

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**Análisis de zonas inundables en la parte baja de la cuenca hidrográfica
del río Aranjuez utilizando un modelo hidráulico bidimensional**

Proyecto de Graduación

Para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta

Saulo Richmond Solera

Director de Proyecto de Graduación

Ing. Rafael Oreamuno Vega, M. Sc.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

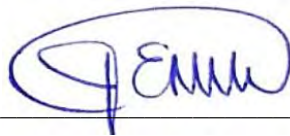
Comité Asesor y Estudiante



Ing. Rafael Oreamuno Vega, M. Sc.
Director de Proyecto



Ing. Alberto Serrano Pacheco, Ph. D.
Asesor de Proyecto



Geól. Julio Madrigal Mora, M. Sc.
Asesor de Proyecto



Saulo Richmond Solera
Estudiante

18 de diciembre de 2020

El suscrito, Saulo Richmond Solera, cédula 1 1397 0608, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné A85229, manifiesta que es autor del Proyecto de Graduación **"Análisis de zonas inundables en la parte baja de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez utilizando un modelo hidráulico bidimensional", bajo la dirección del** Ing. Rafael Oreamuno Vega, M. Sc., quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); **"no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales"**. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Dedicado a Daniel y Guiselle, mis padres

Agradecimientos

A mi familia, por el apoyo eterno e incondicional.

A Rafael Oreamuno, por su guía, apoyo, confianza y amistad.

A Alberto Serrano y Julio Madrigal, por su acompañamiento como asesores.

A mis colegas y amigos Andrey Ruiz, Francisco Mata y Marcos Chaves, de Fermat Ingeniería.

A Alexander Cerdas, Edwin Matarrita, Manuel Álvarez, Martín Morales, Sebastián Damazzio, Sergio Feoli, Ligia Umaña y Carlos Méndez, por su generosa colaboración en distintas etapas del proyecto mediante gestiones, consejos y asesoría.

A mis compañeros de la EIT, por su apoyo e interés.

A los profesores y compañeros con quienes tuve la oportunidad de compartir en todos estos años de estudio.

A Mari, por todo.

Índice General

1. Introducción	1
1.1 Justificación	1
1.1.1 El problema específico	1
1.1.2 Importancia	2
1.1.3 Antecedentes.....	2
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Delimitación del problema	3
1.3.1 Alcances	3
1.3.2 Limitaciones.....	5
1.4 Metodología	5
2. Marco teórico	8
2.1 Cuencas hidrográficas	8
2.1.1 Caracterización morfológica de una cuenca	9
2.1.2 Caracterización geológica, geomorfológica y de los suelos de una cuenca.....	15
2.1.3 Uso del suelo en una cuenca	18
2.1.4 Caracterización climatológica de una cuenca	18
2.2 Modelado hidrológico	19
2.2.1 Precipitación	20
2.2.2 Análisis de frecuencias y distribuciones de probabilidad	21
2.2.3 Pérdidas de precipitación.....	24
2.2.4 Hidrograma unitario sintético de Snyder.....	30
2.2.5 Modelo hidrológico en HEC-HMS.....	34
2.3 Modelado hidráulico	34
2.3.1 Tránsito de crecientes.....	35
2.3.2 Flujo bidimensional.....	36
2.3.3 Ecuaciones de Navier-Stokes	37
2.3.4 Ecuaciones de aguas someras	37
2.3.5 Simulación numérica de flujo en ríos: Modelo Iber	38

2.3.5.1 Esquemas numéricos	39
2.3.5.2 Paso temporal	41
3. Caracterización de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez	42
3.1 Generalidades.....	42
3.2 Caracterización morfológica	44
3.2.1 Parámetros de forma o geométricos	45
3.2.2 Parámetros de relieve u orográficos	46
3.2.3 Parámetros de la red de drenaje.....	53
3.2.4 Resumen de parámetros morfológicos.....	55
3.3 Caracterización geológica y geomorfológica	56
3.4 Caracterización de los suelos	60
3.5 Uso del suelo.....	65
3.6 Caracterización climatológica	68
3.6.1 Parámetros climatológicos medios.....	68
3.6.2 Zonas de vida.....	73
4. Hidrología	75
4.1 Precipitación	75
4.1.1 Registros de precipitación disponibles.....	75
4.1.2 Análisis y estimación de eventos extremos de precipitación	78
4.1.3 Distribución espacial de la lluvia.....	83
4.1.4 Distribución temporal de la lluvia.....	101
4.2 Pérdidas de precipitación.....	102
4.3 Hidrograma unitario sintético de Snyder	105
4.4 Modelo hidrológico	109
4.4.1 Parámetros del modelo	109
4.4.2 Hidrogramas de crecientes.....	109
5. Modelado hidráulico	115
5.1 Modelo de elevación digital.....	115
5.2 Cobertura del suelo y coeficiente de rugosidad	119
5.3 Estructuras hidráulicas	121
5.4 Parámetros del modelo Iber	122
6. Zonas inundables.....	123

6.1 Mapas de zonas inundables.....	123
6.2 Zonas inundables con alto grado de peligro	136
6.3 Análisis del tránsito de crecientes	139
6.4 Tormenta Nate en la cuenca del río Aranjuez	141
7. Conclusiones y recomendaciones.....	143
7.1 Conclusiones.....	143
7.1.1 Caracterización de la cuenca.....	143
7.1.2 Hidrología.....	144
7.1.3 Modelado hidráulico	145
7.1.4 Zonas inundables.....	146
7.2 Recomendaciones.....	147
Bibliografía.....	151
Anexos.....	154
Anexo 1. Mapa de distritos y poblados en la cuenca del río Aranjuez.....	154
Anexo 2. Mapa de ríos, caminos y poblados en la cuenca del río Aranjuez	155
Anexo 3. Ajuste a la distribución de probabilidad de Gumbel y análisis de frecuencia	156
Anexo 4. Comparación de resultados obtenidos con las distribuciones de probabilidad de Gumbel y GEV	168
Anexo 5. Volúmenes de precipitación diaria registrados durante eventos extremos.	175
Anexo 6. Resultados de los vuelos fotogramétricos realizados con VANT en la parte baja de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez.....	178
Anexo 7. Levantamiento topográfico de secciones transversales aguas arriba y aguas abajo del puente sobre la Ruta Nacional 1, mediante metodología GNSS RTK	182

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Principales poblados dentro de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez, según cantón y distrito	4
Cuadro 2. Forma de la cuenca en función del factor de forma	10
Cuadro 3. Subclases por capacidad de uso del suelo en Costa Rica y sus limitaciones	16
Cuadro 4. Parámetros de clasificación de tierras en Costa Rica, según subclase específica por capacidad de uso, clases I a IV	17
Cuadro 5. Parámetros de clasificación de tierras en Costa Rica, según subclase específica por capacidad de uso, clases V a VIII	17
Cuadro 6. Zonas de vida presentes en Costa Rica, según piso altitudinal.....	19
Cuadro 7. Número de curva de escorrentía para áreas agrícolas cultivadas.....	29
Cuadro 8. Número de curva de escorrentía para áreas urbanas.....	30
Cuadro 9. Parámetros geométricos de la cuenca del río Aranjuez.....	45
Cuadro 10. Parámetros geométricos de la cuenca del río Aranjuez hasta su paso por el puente sobre la Ruta Nacional 1	46
Cuadro 11. Parámetros orográficos de la cuenca del río Aranjuez	50
Cuadro 12. Parámetros orográficos de la cuenca del río Aranjuez hasta su paso por el puente sobre la Ruta Nacional 1	52
Cuadro 13. Longitud de la red de drenaje de la cuenca del río Aranjuez, según orden.....	54
Cuadro 14. Longitud de la red de drenaje de la cuenca del río Aranjuez hasta su paso por el puente sobre la Ruta Nacional 1, según orden.....	55
Cuadro 15. Parámetros morfológicos de la cuenca del río Aranjuez	55
Cuadro 16. Distribución del área de la cuenca del río Aranjuez, según tipo de suelo	65
Cuadro 17. Uso del suelo en la cuenca del río Aranjuez en el año 2020	66
Cuadro 18. Uso del suelo en las partes media y alta de la cuenca del río Aranjuez en el año 2020	66
Cuadro 19. Zonas de vida en la cuenca del río Aranjuez	73
Cuadro 20. Características generales de las estaciones meteorológicas ubicadas alrededor de la cuenca del río Aranjuez.....	75
Cuadro 21. Coeficiente de correlación R^2 del análisis de doble masa entre la estación Puntarenas y las demás estaciones meteorológicas.....	77
Cuadro 22. Caracterización estadística y parámetros de la distribución de probabilidad de Gumbel, para las series de datos de precipitación diaria máxima anual.....	78
Cuadro 23. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según estación meteorológica, mediante la distribución de Gumbel.....	79
Cuadro 24. Periodo de retorno de la precipitación diaria originada por la tormenta Nate, según estación meteorológica	79
Cuadro 25. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según estación meteorológica, mediante la distribución de Gumbel y ajustada con base en la estación Puntarenas	80
Cuadro 26. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según estación meteorológica, mediante la distribución GEV	82

Cuadro 27. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según estación meteorológica, mediante la distribución GEV y ajustada con base en la estación Puntarenas.....	83
Cuadro 28. Área de influencia de las estaciones meteorológicas en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez.....	100
Cuadro 29. Precipitación diaria máxima promedio en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, según periodo de retorno.....	100
Cuadro 30. Cálculo del número de curva para la cuenca del río Aranjuez.....	104
Cuadro 31. Precipitación efectiva y pérdidas de precipitación en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, según periodo de retorno.....	105
Cuadro 32. Precipitación efectiva y caudal pico según periodo de retorno, en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez.....	113
Cuadro 33. Coeficiente de rugosidad según cobertura del suelo.....	119
Cuadro 34. Proceso de inundación en la parte baja de la cuenca del río Aranjuez.....	140
Cuadro 35. Distribución de Gumbel para la serie de máxima precipitación diaria, estación 78002 - Monteverde.....	156
Cuadro 36. Intervalos para la prueba de bondad de ajuste chi-cuadrado, estación 78002 - Monteverde.....	157
Cuadro 37. Matriz de cálculo del estadístico de prueba chi-cuadrado, estación 78002 - Monteverde.....	157
Cuadro 38. Distribución de Gumbel para la serie de máxima precipitación diaria, estación 78003-78027 - Puntarenas.....	158
Cuadro 39. Intervalos para la prueba de bondad de ajuste chi-cuadrado, estación 78003-78027 - Puntarenas.....	159
Cuadro 40. Matriz de cálculo del estadístico de prueba chi-cuadrado, estación 78003-78027 - Puntarenas.....	159
Cuadro 41. Distribución de Gumbel para la serie de máxima precipitación diaria, estación 78005 - Sarmiento.....	160
Cuadro 42. Intervalos para la prueba de bondad de ajuste chi-cuadrado, estación 78005 - Sarmiento.....	161
Cuadro 43. Matriz de cálculo del estadístico de prueba chi-cuadrado, estación 78005 - Sarmiento.....	161
Cuadro 44. Distribución de Gumbel para la serie de máxima precipitación diaria, estación 78006 - Miramar.....	162
Cuadro 45. Intervalos para la prueba de bondad de ajuste chi-cuadrado, estación 78006 - Miramar.....	163
Cuadro 46. Matriz de cálculo del estadístico de prueba chi-cuadrado, estación 78006 - Miramar.....	163
Cuadro 47. Distribución de Gumbel para la serie de máxima precipitación diaria, estación 78012 - Montes de Oro.....	163
Cuadro 48. Intervalos para la prueba de bondad de ajuste chi-cuadrado, estación 78012 - Montes de Oro.....	164
Cuadro 49. Matriz de cálculo del estadístico de prueba chi-cuadrado, estación 78012 - Montes de Oro.....	165

Cuadro 50. Distribución de Gumbel para la serie de máxima precipitación diaria, estación 78017-78031 - Chomes.....	165
Cuadro 51. Intervalos para la prueba de bondad de ajuste chi-cuadrado, estación 78017-78031 - Chomes.....	166
Cuadro 52. Matriz de cálculo del estadístico de prueba chi-cuadrado, estación 78017-78031 - Chomes.....	166
Cuadro 53. Distribución de Gumbel para la serie de máxima precipitación diaria, estación 78023 - Lagunilla	166
Cuadro 54. Intervalos para la prueba de bondad de ajuste chi-cuadrado, estación 78023 - Lagunilla	167
Cuadro 55. Matriz de cálculo del estadístico de prueba chi-cuadrado, estación 78023 - Lagunilla	167
Cuadro 56. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según estación meteorológica, mediante la distribución de Gumbel.....	167
Cuadro 57. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78002 - Monteverde.....	168
Cuadro 58. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78003-78027 - Puntarenas	169
Cuadro 59. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78005 - Sarmiento	170
Cuadro 60. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78006 - Miramar	171
Cuadro 61. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78012 - Montes de Oro	172
Cuadro 62. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78017-78031 - Chomes.....	173
Cuadro 63. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78023 - Lagunilla.....	174
Cuadro 64. Precipitación diaria (mm) durante eventos extremos que han afectado la cuenca del río Aranjuez.....	175

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de flujo del proyecto.....	6
Figura 2. La cuenca como un sistema hidrológico.....	8
Figura 3. Determinación de la madurez de la cuenca a partir de la curva hipsométrica.....	11
Figura 4. Determinación de características fisiográficas de la cuenca a partir de la curva hipsométrica	11
Figura 5. Pendiente media ponderada (S_2).....	12
Figura 6. Pendiente media de Taylor y Schwarz.....	13
Figura 7. Número de orden de los cauces	14
Figura 8. Variables del método de pérdidas de precipitación del SCS (NRCS).....	25
Figura 9. Hidrograma unitario sintético de Snyder	33
Figura 10. Inversión de la pendiente transversal al aumentar y reducir el caudal por una creciente.....	37
Figura 11. Ubicación de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez.....	42
Figura 12. División político-administrativa en la cuenca hidrográfica del río Aranjuez	43
Figura 13. Perfil longitudinal del cauce principal hasta su desembocadura.....	49
Figura 14. Perfil longitudinal del cauce principal hasta el puente sobre la Ruta Nacional 1.....	49
Figura 15. Curva hipsométrica de la cuenca del río Aranjuez.....	51
Figura 16. Frecuencia de elevaciones en la cuenca del río Aranjuez.....	51
Figura 17. Curva hipsométrica de la cuenca del río Aranjuez hasta su paso por el puente sobre la Ruta Nacional 1	53
Figura 18. Frecuencia de elevaciones en la cuenca del río Aranjuez hasta su paso por el puente sobre la Ruta Nacional 1	53
Figura 19. Hietograma de precipitación característico para periodos de retorno menores a 50 años.....	101
Figura 20. Hietograma de precipitación de la tormenta Nate.....	102
Figura 21. Hietograma de precipitación característico para periodos de retorno mayores a 50 años.....	102
Figura 22. Hietograma e hidrograma de las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, producto de un evento de precipitación con periodo de retorno de 2 años.....	110
Figura 23. Hietograma e hidrograma de las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, producto de un evento de precipitación con periodo de retorno de 5 años.....	110
Figura 24. Hietograma e hidrograma de las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, producto de un evento de precipitación con periodo de retorno de 10 años.....	111
Figura 25. Hietograma e hidrograma de las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, producto de un evento de precipitación con periodo de retorno de 25 años.....	111
Figura 26. Hietograma e hidrograma de las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, producto de un evento de precipitación con periodo de retorno de 50 años.....	112
Figura 27. Hietograma e hidrograma de las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, producto de un evento de precipitación con periodo de retorno de 100 años.....	112
Figura 28. Hietograma e hidrograma de las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, producto de la precipitación provocada por la tormenta Nate.....	113

Figura 29. Puente sobre la Ruta Nacional 1	121
Figura 30. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78002 - Monteverde.....	168
Figura 31. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78003-78027 - Puntarenas	169
Figura 32. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78005 - Sarmiento	170
Figura 33. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78006 - Miramar	171
Figura 34. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78012 - Montes de Oro	172
Figura 35. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78017-78031 - Chomes.....	173
Figura 36. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78023 - Lagunilla.....	174
Figura 37. Cobertura de los vuelos fotogramétricos	178
Figura 38. VANT empleado en los vuelos fotogramétricos: WingtraOne	178
Figura 39. Comparación de la calidad de las ortofotos obtenidas con los vuelos fotogramétricos (izquierda) y las disponibles en el SNIT (derecha)	179
Figura 40. Visualización de la nube de puntos en la zona del puente sobre la Ruta Nacional 1 sobre el río Aranjuez.....	179
Figura 41. Nivel de detalle obtenido mediante el DSM (izquierda) y el DTM (derecha), en comparación con el DEM generado con datos del IGN (al fondo)	180
Figura 42. Visualización del ajuste geográfico de los resultados de los vuelos fotogramétricos	180
Figura 43. Ejemplo de creación de curvas de nivel a cada 5 m	181
Figura 44. Ejemplo de creación de curvas de nivel a cada 1 m	181
Figura 45. Receptores empleados en el levantamiento de secciones transversales: Emlid Reach RS2.....	182
Figura 46. Ejemplo de captura de datos en las cercanías del puente sobre la Ruta Nacional 1.....	182
Figura 47. Distribución de los puntos medidos en el levantamiento de secciones transversales.....	183

Índice de Mapas

Mapa 1. Ubicación de los puntos de control en la cuenca del río Aranjuez.....	44
Mapa 2. Modelo digital de elevación de la cuenca del río Aranjuez.....	47
Mapa 3. Pendientes en la cuenca del río Aranjuez	48
Mapa 4. Estratigrafía de la cuenca del río Aranjuez	57
Mapa 5. Geomorfología de la cuenca del río Aranjuez.....	59
Mapa 6. Capacidad de uso de las tierras en Costa Rica	61
Mapa 7. Suelos en la cuenca del río Aranjuez.....	64
Mapa 8. Uso del suelo en la cuenca del río Aranjuez en el año 2020	67
Mapa 9. Cantidad promedio de días de lluvia por año en la cuenca del río Aranjuez.....	69
Mapa 10. Cantidad de meses secos en la cuenca del río Aranjuez.....	70
Mapa 11. Temperatura media anual en la cuenca del río Aranjuez.....	71
Mapa 12. Precipitación media anual en la cuenca del río Aranjuez	72
Mapa 13. Zonas de vida en la cuenca del río Aranjuez.....	74
Mapa 14. Estaciones meteorológicas alrededor de la cuenca del río Aranjuez.....	76
Mapa 15. Estaciones meteorológicas y sus polígonos de Thiessen en la cuenca del río Aranjuez	84
Mapa 16. Distribución espacial de la lluvia ocasionada por el huracán Gilbert, 11/9/1988	85
Mapa 17. Distribución espacial de la lluvia ocasionada por el huracán Juana, 22/10/1988	86
Mapa 18. Distribución espacial de la lluvia ocasionada por el huracán César, 28/7/1996..	87
Mapa 19. Distribución espacial de la lluvia ocasionada por el huracán Mitch, 28/10/1998	88
Mapa 20. Distribución espacial de la lluvia ocasionada por la tormenta Alma, 28/5/2008.	89
Mapa 21. Distribución espacial de la lluvia ocasionada por el huracán Tomás, 2/11/2010	90
Mapa 22. Distribución espacial de la lluvia ocasionada por la tormenta Nate, 4/10/2017..	91
Mapa 23. Distribución espacial de la lluvia ocasionada por la tormenta Nate, 5/10/2017..	92
Mapa 24. Precipitación diaria máxima con 2 años de periodo de retorno en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez.....	94
Mapa 25. Precipitación diaria máxima con 5 años de periodo de retorno en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez.....	95
Mapa 26. Precipitación diaria máxima con 10 años de periodo de retorno en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez.....	96
Mapa 27. Precipitación diaria máxima con 25 años de periodo de retorno en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez.....	97
Mapa 28. Precipitación diaria máxima con 50 años de periodo de retorno en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez.....	98
Mapa 29. Precipitación diaria máxima con 100 años de periodo de retorno en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez.....	99
Mapa 30. Modelo digital de terreno obtenido mediante vuelos fotogramétricos, sección ubicada aguas arriba del puente sobre la Ruta Nacional 1	117
Mapa 31. Modelo digital de terreno obtenido mediante vuelos fotogramétricos, sección ubicada aguas abajo del puente sobre la Ruta Nacional 1.....	118
Mapa 32. Cobertura del suelo en la parte baja de la cuenca del río Aranjuez.....	120

Mapa 33. Profundidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 2 años de periodo de retorno	124
Mapa 34. Profundidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 5 años de periodo de retorno	125
Mapa 35. Profundidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 10 años de periodo de retorno	126
Mapa 36. Profundidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 25 años de periodo de retorno	127
Mapa 37. Profundidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 50 años de periodo de retorno	128
Mapa 38. Profundidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 100 años de periodo de retorno.....	129
Mapa 39. Velocidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 2 años de periodo de retorno	130
Mapa 40. Velocidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 5 años de periodo de retorno	131
Mapa 41. Velocidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 10 años de periodo de retorno.....	132
Mapa 42. Velocidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 25 años de periodo de retorno.....	133
Mapa 43. Velocidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 50 años de periodo de retorno.....	134
Mapa 44. Velocidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 100 años de periodo de retorno.....	135
Mapa 45. Zonas de riesgo por inundación en la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, según periodo de retorno	137
Mapa 46. Zonas de riesgo por inundación con alto grado de peligro en la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, según periodo de retorno.....	138
Mapa 47. Profundidad aproximada de la inundación provocada por la tormenta Nate y profundidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 100 años de periodo de retorno.....	142

Richmond Solera, Saulo

Análisis de zonas inundables en la parte baja de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez utilizando un modelo hidráulico bidimensional

Proyecto de Graduación, Licenciatura en Ingeniería Civil - San José, Costa Rica:

S. Richmond S., 2020

xv, 153, [30]h; ils. col. - 26 refs.

Resumen

Los deslizamientos en las partes alta y media de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez modifican los cauces de quebradas y ríos, reduciendo su capacidad y ocasionando inundaciones que afectan a comunidades de la parte baja de la cuenca.

Con el fin de definir los niveles de inundación y la distribución de velocidades de flujo durante crecientes en esta sección de la cuenca, para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, se analizaron las características morfológicas y climatológicas de la cuenca, así como el uso del suelo actual.

Mediante el análisis estadístico de los registros de precipitación de estaciones meteorológicas ubicadas en los alrededores de la cuenca, se estimaron eventos extremos de precipitación para generar los hidrogramas de crecientes asociados, de forma sintética y por medio del programa de modelado hidrológico HEC-HMS.

El tránsito hidráulico de las crecientes estimadas sobre las planicies de inundación del río Aranjuez se realizó por medio del programa de modelado hidráulico Iber, que permite un modelado bidimensional bajo condiciones de flujo no permanente.

A partir de los resultados de esta etapa, se generaron mapas de zonas inundables según los valores máximos de profundidad del agua y velocidad del flujo, además de un mapa de zonas de riesgo por inundación y un mapa de zonas de riesgo con alto grado de peligro.

ARANJUEZ; MODELADO HIDROLÓGICO; MODELADO HIDRÁULICO; HIDROGRAMAS DE CRECIENTE; FLUJO BIDIMENSIONAL; IBER; ZONAS INUNDABLES; MAPA DE INUNDACIÓN.

Ing. Rafael Oreamuno Vega, M. Sc.

Escuela de Ingeniería Civil

1. Introducción

1.1 Justificación

1.1.1 El problema específico

Las lluvias generadas por la tormenta tropical Nate, durante los días 4 y 5 de octubre del año 2017, provocaron una serie de deslizamientos en las partes alta y media de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez, afectando a comunidades como Arancibia y Ojo de Agua, en el distrito Arancibia del cantón de Puntarenas, y Cedral y San Buenaventura, en el distrito La Unión del cantón de Montes de Oro. Estos deslizamientos modificaron los cauces de quebradas y ríos, ocasionando inundaciones que han afectado a comunidades como Bajo Caliente, en el distrito Arancibia, y Aranjuez y Pitahaya, en el distrito Pitahaya, ambos del cantón de Puntarenas.

El río Aranjuez se caracteriza por ser entrelazado en la zona de planicie de inundación, lo cual significa que tiene varios canales secundarios o brazos que se comunican entre sí y que forman bancos o islas transitorias entre ellos. Estos canales no tienen una definición permanente, se separan y se vuelven a unir, por lo que el curso del río es divagante.

Tras su paso por el puente sobre la Ruta Nacional 1, el río Aranjuez es esencialmente móvil, sus características no tienen estabilidad ni permanencia, desplazándose y variando ante eventos hidrometeorológicos extremos. La causa principal de la activación de los canales secundarios y los procesos erosivos, así como de las variaciones en el cauce, es el exceso de material aluvial aportado desde las partes superiores de la cuenca, por la inestabilidad de laderas, que aumentó súbitamente el caudal durante la influencia de la tormenta tropical Nate, en octubre del año 2017.

Actualmente, el cauce principal no posee capacidad hidráulica para manejar los volúmenes de agua aportados durante eventos extremos de precipitación o precipitaciones estacionales prolongadas, por lo que las inundaciones son más frecuentes y afectan a una mayor cantidad de poblaciones que se ubican a lo largo del cauce del río Aranjuez y a terrenos dedicados a la agricultura que presentaban menor frecuencia de inundación.

1.1.2 Importancia

La movilidad fluvial del río Aranjuez representa un peligro para las obras de ingeniería ubicadas sobre el lecho fluvial y en sus inmediaciones, así como para las comunidades mencionadas y sus actividades económicas, por lo que se debe conocer el comportamiento del río, identificando sus diferentes formas fluviales.

Los efectos de eventos extremos, como la tormenta tropical Nate, inciden negativamente en los sectores social, económico, habitacional, agrícola, vial, educación y salud, entre otros, de manera que estas comunidades se encuentran en condiciones de vulnerabilidad y requieren de una estrategia para la gestión del riesgo, que enmarca la necesidad de esta investigación.

1.1.3 Antecedentes

Históricamente, la cuenca hidrográfica del río Aranjuez ha sufrido los efectos de diversos fenómenos hidrometeorológicos, como lo fueron el huracán Gilbert y el huracán Juana, ambos en el año 1988, precipitaciones estacionales continuas en los años 1994 y 1996, la tormenta tropical Alma en el año 2008 y la tormenta tropical Nate en el año 2017. Los deslizamientos y erosiones provocados por las lluvias en la parte superior de la cuenca, han desencadenado procesos de transporte de sedimentos hacia las partes bajas, donde se generan problemas de colmatación y aumento de depósitos aluviales en las planicies de inundación, provocando inundaciones y la consecuente destrucción de cultivos, viviendas, estructuras de uso comunitario e infraestructura en general.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Definir los niveles de inundación y la distribución de velocidades de flujo durante crecientes, en la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para diferentes periodos de retorno.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar la cuenca del río Aranjuez en términos morfológicos, climatológicos y de uso del suelo actual.
2. Generar, sintéticamente, los hidrogramas de crecientes para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, a partir de estimaciones de eventos extremos de precipitación, para la cuenca del río Aranjuez.
3. Realizar el tránsito hidráulico de las crecientes estimadas para cada periodo de retorno, sobre las planicies de inundación de la cuenca del río Aranjuez.
4. Elaborar el mapa de zonas de riesgo por inundación de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez.

1.3 Delimitación del problema

1.3.1 Alcances

La cuenca hidrográfica del río Aranjuez se ubica en el extremo suroeste de la Cordillera de Tilarán, drenando sus aguas hacia el Golfo de Nicoya, y tiene una extensión aproximada de 192 km². Comprende los distritos Arancibia, Acapulco y Pitahaya del cantón de Puntarenas y los distritos La Unión y Miramar del cantón de Montes de Oro. Los principales poblados que se localizan dentro de la cuenca del río Aranjuez se muestran en el Cuadro 1.

En este proyecto se definieron los niveles de inundación y la distribución de velocidades de flujo durante crecientes, en la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, analizando sus características morfológicas y climatológicas, el uso del suelo y la topografía.

La caracterización de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez se realizó a partir de los datos recopilados en el Atlas Digital de Costa Rica del año 2014 y otros disponibles en el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT).

El uso del suelo actual se determinó empleando imágenes satelitales captadas recientemente por el satélite Landsat 8, un sistema de clasificación semiautomática y un proceso manual de corrección de los resultados de este sistema.

Cuadro 1. Principales poblados dentro de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez, según cantón y distrito

Cantón	Distrito	Poblado
Puntarenas	Arancibia	Ojo de Agua
		Corazón de Jesús
		San Martín
		San Francisco
		Bajo Caliente
		Santa Marta
	Pitahaya	Pitahaya
Montes de Oro	La Unión	Cedral
		Palmital
		Bajo Caliente Este
		Ventanas
		San Buenaventura

El modelo de elevación digital base se generó mediante las curvas de nivel disponibles en el SNIT. Para una definición más precisa del modelo en las planicies de inundación, tras el paso del río Aranjuez por el puente sobre la Ruta Nacional 1, se realizaron vuelos fotogramétricos, que a su vez fueron complementados con levantamientos topográficos de secciones transversales aguas arriba y aguas abajo de dicho puente, para una mejor definición del cauce en dicho sitio.

La estimación de los eventos extremos de precipitación está asociada a los registros históricos de las estaciones meteorológicas del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), ubicadas en los alrededores del área de estudio. Los hidrogramas de crecientes se generaron de manera sintética y es a partir de ellos que se realizó el tránsito hidráulico de crecientes y el mapa de zonas de riesgo por inundación de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez.

El análisis de zonas de riesgo por inundación se ejecutó mediante el modelo de flujo bidimensional Iber, que contempla el posible amortiguamiento que puede generar la planicie

de inundación. Se definió para esto el puente sobre el río Aranjuez en la Ruta Nacional 1 como punto de control de inicio del modelado.

Para la simulación y la generación de los mapas de inundaciones en el modelo Iber, se omitió el caudal base del río y se consideró únicamente el caudal aportado por la escorrentía directa producto de los eventos extremos de precipitación. Además, se partió del supuesto que el flujo es subcrítico.

Los resultados obtenidos corresponden únicamente a la cuenca hidrográfica del río Aranjuez, bajo las condiciones de clima, topografía, uso e intensidad de uso del suelo, determinadas durante el desarrollo del proyecto. Por lo tanto, los resultados no deben ser extendidos a otras cuencas y deberán ser ajustados según varíen en el tiempo los parámetros de caracterización de la cuenca del río Aranjuez.

1.3.2 Limitaciones

Los registros históricos de datos meteorológicos en el área de estudio son limitados, por lo que fue necesario emplear métodos de análisis complementarios y generar los hidrogramas de crecientes de manera sintética.

La determinación del uso del suelo actual parte de imágenes satelitales recientemente captadas por el satélite Landsat 8 y la aplicación a estas del complemento de clasificación semiautomática (SCP, por sus siglas en inglés), del software QGIS, con una posterior edición manual de los resultados.

Las curvas de nivel disponibles en el SNIT están dadas cada 10 m y son las que definen el modelo de elevación digital base, por fuera del área levantada con vuelos fotogramétricos.

Deben considerarse las limitaciones del modelo Iber como herramienta para el modelado hidráulico, como limitaciones propias del proyecto.

1.4 Metodología

La metodología seguida para la elaboración del proyecto se dividió en 7 etapas, enlazadas según el siguiente diagrama de flujo (Figura 1) y descritas más adelante.

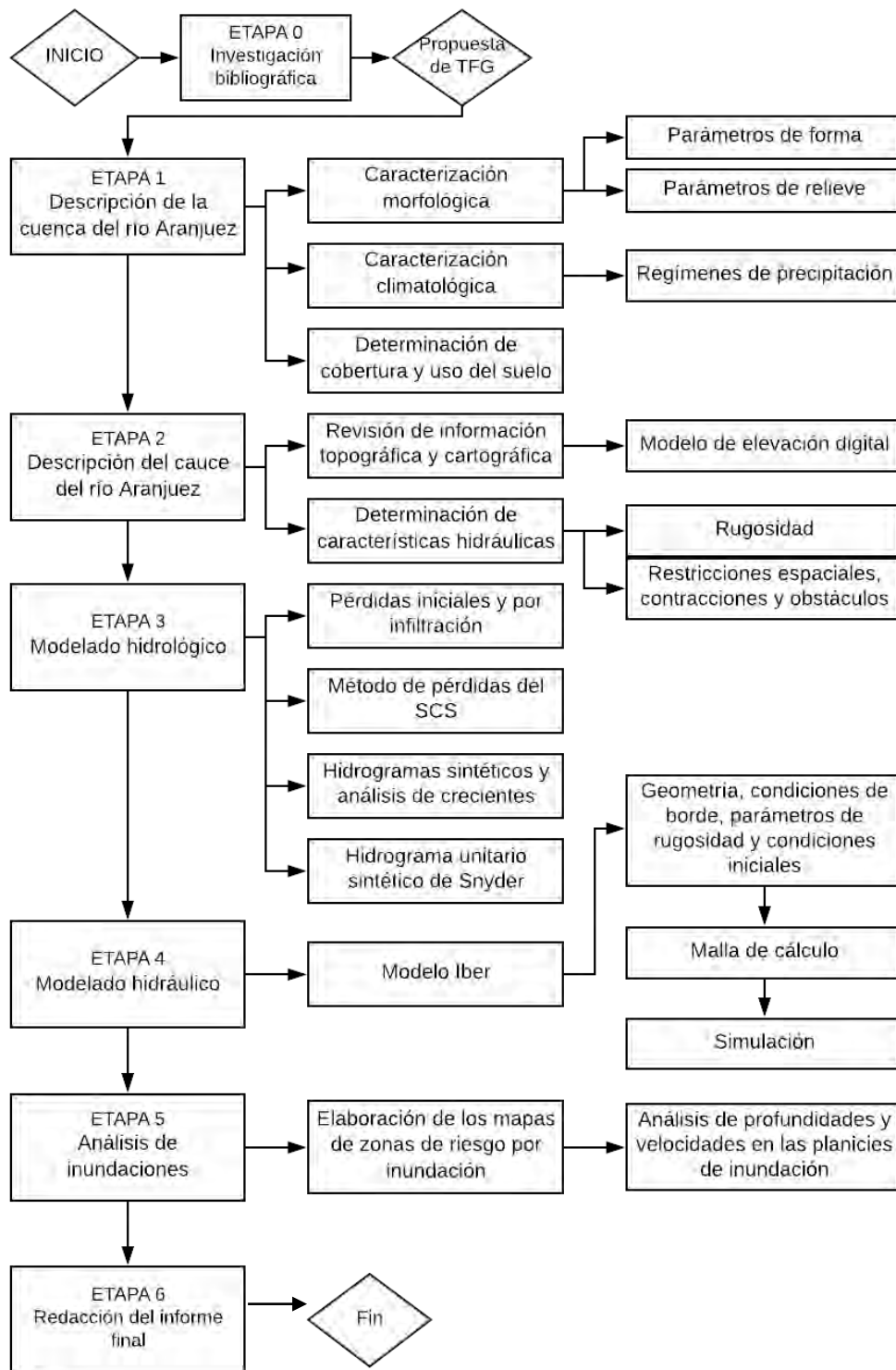


Figura 1. Diagrama de flujo del proyecto

La etapa 0 consistió en la investigación bibliográfica acerca de modelado hidrológico y modelado hidráulico para el análisis de riesgo por inundación ante crecientes debidas a eventos extremos de precipitación.

Las etapas 1 y 2 consistieron en la descripción de la cuenca y del cauce del río Aranjuez. La cuenca se estudió mediante su caracterización morfológica y climatológica, a partir de los datos disponibles en el Atlas Digital de Costa Rica del año 2014 y en el SNIT. Además, la determinación del uso del suelo actual se realizó con imágenes satelitales recientemente captadas por el satélite Landsat 8, un sistema de clasificación semiautomática y un proceso manual de corrección de los resultados de este sistema.

El modelo de elevación digital se construyó mediante la topografía y cartografía disponibles en el SNIT (curvas de nivel a cada 10 m), como insumo para el análisis de la cuenca y el cauce principal. Este modelo se detalló mediante vuelos fotogramétricos y levantamiento topográfico en las zonas cercanas al puente sobre el río Aranjuez en la Ruta Nacional 1.

La etapa 3 consistió en el modelado hidrológico de la cuenca, siendo necesario conocer la distribución espacial y temporal de la precipitación, mediante la estimación de eventos extremos utilizando patrones de tormenta característicos de la cuenca. Además, con el uso del software HEC-HMS, del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE), se generaron los hidrogramas de crecientes para los periodos de retorno seleccionados, con los métodos de pérdidas del SCS (NRCS) y el hidrograma unitario sintético de Snyder.

La etapa 4 consistió en el modelado hidráulico de la cuenca mediante el modelo Iber. En este modelo se creó una geometría de la parte baja de la cuenca, a la cual se le definieron condiciones de borde y rugosidades según el uso del suelo. Posteriormente, se generó una superficie mediante una malla o red irregular de triángulos rectángulos (RTIN, por sus siglas en inglés), basada en el modelo de elevación digital, se transfirió la geometría y las condiciones asignadas a los nodos de la malla de cálculo y se simuló las crecientes según los hidrogramas generados.

La etapa 5 consistió en el análisis de resultados y de inundaciones mediante la elaboración de mapas de riesgo de inundación, obtenidos con la simulación en el modelo Iber.

La etapa 6 consistió en la extracción de conclusiones y la propuesta de recomendaciones, para proceder con la redacción del informe final del proyecto.

2. Marco teórico

2.1 Cuencas hidrográficas

Desde el punto de vista superficial, considerando la superficie terrestre como un material impermeable, una cuenca es un área delimitada por divisorias de aguas, en donde toda la precipitación que caiga dentro será transportada por un sistema de drenaje hacia un único punto de salida. La cuenca es la unidad básica de estudio de la hidrología. (Aparicio, 1992, p. 19)

Para Chow (1994, pp. 5-8), la alta complejidad de los fenómenos hidrológicos puede simplificarse mediante un sistema que permita su análisis. La cuenca puede verse entonces como el sistema hidrológico representado en la Figura 2: un espacio delimitado que recibe agua como entrada, mediante precipitación en su parte superior, y entrega agua como salida, mediante caudal en un único punto.

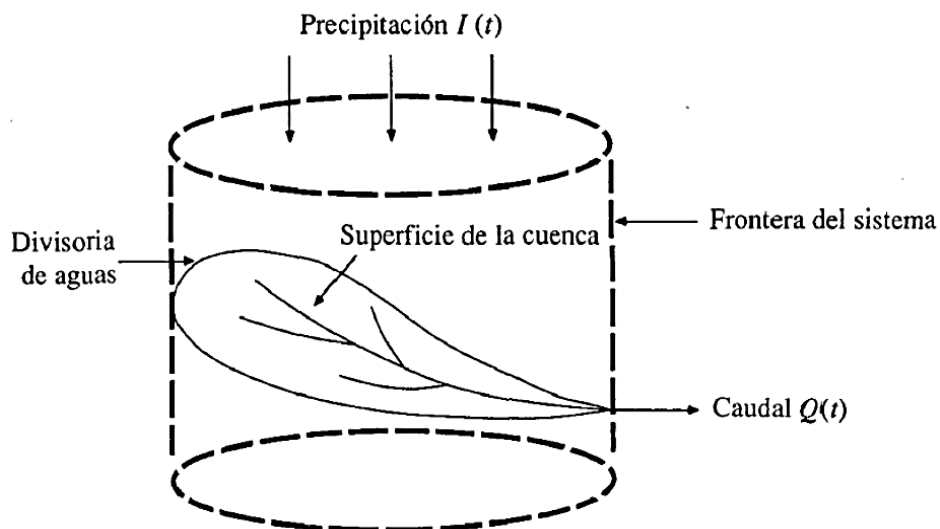


Figura 2. La cuenca como un sistema hidrológico
Fuente: Chow, 1994, p. 8

Cada cuenca es única; desde la gran variabilidad que presenta el fenómeno de la precipitación, hasta cada una de las características del espacio que abarca la cuenca, todo condiciona la forma en que la entrada de agua se relaciona con la salida de agua. Es por esto necesaria la caracterización de una cuenca, para poder estudiar los procesos del ciclo hidrológico que en ella ocurren.

2.1.1 Caracterización morfológica de una cuenca

La caracterización morfológica de una cuenca hidrográfica se compone de parámetros de forma o geométricos, parámetros de relieve u orográficos y parámetros de la red de drenaje. Estos parámetros se detallan a continuación.

- Parámetros de forma o geométricos

Área (A): dimensión, en proyección horizontal, de la superficie de drenaje delimitada por las divisorias de aguas.

Perímetro (P): longitud total, en proyección horizontal, de las líneas que delimitan el área de la cuenca (las divisorias de aguas).

Coefficiente de compacidad o índice de Gravelius (I_G): relación entre el perímetro de la cuenca y la longitud de la circunferencia de un círculo de área igual a la de la cuenca.

$$I_G = \frac{P}{2\pi r} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

De acuerdo con Serrano (2013, p. 11), una cuenca perfectamente circular posee un coeficiente de compacidad mínimo (la unidad) y cuanto más irregular sea la forma de la cuenca, mayor será su coeficiente de compacidad. Además, entre más próximo sea este valor a la unidad, mayor tendencia habrá a las crecientes, un tiempo de respuesta menor ante eventos de precipitación. Por su parte, Brieva indica que para cuencas alargadas el coeficiente de compacidad alcanza valores próximos a 3 (2018, p. 21).

Factor de forma (K_f): relación entre el ancho medio (B) y la longitud axial de la cuenca (L_c), obtenida esta al medir el curso de agua más largo, desde la desembocadura hasta la cabecera más distante en la cuenca.

$$K_f = \frac{B}{L_c} = \frac{A}{L_c^2} \quad (2)$$

Según Serrano (2013, p. 12), una cuenca con un factor de forma bajo está menos expuesta a crecientes que otra del mismo tamaño, pero con mayor factor de forma. De acuerdo con Brieva (2018, p. 22), un factor de forma superior a la unidad indica el achatamiento de la

cuenca o un río principal corto, que derivan en una mayor tendencia a concentrar la escorrentía de una lluvia intensa, formando fácilmente grandes crecidas.

Los datos del Cuadro 2 permiten identificar la forma de la cuenca según el valor obtenido para el factor de forma.

Cuadro 2. Forma de la cuenca en función del factor de forma

Factor de forma	Forma de la cuenca
< 0,22	Muy alargada
0,22 – 0,30	Alargada
0,30 – 0,37	Ligeramente alargada
0,37 – 0,45	Ni alargada ni achatada
0,45 – 0,60	Ligeramente achatada
0,60 – 0,80	Achatada
0,80 – 1,20	Muy achatada
> 1,2	Rodeando el desagüe

Fuente: Brieva, 2018, p. 22

Rectángulo equivalente: figura rectangular, definida por un lado largo (L_{re}) y un lado corto (l_{re}), cuya área es igual al área de la cuenca.

$$L_{re} = \frac{I_G \sqrt{A}}{1,12} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{I_G}\right)^2} \right] \quad (3)$$

$$l_{re} = \frac{I_G \sqrt{A}}{1,12} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{I_G}\right)^2} \right] \quad (4)$$

Entre más diferencia exista entre la longitud del lado largo y la longitud del lado corto, más alargada será la cuenca y mayor será su tiempo de respuesta ante eventos de precipitación.

- Parámetros de relieve u orográficos

Elevación máxima: elevación del punto más alto de la cuenca, medida sobre el perímetro de la cuenca (la divisoria de aguas).

Elevación mínima: elevación del punto más bajo de la cuenca, medida sobre el cauce principal en su punto de desfogue o punto de control.

Elevación media: elevación sobre la cual se encuentra el 50% del área de la cuenca.

Elevación promedio: promedio ponderado de las elevaciones de la cuenca con respecto a la superficie que abarcan.

Curva hipsométrica: representación gráfica del relieve de la cuenca, de la elevación sobre o bajo la que se ubica un determinado porcentaje del área de la cuenca. La curva hipsométrica puede mostrar el estado de madurez de la cuenca (Figura 3) o algunas características fisiográficas de esta (Figura 4).

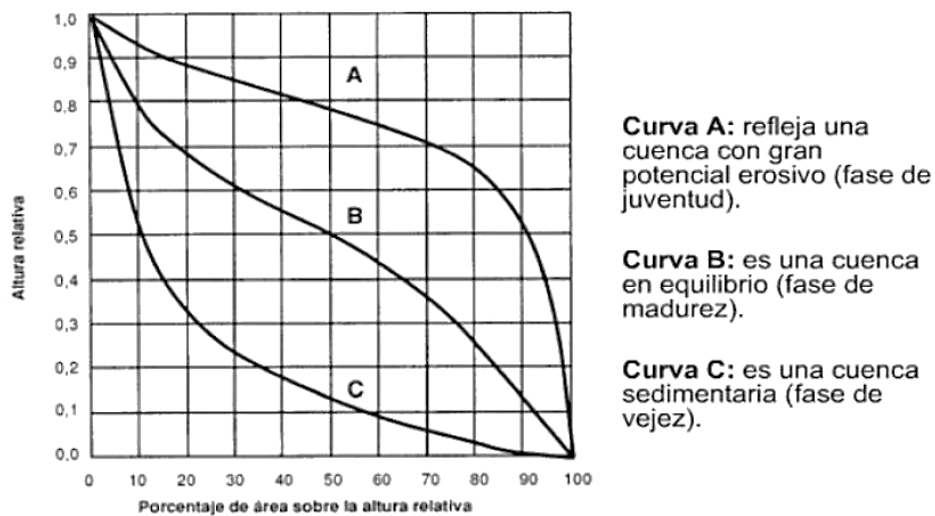


Figura 3. Determinación de la madurez de la cuenca a partir de la curva hipsométrica
Fuente: Brieva, 2018, p. 24

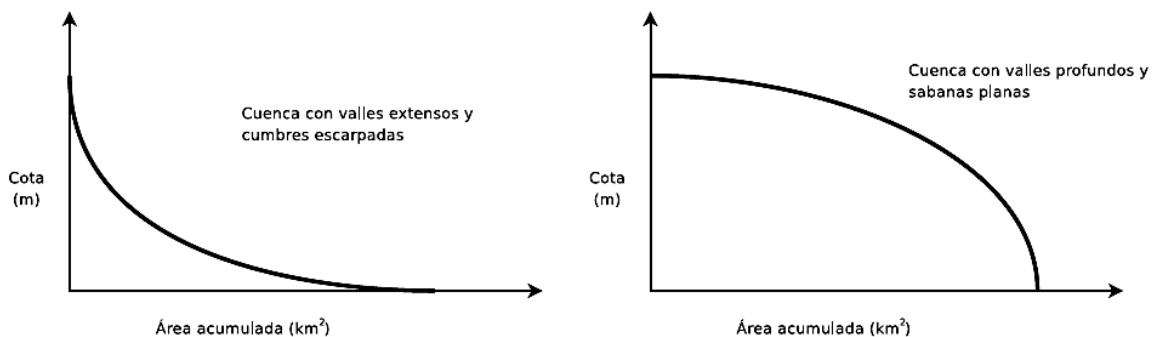


Figura 4. Determinación de características fisiográficas de la cuenca a partir de la curva hipsométrica
Fuente: Serrano, 2013, p. 22

Pendiente promedio en las laderas: valor medio del declive del terreno y la inclinación, respecto a la horizontal, de la vertiente sobre la cual se ubica la cuenca.

Pendiente del cauce principal: inclinación del cauce principal, respecto a la horizontal. Según Aparicio (1992, p. 22), la pendiente del cauce principal es uno de los indicadores más importantes del grado de respuesta de una cuenca a una tormenta. Serrano, por su parte, aclara el motivo al afirmar que la velocidad de escurrimiento del agua depende de la pendiente del cauce, siendo que, a mayor pendiente, mayor velocidad (2013, p. 22). Debido a que la pendiente es variable a lo largo del cauce, se define una pendiente media con base en los siguientes métodos:

Pendiente media (S_1): relación entre el desnivel que presentan los puntos más elevado y menos elevado del cauce principal, y la longitud del mismo cauce, en proyección horizontal.

Pendiente media ponderada (S_2): pendiente de la línea que, apoyada en el extremo de aguas abajo del cauce principal, produce áreas iguales entre el perfil del cauce y arriba y abajo de dicha línea. Esta condición se ilustra en la Figura 5.

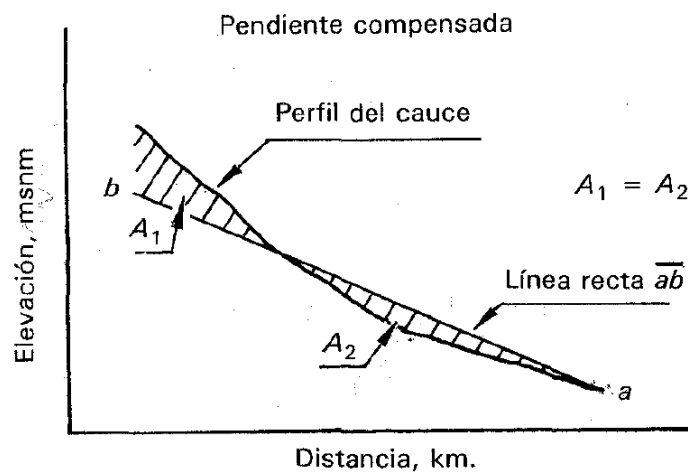


Figura 5. Pendiente media ponderada (S_2)
Fuente: Aparicio, 1992, p. 23

Pendiente media de Taylor y Schwarz (S_3): pendiente de un canal de sección transversal uniforme que tenga la misma longitud y tiempo de recorrido que el cauce principal. Esto se ilustra en la Figura 6 y se calcula mediante la siguiente ecuación, donde L_c es la longitud del cauce principal, l_i es la longitud de cada tramo en que se divide la longitud total y S_i es la pendiente media de dicho tramo.

$$S_3 = \left(\frac{L_c}{\sum_{i=1}^m \frac{l_i}{\sqrt{S_i}}} \right)^2 \quad (5)$$

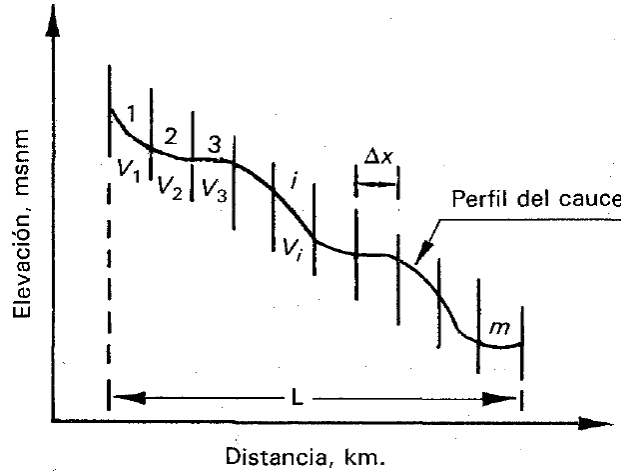


Figura 6. Pendiente media de Taylor y Schwarz
Fuente: Aparicio, 1992, p. 24

Índice de pendiente (I_p): ponderación establecida entre las pendientes y el tramo recorrido por el río. Esto se calcula mediante la siguiente ecuación, donde n es el número de curvas de nivel existentes en el rectángulo equivalente (incluyendo los extremos), $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ son las cotas de las n curvas de nivel consideradas (en km), β_i es la fracción de la superficie total de la cuenca comprendida entre las cotas (A_i/A_T , donde A_i es el área comprendida entre las cotas y A_T es el área total de la cuenca) y L_{re} es la longitud del lado mayor del rectángulo equivalente (en km).

$$I_p = \sum_{i=2}^m \sqrt{\beta_i(a_i - a_{i-1})} \frac{1}{\sqrt{L_{re}}} \quad \beta_i = \frac{A_i}{A_T} \quad (6)$$

Según Serrano (2013, p. 13), este valor permite establecer el tipo de granulometría que se encuentra en el cauce.

- Parámetros de la red de drenaje

Longitud del cauce principal (L_c): longitud del cuerpo de agua que le da nombre a la cuenca y que pasa por el punto de salida o punto de control, tomando en cuenta la sinuosidad del cauce.

Longitud total de los cauces: suma de las longitudes de todos los cauces que componen la red de drenaje de la cuenca.

Número de orden de los cauces: clasificación que proporciona el grado de ramificación o bifurcación dentro de la cuenca. El orden de la cuenca es el del cauce principal en su punto de salida.

Como se ilustra en la Figura 7, una corriente de orden 1 es un cauce sin tributarios y, de manera general, cuando dos corrientes de orden i se unen, resulta una corriente de orden $i+1$, pero cuando una corriente se une con otra de orden mayor, resulta una corriente que conserva el orden mayor.

De acuerdo con Aparicio (1992, p. 21), "entre más corrientes tributarias tenga una cuenca, es decir, entre mayor sea el grado de bifurcación de su sistema de drenaje, más rápida será su respuesta a la precipitación".

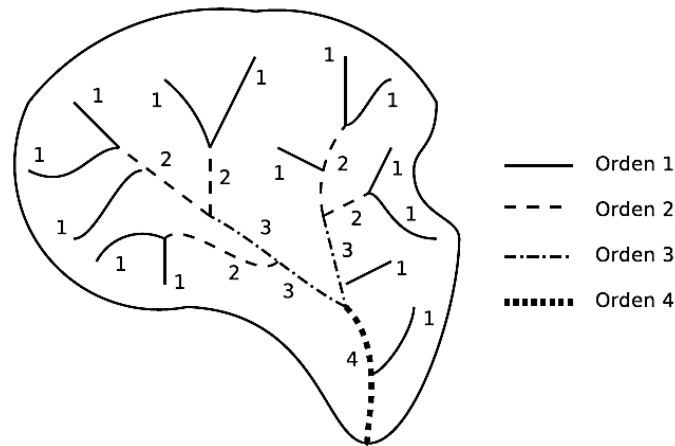


Figura 7. Número de orden de los cauces
Fuente: Serrano, 2013, p. 12

Densidad de drenaje (D_d): relación entre la longitud total de los cauces de la cuenca y su área total.

$$D_d = \frac{L}{A} \quad (7)$$

Según Serrano (2013, p. 13), una densidad de drenaje menor o cercana a $0,5 \text{ km/km}^2$ corresponde a cuencas con drenaje pobre, mientras que una densidad de drenaje de hasta $3,5 \text{ km/km}^2$ corresponde a cuencas excepcionalmente bien drenadas. Aparicio añade que

un valor bajo en la densidad de drenaje suele presentarse donde los suelos son muy resistentes a la erosión o muy permeables, mientras que una alta densidad de drenaje suele presentarse donde los suelos se erosionan fácilmente o son relativamente impermeables, las pendientes son altas y la cobertura vegetal es escasa (1992, p. 22).

2.1.2 Caracterización geológica, geomorfológica y de los suelos de una cuenca

La geología estudia la composición y estructura de una región, tanto interna como superficialmente, así como los procesos que definen su evolución a lo largo del tiempo. Por su parte, la geomorfología estudia la descripción y explicación del relieve terrestre, continental y submarino, desde tres puntos de vista en general: geomorfología estructural, geomorfología dinámica, y geomorfología climática. (Solano y Salas, 2011, p. 2).

Los suelos influyen en el fenómeno de la escorrentía, con características como su origen, naturaleza, composición, grado de erosión, granulometría e impermeabilidad.

- Capacidad de uso del suelo en Costa Rica

De acuerdo con el MAG (1991, p. 3), los órdenes taxonómicos de los suelos en Costa Rica son siete: entisoles (E), inceptisoles (I), molisoles (M), vertisoles (V), aefisoles (A), ultisoles (U) y histosoles (h). Se establecen, además, varias clases y subclases en función de la capacidad de uso del suelo, con base en los conceptos básicos del Manual 210 del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos.

Las clases I, II y III incluyen todas las tierras que son adecuadas para el cultivo regular, y las clases IV, las tierras que se pueden cultivar sin riesgos solo de vez en cuando, es decir, de modo limitado. Las clases V, VI y VII comprenden las tierras que no son adecuadas para cultivarlas, pero que son propias para pastos y bosques. La clase VIII comprende las tierras que no son adecuadas para cultivos, pastos ni bosques, algunas extensiones de ellas son apropiadas para fines de esparcimiento. MAG, 1991, p. 4.

En cuanto a las subclases, estas se dividen en generales y específicas. Las subclases generales agrupan territorios que presentan limitaciones por erosión (e), humedad (h), suelos (s) o clima (c). Las subclases específicas y sus limitaciones asociadas se describen en el

Cuadro 3.

Cuadro 3. Subclases por capacidad de uso del suelo en Costa Rica y sus limitaciones

Subclase general	Subclase específica	Descripción de su limitación
s	s1	Limitación por profundidad efectiva
	s2	Limitación por textura
	s3	Limitación por pedregosidad y/o rocosidad
e	e1	Limitación por riesgo de erosión (pendiente)
	e2	Limitación por erosión actual
h	h1	Limitación por condición de drenaje (bueno, moderado, pobre)
	h2	Limitación por riesgo de inundaciones
c	c1	Limitación por temperaturas bajas
	c2	Limitación por exceso de precipitación
	c3	Limitación por número de meses secos al año

Fuente: MAG, 1991, p. 6

A continuación, se presentan los parámetros de clasificación de tierras en Costa Rica, según subclase específica por capacidad de uso, para las distintas clases.

Cuadro 4. Parámetros de clasificación de tierras en Costa Rica, según subclase específica por capacidad de uso, clases I a IV

Característica	Símbolo	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
Profundidad, cm	s1	más de 150	150-90	90-60	60-40
Textura	s2	medias	mod. livianas a mod. pesadas	livianas a pesadas	muy pesadas a livianas
Pedregosidad y/o rocosidad	s3	sin	escasas (menos de 3%)	moderada (3.8%)	abundante (8-15%)
Pendiente	e1	0 a 2 plano	2a 6 lig. ondulado	6 a 15 ondulado	15 a 30 fuert. ondulado
Erosión	e2	sin	leve	moderada	fuerte
Drenaje	h1	bueno	lig. lento o lig. rápido	mod. lento mod. rápido	impedido imperfecto
Riesgo de inundaciones	h2	sin	sin	escasa	moderado
Temperatura media anual	c1	más de 15°C	más de 15°C	más de 15°C	más de 15°C
Precipitación media anual	c2	menos de 3500 mm	menos de 3500 mm	menos de 3500 mm	menos de 3500 mm
No. de meses secos al año	c3	1 a 2	2 a 5	2 a 5	2 a 5

Fuente: MAG, 1991, p. 11

Cuadro 5. Parámetros de clasificación de tierras en Costa Rica, según subclase específica por capacidad de uso, clases V a VIII

Característica	Símbolo	Clase V	Clase VI	Clase VII	Clase VIII
Profundidad, cm	s1	más de 50	40 a 20	menos de 20	cualquiera
Textura	s2	cualquiera	cualquiera	cualquiera	cualquiera
Pedregosidad y/o rocosidad	s3	menos de 50%	menos de 50%	cualquiera	cualquier
Pendiente	e1	0 a 5	30 a 50 escarpado	50 a 75 fuert. escamado	más de 75 montañoso
Erosión	e2	sin	fuerte	cualquiera	cualquiera
Drenaje	h1	muy pobre a bueno	pobre a moderadamente excesivo	pobre a excesivo	cualquiera
Riesgo de inundaciones	h2	fuerte	cualquiera	cualquiera	cualquiera
Temperatura media anual	c1	más de 15°C	más de 8°C	más de 8°C	cualquiera
Precipitación media anual	c2	menos de 3500 mm	menos de 3500 mm	cualquiera	cualquiera
No. de meses secos al año	c3	cualquiera	cualquiera	cualquiera	cualquiera

Fuente: MAG, 1991, p. 11

2.1.3 Uso del suelo en una cuenca

El uso del suelo se refiere al aprovechamiento dado a los terrenos, el fin al que se destinan, variando en cuanto a clase o tipo, forma e intensidad. Por ejemplo, los suelos pueden ser utilizados con fines residenciales, comerciales, industriales, agrícolas, forestales, de protección, entre otros.

El uso del suelo y la intensidad de este, definen en gran medida la cobertura del suelo, es decir, los elementos físicos presentes en la superficie, como edificaciones, asfalto, concreto, cultivos, pastos, bosques e incluso podría tratarse de suelos desnudos.

