	523,869
TOTAL	1,038,666,698	65,212,754

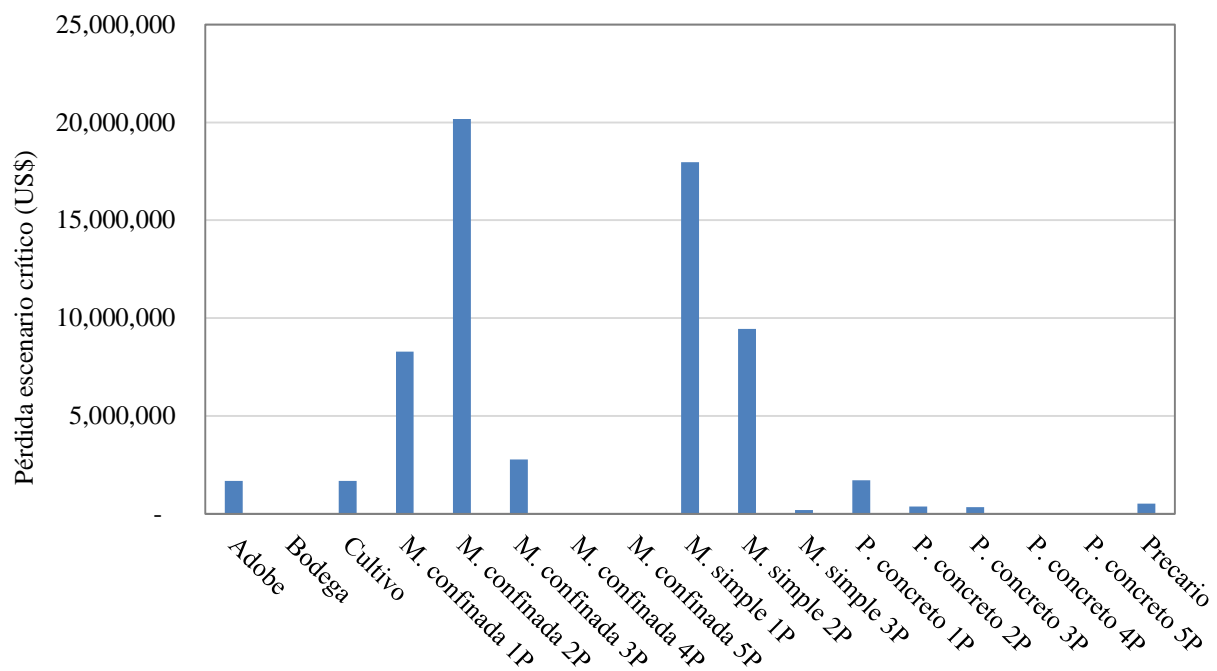


Figura 144. Pérdidas esperadas para el escenario crítico. Cuenca Río Rocha

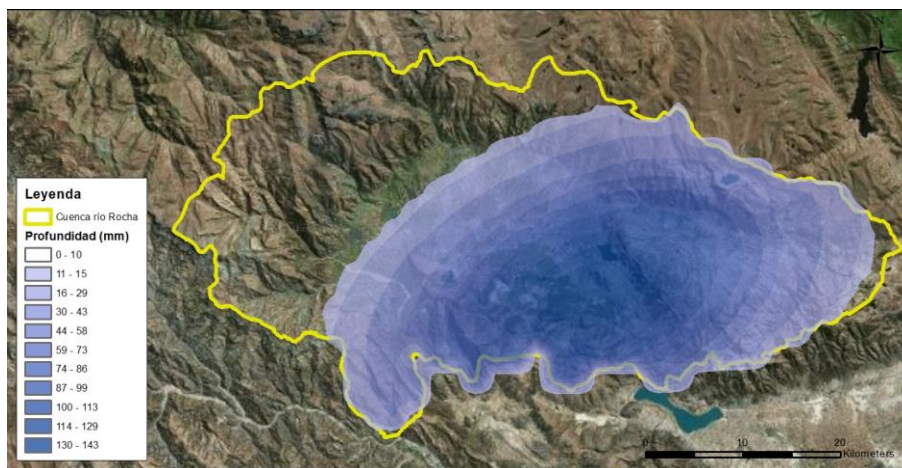


Figura 145. Lluvia que genera el escenario crítico de riesgo. Cuenca Río Rocha

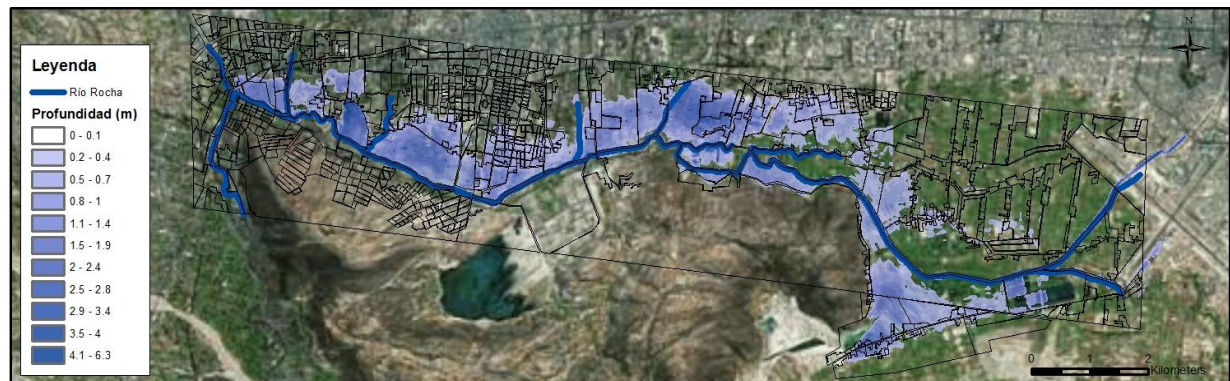


Figura 146. Escenario crítico de inundación. Cuenca Río Rocha

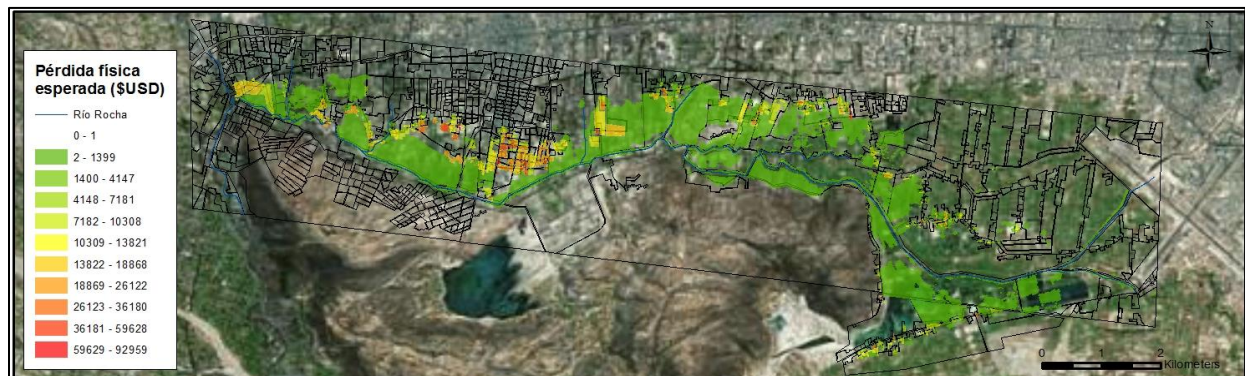


Figura 147. Pérdidas esperadas para el escenario crítico en valor absoluto (US\$). Cuenca Río Rocha

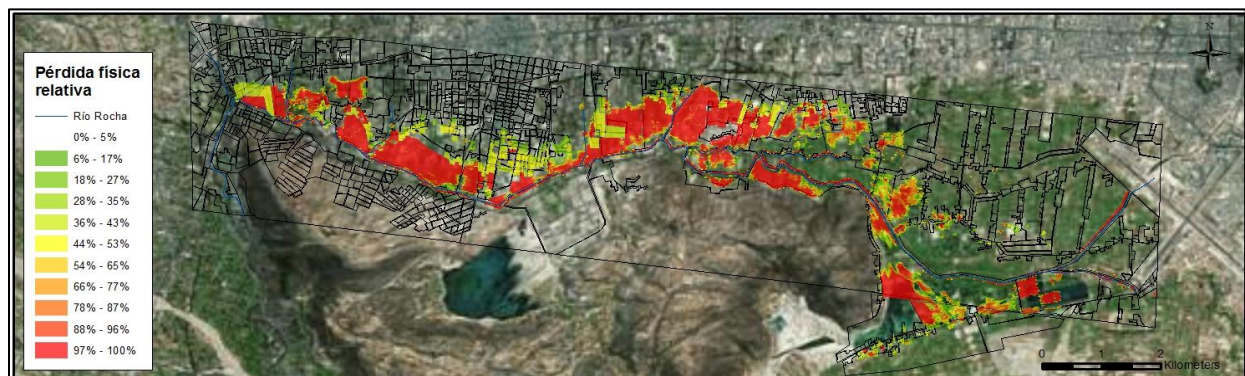


Figura 148. Pérdidas esperadas para el escenario crítico con respecto al valor de reposición individual (%). Cuenca Río Rocha

Por otro lado, la Figura 149 presenta los resultados de pérdidas para todos los escenarios de inundación contenidos en el análisis organizado de menor a mayor y un histograma con el número de escenarios cuya pérdida esperada se encuentra dentro de los diferentes rangos definidos.

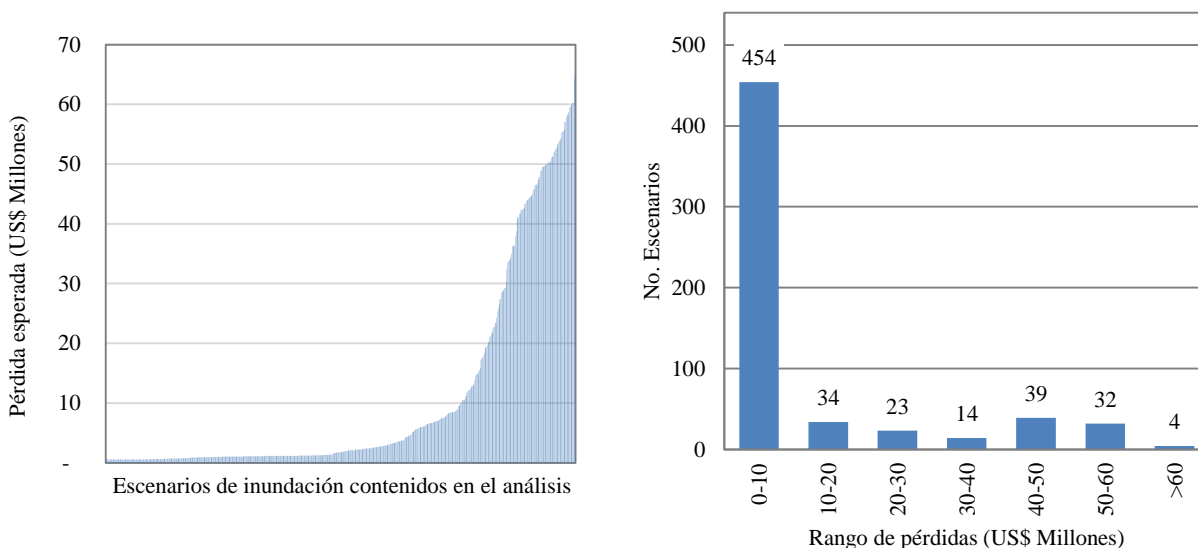


Figura 149. Resultados de pérdidas para el portafolio de escenarios de inundación. Cuenca Río Rocha

La Tabla 60 presenta el resumen de las pérdidas esperadas para cinco escenarios críticos de inundación. De igual manera, de la Figura 150 a la Figura 154 se presentan las lluvias e inundaciones asociadas a cada escenario, así como la distribución geográfica de pérdidas absolutas y relativas. Estos escenarios ilustran las diferentes posibilidades de escenarios de inundación para la cuenca del río Rocha. Finalmente, la Figura 155 presenta el resumen de pérdidas esperadas por tipo de uso para cinco escenarios críticos en la cuenca del río Rocha.

Tabla 60. Resumen de pérdida esperada para algunos escenarios críticos de inundación. Cuenca Río Rocha

No. escenario	Nombre escenario	Pérdida esperada (US\$)
505	Lluvia_Duracion1_TR100_Tormenta4	44,294,015
575	Lluvia_Duracion1_TR100_Tormenta74	10,557,162
592	Lluvia_Duracion1_TR100_Tormenta91	23,426,278
594	Lluvia_Duracion1_TR100_Tormenta93	4,493,957
595	Lluvia_Duracion1_TR100_Tormenta94	52,452,521

