

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**Análisis morfológico de distintos cauces de ríos utilizando secciones
transversales**

Trabajo de Final de Graduación

Para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

José María Alfaro Segura

Director del Proyecto de Graduación:

Ing. Alberto Serrano Pacheco, Ph.D.

Departamento: Hidráulica y Ambiental

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Agosto, 2021

Hoja de aprobación

El comité asesor del proyecto hace constar que el presente proyecto final de graduación fue concluido, revisado y presentado de manera satisfactoria, según el alcance establecido al inicio del proceso, además cumple con las normas que establecen la Universidad de Costa Rica y la Escuela de Ingeniería Civil para su ejecución.

Director:



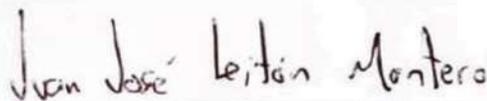
Ing. Alberto Serrano Pacheco, Ph. D.

Estudiante:

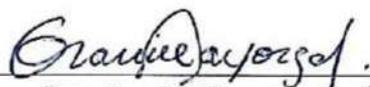


José María Alfaro Segura

Asesores:



Ing. Juan José Leitón Montero, MSc.



Ing. Gravin Mayorga Jiménez, MSc.

Fecha: 2021, agosto, 19

El suscrito, **José María Alfaro Segura**, cédula 1-1630-0859. Estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné B40195, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Análisis morfológico de distintos cauces de ríos utilizando secciones transversales**, bajo la dirección del Ph.D., **Alberto Serrano Pacheco**, 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: Según la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos, No. 6683, en su artículo 7: "Toda persona puede utilizar, libremente, en cualquier forma y por cualquier proceso, las obras intelectuales pertenecientes al dominio público; pero si fueren de autor conocido, no podrá suprimirse su nombre 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, como lo establece el artículo 13 de esta misma ley, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, siendo obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Agradecimientos

Agradezco al Comité Asesor por la guía y paciencia brindada a lo largo de la elaboración de este Proyecto de Graduación.

A mi familia, especialmente a mis tías Rocío, Hazel, Lucy y Lula, que me apoyaron de diversas maneras durante mi estadía en la universidad, creyendo siempre en mí, al igual que la abuela Beleida.

A mis amigos del colegio, Alberto, Felipe, Chris, Joss, Geo, Javier, JP, Laurence, Rorri, Victor, Isaac, Bity y Patrick, por todos los buenos momentos antes y después del colegio.

Por las amistades que he formado a lo largo de la universidad especialmente a Guan, Ivan, Julio, Marvin, Fidel, los dos Tavos, Andre y Elías por estar ahí en los buenos y malos momentos a lo largo de la carrera.

Finalmente, a Eli quién me motivó en reiteradas ocasiones para terminar este proyecto y seguir adelante, muchas gracias en verdad.

Dedicatoria

El presente trabajo final de graduación está dedicado a mi mamá y papá, quienes han sido mis dos principales pilares, a lo largo de todo este proceso de aprendizaje, así como de crecimiento personal.

También en memoria de mi abuela Margarita, quien anhelaba con ver mi graduación.

Tabla de contenido

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Justificación	1
1.1.1. Problema Específico	1
1.1.2. Importancia	2
1.1.3. Antecedentes	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo General	4
1.2.2. Objetivos Específicos.....	4
1.3. Delimitación del Problema	4
1.3.1. Limitaciones.....	4
1.3.2. Alcance	5
Capítulo 2. Metodología.....	7
Fase I: Recopilación de información.....	7
Fase II: Ilustración de la información	9
Fase III: Obtención de resultados a partir de las secciones transversales	9
Fase IV: Verificación y análisis de los resultados.....	9
Fase V: Finalización del TFG	10
Capítulo 3. Marco Teórico	11
3.1. Procesos Morfológicos	11
3.2. Procesos Aluviales	12
3.2.1. Erosión.....	13
3.2.2. Equilibrio en cauces.....	14
3.2.3. Sedimentación.....	15
3.2.4. Transporte de Sedimentos	19
3.3. La morfología de un cauce	22
3.3.1. Clasificación por edad	22
3.3.2. Clasificación por condición de estabilidad	23
3.3.3. Clasificación por tramos	24
3.3.4. Clasificación por los grados de libertad.....	25
3.3.5. Clasificación según el material de las márgenes y el fondo	25
3.3.6. Clasificación por geometría	27
3.3.7. Por condición de transporte.....	29

3.4.	Fenómenos meteorológicos importantes en Costa Rica	32
3.4.1.	Zona de convergencia intertropical (ZCIT)	32
3.4.2.	Vientos alisios.....	34
3.4.3.	El monzón.....	35
3.4.4.	Huracanes y ciclones tropicales	36
3.4.5.	Fenómeno del ENOS.....	39
3.5.	Aforos de caudal.....	47
3.6.	Flujo de Lodos	47
Capítulo 4.	Procesamiento de Datos.....	49
4.1.	Revisión de las secciones de ICE.....	49
4.2.	Representación de las secciones graficadas	51
4.2.1.	Ilustración de la información brindada por el Instituto Costarricense de Electricidad 51	
4.2.2.	Principales problemas presentados al interpretar la información	54
4.3.	Disponibilidad de información	59
Capítulo 5.	Eventos importantes ocurridos entre el 2008-2020.....	60
5.1.	Tormenta Tropical Alma (28 y 29 de mayo de 2008).....	61
5.2.	Terremoto de Cinchona (8 de enero del 2009).....	64
5.3.	Tormenta Tropical Tomás (4 de noviembre del 2010).....	67
5.4.	Terremoto de Sámara (5 de septiembre del 2012).....	69
5.5.	Huracán Otto (24 de noviembre del 2016)	71
5.5.1.	Trayectoria de Otto a lo largo de Costa Rica.....	73
5.6.	Tormenta Tropical Nate (4 a 12 de octubre de 2017).....	74
Capítulo 6.	Análisis morfológico por eventos extremos	77
6.1.	Estaciones de la Vertiente del Caribe.....	82
6.1.1.	Estación Pandora 02-02.....	82
	Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 02-02	82
	Afectación derivada del Terremoto de Sámara en la estación 02-02.....	83
	Afectación derivada del Huracán Otto en la estación 02-02	84
6.1.2.	Estación Playa Hermosa 06-03	86
	Afectación derivada del Terremoto de Sámara en la estación 06-03.....	86
6.1.3.	Estación Tapantí Arriba 09-22	86
	Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 09-22	86

Afectación derivada del Terremoto de Sámara en la estación 09-22	88
Afectación derivada del Huracán Otto en la estación 09-22	89
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 09-22	91
6.1.4. Estación Hamburgo 09-39	95
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Alma en la estación 09-39	95
Afectación derivada Terremoto de Cinchona en la estación 09-39	98
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 09-39	99
6.1.5. Análisis de la Vertiente del Caribe con respecto al Terremoto de Sámara.....	101
6.2. Estaciones de la Vertiente Norte	102
6.2.1. Estación Veracruz 12-04.....	102
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 12-04	102
Afectación derivada del Terremoto de Sámara en la estación 12-04.....	105
Afectación derivada del Huracán Otto en la estación 12-04	105
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 12-04	106
6.2.2. Estación Peñas Blancas 14-05	107
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 14-05	107
Afectación derivada del Terremoto de Sámara en la estación 14-05.....	110
Afectación derivada del Huracán Otto en la estación 14-05	111
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 14-05	115
6.2.3. Estación Guatuso 16-02.....	116
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Alma en la estación 16-02	116
Afectación derivada del Terremoto de Cinchona en la estación 16-02	117
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 16-02	119
Afectación derivada del Terremoto de Sámara en la estación 16-02.....	121
Afectación derivada del Huracán Otto en la estación 16-02	121
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 16-02	122
6.2.4. Análisis de la Vertiente Norte con respecto al Terremoto de Sámara.....	123
6.2.5. Análisis del Huracán Otto en las estaciones de la Vertiente Norte	124
6.2.6. Análisis de la Tormenta Tropical Nate en las estaciones de la Vertiente Norte	125
6.3. Estaciones de la Vertiente del Pacífico	127
6.3.1. Estación Paso Hondo 20-14.....	127
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 20-14	127
Afectación derivada del Terremoto de Sámara en la estación 20-14.....	129

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 20-14	129
6.3.2. Estación Nuestro Amo 24-24.....	131
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 24-24	131
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 24-24	134
6.3.3. Estación Santo Domingo 24-27	138
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 24-27	138
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 24-27	139
6.3.4. Estación Echeverría 24-29	141
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 24-29	141
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 24-29	143
6.3.5. Estación El Brujo 31-03.....	147
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 31-03	147
Afectación derivada del Huracán Otto en la estación 31-03	149
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 31-03	152
6.3.6. Estación Remolino 31-04.....	154
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 31-04	154
Afectación derivada del Terremoto de Sámara en la estación 31-04.....	158
Afectación derivada del Huracán Otto en la estación 31-04	159
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 31-04	161
6.3.7. Estación La Cuesta 31-09.....	167
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 31-09	167
Afectación derivada del Terremoto de Sámara en la estación 31-09.....	171
Afectación derivada del Huracán Otto en la estación 31-09	172
Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 31-09	173
6.3.8. Análisis de la Vertiente del Pacífico con respecto al Terremoto de Sámara.....	178
Capítulo 7. Conclusiones y Recomendaciones	179
7.1. Conclusiones con respecto a la información utilizada	179
7.2. Conclusiones obtenidas de las estaciones de la Vertiente del Caribe	181
7.3. Conclusiones obtenidas de las estaciones de la Vertiente del Norte	183
7.4. Conclusiones obtenidas de las estaciones de la Vertiente del Pacífico	185
7.5. Recomendaciones	187
Bibliografía	189

Tabla de Figuras

<i>Figura 1. Esquema metodológico del Trabajo Final de Graduación.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2. Diagrama de procesos morfológicos.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3. Criterio de sedimentación en el gráfico de Shields.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 4. Diagrama de Hjulstrom (1935).....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 5. Ubicación de la ZCIT en enero y en julio.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 6. Trayectorias de los ciclones tropicales en el mundo</i>	<i>37</i>
<i>Figura 7. Condiciones normales sobre el Océano Pacífico en comparación con el fenómeno del Niño.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 8. Cambio en las condiciones debido al fenómeno ENOS en la fase positiva (El Niño).....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 9. Afectación de la temporada de huracanes por el Fenómeno del Niño</i>	<i>42</i>
<i>Figura 10. Distribución de las precipitaciones en la región ante la influencia del Niño.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 11. Condiciones normales sobre el Océano Pacífico en comparación con el fenómeno de La Niña.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 12. Cambio en las condiciones debido al fenómeno ENOS en la fase negativa (La Niña).....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 13. Afectación de la temporada de huracanes por el Fenómeno de La Niña.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 14. Anomalías anuales de precipitación (respecto al promedio) en las distintas regiones del país debido al fenómeno de La Niña.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 15. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 14-05 en todo el periodo de análisis.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 16. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 16-02 en todo el periodo de análisis.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 17. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 31-03 en todo el periodo de análisis.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 18. Precipitación de mayo 2008 en el Pacífico costarricense.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 19. Trayectoria de la Tormenta Tropical Alma.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 20. Mapa de intensidades Mercalli Modificada para el Terremoto de Cinchona en Costa Rica.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 21. Mapa preliminar de las zonas potenciales de erosión y depositación de sedimentos por flujos de lodo.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 22. Trayectoria del ciclón tropical Tomás.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 23. Condiciones secas en el mes de octubre de 2010 en las diferentes regiones del país.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 24. Mapa de intensidades Mercalli Modificada en Costa Rica para el Terremoto de Sámara</i>	<i>70</i>
<i>Figura 25. Trayectoria presentada por el Huracán Otto.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 26. Trayectoria inicial tomada por Nate.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 27. Trayectoria de Nate posterior a ser categorizado como tormenta tropical.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 28. Afectación de la Tormenta Tropical Nate y el Huracán Otto en nuestro país</i>	<i>76</i>

<i>Figura 29. Cambios en las secciones transversales de la estación 02-02 durante la Tormenta Tropical Tomás.....</i>	82
Figura 30. Cambios en las secciones transversales de la estación 02-02 durante el Terremoto de Sámara	84
<i>Figura 31. Cambios en las secciones transversales de la estación 02-02 durante el Huracán Otto.....</i>	85
Figura 32. Cambios en las secciones transversales de la estación 06-03 durante el Terremoto de Sámara	86
<i>Figura 33. Cambios en las secciones transversales de la estación 09-22 durante la Tormenta Tropical Tomás.....</i>	87
<i>Figura 34. Cambios en las secciones transversales de la estación 09-22 durante el Terremoto de Sámara</i>	89
<i>Figura 35. Cambios en las secciones transversales de la estación 09-22 durante el Huracán Otto.....</i>	90
<i>Figura 36. Cambios entre nov – dic 2012 en la estación 09-22.....</i>	91
<i>Figura 37. Cambios en las secciones transversales de la estación 09-22 antes y después de la Tormenta Tropical Nate.....</i>	92
Figura 38. Secciones transversales de octubre y setiembre en la estación 09-22, años: 2012, 2013 y 2014.....	94
Figura 39. Cambios en las secciones transversales en el periodo de la Tormenta Tropical Alma en la estación 09-39	95
<i>Figura 40. Cuenca del Río Reventazón.....</i>	97
<i>Figura 41. Cambios en las secciones transversales de la estación 09-39, antes y después del terremoto de Cinchona.....</i>	99
<i>Figura 42. Cambios en las secciones transversales de la estación 09-39 durante la Tormenta Tropical Tomás.....</i>	100
Figura 43. Cambios en las secciones transversales de la estación 12-04 durante la Tormenta Tropical Tomás.....	103
<i>Figura 44. Cambios en las secciones transversales de la estación 12-04 durante el año 2010.....</i>	104
Figura 45. Cambios en las secciones transversales de la estación 12-04 durante el Terremoto de Sámara	105
<i>Figura 46. Cambios en las secciones transversales de la estación 12-04 durante el Huracán Otto.....</i>	106
<i>Figura 47. Cambios en las secciones transversales de la estación 12-04 antes y después de la Tormenta Tropical Nate.....</i>	107
<i>Figura 48. Cambios en las secciones transversales de la estación 14-05 durante la Tormenta Tropical Tomás.....</i>	108
<i>Figura 49. Mapa de altitud en la cuenca del Río San Carlos.....</i>	110
Figura 50. Cambios en las secciones transversales de la estación 14-05 durante el Terremoto de Sámara	111
<i>Figura 51. Cambios en las secciones transversales de la estación 14-05 durante el Huracán Otto.....</i>	112

<i>Figura 52. Cambios en las secciones transversales de la estación 14-05 posterior el Huracán Otto</i>	113
<i>Figura 53. Precipitación acumulada en milímetros (mm) durante diciembre de 2016</i>	114
<i>Figura 54. Cambios en las secciones transversales de la estación 14-05 antes y después de la Tormenta Tropical Nate</i>	116
<i>Figura 55. Cambios en las secciones transversales en el periodo de la Tormenta Tropical Alma en la estación 16-02</i>	117
<i>Figura 56. Cambios en las secciones transversales de la estación 16-02, antes y después del terremoto de Cinchona</i>	118
<i>Figura 57. Cambios en las secciones transversales de la estación 16-02, Periodo: diciembre 2008 – junio 2009</i>	119
<i>Figura 58. Cambios en las secciones transversales de la estación 16-02 durante la Tormenta Tropical Tomás</i>	120
<i>Figura 59. Cambios en las secciones transversales de la estación 16-02 durante el Terremoto de Sámara</i>	121
<i>Figura 60. Cambios en las secciones transversales de la estación 16-02 durante el Huracán Otto</i>	122
<i>Figura 61. Cambios en las secciones transversales de la estación 16-02 antes y después de la Tormenta Tropical Nate</i>	123
<i>Figura 62. Secciones transversales comparativas en la estación 09-22, años: 2012, 2013 y 2014</i>	126
<i>Figura 63. Cambios en las secciones transversales de la estación 20-14 durante la Tormenta Tropical Tomás</i>	128
<i>Figura 64. Cambios en las secciones transversales de la estación 20-14 durante el Terremoto de Sámara</i>	129
<i>Figura 65. Cambios en las secciones transversales de la estación 20-14 antes y después de la Tormenta Tropical Nate</i>	130
<i>Figura 66. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-24 durante la Tormenta Tropical Tomás</i>	132
<i>Figura 67. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-24 (2010-10-22 al 2010-11-05)</i>	132
<i>Figura 68. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-24 (2010-11-05 al 2010-11-09)</i>	133
<i>Figura 69. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-24 (2010-11-05 al 2010-11-09)</i>	134
<i>Figura 70. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-24 antes y después de la Tormenta Tropical Nate</i>	135
<i>Figura 71. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-24 en el 2018</i>	137
<i>Figura 72. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-27 durante la Tormenta Tropical Tomás</i>	138
<i>Figura 73. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-27 antes y después de la Tormenta Tropical Nate</i>	140
<i>Figura 74. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-27 post-Nate</i>	141

Figura 75. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-29 durante la Tormenta Tropical Tomás.....	142
<i>Figura 76. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-29 previo a Nate ...</i>	144
<i>Figura 77. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-29 debido a la T.T. Nate.....</i>	145
<i>Figura 78. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-29 en septiembre de 2017 y mayo de 2018</i>	146
Figura 79. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-03 durante la Tormenta Tropical Tomás.....	147
Figura 80. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-03 en enero posterior a la Tormenta Tropical Tomás.....	148
<i>Figura 81. Comparación entre septiembre y noviembre del 2016 en la estación 31-03 ...</i>	150
<i>Figura 82. Comparación entre septiembre de 2016 y enero de 2017 en la estación 31-03</i>	151
<i>Figura 83. Estación 31-03, año 2014, Meses: Septiembre, Noviembre y Diciembre.....</i>	152
<i>Figura 84. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-03 debido a la T.T. Nate.....</i>	153
Figura 85. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-04 durante la Tormenta Tropical Tomás.....	155
Figura 86. Curvas del año 2013 en la estación 31-04.....	156
Figura 87. Localización de las estaciones ubicadas en la Cuenca 31 (Río Térraba).....	157
<i>Figura 88. Secciones transversales en 31-04 para el mes de noviembre de 2010 y todo el año 2011</i>	158
<i>Figura 89. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-04 durante el Terremoto de Sámará</i>	159
<i>Figura 90. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-04 previo, durante y posterior al Huracán Otto</i>	160
<i>Figura 91. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-04 antes de la T.T. Nate.....</i>	162
<i>Figura 92. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-04 debido a la T.T. Nate.....</i>	163
<i>Figura 93. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-04 debido a la T.T. Nate.....</i>	164
<i>Figura 94. Comparación entre las secciones transversales de septiembre de 2017 y enero de 2019 de la estación 31-04.....</i>	165
<i>Figura 95. Comparación del comportamiento de los años 2013 y 2014 de la estación 31-04</i>	166
<i>Figura 96. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-09 durante la Tormenta Tropical Tomás.....</i>	167
Figura 97. Curvas de octubre y noviembre en la estación 31-09 para los años 2012, 2013, 2014	170
<i>Figura 98. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-09 durante el Terremoto de Sámará</i>	171

<i>Figura 99. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-09 previo, durante y posterior al Huracán Otto</i>	172
<i>Figura 100. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-09 debido a la T.T. Nate</i>	174
<i>Figura 101. Comparación de secciones transversales en la estación 31-09 para septiembre de 2017 y el año 2018</i>	175
<i>Figura 102. Comparación de secciones transversales en la estación 31-09 para septiembre de 2017 y el año 2019</i>	175
<i>Figura 103. Comparación de secciones transversales en la estación 31-09 para septiembre de 2017 y el año 2020</i>	176
<i>Figura 104. Comparación del comportamiento de los años 2012, 2013 y 2014 de la estación 31-09</i>	177
<i>Figura 105. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 02-02 en todo el periodo de análisis</i>	196
<i>Figura 106. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 06-03 en todo el periodo de análisis</i>	196
<i>Figura 107. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 09-22 en todo el periodo de análisis</i>	197
<i>Figura 108. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 09-39 en todo el periodo de análisis</i>	197
<i>Figura 109. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 12-04 en todo el periodo de análisis</i>	198
<i>Figura 110. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 20-14 en todo el periodo de análisis</i>	199
<i>Figura 111. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 24-24 en todo el periodo de análisis</i>	199
<i>Figura 112. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 24-27 en todo el periodo de análisis</i>	200
<i>Figura 113. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 24-29 en todo el periodo de análisis</i>	200
<i>Figura 114. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 31-04 en todo el periodo de análisis</i>	201
<i>Figura 115. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 31-09 en todo el periodo de análisis</i>	201

Tabla de Cuadros

<i>Cuadro 1. Tipo de cauce según clasificación por tramos.....</i>	<i>24</i>
<i>Cuadro 2. Clasificación de cauces por condición de transporte según Schumm</i>	<i>30</i>
<i>Cuadro 3. Escala de Saffir – Simpson para categorizar huracanes.....</i>	<i>38</i>
<i>Cuadro 4. Características de las estaciones hidrológicas a analizar.....</i>	<i>50</i>
<i>Cuadro 5. Descripción de las estaciones con las secciones con menos problemas.....</i>	<i>56</i>
<i>Cuadro 6. Descripción de las estaciones con las secciones con menos problemas (continuación).....</i>	<i>57</i>
<i>Cuadro 7. Estaciones con mayores errores/problemas observados.....</i>	<i>58</i>
<i>Cuadro 8. Disponibilidad de información por estación y evento</i>	<i>59</i>
<i>Cuadro 9. Afectación de los diferentes fenómenos en Costa Rica</i>	<i>80</i>
<i>Cuadro 10. Precipitación acumulada en la Zona Norte en el mes de diciembre 2016.....</i>	<i>114</i>
<i>Cuadro 11. Precipitación acumulada en la Zona Norte y Pacífico Sur en el mes de noviembre 2016.....</i>	<i>124</i>

Alfaro Segura, José María

Análisis morfológico de distintos cauces de ríos utilizando secciones transversales.
Trabajo Final de Graduación – Ingeniería Civil – San José, Costa Rica:
J.M. Alfaro S, 2021
xviii, 192, [8]h; ils. col. – 42 refs.

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un análisis morfológico de las secciones transversales de aflujos de ríos, correspondientes a 14 estaciones hidrometeorológicas del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) a lo largo de un periodo de 12 años, específicamente entre los años 2008 y 2020. Para esto se procedió a ilustrar la información correspondiente a las 14 estaciones del ICE con el software RStudio, y hacer un estudio sobre el comportamiento general, con el fin de determinar anomalías fácilmente observables y que pudiesen corresponder a eventos meteorológicos y telúricos importantes.

A lo largo del estudio se pudo observar que en ciertos periodos de tiempo se presentaron cambios en periodos específicos que coinciden entre estaciones, por lo que se determinó que estas discrepancias que coinciden periódicamente entre sí correspondían a fenómenos o eventos extremos importantes en el periodo de análisis. Es por esto que se procede a enfocar el estudio a medir cuantitativamente los principales cambios observados, correspondientes a cuatro eventos hidrometeorológicos, y los dos eventos telúricos más importantes dentro del periodo de análisis.

Una vez obtenida toda la información necesaria, se procedió a comparar los resultados obtenidos en las 14 estaciones entre sí, haciendo énfasis en el análisis entre las 3 vertientes del país: Vertiente del Caribe, Vertiente Norte, y Vertiente del Pacífico. Finalmente se obtuvieron los resultados comparativos de manera gráfica, así como las diferencias de elevación más importantes entre las curvas, con el fin de obtener las conclusiones mostradas en el presente trabajo respecto al comportamiento morfológico de las 14 estaciones analizadas, así como las principales diferencias y similitudes entre sí.

PALABRAS CLAVES: AFOROS DE RÍOS, SECCIONES TRANSVERSALES, CLASIFICACIÓN POR VERTIENTES, FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS EXTREMOS.

Dr.-Ing. Alberto Serrano Pacheco
Escuela de Ingeniería Civil

Alfaro Segura, José María

Análisis morfológico de distintos cauces de ríos utilizando secciones transversales.
Trabajo Final de Graduación – Ingeniería Civil – San José, Costa Rica:
J.M. Alfaro S, 2021
xviii, 192, [8]h; ils. col. – 42 refs.

ABSTRACT

In the present investigation, a morphological analysis of the cross sections of river gauges was carried out, corresponding to 14 hydrometeorological stations of the Costa Rican Electricity Institute (ICE, acronym in Spanish), over a period of 12 years, specifically between the years 2008 and 2020. For this, it was necessary to illustrate the information of all the fourteen stations, which was carried out with the help of the software RStudio. With the purpose of doing a general study of the behavior of the curves, trying to determine anomalies that are easily observable and that could correspond to important events.

Throughout the study, it was possible to determine that in certain periods of time, some changes were noticeable and coincide between stations. For which it was determined that these discrepancies may correspond to important extreme events in the period of analysis. Therefore, the study is focused on quantitatively measuring the main changes between the cross sections, during the four most predominant hydrometeorological events and two most important telluric events that happened between 2008-2020.

Once all the necessary information had been obtained, the results from the fourteen stations were compared with each other, emphasizing the analysis between the 3 hydrographic slopes in the country: the Caribbean Slope, North Slope and Pacific Slope. Finally, the comparative results were obtained graphically, as well as the main elevation differences between the curves, which led to obtain the conclusions shown in the present investigation. Regarding the morphological behavior of the 14 stations that were analyzed, they were compared as well, to find the main differences and similarities between them.

KEYWORDS: RIVER GAUGES, CROSS SECTIONS, CLASSIFICATION BY HYDROGRAPHIC SLOPES, EXTREME HYDROMETEOROLOGICAL EVENTS.

Dr.-Ing. Alberto Serrano Pacheco
Escuela de Ingeniería Civil

Capítulo 1. Introducción

1.1. Justificación

1.1.1. Problema Específico

Una de las tareas de mayor importancia, desde la perspectiva de la investigación técnica – científica, que desarrolla el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), es la toma de información hidrometeorológica a lo largo del país, siendo uno de los principales entes con este tipo de información a disposición en Costa Rica.

El Departamento de Estudios Básicos de Ingeniería y Construcción del ICE recibe esta información de las diversas estaciones que tiene instaladas la institución, de forma que permite el estudio de cuencas hidrográficas, análisis de crecidas de ríos, así como valiosa información para estudios hidráulicos, y de factibilidad de proyectos.

Parte de la información que obtiene el ICE (perfiles derivados de los aforos), no suele ser analizada con más detalle que los datos convencionales de un aforo, es por esto que surge la iniciativa de analizar los datos obtenidos en los aforos realizados por la institución de manera que no solamente se utilicen para obtener los resultados o productos convencionales del aforo como lo son: caudal, velocidad media, área, ancho, radio hidráulico, entre otros, sino también utilizar los datos de las distintas secciones transversales de diferentes ríos y analizar la evolución de su geometría a través del tiempo. El estudio permitiría encontrar patrones de sedimentación, socavación y comportamientos morfológicos de los ríos.

Se desea proponer el presente enfoque a lo largo de distintos cauces, estudiando el comportamiento de los mismos tanto aguas arriba como aguas abajo en los casos en que se cuente con datos que permitan el análisis, además se plantea analizar datos de distintas regiones por lo que se pretende estudiar casos de la vertiente del Caribe, la vertiente del Pacífico y la vertiente norte. De esta manera se realizaría un estudio comparativo, ya sea entre cauces cercanos, cauces a distancia, cauces de diferente vertiente.

1.1.2. Importancia

Desde el punto de vista morfológico, el estudio permite observar la evolución de las secciones transversales de los distintos ríos, en los puntos de control que tenga establecidos el Instituto Costarricense de Electricidad.

Para observar las variaciones que tiene el cauce, se pueden graficar los aforos de distintos periodos, de manera que la representación de la transformación de la sección transversal del río queda planteada de una forma bastante clara. Dicha representación gráfica de la información permite identificar fácilmente procesos de sedimentación en el río al aumentar el fondo del cauce, de manera similar también se podrían identificar procesos erosivos en el fondo al observarse la disminución del fondo con relación a años anteriores.

Este tipo de procesos son de importancia desde el punto de vista de la ingeniería, ya que un aumento en el nivel de fondo ocasiona una pérdida de la capacidad hidráulica del río, que puede conllevar a posibles problemas de inundación en caso de no realizar una intervención. Por otro lado, si el problema presente es erosión, se debe prestar atención a los problemas que pueden generarse en las márgenes y fondo del cauce en casos de contar con infraestructura y área que puede afectar, un ejemplo muy claro de esto son los bastiones de un puente. Otro punto importante en caso de observar procesos erosivos, serían las afectaciones que puede presentar el río aguas abajo de la zona erosiva, ya que puede generar problemas de sedimentación en las zonas donde la energía llega a disminuir.

Observar este tipo de fenómenos, a partir de un análisis de secciones transversales, puede permitir la obtención de conclusiones que posibilitan la prevención de problemas a futuro, ya sea a corto, mediano o largo plazo. Es por esto que este recurso toma relevancia, ya que representa una herramienta de mitigación que, con una adecuada intervención ante un problema, que puede lograr una disminución importante en afectaciones que podrían conllevar a pérdidas económicas importantes con el tiempo.

Un aspecto muy importante del trabajo consiste en la evaluación de los efectos y consecuencias que ciertos eventos pueden ocasionar. Entre dichos eventos están incluidos principalmente eventos meteorológicos de gran magnitud que han dejado su huella en los cauces, también se pueden analizar eventos de mayor recurrencia que suelen afectar al país periódicamente, y finalmente si existen afectaciones considerables ante movimientos

telúricos que hayan ocurrido durante el periodo de análisis que permitan ser estudiados a partir de los registros que maneja el ICE.

1.1.3. Antecedentes

El presente caso de estudio plantea la utilización de una metodología que actualmente en el país no se ha contemplado para analizar cambios morfológicos a lo largo de un río en el tiempo, si no que dicha información es utilizada para obtener los parámetros convencionales anteriormente dichos. Es por esto que se cuenta con poca información relacionada con proyectos similares en el país, e inclusive a nivel internacional, donde la posibilidad de estudiar los cambios en la morfología de los ríos a partir de secciones transversales, evidentemente requiere de un registro importante de datos, para lo cual es necesaria la recopilación de información en un periodo de tiempo considerable, y no siempre es aplicable dicha metodología.

Uno de los casos en que se ha estudiado esta temática fuera de Costa Rica, ha sido el caso del Río Fluvíá en Cataluña, España. El río Fluvíá presenta una movilidad bastante marcada y en él se planea realizar la restauración de meandros cortados por canalizaciones. El artículo se basa principalmente en lo que consistió el estudio morfodinámico del río, con las limitantes de información que se presentaron. En dicho estudio se tenían recursos como granulometría y análisis de formas fluviales, cartografía y fotografías aéreas, y unas pocas batimetrías (Martín, 2012). Buscaba entender la dinámica fluvial del río, dando un diagnóstico y pronóstico del transporte sólido grueso del río y sus efectos en pequeños embalses que se ubican a lo largo de su cauce. Además, el artículo también busca dar un pronóstico de la evolución de la restauración de los meandros canalizados.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Determinar el comportamiento de distintos cauces mediante un análisis morfológico y de transporte de sedimentos de las secciones transversales, para caracterizar su evolución en el tiempo.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Analizar gráficamente la evolución de las secciones transversales en el tiempo a partir de los datos del ICE.
- Estudiar el comportamiento de los procesos morfológicos que se presentan en los distintos cauces.
- Estudiar los impactos directos de los fenómenos meteorológicos más importantes entre el 2008 – 2020 sobre los cauces de los ríos, específicamente en las diferencias observadas entre secciones transversales.
- Buscar evidencias de alteraciones, directas o indirectas, en las distintas secciones transversales debido a movimientos telúricos importantes durante el periodo de análisis.

1.3. Delimitación del Problema

1.3.1. Limitaciones

A continuación, se presentan las limitaciones determinadas a lo largo del presente caso de estudio.

- El periodo de los datos del ICE limita la extensión temporal del análisis, por lo tanto, el periodo de análisis, así como la determinación de comportamientos entre años quedan sujetos a la cantidad de información a disposición en cada una de las estaciones.
- Otra limitante en cuanto a la información, corresponde a los años y meses con que se cuentan datos debido a que, en algunas estaciones por diversas razones, en algunos meses se discontinuó la toma de datos temporalmente, y vuelven a ser retomados meses después, por lo que en algunas estaciones es difícil tener registros continuos. Además, algunas de las estaciones ya se encuentran en desuso y por ende no cuentan con una gran cantidad de información que resulta valiosa para el análisis. Un ejemplo de este punto son las estaciones de Caribe para la Tormenta Tropical Nate.

- No se cuenta con granulometría del material del lecho en la zona de estudio, lo que afecta la caracterización del tipo de partícula y la aplicación de metodologías de transporte de sedimentos, ya que muchos de estos métodos dependen de la granulometría del material.
- Los datos con los que se trabaja son puntuales, esto quiere decir que son de un sector en específico y no se puede analizar el comportamiento y características en un tramo continuo completo.
- La información utilizada en el presente trabajo comprende únicamente las secciones transversales de las diferentes estaciones que posee el ICE, por lo tanto no se cuenta con una gran variedad de criterios complementarios al análisis como fotografías aéreas, deslizamientos observados, variación del caudal en el cauce, información detallada sobre el tiempo en el momento de un evento, comentarios de los residentes de la zona, entre otros.
- El análisis de la vecindad del entorno en el que se encuentran las estaciones estudiadas en el presente proyecto no fue analizado a profundidad debido a las restricciones de traslado, así como lejanía de las estaciones a nivel nacional. En cuanto a los elementos que no fueron posibles de analizar, así como su impacto en los cauces, se encuentran aquellas obras hidráulicas como presas, diques, puentes o cualquier elemento antrópico con incidencia en los ríos estudiados.
- La emergencia nacional debido a la epidemia ocasionada por el SARS – COV-2, afectaron en diversos ámbitos la elaboración del proyecto como la extensión del plazo de entrega de la información solicitada, producto de problemas de comunicación mientras se daba una adaptación a los nuevos modelos de trabajo en el ICE. Además, se complicó hasta cierto punto las reuniones con el comité asesor del proyecto en algunas ocasiones.

1.3.2. Alcance

En el presente trabajo se plantea realizar un estudio de caracterización de las distintas secciones transversales de las 14 estaciones a disposición, por parte del Instituto Costarricense de Electricidad.

El estudio consiste en observar las distintas secciones transversales de manera que se puedan detectar patrones en la evolución de las mismas que permitan ser estudiados. Los

principales factores a estudiar en la evolución del cauce a partir de la información que se tiene a disposición, son los patrones de erosión y sedimentación que ocurren con cada mes, y que presentan grandes variaciones estacionarias.

Debido a que se cuenta con información de ríos que vierten en las 3 vertientes de nuestro país, se plantea realizar comparaciones entre los resultados analizados, entre vertientes de manera que se identifiquen similitudes o contrastes entre las mismas, para poder sacar conclusiones y plantear hipótesis.

Por otro lado, la investigación también busca identificar aquellos efectos e impactos que sufren los cauces de los ríos por eventos meteorológicos importantes a partir de las diferencias observables en las secciones transversales. Se busca hacer una comparación entre eventos y los cambios generados por cada uno de ellos para una mejor caracterización de los fenómenos. También se presentará un análisis de los resultados obtenidos para las fechas cercas a eventos telúricos importantes entre el 2008 y el 2020, de manera que se puedan sacar conclusiones acerca del impacto que pueden llegar a presentar dichos eventos sobre el lecho de un río, en caso de presentarse algún tipo de afectación como tal.

Capítulo 2. Metodología

A continuación, se presenta un resumen esquemático de la metodología utilizada en el trabajo.

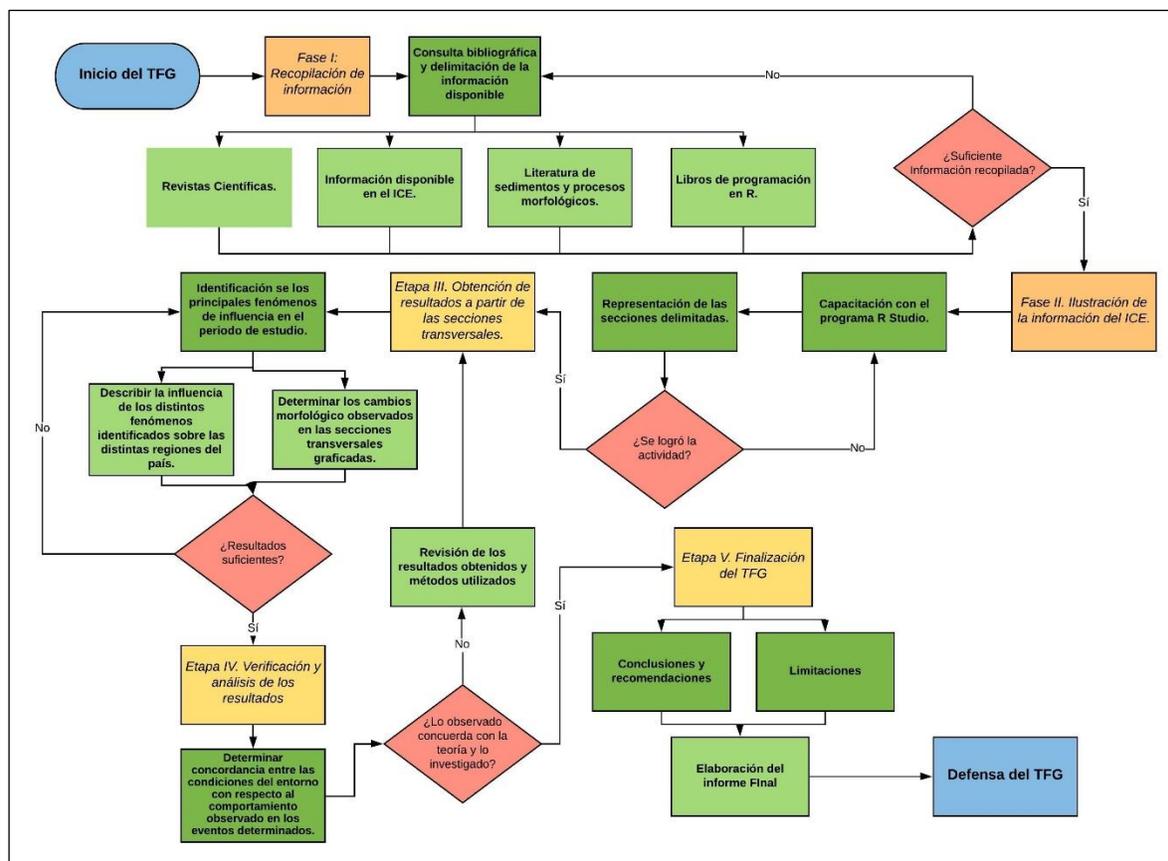


Figura 1. Esquema metodológico del Trabajo Final de Graduación

Elaborado por: Alfaro, 2019.

Fase I: Recopilación de información

La primera fase del presente proyecto fue analizar los requerimientos de información del trabajo y estudiar la viabilidad para obtenerlos. En primera instancia se debe tomar en cuenta que la investigación gira en torno a los datos de los aforos del Instituto Costarricense de Electricidad por lo que la solicitud de información de forma previa y anticipada fue clave debido a los posibles atrasos presentables.

En cuanto a la selección de las 14 estaciones con que se decidió trabajar, se planteó la selección a partir de 3 filtros. El primer filtro fue propuesto por el Ing. Juan José Leitón Montero, en donde seleccionó básicamente las secciones trabajables de la base de datos del ICE, esta primera fase incluía 46 estaciones. El segundo filtro realizado, fue la

polarización entre las estaciones que presentaban problemas y discrepancias notorias al momento de graficar todas las secciones transversales que la base de datos permite. En este filtro se clasificaron 14 estaciones que presentaron una muy buena consistencia en el patrón de comportamiento de las curvas manteniendo formas similares entre sí con los años. Por otro lado, se detectaron 32 estaciones con una gran diversidad de problemas, de los cuales se detallará más adelante en el trabajo, sin embargo, muchas de las inconsistencias se debían a problemas de digitación de los datos, inversión de las secciones e incluso cambios en la ubicación de las estaciones.

Finalmente, el tercer y último filtro de las estaciones fue la aprobación y revisión de las 14 estaciones por el Ing. Alberto Serrano Pacheco, en donde se realizó una revisión de las estaciones escogidas, y corroborar que estas siguen un comportamiento similar a lo largo del tiempo, y en caso de presentar alguna inconsistencia verificar que esta coincida con algún año influenciado por un evento o fenómeno importante a ser estudiado. Una vez concluido este filtro se acuerda usar las 14 estaciones analizadas en la presente investigación.

También es necesario recuperar información que facilite el análisis de las secciones transversales de la Etapa II por lo que es necesario recopilar información relacionada con las características geográficas y geológicas, así como la climatología que presentan las regiones en donde se encuentran ubicadas las estaciones a utilizar en un momento determinado.

La principal fuente de información para encontrar este tipo de información que se encarga de caracterizar las regiones en que pertenecen las estaciones es el Instituto Meteorológico Nacional. Dependiendo de la base de datos y cantidad de información por estación, se pretende encontrar cuales fueron los fenómenos más influyentes en Costa Rica a lo largo del periodo de estudio, que se define desde la fecha más antigua aforada, hasta la fecha más reciente con información de las estaciones elegidas.

Finalmente se debe dar la recopilación de información perteneciente a teoría relacionada con las principales variables y elementos que pueden afectar la morfología de un río, lo cual representa un reto debido a la poca información estudiada con este tema en secciones transversales, ya que la mayoría de la bibliografía trata la morfología de cauces vista "en planta", y no como cortes transversales a los ríos.

Como un adelanto a la Fase II fue necesario buscar libros de texto, así como indagar en páginas web sobre programación en el lenguaje de R, ya que el presente trabajo final de graduación presenta los resultados de los gráficos por medio del software R Studio.

Fase II: Ilustración de la información

La Fase II básicamente consiste en utilizar la información recopilada en la Fase I, y utilizarla para generar un programa que permita generar gráficos de la gran variedad de curvas correspondientes a las secciones transversales que se pretenden estudiar en las etapas posteriores.

Como se mencionó anteriormente, el programa se pretende realizar en el lenguaje de R y el propósito es generar gráficos que permitan facilitar la labor del análisis de las estaciones, lo cual es una de las ventajas que posee R debido a la gran variedad de paquetes y herramientas a disposición para el análisis de datos.

Fase III: Obtención de resultados a partir de las secciones transversales

Esta fase consiste principalmente en estudiar las curvas obtenidas para las estaciones en periodos importantes, en donde puedan haberse presentado cambios morfológicos significativos sobre las secciones transversales. Este proceso implica identificar los procesos que interaccionaron con el cauce, sean de sedimentación o procesos erosivos, así como medir las diferencias observadas en dichos periodos.

Es importante realizar este tipo de proceso a todas las estaciones, en cuanto sea posible (debido a que en algunos casos no se va a contar con información para lugares en específico), ya que esto permite comparar los resultados obtenidos entre sí y alrededor de distintas regiones del país. También determinar si los comportamientos observados entre estaciones de una misma estación o región en particular, son consecuentes o presentan características similares.

Fase IV: Verificación y análisis de los resultados

La Fase IV, implica tomar la información obtenida en la Fase III y analizar su comportamiento a un nivel más específico. La principal tarea en esta fase es estudiar los comportamientos observados en la Fase III, y con base en la información obtenida en la

Fase I de recopilación de información, determinar si las condiciones del entorno en el periodo específico en que ocurre algún cambio morfológico relevante llegan a coincidir cronológicamente con algún fenómeno ya sea hidrometeorológico o geológico importante, y analizar de manera similar si dicho evento presenta la capacidad de generar los cambios observados en las secciones. Para esto es necesario tener material de consulta sobre características propias del lugar, o de la cuenca como tal, así como el clima presentado en el momento que la variación de las secciones transversales.

También, otro punto esencial será la realización de una comparación de los resultados obtenidos a la hora de realizar el análisis de la afectación de un evento sobre el cauce, con periodos de actividad meteorológica ordinaria. El fin de realizar este tipo de comparaciones, es determinar si los efectos visualizados en los gráficos planteados en un evento extremos, representan cambios atípicos o si por el contrario, el evento realmente no fue muy influyente en el río.

Las comparaciones a realizar quedan sujetas a la disponibilidad de información según la base de datos proporcionada por el ICE en los periodos de comparación claves definidos más adelante en el Capítulo 6, así como el criterio del investigador, ya que en algunos periodos la afectación puede ser muy evidente y no es necesaria una revisión de este tipo.

Fase V: Finalización del TFG

La Fase V consiste en la etapa final de la presente investigación. En esta etapa se plantea redactar las conclusiones derivadas del análisis del proyecto, así como las recomendaciones que se pueden brindar, y las limitaciones que se presentaron a lo largo de la elaboración del trabajo final de graduación. Finalmente se toma el tiempo para concluir la elaboración del presente informe final, la revisión final por parte del equipo de trabajo (director y asesores) y la defensa final del trabajo.

Capítulo 3. Marco Teórico

3.1. Procesos Morfológicos

Los procesos morfológicos son variaciones o deformaciones que sufren los cauces aluviales en función de sus características morfológicas, hidráulicas y del contenido de sedimentos (Serrano, 2019).

Los procesos morfológicos son eventos recurrentes que incluyen la influencia y acción de una gran cantidad de factores muy diversos. A continuación, se presentan un diagrama en que se explica de manera simplificada el flujo en que suelen ocurrir los cambios correspondientes para que se presenten modificaciones en los procesos morfológicos.

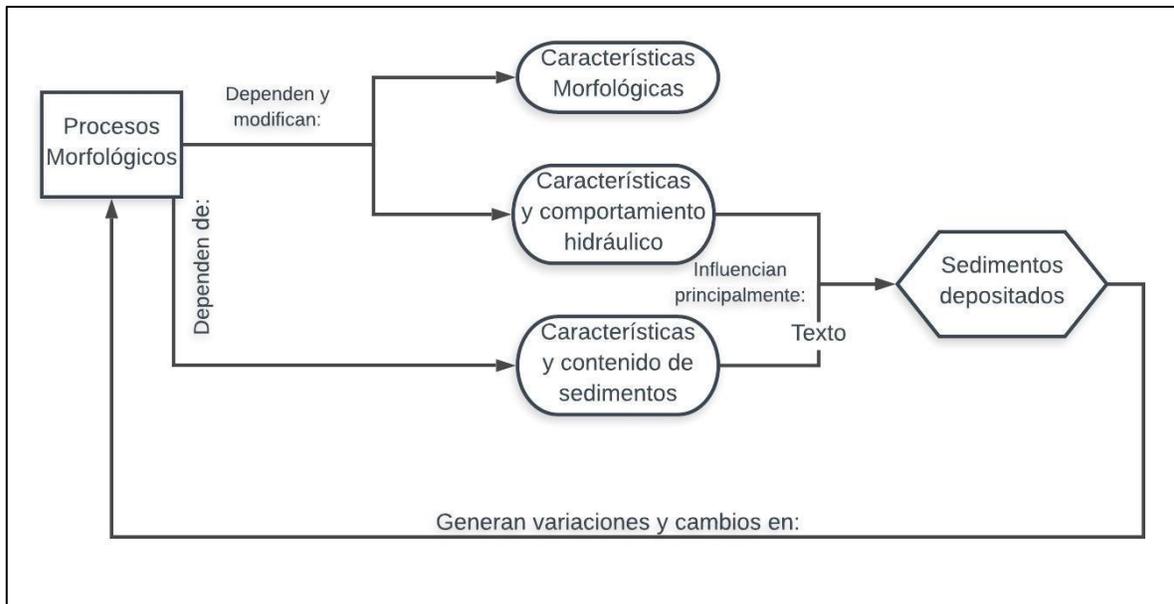


Figura 2. Diagrama de procesos morfológicos

Elaborado por: Alfaro, 2020

En el diagrama se observa que los procesos morfológicos dependen de tres importantes factores: las características morfológicas del cauce en el momento de análisis, las características y comportamiento hidráulico, y finalmente las características y contenido de sedimentos tanto del lecho como de las orillas. El proceso continúa con la deposición de sedimentos en el cauce que depende directamente de la granulometría y características intrínsecas del sedimento, así como de las características físicas e hidráulicas del flujo.

La deposición de sedimento en el cauce es la acción principal y acumulativa para que se generen variaciones que preceden a los cambios en los procesos morfológicos de un río. Cabe mencionar que los cambios en los procesos morfológicos también influyen directamente sobre aquellos factores que dependen del mismo proceso, es decir, los cambios en los procesos morfológicos son sujeto de incidencia en el comportamiento hidráulico de un río así como las características morfológicas, ya que pueden modificar propiedades importantes como la profundidad y el ancho de banca, disminuyéndolas, o aumentándolas en el caso de que exista erosión, por ende la sección transversal del río se ve alterada y por ende todas las propiedades hidráulicas que dependen de esta.

Serrano (2019), describe a la recurrencia en dichos procesos morfológicos como “un efecto biunívoco y simultáneo del flujo sobre los sedimentos de fondo, creando diferentes configuraciones del cauce y de estas configuraciones sobre el flujo”.

3.2. *Procesos Aluviales*

Los procesos aluviales son aquellos procesos que se derivan de variables externas e influenciadas por las características propias de los cauces, influyendo directamente sobre el caudal del río. Entre las principales variables que modelan la acción de los procesos aluviales, se pueden mencionar el régimen de precipitaciones, tormentas, fenómenos atmosféricos, la topografía de la región, tipo de suelo de la cuenca, el sistema de drenaje, entre otros.

Estos procesos se encuentran conformados por los fenómenos de erosión, transporte y sedimentación de sedimentos en el río, los cuales condicionan como se mencionó anteriormente a los procesos morfológicos por medio de las deformaciones que le inducen a los cauces como resultado de los procesos aluviales.

En la presente investigación, se le dará especial importancia a la influencia que tienen los procesos aluviales en los cauces, particularmente a los resultados apreciables a partir de cortes en distintos ríos, que permiten visualizar a partir de secciones transversales, los cambios que estas presentan en periodos de tiempo determinados por la influencia de procesos erosivos, así como de sedimentación. A continuación, se procede a hablar sobre la erosión, sedimentación y transporte de sedimentos de forma individual.

3.2.1. Erosión

La erosión en cauces es un tema bastante estudiado en la ingeniería debido a la necesidad de conocer el comportamiento del fenómeno en estudios de susceptibilidad de socavación de puentes.

Serrano (2019), define a la socavación como la disminución del lecho del río o canal por debajo de su nivel original o de referencia, y se debe a la erosión causada por el flujo del agua. El nivel de referencia es aquel al que tiende el río de manera natural y bajo un nivel de agua ordinario sin crecientes. Como se mencionó anteriormente, es una temática de suma importancia en el diseño del puente ya que entre mayor sea la profundidad de socavación, mayor será la probabilidad de que la fundación del puente se exponga al flujo, lo cual lleva a una futura desestabilización y posible falla de la estructura.

Con todo lo mencionado anteriormente, la erosión de un río toma mucha importancia a la hora de diseñar obras hidráulicas, sin embargo, también cabe mencionar que la erosión del lecho de fondo no es el único tipo de erosión presente en los cauces. En la presente investigación también se pretende observar cambios erosivos en las márgenes u orillas de los diferentes ríos que son producto de la inestabilidad inherente que tienen la mayoría de los ríos.

Martín (2003) en su libro *Ingeniería de ríos*, describe la erosión en un cauce como el descenso del fondo (o retroceso de las orillas) como consecuencia de fenómenos de dinámica fluvial natural o suscitados por obras del hombre. También hace mención al concepto de estabilidad de cauces, donde menciona: "Como indica la balanza de Lane, la erosión es también una respuesta del cauce a la falta de equilibrio entre las variables principales. Ya que una de estas variables, el caudal sólido, es de tan incierta cuantificación, es lógico que la erosión sea extraordinariamente difícil de prever".

El párrafo anterior destaca dos argumentos muy importantes para entender y analizar la erosión, el primero es la gran diversidad de fenómenos que pueden suscitar la erosión en un cauce como se mencionará a continuación, y el segundo argumento, es la introducción del concepto de "equilibrio en un río". El Technical Advisory Committee (TAC) y el Federal Highway Administration de los Estados Unidos, tienen establecidos diferentes factores que pueden influir sobre la predisposición que puede tener un puente a sufrir socavación. Algunos de estos factores son los siguientes:

- El alineamiento natural del cauce.
- La historia de inundaciones en la zona.
- Una contracción o realineamiento del flujo de agua debido a la presencia de estructuras hidráulicas.
- El tamaño, forma y alineamiento de las pilas y bastiones con respecto al flujo de agua.
- La distancia de otras estructuras hidráulicas (puentes, diques, entre otros) que se encuentren aguas arriba o aguas abajo del puente analizado.
- Las propiedades del material del lecho (gradación, tamaño, entre otros).
- La acumulación de escombros transportados por el cauce sobre las fundaciones de la estructura.
- Propiedades hidrológicas de la cuenca, como lo es el comportamiento de la misma ante eventos extremos.
- Cambios en la elevación del cauce por razones naturales o causas humanas que afectan la zona donde se encuentra la estructura.

Como se puede observar muchas de los factores mencionados (a pesar de enfocarse en la erosión de fondo para puentes), son propios del ecosistema en que se encuentra el cauce, ya que corresponden a características propias de la cuenca y de los materiales que hay en ella y en el lecho del río. Estos factores suelen ser complicados de cuantificar lo que complica la estimación de la erosión, sin embargo, sumado a esto como se observó en la lista, también inciden variables meramente antrópicas. La erosión no solamente está condicionada por la naturaleza, sino también por aquellas estructuras y alteraciones que se hayan realizado por el hombre ya sea aguas arriba, como aguas abajo de un punto de interés.

3.2.2. Equilibrio en cauces

Retomando el segundo argumento de Martín, existe una gran complejidad en la mayoría de los cauces para alcanzar un equilibrio. Según la García (s.f), se dice que un cauce se encuentra en equilibrio, en presencia de transporte de sedimentos (ya sea en suspensión o por el fondo), cuando su cota no sufre modificación. Lane (1955), propuso tener en cuenta cuatro variables esenciales para analizar la estabilidad de un fondo.

- El caudal líquido unitario. (q)
- El caudal sólido de fondo unitario. (q_s)
- La pendiente del cauce. (i)
- El tamaño del sedimento. (D_{50})

La condición de equilibrio establecida por Lane, depende de la relación entre las 4 variables, de esta forma se debe cumplir la siguiente relación, que especifica que el conjunto caudal sólido – granulometría de los sedimentos debe ser igual al conjunto caudal líquido – pendiente del cauce, como se muestra a continuación.

$$q_s \cdot D_{50} \propto q \cdot i$$

Este es el concepto denominado la Balanza de Lane, en donde cada término del lado izquierdo, y el lado derecho de la ecuación representa un brazo de la balanza. Es por esto que en caso de presentarse algún desequilibrio en la ecuación el otro brazo debe ser compensado aumentando el peso del platillo opuesto.

Como menciona García (s.f), en su documento "Hidráulica fluvial, morfología fluvial, erosión y transporte sólido", los ríos se pueden encontrar en equilibrio o desequilibrio, en el segundo caso puede existir un exceso de transporte de sedimentos de fondo, que se conoce como sobrealimentación, o un defecto que se le conoce como subalimentación, y se produce sedimentación o erosión respectivamente. Se debe de destacar el hecho que la principal variable, que permite volver a la condición de equilibrio es la pendiente.

Cuando se encuentra en el caso de una sobrealimentación de sedimentos, la tendencia que va a tener el cauce será a aumentar la pendiente mediante la sedimentación del material transportado, mientras que, en el caso contrario, es decir, desequilibrio por subalimentación, la tendencia sería la disminución de la pendiente al producirse erosión en el lecho.

3.2.3. Sedimentación

La sedimentación es un proceso en el que se presenta una separación (sólido – líquido) de las partículas sólidas en suspensión que son más densas que el fluido en que se encuentran a partir de la acción de la gravedad, y es una operación controlada por la transferencia de cantidad de movimiento.

Es un fenómeno de mucha importancia en la ingeniería fluvial y está regida por dos magnitudes principales a caracterizar, en primera instancia se tiene la velocidad de caída de la partícula, y por otro lado la velocidad de corte de la corriente. La velocidad de caída está definida principalmente por el tamaño de las partículas. Si la partícula es pequeña, menor que 0,075 mm (es decir arcillas, y limos, fundamentalmente) en su descenso dominan las fuerzas viscosas y entonces la velocidad de caída es proporcional al tamaño de partícula al cuadrado. De manera similar, en el caso de que la partícula sea gruesa, es decir, mayor que 2 mm (gravas y materiales mayores), las fuerzas de inercia son dominantes y entonces la velocidad de caída es proporcional a la raíz cuadrada del diámetro (Martín, 2003).

El criterio fundamental para la sedimentación establece que si la velocidad de caída de la partícula es mayor que la velocidad de corte del río o la corriente, esta partícula va a sedimentar, en caso contrario la partícula se mantendría en suspensión.

La comparación anterior puede expresarse de la siguiente forma, como se muestra a continuación:

Entiéndase por ω la velocidad de caída de las partículas y v_c la velocidad de corte de la corriente. De esta manera se procede a plantear el cociente adimensional ω/v_c , el cual representa el parámetro de comparación entre velocidades para determinar si el sedimento continúa en suspensión o sedimenta.

$$\text{Si } \frac{\omega}{v_c} > 1, \text{ la partícula se sedimentará.}$$

$$\text{Si } \frac{\omega}{v_c} < 1, \text{ la partícula continuará en suspensión.}$$

La velocidad de corte es de los conceptos que conforman el umbral o principio de movimiento, y representa la acción del agua sobre el fondo que genera el arrastre de las partículas. Convencionalmente suele definirse a partir de la tensión cortante τ , en donde:

$$\tau = \rho v_c^2, \quad v_c = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$$

Para la expresión anterior, la tensión cortante es posible calcularla a partir de las características físicas del río, haciendo uso del radio hidráulico (R_h), la pendiente del río (I), y el peso específico (γ).

$$\tau = \gamma R_h I$$

Ambos fenómenos se encuentran representados de manera muy intuitiva en el ábaco de Shields que se presenta a continuación.

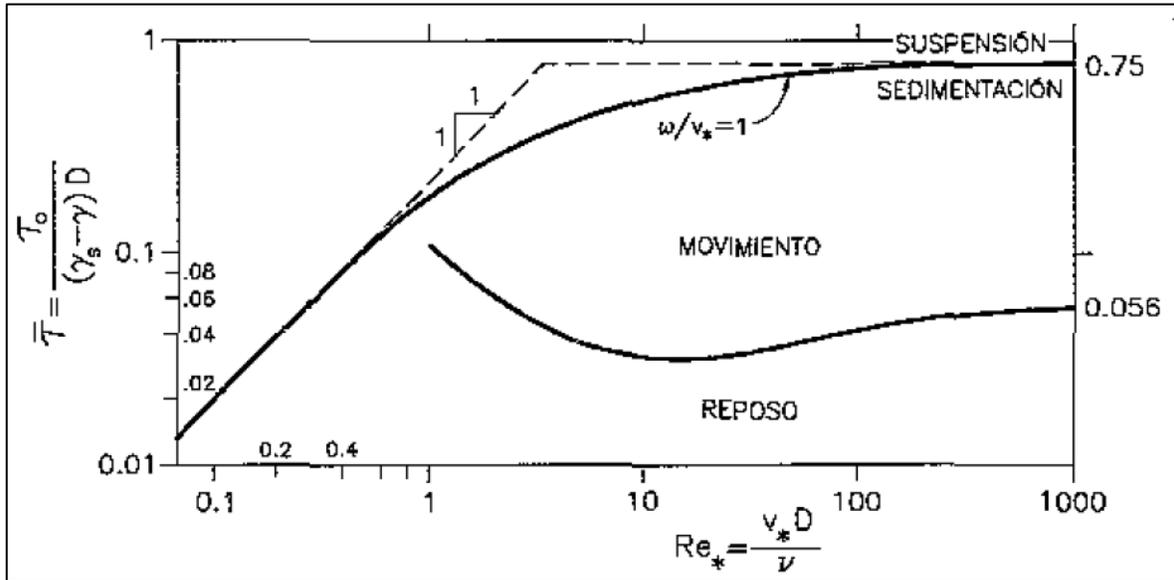


Figura 3. Criterio de sedimentación en el gráfico de Shields

Fuente: Martín, 2003

El gráfico describe las condiciones límite entre ambos fenómenos a partir de las líneas marcadas, en donde la línea representa el caso $\omega/v_c = 1$, por debajo de la curva ocurre sedimentación, mientras que por encima de esta las partículas permanecen en suspensión. También es pertinente hacer mención a la otra curva que se encuentra en el gráfico. Una curva representa de manera gráfica el límite entre la suspensión y sedimentación, como se mencionó anteriormente, sin embargo, la curva restante es el límite entre el reposo y el movimiento de las partículas. Esto se debe a que como bien se sabe el transporte de sedimentos no está únicamente limitado al transporte por suspensión, sino que también puede existir el transporte de fondo, que es a lo que hace mención esta curva, ya que puede darse el caso en que la fuerza promotora no es suficiente para poner en suspensión las partículas.

Además del tamaño de las partículas, la sedimentación también se encuentra modelada a partir de un número importante de variables que deben ser estudiados para comprender el fenómeno en mayor magnitud. El estudio de las características de los materiales en

investigaciones de los procesos de deposición y transporte de sedimentos es muy variado. Según Ochoa (2011), en algunas ocasiones son determinantes las propiedades de las partículas individuales y, en otras, las de un conjunto completo o mezcla, compuesta en la gran mayoría de los casos por materiales gradados o que poseen una granulometría uniforme, lo cual no es frecuente.

Las propiedades fundamentales de los sedimentos son:

- El diámetro representativo de las partículas.
- El peso específico.
- La densidad.
- La forma de las partículas (que se encuentra caracterizada en función de la esfericidad relativa y de la curvatura relativa de las superficies irregulares).
- La granulometría o contenido relativo de sólidos de diferentes dimensiones según el peso.

También, suelen ser caracterizadas otras propiedades que dependen directamente de las ya mencionadas, como lo son la porosidad, la dureza y la velocidad de caída vertical en aguas tranquilas.

Cabe mencionar que a pesar de la importancia individual que tienen cada una de estas propiedades en la mecánica de ríos, es muy usual tomar una muestra y definir su granulometría, y definir el comportamiento representativo de todo el conjunto o mezcla a partir de un solo parámetro. Por ejemplo, los sedimentos del lecho pueden ser expresados a través del d_{90} para representar su resistencia hidráulica. Por este motivo, es importante reconocer en qué momento se requieren los parámetros de una partícula individual y cuándo son relevantes las propiedades de una mezcla completa (Ochoa, 2011).

Como menciona Ochoa (2011), el diámetro mediano de las partículas y su composición granulométrica son sus propiedades fundamentales. La granulometría depende del origen de los sedimentos y de su composición mineralógica, del tipo de suelos que constituyen las laderas, las orillas y el fondo del río y de las variaciones que ha sufrido en los períodos anteriores. Lo anterior se complementa fuertemente con los conceptos contemplados anteriormente, en donde se mencionada que el tamaño de las partículas, así como la

velocidad de corte de la corriente, son esenciales para determinar el proceso de sedimentación.