Tanto el uso como la cobertura del suelo son factores determinantes en la capacidad de respuesta de una cuenca ante eventos meteorológicos extremos. Por ejemplo, una cuenca cuyo suelo se destine principalmente al uso urbano tendrá una cobertura altamente impermeable, lo cual provocaría una respuesta más rápida ante un evento de precipitación que aquella de una cuenca con las mismas características morfológicas, pero de uso forestal.

Pese a que el uso del suelo se controla mediante normativa específica y las limitaciones impuestas por la propia topografía de una zona y las características de sus suelos, es un factor variable en el tiempo, por lo que siempre debe indicarse la fecha a la que corresponde su caracterización.

2.1.4 Caracterización climatológica de una cuenca

Se entiende por tiempo atmosférico o tiempo meteorológico al estado de la atmósfera en un momento determinado, que puede prolongarse por un periodo de corta duración. El clima es la estadística del tiempo atmosférico en periodos mucho más extensos, que permite describir las condiciones atmosféricas comunes de una zona para cualquier momento del año.

Algunas de estas condiciones atmosféricas son: temperatura, humedad, presión, nubosidad, viento, precipitación, entre otros. Cada una de estas variables debe ser medida de manera continua para contar con registros suficientes que permitan determinar la caracterización del clima en una zona.

Sin embargo, no en todas las cuencas se realizan estas mediciones o los registros existentes son insuficientes para ser concluyentes en la caracterización del clima. Como solución alternativa, existe el concepto de zonas de vida, que consiste en la descripción climática de áreas distintas que cuentan con vegetación similar, definiendo regiones biogeográficas.

En Costa Rica se emplea el sistema de zonas de vida de Holdridge, cuyos parámetros base son la biotemperatura, la precipitación y la relación de evapotranspiración potencial. Bajo este sistema, Costa Rica se divide en 12 zonas de vida (indicadas en el Cuadro 6) y 12 zonas de transición.

Cuadro 6. Zonas de vida presentes en Costa Rica, según piso altitudinal

Piso Altitudinal	Límites de temperatura (°C)	Rango altitudinal (msnm)	Zonas de vida
Basal	Más de 24 (21)	0 – 700 Según región	Bosque seco
			Bosque húmedo
			Bosque muy húmedo
Premontano	24 - 18 (26)	700 – 1400 Según región	Bosque húmedo
			Bosque muy húmedo
			Bosque pluvial
Montano bajo	18 – 12 (11)	1400 – 2700	Bosque húmedo
			Bosque muy húmedo
			Bosque pluvial
Montano	12 – 6 (13 – 5,5)	± 2400 – 3700	Bosque muy húmedo
			Bosque pluvial
Subalpino (Montano alto)	6 – 3 (6,5 – 2,7)	2800 – 4000	Páramo pluvial

Fuente: Quesada, 2007, p. 6

2.2 Modelado hidrológico

El modelado hidrológico corresponde a la determinación del patrón de flujo de la escorrentía superficial sobre el área de drenaje de una cuenca, considerando eventos extremos de precipitación asociados a distintos periodos de retorno. Para esto, se requiere la caracterización de la lluvia, la determinación de las propiedades de escorrentía y la generación de hidrogramas sintéticos.

2.2.1 Precipitación

La precipitación, particularmente en forma de lluvia, es un fenómeno con un alto grado de variabilidad espacial y temporal, que requiere de registros históricos de medición para poder ser caracterizado.

La medición de la cantidad de lluvia, asociada a intervalos de tiempo específicos, se realiza de manera puntual en estaciones meteorológicas y permite identificar la intensidad de dicha precipitación en cada uno de esos lapsos. A la representación gráfica de la cantidad de lluvia o de su intensidad en función del tiempo, se le denomina hietograma.

El carácter puntual de estas mediciones hace necesario contar con varias estaciones meteorológicas para describir de una manera más certera esa distribución espacial y temporal de la lluvia, asignando áreas de influencia a cada sitio de medición con métodos como el de Thiessen.

El método de Thiessen establece que en cualquier punto de la cuenca la lluvia es igual a la que se registra en el pluviómetro más cercano; luego la profundidad registrada en un pluviómetro dado se aplica hasta la mitad de la distancia a la siguiente estación pluviométrica en cualquier dirección. Los pesos relativos de cada pluviómetro se determinan de las correspondientes áreas de aplicación en una red de *polígonos de Thiessen*, cuyas fronteras están formadas por los bisectores perpendiculares a las líneas que unen pluviómetros adyacentes. Chow, 1994, p. 80.

Este tipo de métodos permiten determinar el volumen de precipitación promedio que cae sobre el área de drenaje, de la siguiente manera:

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \cdot \sum_{j=1}^J (A_j \cdot P_j) \quad (8)$$

Donde A es el área total de la cuenca, A_j es el área de influencia del pluviómetro j y P_j es la precipitación registrada en el pluviómetro j.

El método de Thiessen presenta el inconveniente de no tomar en cuenta, de forma directa, la influencia de la topografía en la precipitación. Sin embargo, diversos estudios han llegado a la conclusión de que todos los métodos ofrecen resultados comparables, especialmente cuando el periodo de estudio es largo.

Existen otros métodos de distribución espacial de la lluvia basados en interpolación, como los trazadores (*spline*), la distancia inversa ponderada (*IDW*) y el krigeaje (*kriging*). El uso de estos métodos mediante sistemas de información geográfica permite asignar un volumen de precipitación a cada una de las celdas en que se subdivide el área de drenaje, de forma que también se puede obtener el volumen de precipitación promedio que cae sobre el área de drenaje.

2.2.2 Análisis de frecuencias y distribuciones de probabilidad

El análisis de frecuencias es un procedimiento para estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos pasados o futuros de acuerdo con su magnitud, a partir de series de datos homogéneos e independientes y el uso de distribuciones de probabilidad. Esta probabilidad de ocurrencia (P) se asocia con el concepto de periodo de retorno (T): **“intervalo de recurrencia promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud especificada”** (Chow, 1994, p. 392).

$$P = \frac{1}{T} \quad (9)$$

La distribución de probabilidad de una variable aleatoria es una función que asigna a cada evento definido sobre la variable una probabilidad de ocurrencia, de manera que este tipo de funciones permiten pronosticar la ocurrencia de un suceso determinado. La selección y uso de una distribución de probabilidad requiere del cálculo de sus parámetros y de la validación por medio de pruebas de bondad de ajuste. El ajuste de una serie de datos a una distribución de probabilidad busca garantizar que la distribución seleccionada es verdaderamente representativa del comportamiento de la muestra de datos.

En el caso de la precipitación como variable, se utilizan diferentes distribuciones para estimar la probabilidad de excedencia de un evento extremo y así obtener su correspondiente periodo de retorno. Por ejemplo, Serrano (2013, p. 137) menciona que la distribución Gumbel, también llamada distribución de valor extremo tipo I, Fisher-Tippett tipo I o distribución doble exponencial, es una de las distribuciones de valores extremos más utilizadas en hidrología.

La función $F(x)$ de distribución acumulada de la distribución Gumbel y su correspondiente función $f(x)$ de densidad de probabilidad, tienen la siguiente forma:

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-\beta}{\alpha}}} \quad (10)$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{x-\beta}{\alpha}} e^{-\frac{x-\beta}{\alpha}} \quad (11)$$

Donde α es el parámetro de escala y β es el parámetro de ubicación, también llamado valor central o moda, que se calculan de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot S \quad (12)$$

$$\beta = \bar{x} - 0,45 \cdot S \quad (13)$$

Siendo \bar{x} la media y S la desviación estándar de la muestra.

Según Chow (1994, p. 400), la magnitud (x_T) de un evento hidrológico extremo puede **representarse como la media (μ) más una desviación (Δx_T)** de la variable con respecto a la media. Esta desviación con respecto a la media puede igualarse al producto de la desviación estándar (σ) y el factor de frecuencia (K_T), el cual es función del periodo de retorno y de la distribución de probabilidad **seleccionada. La media (μ) puede ser aproximada por \bar{x}** y la desviación estándar (σ) puede ser aproximada por S .

$$x_T = \mu + \Delta x_T = \mu + K_T \sigma \quad (14)$$

$$x_T = \bar{x} + K_T S \quad (15)$$

El mismo Chow dedujo la siguiente expresión para calcular el factor de frecuencia para la distribución Gumbel en función del periodo de retorno en cuestión (1994, p. 402):

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0,5772 + \ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \right\} \quad (16)$$

Una de las pruebas de bondad de ajuste más conocidas es la prueba χ^2 de Pearson, que ofrece un parámetro de comparación entre una distribución observada y otra teórica, indicando la medida en que se diferencian. El estadístico de prueba χ^2 es el siguiente:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\theta_i - \varepsilon_i)^2}{\varepsilon_i} \quad (17)$$

Donde θ_i es la cantidad observada de eventos que se agrupan en un determinado intervalo i y ε_i es la cantidad esperada de eventos que se agrupan en el mismo intervalo.

Seleccionado un nivel de significancia (α), se compara el estadístico de prueba con el valor teórico de la distribución χ^2 . Si el estadístico de prueba es menor que el valor teórico, se puede concluir que la distribución de probabilidades elegida se ajusta a los datos observados.

De acuerdo con Torres (2020, p. 27), se define una función $G(z)$ que pertenece a uno de los siguientes tipos de distribución límite de máximos:

$$I. \text{Gumbel: } G(z) = e^{-e^{-\frac{(z-b)}{a}}}, \quad -\infty < z < \infty \quad (18)$$

$$II. \text{Fréchet: } G(z) = \begin{cases} 0, & z \leq b \\ e^{-\left(\frac{z-b}{a}\right)^{-\alpha}}, & z > b \end{cases} \quad (19)$$

$$III. \text{Weibull: } G(z) = \begin{cases} e^{-\left[-\left(\frac{z-b}{a}\right)\right]^{-\alpha}}, & z < b \\ 1, & z \geq b \end{cases} \quad (20)$$

Donde $a > 0$ y $\alpha > 0$. Cada distribución tiene un parámetro de escala (a) y un parámetro de ubicación (b). Adicionalmente, las distribuciones Fréchet y Weibull tienen un parámetro de forma (α). Estas tres distribuciones son las distribuciones de valores extremos.

Según Salvadori et al. (2007) y Coles (2001), mencionados por Torres (2020, p. 28), para un mejor análisis de los máximos se combinan las tres distribuciones en un solo modelo con la siguiente función de distribución y función de densidad de probabilidad:

$$G(z) = e^{-\left[1 + \xi \left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}} \quad (21)$$

$$g(z) = \frac{1}{\sigma} \left[1 + \xi \left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi - 1} e^{-\left[1 + \xi \left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}} \quad (22)$$

Definido en el conjunto $\{z : 1 + \xi \left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right) > 0\}$, donde $-\infty < \mu < \infty$, $\sigma > 0$ y $-\infty < \xi < \infty$.

Esta distribución es conocida como Generalizada de Valor Extremo (GEV, por sus siglas en inglés) o ley de probabilidad de von Mises o von Mises-Jenkinson, donde μ es el parámetro de localización, σ es el parámetro de escala y ξ es el parámetro de forma. Si $\xi = 0$, corresponde a la distribución Gumbel, mientras que si $\xi > 0$, corresponde a la distribución Fréchet y si $\xi < 0$, corresponde a la distribución Weibull.

Coles (2001), mencionado por Torres (2020, p. 29), indica que la unificación de las tres distribuciones de valores extremos en una sola distribución permite una simplificación en la implementación estadística, ya que a través de la inferencia de ξ los mismos datos determinan el comportamiento adecuado, sin subjetividad sobre la elección de una u otra distribución.

A partir de la distribución GEV, pueden calcularse sus niveles de retorno o cuantiles (z_p) asociados a un determinado periodo de retorno (1/P). Para el caso en estudio, z_p representan aquellos volúmenes de precipitación que serán excedidos al menos una vez en los periodos de retorno seleccionados.

$$z_p = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left[1 - (-\log(1 - P))^{-\xi}\right], & \text{para } \xi \neq 0 \\ \mu - \sigma [\log(-\log(1 - P))], & \text{para } \xi = 0 \end{cases} \quad (23)$$

2.2.3 Pérdidas de precipitación

Del volumen total que compone una precipitación, una porción será retenida por la vegetación mediante intercepción, otra será almacenada en depresiones propias de la topografía y otra se infiltrará en el suelo, sumando, entre todas, el volumen de pérdidas de precipitación. El volumen restante se conoce con el nombre de exceso de precipitación o precipitación efectiva, y es aquel que se convertirá en escorrentía superficial y establece la relación lluvia-escorrentía.

El Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS, por sus siglas en inglés, actualmente NRCS) desarrolló, un método para calcular las pérdidas de precipitación de una tormenta con base en el uso, cobertura y tipo de suelo, así como en las condiciones de humedad antecedente del suelo. Este método se denomina número de curva de escorrentía (CN).

Para cualquier tormenta, la escorrentía directa está asociada a la precipitación efectiva (P_e), que es siempre menor o igual a la precipitación total (P). De forma similar, la precipitación retenida en la cuenca (F_a) es menor o igual a la retención potencial máxima en la cuenca (S). Además, existe una cierta cantidad de precipitación para la cual no ocurrirá escorrentía, conocida como pérdida inicial antes del encharcamiento (I_a), que permite definir la escorrentía potencial como $P - I_a$.

De acuerdo con Chow (1994, p. 151), la hipótesis de este método consiste en que las relaciones de las dos cantidades reales y las dos cantidades potenciales son iguales:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (24)$$

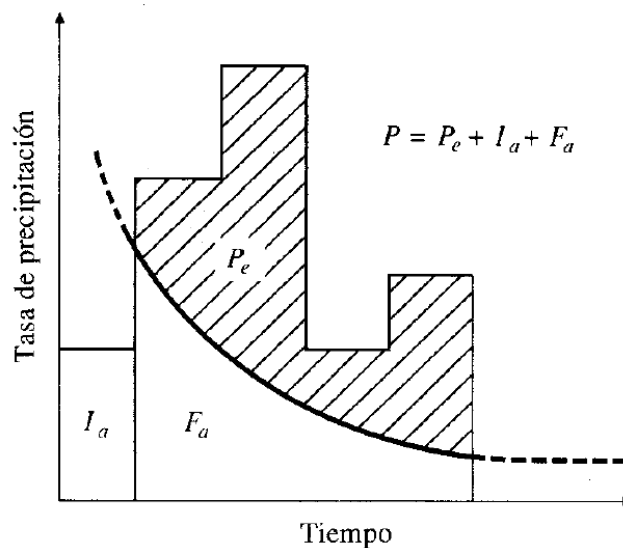


Figura 8. Variables del método de pérdidas de precipitación del SCS (NRCS)

Fuente: Chow, 1994, p. 151

Donde, además, por el principio de continuidad, se establece que:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (25)$$

Por lo tanto, se obtiene la ecuación básica del método de pérdidas de precipitación del SCS (NRCS) para el cálculo de la precipitación efectiva:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (26)$$

Y como resultado de muchos estudios en cuencas experimentales pequeñas, se ha establecido, como relación empírica, que I_a puede aproximarse como $0,2 S$, por lo tanto:

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (27)$$

Según Serrano (2013, p. 185), este método fue desarrollado con base en datos de precipitación y escorrentía de 24 horas, lo cual limita el cálculo de la precipitación efectiva y no considera explícitamente las variaciones temporales de intensidad de lluvia. Sin embargo, agrega que la distribución temporal de la precipitación puede ser introducida posteriormente, al generar el hidrograma de escorrentía.

Debido a la variabilidad que puede presentar el almacenamiento potencial de la cuenca (S), el método aproxima este valor en función del número de curva de escorrentía (CN).

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (28)$$

De donde se obtiene una aproximación de S , en mm. El número de curva es una variable adimensional que teóricamente toma valores enteros en el rango de 1 a 100, aunque en la práctica el rango va de 30 a 98, y que es inversamente proporcional a la capacidad de la cuenca para generar pérdidas de precipitación y reducir la escorrentía directa.

La selección del número de curva depende de una combinación específica del grupo hidrológico del suelo (tipo de suelo), su uso y cobertura, la condición hidrológica superficial y las condiciones de humedad antecedente, ya que todos estos factores tienen una incidencia directa sobre la cantidad de escorrentía que produce un área de drenaje.

Según el tipo de suelo, existen cuatro grupos hidrológicos, descritos por Serrano (2013, pp. 188-189):

- Grupo A: Suelos con bajo potencial de escorrentía, con una alta tasa de infiltración aun en condiciones muy húmedas y una alta tasa de transmisión de agua. Consisten mayoritariamente en arenas o gravas profundas de bien a excesivamente drenadas.
- Grupo B: Suelos con un potencial de escorrentía moderadamente bajo, con una tasa de infiltración moderada en condiciones muy húmedas y una tasa de transmisión de agua moderada. Suelos de moderadamente profundos a profundos, de moderadamente bien drenados a bien drenados, con texturas de moderadamente finas a moderadamente gruesas y permeabilidad de moderadamente lenta a moderadamente rápida.
- Grupo C: Suelos con un potencial de escorrentía moderadamente alto, con una tasa de infiltración baja en condiciones muy húmedas. Cuentan con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo, por lo que presentan niveles freáticos moderados. Consisten en suelos de textura de moderadamente fina a fina, que pueden ser pobremente drenados o moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad de lenta a muy lenta a poca profundidad (50 – 100 cm).
- Grupo D: Suelos con un potencial de escorrentía alto, con una tasa de infiltración muy baja en condiciones muy húmedas y una tasa de transmisión de agua muy baja. Consisten mayoritariamente en arcillas con alto potencial de expansión; presentan niveles freáticos altos permanentemente, en un estrato arcilloso superficial de poca profundidad que se ubica sobre material casi impermeable.

La condición hidrológica se refiere a la capacidad de la superficie de la cuenca para aumentar o impedir la escorrentía directa. Por ejemplo, en el caso de áreas cubiertas con pastos, una condición hidrológica pobre corresponde a menos del 50% del área cubierta y alta intensidad de pastoreo, una condición hidrológica aceptable corresponde al 50 a 75% del área cubierta y media intensidad de pastoreo, y una condición hidrológica buena corresponde a más del 75% del área cubierta y ligera intensidad de pastoreo. En el caso de bosques, una condición hidrológica pobre corresponde a áreas densamente pastadas o bosques regularmente quemados, con pocos arbustos y muy pequeña cantidad de humus vegetal, una condición hidrológica aceptable corresponde a áreas con pastos no quemados, con algunos arbustos y moderada cantidad de humus vegetal, y una condición hidrológica buena corresponde a áreas protegidas con pasto, con alta cantidad de humus vegetal y muchos arbustos cubriendo la superficie. (Serrano, 2013, pp. 189-190)

Finalmente, la condición de humedad antecedente (AMC, por sus siglas en inglés) depende de la precipitación total en los cinco días previos a la tormenta, lo que define tres posibles condiciones (Serrano, 2013, p. 190):

- Condición de humedad antecedente seca (AMC I): Tiene el menor potencial de escorrentía, pues los suelos están lo suficientemente secos, con una precipitación acumulada en los cinco días previos a la tormenta menor a 3,5 cm.
- Condición de humedad antecedente promedio (AMC II): Tiene un potencial de escorrentía promedio, con una precipitación acumulada en los cinco días previos a la tormenta de entre 3,5 y 5,25 cm.
- Condición de humedad antecedente húmeda (AMC III): Tiene el mayor potencial de escorrentía, pues los suelos están prácticamente saturados por precipitaciones previas, con una precipitación acumulada en los cinco días previos a la tormenta mayor a 5,25 cm.

En función de estas características, se han creado cuadros que permiten seleccionar el número de curva de escorrentía que mejor se adapta a las condiciones de la cuenca en estudio. En el Cuadro 7 y el Cuadro 8 se presentan números de curva de escorrentía para diferentes condiciones.

El número de curva así obtenido corresponde a una condición AMC II, por lo que deben realizarse conversiones en caso de tratarse de condiciones AMC I o AMC III, mediante las siguientes ecuaciones.

$$CN_I = \frac{4,2 \cdot CN_{II}}{10 - 0,058 \cdot CN_{II}} \quad (29)$$

$$CN_{III} = \frac{23 \cdot CN_{II}}{10 + 0,13 \cdot CN_{II}} \quad (30)$$

Cuadro 7. Número de curva de escorrentía para áreas agrícolas cultivadas

Uso de la tierra	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	Grupo de suelo			
			A	B	C	D
Rastrojo	Hileras rectas	-	77	86	91	94
Cultivos en hileras	Hileras rectas	Mala	71	81	88	91
		Buena	67	78	85	89
	Curvas de nivel	Mala	70	79	84	88
		Buena	65	75	82	86
	Terrazas	Mala	66	74	80	82
		Buena	62	71	78	81
Cultivos en hileras estrechas	Hileras rectas	Mala	65	76	84	88
		Buena	63	75	83	87
	Curvas de nivel	Mala	63	74	82	85
		Buena	61	73	81	84
	Terrazas	Mala	61	72	79	82
		Buena	59	70	78	81
Pastos de pastoreo	Hileras rectas	Mala	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
		Buena	39	61	74	80
	Curvas de nivel	Mala	47	67	81	88
		Regular	25	59	75	83
		Buena	6	35	70	79
Bosques	Mala	45	66	77	83	
	Regular	36	60	73	79	
	Buena	25	55	70	77	
Patios		-	59	74	82	86
Caminos de tierra		-	72	82	87	89

Fuente: Adaptado de Serrano, 2013, p. 192

Cuadro 8. Número de curva de escorrentía para áreas urbanas

Tipo de cobertura y condición hidrológica	% promedio de área impermeable	Grupo de suelo			
		A	B	C	D
Áreas urbanas totalmente desarrolladas					
Espacios abiertos (prados, parques, etc.)					
Condición pobre (menos del 50% cubierto de pastos)		68	79	86	89
Condición regular (del 50% al 75% cubierto de pastos)		49	69	79	84
Condición buena (más del 75% cubierto de pastos)		39	61	74	80
Áreas impermeables					
Parqueos pavimentados, techos, autopistas, etc.		98	98	98	98
Calles y caminos					
Pavimentados		98	98	98	98
Grava		76	85	89	91
Tierra		72	82	87	89
Áreas urbanas		89	92	94	95
Comercial y de negocios	85	81	88	91	93
Industrial	72	81	88	91	93
Áreas residenciales por promedio del tamaño del lote		77	85	90	92
1/8 acre o menos	65	61	75	83	87
1/4 acre	38	57	72	81	86
1/3 acre	30	54	70	80	85
1/2 acre	25	51	68	79	84
1 acre	20	46	65	77	82
Áreas urbanas desarrolladas recientemente conformadas		77	86	91	94

Fuente: Adaptado de Serrano, 2013, p. 192

2.2.4 Hidrograma unitario sintético de Snyder

Un hidrograma unitario es la función que representa la respuesta de una cuenca ante un pulso de precipitación efectiva de 1 mm de profundidad con una duración efectiva. El término unitario se debe al volumen unitario que tiene el hidrograma.

De acuerdo con Chow (1994, pp. 220-221), el hidrograma unitario es un modelo lineal simple que permite deducir el hidrograma resultante de cualquier cantidad de precipitación efectiva, bajo los siguientes supuestos:

1. El volumen que representa el área bajo la función del hidrograma es unitario.
2. La precipitación efectiva tiene una intensidad constante dentro de la duración efectiva.
3. La precipitación efectiva se distribuye uniformemente sobre toda el área de la cuenca.
4. El tiempo base del hidrograma resultante de una precipitación efectiva de duración dada es constante.
5. El hidrograma obedece el principio de superposición, es directamente aditivo y multiplicativo.
6. El hidrograma resultante de una precipitación efectiva para una cuenca dada sigue el principio de invariancia temporal y no cambia salvo que exista un cambio en las condiciones de la cuenca.

El método de preferencia para realizar la transformación de escurrimiento a caudal es el uso de hidrogramas registrados en la cuenca para determinar un hidrograma unitario que represente la respuesta hidrológica de la cuenca. Sin embargo, en muchas ocasiones no se cuenta con mediciones de caudal, por lo que deben utilizarse métodos de hidrograma unitario sintético.

El método de Snyder utiliza las características físicas de la cuenca para generar sintéticamente la función del hidrograma unitario. Snyder desarrolló su método tras estudiar los hidrogramas de una gran cantidad de cuencas en los Estados Unidos, logrando relacionar el tiempo al pico de los hidrogramas con características físicas de las cuencas.

De acuerdo con Chow (1994, p. 232), Snyder definió el hidrograma unitario estándar como aquel cuya duración de lluvia (t_r) está relacionada con el retardo de la cuenca (t_p) mediante la siguiente expresión:

$$t_p = 5,5 \cdot t_r \quad (31)$$

Además, para un hidrograma unitario estándar:

$$t_p = C_1 \cdot C_t \cdot (L \cdot L_c)^{0,3} \quad (32)$$

Donde C_1 es 0,75 cuando se utilizan unidades SI, L es la longitud del cauce principal (en km), L_c es la longitud del cauce principal hasta el punto más cercano al centroide de la cuenca (en km) y C_t es un coeficiente basado en las características de la cuenca.

Según Dunne y Leopold (1978, p. 336), en los estudios de Snyder el coeficiente C_t resultó en valores entre 1,8 y 2,2, pero se han registrado valores que van desde 0,3 en cuencas montañosas de pendiente pronunciada hasta 10 en tierras bajas de muy poca pendiente.

El caudal pico del hidrograma unitario estándar (q_p) es:

$$q_p = \frac{C_2 \cdot C_p \cdot A}{t_p} \quad (33)$$

Donde C_2 es 2,75 cuando se utilizan unidades SI, A es el área de la cuenca (en km²) y C_p es un coeficiente propio de la cuenca.

Según Subramanya (2008, pp. 226-227), en los estudios de Snyder el coeficiente C_p resultó en valores entre 0,56 y 0,69, pero se han registrado valores que van desde 0,31 hasta 0,93, dependiendo de las características de la cuenca. Este coeficiente se considera una indicación de la retención y de la capacidad de almacenamiento de la cuenca.

Mientras que el caudal pico del hidrograma unitario requerido (q_{pR}) es:

$$q_{pR} = \frac{q_p \cdot t_p}{t_{pR} \cdot A} \quad (34)$$

Donde el tiempo de retardo de la cuenca en el hidrograma unitario requerido (t_{pR}) es:

$$t_p = t_{pR} + \frac{t_r - t_R}{4} \quad (35)$$

El tiempo base (t_b) del hidrograma unitario es:

$$t_b = \frac{C_3}{q_{pR}} \quad (36)$$

Donde C_3 es 5,56 cuando se utilizan unidades SI.

El ancho en horas (W) del hidrograma unitario al 75% y 50% del caudal pico es:

$$W_{75} = 1,22 \cdot q_{pR}^{-1,08} \quad (37)$$

$$W_{50} = 2,14 \cdot q_{pR}^{-1,08} \quad (38)$$

Donde usualmente cada ancho se distribuye con un tercio del tiempo ocurriendo antes del caudal pico y los dos tercios restantes después del caudal pico.

El tiempo al pico del hidrograma unitario requerido es la mitad de la duración efectiva (t_R) más el tiempo de retardo (t_{pR}).

Los parámetros característicos del hidrograma unitario sintético de Snyder, antes descritos, se muestran en la Figura 9.

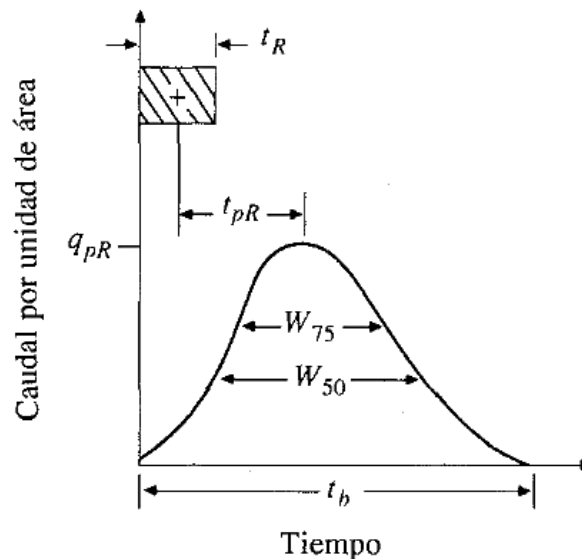


Figura 9. Hidrograma unitario sintético de Snyder
Fuente: Chow, 1994, p. 231

2.2.5 Modelo hidrológico en HEC-HMS

El software de modelado hidrológico del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE), HEC-HMS, utiliza una serie de componentes para formar el modelo hidrológico de un sistema de cuenca hidrológica. Los componentes se dividen en cuatro apartados: los modelos de cuenca, los modelos meteorológicos, las especificaciones de control y los datos de series temporales.

El componente básico de un modelo de cuenca en HEC-HMS es el área de drenaje, denominada *subbasin*. A cada área de drenaje se le asignan métodos de cálculo y los parámetros necesarios para su ejecución. En este caso, se utiliza el método de número de curva de escurrimiento del SCS (NRCS), como método de pérdidas de precipitación, y el método del hidrograma unitario sintético de Snyder, como método de transformación de precipitación a caudal.

El componente de modelos meteorológicos asigna a cada área de drenaje la información de precipitación que se quiere utilizar, siendo posible someter un mismo modelo de cuenca a distintos eventos de precipitación, por ejemplo, en función del periodo de retorno. La información de precipitación se almacena en forma de datos de series temporales representativas de la distribución de la lluvia.

Finalmente, las especificaciones de control consisten en el intervalo de tiempo en el cual se va a realizar la simulación hidrológica. Los resultados del modelo hidrológico en HEC-HMS, requeridos para el modelado hidráulico, son los hidrogramas de creciente con su respectivo caudal pico, para cada periodo de retorno.

2.3 Modelado hidráulico

El modelado hidráulico depende de una gran cantidad de información base para su correcta ejecución, como lo es el detalle de la topografía del cauce y su entorno, junto con los resultados obtenidos del modelado hidrológico. A partir de estos elementos de entrada, se generan procesos de tránsito de crecientes para analizar el comportamiento del flujo de agua, mediante distintos modelos.

2.3.1 Tránsito de crecientes

El tránsito de crecientes es un procedimiento que permite determinar el hidrograma de una creciente en un punto de un curso de agua, dado el hidrograma de entrada (conocido o supuesto) en uno o más puntos aguas arriba, lo cual permite seguir el caudal a través del sistema hidrológico. (Chow, 1994, p. 249)

El flujo de agua a través del suelo y de los canales en una cuenca es un proceso distribuido porque el caudal, la velocidad y la profundidad varían en el espacio. Para el estudio de los efectos de la propagación de crecientes en ríos se pueden utilizar modelos unidimensionales o bidimensionales.

Los modelos de tránsito distribuido de crecientes están basados en las ecuaciones de Saint-Venant para flujo unidimensional (ecuación de continuidad y ecuación de cantidad de movimiento), ecuaciones diferenciales parciales que permiten el cálculo simultáneo del caudal y del nivel del agua en función del espacio y el tiempo, aproximando mejor la naturaleza de flujo no permanente y no uniforme propia de la propagación de una creciente. Particularmente, el cálculo del nivel del agua en una creciente es importante porque este nivel delinea la planicie de inundación. (Ídem, p. 281)

Estos modelos unidimensionales de tránsito distribuido de crecientes se clasifican en: tránsito de onda cinemática, tránsito de onda de difusión y tránsito de onda dinámica. Los dos primeros modelos son útiles para describir la propagación de ondas aguas abajo, cuando las pendientes de fondo son mayores al 0,01% y no existen ondas propagándose aguas arriba por perturbaciones, pero cuando esto ocurre, en ríos de pendiente baja, se requiere del tránsito de onda dinámica para incluir tanto el término de fuerza inercial como el término de fuerza de presión en la ecuación de cantidad de movimiento. (Ídem, pp. 320-321)

Por ejemplo, el método de Muskingum-Cunge para el tránsito de crecientes (modelo unidimensional) presenta las desventajas de que no puede manejar los efectos de perturbaciones aguas abajo que se propagan aguas arriba y que no puede predecir de forma exacta el hidrograma de caudal de salida en una frontera aguas abajo cuando existen grandes variaciones en la velocidad de la onda cinemática, como las que resultan de las crecientes sobre planicies de inundación grandes. (Ídem, p. 314)

2.3.2 Flujo bidimensional

El flujo bidimensional se refiere al análisis del movimiento de un fluido considerando la velocidad en un cierto plano dado, por lo que puede separarse en dos componentes ortogonales. Todas las partículas fluyen sobre planos paralelos a lo largo de la trayectoria que realiza el fluido y si se comparan las diferentes trayectorias de cada plano, estas deben ser idénticas entre sí. (Álvarez, 2018, p. 38)

El flujo en cuerpos de agua naturales, como ríos y quebradas, enfrenta condiciones variables que lo vuelven complejo, donde se destaca la interacción entre el cauce y la planicie de inundación, creando desplazamientos que no necesariamente siguen la dirección del flujo dentro del cauce.

La propagación de flujo en ríos naturales es compleja debido a varios factores: uniones y tributarios, variaciones en la sección transversal, variaciones en la resistencia tanto con la profundidad de flujo como con la localización a lo largo del río, áreas inundadas y meandros en el río. La interacción entre el canal principal y la planicie de inundación o valle inundado es uno de los factores más importantes que afectan la propagación de crecientes. Durante el periodo de aumento de una onda de creciente, el agua fluye hacia la planicie de inundación o valle desde el canal principal, y durante la disminución de la creciente, el agua regresa del valle inundado al canal principal. El efecto del almacenamiento en el valle es disminuir el caudal durante la disminución de la creciente. Así mismo, ocurren algunas pérdidas en el valle debido a infiltración y evaporación.

La planicie de inundación tiene un efecto en la celeridad de la onda debido a que la onda de creciente se mueve más lentamente en el valle inundado que en el canal principal de un río. Esta diferencia de celeridades de onda dispersa la onda de creciente y produce flujo desde el canal principal hacia la planicie de inundación durante el aumento de la creciente, creando una pendiente transversal en la superficie del agua hacia afuera del canal. Durante la disminución de la creciente, la pendiente transversal se invierte desde el valle inundado hacia el canal principal, luego el agua regresa de la planicie de inundación al canal principal. Chow, 1994, p. 322.

Esta inversión de la pendiente transversal que menciona Chow y que controla la dirección del flujo hacia y desde la planicie de inundación, respectivamente al aumentar y disminuir el caudal producto de la creciente, se representa en la Figura 10.



a) Pendiente transversal durante el aumento de la creciente. b) Pendiente transversal durante la recesión de la creciente.

Figura 10. Inversión de la pendiente transversal al aumentar y reducir el caudal por una creciente
Fuente: Chow, 1994, p. 323

Por lo tanto, el flujo bidimensional adquiere importancia cuando se estudia una red fluvial y el río analizado tiene velocidades considerables en la dirección perpendicular al sentido de flujo en el cauce, situación que se presenta en planicies de inundación grandes.

2.3.3 Ecuaciones de Navier-Stokes

De acuerdo con Álvarez (2018, p. 38), las ecuaciones de Navier-Stokes describen de la manera más general el comportamiento de un fluido y son una representación especial de la ecuación de continuidad, derivadas de los principios de conservación de la masa, conservación de la cantidad de movimiento y conservación de la energía. La solución de las ecuaciones de Navier-Stokes es una velocidad de flujo en un campo, ya que se define en cada punto de una región del espacio y un intervalo de tiempo. Una vez calculada la velocidad de flujo, se podrían obtener otras variables de interés, como presión o aceleración.

2.3.4 Ecuaciones de aguas someras

Según Álvarez (2018, pp. 38-39), Saint-Venant simplifica las ecuaciones de Navier-Stokes, tanto para flujo en una como en dos dimensiones. En el caso bidimensional, también se les llama ecuaciones de aguas someras o aguas poco profundas. En su forma no conservativa, es decir, que se obtienen a partir de un volumen de control fijo en el espacio, estas ecuaciones se expresan de la siguiente manera:

- Ecuación de conservación de la masa

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (39)$$

- Ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = 0 \quad (40)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) = 0 \quad (41)$$

Donde h es el nivel de profundidad o tirante del agua, en m, el vector bidimensional (u,v) es la velocidad horizontal promedio del flujo en el tirante, en m/s, y g es la aceleración de la gravedad, en m/s². En este caso, no se están considerando fuerzas generadas por el efecto Coriolis, fricción o viscosidad.

Estas ecuaciones requieren de los siguientes supuestos para su aplicación:

1. La distribución de presiones en la componente vertical es hidrostática, por lo que las aceleraciones verticales son despreciables. En consecuencia, los modelos que utilizan las ecuaciones de Saint-Venant, tanto en una como en dos dimensiones, no deben ser utilizados para fluidos rápidamente variados, como sería la descarga de un vertedor.
2. La pendiente de fondo es tan pequeña tal que se puede considerar el seno del ángulo de pendiente como el ángulo mismo. Es decir, $\text{sen}\theta \approx \text{tan}\theta \approx \theta$.
3. El fluido es incompresible y su densidad es constante en todo el dominio.

2.3.5 Simulación numérica de flujo en ríos: Modelo Iber

Iber es un modelo matemático bidimensional para la simulación numérica de flujo en ríos y estuarios. Entre sus usos se encuentran: la simulación del flujo en lámina libre en cauces naturales, la evaluación de zonas inundables y el cálculo de las zonas de flujo preferente, el cálculo hidráulico de encauzamientos, el cálculo hidráulico de redes de canales en lámina libre, el cálculo de corrientes de marea en estuarios. (Bladé et al., 2014, p. 2)

El módulo hidrodinámico de Iber resuelve las ecuaciones de Saint-Venant bidimensionales, incorporando los efectos de la turbulencia, rozamiento superficial por viento y rozamiento de fondo, como se muestra a continuación.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (42)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} \\ = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t h \frac{\partial u}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{gh^2}{2} \right) \\ = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t h \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (44)$$

Donde se utiliza la misma nomenclatura expuesta para las ecuaciones de aguas someras. Adicionalmente, ρ es la densidad del agua, en kg/m³, Z_b es la cota de fondo, en m, τ_s es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, en N, τ_b es la fricción debida al rozamiento del fondo, en N, ν_t es la viscosidad turbulenta, en m²/s.

Según Bladé et al. (2014, p. 2), todas las funciones y parámetros que aparecen en las ecuaciones hidrodinámicas (incluyendo el coeficiente de rugosidad de Manning y la velocidad del viento) pueden imponerse de forma variable tanto espacial como temporalmente.

2.3.5.1 Esquemas numéricos

Los esquemas numéricos que utiliza Iber son apropiados para el modelado de cambios de régimen y de frentes seco-mojado (frentes de inundación), mediante el método de volúmenes finitos para mallas bidimensionales no estructuradas que admiten elementos triangulares y cuadrangulares.

En el caso de los frentes seco-mojado, se define una tolerancia seco-mojado, tal que, si la profundidad del agua en un volumen finito es menor a dicha tolerancia, el elemento se considera seco y no se incluye en el cálculo. La profundidad no se fuerza a cero, con el fin de evitar pérdidas de masa en el interior del dominio de cálculo. A partir de esto, se define

el frente de inundación como el límite entre las zonas secas y las zonas mojadas, donde se impone una condición de reflexión que consiste en forzar a cero tanto la velocidad perpendicular al frente como el gradiente de la lámina de agua en dicha dirección. (Bladé et al., 2014, p. 4)

Las ecuaciones de Saint-Venant bidimensionales son un sistema de ecuaciones diferenciales, en derivadas parciales, hiperbólico y no lineal. De acuerdo con el *Manual de referencia hidráulico* de Iber (2014, p. 7), estas ecuaciones suponen una distribución de presión hidrostática, hipótesis que se cumple razonablemente en el flujo en ríos, y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad, hipótesis que se cumple habitualmente en ríos.

Este sistema de ecuaciones no tiene una solución directa, por lo que se debe resolver por medio de métodos numéricos que requieren de una malla de cálculo, la cual debe tener definidos valores para la geometría, la rugosidad de fondo, condiciones iniciales y condiciones de contorno.

Según el *Manual de referencia hidráulico* (2014, pp. 40-41), Iber emplea las ecuaciones de Saint-Venant escritas en forma conservativa y vectorial, para aplicar el método de volúmenes finitos, las cuales se expresan de la siguiente manera:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} = \sum_k G_k \quad (45)$$

Donde w representa el vector de variables conservadas y F_x y F_y representan los vectores de los términos de flujo. Estos vectores se definen de la siguiente manera:

$$w = \begin{pmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{pmatrix} \quad F_x = \begin{pmatrix} q_x \\ \frac{q_x^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \\ \frac{q_x q_y}{h} \end{pmatrix} \quad F_y = \begin{pmatrix} q_y \\ \frac{q_x q_y}{h} \\ \frac{q_y^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \end{pmatrix} \quad (46)$$

Donde h es la altura del agua en el nodo de cálculo y q_x y q_y son los caudales específicos en los ejes x y y en el nodo de cálculo.

Para discretizar espacialmente las ecuaciones por el método de volúmenes finitos, se realiza la integral de las ecuaciones diferenciales en cada celda de la malla de cálculo. Esto permite formular de forma sencilla métodos conservativos.

2.3.5.2 Paso temporal

De acuerdo con Álvarez (2018, pp. 41-42), Iber utiliza un esquema explícito para evaluar el paso temporal en las ecuaciones de flujo, las evalúa en el instante de tiempo T_n y no en T_{n+1} . El paso de tiempo para la integración temporal está limitado por la condición de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL), que implica que el paso de tiempo máximo utilizado para la integración temporal está limitado por la siguiente ecuación:

$$\Delta t_{CFL} = CFL \frac{\Delta x}{|u \pm c|} \quad (47)$$

Donde Δx es el tamaño mínimo de la malla de cálculo, u es la velocidad del agua, c es la celeridad y CFL es un coeficiente menor o igual a 1.

3. Caracterización de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez

3.1 Generalidades

La cuenca hidrográfica del río Aranjuez se ubica en el sector Pacífico Central de Costa Rica, en la sección noroeste de la provincia de Puntarenas, al suroeste de la Cordillera de Tilarán. Forma parte de la cuenca hidrográfica Abangares (número 21 de las 34 cuencas que conforman el territorio costarricense), drenando sus aguas hacia el Golfo de Nicoya. En la Figura 11, se muestra la ubicación de la cuenca en estudio.



Figura 11. Ubicación de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez

Con referencia a la división político-administrativa de Costa Rica, la cuenca del río Aranjuez abarca territorios de los distritos Arancibia, Acapulco y Pitahaya del cantón de Puntarenas (representados con color anaranjado en la Figura 12) y de los distritos La Unión y Miramar del cantón de Montes de Oro (representados con color verde), para una extensión total de aproximadamente 192 km².

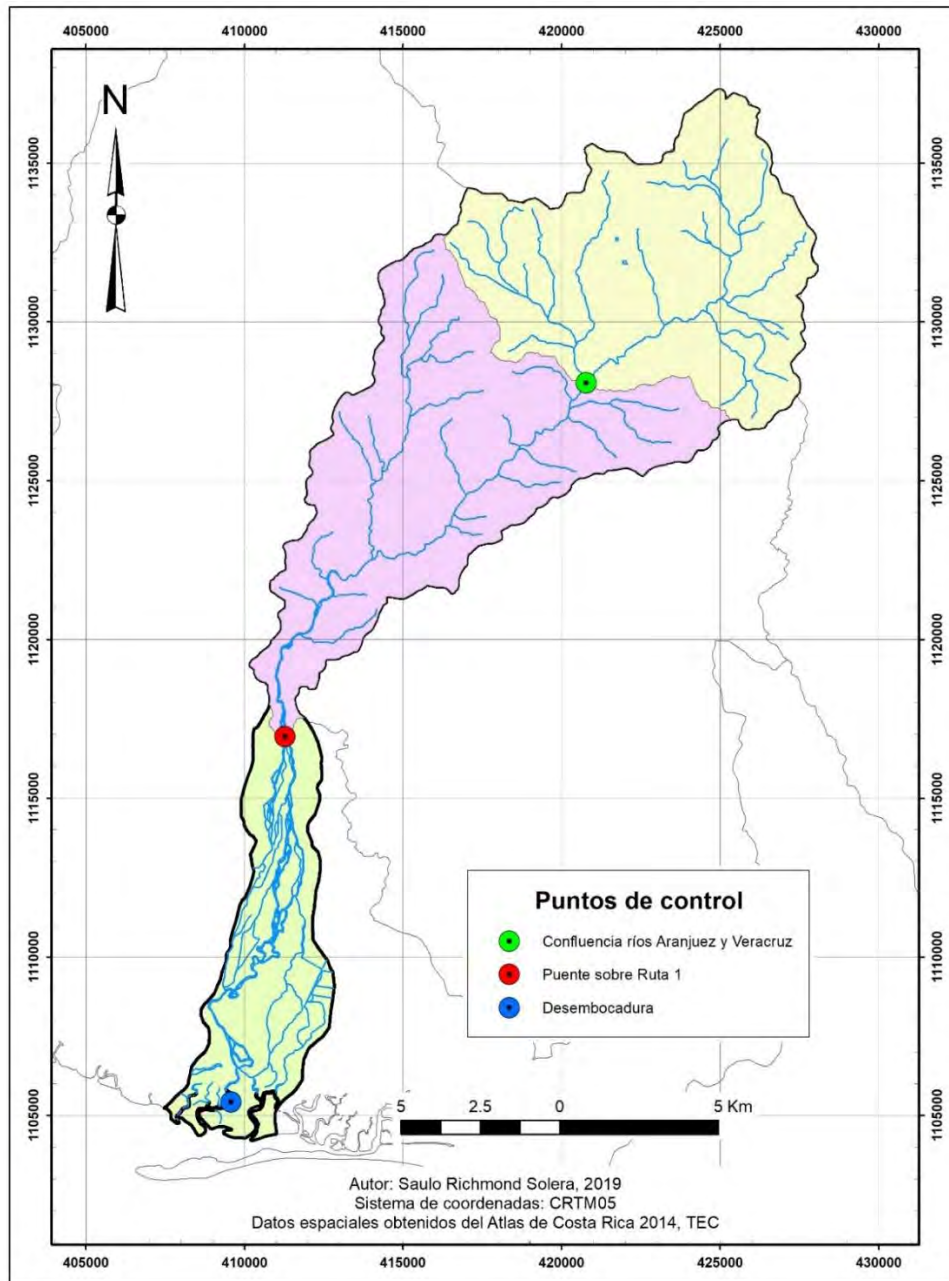


Figura 12. División político-administrativa en la cuenca hidrográfica del río Aranjuez

La distribución espacial de los principales poblados que se localizan dentro de la cuenca del río Aranjuez se presentan en el Anexo 1. De igual forma, los principales cuerpos de agua que drenan el área y los principales caminos que la atraviesan, se presentan en el Anexo 2.

La división de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez en sus secciones alta, media y baja, define tres puntos de control: un primer punto a la altura de la confluencia de los ríos Veracruz y Aranjuez, en el poblado de Bajo Caliente, con un área de influencia de aproximadamente 74,3 km² (parte alta de la cuenca); un segundo punto a la altura del puente sobre la Ruta Nacional 1, con un área de influencia de aproximadamente 156,5 km² (partes alta y media de la cuenca); y un tercer punto en la desembocadura al Océano Pacífico, en el Golfo de Nicoya, con un área de influencia de aproximadamente 192,0 km² (totalidad de la cuenca). La ubicación de estos puntos de control se muestra en el Mapa 1, donde también se establecen las áreas que definen las cuencas alta, media y baja.

Para el presente estudio, se consideró el punto de control de la parte media de la cuenca, con el fin de analizar las zonas inundables de la parte baja.



Mapa 1. Ubicación de los puntos de control en la cuenca del río Aranuez

3.2 Caracterización morfológica

La caracterización morfológica de una cuenca hidrográfica se compone de parámetros de forma o geométricos, parámetros de relieve u orográficos y parámetros de la red de drenaje. Estos parámetros fueron obtenidos con el software ArcGIS.

3.2.1 Parámetros de forma o geométricos

Los principales parámetros geométricos de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez se presentan en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Parámetros geométricos de la cuenca del río Aranjuez

Área (km²)	191,99
Perímetro (km)	115,19
Longitud del cauce principal (km)	43,97
Longitud del cauce principal hasta el centroide de la cuenca (km)	27,30

Con base en estos parámetros se obtuvieron el coeficiente de compacidad o índice de Gravelius, el factor de forma y el rectángulo equivalente.

El coeficiente de compacidad es 2,345, como resultado de la siguiente ecuación:

$$I_G = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$$
$$I_G = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot \frac{115,19}{\sqrt{191,99}} = 2,345$$

El factor de forma es 0,099 y se obtuvo de la siguiente manera:

$$K_f = \frac{B}{L_c} = \frac{A}{L_c^2}$$
$$K_f = \frac{191,99}{43,97^2} = 0,099$$

El rectángulo equivalente se define por su lado largo (L_{re}) y su lado corto (l_{re}), de la siguiente manera:

$$L_{re} = \frac{I_G \sqrt{A}}{1,12} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{I_G} \right)^2} \right]$$
$$L_{re} = \frac{2,34 \sqrt{191,99}}{1,12} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{2,34} \right)^2} \right] = 54,50 \text{ km}$$

$$l_{re} = \frac{I_G \sqrt{A}}{1,12} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{I_G} \right)^2} \right]$$

$$l_{re} = \frac{2,34 \sqrt{191,99}}{1,12} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{2,34} \right)^2} \right] = 3,52 \text{ km}$$

Un coeficiente de compacidad y un factor de forma que difieren de la unidad, así como la relación entre las dimensiones de los lados del rectángulo equivalente, comprueban la evidente forma alargada de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez. Esta característica se asocia con cuencas cuya respuesta ante eventos de precipitación es lenta.

Considerando ahora la cuenca hasta el punto de control en el puente sobre la Ruta Nacional 1, los principales parámetros geométricos se presentan en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Parámetros geométricos de la cuenca del río Aranjuez hasta su paso por el puente sobre la Ruta Nacional 1

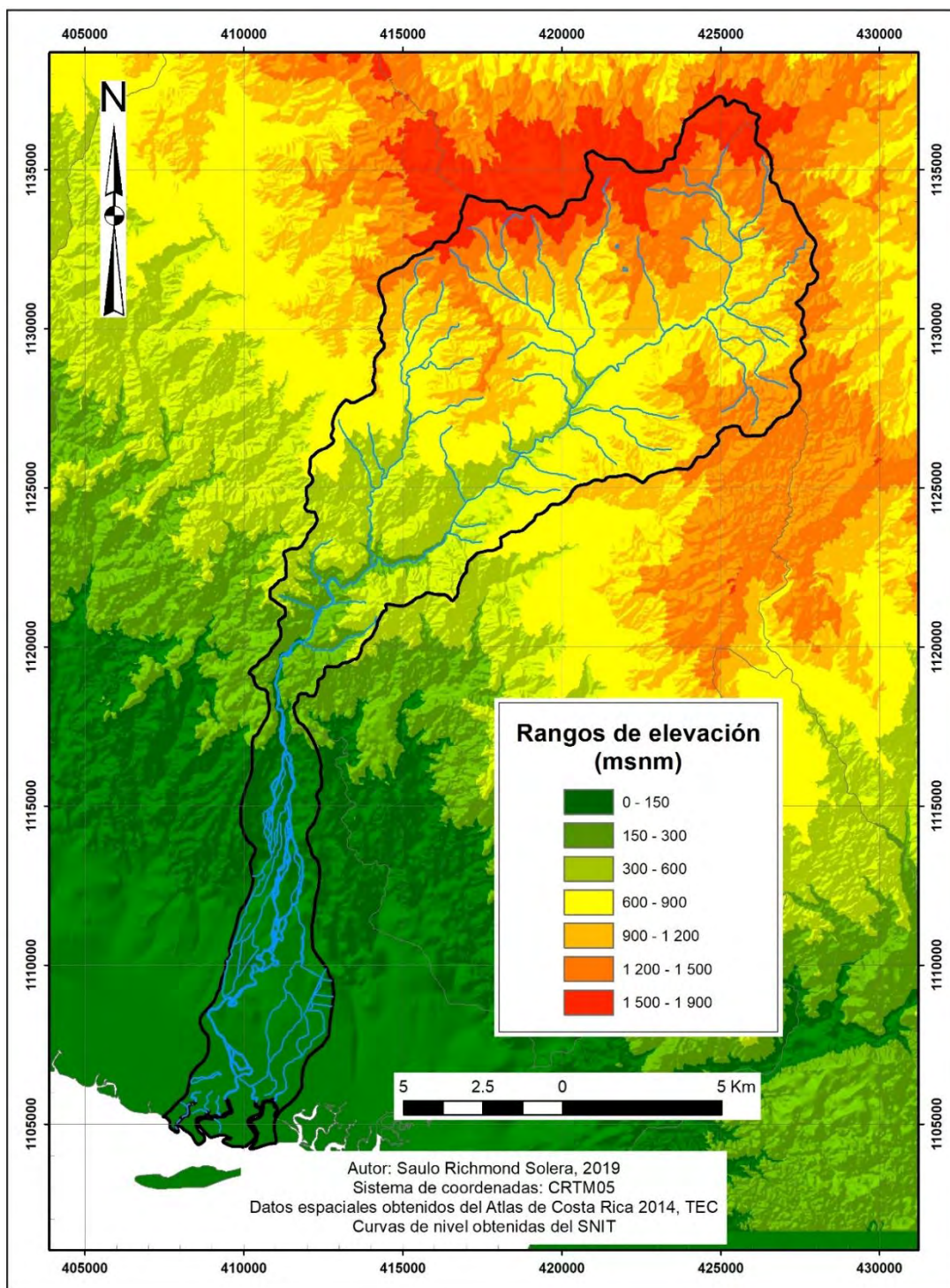
Área (km²)	156,49
Perímetro (km)	70,98
Longitud del cauce principal (km)	30,32
Longitud del cauce principal hasta el centroide de la cuenca (km)	17,75

En este caso, el coeficiente de compacidad es 1,601, el factor de forma es 0,170, y los lados del rectángulo equivalente miden 30,65 km y 5,11 km. Estos resultados confirman que la sección analizada también es alargada, aunque en menor medida que la cuenca completa, característica asociada a una respuesta lenta ante eventos de precipitación.

3.2.2 Parámetros de relieve u orográficos

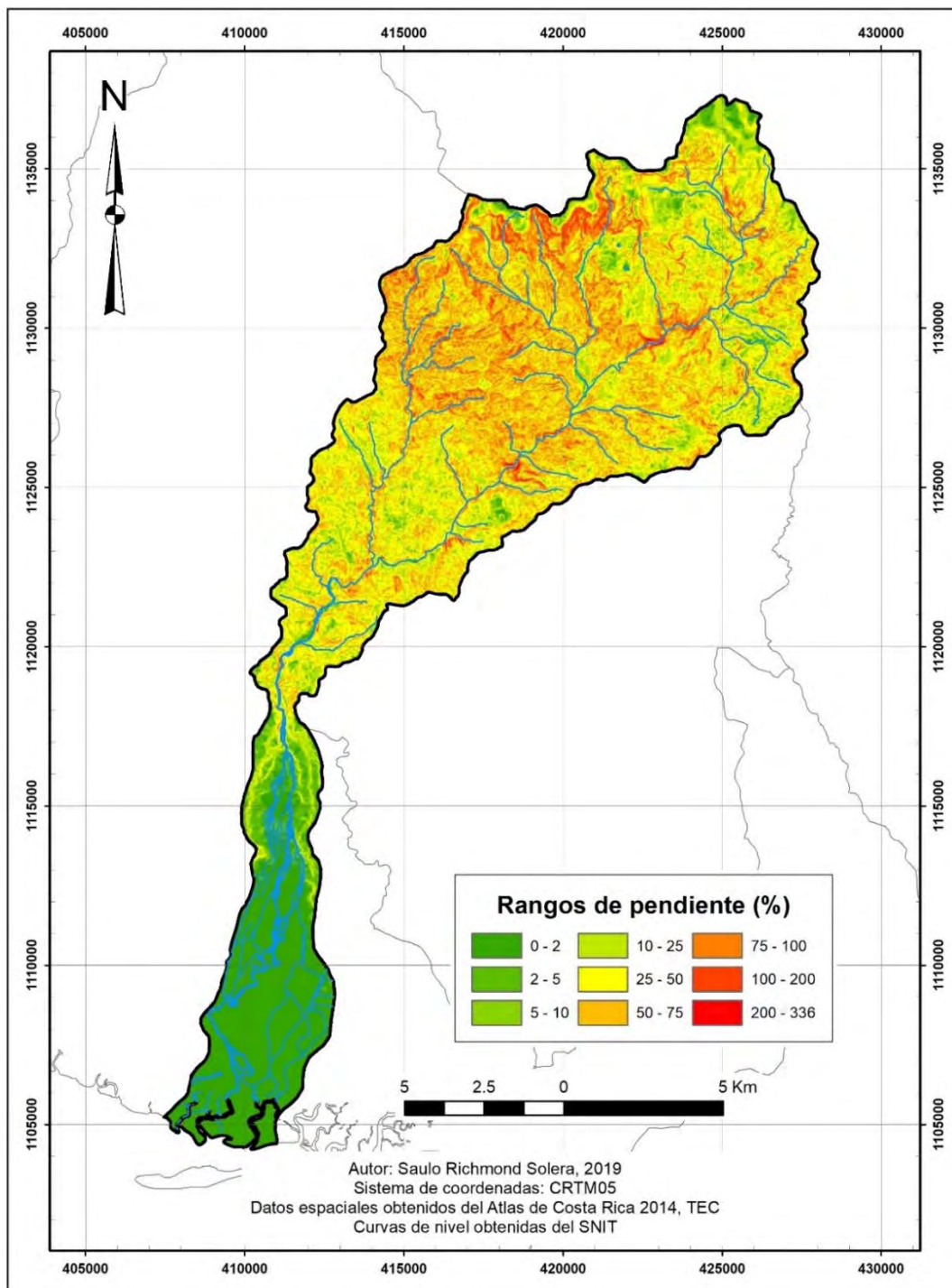
El análisis de los parámetros orográficos de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez requirió de la generación de un modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés), a partir de las curvas de nivel que representan la topografía de la zona. El DEM de la cuenca del río Aranjuez se muestra en el Mapa 2; fue generado a partir de las curvas de nivel de la

cartografía del IGN en escala 1:25000, con un intervalo entre curvas de 10 m, las cuales se encuentran disponibles mediante los servicios WFS del SNIT.



Mapa 2. Modelo digital de elevación de la cuenca del río Aranjuez

A partir del DEM, se generó el mapa de pendientes del terreno (Mapa 3), en donde se evidencia que la parte alta de la cuenca presenta fuertes pendientes, incluso superiores al 100%, mientras que la parte baja es extremadamente plana, con pendientes menores al 2% en una gran extensión de terreno.



Mapa 3. Pendientes en la cuenca del río Aranjuez

Estas condiciones topográficas se asocian con altas velocidades de escorrentía superficial en las laderas y de flujo en cauces, en las partes alta y media de la cuenca, mientras que en la parte baja de la cuenca las velocidades se reducen considerablemente, requiriendo de cauces más amplios. Lo anterior se evidencia en las siguientes figuras, que presentan el perfil longitudinal del cauce principal hasta su desembocadura (Figura 13) y hasta su paso por el puente sobre la Ruta Nacional 1 (Figura 14), junto con su pendiente media S_1 , pendiente media ponderada S_2 y pendiente media de Taylor y Schwarz S_3 .