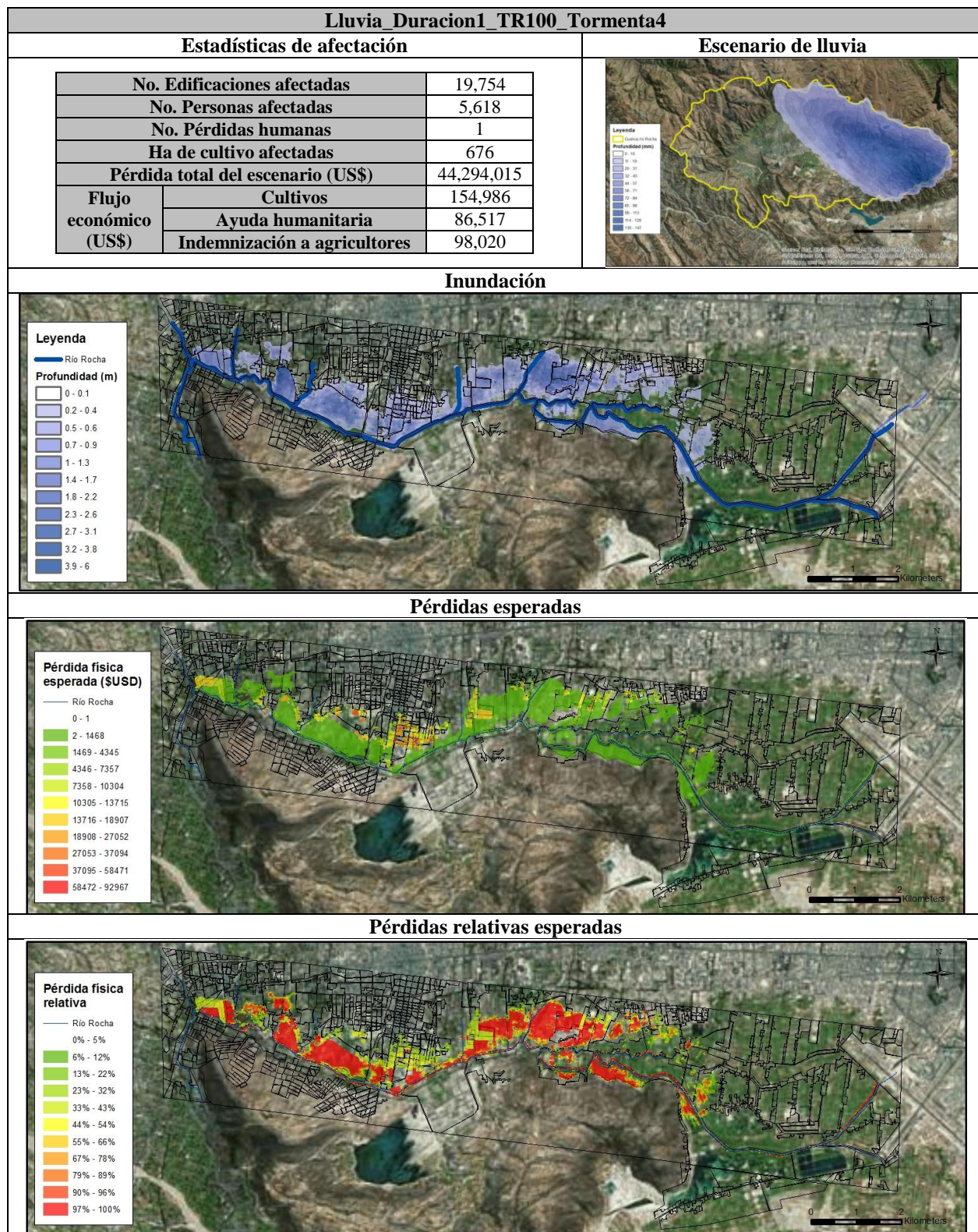


Figura 150. Resultados para el escenario 505. Cuenca Río Rocha

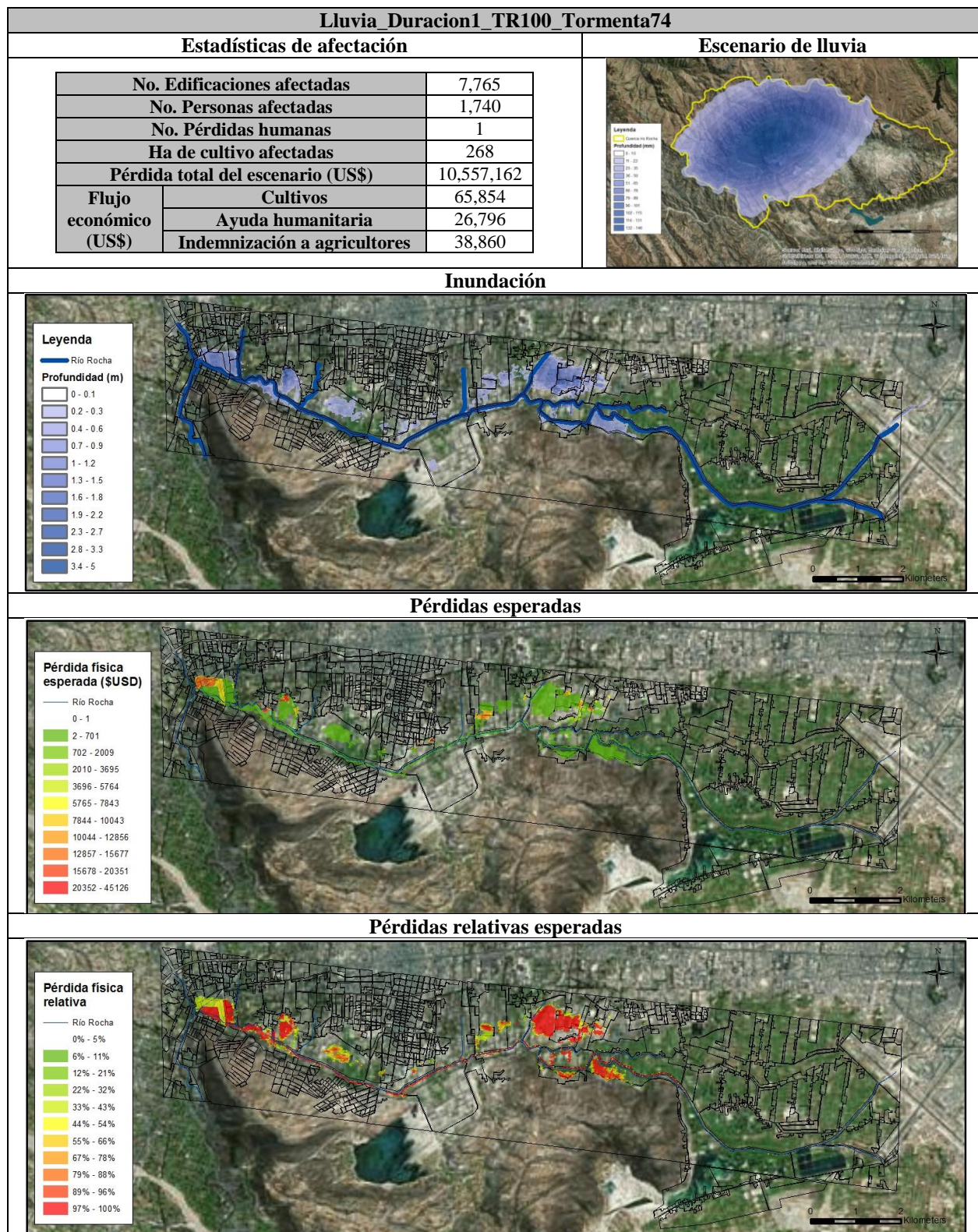


Figura 151. Resultados para el escenario 575. Cuenca Río Rocha

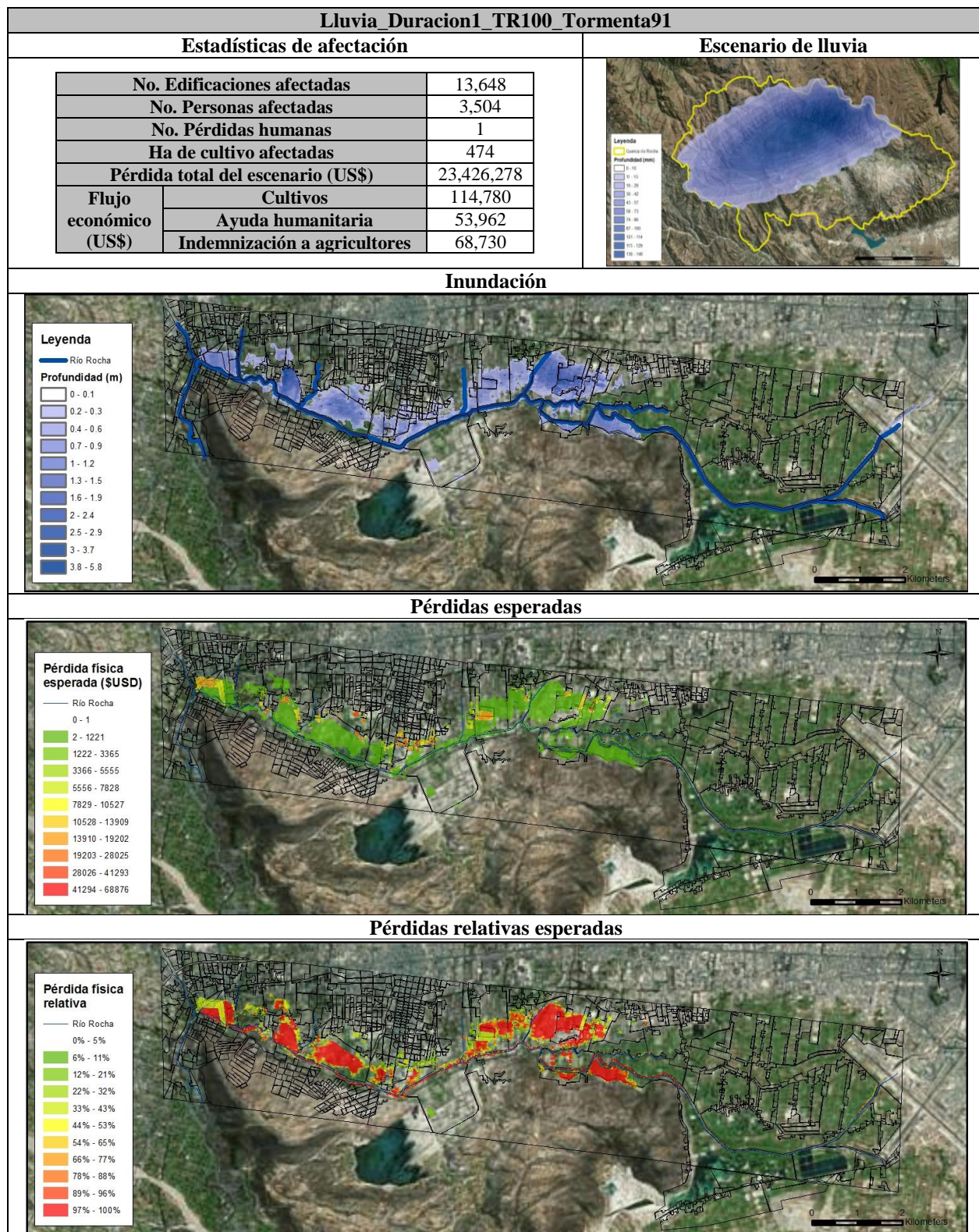


Figura 152. Resultados para el escenario 592. Cuenca Río Rocha

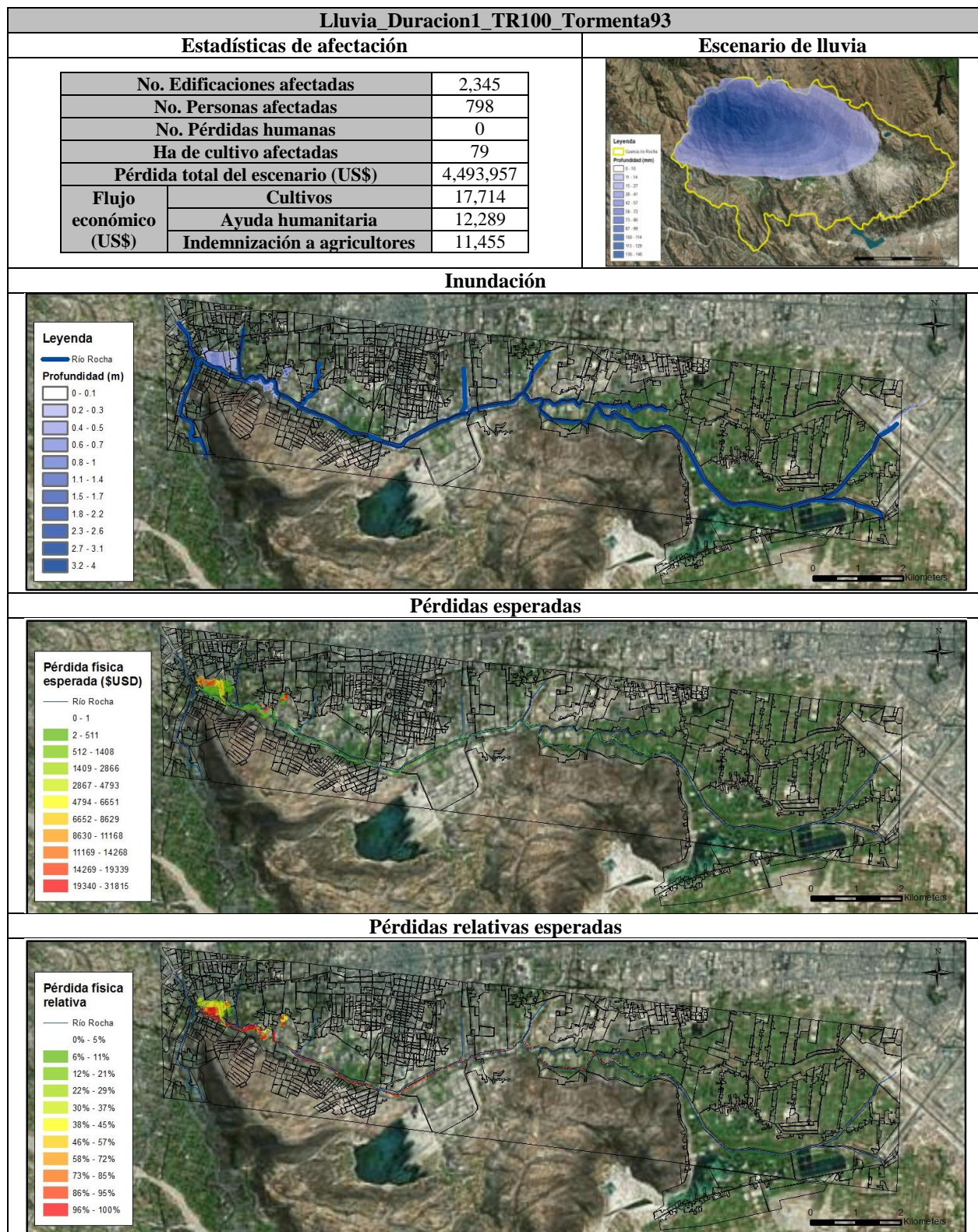


Figura 153. Resultados para el escenario 594. Cuenca Río Rocha

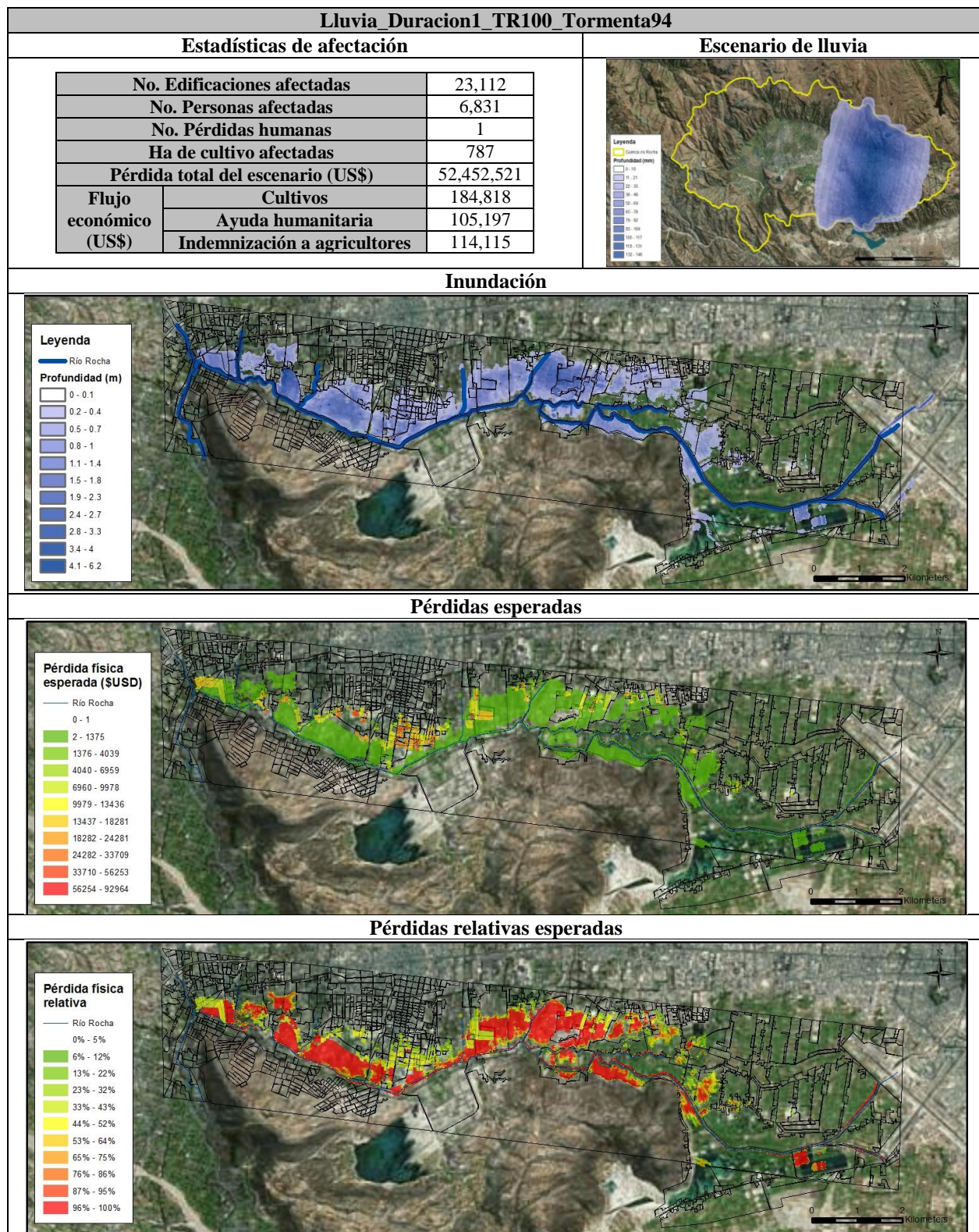


Figura 154. Resultados para el escenario 595. Cuenca Río Rocha

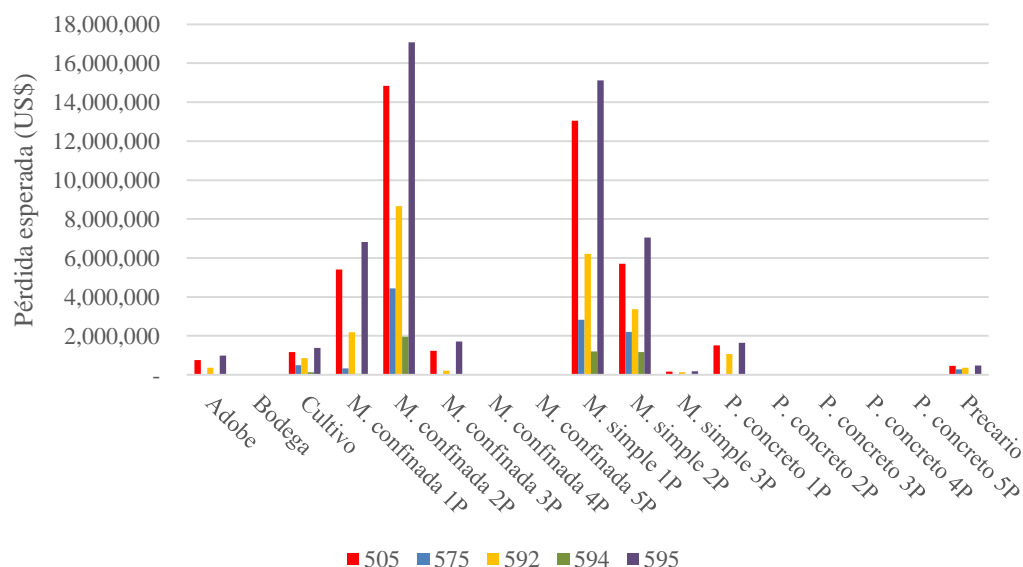


Figura 155. Resumen de pérdidas esperadas por tipo de uso para cinco escenarios críticos en la cuenca río Rocha

7.2.3 Resultados del análisis de riesgo por cada componente para la cuenca del río Grande

La evaluación del riesgo por inundación en la cuenca del río Grande corresponde a lo siguiente:

- Archivo de amenaza: AMEInundacion_Grande_TR100_5D_V5_RES10K_18ESCS.AME
- Shape de exposición: Edificaciones Cuenca Río Grande
- Duración de tormenta: 5 días
- Escenario crítico de pérdidas económicas: tormenta 0 con periodo de retorno de 25 años
- Total de escenarios generados: 18

La Tabla 61 y la Figura 156 presentan los resultados generales del análisis de riesgo para la cuenca del río Grande.

Tabla 61. Resultados generales de riesgo por inundación. Cuenca Río Grande

Resultados		
Valor Expuesto en la zona de análisis	US\$	3,712,596,662
Pérdida anual esperada	US\$	29,715,821
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	US\$	% de valor expuesto en la zona de análisis
2	23,654,812	0.64
5	34,291,639	0.92
10	60,230,086	1.62
25	102,304,514	2.76
50	103,668,205	2.79
100	106,395,587	2.87

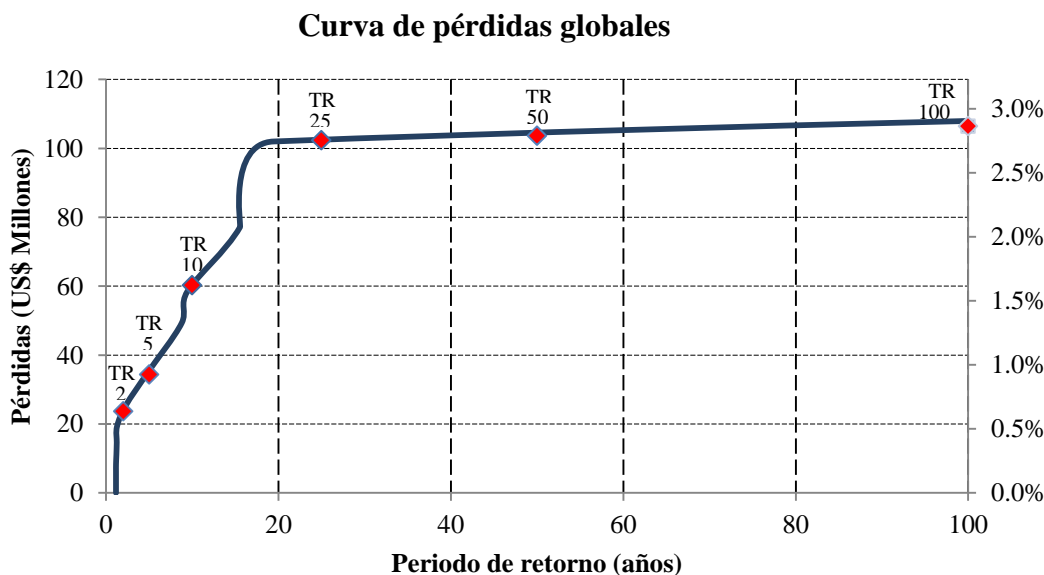


Figura 156. Curva de pérdida máxima probable vs. periodo de retorno. Cuenca Río Grande

Por otro lado se presenta la siguiente información para el escenario crítico de inundación. La Tabla 62 y la Tabla 63 presentan las características y pérdidas económicas por grupo de uso para el escenario crítico de inundación. La Figura 158 presenta la distribución de intensidades de lluvia que genera el escenario crítico de riesgo.

La Figura 159, Figura 160 y Figura 161 presentan el escenario crítico de inundación, las pérdidas económicas esperadas y las pérdidas esperadas en porcentaje respectivamente.

Tabla 62. Escenario crítico de inundación. Cuenca Río Grande

Archivo AME de inundación		AMEINUNDACION_GRANDE_TR100_5D_V5_RES10K_18ESCS[ESC_10_INT_1_MOM].grd
Escenario crítico		No. 10 - Tormenta 0 con periodo de retorno de 25 años
Intensidad máxima de lluvias		356.5 mm
Localización del centro de tormenta aproximado		Latitud -17.8336° Longitud -66.6216°
No. Edificaciones afectadas		1,995
No. Personas afectadas		14,586
No. Pérdidas humanas		3
Hectáreas de cultivo afectadas		80,948
Pérdidas económicas (US\$)		129,645,485
Flujo económico (US\$)	Cultivos	34,527,707
	Ayuda humanitaria	224,628
	Indemnización a agricultores	11,737,494

Tabla 63. Pérdidas esperadas por tipo de componente. Cuenca Río Grande

Grupo de uso	Valor expuesto (US\$)	Pérdida escenario crítico (US\$)
Adobe	58,533,196.35	2,765,705.81
Bosque	-	-
Cultivo heterogéneo	699,288,840.42	49,165,967.98
Cultivo homogéneo	300,835,266.61	12,792,101.95
Cultivo semihomogéneo	166,097,328.89	13,805,899.41
Galpón	184,319,661.37	-
Madera	239,040,029.90	3,801,112.95
Mampostería	2,030,184,864.38	46,937,044.12
Precario	8,809,497.81	377,653.09
Centro productivo	25,487,976.16	-
Zona de reserva	-	-
TOTAL	3,712,596,662	129,645,485