Las partículas mayores de 0.1 mm suelen presentar un comportamiento granular, mientras que las menores a dicho valores pueden desarrollar fuerzas intergranulares de cohesión, que se encuentran muy influenciadas por la química del agua. De esta forma las fuerzas de cohesión pueden estar mucho más presentes en los sedimentos que circulan en un cauce con aguas duras y salinas, en donde la cohesión va a evidentemente favorecer a la sedimentación ya que puede formar conjuntos de mayor tamaño que las partículas sueltas, un fenómeno muy similar a la floculación.

La deposición de todos los materiales que componen el lecho de un río es sumamente variada, como menciona Ochoa, con un material móvil en el fondo, la acumulación de sedimentos en diferentes puntos sucede también en forma diversa. De la misma manera va a tender a variar la composición de los materiales que pasan de una zona a otra. Sin embargo, en un sector dado, las condiciones de deposición deben de ser constantes, y la composición granulométrica de los sedimentos debe seguir una cierta ley de probabilidad o de frecuencias.

3.2.4. Transporte de Sedimentos

Los ríos son afectados directamente por diferentes tipos de partículas que se transportan de distintas maneras y orígenes, para terminar depositándose en los cauces y formar parte del flujo del río. Entre los tipos de transporte más destacados, se encuentra la transportación eólica responsable de formar desiertos y zonas fértiles, la transportación glaciaria propia de zonas de latitudes altas y que no son propias de Costa Rica como país tropical, y el transporte fluvial, que para efectos de la presente investigación representa el tipo de transporte más relevante y con el mayor impacto a las corrientes de los ríos.

La transportación fluvial afecta a todo tipo de corrientes, desde arroyos, hasta ríos caudalosos. El transporte fluvial puede dividirse en tres tipos: por suspensión, tracción y el transporte por solución. El transporte por suspensión es el encargado de mover aquellas partículas de menor diámetro, como los limos, las arcillas y arenas finas. Se genera cuando el río presenta velocidades que permiten la turbulencia y por ende que los sedimentos del fondo sean levantados y transportados por la corriente de flujo al vencer la cohesión entre

las partículas finas. En general, el volumen de sedimentos que se transporta por suspensión suele tener mayor concentración conforme se acerca al fondo de la corriente, además cabe mencionar que dicha concentración cambia según el tamaño de partícula, esto quiere decir que, para partículas de mayor diámetro, la concentración aumenta hacia el fondo de la corriente disminuye proporcionalmente hacia la superficie.

El transporte desarrollado por tracción está presente principalmente en el movimiento de las partículas de gran tamaño como las gravas y materiales de gran tamaño que por lo general se transportan por el fondo del cauce. Está íntimamente relacionado con las fuerzas de fricción presentes en el fondo del cauce, la turbulencia y velocidad del fluido, la velocidad de sedimentación de las partículas y la forma de las mismas.

El transporte por solución corresponde al que se desarrolla por aquellas partículas que se originan a partir del efecto del intemperismo sobre las rocas en la superficie, y que son compuestos químicos que se logran disolver en el agua. Este tipo de transporte no tiene una gran influencia sobre los sedimentos a estudiar.

Hjulstrom (1935) representó el comportamiento de transporte, sedimentación y socavación, según el tamaño del grano y la velocidad del cauce como se muestra en la figura a continuación.

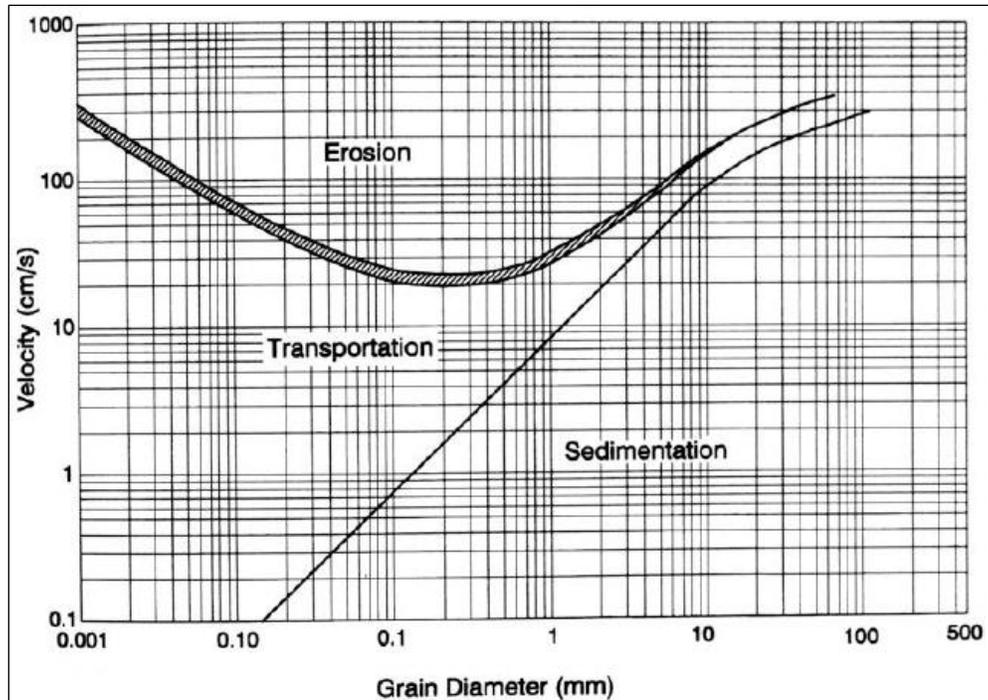


Figura 4. Diagrama de Hjulstrom (1935)

Fuente: Hjulstrom, 1935

Como se puede observar del gráfico anterior, ocurre que para velocidades muy altas y tamaño de granos pequeños, el efecto que se presenta en el cauce es de socavación, ya que la energía cinética que lleva el agua es suficiente para romper con la cohesión de las partículas en los márgenes de los ríos. Por el contrario, si la velocidad de la corriente es lenta para granos pequeños, las partículas van a tender a sedimentarse, efecto que se agrava conforme aumenta el tamaño del grano.

Todos estos procesos generan variaciones en la forma y estructura del cauce y sus márgenes produciendo deformaciones y alteraciones que se producen permanentemente bajo la acción del flujo. Dependiendo de estas formas, pueden aparecer barras, meandros de diferentes tipos, islotes, cauces trenzados, entre otros (Serrano, 2019).

3.3. La morfología de un cauce

La morfología de ríos estudia la estructura y forma de los ríos, incluyendo la configuración del cauce en planta, la geometría de las secciones transversales, la forma del fondo, y las características del perfil. En general, representa el estudio de aquellos aspectos relacionados con la forma y características de un río a lo largo de su recorrido. (Gracia y Maza, 1997).

La morfología de un río suele estar modelada a partir de una gran variedad de procesos que se desarrollan a lo largo de toda la longitud del cauce, desde su nacimiento, hasta la culminación de su recorrido en un cuerpo de agua mayor, ya sea un lago, mar u océano.

Según Martín (2003), "el papel geológico de un río es, a muy grandes rasgos, la erosión en la cabecera de la cuenca (tramo alto de la montaña), donde la pendiente es mayor y el material más grueso, el transporte en el tramo medio y la sedimentación en el tramo bajo donde la pendiente es menor y el material del cauce más fino. Esto da un perfil longitudinal típicamente cóncavo y una distribución del tamaño del material granular menguante en la dirección de aguas abajo". Lo anterior implica que dependiendo de la localización de un punto determinado que se quiera estudiar, este va a presentar un comportamiento muy variado dependiendo de la elevación en el recorrido que el cauce se encuentre.

Existen diversas formas de clasificar los ríos según el estudio de la morfología, desde diversos puntos de vista. Lo anterior permite una caracterización más sencilla de los cauces para lograr identificar sus principales características, sin embargo, bien se sabe que el comportamiento de la naturaleza no tiende a ser ideal y suele comportarse con patrones muy variados, por lo tanto, es usual encontrar condiciones intermedias entre las que se suelen clasificar. A continuación, se presenta una breve descripción de los principales tipos de clasificación más importantes de cauces: por edad, estabilidad, por tramos, grados de libertad, tipo de material de las márgenes y el fondo, y por geometría.

3.3.1. Clasificación por edad

Este tipo de clasificación es meramente geológica, y se suelen clasificar como jóvenes, maduros y viejos. Los ríos jóvenes se encuentran en los cauces de montaña; tienen pendientes altas y sección transversal tipo "V". Son muy irregulares y están generalmente en proceso de degradación (Gracia y Maza, 1997). Por otro lado, Gracia y Maza (1997) también mencionan que los ríos maduros se presentan en valles amplios y tienen pendientes relativamente bajas; la erosión de las márgenes suele haber remplazado a la erosión del

fondo. En cuanto a los ríos viejos, estos se encuentran en valles amplios y planicies cuyo ancho es 15 a 20 veces mayor que el ancho de los meandros, y las pendientes son muy bajas. En estos ríos se forman depósitos naturales de sedimentos a lo largo de las márgenes. Frecuentemente se forman amplias planicies y pantano en las zonas vecinas a las márgenes del río, no suelen tener rápidas o caídas, pero cerca de ellos puede haber lagos con forma de cuerno o herradura que son restos de meandros abandonados y que se cortaron en forma natural (Gracia y Maza, 1997).

3.3.2. Clasificación por condición de estabilidad

Los ríos suelen ser distinguido por tres tipos de condiciones de estabilidad, la estabilidad estática, dinámica y morfológica.

- ***Estabilidad estática***

Un cauce presenta estabilidad estática cuando este es capaz de arrastrar sedimentos, pero no puede mover y arrastrar las partículas o los elementos de las orillas (Gracia y Maza, 1997). Los ríos que presentan márgenes rocosas suelen representar este tipo de cauces, así como aquellos que presentan una alta cohesión.

- ***Estabilidad Dinámica***

Según Gracia y Maza (1997), un cauce presenta estabilidad dinámica cuando las variaciones de la corriente los materiales de la plantilla y orillas, así como los sedimentos transportados han formado una pendiente y una sección que no cambian apreciablemente año con año. Los cauces con este tipo de condición sufren desplazamientos laterales continuos en las curvas, con erosiones principalmente en las márgenes exteriores, y depósito de sedimento en las interiores. Todos los gastos, antes de producirse un desbordamiento, escurren por un único cauce que no tiene islas o bifurcaciones.

- ***Condición de inestabilidad dinámica***

La inestabilidad dinámica es un caso muy particular que a primera instancia es similar al caso anterior sin embargo corresponde básicamente a un proceso en el que el río intenta alcanzar la estabilidad de su pendiente. Gracia y Maza (1997) la describen como: "El río escurre por un solo cauce, pero se presenta cuando el desplazamiento lateral de los meandros es muy intenso y por tanto, el corte natural de ellos ocurre muy frecuentemente.

Por una parte, el río trata de alcanzar su pendiente de equilibrio al desarrollar sus meandros y por otra estos se estrangulan rápidamente y se cortan.”

- **Condición de estabilidad morfológica**

La morfología de un cauce, depende de una gran cantidad y variedad de factores, sin embargo, estos presentan entre sí un factor común, dependiendo estos del caudal o gasto líquido que escurre anualmente, así como de su distribución. Entre los factores que se ven afectados debido al caudal del cauce, se encuentran los siguientes a continuación:

- La pendiente de cualquier tramo.
- El ancho del canal.
- El tirante de su sección transversal.
- Cantidad de brazos en que se divide el cauce.

Otros factores de suma importancia que moldean y caracterizan la morfología del cauce son características de algunos materiales. Entre estos destacan los materiales que forman el fondo y orillas del cauce, así como la calidad y cantidad de sedimento que es transportado.

Por lo tanto, según Gracia y Maza (1997), cualquier corriente natural no alterada por factores humanos tiene estabilidad morfológica, por ello un cauce que en forma natural tiene estabilidad estática o dinámica, también la tiene morfológica.

3.3.3. Clasificación por tramos

La clasificación por tramos a lo largo del recorrido de un río fue propuesta por Lojtin según Gracia y Maza (1997), y se presenta en el cuadro a continuación.

Cuadro 1. Tipo de cauce según clasificación por tramos

Tipo de cauce	D/S₀	Fr
Alta montaña	> 10	> 1
Montaña	> 7	0.7 - 1
Faldas de montaña	> 6	0.045 - 0.7
Intermedio	> 5	0.2 - 0.45
Planicie (cauce arenoso)		
a) Río caudaloso	> 2	0.14 - 0.44
b) Río poco caudaloso	> 1	0.44 - 0.55

Fuente: Gracia y Maza, 1997

En el cuadro anterior, D corresponde al diámetro medio de las partículas del fondo en metros, S_0 la pendiente hidráulica en m/m y finalmente Fr representa al número de Froude. La expresión correspondiente al número de Froude es la siguiente:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot d}}$$

En la fórmula anterior el numerador corresponde a la velocidad media, mientras que los términos en el denominador corresponden a la gravedad y al tirante hidráulico.

3.3.4. Clasificación por los grados de libertad

- ***Un grado de libertad***

Esta clasificación comprende cuando el gasto en un cauce o canal varía únicamente el tirante, por lo tanto, se dice que existe un grado de libertad. Se suele presentar en casos especiales como un canal revestido donde el fondo, las paredes y la pendiente no cambian con el caudal. Para los casos de un grado de libertad el transporte de sedimentos es nulo.

- ***Dos grados de libertad***

Únicamente varían el tirante y la pendiente. Ocurren en cauces donde las márgenes son muy resistentes, pero el fondo carece de dicha resistencia.

- ***Tres grados de libertad***

Esta clasificación ocurre cuando las variables mencionadas anteriormente: el tirante, la pendiente y las márgenes, varían con el gasto del cauce, modificando y ajustando el ancho del cauce.

3.3.5. Clasificación según el material de las márgenes y el fondo

- ***Materiales cohesivos***

Son aquellos cauces que cuentan con una predominancia muy marcada de materiales de tipo arcillosos.

- **Materiales no cohesivos**

Según Gracia y Maza (1997), ocurre en los cauces alojados en material que no desarrolla cohesión, sino que está formado por partículas sueltas. Se clasifican a su vez, según el predominio del material grueso, en boleado y cantos rodados si $D_m > 64$ mm, en gravas y arena si $64 \text{ mm} > D_m > 2$ mm, y en arenoso si $2 \text{ mm} > D_m > 0.062$ mm. Donde D_m es el diámetro medio de las partículas.

- **Acorazados**

Son aquellos cauces donde debido a lo extendido de la granulometría ($\sigma_g > 3$), puede ocurrir el arrastre de las partículas más finas, lo que permite la formación de una capa protectora o coraza de material grueso en su superficie, la cual mantiene debajo de ella, a toda la granulometría original incluyendo a los granos más finos (Gracia y Maza, 1997). Donde σ_g es la desviación estándar de los diámetros de partículas.

- **Bien graduados o de granulometría extendida**

Corresponden a aquellos materiales en donde la desviación estándar de los diámetros de las partículas, es mayor que 3, es decir que $\sigma_g > 3$. En esta clasificación entran los sedimentos de fondo que están compuestos por una gran diversidad de tamaños.

- **Mal graduados o de granulometría uniforme**

Esta clasificación es básicamente el contrario de la anterior, corresponden a aquellos materiales que presentan una desviación estándar de los diámetros de las partículas menor a 3 ($\sigma_g < 3$). En estos casos según Gracia y Maza (1997), los tamaños de las partículas siguen una distribución log-normal o logarítmica, en donde σ_g vale:

$$\sigma_g = \frac{D_{84}}{D_{50}} = \frac{D_{50}}{D_{16}} = \left[\frac{D_{84}}{D_{16}} \right]^{1/2}$$

En donde D_i es el diámetro de la muestra en que el porcentaje i en peso, es menor que ese tamaño.

3.3.6. Clasificación por geometría

- ***Sinuosos***

En primera instancia cabe mencionar que es importante definir el concepto de sinuosidad de un cauce antes de referirse a este tipo de clasificación en particular.

La sinuosidad es clasificada según el "índice de sinuosidad", el cual según Ollero (1990) es un parámetro fundamental en el estudio de las corrientes meandriformes y es el resultado de dividir la longitud del cauce entre la del valle. Para cauces sinuosos, la sinuosidad debe estar comprendida entre 1.2 y 1.5.

- ***Rectos***

Los tramos rectos no suelen ser el tipo de geometría más común que se puede encontrar al analizar el cauce de un río. Según Gracia y Maza (1997), este tipo de geometría normalmente ocurre en pequeños tramos y son transitorios, ya que con cualquier irregularidad en la forma del cauce o en su alineamiento, o con la formación de bancos, o bien alguna obstrucción temporal, se originan disturbios locales que producen flujos transversales que inician la formación de curvas y meandros. Suelen ocurrir también cuando los ríos escurren a lo largo de una falla geológica. El criterio básico para definir un tramo recto a partir del concepto de sinuosidad corresponde a que la sinuosidad no debe ser mayor que 1.2.

- ***Con meandros***

Leopold, Wolman y Miller (1964) restringen el término "meandering" a canales con curvas de considerable simetría y un índice de sinuosidad superior a 1.5. Además, Ollero (1990) también menciona que, dado que la idea de meandro va asociada a la morfología de la curva, que tiene hacia una progresiva regularización, no podemos hablar de cauce meandriforme si las curvas consideradas, no forman una familia continua y se dimensiones regulares.

Por otro lado, normalmente la pendiente en dichos cauces es baja. Pueden presentar erosión en las márgenes exteriores de las curvas, principalmente en los tramos de agua abajo. Además, suelen existir profundas depresiones del fondo en las curvas y altas velocidades

en la cercanía de las márgenes cóncavas y los tirantes en las transiciones son menos profundos si se comparan con los que ocurren en las curvas (Gracia y Maza, 1997).

Dicho tipo de cauces también se pueden clasificar como superficiales, que corresponden a los cauces que suelen cambiar su curso con el transcurso del tiempo, y los cauces con curvas en "trinchera", que presentan materiales resistentes y permanecen fijos.

- **Trenzados**

Este tipo de clasificación son aquellos que a lo largo de todo su recorrido se dividen en varios cauces que se entrelazan entre sí, y se separan posteriormente formando un comportamiento relativamente difícil de predecir, por ende, se diferencian de los demás debido a que no están sujetos a un único cauce.

En 1997, Gracia y Maza mencionan que son cauces amplios y las márgenes no están bien definidas. Presentan caudales bajos, y suele existir dos o más cauces principales entrelazados y se forman cauces secundarios. En las crecientes, el agua cubre todos los cauces y grandes cantidades de sedimento se depositan rellenando los cauces antiguos, y es por esto que en la época de estiaje se forman nuevos cauces entrelazados. También mencionan que estos cauces suelen tener pendientes altas, materiales de granulometría gruesa, y a ellos llegan grandes cantidades de sedimento, es por estos que la principal característica de los ríos trenzados es que están sujetos principalmente a un proceso de sedimentación.

- **Con islas**

Son cauces que presentan islas en su interior y que puede presentar movimiento, desplazándose aguas abajo.

- **En estuario**

Este tipo de morfología es usual y se presenta en las desembocaduras a los océanos y están influenciados principalmente por las mareas. Suelen contener estratos o mezclas de agua salada.

- **En pantano**

Este tipo de cauces son muy amplios, ya que la pendiente tiende a ser muy pequeña, además presentan zonas muerta y saturadas por altos niveles freáticos. Los tirantes son más pequeños (se reducen) y se crea un ambiente favorable para el crecimiento de la vegetación (Gracia y Maza, 1997).

- **Deltas**

Los deltas son aquellos ríos que arrastran grandes cantidades de sedimentos y desembocan en el mar con mareas reducidas. Estos se ven influenciados fuertemente por la acción del oleaje, que influyen directamente sobre lo que se conoce como "flechas" que son las formaciones del material depositado que se llegan a depositar paralelas al flujo que delimitan las márgenes del cauce. Ante la ocurrencia de grandes eventos, como avenidas o tormentas las flechas se rompen en la salida del flujo y todo el proceso de formación de flechas se repita nuevamente, lo que produce un abanico de sedimentación que se asemeja a la letra griega D, de donde se deriva su nombre (Gracia y Maza, 1997).

3.3.7. Por condición de transporte

La presente clasificación, depende principalmente en la carga de sedimentos que un cauce transporta. Los ríos pueden estar en los tres estados en que se caracteriza la presente clasificación:

- Estable.
- Erosionable.
- Depositante.

Gracia y Maza (1997) comentan que esta clasificación es bastante relevante, y ha sido trabajada por Schumm en 1963. Su importancia radica en el hecho de que dicho factor afecta significativamente la estabilidad del cauce, su forma y sinuosidad. Lo anterior ocurre debido a la recurrencia de los procesos morfológicos a los que están sujetos los cauces constantemente, ante procesos de erosión o sedimentación. Schumm también propone subclases dependiendo del modo de transporte del sedimento, ya sea en la capa de fondo, mixto y en suspensión.

A continuación, se presenta la clasificación de cauces según Schumm.

Cuadro 2. Clasificación de cauces por condición de transporte según Schumm

Forma del transporte de sedimento	M%	Estable	Estabilidad del cauce	
			Con depósito	Con erosión
En suspensión del 85% al 100%.	100	F < 7 P > 2.1 S baja	El principal depósito ocurre en las márgenes que origina el estrechamiento del cauce. El depósito en el fondo es menor.	Predomina la erosión del fondo. Poca ampliación de márgenes.
En suspensión del 65 % al 85% y en el fondo del 15 % al 35%.	30	7 < F < 25 1.5 < P < 2.1 S moderada	Es importante el depósito en las márgenes, pero también el del fondo.	Es importante la erosión del fondo y la ampliación de las márgenes.
De fondo del 35 % al 70%	< 5	F > 25 1 < P < 1.5 S alta	Depósito en el fondo y formación de islas.	La erosión del fondo es baja, pero la ampliación del cauce es muy importante.

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: Gracia y Maza, 1997

Donde:

- $F = B/d$; B es el ancho de la superficie libre, d es el tirante de la corriente
- P es la sinuosidad.
- S es la pendiente longitudinal del fondo.
- M es el porcentaje de sedimento transportado que es menor de 0.074 mm (Malla 200), tomado de la curva granulométrica correspondiente. También se le conoce como *transporte de lavado*.

Martín (2003), propone una clasificación básica que abarca una gran diversidad de aspectos. La primera clasificación está relacionada con el clima propio de cada región, en donde se hace distinción de los tipos de ríos que se pueden encontrar en diferentes zonas, en primera instancia se hace mención a los ríos de climas tropicales en donde el régimen hidrológico que presentan los cauces presenta una estacionalidad bastante marcada por una temporada de lluvias que puede esperarse cada año y que afecta directamente los caudales líquidos.

Estos ríos suelen ser considerados efímeros, en donde la permanencia de sus caudales base se explica debido a la preservación de las aguas subterráneas que permiten alimentar el cauce. De manera inversa, también se genera infiltración a través de un cauce permeable explica que los ríos se sequen. Por oposición a los ríos efímeros, también son comunes los ríos perennes en regiones con climas áridos y semiáridos, estos ríos presentan transporte líquido únicamente en los periodos de fuertes precipitaciones y suelen mantenerse secos el resto del año.

Otra clasificación empleada es por los materiales que conforman el cauce, por ejemplo, los ríos aluviales son aquellos que discurren por materiales sedimentarios modernos, y generalmente son aportados por el propio río (Martín, 2003). Suelen presentar materiales granulares, usualmente sueltos y ocupar una gran extensión horizontal a la del cauce actual formando lo que se conoce como llanuras de inundación. Una característica bastante peculiar y que genera uno de los problemas más importantes con que se trabaja en la ingeniería fluvial es el hecho que los valles en que se desarrollan este tipo de ríos son un punto atractivo de asentamiento de poblaciones, por lo que suelen presentar una mayor densidad de población debido al desarrollo de actividades humanas. Según el tipo de material aluvial se diferencia entre ríos de grava y ríos de arena.

Por otro lado, también existen los ríos de lecho rocoso o cohesivo, que presentan menos interacción con asentamientos humanos, presentan materiales con mayor resistencia a y oposición al transporte de sedimentos y suelen estar encajados o incisos en los valles, desde el punto de vista morfológico.

Finalmente, una de las clasificaciones finales es la clasificación por pendiente, que básicamente implica la denominación de "ríos torrenciales" a aquellos que presentan una pendiente mayor del 1.5 %, y torrentes a los cursos de agua de pendiente mayor que el 6%.

3.4. Fenómenos meteorológicos importantes en Costa Rica

El clima en Costa Rica se encuentra modelado por una gran variedad de fenómenos. La interacción que tienen estos fenómenos entre sí, define las características y el comportamiento estacional que presenta el clima en nuestro país, y que se manifiestan en fenómenos hidrometeorológicos que afectan a todas las personas. Por lo general, estos fenómenos dependen de una continua interacción entre el océano y la atmósfera, por lo que dichos fenómenos presentan una gran complejidad en su estudio, así como una gran variedad en la magnitud con que se presentan en el tiempo.

El Instituto Geográfico Nacional (2005) se refiere al respecto como: "El clima tropical de nuestro país, es modificado por diferentes factores como el relieve (la disposición de las montañas, llanuras y mesetas), la situación con respecto al continente (condición ístmica), la influencia oceánica (los vientos o las brisas marinas, la temperatura de las corrientes marinas) y la circulación general de la atmósfera). La interacción de factores geográficos locales, atmosféricos y oceánicos son los criterios principales para regionalizar climáticamente el país".

A continuación, se procede a explicar en mayor detalle los principales fenómenos que afectan directamente a nuestro país.

3.4.1. Zona de convergencia intertropical (ZCIT)

La zona de convergencia intertropical comprende una franja alrededor de la franja ecuatorial, en donde existe una importante evaporación y calentamiento, generados por la acción del sol.

El Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, define la ZCIT como un cinturón de bajas presiones, nubes, y tormentas que rodea a todo el globo terrestre en la región tropical. Dicho cinturón se encuentra básicamente formado por la convergencia de aire húmedo y cálido de las latitudes al norte y sur del ecuador, a partir de la confluencia de los alisios de ambos hemisferios.

Algunas de las características más notables de esta franja de nubes y precipitaciones corresponde en primera instancia a la posición de las mismas, debido a que varían estacionalmente a partir de la posición del Sol en el cenit. Suele alcanzar la posición más al

norte a unos 15° N en setiembre, mientras que por el contrario, en enero alcanza su posición más al sur a 6° S, variando meridionalmente. Suele ser menos móvil en las longitudes oceánicas, en donde se mantiene en una posición relativamente estática al norte del ecuador.

Las características anteriores corresponden principalmente al ciclo estacional que tiene la ZCIT cada año presentando comportamientos muy diferentes según el mes en que se observe, sin embargo, también presenta un ciclo diurno donde desarrolla nubes cúmulos a mediodía, y se transforman en tormentas por la tarde. En la figura a continuación, se presenta de manera gráfica la variación estacional que presenta la zona de convergencia intertropical según el mes en que se estudie, mostrando la ubicación más común de la ZCIT en enero y julio.

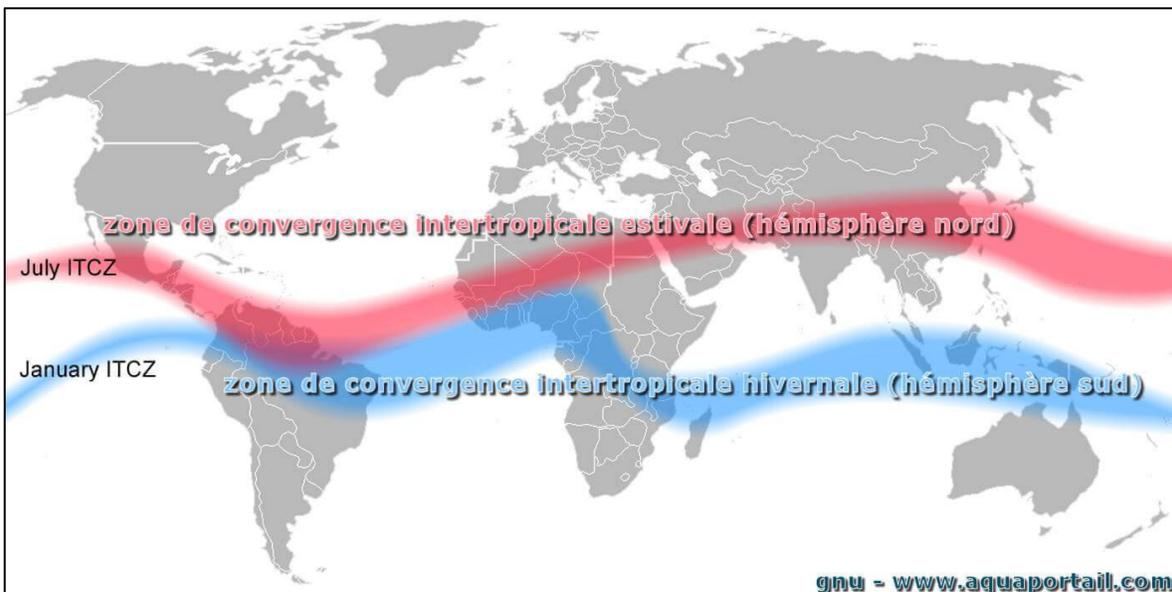


Figura 5. Ubicación de la ZCIT en enero y en julio

Fuente: Aquaportail, 2019

La posición en que se encuentra la zona de convergencia intertropical afecta en los países tropicales la influencia de las estaciones secas y lluviosas, en el caso particular de Costa Rica, según el Instituto Meteorológico Nacional, afecta el inicio, desarrollo y finalización de la temporada de lluvias, de tal forma que el establecimiento de las lluvias sigue el movimiento meridional de la ZCIT: comenzando en marzo en la parte sur del país hasta alcanzar dos meses después en mayo, la región norte.

3.4.2. Vientos alisios

Los vientos alisios son de los principales sistemas que influyen sobre los países pertenecientes a regiones tropicales. Estos presentan una dirección fija viajando de este a oeste debido a la fuerza de Coriolis por el movimiento de rotación de la Tierra, que desvía los vientos procedentes de las latitudes subtropicales en donde se desarrollan las altas presiones, dirigiéndose hacia las regiones de baja presión, es decir en el caso de la región tropical, la Zona de Convergencia Intertropical.

Algunas características importantes de los vientos alisios según el IMN son:

- Circulan entre los trópicos, desde los 30° de latitud norte y sur, hacia el ecuador.
- En el hemisferio norte soplan del noreste al suroeste.
- En el hemisferio sur soplan del sureste al noroeste.
- En Costa Rica, es importante destacar que se ve influenciado por tanto la presencia de los vientos alisios del noreste y los vientos alisios del sureste.

En nuestro país, estos vientos se originan en el océano Atlántico en el anticiclón o sistema de alta presión de las Azores. Los vientos alisios pierden fuerza desde abril a octubre y soplan con dirección del este y pueden desaparecer por completo debido a las bajas presiones que se forman en el Mar Caribe y Océano Atlántico (IMN, s.f). En el caso del invierno boreal, que comprende desde noviembre a febrero, los alisios aumentan considerablemente de fuerza y la dirección varía soplando desde el noreste debido a un aumento en la intensidad de las altas presiones migratorias sobre Norte América.

Los vientos alisios también tienen una importancia trascendental en cuanto a los cambios estacionales de las lluvias, al igual que los monzones y la ZCIT en nuestro país, influenciando en las temporadas secas y lluviosas en la vertiente del Pacífico en función de la presencia o ausencia de los mismos.

Por ejemplo, cuando los vientos alisios presentan sus mayores velocidades producen condiciones lluviosas en la provincia de Limón, ya que recogen toda la humedad del mar Caribe y Océano Atlántico, que condensa al llegar a la costa y en las laderas de barlovento (al este de la cordillera). Al pasar por las laderas de sotavento (al oeste de las cordilleras) y llegar a la Vertiente del Pacífico, los vientos alisios llegan secos y con una alta velocidad, principalmente en Guanacaste y el Valle Central, donde existe una estación lluviosa y seca

muy marcadas (IMN, s.f). La situación anterior provoca que, en este periodo de grandes intensidades de velocidad, los vientos alisios provocan una temporada lluviosa en la vertiente del Caribe, y la época seca en la vertiente del pacífico y centro del país.

Además, en plena temporada de lluvias, las tardes suelen ser muy lluviosas y tormentosas debido a la convergencia o choque frontal entre los vientos alisios con el sistema de vientos de los monzones y brisas marinas (IMN, s.f).

Es importante referirse a los vientos alisios del sureste, ya que estos son los incitan la temporada de lluvias en el sector oeste de la Cordillera de Talamanca y la Sierra Volcánica Central. Una vez que los vientos alisios, pierden su fuerza por el mes de mayo, comienzan a ingresar los alisios del sureste o ecuatoriales, que también son conocidos como "alisios del suroeste" ya que estos son desviados hacia la derecha al pasar el ecuador, llegando a nuestro país desde el oeste. Estos vientos son húmedos y afectan principalmente al Pacífico Sur costarricense generando la estación lluviosa y de alta humedad. Además, estos vientos generan un efecto inverso en el sector del Caribe, ya que provoca meses con menos lluvias y una aparente estación seca (UNED, 2016).

3.4.3.El monzón

Se puede describir físicamente el origen del monzón como el resultado de la variación de la radiación solar entrante y el calentamiento diferencial en las superficies de la tierra y el agua (IMN, s.f). La situación anterior se explica a partir de una de las propiedades más importantes del agua e influyentes en el clima, el calor específico. El calor específico del agua le permite tener cambios más graduales de temperatura en comparación con la tierra en la superficie, es por esto que la tierra se calienta y enfría más rápido que el océano, esto genera que el aire sobre la tierra ascienda provocando áreas de baja presión en verano. Las precipitaciones se producen a partir del aire húmedo que es traslado por el viento, como el viento sopla de áreas de mayor presión, a áreas de menor presión este es llevado hasta las montañas donde se enfría y condensa.

3.4.4. Huracanes y ciclones tropicales

Según el Instituto Meteorológico Nacional (s.f), los ciclones tropicales son grandes sistemas organizados de nubes y tormentas que giran alrededor de un sistema de baja presión. En el caso de los huracanes, este representa el más severo de los fenómenos meteorológicos que pueden catalogarse como ciclones tropicales.

Estos fenómenos se desarrollan en las latitudes tropicales y subtropicales entre los paralelos del Trópico de Cáncer y Trópico de Capricornio, que conforman la franja conocida como "Zona Tropical". El movimiento que tanto los huracanes como los ciclones tropicales desarrollan dependen del hemisferio en que se encuentran; en el caso del hemisferio norte, estos presentan una rotación antihoraria en contra de las manecillas del reloj, mientras que por el contrario, en el hemisferio sur la rotación que desarrollan es en el sentido horario.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1999), estableció que los ciclones tropicales pueden clasificarse de la siguiente manera en función de la velocidad de los vientos máximos sostenidos.

- Depresión Tropical: Cuando la velocidad de los vientos máximos sostenidos es inferior a 63 km/h.
- Tormenta Tropical: Cuando la velocidad de los vientos máximos sostenidos es superior a 63 km/h, y suelen atribuírseles nombres.
- Huracán – Tifón – Ciclón: Cuando la velocidad de los vientos máximos sostenidos es superior a los 116 km/h.

A continuación, se muestran las trayectorias generales que presentan estos fenómenos a lo largo del globo.

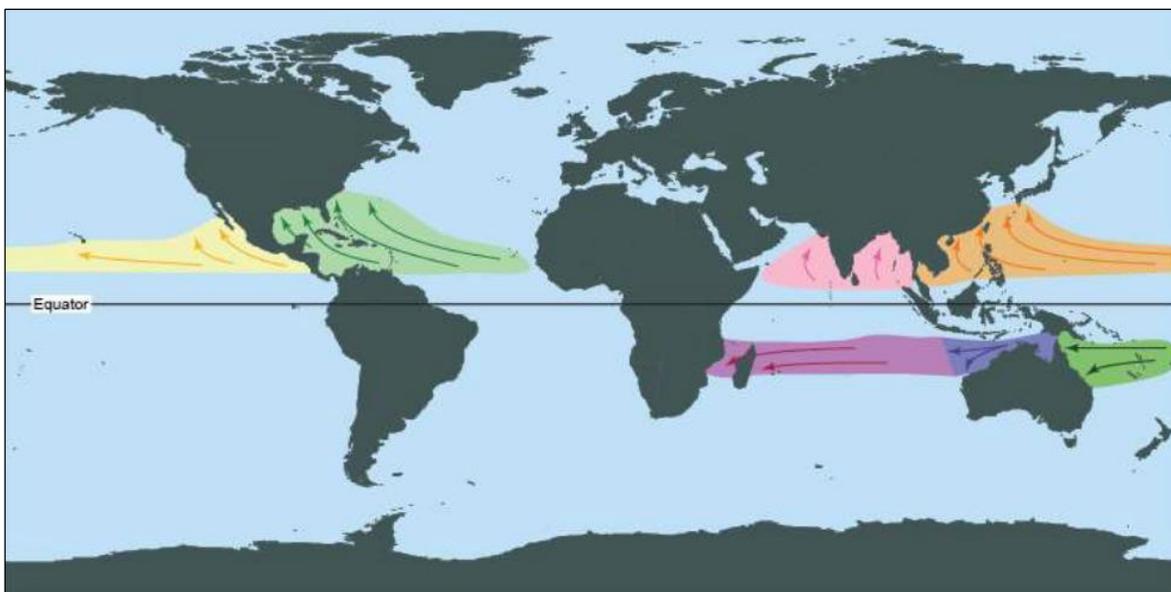


Figura 6. Trayectorias de los ciclones tropicales en el mundo

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), s.f

De manera similar, la OMM (s.f) menciona que el fenómeno conocido como "Huracán", puede tener diferentes denominaciones según el lugar de origen del fenómeno, por lo tanto, en el mar Caribe, Golfo de México, el Océano Atlántico Norte y el Océano Pacífico oriental y central, el fenómeno se conoce como huracán. En el Pacífico Norte se le denomina "tifón", por otro lado, en la Bahía de Bengala y el Mar Árabe, se le denomina "ciclón". El término "ciclón" también es usado en el suroeste del Pacífico y sureste del océano Índico, donde le llaman "ciclón tropical severo", mientras que en el suroeste del Océano Índico se conoce como "ciclón tropical" únicamente.

La categoría de los huracanes suele estar asociada también la velocidad de los vientos, donde se encuentra clasificada a partir de la escala de Saffir/Simpson.

Cuadro 3. Escala de Saffir – Simpson para categorizar huracanes

Categoría	Rango de velocidad de los vientos (km/h)
1	119 - 153
2	154 - 177
3	178 - 209
4	210 - 250
5	Mayores a 250

Elaborado por: Alfaro, 2020.

Fuente: IMN, s.f

Es importante mencionar que dicha clasificación por categorías no está asociada directamente a los daños o destrucción que puede ocasionar el fenómeno, ya que la afectación se ve influenciada por una serie de factores bien diversos, como los fenómenos atmosféricos que interactúan con los huracanes, la región afectada (factores meramente antrópicos), y la velocidad con que se mueve.

En cuanto a las afectaciones que presentan los huracanes en nuestro país, este tipo de fenómenos se forman en la Cuenca del Atlántico, en particular en el Mar Caribe, y suelen afectar directamente la vertiente del Pacífico, principalmente en las provincias de Guanacaste, Puntarenas y San José. Suelen ocurrir entre el 1 de junio y el 30 de noviembre.

Según Alfaro (2002), por su frecuencia, su intensidad y su trayectoria típica, los ciclones del Mar Caribe son los que más afectan al Istmo Centroamericano. Por otra parte, los ciclones tropicales originados en el Océano Pacífico alcanzan la intensidad de tormenta tropical o huracán a una distancia considerable de Centroamérica y sus trayectorias típicas hacia el oeste hacen muy poco probable que toquen tierra en la región. Sin embargo, existen ciclones tropicales en el Mar Caribe que han logrado atravesar el Istmo Centroamericano causando fuertes precipitaciones en la vertiente del Pacífico.

La ocurrencia de que este tipo de fenómenos atraviesen el istmo, ha sido estudiada por autores como Banichevich y Lizano (1998), que encontraron que al darse la transición de El Niño Oscilación del Sur (conocido como ENOS) – cálido a ENOS – frío, la probabilidad de que se presenten este tipo de interconexiones entre el Atlántico occidental y el Pacífico oriental, suele aumentar, principalmente a través del paso de Nicaragua, del Caribe al Pacífico). Además, también se ha encontrado una notable disminución en la frecuencia de

huracanes en el Caribe durante las fases cálidas del ENOS y un aumento durante las fases frías.

Costa Rica por fortuna se encuentra hasta cierto punto en una zona favorecida desde el punto de vista probabilístico, de sufrir los efectos directos de un huracán. De hecho, Alfaro (2002) menciona que: "Un análisis estadístico de la frecuencia espacial de ciclones tropicales pone en manifiesto que El Salvador, Costa Rica y Panamá se encuentran en una posición geográfica privilegiada, lejos de la ruta de estos fenómenos; de hecho, la probabilidad de impacto directo es menor o igual al 5%.". En el documento se habla que las probabilidades más altas de este tipo de riesgo las posee Nicaragua y Honduras con un 36 – 40% de probabilidad, sin embargo, el 24 de noviembre del 2016, la pequeña probabilidad de ocurrencia se presentó con la llegada del huracán Otto que atravesó la zona norte de nuestro país, provocando impactos directos sobre el territorio nacional.

3.4.5. Fenómeno del ENOS

Las siglas del ENOS corresponden a "El Niño Oscilación del Sur" y es uno de los fenómenos meteorológicos que tienen mayor impacto en nuestro país, así como los países circundantes al Pacífico Central. Es un fenómeno cíclico, pero aperiódico que surge del acople de anomalías en el océano y la atmósfera, y consiste en la interacción del enfriamiento o el calentamiento (más allá de los niveles normales) de las aguas del océano Pacífico tropical con la atmósfera circundante. (IMN, s.f).

Es caracterizado actualmente por dos fases bien estudiadas, la fase cálida del ENOS correspondiente al "Fenómeno del Niño" en donde se da un calentamiento por encima de los niveles normales en el océano, y la fase fría denominada "Fenómeno de la Niña", donde se manifiesta un enfriamiento atípico de las aguas. Ambos fenómenos son cíclicos, sin embargo, no mantienen una periodicidad fija debido a la complejidad de la interacción Océano – Atmósfera. En cuanto a la duración e intensidad con que dichos fenómenos se presentan, es muy variable entre ciclos, en promedio duran 17 meses siendo la Niña la que suele tener mayor duración, presentan un rango de variación de los ciclos muy grande, que va desde los 6 meses hasta 48 meses (4 años).

La recurrencia entre eventos ha cambiado mucho con los años, se habla que hace unos 60 años se registraban 4 años entre un evento y otro, por lo que ocurrían 4 eventos por década, sin embargo, en los últimos 20 años ese tiempo se ha disminuido a la mitad, aumentando la frecuencia a 7 por década. También, es importante mencionar que la intensidad de ambos eventos ha ido en aumento en los últimos 30 años, en donde la magnitud máxima de un evento Niño (3.1 según un índice acoplado) ocurrió en 1983, mientras que la Niña tuvo su máximo en el 2011 con una magnitud de 2.0 (IMN, s.f).

Afectación directa del fenómeno ENOS

Es importante mencionar que la incidencia que presentan ambos fenómenos del Niño o la Niña en el país son inversos y tienen fuertes variaciones en el espacio y tiempo en que se desarrollan. Debido a la gran variación y comportamiento entre fenómenos se abordarán de manera separada.

- ***El Niño: Fase Cálida del ENOS***

El Niño está asociado al calentamiento anormal de las aguas en el Océano Pacífico Tropical, y este fenómeno influye directamente en el clima de diversas partes del mundo cuando alcanza intensidades importantes. A continuación, se muestran algunas de las implicaciones de este fenómeno, según el Instituto Meteorológico Nacional.

- La precipitación se desplaza hacia el centro del océano. Normalmente se producen en Indonesia dejando el occidente del Océano Pacífico seco.
- El viento sobre el ecuador es débil o circula del oeste hacia el este, cuando lo normal es que circule del este al oeste.
- Las temperaturas superficiales del mar son anómalamente altas sobre una extensa zona del océano.
- La termoclina se profundiza en el sector oriental del Océano Pacífico.

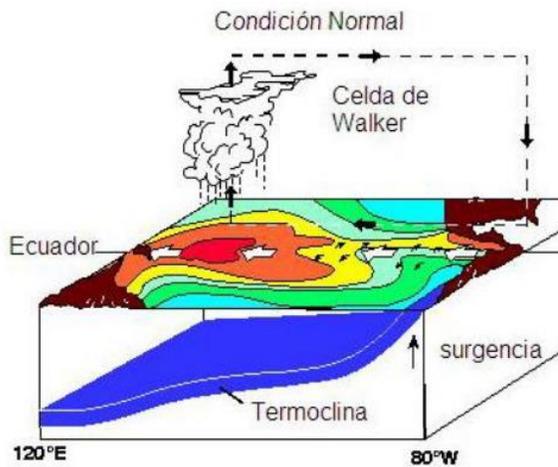


Figura 7. Condiciones normales sobre el Océano Pacífico en comparación con el fenómeno del Niño

Fuente: IMN, s.f

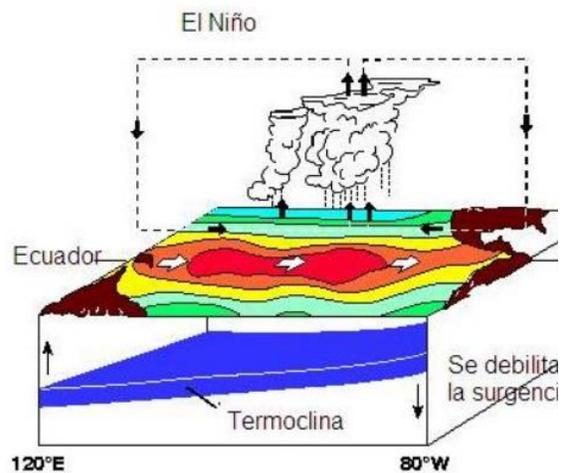


Figura 8. Cambio en las condiciones debido al fenómeno ENOS en la fase positiva (El Niño)

Fuente: IMN, s.f

Una de las afectaciones más importantes que genera el fenómeno del Niño son los cambios sobre la temporada de huracanes. En la Cuenca del Atlántico se da una disminución en la cantidad de huracanes en comparación con las condiciones normales, o cuando se encuentra la región bajo la influencia del fenómeno de la Niña. En particular, se presenta una disminución en el Golfo de México, Mar Caribe y el Océano Atlántico, sin embargo los que se logran formar tienen a hacerlo en el norte del Mar Caribe. Por otro lado, el fenómeno logra intensificar la temporada de huracanes en el Pacífico Oriental, particularmente, frente a las costas mexicanas.

A continuación, se muestra una representación gráfica de la variabilidad de la temporada de huracanes en la región, en donde el sector en amarillo corresponde al aumento de huracanes en el Pacífico, el sector celeste la disminución de los huracanes en la región Atlántica, y por último el sector rojizo indicando que las condiciones en la región central son calientes y húmedas.

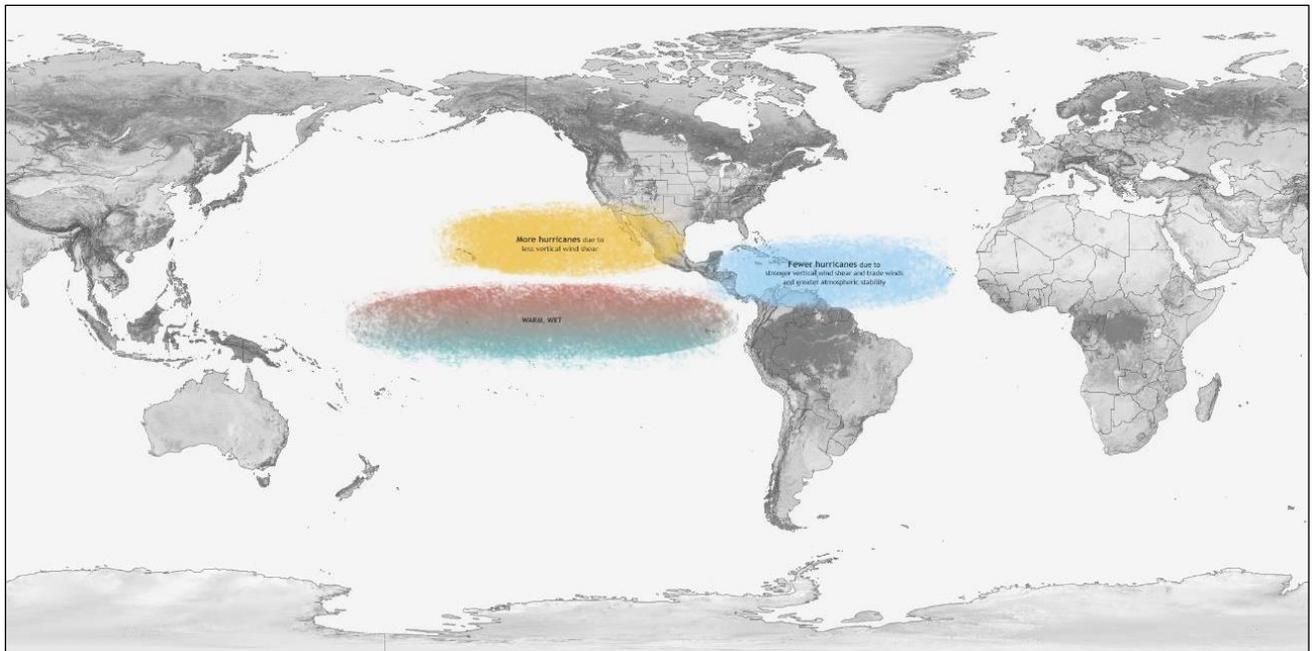


Figura 9. Afectación de la temporada de huracanes por el Fenómeno del Niño

Fuente: IMN, s.f

Un efecto importante del fenómeno del Niño es sobre la turbidez del agua en el océano. El aumento de la precipitación relacionada con El Niño aumenta la turbidez del agua disminuyendo su salinidad, influyendo negativamente en el proceso de fotosíntesis marina, y por ende en las poblaciones de las diferentes especies que dependen este proceso (IMN, s.f). Un factor muy importante y que se busca tener evidencia con la presente investigación es la afectación que dichas precipitaciones tienen sobre los cauces de los diferentes ríos, ya que bien se sabe que las lluvias torrenciales producen aumentos significativos en la cantidad de materia sólida (sedimentos) que descargan los ríos en el mar.

En la figura a continuación, se presenta un mapa en donde se muestran las repercusiones de la distribución de precipitaciones ante la presencia del fenómeno del Niño.



Figura 10. Distribución de las precipitaciones en la región ante la influencia del Niño

Fuente: IMN, s.f

Como se puede observar, en el caso de Costa Rica que es la región de estudio que interesa en la presente investigación, El Niño ocasiona un déficit de lluvias en la Vertiente del Pacífico, acompañado de aumento de temperatura. Caso inverso que se observa en la Vertiente del Atlántico donde se tienen precipitaciones excesivas y se generan problemas de grandes inundaciones, especialmente en Limón a mediados de año, mientras que Guanacaste experimenta sequías severas.

- **La Niña: Fase fría del ENOS**

La Niña como se ha mencionado anteriormente, es el enfriamiento anormal del Océano Pacífico Tropical. El fenómeno suele impactar en las condiciones del tiempo en distintas partes del mundo, y por lo general de manera opuesta al fenómeno del Niño. La presencia de La Niña tiene una variedad de consecuencias ya estudiadas, entre estas se mencionan las siguientes:

- Las precipitaciones acumulan cantidades por encima de lo normal sobre Indonesia y Centroamérica en general.
- Sobre el Ecuador, el viento es moderado y circula de este a oeste.
- Las temperaturas superficiales del mar son anómalamente bajas (más frías de lo normal sobre una extensa zona del océano, particularmente sobre el centro y oriente del ecuador).
- La termoclina se encuentra más superficial en el sector oriental de Océano Pacífico y mucho más profunda en el occidente cerca de Australia.

A continuación, se presenta un esquema gráfico de la alteración que genera el fenómeno de La Niña en las condiciones normales sobre el Océano Pacífico.

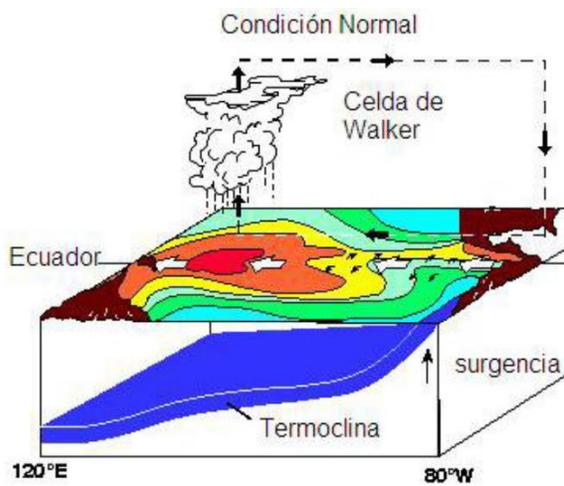


Figura 11. Condiciones normales sobre el Océano Pacífico en comparación con el fenómeno de La Niña
Fuente: IMN, s.f

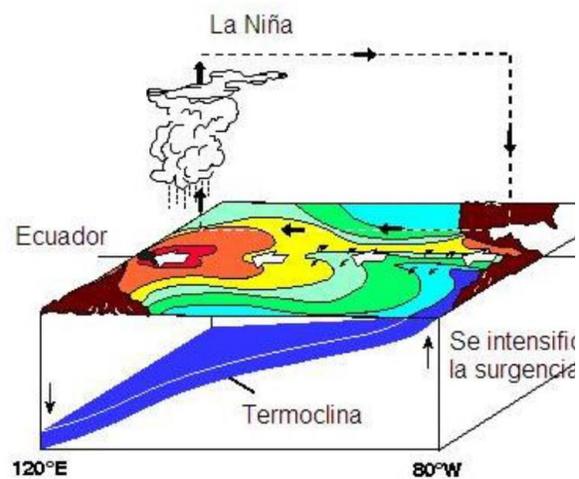


Figura 12. Cambio en las condiciones debido al fenómeno ENOS en la fase negativa (La Niña)
Fuente: IMN, s.f

De manera similar al fenómeno del Niño, La Niña tiene una incidencia directa sobre la temporada de huracanes tanto en el Océano Pacífico, como el Atlántico, sin embargo, presenta un efecto completamente inverso al Niño. En cuanto a la Cuenca del Atlántico, las temporadas de huracanes tienden a ser más activas que lo normal. Lo anterior concierne al Golfo de México, Mar Caribe y Océano Pacífico principalmente. Por otro lado, La Niña suprime la actividad de los huracanes en las cuencas del Pacífico central y oriental (IMN, s.f).

A continuación, se muestra la representación gráfica de los efectos de La Niña en ambas cuencas. Igual que en el caso del Niño, el color amarillo indica la zona de mayor incidencia de huracanes debido al fenómeno, y la celeste es la zona en que disminuye la probabilidad de formación de los mismos. En cuanto al tercer óvalo en el mapa, indica las condiciones del Océano Pacífico en dicha región, donde se muestra un ambiente más frío y seco.

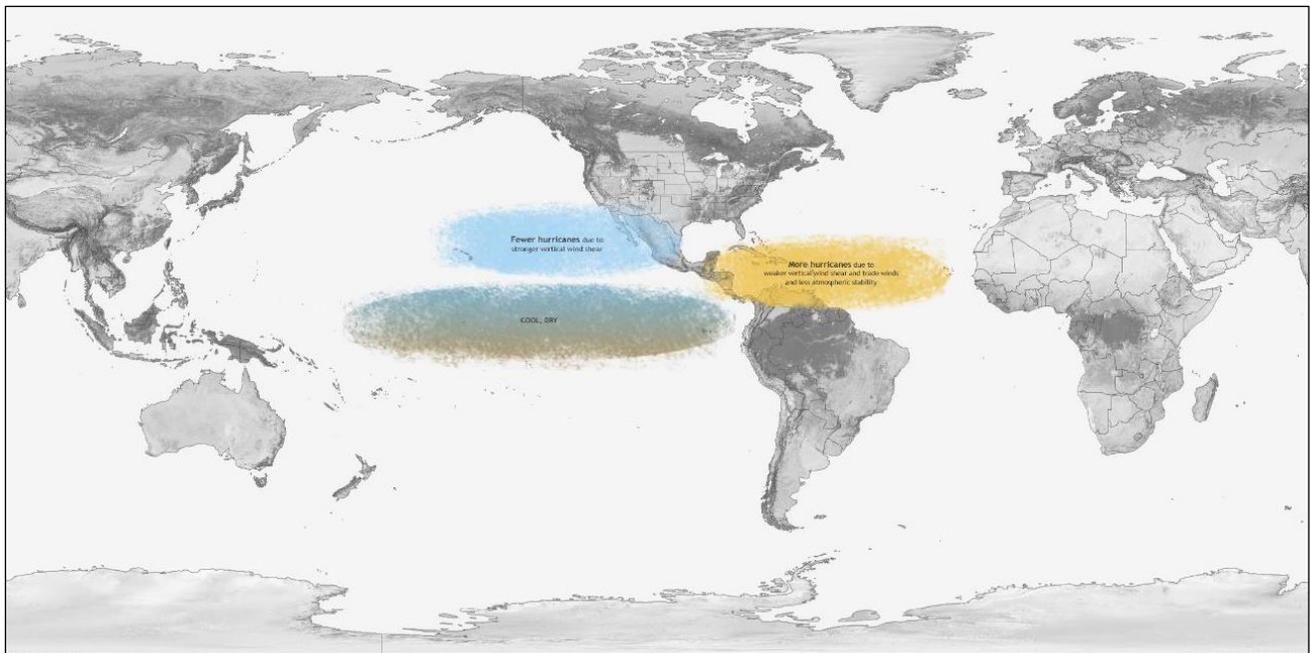


Figura 13. Afectación de la temporada de huracanes por el Fenómeno de La Niña

Fuente: IMN, s.f

El fenómeno de La Niña tiene una afectación importante en el patrón normal de distribución de lluvias. En cuanto al océano, este presenta características particulares como una intensificación de los vientos alisios, así como temperaturas más bajas de lo normal en el mar. En nuestro país en particular las consecuencias registradas por el fenómeno de La

Niña, varían según la época y espacio. En general ante un fenómeno de la Niña se observa un aumento bastante notorio de precipitaciones, en la Vertiente del Pacífico, de manera similar con la intensidad de las mismas. Por otro lado, se registran déficit de lluvias en la Vertiente del Caribe y la Zona Norte del país. En el caso del Pacífico, una de las particularidades antes el fenómeno, es la ocurrencia de temporales, especialmente en setiembre y octubre, así como una intensificación como ya fue mencionado anteriormente, en la temporada de huracanes en el Atlántico.

A continuación, se presenta el pronóstico climático del año 2007 del Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, un año que fue azotado por el fenómeno de La Niña posterior a un periodo del fenómeno del Niño, en donde se observa de manera visual y muy clara los efectos del fenómeno sobre el país.



Figura 14. Anomalías anuales de precipitación (respecto al promedio) en las distintas regiones del país debido al fenómeno de La Niña

Fuente: IMN, 2007

3.5. Aforos de caudal

Un aforo de agua es la aplicación de métodos de medición de caudal de agua en donde se mide parámetros como la velocidad con que transita el agua. En esta labor mide la profundidad del fondo del cauce, con equipo de nivelación topográfica, con el fin de estratificar el cauce en diferentes secciones en donde se toman medidas de la velocidad del flujo a diferentes alturas, por lo que se obtiene un perfil del río en dicha sección. Por lo tanto, finalizado el aforamiento de un río se obtienen parámetros como velocidad media, caudal, ancho y profundidades del río, y por ende la sección transversal del mismo.

3.6. Flujo de Lodos

Los flujos de lodo son eventos que se suelen presentar en periodos de grandes lluvias, como huracanes, temporales, tormentas tropicales, entre otros. Este tipo de evento es una derivación de otro tipo de peligro; los deslizamientos se generan producto de la sobresaturación del suelo por las intensas lluvias por al menos cinco días, este tipo de evento provoca la caída de material en la dirección en que la pendiente presente. Los deslizamientos muchas veces pueden presentarse por problemas de desestabilización, por lo que suelen presentarse en caminos de carreteras que atraviesan las montañas, el agua es el catalizador que, al saturar el suelo, llega a presentar la inminente falla que deriva en la caída de material y que genera grandes peligros.

Los flujos de lodos suelen generarse cuando el desprendimiento de material en las laderas de las montañas o volcanes, termina en un cuerpo con flujo de agua. Suelen transportar materiales como arena, arcillas con contenido de bloques de roca, e inclusive troncos y material que fue arrasado durante el evento, finalmente la mezcla se vuelve sumamente peligrosa al convertirse en un flujo viscoso que transporta mayores volúmenes de material y líquido que en condiciones normales.

La Red Sismológica Nacional (2009), define los flujos de lodo de la siguiente manera: "Un flujo de lodo o avalancha de lodo, es un flujo viscoso con un fluido como medio de transporte (agua por ejemplo), con una elevada concentración de material detríticos (fragmentos) como coloides, arenas, rocas y materia orgánica incluida. Estas avalanchas se mueven hacia los valles por gravedad, se requiere de una zona de aporte, un canal o canales colectores y

una zona de depositación. Dado que se mueven por gravedad, un cambio de pendiente más suave, implica una disminución de la energía cinética, por tanto, ocurre sedimentación, estos flujos de lodo pueden ocurrir en oleadas en dependencia de la frecuencia en que ocurre la obstrucción del canal principal.”

Capítulo 4. Procesamiento de Datos

4.1. Revisión de las secciones de ICE

Para la elaboración de los gráficos de las secciones transversales que facilitó el ICE se ha utilizado el software R Studio para su representación, así como revisión de la información brindada. Para esto se elaboró un código de programación de manera que este grafique cada una de las secciones transversales por año, para cada una de las estaciones.

Una vez que se sobreponen las secciones, es posible analizar y determinar el comportamiento que ha presentado el río a lo largo del tiempo. Para el presente estudio se plantea analizar 14 estaciones, las cuales en primera instancia se plantea determinar coherencia entre todas las secciones. Este proceso se realiza debido a que en varias secciones se presentan inconvenientes, por ejemplo, el traslado de la estación, algunas estaciones pueden haber sido trasladadas ya sea aguas arriba como aguas abajo y por ende la sección transversal ya no es la misma. Estos casos deben de analizarse de manera independiente y estudiar el comportamiento en ambas que debería de ser bastante similar.

Por otro lado, también pueden ocurrir errores humanos en el momento de la digitación de los datos, esto se puede ver reflejado en los gráficos con cambios abruptos en la superficie del canal del río, reflejados muchas veces en "picos" a lo largo de la sección transversal. También, otro error común suele ser que las secciones no se encuentran en la misma escala, por lo tanto, se encuentran desfasadas entre sí y es necesario realizar una corrección ya sea en el eje de las ordenadas o en el eje de las abscisas.

Estas consideraciones aún no han sido tomadas en cuenta en las secciones graficadas mostradas más adelante, sin embargo, es parte del proceso de elaboración del estudio y se debe realizar en conjunto con los profesionales del ICE para lograr la mejor representación de los datos.