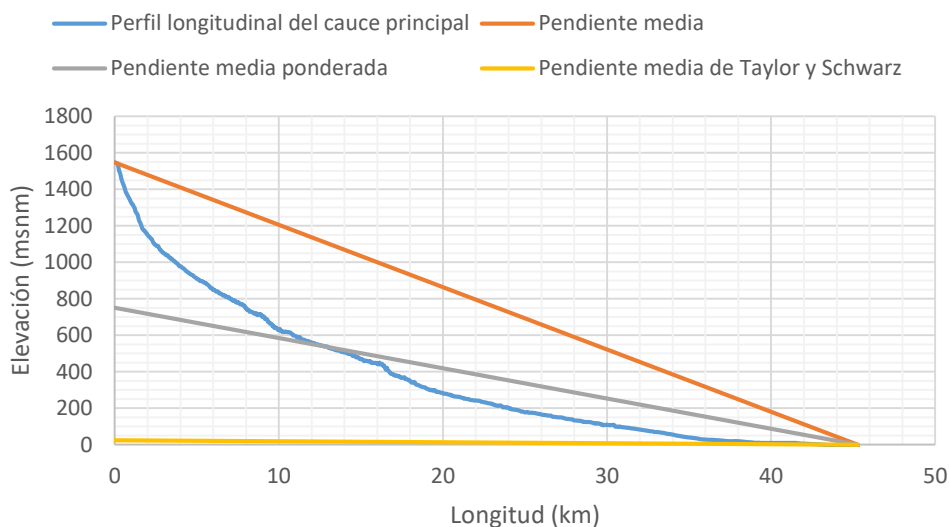


Figura 13. Perfil longitudinal del cauce principal hasta su desembocadura

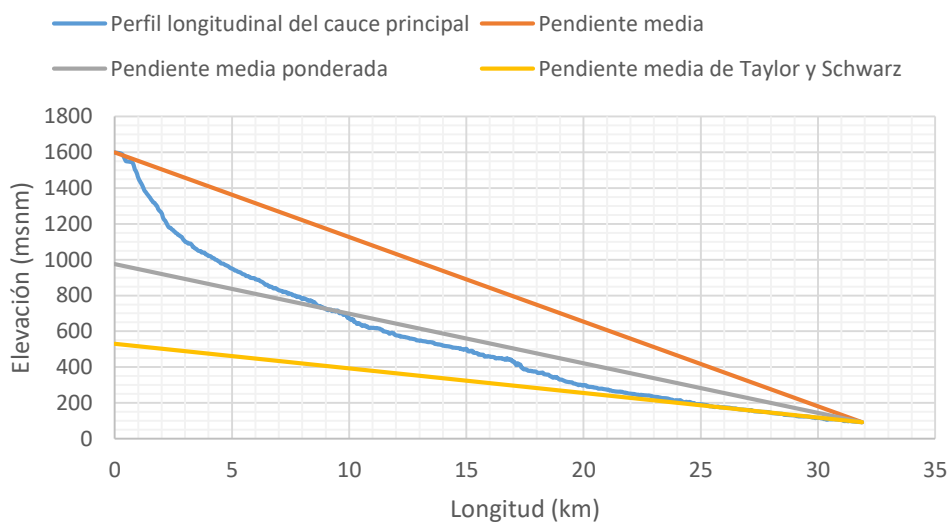


Figura 14. Perfil longitudinal del cauce principal hasta el puente sobre la Ruta Nacional 1

Los principales parámetros orográficos de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez se presentan en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Parámetros orográficos de la cuenca del río Aranjuez

Elevación máxima (msnm)	1804,74
Elevación mínima (msnm)	0,00
Elevación media (msnm)	813,96
Elevación promedio (msnm)	787,42
Pendiente promedio en las laderas (%)	38,51
Pendiente del cauce principal	
Pendiente media, S₁ (%)	3,42
Pendiente media ponderada, S₂ (%)	1,66
Pendiente media de Taylor y Schwarz, S₃ (%)	0,05

La pendiente promedio en las laderas fue obtenida mediante el software ArcGIS, pero el indicador empleado para representar dicha pendiente es el índice de pendiente, definido como la relación entre las pendientes en la cuenca y el recorrido del cauce principal.

$$I_p = \frac{\sum_{i=2}^n \sqrt{\beta_i \cdot (\alpha_i - \alpha_{i-1})}}{\sqrt{L_{re}}} = \frac{\sum_{i=2}^n \sqrt{\beta_i \cdot (\alpha_i - \alpha_{i-1})}}{\sqrt{54501}} = 0,17$$

La distribución porcentual del área de la cuenca en función de la elevación del terreno a la cual se encuentra, se representa mediante la curva hipsométrica (Figura 15). En el caso de la cuenca analizada, la curva hipsométrica es, en general, tipo B, correspondiente a cuencas de edad intermedia y un cauce maduro; con la particularidad de la amplia extensión de terreno que se ubica en elevaciones bajas, evidenciada en el extremo inferior derecho de la curva.

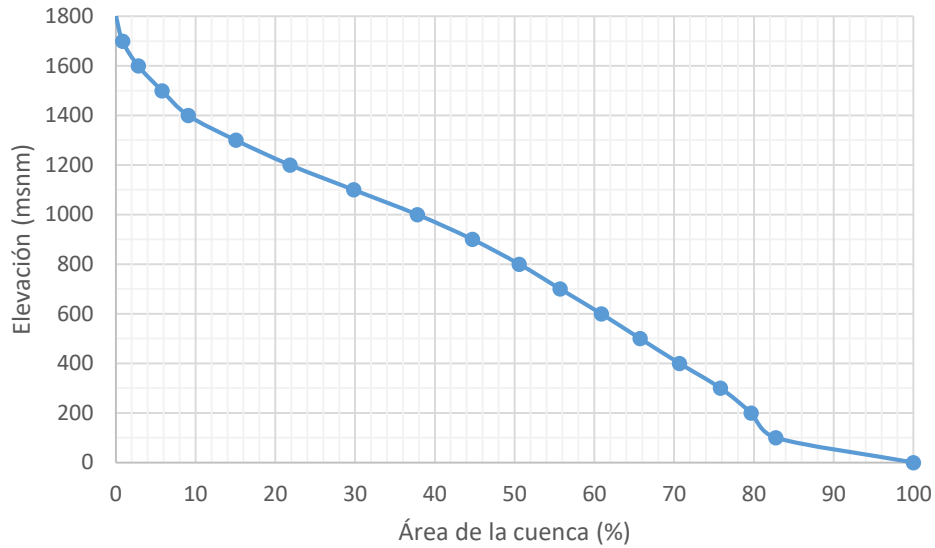


Figura 15. Curva hipsométrica de la cuenca del río Aranjuez

Esta última condición queda evidenciada en la Figura 16, donde se muestran las frecuencias con que se presentan las distintas elevaciones, destacándose el segmento de menor elevación como aquel de mayor frecuencia.

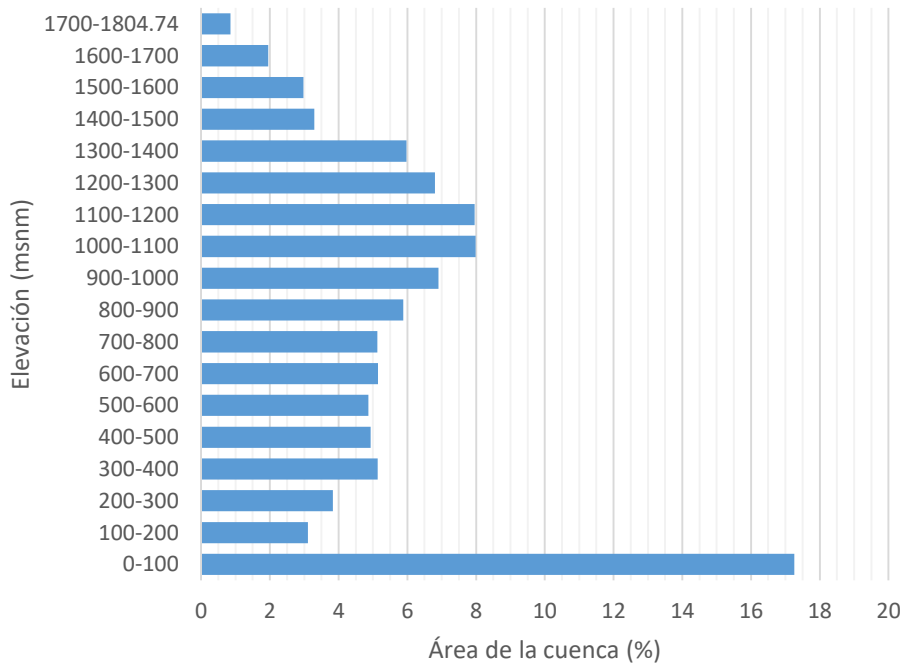


Figura 16. Frecuencia de elevaciones en la cuenca del río Aranjuez

Considerando ahora la cuenca hasta el punto de control en el puente sobre la Ruta Nacional 1, los principales parámetros orográficos se presentan en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Parámetros orográficos de la cuenca del río Aranjuez hasta su paso por el puente sobre la Ruta Nacional 1

Elevación máxima (msnm)	1804,74
Elevación mínima (msnm)	92,73
Elevación media (msnm)	981,46
Elevación promedio (msnm)	915,99
Pendiente promedio en las laderas (%)	46,67
Pendiente del cauce principal	
Pendiente media, S₁ (%)	4,72
Pendiente media ponderada, S₂ (%)	2,77
Pendiente media de Taylor y Schwarz, S₃ (%)	1,37

Haciendo la misma salvedad del caso anterior, se calculó el índice de pendiente para esta sección de la cuenca:

$$I_p = \frac{\sum_{i=2}^n \sqrt{\beta_i \cdot (\alpha_i - \alpha_{i-1})}}{\sqrt{L_{re}}} = \frac{\sum_{i=2}^n \sqrt{\beta_i \cdot (\alpha_i - \alpha_{i-1})}}{\sqrt{30648}} = 0,23$$

La curva hipsométrica de este sector en particular se presenta en la Figura 17, clasificada también como de tipo B (cuencas de edad intermedia y cauce maduro), pero con mayor balance de áreas en altas y bajas elevaciones. En la Figura 18 se muestran las frecuencias con que se presentan las distintas elevaciones, observándose una mayor frecuencia en el intervalo de elevaciones entre 975 y 1275 msnm.

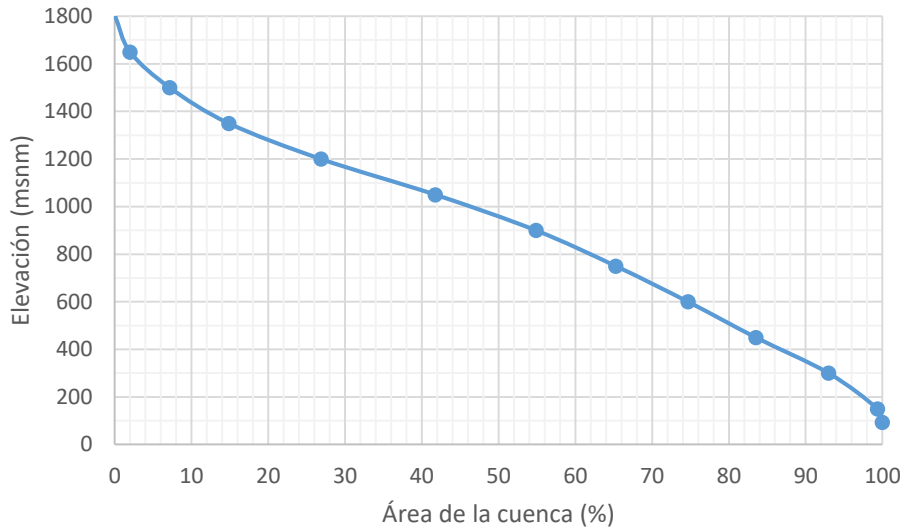


Figura 17. Curva hipsométrica de la cuenca del río Aranuez hasta su paso por el puente sobre la Ruta Nacional 1

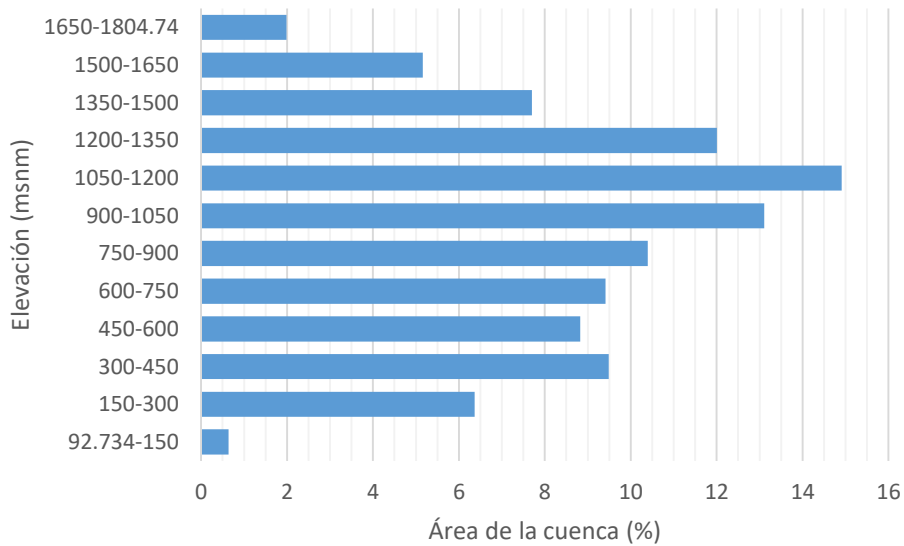


Figura 18. Frecuencia de elevaciones en la cuenca del río Aranuez hasta su paso por el puente sobre la Ruta Nacional 1

3.2.3 Parámetros de la red de drenaje

La cuenca hidrográfica del río Aranuez presenta dos patrones de drenaje claramente diferenciables: aguas arriba del punto de control establecido en el puente sobre la Ruta Nacional 1, se presenta un patrón de drenaje dendrítico, que usualmente caracteriza a cuencas compuestas por material geológico erosionable y suelos relativamente

impermeables, mientras que, aguas abajo de dicho punto, el patrón de drenaje es trezado (ver Mapa 1).

Si bien el software ArcGIS cuenta con herramientas de hidrología que permiten generar la red de drenaje completa de la cuenca en estudio y definir los parámetros que la caracterizan, esta red se basa en el modelo de elevación digital ya mostrado, situación que no refleja con fidelidad la red hídrica de la cuenca.

Por tanto, la parametrización de la red de drenaje se realizó con aquella que se encuentra oficializada y publicada así mediante el SNIT y el Atlas de Costa Rica 2014 (Mapa 1): se trata de una red de orden 4, con las siguientes longitudes para cada orden.

Cuadro 13. Longitud de la red de drenaje de la cuenca del río Aranjuez, según orden

Orden	Longitud (km)
1	94,77
2	16,07
3	28,39
4	21,70
Total	160,93

En consecuencia, la densidad de drenaje de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez se define de la siguiente manera:

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A}$$

$$D_d = \frac{160,93}{191,99} = 0,84 \text{ km/km}^2$$

Analizando ahora la red de drenaje hasta el punto de control en el puente sobre la Ruta Nacional 1, esta es también de orden 4 y únicamente varía la longitud para el orden máximo. En este caso, la densidad de drenaje es de 0,77 km/km².

Cuadro 14. Longitud de la red de drenaje de la cuenca del río Aranjuez hasta su paso por el puente sobre la Ruta Nacional 1, según orden

Orden	Longitud (km)
1	94,77
2	16,07
3	28,39
4	8,00
Total	147,22

Se trata de densidades de drenaje que se pueden clasificar como medias, al ubicarse en el rango de entre 0,5 y 3,5 km/km², e indican una respuesta moderada de la cuenca ante eventos de precipitación.

3.2.4 Resumen de parámetros morfológicos

Cuadro 15. Parámetros morfológicos de la cuenca del río Aranjuez

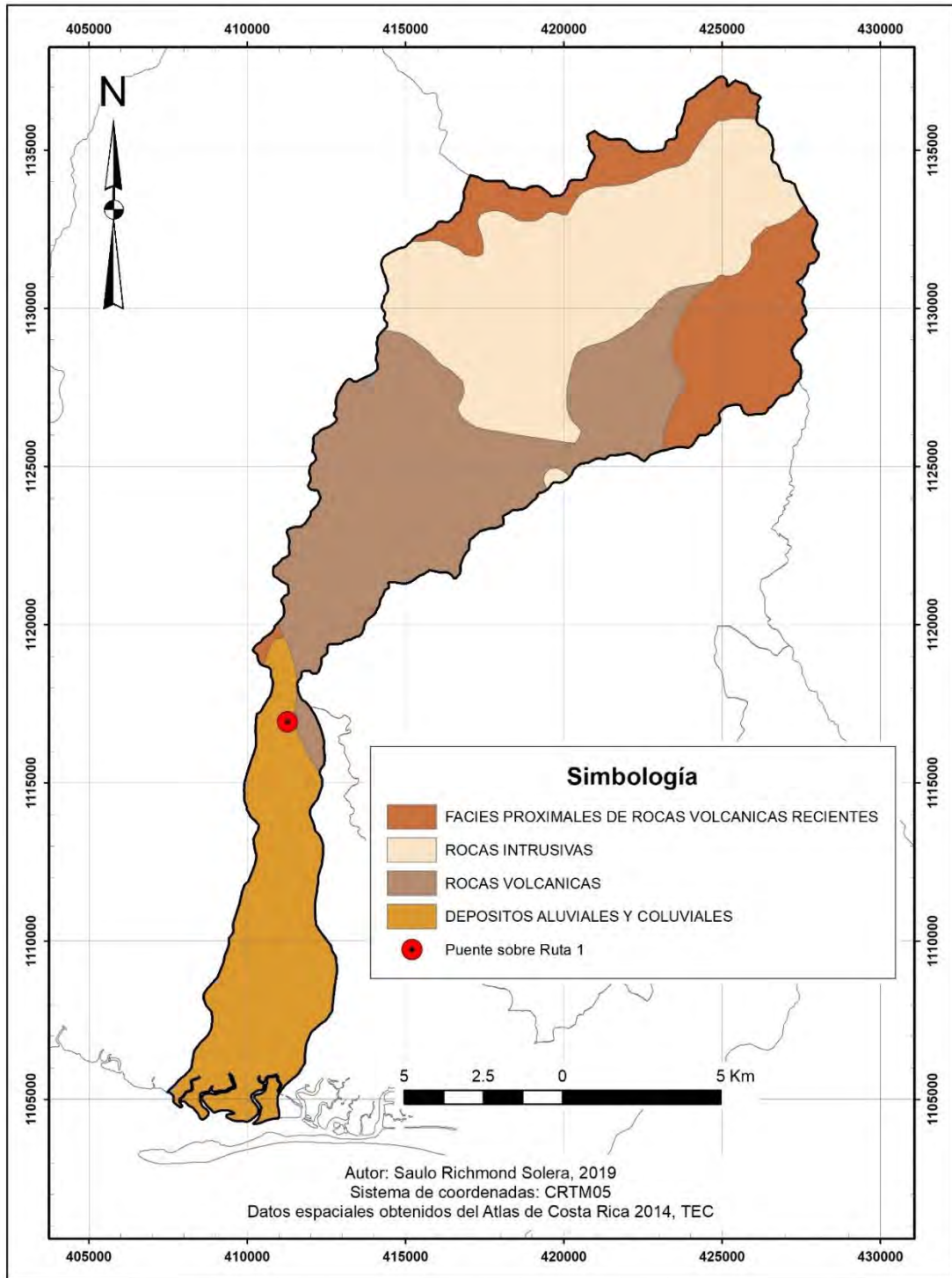
Parámetro	Cuenca completa	Cuenca media y alta
Dimensiones generales		
Área (km ²)	191,99	156,49
Perímetro (km)	115,19	70,98
Forma		
Coefficiente de compacidad	2,34	1,60
Factor de forma	0,099	0,170
Rectángulo equivalente		
Lado mayor (km)	54,50	30,65
Lado menor (km)	3,52	5,11
Elevaciones		
Elevación mínima (msnm)	0,00	92,73
Elevación máxima (msnm)	1804,74	1804,74
Elevación media (msnm)	813,96	981,46
Elevación promedio (msnm)	787,42	915,99

Cuadro 15. Parámetros morfológicos de la cuenca del río Aranjuez (cont.)

Parámetro	Cuenca completa	Cuenca media y alta
Sistema de drenaje		
Longitud total de los cauces (km)	160,93	147,22
Longitud del cauce principal (km)	43,97	30,32
Longitud del cauce principal hasta el centroide de la cuenca (km)	27,30	17,75
Número de orden	4	4
Densidad de drenaje (km/km ²)	0,84	0,77
Pendientes		
Pendiente promedio en las laderas (%)	38,51	46,67
Pendiente media del cauce principal S ₁ (%)	3,42	4,72
Pendiente media ponderada del cauce principal S ₂ (%)	1,66	2,77
Pendiente media de Taylor y Schwarz del cauce principal S ₃ (%)	0,05	1,37
Índice de pendiente	0,17	0,23

3.3 Caracterización geológica y geomorfológica

De acuerdo con los datos espaciales del Atlas de Costa Rica (TEC, 2014), la estratigrafía de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez se divide en: rocas volcánicas y rocas intrusivas del terciario y facies proximales de rocas volcánicas recientes del cuaternario, que abarcan casi la totalidad de las partes alta y media de la cuenca, así como depósitos superficiales de tipo aluvial y coluvial del cuaternario, abarcando casi la totalidad de la parte baja de la cuenca. Esta situación se muestra en el Mapa 4, donde el punto de control en el puente sobre la Ruta Nacional 1 identifica la división entre las partes media y baja de la cuenca.



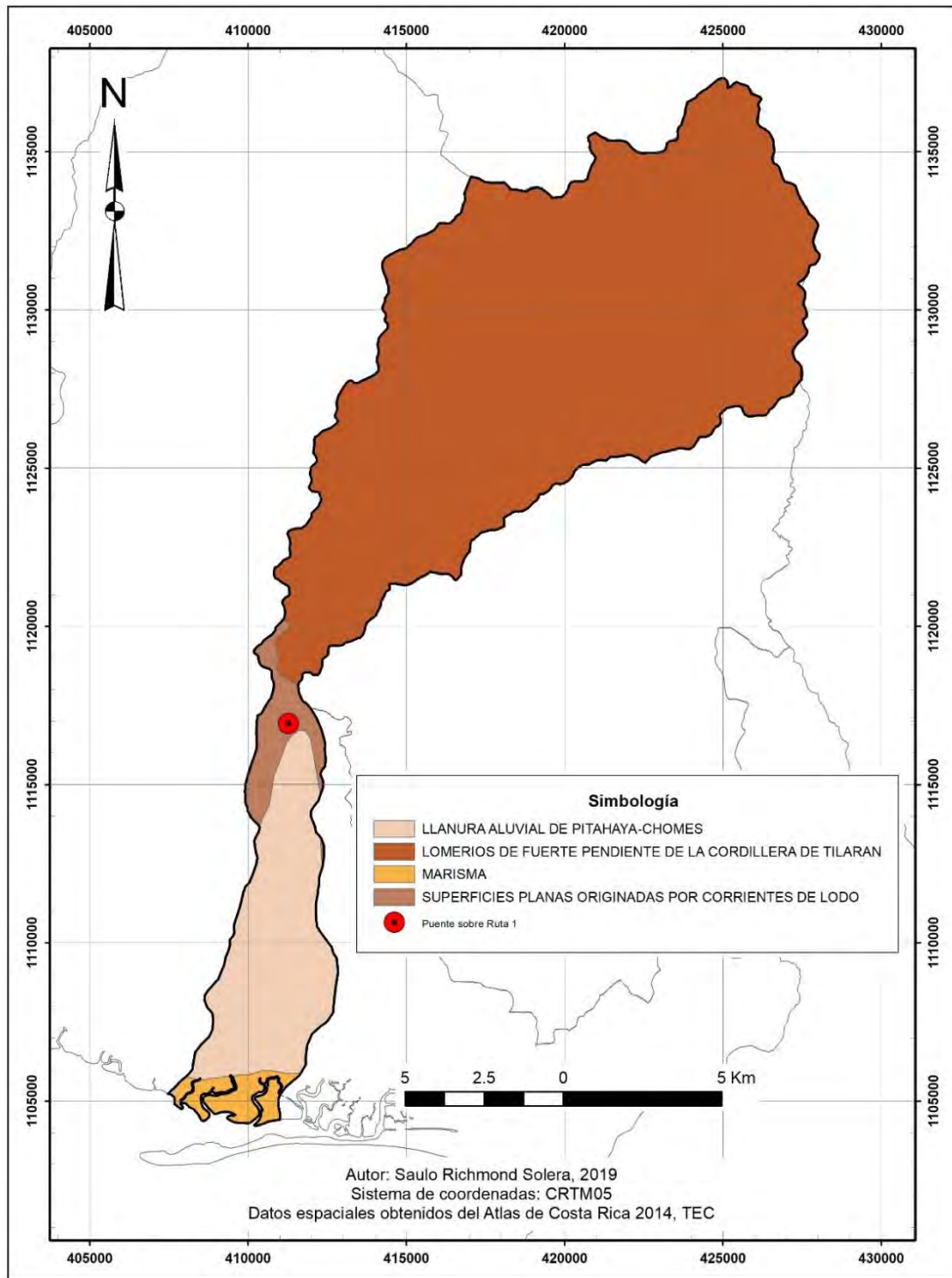
Mapa 4. Estratigrafía de la cuenca del río Aranuez

Las rocas volcánicas se componen de coladas, tobas y brechas tobáceas andesitas. Las rocas intrusivas tienen en su composición desde grava hasta granito y riolita subvolcánica. Las facies proximales de rocas volcánicas recientes incluyen coladas de lava, aglomerados, lahar y ceniza volcánica. Y los depósitos superficiales de tipo aluvial y coluvial incluyen depósitos de deslizamientos, conglomerados, pantanos y playa.

Geomorfológicamente, la parte alta y gran parte de la parte media de la cuenca se ubican en lomeríos de fuertes pendientes de la Cordillera de Tilarán, pasando luego por una pequeña área de superficies planas, originadas por corrientes de lodo y ubicadas en el entorno cercano al punto de control en el puente sobre la Ruta Nacional 1. Posteriormente, la parte baja de la cuenca se ubica, mayoritariamente, sobre la llanura aluvial Pitahaya-Chomes, anterior a la presencia de marismas en la desembocadura del río Aranjuez en el Golfo de Nicoya. La distribución de estos espacios en el territorio de la cuenca se muestran en el Mapa 5.

Según Solano y Salas (2011, p. 8), la parte alta de la cuenca presenta procesos erosivos importantes, con deslizamientos de tipo de bloques rodados, ocasionados por la infiltración de las aguas superficiales, las altas pendientes, la gravedad, el sobrepeso de los árboles y los escasos espesores de los suelos. Si bien los cerros están constituidos por materiales de origen volcánico sumamente duros, se encuentran diaclasados y muy susceptibles a desarrollar derrumbes y desprendimientos de material en cortes casi verticales.

Además, estos terrenos presentan, en general, una capa somera de limos poco plásticos, con bloques, sobre materiales rocosos de origen volcánico. Los materiales rocosos pueden clasificarse en una zona de bloques embebidos en una matriz limo-arenosa y una zona de rocas lávicas muy fracturadas, con discontinuidades distribuidas en forma subhorizontal y subvertical, en términos muy generales. Estos sistemas de fracturas producen bloques columnares y en forma de lajas, que pueden ser muy desfavorables para la estabilidad de los taludes. (Ídem, p. 9).



Mapa 5. Geomorfología de la cuenca del río Aranuez

3.4 Caracterización de los suelos

Según el Manual descriptivo de la leyenda del Mapa de Capacidad de Uso de la Tierra de Costa Rica Escala 1:200.000 (MAG, 1991, p. 57), los suelos de la unidad cartográfica Aranjuez se caracterizan principalmente por ser planos, de profundos a muy profundos, con texturas medias a moderadamente gruesas, de color negro a pardo amarillento oscuro, bien drenados y permeables, además de muy fértiles. Este mismo documento indica que la capacidad de uso de estos suelos es clase II, subclases s2 y c3.

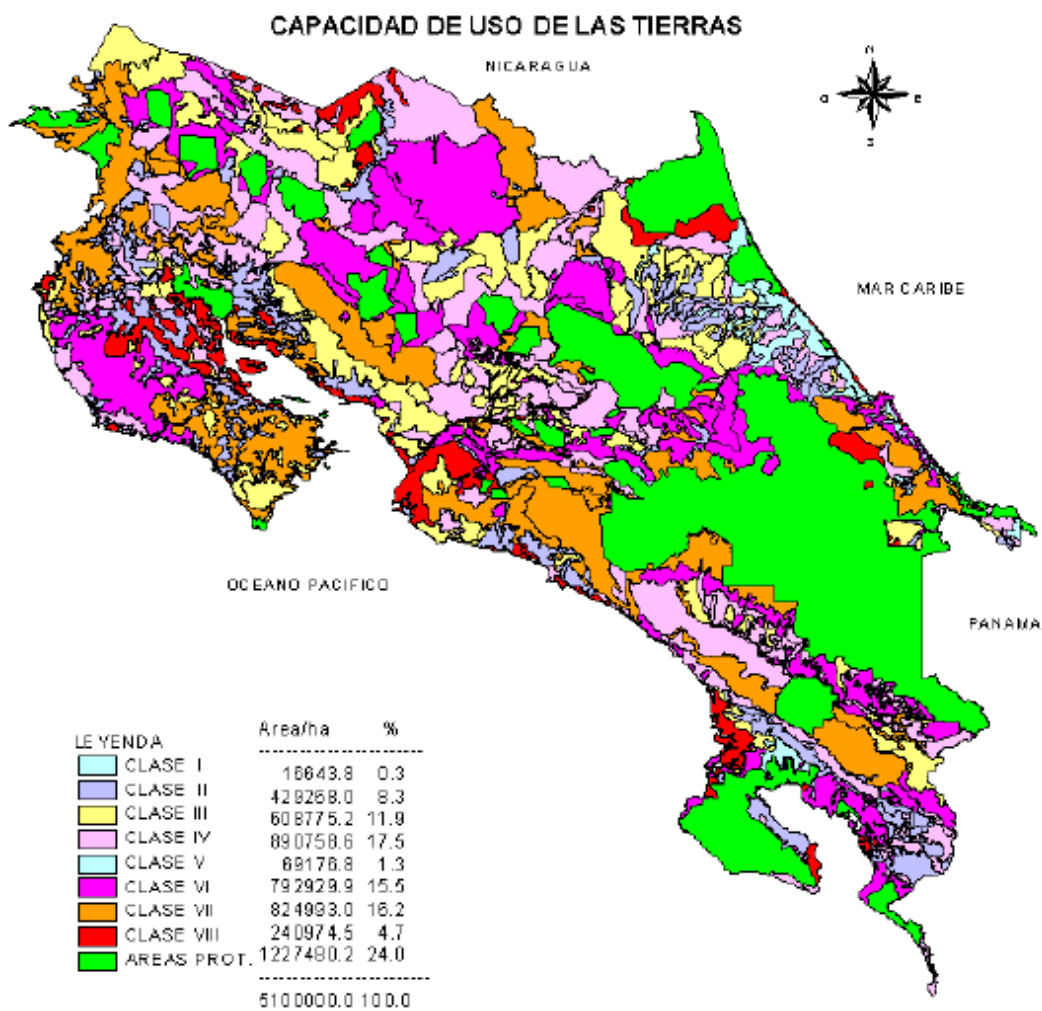
Los suelos clase II son buenos para cultivos, pero con algunas limitaciones que reducen la elección de plantas y/o requieren moderadas prácticas de conservación y manejo para mejorar las relaciones suelo-agua-planta. Las limitaciones más usuales de esta clase incluyen, sea en forma aislada o combinada, los siguientes factores: pendientes suaves, moderada susceptibilidad a la erosión o efectos ligeramente adversos por erosión pasada, profundidad inferior a la ideal, estructura y laborabilidad desfavorable, contenido de sales o sodio que afecta ligeramente los cultivos comunes (fácil de corregir pero con posibilidad de aparecer de nuevo), daños ocasionados por inundaciones y excesos de humedad (corregibles por drenaje, aunque con moderadas limitaciones permanentes), y ligeras limitaciones climáticas en el uso y manejo del suelo. (MAG, 1991, pp. 7-8).

Las subclases específicas s2 y c3 se refieren a limitaciones por la textura del suelo: con condiciones de moderadamente livianas a moderadamente pesadas, y limitaciones por el número de meses secos al año: de 2 a 5 meses; según la información del

Cuadro 3 y el

Cuadro 4.

La unidad cartográfica Aranjuez, con los suelos antes descritos, se ubica aproximadamente en la mitad inferior de la parte baja de la cuenca, exceptuando la zona de manglar, como se observa en el Mapa 6. Esta última zona contiene suelos clase VIII: suelos con tantas limitaciones que solo se recomienda su uso para vida silvestre, reservación de cuencas y esparcimiento, aunque pueden justificarse ciertas prácticas de manejo con el fin de conservación de cuencas y protección de terrenos más valiosos. (MAG, 1991, p. 10).



Mapa 6. Capacidad de uso de las tierras en Costa Rica
Fuente: MAG, 1997

En la mitad superior de la parte baja de la cuenca, los suelos son clase III: suelos moderadamente buenos para cultivos, pero con limitaciones que reducen la elección de plantas y/o requieren prácticas especiales de manejo y conservación. Las limitaciones

incluyen uno o más de los siguientes factores: pendientes moderadamente fuertes, alta susceptibilidad a la erosión o efectos de la ya ocurrida, poca profundidad efectiva, muy baja fertilidad del subsuelo o fertilidad de difícil corrección, baja capacidad de retención de humedad, moderada cantidad de sales y/o sodio que afecta a los cultivos, frecuentes inundaciones o sobresaturación que permanece aún luego del drenaje, condiciones climáticas moderadamente limitantes en la selección de cultivos por épocas de siembra y cosecha, entre otros. (MAG, 1991, p. 8).

Las partes media y alta de la cuenca cuentan con suelos de clase VII: suelos con muy severas limitaciones para cultivos agronómicos, por lo que su uso está restringido a pastos y bosques, con cuidados extremos para evitar la erosión. Ningún cultivo agronómico puede ser utilizado, salvo cultivos muy especiales y prácticas nada comunes. (MAG, 1991, p. 10).

Los suelos en la cuenca hidrográfica del río Aranjuez se dividen, según su orden, en alfisoles, entisoles, inceptisoles y ultisoles, distribuidos en el territorio según se muestra en el Mapa 7.

Los alfisoles son suelos con horizonte argílico y con más de 35% de saturación de bases. Son suelos productivos de alta fertilidad y generalmente cuentan con un buen drenaje, aunque se encuentren húmedos la mayor parte del año (INTA, 2015). Según el Atlas de Costa Rica (TEC, 2014), los suelos de este tipo ubicados en la parte media de la cuenca, se caracterizan en superficie por un terreno fuertemente ondulado, con pendientes de entre 30% y 60%, mientras que, aquellos ubicados en la parte baja de la cuenca, se caracterizan en superficie por un terreno plano, con pendientes de entre 0% y 2%.

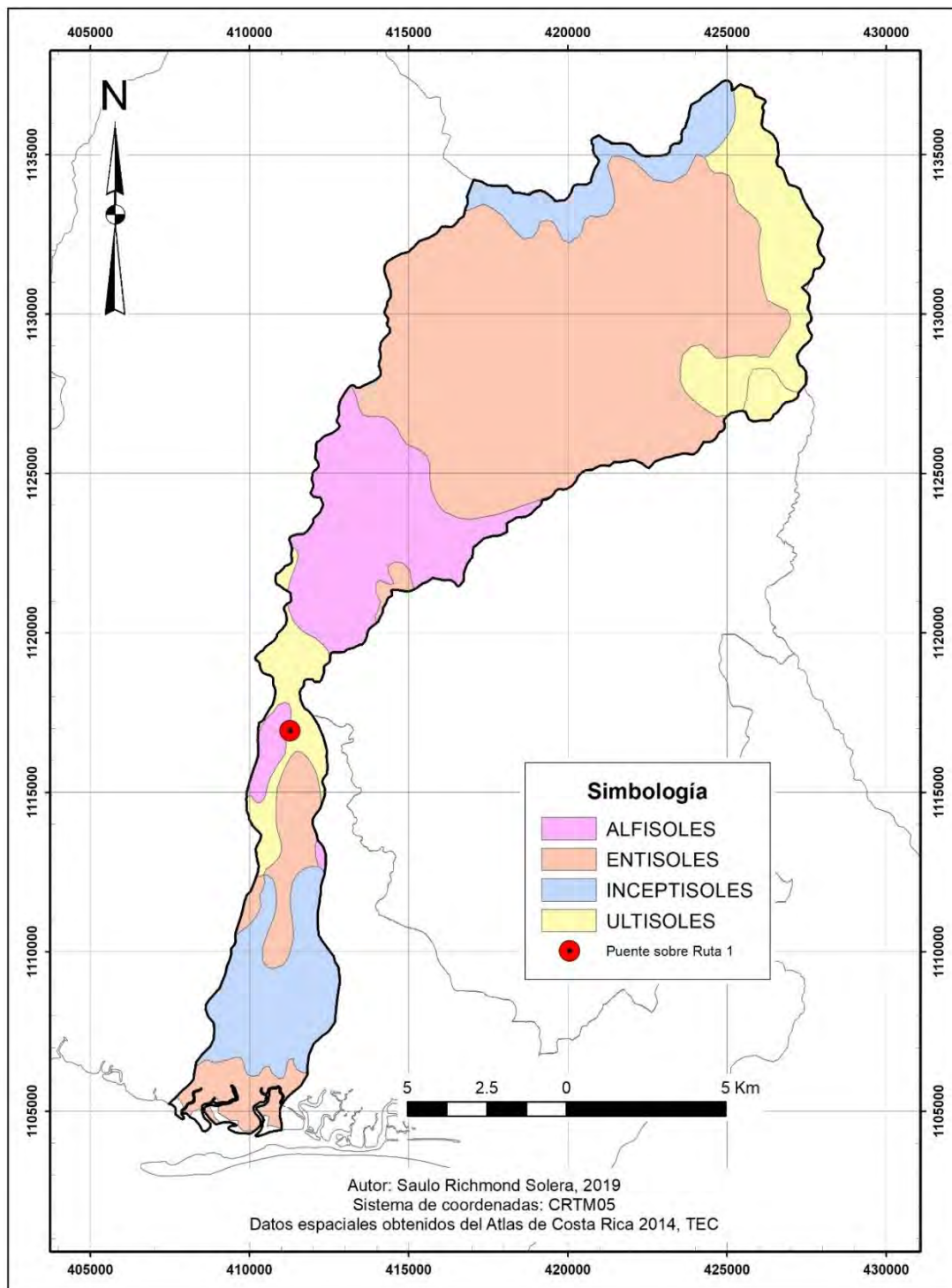
Los entisoles son suelos minerales de origen muy reciente, con poco desarrollo de horizontes y baja fertilidad, que pueden presentar problemas de hidromorfismo o descomposición bajo condiciones de saturación. Son suelos derivados de fragmentos de roca suelta, formados sobre abanicos aluviales, llanuras de inundación o en las montañas en áreas cuya erosión geológica está en equilibrio con el desarrollo de suelos. Pueden hallarse en tierras erosionadas, semiáridas, o en llanuras costeras de inundación con problemas graves de drenaje (INTA, 2015). Según el Atlas de Costa Rica (TEC, 2014), los suelos de este tipo ubicados en las partes media y alta de la cuenca, se caracterizan en superficie por un terreno escarpado, con pendientes mayores al 60%, mientras que, aquellos ubicados en la parte

baja de la cuenca, se caracterizan en superficie por un terreno plano, con pendientes de entre 0% y 2%.

Los inceptisoles son suelos recientes, originados por la meteorización de sedimentos aluviales y coluviales que se depositan cuando permanecen un cierto periodo sin recibir nuevos aportes de sedimentos. La mayoría de estos suelos se ubican en terrenos planos y ligeramente ondulados, y presentan un alto contenido de materia orgánica (INTA, 2015). Según el Atlas de Costa Rica (TEC, 2014), se clasifican en los subórdenes andept (inceptisoles derivados de materiales volcánicos, ubicados en las partes más altas de la cuenca y se caracterizan en superficie por un terreno escarpado, con pendientes mayores al 60%) y tropept (otros inceptisoles tropicales, ubicados en la parte baja de la cuenca y se caracterizan en superficie por un terreno plano, con pendientes de entre 0% y 2%).

Los ultisoles son de los suelos más viejos del país y se encuentran generalmente en lugares muy húmedos y con mucha precipitación. Presentan un horizonte argílico (un horizonte superficial con aumento en el contenido de arcillas) y con menos de 35% de saturación de bases. Se desarrollan en relieves que van desde ligeramente ondulados hasta fuertemente ondulados, son generalmente profundos, bien drenados y de relativa baja fertilidad (INTA, 2015). Según el Atlas de Costa Rica (TEC, 2014), los ultisoles ubicados en las partes más altas de la cuenca cuentan con altos contenidos de materia orgánica y se caracterizan en superficie por un terreno escarpado, con pendientes mayores al 60%, y los restantes se caracterizan en superficie por un terreno moderadamente ondulado, con pendientes de 15% y 30%.

En total, los alfisoles se encuentran en el 15,46% del territorio de la cuenca del río Aranjuez (29,68 km²), los entisoles en el 56,25% (108,00 km²), los inceptisoles en el 13,74% (26,38 km²) y los ultisoles en el 14,10% (27,06 km²). La distribución de estas áreas, según suborden, características del terreno y pendientes, se presenta en el Cuadro 16. Otros tipos de suelos, no identificados, se encuentran en el restante 0,45% del territorio (0,87 km²).



Mapa 7. Suelos en la cuenca del río Aranjuez

Cuadro 16. Distribución del área de la cuenca del río Aranjuez, según tipo de suelo

Nombre	Orden	Suborden	Terreno	Pendiente	Área (km²)
Ah-fo	Alfisoles	Ustalf	Fuertemente ondulado	Entre 30% y 60%	27,332
Ah-p	Alfisoles	Ustalf	Plano	Entre 0% y 2%	2,346
Eo-e	Entisoles	Orthent	Escarpado	Mayor a 60%	94,820
Eu-e	Entisoles	Orthent	Escarpado	Mayor a 60%	0,907
Eu-p	Entisoles	Orthent	Plano	Entre 0% y 2%	6,976
Et-p	Entisoles	Aquent	Plano	Entre 0% y 2%	5,299
Ih-e	Inceptisoles	Andept	Escarpado	Mayor a 60%	9,894
Iw-p	Inceptisoles	Tropept	Plano	Entre 0% y 2%	16,488
Ut-e	Ultisoles	Humult	Escarpado	Mayor a 60%	17,157
Ut-mo	Ultisoles	Humult	Moderadamente ondulado	Entre 15% y 30%	9,904

Fuente: TEC, 2014

Considerando únicamente las partes media y alta de la cuenca del río Aranjuez, los alfisoles se encuentran en el 17,47% del territorio (27,33 km²), los entisoles en el 61,17% (95,73 km²), los inceptisoles en el 6,32% (9,89 km²) y los ultisoles en el 15,02% (23,50 km²).

Finalmente, según la base de datos de perfiles de suelos de Costa Rica (Sandoval y Mata, 2014), los ultisoles presentes en los cantones de Puntarenas y Montes de Oro presentan textura arcillosa y erosión moderada. En la parte baja de la cuenca, específicamente en el poblado de Aranjuez, se identifican suelos con textura franca en superficie, pasando a textura franco limosa y finalmente arenosa en profundidad, con erosión leve.

3.5 Uso del suelo

El uso del suelo en la cuenca hidrográfica del río Aranjuez en el año 2020 se estimó a partir de imágenes satelitales, mediante el complemento de clasificación semiautomática (SCP, por sus siglas en inglés), del software QGIS, y la posterior edición manual de los resultados. Las imágenes fueron capturadas el 30 de marzo de 2020, por el satélite Landsat 8, de la NASA y el USGS.

Para esto, se definieron al SCP los siguientes usos del suelo como posibles: bosque, pastos con árboles dispersos, pastos, cultivos, suelo desnudo, residencial, agua y manglar. Estos usos del suelo se presentan en el Mapa 8 y se resumen en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Uso del suelo en la cuenca del río Aranjuez en el año 2020

Uso	Área (km²)	Área (%)
Bosque	116,07	60,45
Pastos con árboles dispersos	30,87	16,08
Pastos	22,95	11,95
Cultivos	15,17	7,90
Manglar	4,97	2,59
Suelo desnudo	1,69	0,88
Residencial	0,24	0,13
Agua	0,05	0,03

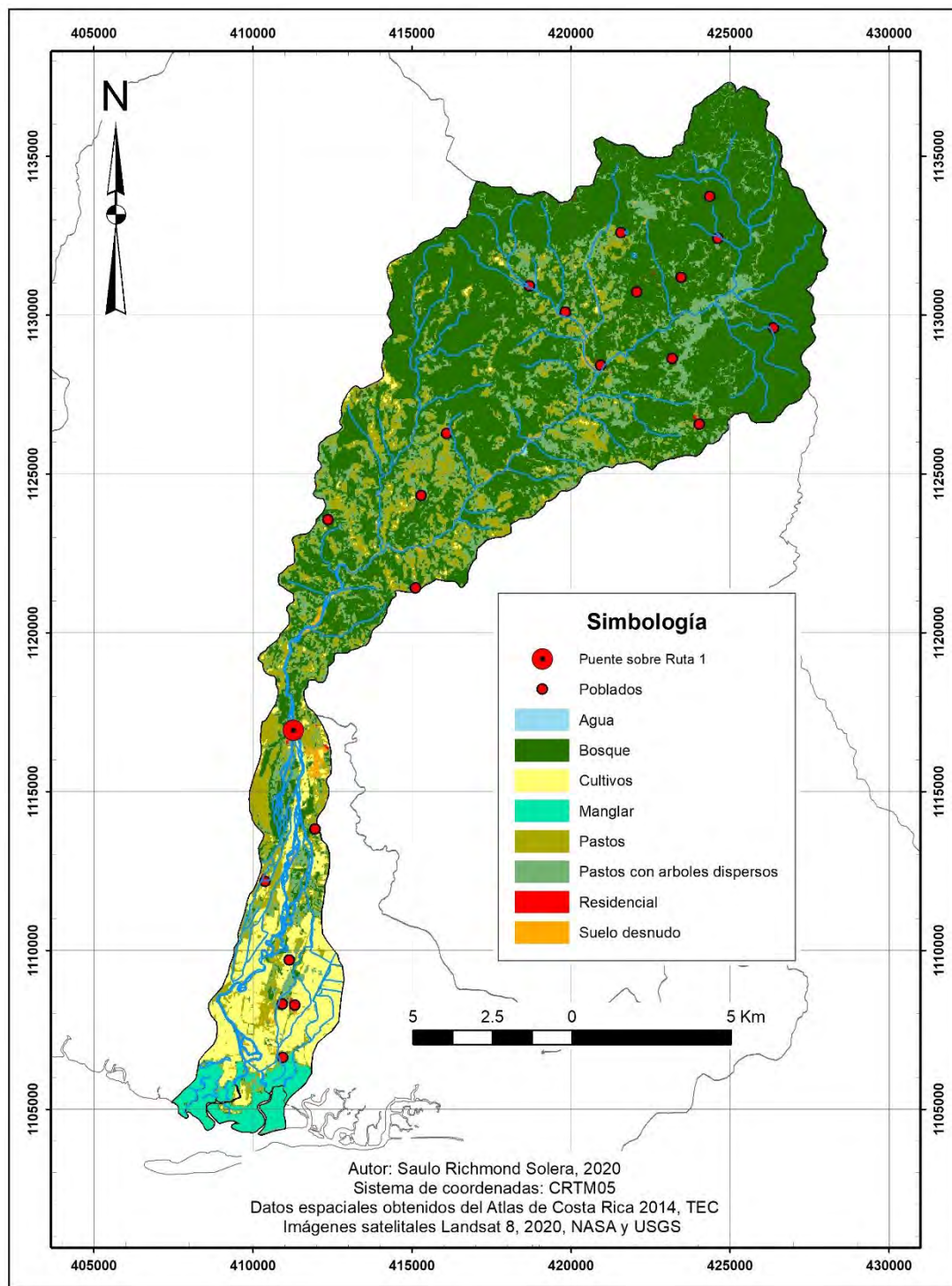
Considerando únicamente las partes media y alta de la cuenca del río Aranjuez, la distribución del territorio según el uso del suelo se presenta en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Uso del suelo en las partes media y alta de la cuenca del río Aranjuez en el año 2020

Uso	Área (km²)	Área (%)
Bosque	108,72	69,47
Pastos con árboles dispersos	27,27	17,42
Pastos	18,80	12,01
Cultivos	0,85	0,54
Suelo desnudo	0,75	0,48
Residencial	0,09	0,06
Agua	0,02	0,01

Se evidencia de esta manera una gran extensión de cobertura forestal, ubicada mayoritariamente en las partes media y alta de la cuenca, mientras que en la parte baja de la cuenca predominan los pastos y cultivos, con presencia de manglar hacia la desembocadura. El uso residencial en la cuenca del río Aranjuez es muy bajo, representando apenas el 0,13% del área total de la cuenca, y su ubicación es dispersa.

Estas condiciones favorecerían una respuesta lenta de la cuenca ante eventos de precipitación importantes, debido a la interceptación del agua de lluvia por parte de la vegetación.



Mapa 8. Uso del suelo en la cuenca del río Aranjuez en el año 2020

3.6 Caracterización climatológica

3.6.1 Parámetros climatológicos medios

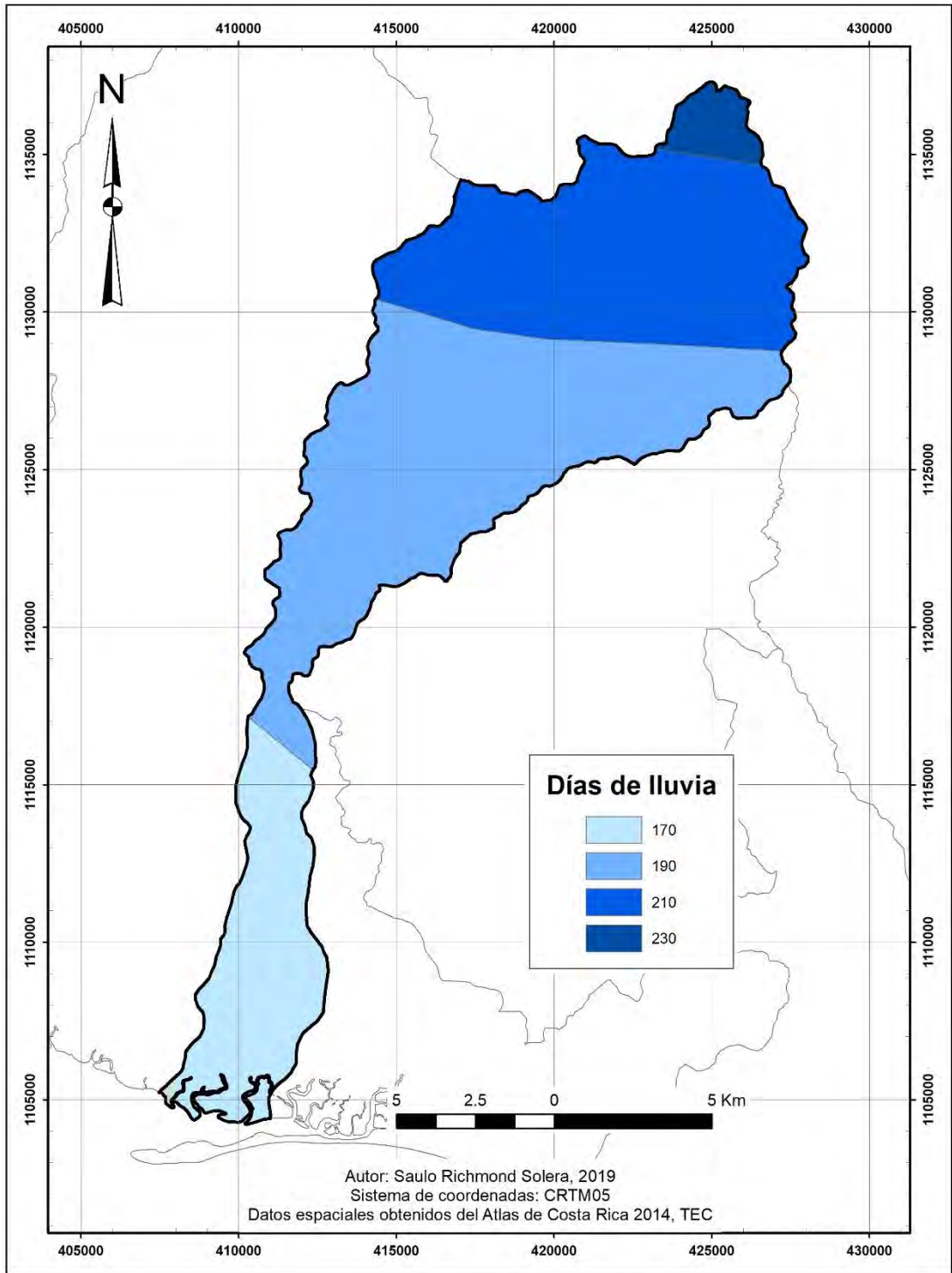
De acuerdo con Solano y Salas (2011, p. 9), las partes media y baja de la cuenca están influenciadas por el clima de la Vertiente del Pacífico Norte de Costa Rica, mientras que la parte alta está influenciada por el régimen lluvioso de la Vertiente del Caribe, durante los meses de diciembre a marzo.

De manera general, se identifican relaciones entre la temperatura media anual, la cantidad de meses secos, la cantidad promedio de días de lluvia al año y la precipitación media anual, en las diferentes secciones de la cuenca del río Aranjuez y sus distintos pisos altitudinales.

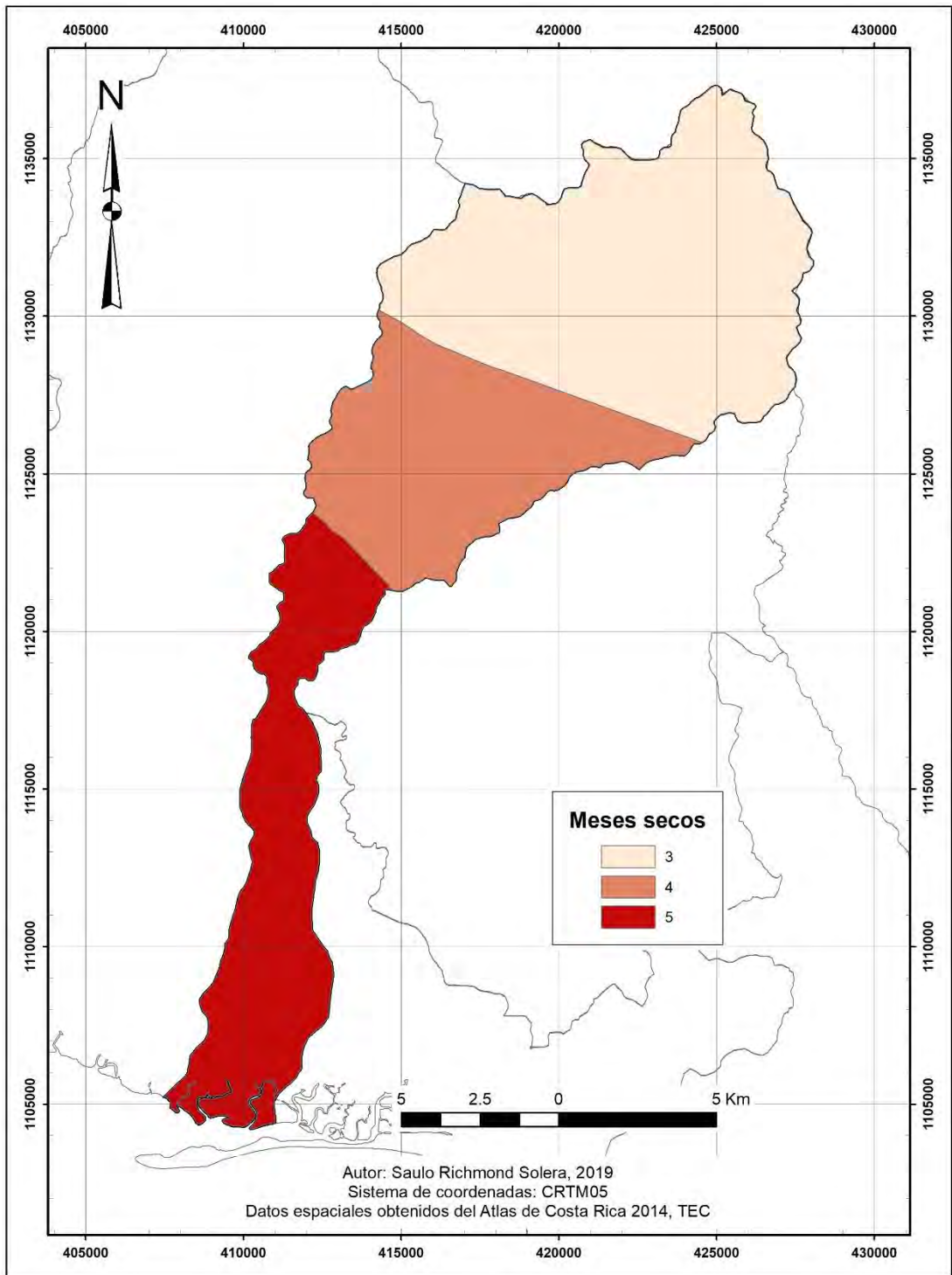
En la parte alta de cuenca, la temperatura media anual es de entre 16 °C y 24 °C, con tres meses secos y más de 190 días de lluvia al año, incluso más de 210 días de lluvia al año en las partes más altas. En la parte media de la cuenca, la temperatura media anual es de entre 20 °C y 26 °C, con cuatro meses secos y entre 190 y 210 días de lluvia al año. En la parte baja de la cuenca, la temperatura media anual es de entre 26 °C y 28 °C, con cinco meses secos y entre 170 y 190 días de lluvia al año. Estos datos se ilustran en el Mapa 9, Mapa 10 y Mapa 11.

En cuanto a la precipitación media anual, esta fue obtenida de registros reales de precipitación de distintas estaciones meteorológicas ubicadas alrededor de la cuenca del río Aranjuez, propiedad del IMN y del ICE. Los detalles al respecto se presentan más adelante, en la sección 4.1.

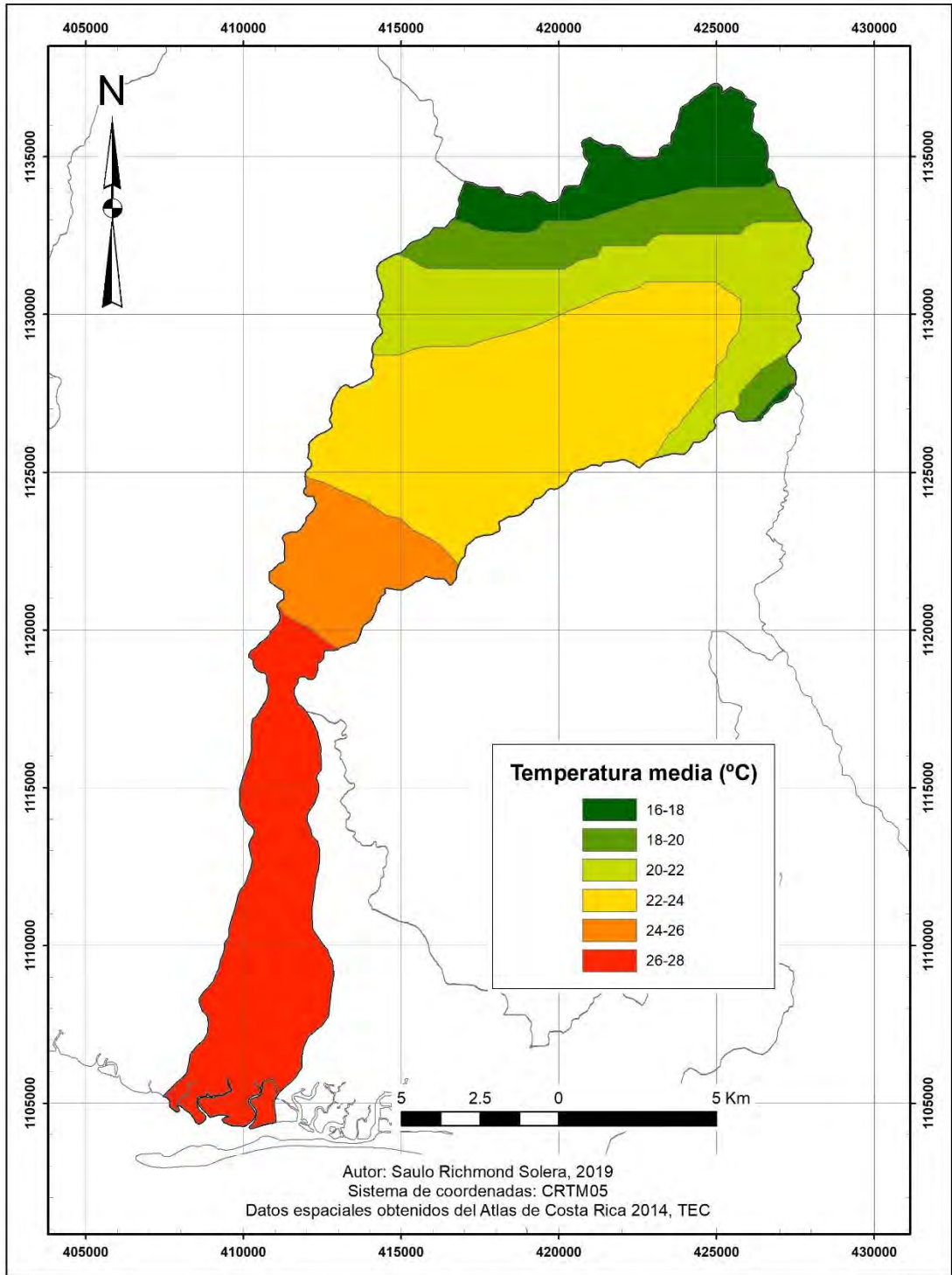
En la parte alta de la cuenca, la precipitación media anual es de entre 2250 mm y 2750 mm, mientras que en la parte media de la cuenca es de entre 1750 mm y 2250 mm y en la parte baja de la cuenca es de entre 1250 mm y 1750 mm. Este comportamiento se muestra en el Mapa 12.