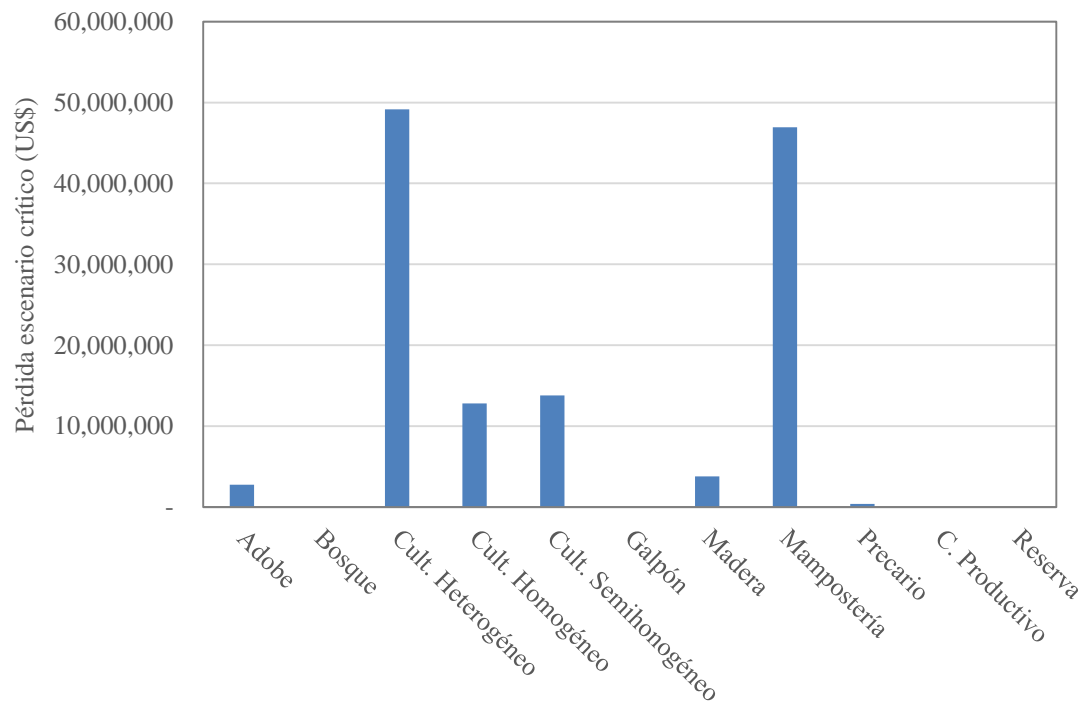


Figura 157. Pérdidas esperadas para el escenario crítico. Cuenca Río Grande

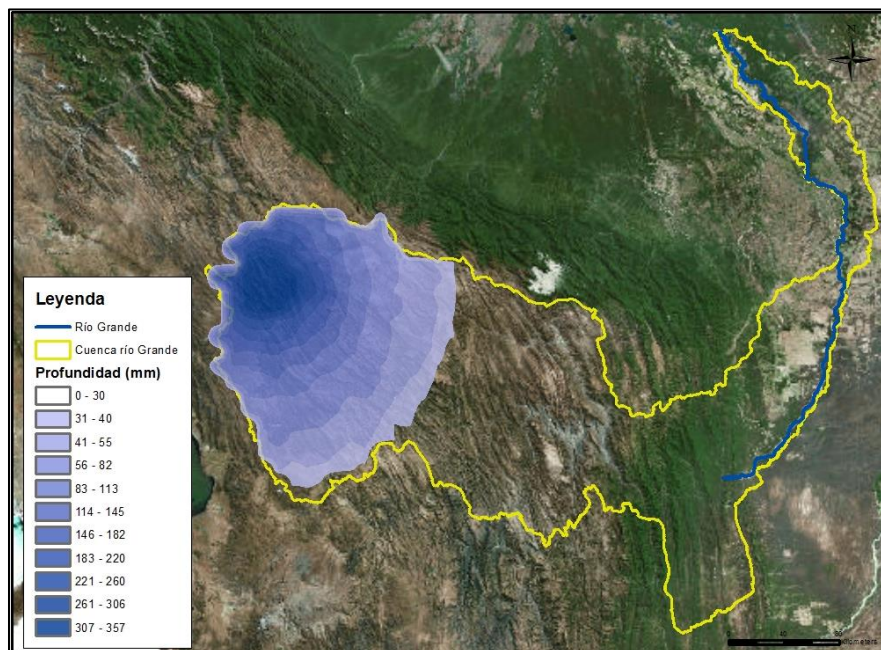


Figura 158. Lluvia que genera el escenario crítico de riesgo. Cuenca Río Grande

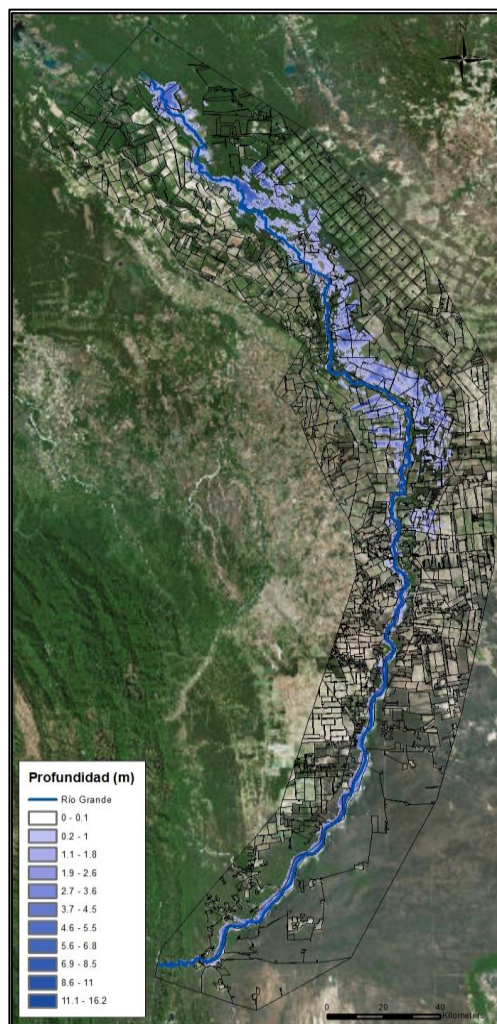


Figura 159. Escenario crítico de inundación. Cuenca Río Grande

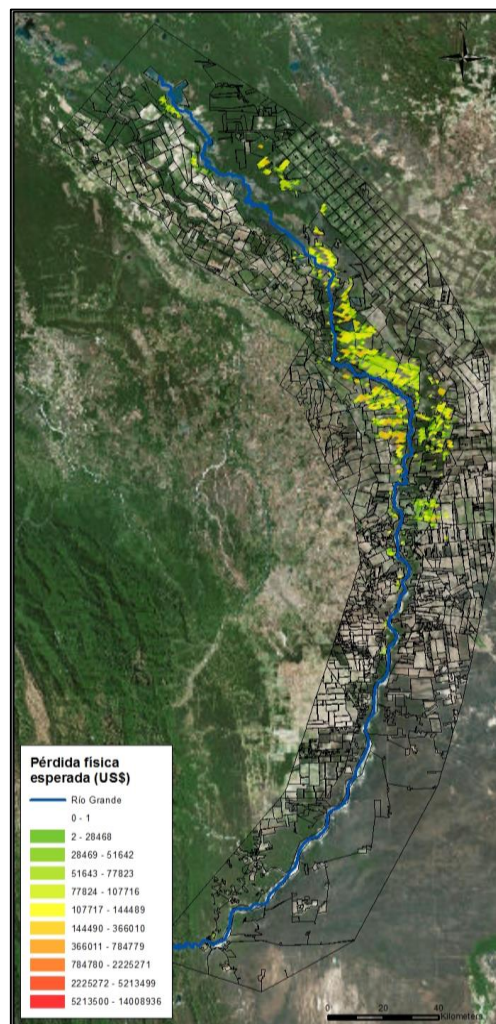


Figura 160. Pérdidas esperadas para el escenario crítico en valor absoluto (US\$). Cuenca Río Grande

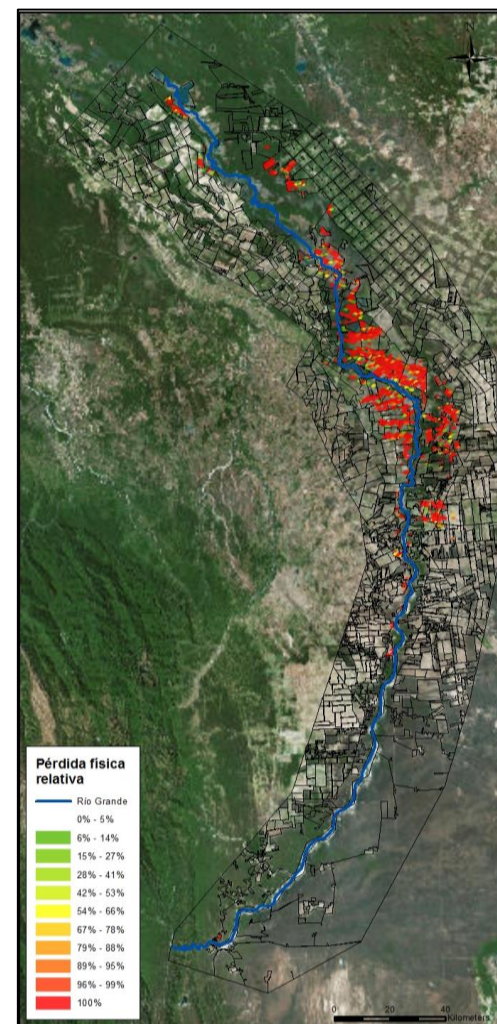


Figura 161. Pérdidas esperadas para el escenario crítico con respecto al valor de reposición individual (%). Cuenca Río Grande

Por otro lado, la Figura 162 presenta los resultados de pérdidas para todos los escenarios de inundación contenidos en el análisis organizado de menor a mayor y un histograma con el número de escenarios cuya pérdida esperada se encuentra dentro de los diferentes rangos definidos.

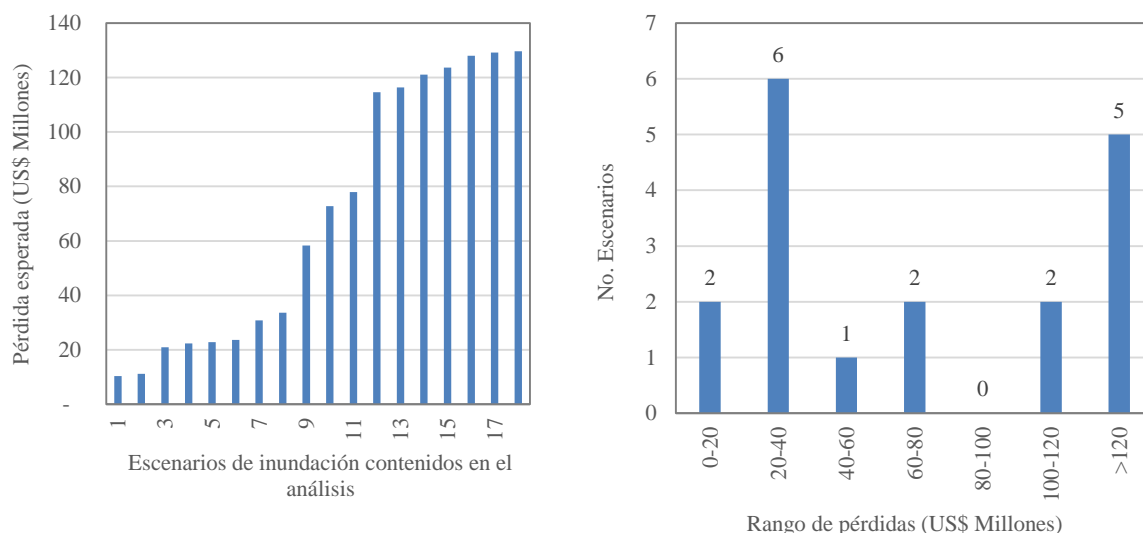


Figura 162. Resultados de pérdidas para el portafolio de escenarios de inundación. Cuenca Río Grande

La Tabla 64 presenta el resumen de las pérdidas esperadas para cinco escenarios de inundación analizados. De igual manera, de la Figura 163 a la Figura 166 se presentan las lluvias e inundaciones asociadas a cada escenario, así como la distribución geográfica de pérdidas absolutas y relativas. Estos escenarios ilustran las diferentes posibilidades de escenarios de inundación para la cuenca del río Grande. . Finalmente, la Figura 167 presenta el resumen de pérdidas esperadas por tipo de uso para cinco escenarios críticos en la cuenca del río Grande.

Tabla 64. Resumen de pérdida esperada para algunos escenarios críticos de inundación. Cuenca Río Grande

No. escenario	Nombre escenario	Pérdida esperada (US\$)
11	Lluvia_Duracion5_TR25_Tormenta1	116,351,768
16	Lluvia_Duracion5_TR100_Tormenta0	129,106,409
17	Lluvia_Duracion5_TR100_Tormenta1	121,101,950
18	Lluvia_Duracion5_TR100_Tormenta2	22,346,063