En el cuadro a continuación, se muestra información básica de las estaciones que se van a utilizar para desarrollar en el presente trabajo.

Cuadro 4. Características de las estaciones hidrológicas a analizar

Código	Nombre	Número de aforos	Número de verticales	Periodo	Elevación (msnm)
02-02	Pandora	94	1773	May 2010 – Jun 2018	41
06-03	Playa Hermosa	43	819	Jun 2011 – Oct 2014	140
09-22	Tapantí Arriba	151	2620	Jun 2010 – Mar 2020	1544
09-39	Hamburgo	49	999	May 2008 – Abr 2011	38
12-04	Veracruz	128	2238	May 2010 – Mar 2020	120
14-05	Peñas Blancas	153	2657	Jun 2010 – Mar 2020	76
16-02	Guatuso	245	4492	Abr 2008 – Mar 2020	65
20-14	Paso Hondo	86	1477	Jun 2010 – Mar 2020	10
24-24	Nuestro Amo	135	2494	Ago 2009 – Feb 2020	556
24-27	Santo Domingo	87	1433	May 2010 – May 2019	1070
24-29	Echeverría	83	1180	May 2010 – May 2020	950
31-03	El brujo	100	1864	Jun 2010 – May 2019	171
31-04	Remolino	117	2295	May 2010 – Feb 2020	429
31-09	La Cuesta	166	3105	May 2010 – Feb 2020	509
	Totales	1637	29446		

Fuente: ICE, 2020

4.2. Representación de las secciones graficadas

4.2.1. Ilustración de la información brindada por el Instituto Costarricense de Electricidad

Para estudiar el comportamiento de cambio del cauce a lo largo del tiempo se procedió a graficar las secciones transversales correspondientes a los periodos completos con que el Instituto Costarricense de Electricidad cuenta a su disponibilidad. Estos gráficos cuentan con una gran variedad de secciones, en donde algunos superan periodos de más de 10 años de recopilación de información, mientras que otros cuentan únicamente con 3 años a disposición.

En primera instancia, se ejecutaron los gráficos correspondientes al periodo completo disponible de cada una de las estaciones, con el fin de determinar si existe algún tipo de comportamiento fácilmente perceptible y obtener información útil para analizar las secciones con mayor detalle posteriormente.

A continuación, se presentan los gráficos obtenidos de las estaciones con comportamientos más representativos como se detalla adelante.

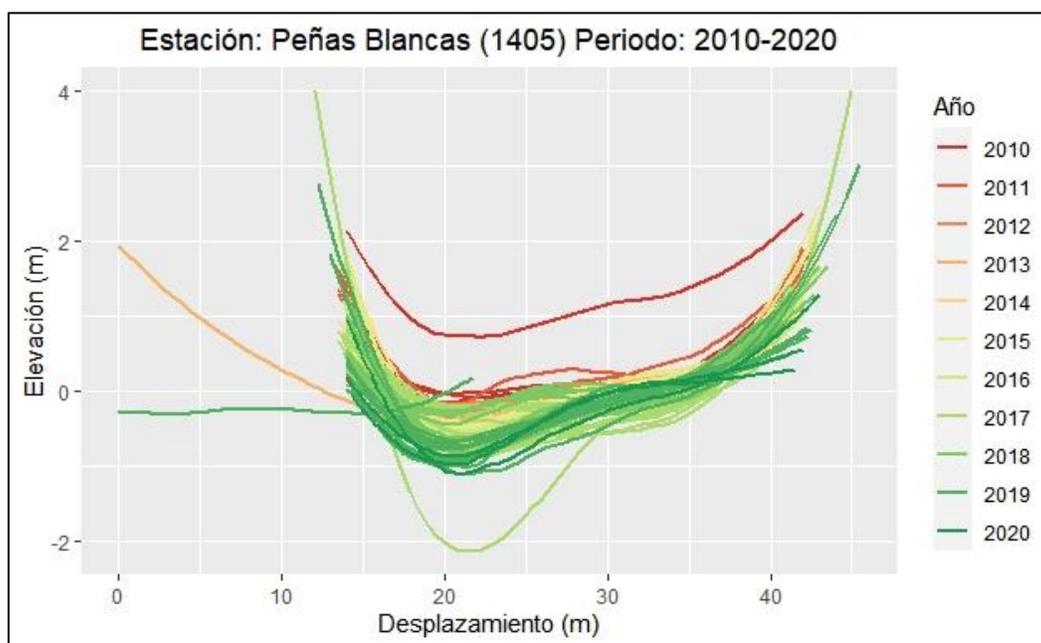


Figura 15. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 14-05 en todo el periodo de análisis.

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

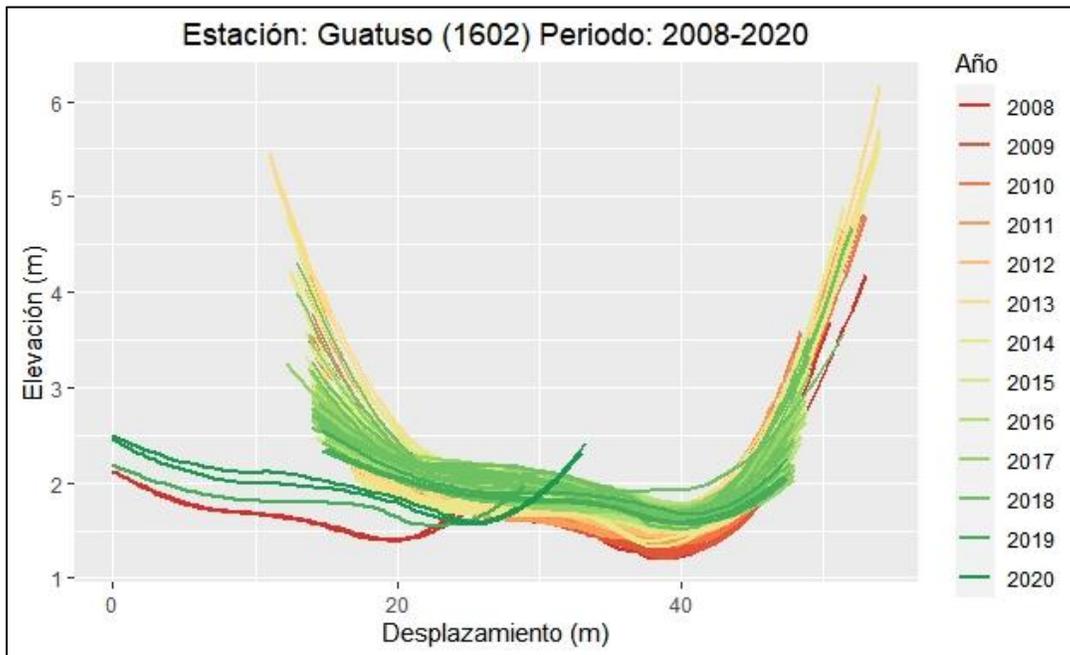


Figura 16. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 16-02 en todo el periodo de análisis.

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

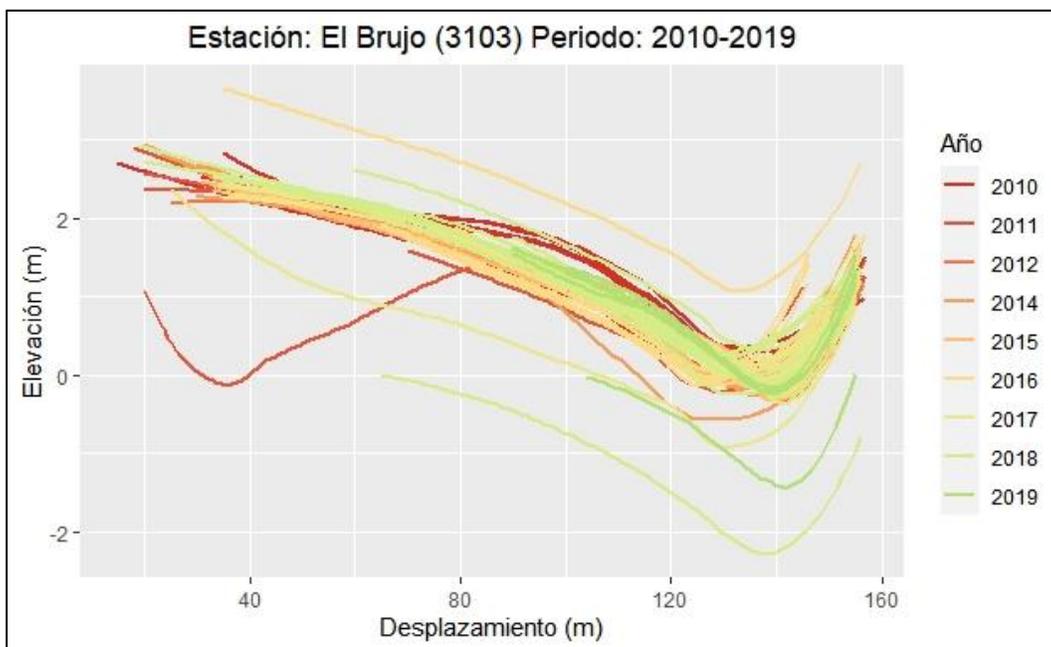


Figura 17. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 31-03 en todo el periodo de análisis.

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Como se mencionó anteriormente los gráficos anteriores cuentan con todos los años de información disponible para las estaciones solicitadas en un espectro de colores para cada uno de los años. El propósito de ilustrar esta enorme cantidad de información consistió en estudiar si existían comportamientos fácilmente identificables e invariables en primera instancia, es decir en caso de observar un cambio erosivo en un cauce observar si dicho proceso morfológico procedía en los años siguientes, o por el contrario la continuidad mermaba y ocurría el proceso morfológico contrario. De igual manera se procede a analizar si se observaba sedimentación en el cauce o inclusive cambios significativos en las márgenes del río.

Al analizar los gráficos se observó que la tarea de identificación de las curvas se vuelve muy compleja debido a la gran saturación de secciones y además por la gran variación de comportamientos con los años, es decir se presentan muy pocos escenarios en que la continuidad de un proceso erosivo o sedimentario no se ve interrumpida por el proceso opuesto poco después lo que genera que tiendan a haber curvas que no se llegan a apreciar visualmente al encontrarse parcialmente cubiertas por otros años. Es por esto, que se llega a proponer un análisis en donde se reduce la escala temporal para periodos determinados, específicamente entre meses o pares de años.

La gran variabilidad en el tiempo que presentan los gráficos anteriores permite plantearse ciertas hipótesis, ya que las secciones aparentan volver naturalmente a las condiciones similares a las que mantenían antes de ser sometidas a un cambio. Este proceso de reversión puede ser estudiado analizando eventos importantes que puedan haber inducido cambios significativos en la geometría de una sección, de manera se debe analizar las secciones antes y posterior al evento, y determinar cuánto se demora el cauce en transformar su geometría a condiciones similares a las de antes de ser sometidas al cambio.

4.2.2. Principales problemas presentados al interpretar la información

A la hora de trabajar con información es posible encontrarse con distintos problemas a lo largo de la evaluación de los resultados y pueden tener diversos orígenes. Los errores detectados en el presente trabajo fueron descubiertos al hacer comparaciones entre las curvas semejantes en un periodo de tiempo. En caso de encontrarse discrepancias bastante pronunciadas en un periodo de tiempo relativamente muy corto, se procede a investigar si dicho cambio puede haber sido inducido por algún fenómeno importante, y que incluso pueda requerir atención en el presente documento.

Para hacer la respectiva valoración de los posibles errores, se procede a buscar la fecha exacta en que ocurren las diferencias abruptas en los registros del Instituto Meteorológico Nacional, específicamente en los boletines meteorológicos. En caso de encontrar uno o varios fenómenos en el periodo que se investigan dichas diferencias, dichos fenómenos se plantean como objeto de estudio del presente trabajo con el fin de evaluar su impacto en diferentes estaciones.

Por otro lado, es importante mencionar que no siempre se logra detectar eventos importantes en las fechas valoradas. En estos casos se procede a interpretar la razón de las anomalías, en donde la mayor parte de estas son inducidas por error humano. Este tipo de errores pueden ocurrir en el momento del aforo, así como a la hora de digitalizar la información en un ordenador.

Por lo general, los errores más comunes y apreciables son los errores de digitalización de la información en un ordenador. Estos suelen ser bastante perceptibles al encontrarse discrepancias entre la escala vertical o la escala horizontal de las curvas. Se presentan como desplazamientos hacia la derecha o izquierda de la posición regular de las curvas en caso que el problema sea la escala horizontal; dos ejemplos de este tipo de problema se muestran ilustrados en las estaciones de Peñas Blancas y Guatuso, en el caso de Peñas Blancas (Figura 15) únicamente se observa una curva en el 2019 (color verde) desplazada hacia el sector izquierdo, también se observa una curva en el 2013 (color anaranjado) que difiere del resto; en el caso de la estación 1602 (Guatuso) en la Figura 16 se observan 4 curvas distintas con este mismo problema desplazadas a la izquierda y en diferentes años (2008 y 2020).

En cuanto a los errores por escala vertical, estos errores son más difíciles de discernir ya que en el caso de las discrepancias por escala horizontal, estos son menos comunes y suelen presentarse en cauces con gran dinamismo, por lo general en ríos muy caudalosos en donde la dispersión de la energía es necesaria y se encuentran en constante cambio, es por esto que son menos comunes de apreciar. Los errores por escala vertical se deben de estudiar con mayor detalle puesto que pueden llegar a confundirse con el producto de periodos erosivos o de sedimentación importantes. Es parte de la naturaleza de los ríos, en periodos con fenómenos meteorológicos importantes, tender a aumentar el caudal debido a la carga de agua inducida por estos fenómenos. Durante estos periodos de tiempo, las altas velocidades del flujo tienden a causar procesos erosivos que dependen de las características propias del río, por lo que puede presentarse en las márgenes y en el fondo. Los procesos erosivos de fondo de grandes magnitudes son los que suelen confundirse con errores en la vertical, por lo que se debe discernir si corresponden con algún evento meteorológico importante, aunque algunas veces pueden ser inducidos por factores antrópicos como por ejemplo la construcción de alguna estructura hidráulica ya sea aguas arriba como aguas abajo. En este tipo de eventos cabe destacar que la erosión causada por las fuertes corrientes provocan el desprendimiento de sedimentos, por lo que estos van a tender a depositarse aguas abajo en el curso bajo donde hay menos energía y los sedimentos pueden depositarse por la acción de la gravedad, estos cambios también pueden generar confusión en la escala vertical representándose como curvas desplazadas hacia arriba.

También pueden presentarse errores en el orden en que se pueden mostrar representados los datos, en donde se llegan apreciar secciones transversales que se encuentran invertidas respecto al eje de las ordenadas. Un ejemplo de esto se muestra ilustrado en la Figura 17 en la estación El Brujo (31-03) donde se observa la curva del año 2012 (color anaranjado), cuyo comportamiento destaca del resto al ser completamente diferente. Es fácilmente identificable que, con invertir la curva con respecto a las ordenadas, esta mostraría una concordancia con el resto de las secciones de la estación.

A continuación, se presenta un resumen descriptivo sobre las estaciones con menos dificultades para analizar, es decir las que presentaron mejores comportamientos y menor cantidad de errores observados. Es importante mencionar que los gráficos utilizados para

describir las estaciones del presente cuadro se encuentran en la sección de anexos al final del documento.

Cuadro 5. Descripción de las estaciones con las secciones con menos problemas

Nombre	Código	Comentario
<i>Pandora</i>	02-02	A primera vista, la estación se muestra muy estable en cuanto a la forma que mantiene la sección. Mantiene una geometría de dos fosas y muestra una tendencia a sedimentarse del lado derecho del cauce.
<i>Playa Hermosa</i>	06-03	A pesar de contar únicamente con 4 años de información, se observa que las secciones varían considerablemente entre periodos ya que inicialmente presenta una morfología predominante de una cresta, y posteriormente entre el 2013 – 2014, esta cambia a dos fosas.
<i>Hamburgo</i>	09-39	La presente estación cuenta con pocos datos, al igual que Playa Hermosa. Presenta un comportamiento irregular en el periodo de 4 años, presentando tanto procesos aluviales erosivos, como sedimentarios.
<i>Veracruz</i>	12-04	Veracruz presenta una morfología muy estable en los 11 años de análisis. Se mantiene bajo una alternancia entre periodos erosivos y de sedimentación, sin embargo, presenta una curva que destaca en el año 2014, que debe revisarse y estudiar lo acontecido en el año.
<i>Paso Hondo</i>	20-14	Las secciones en esta sección muestran un comportamiento intercalado entre procesos erosivos y sedimentarios, sin embargo, no sufre deformaciones importantes, manteniendo una morfología muy parecida con los años.
<i>Nuestro Amo</i>	24-24	La estación muestra un comportamiento muy diverso en los primeros años, erosionándose y volviéndose a sedimentar. Sin embargo, a partir del año 2013 el cauce aparenta tener una tendencia hacia la erosión, bajando cada vez más las secciones transversales en la vertical.

Elaborado por: Alfaro, 2020

Cuadro 6. Descripción de las estaciones con las secciones con menos problemas (continuación)

Nombre	Código	Comentario
<i>Santo Domingo</i>	24-27	Las secciones transversales en Santo Domingo mantienen una forma similar a lo largo de los años, con alternancias entre los procesos aluviales con el paso de los años. Sí cuenta con algunas fechas que deben de revisarse, ya que muestran cambios en la escala vertical importantes, en particular a partir del año 2017. En cuanto al cambio más destacable, en el 2019 aparenta existir una fuerte sedimentación, por lo que también conviene corroborar la posición geográfica de la estación, ya que se esperaría que se encuentre cerca de los tramos más bajos del recorrido.
<i>Echeverría</i>	24-29	Echeverría es una de las estaciones que presentan secciones con las morfologías más variantes. Es posible observar que existen secciones del mismo color con diferentes formas, intercambiando entre morfologías de una fosa, a tender por dos fosas en otros meses. Una hipótesis que por desgracia se sale del estudio del presente trabajo, está relacionada con el tipo de material por el que están compuestas las orillas y el fondo, siendo un material poco cohesivo, que facilita la acción de los procesos aluviales, moldeando fácilmente las secciones.
<i>Remolino</i>	31-04	En los primeros años de información que se posee, aparenta haber sido testigo de un fenómeno erosivo. Posteriormente ha tendido una tendencia a subir en la escala vertical sedimentándose con los años, y manteniendo una forma relativamente similar en todos los años, sin embargo, sí es posible observar transiciones entre procesos erosivos y sedimentables entre los años.

Elaborado por: Alfaro, 2020

En cuanto a las secciones que presentan discrepancias o problemas de algún tipo, en el cuadro a continuación, se presenta una descripción acerca de las mismas, en donde se mencionan los problemas que estas presentan, y de qué manera abordar y corroborar la veracidad de algunos de los datos con incertidumbre. Es importante recalcar que dos de los

gráficos utilizados para comentar el presente cuadro, se presentan en la sección de anexos del presente documento, específicamente las estaciones 09-22 y 31-09.

Cuadro 7. Estaciones con mayores errores/problemas observados

Nombre	Código	Comentario
<i>Tapantí Arriba</i>	09-22	Las secciones aparentan presentar una geometría bastante constante de una única fosa a lo largo de todo su ancho, así como en el tiempo. Sin embargo, presenta cambios erosivos con los años profundizándose al acercarse a los datos más nuevos, predominando principalmente la erosión en el cauce. También presenta curvas que presentan discrepancias en la margen izquierda, por lo que es conveniente revisar el periodo en que se presentan estas diferencias.
<i>Peñas Blancas</i>	14-05	La sección en realidad presenta en su mayoría, una morfología muy constante con pocas diferencias, sin embargo, presenta algunos problemas. En primera instancia se presenta una sección transversal en los primeros años del periodo muy por encima de las demás que requiere de investigación. En el 2017, también se observa una sección que requiere de indagación en el periodo exacto, ya que sí altera considerablemente la morfología de la sección profundizándose bastante el cauce. Finalmente, en el año 2019, hay una sección que sufrió un desplazamiento hacia la izquierda.
<i>Guatuso</i>	16-02	Las secciones transversales en Guatuso presentan un comportamiento bastante noble y mantienen una morfología similar en todo el periodo, a excepción 4 secciones sufrieron un error en la escala horizontal hacia la izquierda.
<i>El Brujo</i>	31-03	La estación El Brujo presenta secciones muy variantes en la escala vertical que se deben de revisar con fenómenos meteorológicos importantes. Presenta una morfología con una única fosa y una gran extensión en la orilla izquierda. Aparenta ser un cauce ubicado cerca, o en un meandro, donde predominan fuerzas centrífugas, que lo moldean de dicha manera.
<i>La Cuesta</i>	31-09	La Cuesta es una estación que presenta un comportamiento bastante parejo a lo largo de todo el periodo de análisis. Presenta la misma morfología de una sola concavidad, con pequeños cambios debido a la erosión y sedimentación. El único problema que presenta es la existencia de una curva en el 2017 que se diferencia de las demás, inclusive con las del mismo año. Esta curva debe revisarse para determinar si coincide con algún fenómeno meteorológico importante.

Elaborado por: Alfaro, 2020

4.3. Disponibilidad de información

La disponibilidad de información para trabajar en el presente trabajo varía fuertemente de una estación a otra. Algunas de las estaciones cuentan únicamente con información en los primeros años del periodo de análisis a realizar, otras más bien presentan una carencia en el periodo inicial y cuentan un buen registro a partir del año 2010.

Para representar esta información de la forma más compacta posible, se procedió a realizar una matriz con las 14 estaciones, así como los eventos más importantes que se estudiarán con mayor detalle en el Capítulo 5.

Cuadro 8. Disponibilidad de información por estación y evento

Evento	Estaciones													
	02-02	06-03	09-22	09-39	12-04	14-05	16-02	20-14	24-24	24-27	24-29	31-03	31-04	31-09
Tormenta Tropical Alma	x	x	x	✓	x	x	✓	x	x	x	x	x	x	x
Terremoto de Cinchona	x	x	x	✓	x	x	✓	x	x	x	x	x	x	x
Tormenta Tropical Tomás	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Terremoto de Sámara	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	✓	✓
Huracán Otto	✓	x	✓	x	✓	✓	✓	x	x	x	x	✓	✓	✓
Tormenta Tropical Nate	x	x	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
x	Carece de información													
✓	Presenta información													

Elaborado por: Alfaro, 2021

En el cuadro anterior, es posible observar que realmente se cuenta con una diversidad importante de información. Hay estaciones como Guatuso (16-02) que presentan una abundancia de información a lo largo de todo el periodo de análisis, mientras que otras como Playa Hermosa (06-08), solamente son capaces de aportar datos para un evento en particular.

En el cuadro también es posible observar que las estaciones mejor documentadas son las que se encuentran en la Vertiente Norte, mientras caso contrario se presenta en la Vertiente

del Caribe con faltantes importantes. Por otra parte, como se puede observar, desafortunadamente solamente fue posible analizar 2 estaciones para los primeros dos eventos, ya que únicamente las estaciones de Hamburgo y Guatuso cuentan con el registro más antiguo de las 14 estaciones analizadas.

Finalmente, en contraste con los primeros dos eventos del cuadro anterior, cabe destacar el abundante registro que se cuenta para estudiar la Tormenta Tropical Tomás, así como la Tormenta Tropical Nate, los cuales cuentan con 13 y 11 estaciones con información disponible, respectivamente, lo cual permitió caracterizar de una mejor manera los resultados obtenidos en los cauces, por parte de estos fenómenos.

Capítulo 5. Eventos importantes ocurridos entre el 2008-2020

En el Capítulo 2, se hizo mención acerca de ciertas irregularidades que se presentan al momento de analizar un gráfico con distintas secciones transversales de diferentes años y meses. En el presente capítulo, se procedió a identificar los eventos hidrometeorológicos más relevantes ocurridos durante el periodo de análisis en el país, sin embargo también se quiere corroborar si es posible apreciar cambios significantes en los cauces debido a movimientos telúricos, de los cuales, de los 3 sismos más importantes ocurridos en territorio nacional en las últimas 3 décadas, 2 calzan en el periodo de análisis, correspondiendo al Terremoto de Cinchona en el año 2009 y el Terremoto de la Península de Nicoya en el 2012.

De manera similar, los eventos hidrometeorológicos más importantes seleccionados corresponden a una tormenta tropical originada en el Pacífico (Alma), 2 tormentas tropicales formadas en el Caribe (Tomás y Nate), así como un huracán de categoría 3, que tocó suelo nacional por primera vez desde que se tienen registros, con categoría 2, el Huracán Otto. Cada uno de estos fenómenos llegó a afectar el territorio nacional de distinta manera, de forma directa en las comunidades más damnificadas por medio de inundaciones, comunidades que quedaron aisladas por la destrucción de vías de comunicación y accesos, así como de forma indirecta con la caída de árboles, fallas en el tendido eléctrico en algunas comunidades, desabastecimiento de agua en ciertas localidades, en gran parte por daños o pérdidas en infraestructura.

A continuación, se procede a caracterizar los eventos mencionados anteriormente con un grado de detalle mayor, para esto se utiliza información de los boletines del ENOS del Instituto Meteorológico Nacional, así como información recopilada de la prensa.

5.1. Tormenta Tropical Alma (28 y 29 de mayo de 2008)

La Tormenta Tropical Alma presentó sus principales afectaciones en Costa Rica en la Vertiente del Pacífico, principalmente el Pacífico Central y el Pacífico Sur del país. La tormenta tropical llega a coincidir con la entrada de la estación lluviosa en el Valle Central, el Pacífico Norte y el Pacífico Central en el mes de mayo.

Dicha Tormenta intensificó las lluvias, de manera que se tuvo un mayo extremadamente más lluvioso, fuera de lo normal. En cuanto a la región del Caribe, prevalecieron los escenarios secos tanto en el mes de mayo como en junio con un régimen deficitario de lluvias, mientras que por otro lado, la Zona Norte presentó meses muy lluviosos, en donde hubieron superávits en la mayor parte de la región.

Según el IMN (2008), los sistemas de baja presión atmosférica de la Zona de Confluencia Intertropical, las ondas tropicales que transitaron sobre el país y la Tormenta Tropical Alma generaron superávit en las cantidades acumuladas de lluvia en el Pacífico Central, Pacífico Sur y Valle Central. Algunos de los mayores montos porcentuales fueron en San José, 122% y Quepos, 126%. En cuanto a la Tormenta Tropical Alma en específico, esta llegó a aportar valores acumulados de lluvia de alrededor de 500 mm en 3 días, causó 2 muertes, dañó a 600 comunidades, y ocasionó pérdidas estimadas en 20 000 millones de colones.

En cuanto al análisis en específico de este fenómeno se deben de tomar una serie de aspectos en cuenta para evitar posibles discrepancias que se puedan encontrar al analizar las secciones. En primera instancia, es pertinente caracterizar un poco el periodo en que se presenta la Tormenta Tropical Alma.

Durante dicho periodo, se tuvo presencia del fenómeno de la niña durante todo el año, de hecho, este fenómeno persistió hasta marzo del 2009. Específicamente en mayo del 2008, La Niña ya venía experimentando un debilitamiento, las temperaturas del mar en el Atlántico tropical norte y el mar Caribe mostraban una tendencia al enfriamiento entre los rangos normales de variación. La presencia de este fenómeno trae como consecuencia que las

condiciones climáticas en el país estén caracterizadas por un déficit significativo de precipitaciones en la Zona Norte y la Región Caribe, en donde se contaban con sequías agrícolas y poco recurso hídrico para consumo humano y producción eléctrica. La situación anterior, sirve para prestarle atención a las estaciones ubicadas en la Zona Norte, ya la deficiencia de precipitaciones en dicha zona es mencionada en el reporte del 12 de mayo, 2008, sin embargo, a finales de dicho mes el régimen de precipitación cambia, en donde se menciona que únicamente la Región Caribe prevalece con escenarios secos, por lo que Alma sí tuvo un efecto importante en las lluvias del norte de Costa Rica.

A continuación, se presenta un gráfico con las precipitaciones diarias presentadas en el mes de mayo para la vertiente del pacífico, en donde se puede observar los efectos de la tormenta en los patrones de lluvia de la región.

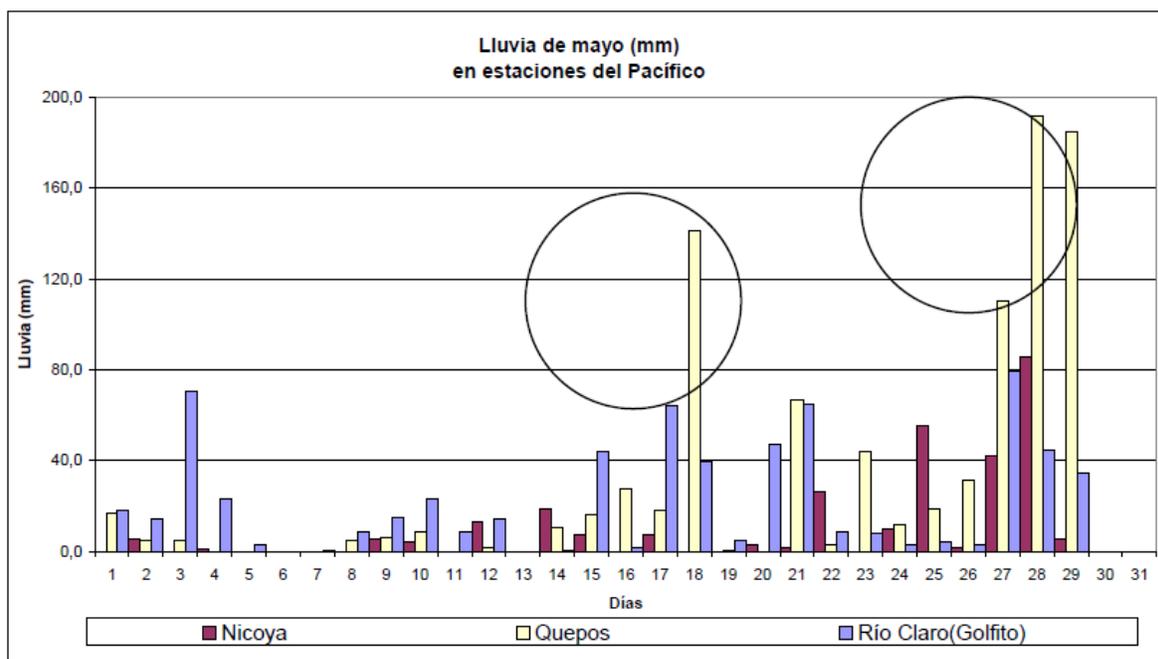


Figura 18. Precipitación de mayo 2008 en el Pacífico costarricense

Fuente: IMN, 2008

En cuanto a la Tormenta Tropical Alma en específico, fue el primer sistema ciclónico de la temporada 2008 en el Pacífico Oriental. Se originó bastante cerca de Costa Rica, en una región de baja presión atmosférica que se localizaba el 27 de mayo a 176 Km al oeste de la península de Santa Elena en Guanacaste, llegando al día siguiente a solamente 66 Km de la

costa pacífica costarricense. Fue el día 29 de mayo que alcanzó el grado de tormenta tropical al comenzar a desplazarse hacia el norte con vientos de 80 Km/h (que posteriormente aumentaron a 110 Km/H) y una presión central de 1001 hPa (posteriormente disminuyó a 994 hPa), localizándose al noreste de la península de Santa Elena a unos 164 Km. La tormenta posteriormente atravesó el Pacífico nicaragüense en dirección al norte, en donde se disipó el 30 de mayo en las montañas del occidente de Honduras (IMN, 2008). En la Figura a continuación se presenta la trayectoria que tomó la tormenta posterior a su formación.

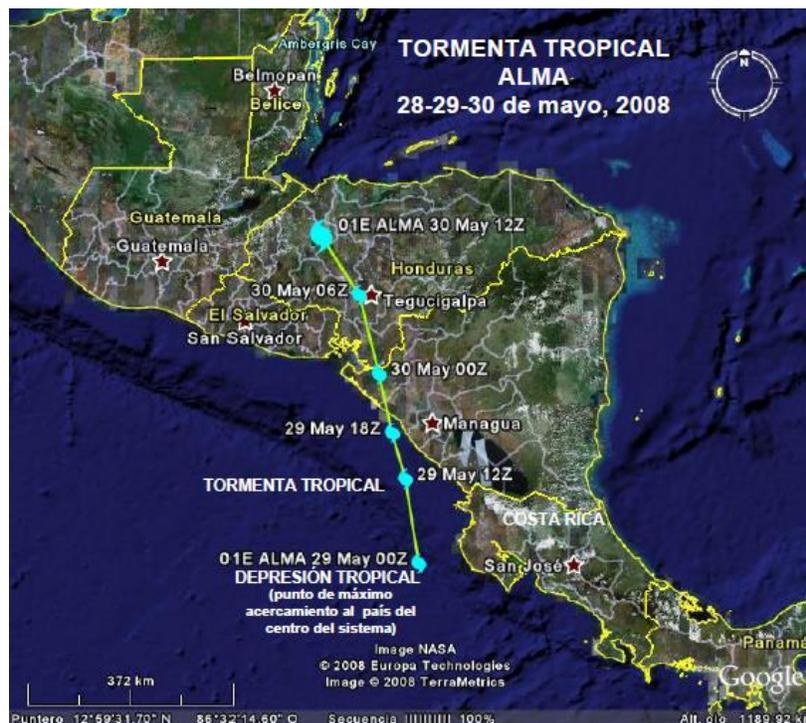


Figura 19. Trayectoria de la Tormenta Tropical Alma

Fuente: IMN, 2008

Un dato interesante es que posterior a la disipación de la tormenta, se originó la Tormenta Tropical Arthur gracias a los remanentes de la Tormenta Tropical Alma y otras ondas tropicales, sin embargo, perdió fuerza rápidamente y se disipó el 2 de junio.

Alma ha sido uno de los ciclones con mayores afectaciones generadas en el país, afectando de manera directa o indirecta a 75 000 personas, generó daños severos en infraestructura vial en carreteras y puentes.

5.2. Terremoto de Cinchona (8 de enero del 2009)

Los impactos que puede tener los sismos sobre un cauce pueden ser muy diversos, y dependen de muchísimos factores, características geológicas y topográficas que se salen del alcance del presente estudio, sin embargo, el propósito de incluir los terremotos más importantes, es con el fin de determinar si existe algún tipo de cambio o acontecimiento importante debido a uno de los peligros más importantes relacionados con los ríos durante el momento de un sismo, los flujos de lodos.

El Terremoto de Cinchona ocurrió el día jueves 8 de enero de 2009 a la 1:21 pm y sacudió la región norte del Valle Central. Presentó una magnitud de 6.2 Mw (Magnitud del momento sísmico), a una profundidad de 6 km, a un kilómetro al sur de Cinchona (RSN, 2009). A continuación, se presenta el mapa de intensidades para el Terremoto de Cinchona elaborado por la Red Sismológica Nacional.

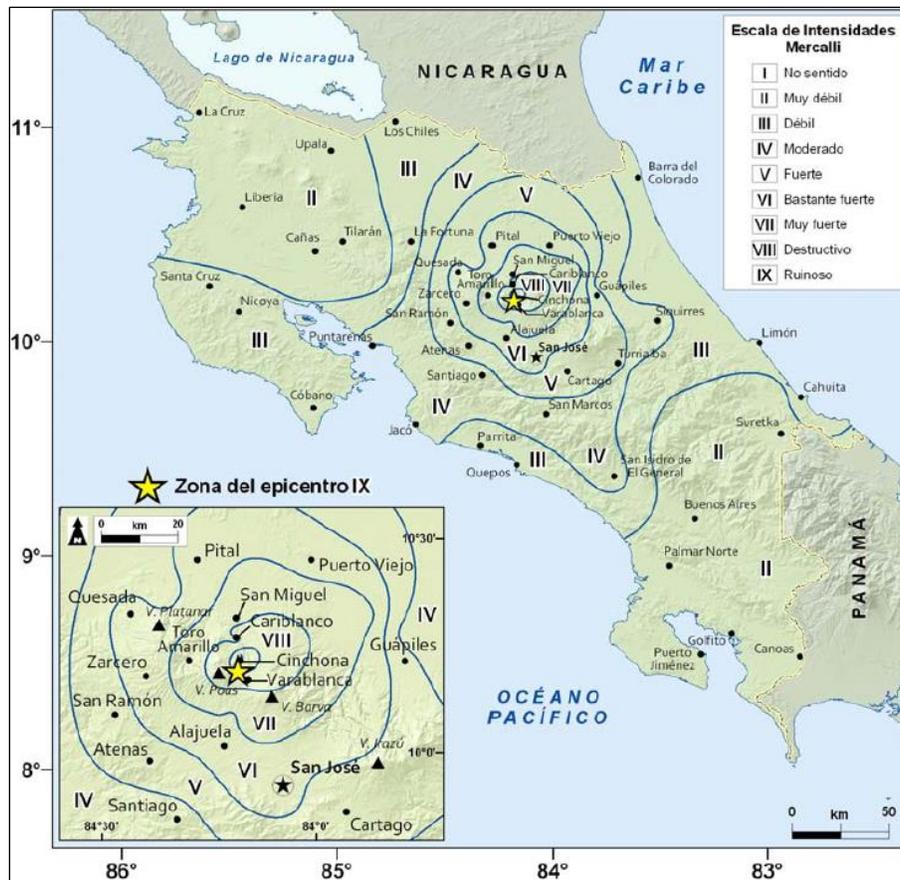


Figura 20. Mapa de intensidades Mercalli Modificada para el Terremoto de Cinchona en Costa Rica.

Fuente: RSN, 2009

La Red Sismológica Nacional cuenta con información específicamente sobre los flujos de lodos reportados por diferentes testigos en la zona. Según el informe detallado por la RSN “El terremoto de Cinchona del 8 de enero de 2009”, después del terremoto de cinchona, se observó un potente flujo de lodo. Los testigos lograron reportar que la avalancha ocurrió entre 20 min a 1 hr después de ocurrido el evento principal. Las inspecciones realizadas en campo al respecto, determinaron que el flujo de lodo principal bajó por el cañón del río Sarapiquí, río Toro y colectores secundarios como por ejemplo, río Ángel, río Sardinal, río Cariblanco, río La Paz, río María Aguilar, etc.

En la figura a continuación, se presentan los cauces en los que la RSN determinó un mayor potencial de sufrir los efectos de los procesos aluviales, a partir de erosión y sedimentación, determinando en cuales zonas es más probable la deposición, y cuales el aporte de material (por erosión). El mapa es muy importante, debido a que permite identificar de las estaciones

con que se cuenta con información, cuáles son las que tienen la mayor probabilidad de sufrir alteraciones morfológicas debido al sismo.

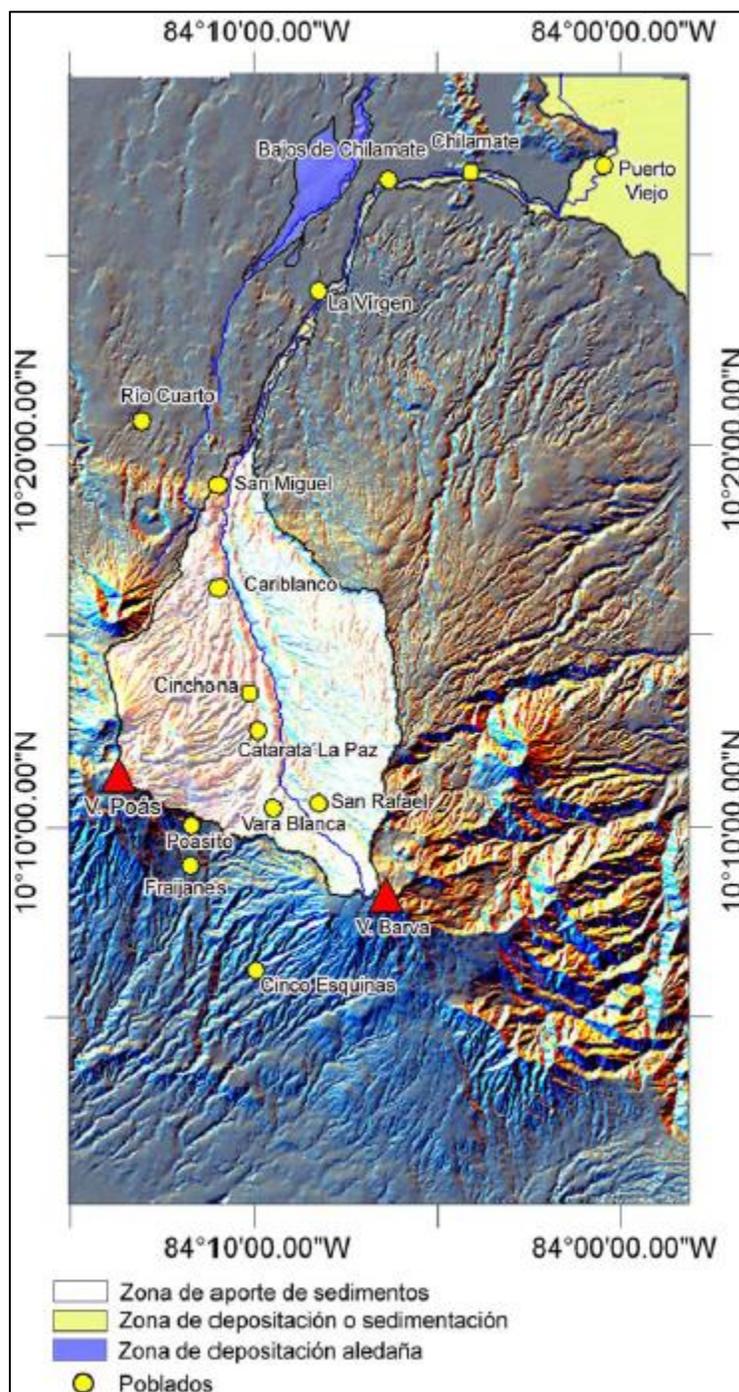


Figura 21. Mapa preliminar de las zonas potenciales de erosión y deposición de sedimentos por flujos de lodo

Fuente: RSN, 2009

5.3. Tormenta Tropical Tomás (4 de noviembre del 2010)

La Tormenta Tropical Tomás hizo su aparición el 29 de octubre de 2010, y finalizó el 7 de noviembre del mismo año. Presentó un comportamiento sumamente variable en cuanto a intensidad y trayectoria, pasó de ser una tormenta tropical a un huracán categoría 2 en menos de 48 horas, posteriormente se dirigió rumbo a Venezuela, se debilitó a depresión tropical, para finalmente intensificarse nuevamente a huracán cerca de Haití (IMN, 2010). En la figura a continuación, se muestra la trayectoria de Tomás sobre el Mar Caribe.



Figura 22. Trayectoria del ciclón tropical Tomás

Fuente: IMN, 2010

La afectación de Tomás representó el evento hidrometeorológico más importante en Costa Rica a lo largo de todo el año 2010, debido a que sufrió la interacción de la ZCIT con el ciclón tropical. Esta conjugación de fenómenos ocasionó precipitaciones que superaron varios récords en el Pacífico Central, Pacífico Sur y en el Valle Central. La máxima aproximación que tuvo este sistema a nuestro país fue 890 km al noreste de Puerto Limón el 3 de noviembre a las 6 am como depresión tropical (IMN, 2010).

Es importante mencionar para efectos de análisis de los resultados obtenidos por medio de las secciones transversales para las distintas estaciones, antes de Tomás, en octubre del

mismo año se estaba presentando una situación anómala en varias de las regiones del país. El Valle Central, así como el Pacífico Norte se encontraba bajo condiciones climáticas sumamente secas, de hecho, según el Instituto Meteorológico Nacional (2010), el impacto fue tan significativo e histórico que se convirtió en el octubre más seco desde 1948 en todo Guanacaste, lo cual difiere de todas las condiciones regulares para este mes, ya que octubre se figura normalmente como el mes más lluvioso del año para ambas regiones.

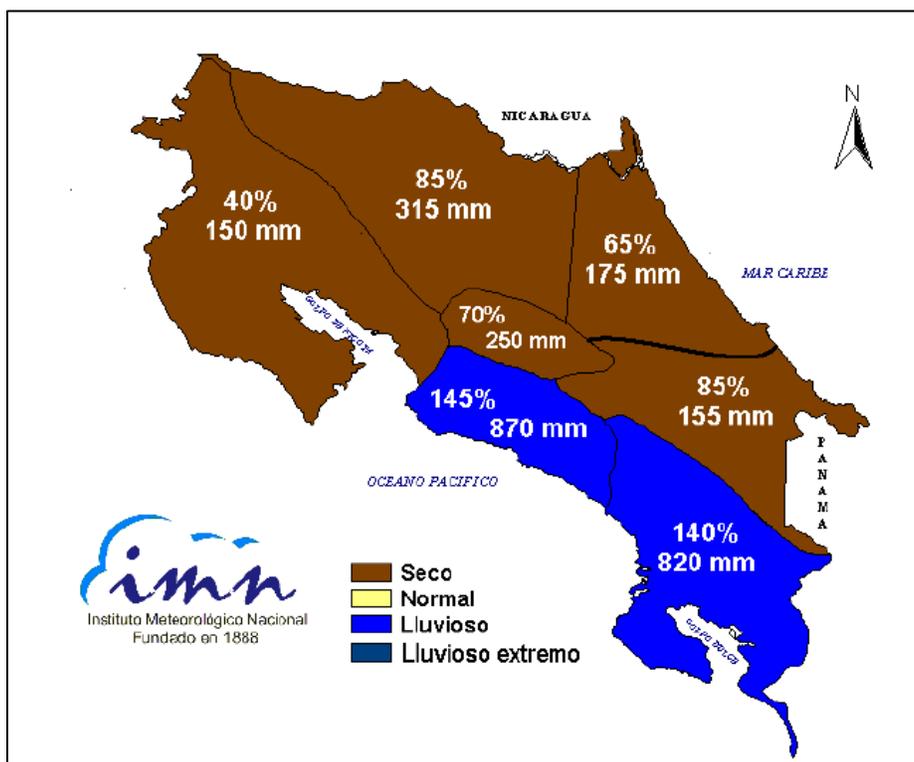


Figura 23. Condiciones secas en el mes de octubre de 2010 en las diferentes regiones del país

Fuente: IMN, 2010

Si bien esta situación anómala predominó en la mayor parte del mes de octubre (entre el 1 y el 20 de octubre), el efecto comenzó a revertirse, volviendo a la normalidad en el mes siguiente, no obstante, los efectos de la Tormenta Tropical Tomás se vieron debilitados considerablemente a finales del mes de octubre y no fueron percibidos hasta la primera semana del mes de noviembre, cuando uno de los principales responsables de la condición anómala (La fase "seca" de la Oscilación de Madden – Julian) se debilitó.

Tomás no tuvo un contacto directo con el país, sin embargo, la interacción que presentó con un sistema de baja presión perteneciente a la ZCIT hizo que para el 2 de noviembre formara un amplio sistema ciclónico, en el que a pesar de que se degrada a depresión tropical, el sistema incentiva indirectamente el fuerte ingreso de humedad al país. Ambos sistemas posicionaron la Zona de Convergencia Intertropical sobre el país, lo cual reforzó la persistencia y la intensidad de las lluvias (IMN, 2010). Finalmente, el temporal permanece hasta la noche del 5 de noviembre, momentos en que también ingresaba un empuje frío, que fortaleció los vientos del norte que inhibieron la precipitación en las regiones afectadas por lluvias.

El huracán provocó pérdidas millonarias en infraestructura vial, por viviendas, y daños en el sector agrícola. También provocó pérdidas humanas importantes por el deslizamiento del cerro Pico Blanco en San Antonio de Escazú en donde 20 personas perdieron la vida (IMN, 2010), así como 3 víctimas mortales en el sector de San Marcos de Tarrazú, en la Cordillera de Talamanca (BBC, 2010).

5.4. Terremoto de Sámara (5 de septiembre del 2012)

En cuanto al Terremoto de Sámara, también conocido como el Terremoto de la Península de Nicoya, este sismo ocurrió el día 5 de septiembre del 2012 a las 8:42 am, tuvo una magnitud de 7.6 Mw a una profundidad de 15.4 km. Su localización fue a 24 km al sur-suroeste de Sámara, frente a la Península de Nicoya, y su origen fue la zona sismogénica entre las placas del Coco y Caribe.

Fue sentido en todo Costa Rica e inclusive localidades de Nicaragua, Panamá, El Salvador y Guatemala. En cuanto a los daños provocados por el terremoto, la mayor parte de estos fueron reportados en Nicoya, Santa Cruz, Nandayure y Sámara en Guanacaste, en Puntarenas también se reportaron afectaciones el centro, Mata de Limón y Jacó. Fueron reportados daños importantes en los cantones de Grecia, Naranjo y Valverde Vega en viviendas y edificios, mientras que por otro lado el Valle Central los daños no fueron severos. El Consejo de Gobierno detalló que los diferentes ministerios e instituciones oficiales valoraron en ₡ 22 360 millones los costos de los daños en infraestructura pública y viviendas, repartidos principalmente en 20 cantones del país (RSN, 2012).

En la figura a continuación, se presenta las distintas intensidades reportadas por el sismo a lo largo de todo el país.

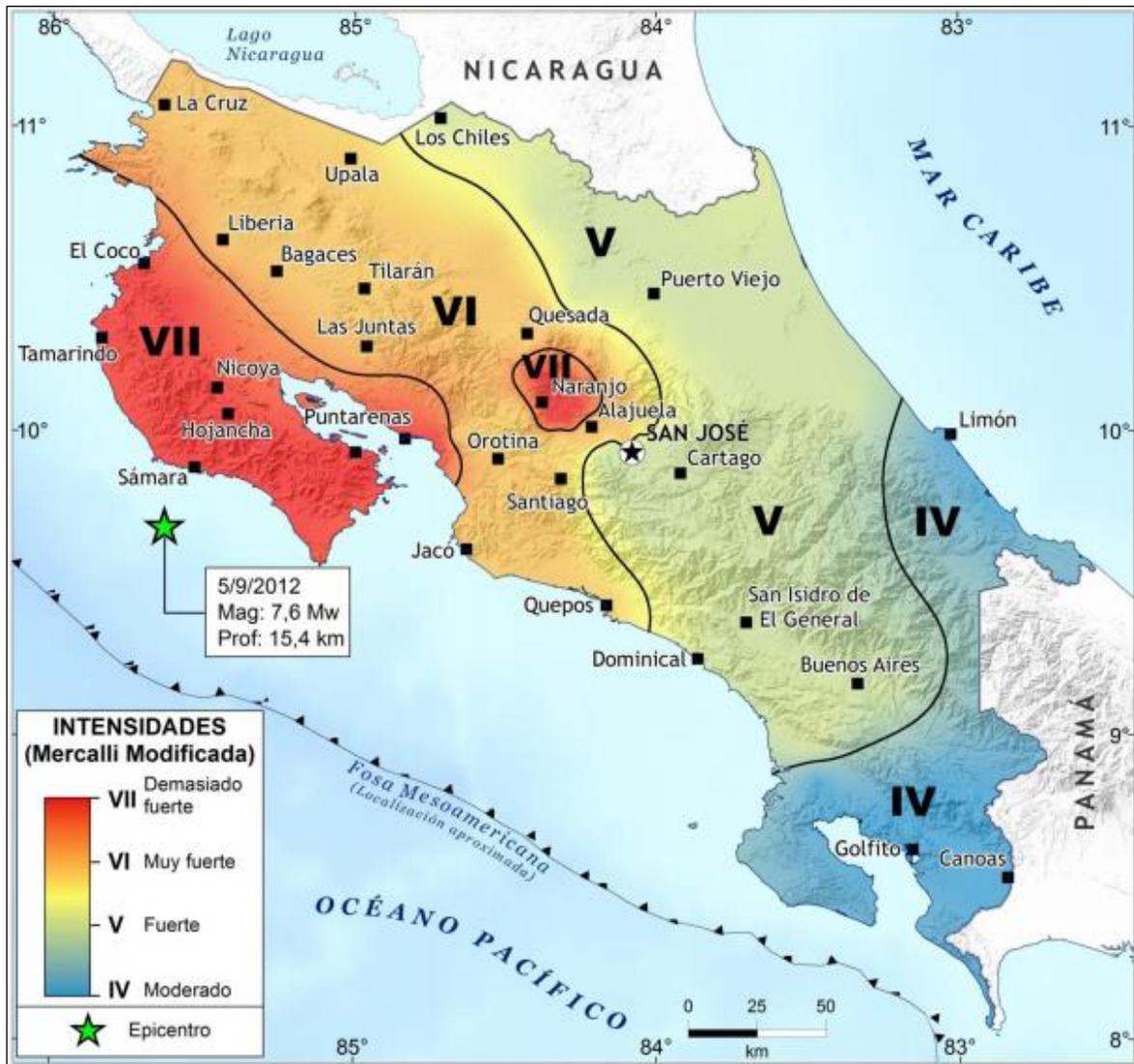


Figura 24. Mapa de intensidades Mercalli Modificada en Costa Rica para el Terremoto de Sámara

Fuente: RSN, 2012

En lo correspondiente al análisis a realizar de las secciones transversales, si se compara el Terremoto de Sámara con el Terremoto de Cinchona, es evidente que la probabilidad de encontrar alteraciones en los cauces debido a eventos como los flujos de lodos es menor debido a la localización del epicentro. A pesar de esto, se pretende estudiar más adelante los cambios ocurridos en las curvas, dándole mucha mayor importancia y énfasis a las secciones transversales que se encuentren más cercanas a los sitios de mayor intensidad

mostrados en la figura anterior, ya que como se mencionó previamente ocurrieron afectaciones considerables no solo en Guanacaste, sino que también las zonas circundantes a Alajuela.

5.5. Huracán Otto (24 de noviembre del 2016)

Otto representa es un desastre nacional en la historia de nuestro país, debido a que es el primer huracán en tener un impacto directo en nuestro país desde que se tiene registros en 1851. Según el Instituto Meteorológico Nacional (2016), generó aguaceros torrenciales con acumulados diarios de 300 mm y vientos intensos con ráfagas de 15 a 30 m/s en las regiones del norte del país, que destacan entre las regiones más afectadas por el evento.

Este huracán generó inundaciones y además debido a la gran cantidad de lluvia se generaron diversos deslizamientos y avalanchas que impactaron fuertemente en comunidades como Upala, Bagaces y Bijagua. Afectó también zonas de cultivo, flora, fauna y tomó consigo 10 víctimas mortales.

El Huracán Otto surgió de un sistema de baja presión segregado de la vaguada monzónica localizada al sur de Mar Caribe el día 15 de noviembre. Al mismo tiempo, un empuje frío estaba localizado en el noroeste del Mar Caribe e influyó posteriormente de forma significativa en la trayectoria seguida por el ciclón. Además, cabe mencionar que la intensificación paulatina del sistema de baja presión hasta convertirse en huracán categoría 2 fue debido a una serie condiciones ambientales favorables (IMN, 2016). Entre estas condiciones se encuentran:

- Altas temperaturas del Mar Caribe (29 °C)
- La baja cortante vertical.
- La difluencia/divergencia en la tropósfera alta.
- Influencia de la fase fría del ENOS, el fenómeno de la Niña.

Los primeros efectos o impactos de Otto en el país, pueden trazarse desde el día 16 de noviembre cuando era apenas una baja presión. Ocasionó fuertes precipitaciones en ciertas partes del país, en particular los cantones de Golfito, Osa y Corredores registraron precipitaciones de hasta 300 mm en 24 horas, provocando inundaciones y deslizamientos. Las características más importantes que se deben de rescatar de este fenómeno y del particular impacto que tuvo sobre el país se deben al origen de su formación, de hecho el

Huracán Otto junto con Martha (noviembre de 1969) son los dos huracanes más meridionales de la Cuenca del Océano Atlántico, e incluso rompe récords al cruzar el istmo en el Pacífico, convirtiéndose en la segunda tormenta del historial más meridional de la cuenca de Pacífico nororiental. A continuación, se procede a mostrar de manera ilustrada la trayectoria que presentó el Huracán Otto.



Figura 25. Trayectoria presentada por el Huracán Otto

Fuente: IMN, 2016

Como se muestra en la imagen, Otto se demoró en convertirse en huracán categoría 2 (escala Saffir-Simpson) y no fue hasta las 6 am del jueves 24 de noviembre que un avión caza huracanes realizó una serie de sobre vuelos dentro y fuera de Otto, encontrándolo con una intensidad mucho mayor a la estimada, se encontraba localizado a 115 km al norte de Limón, con una velocidad de vientos de 155 km/h, una presión central de 978 hPa y en dirección al oeste a 13 km/h.

5.5.1. Trayectoria de Otto a lo largo de Costa Rica

Según el Instituto Meteorológico Nacional (2016), la hora y punto de contacto con el país fue aproximadamente a las 2:00 pm del jueves 24 de noviembre en la línea fronteriza a 4 km al este del poblado las Delicias en los Chiles, Alajuela. Para este entonces al haberse adentrado en tierra, la estructura del ojo había desaparecido, sin embargo, esto no implica una disminución en la cobertura de nubes o las condiciones de lluvias y vientos.

Su trayectoria atravesó los distritos de Los Chiles y Caño Negro, luego continuó hacia distritos del cantón de Upala por Yolillal, Upala (distrito), San José, y Aguas Claras. En este punto el Huracán se había sido debilitado y declarado como categoría 1 (vientos de 120 km/h) y continuó por los distritos de Cañas Dulces, Mayorga y Nacascolo en el cantón de Liberia, Guanacaste. Finalmente, a las 9 pm encontrándose a 22 km al norte de la ciudad de Liberia, fue degradado a tormenta tropical con vientos de 110 km/h, y continuó rumbo al Pacífico en donde a las 10:30 pm concluyó en el punto de salida del país específicamente por Playa Naranjo en el Golfo de Papagayo. Otto continuó avanzando sobre el océano Pacífico por 2 días más como tormenta tropical hasta debilitarse el 26 de noviembre a un sistema de baja presión a unos 1050 km al oeste del país.

Otto fue un caso extraordinario para Costa Rica, ya que como se mencionó anteriormente fue el primer ciclón tropical con grado de huracán en impactar directamente a Costa Rica desde los primeros registros históricos. Previo a Otto se conocía de otros dos ciclones que tocaron tierra en el país: una tormenta tropical el 12 de diciembre de 1887 y la depresión tropical N.17 del 18 de noviembre de 1973.

Los tres ciclones coinciden en un punto específico que debe de ser enfatizado, y es el hecho que ingresaron al país en los dos últimos meses del año. Una de las principales razones por las que el huracán Otto presentó una trayectoria poco usual y llegó a tocar suelo costarricense fue que se vio sometido al efecto de los empujes fríos y las altas presiones en Norteamérica, que llegan a impedir que los huracanes sigan las rutas típicas hacia el norte, inhibiendo su movimiento, y restringiendo su avance de este a oeste, inclusive con un sesgo hacia el sur como fue el caso de Otto.

5.6. Tormenta Tropical Nate (4 a 12 de octubre de 2017)

La Tormenta Tropical Nate ha sido uno de los eventos más impactantes a lo largo de la última década que han logrado impactar a Costa Rica de forma severa. Se formó en los primeros días del mes de octubre como depresión tropical (número 16 de la temporada de huracanes) donde fue ascendiendo su intensidad pasando por tormenta tropical, y convirtiéndose el 7 de octubre en el golfo de México en huracán. Las principales afectaciones que presentó en nuestro país fueron a lo largo de la Vertiente del Pacífico y el Valle Central.

El problema presentado por esta tormenta tropical a Costa Rica fue debido principalmente al gran aporte de humedad que aportó constantemente del Pacífico Tropical del Este, que junto con la orografía propia de nuestro país, generó abundantes precipitaciones en la costa Pacífica (IMN, 2017).

En cuanto a la trayectoria que presentó Nate, el ciclón siempre tuvo una dirección hacia el norte desde su aparición como sistema de baja presión. En las figuras a continuación, se presentan las trayectorias desarrolladas por el sistema en el momento de su génesis, y a partir del momento en que es declarada tormenta tropical, que toma una trayectoria predominante hacia el norte del hemisferio.



Figura 26. Trayectoria inicial tomada por Nate

Fuente: IMN, 2017

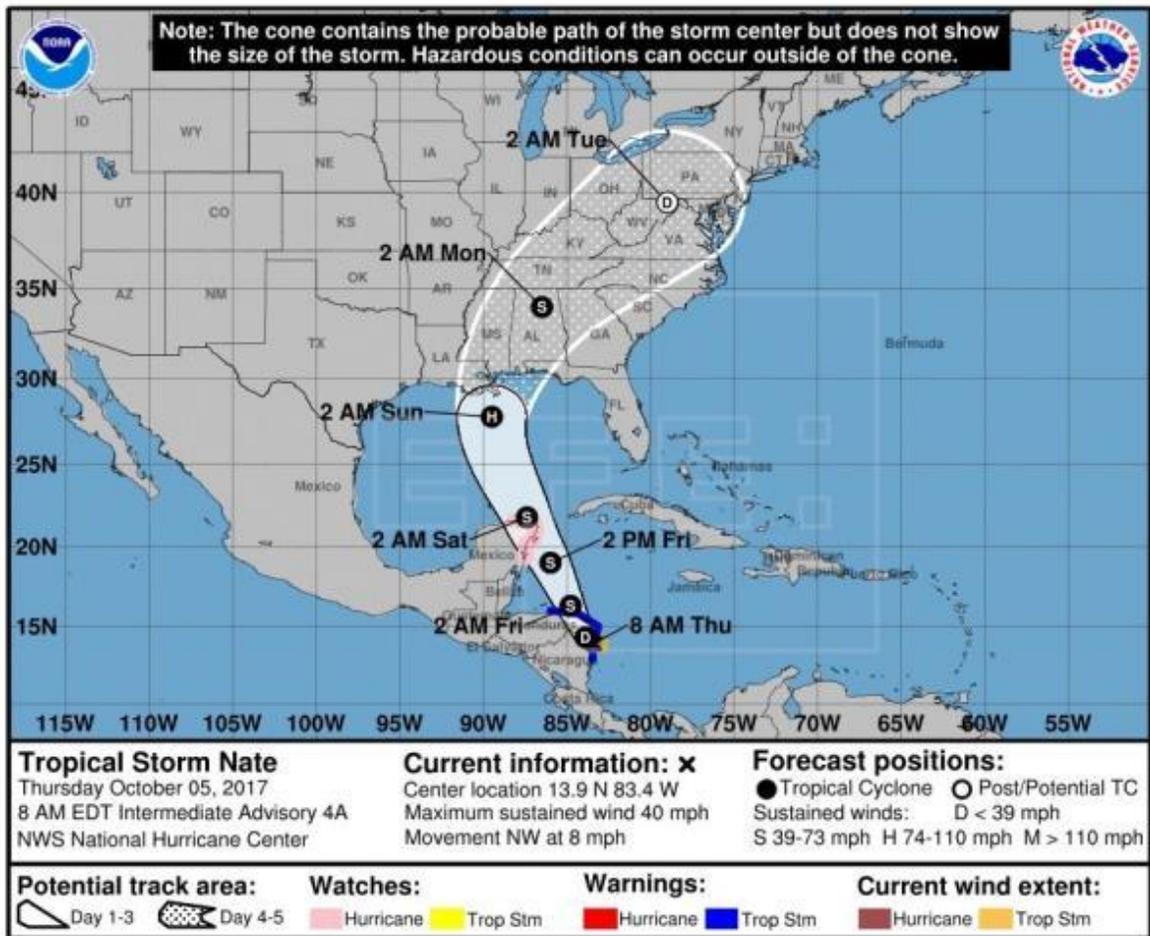


Figura 27. Trayectoria de Nate posterior a ser categorizado como tormenta tropical
 Fuente: Agencia EFE, 2017

Los días con mayor afectación por la tormenta tropical fueron los días 4 y 5 de octubre, en donde se alcanzaron valores acumulados entre 400 – 550 mm durante dicho periodo en la costa del Pacífico. Como se mencionó al inicio los daños provocados por la tormenta tropical Nate, lo han puesto entre los eventos meteorológicos más dañinos que ha sufrido Costa Rica en la última década, colocándolo por encima incluso del Huracán Otto, que afectó a Costa Rica directamente en noviembre de 2016 (IMN, 2017).