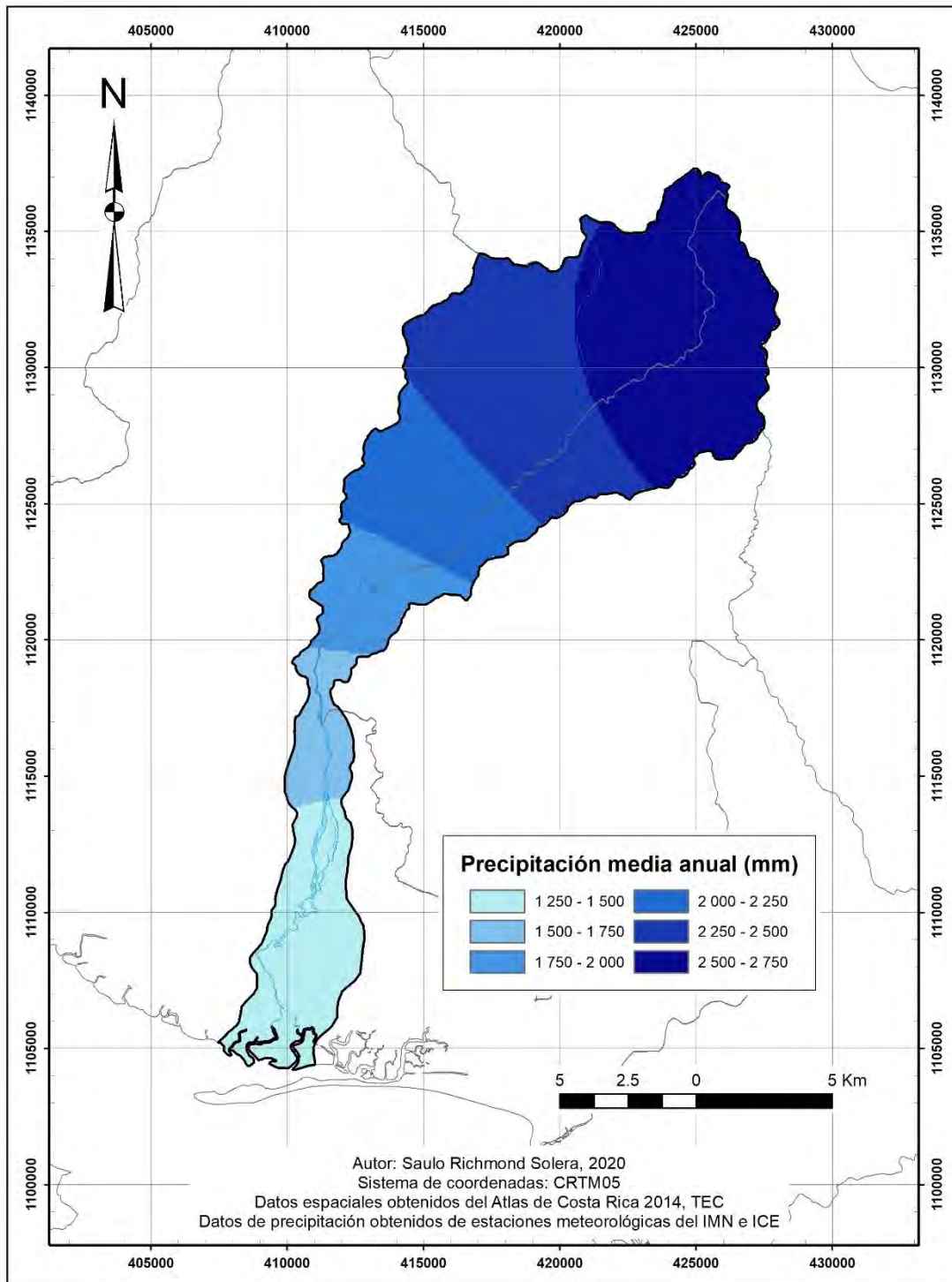
Mapa 9. Cantidad promedio de días de lluvia por año en la cuenca del río Aranjuez



Mapa 10. Cantidad de meses secos en la cuenca del río Aranjez



Mapa 11. Temperatura media anual en la cuenca del río Aranjuez



Mapa 12. Precipitación media anual en la cuenca del río Aranuez

3.6.2 Zonas de vida

En general, la cuenca del río Aranjuez se presenta como un área de condiciones húmedas. Las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez presentan una variedad de zonas de vida considerable, asociada con los cambios en las condiciones de topografía y elevación.

Bordeando la parte alta de la cuenca, en las zonas de mayor elevación, se distinguen: el bosque pluvial montano bajo, el bosque muy húmedo montano bajo, el bosque pluvial premontano y el bosque muy húmedo premontano transición a pluvial. Al reducirse la elevación, se presenta el bosque muy húmedo premontano, llegando incluso a alcanzar una zona de bosque húmedo tropical transición a premontano, en el punto de confluencia de los ríos Aranjuez y Veracruz.

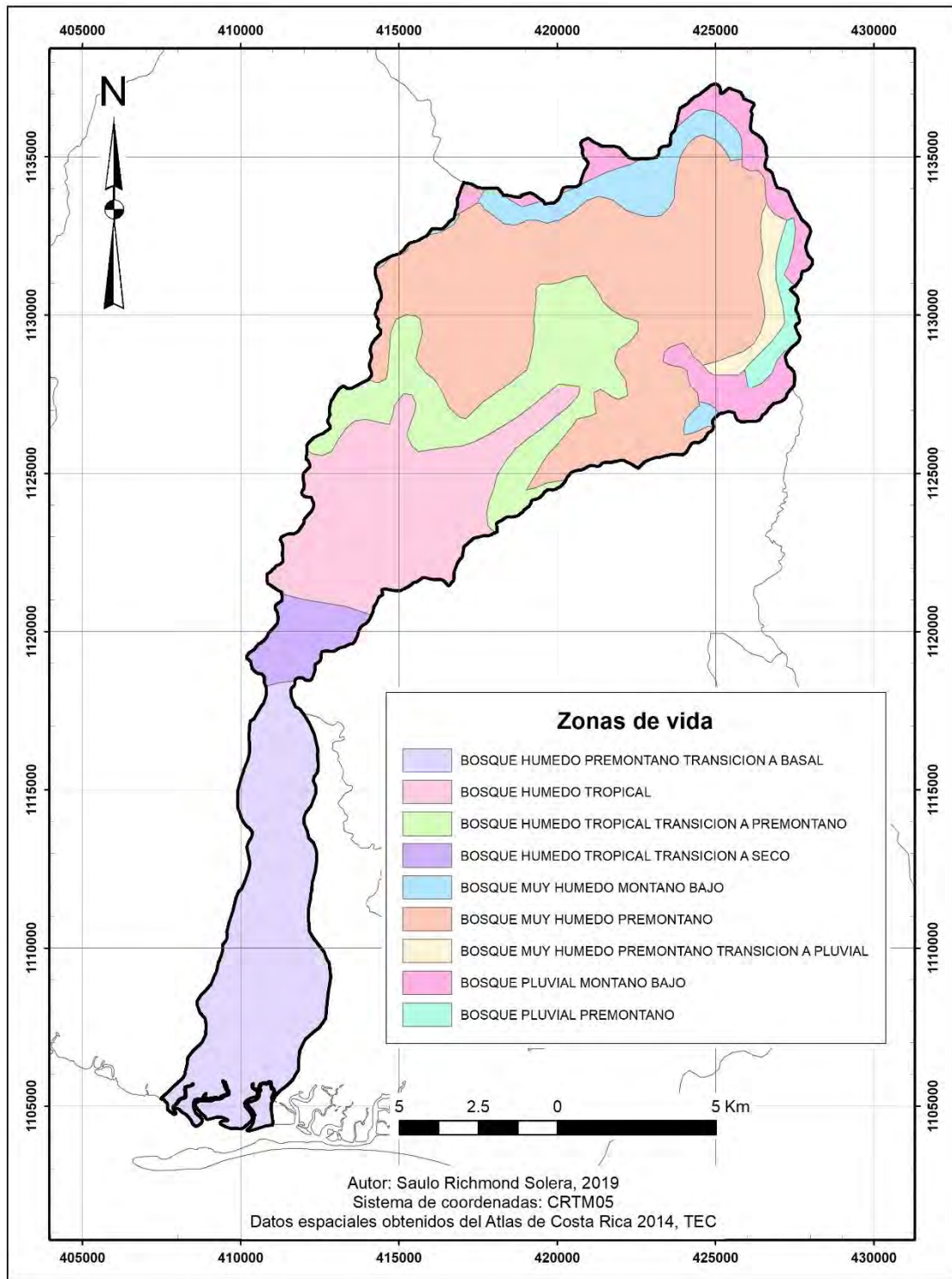
La parte media de la cuenca inicia con bosque muy húmedo premontano en su territorio más elevado, para continuar con bosque húmedo tropical transición a premontano, luego bosque húmedo tropical y finalizar con bosque húmedo tropical transición a seco.

En cuanto a la parte baja de la cuenca, toda su extensión se considera zona de bosque húmedo premontano transición a basal.

La distribución de estas zonas de vida en la cuenca del río Aranjuez se presenta en el Mapa 13 y el Cuadro 19, donde también están sus parámetros climatológicos asociados.

Cuadro 19. Zonas de vida en la cuenca del río Aranjuez

Zona	Nombre	Piso	Temperatura media (°C)	Precipitación anual (mm)	Área (km²)	Área (%)
bp-P	Bosque pluvial premontano	Premontano	18 a 24	4000 a 8000	2,79	1,45
bp-MB	Bosque pluvial montano bajo	Montano bajo	12 a 18	4000 a 8000	11,07	5,77
bmh-P4	Bosque muy húmedo premontano transición a pluvial	Premontano	18 a 24	4000 a 8000	3,34	1,74
bmh-P	Bosque muy húmedo premontano	Premontano	18 a 24	2000 a 4000	65,99	34,37
bmh-MB	Bosque muy húmedo montano bajo	Montano bajo	12 a 18	2000 a 4000	9,11	4,75
bh-T12	Bosque húmedo tropical transición a premontano	Basal	24 a 30	2000 a 4000	24,80	12,92
bh-T10	Bosque húmedo tropical transición a seco	Basal	24 a 30	1000 a 2000	6,21	3,23
bh-T	Bosque húmedo tropical	Basal	24 a 30	2000 a 4000	32,10	16,72
bh-P6	Bosque húmedo premontano transición a basal	Premontano	18 a 24	1000 a 2000	36,59	19,06



Mapa 13. Zonas de vida en la cuenca del río Aranjuez

4. Hidrología

4.1 Precipitación

4.1.1 Registros de precipitación disponibles

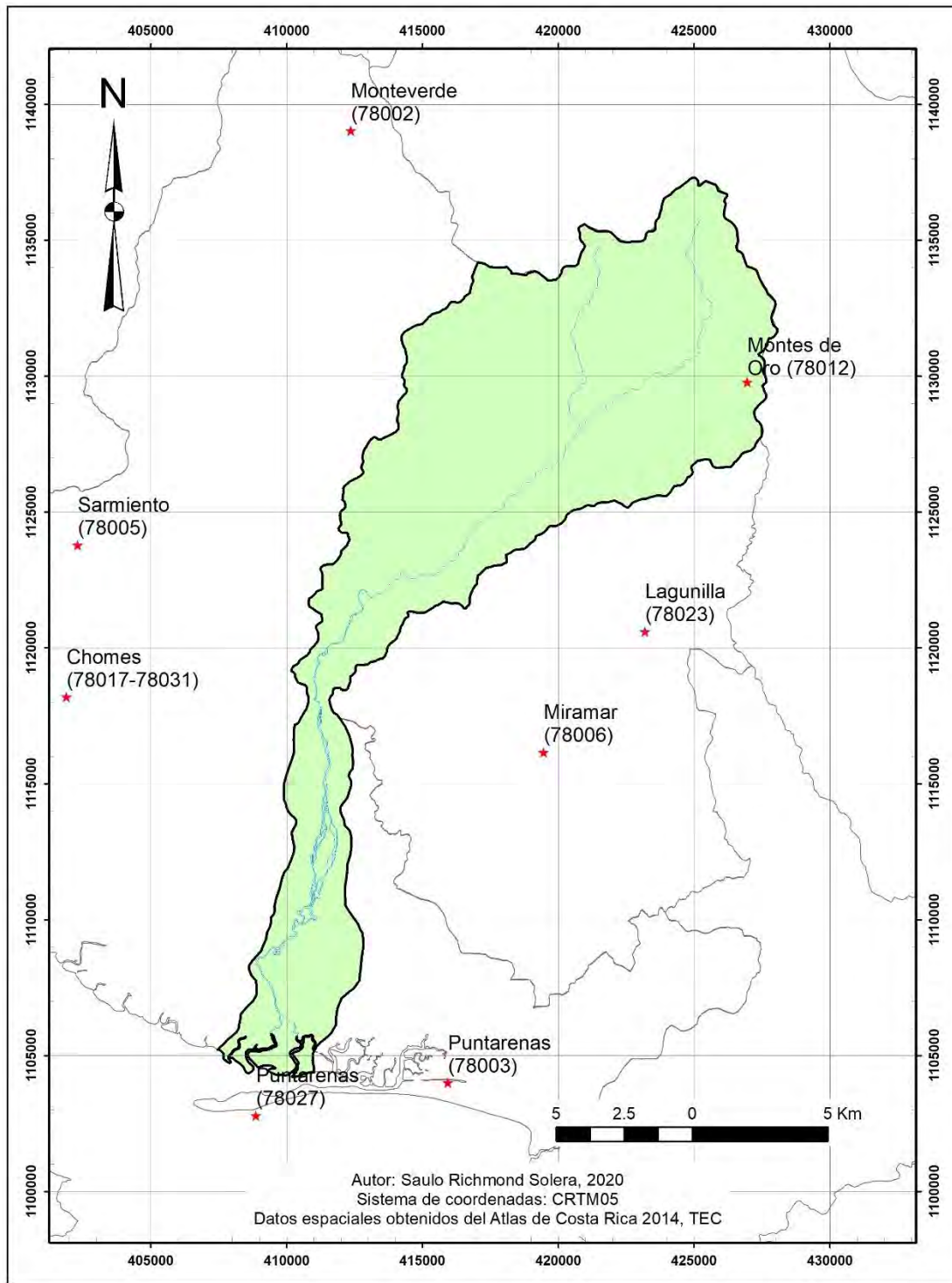
Las estaciones meteorológicas ubicadas alrededor de la cuenca del río Aranjuez, con registros de precipitación suficientes y disponibles, se muestran en el Mapa 14 y sus características se presentan en el Cuadro 20. Estas estaciones meteorológicas pertenecen en su mayoría al Instituto Meteorológico Nacional (IMN), únicamente las estaciones 78002 y 78012 pertenecen al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE); ambas instituciones colaboraron ofreciendo los registros de precipitación solicitados.

Cuadro 20. Características generales de las estaciones meteorológicas ubicadas alrededor de la cuenca del río Aranjuez

Número	Nombre	Coord. Y CRTM05	Coord. X CRTM05	Elevación (msnm)	Periodo de registro
78002	Monteverde	1138900	412077	1508	1983-2019
78003	Puntarenas	1103998	415945	3	1937-2000
78005	Sarmiento de Puntarenas	1123789	402324	160	1971-2015
78006	Miramar	1116157	419475	450	1971-2019
78012	Cedral, Montes de Oro	1129747	426708	1099	1983-2019
78017	Chomes	1118198	401912	100	1999-2011
78023	Lagunilla, Miramar	1120604	423199	1260	1998-2006
78027	Puntarenas	1102787	408893	3	2001-2019
78031	San Gerardo, Chomes	1118324	401797	100	2014-2019

Fuentes: IMN e ICE, 2020

Los registros empleados incluyeron volumen de precipitación total anual y volumen de precipitación diaria máxima anual, en todas las estaciones y en sus respectivos periodos de registro. Además, volumen acumulado de precipitación diaria y volumen acumulado de precipitación cada 5 minutos, durante eventos seleccionados y según disponibilidad.



Mapa 14. Estaciones meteorológicas alrededor de la cuenca del río Aranjuez

Nótese que la estación Puntarenas fue trasladada en el año 2001, por lo que antes de este año se identifica con el número 78003 y posteriormente con el número 78027. Al ser la estación con un registro más extenso y completo, se decidió emplearla como estación base de comparación, pero únicamente considerando los registros a partir del año 1971, por semejanza con las siguientes estaciones de mayor registro: 78005 y 78006.

Mediante un análisis de doble masa, se identificó una correlación distinta entre los datos de precipitación total anual registrados en la estación Puntarenas antes del año 2001 y los registrados posteriormente, al ser comparados con el promedio de los datos de precipitación total anual registrados en las demás estaciones meteorológicas, por lo que se procedió a ajustar los datos registrados previo al cambio de ubicación. Posteriormente, se definió la correlación entre los datos ajustados de la estación Puntarenas y los datos de cada una de las demás estaciones meteorológicas, mediante análisis de doble masa, obteniendo los resultados del Cuadro 21.

Cuadro 21. Coeficiente de correlación R^2 del análisis de doble masa entre la estación Puntarenas y las demás estaciones meteorológicas

Número	Nombre	Coeficiente de correlación R^2
78002	Monteverde	0,9996
78005	Sarmiento de Puntarenas	0,9823
78006	Miramar	0,9986
78012	Cedral, Montes de Oro	0,9984
78017-78031	Chomes	0,9942
78023	Lagunilla, Miramar	0,9974

Los análisis de doble masa se utilizan para estudiar la consistencia de series de valores en cuanto a la homogeneidad de su condición media y poder, de esa forma, extender los registros o completar datos faltantes. Estos análisis se realizan con datos promedio o totales anuales, no se utilizan para el estudio de eventos extremos de precipitación.

Sin embargo, el establecer correlaciones entre los datos de las estaciones meteorológicas ubicadas alrededor de la cuenca del río Aranjuez permitió realizar estimaciones de eventos extremos, ante la limitada extensión que presentan los registros disponibles de algunas estaciones, con el fin de obtener una mejor caracterización climática de la cuenca.

4.1.2 Análisis y estimación de eventos extremos de precipitación

Los registros de volumen de precipitación diaria máxima anual, en todas las estaciones y en sus respectivos periodos de registro, se ajustan a la distribución de probabilidad de Gumbel, siendo una de las distribuciones de valores extremos más utilizadas en hidrología.

En el Cuadro 22, se presenta un resumen de la caracterización estadística de las series de datos empleadas y los parámetros de la distribución de probabilidad asociada a cada una. Los resultados obtenidos fueron validados mediante pruebas de bondad del ajuste χ^2 , con un intervalo de confianza del 95%, siendo entonces la distribución de probabilidad de Gumbel representativa del comportamiento de las series de datos analizadas.

Cuadro 22. Caracterización estadística y parámetros de la distribución de probabilidad de Gumbel, para las series de datos de precipitación diaria máxima anual

Estación	Cantidad de datos	Valor promedio (mm)	Desv. estándar (mm)	α	β
78002	37	101,08	34,43	26,841	85,590
78003-78027	49	114,61	42,47	33,116	95,497
78005	45	87,09	13,14	10,247	81,172
78006	39	157,79	42,74	33,323	138,562
78012	37	105,27	36,96	28,820	88,634
78017-78031	14	101,94	25,96	20,242	90,260
78023	9	127,61	27,32	21,297	115,319

Estos resultados permitieron estimar la probabilidad de excedencia de un evento extremo y determinar su correspondiente periodo de retorno, así como estimar la magnitud de un evento extremo dado un periodo de retorno. En el Cuadro 23 se muestran los volúmenes de precipitación diaria máxima asociados a periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, en cada una de las estaciones meteorológicas, obtenidos mediante la distribución de probabilidad de Gumbel. El procedimiento en detalle se presenta en el Anexo 3.

Además, con base en estos resultados, se analizaron los registros disponibles de precipitación diaria originada por la tormenta Nate, para obtener una aproximación del periodo de retorno de dicho evento, siendo el que mayores daños ha provocado en la cuenca del río Aranjuez. Los resultados se muestran en el Cuadro 24.

Cuadro 23. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según estación meteorológica, mediante la distribución de Gumbel

Estación		Periodo de retorno (años)					
Número	Nombre	2	5	10	25	50	100
78002	Monteverde	95,4	125,9	146,0	171,4	190,3	209,1
78003-78027	Puntarenas	107,6	145,2	170,0	201,4	224,7	247,8
78005	Sarmiento	84,7	95,9	103,3	112,6	119,6	126,4
78006	Miramar	150,8	188,5	213,6	245,1	268,6	291,9
78012	Montes de Oro	98,8	130,4	151,3	177,7	197,4	216,8
78017-78031	Chomes	97,7	120,6	135,8	155,0	169,2	183,4
78023	Lagunilla	123,1	147,3	163,2	183,4	198,4	213,3

Cuadro 24. Periodo de retorno de la precipitación diaria originada por la tormenta Nate, según estación meteorológica

Estación		Fecha	Precipitación diaria (mm)	Periodo de retorno (años)
Número	Nombre			
78002	Monteverde	4/10/2017	199,4	70
		5/10/2017	213,1	116
78006	Miramar	4/10/2017	126,4	1
		5/10/2017	173,8	3
78012	Montes de Oro	4/10/2017	148,1	8
		5/10/2017	220,2	97

A esta información pueden añadirse los registros de 103,4 mm y 268,6 mm, respectivamente de los días 4 y 5 de octubre de 2017, medidos en la estación Pitahaya (78033), la cual se ubica en la parte baja de la cuenca en una elevación de 30 msnm. Esta estación es de reciente instalación e inició mediciones en julio de 2016, por lo que su registro es muy limitado y no fue considerado en esta investigación.

La tormenta Nate fue un evento extraordinario con altos volúmenes de precipitación diaria en toda la cuenca del río Aranjuez y durante dos días consecutivos, aun cuando los volúmenes registrados en la parte media de la cuenca se asocian con periodos de retorno bajos, recordando que la estación Monteverde se encuentra ubicada en una elevación de 1508 msnm, la estación Miramar en 450 msnm y la estación Montes de Oro en 1099 msnm.

Habiendo establecido previamente la correlación entre la estación Puntarenas y cada una de las restantes estaciones meteorológicas, se buscó extender los resultados obtenidos de magnitudes de eventos extremos para diferentes periodos de retorno, de manera que fuesen representativos de un periodo más extenso que aquel del que se tiene registro: un periodo igual al registrado en la estación Puntarenas. Para esto, se compararon los eventos extremos estimados de la estación Puntarenas, obtenidos únicamente del registro de los años que comparte esta estación con cada una de las demás, con los obtenidos del registro completo. El resultado de esta comparación se utilizó como ajuste a los eventos extremos estimados de cada una de las demás estaciones meteorológicas.

Por ejemplo, la estación 78023 cuenta únicamente con un registro de 9 años, que va del año 1998 al año 2006, registro con el que se estimaron sus eventos extremos. Por su parte, se estimaron los eventos extremos de la estación Puntarenas considerando únicamente el registro de dichos años y se compararon con los eventos extremos de la estación Puntarenas a partir de su registro completo de 49 años. Esta relación es la que permitió entonces ajustar los eventos extremos estimados de la estación 78023, de manera que representen un periodo más extenso.

En el Cuadro 25, se presentan los volúmenes de precipitación diaria máxima asociados a periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, en cada una de las estaciones meteorológicas, obtenidos mediante la distribución de probabilidad de Gumbel y ajustados con base en la estación Puntarenas.

Cuadro 25. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según estación meteorológica, mediante la distribución de Gumbel y ajustada con base en la estación Puntarenas

Estación		Periodo de retorno (años)					
Número	Nombre	2	5	10	25	50	100
78002	Monteverde	97,3	128,4	149,0	174,9	194,2	213,4
78003-78027	Puntarenas	107,6	145,2	170,0	201,4	224,7	247,8
78005	Sarmiento	86,3	100,4	109,3	120,4	128,6	136,6
78006	Miramar	142,1	179,4	204,1	235,2	258,2	281,0
78012	Montes de Oro	100,7	133,0	154,4	181,4	201,4	221,3
78017-78031	Chomes	110,6	148,6	172,9	203,3	225,6	247,6
78023	Lagunilla	133,8	175,1	201,1	233,1	256,5	279,5

Estos resultados muestran una particularidad: la estación 78005 (Sarmiento) presenta un comportamiento que no se relaciona con el de las demás estaciones meteorológicas analizadas. Para periodos de retorno de 2 y 5 años, los estimados de precipitación diaria máxima en la estación Sarmiento podrían considerarse acordes con los del resto de estaciones meteorológicas, pero para periodos de retorno mayores, los resultados obtenidos no guardan un incremento similar al de las otras estaciones, siendo que la precipitación diaria máxima estimada para un periodo de retorno de 100 años en esta estación únicamente difiere en 50 mm de aquella estimada para un periodo de retorno de 2 años, mientras que en el resto de estaciones meteorológicas la diferencia es mayor a 100 mm (116 mm en el menor de los casos).

Ante esta situación, se decidió analizar más en detalle los registros de esta estación, detectándose que además de ajustarse a la distribución de probabilidad de Gumbel, la cual es representativa de series de eventos extremos, los datos se ajustan a la distribución normal, mayormente asociada con eventos promedio. Al mismo tiempo, a diferencia de los registros del resto de estaciones, la distribución de los datos de la estación Sarmiento presenta asimetría negativa u oblicua hacia la izquierda, que no se asocia con eventos extremos máximos.

Los mismos registros de volumen de precipitación diaria máxima anual fueron analizados mediante una distribución de probabilidad GEV, considerando la subjetividad que podría implicar el haber seleccionado la distribución de probabilidad de Gumbel, pese a los resultados positivos en cuanto a la bondad del ajuste. Los volúmenes de precipitación diaria máxima asociados a periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, en cada una de las estaciones meteorológicas, con un intervalo de confianza del 95%, obtenidos mediante la distribución de probabilidad GEV, se muestran en el Cuadro 26.

Nuevamente, se evidencia que la estación 78005 (Sarmiento) presenta un comportamiento que no se relaciona con el de las demás estaciones meteorológicas analizadas. En la Figura 32 del Anexo 4, se demuestra que los resultados obtenidos con la distribución de probabilidad de Gumbel para la estación Sarmiento están por fuera del intervalo de confianza de 95% establecido mediante la distribución de probabilidad GEV.

Cuadro 26. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según estación meteorológica, mediante la distribución GEV

Estación		Periodo de retorno (años)					
Número	Nombre	2	5	10	25	50	100
78002	Monteverde	92,2	121,1	143,8	177,0	205,6	237,7
78003-78027	Puntarenas	105,5	142,0	168,3	204,3	233,2	263,7
78005	Sarmiento	87,6	98,8	104,2	109,2	112,0	114,1
78006	Miramar	153,4	193,0	216,4	243,1	261,0	277,4
78012	Montes de Oro	97,2	129,7	153,2	185,5	211,4	239,0
78017-78031	Chomes	97,2	121,5	137,8	158,6	174,3	190,1
78023	Lagunilla	118,6	141,6	161,6	193,7	223,9	260,6

Las distintas condiciones antes mencionadas acerca de la estación Sarmiento podrían deberse a alguna falla en el funcionamiento de los instrumentos de medición de la estación meteorológica o a errores en el manejo de los datos por parte de su administrador, por lo que se pone en duda que sus registros sean verdaderamente representativos de la climatología del área de estudio.

En el Anexo 4, también se presenta una comparación entre los resultados obtenidos con las distribuciones de probabilidad de Gumbel y GEV para las demás estaciones meteorológicas, donde se muestra que los volúmenes de precipitación diaria máxima estimados con la distribución de probabilidad de Gumbel se encuentran dentro del intervalo de confianza de 95% establecido mediante la distribución de probabilidad GEV, incluso con una diferencia porcentual menor a 4,2% para los periodos de retorno de 2, 5, 10 y 25 años, menor a 7,4% para el periodo de retorno de 50 años y menor a 12,0% para el periodo de retorno de 100 años. Únicamente escapan de estas diferencias porcentuales los resultados obtenidos para la estación 78023 (Lagunilla), situación que se explica por la limitada cantidad de datos que componen su registro, lo cual también se ve reflejado en un intervalo de estimación poco preciso para los periodos de retorno de 50 y 100 años.

Al igual que los resultados obtenidos mediante la distribución de probabilidad de Gumbel, los volúmenes de precipitación diaria máxima estimados con la distribución de probabilidad GEV fueron ajustados con base en la estación Puntarenas, resultando en los siguientes valores.

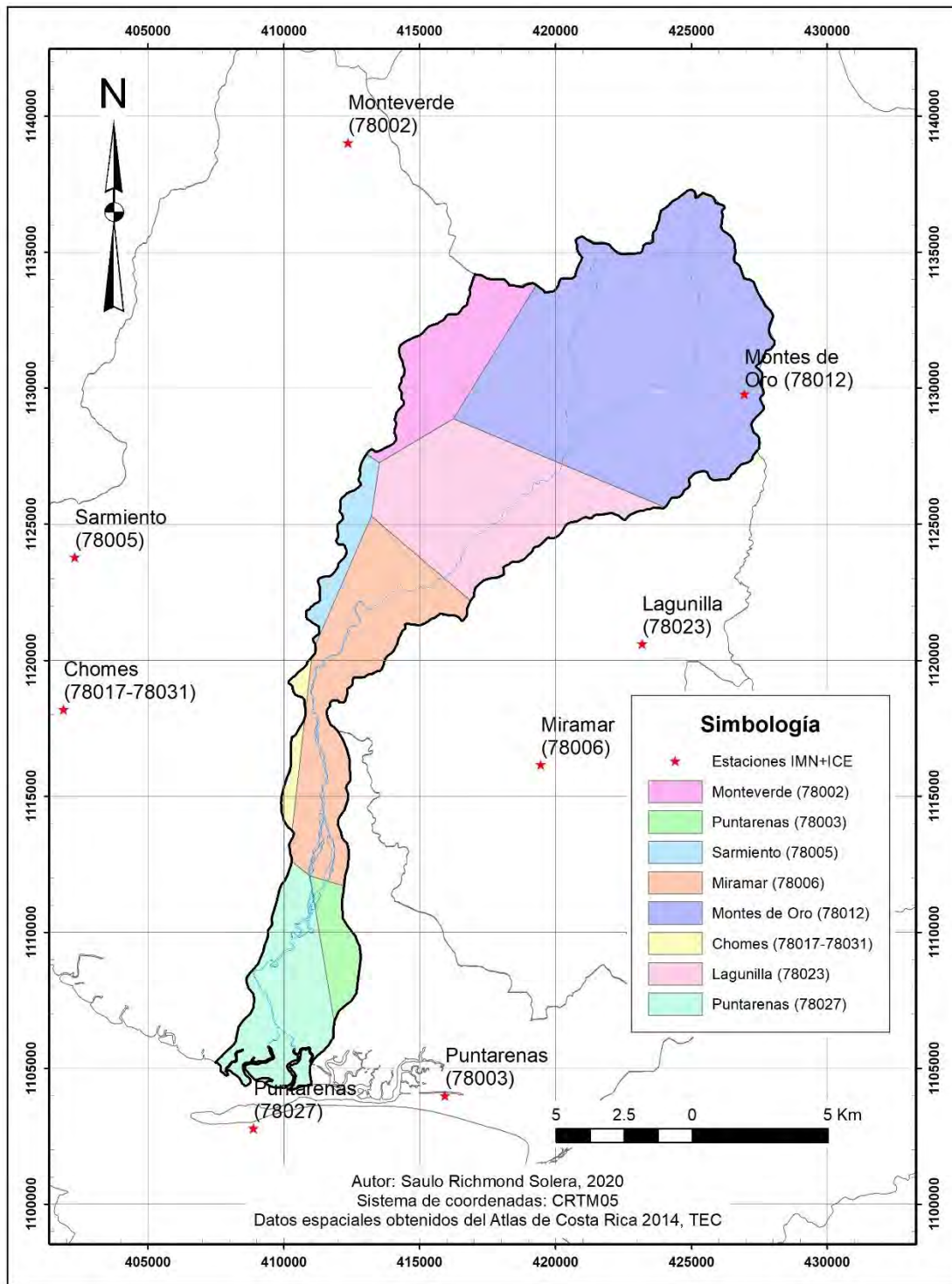
Cuadro 27. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según estación meteorológica, mediante la distribución GEV y ajustada con base en la estación Puntarenas

Estación		Periodo de retorno (años)					
Número	Nombre	2	5	10	25	50	100
78002	Monteverde	94,1	123,6	146,7	180,7	209,9	242,7
78003-78027	Puntarenas	105,5	142,0	168,3	204,3	233,2	263,7
78005	Sarmiento	89,3	103,7	110,7	117,3	121,1	124,1
78006	Miramar	145,1	184,1	207,2	233,6	251,3	267,4
78012	Montes de Oro	99,1	132,3	156,4	189,4	215,9	244,0
78017-78031	Chomes	112,0	158,1	189,6	230,4	261,3	292,4
78023	Lagunilla	129,9	174,6	210,3	265,7	316,7	378,0

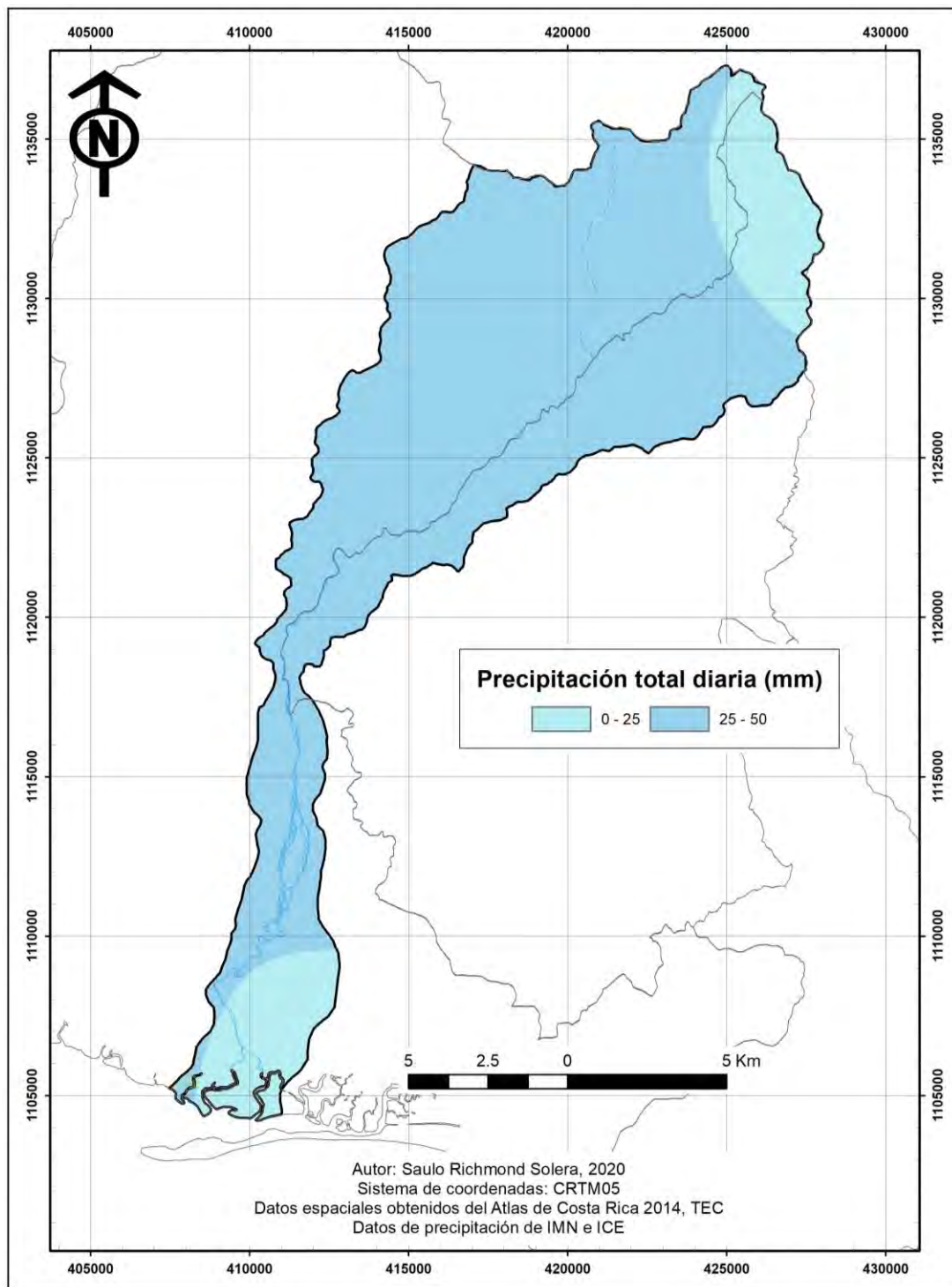
4.1.3 Distribución espacial de la lluvia

La medición de la cantidad de lluvia se realiza de manera puntual en las estaciones meteorológicas, por lo que la descripción de la distribución espacial de la lluvia requiere de asignar áreas de influencia a cada sitio de medición. En el Mapa 15, se presentan los polígonos de Thiessen asociados a las estaciones meteorológicas ubicadas alrededor de la cuenca del río Aranjuez, como método de asignación de áreas de influencia para la distribución espacial de la lluvia.

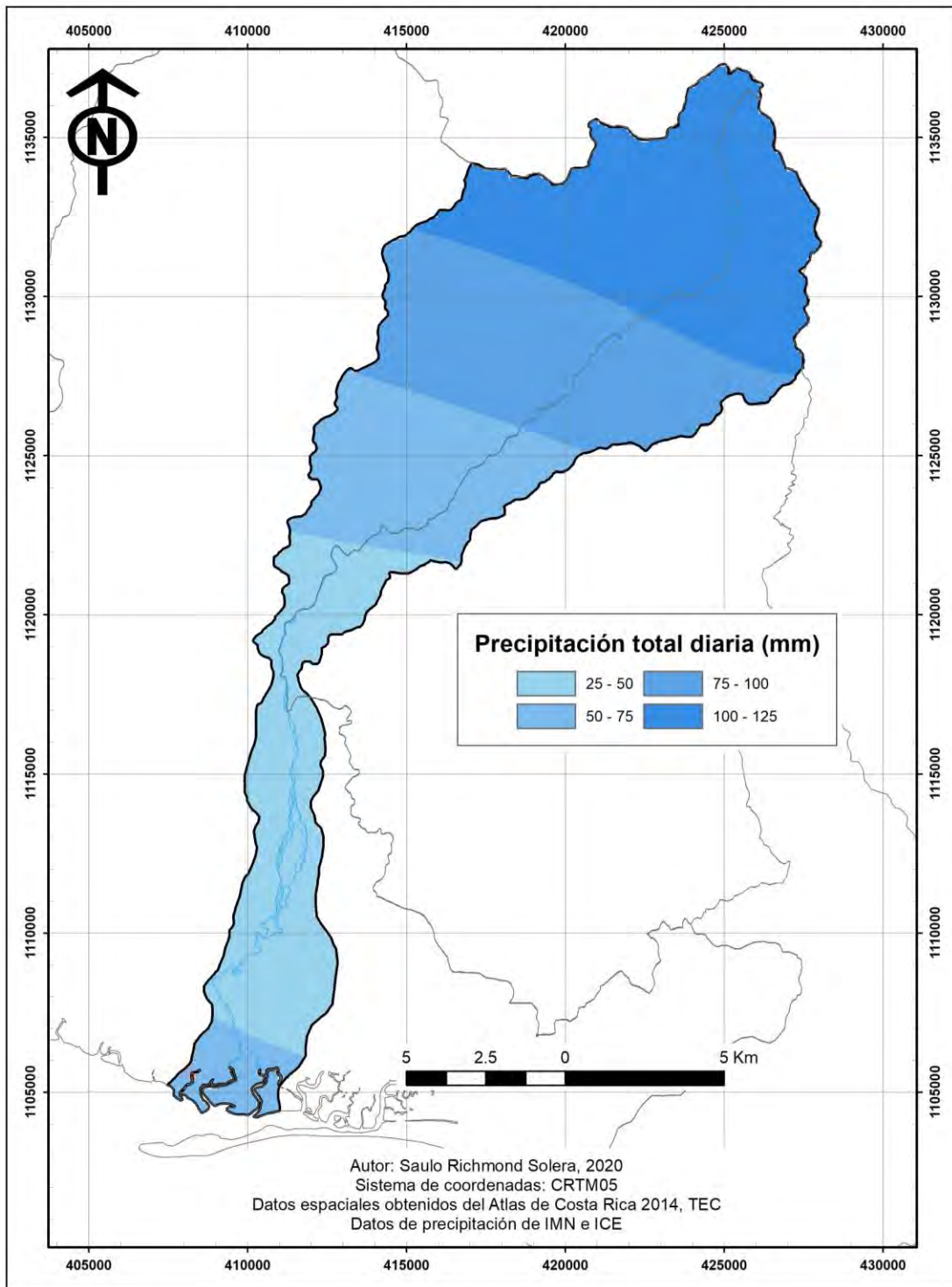
Existen otros métodos de distribución espacial de la lluvia basados en interpolación, como el método de los trazadores (*spline*), el método de la distancia inversa ponderada (*IDW*) y el método de *kriging*. Este último método se empleó para representar la distribución espacial de la lluvia durante algunos eventos que han ocasionado emergencias en la cuenca del río Aranjuez, según se muestra en los Mapas 16 a 23.



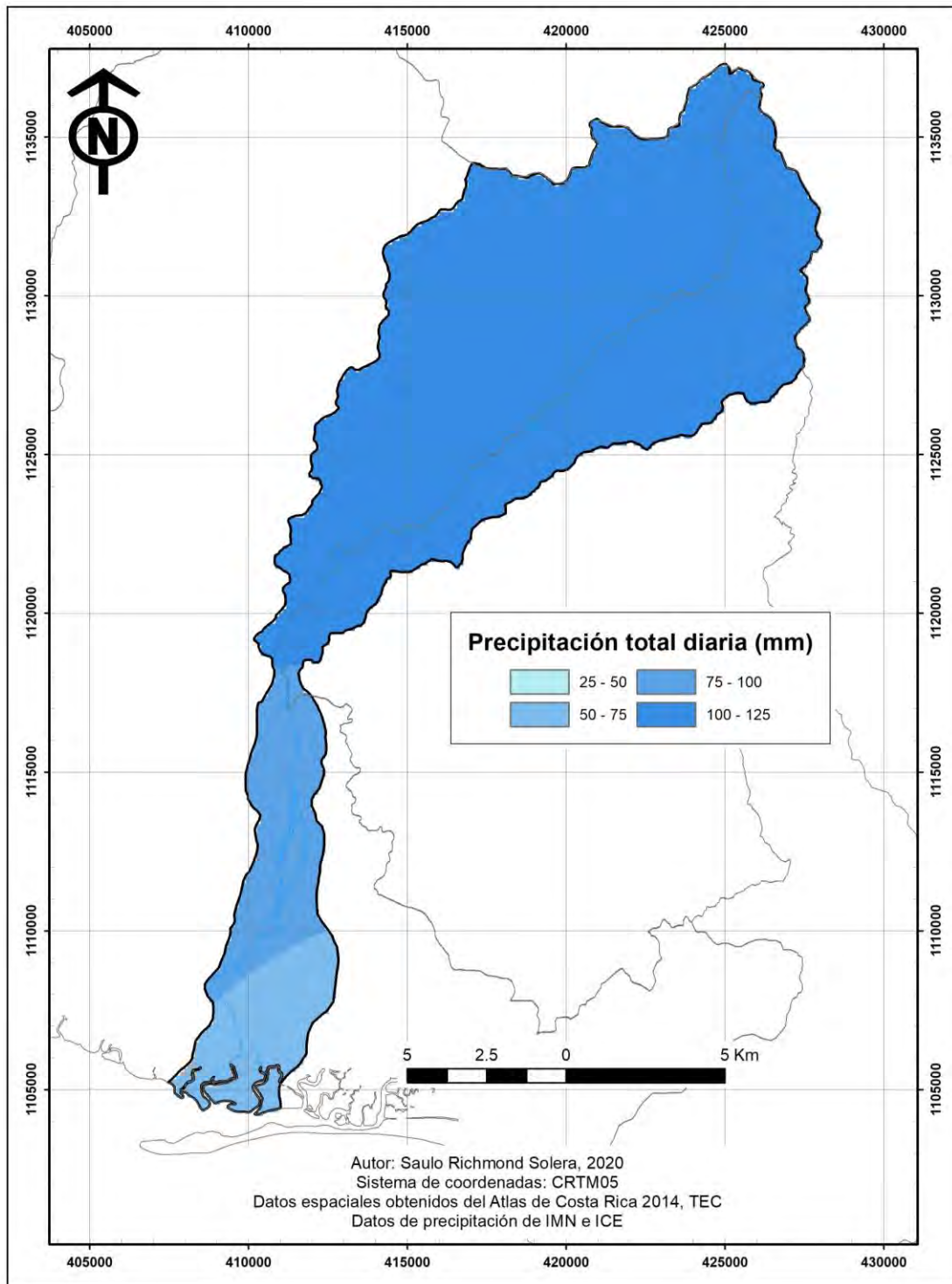
Mapa 15. Estaciones meteorológicas y sus polígonos de Thiessen en la cuenca del río Aranjuez



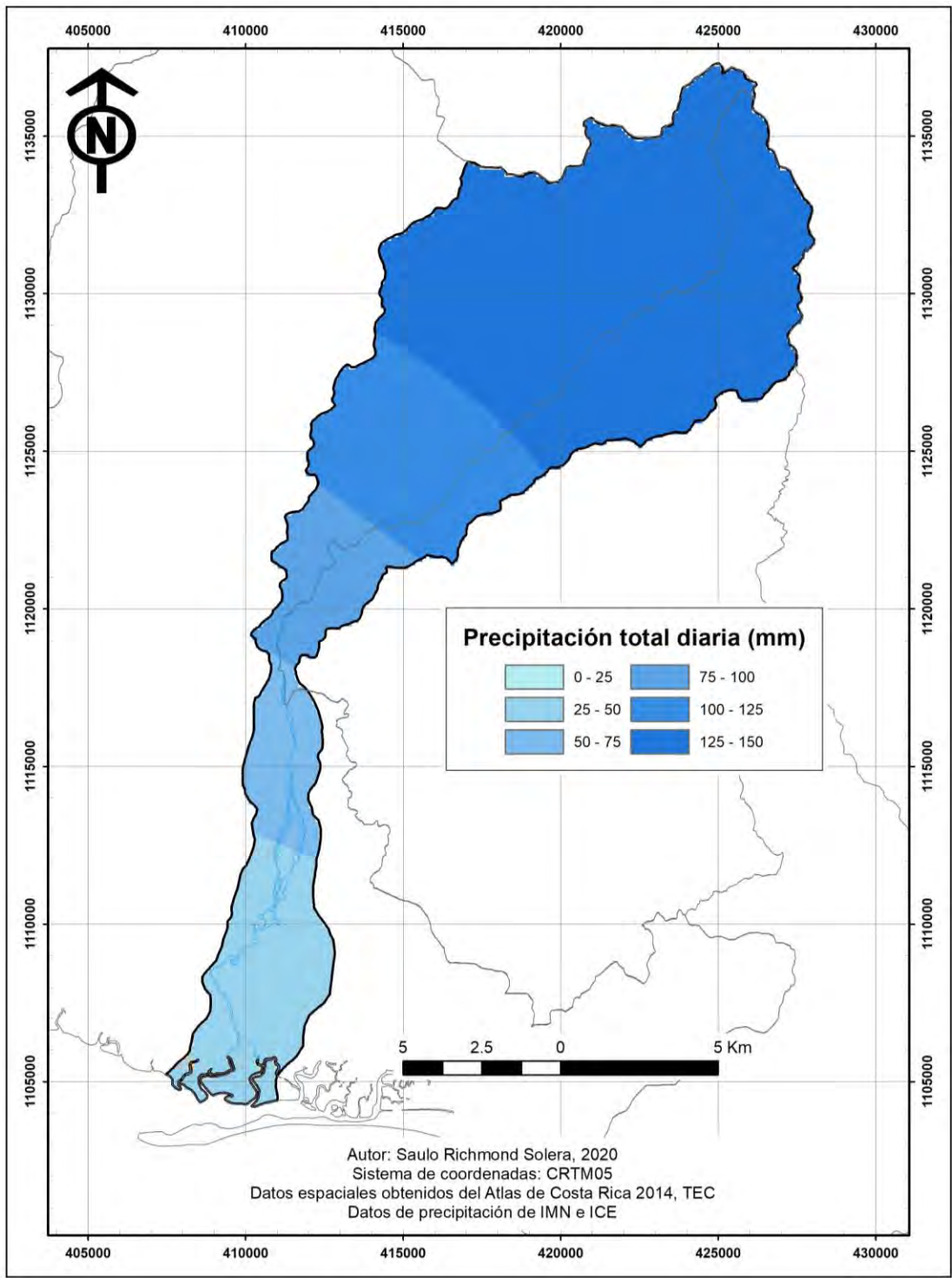
Mapa 16. Distribución espacial de la lluvia ocasionada por el huracán Gilbert, 11/9/1988



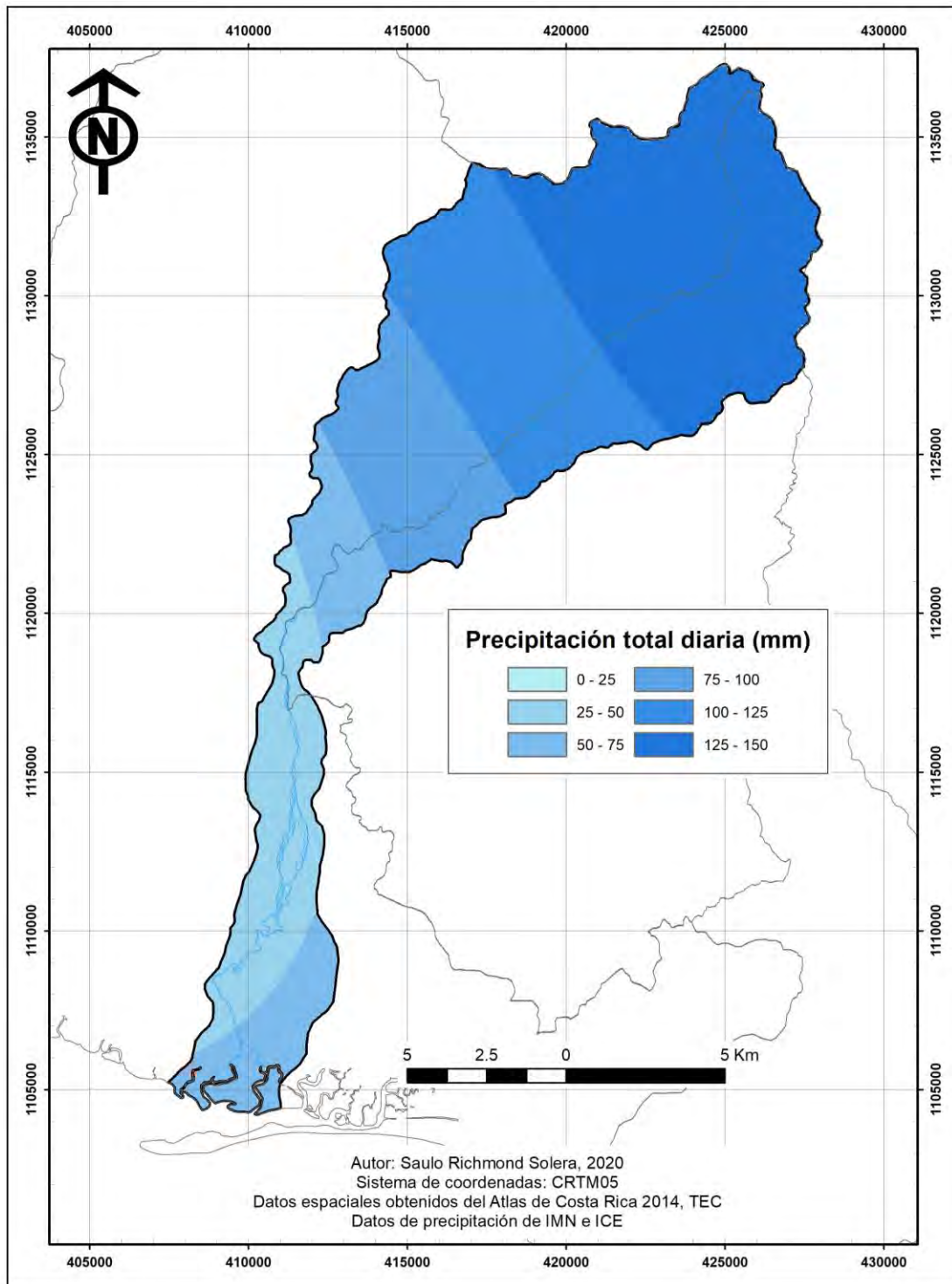
Mapa 17. Distribución espacial de la lluvia ocasionada por el huracán Juana, 22/10/1988



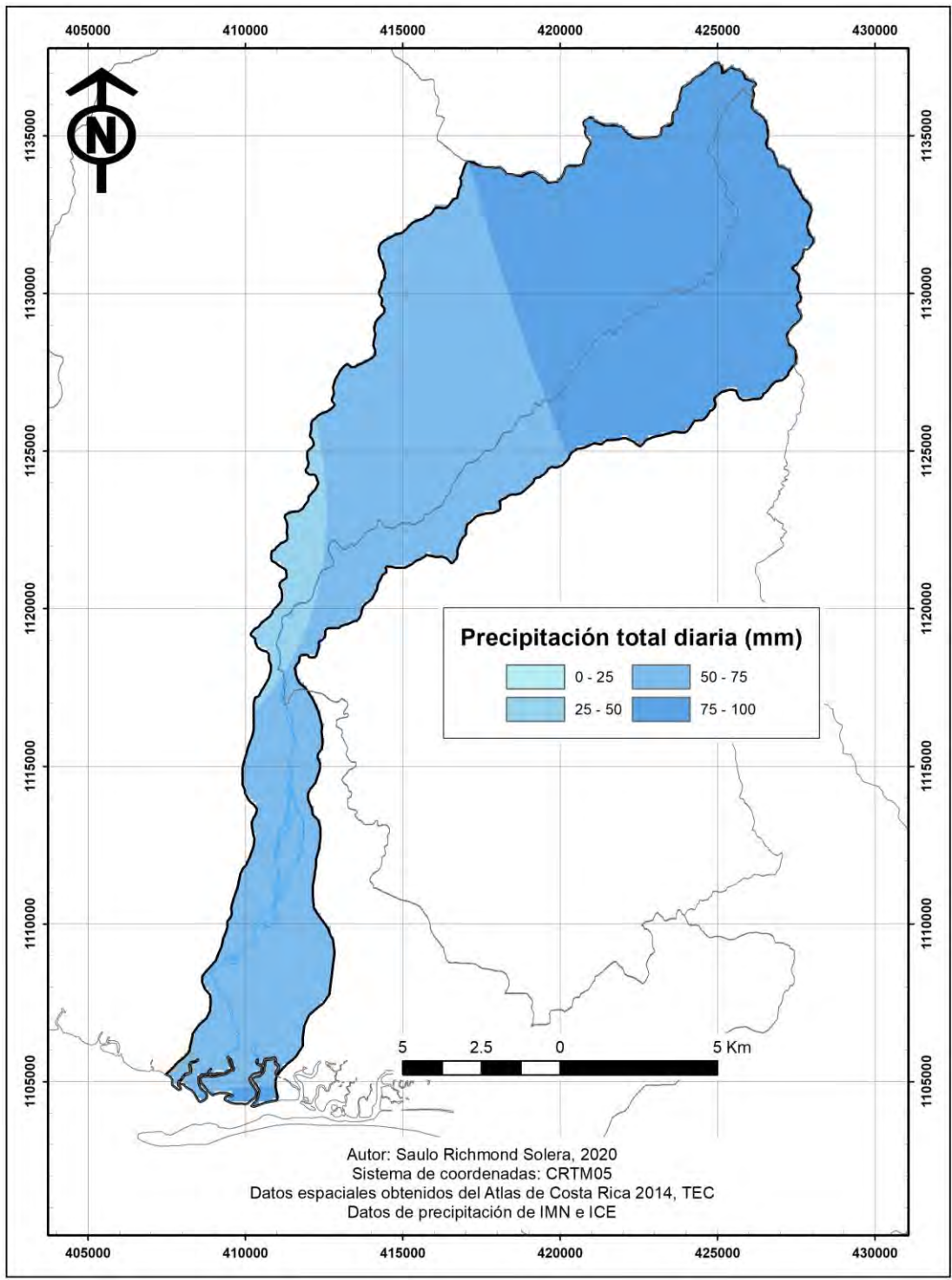
Mapa 18. Distribución espacial de la lluvia ocasionada por el huracán César, 28/7/1996



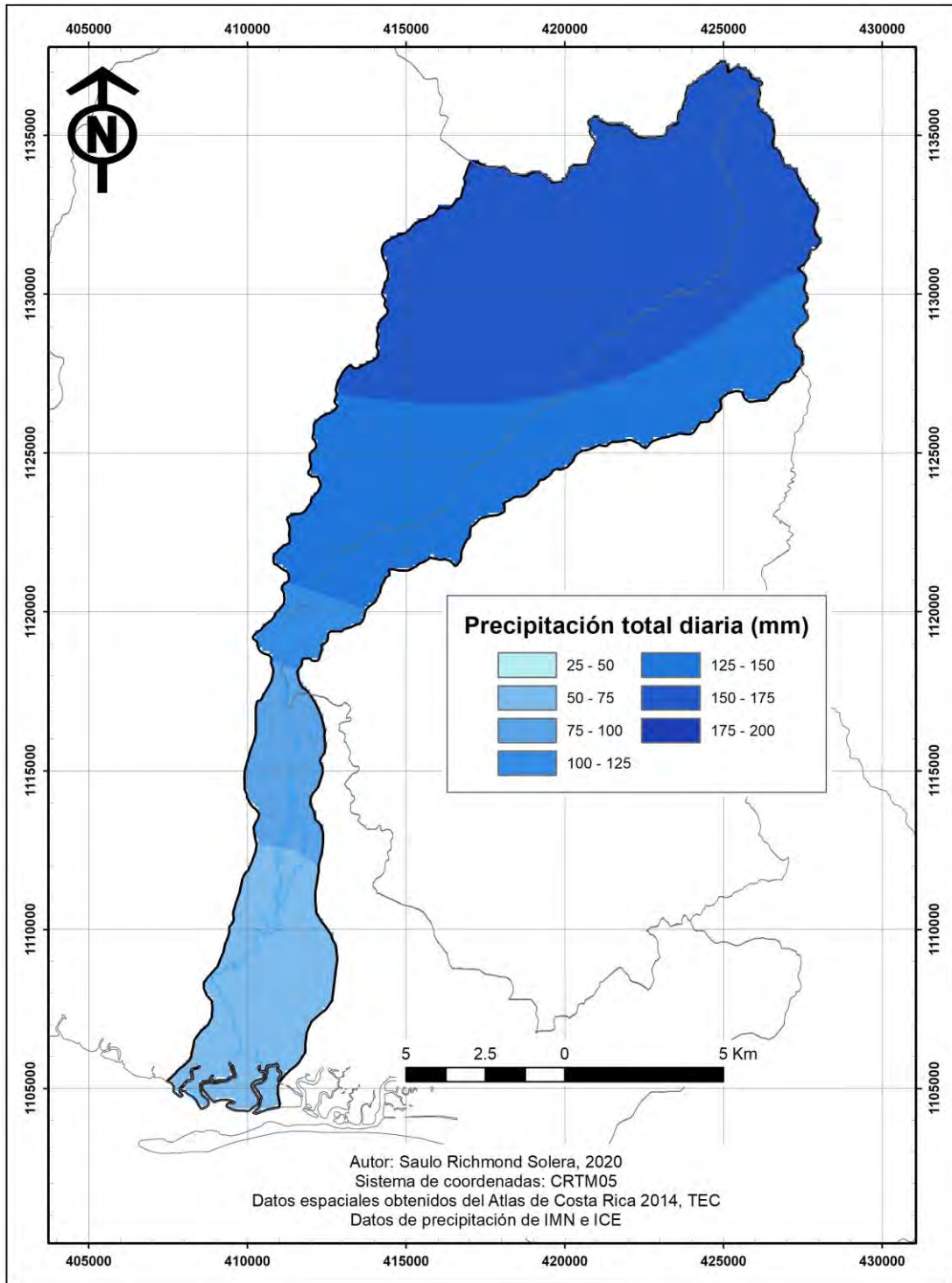
Mapa 19. Distribución espacial de la lluvia ocasionada por el huracán Mitch, 28/10/1998