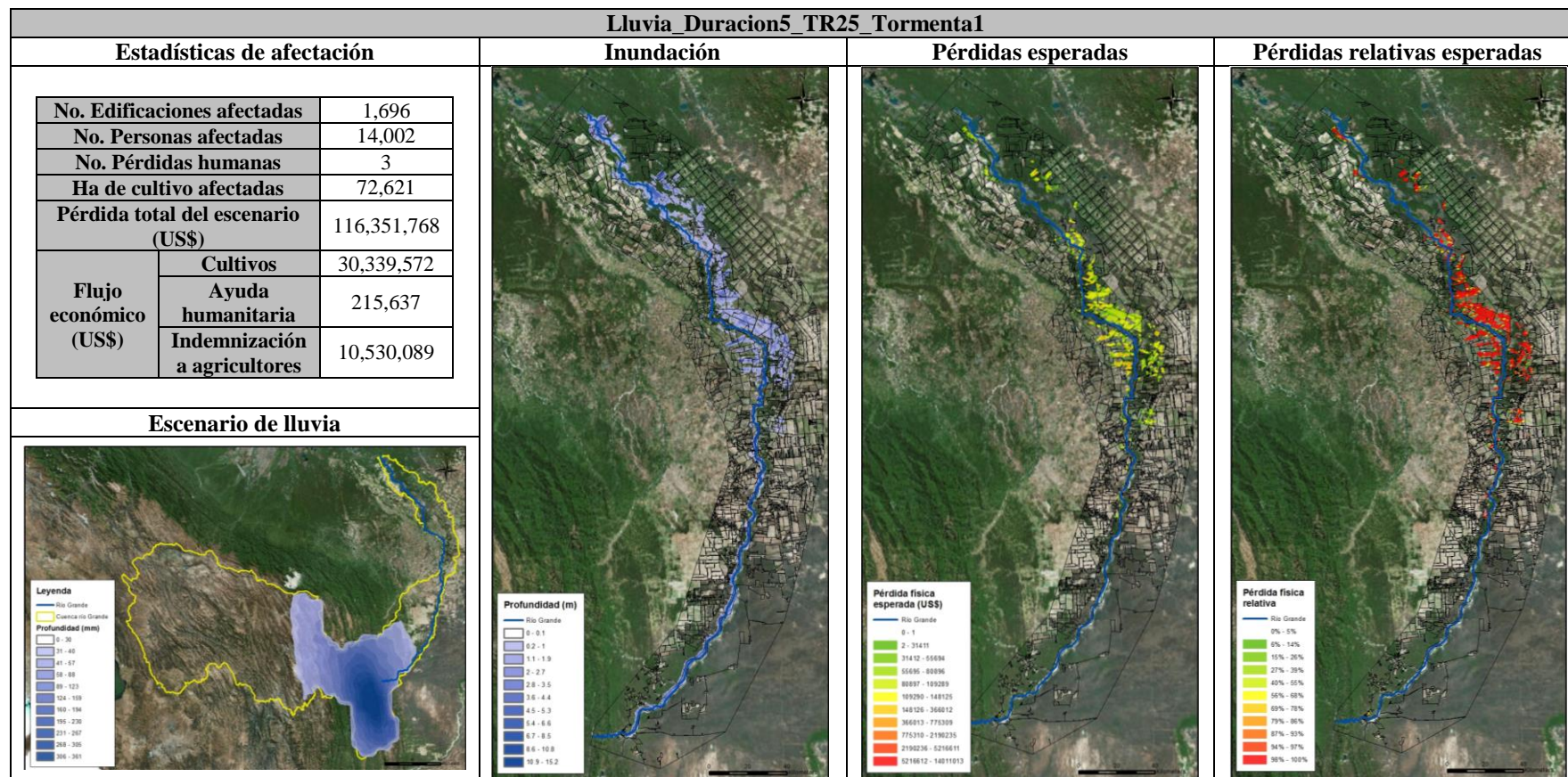


Figura 163. Resultados para el escenario 11. Cuenca Río Grande

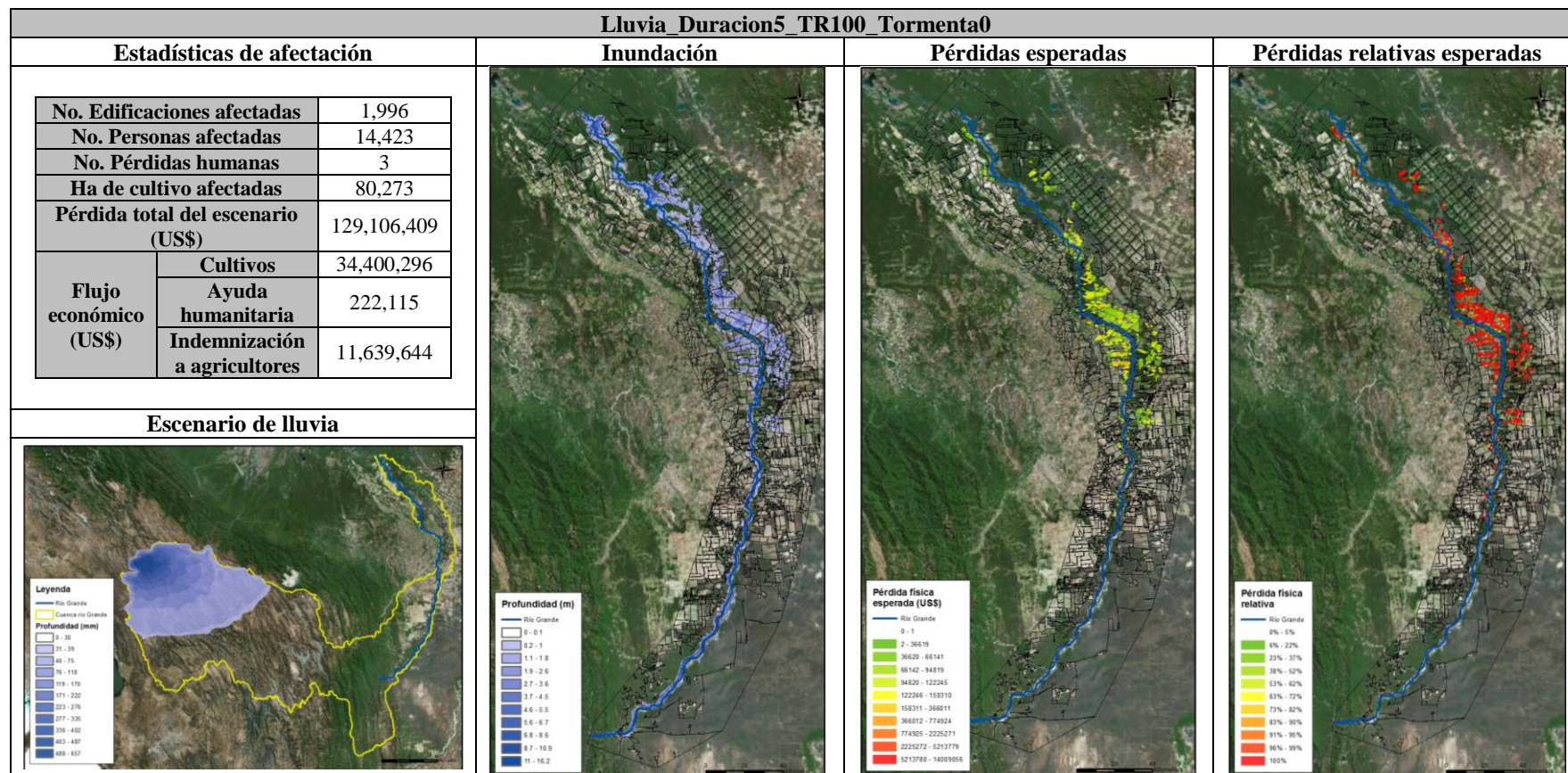


Figura 164. Resultados para el escenario 16. Cuenca Río Grande

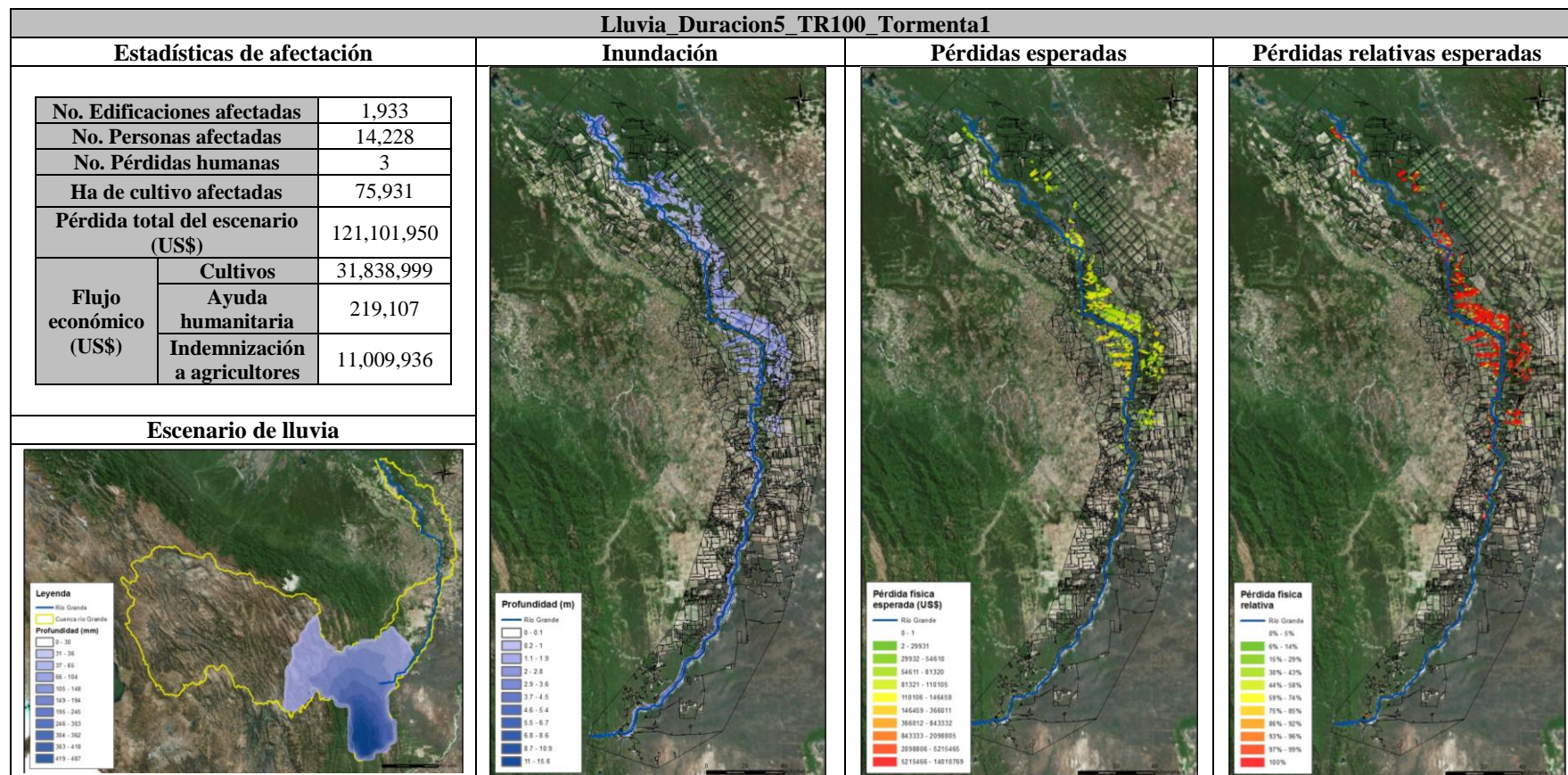


Figura 165. Resultados para el escenario 17. Cuenca Río Grande

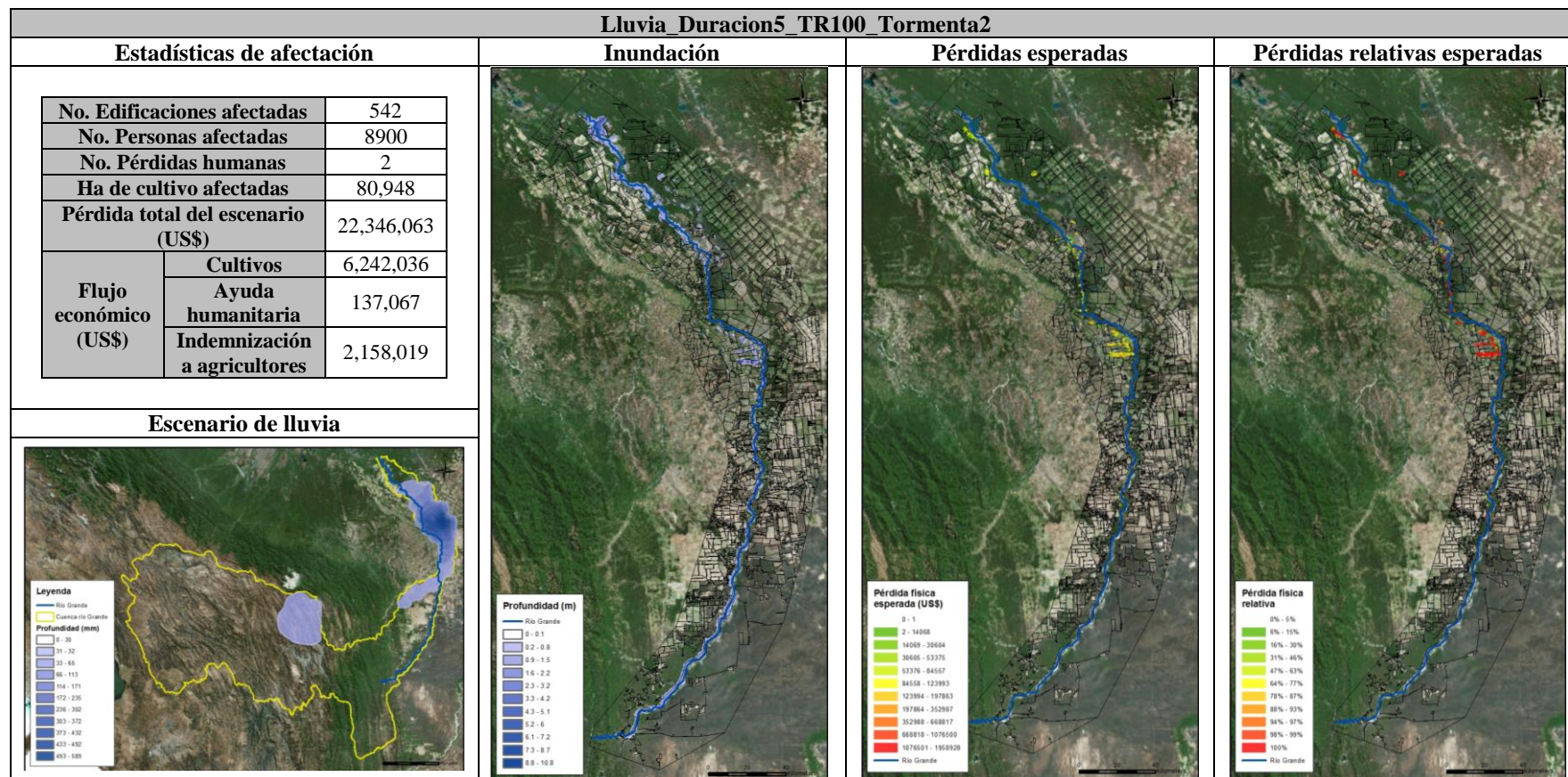


Figura 166. Resultados para el escenario 18. Cuenca Río Grande

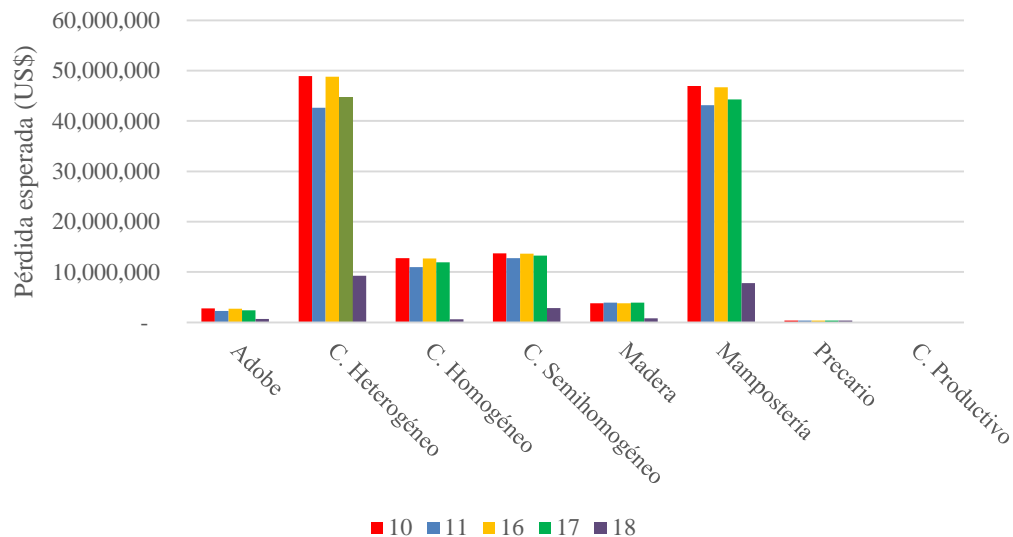


Figura 167. Resumen de pérdidas esperadas por tipo de uso para cinco escenarios en la cuenca del río Grande

7.2.4 Resumen e integración de resultados del análisis de riesgo

Los resultados anteriores se resumen e integran en la Tabla 65 para la cuenca del río Rocha y la cuenca del Río Grande.

Tabla 65. Resumen de resultados del escenario crítico para las cuencas analizadas

Cuenca	PAE* (millones US\$)	PML* TR=100 años (millones US\$)	Estadísticas escenario crítico						
			No. total de construcciones afectadas	No. total de construcciones destruidas	No. total de personas afectadas	No. de pérdidas humanas	Hectáreas de cultivos afectadas	Flujo económico por cultivos (millones US\$)	Pérdida económica máxima esperada (millones US\$)
Río Rocha	1.3	17	28,391	19,403	8,807	2	963	0.3	65
Río Grande	30	106	1,996	1,575	14,586	3	80,948	35	130

*PAE: Pérdida anual esperada

*PML: Pérdida máxima probable

**Valores estimados con número limitado de escenarios

7.2.5 Riesgo representativos

En la Figura 168 se presenta el riesgo de inundación para el escenario crítico de análisis para la cuenca del río Rocha y en la Figura 169 se presenta el riesgo de inundaciones para el escenario crítico de análisis en la cuenca del río Grande.

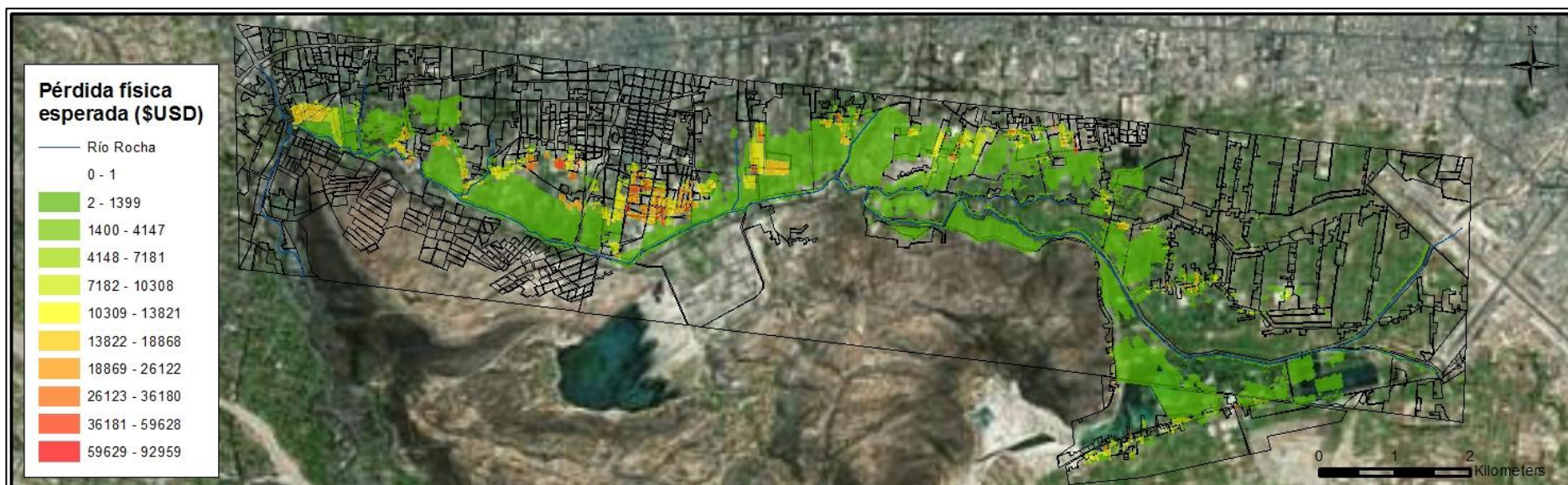


Figura 168. Riesgo de inundaciones para el escenario crítico de análisis para la cuenca del río Rocha

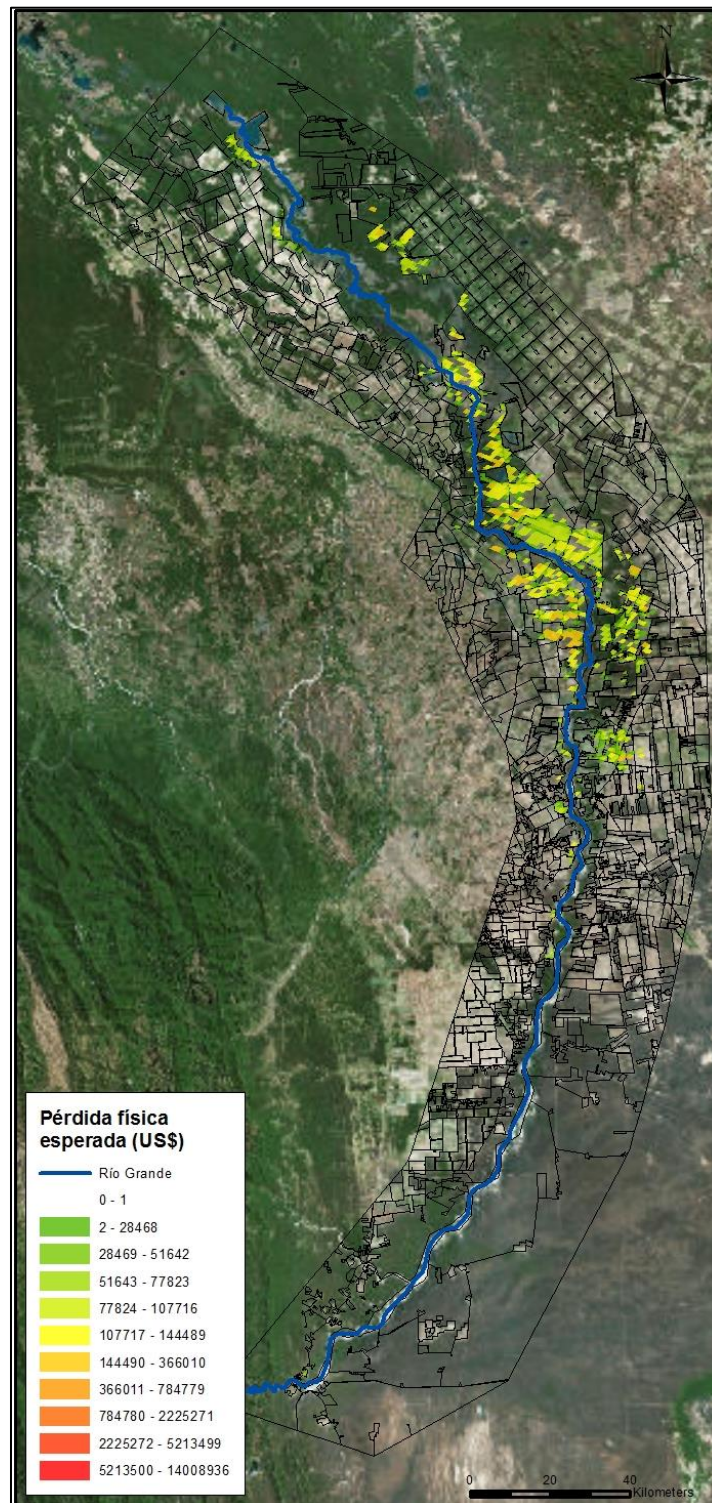


Figura 169. Riesgo de inundaciones para el escenario crítico de análisis para la cuenca del río Grande

7.2.6 Otros impactos por inundación

De manera ilustrativa se cuantifican las pérdidas por interrupción de flujos económicos debido a la afectación de cultivos en las zonas inundadas, a la interrupción de vías de comunicación y a los eventuales gastos relacionados con ayuda humanitaria e indemnizaciones. También se presentan unos estimativos de pérdida de vidas humanas en caso de eventos catastróficos en las cuencas estudiadas.

Las cifras que se presentan tienen carácter puramente indicativo y solo pretenden dimensionar los posibles impactos de eventos catastróficos seleccionados. En ningún caso dichas estimaciones deberán tomarse como absolutas y confiables, y su alta incertidumbre debe tenerse en cuenta a la hora de tomar decisiones.

7.2.6.1 Pérdidas económicas por afectación de cultivos

Con el propósito de cuantificar el impacto económico por afectación de cultivos se realiza un análisis de riesgo determinista para algunos escenarios de inundación donde el valor expuesto corresponde únicamente al ingreso neto por hectárea definido en la Tabla 50. Utilizando esta información y el impacto en los cultivos de los escenarios críticos identificados en cada una de las cuencas se presentan los estimativos de la Tabla 66.

Tabla 66. Impacto económico por afectación de cultivos en escenarios críticos

CUENCA	ESCENARIO No.	Número de Hectáreas de cultivos afectadas por el evento de inundación	Pérdida económica máxima por afectación de cultivos para los propietarios (USD\$)
Rio Rocha	505	676	154,986
	575	268	65,854
	592	474	114,780
	594	79	17,714
	595	787	184,818
	600	963	230,758
Rio Grande	10	80,948	34,527,707
	11	72,621	30,339,572
	16	80,273	34,400,296
	17	75,101,950	31,838,999
	18	80,948	6,242,036

7.2.6.2 Pérdidas económicas por interrupción de vías de comunicación

Dado que en la zona expuesta en la cuenca del río Rocha no se encuentran vías principales este análisis solo se realiza para la cuenca del río Grande.

El sistema Vial Carretero de Bolivia está conformado por la Red Vial Fundamental (RVF), la Red Vial Departamental (RVD) y la Red Vial Municipal (RVM). La RVF es administrada por la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), tiene una longitud de 16,054 km en donde se encuentran cinco corredores principales de transporte con una extensión de 9,650 km, equivalente al 60% de la RVF: Corredor Este-Oeste, Corredor Oeste-Sur, Corredor Oeste-Norte, Corredor Norte Sur y Corredor Central-Sur (Ver Figura 170).

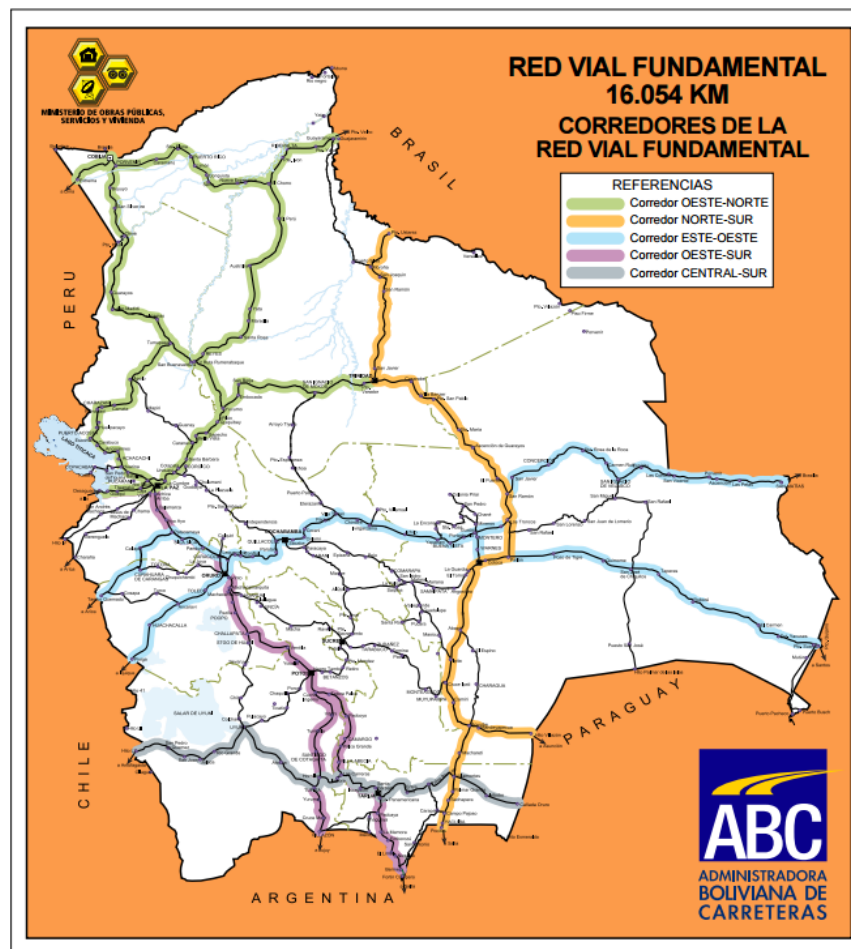


Figura 170: Corredores RVF. Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras (ABC)

El único corredor que se puede ver afectado por las inundaciones del río Grande es el corredor Este-Oeste, el cual a su vez es el corredor más importante ya que permite la vinculación con los puertos del Atlántico (Puerto Santos en Brasil) y del Pacífico Sur (Puerto Ilo en Perú, Puerto Arica y Puerto Iquique en Chile) y el de mayor flujo de transporte con un 53% del flujo comercial total (incluyendo exportaciones e importaciones vía carretera) de acuerdo a datos del Instituto Nacional de Estadística de Bolivia - INE.

El corredor Este-Oeste conecta a Brasil (en los puertos fronterizos de San Matías y Puerto Suárez) con Chile (en los puertos fronterizos Pisiga y Tambo Quemado) y con Perú (en el puerto fronterizo Desaguadero) tal como se ve en la siguiente figura.

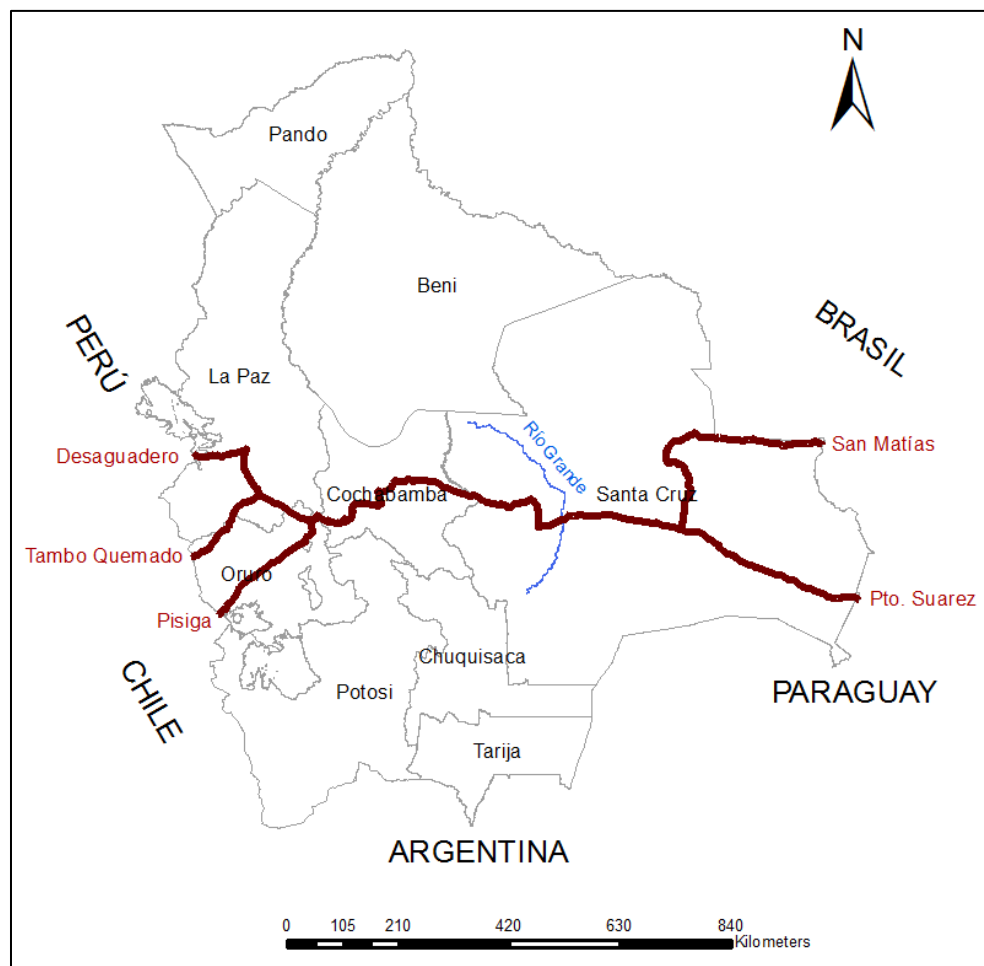


Figura 171. Corredor Este-Oeste Bolivia

De presentarse una inundación en el río Grande, tal como la que se presentó en el 2008 (desde Puerto Pailas hacia aguas abajo), la ruta 10 desde Banegas a montero y la ruta 9 de Pailón a Santa Cruz de la Sierra quedan inhabilitadas. Por lo tanto los vehículos que transitan por el corredor Este-Oeste deben tomar una desviación hacia las rutas 9 y 3 ubicadas al norte en el departamento del Beni como se presenta en la siguiente figura.