Nate presentó una gran diversidad de afectaciones, entre las más importante se reportaron víctimas mortales, sumando 11 fallecimientos y 2 desaparecidos, así como 11 517 refugiados, según el ministro de la Presidencia de Costa Rica. El Instituto Meteorológico Nacional (2017), también enfatiza acerca de la gran cantidad de comunidades que

resultaron afectadas por la tormenta tropical, entre las más agravadas se encuentran varias comunidades guanacastecas, la Zona Sur, Central Sur, Turrialba, zonas de Cartago, Puntarenas y varias comunidades indígenas. En la figura a continuación, se muestra una comparación donde se puede apreciar la afectación que generó la tormenta tropical Nate en comparación con el Huracán Otto el año anterior al evento en cuestión.

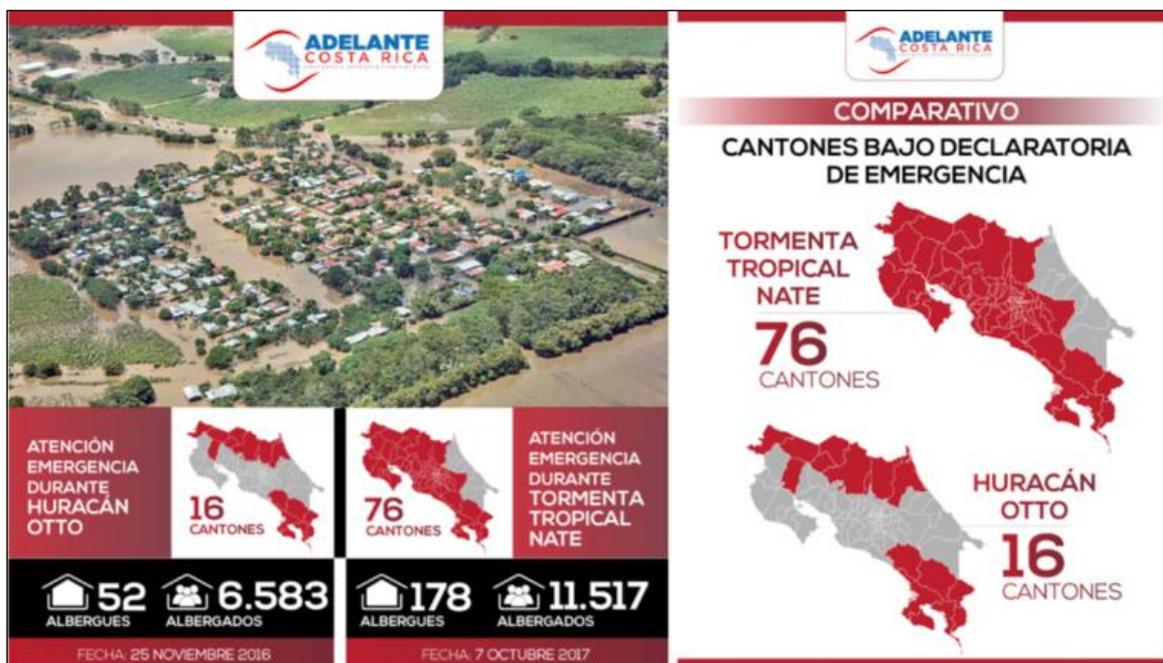


Figura 28. Afectación de la Tormenta Tropical Nate y el Huracán Otto en nuestro país
Fuente: UCR, 2017

Finalmente, en cuanto a los daños materiales, Nate generó muchísimas pérdidas. Se reportaron 499 carreteras dañadas, de las cuales 117 fueron rutas nacionales y 36 puentes totalmente inhabilitados que generaron problemas de comunicación con algunos sectores. También en el sector agrícola se reportaron grandes impactos en la Región Chorotega, la Región Central Oriental y Pacífico Central, con pérdidas en la producción de hortalizas, arroz, frijol, maíz, melón, caña, limón, palma aceitera, papaya, pastos y sandía en las distintas regiones afectadas. Las pérdidas económicas totales se estimaron en unos 185 millones de dólares (IMN, 2017).

Capítulo 6. Análisis morfológico por eventos extremos

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis de cada uno de los eventos mencionados en el Capítulo 3, según la información brindada por el Departamento de Estudios Básicos de Ingeniería y Construcción del ICE, para las 14 estaciones solicitadas. En este capítulo se relacionan los efectos generados por los distintos eventos con los cambios observables en las curvas graficadas.

Un aspecto importante a contemplar en el análisis a continuación, es que la información establece restricciones que dificultan la labor de realizar comparaciones entre periodos. El problema que presenta la información es que las fechas de realización de los aforos no suelen ser constantes, es decir no suelen realizarse en el mismo día cada mes y realmente no aparenta haber un patrón de toma de datos establecido por la institución para tomar las mediciones. Es por esto que, en ocasiones, se presentan medidas en las que se saltan incluso meses, y el periodo entre dos curvas puede llegar a ser mayor a 30 días y no se puede caracterizar los comportamientos observados entre las dos secciones a un solo mes como tal.

Como fue mencionado en la metodología de la investigación, las comparaciones que se realizaran en el presente capítulo tienen el fin de determinar la magnitud de afectación de un evento extremo, al compararlo con un periodo ordinario de actividad meteorológica. Estos periodos ordinarios se establecieron al estudiar todo el periodo de análisis de la información utilizada en el documento, que comprende desde enero de 2008 hasta marzo de 2020. Para estos se tomaron en cuenta los eventos meteorológicos más importantes, así como fenómenos modificadores del clima en el territorio nacionales como es el caso del Fenómeno del Niño y la Niña.

Se procedió a tabular la información de manera que se facilite encontrar los años y meses con las condiciones atmosféricas más regulares posibles como se muestra en el cuadro a continuación.

Cuadro 9. Afectación de los diferentes fenómenos en Costa Rica

Mes	Años												
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Enero	Fenómeno de la Niña	Fenómeno de la Niña Terremoto de Cinchona (8 de enero)	Fenómeno del Niño	Fenómeno de la Niña	Fenómeno de la Niña			Fenómeno del Niño	Fenómeno del Niño	Fenómeno de la Niña	Fenómeno de la Niña		
Febrero	Fenómeno de la Niña	Fenómeno de la Niña	Fenómeno del Niño	Fenómeno de la Niña	Fenómeno de la Niña			Fenómeno del Niño	Fenómeno del Niño	Fenómeno de la Niña	Fenómeno de la Niña		
Marzo	Fenómeno de la Niña	Fenómeno de la Niña	Fenómeno del Niño	Fenómeno de la Niña	Fenómeno de la Niña			Fenómeno del Niño	Fenómeno del Niño	Fenómeno de la Niña	Fenómeno de la Niña		
Abril	Fenómeno de la Niña			Fenómeno de la Niña				Fenómeno del Niño	Fenómeno del Niño	Fenómeno de la Niña			
Mayo	Fenómeno de la Niña			Fenómeno de la Niña				Fenómeno del Niño	Fenómeno del Niño	Fenómeno de la Niña			
Junio	Fenómeno de la Niña		Fenómeno de la Niña	Fenómeno de la Niña				Fenómeno del Niño		Fenómeno de la Niña			
Julio	Fenómeno de la Niña	Fenómeno del Niño	Fenómeno de la Niña	Fenómeno de la Niña				Fenómeno del Niño		Fenómeno de la Niña			
Agosto	Fenómeno de la Niña	Fenómeno del Niño	Fenómeno de la Niña	Fenómeno de la Niña				Fenómeno del Niño	Fenómeno de la Niña	Fenómeno de la Niña			
Septiembre	Fenómeno de la Niña	Fenómeno del Niño	Fenómeno de la Niña	Fenómeno de la Niña	Terremoto de la Península de Nicoya (5 septiembre)			Fenómeno del Niño	Fenómeno de la Niña	Fenómeno de la Niña			
Octubre	Fenómeno de la Niña	Fenómeno del Niño	Fenómeno de la Niña	Fenómeno de la Niña				Fenómeno del Niño	Fenómeno de la Niña	Fenómeno de la Niña Tormenta Tropical Nate (12 de octubre)			
Noviembre	Fenómeno de la Niña	Fenómeno del Niño	Fenómeno de la Niña Tormenta Tropical Tomas (4 de nov)	Fenómeno de la Niña			Fenómeno del Niño	Fenómeno del Niño	Fenómeno de la Niña Huracán Otto (24 de nov)	Fenómeno de la Niña			
Diciembre	Fenómeno de la Niña	Fenómeno del Niño	Fenómeno de la Niña	Fenómeno de la Niña			Fenómeno del Niño	Fenómeno del Niño	Fenómeno de la Niña	Fenómeno de la Niña			

Elaborado por: Alfaro, 2020

Como es posible observar en el cuadro anterior, debido al Fenómeno del ENOS, una importante cantidad de años y meses se encuentran afectados por el fenómeno, los cuales generan afectaciones debido a las alteraciones en los regímenes de precipitación y condiciones secas en el país.

Debido a esto, se procede a utilizar los meses que se encuentran ausentes de dicho fenómeno, así como de los eventos extremos mencionados. De esta manera, se procede a utilizar como principal pilar comparativo los periodos que comprenden los años 2012, 2013 y 2014. No se utilizan los años más recientes debido a que varias de las estaciones no cuentan con un registro completo en estos años. Por otro lado, en la investigación se utilizan otros periodos distintos a estos 3 años en caso de que la estación como tal, no cuente con un registro en el periodo 2012-2014, como es el caso en ciertas estaciones del Caribe.

6.1. Estaciones de la Vertiente del Caribe

6.1.1. Estación Pandora 02-02

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 02-02

Se observa una erosión bastante generalizada a lo largo de todo el cauce, con predominancia hacia la margen izquierda del cauce del río. Se determinan diferencias entre ambas curvas (29 de octubre y 23 de noviembre) de más de 60 cm.

A continuación, se presenta la ilustración de las curvas correspondientes al periodo en que se presentó la Tormenta Tropical Tomás en la estación 02-02.

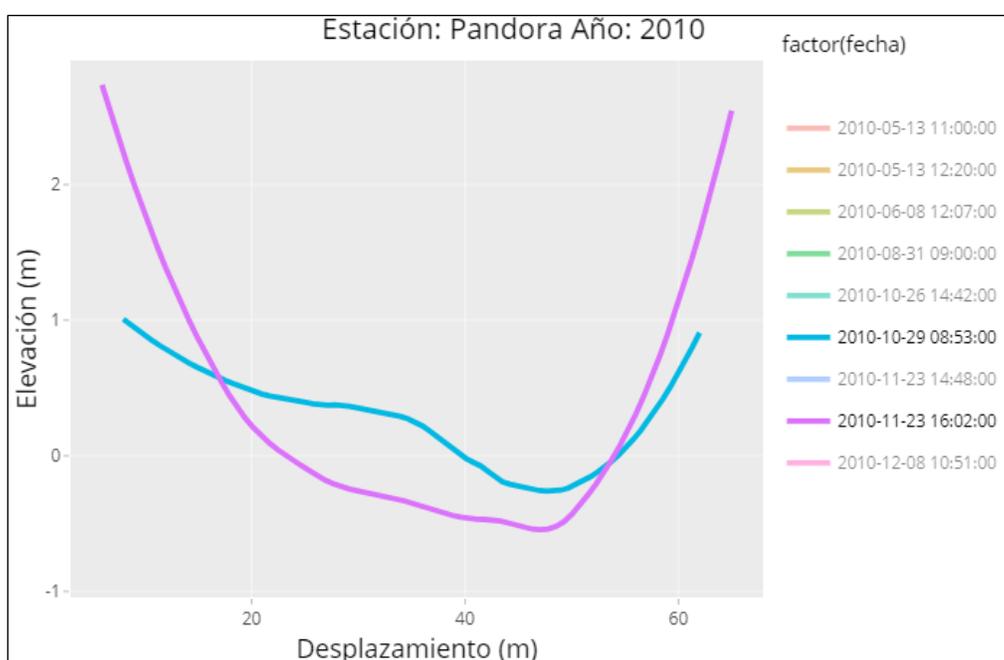


Figura 29. Cambios en las secciones transversales de la estación 02-02 durante la Tormenta Tropical Tomás

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Como se mencionó en el capítulo anterior, las condiciones secas fueron una anomalía observada en la mayor parte del país para el mes de octubre, y no fue hasta noviembre con la entrada de Tomás que estas condiciones se reversaron. Dichas condiciones secas afectaron principalmente al Valle Central y el Pacífico del país, ya que en el caso del Caribe este periodo seco no es poco común, sin embargo, para el mes de noviembre se registraron

porcentajes de lluvia acumulada sobre el promedio entre 50% y 66% en Ciudad Quesada y Limón, indicando que hubo una afectación significativa debido a las condiciones climáticas que trajo consigo la tormenta.

Al compararse con los años 2012 y 2013 con condiciones meteorológicas estables, el cauce del río muestra realmente haber sido afectado por la tormenta tropical, ya que en el 2012 y 2013 se registraron diferencias por erosión de aproximadamente 21 cm y 11.3 cm respectivamente. Al comparar los 60 cm de erosión posterior a la tormenta tropical, con el promedio entre ambos años (16.15 cm), es más que evidente el fuerte impacto del fenómeno en el cauce.

Afectación derivada del Terremoto de Sámara en la estación 02-02

En cuanto al Terremoto de Sámara, no se cuenta con datos del mes de septiembre por lo que no es posible visualizar si hubo una afectación directa. Se cuenta con datos en agosto y octubre mostrando una diferencia significativa, producto de una sedimentación en todo el cauce que alcanza valores por encima de 40 cm de diferencia.

Sin embargo, debido al faltante de información en el mes de septiembre no es posible evaluar la continuidad de dicha sedimentación y llegar a concluir que el cauce fue afectado directamente por el terremoto.

En la figura a continuación, se presenta el gráfico respectivo a la información mencionada anteriormente.

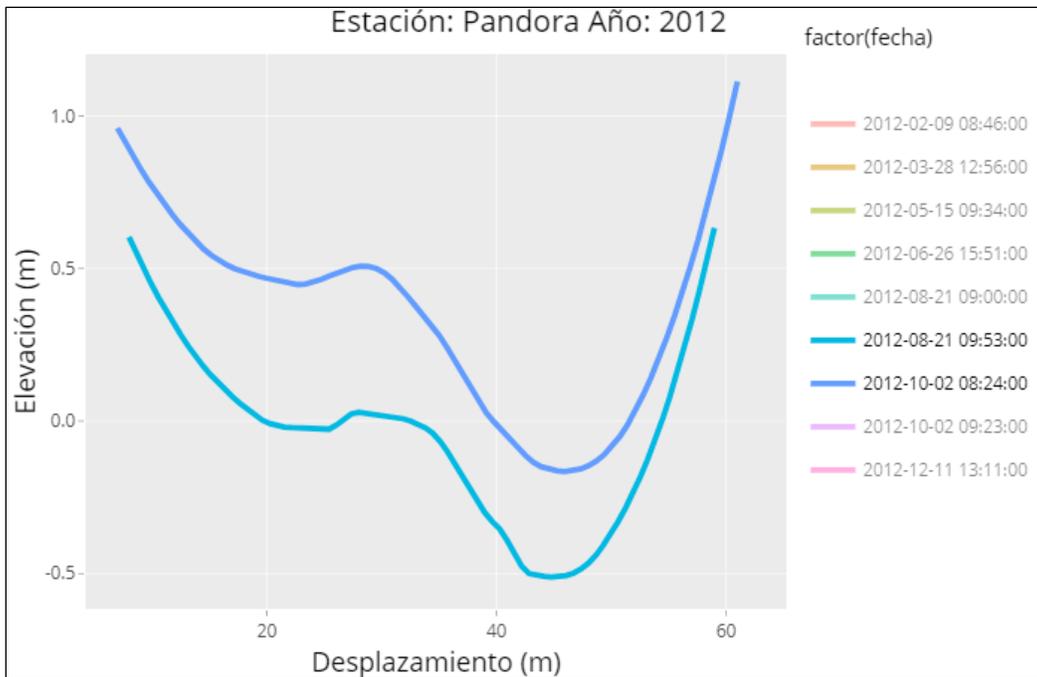


Figura 30. Cambios en las secciones transversales de la estación 02-02 durante el Terremoto de Sámara

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Afectación derivada del Huracán Otto en la estación 02-02

Para el Huracán Otto, no se cuentan con datos específicos para el mes de noviembre, sin embargo, es posible realizar la comparación entre los meses de octubre y diciembre.

Se observa una erosión muy marcada en la margen izquierda del río, en donde se pueden apreciar cambios de aproximadamente 80 cm, por otro lado, en la margen derecha del río se pueden visualizar pérdidas cercanas a 30 cm.

A continuación, se presentan los datos correspondientes a las secciones transversales de la estación de Pandora, para los meses de octubre y diciembre de 2016.

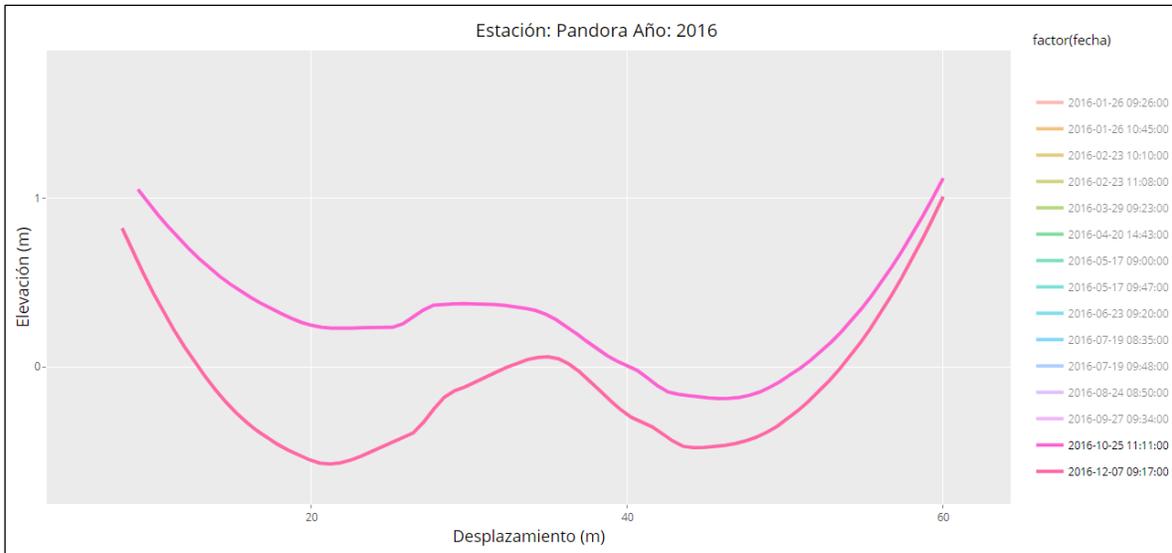


Figura 31. Cambios en las secciones transversales de la estación 02-02 durante el Huracán Otto

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

En el caso de Pandora, era de esperar que tendiera a un comportamiento sedimentario al encontrarse aguas abajo muy cerca del mar, sin embargo, la predominancia erosiva que presentó es una muestra del gran impacto que presentó el huracán en el cauce. Al comparar los resultados obtenidos derivados del Huracán Otto con los años 2012 y 2013 es posible determinar que realmente existió una afectación en el cauce en el 2016. Para el año 2012, sufrió un comportamiento muy interesante, en donde la margen izquierda sufrió una erosión de aproximadamente 24 cm, mientras que la margen derecha se sedimentó con valores muy similares a los erosionados.

Al comparar los resultados anteriores (24 cm aproximadamente) con los obtenidos durante el Huracán Otto (30 cm – 80 cm) es posible notar de primera entrada que la diferencia de magnitudes es muy grande por lo que Pandora parece haber experimentado una erosión anormal.

Al comparar con el año 2013, por desgracia el cauce no se encontraba en presencia erosivos, sino de sedimentarios. El cauce sufrió una sedimentación a lo largo de todo su ancho de aproximadamente 18 cm entre el 24 de octubre y el 10 de diciembre de 2013. Nuevamente, a pesar de no presentar el mismo fenómeno que en el 2016 (erosión) se puede observar que el cauce no presentó cambios drásticos como los observados posterior al huracán.

6.1.2. Estación Playa Hermosa 06-03

Afectación derivada del Terremoto de Sámara en la estación 06-03

La estación Playa Hermosa presenta un comportamiento prácticamente inalterado, en donde no se observa ninguna afectación importante entre el 7 de agosto al 12 de septiembre de 2012, y la morfología del cauce presenta cambios sumamente ligeros. Lo anterior implica que la estación no fue afectada directamente por el terremoto, lo cual concuerda con el distanciamiento que presenta la estación con el epicentro del movimiento sísmico.

A continuación, se presentan las curvas derivadas del análisis de los dos días estudiados en donde se representa de manera gráfica los descrito en el párrafo anterior.

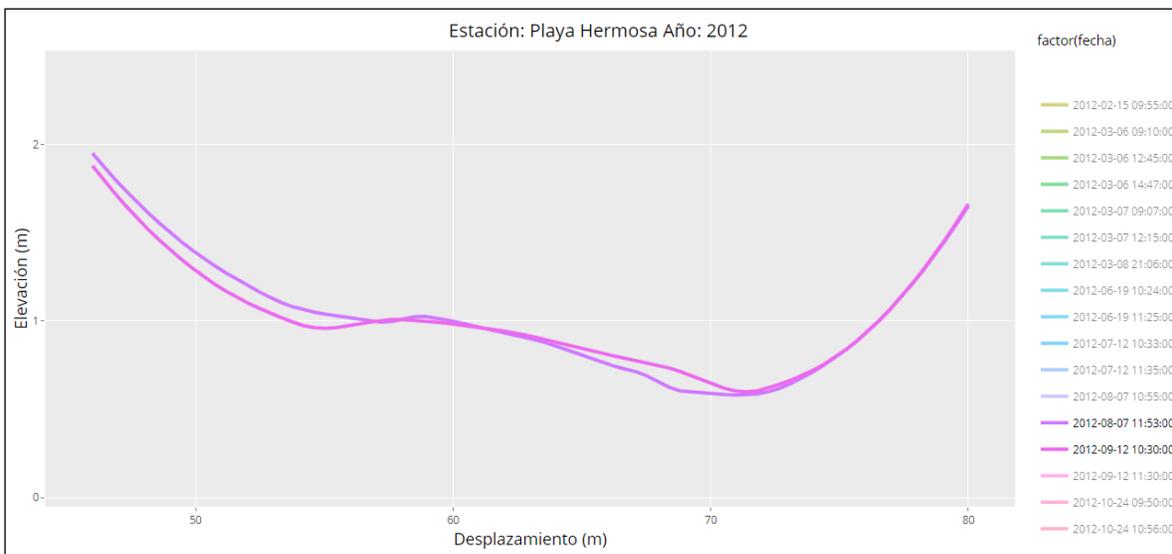


Figura 32. Cambios en las secciones transversales de la estación 06-03 durante el Terremoto de Sámara

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

6.1.3. Estación Tapantí Arriba 09-22

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 09-22

La Tormenta Tropical Tomás tuvo un comportamiento muy interesante en la estación de Tapantí Arriba. Para el día 19 de noviembre es posible observar que ha ocurrido una sedimentación bastante irregular en el centro del cauce.

Dicha sedimentación varía considerablemente a lo largo del ancho del cauce, presenta la mayor acumulación de sedimentos principalmente el centro del cauce y esta disminuye conforme se acerca a las márgenes del cauce. En el centro es posible medir valores de hasta 25 cm de diferencia por sedimentación. Por otro lado, la margen izquierda presenta una ligera erosión en comparación a octubre.

Es interesante mencionar que la morfología presenta también un cambio bastante notorio, manteniendo la forma de una cresta el 26 de octubre. Para el mes de noviembre, los resultados muestran un cambio que tiende a dos fosas.

A continuación, se presentan las secciones transversales correspondientes al periodo de afectación por la Tormenta Tropical Tomás.

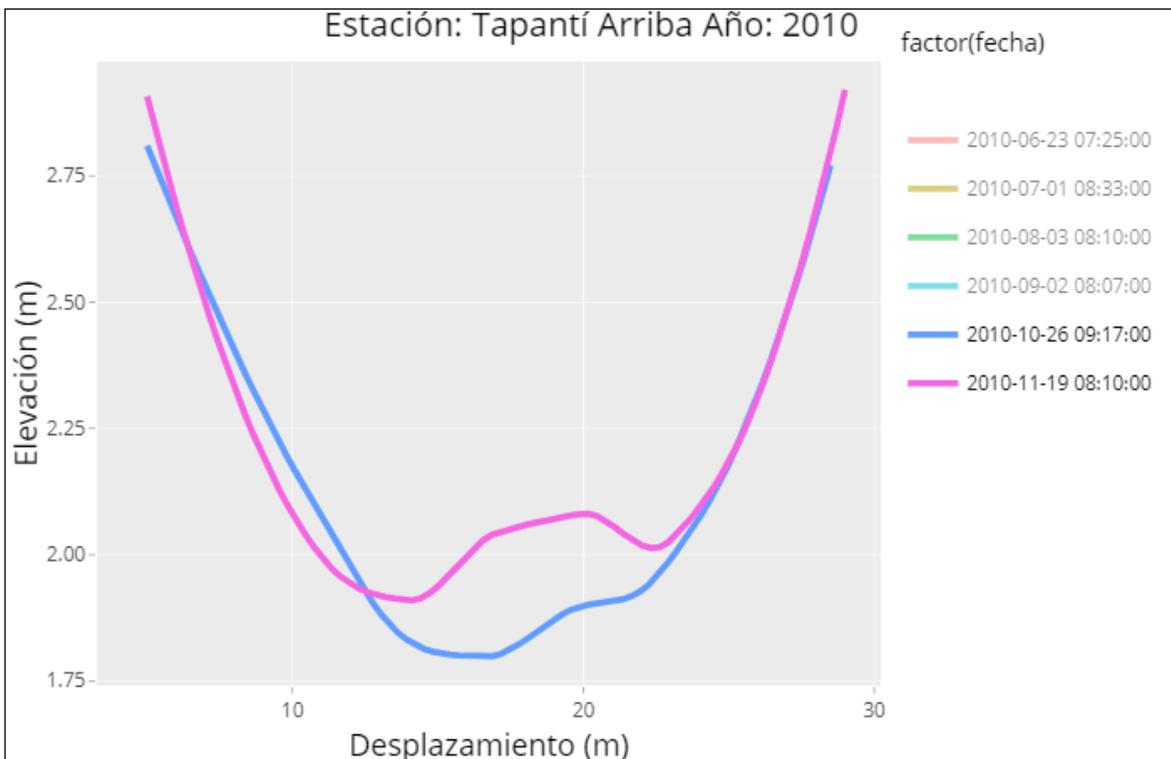


Figura 33. Cambios en las secciones transversales de la estación 09-22 durante la Tormenta Tropical Tomás

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Un aspecto interesante de esta estación es que, a pesar de encontrarse en la región del Caribe, al igual que la estación 02-22, Tapantí Arriba presenta cambios morfológicos opuestos habiéndose sedimentado en dicho periodo. El cauce puede haber sufrido una depositación súbita de materiales en este periodo proveniente de las faldas de alguna montaña, ya que esta estación se encuentra en el curso alto del cauce en donde es común este tipo de eventos debido a la saturación del suelo ante periodos prolongados de lluvia.

Por otro lado, es importante mencionar que los 25 cm depositados en el centro del río son considerables una vez se toma en cuenta las condiciones normales de los años 2012 y 2013 que contaron con la ausencia del Fenómeno del ENOS. En el 2012 se observan cambios sumamente despreciables de únicamente 2 cm mientras que para el 2013 se observan 7.6 cm. En promedio, las secciones transversales muestran evidencia de sedimentarse relativamente poco (4.8 cm), por lo que se considera que el aumento de 25 cm en este periodo es importante y considerable.

Sin embargo, no deja de ser interesante que el comportamiento observado es el contrario al esperado de una estación que se encuentra en el curso alto del río, donde hubiese sido más esperable una erosión predominante.

Afectación derivada del Terremoto de Sámara en la estación 09-22

En el caso de la estación Tapantí Arriba, se poseen datos un día antes del terremoto, y en comparación con los 22 días siguientes, el cauce se muestra erosionado, con diferencias de aproximadamente 15 cm.

Tapantí Arriba se encuentra ubicado lejos de las zonas de más afectación por el sismo cercanas a su epicentro. Debido a esto, es poco probable que los 15 cm de erosión observados se hayan derivado de la acción del sismo sobre el río, y es más probable que estas diferencias se hayan presentado por la influencia de lluvias características de la época lluviosa en este periodo.

A continuación, se presenta el gráfico correspondiente a las curvas de los días 4 de septiembre y 26 de septiembre del 2012, en donde se representa lo descrito anteriormente.

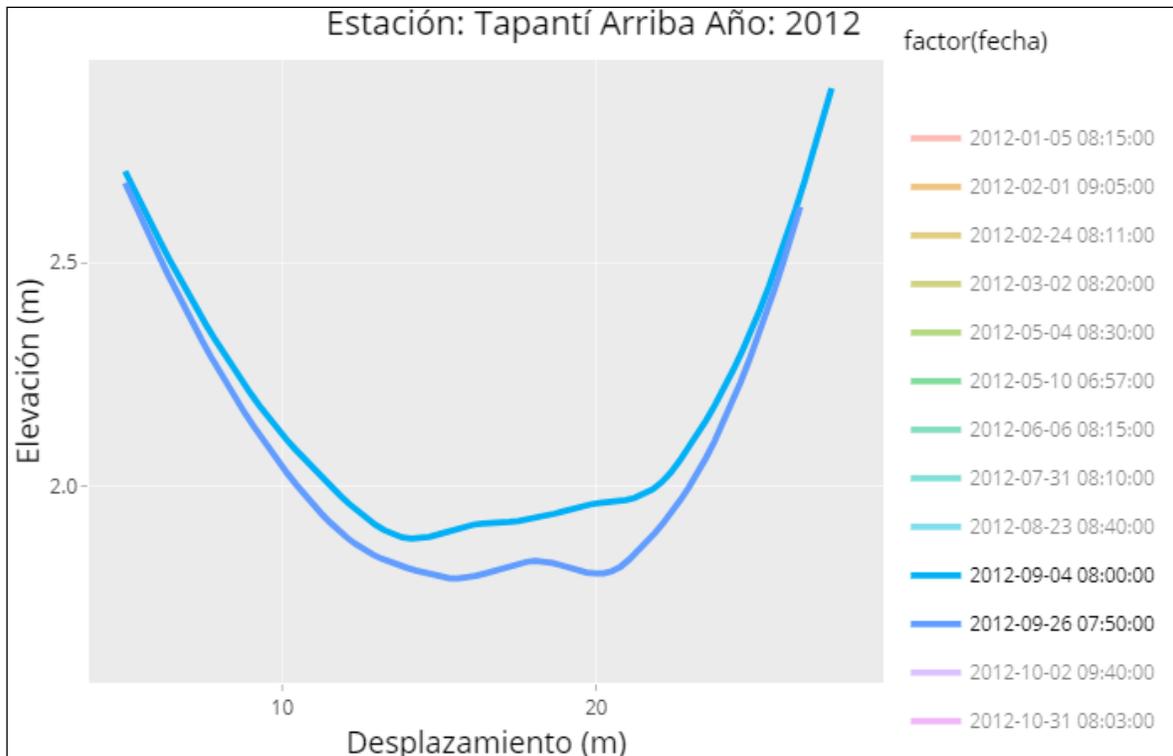


Figura 34. Cambios en las secciones transversales de la estación 09-22 durante el Terremoto de Sámara

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Afectación derivada del Huracán Otto en la estación 09-22

En Tapantí Arriba, se cuenta con información para los días 10 de noviembre antes de Otto y para el 14 de diciembre posterior al evento.

El cambio observado que ocurre en diciembre, posterior al Huracán Otto es sumamente drástico. Para el día 14 de diciembre, la sección se muestra con una erosión predominante en prácticamente todo su ancho. El centro es la única región que no sufre alteración, sin embargo, a partir del centro hacia ambas márgenes se ven cambios muy fuertes.

En el caso de la margen izquierda, la erosión alcanza valores alrededor de 30 cm de diferencia. La margen más afectada es la derecha en donde la erosión varía de forma "exponencial" conforme se aleja del centro, esta zona de la sección transversal se vio severamente afectado por el paso del agua en este periodo.

A continuación, se muestran ilustradas las secciones transversales que describen el comportamiento anteriormente mencionado.

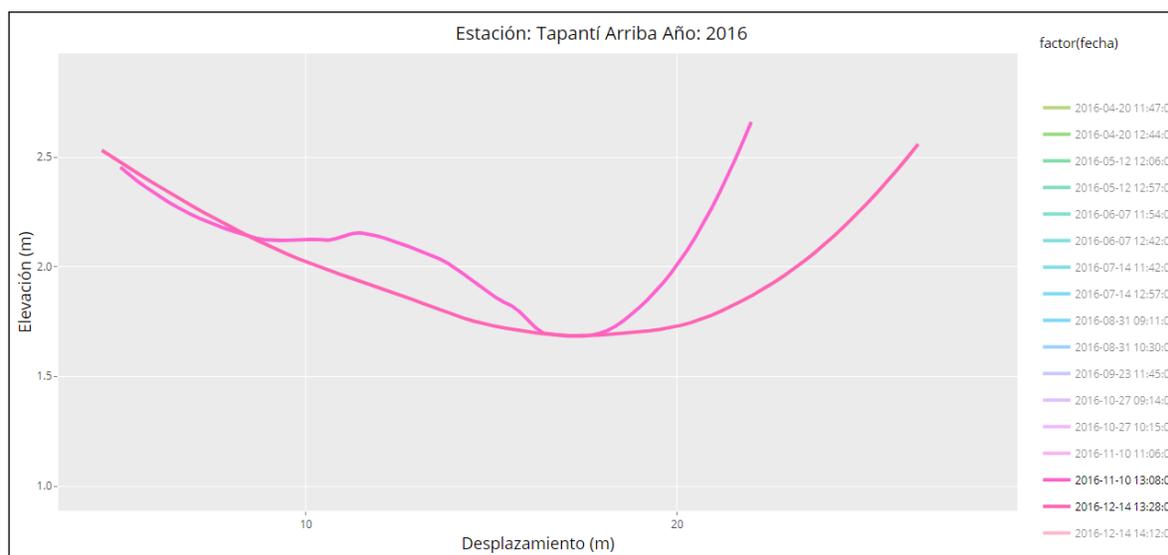


Figura 35. Cambios en las secciones transversales de la estación 09-22 durante el Huracán Otto

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Es interesante el hecho de que ambas estaciones (02-02 y 09-22) presentan resultados muy parecidos al coincidir en la erosión generalizada a lo largo de todo el cauce.

En lo correspondiente a la estación de Tapantí Arriba, esta estación mostró un comportamiento común de ríos montañosos de mayor pendiente. El cauce aparenta haberse erosionado posterior al Huracán Otto con cambios importantísimos en su morfología como permite observar la figura. Se logra apreciar como posterior al huracán, el lecho que mantenía fue lavado agresivamente, de manera que incluso llega a correr la margen derecha de las curvas 4.5 m hacia la derecha, y erosionando parte de la izquierda con valores que alcanzan los 25 cm.

Al comparar los resultados del Huracán Otto con el año 2012, utilizado como punto de comparación en el análisis, la estación fue testigo también de erosión en donde se observan valores que rondan los 12 cm -15 cm. Las diferencias con la margen izquierda posterior al huracán no son tan diferentes, aunque sí presentan un aumento considerable de 10 cm. En donde se aprecian las mayores diferencias, es en la margen derecha en donde para el año

2012 la sección prevalece con una morfología muy similar a la que presentaba en años anteriores, como se muestra en la figura a continuación. Por desgracia no es posible comparar resultados con el 2013 y 2014 debido a un faltante de información en la estación para los meses de noviembre y diciembre.

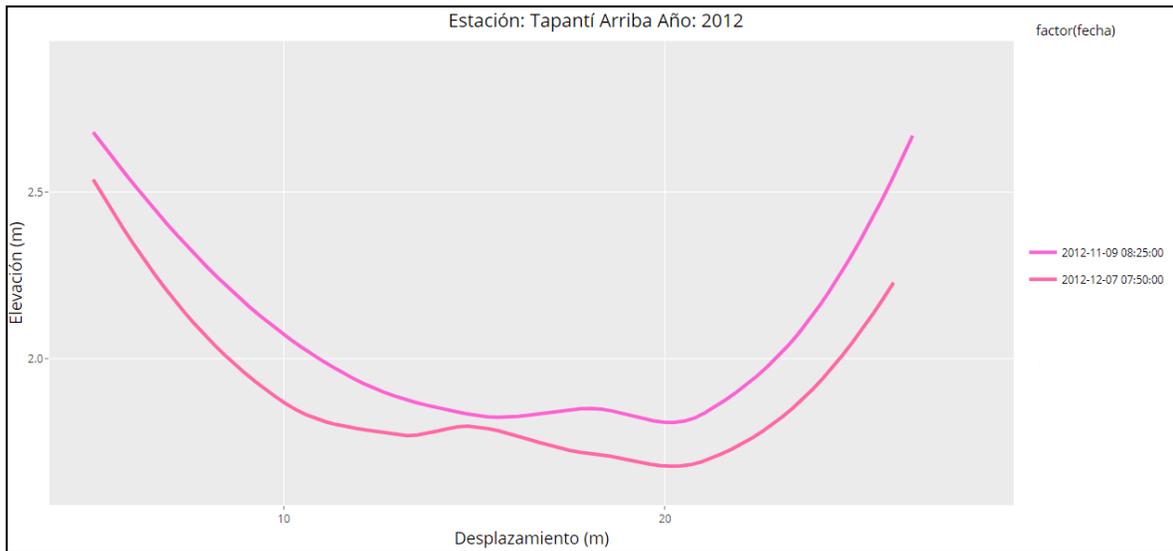


Figura 36. Cambios entre nov – dic 2012 en la estación 09-22

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

En general la Vertiente del Caribe aparenta haber sido afectada considerablemente por el Huracán Otto, a pesar que solamente se cuenta con evidencia de dos estaciones. No obstante, ambas estaciones mostraron un comportamiento similar ante el evento. Sí se recomendaría analizar más estaciones, de distintas cuencas tanto aguas arriba como aguas abajo, para determinar si presentan comportamientos similares a Pandora y Tapantí.

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 09-22

Desafortunadamente en el caso de la Vertiente del Caribe, solamente se cuenta con información para la estación Tapantí Arriba (09-22), por lo que no va ser posible realizar comparaciones de datos entre la misma vertiente.

En Tapantí Arriba se tiene bien registrado el paso de la Tormenta Tropical Nate, ya que se tienen los datos correspondientes a 5 días después del 12 de octubre, que permite apreciar el efecto prácticamente inmediato que generó la tormenta.

Al realizar la comparación de los resultados entre las curvas del 1 de septiembre y 17 de octubre, es posible observar un proceso erosivo agresivo en donde se observan cambios de hasta 63 cm en la sección más profunda de la fosa, mientras que en la margen derecha se logra registrar una erosión un poco menos marcada con diferencias de aproximadamente 28 cm.

En los meses posteriores al evento, se observa que la morfología de las secciones transversales en noviembre y diciembre no varían significativamente en comparación con la sección transversal observada en octubre.

A continuación, se presenta el gráfico que presenta las secciones transversales correspondientes a octubre de 2017 – diciembre de 2017, correspondientes a las secciones transversales estudiadas en la estación 09-22.

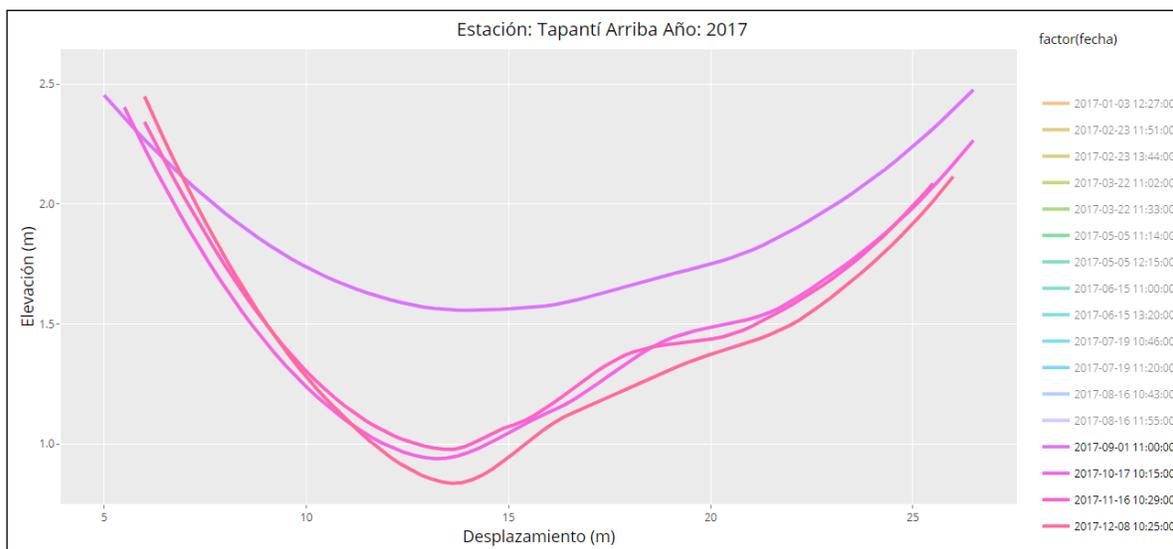


Figura 37. Cambios en las secciones transversales de la estación 09-22 antes y después de la

Tormenta Tropical Nate

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2021

La estación Tapantí Arriba, muestra una evidente afectación debido a la tormenta tropical, en donde sus efectos prevalecen meses después de pasado el evento hidrometeorológico. Al igual que en eventos estudiados previamente en el presente capítulo, muestra el mismo comportamiento erosivo propio de ríos de montaña en donde la erosión domina sobre el fondo del cauce debido a las altas pendientes.

Los cambios observados con la Tormenta Tropical Nate muestran una afectación mucho más fuerte que con el Huracán Otto, en donde los 30 cm de erosión provocados en las márgenes del río son considerablemente menores que los 63 cm observados en octubre de 2017. Lo anterior coincide con las principales afectaciones previstas para ambos fenómenos, en donde la región Caribe se encontraba incluida entre las zonas de mayor afectación con alertas rojas en el país para la Tormenta Tropical Nate, caso contrario a Otto en donde la alerta roja se estableció principalmente para la Zona Norte y el Pacífico Sur.

Al comparar los resultados obtenidos en la estación anterior con los años 2012, 2013 y 2014, es posible observar que, en dichos años con condiciones meteorológicas normales para el mes de octubre, el cauce no presentó variaciones extraordinarias como las observadas en el análisis de octubre de 2017 con el impacto de Nate. Las mayores diferencias entre los meses de setiembre y octubre observadas variaron entre los 5 cm - 9 cm (sedimentación) mostrando condiciones estables en dicho periodo. A continuación, se presentan los 3 años mencionados y su comportamiento en el periodo de interés para la Tormenta Tropical Nate.

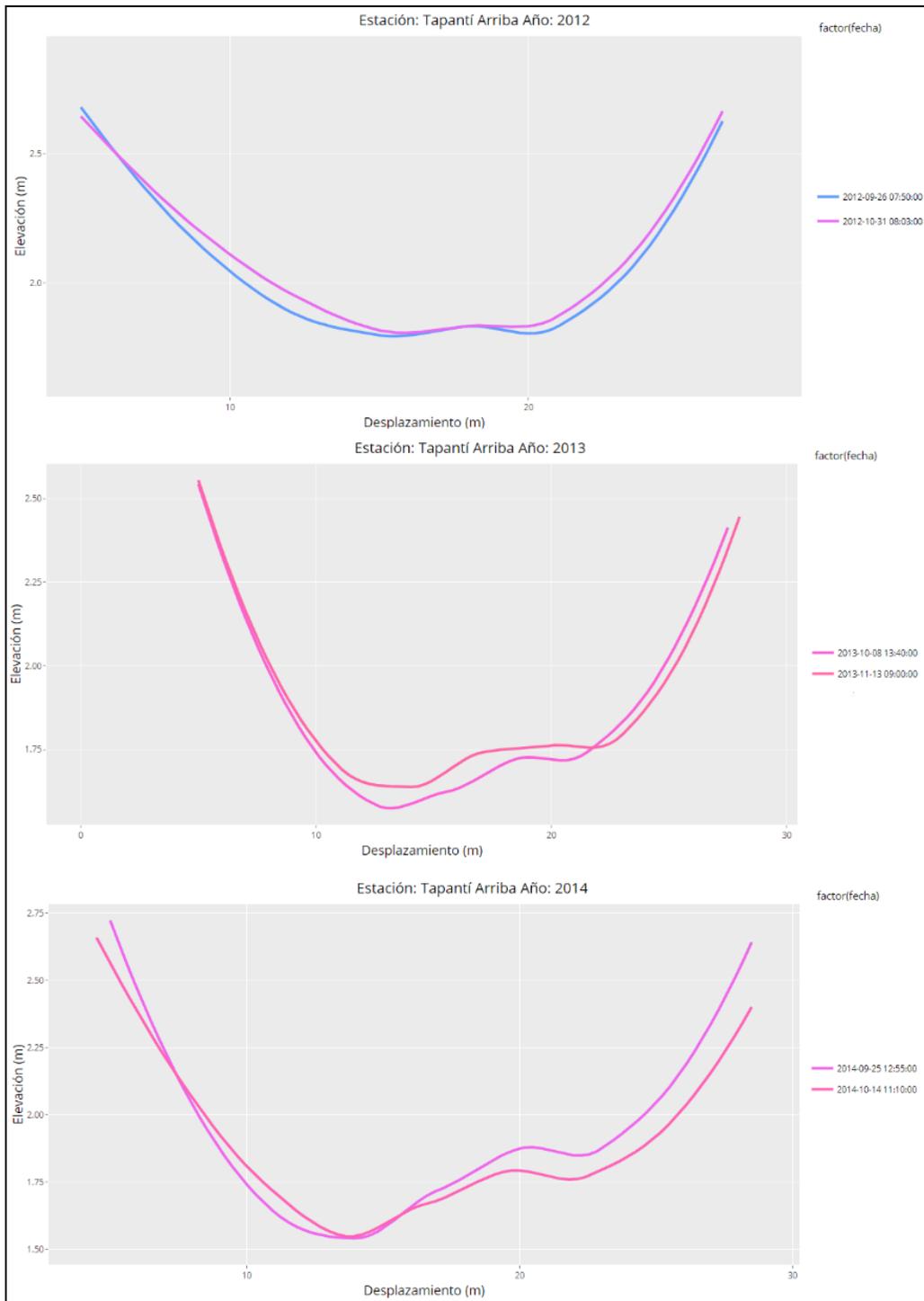


Figura 38. Secciones transversales de octubre y setiembre en la estación 09-22, años: 2012, 2013 y 2014

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2021

6.1.4. Estación Hamburgo 09-39

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Alma en la estación 09-39

Específicamente para la estación 09-39, esta cuenta con un buen registro para este periodo en específico, los primeros datos que tiene dicha estación pertenecen al 13 de mayo del 2008, mientras que los datos posteriores corresponden al día 4 de junio del 2008, es por esto que, esta estación cuenta con información bastante representativa de los cambios producidos en la sección debido a la tormenta tropical.

En la figura a continuación, se presenta la comparación entre los meses de mayo y junio del año 2008. En la imagen es posible observar que para ambos meses se cuentan con tres tomas de datos a diferentes horas. Para efectos del presente trabajo, así como mantener las imágenes lo más limpias posibles, se ha procurado trabajar con la última medición tomada a no ser que se considere pertinente considerar alguna otra medición a lo largo del análisis.

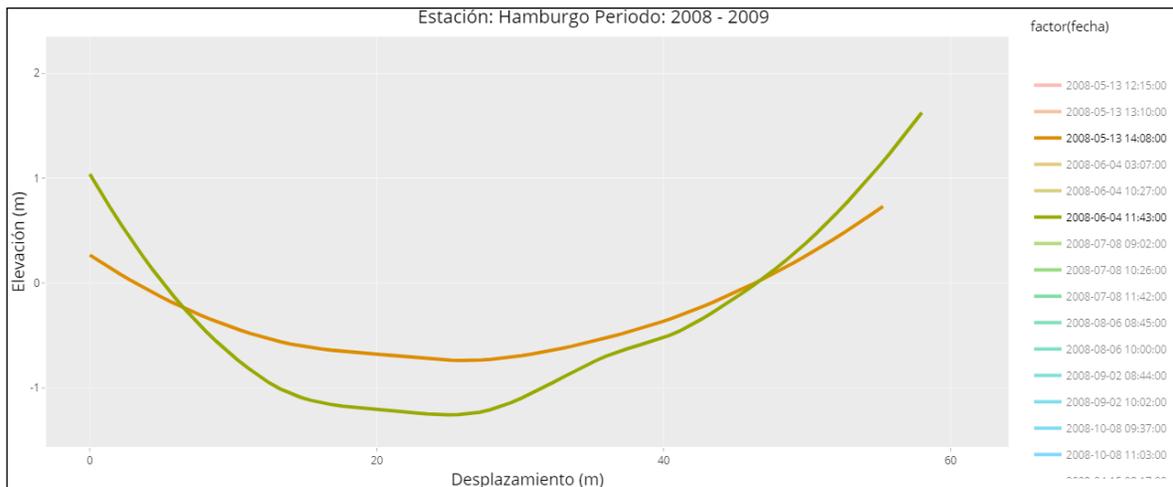


Figura 39. Cambios en las secciones transversales en el periodo de la Tormenta Tropical Alma en la estación 09-39

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Como es posible observar, el cambio presentado después de que se presentó en el ciclón tropical, fue una disminución en el nivel de la superficie del cauce, es decir hubo un proceso

erosivo bastante evidente. Se presentaron cambios importantes cercanos a los 53 cm cerca del centro del cauce, disminuyendo gradualmente conforme se acerca a las márgenes.

Los 53 cm de erosión observados en mayo pueden ser comparados con los resultados del 2009 y 2010, dos años en los que se presenta la coincidencia de no presentar efectos del Niño y la Niña, y por ende representa un parámetro más fiable sobre las condiciones normales que experimenta el cauce. En el año 2009 se presentó una disminución del lecho (erosión) de aproximadamente 31 cm, y en el 2010 45 cm, con un promedio de 38 cm entre los dos años. Como se puede observar existe una diferencia interesante de unos 15 cm por encima de las condiciones normales.

El cambio erosivo que aconteció en mayo del 2008, indujo que el cauce se mantuviera con curvas por debajo de la del mes de mayo por el resto del 2008 (al menos hasta octubre que es el último mes con información del 2008), y no es hasta el 15 abril del 2009 que se puede observar una curva que muestra evidencia de sedimentación, por encima de los niveles que mantenía el cauce previo a la Tormenta Tropical Alma, sin embargo debido a un déficit de información entre octubre de 2008 y abril de 2009, no se puede tener certeza completa sobre en qué momento comienza a persistir la sedimentación en el cauce.

Es importante mencionar que la erosión acontecida en la estación de Hamburgo, no es consistente con respecto a lo mencionado en el Capítulo 5 para la Tormenta Tropical Alma. Retomando dicho capítulo, se mencionaba que el mes de mayo, había sido un mes con abundantes precipitaciones para la región del Pacífico e incluso la Zona norte, en donde se introdujo la estación lluviosa más temprano de lo normal, no obstante, la región del Caribe tuvo un déficit de lluvias. La estación de Hamburgo se encuentra ubicada en dicha región, por lo que se esperaría que los efectos de la Tormenta Tropical no sean tan relevantes, sin embargo, sí se observa una disminución del lecho y posiblemente el cambio morfológico más importante de todo el 2008.

Esta discrepancia podría explicarse a partir de los registros de precipitación con los que cuenta el Instituto Meteorológico Nacional para el mes de mayo del 2008. En el Boletín Meteorológico de dicho mes, se cuenta con información climática recopilada por las estaciones termo pluviométricas del IMN. En la región del Caribe, la estación CATIE en Turrialba (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) y la estación Ingenio Juan Viñas, cuentan con mediciones de precipitación de 346.2 mm y 347.3 mm de lluvia

mensual respectivamente. Ambas estaciones se encuentran ubicadas en la misma cuenca que la estación de Hamburgo en la cuenca del Río Reventazón a aproximadamente 15 km de distancia y ambas difieren considerablemente de estaciones como la del Aeropuerto de Limón con únicamente 82.8 mm.

En el mapa a continuación se presentan las altitudes correspondientes a la Cuenca del Río Reventazón en donde se ubican todas las estaciones mencionadas en el presente análisis.

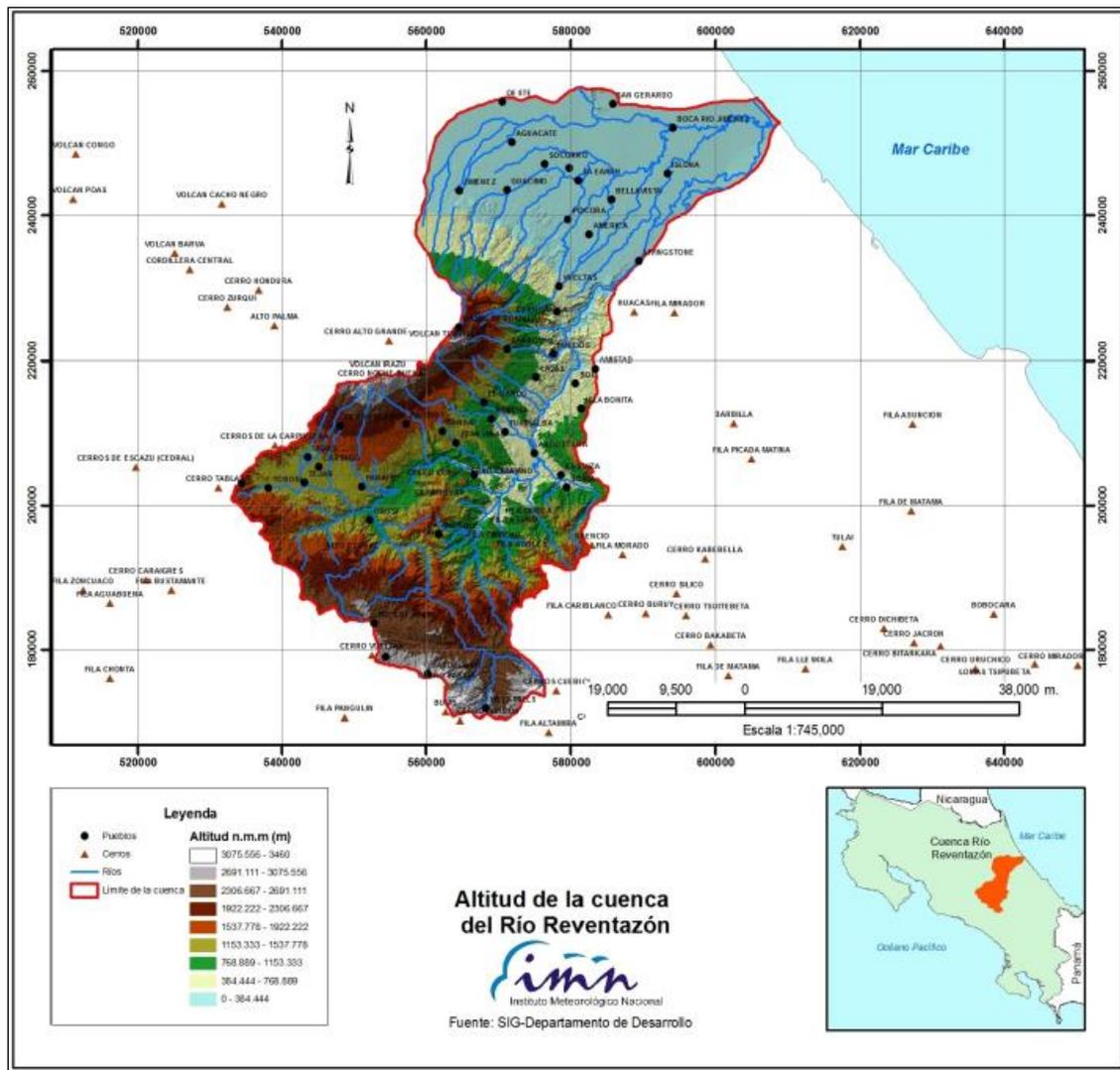


Figura 40. Cuenca del Río Reventazón

Fuente: IMN, 2011

Al comparar la lluvia mensual en el curso alto del cauce con datos en otras regiones del país que fueron más afectadas por la tormenta como es el caso del Valle Central que llegan a variar entre 294.5 mm (Volcán Irazú) y 665.6 mm (Santa Lucía, Heredia), es fácil comprender que la afectación que los cauces pertenecientes a la cuenca del Río Reventazón va a diferir de otras regiones del Caribe, y es por esto que es posible observar alteraciones morfológicas en el fondo por la acción de un incremento en el caudal del río. Es interesante mencionar también que la posición de Hamburgo es muy cercana a la desembocadura, sin embargo, en lugar de observar procesos de sedimentación como es usual del curso bajo con poca energía, el resultado observado fue una marcada erosión.

Afectación derivada Terremoto de Cinchona en la estación 09-39

Como se mencionó en el análisis de la Tormenta Tropical Alma, la estación de Hamburgo se encuentra localizada en la Cuenca del Río Reventazón.

La estación de Hamburgo presenta una carencia de mediciones en este periodo en específico. Esta estación cuenta con un faltante de información en los meses noviembre (2008), diciembre (2008), enero (2009), febrero (2009) y marzo (2009). Para el terremoto de Cinchona es imprescindible contar con los meses de enero y febrero, ya que los efectos de un posible flujo de lodos, producto de algún tipo de desprendimiento aguas arriba, el cual se apreciaría fácilmente en el mes siguiente y con una esperable sedimentación al encontrarse en el curso bajo del cauce, en donde hay menos energía.

Si bien lo descrito en el párrafo anterior, es lo que se logra apreciar en la figura a continuación, no hay suficiente evidencia contundente debido a la falta de información en los meses más importantes, por lo que no es posible determinar si la sedimentación observada haya sido inducida por algún efecto indirecto derivado del terremoto.

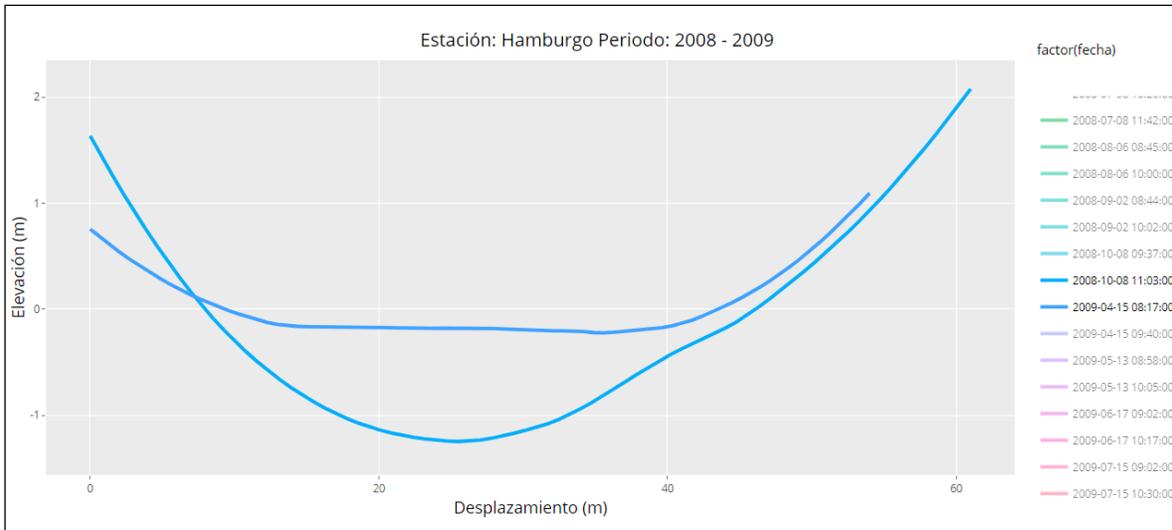


Figura 41. Cambios en las secciones transversales de la estación 09-39, antes y después del terremoto de Cinchona

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

En la figura es posible observar las curvas correspondientes a los días 8 de octubre de 2008 y 15 de abril de 2009. La curva más elevada corresponde a abril, evidenciando que existió una evidente sedimentación durante dicho periodo. La sedimentación que se presentó durante este tiempo es bastante fuerte, llegando a alcanzar valores de hasta 1.06 m y disminuyendo conforme se acerca a las orillas. Sin el embargo, el periodo de análisis entre ambas curvas es muy grande y por ende la probabilidad de que la sedimentación presente otro o diversos orígenes es mayor y no se le puede atribuir únicamente al terremoto.

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 09-39

En la estación de Hamburgo es posible observar un aumento importante en la cantidad de sedimentos depositados en el fondo del cauce. Estos aumentos se presentan principalmente en la margen derecha, y región central del cauce con una menor intensidad.

La deposición de sedimentos no es uniforme a lo ancho del cauce, y se registran valores máximos alrededor de los 63 cm al acercarse a la margen derecha. En el centro se registran cambios cercanos a 34 cm disminuyendo conforme se acerca a la margen izquierda.

A continuación, se presenta el gráfico correspondiente a las curvas que caracterizan el periodo de afectación durante la Tormenta Tropical Nate.