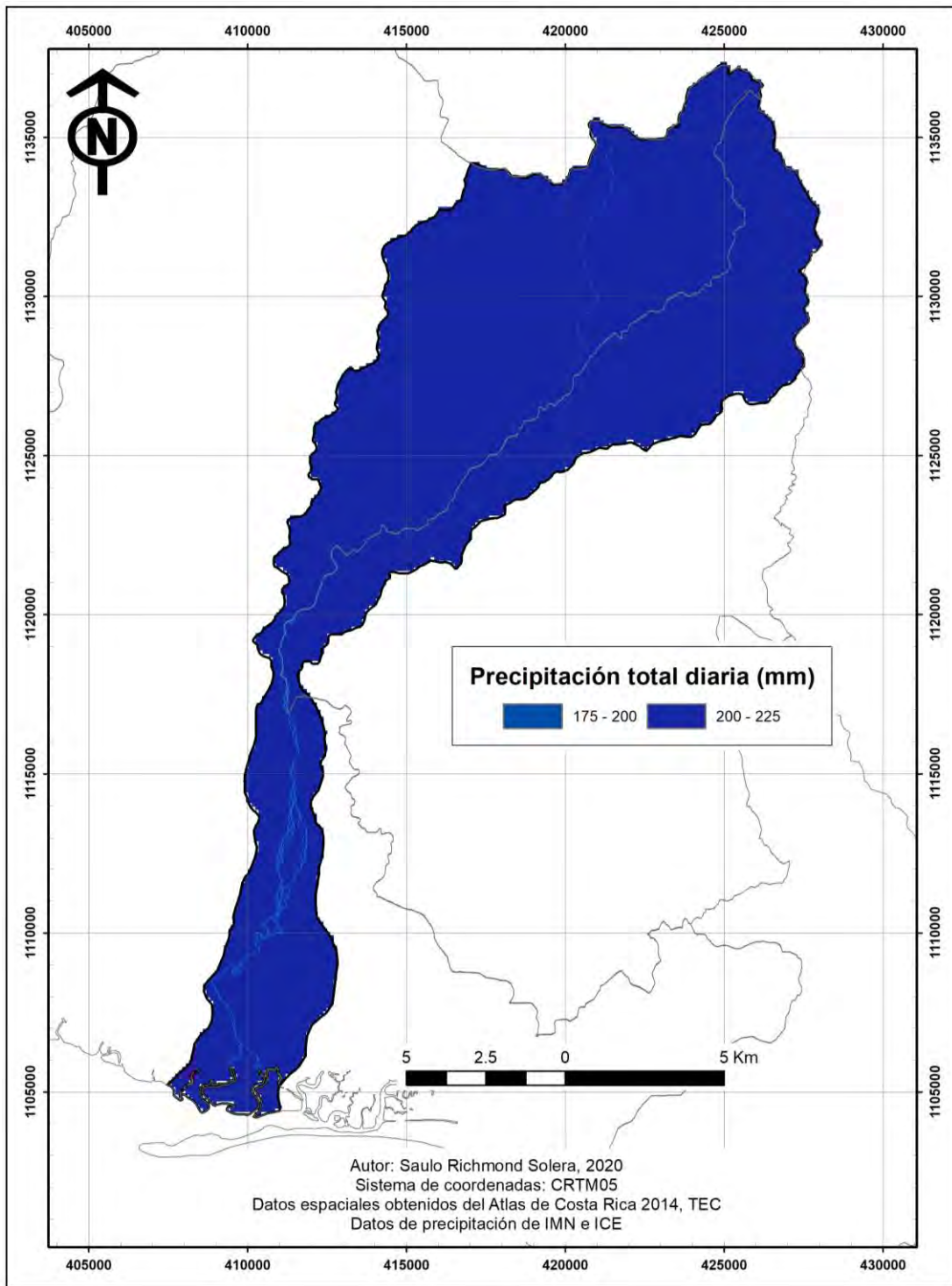
Mapa 20. Distribución espacial de la lluvia ocasionada por la tormenta Alma, 28/5/2008



Mapa 21. Distribución espacial de la lluvia ocasionada por el huracán Tomás, 2/11/2010



Mapa 22. Distribución espacial de la lluvia ocasionada por la tormenta Nate, 4/10/2017



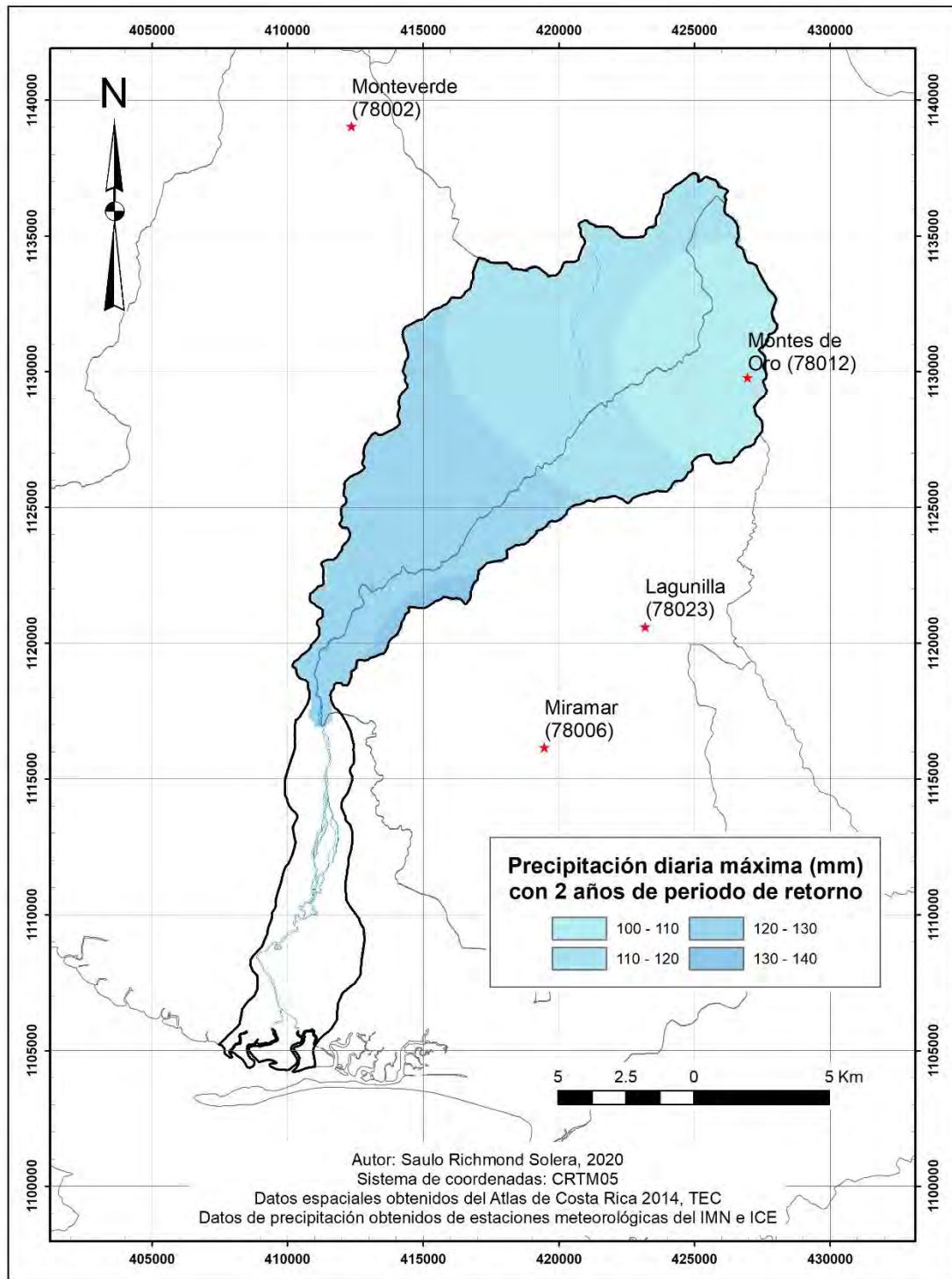
Mapa 23. Distribución espacial de la lluvia ocasionada por la tormenta Nate, 5/10/2017

Habiendo mencionado anteriormente la particularidad de los resultados obtenidos en las estimaciones de precipitación diaria máxima en la estación Sarmiento, para los diferentes periodos de retorno, y evidenciándose en el Mapa 15 que el área de influencia de esta estación sobre la cuenca hidrográfica del río Aranjuez no tiene tanto peso como las de otras estaciones, se decidió no utilizar en adelante los datos y resultados de esta estación meteorológica.

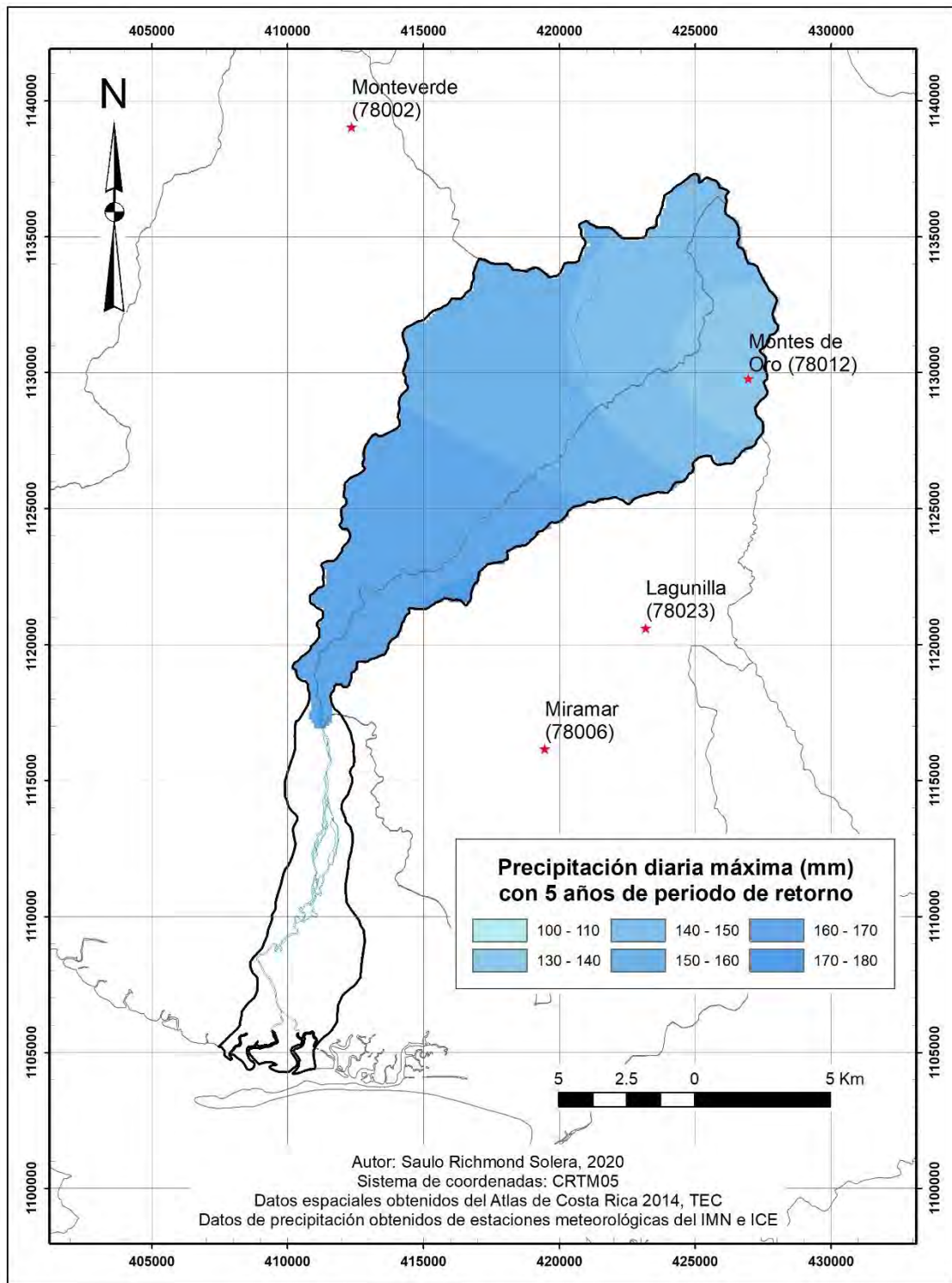
Adicionalmente, la estación Sardinal se ubica al oeste de la cuenca hidrográfica del río Guacimal, situada al oeste del área de drenaje del río Sardinal, que a su vez se encuentra al oeste de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez, por lo que la estación Sardinal podría responder a condiciones orográficas, zonas de vida y climatología distintas a las de la cuenca en estudio y, por ende, no representativas de esta.

Además, para el objetivo de esta investigación, solamente se requería analizar la precipitación y la respuesta de la cuenca en sus partes alta y media, cuya repercusión estará dada sobre las planicies de la parte baja de la cuenca. Por lo tanto, se descartaron también en adelante los resultados obtenidos hasta el momento de las estaciones Chomes (78017-78031) y Puntarenas (78003-78027).

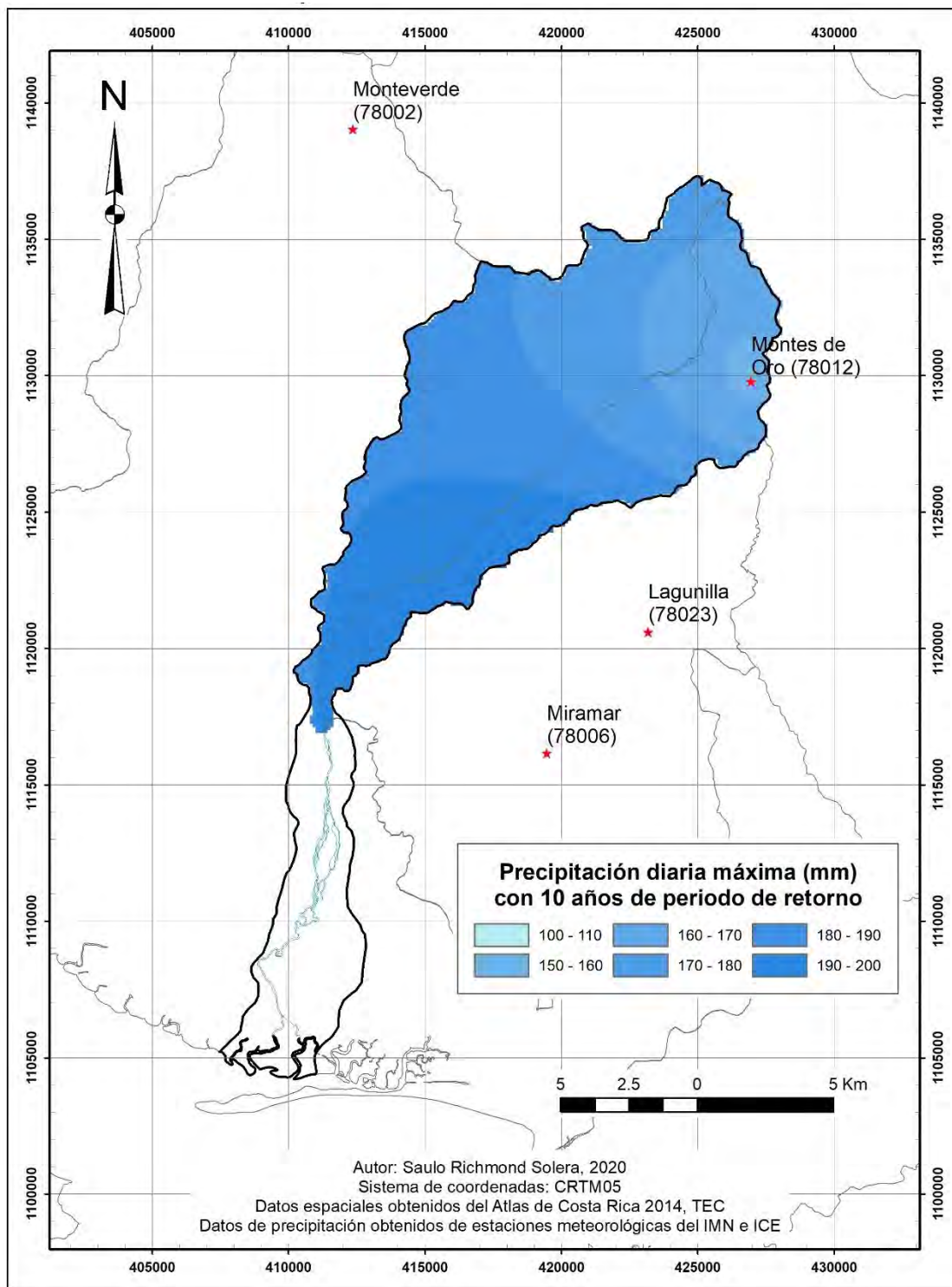
La distribución espacial de la lluvia para cada uno de los periodos de retorno analizados, considerando condiciones críticas en las cuales se presentan en simultáneo los eventos de precipitación con determinado periodo de retorno, se ejecutó tanto con polígonos de Thiessen como con el método de *kriging*, para la determinación del volumen promedio de precipitación en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez. Los Mapas 24 a 29 muestran la distribución espacial de la lluvia para cada periodo de retorno, obtenida mediante el método de *kriging*.



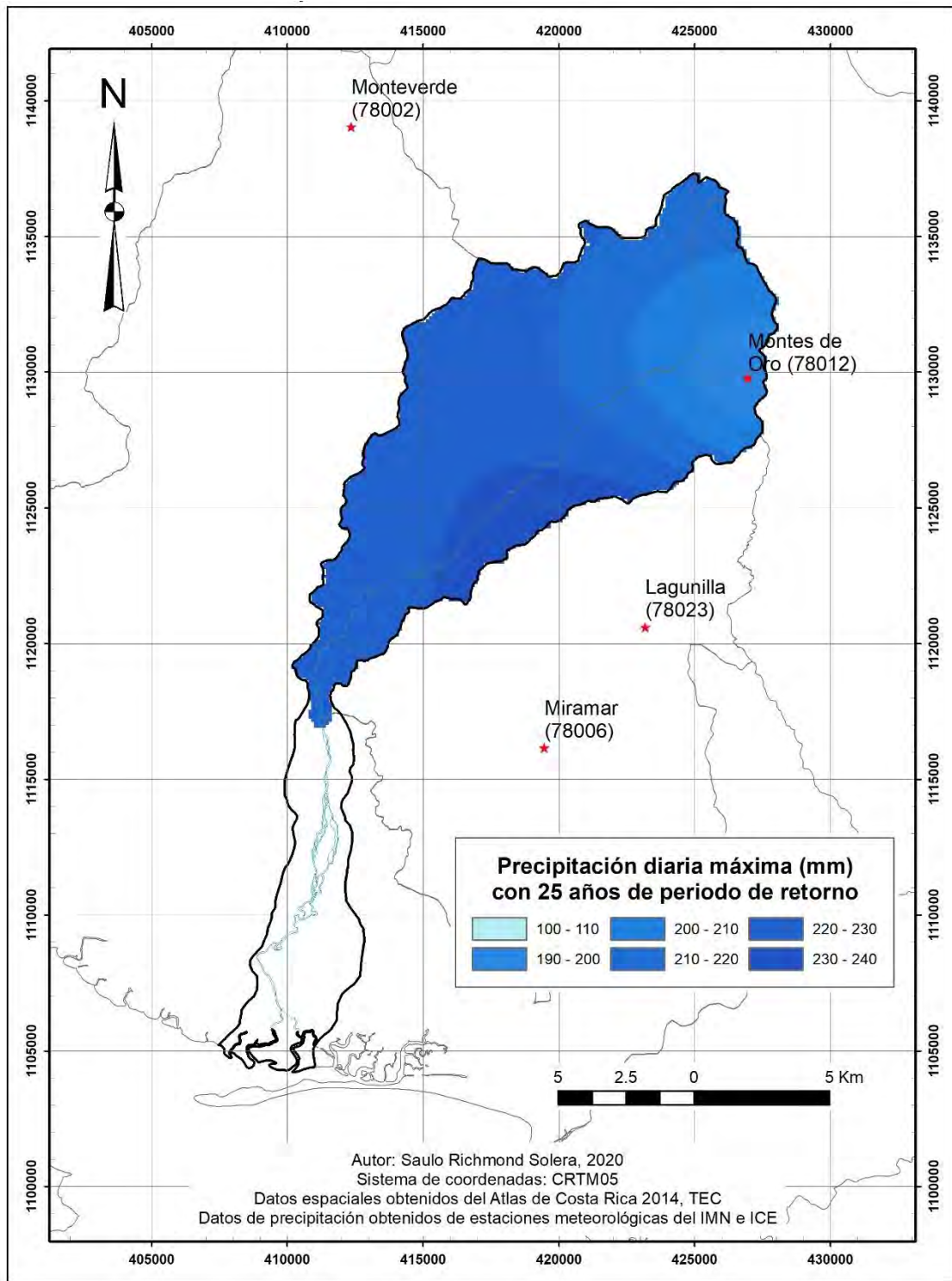
Mapa 24. Precipitación diaria máxima con 2 años de periodo de retorno en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez



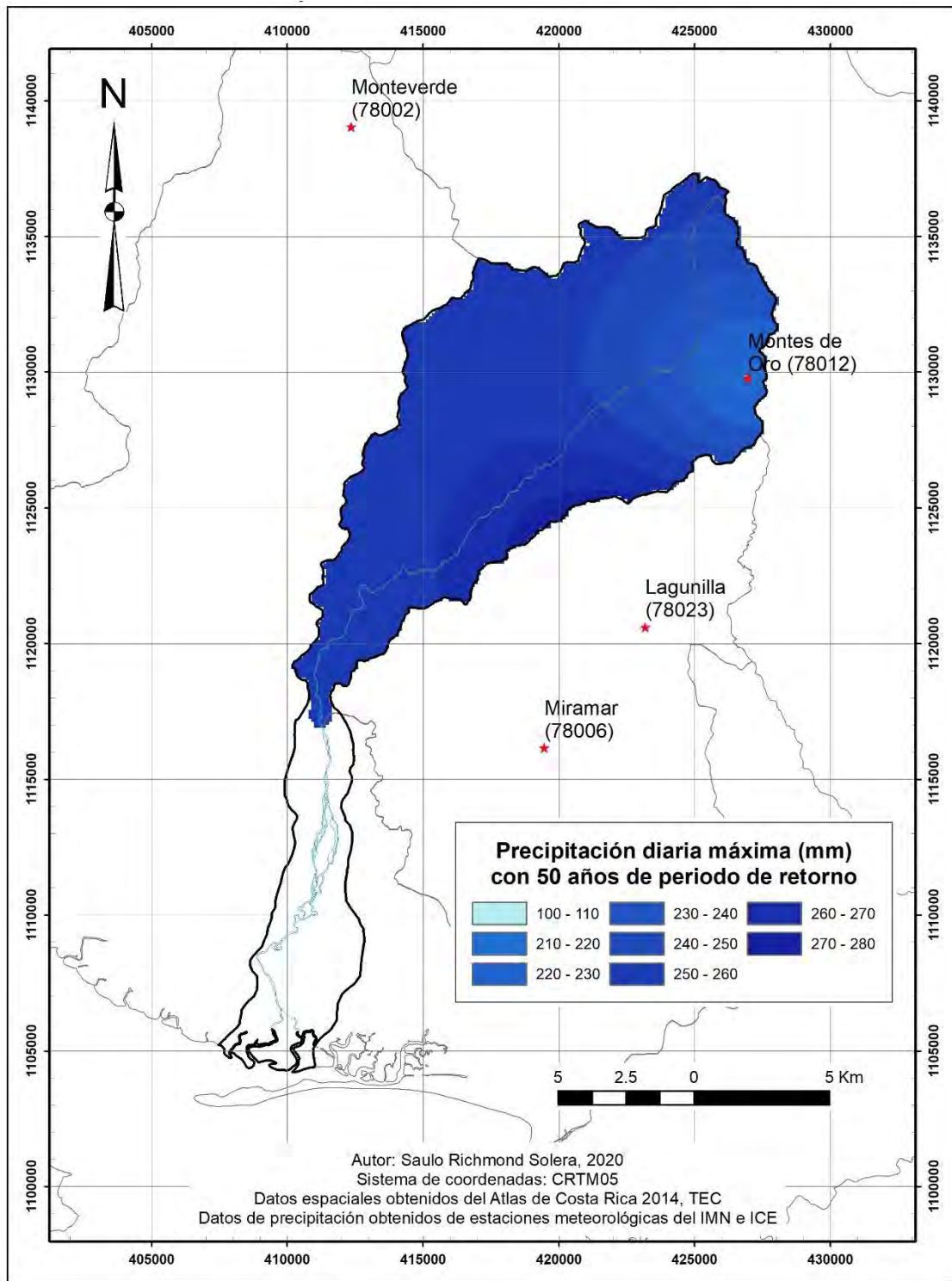
Mapa 25. Precipitación diaria máxima con 5 años de periodo de retorno en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez



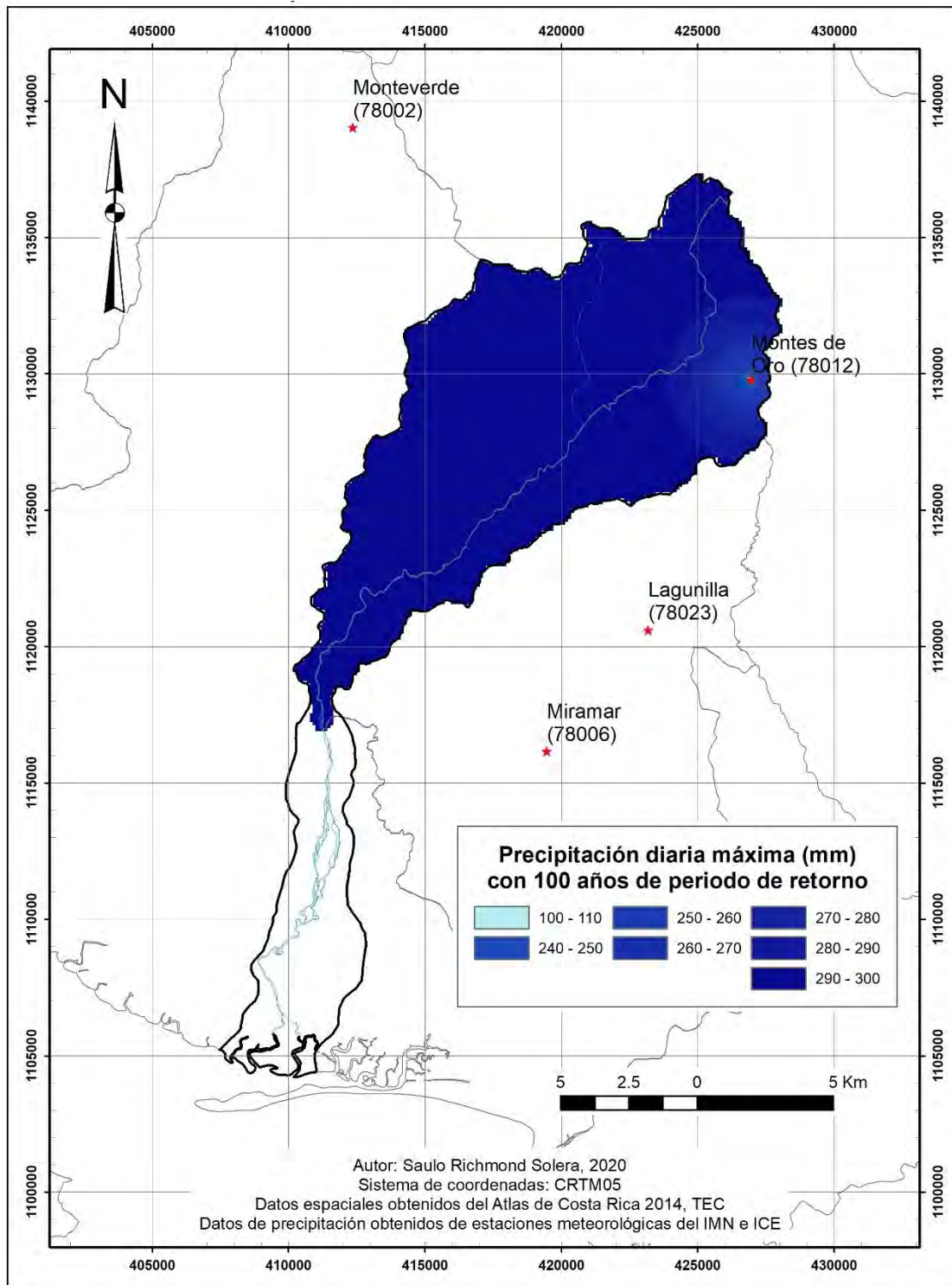
Mapa 26. Precipitación diaria máxima con 10 años de periodo de retorno en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez



Mapa 27. Precipitación diaria máxima con 25 años de periodo de retorno en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez



Mapa 28. Precipitación diaria máxima con 50 años de periodo de retorno en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez



Mapa 29. Precipitación diaria máxima con 100 años de periodo de retorno en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez

Las partes alta y media de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez abarcan un área de 156,49 km², la cual se divide en áreas de influencia de las estaciones 78002, 78006, 78012 y 78023, según la metodología de polígonos de Thiessen, de la siguiente manera.

Cuadro 28. Área de influencia de las estaciones meteorológicas en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez

Estación		Área de influencia (km²) según polígonos de Thiessen
Número	Nombre	
78002	Monteverde	15,644
78006	Miramar	23,769
78012	Montes de Oro	81,726
78023	Lagunilla	35,355

Con base en esta información y las estimaciones de precipitación diaria máxima, se calcularon los volúmenes promedio de precipitación diaria máxima en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, para cada periodo de retorno. Los resultados se muestran en el Cuadro 29, tanto los obtenidos con el método de polígonos de Thiessen como con el método de *kriging*, y la diferencia porcentual que se presentó entre ambos métodos, la cual se puede considerar como despreciable en el contexto de las incertidumbres de esta investigación.

Cuadro 29. Precipitación diaria máxima promedio en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, según periodo de retorno

Periodo de retorno (años)	Precipitación diaria máxima promedio (mm)		Diferencia porcentual (%)
	Thiessen	Kriging	
2	112,6	116,2	3,24
5	148,9	153,1	2,84
10	175,3	180,0	2,67
25	212,5	217,8	2,50
50	243,4	249,3	2,41
100	277,7	284,2	2,33

4.1.4 Distribución temporal de la lluvia

Si bien la distribución temporal de la lluvia varía de un sitio a otro en función de características físicas y condiciones climatológicas, de las cuatro estaciones meteorológicas consideradas en las partes alta y media de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez, únicamente se dispone de registros de distribución temporal en las estaciones 78002 (Monteverde) y 78012 (Montes de Oro).

Sin embargo, al igual que la estación Sarmiento antes descartada, la estación Monteverde se ubica en la cuenca hidrográfica del río Guacimal, relativamente alejada de la cuenca en estudio, por lo que se consideró la distribución temporal de la lluvia registrada en la estación 78012 como aquella representativa del área de drenaje.

El análisis de los registros de distribución temporal durante distintos eventos de precipitación que han generado afectación en la cuenca del río Aranjuez, permitió identificar un comportamiento fuera de lo común durante la tormenta Nate, en el año 2017. Los registros de precipitación diaria durante este evento en la estación 78012 llegaron incluso a superar el volumen estimado de precipitación diaria máxima para un periodo de retorno de 50 años, antes indicado en el Cuadro 27.

Por lo tanto, se determinaron dos distribuciones temporales de la lluvia: una asociada a eventos con periodo de retorno menor a 50 años y otra para eventos extraordinarios, cuyo periodo de retorno sea de 50 años o más.

En la Figura 19, se muestra el hietograma de precipitación característico para periodos de retorno menores a 50 años, donde el evento principal se registra en 4,5 horas y aproximadamente el 60% de la precipitación se da en 80 minutos.

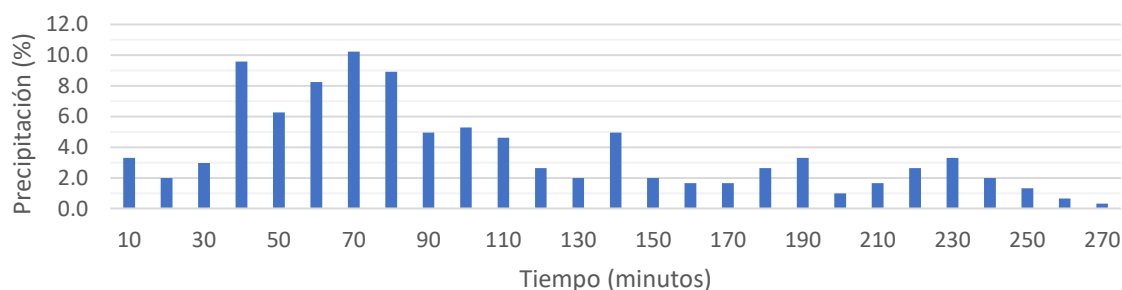


Figura 19. Hietograma de precipitación característico para periodos de retorno menores a 50 años

El registro de la tormenta Nate es mucho más amplio, siendo registrado el evento principal a lo largo de 33 horas, como se muestra en la Figura 20. Las mayores intensidades de precipitación se presentaron en un periodo de 7 horas hacia el final del evento principal, por lo que se consideró el hietograma de la Figura 21 como el hietograma de precipitación característico para periodos de retorno mayores a 50 años, que, además, se presentan tras varias horas de precipitación de menor intensidad.

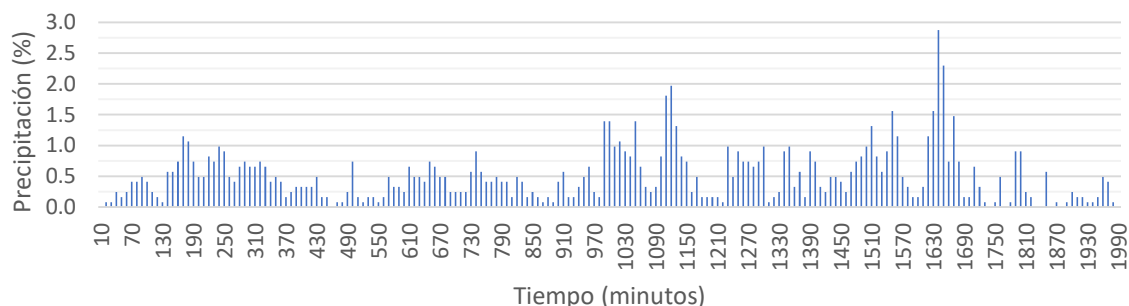


Figura 20. Hietograma de precipitación de la tormenta Nate

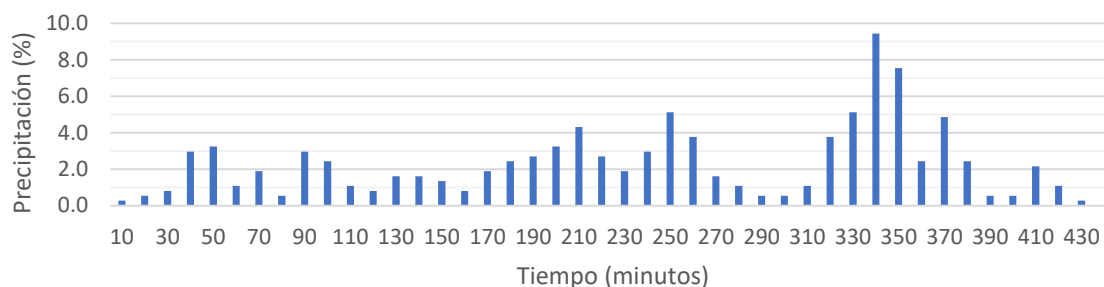


Figura 21. Hietograma de precipitación característico para periodos de retorno mayores a 50 años

4.2 Pérdidas de precipitación

El cálculo de las pérdidas de precipitación permite determinar la precipitación efectiva, que es el volumen de precipitación que se convertirá en escorrentía superficial y establece la relación lluvia-escorrentía.

El método de pérdidas de precipitación del SCS (NRCS) calcula la precipitación efectiva en función de la precipitación total y el almacenamiento potencial de la cuenca, siendo este último aproximado mediante el número de curva de escorrentía (CN). Como se mencionó en el apartado 2.2.3, la selección del número de curva depende del grupo hidrológico del

suelo (tipo de suelo), su uso y cobertura, la condición hidrológica superficial y las condiciones de humedad antecedente.

La caracterización de los suelos presentada en el apartado 3.4 permite asignar el grupo hidrológico C a los suelos de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez, que presentan, de manera general, una textura que va de moderadamente fina a fina, con horizontes argílicos, pero bien drenados, y suelos recientes producto de la erosión geológica en la zona montañosa y de la meteorización de sedimentos en la zona de llanura.

La parte baja de la cuenca presenta una dicotomía que se ve reflejada en el uso del suelo.

En su mitad superior, los suelos son muy susceptibles a la erosión, cuentan con poca profundidad efectiva y poco desarrollo de horizontes, además de una baja capacidad de retención de humedad y una sobresaturación que permanece luego del drenaje, en una zona de frecuentes inundaciones; se trata mayormente de entisoles, que conforman llanuras costeras de inundación con problemas graves de drenaje.

En su mitad inferior, los suelos son moderadamente susceptibles a la erosión, cuentan con texturas medias a moderadamente gruesas, con textura franca en superficie, pasando a textura franco limosa y finalmente arenosa en profundidad; se trata mayormente de inceptisoles, suelos recientes originados por la meteorización de sedimentos. Son suelos bien drenados y permeables, que coinciden con las zonas de mayor aprovechamiento en cultivos, sin embargo, presentan daños ocasionados por inundaciones y excesos de humedad.

En el Anexo 5, se presentan los volúmenes de precipitación diaria registrados durante eventos extremos que han generado afectación en la cuenca hidrográfica del río Aranjuez, de acuerdo con los registros de la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (Vallejos, Esquivel e Hidalgo, 2012, y Madrigal, 2018). Estos datos presentan un comportamiento variable en cuanto a la precipitación total acumulada en los días previos a cada tormenta e incluso presentan variabilidad para una misma tormenta en las diferentes estaciones meteorológicas.

Sin embargo, la tendencia promedio es hacia una condición de humedad antecedente AMC II, condición que se consideró para eventos con periodo de retorno menor a 50 años. Para eventos extraordinarios, cuyo periodo de retorno sea de 50 años o más, se consideró una

condición de humedad antecedente AMC III, dado que así se manifestó durante la tormenta Nate.

Considerando grupo hidrológico C para los suelos de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez, así como su uso, cobertura y condición hidrológica superficial, se seleccionó el número de curva y se obtuvo el ponderado representativo de toda el área de drenaje.

Cuadro 30. Cálculo del número de curva para la cuenca del río Aranjuez

Uso	Condición hidrológica	Número de curva	Área (km²)
Bosque	Regular	73	116,08
Pastos con árboles dispersos	Regular, curvas de nivel	75	30,87
Pastos	Mala, curvas de nivel	81	22,95
Cultivos	Mala, curvas de nivel	82	15,17
Suelo desnudo	Mala	88	1,69
Residencial		90	0,24

Estos cálculos fueron realizados considerando toda el área de la cuenca, sin embargo, el resultado obtenido al considerar únicamente las partes alta y media de la cuenca es el mismo. Como resultado de la ponderación, se obtuvo un número de curva 75 para la condición de humedad antecedente AMC II. Para la condición de humedad antecedente AMC III el número de curva es 87.

Pese a la amplia cobertura boscosa, se determinó que la condición hidrológica es regular en bosques y pastos con árboles dispersos, debido a la alta susceptibilidad a la erosión que presentan los suelos en las partes alta y media de la cuenca, lo cual se ha manifestado en varias ocasiones a través de deslizamientos y derrumbes. Esta misma situación se tomó en cuenta para determinar que la condición hidrológica en pastos y cultivos es mala.

Con base en los resultados anteriores, se calcularon los volúmenes de precipitación efectiva y de pérdidas de precipitación, asociados a los volúmenes promedio de precipitación diaria máxima en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, para cada periodo de retorno.

Cuadro 31. Precipitación efectiva y pérdidas de precipitación en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, según periodo de retorno

Periodo de retorno (años)	P total (mm)	CN	P efectiva (mm)	Pérdidas (mm)
2	116,2	75	53,6	62,6
5	153,1	75	84,0	69,1
10	180,0	75	107,3	72,7
25	217,8	75	141,3	76,5
50	249,3	87	208,9	40,4
100	284,2	87	243,2	41,0

4.3 Hidrograma unitario sintético de Snyder

Para generar el hidrograma unitario sintético de Snyder se requiere de los coeficientes C_t y C_p , los cuales responden a las características propias de cada cuenca.

El coeficiente C_t está relacionado con el tiempo que transcurre entre el centroide del hidrograma de precipitación efectiva y el centroide del hidrograma de respuesta, es decir, el tiempo de respuesta de la cuenca ante un determinado evento de precipitación. Este coeficiente fue aproximado de tres maneras distintas para seleccionar un valor suficientemente representativo.

Primeramente, se analizaron las características de las partes alta y media de la cuenca y el efecto que estas pueden tener en la respuesta a eventos de precipitación.

- El coeficiente de compacidad o índice de Gravelius obtenido indica que se trata de una cuenca de forma alargada, de la que se esperaría una respuesta lenta.
- Las pendientes en la cuenca son pronunciadas, tanto en las laderas como en el cauce, y así lo demuestra el índice de pendiente, lo cual resulta en una respuesta rápida.
- El orden de la red hídrica y la densidad de drenaje representan un valor intermedio, asociado a una respuesta media.
- La textura de los suelos, en general, se relaciona con una baja permeabilidad y esta a su vez con una respuesta rápida.
- El uso del suelo es principalmente de bosques y pastos, que se asocian con condiciones de intercepción causantes de una respuesta lenta.

Se decidió dar mayor peso en la decisión a las pendientes pronunciadas, que, junto con la baja permeabilidad y la susceptibilidad a la erosión de los suelos, pese a su cobertura vegetal, daría como resultado una respuesta rápida de la cuenca ante eventos de precipitación. Teniendo en cuenta que se han registrado valores de C_t hasta de 0,3 en cuencas montañosas de pendiente pronunciada, se seleccionó un valor de 0,5 para este coeficiente, con el cual se calculó el tiempo de retardo.

$$t_p = C_1 \cdot C_t \cdot (L \cdot L_c)^{0,3}$$

$$t_p = 0,75 \cdot 0,5 \cdot (30,32 \cdot 17,75)^{0,3} = 2,47 \text{ horas}$$

En segunda instancia, se calculó un aproximado del tiempo de viaje promedio del flujo superficial, tomando como punto de partida el centroide de la cuenca.

De acuerdo con Chow (1994, pp. 159-160), el caudal por unidad de ancho de un flujo superficial permanente sobre un plano uniforme, está dado por la siguiente ecuación:

$$q_0 = (i - f) \cdot L_0 \cdot \cos(\theta) \quad (48)$$

Donde i es la intensidad de la lluvia, f es la tasa de infiltración, L_0 es la longitud del recorrido y θ es el ángulo de inclinación del plano con respecto a la horizontal, con pendiente $S_0 = \tan(\theta)$.

Considerando una intensidad de 1 in/h, una tasa de infiltración nula (0 in/h), la distancia del centroide de la cuenca al cauce principal (1,3 km) y la pendiente promedio de las laderas (47%), se obtuvo un caudal por unidad de ancho de 0,08935 ft²/s.

Con este caudal y la viscosidad cinemática del agua ($\nu = 1,2 \times 10^{-5}$ ft²/s), se obtuvo el número de Reynolds de la siguiente manera:

$$Re = \frac{4 \cdot q_0}{\nu} = 29784 \quad (49)$$

De donde se define que el flujo es turbulento. Bajo esta condición, la ecuación de Manning es aplicable para describir el flujo (Chow, 1994, p. 162), en la cual se puede aproximar el radio hidráulico como igual a la profundidad y , por lo tanto:

$$y = \left(\frac{n \cdot q_0}{1,49 \cdot S_0^{1/2}} \right)^{3/5} \quad (50)$$

Considerando nuevamente la pendiente promedio de las laderas y un valor supuesto de 0,08 para el coeficiente n de Manning (valor usual en terreno natural con vegetación abundante), se obtuvo una profundidad de 0,6112 in.

La ecuación de continuidad establece que el caudal es igual al producto de la velocidad por el área de la sección transversal, que en este caso tiene un ancho unitario, por consiguiente:

$$V = \frac{q_0}{y} = 1,7544 \text{ ft/s} \quad (51)$$

De manera simplificada, la velocidad es la razón de la distancia entre el tiempo, de manera que el tiempo promedio de flujo superficial hacia el cauce es de:

$$t = \frac{L_0}{V} = 0,6753 \text{ horas} \quad (52)$$

Ahora, suponiendo 2 m de profundidad promedio en el cauce durante una crecida, un ancho unitario y un valor de 0,04 para el coeficiente n de Manning (valor usual en corrientes naturales montañosas de laderas empinadas y sin vegetación en el cauce), la ecuación de Manning permite obtener una velocidad de flujo en el cauce de 2,259 m/s. Con base en esta velocidad y la distancia de recorrido en el cauce desde el centroide de la cuenca hasta el punto de control (17,75 km), se obtuvo un tiempo de 2,183 horas.

En total, el tiempo de viaje promedio del flujo superficial es de 2,858 horas, que representa una variación menor al 16% con respecto al tiempo de retardo antes calculado.

Finalmente, se calculó el tiempo de retardo por medio de la ecuación del SCS (NRCS) (Chow, 1994, p. 514). La ecuación requiere de la longitud del cauce principal, en pies (30,32 km);

la pendiente promedio del terreno, en porcentaje (47%); y el número de curva. Se utilizó el número de curva 87, obtenido para condición de humedad antecedente AMC III, debido a que en el cálculo anterior se supuso una tasa de infiltración nula.

$$t = \frac{100 \cdot L^{0,8} \cdot \left[\frac{1000}{CN} - 9 \right]^{0,7}}{1900 \cdot S^{0,5}} \quad (53)$$

$$t = 144,959 \text{ minutos} = 2,416 \text{ horas}$$

Este tiempo representa una variación menor al 3% con respecto al tiempo de retardo antes calculado.

En conclusión, el valor de 0,5 es una buena aproximación del coeficiente C_t para las partes alta y media de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez, cuyo tiempo de retardo es de aproximadamente 2,5 horas.

El coeficiente C_p está relacionado con el caudal pico del hidrograma de respuesta, es decir, el máximo caudal que produce la cuenca ante un determinado evento de precipitación. Este caudal depende del tiempo de respuesta de la cuenca, por lo que C_p se relaciona con C_t y, de formar similar a este último, depende de características físicas de la cuenca, como su forma, pendientes, red hídrica, tipo y uso del suelo.

Considerando que el uso del suelo es mayoritariamente de bosques y pastos, se favorece la interceptación, reduciendo el caudal. Sin embargo, como se mencionó al seleccionar el número de curva, la condición hidrológica de los suelos es de regular a mala, por su alta susceptibilidad a la erosión. Se seleccionó entonces un valor intermedio de 0,5 para el coeficiente C_p , como aproximación.

La validación de los coeficientes seleccionados se concretó con la creciente asociada a eventos de precipitación con 2 años de periodo de retorno, bajo el supuesto empírico de que esta creciente es aquella que llena el cauce hasta el nivel de banco, sin provocar inundaciones.

4.4 Modelo hidrológico

De acuerdo con lo que se ha planteado anteriormente, se generaron dos modelos hidrológicos: un primer modelo para dar solución a los hidrogramas de creciente como respuesta a los eventos de precipitación estimados para 2, 5, 10 y 25 años de periodo de retorno y un segundo modelo para los hidrogramas de creciente en respuesta a los eventos de precipitación estimados para 50 y 100 años de periodo de retorno.

4.4.1 Parámetros del modelo

El modelo de cuenca se definió como el área de las partes alta y media de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez, 156,49 km². Se utilizó el método de número de curva de escorrentía del SCS (NRCS), como método de pérdidas de precipitación, considerando un número de curva 75 para los periodos de retorno de 2, 5, 10 y 25 años, y un número de curva 87 para los periodos de retorno de 50 y 100 años. Se utilizó el método del hidrograma unitario sintético de Snyder, como método de transformación de precipitación a caudal, considerando un tiempo de retardo de 2,5 horas y un coeficiente al pico (C_p) de 0,5, según fueron aproximados anteriormente.

Para la definición de la cantidad de precipitación, en los modelos meteorológicos se incorporaron los volúmenes de precipitación diaria máxima promedio, estimados mediante el método de interpolación *kriging* y mostrados en el Cuadro 29, mientras que la distribución temporal de la lluvia se basó en los registros de la estación 78012 (Montes de Oro), según los hietogramas característicos de la Figura 19 y Figura 21.

4.4.2 Hidrogramas de crecientes

A continuación, se presentan los hidrogramas de crecientes debido a eventos de precipitación con 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años de periodos de retorno, en las partes alta y media de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez.

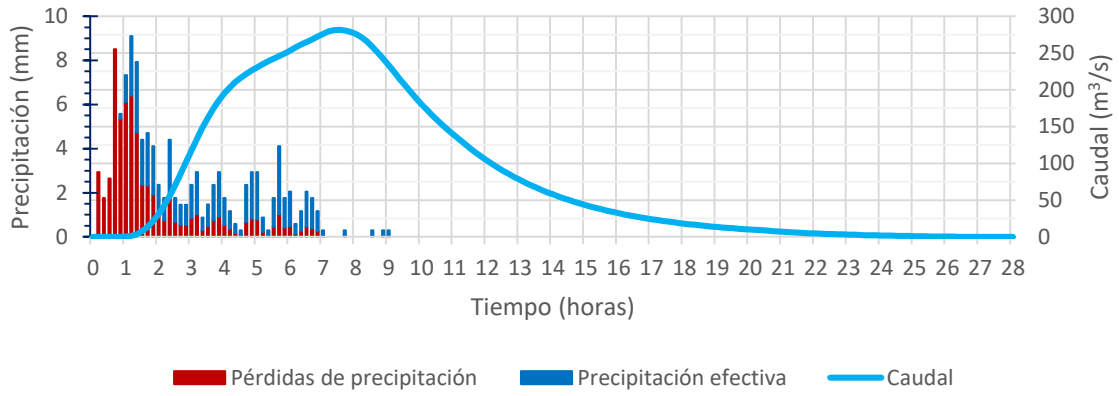


Figura 22. Hietograma e hidrograma de las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, producto de un evento de precipitación con periodo de retorno de 2 años

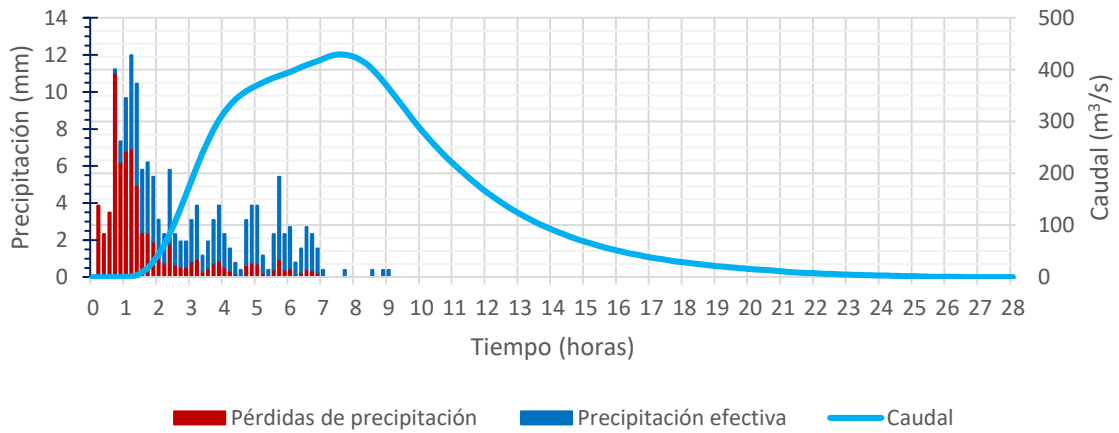


Figura 23. Hietograma e hidrograma de las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, producto de un evento de precipitación con periodo de retorno de 5 años

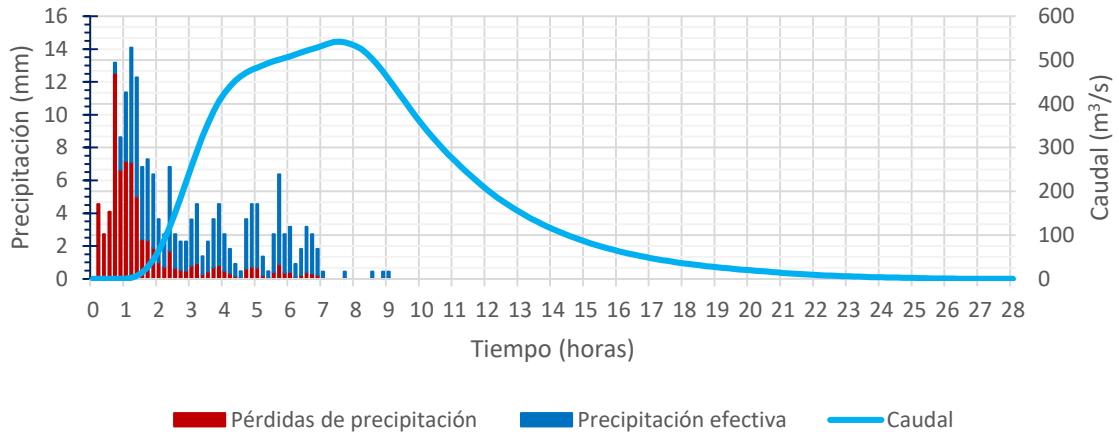


Figura 24. Hietograma e hidrograma de las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, producto de un evento de precipitación con periodo de retorno de 10 años

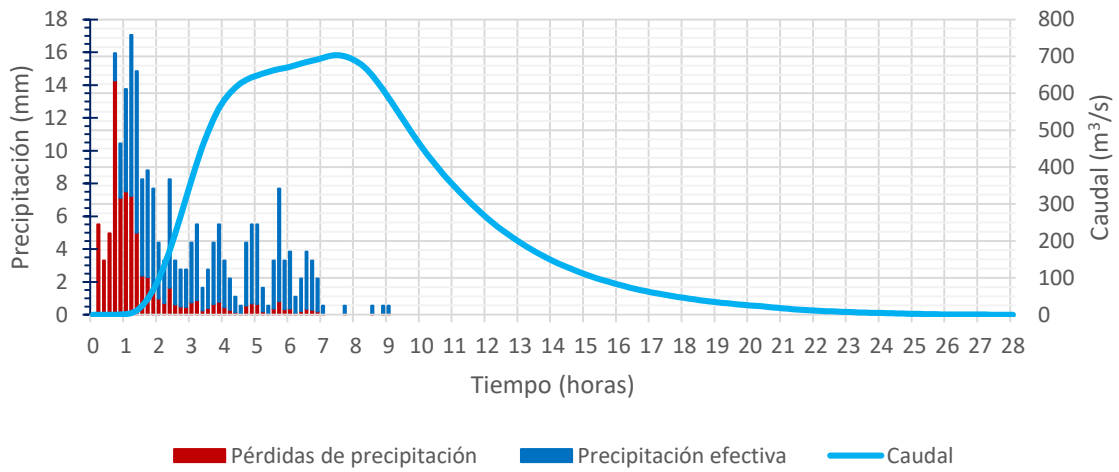


Figura 25. Hietograma e hidrograma de las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, producto de un evento de precipitación con periodo de retorno de 25 años

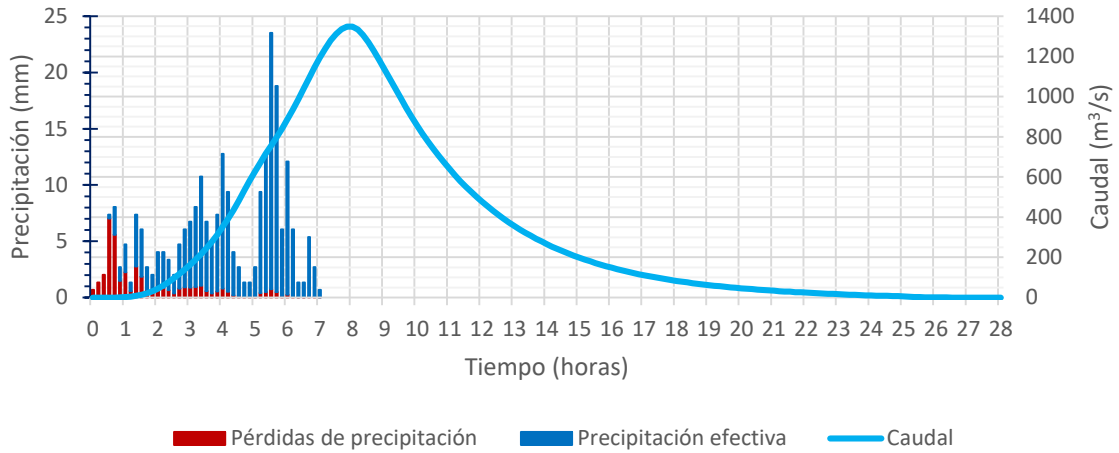


Figura 26. Hietograma e hidrograma de las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, producto de un evento de precipitación con periodo de retorno de 50 años

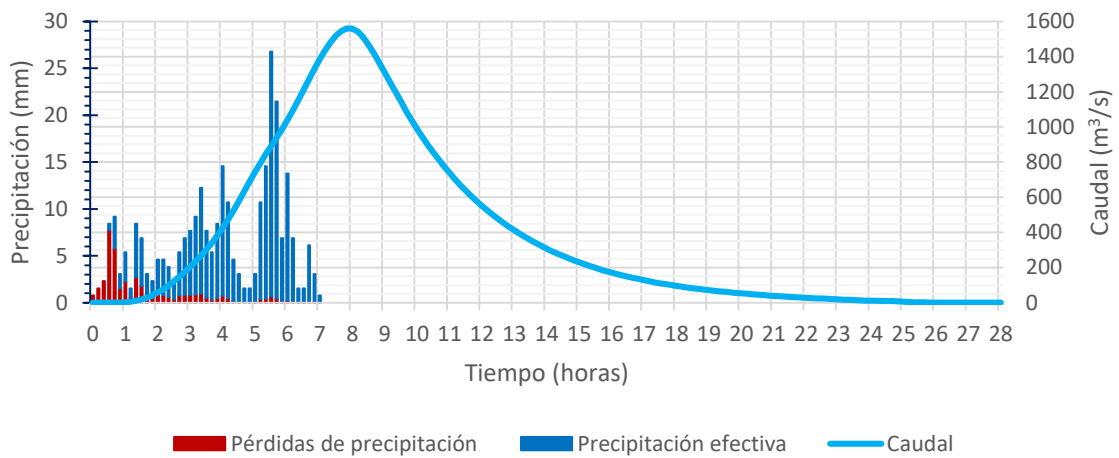


Figura 27. Hietograma e hidrograma de las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, producto de un evento de precipitación con periodo de retorno de 100 años

Los resultados del modelo hidrológico se resumen en el Cuadro 32. Para cada periodo de retorno se presenta precipitación total, número de curva (CN), precipitación efectiva, pérdidas de precipitación y caudal pico.