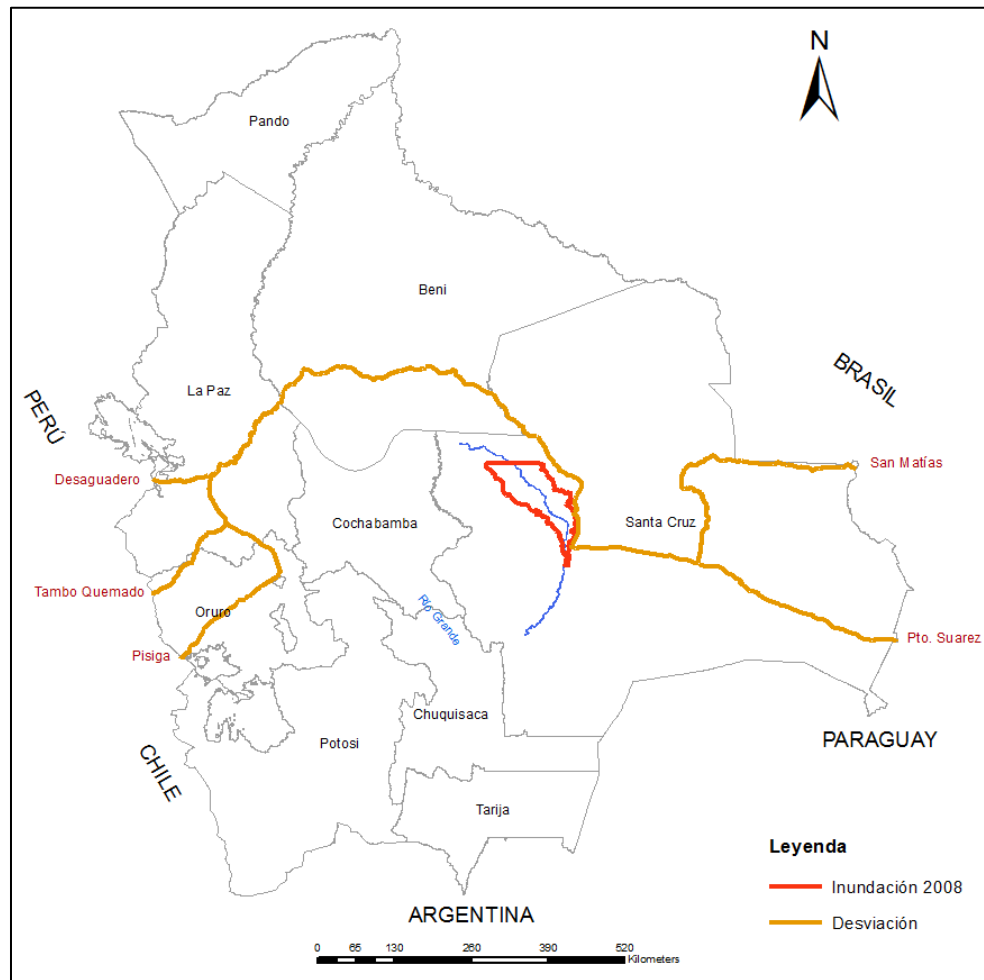
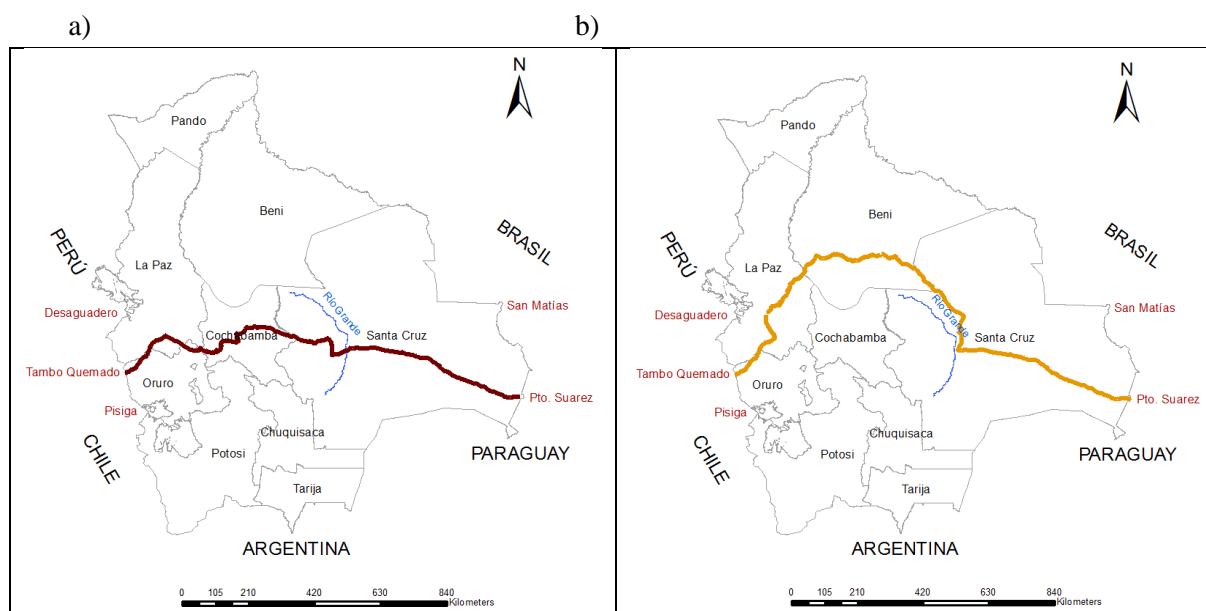
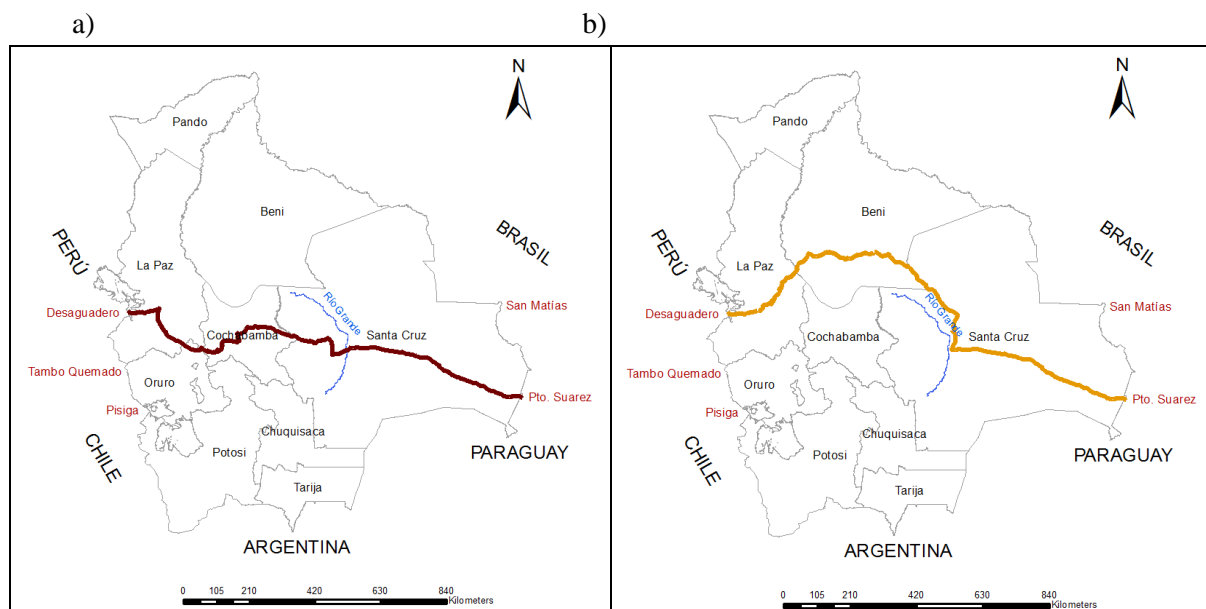


Figura 172. Desviación por inundación para el corredor Este-Oeste Bolivia

Por convención se definen seis trayectos de la siguiente forma:

- **Trayecto 1:** De Puerto Suárez a Desaguadero
- **Trayecto 2:** De Puerto Suárez a Tambo Quemado
- **Trayecto 3:** De Puerto Suárez a Pisiga
- **Trayecto 4:** De San Matías a Desaguadero
- **Trayecto 5:** De San Matías a Tambo Quemado
- **Trayecto 6:** De San Matías a Pisiga

En las siguientes figuras se presentan los trayectos anteriormente descritos y su desviación correspondiente por inundación en las vías de la zona de estudio.



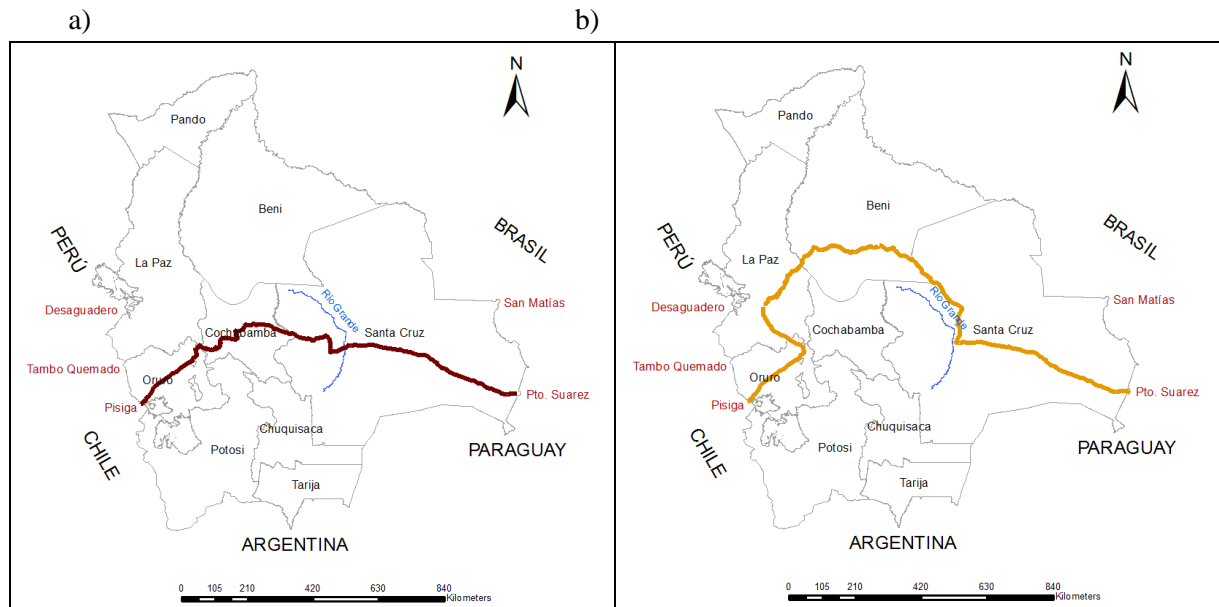


Figura 175. Trayecto 3: Pto. Suarez a Pisiga. a) Trayecto sin considerar inundación; b) Desvío por inundación

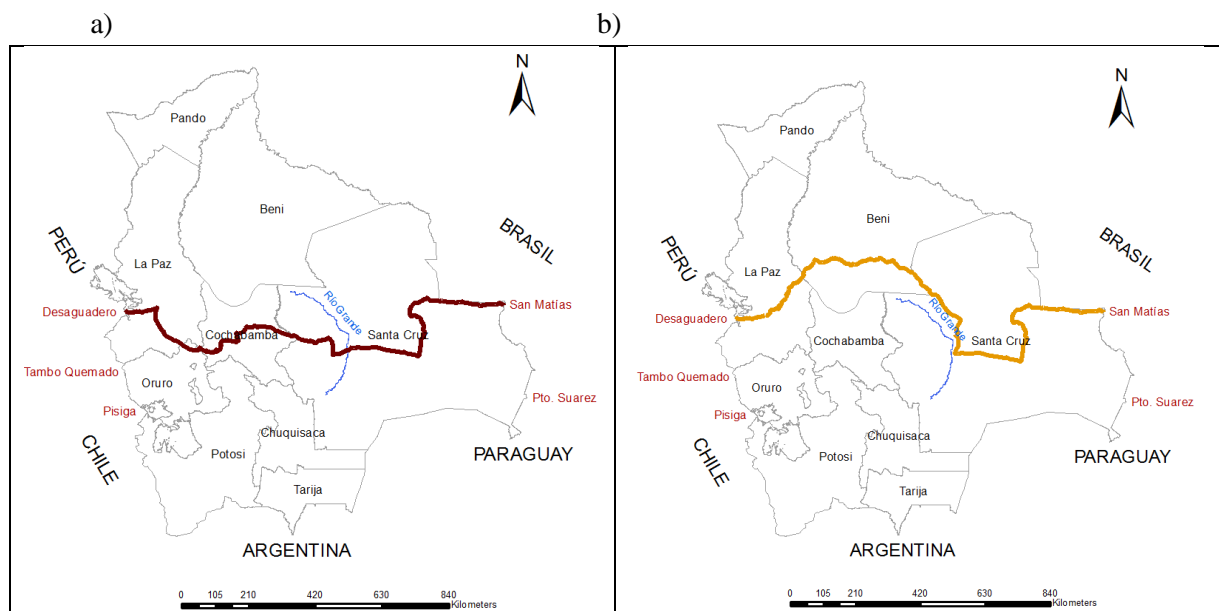


Figura 176. Trayecto 4: San Matías a Desaguadero. a) Trayecto sin considerar inundación; b) Desvío por inundación

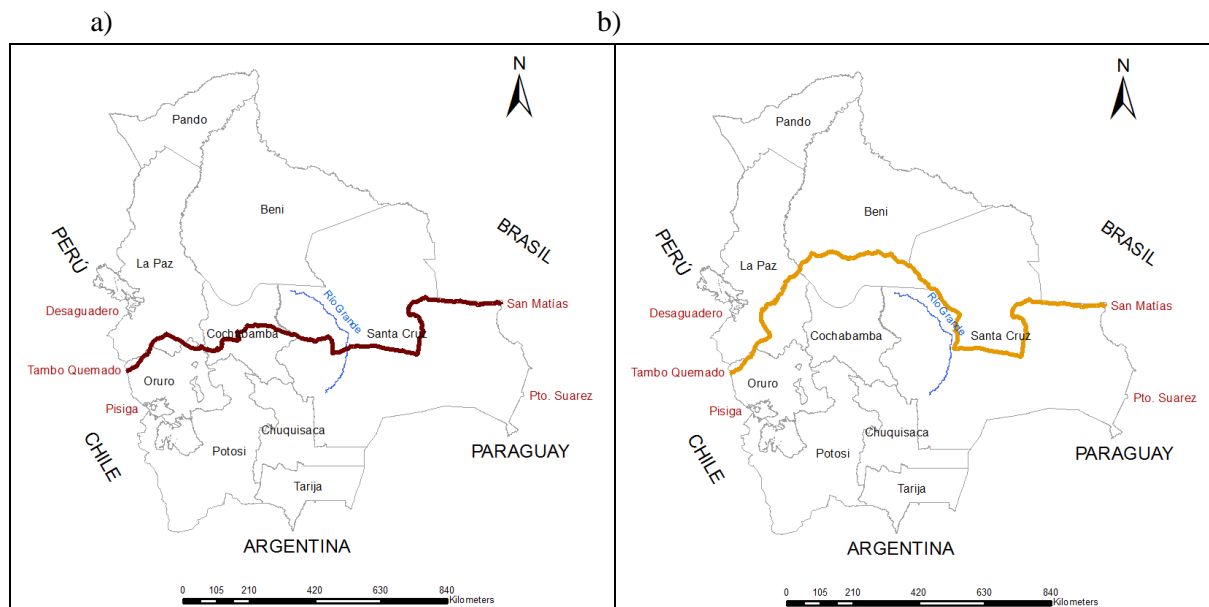


Figura 177. Trayecto 5: San Matías a Tambo Quemado. a) Trayecto sin considerar inundación; b) Desvío por inundación

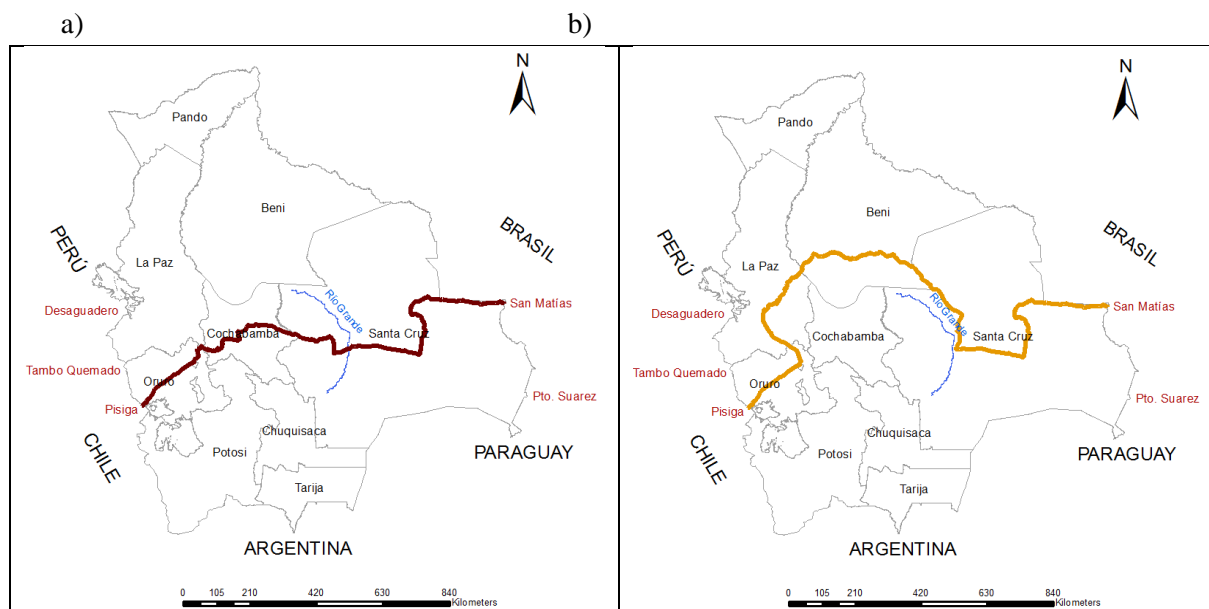


Figura 178. Trayecto 6: San Matías a Pisiga. a) Trayecto sin considerar inundación; b) Desvío por inundación

De acuerdo a Vías Bolivia, para el año 2012 por los corredores de la RVF circularon en promedio 86,575 camiones de carga diarios, de los cuales el 70.2% circularon por el corredor Este-Oeste, equivalente a 60,776 camiones. De éstos camiones, el 26.1% son de tipo semirremolque, 25.4% mediano (2 ejes), 22.5% grande (3 ejes), 15.9% grande (2 ejes) y 10.2% con remolque. Con base a estos datos y asumiendo que los camiones operan con una capacidad de carga 80%, el volumen de carga que transita por el corredor Este-Oeste es de aproximadamente 50,200 toneladas al día y 18,074,000 toneladas al año.

De acuerdo a datos del Instituto Nacional de Estadística de Bolivia – INE, el flujo de carga de exportaciones e importaciones en Bolivia es de aproximadamente 7.5 millones de toneladas anuales, el comercio interno de alimentos, aproximadamente 13 millones toneladas y el transporte de otros bienes 2 millones de toneladas, dando un total de 22.5 millones de toneladas anuales que transitan por todo el país.

Adicionalmente, de acuerdo a los Perfiles de País en Transporte de Carga del BID la tarifa promedio por carretera en Bolivia es de 0.13 US\$ ton-km.

A fin de saber la distancia y duración promedio de cada uno de los seis trayectos, tanto para su recorrido sin considerar inundación como para la desviación por inundación, se usó la herramienta de Google, Google Maps.

Una vez teniendo estos valores, es posible calcular el costo de transporte de carga diaria para cada trayecto, así como el costo de transporte que implica la desviación de los camiones por inundación como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 67. Distancia, duración y costo de transporte para el corredor Este-Oeste sin inundación y en su desviación por inundación

TRAYECTO	Sin inundación			Con inundación			Diferencia		
	Distancia	Duración	costo transporte	Distancia	Duración	costo transporte	Distancia	Duración	costo transporte
	km	horas	US\$ /día	km	horas	US\$ /día	km	horas	US\$ /día
1	1573	22	10,265,398	1785	31	11,648,910	212.0	9.0	1,383,512
2	1597	23	10,422,022	1961	33	12,797,486	364.0	10.0	2,375,464
3	1574	26	10,271,924	2134	38	13,926,484	560.0	12.0	3,654,560
4	1633	29	10,656,958	1833	38	11,962,158	200.0	9.0	1,305,200
5	1645	30	10,735,270	2009	40	13,110,734	364.0	10.0	2,375,464
6	1624	32	10,598,224	2182	45	14,239,732	558.0	13.0	3,641,508
PROMEDIO	1608	27	10,491,633	1984	38	12,947,584	376.3	10.5	2,455,951

De la tabla anterior se puede ver que la distancia y duración promedio extra que los vehículos deben recorrer, debido a la desviación por inundación en las vías mencionadas, es de 376.3 km y 10.5 horas respectivamente. Además, el costo de transporte se incrementaría en promedio US\$ 2,455,951 por cada día que las vías permanezcan cerradas por inundación, equivalente a un aumento del 23.4% en el costo de transporte.

Para los escenarios críticos de inundación analizados para el Rio Grande no se han hecho estimativos del número de días que podrían durar inundaciones de tipo catastrófico. Sin embargo, según información de eventos pasados resulta posible que una inundación del tipo que se está analizando podría tener duraciones del orden de 30 días (de acuerdo a consultor local). Según esto, el costo de una inundación de tipo catastrófico en la cuenca del río Grande puede llegar a generar pérdidas económicas por interrupción de

vías de comunicación del orden de US\$ 80 a US\$ 100 millones sin considerar posibles afectaciones a elementos perecederos u otras situaciones particulares que pudiese presentarse.