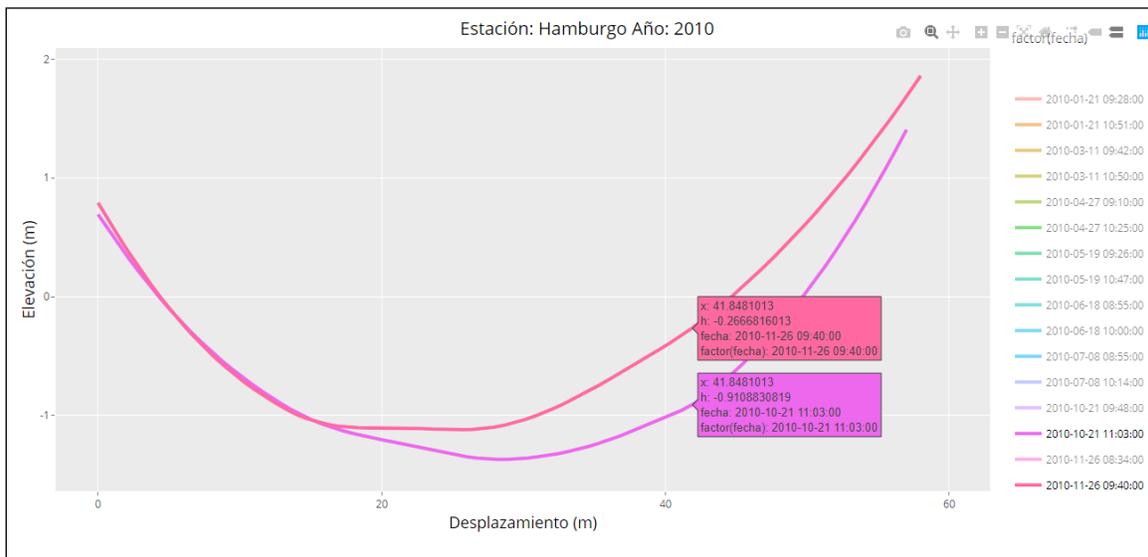


Figura 42. Cambios en las secciones transversales de la estación 09-39 durante la Tormenta Tropical Tomás

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

En la estación anterior (Tapantí Arriba), se logró observar una sedimentación a lo ancho del cauce, dicha estación se encuentra aguas arriba de Hamburgo, por lo que es interesante que ambas estaciones presentaron el mismo comportamiento ante el transporte de sedimentos que trajo consigo este fenómeno.

Desafortunadamente, no se encontraron datos comparativos con las condiciones normales que presentaría el cauce, fuera de fenómenos meteorológicos importantes, ya que el periodo de información únicamente abarca el periodo de 2008 – 2011. Los únicos meses fuera de los efectos del ENOS en dicho periodo son abril y mayo, tanto del año 2009 y 2010, así como junio del 2009, no obstante, no representan una buena comparación para el mes noviembre al presentar estos un comportamiento característico de la época seca en nuestro país y no presentar un régimen de lluvias similar.

Hamburgo es una estación que se encuentra muy cerca de la zona de desembocadura, por lo que es esperable que dicha estación presente comportamientos de sedimentación al

encontrarse en una zona con baja energía al tener menos pendiente. Es por esta razón que, a pesar de que ambas estaciones presentan un comportamiento similar, la estación de Hamburgo es la que presenta mayores magnitudes de deposición de sedimento, ya que es de esperar que en Tapantí Arriba, el flujo desarrolle mayores velocidades que permiten romper la cohesión de los materiales depositados y por ende llevarlos aguas abajo.

6.1.5. Análisis de la Vertiente del Caribe con respecto al Terremoto de Sámara

La Vertiente del Caribe es posiblemente la que mostró más variabilidad en comparación con las otras dos vertientes. De hecho, de la comparación realizada entre meses, para todas las 14 estaciones, la estación de Pandora (02-02) y Tapantí Arriba (09-22) son las que mostraron cambios en la morfología de manera más pronunciada. No obstante, en el caso de la estación de Pandora, hace falta información para estudiar la evolución de las secciones transversales, y poder tener certeza de que los cambios más significativos presentados del proceso de sedimentación (valores de hasta 40 cm), puedan haber sido derivados del sismo.

En el caso de la estación Tapantí Arriba, el proceso que se observa es contrario al observado en Pandora, es un proceso erosivo, típico de regiones de altitudes altas como en esta estación. Además, cabe mencionar que los valores de 15 cm tampoco representan anomalías en este tipo de procesos. En este periodo la Oscilación de Madden – Julian y la falta de ciclones tropicales (principalmente en el mes de septiembre) debilitó el periodo de lluvias en el país, por lo que es de esperar que las diferencias en elevación de las secciones transversales no sean tan significativas.

Finalmente, la estación de Playa Hermosa cuenta con información bastante representativa para el periodo de análisis, y esta estación no muestra cambios en absoluto en su morfología mostrándose prácticamente inalterada, y por ende brindando evidencia que el Terremoto de Sámara no afectó significativamente la región del Caribe costarricense.

6.2. Estaciones de la Vertiente Norte

Las estaciones de la Vertiente Norte muestran una documentación bastante completa para el periodo en que ocurrió el Huracán Otto, y muestra resultados un tanto inesperados.

Se presentan a continuación los resultados obtenidos para cada una de las 3 estaciones en los eventos en que se cuenta con información.

6.2.1. Estación Veracruz 12-04

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 12-04

En la estación de Veracruz se cuentan con datos para los días 22 de octubre y 17 de noviembre a pocos días de ocurrida la tormenta tropical. Se observa una pequeña sedimentación en la margen derecha, así como en el centro, esta última siendo un tanto irregular, y llegando a alcanzar valores de aproximadamente 12 cm en algunas de las regiones.

A continuación, en la siguiente figura se muestran las secciones transversales utilizadas para caracterizar la tormenta tropical en la estación de Veracruz.

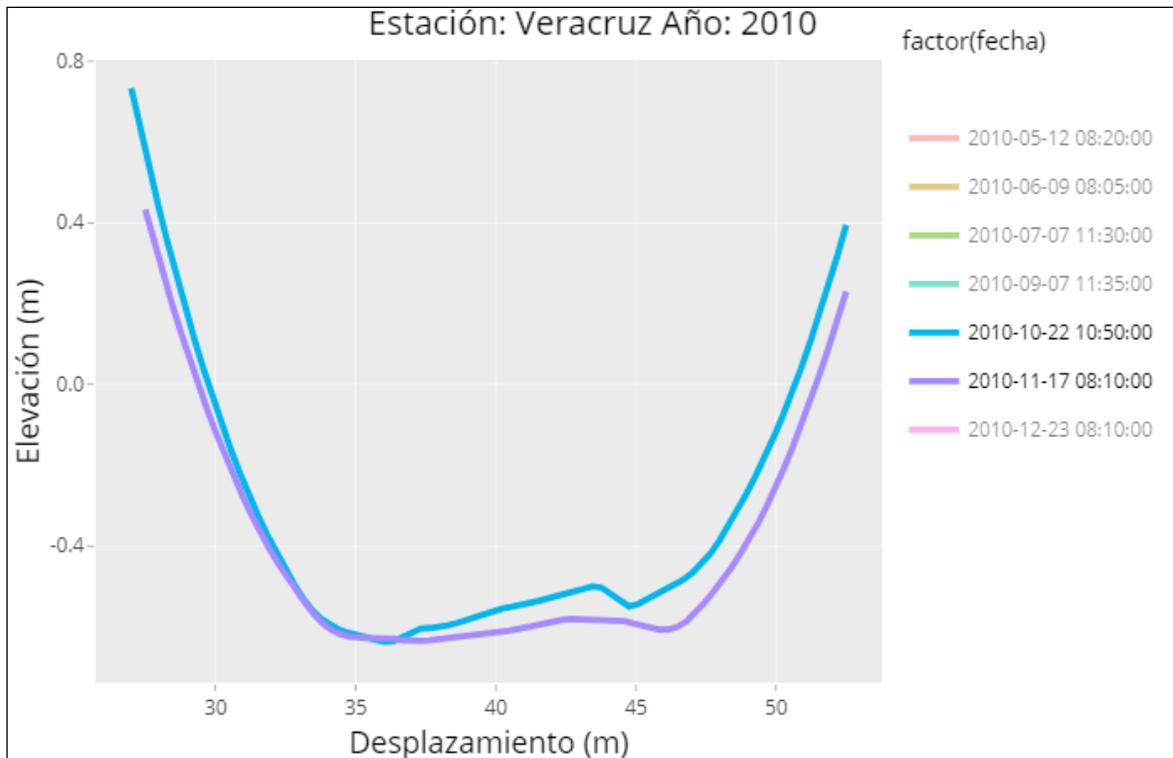


Figura 43. Cambios en las secciones transversales de la estación 12-04 durante la Tormenta Tropical Tomás

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Los resultados obtenidos para estación de Veracruz no muestran indicios de una afectación importante debido a la Tormenta Tropical Tomás. Como se anteriormente, las diferencias más importantes obtenidas en este periodo fueron de alrededor de 12 cm, y al estudiar las secciones del año 2010, es posible determinar que el comportamiento observado en estos meses no fue para nada inusual, ya que como se muestra en la figura a continuación, las diferencias con respecto a los demás meses fueron bastante similares y no hubo anomalías importantes. Las diferencias más grandes observadas entre los meses del mismo año no llegan a superar los 20 cm.

Finalmente, al comparar con el año 2012, se observan diferencias muy similares debido a sedimentación en el mismo mes de noviembre (alrededor de unos 12 cm – 15 cm), en donde se reafirma que la influencia debido a la Tormenta Tropical Tomás fue mínima en esta estación.

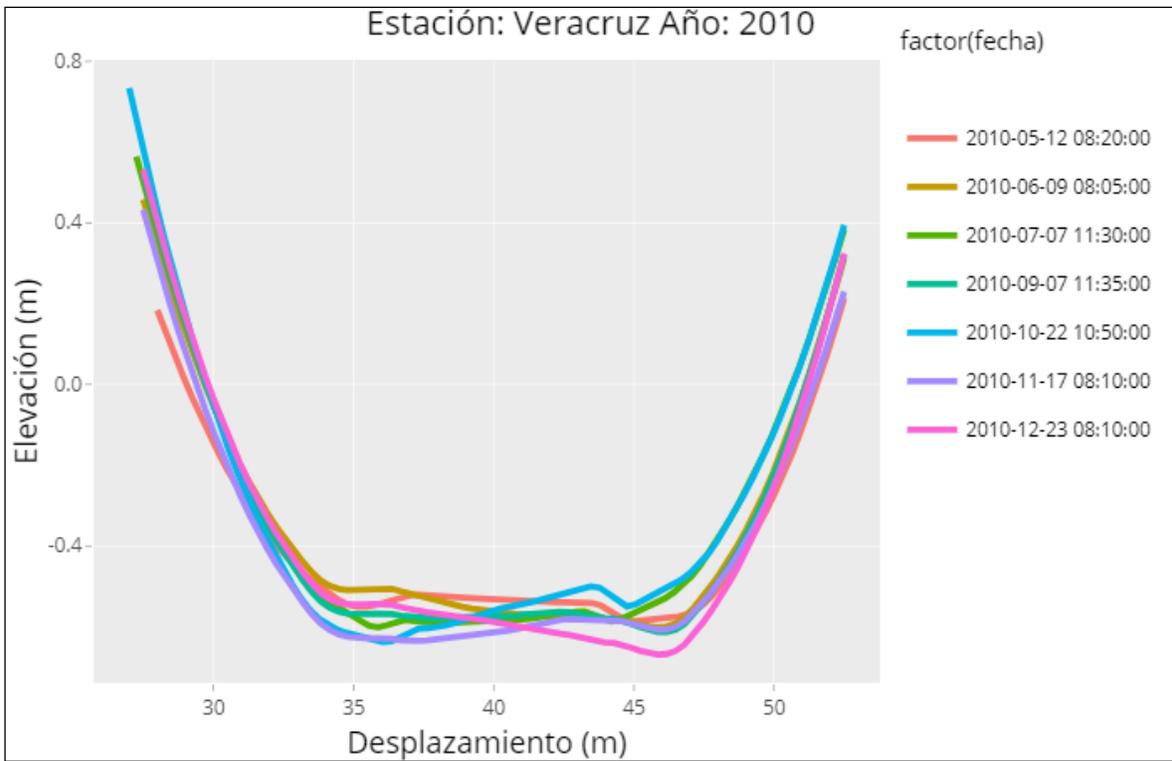


Figura 44. Cambios en las secciones transversales de la estación 12-04 durante el año 2010

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Afectación derivada del Terremoto de Sámara en la estación 12-04

No se observa ningún cambio morfológico significativo en el cauce, mantiene prácticamente la misma morfología desde el 23 de agosto hasta el 20 de octubre. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la estación 12-04 debido al Terremotos de Sámara.

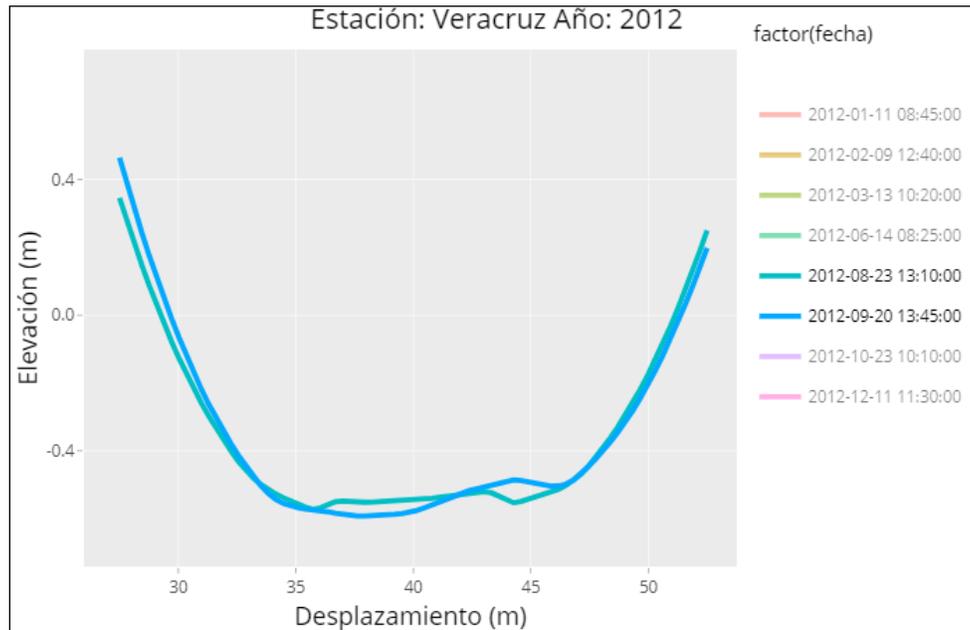


Figura 45. Cambios en las secciones transversales de la estación 12-04 durante el Terremoto de Sámara

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Afectación derivada del Huracán Otto en la estación 12-04

El Huracán Otto no aparenta haber presentado ninguna afectación importante entre los días 15 de noviembre y 15 de diciembre del 2016, indicando que la afectación provocada por el Huracán Otto fue mínima. Las diferencias más marcadas llegaron ser de aproximadamente 13 cm de erosión.

A continuación, se presentan los resultados representativos del periodo utilizado para analizar los efectos del Huracán Otto en la estación.

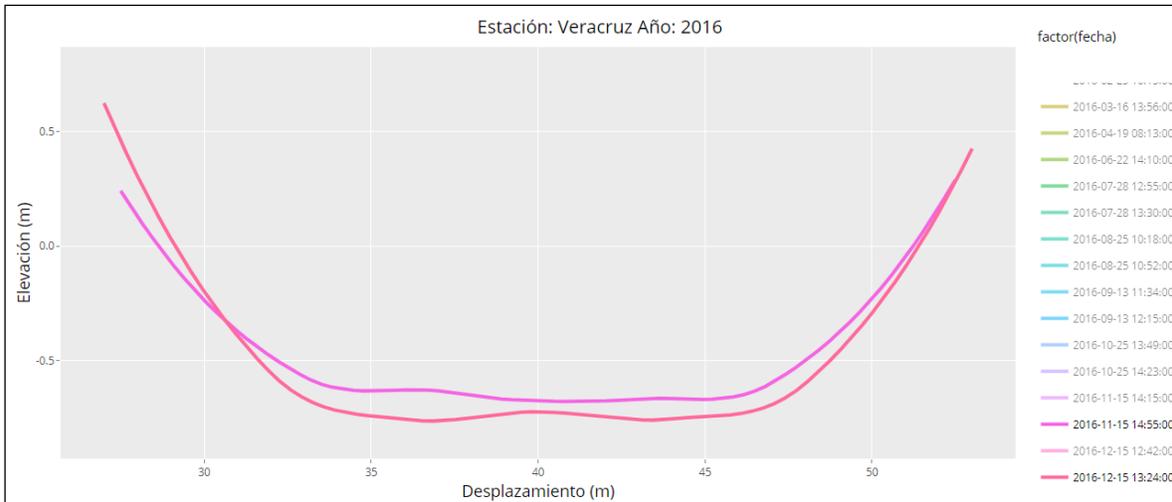


Figura 46. Cambios en las secciones transversales de la estación 12-04 durante el Huracán Otto

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 12-04

En la presente estación se presenta la particularidad de que se cuenta con datos muy cerca de los primeros días de afectación de la tormenta, sin embargo, no se cuenta con información para noviembre y diciembre, por lo que no se puede observar el efecto directo que tiene Nate en el cauce.

Analizando las curvas correspondientes al 11 de octubre del 2017 y 9 de enero de 2018, el cauce está ante la presencia de un proceso erosivo, sin embargo, no hay certeza de haber sido derivado de la tormenta tropical. Dicho proceso no es de gran magnitud puesto que las mayores diferencias rondan los 20 cm.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la estación de Veracruz para la Tormenta Tropical Nate.

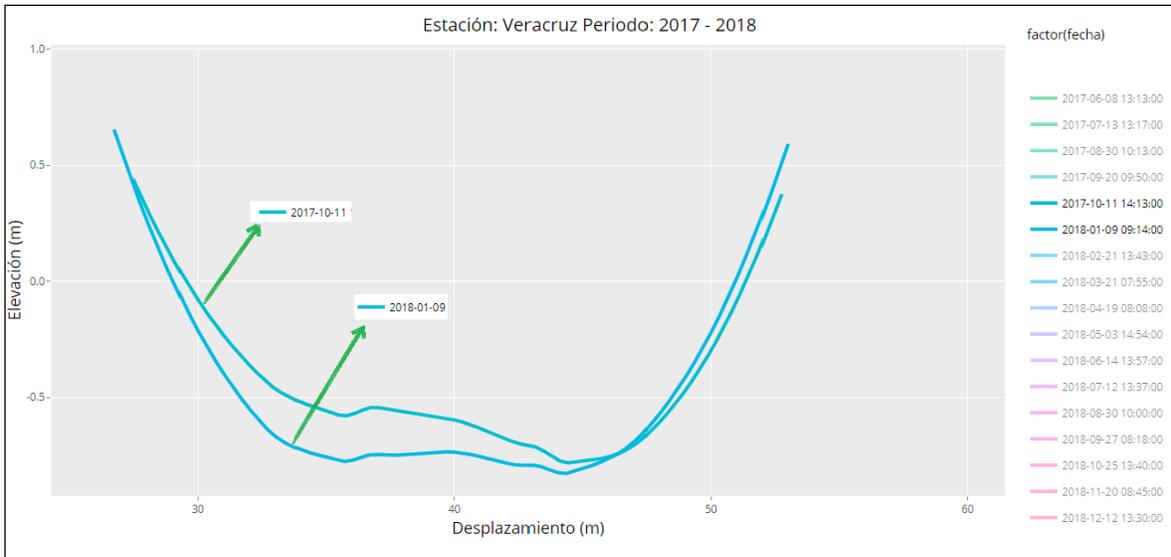


Figura 47. Cambios en las secciones transversales de la estación 12-04 antes y después de la Tormenta Tropical Nate

Elaborado por: Alfaro, 2021

Fuente: ICE, 2020

6.2.2. Estación Peñas Blancas 14-05

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 14-05

La estación de Peñas Blancas, cuenta con uno de los mejores registros de información para este evento en particular. Se cuenta con datos de:

- 03 de noviembre de 2012.
- 26 de noviembre de 2010.
- 27 de noviembre de 2010.
- 10 de diciembre de 2010.

Una vez que se analiza la información se observa que la morfología del río, no presenta ningún tipo de variación importante y se mantiene prácticamente igual a pesar que se tienen dos mediciones en el mismo mes, antes y después del evento. Las diferencias más grandes observadas después del evento superan apenas los 5 cm entre curvas, manteniéndose prácticamente en el centro, y con pequeños indicios de sedimentación en las márgenes.

A continuación, se procede a mostrar las secciones transversales estudiadas para este evento.

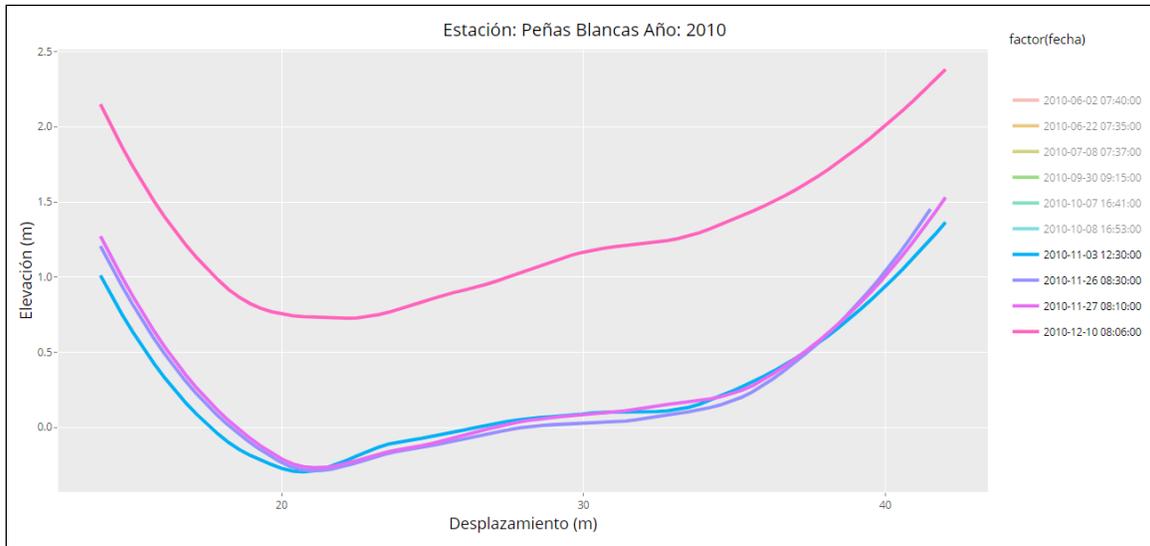


Figura 48. Cambios en las secciones transversales de la estación 14-05 durante la Tormenta

Tropical Tomás

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

En la figura anterior, se muestran los resultados de las 4 fechas mencionadas anteriormente para la estación 14-05. El gráfico muestra claramente como las primeras 3 secciones correspondientes al mes de noviembre son sumamente similares y la morfología no cambia significativamente en un periodo de 24 días de documentación, por lo que la estación de Peñas Blancas no muestra alteraciones importantes debido a la Tormenta Tropical Tomás.

Sin embargo, como se observa en la misma figura, la curva con tonalidad rozada sobresale de las demás secciones transversales, y esta corresponde a la curva del 10 de diciembre. Esta curva es muy interesante ya que muestra diferencias muy significativas que llevan alcanzar valores de hasta 1.08 m de diferencia (de sedimentación) y este cambio no aparenta haber sido provocado por la Tormenta Tropical Tomás. El boletín mensual del IMN para diciembre de 2010 menciona: "El mes de diciembre presentó la típica disminución de las precipitaciones en el Pacífico y Valle Central del País, por el contrario, hubo una condición más lluviosa en el Caribe y Zona Norte."

Por lo visto, en la Zona Norte hubo una intensificación en las lluvias que pudieron haber generado algún tipo de evento de desprendimiento de material, así como aportes importantes de sedimentos de toda la cuenca. La estación de Peñas Blancas se encuentra

en el curso bajo de la cuenca en las altitudes más bajas (20 msnm – 275.6 msnm), lo cual facilita que el río a presente procesos aluviales sedimentarios. Es posible observar que los cambios en altitud en esta cuenca (Cuenca del Río San Carlos) son bastante súbitos como se muestra en el mapa a continuación, y gran parte del área de la cuenca cuenta con altitudes bajas. Estas características ayudan a que los sedimentos bajen con mayor facilidad por las zonas de mayores pendientes, y se depositen en las regiones con menor energía.

Al estudiar el comportamiento en el mes de noviembre y diciembre para los años sin afectación del Fenómeno del ENOS (2012 y 2013), y en ausencia de fenómenos meteorológicos importantes, se observa que noviembre suele ser un mes que se mantiene poco perturbado en condiciones normales, para esta estación, por lo que los cambios suelen ser muy pequeños. Por otro lado, diciembre presenta cambios en ambos años alrededor de los 15 cm, por lo que la sedimentación observada en el 2010 posterior a la tormenta tropical es completamente anómala.

A pesar de que la gran magnitud de sedimentos observados en este mes no es normal, no es posible determinar si la Tormenta Tropical Tomás influyó en este suceso o si es debido únicamente a las lluvias posteriores, debido a las limitaciones que establecen las distintas fuentes de información con que se cuentan para el presente trabajo.

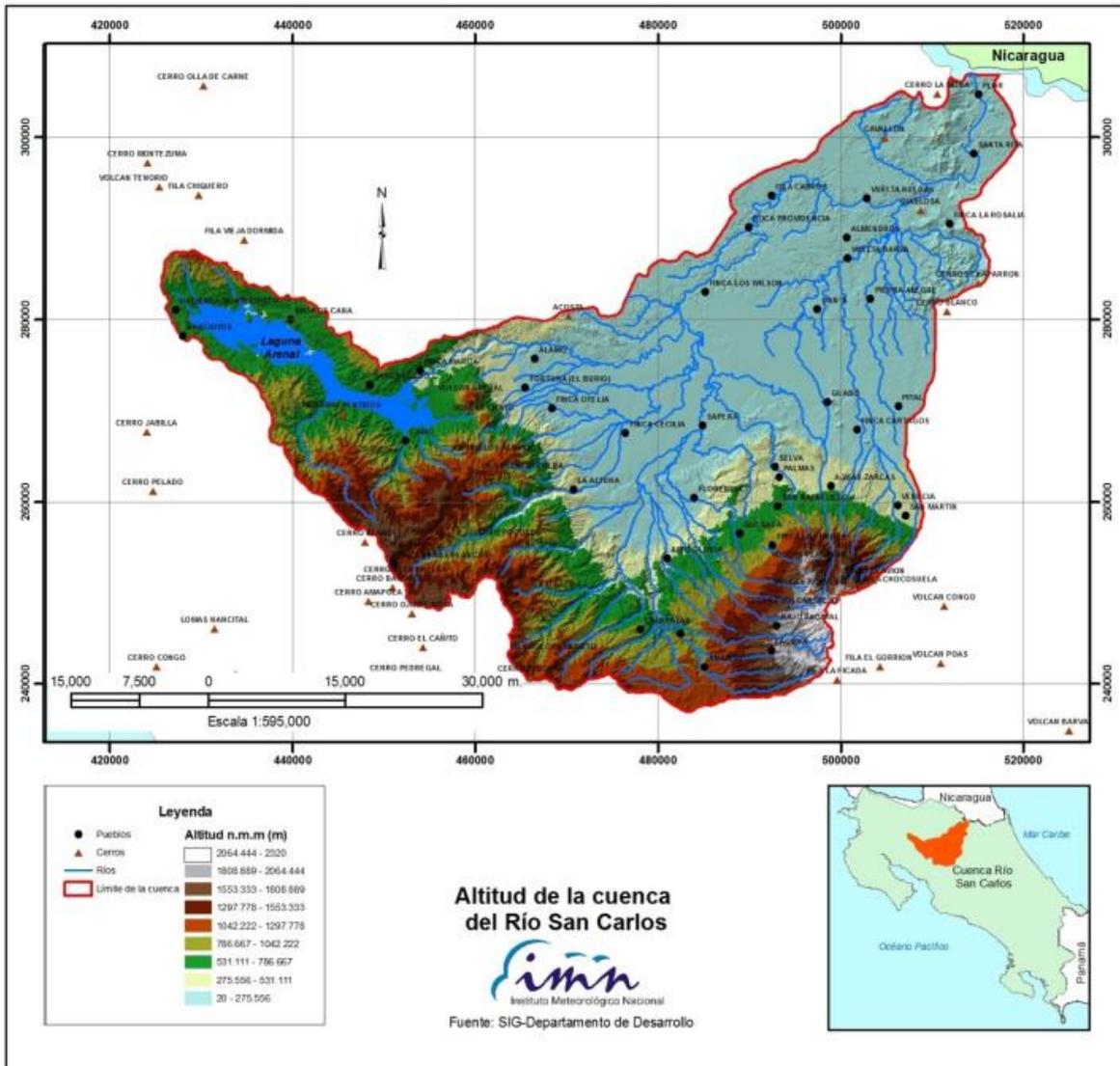


Figura 49. Mapa de altitud en la cuenca del Río San Carlos

Fuente: IMN, 2011

Afectación derivada del Terremoto de Sámara en la estación 14-05

En el caso del Terremoto de Sámara, ocurre un escenario muy similar al de la estación de Veracruz en donde no se observan variaciones importantes en la morfología. No fue posible identificar cambios importantes entre el 23 de agosto y el 2 de noviembre, en donde las curvas muestran ausencia de variaciones importantes en este periodo, las más notorias siendo una ligera erosión de aproximadamente 6 cm - 7 cm en el centro del cauce y una

sedimentación con diferencias variadas, que ronda los 15 cm aproximadamente y que predominó en la margen izquierda.

A continuación, se presentan el gráfico correspondiente a este periodo, mostrando los días 23 de agosto de 2012 y 14 de septiembre de 2012.

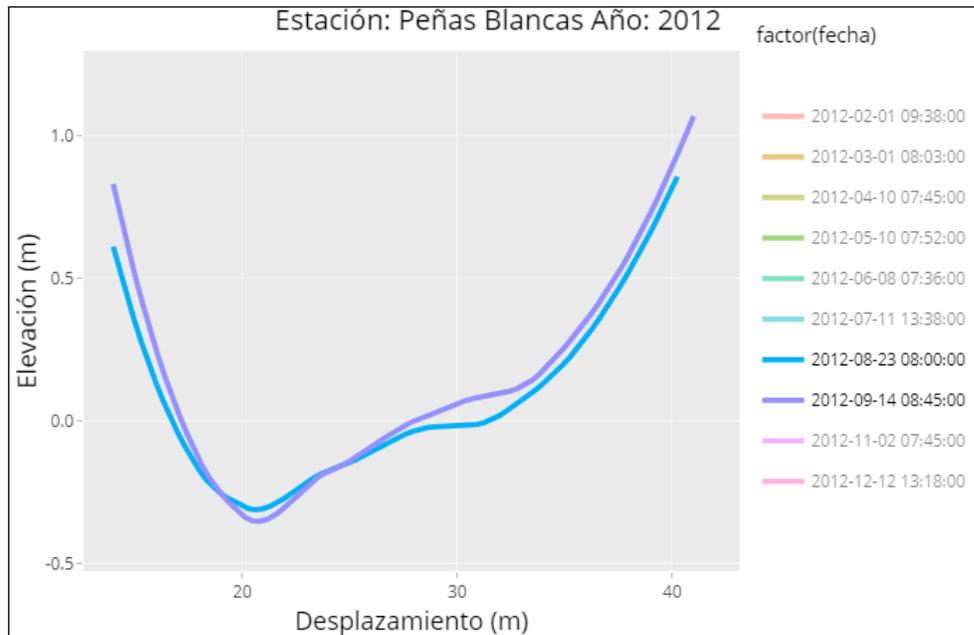


Figura 50. Cambios en las secciones transversales de la estación 14-05 durante el Terremoto de Sámara

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Afectación derivada del Huracán Otto en la estación 14-05

De manera similar a Veracruz, Peñas Blancas no presenta cambios importantes en su morfología para el mes de diciembre, en donde permanece invariante.

No obstante, para el 10 de enero del 2017 se observan variaciones muy importantes en la forma, así como diferencias considerables en cuanto a magnitud. En la sección más profunda se observa un proceso erosivo importante que genera diferencias superiores a 1.5 m de profundidad. Es importante mencionar que, para el 7 de febrero, la sección transversal recupera la morfología que traía desde antes del mes de diciembre, es decir que prácticamente se volvió a remplazar el material lavado entre diciembre y enero nuevamente.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los días 10 de noviembre y 8 de diciembre de 2016, en donde se observa que la afectación provocada por el Huracán en el cauce fue despreciable.

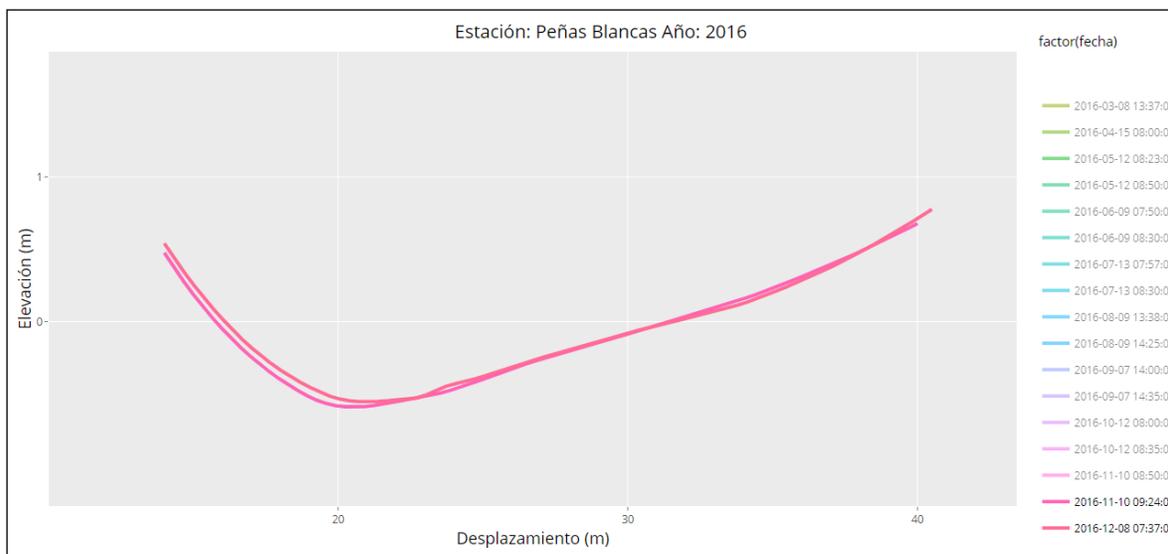


Figura 51. Cambios en las secciones transversales de la estación 14-05 durante el Huracán Otto

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Por otro lado, destacan los resultados obtenidos posterior al evento meteorológico Huracán Otto. En el caso de las estaciones de Veracruz y Guatuso, no fue posible detectar anomalías posteriores al huracán, ya que las secciones transversales mantienen una morfología uniforme al compararse con las curvas que pertenecen al periodo estudiado del huracán en ambas estaciones. Sin embargo, como se mencionó previamente, Peñas Blancas sí experimenta un cambio bastante drástico.

Peñas Blancas muestra un cauce con una morfología diferente para el 10 de enero de 2017 como se muestra en la figura a continuación. La sección transversal de enero es testigo de una erosión sumamente agresiva y marcada que se establece principalmente en la margen izquierda del cauce, aunque la margen derecha también se ve afectada, pero en menor magnitud. Se observa el origen de una fosa que alcanza a presentar diferencias de hasta 1.5 m en comparación con el mes de diciembre.

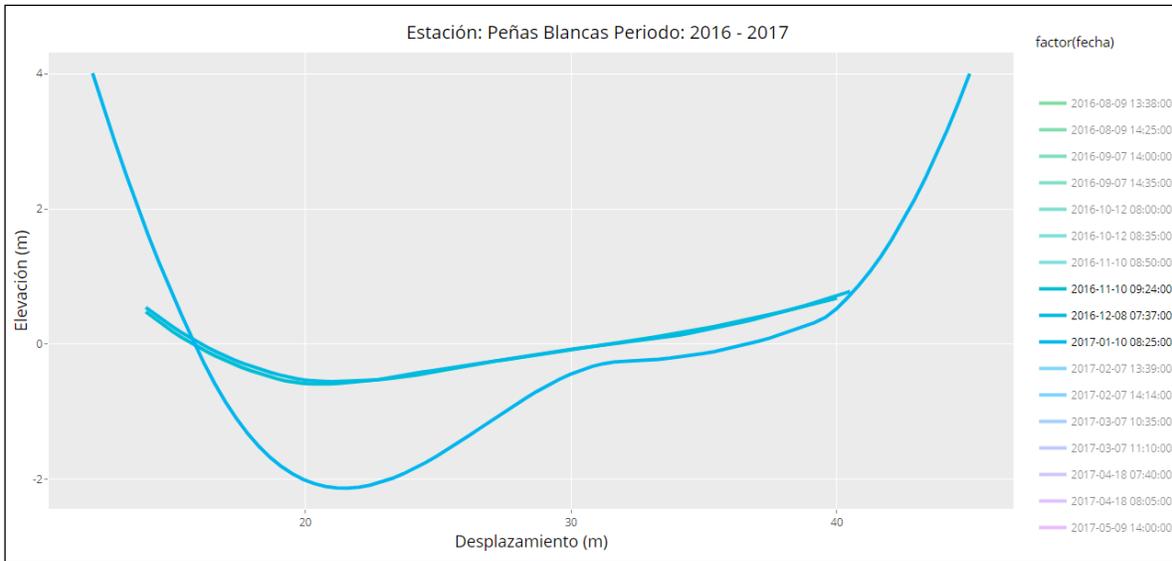


Figura 52. Cambios en las secciones transversales de la estación 14-05 posterior el Huracán Otto

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Con el fin de explicar este comportamiento, se encuentra documentación relacionada con la distribución de precipitaciones de la región durante el mes de diciembre, y se confirma que en dicho mes se presentaron abundantes precipitaciones en la Zona Norte. Los reportes del Instituto Meteorológico Nacional (2016), mencionan que la distribución de las precipitaciones a nivel nacional muestra que la mayor cantidad de lluvia se concentró en la Zona Norte, y estaría relacionada con un aumento en la intensidad de los "Nortes" y vientos Alisios, así como la afectación directa de los frentes fríos. A continuación, se presenta la precipitación acumulada para el mes de diciembre de 2016 en donde se puede comparar con los resultados del mes de noviembre de 2016, presentados más adelante, y aún con el paso del Huracán Otto, diciembre muestra en general aumentos en las precipitaciones de la región.

Cuadro 10. Precipitación acumulada en la Zona Norte en el mes de diciembre 2016

Región Climática	Nombre de las estaciones	Altitud	Lluvia mensual (mm)
Zona Norte	Comando Los Chiles (Centro)	40	N.D
	Upala (Las Brisas)	60	494.8
	Estación Biológica La Selva (OFT, Sarapiquí)	40	522
	Santa Clara (Florencia)	170	N.D
	ADIFOR, La Fortuna (San Carlos)	266	576.6
	Ciudad Quesada (Centro)	700	N.D

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: IMN, 2016

A continuación, se presentan un mapa con la distribución de precipitaciones en el territorio costarricense para el mes de diciembre de 2016.

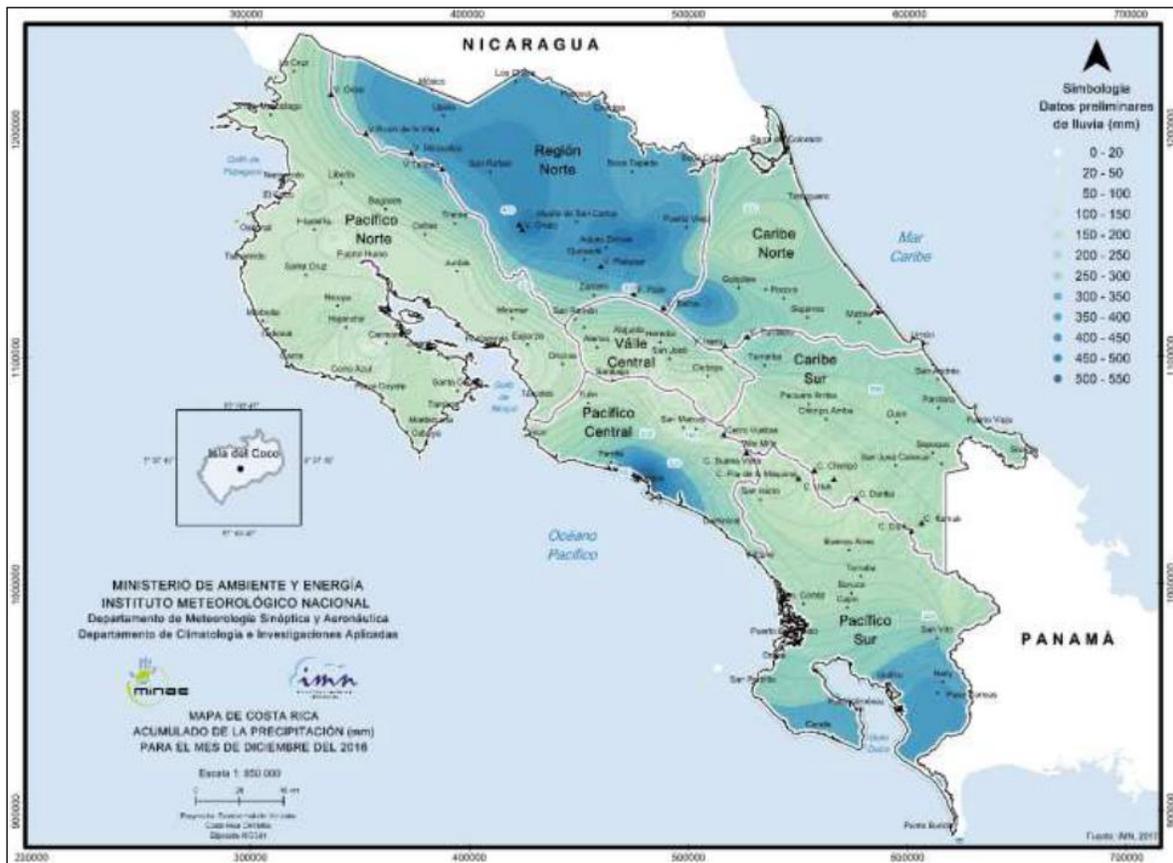


Figura 53. Precipitación acumulada en milímetros (mm) durante diciembre de 2016

Fuente: IMN, 2016

La estación más cercana a Peñas Blancas corresponde a la estación de Ciudad Quesada Centro, la cual desafortunadamente no cuenta con registros para el mes de diciembre, sin embargo como se mencionó anteriormente el comportamiento de todas las estaciones, con que se cuenta con información, muestra que en diciembre la magnitud de las precipitaciones acumuladas mensuales fue mayor, y en el caso de la estación de Ciudad Quesada (Centro) en el mes de noviembre, fue la estación de la Zona Norte que reportó la mayor cantidad de lluvia registrada (641.6 mm), por lo que la tendencia sería que en diciembre este valor sea todavía mayor.

La anomalía observada en enero puede ser explicada hasta cierto grado por medio del fuerte régimen de precipitaciones que tuvo lugar a lo largo del mes de diciembre, sin embargo, hay que recordar que muchos factores influyen en el comportamiento de estas curvas. Es importante mencionar que aún con esta evidencia, de la manera en que puede cambiar un cauce en un periodo tan corto ante periodos intensos de precipitación.

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 14-05

El impacto de la tormenta tropical sobre Peñas Blancas, fue prácticamente mínimo días después del evento. Se observan ligeros cambios producto de un proceso de sedimentación de aproximadamente 20 cm (margen derecha).

Posteriormente en los meses siguientes se observa que continua gradualmente el aumento de sedimentos, llegando a acumularse entre noviembre y diciembre alrededor de 40 cm entre el centro y la margen derecha del cauce.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos entre los días 6 de septiembre y 13 de diciembre de 2016.

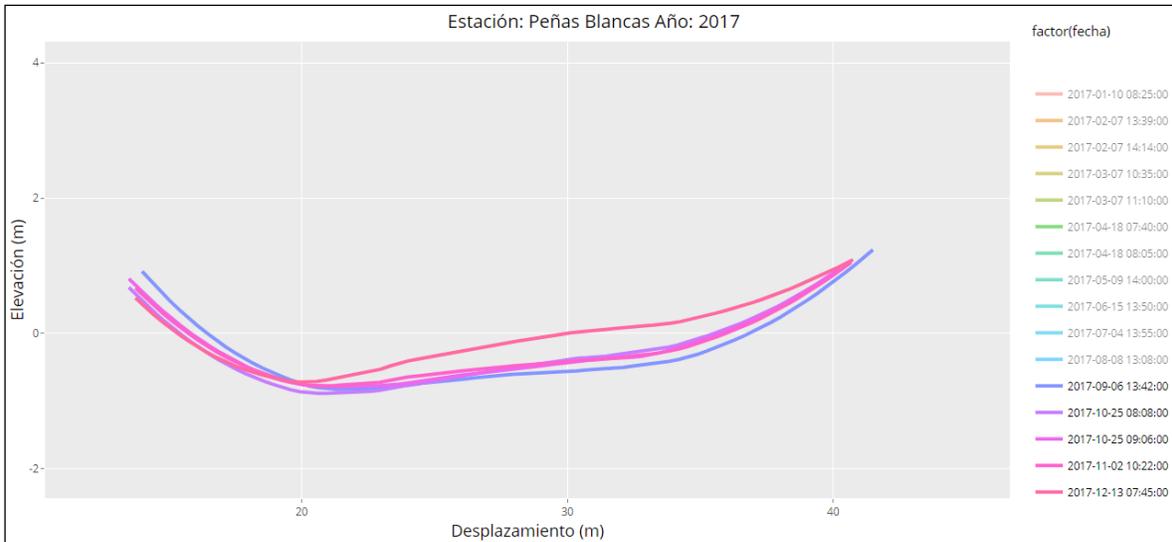


Figura 54. Cambios en las secciones transversales de la estación 14-05 antes y después de la Tormenta Tropical Nate

Elaborado por: Alfaro, 2021

Fuente: ICE, 2020

6.2.3. Estación Guatuso 16-02

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Alma en la estación 16-02

En cuanto a la estación de Guatuso 16-02, que representa la segunda estación con información para este periodo, se presentan problemas con la escala vertical, sin embargo, se procede a sacar el mayor provecho de esta información. Asumiendo que la escala vertical es correcta, se prosigue a estudiar los puntos más bajos de las curvas del 14 de mayo de 2008 y 11 de junio del mismo año, en donde es posible observar que la diferencia es mínima.

Para el 14 de mayo se obtiene una elevación de 1.390 m, mientras que al siguiente mes la elevación corresponde a 1.374 m, por lo tanto, la diferencia entre ambos meses es un poco más de un centímetro y medio. Lo anterior indicaría que la afectación de la Tormenta Tropical Alma en esta estación fue mínima, a pesar que el Instituto meteorológico indicó que la Zona Norte experimentó una llegada temprana de la estación lluviosa similar al Valle Central y el Pacífico. De hecho, la morfología de las secciones transversales varía muy poco a lo largo de todo el año, mostrando cambios muy pequeños como el mencionado

anteriormente, un comportamiento muy propio de los cauces de la Zona Norte como se ha venido observando a lo largo del proyecto.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para ambos meses de mayo y junio.

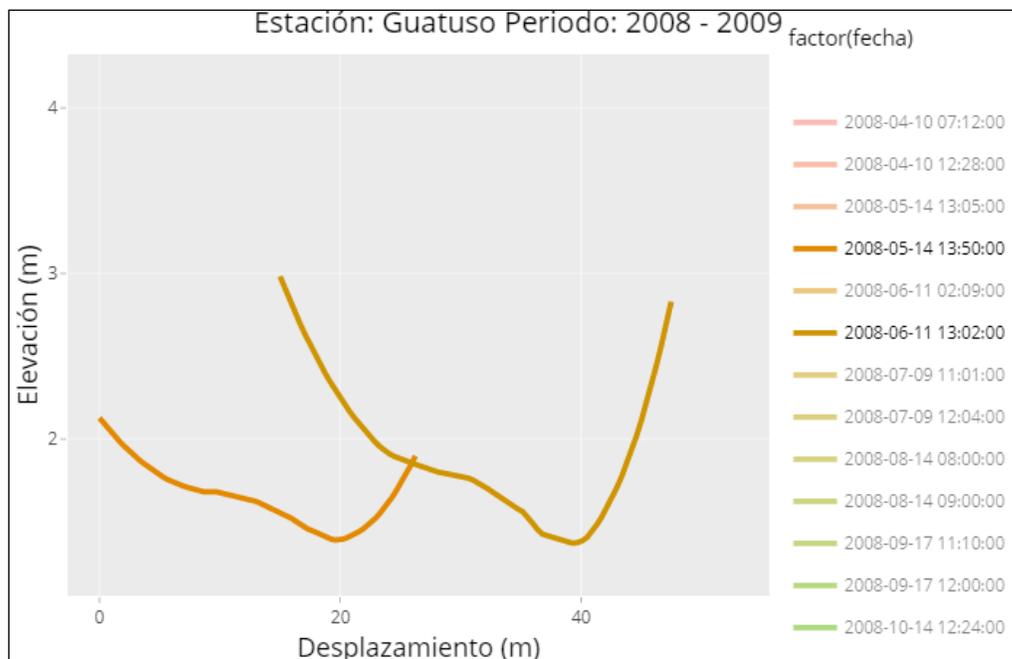


Figura 55. Cambios en las secciones transversales en el periodo de la Tormenta Tropical Alma en la estación 16-02

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Afectación derivada del Terremoto de Cinchona en la estación 16-02

En cuanto al Terremoto de Cinchona, la estación de Guatuso cuenta con un muy buen registro para este periodo en específico, contando con mediciones en diciembre de 2008 y finales de enero de 2009. En la figura a continuación, se muestra el cambio presentado durante estos meses.

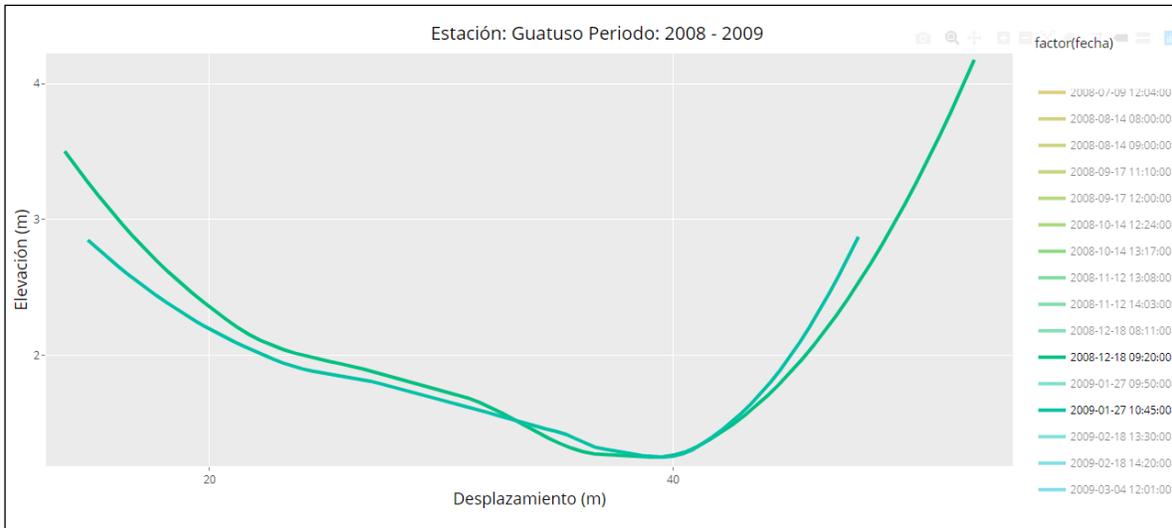


Figura 56. Cambios en las secciones transversales de la estación 16-02, antes y después del terremoto de Cinchona

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Como se puede observar, la estación de Guatuso muestra un cambio muy insignificante durante este periodo y se muestra prácticamente inalterada. Muestra diferencias muy pequeñas, alrededor de 10 cm mostrando pequeños indicios de erosión en la margen izquierda con respecto al centro, así como muy poca sedimentación en algunos sectores de la margen derecha.

A modo de comparación, se comparan los 10 cm observados en este periodo con los cambios presentados entre los meses de enero y febrero del año 2013 y 2014 (años que carecieron del Fenómeno del ENOS). En el 2013 se visualizó un proceso erosivo de aproximadamente 14 cm entre los dos meses, mientras que en el 2014 la máxima erosión detectada fue de 5 cm. En promedio las diferencias observadas entre los 2 años son de 9.5 cm que son muy cercanos a los 10 cm estudiados para el terremoto, difiriendo muy poco entre sí.

En general, la estación 16-02 no muestra evidencia de haber sido afectada del todo por el terremoto. Estudiando las secciones transversales de los meses siguientes como se observa en la siguiente figura, no ocurren cambios morfológicos significativos en los meses posteriores al evento, por lo que muy probablemente no ocurrieron derrumbes, o

desprendimientos de material que pudiesen haber ocasionado algún tipo de cambio en las secciones transversales del río.

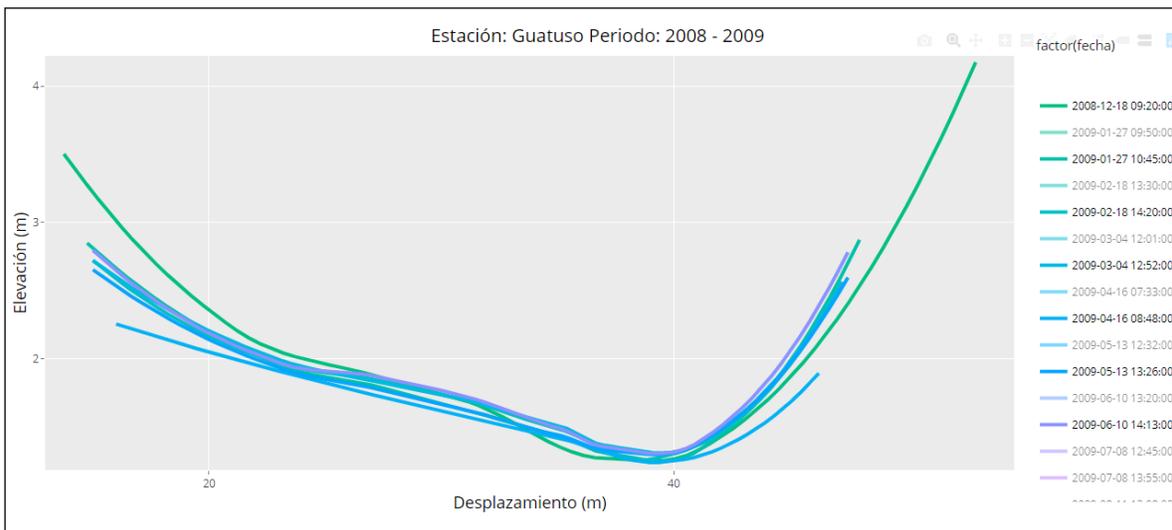


Figura 57. Cambios en las secciones transversales de la estación 16-02, Periodo: diciembre 2008 – junio 2009

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 16-02

La estación de Guatuso cuenta con un registro de información bastante completo para la Tormenta Tropical Tomás, que abarca el periodo de análisis de la Tormenta Tropical Tomás. Al igual que Peñas Blancas, no se observan variaciones importantes entre noviembre y diciembre, durante el periodo en que ocurre la tormenta tropical y la morfología permanece invariable.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los días 3 de noviembre y 9 de diciembre de 2010.

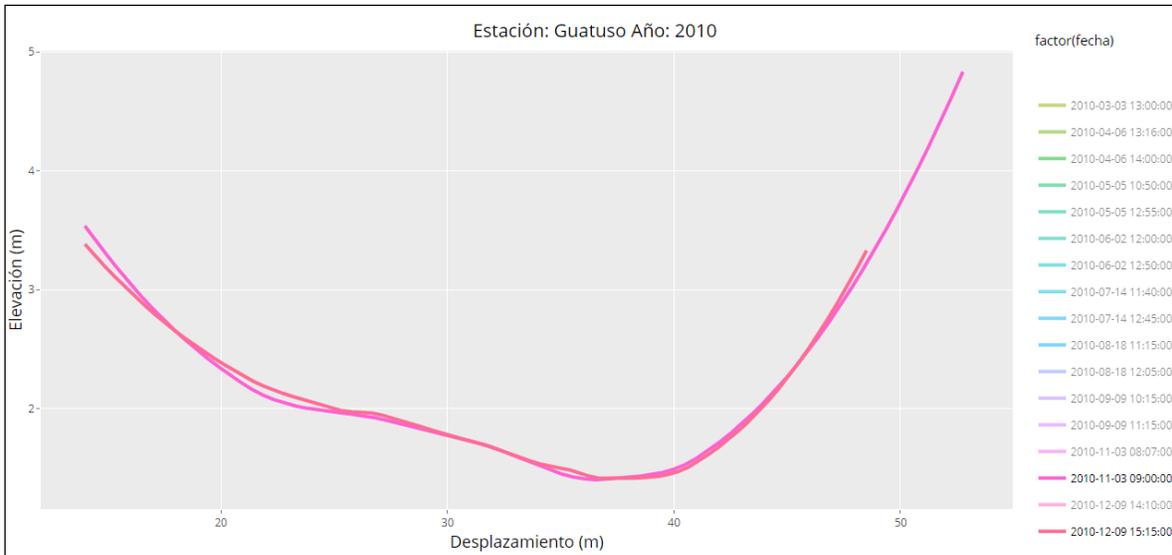


Figura 58. Cambios en las secciones transversales de la estación 16-02 durante la Tormenta Tropical Tomás

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Como se puede observar, los cambios entre los meses de noviembre y diciembre son prácticamente nulos. Las secciones transversales muestran una morfología invariable y consistente que demuestra que la Tormenta Tropical Tomás no tuvo afectaciones en este cauce. Un dato interesante a tomar en cuenta es que en diciembre este cauce no presenta afectaciones drásticas como lo presentó la estación 14-05 en Peñas Blancas, sin embargo, dichas estaciones se encuentran en cuencas diferentes por lo que el comportamiento no debería de ser necesariamente el mismo.

Finalmente, como se pudo observar en los resultados de las estaciones anteriores, la evidencia sugiere que la tormenta tropical no tuvo afectaciones importantes, lo cual concuerda con los informes del Instituto Meteorológico Nacional sobre las zonas más afectadas por precipitaciones debido a este evento en el territorio nacional.

Afectación derivada del Terremoto de Sámara en la estación 16-02

Se cuentan con mediciones en el mismo día del evento 2 horas después de haber ocurrido, en donde se observa únicamente una ligera erosión de aproximadamente 14 cm. Seguidamente se cuenta con una medición el 3 de octubre en donde se observa una sedimentación cercana a los 15 cm.

Los cambios mencionados no representan un impacto significativo en el cauce, de manera que al igual que las estaciones anteriores, no se cuenta con evidencia de que el terremoto haya generado un impacto sobre el cauce.

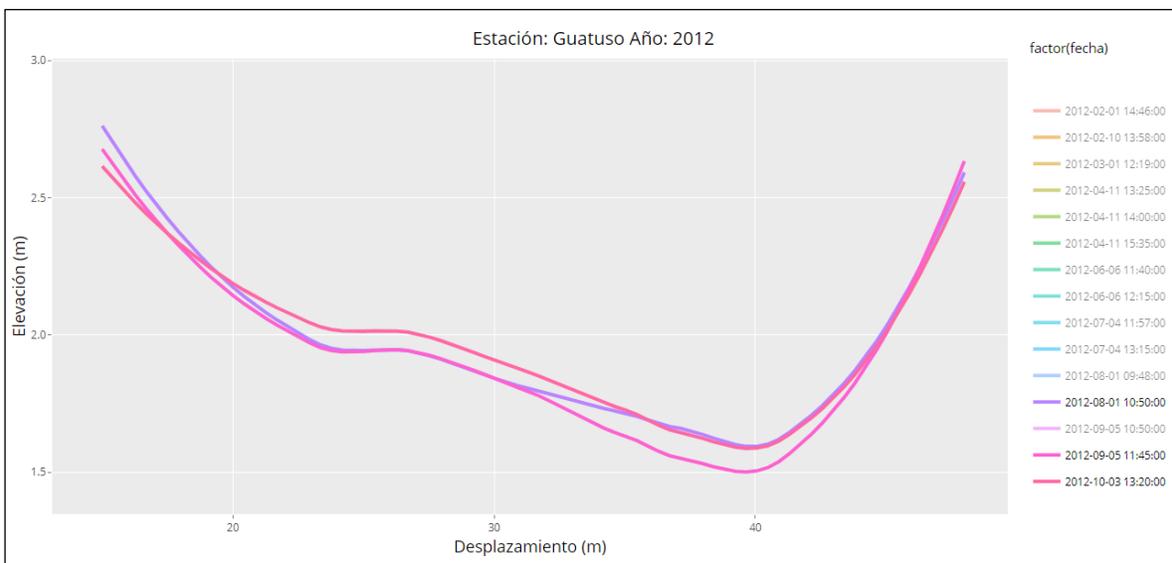


Figura 59. Cambios en las secciones transversales de la estación 16-02 durante el Terremoto de Sámara

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Afectación derivada del Huracán Otto en la estación 16-02

Nuevamente, al igual que los ríos analizados que drenan en la vertiente norte, el cauce no experimenta ningún cambio significativo con el Huracán. Se observa una ligera erosión de aproximadamente 8 cm en el fondo del cauce, la cual no es consistente a lo largo de todo su ancho, afectando principalmente las márgenes.