Cuadro 32. Precipitación efectiva y caudal pico según periodo de retorno, en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez

Periodo de retorno (años)	P total (mm)	CN	P efectiva (mm)	Pérdidas (mm)	Caudal pico (m ³ /s)
2	116,2	75	53,6	62,6	281,5
5	153,1	75	84,0	69,1	429,7
10	180,0	75	107,3	72,7	542,0
25	217,8	75	141,3	76,5	703,1
50	249,3	87	208,9	40,4	1348,7
100	284,2	87	243,2	41,0	1560,1

Adicionalmente, con base en los volúmenes de precipitación diaria registrados durante la tormenta Nate, presentados en el Cuadro 24, se obtuvo el volumen promedio de precipitación diaria en las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez provocado por este evento extraordinario (212,3 mm), así como los volúmenes de precipitación efectiva (172,7 mm) y de pérdidas de precipitación (39,6 mm), considerando un número de curva 87 por su condición de humedad antecedente (AMC III).

Teniendo en cuenta que el hietograma de precipitación característico de la Figura 21 corresponde a la distribución temporal de la lluvia registrada en la estación 78012 durante la tormenta Nate, se generó el hidrograma de creciente de este evento, mostrado en la Figura 28, cuyo caudal pico fue de 1125,0 m³/s.

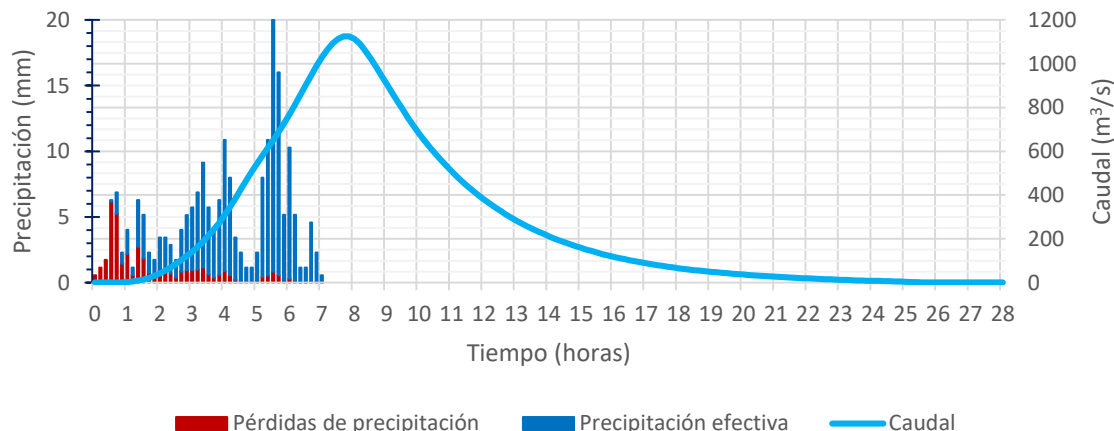


Figura 28. Hietograma e hidrograma de las partes alta y media de la cuenca del río Aranjuez, producto de la precipitación provocada por la tormenta Nate

Pese a la magnitud de la tormenta Nate en cuanto a los volúmenes de precipitación diaria registrados en las partes alta y baja de la cuenca del río Aranjuez, al incluir en el volumen promedio de precipitación diaria únicamente los registros de las partes alta y media de la cuenca, este terminó por generar un hidrograma con un caudal pico menor al aproximado para un periodo de retorno de 50 años. Sin embargo, se debe recordar que las estimaciones resumidas en el Cuadro 32 corresponden a condiciones críticas de eventos extremos con igual periodo de retorno que ocurren de forma simultánea y que, desde luego, generarán crecientes mayores.

5. Modelado hidráulico

Iber es un modelo matemático bidimensional para la simulación numérica de flujo en ríos y estuarios, desarrollado en conjunto por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA), el Instituto Flumen y el Centro Internacional para Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), con la colaboración del Gobierno de España.

El modelado hidráulico depende de una gran cantidad de información base para su correcta ejecución, como lo es el detalle de la topografía del cauce y su entorno, el uso del suelo y su rugosidad característica, la ubicación y caracterización de estructuras hidráulicas y los resultados obtenidos del modelado hidrológico, además de los parámetros propios del modelado.

5.1 Modelo de elevación digital

El modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) presentado anteriormente en la caracterización de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez (Mapa 2), fue generado a partir de las curvas de nivel de la cartografía del IGN en escala 1:25000, con un intervalo entre curvas de 10 m. Este intervalo de curvas de nivel tiene limitaciones en la representación de grandes espacios de topografía plana, como lo son las planicies de inundación en la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, debido a que no permite identificar los cambios que pueda presentar la superficie y supone un plano de pendiente constante entre curvas de nivel ampliamente espaciadas en horizontal.

Por lo tanto, para cumplir con el objetivo de realizar el tránsito hidráulico de las crecientes estimadas para cada periodo de retorno, sobre las planicies de inundación de la cuenca del río Aranjuez, y poder identificar con esto las zonas inundables, se requirió de otros insumos que describiesen la topografía de esta área con mayor detalle. Para esto, se realizaron vuelos fotogramétricos con vehículo aéreo no tripulado (VANT), siguiendo el cauce del río tras su paso por el puente sobre la Ruta Nacional 1, que a su vez se complementaron con levantamientos topográficos de secciones transversales aguas arriba y aguas abajo de dicho puente, para una definición más precisa del cauce en dicho sitio.

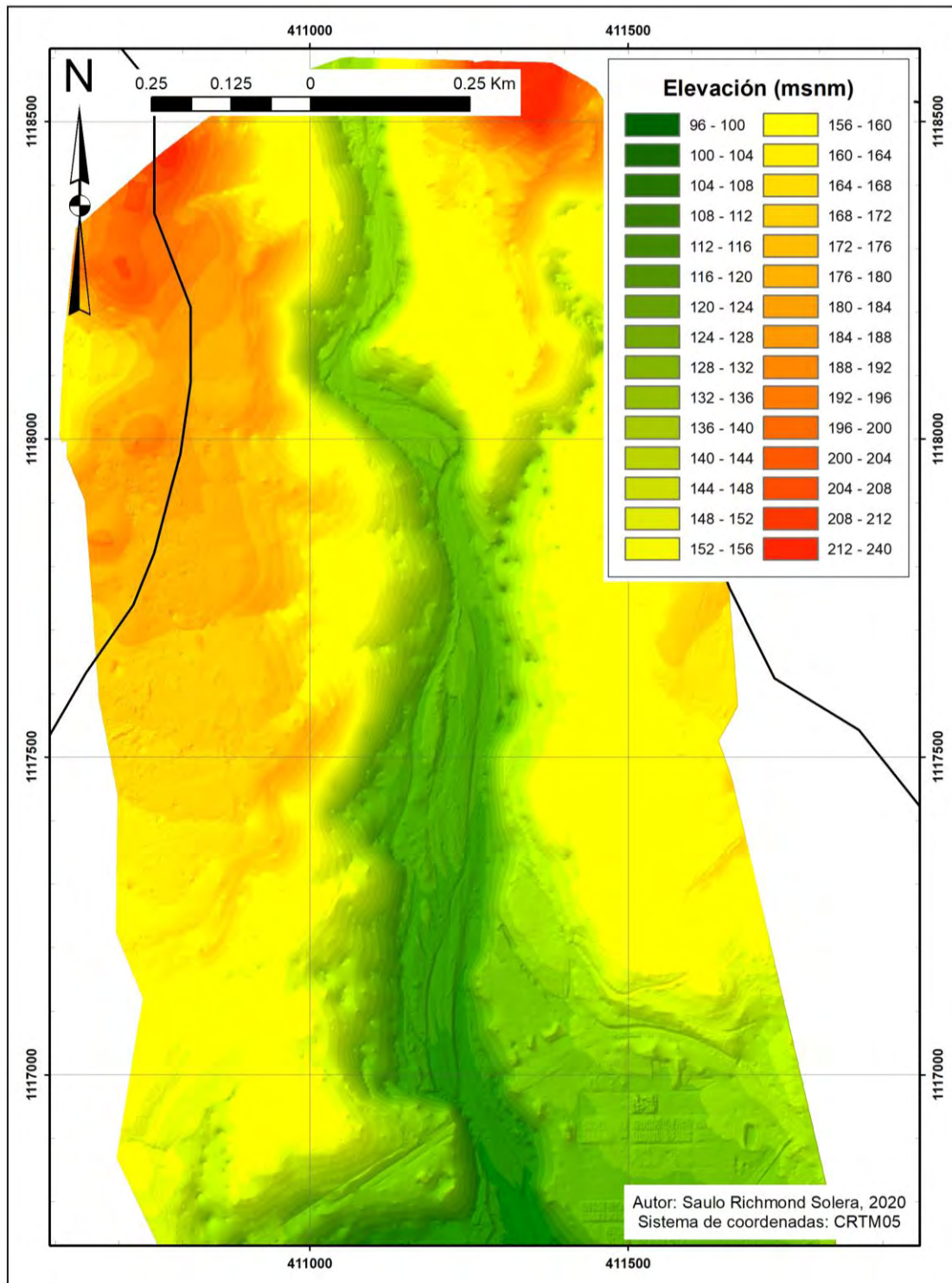
Los vuelos fotogramétricos fueron realizados por la empresa Geotecnologías, en coordinación con la empresa Fermat Ingeniería, con financiamiento por parte de la Comisión

Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) y el Centro de Investigación y Estudios para el Desarrollo Sostenible (CIEDES-UCR). Se utilizó un VANT de ala fija WingtraOne con tecnología VTOL; sobre un área de aproximadamente 8 km², en una franja de 1 km de ancho centrada en el cauce del río Aranjuez y con una extensión cercana a los 8 km, obteniendo una precisión de 3,5 cm en el levantamiento.

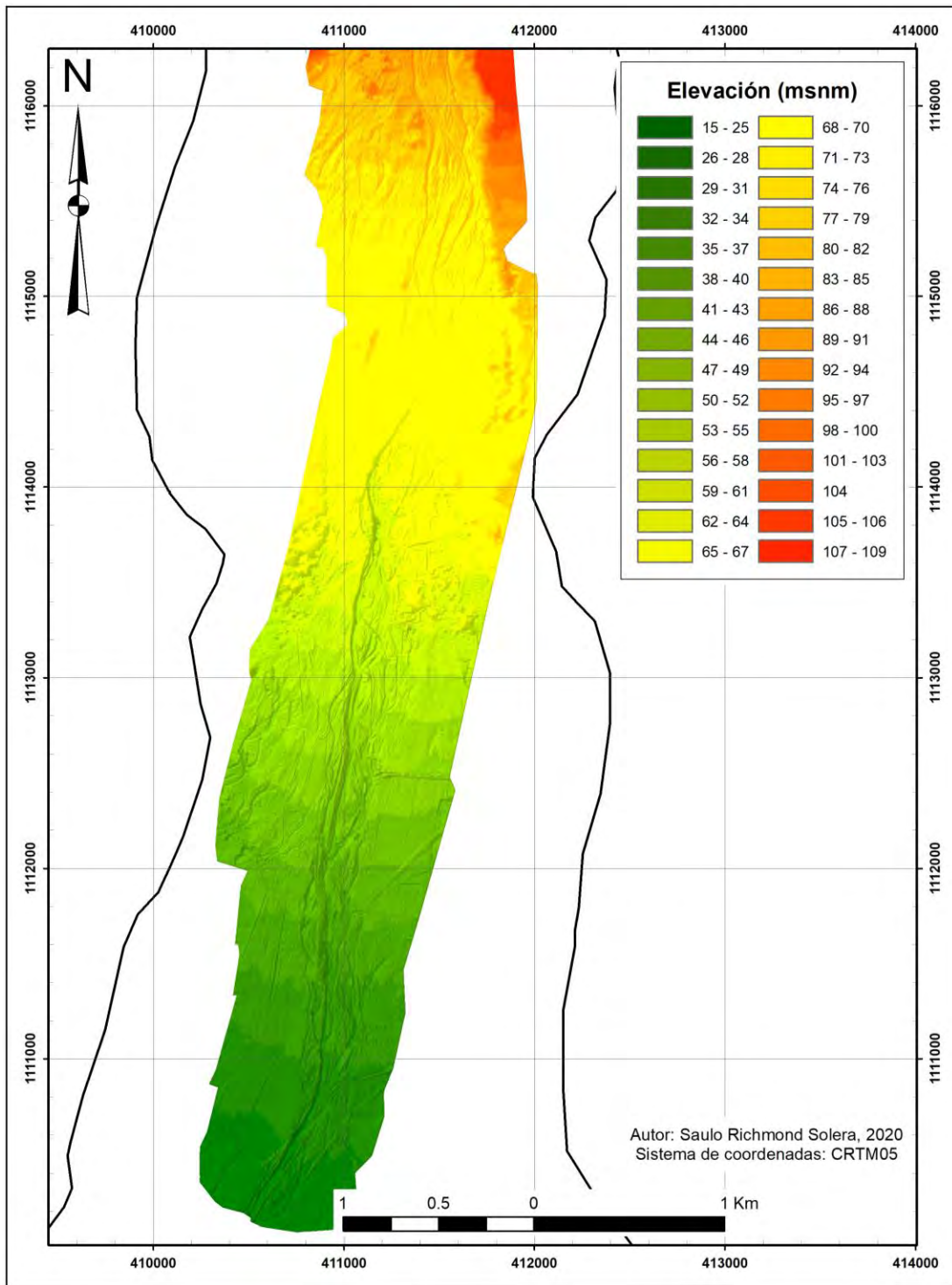
Como productos de los vuelos fotogramétricos se obtuvieron mosaicos de fotografías aéreas georreferenciadas y ortorectificadas (ortofotos) con una resolución de 5 cm/píxel y una nube de puntos cercana a los 207 millones de puntos, espaciados a cada 30 cm, a partir de los cuales se generaron el modelo digital de superficie y el modelo digital de terreno (DSM y DTM, respectivamente, por sus siglas en inglés), conformados por celdas de 30 cm x 30 cm. El DTM es el modelo que brinda una mejor definición al DEM general de toda la cuenca, en la zona específica de análisis. El Mapa 30 muestra la sección del DTM ubicada aguas arriba del puente sobre la Ruta Nacional 1, mientras que el Mapa 31 muestra la sección ubicada aguas abajo.

Adicionalmente, el DTM permitió crear curvas de nivel con intervalos menores, cada 5, 2 y 1 m, siendo incluso posible crear curvas de nivel a cada 0,5 m, por la calidad del levantamiento en cuanto a definición y precisión. En el Anexo 6, se muestran, como referencia visual, algunos de los productos obtenidos de los vuelos fotogramétricos.

El levantamiento topográfico de secciones transversales aguas arriba y aguas abajo del puente sobre la Ruta Nacional 1 permitió tener una definición del cauce aún mejor en el entorno del puente, como estructura hidráulica que interviene en el flujo mediante sus dos pilas y los rellenos de aproximación en los que se cimientan sus bastiones. Esta labor fue realizada mediante la metodología GNSS RTK, con la colaboración de la empresa Fermat Ingeniería, empleando receptores satelitales Reach RS2 de la marca Emlid, cuya precisión en esta metodología es de 7 mm + 1 ppm en horizontal y 14 mm + 1 ppm en vertical. Algunas imágenes asociadas con este levantamiento se muestran en el Anexo 7.



Mapa 30. Modelo digital de terreno obtenido mediante vuelos fotogramétricos, sección ubicada aguas arriba del puente sobre la Ruta Nacional 1



Mapa 31. Modelo digital de terreno obtenido mediante vuelos fotogramétricos, sección ubicada aguas abajo del puente sobre la Ruta Nacional 1

5.2 Cobertura del suelo y coeficiente de rugosidad

Con base en las ortofotos producidas como parte de los vuelos fotogramétricos y las ortofotos del IGN disponibles en el SNIT, se realizó un proceso de fotointerpretación para generar un mapa de cobertura del suelo (Mapa 32), de manera que fuese posible asignar un coeficiente de rugosidad de Manning a cada área, en función de su cobertura.

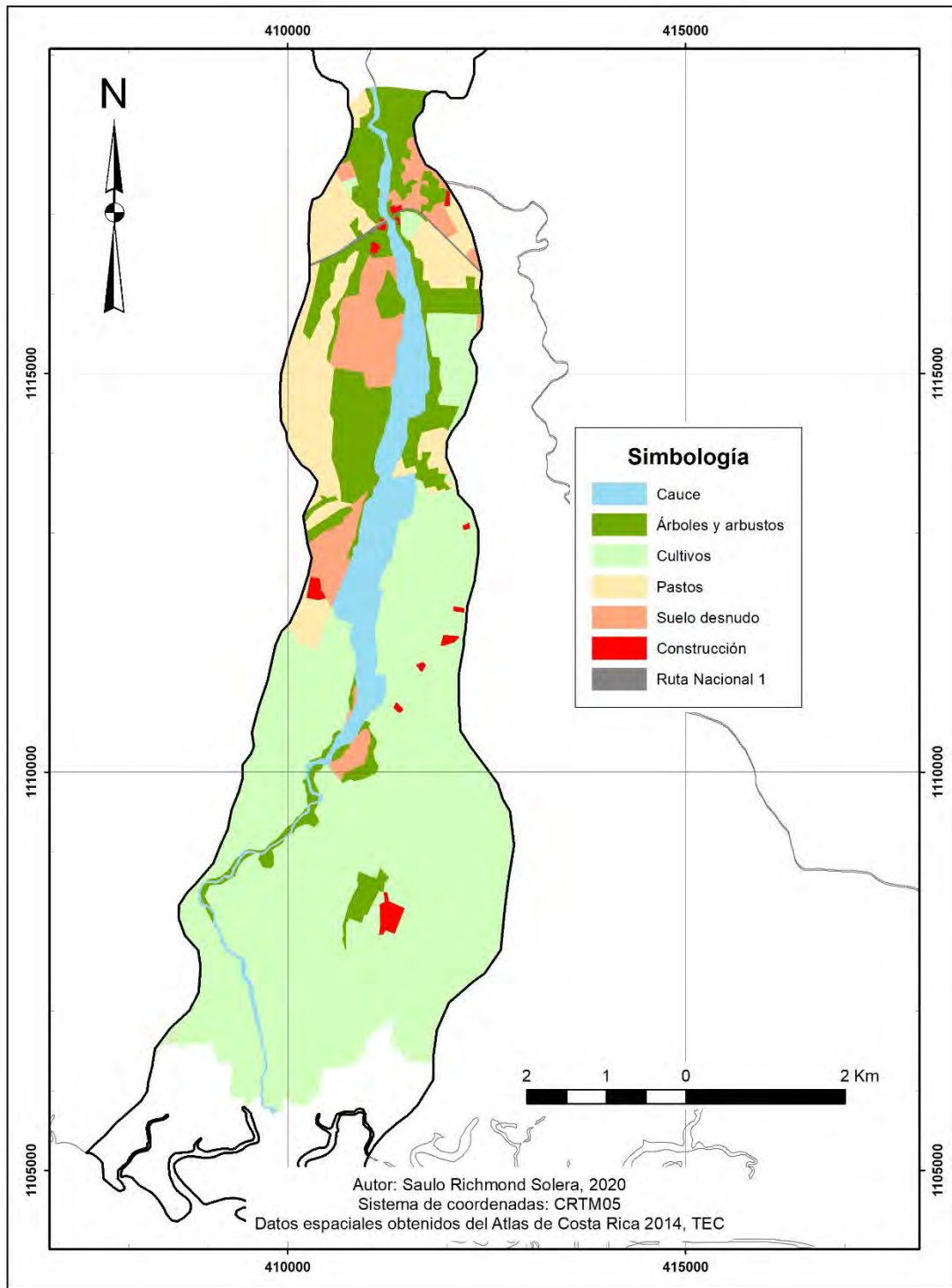
De acuerdo con Chow (1994-b, p. 111), para cauces naturales cuyo ancho superficial durante crecientes sea mayor a 30 m, con sección irregular y rugosa, el coeficiente de rugosidad varía entre 0,035 y 0,100, siendo menor que el que se presenta en cauces menores con condiciones similares, debido a la resistencia menos efectiva que ofrecen los bancos. Un cauce natural en planicie, cuyo ancho superficial durante crecientes sea menor a 30 m, con algunos pozos, bancos de arena, matorrales y piedras, presenta un coeficiente de rugosidad que varía entre 0,035 y 0,050, siendo 0,045 el valor usual.

En planicies de inundación, las zonas con árboles y poco crecimiento de matorrales presentan un coeficiente de rugosidad de 0,100, siempre que el nivel del agua se mantenga por debajo de las ramas, pero cuando el nivel del agua alcanza las ramas, el coeficiente de rugosidad cambia a 0,120. Se consideró una altura del agua mayor a 2 m como aquella que alcanza las ramas de los árboles.

La asignación del coeficiente de rugosidad según el tipo de cobertura se presenta en el Cuadro 33.

Cuadro 33. Coeficiente de rugosidad según cobertura del suelo

Cobertura del suelo	Coeficiente de rugosidad n ($s/m^{1/3}$)
Cauce	0,040
Árboles y arbustos	0,100 / 0,120
Pastos	0,035
Cultivos	0,035
Suelo desnudo	0,030
Construcción	0,150
Ruta Nacional 1 (asfalto)	0,016



Mapa 32. Cobertura del suelo en la parte baja de la cuenca del río Aranjuez

5.3 Estructuras hidráulicas

Como estructura hidráulica se consideró el puente sobre la Ruta Nacional 1, con una longitud cercana a los 106 m. Con base en los resultados de los vuelos fotogramétricos y los levantamientos de secciones transversales, se definió una altura promedio del tablero cercana a los 15 m, el cual es soportado por una cercha con una altura que va desde los 10 m en su apoyo en las pilas hasta los 11 m en el centro de su luz, alturas medidas desde el fondo del cauce.

El relleno de aproximación en la margen derecha estrangula el cauce de forma importante, como se observa en el modelo digital de terreno obtenido mediante vuelos fotogramétricos (extremo sur del Mapa 30). Además, el levantamiento de secciones transversales permitió ubicar las dos pilas del puente, de sección rectangular de 1,65 m de ancho por 7,30 m de largo y una altura de aproximadamente 10 m. Algunos detalles de la configuración del puente sobre la Ruta Nacional 1 se pueden apreciar en la Figura 29.



Figura 29. Puente sobre la Ruta Nacional 1

5.4 Parámetros del modelo Iber

Debido a la irregular geometría que caracteriza a los ríos, es deseable que la malla de cálculo sea irregular para minimizar el número de elementos con transiciones suaves. Si el terreno forma una superficie suficientemente suave, es posible utilizar el MDT como una única superficie, que será considerada por Iber como una entidad NURBS (*Non Uniform Rational B-Splines*) y puede ofrecer mallas de buena calidad.

Sin embargo, si el terreno tiene irregularidades importantes, la aproximación puede resultar inadecuada y se pueden producir errores en el mallado. Para estos casos, Iber utiliza la metodología de creación de geometrías en formato de red irregular de triángulos rectángulos (RTIN, por sus siglas en inglés), que permite obtener mallas de gran calidad y robustez, aunque con presencia de direcciones dominantes. Por último, una vez creada la malla de cálculo, se puede modificar la cota de los nodos de los elementos de la malla a partir del MDT. (Bladé et al., 2014, p. 4)

Se utilizó un tamaño de malla de 10 m dentro del cauce y de 60 m fuera de este.

Además de la geometría, el modelo requiere, como parámetros de entrada, la asignación de coeficientes de rugosidad a los elementos de la malla de cálculo y la definición de condiciones de contorno y condiciones iniciales.

La entrada de los hidrogramas de creciente al modelo de elevación digital se definió como una entrada de caudal en flujo subcrítico. Una entrada subcrítica se consideró válida para este modelo por tratarse de un tramo del río ubicado en planicie, donde las pendientes bajas favorecen un régimen de flujo mayoritariamente subcrítico. De igual forma, se utilizó una condición de salida en flujo subcrítico. En cuanto a las condiciones iniciales, se fijó una profundidad inicial de agua de 0 m dentro de toda el área de estudio.

6. Zonas inundables

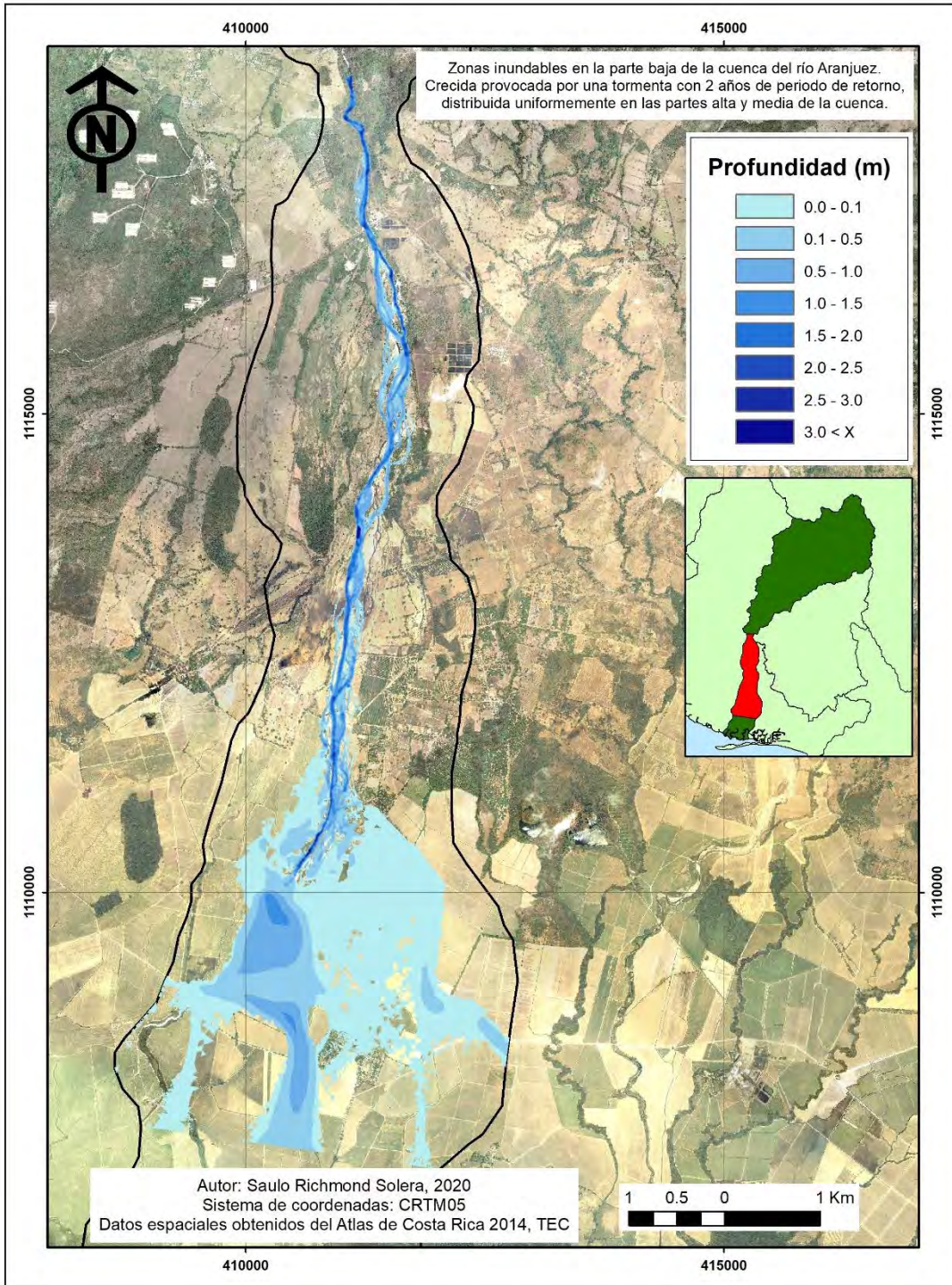
6.1 Mapas de zonas inundables

Como resultado del modelado hidráulico por medio de Iber, se generaron los mapas de zonas inundables en la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, asociados a las crecientes provocadas por eventos de precipitación con 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años de periodo de retorno, distribuidos uniformemente en las partes alta y media de la cuenca.

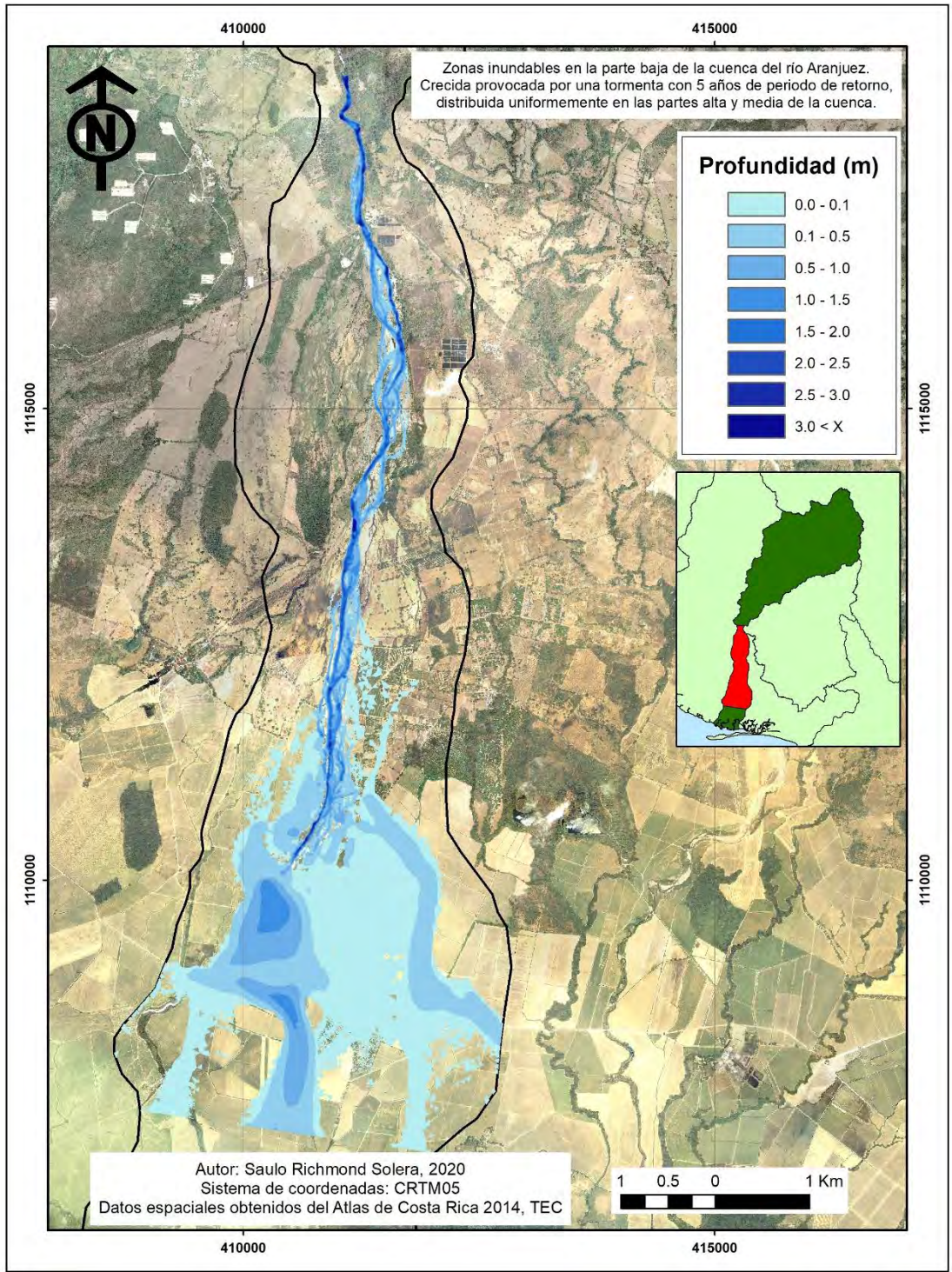
Es debido mencionar que el DTM creado como producto de los vuelos fotogramétricos finaliza aproximadamente en el paralelo norte 1 110 000, identificado en los mapas de zonas inundables, por lo que el modelado en las áreas ubicadas aguas abajo de esta coordenada se ejecutó con base en el DEM creado a partir de las curvas de nivel de la cartografía del IGN en escala 1:25000, con las limitaciones que esto implica.

Para cada evento se crearon mapas de profundidad del agua y de velocidad del flujo, considerando una simbología con los mismos rangos para identificar con facilidad la variación en función del periodo de retorno de cada tormenta.

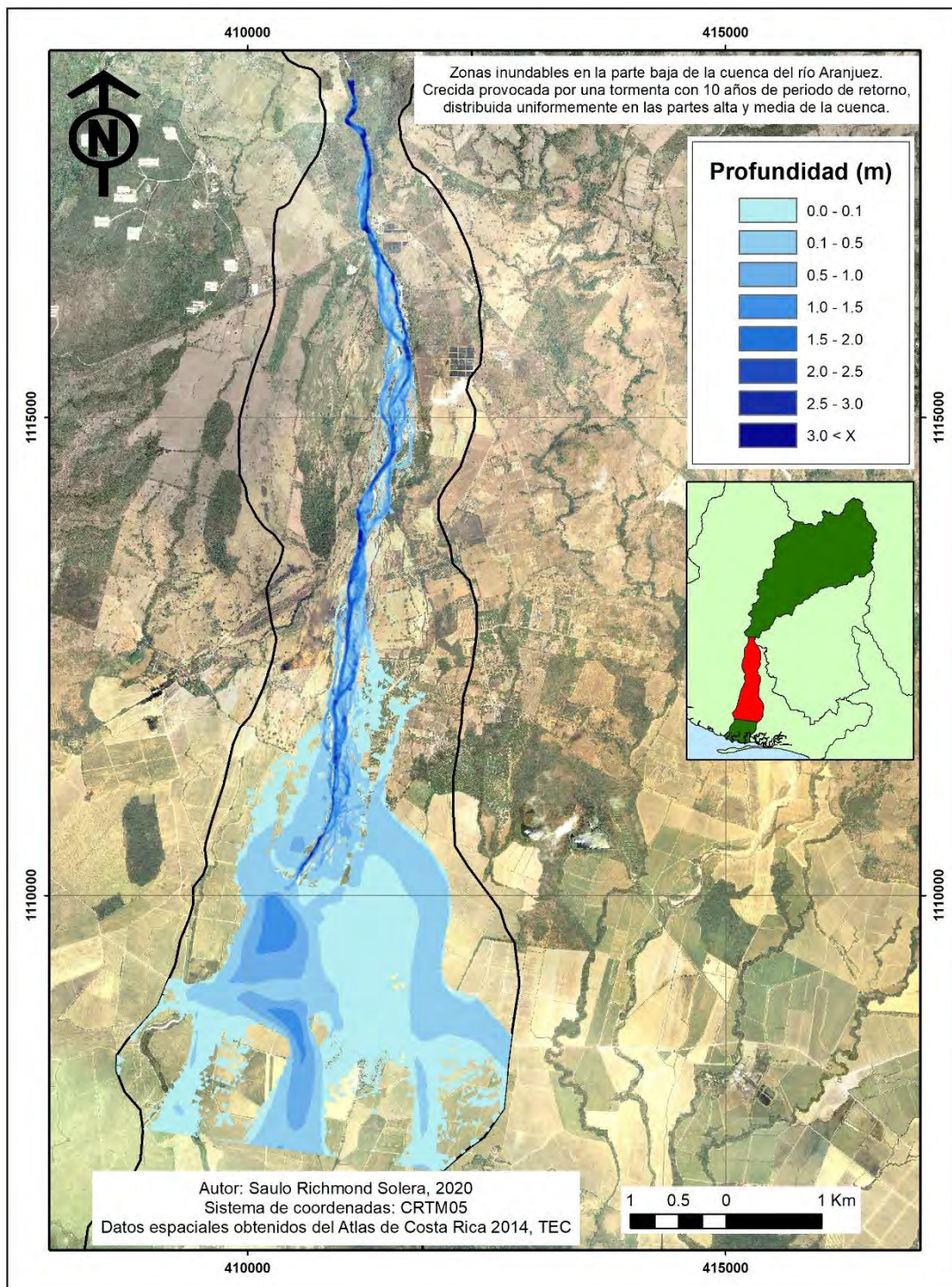
Nótese en el Mapa 33 que, a lo largo de la zona levantada mediante vuelos fotogramétricos, la cual cuenta con el DTM que da una mejor definición al DEM, la crecida provocada por una tormenta con 2 años de periodo de retorno es aquella que llena el cauce hasta el nivel de banco, sin provocar inundaciones. Esta condición valida, como supuesto empírico, la selección de los coeficientes para generar el hidrograma unitario sintético de Snyder.



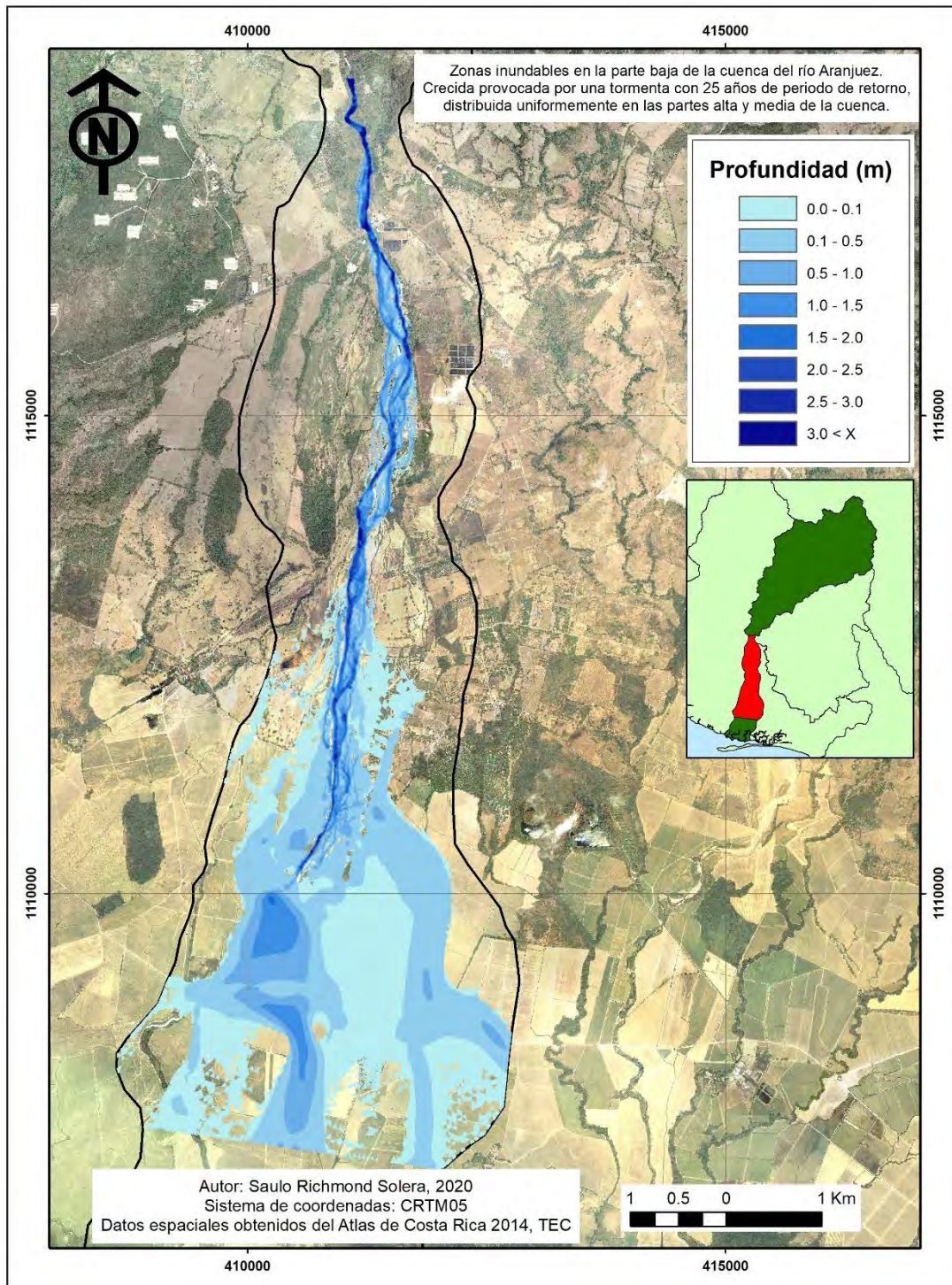
Mapa 33. Profundidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranuez, para una tormenta con 2 años de periodo de retorno



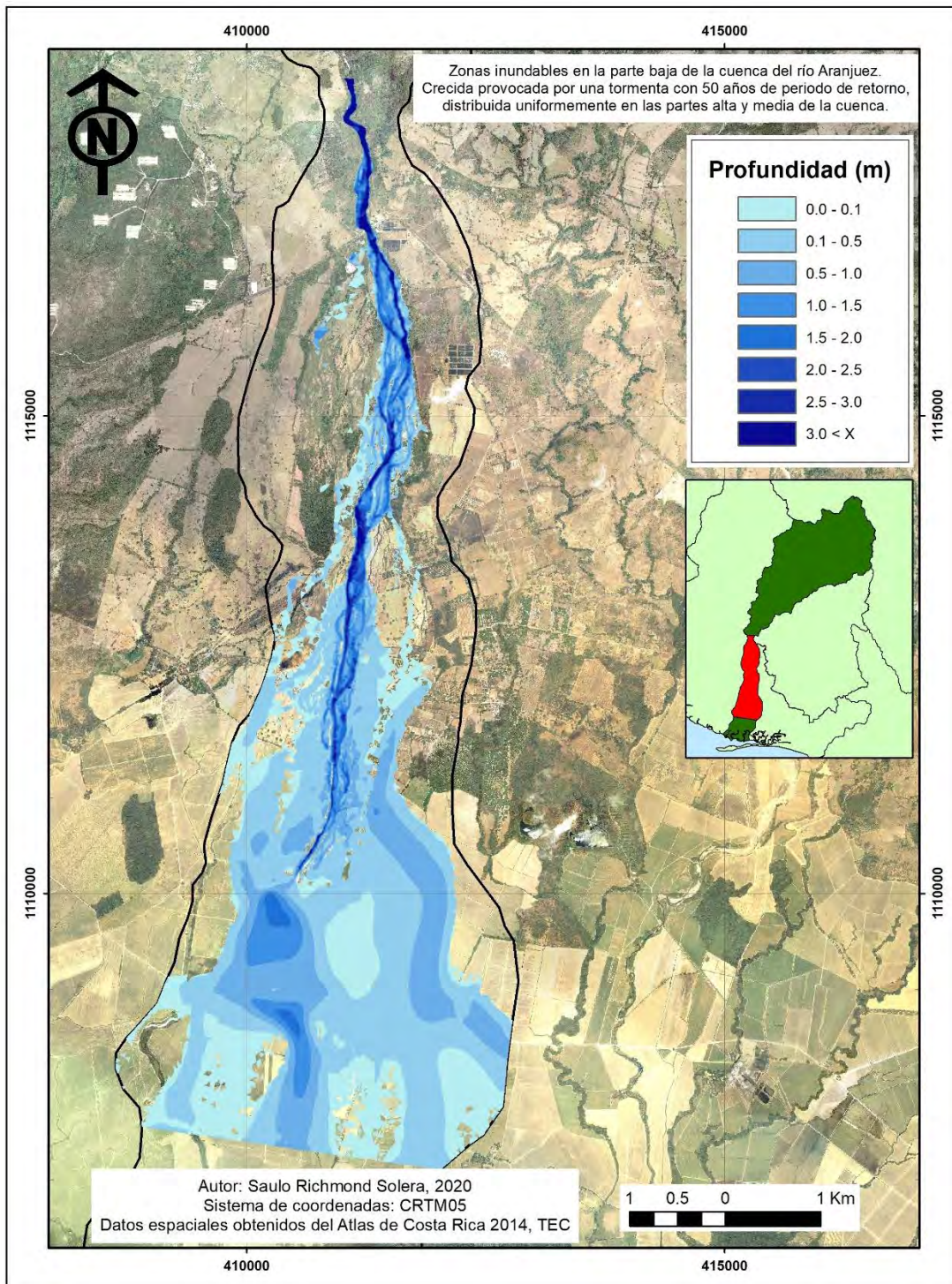
Mapa 34. Profundidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 5 años de periodo de retorno



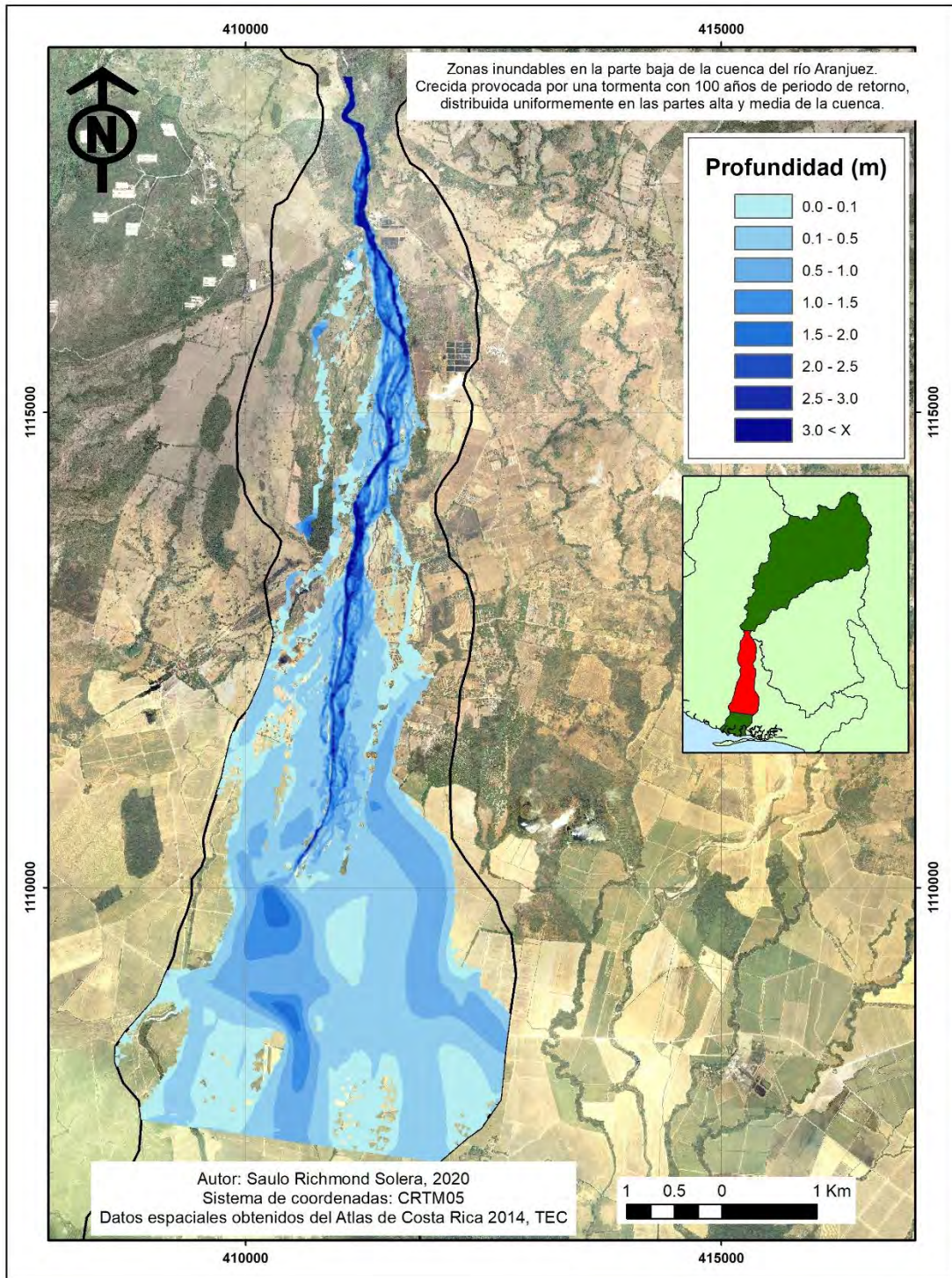
Mapa 35. Profundidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranuez, para una tormenta con 10 años de periodo de retorno



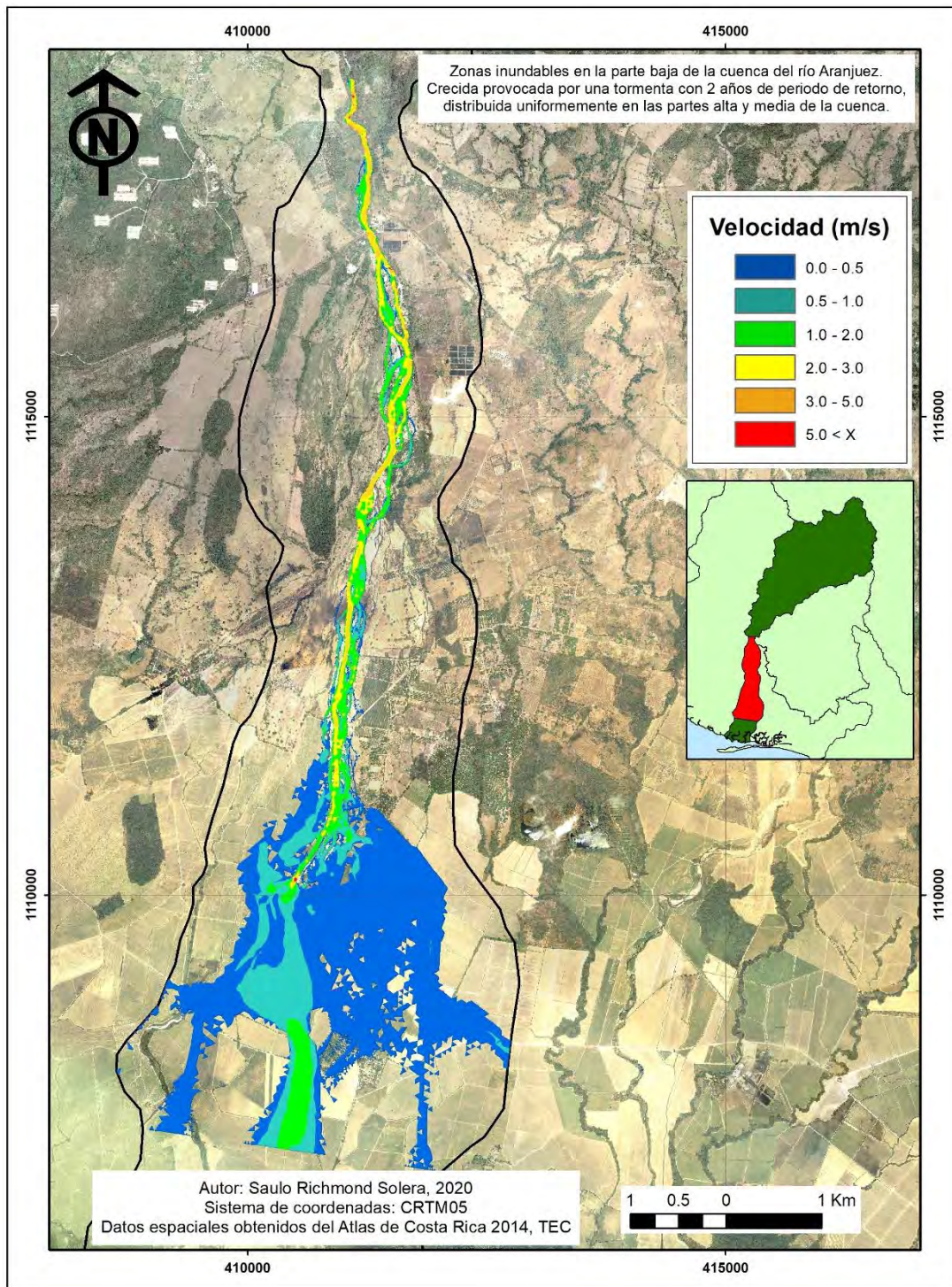
Mapa 36. Profundidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranuez, para una tormenta con 25 años de periodo de retorno



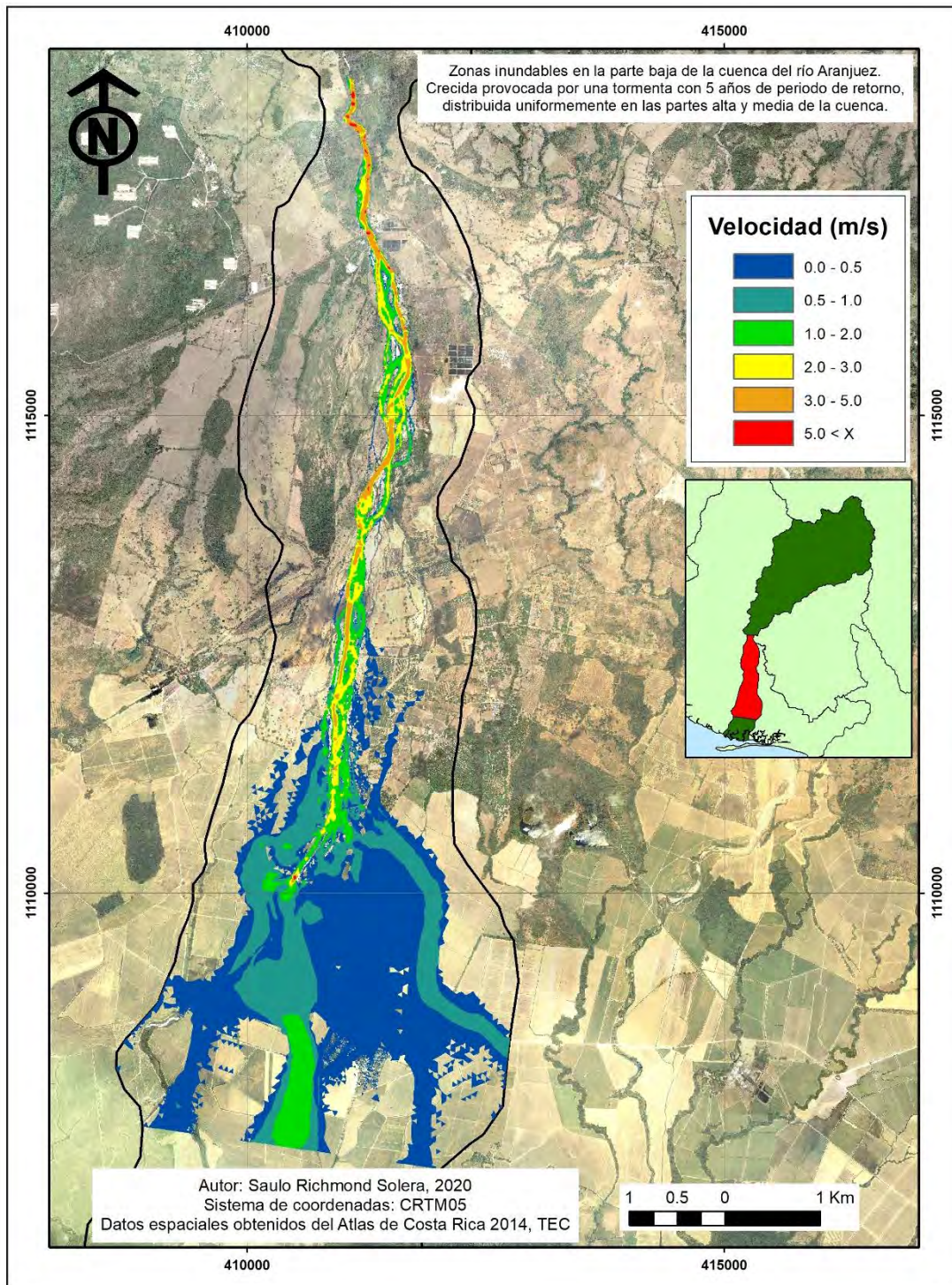
Mapa 37. Profundidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 50 años de periodo de retorno



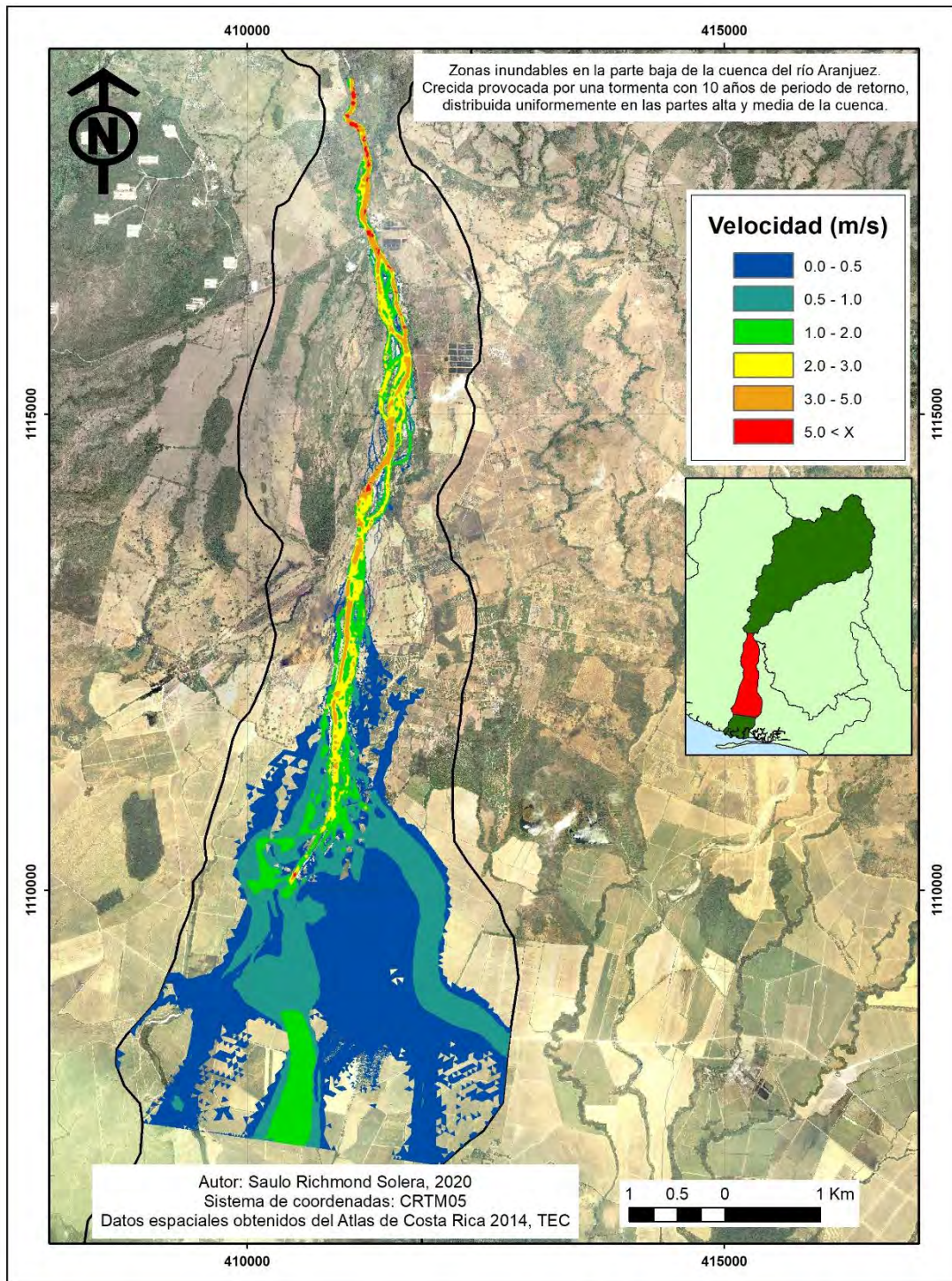
Mapa 38. Profundidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 100 años de periodo de retorno