7.2.6.3 Ayuda humanitaria e indemnizaciones

También se hacen unos análisis de tipo indicativo sobre los eventuales costos por ayudas humanitarias que pueden presentarse en eventos de tipo catastrófico en las cuencas analizadas. De acuerdo a datos reportados en el año 2014 en la Unidad de Gestión de Suministros para la Defensa Civil, 8,749 familias en Bolivia requirieron ayuda humanitaria por eventos de inundación. La ayuda humanitaria ofrecida a las familias afectadas incluía alimentos, herramientas, ropa de cama, refugio y vivienda, entre otros, sumando un monto total de Bs 3,726,928 para el año 2014, equivalente a US\$ 540,162.31 (1 boliviano = 0.144935 dólares para el año 2015).

Para calcular el costo de ayuda humanitaria por cada afectado para los diferentes escenarios de inundación, se asume que cada familia estaría conformada en promedio por cuatro miembros. De esta manera, cada afectado por inundación implica un costo en ayuda humanitaria de aproximadamente Bs 106.5, equivalente a US\$ 15.4 .

En cuanto a las indemnizaciones por afectación de cultivos, el 29 de enero del 2014 se aprobó el Decreto Supremo 1883 el cual autoriza al Ministerio de Economía transferir hasta Bs 24 millones al Instituto Nacional de Seguro Agrario (INSA), para indemnizar a los agricultores que perdieron su cosecha por desastres asociados a eventos naturales. Por lo tanto, por cada hectárea afectada se indemnizará a los agricultores con Bs 1,000, equivalente a US\$ 145.

De acuerdo con lo anterior, la Tabla 68 resumen los costos asociados a ayuda humanitaria a personas afectadas y por afectación a cultivos que podría presentarse en cada uno de los escenarios críticos estudiados en cada una de las cuencas.

Tabla 68. Costos de ayuda humanitaria y por afectación a cultivos en escenarios críticos

CUENCA	ESCENARIO No.	Costo estimado de ayudas humanitarias (\$US)	Costo estimado de ayudas por afectación de cultivos (\$US)
Rio Rocha	505	86,517	98,020
	575	26,796	38,860
	592	53,962	68,730
	594	12,289	11,455
	595	105,197	114,115
	600	135,628	139,635
Rio Grande	10	224,628	11,737,494
	11	215,637	10,530,089
	16	222,115	11,639,644
	17	219,107	11,009,936
	18	137,067	2,158,019

De acuerdo con lo anterior, por cuenta de ayudas humanitarias se podrían esperar costos del orden de los US\$ 100,000 en escenarios críticos de la cuenca del Río Rocha y de US\$ 200,000 para la cuenca del Río Grande.

En contraste, por cuenta de costos por indemnizaciones por afectaciones de cultivos se podrían esperar costos del orden de los US\$ 100,000 en escenarios críticos de la cuenca del Río Rocha y de US\$ 10 millones para la cuenca del Río Grande.

7.2.6.4 Pérdidas de vidas humanas

Las pérdidas humanas por inundación en las zonas de exposición, tanto para la cuenca del río Grande como para la cuenca del río Rocha, se calcularon a partir de antecedentes reportados en la base de datos de desastres EM-DAT (EM_DAT, 2014) los cuales se encuentran a nivel país. Se hizo un filtro por eventos, dejando únicamente los eventos de inundación, y de número de afectados mayor a cero. Luego se realizó un gráfico de dispersión del número de pérdidas humanas (en el eje de las ordenadas) contra el número de afectados (en el eje de las abscisas), así como la regresión lineal de los datos, obteniendo de esta manera la correlación entre el número de afectados y número de pérdidas humanas, la cual para Bolivia es de 0.00016732 por cada afectado (o 17 por cada 100,000 habitantes) como se presenta en la siguiente figura.

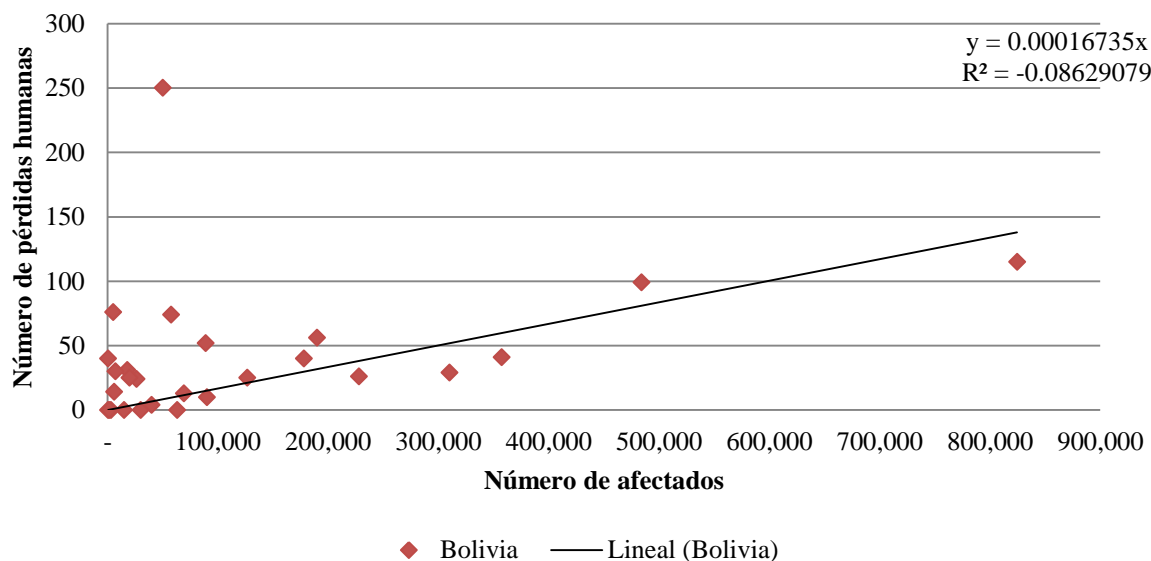


Figura 179. Pérdidas humanas vs. Número de afectados por inundación en Bolivia

Luego, para obtener el número de pérdidas humanas para cada escenario de inundación, se multiplica el número de afectados en la zona de exposición por la correlación entre el número de afectados y el número de pérdidas humanas mencionado anteriormente (0.00016732 pérdidas humanas por cada afectado).

A fin de comparar a Bolivia con demás países de Suramérica, se obtuvo la correlación entre el número de afectados y número de pérdidas humanas por inundación para distintos países de Suramérica, utilizando el mismo procedimiento descrito anteriormente. En la siguiente tabla y figura se presentan los valores encontrados.

Tabla 69. Tasa de mortalidad por inundación para Bolivia y distintos países de Suramérica

PAÍS	Correlación*	Pérdidas humanas / 100,000 afectados
Bolivia	1.674E-04	17
Chile	3.704E-05	4
Colombia	3.221E-05	3
Venezuela	2.778E-05	3
Brasil	2.523E-05	3
Ecuador	1.805E-05	2
Argentina	1.213E-05	1
Perú	9.300E-06	1
PROMEDIO	4.114E-05	4

Nota: *correlación entre el número de afectados y número de pérdidas humanas

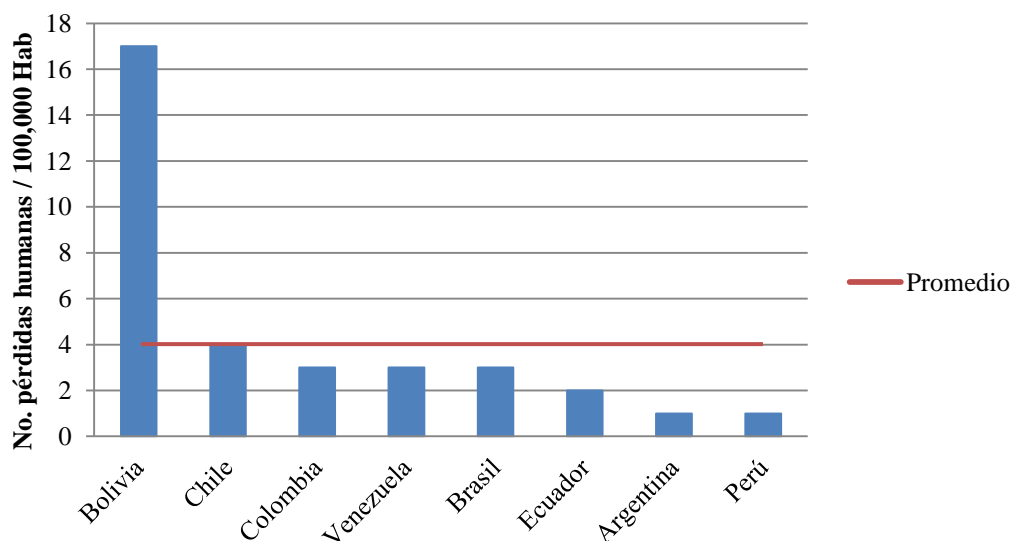


Figura 180. No. de pérdidas humanas por cada 100,000 afectados por inundación en países de Suramérica

Analizando la anterior tabla y figura, se puede observar que Bolivia presenta el mayor número de pérdidas humanas por cada 100,000 afectados en Suramérica (17 pérdidas humanas/100,000 afectados), superando casi en 5 veces tanto al país que le sigue en orden de mayor a menor (Chile) como al promedio para toda Suramérica.

De nuevo aplicando los anteriores indicadores a los resultados de los análisis de escenarios críticos en cada una de las cuencas de análisis se obtienen los resultados que se indican en la Tabla 70.

Tabla 70. Posible pérdida de vidas humanas en escenarios críticos

CUENCA	ESCENARIO No.	Número estimado de personas afectadas	Número estimado de pérdida de vidas humanas
Río Rocha	505	5,618	1
	575	1,740	1
	592	3,504	1
	594	798	0
	595	6,831	1
	600	8,807	2
Río Grande	10	14,586	3
	11	14,002	3
	16	14,423	3
	17	14,228	3
	18	8,900	2

De acuerdo a la base de datos de DesInventar, en Bolivia se han registrado, desde el año 1970 al 2012, un total de 120 eventos de inundación causando 413 pérdidas de vidas humanas. De acuerdo con esto, se han presentado en promedio 3 pérdidas humanas por evento de inundación. De la Figura 181 y la Figura 182 se puede observar que la mayoría de los eventos de inundación han causado de 1 a 3 pérdidas de vidas humanas, más específicamente el 86%, y el 14 % de los eventos de 4 a 52 pérdidas de vidas humanas. Esto se debe a que se trata de eventos repetitivos, en los que el sistema de alerta temprana permite evacuar a gran parte de la población que se encuentra en zonas de alto riesgo.

Por lo tanto, analizando la anterior tabla se puede concluir que para la cuenca del río Grande las pérdidas humanas por evento de inundación se encuentran dentro del promedio reportado a nivel país, mientras que para la cuenca del río Rocha se encuentran por debajo del promedio.

Estas cifras tienen carácter puramente indicativo y solo pretenden dimensionar los posibles impactos, por lo cual para su interpretación deberán tenerse precauciones especiales.

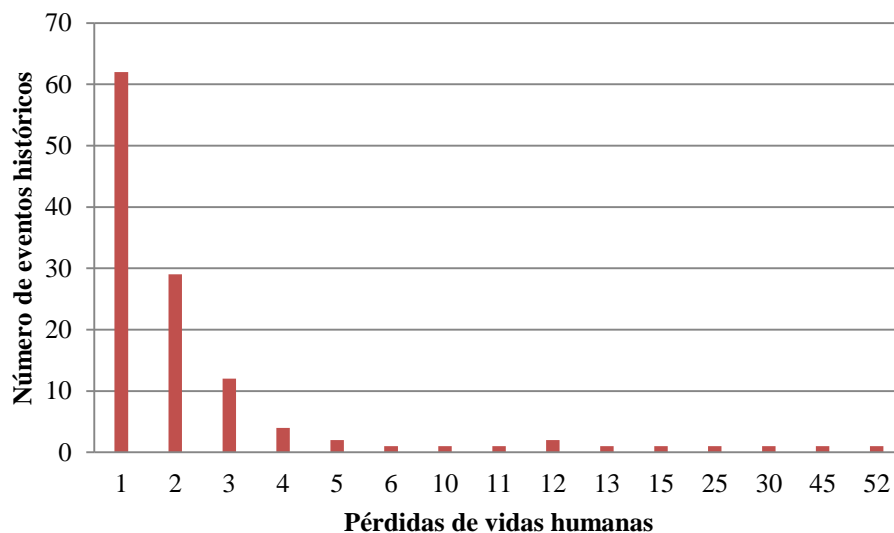


Figura 181. Pérdidas de vidas humanas vs. Número de eventos históricos en Bolivia

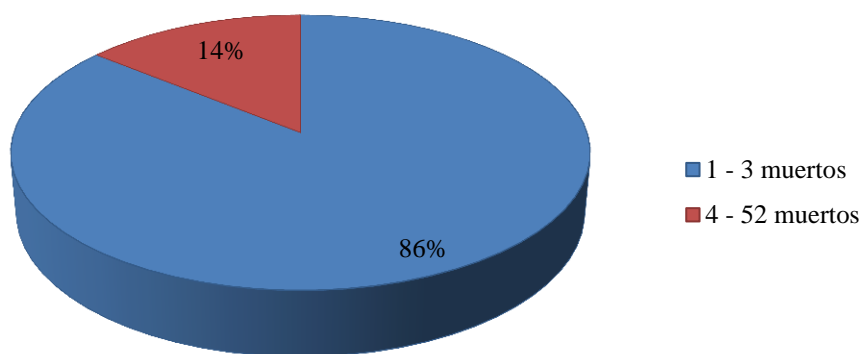


Figura 182. Porcentaje de eventos históricos de inundación con pérdidas humanas en Bolivia

8 CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS PARA INUNDACIONES FRECUENTES

8.1 MARCO GENERAL Y PROPÓSITO

La estimación económica del costo de los desastres es una tarea compleja ya que entran en consideración gran cantidad de variables y aspectos a analizar. En términos generales, los costos de los desastres pueden agruparse en costos directos, costos indirectos y efectos macroeconómicos. Los costos directos representan la afectación inmediata y dan cuenta de cambios en el inventario de activos (bienes físicos, inmuebles, edificaciones, materiales y mercancías afectadas). Los costos indirectos representan la afectación económica debido a la imposibilidad de prestar los servicios y beneficios de los bienes afectados. Finalmente los costos macroeconómicos reflejan el cambio en el comportamiento económico de un país o una región luego de la ocurrencia del desastre.

Por otro lado el impacto de desastres frecuentes, tales como las inundaciones periódicas que ocurren en sitios específicos, aunque generan impactos económicos limitados, las pérdidas asociadas son de alta frecuencia y por lo tanto generan afectación importante en el mediano y largo plazo.

Resulta relevante por lo tanto realizar una valoración aproximada de los desastres históricos de los que se tiene conocimiento relacionados con temas de inundación en Bolivia. De acuerdo a esto se pretende realizar una evaluación simplificada y práctica de las pérdidas económicas de eventos de inundación menores en Bolivia con base en la cual se puedan generar curvas de excedencia de pérdidas para eventos de inundación frecuentes. En el análisis solo se tienen en cuenta las pérdidas directas, las cuales se evalúan mediante interpretación de la información disponible y algoritmos simplificados para la evaluación de las pérdidas económicas. Solo se presenta el análisis a nivel país ya que no hay suficiente información para el nivel regional.

Para el efecto se utiliza la información contenida en la base de datos DesInventar (<http://www.desinventar.org/>), la cual proporciona información de los efectos físicos y pérdidas humanas históricas para diversos países, en el tiempo y en forma discriminada por tipo de evento tales como sismos, inundaciones, deslizamientos, volcanes, huracanes y otros. Para el presente caso se utiliza únicamente la información relacionada con eventos de inundación.

El numeral 1.4 describe la información contenida en la base de datos DesInventar de Bolivia, haciendo énfasis en el análisis de eventos relacionados con inundaciones y deslizamientos, la cual es utilizada en la elaboración de las curvas empíricas de excedencia de pérdidas tanto de inundaciones como de deslizamientos.

8.2 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

8.2.1 Agrupación temporal y espacial

Debido a que los eventos no están agrupados ni espacial, ni temporalmente, se hace necesario establecer unos criterios para agrupar diferentes registros que puedan considerarse como consecuencias de un mismo evento. Los criterios de agrupación temporal y espacial toman en cuenta que un evento puede ser reportado en diferentes registros separados en el tiempo y el espacio, debido a que se reportan daños en diferentes escalas espaciales (poblaciones, regiones, etc.) y en diferentes fechas. También se debe considerar que una categoría puede desencadenar un evento secundario perteneciente a otra categoría (por ejemplo, un evento sísmico puede ser el detonador de un deslizamiento). Los parámetros espaciales además toman en cuenta el lugar donde ocurrió el evento para agruparlo con registros similares ocurridos en el mismo lugar, o dentro de un radio de acción razonable.

La Tabla 71 presenta unos criterios de agrupación temporal, que sirven de guía metodológica, la cual debe validarse caso por caso según un análisis riguroso de la base de datos y de las amenazas presentes en cada región. La agrupación espacial se debe establecer en cada caso particular, ya que no hay una metodología única de recopilación de datos. Estos pueden ser obtenidos y almacenados en diversos niveles de administración política. Como criterio general se trata de agrupar los registros en el nivel inmediatamente superior al nivel correspondiente a poblaciones.

Tabla 71. Criterios de agrupación temporal

Causa	Consecuencia	Tiempo transcurrido [días]
Sequía	Sequía	15
Huracanes	Huracanes	5
	Hidrometeorológicos	5
	Deslizamientos	5
Hidrometeorológicos	Hidrometeorológicos	2
	Deslizamientos	2
Deslizamientos	Deslizamientos	1
Tectónicos	Tectónicos	2
	Deslizamientos	3
Volcánicos	Volcánicos	5

La agrupación espacial se da dentro de un nivel de división político-administrativo, en el cual se puedan considerar como consecuencias de un mismo evento diferentes registros. Aunque esta aproximación tiene sus desventajas, es la forma más sencilla y explícita de realizar la agrupación. Empleando simultáneamente los parámetros de agrupación espacial y temporal se pretende consolidar la información recolectadas en diferentes poblaciones, en un único registro.

En el presente caso se han considerado las causas descritas como Desbordamientos, Inundación, Lluvias y Tempestad en la categoría de inundaciones.

8.2.2 Modelo de costos

Para efectos del presente proyecto, la estimación de los costos de los eventos reportados en la base de datos DesInventar incluye únicamente una valoración global indicativa de los efectos directos. No se consideran en el presente análisis los efectos indirectos, ni los efectos macroeconómicos (dado que la correcta evaluación de sus consecuencias, la afectación al flujo de capital o a la economía, requiere un nivel de detalle que escapa del alcance actual y del tipo de información disponible).

El modelo de costos propuesto pretende estimar el mínimo costo del evento o el capital monetario que un gobierno habría requerido para cubrir su responsabilidad fiscal hacia los sectores menos favorecidos de la sociedad (dado que ha permitido la construcción de viviendas en sectores que no son idóneos o mediante el uso de técnicas que no cumplen las reglamentaciones mínimas de seguridad). El modelo planteado no pretende en ningún momento estimar el costo total de los diferentes desastres reportados en la base de datos, ni establecer cifras que puedan compararse con la estimación oficial de costos siguiendo por ejemplo la metodología propuesta por la CEPAL.

Dado que el principal indicador a usar para la valoración económica de los desastres es el número de viviendas (afectadas y destruidas), se propone emplear como valor de reposición, el valor nominal de la vivienda de interés social. No se considera el valor comercial real de los inmuebles impactados, dado que en el concepto empleado de responsabilidad fiscal, consiste en dar solución de vivienda y no reponer lo que existía anteriormente a la ocurrencia del evento (pudiendo ser más o menos costoso). Se supone que otros sectores económicos, dada su mayor capacidad y resiliencia, construyen en lugares más adecuados y menos susceptibles a daños por fenómenos naturales, emplean mejores técnicas, procesos y materiales que cumplen los códigos normativos de construcciones y que adicionalmente tienen acceso al mercado de seguros, por lo que no necesitarían en principio la ayuda del gobierno local.

8.2.3 Suposiciones básicas para el análisis

Con el fin de poder plantear un modelo consistente, aunque solamente con carácter indicativo, para la valoración de los eventos contenidos en la base de datos se plantean una serie de supuestos e hipótesis que deben quedar muy claramente establecidas con fines de interpretación y aplicación de los resultados del análisis.

Para efectos del presente análisis, la evaluación económica de las pérdidas producidas por cada uno de los eventos se basa en la responsabilidad fiscal del gobierno, en el supuesto caso que el mismo tenga por responsabilidad constitucional o administrativa, el remplazo de las viviendas afectadas de los sectores más vulnerables de la población, con una vivienda básica de interés social.

Por otro lado, considerando que la base de datos DesInventar tiene un extenso registro de eventos, los cuales corresponden en su gran mayoría a eventos menores que se producen por lo general en zonas de alta susceptibilidad y por lo tanto corresponden en general a zonas rurales o periféricas de las ciudades, se presume que dichos eventos afectan principalmente a los sectores más vulnerables de la sociedad, lo cual sería compatible con el tipo de valoración que se pretende realizar.

Se propone por lo tanto realizar una valoración de cada uno de los eventos empleando un valor indicativo de reposición fiscal de cada unidad el cual se aplicaría de manera razonable a la información referente a número de viviendas afectadas. Otras variables como centros de salud, escuelas y vías, aunque no tienen asociada una descripción explícita que permita identificar el tamaño del elemento original, ni el nivel de afectación se emplean en el análisis de manera genérica, de modo que se pueda obtener una mejor estimación de la responsabilidad fiscal.