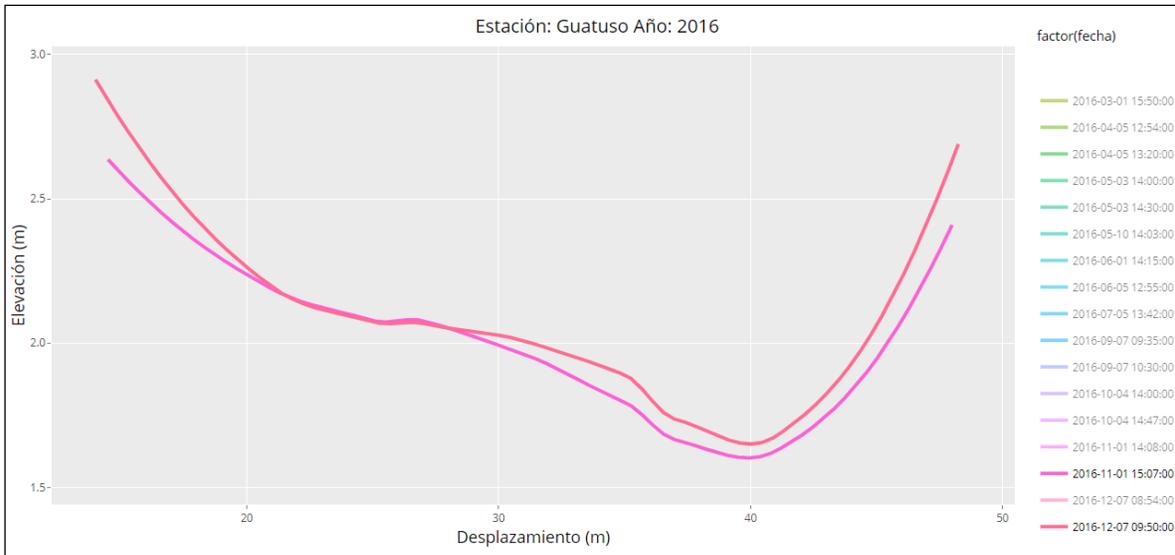


Figura 60. Cambios en las secciones transversales de la estación 16-02 durante el Huracán Otto

Elaborado por: Alfaro, 2020

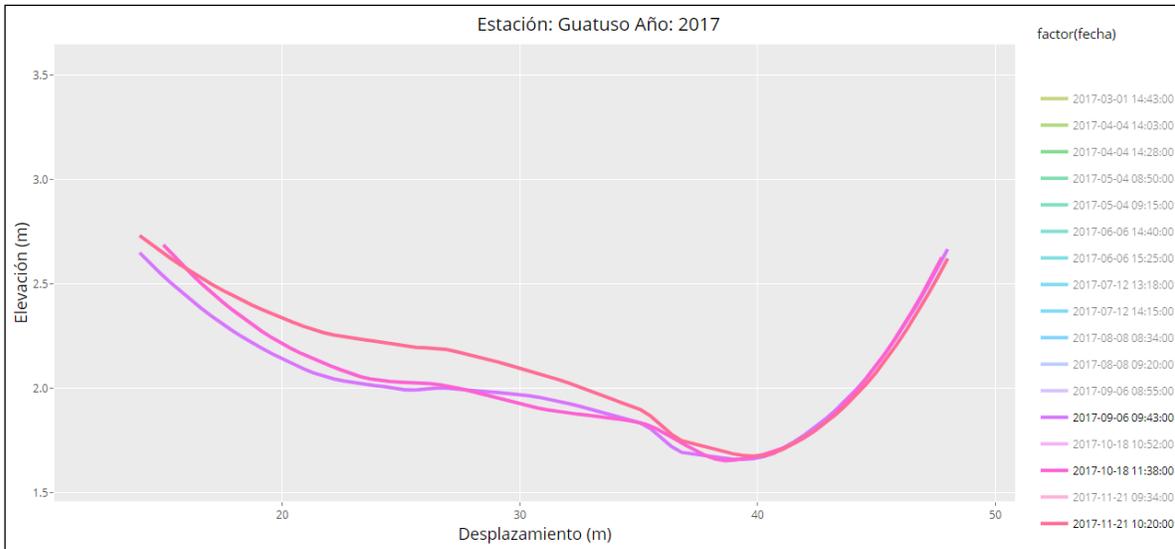
Fuente: ICE, 2020

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 16-02

En lo correspondiente a la Tormenta Tropical Nate, no se observan cambios en la morfología de las secciones transversales. De manera similar a la estación de Peñas Blancas, se puede observar que entre el 6 de setiembre y el 18 de octubre, el río presenta prácticamente la misma forma.

Para el 21 de noviembre del 2017 experimenta una sedimentación muy ligera de unos 12 cm, y para el 16 de enero del 2018, la sección vuelve a erosionarse a un estado similar al de octubre.

A continuación, se presenta graficada la información perteneciente a los días 6 de setiembre, 18 de octubre, y 21 de noviembre de 2017.



*Figura 61. Cambios en las secciones transversales de la estación 16-02 antes y después de la Tormenta Tropical Nate
Elaborado por: Alfaro, 2021
Fuente: ICE, 2020*

6.2.4. Análisis de la Vertiente Norte con respecto al Terremoto de Sámara

En la Vertiente Norte, las 3 estaciones cuentan con un registro de datos sumamente característico para analizar los efectos del terremoto en la región. Todas las estaciones presentan datos que permiten observar los cambios en las secciones transversales, y las tres presentan el mismo comportamiento. Veracruz (12-04), Peñas Blancas (14-05) y Guatuso (16-02) se muestran para efectos prácticos, inalteradas durante este periodo, mantienen la misma morfología antes y después de ocurrido el evento. Sí se logran observar cambios típicos en donde se observan pequeñas muestras erosivas y de sedimentación, pero no se encuentran relacionados al sismo y son parte de las alteraciones naturales del cauce. Finalmente, se concluye que la Vertiente Norte no muestra haber sido afectada por el terremoto significativamente.

6.2.5. Análisis del Huracán Otto en las estaciones de la Vertiente Norte

Como se pudo observar anteriormente, las tres estaciones presentaron un comportamiento muy similar en lo que respecta a los cambios observados entre noviembre y diciembre de 2016. Las tres estaciones mostraron cambios muy pequeños que van en contra de los pronósticos que se plantean con respecto a un evento de este tipo, en especial en la Zona Norte, debido a que fue una de las regiones más impactadas en Los Chiles, Upala, Guatuso, entre otros. El Huracán incluso toca suelo costarricense inicialmente en esta zona por lo que era de esperarse alteraciones mucho más impactantes en los cauces debido al impacto de las precipitaciones.

A continuación, se presentan tabuladas las precipitaciones mensuales de las zonas declaradas en alerta roja durante el Huracán Otto, a partir de información del IMN.

Cuadro 11. Precipitación acumulada en la Zona Norte y Pacífico Sur en el mes de noviembre 2016

Región Climática	Nombre de las estaciones	Altitud	Lluvia mensual (mm)
Zona Norte	<i>Comando Los Chiles (Centro)</i>	40	237.6
	<i>Upala (Las Brisas)</i>	60	411.6
	<i>Estación Biológica La Selva (OFT, Sarapiquí)</i>	40	429.4
	<i>Santa Clara (Florenia)</i>	170	N.D
	<i>ADIFOR, La Fortuna (San Carlos)</i>	266	360.4
	<i>Ciudad Quesada (Centro)</i>	700	641.6
Pacífico Sur	<i>Altamira (Bioley de Buenos Aires)</i>	1370	534.1
	<i>Estación Biológica Las Cruces (OET, Coto Brus)</i>	1210	706.7
	<i>Coto 49 (Corredores)</i>	8	1228.6
	<i>Rancho Quemado (Sierpe, Osa)</i>	240	1412.2

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: IMN, 2016

En el cuadro anterior se pone en evidencia que en la Zona Norte sí hubo una cantidad de lluvia importante en dicho mes. El Instituto Meteorológico Nacional (2016), menciona que noviembre fue un mes que estuvo por completo en transición de la estación lluviosa a la seca, lo cual dejó superávits en la mayor parte de nuestro territorio, en donde regiones como Upala mostraron una anomalía de lluvias con 186 mm, lo cual equivale a un +83%.

También es interesante el hecho de que el Pacífico Sur experimentara acumulados de precipitación mayores al norte del país, que fue afectado directamente por el Huracán, ya

que la trayectoria del mismo atravesó esta zona. Sin embargo, el gran ingreso de humedad al país debido al huracán, así como el relieve propio, favorece que esta región haya sido afectada fuertemente por un excedente de precipitaciones.

6.2.6. Análisis de la Tormenta Tropical Nate en las estaciones de la Vertiente Norte

Es bastante interesante que al igual que el Huracán Otto y sus características tan particulares en cuanto la afectación que esperaba verse reflejada en las secciones transversales de los ríos de la Zona Norte, para la Tormenta Tropical Nate, las secciones transversales muestran un comportamiento sumamente parecido.

Las tres estaciones muestran cambios morfológicos muy pequeños en donde las variaciones directas a la fecha de afectación de la tormenta no superan ni siquiera los 20 cm, en aquellos casos en donde las secciones muestran variabilidad derivada de los procesos estudiados en el periodo. En el caso de la estación de Veracruz, esta estación muestra una tendencia orientada a haber experimentado procesos erosivos. El principal problema que presenta la estación de Veracruz es el hecho de que no presenta datos en los meses de noviembre y diciembre puesto que son esenciales para determinar el potencial erosivo que tuvo la Tormenta Tropical Nate, ya que en noviembre y diciembre pueden haber existido otros factores que influyeron en la erosión presentada en la curva de enero.

Se procedió a estudiar el comportamiento de la estación 12-04 en los años 2012, 2013 y 2014 con el fin de determinar si los 20 cm observados entre octubre y enero fueron anómalos. A continuación, se presentan los resultados para los 3 años.

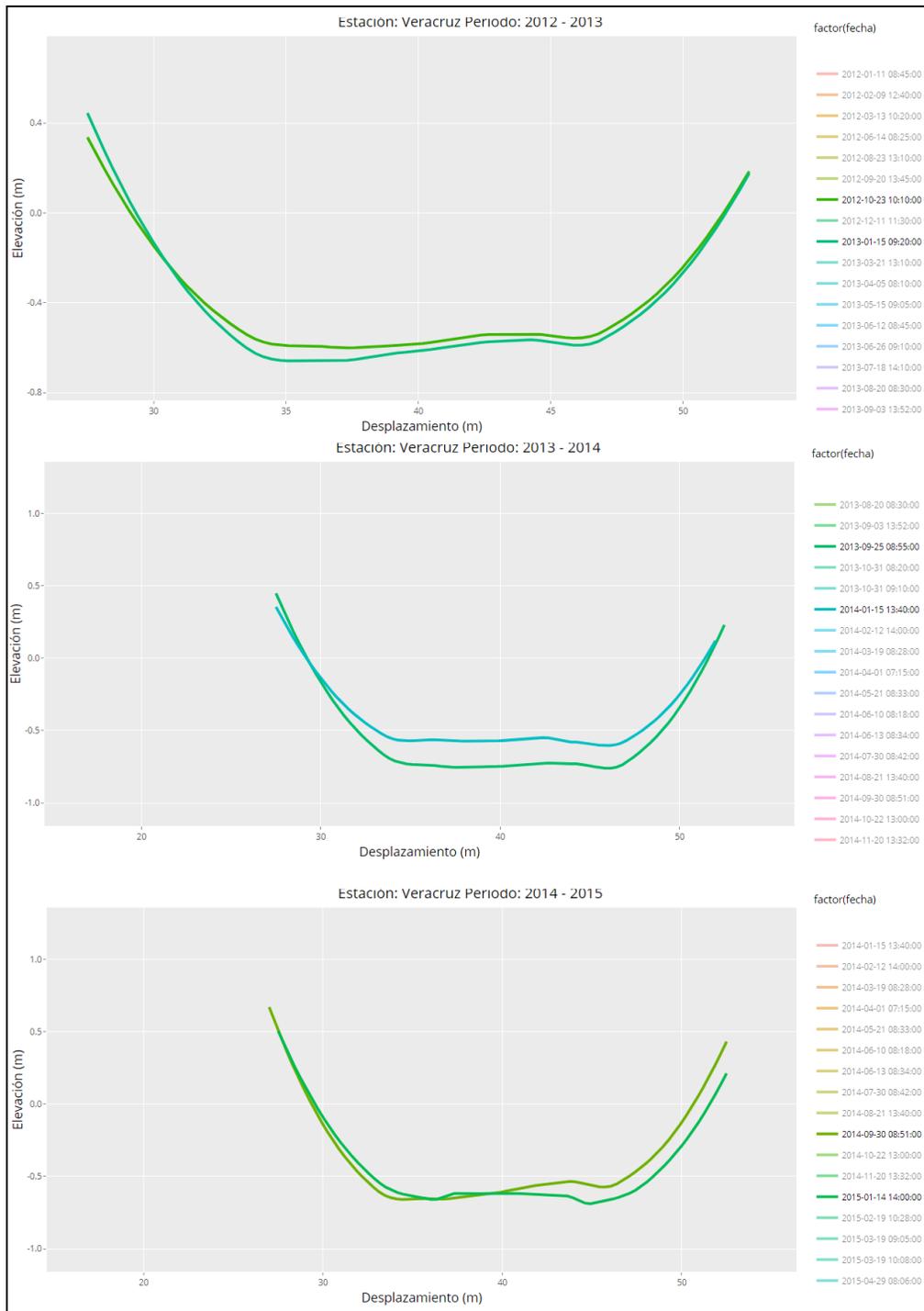


Figura 62. Secciones transversales comparativas en la estación 09-22, años: 2012, 2013 y 2014

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2021

Como es posible observar los cambios observados en los 3 años son muy similares a los observados en el mes de enero posterior a la Tormenta Tropical Nate, de hecho, las diferencias más notorias vistas en 2012, 2013 y 2014, fueron 6 cm, 18 cm y 13 cm respectivamente, los cuales no se encuentran muy lejanos en orden de magnitud a los 20 cm mencionados.

En el caso de Peñas Blancas y Guatuso, ambas estaciones presentaron comportamientos prácticamente idénticos desde el punto de vista morfológico. Las dos estaciones mostraron sedimentaciones muy pequeñas en donde las variaciones son mínimas, comportamiento similar al presentado con el Huracán Otto en el 2016 donde sufrieron una sedimentación muy ligera.

6.3. Estaciones de la Vertiente del Pacífico

6.3.1. Estación Paso Hondo 20-14

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 20-14

Desafortunadamente la estación Paso Hondo cuenta con un déficit importante de información y no se cuenta con datos para: noviembre, diciembre y enero. Por lo que los resultados más cercanos entre sí para poder estudiar este fenómeno, corresponderían al 19 de octubre de 2010 y el 1 de febrero de 2011.

Entre octubre 2010 - febrero 2011, lo que se logra apreciar es una sedimentación irregular en el ancho del cauce particularmente orientado a la margen izquierda del cauce. Se logran observar diferencias de aproximadamente 46 cm entre el centro y la margen derecha.

En la figura a continuación, se presentan los resultados para las secciones transversales más próximas a la tormenta tropical, según la información que se cuenta.

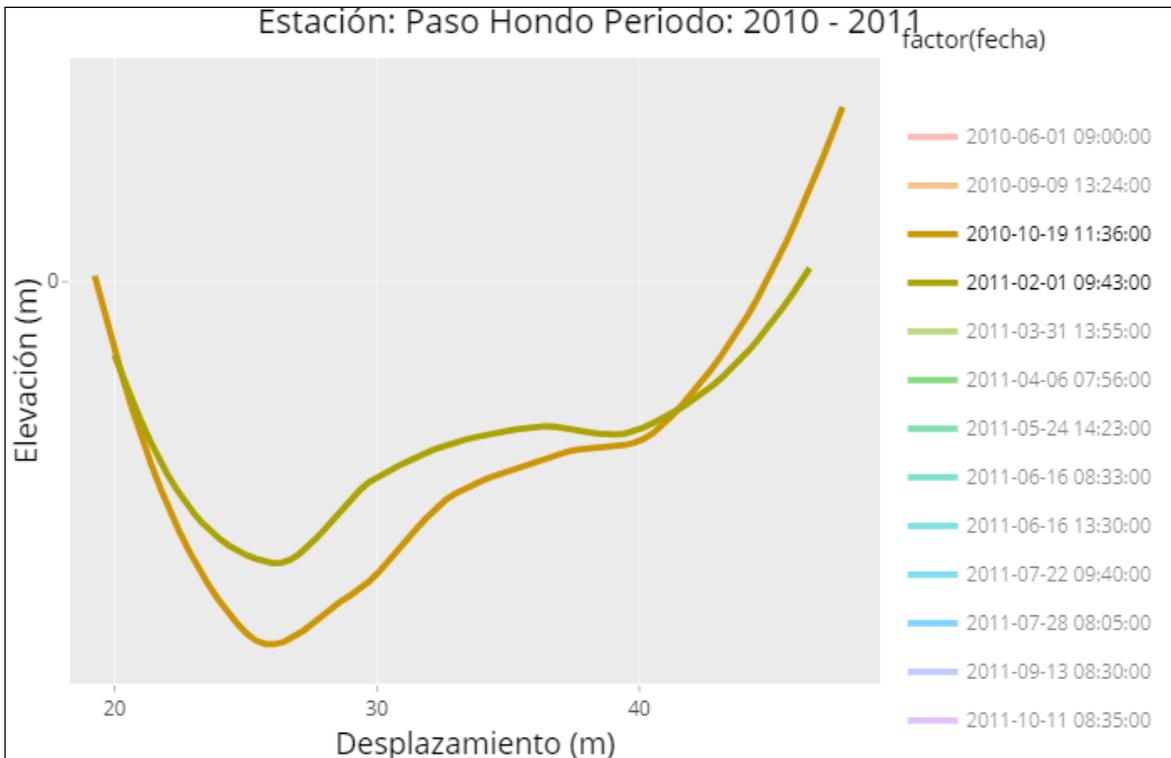


Figura 63. Cambios en las secciones transversales de la estación 20-14 durante la Tormenta Tropical Tomás

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

El faltante de datos en noviembre y diciembre generan dificultades para obtener conclusiones y realizar un análisis de esta estación para este periodo, sin embargo, el cauce sí aparenta haber experimentado cambios morfológicos importantes en este periodo de 4 meses de ausencia de información. Se considera pertinente analizar estaciones cercanas o que al menos se encuentren en la misma vertiente, para relacionar comportamientos y observar si se obtienen resultados similares a la estación de Paso Hondo.

Debido al faltante de información en esta estación para el periodo específico, se procedió a comparar los resultados entre el 19 de octubre del 2010 con el 1 de febrero del 2011, con el registro histórico del 2012 y 2013 sin influencia del fenómeno del ENOS. Entre el 10 de octubre de 2012 y el 31 de enero de 2013 se observaron diferencias de aproximadamente 40 cm principalmente en la margen derecha, por ende, las variaciones observadas en el análisis de la T.T Tomás no aparentan haber sido anormales.

Afectación derivada del Terremoto de Sámara en la estación 20-14

Nuevamente se observa que la morfología no cambia significativamente, en agosto el cauce presenta la misma forma que setiembre a excepción de una ligera erosión de aproximadamente unos 15 cm, comportamiento que se mantiene en lo restante del año sin mucha variación.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para este periodo entre los días 14 de agosto y 11 de septiembre de 2012.

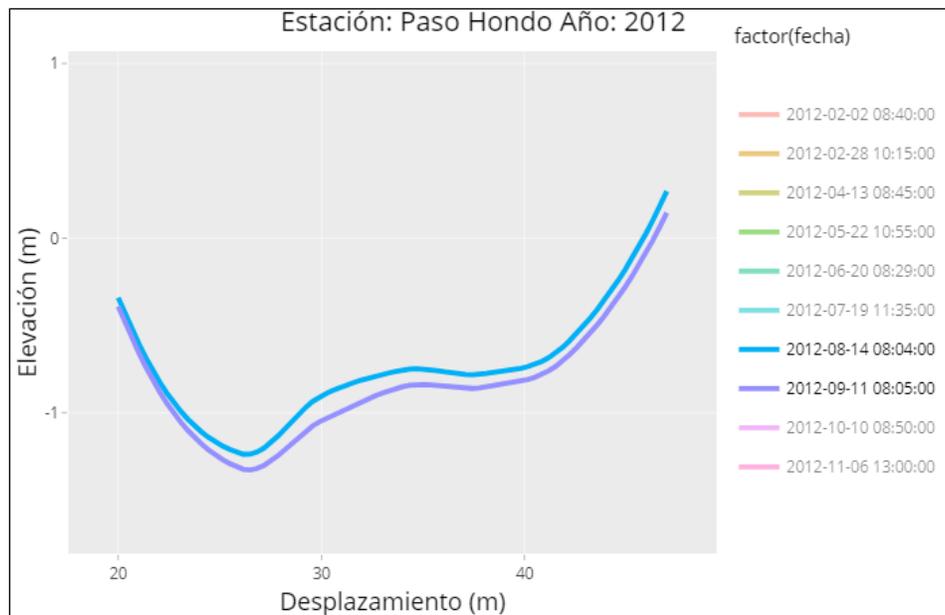


Figura 64. Cambios en las secciones transversales de la estación 20-14 durante el Terremoto de Sámara

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 20-14

Entre el 19 de setiembre del 2017 y el 30 de noviembre del mismo año, se puede observar que el cauce experimentó un cambio considerable de forma, la sección transversal fue erosionada con diferencias que varían entre los 40 cm hasta los 64 cm en las regiones más profundas.

A continuación, se procede a mostrar los resultados de las secciones transversales de la estación de Paso Hondo (20-14).



*Figura 65. Cambios en las secciones transversales de la estación 20-14 antes y después de la Tormenta Tropical Nate
Elaborado por: Alfaro, 2021
Fuente: ICE, 2020*

Paso Hondo cuenta únicamente con dos mediciones para el año 2017 y afortunadamente corresponden a un periodo relativamente corto en el que se encuentra incluida la Tormenta Tropical Nate. Como se puede apreciar en el gráfico anterior, el proceso que aparenta haber inducido la tormenta tropical, fue una fuerte erosión, lo cual es un fenómeno interesante debido a que Paso Hondo se encuentra en una zona con muy poca elevación, muy cerca de la desembocadura a solo 10 msnm y lo usual hubiese sido que los sólidos tendieran a depositarse en esta zona.

Lo anterior sugiere que los ríos de esta región del Pacífico sufrieron una afectación muy severa debido a las fuertes corrientes inducidas por la gran cantidad de precipitación que trajo Nate consigo. El fuerte flujo en el cauce hizo que las altas velocidades de la corriente no permitieran que las partículas sedimentaran en este sector.

Nuevamente, se decide estudiar el comportamiento observado en los años de comparación, y se observó que, en el 2012, 2013 y 2014, las diferencias máximas en erosión determinadas fueron: 26 cm, 17 cm y 8 cm respectivamente. Lo anterior sugiere una importante afectación generada por Nate en el río en donde el rango de erosión de 40 cm – 64 cm sobrepasa los valores ordinarios de erosión.

6.3.2. Estación Nuestro Amo 24-24

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 24-24

Los efectos que trajo consigo Tomás a la estación Nuestro Amo es uno de los comportamientos más dinámicos del presente trabajo. En octubre se observa que el cauce venía presentando un proceso erosivo continuo. Una vez que Tomás afecta el país, cambia el comportamiento y se torna muy interesante.

Se poseen datos del mismo día en que Tomás afecta a Costa Rica, donde para el 4 de noviembre el cauce se muestra con sedimentos que superan los 87 cm en comparación a octubre. Al día siguiente (5 de noviembre) se toma una nueva medición y se observa un aumento en la sedimentación de alrededor de 1 m, con respecto a octubre, pero manteniendo relativamente la misma morfología.

Esto cambia en una nueva medición 4 días después (9 de noviembre) en donde se observa un aumento de sedimentos irregular orientada hacia la margen izquierda del cauce (alrededor de 68 cm), y erosiones de magnitudes muy variadas en ambos márgenes del río. Para este punto, la morfología del río cambia completamente.

Al día siguiente, el 10 de noviembre se toma una nueva medición y es posible observar que no varía considerablemente al día anterior. De manera similar al 10 de noviembre, el 15 de diciembre se toman nuevas mediciones y no llega a presentar cambios significantes respecto a la nueva morfología adquirida, a excepción de unos 20 cm de sedimento en la margen derecha y una ligera erosión de aproximadamente 13 cm en la margen izquierda.

El mes de enero muestra una morfología similar al 15 de diciembre, con una ligera erosión. La nueva forma adquirida durante este periodo prevalece hasta la medición del 2 de mayo de 2011, y es hasta junio que se comienza a apreciar pequeños cambios.

A continuación, se presenta de forma gráfica el proceso descrito anteriormente.

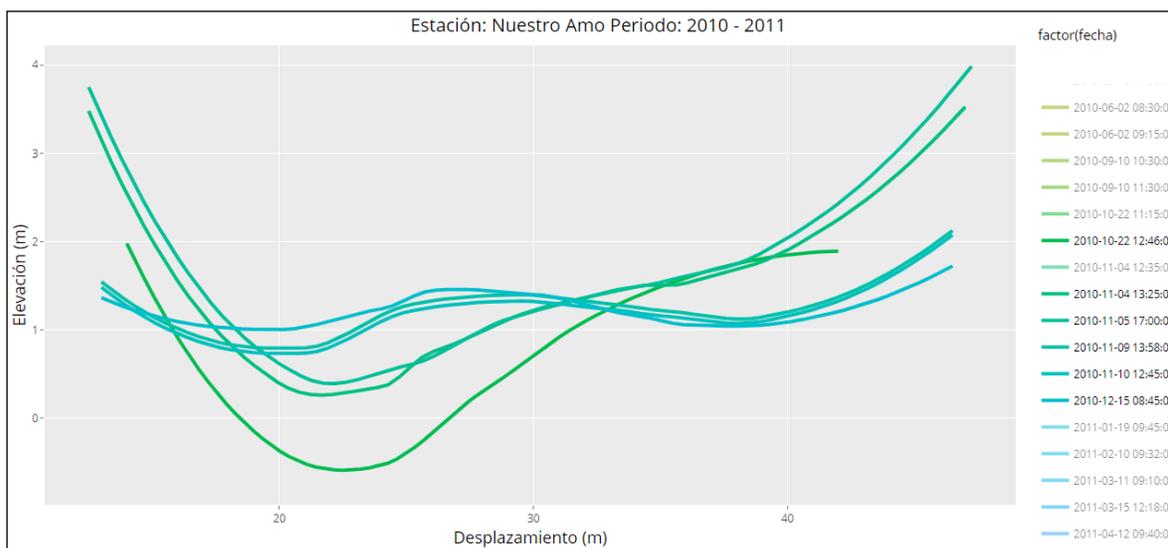


Figura 66. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-24 durante la Tormenta Tropical Tomás

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

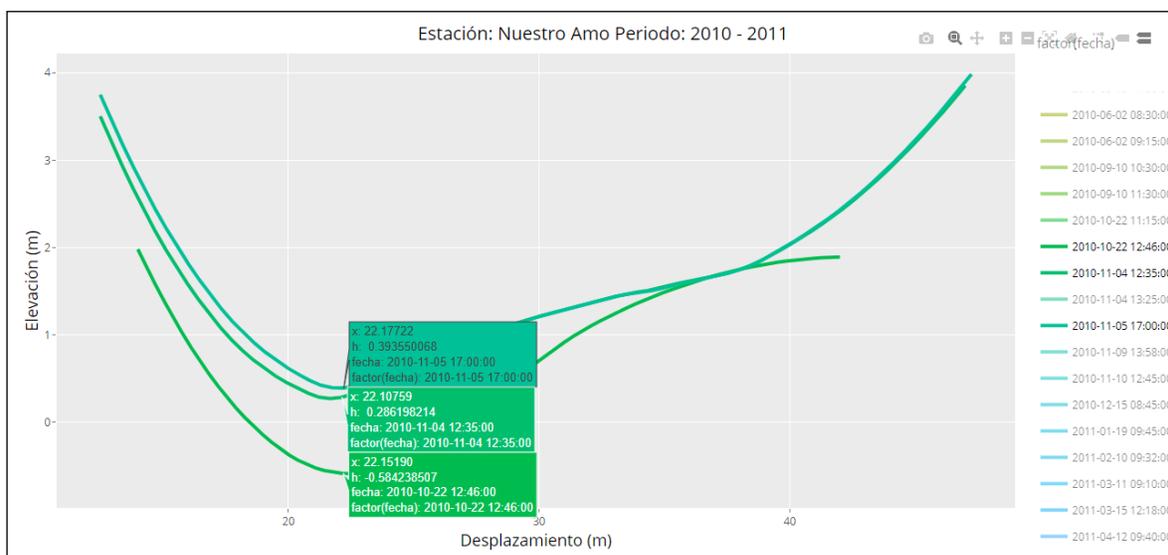


Figura 67. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-24 (2010-10-22 al 2010-11-05)

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Como es posible observar en la figura, los cambios presenciados entre el mes de octubre y los días 4 y 5 de noviembre, fueron una fuerte sedimentación en todo el cauce, alcanzando magnitudes muy grandes de hasta 1 m de sedimentos (5 de noviembre). Sin embargo, la morfología aún se conservaba, y solamente se había alzado la sección transversal en el eje vertical.

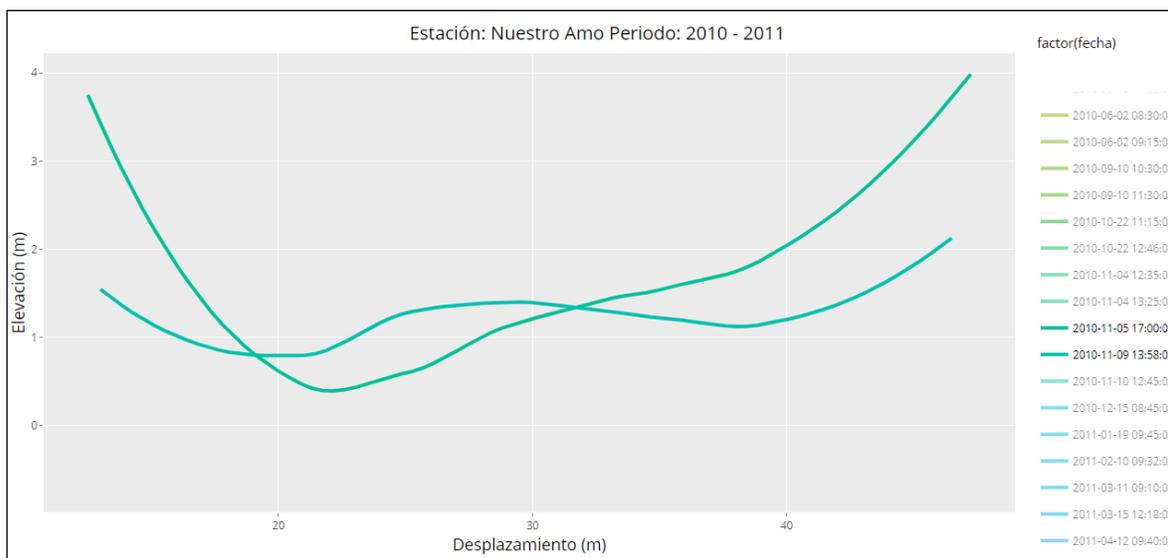


Figura 68. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-24 (2010-11-05 al 2010-11-09)

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Es hasta el día 9 de noviembre que se observa una variación muy importante en la morfología de las secciones transversales del cauce. En dicho periodo es posible observar que continúa la sedimentación, principalmente cerca del centro del cauce, mientras que en las márgenes se presenta una erosión bastante evidente, mostrándose mucho más afectada la margen derecha del río, sin embargo, la izquierda muestra afectaciones similares en menor magnitud. Las dos erosiones que se presentan en las márgenes no son uniformes y aumentan conforme se acerca a los bordes.

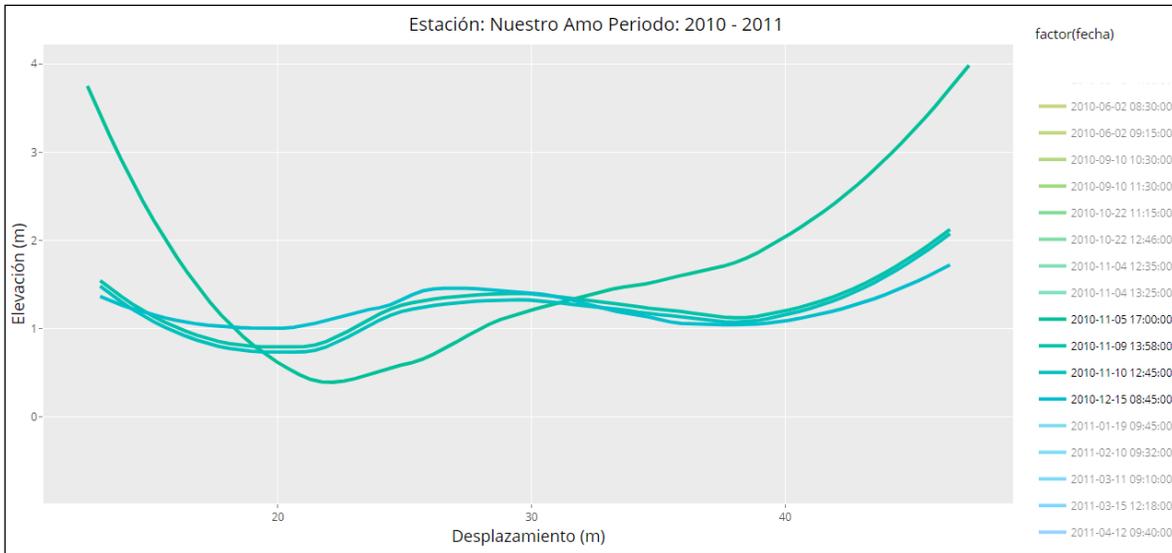


Figura 69. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-24 (2010-11-05 al 2010-11-09)

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Finalmente, para el mes de diciembre, el cauce alcanzó una condición estable y se muestra invariante durante este mes, presentando las curvas muy pocos cambios en este periodo, lo cual concuerda con el inicio de la estación seca de la Vertiente Pacífico.

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 24-24

Nuestro Año cuenta con un proceso evolutivo muy claro debido a la documentación que la estación presenta, desde el mes de septiembre hasta diciembre del 2017.

Los principales cambios observados en el primer mes de septiembre previo al evento en comparación con el 31 de octubre posterior a Nate, es una sedimentación en ambas márgenes, con una intensidad enorme en la margen derecha, donde se llegan a apreciar cambios de hasta 1.1 m debido a la acumulación de sedimentos.

Entre el 31 de octubre y el 29 de noviembre se comienza a ver el proceso inverso a la sedimentación en el mes de octubre. La sección más profunda comienza a acentuarse aún más (erosión) y parte de la margen derecha comienza a erosionarse. Dichas erosiones rondan alrededor de toda la sección aproximadamente entre los 28 cm y los 33 cm.

De manera similar al mes de noviembre, entre el 29 de noviembre y el 13 de diciembre se observa un incremento muy importante en la erosión a lo largo del cauce, principalmente en la sección más profunda donde se alcanzan diferencias con respecto al mes anterior de hasta 82 cm.

Una vez iniciado el 2018 se comienza a ver un proceso de retroceso a lo que se había ido presentando desde octubre del 2017. Se puede observar como el cauce se comienza a sedimentar gradualmente con el paso de los meses, hasta llegar a alcanzar prácticamente la misma morfología que traía antes de Nate (8 de setiembre del 2017), en la medición realizada el 3 de julio del 2018 en donde parece alcanzar un equilibrio con respecto al año anterior.

A continuación, se muestran los resultados gráficos obtenidos para la estación Nuestro Amo en donde se puede observar lo descrito en los párrafos, así como la evolución de las secciones transversales el año entrante a Nate, en donde se observa un retroceso de los efectos que ocasionó la tormenta.

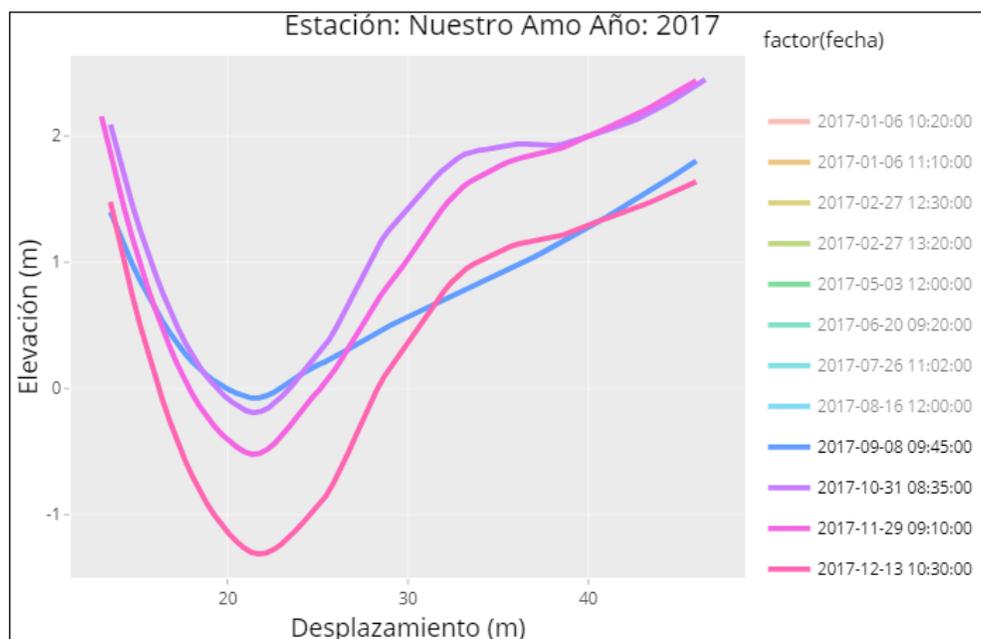


Figura 70. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-24 antes y después de la Tormenta Tropical Nate

Elaborado por: Alfaro, 2021

Fuente: ICE, 2020

El comportamiento de Nuestro Amo resulta muy interesante, puesto que es sumamente consistente en los meses posteriores a la Tormenta Tropical Nate. Como se mencionó anteriormente, el efecto directo que provocó Nate sobre la estación 24-24 fue principalmente una sedimentación considerable en la margen derecha, que varía la morfología del cauce. La erosión se presentó únicamente en la fosa del cauce y de manera muy ligera, siendo el proceso aluvial con menor intensidad en este periodo.

Sin embargo, esto cambia en los meses siguientes en donde en cuestión de un mes el cauce cambia su comportamiento debido a la intensificación de los procesos erosivos presentes entre octubre y noviembre. Es interesante el hecho de que tanto los cambios que se observan el 29 de noviembre, así como el 13 de diciembre, mantienen la nueva morfología adoptada por el cauce a pesar de que la erosión se intensifica a finales del año.

Este cauce representa uno de los ejemplos más claros de cómo algunos ríos tienden a conservar una morfología estable aún después de haber sido sometidos a un evento extremo que los desestabiliza, tendiendo a recuperar la morfología inicial gradualmente. La forma que Nuestro Amo presentaba antes de Nate, era una forma bastante consistente, que se mantuvo hasta que sufre deformaciones importantes debido al aumento de las precipitaciones y cantidad de sedimentos aportados al cauce durante la tormenta tropical.

Unos meses posteriores al Nate, el cauce lentamente comienza un proceso inverso a restaurar la morfología que presentaba el 8 de septiembre de 2017. Durante este proceso, se observa como el cauce comienza a sedimentarse gradualmente como se muestra en la figura a continuación.

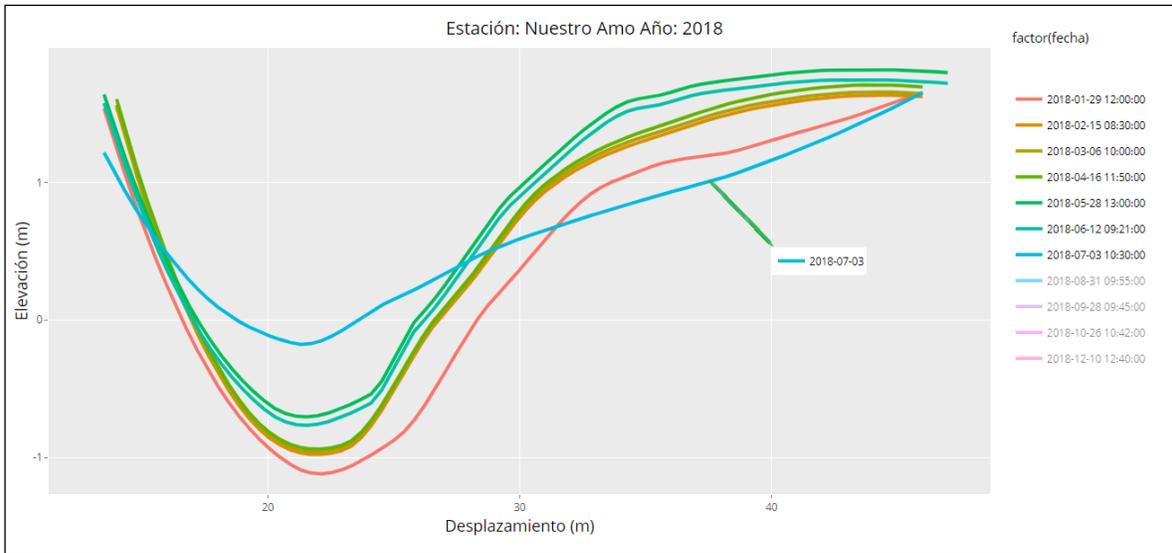


Figura 71. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-24 en el 2018

Elaborado por: Alfaro, 2021

Fuente: ICE, 2020

Ya desde enero las secciones transversales dan evidencia de una sedimentación, y poco a poco van subiendo en la vertical en los meses de enero hasta junio. Esta sedimentación se va presentando manteniendo la morfología inducida post-Nate, no obstante, como se observa en la curva marcada, para el día 3 de julio la sección transversal de este adquiere una forma muy similar a la del día 8 de septiembre, en donde se pone en evidencia la capacidad que tiene un río de volver a condiciones similares a las iniciales antes de un evento extremo después de sufrir cambios importantes en su morfología.

6.3.3. Estación Santo Domingo 24-27

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 24-27

La estación de Santo Domingo no se cuenta con datos específicamente para los meses de noviembre y diciembre del 2010, por lo tanto, no se puede observar los efectos directos que tuvo la tormenta sobre el cauce. Para el mes de enero del 2011 (fecha más próxima con datos) se observa una erosión considerable de aproximadamente unos 30 cm en la parte más profunda, con mayor orientación a la margen izquierda, como se muestra en la figura a continuación.

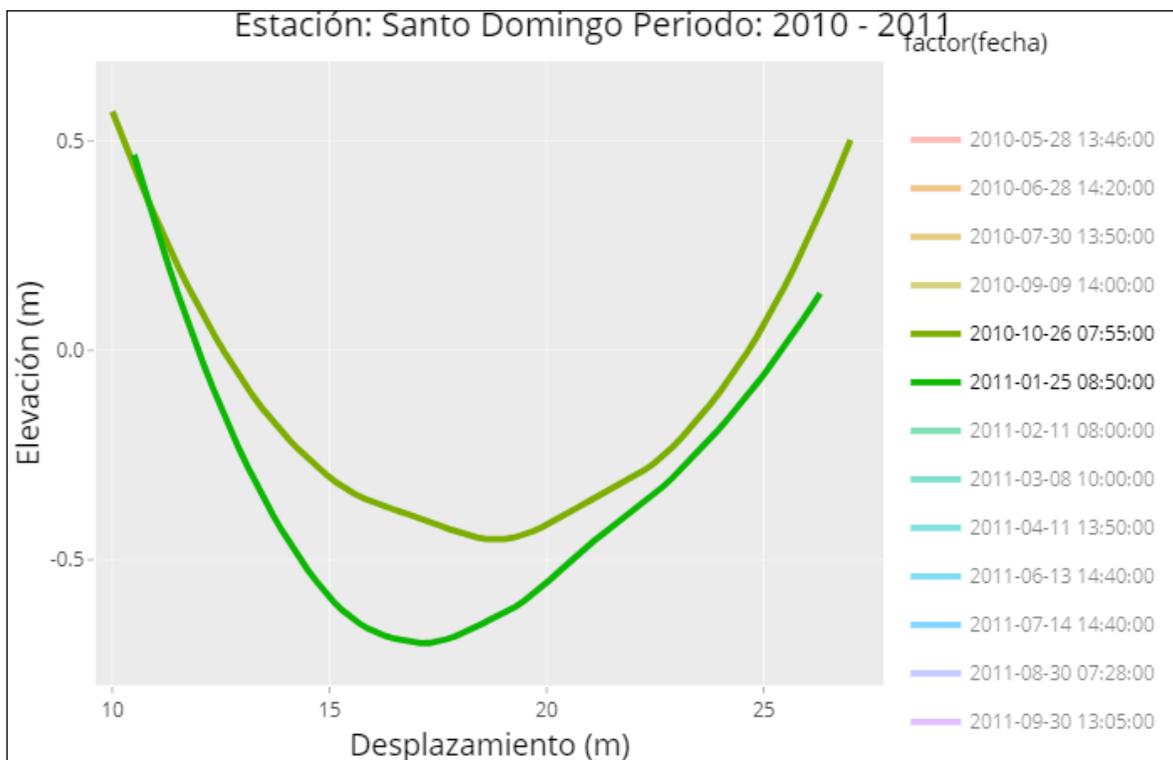


Figura 72. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-27 durante la Tormenta

Tropical Tomás

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Esta estación presenta un problema similar a la estación de Paso Hondo, en donde los meses indispensables para analizar dicha tormenta tropical están haciendo falta. Nuevamente se procede a estudiar con las dos secciones más próximas al evento de la tormenta Tomás.

Los días corresponden a el 26 de octubre de 2010 y 25 de enero de 2011, y la diferencia que se aprecia entre ambos meses evidencia un proceso erosivo, que por desgracia nos es posible comparar con ninguno de los años de comparación (2012, 2013 y 2014) utilizados en el documento. La razón se debe al hecho que entre el 2012-2013 se presenta un déficit de información similar en donde los potenciales datos que pueden caracterizar el periodo de interés presentan casi 5 meses sin información (26 de noviembre de 2012 a 15 de abril de 2013). En el periodo 2013-2014 pasa lo mismo y hay un faltante importante de información entre el 26 de agosto de 2013 al 24 de marzo de 2014.

Es interesante que el proceso observado en esta estación es el proceso inverso que se ha observado en las estaciones anteriores pertenecientes a la Vertiente del Pacífico durante la tormenta tropical. Santo Domingo en particular, se encuentra ubicado en una zona de altitud en el Valle Central, por lo que la topografía de la región puede facilitar que se presenten procesos erosivos de este tipo, debido a las fuertes velocidades características de pendientes elevadas y que son típicas de este tipo de lugares.

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 24-27

Santo Domingo presenta una afectación muy evidente debido a la Tormenta Tropical Nate, la cual se ve reflejada en las grandes diferencias marcadas entre el 5 de septiembre y el 27 de octubre del 2017.

En dicho periodo se observa diferencias erosivas de aproximadamente 64 cm en el centro de la sección transversal, mientras que la erosión en los márgenes varía entre 27 cm y 47 cm aproximadamente. Dichas variaciones se mantienen entre octubre y noviembre sin cambios morfológicos importantes.

Desafortunadamente, no se cuenta con mediciones en el mes de diciembre, pero al continuar estudiando la evolución post - Nate de la estación se observa que, para febrero de 2018, los efectos ocasionados por la tormenta tropical fueron revertidos, mostrando un cauce sedimentado en comparación a octubre y noviembre de 2017.

A continuación, se muestran los resultados de las secciones transversales relacionadas con el periodo de afectación de la Tormenta Tropical Nate en la estación 24-27.

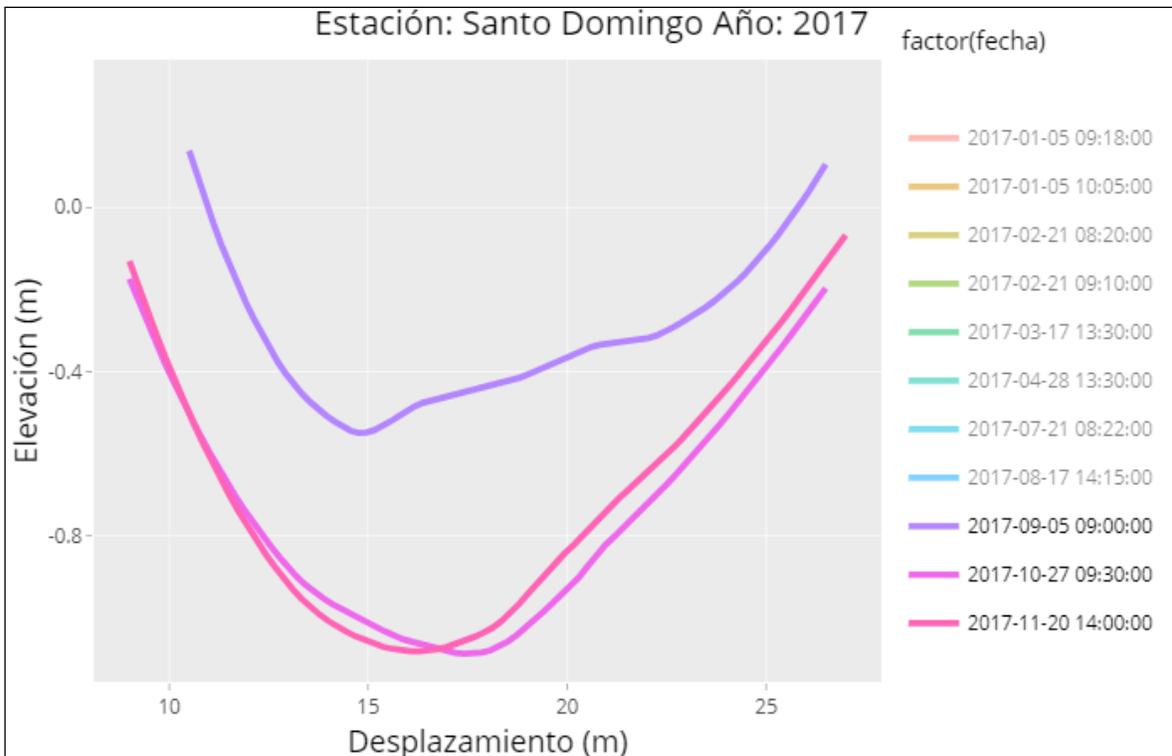


Figura 73. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-27 antes y después de la Tormenta Tropical Nate
Elaborado por: Alfaro, 2021
Fuente: ICE, 2020

En general, así como las demás estaciones mostradas anteriormente, Santo Domingo presenta suficiente evidencia de haber sido impactado considerablemente por la Tormenta Tropical Nate. La diferencia entre secciones transversales en la figura anterior muestra como Nate generó cambios debido al aumento de caudal que experimentó durante el evento debido al lavado de fondo.

Aún más interesante, es como el cauce de manera similar a la estación Nuestro Amo, presenta una tendencia a recuperar el nivel original que traía el cauce, antes de la tormenta tropical. A continuación, se presentan las secciones transversales correspondientes a los meses de noviembre y diciembre de 2017, y el aforo más próximo a estas fechas, que correspondería al 26 de febrero de 2018, en donde se muestra una sección quizás no con la misma morfología que presentaba el 5 de septiembre de 2017, pero tendiendo a este tipo de sección transversal.

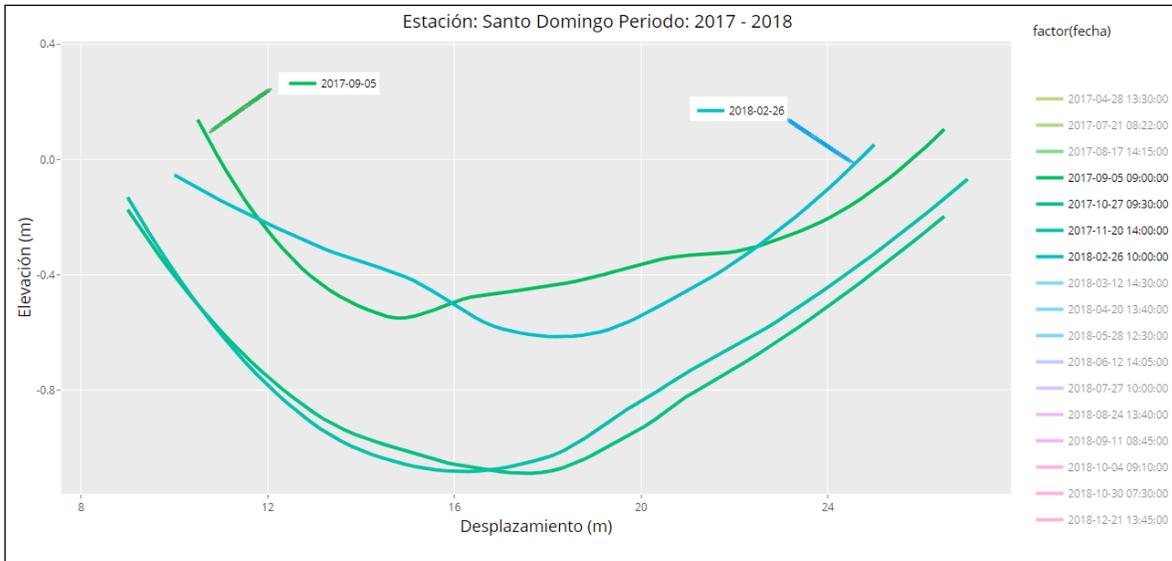


Figura 74. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-27 post-Nate

Elaborado por: Alfaro, 2021

Fuente: ICE, 2020

6.3.4. Estación Echeverría 24-29

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 24-29

Los cambios observados en Echeverría son muy interesantes. Para el 26 de octubre del 2010 el cauce mantenía una morfología con dos fosas. Cinco días después de la tormenta tropical el cauce no tiene una alteración importante en la morfología mencionada, mantiene las dos fosas mencionadas con un aumento de sedimentación muy ligero indicando que Tomás no tuvo mayor afectación en los primeros días. En este aspecto, la estación muestra un comportamiento similar a la estación 24-24 para la misma tormenta tropical.

Lo interesante ocurre en el mes de diciembre, donde la morfología cambia drásticamente a una sola cresta en la margen derecha del río. Lo anterior ocurre debido a una sedimentación predominante en la margen izquierda del río que alcanza valores de hasta 32 cm. Por otro lado, la margen derecha se erosiona considerablemente con valores de hasta 26.5 cm en los puntos más bajos. Dicha morfología de una cresta se mantiene a lo largo de todo el 2011 con evidentes variaciones de procesos erosivos y de sedimentación.

A continuación, se presentan los resultados gráficos de las secciones transversales de la estación Echeverría.

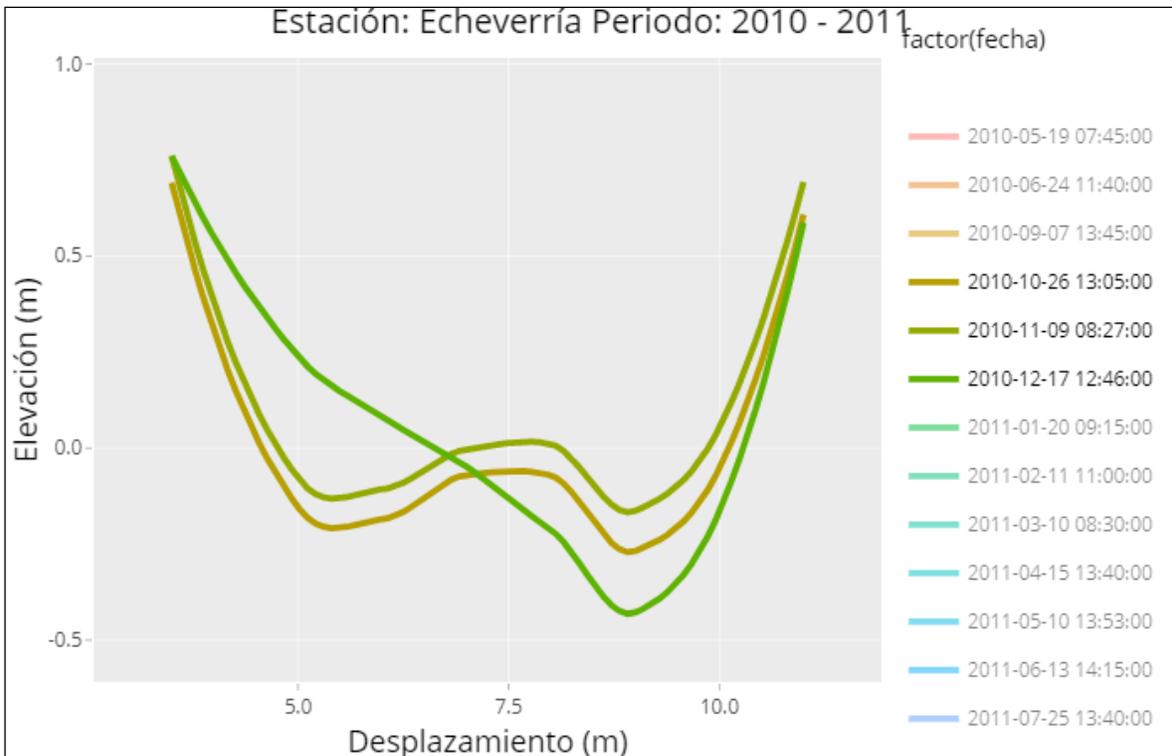


Figura 75. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-29 durante la Tormenta Tropical Tomás

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Es interesante como se mencionó anteriormente, que Nuestro Amo y Echeverría muestran afectaciones similares provocadas por la Tormenta Tropical Tomás, en donde no se vieron reflejados cambios en las secciones transversales en los primeros días de la tormenta tropical. Ambas estaciones muestran el mismo patrón de alteración, sedimentándose ligeramente en los primeros días, y posteriormente mostrando alteraciones bastante significantes en la morfología de ambos ríos.

Desafortunadamente debido al distanciamiento entre las fechas de toma de datos, no es posible determinar con exactitud en cuales días posteriores al inicio del evento ocurren los cambios morfológicos. La entrada de Tomás en Costa Rica comienza teniendo afectaciones indirectas con el ingreso de humedad en el país cerca del 2 de noviembre, por lo que las precipitaciones derivadas de este proceso pudieron haber influido en la sedimentación que se observa en ambos cauces. Los cambios morfológicos observados, pueden tener diversos

órigenes, sin embargo, uno de los más probables es el ingreso de material al río producto de deslizamientos y desestabilizaciones debido a la saturación de los suelos ante la exposición continua de agua durante todo este periodo, así también como el gran aporte de sedimentos de toda la cuenca que ocurre en este tipo de eventos.

Finalmente, se intentó realizar la comparación de los resultados obtenidos para la Tormenta Tropical Tomás con los años 2012 y 2013. Para el año 2012 se logró observar una sedimentación con una magnitud muy similar, presentando valores que rondan los 30 cm en la margen izquierda, sin embargo, la margen derecha también presentó sedimentación, por lo que no fue posible comparar la erosión generada durante la tormenta. El año 2013 presenta grandes déficits de información a final del año por lo que desgraciadamente no fue posible comparar resultados.

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 24-29

En cuanto al periodo en que ocurre la tormenta tropical en específico, es posible visualizar una variación bastante importante en la sección, producto de una sedimentación a lo largo de todo su ancho. Se determinan cambios de acumulación de sedimentos que generan diferencias que rondan entre los 10 hasta los 35 cm.

Posterior a la tormenta tropical se estudia el comportamiento que toma el cauce hasta mayo del 2018. En primera instancia se observa que el mes posterior a Nate tuvo un comportamiento erosivo muy ligero. Dicho comportamiento se mantiene en los siguientes meses hasta llegar a finales de mayo, donde se hace una observación muy interesante. En mayo (donde continúa la erosión de fondo), se compara dicha sección transversal con otras secciones graficadas anteriormente y se observa cómo el cauce aún después de un evento tan importante como Nate tiende a recuperar la morfología que traía antes del evento.

Al compararse las curvas del 5 de setiembre del 2017 y del 28 de mayo del 2018, las curvas coinciden bastante bien y presentan diferencias muy pequeñas una de otra. Mostrando una vez más la tendencia a alcanzar una morfología determinada y recuperarse para llegar a un "equilibrio" previo.

En cuanto a los meses previos a Nate, las secciones transversales de Echeverría mostraban un comportamiento prácticamente estático sin variaciones importantes hasta el mes de

agosto en donde el cauce sufre una sedimentación muy importante y cambia considerablemente su forma. Se quiso estudiar el comportamiento del cauce en periodo ordinarios, sin embargo, desafortunadamente existe un déficit de información importante en los años 2012 -2014. Posteriormente en septiembre, se observa el efecto contrario con una erosión generalizada a lo largo del centro y la margen izquierda del cauce.

En la figura a continuación, se muestra el proceso descrito en el párrafo anterior.

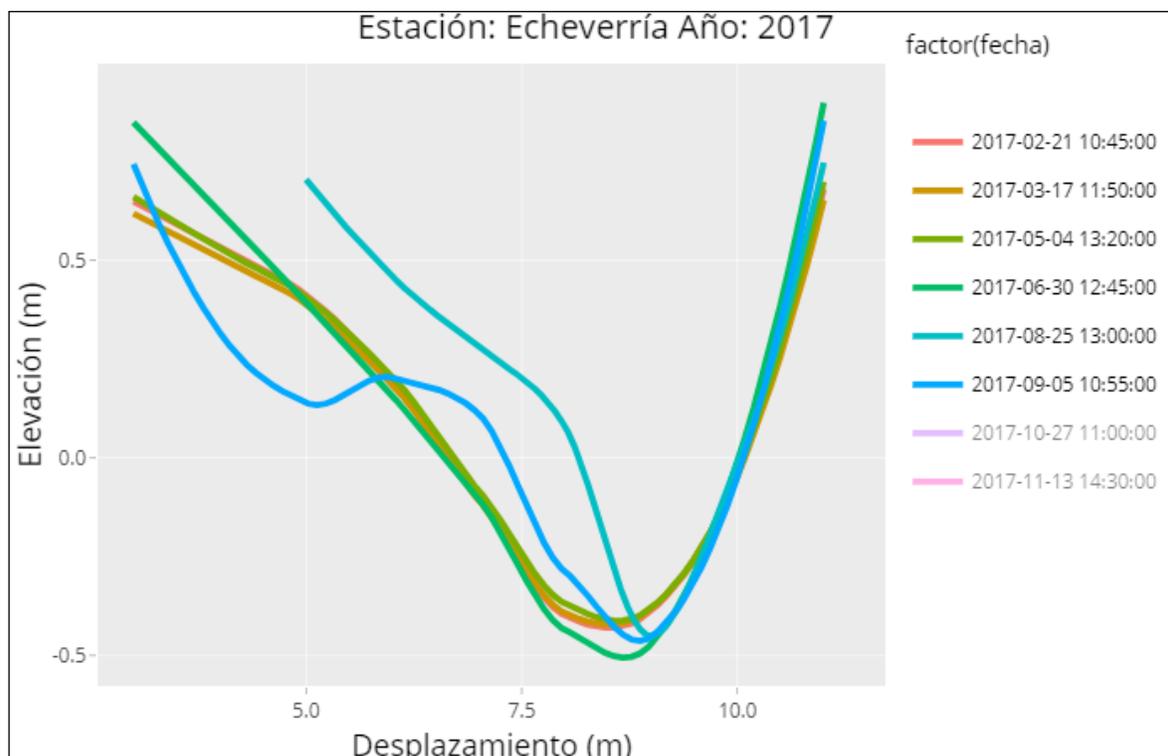


Figura 76. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-29 previo a Nate

Elaborado por: Alfaro, 2021

Fuente: ICE, 2020

En cuanto al análisis de Echeverría en relación a la tormenta tropical en específico, en la figura a continuación, se presentan los resultados de las secciones transversales correspondientes a este fenómeno y el comportamiento descrito anteriormente.