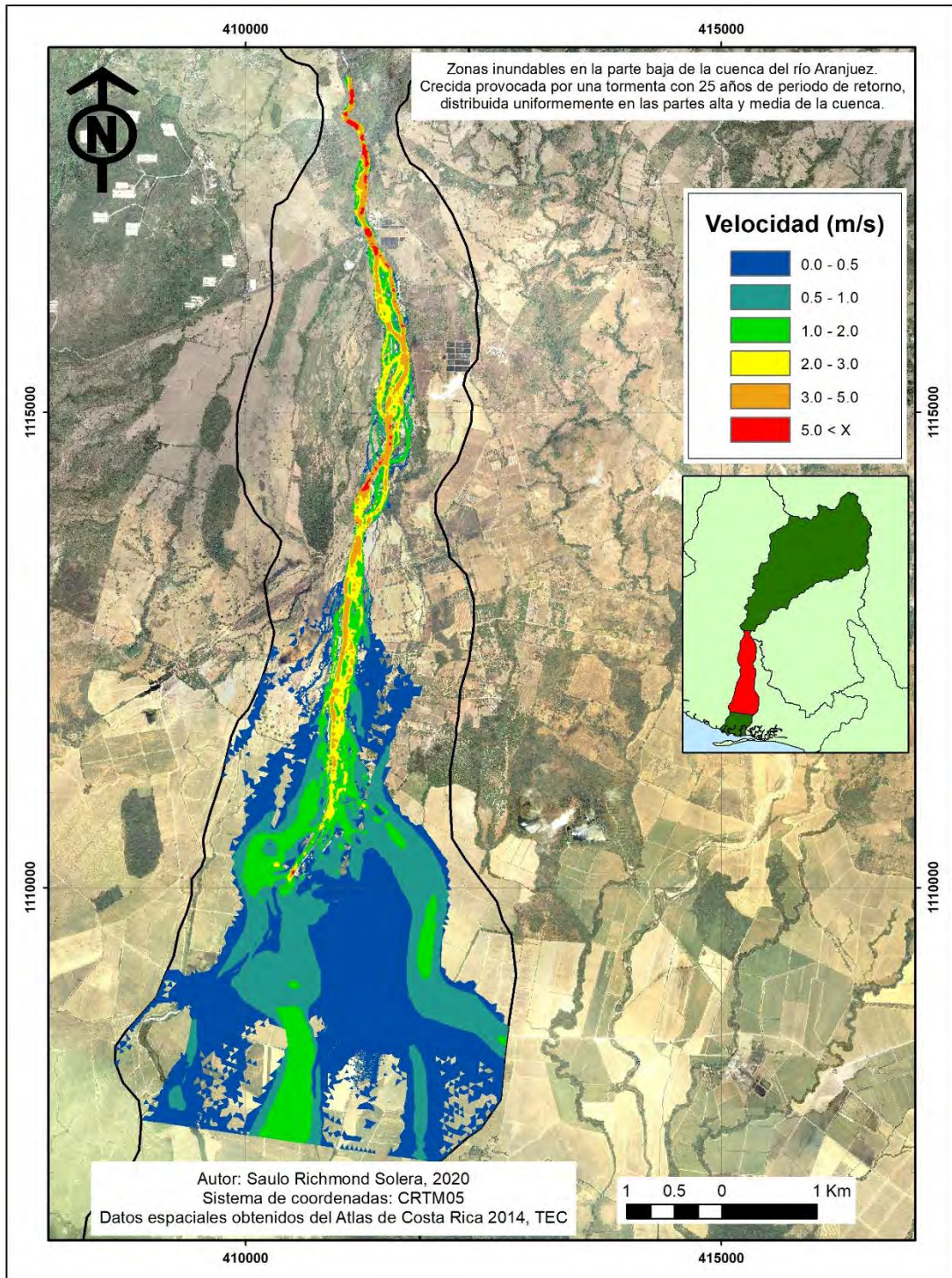
Mapa 39. Velocidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 2 años de periodo de retorno



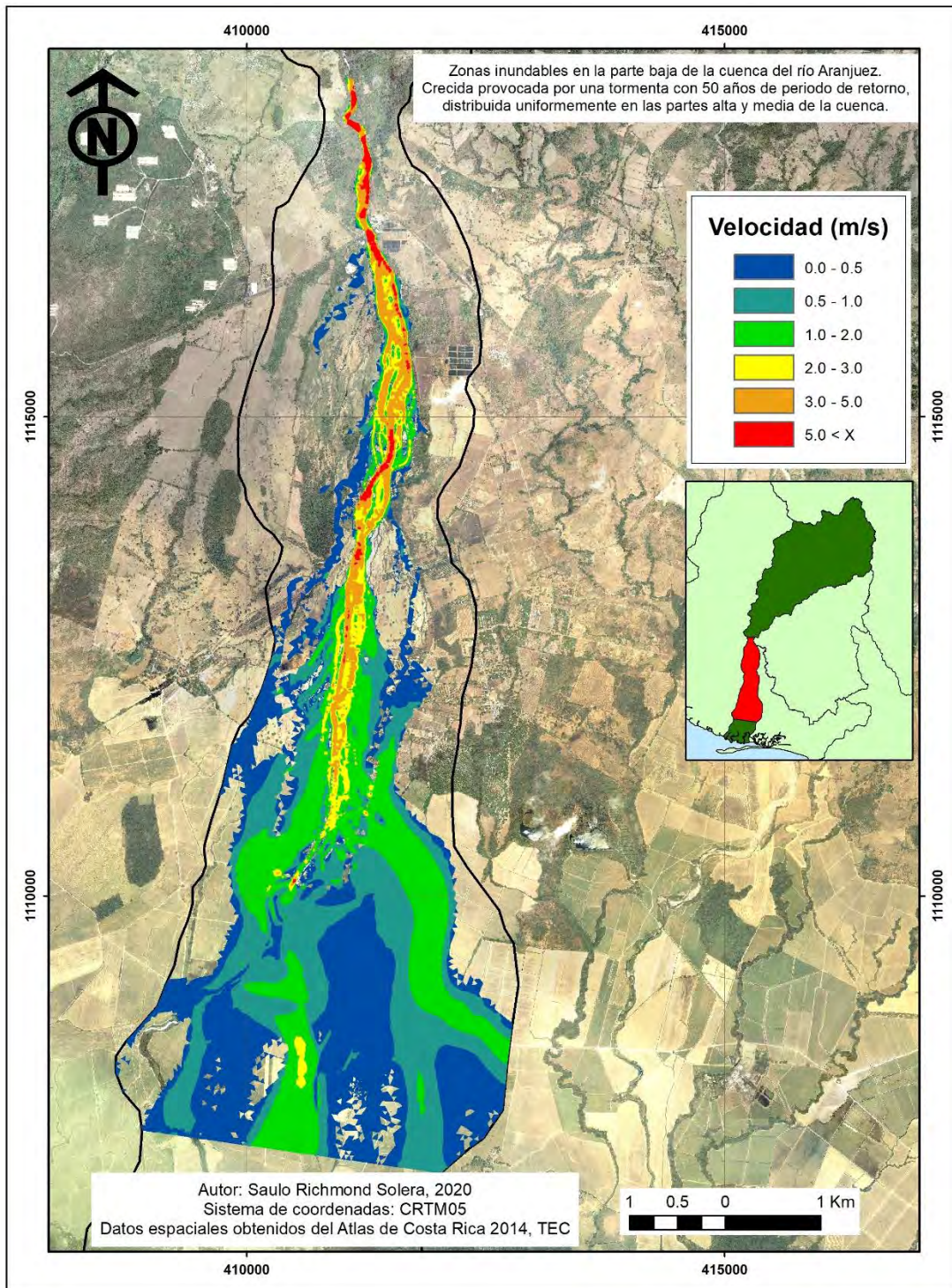
Mapa 40. Velocidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranuez, para una tormenta con 5 años de periodo de retorno



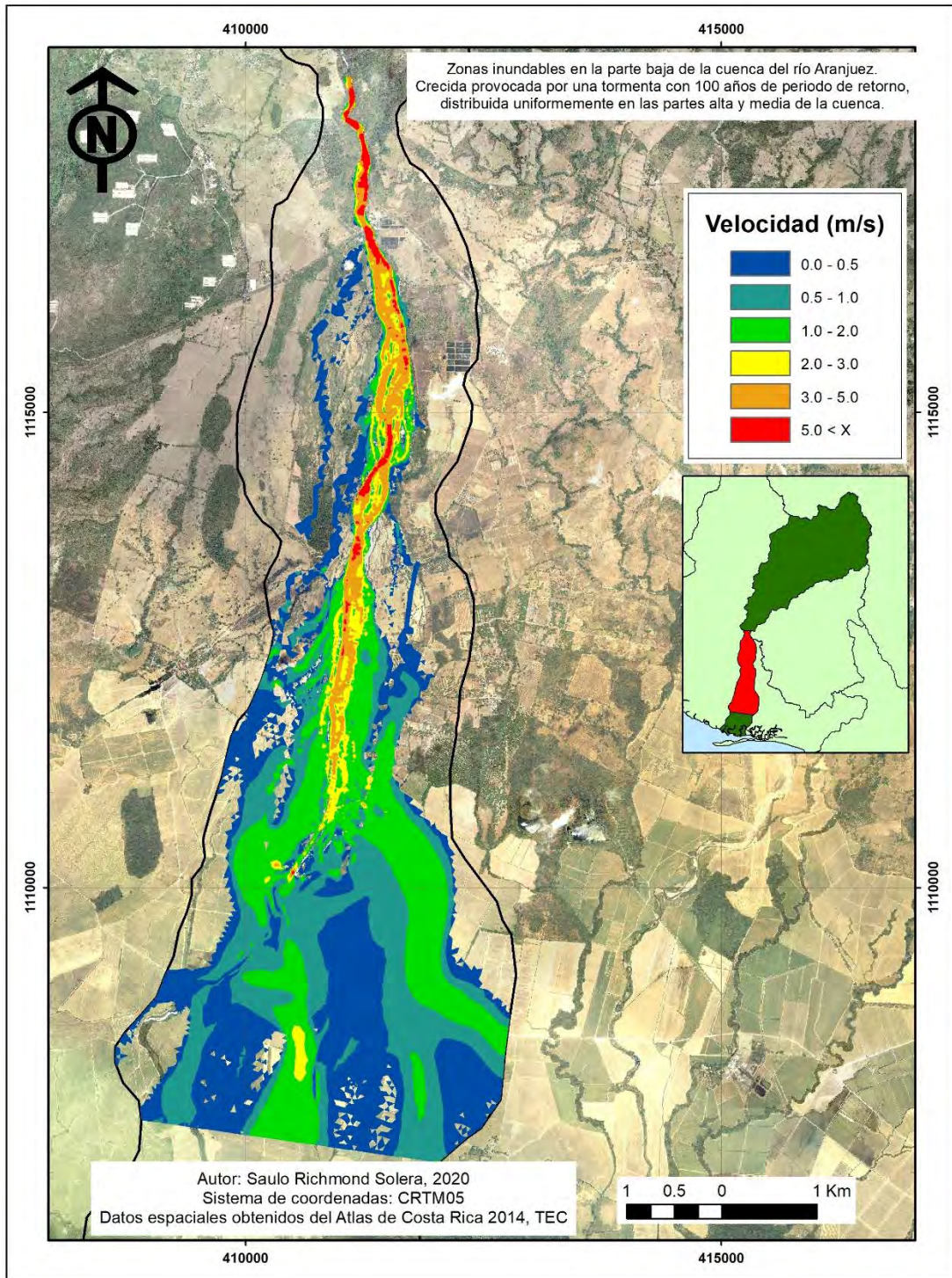
Mapa 41. Velocidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 10 años de periodo de retorno



Mapa 42. Velocidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 25 años de periodo de retorno



Mapa 43. Velocidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 50 años de periodo de retorno



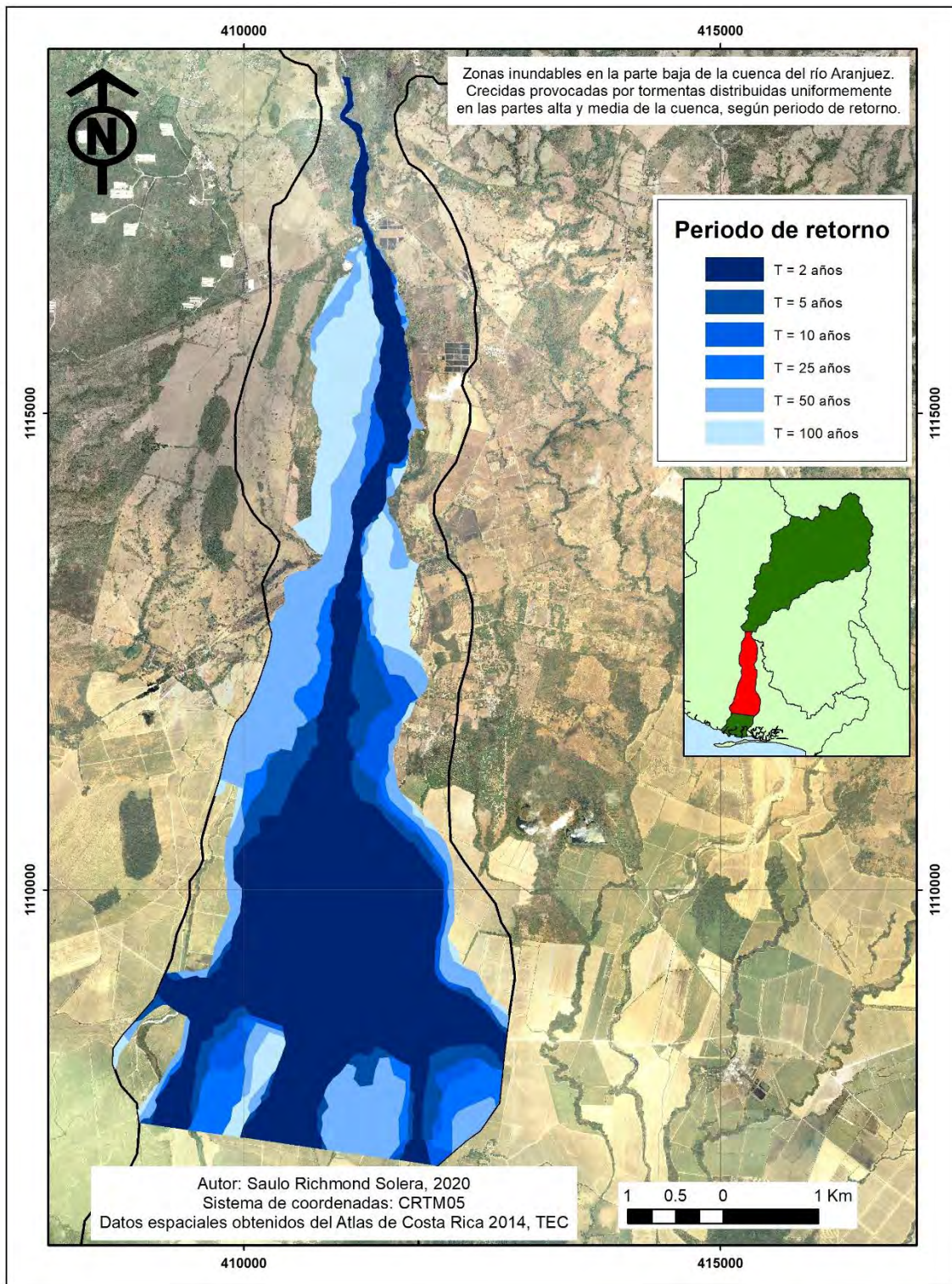
Mapa 44. Velocidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 100 años de periodo de retorno

6.2 Zonas inundables con alto grado de peligro

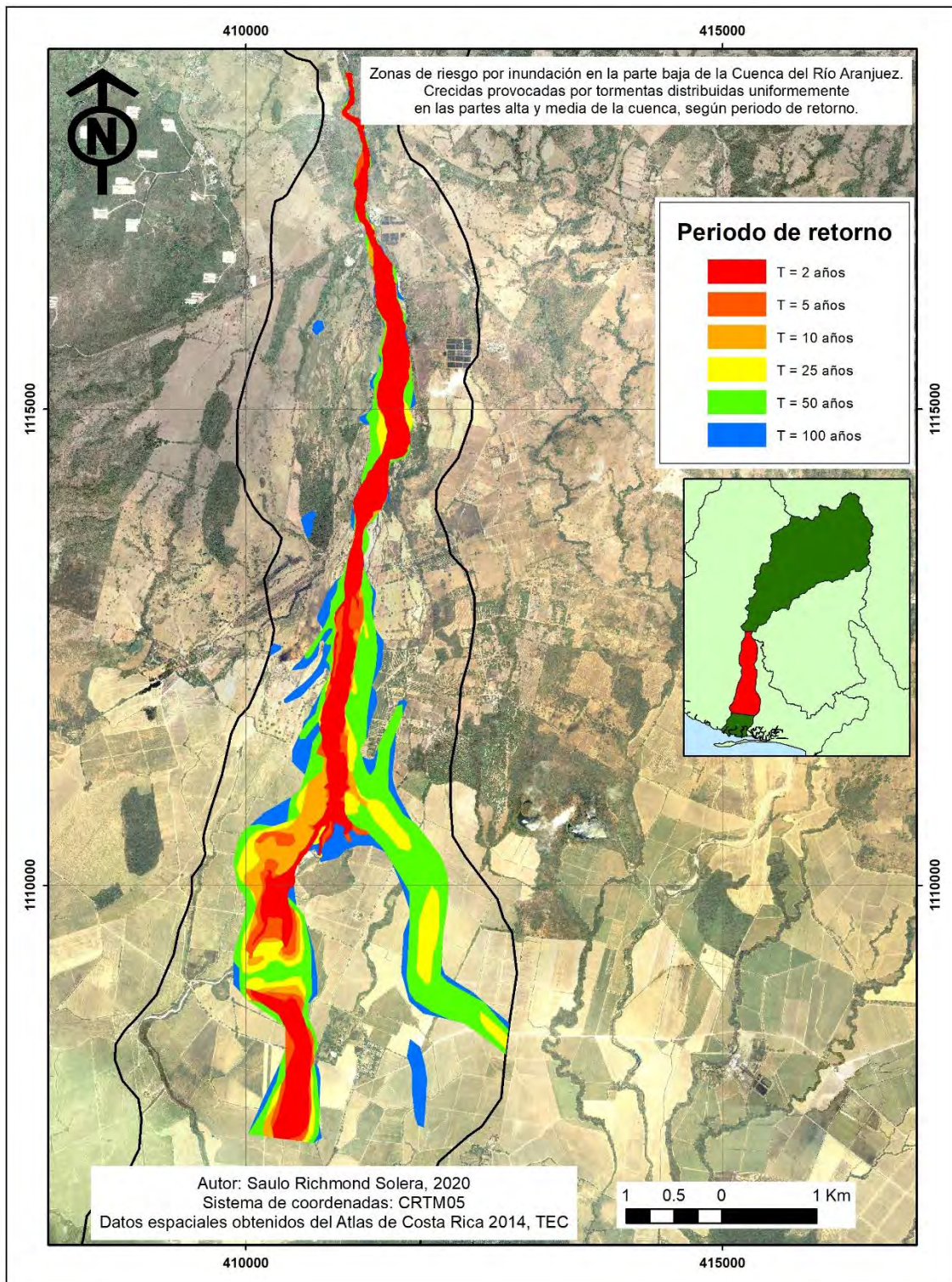
En el Mapa 45 se muestra el incremento de área inundable en función del periodo de retorno, como resultado global de zonas de riesgo por inundación. Sin embargo, en un mapa como este se representa la totalidad de las áreas inundables asociadas a cada periodo de retorno, sin distinción de la profundidad del agua y la velocidad del flujo, lo cual no permite identificar las áreas que presentan mayor peligro durante la inundación.

Existen diversos criterios para la definición del grado o nivel de peligro que presenta una inundación, basados en el nivel que alcanza el agua, la velocidad del flujo y la combinación de ambos factores para provocar volcamiento y deslizamiento por la fuerza de arrastre. En general, se define un nivel bajo de peligro cuando las edificaciones pueden sufrir daños leves por la inundación o el arrastre de sedimentos, un nivel intermedio cuando las edificaciones pueden sufrir daños y la población está en riesgo fuera de las viviendas, y un nivel alto cuando la población está en riesgo tanto fuera como dentro de las viviendas. (Alcocer et al., 2016, pp. 34-39)

Uno de estos criterios es el establecido en España mediante el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, cuya modificación por Real Decreto 9/2008 considera que pueden producirse graves daños sobre las personas y los bienes cuando las condiciones hidráulicas durante la avenida satisfagan uno o más de los siguientes criterios: profundidad superior a 1 m, velocidad superior a 1 m/s, o el producto de ambas variables superior a $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$. Con base en este criterio, se creó el mapa de zonas de riesgo por inundación con alto grado de peligro, en función del periodo de retorno (Mapa 46).



Mapa 45. Zonas de riesgo por inundación en la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, según periodo de retorno



Mapa 46. Zonas de riesgo por inundación con alto grado de peligro en la parte baja de la cuenca del río Aranuez, según periodo de retorno

6.3 Análisis del tránsito de crecientes

A partir de los diferentes resultados obtenidos y la posibilidad que ofrece el modelado hidráulico por medio de Iber para analizar el tránsito de una creciente determinada en cada uno de los pasos temporales y el proceso de inundación que esta puede provocar, se pueden plantear bases para un futuro sistema de alerta temprana (SAT) en la parte baja de la cuenca del río Aranjuez.

Un SAT debe tener en cuenta los pronósticos meteorológicos para la emisión de las primeras alertas a los cuerpos de atención de emergencias, así como un seguimiento continuo de la evolución de los eventos de precipitación para alertar a los habitantes de zonas inundables y valorar la necesidad de evacuarlos hacia sitios seguros. Estas variables permiten una mejor y más temprana respuesta al enfrentar una emergencia y pueden tener como base los volúmenes de precipitación estimados para los diferentes periodos de retorno.

Cuando se presenta un evento extraordinario de precipitación que evoluciona de acuerdo a los pronósticos meteorológicos o incluso los excede, la siguiente etapa del SAT tendrá en cuenta el tránsito de la creciente provocada por dicho evento y el proceso de inundación.

Algunos de los primeros sitios en presentar inundación leve ante el desbordamiento del río Aranjuez en la parte baja de la cuenca, son los terrenos de cultivo que colindan con el aeródromo de Aranjuez, además de Hacienda La Gloria. Si en estas zonas no ocurre inundación, puede afirmarse que se está ante un evento menor al de 5 años de periodo de retorno, el cual no provocará mayores afectaciones.

Al presentarse inundación en estos terrenos, deberá emitirse un primer aviso (alerta verde) a sitios como Hacienda La Irma, Pitahaya y El Establo, la cual deberá incrementarse (alerta amarilla) si la inundación continúa en Hacienda La Gloria y se extiende en el aeródromo de Aranjuez, pues tendrán afectación leve en primera instancia. Cualquier inundación en Hacienda La Irma, Pitahaya y El Establo, debe implicar la extensión de la alerta a Palermo y, si se presenta inundación leve en Palermo, la alerta debe elevarse (alerta naranja), pues se estaría ante un evento de más de 25 años de periodo de retorno que podría incrementar las afectaciones en los poblados mencionados.

En caso de presentarse desbordamiento en las cercanías del puente sobre la Ruta Nacional 1, aguas abajo del puente, se estaría ante un evento extraordinario de más de 50 años de

periodo de retorno y con mayor potencial de afectación. La alerta (alerta roja) debe incluir el Quebrador Aranjuez y las viviendas ubicadas a su alrededor, el aeródromo de Aranjuez y los demás sitios ya mencionados: Hacienda La Gloria, Hacienda La Irma, Pitahaya, El Establo y Palermo.

Analizando la inundación provocada por un evento de precipitación con 100 años de periodo de retorno y considerando como tiempo cero el primer momento de inundación leve en Hacienda La Gloria, habrá un lapso de aproximadamente 30 minutos antes de presentarse inundación en el aeródromo y 20 minutos más antes que esto ocurra en Hacienda La Irma, Pitahaya y El Establo.

Una vez que comience la inundación en estos sitios, transcurrirán aproximadamente 40 minutos antes de presentarse inundación en Palermo y 60 minutos más antes del desbordamiento en las cercanías del puente sobre la Ruta Nacional 1, aguas abajo del puente. Si el evento continúa, llegará a la profundidad máxima de inundación en Hacienda La Irma, Pitahaya y El Establo en aproximadamente 120 minutos.

Este análisis espacial y temporal del proceso de inundación en la parte baja de la cuenca del río Aranjuez y la correspondiente secuencia de alertas propuesta se resumen en el Cuadro 34.

Cuadro 34. Proceso de inundación en la parte baja de la cuenca del río Aranjuez

Tiempo (min)	Sitios con afectación por inundación	Alerta
0	Hacienda La Gloria y terrenos de cultivo colindantes con el aeródromo de Aranjuez	Verde
30	Hacienda La Gloria y aeródromo de Aranjuez	Amarilla
50	Hacienda La Gloria, aeródromo de Aranjuez, Hacienda La Irma, Pitahaya y El Establo	Amarilla
90	Hacienda La Gloria, aeródromo de Aranjuez, Hacienda La Irma, Pitahaya, El Establo y Palermo	Naranja
150	Hacienda La Gloria, aeródromo de Aranjuez, Hacienda La Irma, Pitahaya, El Establo, Palermo y cercanías del puente sobre la Ruta Nacional 1 (aguas abajo)	Roja
270	Profundidad máxima de inundación en Hacienda La Irma, Pitahaya y El Establo	Roja

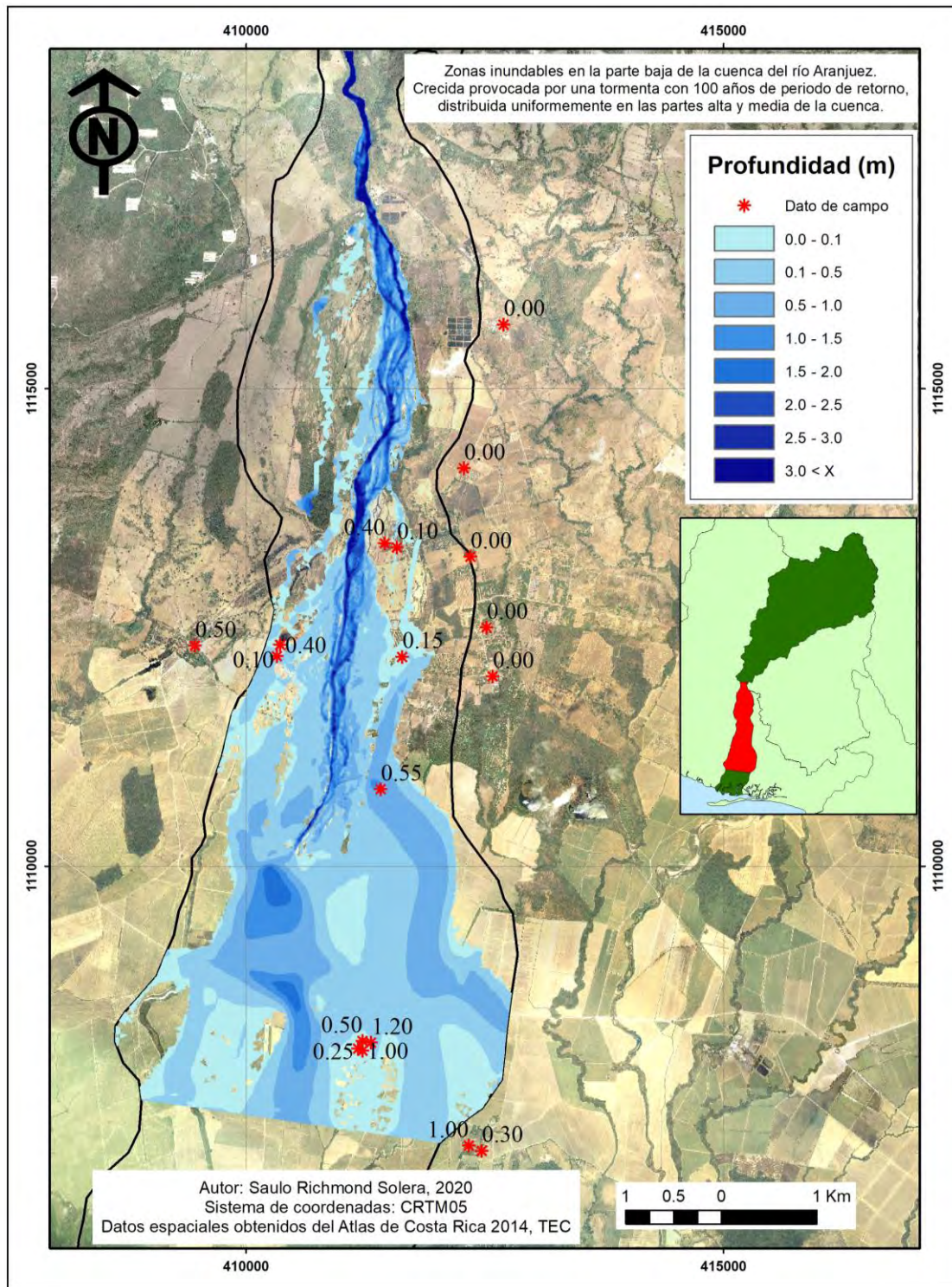
6.4 Tormenta Nate en la cuenca del río Aranjuez

Adicionalmente, durante las visitas realizadas a la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, se mantuvieron conversaciones casuales con vecinos de la zona, quienes manifestaron que la tormenta Nate ha sido el evento con mayores afectaciones por inundación, con profundidades incluso superiores a 1 m en algunos sitios, mientras que otros eventos solo ocasionan crecidas que ligeramente desbordan el cauce e inundan los terrenos de cultivo aledaños, con profundidades de unos pocos centímetros.

Estas personas coincidieron en que nunca antes se había presentado una inundación como la provocada por la tormenta Nate, siendo que algunas de ellas tienen más de 50 años de vivir en el mismo sitio. También afirmaron que, desde ese momento y producto de la acumulación de sedimentos tras los deslizamientos en las partes alta y media de la cuenca, el cauce ha perdido capacidad y, aunque se han realizado labores de dragado, se han vuelto comunes los desbordamientos de baja afectación.

Los reportes de profundidades de la inundación provocada por la tormenta Nate fueron georreferenciados y su variabilidad espacial coincidió con las profundidades de inundación correspondientes a la crecida provocada por una tormenta con 100 años de periodo de retorno, como se muestra en el Mapa 47, lo cual valida los procesos de modelado.

Los datos recolectados en sitios más al sur corresponden a los pueblos de Pitahaya y El Establo (Pitahaya Vieja). En el primer caso, se comprueba la necesidad de extender los vuelos fotogramétricos hacia este sector para obtener un mayor detalle de la topografía y, en consecuencia, del flujo y acumulación del agua en un escenario de inundación, mientras que, en el segundo caso, incluso se requiere hacer levantamientos por fuera de la delimitación de la cuenca hidrográfica para determinar si las inundaciones en este sitio son provocadas por el desbordamiento del río Aranjuez o de otros cuerpos de agua aledaños.



Mapa 47. Profundidad aproximada de la inundación provocada por la tormenta Nate y profundidad del agua en las zonas inundables de la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, para una tormenta con 100 años de periodo de retorno

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

7.1.1 Caracterización de la cuenca

La cuenca hidrográfica del río Aranjuez abarca un área de 192,0 km² y es drenada por un cauce principal que recorre una longitud de 44,0 km. Considerando únicamente las partes alta y media de la cuenca, el área es de 156,5 km² con una extensión de 30,3 km de cauce principal, hasta su paso por el puente sobre la Ruta Nacional 1 (punto de control).

La forma de la cuenca es alargada, propia de cuencas con una respuesta lenta ante eventos de precipitación. Sin embargo, la topografía presenta pendientes muy pronunciadas en las partes alta y media de la cuenca, asociadas con altas velocidades de escorrentía superficial en las laderas y de flujo en cauces. En contraste, las condiciones de la parte baja de la cuenca son de terrenos sumamente planos, que amortiguan la velocidad y la energía del flujo mediante el ensanchamiento notorio del cauce del río.

La cuenca presenta dos patrones de drenaje claramente diferenciables: aguas arriba del punto de control establecido en el puente sobre la Ruta Nacional 1, se presenta un patrón de drenaje dendrítico, que usualmente caracteriza a cuencas compuestas por material geológico erosionable y suelos relativamente impermeables, mientras que, aguas abajo de dicho punto, el patrón de drenaje es trezado.

El uso del suelo en las partes alta y media de la cuenca es mayoritariamente de bosques y pastizales, con pequeños asentamientos humanos, y en la parte baja de la cuenca se presenta un mayor aprovechamiento para cultivos. Estas condiciones favorecerían una respuesta lenta de la cuenca ante eventos de precipitación importantes, debido a la interceptación del agua de lluvia por parte de la vegetación.

Sin embargo, la parte alta de la cuenca presenta procesos erosivos importantes, ocasionados por la infiltración de las aguas superficiales, las altas pendientes, la gravedad, el sobrepeso de los árboles y los escasos espesores de los suelos, por lo que las condiciones de estabilidad de los taludes son muy desfavorables, siendo altamente susceptibles a desarrollar derrumbes y desprendimientos de material en cortes casi verticales.

7.1.2 Hidrología

Pese a que inicialmente se identificaron varias estaciones meteorológicas en los alrededores de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez, algunas de ellas debieron ser descartadas por limitaciones en la extensión de su periodo de registro, cantidad de datos faltantes, falta de correlación entre resultados o la poca área de influencia dentro de la cuenca.

La estación 78012 (Montes de Oro) es la única ubicada dentro del área de la cuenca. Por su ubicación y la disponibilidad de registros de distribución temporal de la lluvia durante distintos eventos de precipitación que han generado afectación en la cuenca, se seleccionó como representativa del área de drenaje de interés: partes alta y media de la cuenca.

El análisis de los registros de distribución temporal de la lluvia permitió identificar un comportamiento fuera de lo común durante la tormenta Nate en el año 2017, con altos volúmenes de precipitación diaria, distribuidos en un tiempo mayor al de otros eventos. Por lo tanto, se determinaron dos distribuciones temporales de la lluvia: una asociada a eventos con periodo de retorno menor a 50 años y otra para eventos extraordinarios, cuyo periodo de retorno sea de 50 años o más.

Este mismo comportamiento asociado a eventos extraordinarios llevó a considerar una condición de humedad antecedente AMC II para eventos con periodo de retorno menor a 50 años y una condición de humedad antecedente AMC III para eventos con periodo de retorno de 50 años o más. En el primer caso se obtuvo un número de curva 75, mientras que en el segundo caso el número de curva es 87; ambos son valores elevados si se tiene en consideración el uso del suelo, pero las altas pendientes y las condiciones de los materiales que conforman el suelo, antes descritas, inciden en la relación lluvia-escorrentía.

El uso de los parámetros de caracterización de la cuenca para aproximar los coeficientes requeridos al generar el hidrograma unitario sintético de Snyder, es una herramienta que permite solventar la carencia de datos que se ajusten a los requerimientos teóricos para su definición. Al tratarse de una aproximación, esta debe ser validada por otros medios, comparando los resultados obtenidos con los coeficientes seleccionados, un análisis del tiempo de viaje promedio del flujo superficial, el cálculo del tiempo de retardo por medio de otras ecuaciones, como la del SCS (NRCS), o supuestos empíricos, como identificar que la creciente asociada a eventos de precipitación con 2 años de periodo de retorno sea aquella que llena el cauce hasta el nivel de banco, sin provocar inundaciones.

Los hidrogramas de creciente generados presentan un tiempo al pico de aproximadamente 7 horas y una duración total o tiempo base de aproximadamente 24 horas, debido a la distribución temporal de la lluvia, con caudales máximos que van desde 281,5 m³/s para un evento con 2 años de periodo de retorno hasta 1560,1 m³/s para un evento con 100 años de periodo de retorno.

7.1.3 Modelado hidráulico

El modelo hidráulico Iber permitió transitar los distintos escenarios de creciente por la planicie de inundación del río Aranjuez. En una planicie de inundación, ante un evento extraordinario de precipitación y su consecuente creciente, la dirección predominante del flujo no necesariamente será en sentido longitudinal del cauce, por lo que un modelado hidráulico en dos dimensiones permite describir el comportamiento del proceso de inundación, teniendo en cuenta el amortiguamiento que genera la planicie de inundación para determinar la profundidad y velocidad del flujo. Adicionalmente, se generó un mapa de cobertura de la mancha de inundación asociada a cada periodo de retorno estudiado.

El uso de vuelos fotogramétricos con VANT para generar modelos de elevación digital ofrece una calidad de información adecuada para el estudio de planicies de inundación, principalmente en zonas sin cobertura boscosa densa y durante la época de estiaje del río en estudio. La presencia de cobertura boscosa requiere de una red de puntos de control vertical para adecuar los resultados de los vuelos a la topografía y en casos de ríos que mantengan un caudal y una profundidad considerables, aun durante la época seca, se requiere de levantamientos topográficos de campo para definir secciones transversales en el cauce, como insumo para ajustar el modelo de elevación digital en esta zona.

Fuera del área levantada mediante vuelos fotogramétricos, para la cual se creó el DTM con mayor detalle, el modelado hidráulico se ejecutó con base en el DEM creado a partir de las curvas de nivel de la cartografía del IGN en escala 1:25000, por lo que Iber no contó con parámetros adecuados de delimitación del cauce. Esto se evidencia en la ampliación de las áreas inundables a partir de este punto, en donde los resultados no son del todo confiables y deben ser verificados.

En algunas zonas, para las diferentes crecidas, el área inundable se extiende fuera de los límites de la cuenca y, en consecuencia, del modelo. Estos bordes laterales fueron habilitados como salidas de caudal para evitar acumulaciones de agua ficticias, con el inconveniente de ser caudal que sale del modelo y no reingresa, condición que podría ocurrir según se presente la topografía en esas zonas aledañas.

7.1.4 Zonas inundables

La crecida provocada por una tormenta con 2 años de periodo de retorno es aquella que llena el cauce del río Aranjuez hasta el nivel de banco, sin provocar inundaciones. Esta condición se había planteado como supuesto empírico para validar la selección de los coeficientes requeridos para generar el hidrograma unitario sintético de Snyder.

La crecida provocada por una tormenta con 5 años de periodo de retorno generó desbordamiento del cauce en las zonas más planas, con inundaciones de baja afectación en terrenos aledaños. Las áreas inundables se incrementaron para las crecidas provocadas por tormentas con 10 y 25 años de periodo de retorno.

Las crecidas provocadas por tormentas con 50 y 100 años de periodo de retorno generaron desbordamientos incluso a la altura del puente sobre la Ruta Nacional 1, aumentando las áreas inundables y la potencial afectación, producto de profundidades y velocidades de flujo mayores. Las velocidades del flujo en zonas inundables fuera del cauce del río Aranjuez se tornaron peligrosas durante las crecidas provocadas por tormentas con 50 y 100 años de periodo de retorno, donde una gran extensión de terreno presenta velocidades de entre 1,0 y 2,0 m/s.

El uso de criterios para la definición del grado o nivel de peligro que presenta una inundación, basados en el nivel que alcanza el agua, la velocidad del flujo y la combinación de ambos factores para provocar volcamiento y deslizamiento por la fuerza de arrastre, ofrece mayores posibilidades para el análisis del riesgo por inundación, que la definición de la totalidad del área inundable asociada a cada periodo de retorno.

Hacienda La Gloria y el aeródromo de Aranjuez son los sitios en donde se manifestará primero cualquier amenaza de inundación en la parte baja de la cuenca del río Aranjuez, que luego se extenderá a Hacienda La Irma, Pitahaya, El Establo y Palermo. Eventos de

mayor magnitud pueden provocar desbordamientos en las cercanías del puente sobre la Ruta Nacional 1, aguas abajo del puente.

En caso de presentarse un evento extraordinario, como el analizado para 100 años de periodo de retorno, transcurrirán aproximadamente 270 minutos entre el primer momento de inundación en Hacienda La Gloria y el momento de profundidad máxima de inundación en Hacienda La Irma, Pitahaya y El Establo. Este proceso de inundación debe ser considerado en futuros sistemas de alerta temprana.

La inundación provocada por la tormenta Nate ha sido el evento registrado de mayor afectación en la parte baja de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez, el cual se ve representado por el mapa de zonas inundables asociado a la crecida provocada por una tormenta con 100 años de periodo de retorno. Los deslizamientos que esta tormenta provocó en las partes alta y media de la cuenca tuvieron como una de sus consecuencias la acumulación de sedimentos en la parte baja del cauce del río, reduciendo su capacidad hidráulica y aumentando las probabilidades de ocurrencia de nuevos desbordamientos.

7.2 Recomendaciones

Si bien los resultados de esta investigación corresponden únicamente a la cuenca hidrográfica del río Aranjuez y no deben ser extendidos a otras cuencas, la metodología empleada puede aplicarse en otras cuencas que presenten carencias de información similares y requieran, por ejemplo, la generación sintética de hidrogramas.

En cuanto a la ejecución de levantamientos topográficos mediante vuelos fotogramétricos para la generación de modelos digitales de elevación, los resultados que se obtengan deben ser de una calidad igual o superior a la detallada en esta investigación. Con el fin de optimizar recursos, se recomienda realizar una primera etapa de vuelos que abarquen el cauce del río en estudio y franjas de entre 0,5 y 1,0 km en ambas márgenes, para realizar un primer modelado hidráulico que permita identificar las zonas en que se requiera extender los levantamientos mediante una segunda etapa de vuelos. De esta forma, se tendría el detalle de la topografía realmente necesaria para un modelado hidráulico completo.

Los resultados obtenidos deben ser ajustados según varíen en el tiempo los parámetros de caracterización de la cuenca del río Aranjuez. Para ello, la CNE debe definir plazos de

vigencia, tras los cuales debe haber una revisión para actualizar los parámetros y los resultados.

La determinación de áreas inundables ubicadas aguas abajo del área cubierta por los vuelos fotogramétricos, debe ser validada mediante una continuación de estos levantamientos, de manera que se extienda el modelo de elevación digital con las mismas características y no con los insumos disponibles en el SNIT u otras técnicas cuyos resultados sean de calidad inferior. Debe ser de particular interés el levantamiento en el área donde se ubican los pueblos de Pitahaya y El Establo (Pitahaya Vieja), para una mejor determinación de profundidades y velocidades de flujo.

En caso de querer analizar también el comportamiento de colmatación o acumulación de sedimentos en la zona de manglar, como situación que repercute tanto en términos de inundación como en aspectos de conservación del ecosistema de manglar, la continuación de los vuelos fotogramétricos debe extenderse hasta esta zona.

Siendo conocidas las condiciones de vulnerabilidad ante deslizamientos y derrumbes en las partes alta y media de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez y la incidencia que esto puede tener en cambios en la capacidad hidráulica del cauce por el arrastre y la acumulación de sedimentos, así como afectaciones a la zona de manglar, es de suma importancia mejorar e incrementar los sistemas de monitoreo en la zona, en aspectos como meteorológico, geológico, hidrológico, entre otros.

Como parte de esta medida, la CNFL debe instalar sistemas de medición de caudal y variables meteorológicas en su represa hidroeléctrica El Encanto, para sus propios fines y en beneficio de futuras investigaciones en la zona. Una estación meteorológica ubicada en este sitio complementaría los datos de la estación 78012 (Montes de Oro) y la estación 78033 (Pitahaya) para una mejor descripción de las condiciones en la cuenca.

El efecto amortiguador de la planicie de inundación y las zonas identificadas como inundables deben ser tenidos en cuenta para el diseño de obras de infraestructura y la creación de sistemas de alerta temprana (SAT) que permitan evacuar los sitios más vulnerables en caso de potencial inundación.

Para una mejor gestión del riesgo, se debe realizar la identificación de tiempos de tránsito de crecientes desde diferentes puntos a lo largo del cauce en las partes alta y media de la

cuenca, que complementen el análisis realizado para la parte baja. Se consideran sitios clave para este fin la confluencia de los ríos Aranjuez y Veracruz en las cercanías de Bajo Caliente, el sitio de presa El Encanto, la confluencia de los ríos Aranjuez y Aranjuecito, el puente sobre la Ruta Nacional 1 y el Quebrador Aranjuez o el aeródromo de Aranjuez.

Se deben analizar con frecuencia las necesidades de dragado del cauce en la parte baja de la cuenca, según se vaya dando el proceso de arrastre y acumulación de sedimentos, de manera que las labores se ejecuten oportunamente y permitan tener una mayor capacidad hidráulica ante eventuales crecidas. El dimensionamiento de estas labores puede calcularse al plantear escenarios de cambio en el DTM y reproducir el modelado hidráulico con Iber y los hidrogramas de creciente ya generados.

Los mapas de zonas de riesgo por inundación permiten incorporar distinción por grado de peligro, según los criterios que la CNE considere pertinentes, que deben complementarse con estudios de vulnerabilidad ante la amenaza y así analizar la posible necesidad de reubicar poblados, además de no permitir nuevas construcciones de vivienda en sitios de riesgo por inundación con determinado grado de peligro.

Como primera medida en este aspecto, se recomienda reubicar a los habitantes de El Establo en Pitahaya, siendo el primero un poblado de baja densidad poblacional con alta vulnerabilidad ante inundaciones y el segundo un núcleo poblacional más consolidado que podría beneficiarse mediante labores de dragado en el cauce del río Aranjuez, reduciendo significativamente la probabilidad de inundación de alto riesgo o que pueda generar daños materiales. Con esas tareas realizadas, se podría reconfigurar el DEM para ejecutar nuevamente el modelado hidráulico y determinar si fuese aun necesaria alguna obra menor de protección ante crecidas.

La CNE debe crear una normativa en donde defina las pautas a seguir en el diseño de mapas de zonas de inundación, los criterios para establecer los grados de peligro por inundación y los periodos de retorno a considerar para las diferentes aplicaciones de estas investigaciones.

Este tipo de investigaciones deben ser consideradas dentro del ordenamiento territorial, como parte de los estudios de diagnóstico de los territorios por regular, de manera que la zonificación restrinja nuevas construcciones dentro de las zonas inundables producto de una

determinada crecida y según el grado de peligro. El mismo reglamento de zonificación debe condicionar el tipo de cultivos permitidos en zonas inundables de uso agrícola, limitándolo a aquellos cultivos que presenten tolerancia a las inundaciones, reduciendo el riesgo de pérdidas económicas.

Además, la administración territorial en términos de cuenca requiere de coordinación entre municipios, donde la CNE debe ser un actor destacado en el análisis de escenarios de cambio de uso del suelo y los efectos en las partes bajas de lo que sucede aguas arriba, la equiparación de zonificaciones en términos de ordenamiento territorial y la coordinación entre comisiones cantonales de atención de emergencias.

Bibliografía

- Alcocer, V., Rodríguez, J., Bourguett, V., Llaguno, O., y Albornoz, P. (2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 7(5), 33-55.
- Álvarez, M. (2018). *Análisis de zonas inundables en la parte baja de la cuenca del río Parrita utilizando un modelo hidráulico bidimensional*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Editorial Limusa.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., y Coll, A. (2014). *Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos*. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol. 30, pp. 1-10.
- Brieva, C. (2018). *Caracterización de cuencas: Caracterización y análisis multidisciplinario de la información hidrológica en cuencas*. Mendoza, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - PNAGUA.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- Chow, V. T. (1994-b). *Hidráulica de canales abiertos*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- Dunne, T., y Leopold, L. (1978). *Water in environmental planning*. Estados Unidos: W. H. Freeman and Company.
- Iber. (2014). *Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Manual de referencia hidráulico*. España.
- Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). (2015). *Suelos de Costa Rica. Orden alfisol*. Boletín técnico 7. San José, Costa Rica.
- Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). (2015). *Suelos de Costa Rica. Orden entisol*. Boletín técnico 2. San José, Costa Rica.

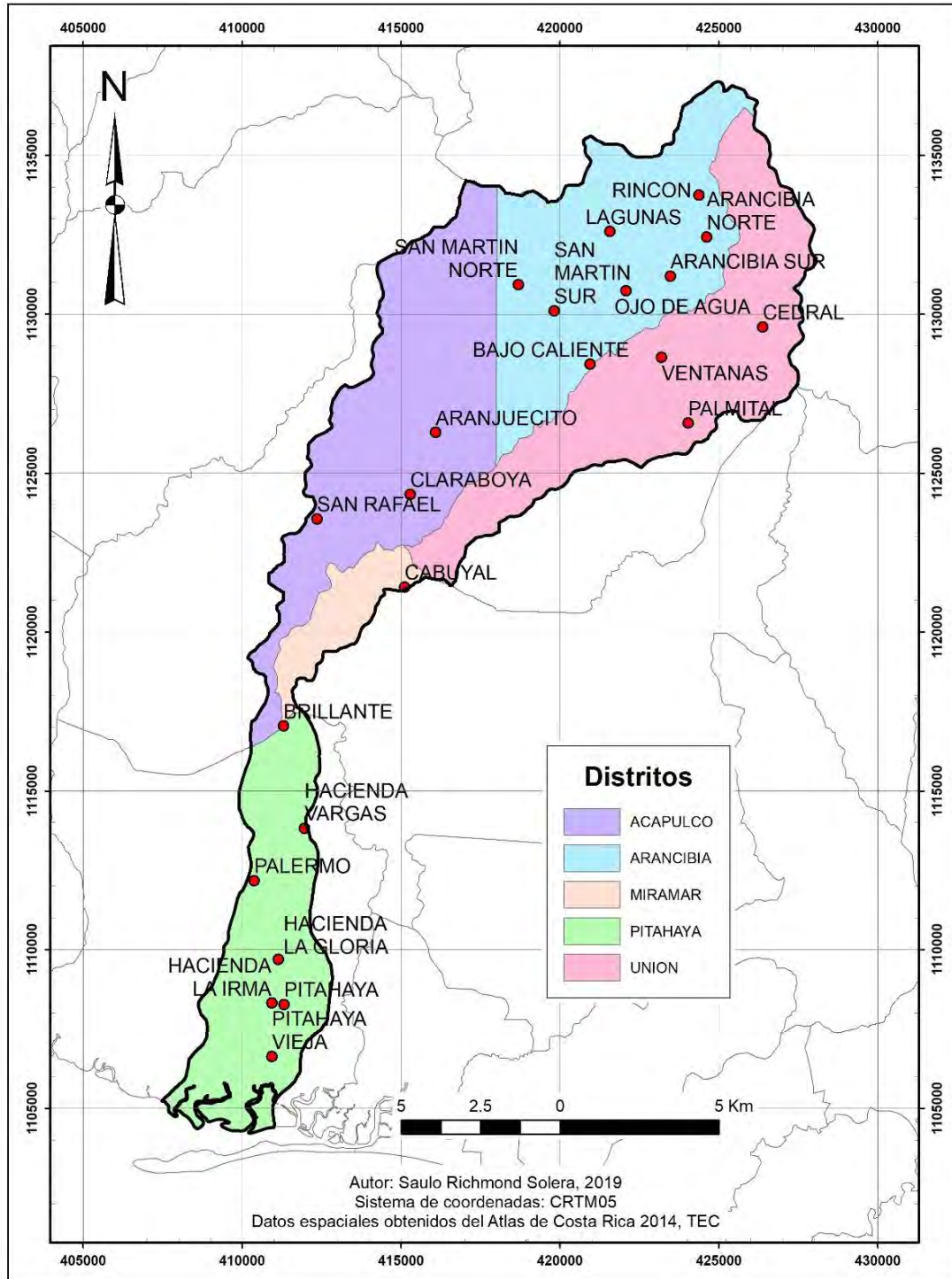
- Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). (2015). *Suelos de Costa Rica. Orden inceptisol*. Boletín técnico 5. San José, Costa Rica.
- Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). (2015). *Suelos de Costa Rica. Orden ultisol*. Boletín técnico 1. San José, Costa Rica.
- Madrigal, J. (2018). *Informe IAR-INF-0320-2018: Valoración general de los efectos generados por la Tormenta Nate en la cuenca hidrográfica del río Aranjuez*. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE).
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (1991). *Manual descriptivo de la leyenda del Mapa de Capacidad de Uso de la Tierra de Costa Rica Escala 1:200.000*. Costa Rica.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (1997). *Mapa de Capacidad de Uso de las Tierras*. Costa Rica.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA), y United States Geological Survey (USGS). (2020). *Imágenes satelitales Landsat 8: 30/03/2020*.
- Quesada, R. (2007). *Los bosques de Costa Rica*. IX Congreso Nacional de Ciencias. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.
- Real Decreto 9/2008. Boletín Oficial del Estado, Madrid, España, 16 de enero de 2008.
- Sandoval, D., y Mata, R. (2014). *Base de datos de perfiles de suelos de Costa Rica*. [en línea]: Versión 1.2. San José, Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS).
- Serrano, A. (2013). *Notas del curso IC-0808 Hidrología*. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Solano, F., y Salas, D. (2011). *Estudio hidrogeomorfológico y análisis sedimentológico de la sección alta de la cuenca del río Aranjuez*. Revista Geográfica de América Central: Número Especial EGAL, 2011, pp. 1-43. Costa Rica.
- Subramanya, K. (2008). *Engineering Hydrology*. 3ª edición. Nueva Dehli, India: Tata McGraw-Hill.
- Tecnológico de Costa Rica (TEC). (2014). *Atlas de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica.

Torres, M. (2020). Guía de fundamentos teóricos y casos de aplicación en hidrología para el análisis de valores extremos. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

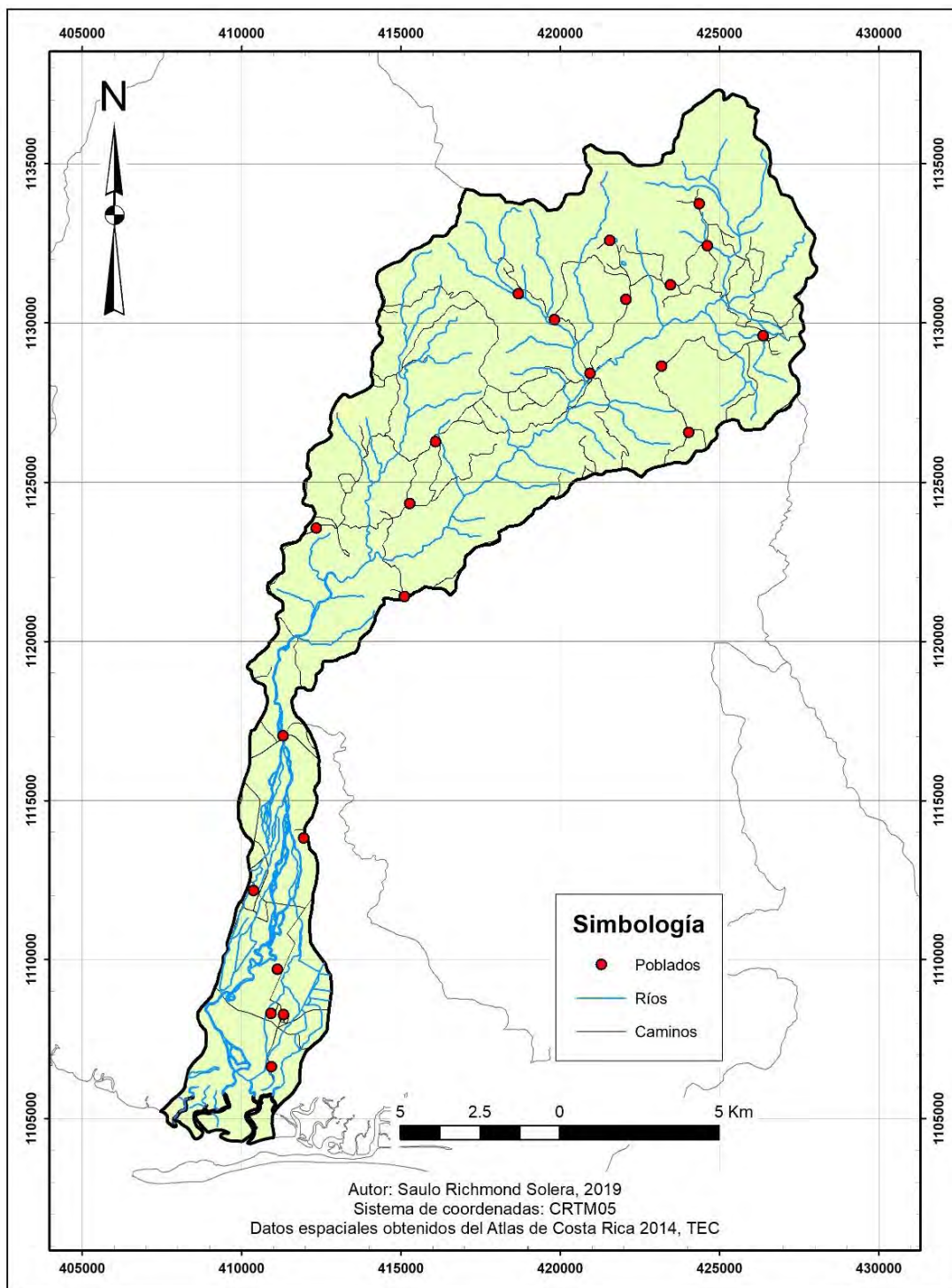
Vallejos, S., Esquivel, L., e Hidalgo, M. (2012). *Histórico de desastres en Costa Rica (Febrero 1723 – Setiembre 2012)*. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE). San José, Costa Rica.

Anexos

Anexo 1. Mapa de distritos y poblados en la cuenca del río Aranjuez



Anexo 2. Mapa de ríos, caminos y poblados en la cuenca del río Aranjuez



Anexo 3. Ajuste a la distribución de probabilidad de Gumbel y análisis de frecuencia

Cuadro 35. Distribución de Gumbel para la serie de máxima precipitación diaria, estación 78002 - Monteverde

No.	Precipitación (mm)	Función de distribución acumulada	Probabilidad de ocurrencia	Periodo de retorno (años)
1	213.1	0.9914	0.0086	116.1462
2	186.6	0.9771	0.0229	43.5899
3	158.0	0.9349	0.0651	15.3515
4	154.8	0.9269	0.0731	13.6837
5	136.7	0.8616	0.1384	7.2262
6	131.1	0.8324	0.1676	5.9648
7	128.8	0.8188	0.1812	5.5187
8	124.7	0.7922	0.2078	4.8129
9	117.3	0.7358	0.2642	3.7845
10	115.8	0.7229	0.2771	3.6088
11	106.9	0.6363	0.3637	2.7496
12	105.8	0.6244	0.3756	2.6624
13	102.2	0.5836	0.4164	2.4014
14	100.4	0.5622	0.4378	2.2841
15	99.0	0.5451	0.4549	2.1983
16	96.4	0.5125	0.4875	2.0512
17	95.6	0.5022	0.4978	2.0089
18	94.0	0.4814	0.5186	1.9284
19	92.3	0.4590	0.5410	1.8483
20	91.9	0.4536	0.5464	1.8302
21	87.5	0.3940	0.6060	1.6503
22	87.4	0.3927	0.6073	1.6466
23	87.2	0.3899	0.6101	1.6392
24	86.2	0.3762	0.6238	1.6032
25	86.0	0.3735	0.6265	1.5962
26	82.0	0.3188	0.6812	1.4681
27	80.0	0.2918	0.7082	1.4121
28	76.7	0.2484	0.7516	1.3305
29	75.9	0.2382	0.7618	1.3126
30	74.6	0.2218	0.7782	1.2850
31	73.8	0.2119	0.7881	1.2689
32	73.1	0.2034	0.7966	1.2554
33	70.4	0.1719	0.8281	1.2075
34	66.5	0.1305	0.8695	1.1501
35	61.7	0.0876	0.9124	1.0960
36	59.9	0.0740	0.9260	1.0799
37	59.7	0.0725	0.9275	1.0782

Cuadro 36. Intervalos para la prueba de bondad de ajuste chi-cuadrado, estación 78002 - Monteverde

Intervalo	Límite inferior (I_i)	Límite superior (S_i)	Cantidad de datos (θ_i)
1	0	35	0
2	35	70	4
3	70	105	21
4	105	140	8
5	140	175	2
6	175	215	2

Cuadro 37. Matriz de cálculo del estadístico de prueba chi-cuadrado, estación 78002 - Monteverde

Intervalo	F(I_i)	F(S_i)	ε_i	(θ_i-ε_i)²/ε_i
1	2.9175E-11	0.00138113	0.05110169	0.05110169
2	0.00138113	0.16738025	6.14196767	0.74699604
3	0.16738025	0.61556115	16.5826932	1.17668457
4	0.61556115	0.87659052	9.6580867	0.28465799
5	0.87659052	0.96487697	3.26659852	0.49111386
6	0.96487697	0.99197619	1.00267106	0.99201527

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\theta_i - \varepsilon_i)^2}{\varepsilon_i} = 3,743$$

El valor teórico de χ^2 con un intervalo de confianza de 95% y 3 grados de libertad es 7,815. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula: la distribución de probabilidad de Gumbel es representativa de la serie de máxima precipitación diaria de la estación 78002, Monteverde.