Las consideraciones y los supuestos básicos del análisis son los siguientes:

- La estimación del impacto económico de los eventos se basa en las variables disponibles en la base de datos. En el presente caso se consideran únicamente viviendas afectadas, las viviendas destruidas, centros de salud, escuelas, y cultivos.
- No se consideran la correlación entre la afectación humana y los daños o afectación a las viviendas.
- Otras variables disponibles en la base de datos que cuantifican una afectación física, tales como afectación a bosques y ganado, no se han utilizado debido a la dificultad para establecer una metodología de evaluación consistente y sustentable. Otras variables que solo indican que se presentó una afectación, pero no cuantifican la magnitud de la misma, también se han descartado en la presente evaluación económica. Entre estas están la afectación a acueductos, saneamiento, comunicaciones, vías y otras tampoco han sido tenidas en cuenta en el análisis.
- Se emplea como valor base para el costo de reposición de una vivienda un valor de US\$ 13,024 el cual se obtuvo del Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda (Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda, 2015).
- Se usó un costo de reposición de cultivos de US\$ 580/Ha, aunque la variable da cuenta indiferentemente del tipo de cultivo. Dicho valor fue tomado de la Organización Panamericana de la Salud (Organización Panamericana de la Salud, 2014).
- Los centros hospitalarios se suponen de 370 m², con un valor de US\$440/m², lo cual da un valor total de US\$164,500, según información encontrada en el Sistema de Contrataciones Estatales de Bolivia (SICOES, 2015).

- Los centros educativos se suponen de 230 m², con un valor de US\$374/m², lo cual da un valor total de US\$86,000, según información encontrada en el Sistema de Contrataciones Estatales de Bolivia (SICOES, 2015).
- No se correlaciona la afectación humana con daños en viviendas.
- No se consideró la afectación en vías.
- El porcentaje de daño para viviendas destruidas será del 100% (aunque una vivienda puede presentar un daño un poco inferior después de un desastre, usualmente por condiciones de seguridad y costos de reparación esta se toma por destruida después del 75% de daño).
- El porcentaje de daño para viviendas afectadas se supone del 25%.
- Los costos básicos estimados de viviendas no incluyen el valor del terreno.
- Se excluyen del análisis los costos asociados a efectos indirectos tales como demolición, remoción y limpieza, albergues temporales, reparaciones, servicios y otros.
- Se excluyen del análisis el costo por daños en los contenidos especiales tales como equipos o contenidos con costos representativos.

De acuerdo con lo anterior, la Tabla 72 resume los principales supuestos para el modelo de estimación del valor fiscal indicativo de los eventos de la base de datos.

Tabla 72. Modelo de costos

	Viv. Afectadas	Viv. Destruídas	Centros Educativos	Centros de Salud	Cultivos (Ha)
Afectación [%]	25%	100%	100%	100%	100%
Costo por unidad [US\$ /unidad]	3,256	13,024	85,962	164,544	580

8.3 CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS POR INUNDACIONES

El anterior procedimiento permite construir una base de datos consolidada de eventos de acuerdo con lo siguiente:

- Número total de eventos reportados con información de pérdidas: 2330
- Periodo de tiempo de análisis: 42 años
- Número medio de eventos por año: 55
- Pérdidas económicas totales estimadas: US\$ 445 millones
- Pérdida media estimada por evento: US\$ 191.000

Por otro lado, las estadísticas contenidas en la base de datos luego de la estimación de las pérdidas económicas permiten realizar un análisis de frecuencia de excedencia de diferentes niveles de pérdidas económicas asociadas con la valoración fiscal indicativa realizada a nivel de todo el país. Este análisis permite generar la curva de excedencia de pérdidas para eventos de inundación frecuentes en Bolivia, la cual permite establecer el número de veces promedio al año que cada nivel de pérdida tiende a superarse, de acuerdo con el registro histórico.

La Figura 183 y Figura 184 presentan las curvas de excedencia de pérdidas por inundación y deslizamientos, respectivamente, para Bolivia con base en las hipótesis y suposiciones indicadas anteriormente. Esta figura se presenta en escala logarítmica. En el eje horizontal se relaciona el nivel de pérdidas económicas y en el eje vertical se indica la tasa anual de excedencia, es decir el número promedio de veces que cada uno de los valores del eje horizontal se excede. El inverso de la tasa anual de excedencia corresponde al periodo de retorno promedio en años, valor que se indica en el eje de la derecha.

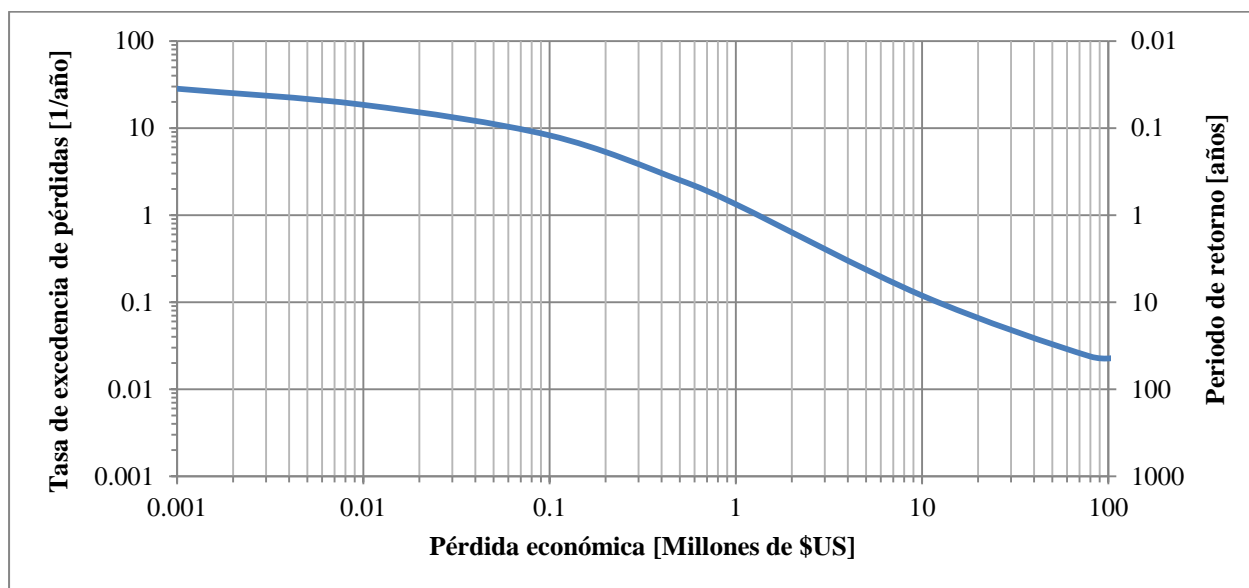


Figura 183. Curva empírica de excedencia de pérdidas por eventos frecuentes de inundación en Bolivia

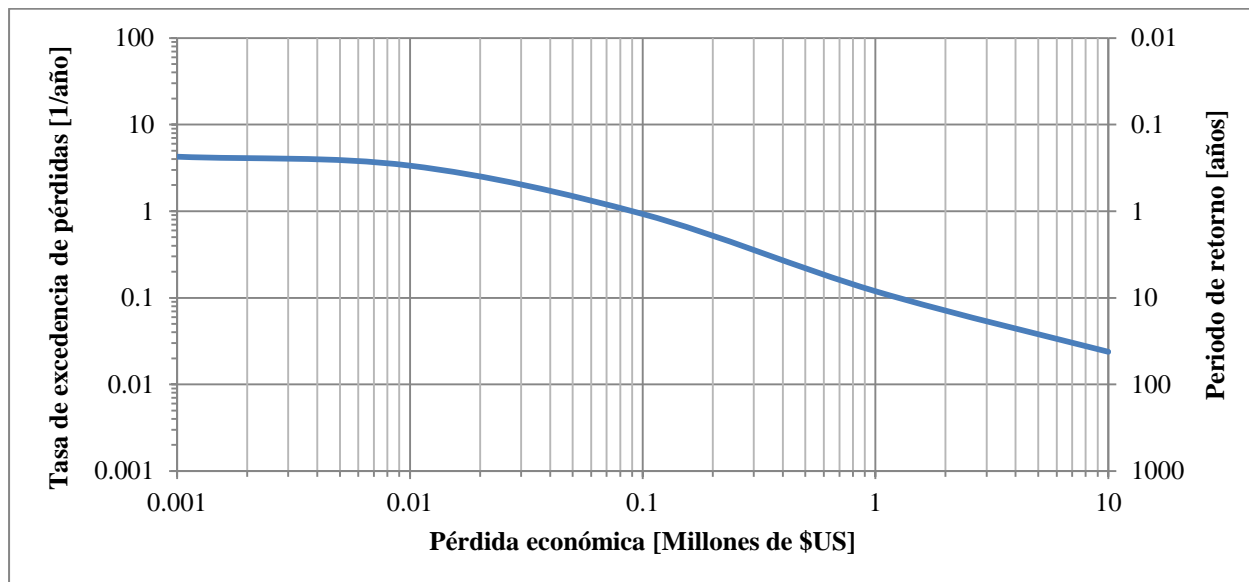


Figura 184. Curva empírica de excedencia de pérdidas por eventos frecuentes de deslizamiento en Bolivia

La información disponible permite por otro lado estimar la pérdida anual promedio para el periodo de observación, la cual se encuentra mediante integración directa de la curva de excedencia de pérdidas. Los valores de pérdida anual promedio que resultan del análisis de las figuras anteriores son de US\$ 11 millones y US\$ 40,000 aproximadamente para inundaciones y deslizamientos, respectivamente. Estos valores no consideran las pérdidas asociadas a escenarios catastróficos, que para el presente caso corresponden a eventos con periodos de retorno superiores a unos 50 años.

Estas pérdidas corresponden al 0.032% y al 0.00012% del producto interno bruto de Bolivia para inundaciones y deslizamientos respectivamente (PIB para Bolivia año 2014 = US\$ 34,100 millones). (Banco Mundial, 2014) .

9 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 PERFIL GENERAL DE RIESGO DE INUNDACIONES A NIVEL PAÍS

Bolivia se encuentra ubicada en un territorio con alta diversidad geográfica y está atravesada por dos cordilleras que hacen parte de la cadena montañosa de los Andes lo que genera gran diversidad de fenómenos climáticos. Su ubicación y los drásticos cambios climáticos afectados por fenómenos del Niño, generan diferentes amenazas naturales extremas como son intensas lluvias, inundaciones, sequías y deslizamientos entre otros. Simultáneamente Bolivia presenta un alto crecimiento poblacional, poca planeación, muy pobres medidas de control lo cual ha llevado a un desordenado desarrollo de los centros urbanos con situaciones de muy alta vulnerabilidad física y social y alto deterioro de la vida urbana profundizando la crisis económica, social y medio ambiental. La alta amenaza combinada con una alta vulnerabilidad son los componentes de una situación de alto riesgo de pérdidas económicas y afectación a la población por fenómenos naturales.

Desde el punto de vista hidrográfico el país se divide en tres cuencas principales que son la del Amazonas, la de la Plata y la del Altiplano. En particular, la cuenca del Amazonas presenta situaciones de alto potencial de riesgo de inundaciones. Eventos históricos relevantes indican que recurrentemente y en particular en años recientes se han presentado situaciones catastróficas que han afectado varios departamentos en forma simultánea. En eventos como los del 2007, 2010, 2013 y 2014 se han presentado altas afectaciones a personas, viviendas y zonas de cultivo. A pesar que no se cuenta con evaluaciones confiables y detalladas de las pérdidas económicas generadas por estos eventos, se estima que en los casos críticos de eventos recientes, las pérdidas económicas totales pueden alcanzar la cifra de los US \$1.000 millones con afectación hasta de 1 millón de habitantes.

Por otro lado es significativa la ocurrencia de eventos de inundaciones de intensidades no tan altas como las anteriores, pero de muy alta frecuencia. Según la información disponible en la base de datos de eventos históricos DesInventar, se concluye lo siguiente para todo el país:

- Se han reportado un total de 2330 eventos de inundación en un periodo de 42 años con un valor total de pérdidas económicas en el orden de los US\$ 445 millones.
- Se han presentado históricamente un promedio de 55 eventos por año con pérdidas económicas hasta de unos US\$ 122 millones en algunos eventos críticos.

- El promedio de pérdidas por evento es de US\$ 200,000.
- Las pérdidas económicas a nivel país de eventos de alta frecuencia tienen aproximadamente la siguiente frecuencia de ocurrencia:
 - Pérdidas de US\$ 1 millón cada año en promedio
 - Pérdidas de US\$ 10 millones cada 10 años en promedio
 - Pérdidas de US\$ 100 millones cada 50 años en promedio
- Analizando la información complementaria disponible se puede establecer que se pueden esperar adicionalmente pérdidas catastróficas entre unos US\$500 millones y US\$ 1000 millones con un periodo de retorno del orden de los 100 años.

9.2 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los análisis realizados y los resultados obtenidos permiten establecer las siguientes conclusiones:

- Las dos cuencas representativas analizadas en el marco del presente estudio abarcan alrededor del 6% del área del país. En la cuenca del río Rocha (0.15% del área total del país) se ubica más del 8% de la población total del país, atravesando una parte importante de la ciudad de Cochabamba. Por su parte la cuenca del Rio Grande (con un área del orden de 6% del área del país) incluye gran cantidad de tierras fértiles y zonas cultivadas expuestas a lo largo de toda la cuenca y una población dispersa principalmente en poblaciones pequeñas.
- El análisis de zonas potencialmente inundables en cada una de las cuencas indica lo siguiente:
 - Cuenca Rio Rocha: tiene un área del orden de 49 km² bajo riesgo por inundación, en la que se encuentran del orden de 13,635 construcciones valoradas en unos US\$ 1,031 Millones, cerca de 77,966 personas expuestas; y del orden de 2,479 Hectáreas de cultivos expuestas con una valoración aproximada de US\$ 7 Millones.
 - Cuenca del Rio Grande: tiene un área del orden de 19,161 km² bajo riesgo por inundación, en la que se encuentran del orden de 40,067 construcciones valoradas en unos US\$ 2,546 Millones con cerca de 365,369 personas expuestas y del orden de 1,115,300 Hectáreas de cultivos expuestas que se valoran aproximadamente en US\$ 1,166 Millones.
- El análisis de riesgo detallado arroja las siguientes cifras aproximadas:

- Cuenca Río Rocha: pérdida anual esperada en el orden de US\$ 1.26 Millones y pérdida máxima probable (PML para 100 años de periodo de retorno) en el orden de los US\$ 17 Millones.

Tabla 57. Resultados generales de riesgo por inundación. Cuenca Río Rocha

Resultados		
Valor Expuesto en la zona de análisis	US\$	1,038,666,698
Pérdida anual esperada	US\$	1,258,802
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	US\$	% de valor expuesto en la zona de análisis
2	876,157	0.08
5	1,125,706	0.11
10	1,374,303	0.13
25	2,032,334	0.20
50	9,010,558	0.87
100	17,114,121	1.65

- Cuenca Río Grande: pérdida anual esperada en el orden de US\$ 30 Millones y pérdida máxima probable (PML para 100 años de periodo de retorno) en el orden de \$100 Millones.

Tabla 61. Resultados generales de riesgo por inundación. Cuenca Río Grande

Resultados		
Valor Expuesto en la zona de análisis	US\$	3,712,596,662
Pérdida anual esperada	US\$	29,715,821
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	US\$	% de valor expuesto en la zona de análisis
2	23,654,812	0.64
5	34,291,639	0.92
10	60,230,086	1.62
25	102,304,514	2.76
50	103,668,205	2.79
100	106,395,587	2.87

- La curva empírica de excedencia de pérdidas por eventos frecuentes de inundaciones y deslizamientos en Bolivia arroja las siguientes cifras aproximadas:

Tabla 73. Curva empírica de excedencia de pérdidas por eventos frecuentes de inundación en Bolivia

Eventos de Inundación	
Periodo retorno	PAE
años	US\$
0.035	0.001
0.054	0.01
0.121	0.1
0.396	0.5
0.75	1
8.4	10
45	80

Tabla 74. Curva empírica de excedencia de pérdidas por eventos frecuentes de deslizamiento en Bolivia

Eventos de Deslizamiento	
Periodo retorno	PAE
años	US\$
0.234	0.001
0.297	0.01
1.077	0.1
8.4	1
42	10

- Los escenarios críticos de inundación analizados generan una pérdida económica máxima para eventos de lluvias con periodo de retorno de 100 años. El análisis de escenarios críticos indica lo siguiente:
 - o Cuenca Rio Rocha: escenario crítico de riesgo generado por una lluvia concentrada en la zona central de la cuenca con una duración de un (1) día, un periodo de retorno de 100 años y una profundidad de precipitación máxima espacial de 143 mm durante el día del evento. Las pérdidas económicas esperadas para este escenario son del orden de US\$ 65 Millones, con un aproximado de 10,000 personas afectadas, dos fallecidos, unas 30,000 construcciones afectadas de las cuales aproximadamente 20,000 serían destruidas y cerca de 1,000 hectáreas de cultivos afectadas con un flujo económico de US\$ 230,000 por cultivos, US\$ 140,000 por indemnización a agricultores y US\$ 135,000 por ayuda humanitaria.

- Cuenca Rio Grande: escenario crítico de riesgo generado por una lluvia concentrada en la zona noroccidental de la cuenca con una duración máxima de (5) días, un periodo de retorno de 100 años y una profundidad de precipitación máxima espacial de 356 mm. Las pérdidas económicas esperadas para este escenario son del orden de US\$ 130 Millones, con un total de 15,000 personas afectadas, tres fallecidos, unas 2,000 construcciones afectadas de las cuales aproximadamente 1,500 serían destruidas y cerca de 80,000 hectáreas de cultivos afectadas con un flujo económico de US\$ 35 Millones por cultivos, US\$ 2.5 Millones por interrupción de vías, US\$ 12 Millones por indemnización a agricultores y US\$ 200,000 por ayuda humanitaria.
- Las zonas críticas desde el punto de vista de riesgo por inundaciones, donde se deben concentrar los esfuerzos para la prevención y mitigación del riesgo y preparación para la atención de emergencias en una primera fase de posibles intervenciones para la reducción del riesgo, son las siguientes para cada una de las cuencas:
 - Cuenca Rio Rocha: hacia los municipios de Quillacollo y Vinto, donde el riesgo se concentra principalmente en la afectación de edificaciones.
 - Cuenca Rio Grande hacia los municipios de Okinawa y San Ramón, donde el riesgo se concentra principalmente en la afectación de cultivos.

9.3 LIMITACIONES EN LAS EVALUACIONES ANALÍTICAS

Los análisis y evaluaciones de amenaza, vulnerabilidad y riesgo que se presentan deben utilizarse con cautela ya que presentan limitaciones y restricciones debido al nivel de resolución de la información disponible y a las incertidumbres del análisis, de lo cual debe ser consciente el usuario final para efectos de poder dar un uso adecuado y consistente a los resultados obtenidos teniendo en cuenta el tipo de análisis, el tipo y calidad de datos, el nivel de resolución y precisión y la interpretación realizada.

En consecuencia es importante señalar lo siguiente:

- Los modelos utilizados en los análisis tienen simplificaciones y supuestos para facilitar el cálculo que el usuario debe conocer debidamente. Éstas están descritas en detalle en los informes técnicos respectivos (ver referencias).
- Considerando el nivel de complejidad de los modelos hidrológicos e hidráulicos desarrollados, especialmente para la cuenca del Río Grande, no es posible en la práctica analizar un número grande de escenarios por las dificultades técnicas y recursos requeridos de procesamiento en computadores. De acuerdo con esto, los valores de PML deben considerarse como indicativos del orden de magnitud que puede esperarse para estos parámetros.

- Los análisis se han desarrollado con la mejor información disponible que presenta limitaciones en su confiabilidad y su grado actualización. Es posible que exista información mejor y más completa a la cual no se tuvo acceso.
- La información utilizada y los resultados de los análisis de amenaza, exposición y riesgo tienen una asociado un nivel de resolución según las unidades de análisis utilizadas.
- El uso que el usuario final le dé a la información no compromete a los autores de los estudios realizados, quienes presentan los casos de aplicación como ejemplos ilustrativos de lo que es factible hacer si se cuenta con información confiable con la precisión adecuada.
- Es responsabilidad del usuario comprender el tipo de modelo utilizado y sus limitaciones, la resolución y calidad de los datos, las limitaciones y suposiciones de los análisis y la interpretación realizada con el fin de darle a estos resultados un uso adecuado y consistente.

9.4 RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIÓN

La gestión del riesgo involucra diferentes elementos entre los cuales pueden mencionarse la identificación y cuantificación del mismo y las diferentes opciones de prevención y mitigación que incluyen entre otras, medidas estructurales y no estructurales de reducción del riesgo, las medidas de protección financiera y la elaboración de planes de atención de emergencias y contingencias.

Los resultados de la valoración del riesgo que se presentan en el informe son la base para llevar a cabo una serie de acciones tendientes a reducir el impacto de los desastres en las cuencas estudiadas con base en lo cual se puede elaborar un plan integral de reducción del riesgo de la cuenca. En este numeral se dan algunas recomendaciones sobre las medidas de prevención y mitigación más importantes que deben evaluarse para la realización de un plan como el mencionado.

Estas aplicaciones y recomendaciones deben ser evaluadas e interpretadas por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua con el fin de realizar planes de implementación de las opciones que considere prioritarias y relevantes de acuerdo con su plan de acción en el mediano y largo plazo.