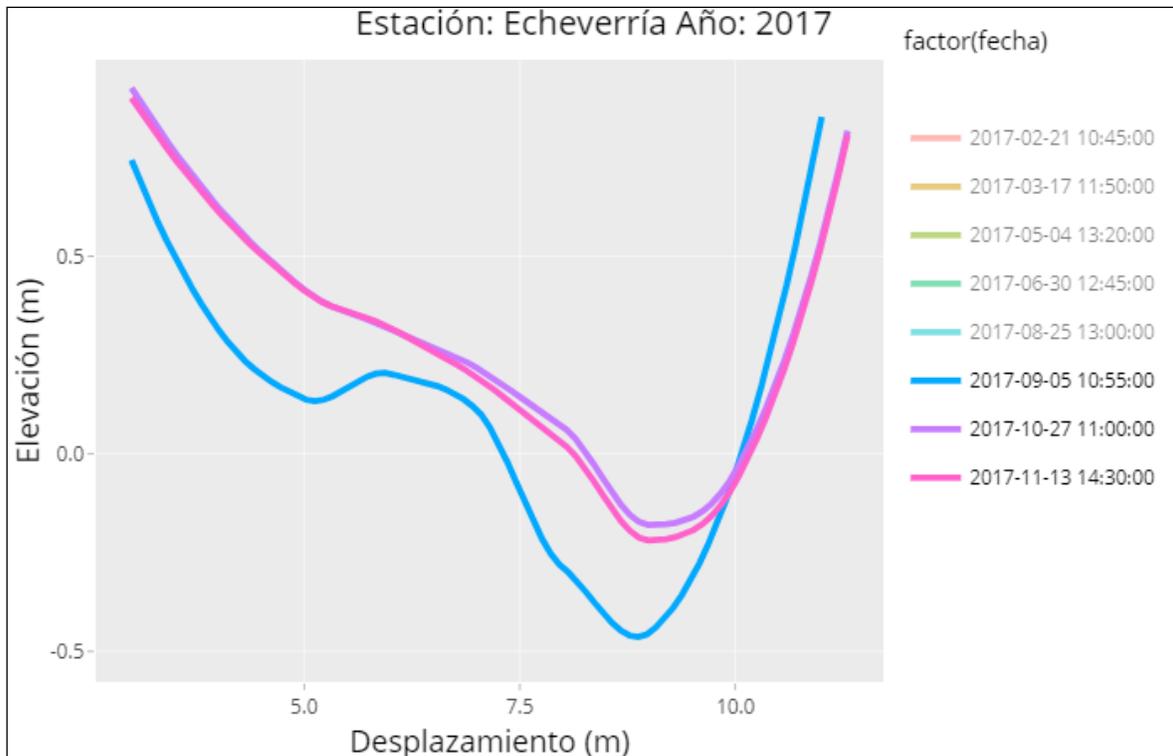


Figura 77. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-29 debido a la T.T. Nate

Elaborado por: Alfaro, 2021

Fuente: ICE, 2020

Como se discutió previamente, el cambio principal inducido por la tormenta tropical en el río fue una sedimentación, sin embargo, el comportamiento predominante en las estaciones de la cuenca del Pacífico ha sido erosivo. Nuestro Amo (24-24) fue de las estaciones que presentaron inicialmente sedimentación al igual que Echeverría, sin embargo, la estación 24-24 mostró un cambio en su comportamiento en los meses próximos erosionándose agresivamente, mientras que en Echeverría en los meses próximos la estación no presenta variaciones importantes entre octubre y noviembre.

Posterior a la tormenta tropical, se estudia el comportamiento que toma el cauce hasta el 28 de mayo de 2018, ya que al igual que las estaciones anteriores presenta un comportamiento de interés. Posterior a Nate el comportamiento predominante en el 2018 fue la erosión, mostrando en los meses iniciales una tendencia a moldear la morfología de la sección transversal a una forma similar a la sección transversal previa a Nate.

Dicho comportamiento se mantiene en los siguientes meses hasta llegar a finales de mayo, donde es posible determinar una característica muy interesante. En mayo se realiza la comparación de dicha sección transversal con secciones graficadas anteriormente y se observa como el cauce aún después de un evento extremo como Nate tiende a recuperar la morfología que traía antes del evento al igual que otras estaciones de la misma vertiente.

Al compararse las curvas del 5 de setiembre del 2017 y del 28 de mayo del 2018, las curvas coinciden bastante bien y presentan diferencias muy pequeñas una de otra. Mostrando una vez más la tendencia a alcanzar una morfología determinada y recuperarse para llegar al "equilibrio" que tenían previamente. A continuación, se presentan los gráficos correspondientes a estas dos fechas.

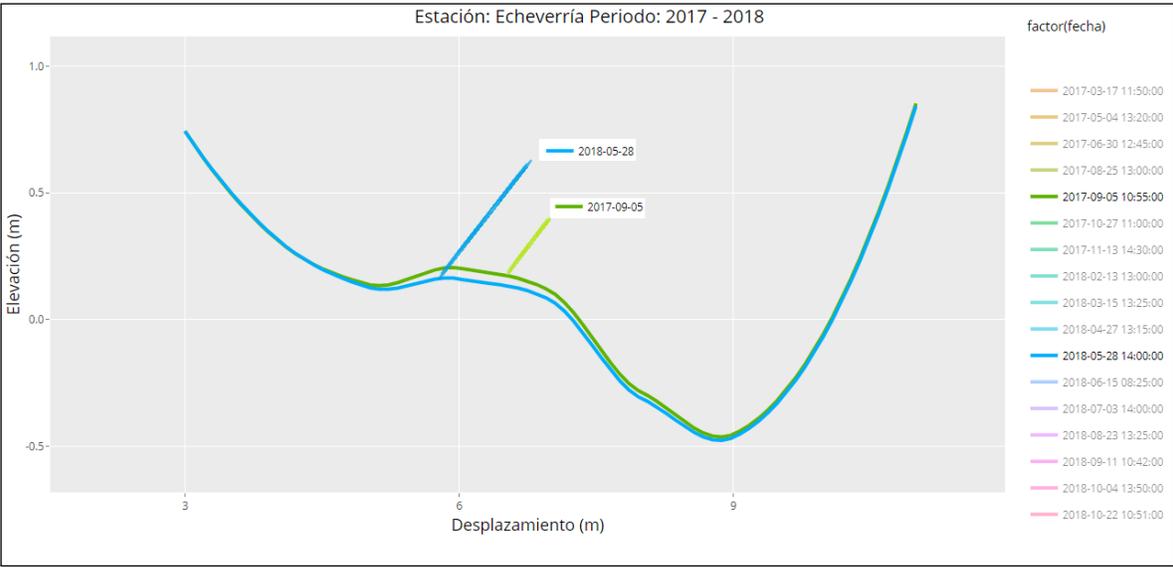


Figura 78. Cambios en las secciones transversales de la estación 24-29 en septiembre de 2017 y mayo de 2018

Elaborado por: Alfaro, 2021

Fuente: ICE, 2020

6.3.5. Estación El Brujo 31-03

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 31-03

Para esta estación se cuenta con aforos en octubre y noviembre del 2010, unos cuantos días posterior a la tormenta tropical. Sin embargo, no se puede estudiar la evolución en el mes de diciembre.

Se observa que entre el 26 de octubre y el 10 de noviembre (periodo de influencia de Tomás) hay una erosión importante que llega a superar los 50 cm, principalmente en la margen izquierda y ligeramente la margen derecha.

En la figura a continuación, se presentan las secciones transversales de la estación 31-03 representativas a la tormenta tropical.

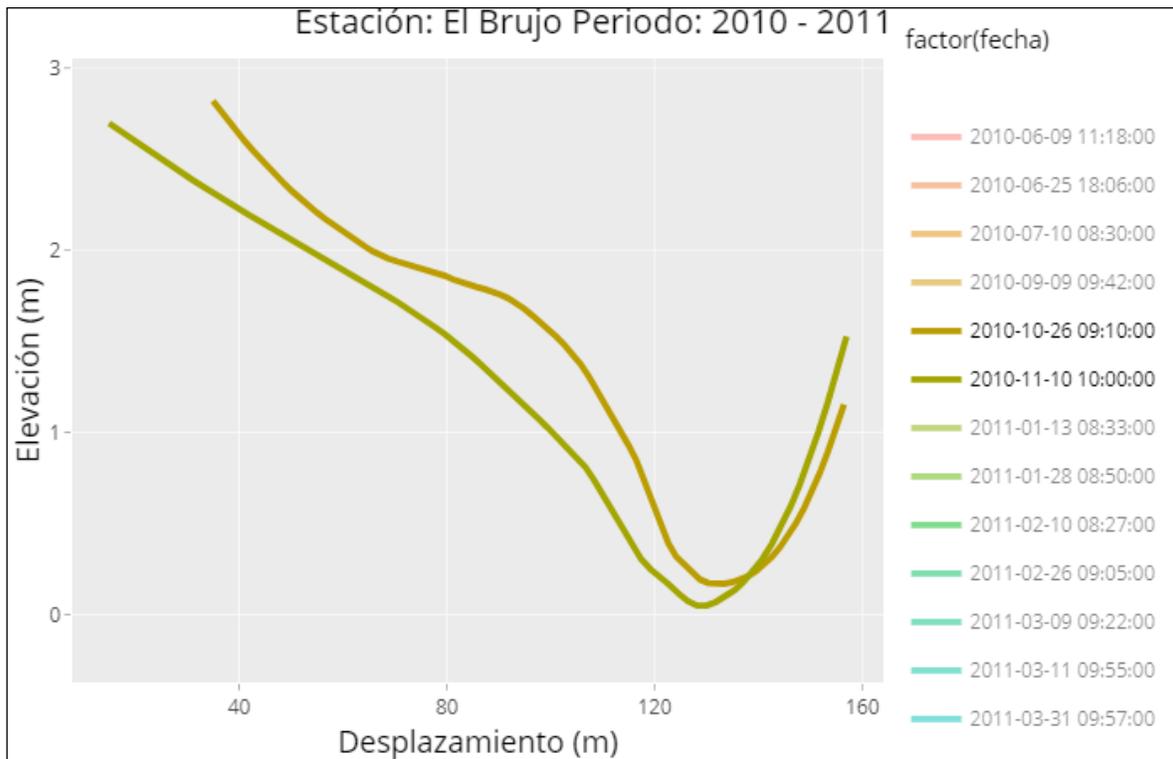


Figura 79. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-03 durante la Tormenta Tropical Tomás

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

En la figura anterior se puede observar que el cauce presenta un comportamiento similar a la estación de Santo Domingo, donde predominaron los procesos erosivos sobre el cauce. Ambas estaciones se encuentran en diferentes cuencas y presentan características de relieve distintas, sin embargo, esto demuestra la gran diversidad de escenarios que pueden ocurrir debido a un evento hidrometeorológico extremo, ya que existe una dependencia de una enorme cantidad de variables y la cantidad de precipitación generada por la tormenta tropical, es solamente una de ellas.

En el mes de enero se observa que parte del sedimento lavado por Tomás se recuperó en el margen izquierdo, y se erosionó el margen derecho de manera que la concavidad principal del valle del cauce se desplazó hacia la derecha como se muestra a continuación.

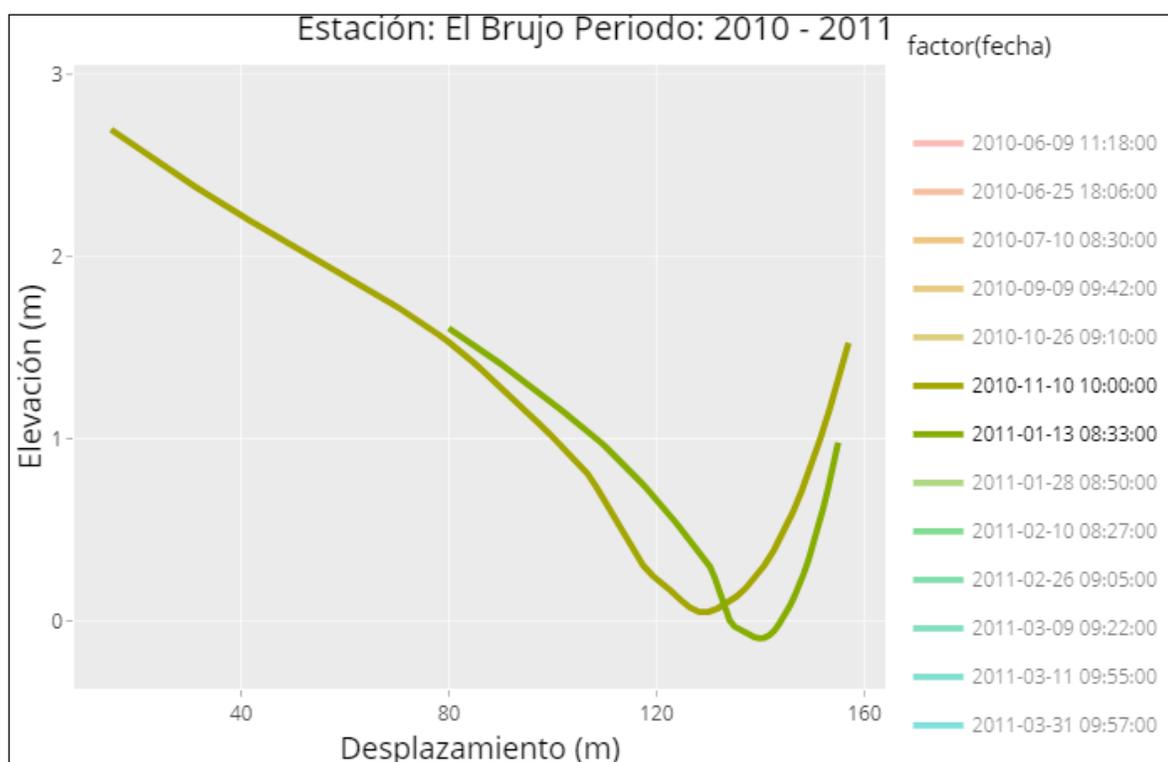


Figura 80. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-03 en enero posterior a la Tormenta Tropical Tomás

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Finalmente, no fue posible realizar comparación con meses de octubre y noviembre que no fueron afectados por algún fenómeno meteorológico importante o que no se encontraran bajo la influencia del fenómeno de ENOS. No obstante, se procedió a comparar con octubre y noviembre del 2014, debido a que no se cuenta con información para el 2012 y 2013. El problema que presenta el año 2014 en particular es que noviembre del 2014 marca el comienzo del fenómeno del niño en el país, sin embargo, es la información más fidedigna y menos afectada por algún fenómeno o evento.

En el 2014 fue posible observar que las curvas en dicho periodo no variaron de sobre manera, en donde las diferencias más grandes encontradas rondan los 12 cm de sedimentación. La poca dinámica presentada entre estos meses sugiere que los 50 cm de erosión mencionados sí representan un cambio brusco para el cauce entre los 16 días de diferencia.

Afectación derivada del Huracán Otto en la estación 31-03

En cuanto El Brujo se cuenta con datos únicamente 16 días antes del huracán (8 de noviembre) y el 3 de enero del 2017 por lo que no se puede apreciar los efectos directos que tuvo el huracán en el cauce en el mes de diciembre.

Las observaciones más importantes son:

- El fondo experimenta variaciones en el eje horizontal entre noviembre y enero, desplazándose hacia la margen derecha 4.5 m la región más profunda. Cabe mencionar que dicho desplazamiento no es exclusivo de este mes, entre septiembre y noviembre de 2016 también se observa un comportamiento similar.
- Un aspecto interesante es la evolución que presenta el cauce. Entre septiembre y noviembre se acumula una cantidad considerable de sedimentos que presentan valores inclusive superiores a un metro a lo largo de todo el cauce. Posteriormente entre los meses de mayor interés para el presente estudio correspondientes al periodo de afectación del Huracán Otto, se observa que entre el 8 de noviembre de 2016 y el 3 de enero de 2017 se presentó un proceso erosivo fuerte ya que prácticamente los sedimentos que se

mencionaron anteriormente fueron removidos, y el cauce vuelve a un estado similar al de inicios de septiembre.

A continuación, se mostrarán las secciones transversales que caracterizan el comportamiento mencionado anteriormente. Se pretende mostrar los cambios entre septiembre y noviembre en donde ocurre la gran acumulación de sedimentos de más de un metro, así como una comparación entre las 3 curvas (septiembre de 2016, noviembre de 2016 y enero de 2017).

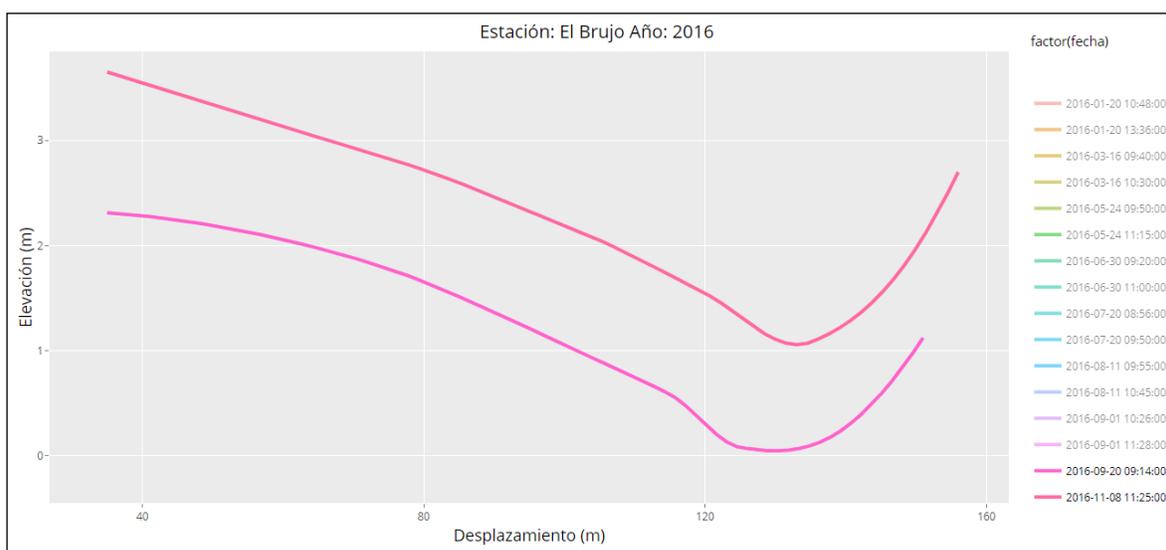


Figura 81. Comparación entre septiembre y noviembre del 2016 en la estación 31-03

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

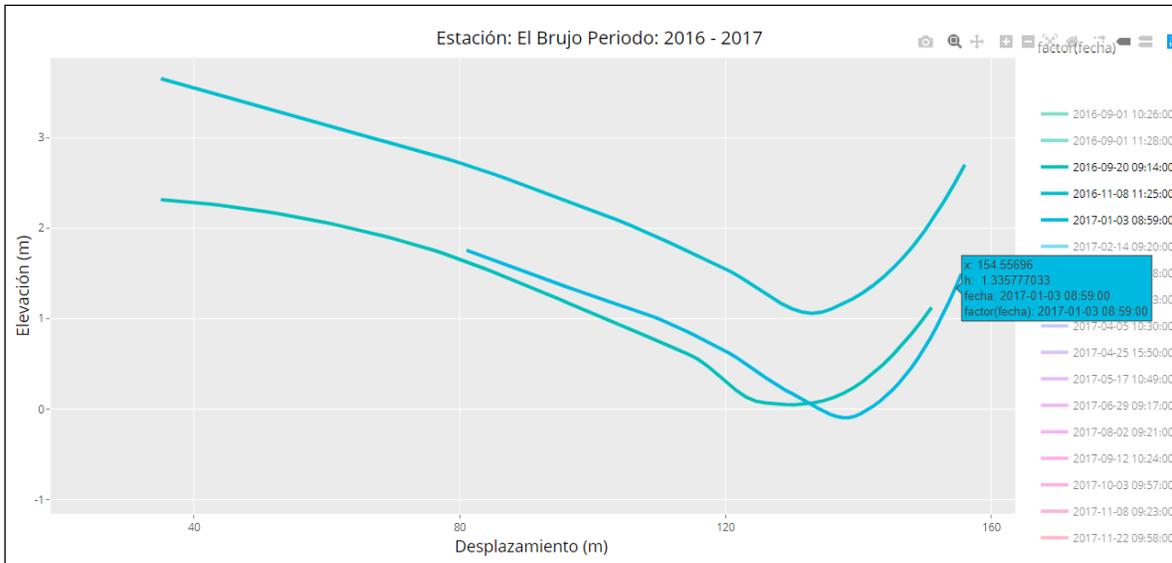


Figura 82. Comparación entre septiembre de 2016 y enero de 2017 en la estación 31-03

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

La estación del Brujo se encuentra a 171 msnm y el comportamiento que experimenta es propio de un río de poca altitud, se observa en la comparación realizada entre septiembre y noviembre, que el cauce tuvo una tendencia a sedimentarse, dicho cambio ocurre en el periodo de la estación lluviosa del Pacífico, por lo que es de esperar que las lluvias traigan consigo un arrastre importante de sedimentos de toda la cuenca a partir de la escorrentía. Por otro lado, el cambio que se evidencia entre noviembre de 2016 y enero 2017 es un proceso erosivo intenso que ocurre en un periodo de fuertes precipitaciones. En noviembre se presenta el fenómeno hidrometeorológico extremo del Huracán Otto que trajo consigo una fuerte entrada de humedad a la región del Pacífico Sur y en diciembre a pesar de que estaba finalizando el proceso de transición de la estación lluviosa a la seca, hubo zonas en donde se llegaron a registrar precipitaciones mensuales de hasta 307.2 mm como lo fue en el caso de Corredores. En general la estación muestra haber sido impactada fuertemente por el Huracán Otto.

Finalmente, a modo de comparación, se compararon los resultados con el año 2014, ya que no se posee información para los últimos meses del 2012, y en el 2013 no presenta información para ninguno de los 12 meses. De septiembre a noviembre del 2014, el cauce experimenta una sedimentación similar a la estudiada en el 2016 en donde se aprecian

valores de hasta 63 cm, los cuales siguen siendo menores al metro de sedimentos observados en el 2016. En cuanto a los cambios observados entre noviembre y diciembre del 2014, el cauce permanece poco alterado con una mezcla de sedimentación en la margen izquierda (aproximadamente 17 cm) y erosión en la margen derecha (aproximadamente 26 cm), lo cual muestra que las diferencias vistas en el 2016 fueron importantes.

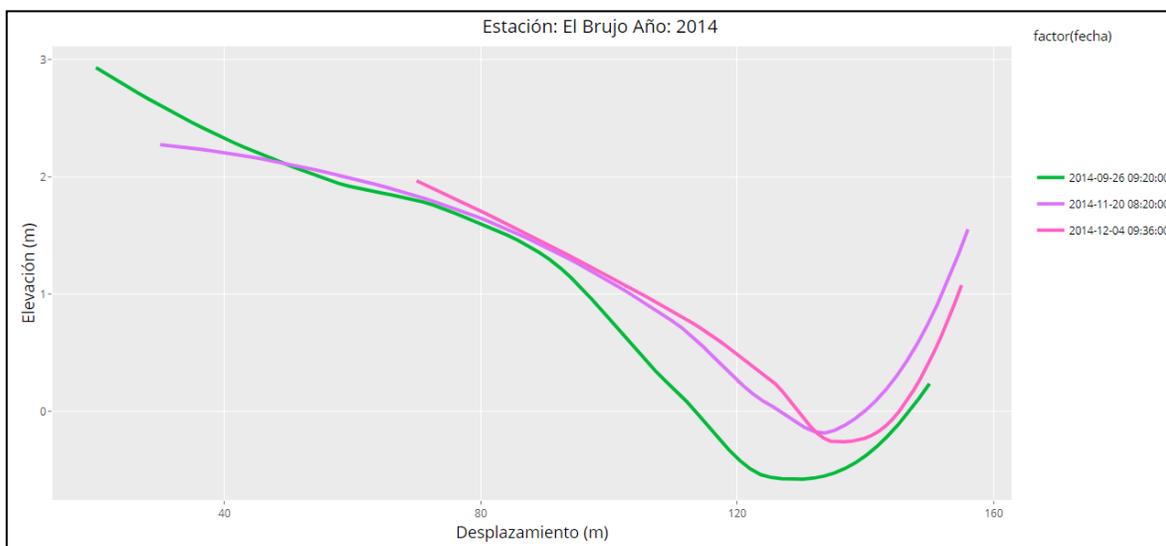


Figura 83. Estación 31-03, año 2014, Meses: Septiembre, Noviembre y Diciembre

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 31-03

En primer lugar, se cuentan con los datos correspondientes al 12 de setiembre del 2017, exactamente un mes antes del evento. Para el día 3 de octubre, todavía previo al paso de la tormenta tropical, se observa una erosión generalizada a lo largo de toda la sección transversal en donde se registran pérdidas importantes que varían entre 90 cm y 1.1 m.

Seguidamente al evento en el mes de noviembre se realiza un aforo el 8 de 11 de 2017 y es posible observar como el material lavado a principios del mes de octubre fue prácticamente repuesto, observándose una sección transversal similar a la que se analizó en el mes de setiembre. Se cuentan con datos para el 22 de noviembre en donde se observan diferencias mínimas a principios de dicho mes.

A continuación, se presentan graficadas las secciones transversales correspondientes al periodo de estudio en la tormenta tropical en la estación 31-03.

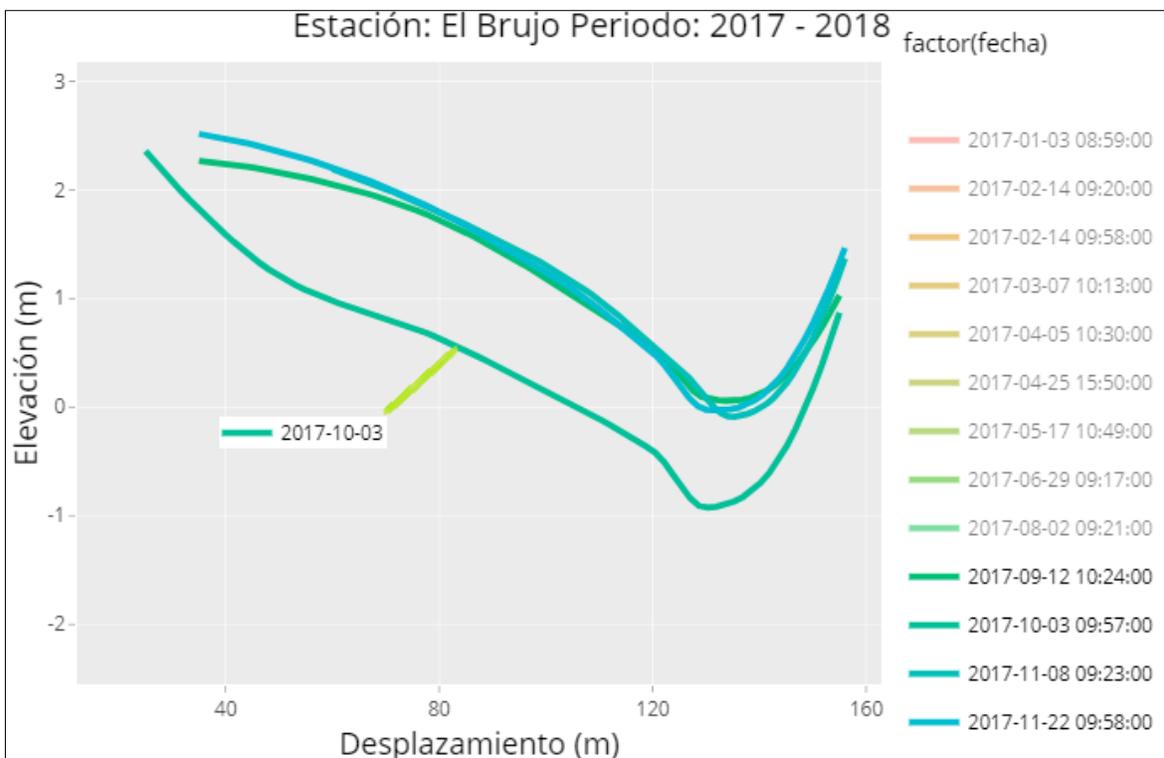


Figura 84. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-03 debido a la T.T. Nate

Elaborado por: Alfaro, 2021

Fuente: ICE, 2020

La estación El Brujo muestra al igual que las estaciones anteriores las consecuencias e impactos generados por Nate. Sin embargo, incluso antes de la tormenta las secciones transversales experimentaron transformaciones interesantes, en donde para el 3 de octubre de 2017 como se mencionó en los resultados tabulados, la sección del 12 de septiembre experimentó una erosión muy fuerte (3 de octubre de 2017). El origen de estos cambios tan radicales puede corresponder a las fuertes precipitaciones que se presentaron en el mes de septiembre que en general se comportó como un mes con bastante dinamismo en las secciones transversales mostradas.

Según el Instituto Meteorológico Nacional (2017): "Un incipiente fenómeno La Niña se hizo sentir en el país este setiembre generando eventos extremos, así como diversos incidentes a nivel nacional. Se registraron acumulados superiores al promedio en el Pacífico y Valle

Central, mientras que la Zona Norte y especialmente el Caribe, tuvieron déficit en sus precipitaciones.”

Por si fuera poco, en el mes de septiembre, la temporada ciclónica en el Océano Atlántico y Mar Caribe estuvo muy activa, por lo que es de esperar todos estos cambios en las secciones a lo largo del mes de septiembre, incluyendo la erosión de la estación El Brujo.

Se revisaron los años de comparación y el único año con información lo suficiente completa fue el año 2014. En dicho año ocurrieron cambios considerablemente grandes en donde se sedimentaron aproximadamente 57 cm en algunas regiones. Sin embargo, a pesar de que los cambios en dicho año fueron grandes, siguen siendo menores en comparación con los 90 cm – 110 cm sedimentados debido a la tormenta tropical e inclusive las precipitaciones de setiembre.

Posteriormente, los efectos percibidos por parte de la Tormenta Tropical Nate muestran que ocurrió el proceso inverso al mes de septiembre y prácticamente todo aquel sedimento lavado en el mes anterior fue nuevamente sustituido restituyendo la forma de la sección transversal que tenía en septiembre. Curiosamente El Brujo muestra haber alcanzado un equilibrio justamente después de que ocurrió el evento, de manera que la tormenta tropical aparenta haber propiciado el transporte de sedimentos que concluyeron depositados en el cauce.

6.3.6. Estación Remolino 31-04

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 31-04

Al igual que El Brujo no se cuentan con datos para diciembre del 2010. Se puede observar una evidente sedimentación a lo largo de todo el cauce llegando a alcanzar valores que superan los 70 cm.

En cuanto a la comparación Post Tomás, en enero se observa que hubo erosión en la margen izquierda cerca de los 45 - 47 cm. En general el cauce sí presenta evidencia clara de haber sido afectado fuertemente por la tormenta con la gran cantidad de sedimentos depositados en dicho periodo.

En la figura a continuación, se muestran los resultados obtenidos para las secciones transversales de la estación Remolino.

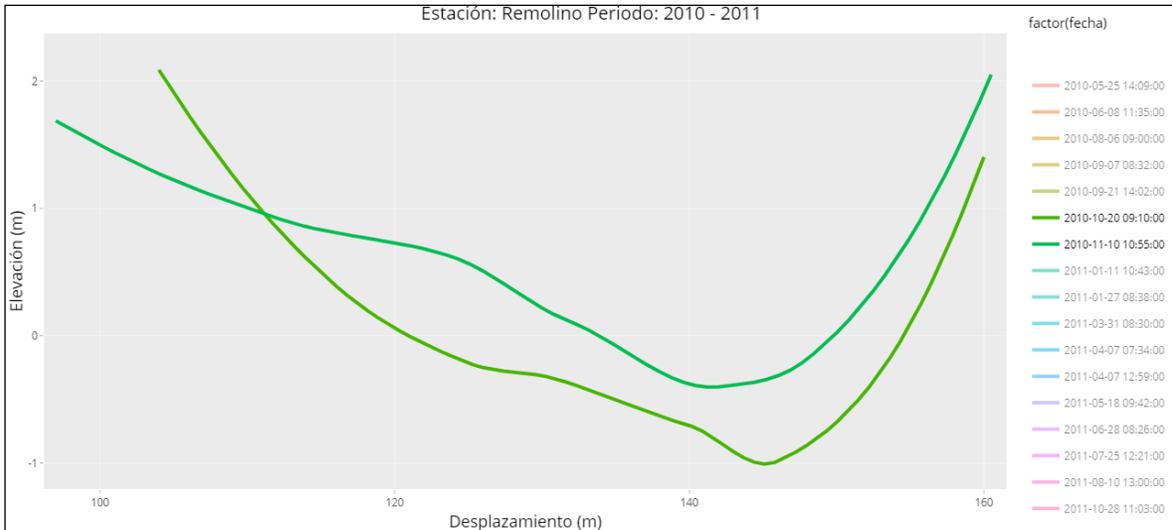


Figura 85. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-04 durante la Tormenta Tropical Tomás

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

En la imagen anterior se presentan las curvas correspondientes al día 20 de octubre y 11 de noviembre. Estas curvas muestran el principal cambio inducido por las precipitaciones ocasionadas producto de la Tormenta Tropical Tomás. El gráfico muestra una clara sedimentación, la cual difiere del comportamiento observado en la estación El Brujo, la cual la principal diferencia aportada por la tormenta en el río fue un proceso erosivo.

Se procede a comparar los resultados obtenidos con el año 2012 y 2013, sin embargo el 2012 presentó un proceso erosivo muy marcado, de manera que no permite hacer una comparación para la sedimentación observada, además solamente cuenta con datos para el inicio de noviembre y no se puede determinar el comportamiento restante del mes; por otro lado en el 2013 se cuenta con información entre el 11 de octubre y 14 de noviembre que coincide con las fechas que se vienen analizando para la T.T. Tomás. Para el 2013 se observa una ligera erosión el fondo del cauce de aproximadamente 17 cm y una ligera sedimentación en la margen izquierda como se muestra a continuación.

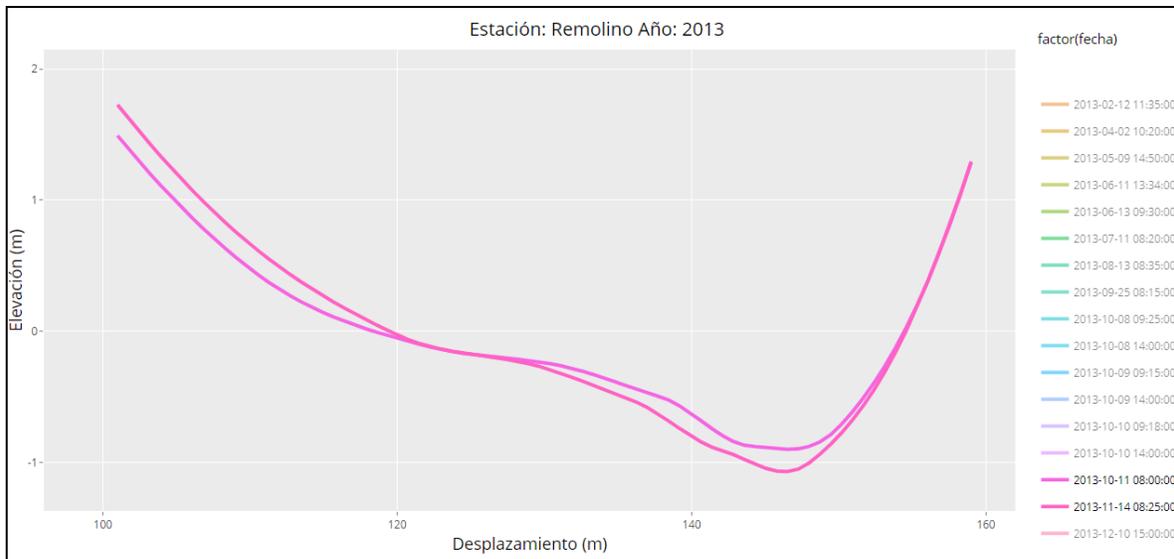


Figura 86. Curvas del año 2013 en la estación 31-04

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Ambas estaciones se encuentran ubicadas en la Cuenca del Río Térraba, por lo que es de esperar un comportamiento similar, sin embargo, la evidencia muestra nuevamente que los procesos aluviales que experimenta un cauce dependen de una enorme cantidad de variables y lo vuelven sumamente complejo. A continuación, se presenta un acercamiento de las 3 estaciones en la Cuenca del Río Térraba.

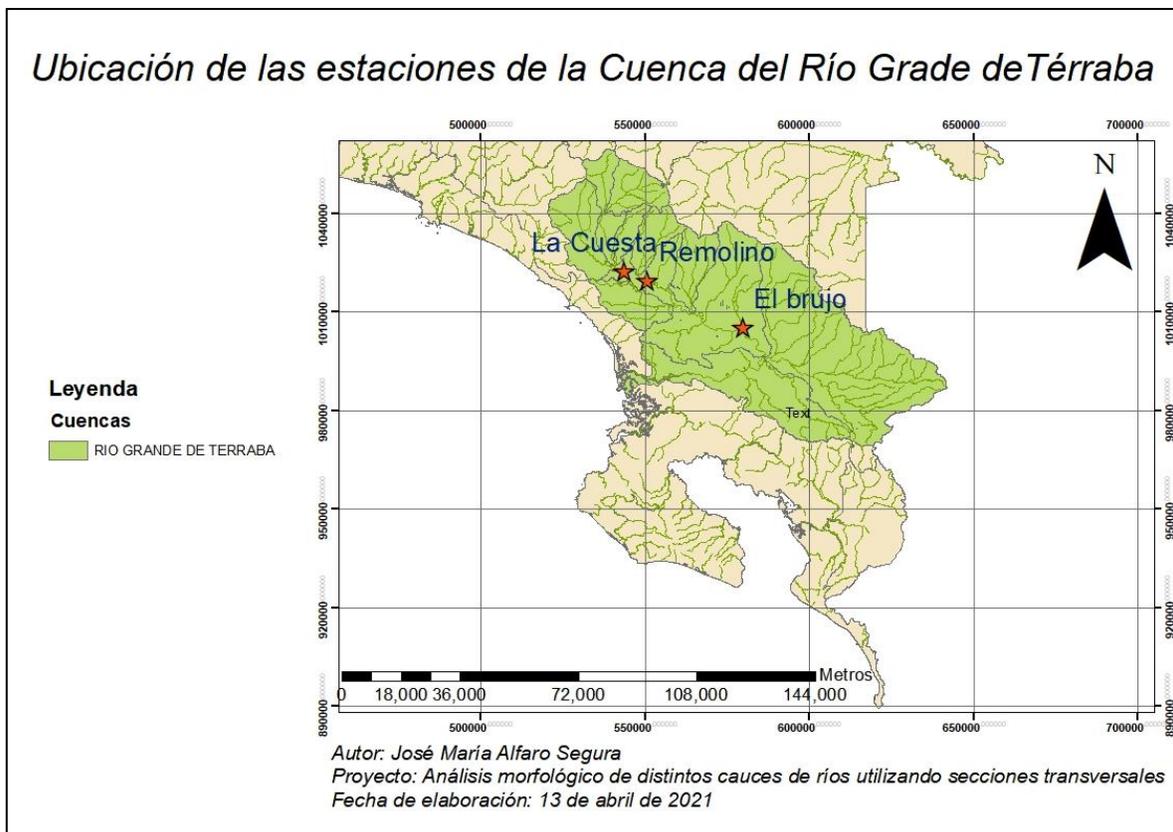


Figura 87. Localización de las estaciones ubicadas en la Cuenca 31 (Río Térraba)

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: Atlas de Costa Rica, 2014

Por otro lado, como se puede observar en el mapa anterior la estación 31-09 debería de presentar un comportamiento más consistente a la estación 31-04, ya que se encuentran en el mismo río, mientras que, en el caso de El Brujo, este puede presentar un comportamiento más variable ya que su cauce es la confluencia de dos cursos de agua distintos en donde uno de estos afluentes corresponde al curso que estudia La Cuesta y Remolino.

En el mes de enero de 2011, se observa un ligero cambio en la morfología del cauce, ya que presenta una erosión en la margen derecha, trasladando horizontalmente la concavidad o el valle más profundo del cauce en esta dirección. Esta nueva ubicación en el eje de las abscisas prevalece durante todo el 2011, obviamente presentando variaciones típicas alternándose la erosión con la sedimentación a lo largo de los meses. En la figura a continuación, se muestra ilustrado todos los meses con información del año 2011 y de color

verde el mes de noviembre de 2010, mostrando el desplazamiento horizontal inducido por la erosión en la margen derecha.

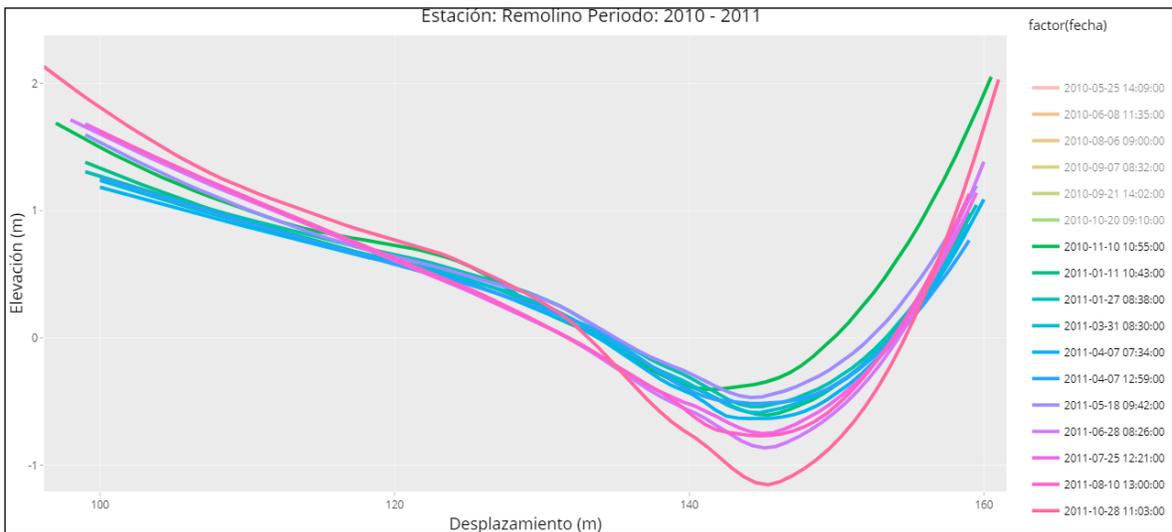


Figura 88. Secciones transversales en 31-04 para el mes de noviembre de 2010 y todo el año 2011

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Afectación derivada del Terremoto de Sámara en la estación 31-04

En cuanto al Terremoto de Sámara, nuevamente se cuenta con faltantes de información al no contar con datos en agosto y septiembre, sin embargo, el comportamiento entre julio y octubre es prácticamente invariable, periodo que incluye el evento y donde la morfología no se ve para nada alterada y por ende el cauce no aparenta haber sido afectado por el terremoto.

A continuación, se presenta los resultados correspondientes a los días 10 de julio y 9 de octubre de 2012.

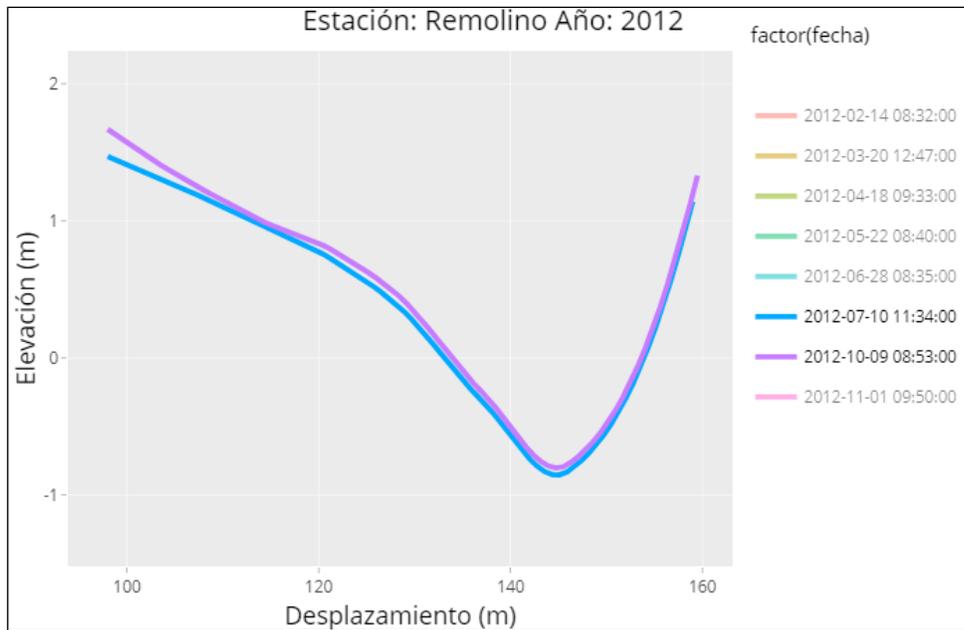


Figura 89. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-04 durante el Terremoto de Sámara

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Afectación derivada del Huracán Otto en la estación 31-04

Nuevamente se logra observar un cambio importante en la morfología del cauce en el mes de septiembre en comparación con el mes de noviembre. Se muestra una fuerte erosión a lo largo de toda la sección transversal y ronda entre los 70 cm hasta los 1.33 m para el mes de noviembre previo a Otto.

De manera similar a la estación 31-03, no se cuentan con datos en diciembre de manera que no se puede observar el efecto directo que tuvo Otto. Sin embargo, en enero del 2017 para esta estación en particular, la morfología de la sección transversal se mantiene prácticamente la misma, en comparación con el 16 de noviembre del 2016.

A continuación, se muestran los resultados gráficos descritos anteriormente.

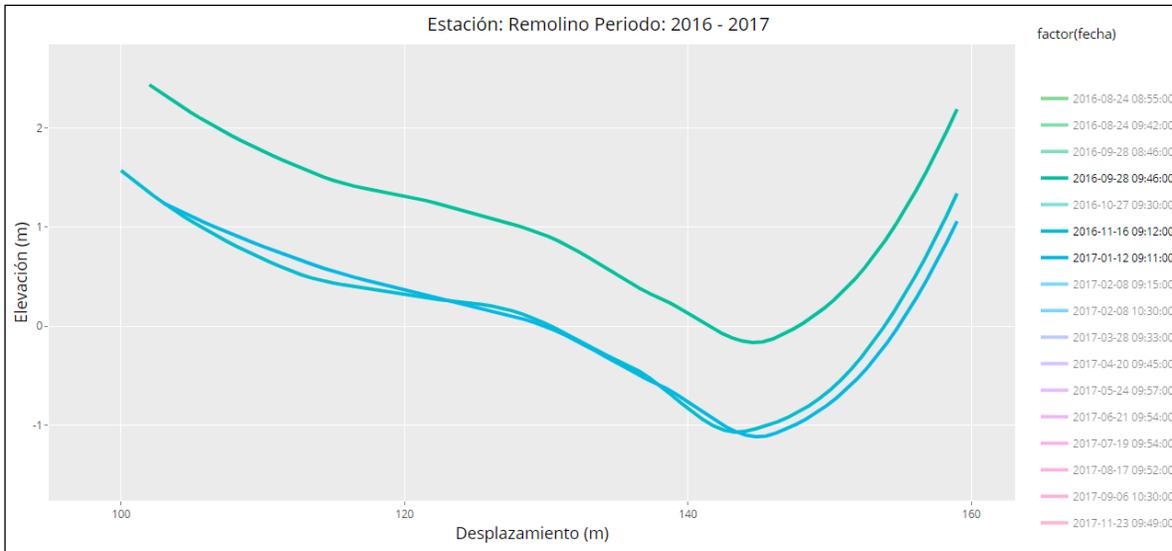


Figura 90. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-04 previo, durante y posterior al Huracán Otto

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

El comportamiento de esta estación es muy interesante porque a diferencia de El Brujo, la estación 31-04 muestra alteraciones poco considerables en el periodo de influencia del Huracán Otto. Es apreciable una ligera erosión entre el 16 de noviembre de 2016 y el 12 de enero de 2017 sin embargo es prácticamente despreciable en comparación con su estación vecina aguas abajo. El problema principal que presenta es el hecho de que en diciembre puede haberse presentado algún proceso importante y no fue registrado, y por consiguiente, el cauce aparenta no haber presentado diferencias considerables debido al huracán.

Ambas estaciones coinciden en el hecho de que, para el 8 de noviembre, El Brujo muestra altos niveles de sedimentación, que puede tener su origen de la fuerte erosión que se presentó aguas arriba en Remolino, que para el día 16 de noviembre muestra que sufrió una fuerte erosión con anterioridad.

Finalmente, a pesar de que Otto presenta evidencia en la estación 31-03 de haber removido una gran cantidad de sedimento entre los días 8 de noviembre de 2016 y 3 de enero de 2017 y haber sido influenciada por el huracán, la estación 31-04 no aparenta haber sido impactada fuertemente en la morfología del cauce, sino más bien las lluvias previas al mismo huracán.

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 31-04

Desafortunadamente para el evento meteorológico de la Tormenta Tropical Nate, no se cuentan con datos para el mes de octubre del 2017, sin embargo, se puede estudiar basándose en los datos del 6 de setiembre del 2017, y el 23 de noviembre del mismo año.

Posterior al evento, la sección transversal cambia de forma, sedimentándose la parte derecha con valores muy variados que logran alcanzar una diferencia de hasta 61 cm (con respecto a la parte más profunda del cauce) y erosionándose la parte izquierda (alcanzando valores de hasta 52 cm), de esta manera se amplía el espejo de aguas (o banco del río) considerablemente.

Lo interesante de este caso en particular es que la sección transversal permanece con la misma morfología adoptada después de Nate a lo largo del 2018, con ligeros cambios erosivos y de sedimentación con el paso de los meses, pero siempre manteniendo la misma forma post - Nate.

Remolino es una estación con un comportamiento interesante debido a los cambios morfológicos que sus secciones transversales experimentan. En la figura continuación, se presentan las secciones de Remolino previas la Tormenta Tropical Nate, en donde se puede apreciar que todas las curvas presentan la misma morfología sin cambios significantes entre sí.

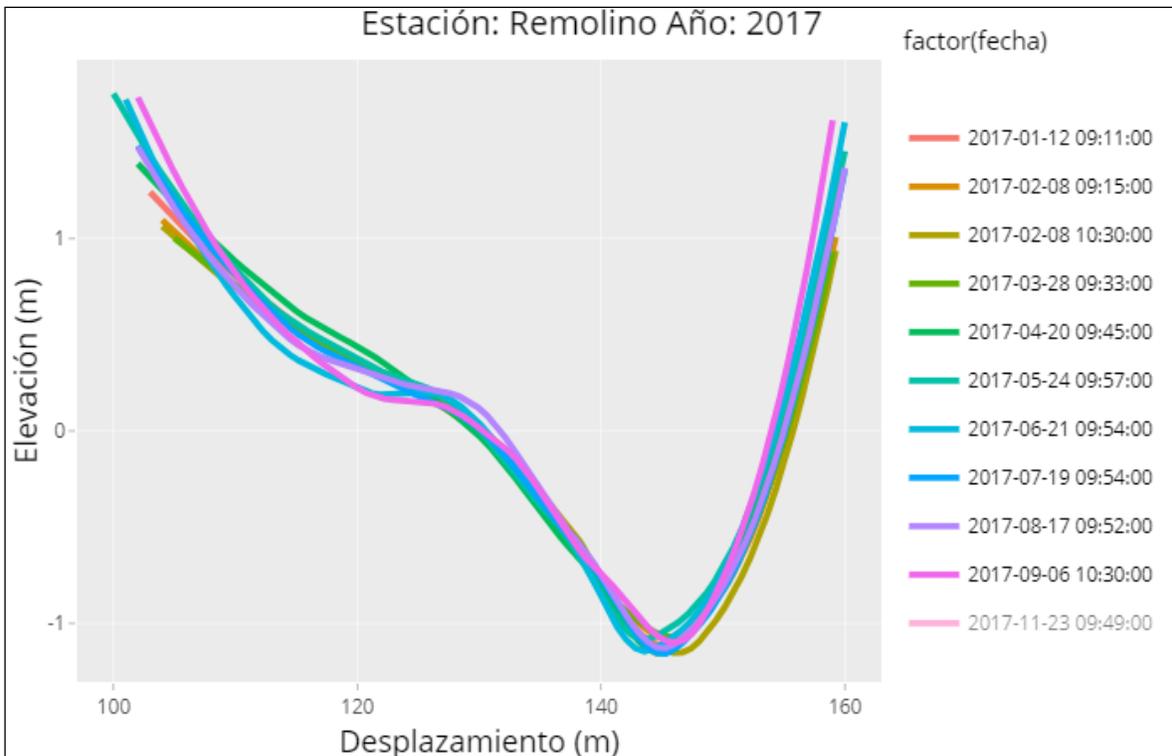


Figura 91. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-04 antes de la T.T. Nate

Elaborado por: Alfaro, 2021

Fuente: ICE, 2020

El cauce se muestra sumamente estable a lo largo de todo este periodo, que abarca desde el 12 de enero de 2017 hasta el 6 de septiembre del mismo año. Una vez la Tormenta Tropical Nate comienza a tener afectaciones directas sobre el país, el cauce cambia su morfología radicalmente como se muestra en el gráfico a continuación. En la Figura a continuación se muestran los meses de enero a septiembre, así como la sección transversal aforada el 23 de noviembre del 2017, en donde cambia su forma debido a la interacción de una erosión en la margen izquierda y sedimentación en la margen derecha.

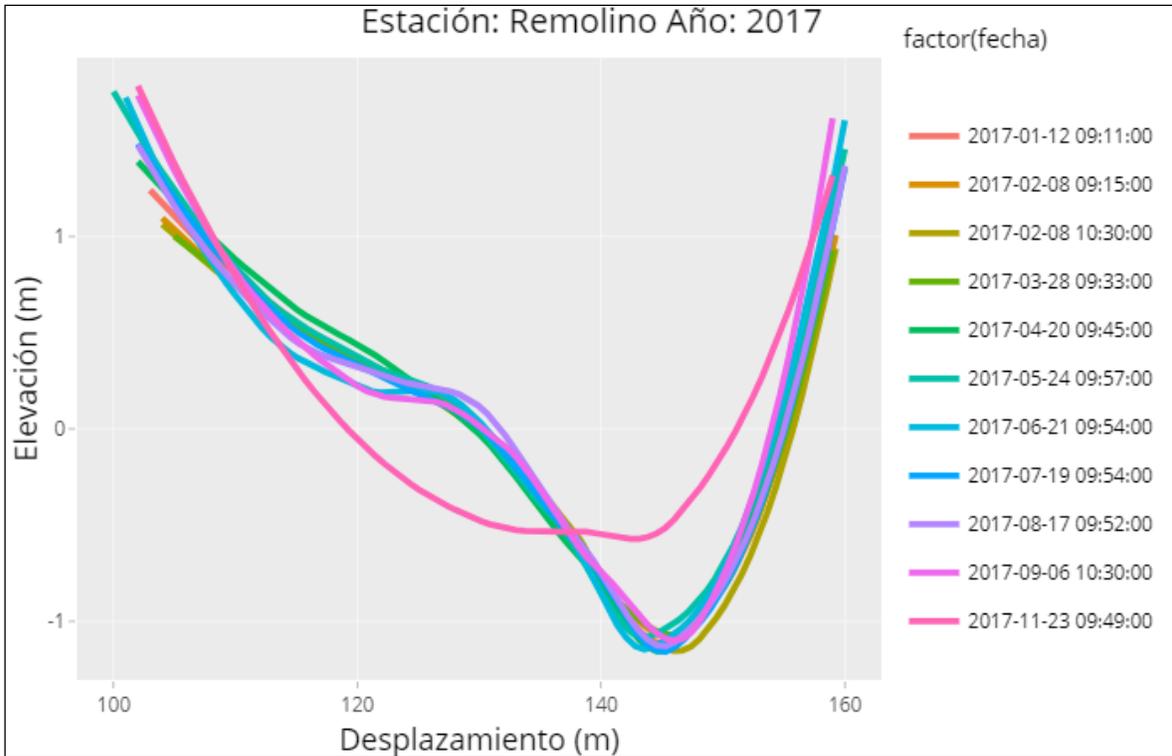


Figura 92. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-04 debido a la T.T. Nate

Elaborado por: Alfaro, 2021

Fuente: ICE, 2020

Lo interesante de este caso en particular fue el hecho de que al río le toma mucho más tiempo recuperar la morfología inicial que traía el cauce antes de la tormenta tropical. En la figura a continuación, se presentan todas las secciones transversales de los años 2017 y 2018 en donde se observa la diferencia entre los dos años.

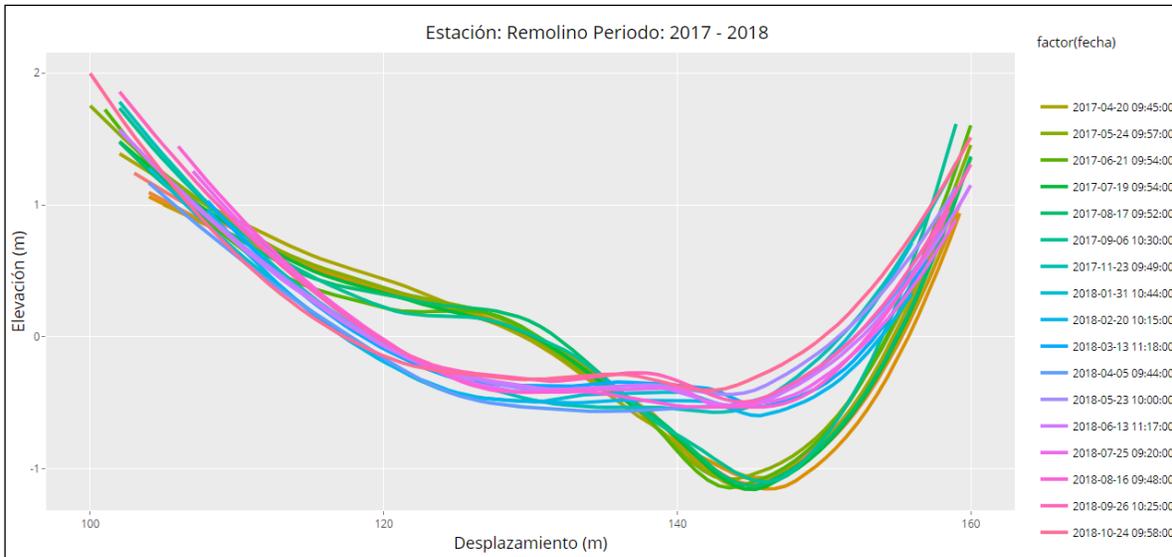


Figura 93. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-04 debido a la T.T. Nate

Elaborado por: Alfaro, 2021

Fuente: ICE, 2020

Las curvas con tonalidades de verde y con una fosa más profunda, son las secciones pertenecientes al año 2017, mientras que las que presentan tonos celestes y de color magenta, así como una forma semejante a un canal trapezoidal son las secciones transversales del año 2018.

Desafortunadamente los datos de información carecen de la información correspondiente a noviembre y diciembre de 2018, ya que entre el 24 de octubre de 2018 y el 16 de enero de 2019 ocurre la “estabilización” del cauce a las condiciones previas a la Tormenta Tropical Nate, y por ende no es posible darle trazabilidad a este cambio tan importante. No obstante, queda en evidencia que puede existir una gran variabilidad del tiempo que un río puede requerir para estabilizarse a las condiciones previas a un evento hidrometeorológico extremo.

En la figura a continuación se muestra una comparación entre las secciones transversales de 6 de septiembre de 2017 (antes de Nate) y 16 de enero de 2019 (estabilización post-Nate).

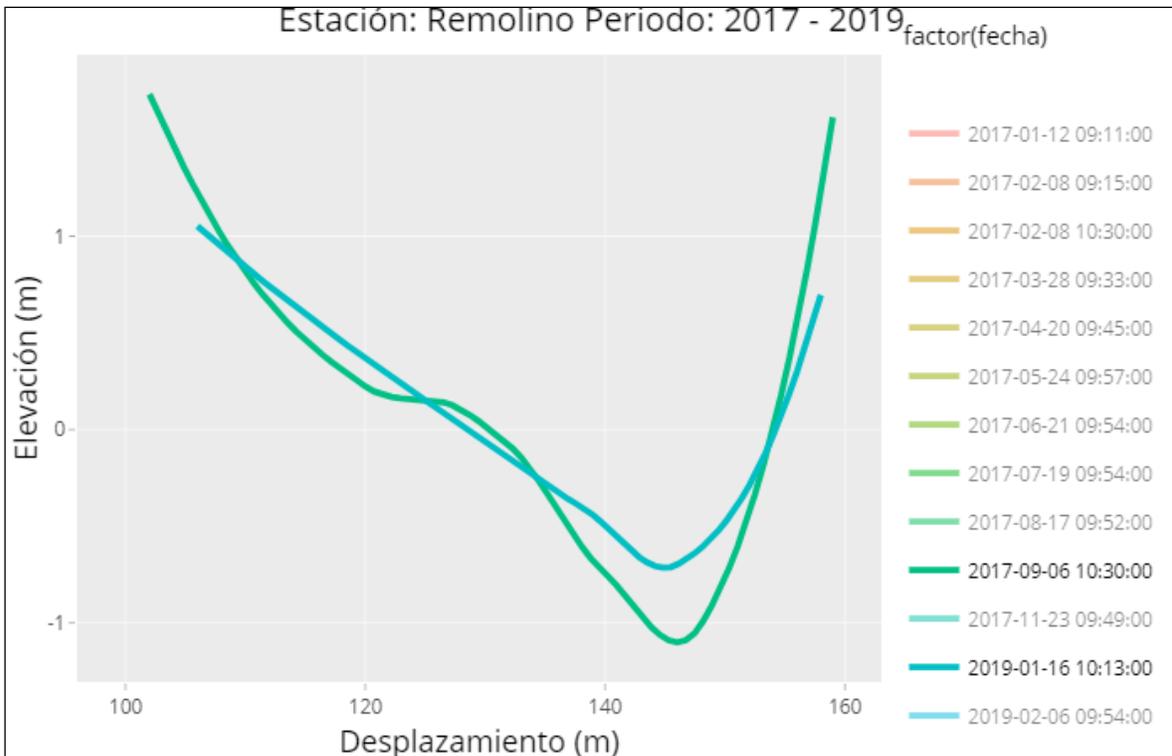


Figura 94. Comparación entre las secciones transversales de septiembre de 2017 y enero de 2019 de la estación 31-04
 Elaborado por: Alfaro, 2021
 Fuente: ICE, 2020

Por último, se procedió a realizar la comparación con los años 2013 y 2014, debido a que el año 2012 carece de información para el mes de octubre. En cuanto al 2013, existieron diferencias muy ligeras entre octubre – noviembre, sin embargo, es posible apreciar una tendencia muy clara a la erosión. Las diferencias mencionadas se encuentran alrededor de los 10 cm y 17 cm. En el año 2014 se encontraron diferencias pequeñas en comparación a las observadas derivadas por la Tormenta Tropical Nate, las cuales rondan entre los 15 cm (erosión) y 36 cm (sedimentación) ya que mostró un comportamiento mixto como el que se apreció en el análisis de Nate. A continuación, se presentan las curvas de comparación utilizadas.