Cuadro 38. Distribución de Gumbel para la serie de máxima precipitación diaria, estación 78003-78027 - Puntarenas

No.	Precipitación (mm)	Función de distribución acumulada	Probabilidad de ocurrencia	Periodo de retorno (años)
1	272.8	0.9966	0.0034	293.7360
2	208.2	0.9745	0.0255	39.2480
3	198.8	0.9659	0.0341	29.3646
4	196.8	0.9638	0.0362	27.6118
5	165.0	0.9049	0.0951	10.5179
6	164.2	0.9026	0.0974	10.2704
7	152.7	0.8634	0.1366	7.3208
8	150.7	0.8552	0.1448	6.9080
9	144.6	0.8275	0.1725	5.7983
10	143.3	0.8210	0.1790	5.5881
11	135.6	0.7780	0.2220	4.5054
12	134.7	0.7725	0.2275	4.3953
13	134.0	0.7681	0.2319	4.3117
14	133.5	0.7649	0.2351	4.2531
15	132.1	0.7557	0.2443	4.0940
16	123.2	0.6907	0.3093	3.2326
17	121.3	0.6751	0.3249	3.0783
18	121.2	0.6743	0.3257	3.0705
19	121.1	0.6735	0.3265	3.0626
20	121.0	0.6726	0.3274	3.0548
21	118.9	0.6548	0.3452	2.8965
22	118.6	0.6521	0.3479	2.8747
23	116.7	0.6353	0.3647	2.7417
24	114.9	0.6188	0.3812	2.6230
25	111.4	0.5853	0.4147	2.4112
26	110.7	0.5784	0.4216	2.3717
27	106.3	0.5334	0.4666	2.1432
28	105.8	0.5277	0.4723	2.1175
29	103.9	0.5079	0.4921	2.0319
30	100.0	0.4650	0.5350	1.8693
31	100.0	0.4650	0.5350	1.8693
32	98.6	0.4493	0.5507	1.8160
33	97.8	0.4403	0.5597	1.7867
34	97.7	0.4392	0.5608	1.7831
35	96.8	0.4290	0.5710	1.7512
36	92.9	0.3843	0.6157	1.6241
37	92.8	0.3831	0.6169	1.6211
38	92.5	0.3797	0.6203	1.6121
39	91.6	0.3690	0.6310	1.5849
40	89.8	0.3486	0.6514	1.5351
41	88.9	0.3382	0.6618	1.5111
42	88.3	0.3313	0.6687	1.4955
43	87.7	0.3245	0.6755	1.4803
44	81.0	0.2494	0.7506	1.3324

45	80.4	0.2430	0.7570	1.3209
46	80.3	0.2419	0.7581	1.3191
47	80.3	0.2419	0.7581	1.3191
48	76.9	0.2062	0.7938	1.2598
49	76.6	0.2032	0.7968	1.2550
50	75.6	0.1931	0.8069	1.2393
51	72.9	0.1670	0.8330	1.2005
52	71.0	0.1497	0.8503	1.1760
53	69.8	0.1392	0.8608	1.1617
54	67.0	0.1161	0.8839	1.1314
55	66.0	0.1084	0.8916	1.1216
56	65.4	0.1040	0.8960	1.1160
57	59.6	0.0662	0.9338	1.0709
58	59.0	0.0629	0.9371	1.0671
59	57.4	0.0546	0.9454	1.0577
60	57.3	0.0541	0.9459	1.0572

Cuadro 39. Intervalos para la prueba de bondad de ajuste chi-cuadrado, estación 78003-78027 - Puntarenas

Intervalo	Límite inferior (I _i)	Límite superior (S _i)	Cantidad de datos (θ _i)
1	0	45	0
2	45	90	21
3	90	135	28
4	135	180	7
5	180	225	3
6	225	273	1

Cuadro 40. Matriz de cálculo del estadístico de prueba chi-cuadrado, estación 78003-78027 - Puntarenas

Intervalo	F(I _i)	F(S _i)	ε _i	(θ _i -ε _i) ² /ε _i
1	2.3493E-08	0.01371459	0.82287385	0.82287385
2	0.01371459	0.35087199	20.2294444	0.02935108
3	0.35087199	0.77434981	25.4086693	0.26427968
4	0.77434981	0.93946665	9.90700988	0.85300273
5	0.93946665	0.98486871	2.7241236	0.02793845
6	0.98486871	0.99661681	0.70488634	0.12355477

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\theta_i - \varepsilon_i)^2}{\varepsilon_i} = 2,121$$

El valor teórico de χ^2 con un intervalo de confianza de 95% y 3 grados de libertad es 7,815. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula: la distribución de probabilidad de Gumbel es

representativa de la serie de máxima precipitación diaria de la estación 78003-78027 - Puntarenas.

Cuadro 41. Distribución de Gumbel para la serie de máxima precipitación diaria, estación 78005 - Sarmiento

No.	Precipitación (mm)	Función de distribución acumulada	Probabilidad de ocurrencia	Periodo de retorno (años)
1	120.0	0.9776	0.0224	44.7137
2	109.0	0.9360	0.0640	15.6186
3	104.0	0.8978	0.1022	9.7869
4	102.4	0.8816	0.1184	8.4472
5	101.7	0.8738	0.1262	7.9239
6	100.5	0.8593	0.1407	7.1061
7	99.8	0.8501	0.1499	6.6717
8	99.6	0.8474	0.1526	6.5529
9	99.1	0.8404	0.1596	6.2660
10	98.4	0.8301	0.1699	5.8873
11	97.3	0.8128	0.1872	5.3423
12	97.0	0.8078	0.1922	5.2036
13	96.5	0.7993	0.2007	4.9813
14	96.0	0.7903	0.2097	4.7697
15	96.0	0.7903	0.2097	4.7697
16	95.0	0.7715	0.2285	4.3766
17	93.5	0.7406	0.2594	3.8551
18	90.6	0.6713	0.3287	3.0424
19	90.1	0.6581	0.3419	2.9246
20	90.0	0.6554	0.3446	2.9017
21	90.0	0.6554	0.3446	2.9017
22	88.4	0.6102	0.3898	2.5655
23	88.3	0.6073	0.3927	2.5462
24	88.0	0.5983	0.4017	2.4896
25	87.7	0.5893	0.4107	2.4347
26	85.8	0.5291	0.4709	2.1235
27	85.0	0.5024	0.4976	2.0098
28	82.1	0.4011	0.5989	1.6698
29	82.0	0.3976	0.6024	1.6599
30	81.0	0.3617	0.6383	1.5666
31	80.5	0.3438	0.6562	1.5238
32	80.5	0.3438	0.6562	1.5238
33	77.5	0.2391	0.7609	1.3142
34	77.4	0.2357	0.7643	1.3085
35	76.0	0.1908	0.8092	1.2358
36	75.1	0.1639	0.8361	1.1960
37	75.0	0.1610	0.8390	1.1919
38	73.0	0.1086	0.8914	1.1218

39	72.6	0.0994	0.9006	1.1104
40	72.0	0.0865	0.9135	1.0947
41	68.5	0.0319	0.9681	1.0330
42	68.0	0.0269	0.9731	1.0276
43	66.5	0.0152	0.9848	1.0154
44	60.8	0.0007	0.9993	1.0007
45	60.7	0.0006	0.9994	1.0006

Cuadro 42. Intervalos para la prueba de bondad de ajuste chi-cuadrado, estación 78005 - Sarmiento

Intervalo	Límite inferior (I _i)	Límite superior (S _i)	Cantidad de datos (θ _i)
1	0	20	0
2	20	40	0
3	40	60	0
4	60	80	13
5	80	100	26
6	100	120	5

Cuadro 43. Matriz de cálculo del estadístico de prueba chi-cuadrado, estación 78005 - Sarmiento

Intervalo	F(I _i)	F(S _i)	ε _i	(θ _i -ε _i) ² /ε _i
1	0	1.139E-170	5.127E-169	0
2	1.139E-170	7.2859E-25	3.2786E-23	3.2786E-23
3	7.2859E-25	0.00037298	0.01678398	0.01678398
4	0.00037298	0.3258868	14.6481219	0.18543713
5	0.3258868	0.852785	23.7104189	0.2210919
6	0.852785	0.97763548	5.61827171	0.0680387

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\theta_i - \varepsilon_i)^2}{\varepsilon_i} = 0,491$$

El valor teórico de χ^2 con un intervalo de confianza de 95% y 3 grados de libertad es 7,815. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula: la distribución de probabilidad de Gumbel es representativa de la serie de máxima precipitación diaria de la estación 78005 - Sarmiento.

Cuadro 44. Distribución de Gumbel para la serie de máxima precipitación diaria, estación 78006 - Miramar

No.	Precipitación (mm)	Función de distribución acumulada	Probabilidad de ocurrencia	Periodo de retorno (años)
1	256.0	0.9710	0.0290	34.4287
2	245.1	0.9599	0.0401	24.9646
3	234.5	0.9454	0.0546	18.3010
4	227.5	0.9330	0.0670	14.9303
5	205.0	0.8727	0.1273	7.8542
6	201.0	0.8577	0.1423	7.0251
7	200.0	0.8537	0.1463	6.8329
8	196.3	0.8379	0.1621	6.1703
9	191.9	0.8173	0.1827	5.4729
10	188.0	0.7971	0.2029	4.9276
11	177.3	0.7315	0.2685	3.7239
12	174.8	0.7139	0.2861	3.4947
13	173.8	0.7066	0.2934	3.4079
14	172.5	0.6969	0.3031	3.2989
15	172.0	0.6931	0.3069	3.2581
16	170.7	0.6830	0.3170	3.1550
17	170.0	0.6775	0.3225	3.1011
18	165.5	0.6405	0.3595	2.7813
19	154.2	0.5350	0.4650	2.1506
20	152.0	0.5127	0.4873	2.0519
21	147.2	0.4622	0.5378	1.8596
22	147.2	0.4622	0.5378	1.8596
23	145.5	0.4439	0.5561	1.7984
24	143.3	0.4200	0.5800	1.7242
25	139.2	0.3749	0.6251	1.5998
26	138.8	0.3705	0.6295	1.5886
27	130.5	0.2798	0.7202	1.3885
28	130.0	0.2745	0.7255	1.3783
29	125.7	0.2297	0.7703	1.2982
30	125.2	0.2246	0.7754	1.2897
31	118.6	0.1620	0.8380	1.1933
32	115.2	0.1332	0.8668	1.1537
33	114.3	0.1260	0.8740	1.1442
34	110.8	0.1002	0.8998	1.1114
35	110.3	0.0968	0.9032	1.1072
36	108.8	0.0869	0.9131	1.0952
37	100.3	0.0427	0.9573	1.0447
38	89.0	0.0120	0.9880	1.0121
39	86.0	0.0079	0.9921	1.0080

Cuadro 45. Intervalos para la prueba de bondad de ajuste chi-cuadrado, estación 78006 - Miramar

Intervalo	Límite inferior (I_i)	Límite superior (S_i)	Cantidad de datos (θ_i)
1	0	45	0
2	45	90	2
3	90	135	11
4	135	180	16
5	180	225	6
6	225	260	4

Cuadro 46. Matriz de cálculo del estadístico de prueba chi-cuadrado, estación 78006 - Miramar

Intervalo	F(I_i)	F(S_i)	ε_i	(θ_i-ε_i)²/ε_i
1	1.6837E-28	6.3512E-08	2.477E-06	2.477E-06
2	6.3512E-08	0.01364483	0.53214577	4.04888312
3	0.01364483	0.3286283	12.2843556	0.13428211
4	0.3286283	0.74948224	16.4133036	0.0104074
5	0.74948224	0.92799638	6.9620515	0.13294114
6	0.92799638	0.97419704	1.80182572	2.68170783

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\theta_i - \varepsilon_i)^2}{\varepsilon_i} = 7,008$$

El valor teórico de χ^2 con un intervalo de confianza de 95% y 3 grados de libertad es 7,815. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula: la distribución de probabilidad de Gumbel es representativa de la serie de máxima precipitación diaria de la estación 78006 - Miramar.

Cuadro 47. Distribución de Gumbel para la serie de máxima precipitación diaria, estación 78012 - Montes de Oro

No.	Precipitación (mm)	Función de distribución acumulada	Probabilidad de ocurrencia	Periodo de retorno (años)
1	220.2	0.9896	0.0104	96.5738
2	188.5	0.9692	0.0308	32.4845
3	168.4	0.9391	0.0609	16.4278
4	159.4	0.9178	0.0822	12.1588
5	158.3	0.9147	0.0853	11.7228
6	138.8	0.8391	0.1609	6.2157
7	123.2	0.7398	0.2602	3.8431
8	123.2	0.7398	0.2602	3.8431

9	121.1	0.7231	0.2769	3.6118
10	118.6	0.7022	0.2978	3.3579
11	118.6	0.7022	0.2978	3.3579
12	117.2	0.6899	0.3101	3.2253
13	116.5	0.6837	0.3163	3.1614
14	111.5	0.6362	0.3638	2.7485
15	111.3	0.6342	0.3658	2.7334
16	105.8	0.5762	0.4238	2.3599
17	103.6	0.5516	0.4484	2.2301
18	103.4	0.5493	0.4507	2.2188
19	101.6	0.5285	0.4715	2.1209
20	95.0	0.4485	0.5515	1.8133
21	91.6	0.4057	0.5943	1.6826
22	90.0	0.3853	0.6147	1.6268
23	88.6	0.3674	0.6326	1.5809
24	85.5	0.3280	0.6720	1.4880
25	84.6	0.3166	0.6834	1.4632
26	80.6	0.2667	0.7333	1.3638
27	79.6	0.2546	0.7454	1.3415
28	77.7	0.2319	0.7681	1.3019
29	75.0	0.2009	0.7991	1.2514
30	73.9	0.1887	0.8113	1.2327
31	73.4	0.1833	0.8167	1.2245
32	72.3	0.1716	0.8284	1.2072
33	72.0	0.1685	0.8315	1.2026
34	66.0	0.1116	0.8884	1.1256
35	64.8	0.1016	0.8984	1.1131
36	64.3	0.0976	0.9024	1.1082
37	50.8	0.0243	0.9757	1.0249

Cuadro 48. Intervalos para la prueba de bondad de ajuste chi-cuadrado, estación 78012 - Montes de Oro

Intervalo	Límite inferior (I_i)	Límite superior (S_i)	Cantidad de datos (θ_i)
1	0	37	0
2	37	74	8
3	74	111	14
4	111	148	10
5	148	185	3
6	185	222	2

Cuadro 49. Matriz de cálculo del estadístico de prueba chi-cuadrado, estación 78012 - Montes de Oro

Intervalo	F(I_i)	F(S_i)	ε_i	(θ_i-ε_i)²/ε_i
1	3.9198E-10	0.00248081	0.09179002	0.09179002
2	0.00248081	0.18983406	6.93207013	0.16452145
3	0.18983406	0.63114549	16.3285228	0.33205811
4	0.63114549	0.88032161	9.21951658	0.06607227
5	0.88032161	0.96531083	3.14460127	0.00664934
6	0.96531083	0.99026911	0.92345612	1.25501005

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\theta_i - \varepsilon_i)^2}{\varepsilon_i} = 1,916$$

El valor teórico de χ^2 con un intervalo de confianza de 95% y 3 grados de libertad es 7,815. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula: la distribución de probabilidad de Gumbel es representativa de la serie de máxima precipitación diaria de la estación 78012 - Montes de Oro.

Cuadro 50. Distribución de Gumbel para la serie de máxima precipitación diaria, estación 78017-78031 - Chomes

No.	Precipitación (mm)	Función de distribución acumulada	Probabilidad de ocurrencia	Periodo de retorno (años)
1	162.5	0.9722	0.0278	35.9781
2	127.5	0.8531	0.1469	6.8082
3	126.8	0.8484	0.1516	6.5947
4	119.2	0.7871	0.2129	4.6974
5	112	0.7106	0.2894	3.4555
6	108.6	0.6676	0.3324	3.0081
7	97.7	0.5004	0.4996	2.0014
8	93.4	0.4247	0.5753	1.7383
9	90.6	0.3741	0.6259	1.5976
10	84.9	0.2717	0.7283	1.3730
11	83.3	0.2440	0.7560	1.3228
12	79.5	0.1824	0.8176	1.2231
13	75.8	0.1296	0.8704	1.1490
14	65.4	0.0329	0.9671	1.0340

Cuadro 51. Intervalos para la prueba de bondad de ajuste chi-cuadrado, estación 78017-78031 - Chomes

Intervalo	Límite inferior (I_i)	Límite superior (S_i)	Cantidad de datos (θ_i)
1	0	27	0
2	27	54	0
3	54	81	3
4	81	108	5
5	108	135	5
6	135	163	1

Cuadro 52. Matriz de cálculo del estadístico de prueba chi-cuadrado, estación 78017-78031 - Chomes

Intervalo	F(I_i)	F(S_i)	ε_i	(θ_i-ε_i)²/ε_i
1	2.9621E-38	1.2973E-10	1.8162E-09	1.8162E-09
2	1.2973E-10	0.00248453	0.03478348	0.03478348
3	0.00248453	0.20595342	2.84856438	0.00805063
4	0.20595342	0.65949311	6.34955563	0.28683903
5	0.65949311	0.89612866	3.31289776	0.85916143
6	0.89612866	0.97287417	1.07443719	0.00515702

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\theta_i - \varepsilon_i)^2}{\varepsilon_i} = 1,194$$

El valor teórico de χ^2 con un intervalo de confianza de 95% y 3 grados de libertad es 7,815. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula: la distribución de probabilidad de Gumbel es representativa de la serie de máxima precipitación diaria de la estación 78017-78031 - Chomes.

Cuadro 53. Distribución de Gumbel para la serie de máxima precipitación diaria, estación 78023 - Lagunilla

No.	Precipitación (mm)	Función de distribución acumulada	Probabilidad de ocurrencia	Periodo de retorno (años)
1	172	0.9325	0.0675	14.8218
2	172	0.9325	0.0675	14.8218
3	137.2	0.6991	0.3009	3.3235
4	126	0.5457	0.4543	2.2014
5	112.8	0.3245	0.6755	1.4803
6	111.5	0.3023	0.6977	1.4332
7	107.2	0.2313	0.7687	1.3009
8	106.7	0.2234	0.7766	1.2876
9	103.1	0.1695	0.8305	1.2041

Cuadro 54. Intervalos para la prueba de bondad de ajuste chi-cuadrado, estación 78023 - Lagunilla

Intervalo	Límite inferior (I _i)	Límite superior (S _i)	Cantidad de datos (θ _i)
1	0	30	0
2	27	60	0
3	54	90	0
4	81	120	5
5	108	150	2
6	135	180	2

Cuadro 55. Matriz de cálculo del estadístico de prueba chi-cuadrado, estación 78023 - Lagunilla

Intervalo	F(I _i)	F(S _i)	ε _i	(θ _i -ε _i) ² /ε _i
1	2.6372E-98	1.3926E-24	1.2533E-23	1.2533E-23
2	3.4292E-28	1.471E-06	1.3239E-05	1.3239E-05
3	1.8607E-08	0.03750524	0.33754696	0.33754696
4	0.00667122	0.44811805	3.97302145	0.26546168
5	0.24411532	0.82181117	5.19926266	1.96860252
6	0.67240493	0.95315466	2.5267476	0.10981035

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\theta_i - \varepsilon_i)^2}{\varepsilon_i} = 2,681$$

El valor teórico de χ^2 con un intervalo de confianza de 95% y 3 grados de libertad es 7,815. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula: la distribución de probabilidad de Gumbel es representativa de la serie de máxima precipitación diaria de la estación 78023 - Lagunilla.

Cuadro 56. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según estación meteorológica, mediante la distribución de Gumbel

Estación		Periodo de retorno (años)					
Número	Nombre	2	5	10	25	50	100
78002	Monteverde	95.4	125.9	146.0	171.4	190.3	209.1
78003-78027	Puntarenas	107.6	145.2	170.0	201.4	224.7	247.8
78005	Sarmiento	84.7	95.9	103.3	112.6	119.6	126.4
78006	Miramar	150.8	188.5	213.6	245.1	268.6	291.9
78012	Montes de Oro	98.8	130.4	151.3	177.7	197.4	216.8
78017-78031	Chomes	97.7	120.6	135.8	155.0	169.2	183.4
78023	Lagunilla	123.1	147.3	163.2	183.4	198.4	213.3

Anexo 4. Comparación de resultados obtenidos con las distribuciones de probabilidad de Gumbel y GEV

Cuadro 57. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78002 - Monteverde

T (años)	Precipitación diaria máxima (mm)						
	2,5%	Valor estimado GEV	97,5%	Valor estimado Gumbel	Diferencia vs GEV (%)	Valor estimado Gumbel ajustado	Diferencia vs GEV (%)
2	84.1	92.2	102.2	95.4	3.5	97.3	5.5
5	105.1	121.1	138.8	125.9	3.9	128.4	6.0
10	119.3	143.8	170.5	146.0	1.6	149.0	3.6
25	136.1	177.0	226.5	171.4	3.1	174.9	1.2
50	146.2	205.6	287.5	190.3	7.4	194.2	5.5
100	155.0	237.7	376.6	209.1	12.0	213.4	10.2

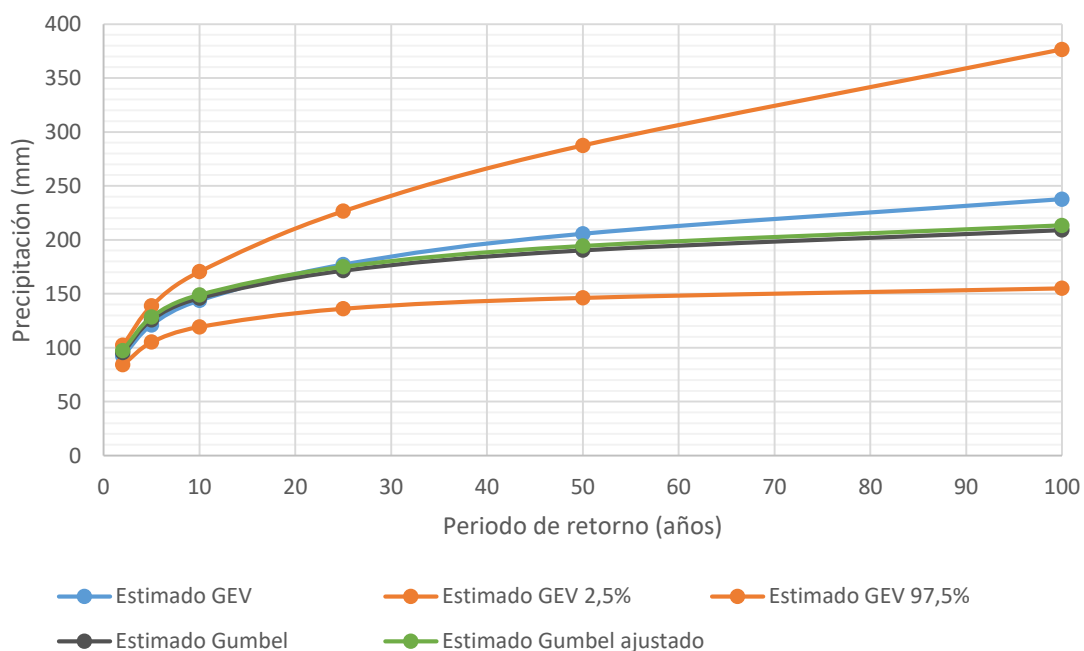


Figura 30. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78002 - Monteverde

Cuadro 58. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78003-78027 - Puntarenas

T (años)	Precipitación diaria máxima (mm)						
	2,5%	Valor estimado GEV	97,5%	Valor estimado Gumbel	Diferencia vs GEV (%)	Valor estimado Gumbel ajustado	Diferencia vs GEV (%)
2	96.3	105.5	117.5	107.6	2.0	107.6	2.0
5	126.7	142.0	160.5	145.2	2.2	145.2	2.2
10	144.3	168.3	192.4	170.0	1.0	170.0	1.0
25	164.3	204.3	251.2	201.4	1.4	201.4	1.4
50	177.9	233.2	303.8	224.7	3.6	224.7	3.6
100	189.2	263.7	367.2	247.8	6.0	247.8	6.0

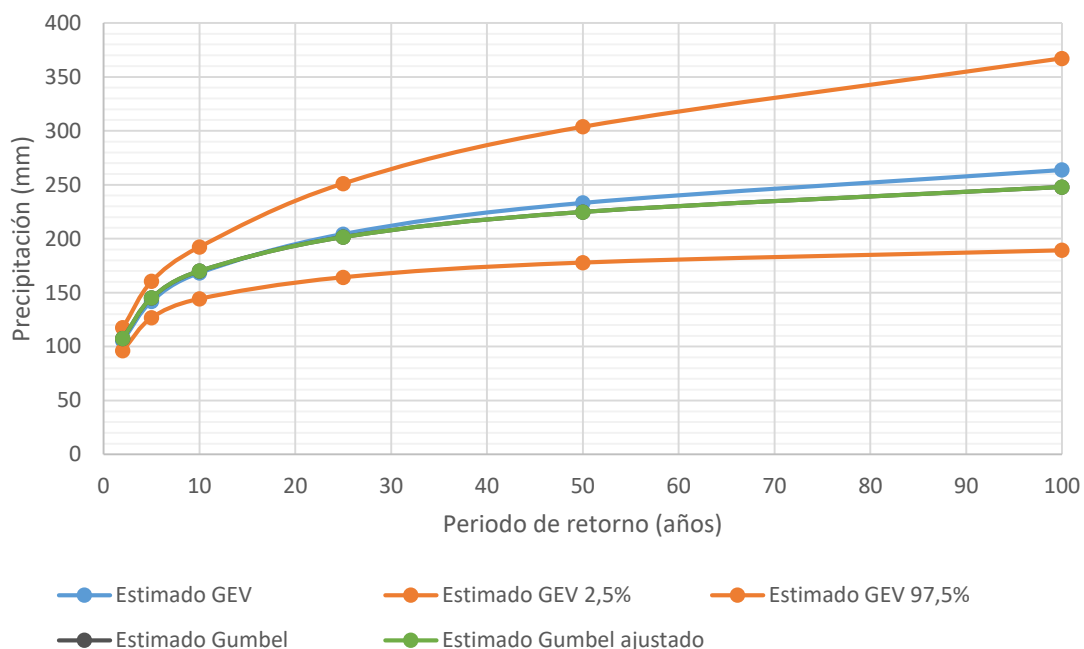


Figura 31. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78003-78027 - Puntarenas

Cuadro 59. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78005 - Sarmiento

T (años)	Precipitación diaria máxima (mm)						
	2,5%	Valor estimado GEV	97,5%	Valor estimado Gumbel	Diferencia vs GEV (%)	Valor estimado Gumbel ajustado	Diferencia vs GEV (%)
2	83.4	87.6	91.5	84.7	3.3	86.3	1.4
5	94.3	98.8	102.6	95.9	3.0	100.4	1.6
10	99.5	104.2	108.5	103.3	0.9	109.3	5.0
25	103.6	109.2	114.9	112.6	3.1	120.4	10.3
50	105.2	112.0	119.0	119.6	6.8	128.6	14.8
100	106.1	114.1	123.8	126.4	10.8	136.6	19.7

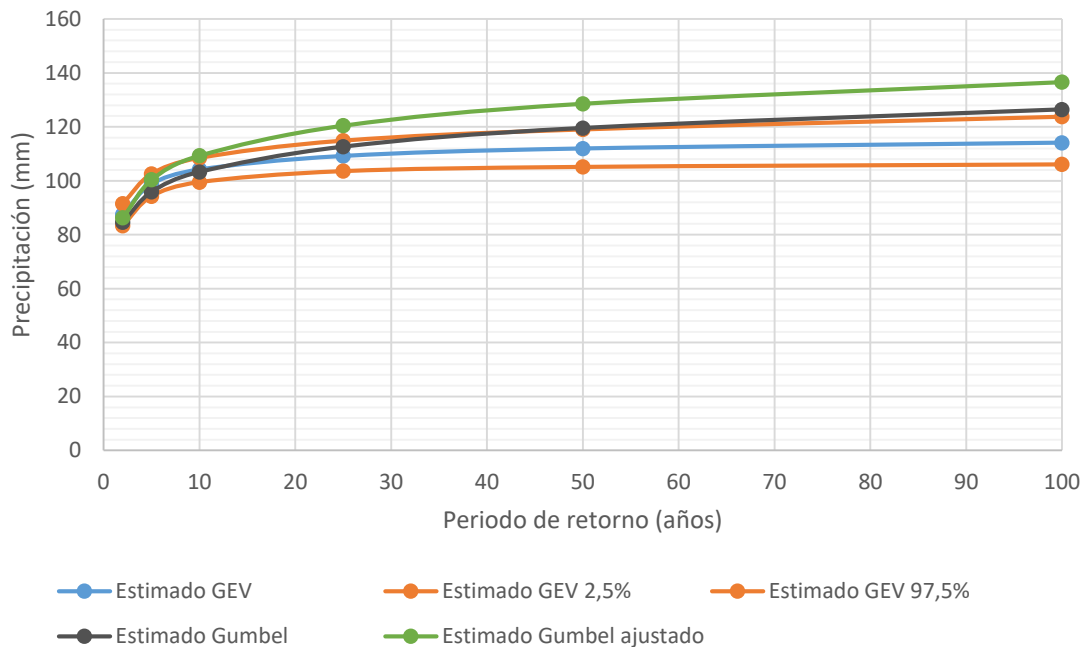


Figura 32. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78005 - Sarmiento

Cuadro 60. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78006 - Miramar

T (años)	Precipitación diaria máxima (mm)						
	2,5%	Valor estimado GEV	97,5%	Valor estimado Gumbel	Diferencia vs GEV (%)	Valor estimado Gumbel ajustado	Diferencia vs GEV (%)
2	139.6	153.4	168.7	150.8	1.7	142.1	7.4
5	175.0	193.0	212.3	188.5	2.3	179.4	7.0
10	192.9	216.4	238.8	213.6	1.3	204.1	5.7
25	211.6	243.1	280.1	245.1	0.9	235.2	3.3
50	220.0	261.0	312.6	268.6	2.9	258.2	1.1
100	227.5	277.4	346.5	291.9	5.2	281.0	1.3

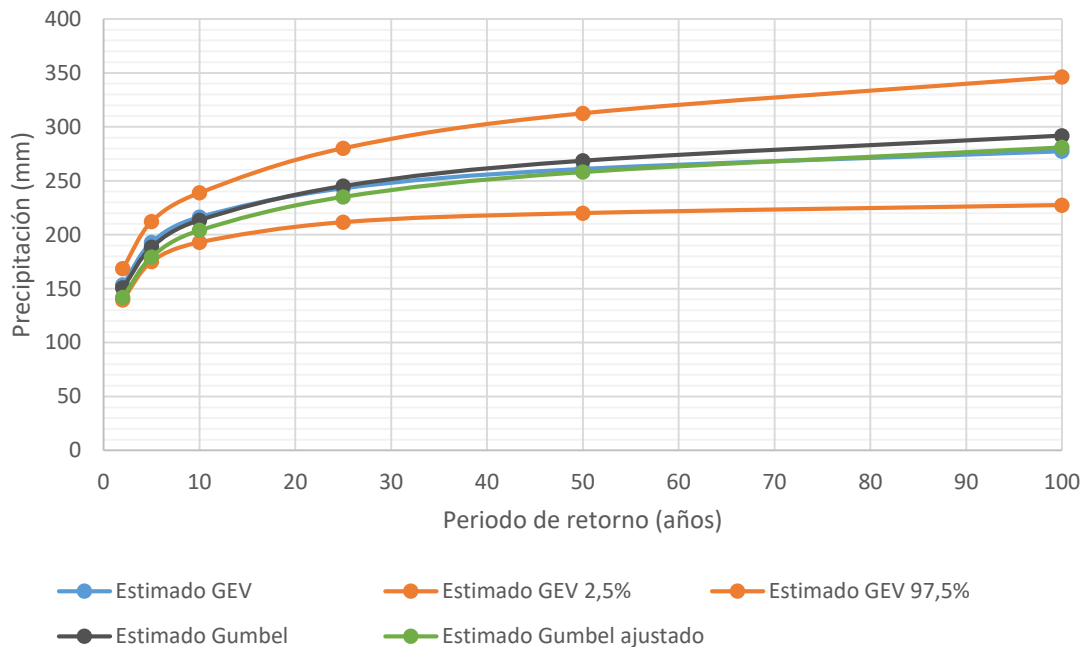


Figura 33. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78006 - Miramar

Cuadro 61. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78012 - Montes de Oro

T (años)	Precipitación diaria máxima (mm)						
	2,5%	Valor estimado GEV	97,5%	Valor estimado Gumbel	Diferencia vs GEV (%)	Valor estimado Gumbel ajustado	Diferencia vs GEV (%)
2	87.4	97.2	109.2	98.8	1.6	100.7	3.7
5	112.5	129.7	148.2	130.4	0.6	133.0	2.6
10	128.1	153.2	181.7	151.3	1.2	154.4	0.8
25	148.0	185.5	238.9	177.7	4.2	181.4	2.2
50	157.7	211.4	297.8	197.4	6.7	201.4	4.8
100	164.4	239.0	368.2	216.8	9.3	221.3	7.4

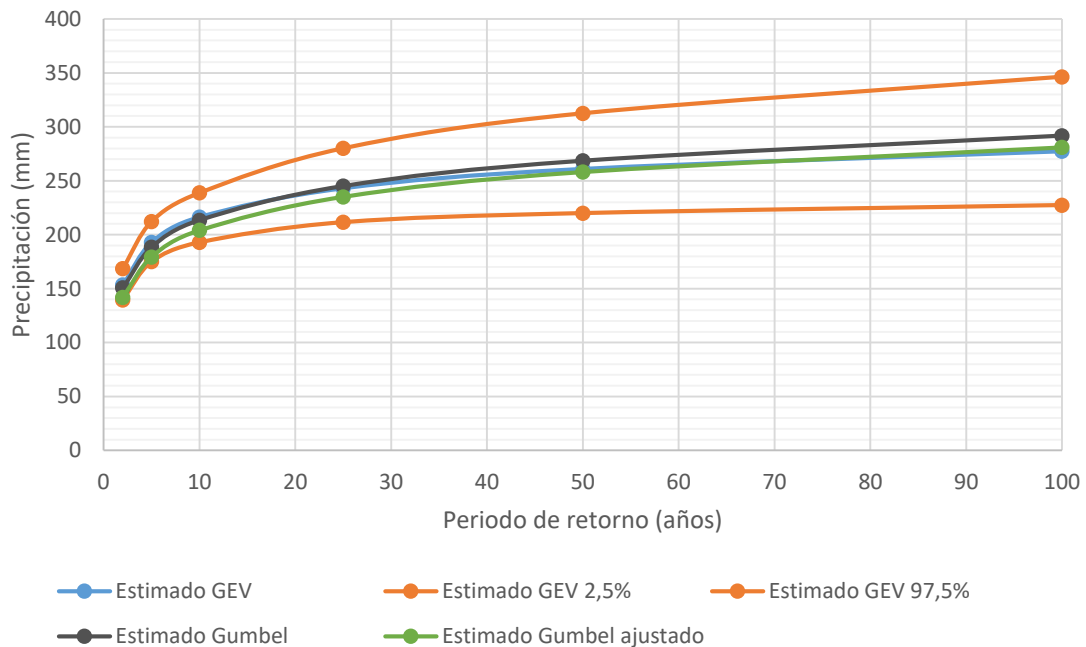


Figura 34. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78012 - Montes de Oro

Cuadro 62. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78017-78031 - Chomes

T (años)	Precipitación diaria máxima (mm)						
	2,5%	Valor estimado GEV	97,5%	Valor estimado Gumbel	Diferencia vs GEV (%)	Valor estimado Gumbel ajustado	Diferencia vs GEV (%)
2	82.8	97.2	113.0	97.7	0.5	110.6	13.8
5	101.1	121.5	141.3	120.6	0.7	148.6	22.3
10	112.1	137.8	161.0	135.8	1.4	172.9	25.5
25	119.0	158.6	201.7	155.0	2.3	203.3	28.1
50	123.3	174.3	241.1	169.2	2.9	225.6	29.4
100	127.5	190.1	297.8	183.4	3.5	247.6	30.3

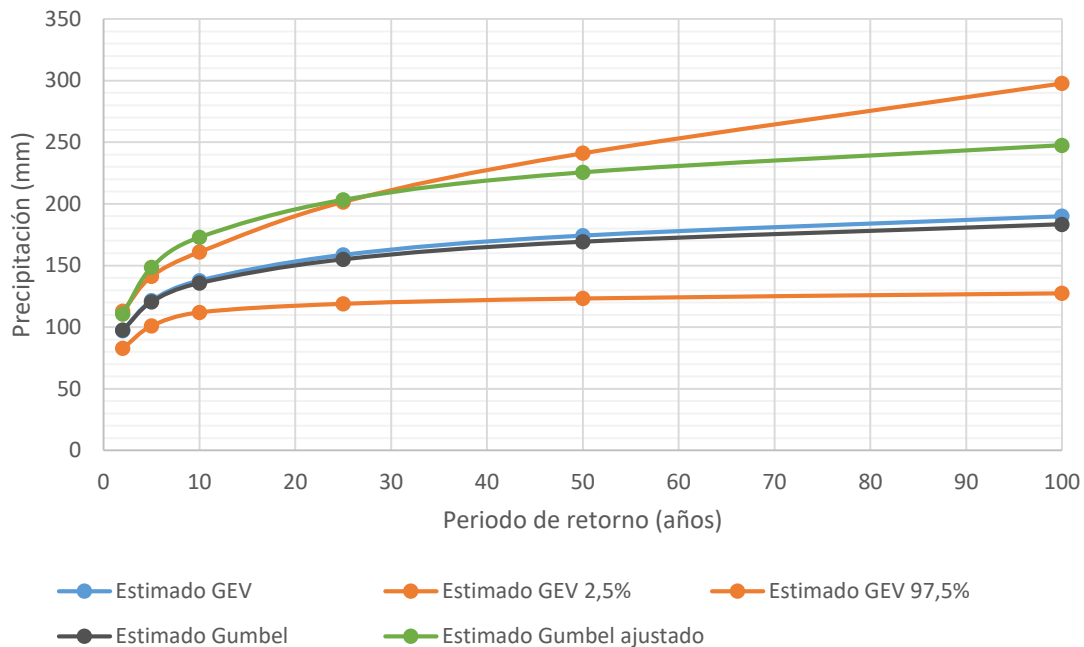


Figura 35. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78017-78031 - Chomes

Cuadro 63. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78023 - Lagunilla

T (años)	Precipitación diaria máxima (mm)						
	2,5%	Valor estimado GEV	97,5%	Valor estimado Gumbel	Diferencia vs GEV (%)	Valor estimado Gumbel ajustado	Diferencia vs GEV (%)
2	106.6	118.6	139.2	123.1	3.8	133.8	12.8
5	119.2	141.6	172.0	147.3	4.0	175.1	23.6
10	127.1	161.6	211.5	163.2	1.0	201.1	24.5
25	133.4	193.7	295.2	183.4	5.3	233.1	20.3
50	137.6	223.9	395.0	198.4	11.4	256.5	14.5
100	138.3	260.6	551.4	213.3	18.2	279.5	7.3

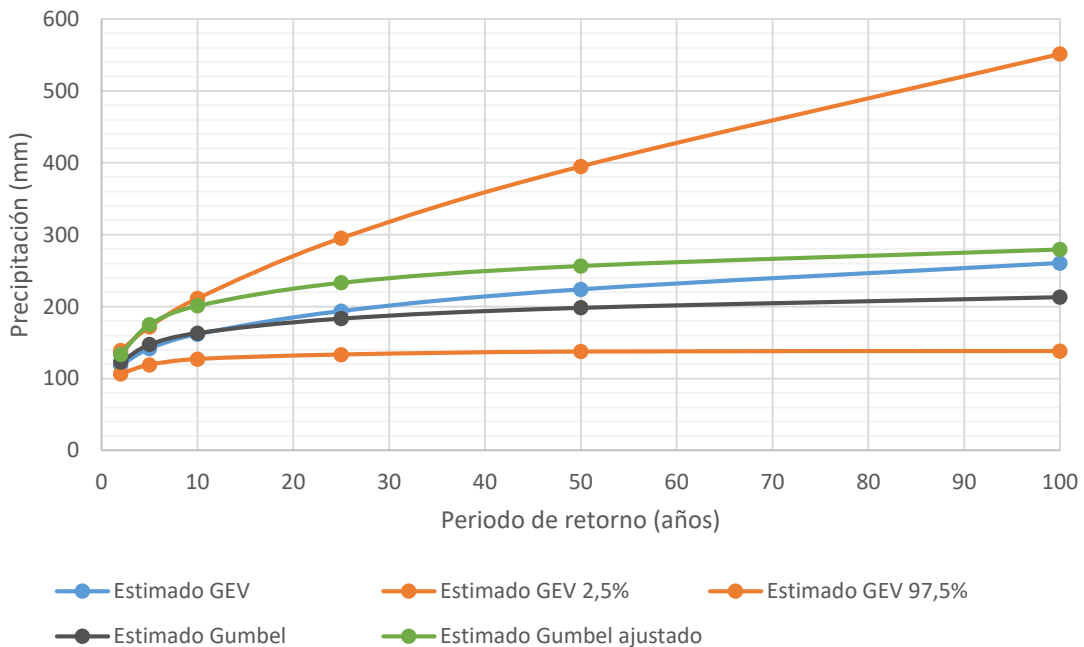


Figura 36. Precipitación diaria máxima (mm) para diferentes periodos de retorno, según distribución de probabilidad, estación 78023 - Lagunilla

Anexo 5. Volúmenes de precipitación diaria registrados durante eventos extremos

Cuadro 64. Precipitación diaria (mm) durante eventos extremos que han afectado la cuenca del río Aranjuez

Fecha			Estación						
Día	Mes	Año	78002	78003 (78027)	78005	78006	78012	78017 (78031)	78023
Huracán Gilbert									
6	9	1988	6.8	24.8	15.5	33.3			
7			22.6	0.9	17.5	2.5			
8			21	5.5	57	30.5			
9			17.3	0	57	28			
10			24.4	7.1	28	51.1			
11			15.6	6.1	52	58.5			
Huracán Juana									
19	10	1988	8.6	1.3	14.5	0	11.2		
20			7.8	0.4	56.3	75.5	9		
21			29.2	44.4	55	70	30.2		
22			124.8	53.3	43	25.5	111.2		
23			14.4	12.3	63	234.5	15		
24			43.2	81	57.3	6.2	70		
Temporal									
16	10	1994	0.1	0.2	30	33.3	12.7		
17			7.5	4	30	44	0		
18			41	143.3	0	29	25.9		
19			6.7	0	0	0	5		
20			0.7	0	8	39.8	0		
21			15.4	24.5	0	0	28		
Temporal									
27	6	1996	34.2	13.3	46.5	2.9	34.9	36.9	
28			0.4	0	0	0	10.4	0	
29			4.8	0	32.5	22.7	6.5	0	
30			24.9	17.2	55	69.5	35.7	61.5	
1	7	1996	65.8	82	11	11.1	44.4	35	
2			91.8	20.4	0	29.5	45.1	9	
Huracán César									
25	7	1996	0.6	0.1		0	1.3	0	
26			2.2	0		40.4	14.7	0	
27			75.9	51		151.5	82.7	0	
28			91.7	60.3		0	117.2	106	
29			2.8	1.1		0	7.3	0	
30			1.5	0		0	0.4	0	
Huracán Gustav / Tormenta tropical Hanna									
28	8	1998	0.8	0	0.8	8	0		5.8
29			14.8	16.2	0.4	0	24.1		37.8
30			6.8	6.2	33	0	0.8		1.8
31			0.2	4.5	6	135	7.4		11.2
1	9	1998	10.2	6.6	0	0	43.7		50
2			0.4	0	10.8	16.1	0		2.8

Huracán Mitch									
25	10	1998	26.5	18.4	71	96.8	8.5		38.6
26			118.1	51.5	50.1	89.5	48		89.7
27			113	118.2	65.1	77.3	63.2		101
28			186.6	45.6	8	30	122.8		172
29			78.6	19.8	14	20.5	27.4		45.7
30			25.2	17.5	0	0	12.6		53.1
Huracán Floyd									
21	9	1999	41	5.8	4.2	12.5	41.7		54.4
22			62.9	10.7	4	0	49.9		25.9
23			4.8	2.2	39.4	0	0		1.8
24			2.2	0.5	3.8	38.2	0.3		1
25			26.8	12.7	47.2	28.3	17.5		63.3
26			95.2	19.5	17.5	23.7	38.3		51.3
Huracán Michelle									
31	10	2001	54.2	55.2	46.6	33.6	35.7	0	40.4
1	11		42	41.3	44.4	33.6	10.8	0	30.5
2			14.4	41.1	8	30	30.8	70	42.4
3			46.8	2.5	14.3	37.5	3	-	19
4			18.5	2.5	21.2	25	1.6	72.5	22.6
8			10	2007	33.8	13.1	23.1		16.4
9	71.6	59.5			40.8		42.4	0	
10	56.9	68.3			43.1		22.6	-	
11	80.5	43.2			30.8		14.4	120	
12	64.8	36.1			70.6		18.1	-	
13	18.3	32.5			42.4		12.7	127	
Tormenta tropical Alma									
26	5	2008	33	19.1	13.6		37.3		
27			22.9	9.7	9.2		13.5		
28			122.7	67.9	13.3		148.6		
29			72.6	92.1	39.8		90.7		
30			1.8	0	0		0.3		
31			0.3	0	0		0.3		
Onda tropical									
28	5	2010	0	5.1	1.4		0.8		
29			0	0	0		0		
30			0	0	0		0		
31			2	0	0		3		
1	6	2010	11.2	33.8	3.1		11.4		
2			14	8.6	9.5		33.5		
3			57.4	11.1	17.3		50.5		
Tormenta Tomás									
1	11	2010		22.8	2.8		36.6		
2				76.6	47.7		85.3		
3				97.7	13.1		27.7		
4				18.6	25		4.3		
5				35.8	24.5		12.2		
6			2.5	1.3	0		9.7		

Huracán Otto									
21	11	2016	0.8			0	0.8	0	
22			0.8			0.1	5.8	0	
23			35.8			10	34	11.1	
24			71.6			14	33	15	
25			6.6			0	9.1	1.6	
26			6.6			12.8	12.4	1.7	
Tormenta tropical Nate									
3	10	2017	29.2			92.2	7.6		
4			199.4			126.4	148.1		
5			213.1			173.8	220.2		
6			3			4.9	3		
7			0			3.6	7.6		
8			4.8			6.9	7.6		

Anexo 6. Resultados de los vuelos fotogramétricos realizados con VANT en la parte baja de la cuenca hidrográfica del río Aranjuez

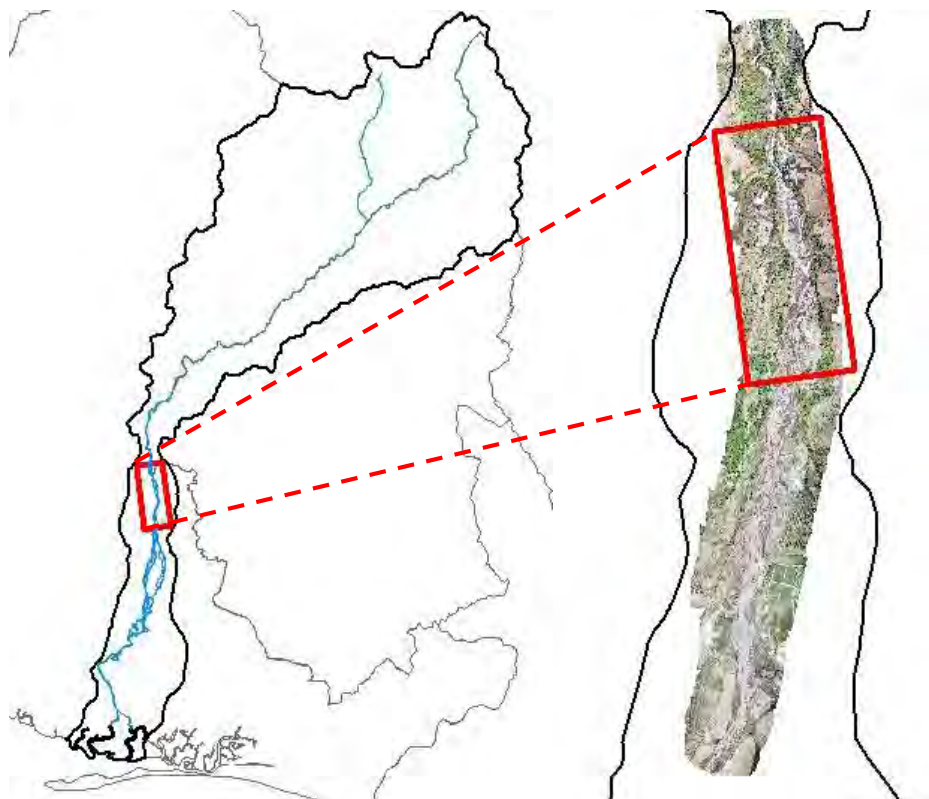


Figura 37. Cobertura de los vuelos fotogramétricos



Figura 38. VANT empleado en los vuelos fotogramétricos: WingtraOne



Figura 39. Comparación de la calidad de las ortofotos obtenidas con los vuelos fotogramétricos (izquierda) y las disponibles en el SNIT (derecha)



Figura 40. Visualización de la nube de puntos en la zona del puente sobre la Ruta Nacional 1 sobre el río Aranjuez

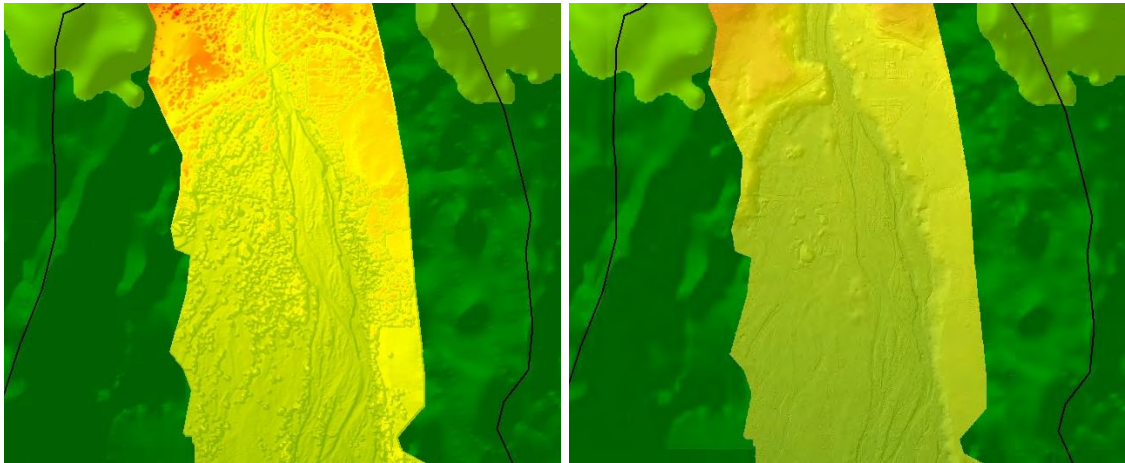


Figura 41. Nivel de detalle obtenido mediante el DSM (izquierda) y el DTM (derecha), en comparación con el DEM generado con datos del IGN (al fondo)

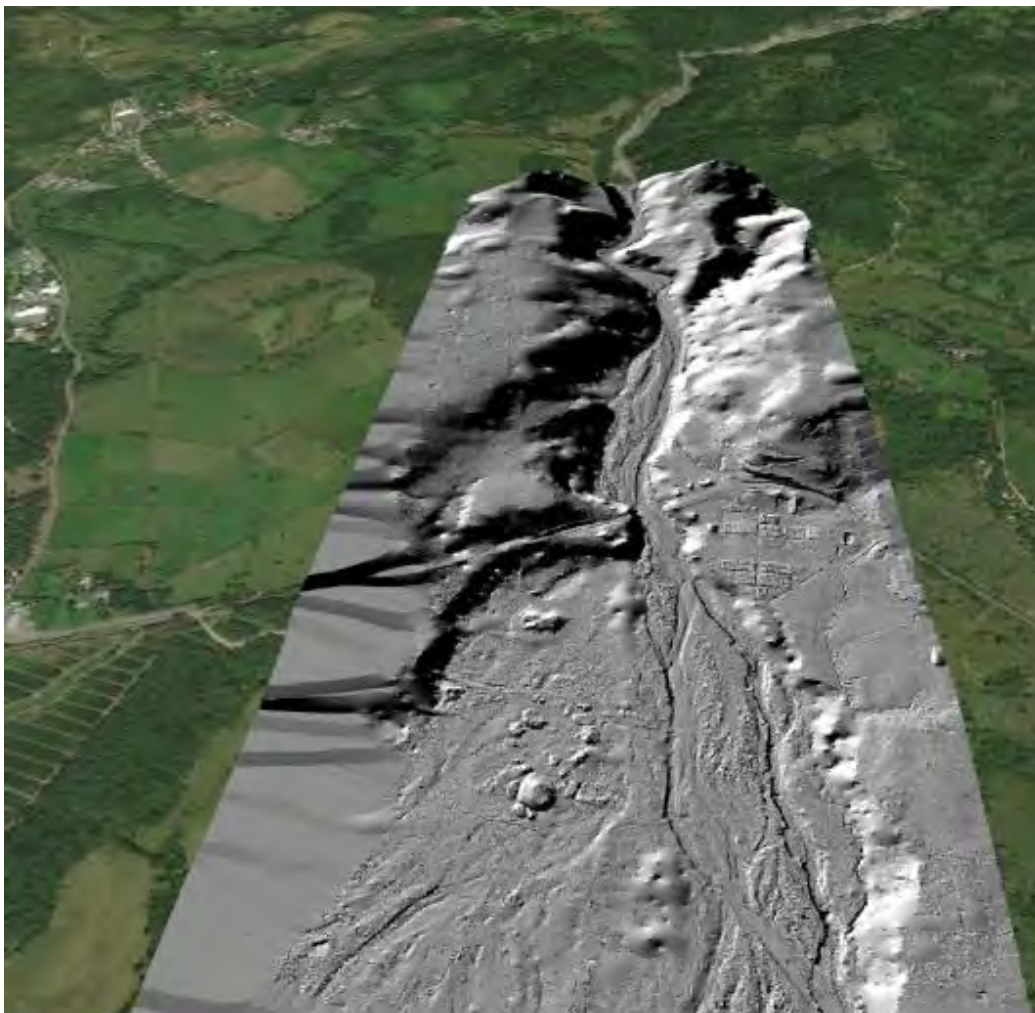


Figura 42. Visualización del ajuste geográfico de los resultados de los vuelos fotogramétricos

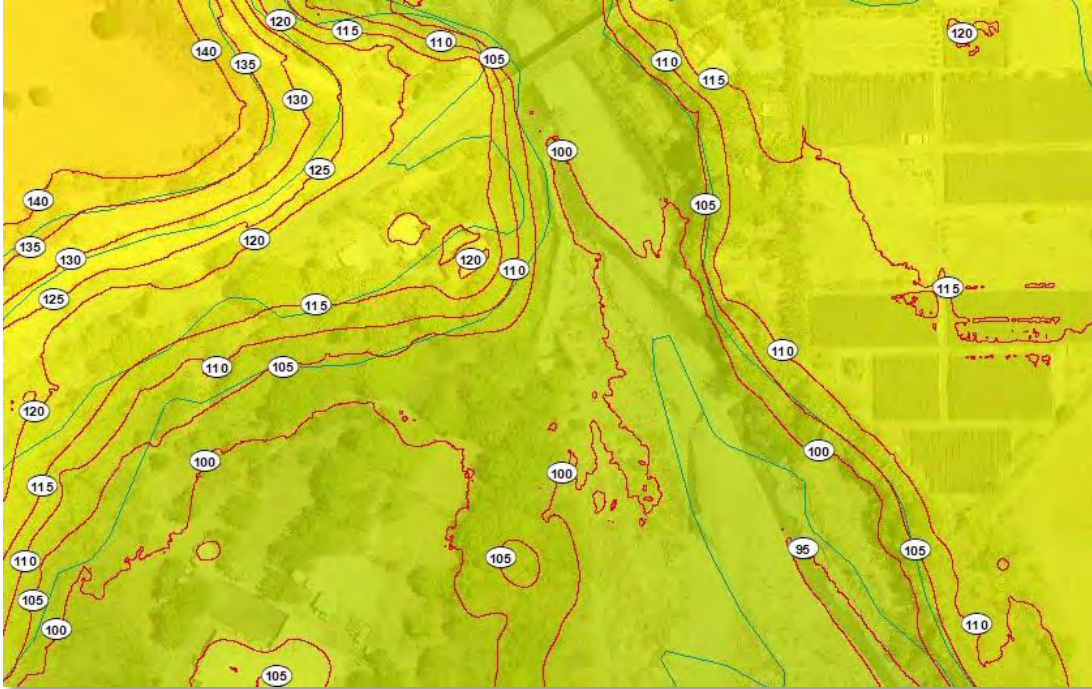


Figura 43. Ejemplo de creación de curvas de nivel a cada 5 m

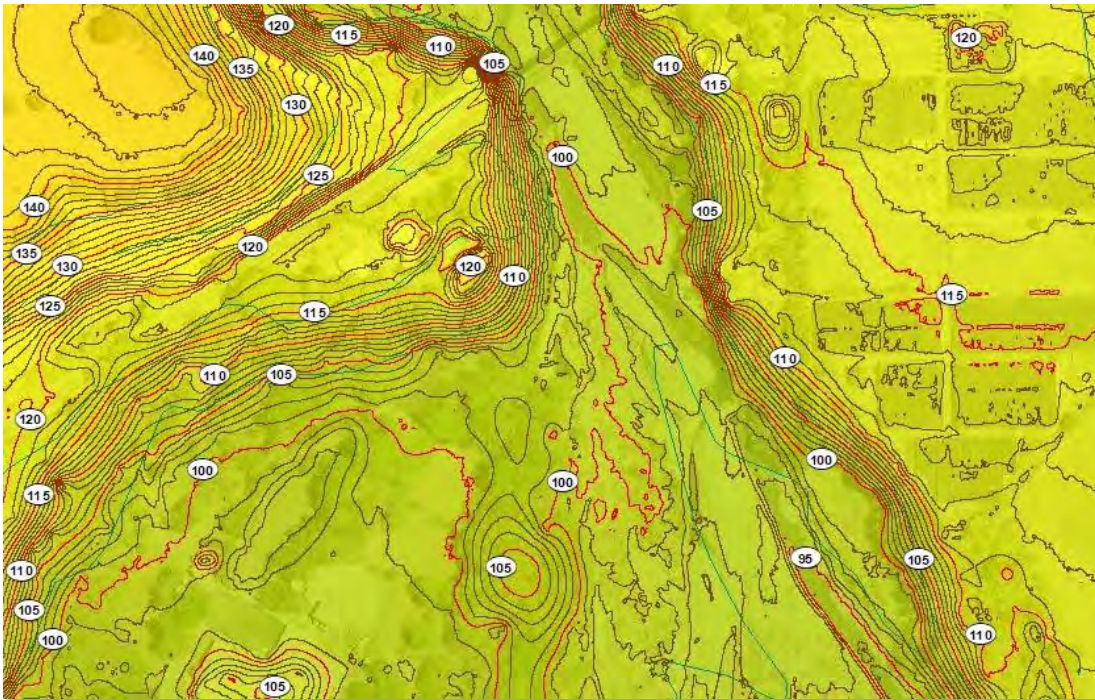


Figura 44. Ejemplo de creación de curvas de nivel a cada 1 m

Anexo 7. Levantamiento topográfico de secciones transversales aguas arriba y aguas abajo del puente sobre la Ruta Nacional 1, mediante metodología GNSS RTK



Figura 45. Receptores empleados en el levantamiento de secciones transversales: Emlid Reach RS2
Fuente: Emlid, 2020



Figura 46. Ejemplo de captura de datos en las cercanías del puente sobre la Ruta Nacional 1



Figura 47. Distribución de los puntos medidos en el levantamiento de secciones transversales