9.4.1 Identificación del riesgo

El proceso de identificación del riesgo debe abarcar la identificación tanto de elementos expuestos, amenazas y vulnerabilidades asociadas a cada una de ellos. Los capítulos 5, 6 y 7 de este informe ilustran de manera detallada la metodología propuesta para la evaluación de amenazas, exposición, vulnerabilidad y riesgo por inundaciones con aplicación específica a varios casos en cuencas representativas de Bolivia. La plataforma CAPRA se convierte en un elemento fundamental para organizar y avanzar en la identificación del riesgo a nivel país. Los principales productos que deben obtenerse en este proceso son los siguientes:

- Información (formatos .AME) y distribución geográfica de amenaza de lluvias y por inundaciones en cada una de las zonas críticas.
- distribución geográfica de amenaza probabilista por inundaciones para diferentes periodos de retorno.
- Bases de datos de elementos y componentes de infraestructura expuestos en las zonas susceptibles de inundación.
- Funciones de vulnerabilidad para los tipos constructivos representativos del país y para los componentes de infraestructura en zonas susceptibles.
- Parámetros que permiten cuantificar el riesgo como los presentados en el este estudio.
- Distribución geográfica del riesgo.

9.4.2 Zonificación de riesgos por inundación

Uno de los objetivos del análisis de riesgo es la zonificación de los mismos desde el punto de vista geográfico lo cual permite plantear estrategias para la definición del uso del suelo y la reducción de los desastres. Usualmente las zonas de riesgo por inundaciones se pueden clasificar en alguna de las siguientes tres categorías:

- Zonas de riesgo Aceptable
- Zonas de riesgo Mitigable
- Zonas de riesgo No mitigable

En cada una de estas zonas se especifican parámetros de intensidad de la amenaza y valores indicativos del nivel de riesgo. También es común acudir al análisis beneficio-costos de opciones de intervención antes de calificar una zona como riesgo por inundación no mitigable. Usualmente se proponen diferentes tipos de medidas de intervención para la reducción del riesgo dependiendo de la clasificación de cada zona, proponiendo en los casos críticos programas de reubicación y cambio de uso del suelo.

Como resultado de este proceso se generan mapas de zonificación de riesgos que se oficializan en los planes de ordenamiento territorial.

9.4.3 Prevención y mitigación del riesgo por inundación

Con base en la información y los resultados obtenidos del análisis de riesgo es posible el planteamiento de programas a corto, mediano y largo plazo para la prevención y mitigación del riesgo por inundaciones. Las medidas de prevención y/o mitigación del riesgo pueden ser estructurales (obras civiles) o no estructurales (normas, programas especiales).

Dentro de las medidas estructurales para la reducción del riesgo pueden considerarse la construcción y operación de presas y reservorios, programas para el desarrollo operación y manejo

de cuencas, mejoramiento de cauces, aumento de la capacidad de flujo mediante la construcción de terraplenes o jarillones, planicies de inundación controladas, canales de flujo de exceso y otros.

Las medidas no estructurales (prácticas para el manejo de planicies inundables) incluyen generalmente medidas de regulación y control del uso de la tierra dentro de la planicie de inundación y todos los aspectos relacionados con reubicación de viviendas e infraestructura localizadas en zonas de Alto Riesgo No Mitigable, la regulación de usos del suelo, planes de ordenamiento territorial, el fortalecimiento institucional, programas de mantenimiento y limpieza de los cauces y sistemas de drenaje, planes de monitoreo y sistemas de alerta, planes de emergencia y contingencia, programas educativos y de divulgación y organización comunitaria, entre otras.

9.4.4 Sistemas de monitoreo y alarma en las cuencas críticas

Los sistemas de monitoreo y alarma se convierten en el caso de las cuencas críticas por efectos de inundaciones de Bolivia en un instrumento clave que permite la disminución del riesgo especialmente relacionado con el impacto social. Es importante que las entidades responsables dediquen esfuerzo en desarrollar actividades orientadas a reducir las pérdidas y daños a nivel nacional en los sitios de mayor riesgo, fortaleciendo las capacidades técnicas de su personal, invirtiendo en el equipamiento para mejorar el monitoreo de las amenazas y desarrollando Sistemas de Alerta Temprana (SATs) para diferentes amenazas, principalmente las inundaciones y los deslizamientos.

9.4.5 Protección financiera

El Estado es responsable de la reconstrucción de los inmuebles públicos o bienes de la colectividad y por lo tanto es tomador de riesgo en nombre de la sociedad. Por otro lado también es responsable de las pérdidas e impactos que se pueden presentar en la población de bajos recursos económicos que no cuenta con recursos financieros para enfrentar una eventual situación de desastre. De acuerdo con esto, el estado debe contar con una estrategia de protección financiera que le permita no solo atender las emergencias sino contar con los recursos necesarios para los programas de reubicación y/o reconstrucción en eventos en que se presentan viviendas destruidas. Dentro de las diferentes opciones e instrumentos disponibles para establecer una estrategia óptima de protección financiera se encuentran los siguientes: fondos de reservas para atención de emergencias y/o reconstrucción, transferencia del riesgo, préstamos contingentes, ayudas y donaciones, nuevos impuestos, reasignaciones presupuestales, créditos externos y otros.

9.4.6 Planes de contingencia y atención de emergencias

El desarrollo de los planes de contingencia se basa en los resultados obtenidos del análisis de riesgos a través de las situaciones o eventos que representan los riesgos más relevantes para la seguridad de la población, el ambiente o los elementos expuestos. Por lo tanto, el objetivo general los planes de contingencia es contar con información oportuna y con la formulación de

procedimientos o protocolos de reacción o respuesta que cada entidad debe seguir frente a las posibles situaciones críticas o de emergencia que se pueden presentar, de acuerdo con el análisis de riesgos realizado con anterioridad.

Las emergencias relacionadas con inundaciones se caracterizan por la afectación directa a componentes de infraestructura y a la población y son causadas por una situación o evento, usualmente inesperado, interno o externo que requiere de una reacción inmediata con el fin de minimizar el impacto mismo en la población, el número de víctimas, heridos o personas afectadas, en los componentes de infraestructura, en las zonas productivas o en el medio ambiente. Esto con el fin de restablecer la normalidad en la zona afectada a la mayor brevedad posible actuando en forma conjunta o coordinada con las instituciones gubernamentales, los medios de comunicación y la misma comunidad.

10 REFERENCIAS

- UNISDR. (2011). *2011 Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction: Revealing Risk, Redefining Development*. . s.c.: United Nations.
- Agrobit. (s.f.). *Estrategias: El punto de equilibrio*. Obtenido de [http://www.agrobit.com/Documentos/B_1_Gestion%5C226_ge000028ge\[1\].htm](http://www.agrobit.com/Documentos/B_1_Gestion%5C226_ge000028ge[1].htm)
- Aircraft Information. (s.f.). *Technical aircarft information*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.aircraft-charter-world.com/airports/southamerica/bolivia.htm#explanations>
- Airport Autorithy. (s.f.). *The Airport Guide*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.the-airport-guide.com/search.php?by=country&search=Bolivia>
- ASTER GDEM. (s.f.). *ASTER GDEM - NASA*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>
- Banco Central de Bolivia. (2013). *Informe de Estabilidad Financiera*. La Paz.
- Banco Mundial. (2014). *www.bancomundial.org*. Obtenido de <http://www.bancomundial.org/es/country/bolivia>
- Bautista C. R., La Fuente R.S. (2014). Desarrollo del modelo hidráulico y escenarios hidrológicos en el marco del plan director de la cuenca del río Rocha. Proyecto de Grado para optar el Diploma Académico de Licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad Mayor de San Simón.
- Berkeley U. (s.f.). *Biogeography*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://biogeo.berkeley.edu/bgm/gdata.php>
- BID. (2011). *Perfil de Riesgo Catastrófico por Terremoto en Bolivia*. ERN Evaluación de Riesgos Naturales. Bolivia.
- Birdlife.org. (s.f.). *Cuencas de Ríos Caine y Mizque*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.birdlife.org/datazone/sitefactsheet.php?id=14350>
- CEDLA, C. d. (19 de Julio de 2010). Obtenido de <http://cedla.org/content/32098>
- CentralAmericaData. (s.f.). *Cental Amrica Data*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.centralamericadata.com>
- Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia. (s.f.). Recuperado el Diciembre de 2014, de <http://cdrnbolivia.org/index.htm>
- CEPAL. (2003). *Manual para la evaluación del impacto socioeconómico y ambiental de los desastres*. . La Paz: s.e.
- CEPIS. (s.f.). *Videos cepis*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsade/cd/videos/Orosi%20Tecnico.pdf>
- Chipana, W. (2013). *La razón*. Recuperado el Noviembre de 2014, de http://www.la-razon.com/index.php?_url=/economia/Mitad-poblacion-boliviana-transicion-media_0_1930606961.html
- Chipana, W. (28 de Octubre de 2013). *La razón*. Obtenido de http://www.la-razon.com/index.php?_url=/economia/Mitad-poblacion-boliviana-transicion-media_0_1930606961.html
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology* (Segunda ed.). S.I: International Editions: McGraw-Hill .
- CIG. (Octubre de 2006). *Cig-Noticias*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.cig.gov.do/noticias/octubre-2006/05-10-06/gov-invi.html>
- Clark, C. (1945). Storage and the unit hydrograph: Transactions. American Society of Civil Engineers.
- CONAGUA. (2011). *Manual para el control de inundaciones*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://cenca.imta.mx/pdf/manual-para-el-control-de-inundaciones.pdf>

- DesInventar. (2013). *DesInventar Disaster Information Management System, Version 9.15. Inventario de Desastres Salvador (1900-2012)*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://online.desinventar.org/desinventar/#SLV-20120604210329>
- DesInventar Project. (2013). *DesInventar Bolivia*. Obtenido de http://online.desinventar.org/desinventar/#BOL-1248983224-bolivia_inventario_historico_de_desastres
- EM_DAT. (2014). *Disaster, EM_DAT: The OFDA/CRED International*. (U. C. Louvain, Editor) Obtenido de www.emdat.be
- ERN América Latina. (2009). *CAPRA: Central American Probabilistic Risk Assessment*. s.c.: WB Group, IADB, UN_ISDR, CEPREDENAC.
- ERN América Latina. (2009b). *Metodología de Modelación Probabilista de Riesgos Naturales. Modelos de Evaluación de Amenazas Naturales y Selección. Tomo I*. s.c: CEPREDENAC, ISDR, IDB, GFDRR, WB.
- ERN Evaluación de Riesgos Naturales. (2011). *Tutorial ERN-Inundación*. México D.F.: ERN - Ingenieros Consultores S.C.
- ERN Latinoamerica. (s.f.). *ERN Aplicaciones CAPRA*. Recuperado el s.f. de 2014, de http://www.ern-la.com/aplicaciones_capra/aplicaciones_capra.htm
- FAO. (29 de junio de 2007). *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*. Obtenido de Informe Especial: Misión FAO/PMA de evaluación de cultivos y suministros de alimentos en Bolivia: <http://www.fao.org/docrep/010/ah867s/ah867s00.htm>
- FAO. (2012). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-i2800s.pdf>
- FAO, O. d. (29 de Junio de 2007). *Informe Especial*. Obtenido de Misión FAO/PMA de Evaluación de Cultivos y Suministros de Alimentos en Bolivia.
- FAO. (2004). *Watershed Management Case Study: Latin America. Review and assessment of the status of watershed management*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/j3887e/j3887e00.pdf>
- G., A. R. (2010). *La problemática de contaminación del río Rocha en el tramo metropolitano de Cochabamba. Todo Sobre el Agua. Boletín No. 100*. . Recuperado el Noviembre de 2014, de http://www.bivica.org/upload/boletin-agua_rio_rocha.pdf
- GeoBolivia. (s.f.). Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://geo.gob.bo/>
- Gobernación Cochabamba. (s.f.). *Proyecto Gestión Integral del Río Rocha*. Recuperado el 2014 de Noviembre, de http://cochabamba.gob.bo/public/docs/medioambiente/resumen/resumen_rio_rocha.pdf
- Gobernación de Cochabamba. (s.f.). *Proyecto Gestión Integral del Río Rocha*. Recuperado el Noviembre de 2014, de http://bicentenario.cochabamba.gob.bo/public/docs/medioambiente/proyectos/proy_rio_rocha.pdf
- Gobernación de Santa Cruz. (s.f.). *Las cuencas hidrográficas del departamento autónomo de Santa Cruz*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.santacruz.gob.bo/archivos/PN30062010140421.pdf>
- Gobernación de Santa Cruz. (s.f.). *Las cuencas hidrográficas del departamento autónomo de Santa Cruz*. . Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.santacruz.gob.bo/archivos/PN30062010140421.pdf>
- Gobierno Autónomo Departamental de Santa Cruz. (s.f.). *Cuenca Hidrográfica Río Piraí*. . Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.santacruz.gob.bo/accion/pdf/noticia.php?IdNoticia=4089>

- Gobierno Autónomo Departamental de Santa Cruz. IC RIMAC SRL. (2013). *Estudio de Factibilidad del Control de Inundaciones. Informe No. 3*. Santa Cruz: s.e.
- Gobierno Autónomo Departamental de Santa Cruz. SEARPI. (2012). *Resumen Hidrometeorológico RHM2011. Santa Cruz, Bolivia. Año2. Número2*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.searpi.org.bo/sistema/adjuntos/53f40e4cd3e68f6.pdf>
- Gobierno Departamental de Santa Cruz. (2009). *Amenazas, Vulnerabilidad y Riesgos Ambientales*. . Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.santacruz.gob.bo/archivos/PN29062010111141.pdf>
- Gobierno Provincia Cochabamba. (s.f.). *Construcción de la visión, políticas y lineamientos estratégicos de la cuenca del río Grande*. Recuperado el Noviembre de 2014, de http://www.cuencasbolivia.org/files/vision_lineamientos_estrateg__pdcrg.pdf
- Hydrographs. (s.f.). *Handbook. Chapter 16*. s.c.: USDA.
- IFRCRCS. (2000). *Risk Reduction. Disaster Preparedness Training Programme*. s.c.: International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies.
- INE. (2012). *Instituto Nacional de Estadística*. Obtenido de Resultados Censo de Población y Vivienda: <http://datos.ine.gob.bo/binbol/RpWebEngine.exe/Portal?&BASE=CPV2012COM>
- Instituto geográfico Boliviano. (s.f.). *GeoBolivia*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://geo.gob.bo/>
- Instituto Nacional de Estadísticas de Bolivia. (2002). *Censo del año 2001*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.ine.gov.bo>
- INVIAS. (s.f.). *Portal INVIAS*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.invias.gov.co/invias/hermesoft/portaIG>
- Iñigo, R. (s.f.). *El Exportador*. Recuperado el Noviembre de 2014, de http://www.el-exportador.com/012002/mercados/n49_articulo.pdf
- Kirpich, Z. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10(10).
- La Razón. (24 de Abril de 2006). *Actualidad Boliviana*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.bolivia.com/Noticias/AutoNoticias/DetalleNoticia32511.asp>
- Michele, F., Aawa, G., Gero, M., Willis, F., Paul, B., Unibristol, N., y otros. (2011)). Critical review of non structural measures for water related risks. . *Kulturisk Project*, 31, 1-42.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2011). *Propuesta de Programa del Plan Director de la Cuenca del Río Grande, Fase 1, 2011-2012*. Recuperado el Noviembre de 2014, de http://www.cuencasbolivia.org/files/propuesta_pd_cuenca_del_rio_grande.pdf
- Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda. (2015). *¿Cuáles son las modalidades y requisitos para obtener una vivienda social?* Obtenido de <http://www.oopp.gob.bo/index.php/faq>
- Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo. (2009). *Manejo Integrado de Cuencas en la Región Andina: Aportes del Programa MIC a la gestión y generación de conocimientos. Sistematización de la exoeriencia (2005-2008)*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.redaac.net/programa-aacc/docs/sistematizacion-MIC.pdf>
- Mockus, V. (1957). *Use of storm and watershed characteristics in syntetic unit hidrograph analysis and application*. s.c.: U.S Soil Conservation Service.
- Natural Resources Conservation Service. (2007). *Part 630*. . s.c.: Hydrology National Engineering .
- Opinión. (1 de Julio de 2012). *El metro cuadrado en los edificios llega hasta los \$US 675*. Obtenido de <http://www.opinion.com.bo/opinion/articulos/2012/0701/noticias.php?id=62171&calificacion=2>

- OPS/OMS Bolivia. (2014). *Programa de Emergencias y Desastres de la OPS/OMS: Emergencias Bolivia 2014 por Inundaciones. Informe de Situación*. Recuperado el Noviembre de 2014, de www.redhum.org/documento_download/14199
- Organización Panamericana de la Salud. (13 de 02 de 2014). *Informe de Situación 2 UNETE Bolivia*. Obtenido de http://www.paho.org/disasters/index.php?option=com_docman&task=doc_details&gid=2168&Itemid=&lang=en
- Página Siete. (9 de abril de 2015). *Precios de casas seguirán altos si no baja costo de la mano de obra*. Obtenido de <http://www.paginasiete.bo/economia/2015/4/9/precios-casas-seguiran-altos-baja-costo-mano-obra-52799.html>
- Pappenberger, F., & Matgen, P. (2006). Influence of uncertain boundary conditions and model structure on flood inundation predictions. . *Advances in Water Resources*, 29(10), 1430-1449.
- Presidencia de la República. (14 de Mayo de 2005). *Presidencia de la República*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.presidencia.gov.co/sne/2005/mayo/14/05142005.htm>
- PreventionWeb. (2011). *Prevention Web*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.preventionweb.net/english/countries/statistics/?cid=21>
- Recursos Hídricos. (s.f.). *Geografía de Bolivia*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.bolivia.com/geografiadebolivia/cap13.htm>
- Saldarria, J. G. (2007). *Hidráulica de Tuberías: Abastecimiento de agua, redes, riegos*. Bogotá: 1era Edición. Alfaomega.
- SENAMHI. (18 de Spetiembre de 2002). *Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología. Unidad de pronósticos*. Obtenido de <http://www.senamhi.gob.bo/meteorologia/nino.php>
- SENAMHI. (18 de Septiembre de 2002). *Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología. Unidad de pronósticos*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.senamhi.gob.bo/meteorologia/nino.php>
- SICOES. (2015). *Monitoreo y seguimiento de licitaciones de Bolivia*. Obtenido de Licitaciones: Convocatoria nacional: <http://www.sicoes.com.bo/construccion-centro-educativo-alternativo-lct82600.html>
- SICOES. (2015). *Monitoreo y seguimiento de licitaciones de Bolivia*. Obtenido de Licitaciones: Convocatoria nacional: <http://www.sicoes.com.bo/construccion-centro-de-salud-cotani-alto-lct191816.html>
- SkyBTech. (2014). *J-SkyBiz Technology and Telecommunications S.A.* . Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.skybtech.com/producto/categoria/9/mapas-digitales-2d-y-3d/>
- SNMH. (s.f.). *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología* . Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.senamhi.gob.bo/>
- Texas A&M University (TAMU). (2014). *Centro Digital de Recursos Naturales de Bolivia. Información Geoespacial*. . Recuperado el Noviembre de 2014 , de http://essm.tamu.edu/bolivia/info_geoespacial_vector_es.htm
- The democracy Center. (2015). *Cambio Climático*. Obtenido de http://cambioclimatico.democracyst.org/?page_id=541
- The democracy Center. (s.f.). *Cambio Climático*. Recuperado el Noviembre de 2014, de http://cambioclimatico.democracyst.org/?page_id=541
- UNICEF. (2014). *Las peores inundaciones en décadas en Bolivia desplazan a las familias y perturban las vidas de los niños*. Obtenido de http://www.unicef.org/spanish/emergencias/bolivia_39044.html
- UNISDR. (2013). *GAR13: Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. . Geneva, Switzerland: ISDR, United Nations.

USDA. (1986). *Urban hydrology for Small Watersheds*. s.c.: TR-55.

USGS. (s.f.). *United States Geological Survey*. Recuperado el Diciembre de 2014, de <https://www.usgs.gov/>

Villazón, M., & Willems, P. (2009). The importance of spill conceptualizations and head loss coefficients in a quasi two-dimensional approach for river inundation modelling. *Flood Risk Management: Research and Practice - Samuels et al. (eds). Taylor & Francis Group, London*, 305-315.

Wikipedia. (s.f.). *Wikipedia: Aeropuertos de Bolivia*. Recuperado el Noviembre de 2014, de http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Aeropuertos_en_Bolivia

World aero data. (s.f.). *Worldaerodata*. Recuperado el s.f. de 2014, de <http://www.worldaerodata.com/countries/Bolivia.php>

Worldpop. (s.f.). Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.worldpop.org.uk/>

Zona Franca Puerto Aguirre. (s.f.). *Zona Franca Puerto Aguirre*. Recuperado el Noviembre de 2014, de <http://www.puertoaguirre.com/>

11 ANEXOS

ANEXO 1 - PROCEDIMIENTO ANALÍTICO PROPUESTO PARA LA EVALUACION DE LA AMENAZA POR INUNDACIONES PRODUCIDAS POR LLUVIAS INTENSAS

ANEXO 2 - RECORRIDOS DE CAMPO PARA EL LEVANTAMIENTO DE ELEMENTOS EXPUESTOS EN LA CUENCA DEL RÍO ROCHA

ANEXO 3 - FICHAS DE CARACTERIZACIÓN DE TIPOS CONSTRUCTIVOS

ANEXO 4 - FICHAS DE CARACTERIZACIÓN DE CULTIVOS

ANEXO 5 - DESCRIPCION DE PAQUETES DE SOFTWARE UTILIZADOS EN EL PRESENTE ESTUDIO

- i. IT-Precipitación
- ii. IT-LuviaNH
- iii. IT-Inundación
- iv. IT-Delizamientos