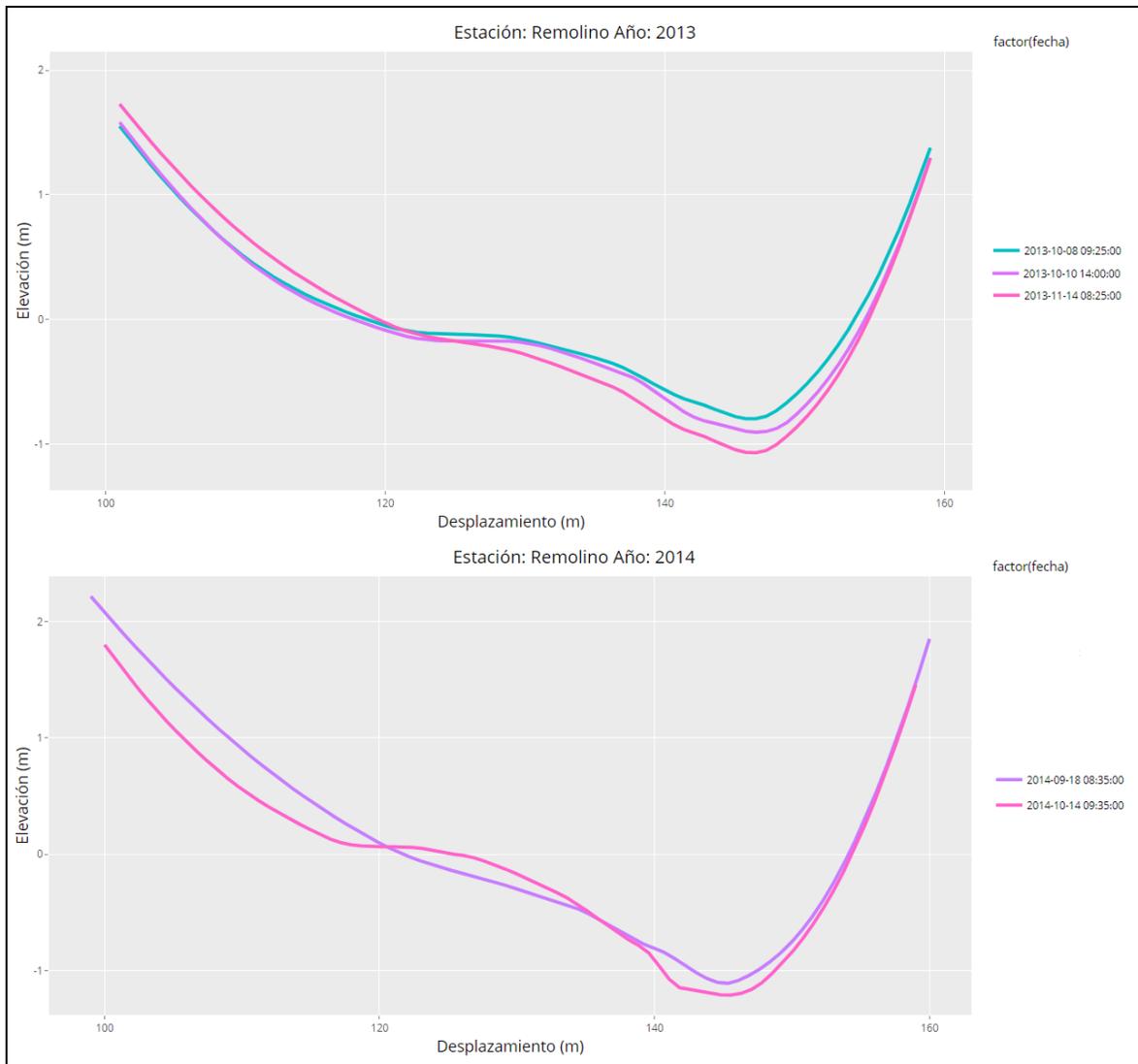


Figura 95. Comparación del comportamiento de los años 2013 y 2014 de la estación 31-04

Elaborado por: Alfaro, 2021

Fuente: ICE, 2020

Como se observa en la figura anterior, las diferencias en estos dos años sugieren que los cambios determinados durante el periodo de análisis de la Tormenta Tropical Nate fueron anómalos en comparación a años con un periodo de condiciones meteorológicas regulares, y por ende el cambio de morfología visto entre el 6 de setiembre y 23 de noviembre es considerable.

6.3.7. Estación La Cuesta 31-09

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Tomás en la estación 31-09

En la estación se registró el desarrollo del evento bastante bien. Se tienen datos a finales de octubre y del 3 de noviembre. Durante este periodo se observa una erosión bastante agresiva alcanzando valores de 136 cm de diferencia en el centro del cauce.

Posteriormente, se tomaron mediciones el 8 de noviembre en donde se observa una variante en la tendencia que venía experimentando el cauce. Se observa una sedimentación importante en el centro del cauce, así como en la margen derecha del río que ronda los 75 cm en algunas partes.

A continuación, se muestran las secciones transversales correspondiente a la estación La Cuesta (31-09) correspondientes al 27 de octubre de 2010 y 3 de noviembre de 2010.

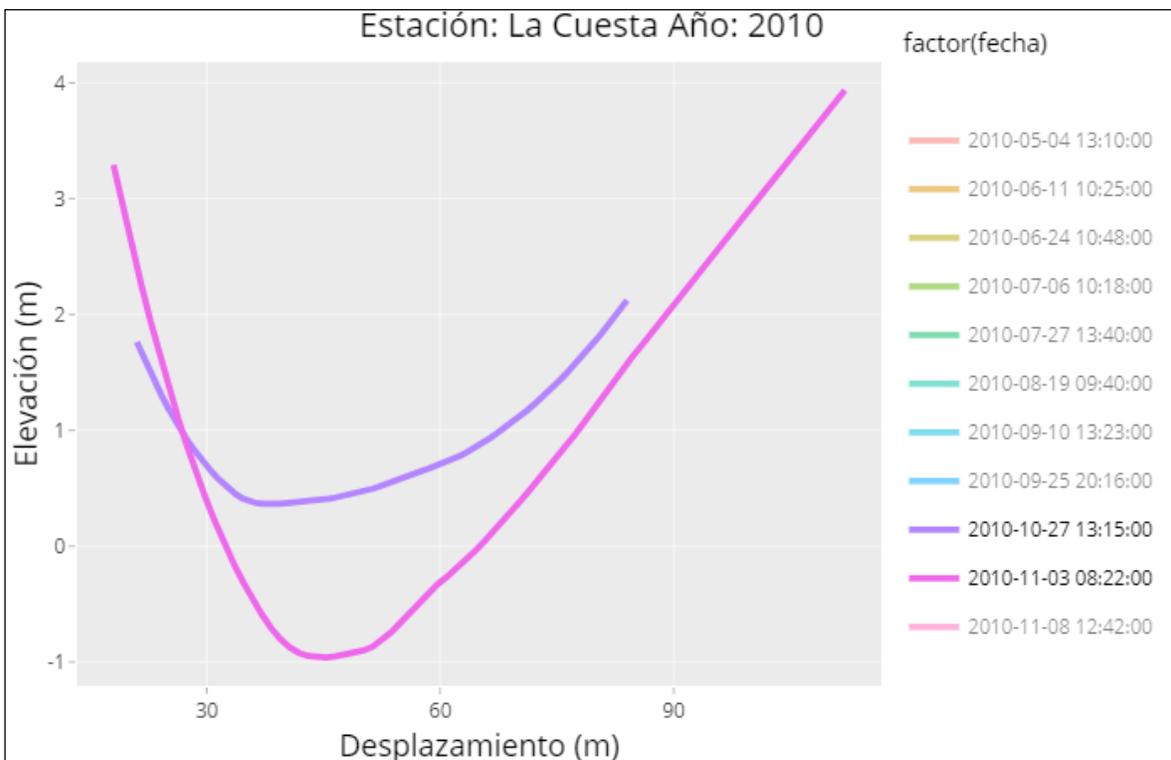


Figura 96. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-09 durante la Tormenta Tropical Tomás

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Como se observa en la figura anterior, el río experimentó un proceso erosivo muy fuerte en cuestión de 8 días. Estos días en particular, fueron el periodo de transición de la anomalía climática que se venía experimentando a lo largo del mes de octubre, y la entrada brusca de humedad que provocó la Tormenta Tropical Tomás en este periodo.

Tomás afectó severamente este cauce, erosionándolo, mientras que por otro lado la estación Remolino como se mostró anteriormente, sufrió un proceso de sedimentación. Es interesante analizar ambas estaciones en conjunto, debido a que estas se encuentran prácticamente continuas. Remolino se encuentra ubicada aguas abajo de La Cuesta, y una hipótesis para explicar la diferencia en los comportamientos observados por ambas estaciones, es el transporte de sedimentos que tuvo que haberse presentado en este periodo.

Para el 3 de noviembre de 2010 la estación La Cuesta sufrió erosión, y como se observó fue una gran cantidad de sedimentos que fueron desprendidos del fondo del cauce. Para el 10 de noviembre los datos de la estación Remolino, indican que el cauce experimentó una sedimentación considerable. Es de esperar que los sedimentos que se desprendieron aguas arriba en la estación La Cuesta fueran depositados aguas abajo de dicha estación, y esto se ve reflejado en Remolino (31-04).

Posterior al 3 de noviembre, se encuentran discrepancias entre ambas estaciones nuevamente. La Cuesta continúa con su proceso de sedimentación (que ya se venía presentando del 3 de noviembre al 8 de noviembre), a partir del 8 de noviembre se observa que la sedimentación continúa en enero del 2011 posterior a la tormenta tropical. En el caso de Remolino ocurre el fenómeno contrario, y posterior al 10 de noviembre de 2010, se observa que el cauce se erosiona según lo observado el 11 de enero de 2011.

A pesar de todas estas diferencias, sí es posible determinar que ambos cauces coinciden en una estabilización posterior al mes de enero, en donde la morfología de ambos cauces cambia relativamente poco a lo largo de todo el 2011.

Finalmente, se desea concluir que, a partir de la evidencia mostrada en las secciones transversales de la Vertiente del Pacífico, esta vertiente fue la que tuvo comportamientos más dinámicos durante el periodo de análisis de la información de la Tormenta Tropical Tomás, concluyendo que fue la vertiente más afectada por el fenómeno hidrometeorológico

y que coincide también con los reportes de afectaciones del Instituto Meteorológico Nacional.

A modo comparativo del evento en la estación La Cuesta, se presentan a continuación los resultados de la transición del mes de octubre a noviembre en los años 2012, 2013 y 2014. Es posible observar que los cambios entre dichos meses para los 3 años, son muy ligeros en comparación a los observados durante la Tormenta Tropical Tomás, lo cual pone evidencia la gran afectación generada por el evento.

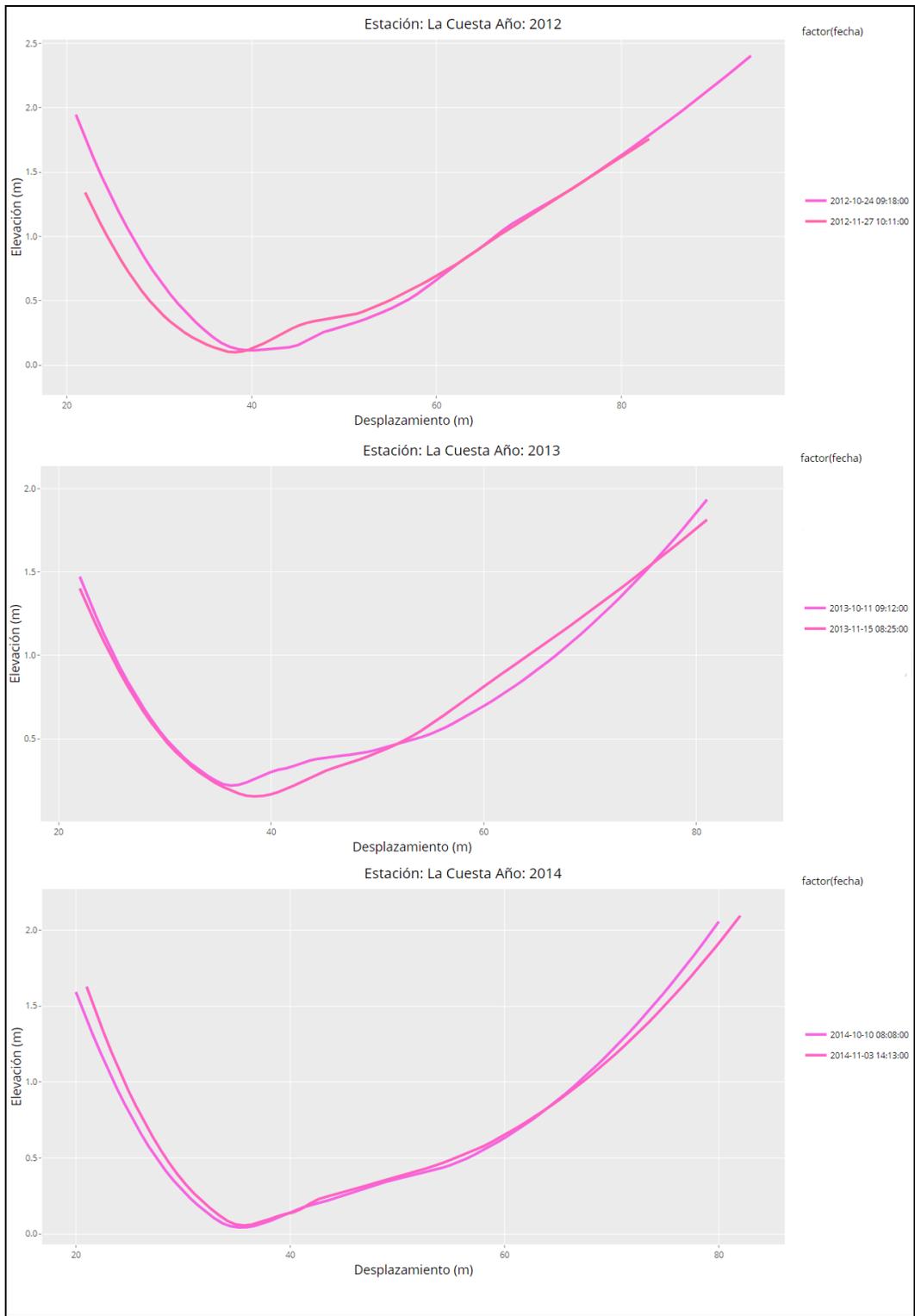


Figura 97. Curvas de octubre y noviembre en la estación 31-09 para los años 2012, 2013, 2014

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Afectación derivada del Terremoto de Sámara en la estación 31-09

En lo correspondiente al Terremoto de Sámara, nuevamente se observan resultados similares a las demás estaciones y no se ven afectaciones derivadas del terremoto, ya que solamente se observa una muy ligera sedimentación entre agosto y septiembre.

A continuación, se presentan los resultados de los días 27 de agosto, 19 de septiembre, y 9 de octubre de 2012, que demuestran la carencia de cambios morfológicos importantes en el periodo.

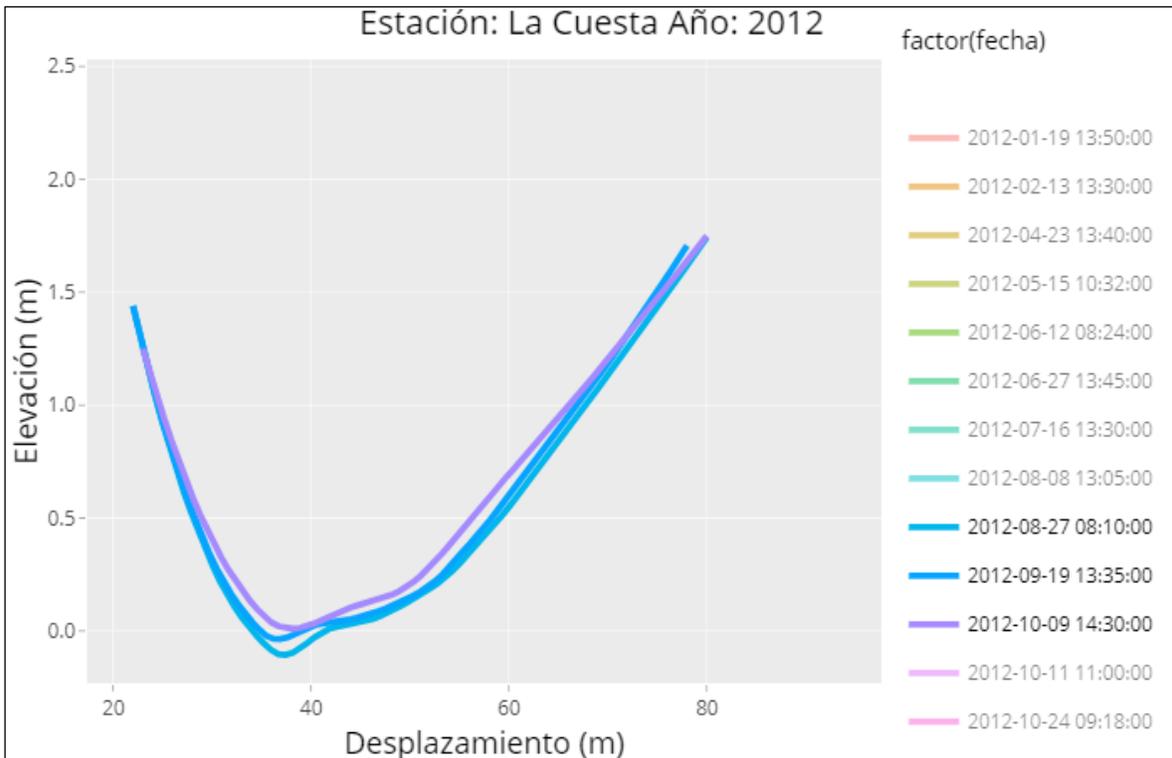


Figura 98. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-09 durante el Terremoto de Sámara

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Afectación derivada del Huracán Otto en la estación 31-09

La Cuesta no presenta variaciones extraordinarias como las anteriores. En este caso en particular se estudia desde el mes de enero del 2016 y se observa que presenta una morfología muy invariable y estable durante todo el año.

El cambio más notorio se presenta en el mes de octubre, en donde se observa erosión en la margen derecha de aproximadamente 32 cm. Dicha erosión vuelve a ser sustituida fácilmente por sedimentos en la sección transversal del 22 de noviembre de 2016.

Nuevamente, al igual que en las estaciones anteriores, no se cuenta con datos para diciembre. En cuanto a las observaciones para el mes de enero, la morfología no presenta cambios importantes a excepción de una pequeña sedimentación cerca del centro del cauce.

En la figura a continuación, se presentan las secciones transversales del 13 de septiembre de 2016, hasta el 18 de enero de 2017. Se escoge este periodo en específico debido a que como se observó en los casos anteriores, las estaciones 31-03 y 31-04 presentaron cambios morfológicos importantes entre septiembre y noviembre, así como el periodo de afectación del Huracán Otto.

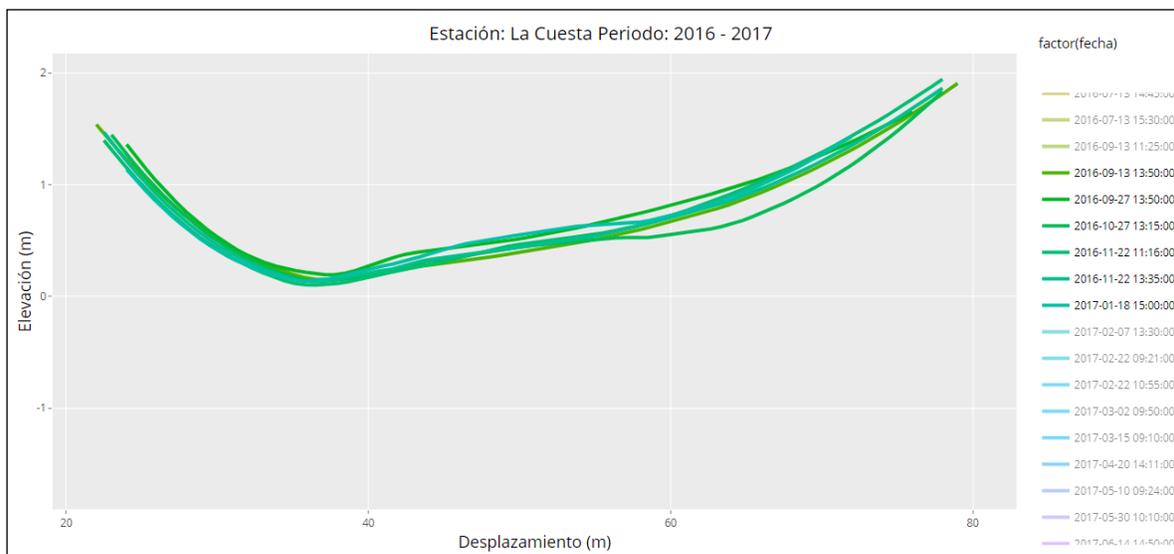


Figura 99. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-09 previo, durante y posterior al Huracán Otto

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

Como se aprecia en la imagen anterior, el comportamiento de La Cuesta es el más interesante de todos. La Cuesta no muestra variaciones importantes en su morfología en prácticamente todo el año y se muestra prácticamente inalterada durante el periodo de interés, tanto entre setiembre y noviembre como de noviembre a enero. La estación Remolino no experimentó sedimentación del todo en el periodo estudiado y esto en parte puede deberse por la poca afectación que sufrió La Cuesta, en donde la erosión de la estación fue prácticamente mínima a lo largo del año.

Afectación derivada de la Tormenta Tropical Nate en la estación 31-09

Al analizar el periodo en que ocurre Nate es decir entre el 29 de setiembre y 18 de octubre del 2017, se puede observar que la sección sufrió una erosión importante, esta varía en menor magnitud conforme se acerca a los márgenes y aumenta conforme se acerca al centro de la sección. La erosión generada a lo largo de la sección transversal ronda entre los 12 cm y 80 cm cerca del centro. Posteriormente en el mes de noviembre la erosión continua en menor magnitud afectando principalmente la margen izquierda del cauce.

Cabe mencionar que dicha morfología se mantiene tanto en el 2018 y 2019 con fluctuaciones de erosión y sedimentación relativamente pequeñas entre los meses sin volver a condiciones similares al 2017.

La Cuesta cuenta con un buen registro de información para la Tormenta Tropical Nate. Esta estación cuenta con datos de los meses setiembre, octubre y noviembre, desafortunadamente no se tomaron mediciones en diciembre, sin embargo, se puede apreciar los efectos de la tormenta tropical bastante bien.

En la figura a continuación, se presentan los resultados obtenidos de forma gráfica para los días: 29 de setiembre, 18 de octubre y 21 de noviembre, todos del año 2017.

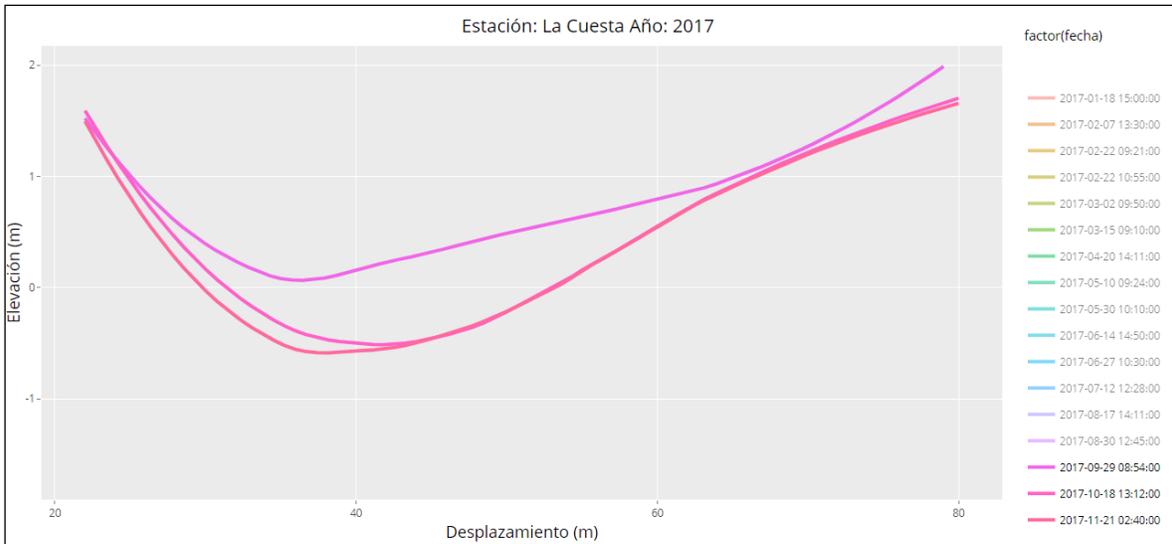


Figura 100. Cambios en las secciones transversales de la estación 31-09 debido a la T.T. Nate

Elaborado por: Alfaro, 2021

Fuente: ICE, 2020

Posterior a la Tormenta Tropical Nate, se presenta una predominante erosión a lo ancho de toda la sección transversal. Cabe mencionar que a pesar que la erosión mostrada fue bastante grande en algunas regiones como se mencionó en el cuadro de resultados (80 cm) la morfología no llega a cambiar tan fuertemente como en los demás cauces, donde las curvas se mostraron mucho más deformadas por la tormenta.

La Cuesta al igual que las estaciones mostradas anteriormente coinciden en las pocas diferencias generadas en el mes posterior a las curvas que evidencian la afectación de Nate. En este caso la curva del 18 de octubre muestra la afectación directa de la tormenta tropical, y esta no llega a diferir fuertemente de la curva mostrada para el 21 de noviembre, a excepción de una erosión parcializada en la margen izquierda del río.

Al igual que las estaciones anteriores, se procede a analizar las secciones transversales de años posteriores. En este caso se analizaron 2018, 2019 y los primeros dos meses del 2020 ya que se buscaba encontrar la cantidad de tiempo que requiere La Cuesta en volver a los niveles de sedimentación observados el 29 de septiembre de 2017, sin embargo, durante todo este periodo el cauce no logró alcanzar estos niveles nuevamente.

A continuación, se presenta la comparación de la curva de septiembre de 2017 con las secciones transversales del 2018, 2019 y 2020.

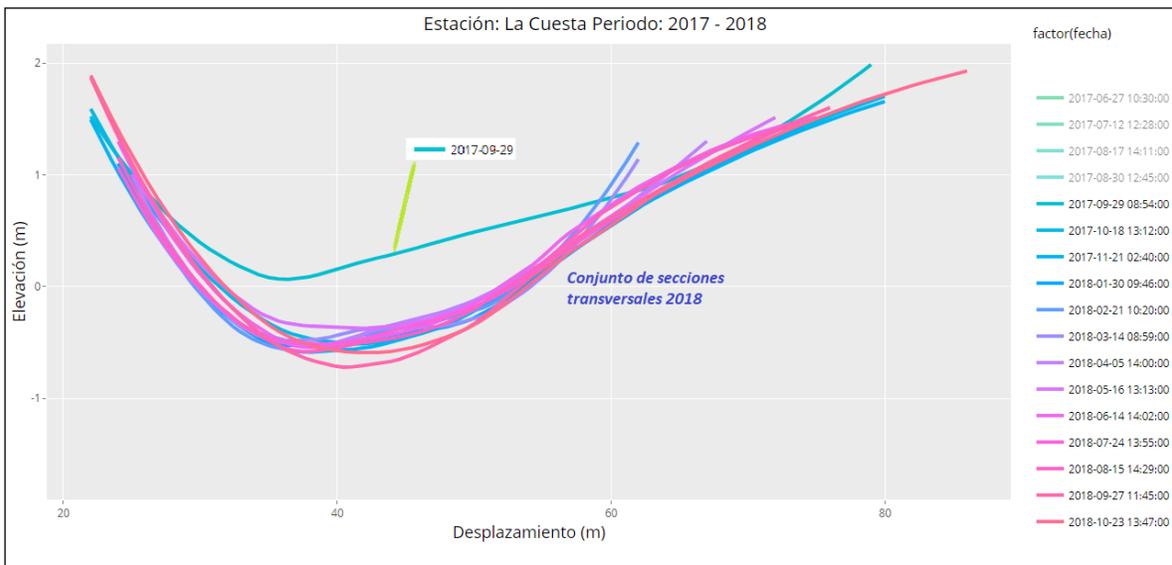


Figura 101. Comparación de secciones transversales en la estación 31-09 para septiembre de 2017 y el año 2018

Elaborado por: Alfaro, 2021

Fuente: ICE, 2020

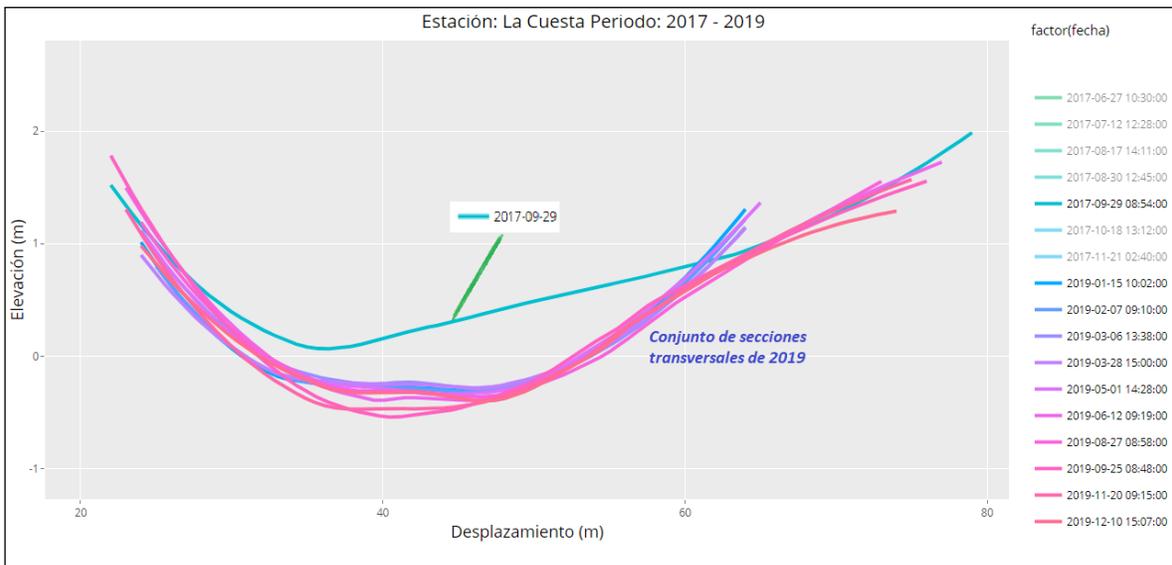


Figura 102. Comparación de secciones transversales en la estación 31-09 para septiembre de 2017 y el año 2019

Elaborado por: Alfaro, 2021

Fuente: ICE, 2020

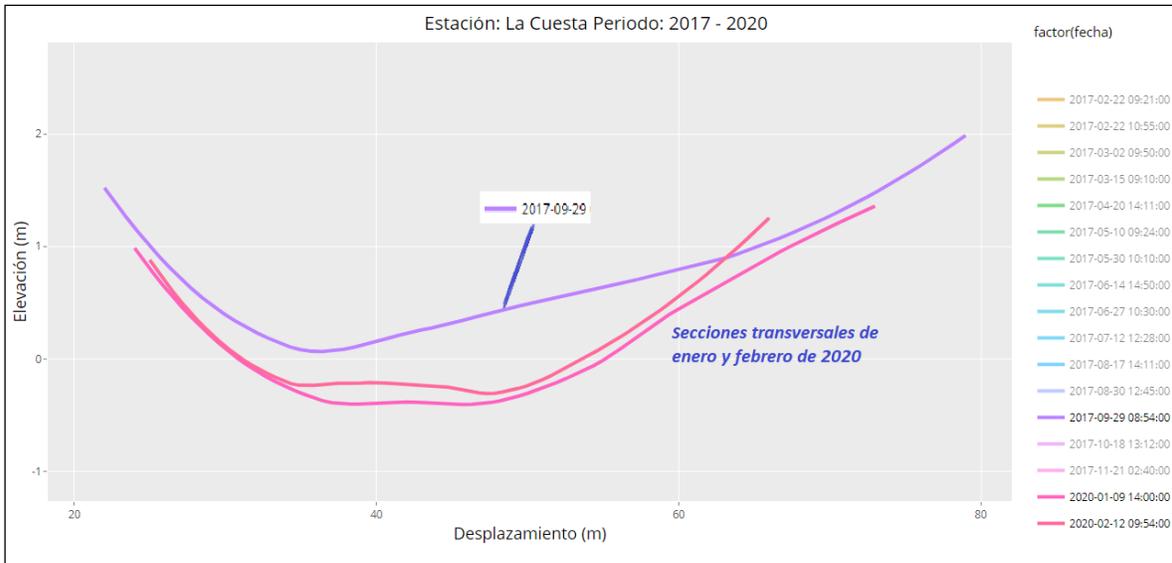


Figura 103. Comparación de secciones transversales en la estación 31-09 para septiembre de 2017 y el año 2020

Elaborado por: Alfaro, 2021

Fuente: ICE, 2020

Como se puede observar en las tres figuras mostradas, al analizar toda la información a disposición no se logró observar una reversión de las secciones transversales a los niveles verticales que mantenía para el 29 de septiembre de 2017. Lo anterior muestra que el cambio inducido por la Tormenta Tropical Nate fue muy importante e influyó severamente en el cauce.

Por otro lado, es muy interesante el hecho de que al analizar la información en los años posteriores al evento las secciones transversales en los 3 años analizados se muestran muy estables y presentan pocas perturbaciones destacables a lo largo de todo el periodo.

A modo de comparación, se procedió a estudiar los 3 años de comparación de eventos (2012, 2013 y 2014) en donde afortunadamente los 3 presentan información en los meses de interés. Cabe mencionar que como se puede apreciar en la figura a continuación, las diferencias encontradas fueron pequeñas (un máximo de 18 cm en el año 2012), por lo que el 2017 representó un año con condiciones atípicas para el cauce.

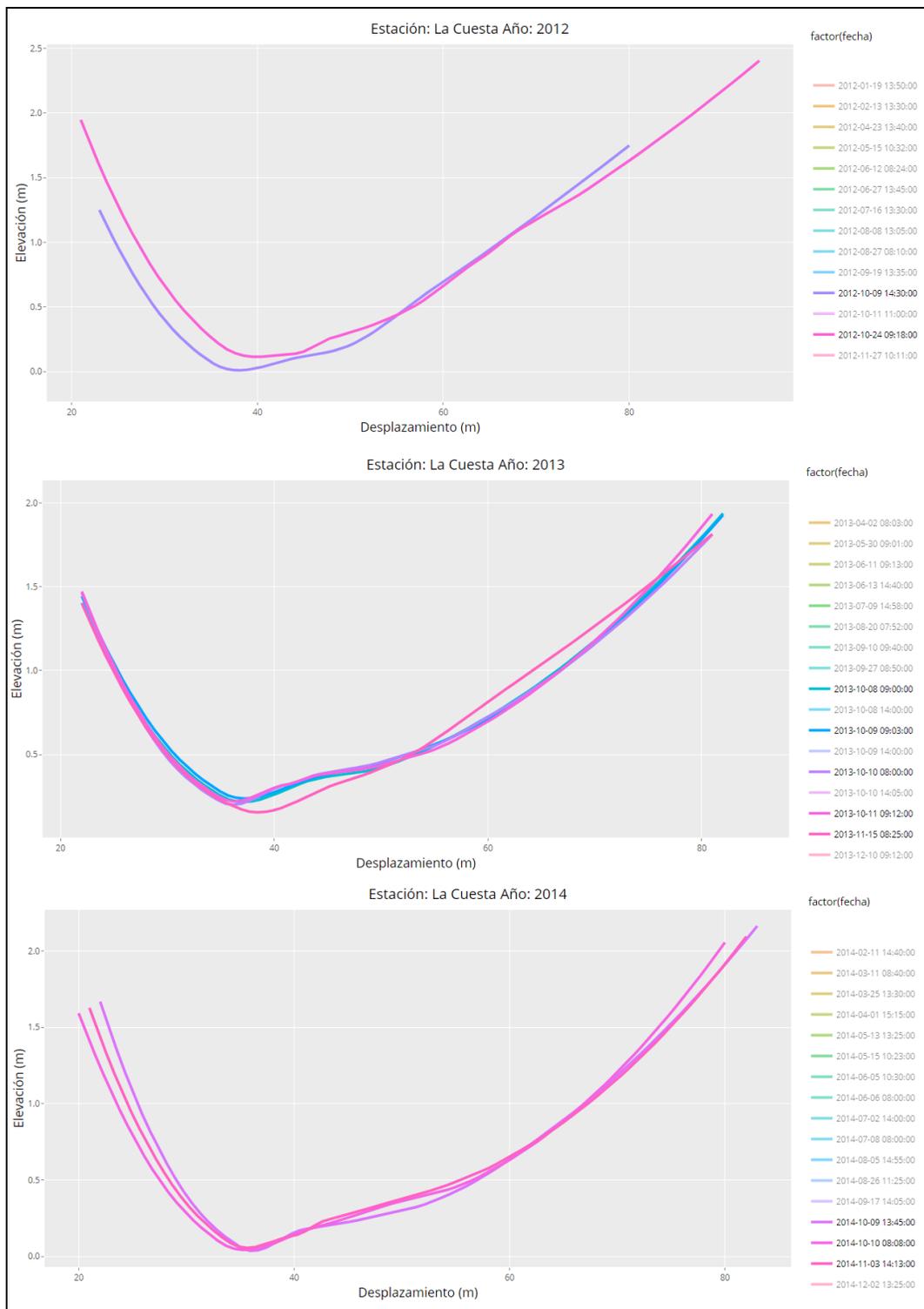


Figura 104. Comparación del comportamiento de los años 2012, 2013 y 2014 de la estación 31-09

Elaborado por: Alfaro, 2021

Fuente: ICE, 2020

6.3.8. Análisis de la Vertiente del Pacífico con respecto al Terremoto de Sámara

De manera similar a la Vertiente Norte, la Vertiente del Pacífico presenta un comportamiento bastante invariante a lo largo de los meses de agosto, septiembre y octubre. En general, las secciones transversales experimentan muy ligeras variaciones; por ejemplo en el caso de Paso Hondo (20-14), se evidencia una erosión bastante pequeña sin variaciones morfológicas importantes entre agosto y septiembre; en el caso de la estación ubicada en Remolino (31-04) esta estación se muestra prácticamente invariable, no se cuentan con los datos de agosto y septiembre, únicamente fue posible analizarla con información perteneciente a julio y octubre, sin embargo los cambios son apenas perceptibles gracias a la codificación de colores utilizada; finalmente en la estación La Cuesta (31-09), se observa una ligera sedimentación, sin embargo el cauce mantiene su forma de agosto a octubre sin variaciones considerables.

Capítulo 7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1. Conclusiones con respecto a la información utilizada

- La disponibilidad de datos en todas las estaciones estudiadas muestra un faltante generalizado en los primeros años del periodo 2008 – 2020, por lo tanto, es posible determinar que los esfuerzos por una adecuada recopilación de datos en las diferentes cuencas del país han aumentado considerablemente.
- En general, para las estaciones escogidas para este trabajo, las que se encuentran ubicadas en la región del Caribe, son las que muestran déficits más importantes de información para analizar los fenómenos hidrometeorológicos propuestos, principalmente en los primeros y últimos años del periodo de estudio.
- En contraste con lo anterior, las estaciones de la Zona Norte, son las que presentan la mejor documentación a lo largo del periodo de estudio, debido a que cuentan con documentación para cada uno de los fenómenos o eventos al menos en una estación. Por otro lado, es importante destacar el trabajo realizado en la estación de Guatuso (16-02) que cuenta con el mejor registro histórico.
- Respecto a la documentación de las estaciones del Pacífico, fue posible observar que las estaciones de esta región cuentan con muy buenos registros a partir de la Tormenta Tropical Tomás en adelante, ya que casi todas las estaciones comienzan su historial a partir del año 2010. Otro aspecto interesante relacionado con los registros históricos de las estaciones de esta región, es el hecho de que presentan una tendencia a no presentar mediciones en la época lluviosa, lo cual dificultó el análisis en varios de los fenómenos, en donde se tuvieron que utilizar las fechas más próximas al evento de interés, con varios meses de diferencia.
- En lo correspondiente al primer filtro de estaciones realizado para el trabajo, en donde se decide las 14 estaciones con que se estuvo trabajando, es interesante el hecho de que 32/46 estaciones presentaran dificultades para poder realizar un análisis adecuado de las secciones transversales, debido a los distintos errores (digitación, escala vertical, escala horizontal, cambio de ubicación de la estación, etc).
- A lo largo del trabajo se realizaron una serie de comparaciones, en donde se examinaron los escenarios de eventos extremos con los periodos ordinarios sin

eventos importantes establecidos. En dichas comparaciones se observó que en raras ocasiones pudo observarse que los cambios observados en un evento ordinario fuesen mayores a los de un evento extremo.

- En los periodos carentes de eventos importantes fue posible observar que existía variabilidad de las secciones transversales a lo largo de los meses, lo cual es de esperarse debido a que la estacionalidad característica en nuestro país continúa influyendo en el modelado de las curvas, así como la intensificación de la época seca y lluviosa en sus respectivos periodos.
- La Tormenta Tropical Alma es uno de los eventos con mayores limitantes de documentación a lo largo de todo el estudio realizado contando únicamente con dos estaciones con datos para analizar, al igual que el caso del Terremoto de Cinchona.
- Desafortunadamente, las estaciones escogidas para el presente trabajo se encuentran alejadas del epicentro del Terremoto de Cinchona, por lo que no es posible generar un análisis de las secciones transversales de estaciones que muy posiblemente fueron mucho más afectadas por el evento, como las estaciones de Cariblanco (12-02), Sarapiquí (12-36), La Isla (12-12), San Miguel (12-11), La Virgen (12-10), Bajos de Chilamate (12-35), entre otros, que pudieron haber sido mucho más representativos.
- La Tormenta Tropical Tomás representa el evento con la mayor cantidad de información disponible para analizar de los eventos propuestos a estudiar en el presente trabajo, presentando únicamente el faltante de la estación Playa Hermosa (06-33)
- En general el Terremoto de la Península de Nicoya, presenta buena documentación por parte de las estaciones estudiadas, teniendo a disposición 9 estaciones para analizar, sin embargo, varias de estas estaciones, en especial las que se encuentran ubicadas en el Caribe y Pacífico Sur, se encuentran considerablemente alejadas del epicentro del sismo por lo que es de esperar que no presentaran alteraciones importantes durante este periodo debido al terremoto.
- El Huracán Otto cuenta con un registro decente de información, de manera que es posible analizar el fenómeno en las 3 vertientes ya que se cuenta con 2 estaciones en el Caribe, 3 en la Zona Norte, y 3 en el Pacífico Sur de manera que sí se pueden realizar las comparaciones pertinentes.

- La Tormenta Tropical Nate, cuenta con una base de información muy completa para la Vertiente del Pacífico y Vertiente Norte (se cuenta con datos de todas las estaciones), caso contrario a la Vertiente del Caribe en donde únicamente se cuenta con la información de la estación de Tapantí Arriba (09-22), por lo tanto, no es posible comparar los resultados obtenidos en dicha estación con cauces del Caribe.

7.2. Conclusiones obtenidas de las estaciones de la Vertiente del Caribe

- Respecto a lo observado en la estación de Hamburgo (09-39), la estación cuenta con una muy buena documentación del periodo de la tormenta, de manera que es posible llevar una trazabilidad bastante buena de los efectos producidos debido a Alma. En particular, es posible observar que el cauce sí experimenta una fuerte y evidente afectación debido al aumento de las lluvias durante este periodo, sufriendo una erosión de más de medio metro en sectores particulares de la sección transversal del río.
- Otro aspecto importante observado en la estación de Hamburgo, es el hecho de que le toma casi un año sedimentarse nuevamente para volver a alcanzar los niveles originales antes de que ocurriera la Tormenta Tropical Alma en mayo, mostrando un largo periodo de recuperación, posterior al evento.
- El proceso aluvial observado en Hamburgo (erosión) a lo largo del periodo analizado para la Tormenta Tropical Alma, es un ejemplo claro de como un río a pesar de encontrarse aguas abajo, también depende directamente de los aportes de precipitación de toda la cuenca. Como se mencionó en el análisis, a pesar de que en la sección baja de la Cuenca del Reventazón no hubo precipitaciones fuertes para el mes de mayo debido a la tormenta tropical, se formula la hipótesis de que el aumento de la erosión en la estación en Hamburgo fue derivado a las altas precipitaciones observadas en las regiones altas de la cuenca que sí se vieron afectadas por Alma.
- En la estación de Hamburgo, debido a un gran faltante de información en meses que resultan imprescindibles para el análisis del Terremoto de Cinchona, no es posible determinar si la fuerte sedimentación observada entre agosto de 2008 y abril de

2009 fue influenciada por eventos derivados del movimiento telúrico, ya que pueden haber ocurrido alteraciones durante ese largo periodo debido a otros factores.

- La Vertiente del Caribe a pesar de haber presentado periodos secos antes de la entrada de la Tormenta Tropical Tomás, mostró cauces con una dinámica morfológica importante en donde se pudo apreciar procesos aluviales tanto erosivos como sedimentarios, predominando este último en 2/3 estaciones que se pudieron analizar. En general, el Caribe costarricense aparenta haber sido afectado fuertemente debido a la tormenta tropical debido a la evidencia de las 3 estaciones, y muy posiblemente se debe al gran parte del aporte de precipitación por parte de las regiones aguas arriba en ambas cuencas.
- La Vertiente del Caribe no muestra afectaciones importantes en sus 3 estaciones analizadas, indicando que los cauces del Caribe costarricense no fueron modificados debido a eventos derivados del Terremoto de Sámara.
- En cuanto a la Vertiente del Caribe, las dos estaciones analizadas mostraron enormes cambios morfológicos debido al Huracán Otto, dando evidencia de haber afectado fuertemente la región. En el caso de la estación de Pandora que se encuentra muy aguas abajo de la cuenca su comportamiento tendió a la sedimentación como era de esperarse, de manera similar, la estación de Tapantí Arriba que se encuentra ubicadas aguas arriba en la Cuenca del Reventazón, mostró como era esperado un comportamiento erosivo.
- La estación 09-22 sí muestra haber sido afectada fuertemente por la Tormenta Tropical Nate, experimentando una erosión a lo largo de todo el cauce, característica de cauces de curso alto. Como se mencionó previamente, no es posible generalizar el comportamiento observado en esta estación para toda la región debido al faltante de datos, sin embargo, este resultado difiere de lo esperado ya que el Caribe era la única región del país que no fue declarada en alerta roja en emergencia nacional en su momento, sin embargo, Nate sí muestra haber presentado una incidencia sobre el cauce.
- Los efectos generados por la Tormenta Tropical Nate en la estación de Tapantí Arriba fueron más drásticos que los observados con el Huracán Otto, en donde con la tormenta tropical fue posible observar diferencias de hasta 63 cm, y con Otto llegaron a alcanzar valores de apenas 24 cm.

7.3. Conclusiones obtenidas de las estaciones de la Vertiente del Norte

- En el caso de la Zona Norte, la evidencia mostrada en la elevación de las dos curvas que caracterizan el periodo de influencia de la Tormenta Tropical Alma, indica que la tormenta no tuvo una influencia importante en las secciones transversales de la estación de Guatuso, mostrando poca afectación.
- En cuanto a la estación de Guatuso que cuenta con un registro bastante preciso para el análisis del evento, el cauce no fue afectado del todo debido al Terremoto de Cinchona, ya que entre diciembre de 2008 y enero de 2009 las curvas son prácticamente invariantes entre sí. De igual manera, las secciones no muestran evidencia de haber sido afectadas por el sismo, posterior a la fecha del desastre.
- La Zona Norte representa uno de los escenarios más curiosos debido a Tomás. En general las 3 estaciones estudiadas no muestran secciones transversales que indiquen afectaciones importantes derivadas de la tormenta tropical. Tomás no presentó alteraciones significantes en las secciones transversales de los 3 cauces.
- En cuanto al caso en específico de la estación de Peñas Blancas (14-05), la estación es evidencia que no siempre es el caso de que un fenómeno hidrometeorológico extremo es el principal catalizador de cambios morfológicos en un cauce, en el caso de Peñas Blancas fue una condición más lluviosa de lo normal en la Zona Norte y Caribe que indujo las diferencias tan enormes de más de 1 m observadas el 10 de diciembre de 2010.
- La Zona Norte a pesar de ubicarse un poco más cerca del epicentro del Terremoto de Sámara, y tener registros de haber experimentado mayores daños debido al sismo, presentó secciones transversales prácticamente inalteradas a lo largo del periodo de estudio para las 3 estaciones analizadas y que se posee información, mostrando nuevamente al igual que en la Vertiente del Caribe, que no tuvo afectaciones importantes en los cauces producto del terremoto.
- El comportamiento visto en la Zona Norte del país respecto al Huracán Otto, es posiblemente el resultado menos esperado de todo el proyecto. Los llamados de emergencia, los desastres generados en la zona con el paso del huracán, las inundaciones generadas en la zona, todo lo anterior indicaba que las secciones

transversales graficadas iban a ser testigo de fuertes cambios morfológicos, sin embargo, ninguna de las 3 estaciones estudiadas de la Zona Norte con que se cuenta información, muestran alteraciones importantes en sus cauces. Los cambios morfológicos observados son prácticamente mínimos y realmente no representan la magnitud de las repercusiones esperadas por el Huracán Otto en la zona.

- Por otro lado, en la misma Zona Norte, fue posible identificar una particularidad nuevamente en la estación de Peñas Blancas, que difiere en el comportamiento observado en el resto de estaciones de la Zona. Se identificó un cambio de hasta 1.5 m en una fosa encontrada en el aforo del 10 de enero de 2017, posterior a Otto. Nuevamente, esta estación indica que eventos posteriores a un evento extremo, son capaces de mostrar cambios y alteraciones en la morfología de un río mucho más fuertes que el evento extremo en sí. Este caso aparenta haber sido una intensificación en las lluvias generadas en diciembre de 2016.
- En cuanto a la Vertiente Norte del país, las secciones transversales observadas en el periodo de estudio no muestran fuertes afectaciones debido a la Tormenta Tropical Nate. Las diferencias más fuertes detectadas fueron de alrededor de los 20 cm.
- A pesar de que los cambios observados en la Vertiente Norte debido a Nate, no son tan grandes, las diferencias que pudieron observarse sobresalen ligeramente de los otros eventos estudiados ya que las secciones transversales de las estaciones de la Zona Norte se comportaron muy "pasivas" en general, con muy pocas alteraciones, a excepción de la estación de Peñas Blancas que sí mostró cambios súbitos posterior al Huracán Otto y la Tormenta Tropical Tomás.

7.4. Conclusiones obtenidas de las estaciones de la Vertiente del Pacífico

- La Vertiente del Pacífico, muestra un comportamiento más parecido a la Vertiente del Caribe que a la Vertiente Norte del país con respecto a la Tormenta Tropical Tomás. El Pacífico muestra afectaciones en todas las estaciones analizadas, en donde hubo diversidad en los procesos aluviales observados, habiendo al igual que en la Vertiente del Caribe predominancia en la sedimentación de cauces 4/7, y 3 cauces experimentaron erosión.
- En los cauces de la Vertiente del Pacífico, solamente Echeverría y El Brujo mostraron comportamientos fuera de lo esperado durante la Tormenta Tropical Alma, en donde en Echeverría era de esperar erosión por su altitud (950 msnm) y en El Brujo sedimentación (171 msnm).
- En el caso de la Vertiente del Pacífico, se cuenta únicamente con 3 estaciones para analizar en el periodo del Terremoto de Sámara. Siendo Paso Hondo (20-14) siendo la más cerca al epicentro, y los dos restantes ubicadas en la zona sur del país. Ninguna de las 3 estaciones del Pacífico experimentó ningún cambio morfológico importante posterior al terremoto de Sámara.
- En cuanto a la Vertiente del Pacífico, se presentan grandes diferencias entre las 3 estaciones con información a lo largo de los últimos meses del 2016, así como los efectos directos observados debido al Huracán Otto. En el caso de la estación 31-03 la estación presentó una sedimentación desde septiembre a noviembre, posteriormente, Otto entra al país y aparenta haber generado una gran erosión lavando prácticamente todo el material sedimentado entre los meses anteriores en el cauce mostrándolo en niveles similares a septiembre. Remolino aparenta haber sido inalterado durante el periodo del huracán, a pesar que antes del evento sufrió una fuerte erosión (entre septiembre y noviembre) que muy probablemente se ve reflejadas aguas abajo en El Brujo (sedimentación observada). Finalmente, La Cuesta se muestra completamente inafectada por Otto y la morfología no cambia en absoluto.
- La Vertiente del Pacífico aparenta no haber sido afectada por el Huracán Otto, si no que las principales variaciones morfológicas fueron previas al huracán. No obstante, la información que se cuenta corresponde a 3 estaciones ubicadas en la misma

cuenca, por lo que no es posible generalizar la escasez de cambios observados en este análisis para la vertiente en general.

- A lo largo de todos los fenómenos analizados fue posible observar con claridad un fenómeno en la estación 31-03, en donde se presentó un movimiento de márgenes considerable, correspondiente al Huracán Otto, en donde la fuerte erosión generada ocasionó que la margen derecha se desplazara 4.5 m hacia la derecha.
- La Vertiente del Pacífico fue la región más afectada desde el punto de vista morfológico debido a la Tormenta Tropical Nate, ya que prácticamente todos los cauces estudiados en la vertiente experimentaron cambios morfológicos inducidos por procesos aluviales muy variados.
- Fue posible observar en la Vertiente del Pacífico la restauración gradual de la morfología de los cauces a lo largo del tiempo después de haber sido inducidos cambios súbitos debido al evento extremo de la Tormenta Tropical Nate. Se destacan los resultados observados en las estaciones de Nuestro Amo (24-24), Santo Domingo (24-27), Echeverría (24-29), y Remolino (31-04).
- Los periodos de reestabilización de los cauces varían considerablemente entre sí, siendo unos más rápidos que otros tomando apenas unos meses a diferencia de otros cauces cuya reestabilización perduró años.

7.5. Recomendaciones

- Uno de los principales problemas presentados en la elaboración del presente trabajo fue que al momento de escoger las estaciones con que se trabajó, se escogieron bajo el criterio de escoger las estaciones con menores problemas visuales para trabajar. En una investigación futura conviene que se analicen cauces que se encuentren en el curso alto, medio y bajo de cuencas diferentes, pero que se encuentren en la misma vertiente, para hacer comparaciones más representativas entre sí, debido a que presentan características mucho más similares.
- En relación con la recomendación anterior, es conveniente también considerar extender el estudio de las estaciones y contemplar tener estaciones que se encuentren tanto en serie como en paralelo dentro de la cuenca. De ser posible, conviene estudiar varias estaciones en serie, que se encuentren en la parte alta, media y baja de la cuenca, de esta manera se pueden hacer comparaciones para estudiar si los comportamientos observados entre las distintas elevaciones difieren, o por el contrario se asemeja. De manera similar, en cuanto las estaciones en paralelo, estas estaciones pueden servir para de igual manera generar comparaciones entre estaciones que se encuentran cercanas y observar si responden de manera similar ante un evento.
- Uno de los problemas presentados a la hora de elaborar este proyecto consistió en la carencia de información para ciertos eventos, en particular, se pueden mencionar los movimientos telúricos estudiados. Es conveniente realizar una investigación previa a la selección de estaciones sobre los fenómenos de interés para poder escoger intuitivamente estaciones que puedan servir de base para analizar dichos eventos en el proyecto. Posteriormente, es recomendable determinar si dichas estaciones tienen suficiente información capaz de satisfacer las necesidades requeridas como el periodo de datos necesarios.
- Relacionado con la recomendación anterior, es conveniente analizar los efectos derivados por el Terremoto de Cinchona en las estaciones de Cariblanco (12-02), Sarapiquí (12-36), La Isla (12-12), San Miguel (12-11), La Virgen (12-10), Bajos de Chilamate (12-35), entre otras estaciones de la zona (en caso de contar con datos), para caracterizar mejor el evento.

- En cuanto a la toma de información de datos, se pudo observar a lo largo del proceso de selección de datos que existen problemas importantes por parte del Instituto Costarricense de Electricidad en cuanto a la digitalización de la información. Fue posible observar problemas puntuales como picos súbitos en las curvas debido a errores de digitación, así como varios problemas en el origen vertical de las curvas, que dan oportunidad a confusiones relacionados a un posible cambio morfológico importante, o un simple error de desplazamiento vertical en el eje.
- De manera similar al Terremoto de Cinchona, el Terremoto de Sámara presenta un problema similar y no se cuenta con suficientes estaciones cercanas al epicentro del sismo, por lo tanto, es recomendable analizar más estaciones que se encuentren en la zona.
- En cuanto al Huracán Otto, como se mencionó en las conclusiones únicamente se poseen datos de la Cuenca del Río Térraba para la Vertiente del Pacífico, por lo que es pertinente realizar comparaciones en cuencas diferentes y que cuenten con una buena base de datos para dicho periodo.
- Es recomendable contar con una mayor cantidad de información para caracterizar los ríos, ya que no se cuenta con información propia de la granulometría de los ríos (que puede explicar la escasez de cambios en algunas secciones debido a materiales cohesivos), información más detallada sobre el relieve de la zona, entre otros.
- Como se mencionó en el apartado de las limitaciones del trabajo, no fue tomado en cuenta el factor humano en el proyecto. Esto quiere decir que no se consideraron las afectaciones de las distintas estructuras hidráulicas cercanas en la vecindad de las estaciones. Un ejemplo de este problema es la estación de Guatuso, que se encuentra aguas abajo de una presa que puede generar cambios importantes en las secciones transversales, ya que ante la presencia de un evento hidrometeorológico importante puede abrir la descarga de fondo, aumentando los sedimentos en el cauce de manera importante y por ende modificando las curvas temporalmente hasta que el sedimento emitido vuelva a lavarse, por lo que es importante tener en consideración este tipo de factores en un futuro análisis. De manera similar estructuras como los puentes pueden cambiar el flujo en ciertos ríos de manera que pueden generar problemas de erosión generalizada en ciertos puntos.

Bibliografía

- Agencia EFE. (2017). El centro de la tormenta tropical Nate se halla sobre el este de Honduras. Recuperado de: <https://www.efe.com/efe/usa/sociedad/el-centro-de-la-tormenta-tropical-nate-se-halla-sobre-este-honduras/50000101-3399828>
- Alfaro, E. y Alvarado, L. (2002). Frecuencia de los ciclones tropicales que afectaron a Costa Rica durante el siglo XX. San José, Costa Rica.
- Aquaportail. (2019). Définition de zone de convergence intertropicale. Tomado de: <https://www.aquaportail.com/definition-12865-zone-de-convergence-intertropicale.html>
- Banichevich, A. y O. Lizano, 1998. Interconexión a nivel ciclónico – atmosférico entre el Caribe y el Pacífico centroamericanos. *Rev. Biol. Trop.*, 46(Supl. 5), 9-22.
- BBC News. Lopes G. (2010). Costa Rica: más de 20 muertos a causa de Tomás. Recuperado de: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2010/11/101104_2121_costa_rica_derrumbe_a_o
- García, A. (s.f). Hidráulica fluvial, morfología fluvial, erosión y transporte de fondo. Escuela de Organización Industrial, España.
- GeoCostaRica. (2019). *Aforo de ríos, nacientes y pozos*. Recuperado de: <https://geocostarica.com/index.php/es/servicios/aforo-de-rios-y-nacientes.html>
- Gracia, J. Maza, J. (1997). Morfología de Ríos - Capítulo 11 del Manual de Ingeniería de Ríos. Instituto de Ingeniería de UNAM. México. Recopilado de: http://eias.usalca.cl/isi/publicaciones/unam/morfologia_de_rios.pdf
- IGN (Instituto Geográfico Nacional). 2005. División Territorial Administrativa de la República de Costa Rica. Comisión Nacional de División Territorial Administrativa. San José, Costa Rica. Sp.
- Instituto Costarricense de Electricidad. (2020). Datos de secciones transversales de aforos para las estaciones: 02-02, 06-03, 09-22, 09-39, 12-04, 14-05, 16-02, 20-14, 24-24, 24-27, 24-29, 31-03, 31-04, 31-09. San José, Costa Rica.

- Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Ambiente y Energía, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2011). Estudio de las Cuencas Hidrográficas de Costa Rica. Análisis biofísico y socioeconómico. San José, Costa Rica.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2008). Boletín ENOS # 11. San José, Costa Rica.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2008). Boletín ENOS # 13. San José, Costa Rica.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2010). Boletín Meteorológico mensual (Octubre, 2010). San José, Costa Rica.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2010). Boletín Meteorológico mensual (Noviembre, 2010). San José, Costa Rica.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2016). Boletín Meteorológico mensual (Noviembre, 2016). San José, Costa Rica.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2016). Boletín Meteorológico mensual (Noviembre, 2016). San José, Costa Rica.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2016). Huracán Otto – Informe técnico. San José, Costa Rica.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2017). Boletín Meteorológico mensual (Septiembre, 2017). San José, Costa Rica.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2017). Resumen meteorológico mensual – Octubre 2017. San José, Costa Rica.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G., Miller, J.P. (1964) Fluvial Processes in Geomorphology. Freeman, 522 págs. San Francisco.
- Martín, J. (2003). *Ingeniería de ríos*. Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña, España.
- Martín, J. (2009). *Estudio de la dinámica morfológica del río Fluviá. Alcances y métodos frente*
- Mayorga, G. (2019). *Notas de clase del curso Obras Hidráulicas IC-1021*. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

- Ochoa, T. (2011). *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos*. Bogotá, Colombia: Ecoe Ediciones.
- Ollero, A. (1990). Pendiente, sinuosidad y tipo de canal en el Ebro Medio. Cuadernos de I. Geográfica. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza. España.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). (1999). Informe Anual 1999. OMM – N° 907. Ginebra, Suiza.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). (s.f). Ciclones tropicales. Tomado de: <https://public.wmo.int/es/ciclones-tropicales>.
- Red Sismológica Nacional (2012). El Terremoto de Sámara del 5 de setiembre del 2012. San José, Costa Rica.
- Red Sismológica Nacional. Universidad de Costa Rica. Instituto Costarricense de Electricidad (2012). El Terremoto de Sámara del 5 de setiembre del 2012. San José, Costa Rica.
- Red Sismológica Nacional. Universidad de Costa Rica. Instituto Costarricense de Electricidad (2009). El Terremoto de Cinchona del 8 de enero de 2009. San José, Costa Rica.
- Serrano, A. (2019). *Notas del curso PF3979 Modelos Morfológicos*. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- UNED. (2016). Climatología – Capítulo 5. Los Climas de Costa Rica. Tomado de: <https://multimedia.uned.ac.cr/pem/climatologia/5climas/51objetivos.html>
- Universidad de Costa Rica. (2017). Tormenta Tropical Nate entre los mayores desastres de Costa Rica. Recuperado de: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2017/10/12/tormenta-tropical-nate-entre-los-mayores-desastres-de-costa-rica.html>
- Universidad de Jaén. (2019). *Sedimentación*. Recopilado de: <http://www4.ujaen.es/~ecastro/proyecto/operaciones/movimiento/sedimentacion.html>

Otras referencias:

Wickman, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag, New York.

Wickman, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., D'Agostino, M., Francois, R. (2019), et al. Welcome to the {tidyverse}. *Journal of Open Source Software*.

Grolemund, G., Wickman, H. (2011). Dates and Times Made Easy with lubridate. *Journal of Statistical Software*.

Milton, S., Wickman, H. (2014). Magrittr: A Forward-Pipe Operator dor R. R package version 1.5.

Wickman, H., Francois, R., Lionel, H., Müller, K. (2020). *A Grammar of Data Manipulation*. R package version 1.0.2.

Neuwirth, E. (2014). RColorBrewer: ColorBrewer Palettes. R package version 1.1-2.

Sievert, C. (2020). *Interactive Web-based Data Visualization with R, plotly and shiny*. Chapman and Hall. Florida, USA.

Anexos

Script de R utilizado para graficar las secciones transversales por año

```
library(tidyverse)
library(lubridate)
library(magrittr)
library(dplyr)

library(RColorBrewer)
library(plotly)

df <- read.csv("C:\\Users\\José Alfaro\\Desktop\\Secciones de JJ\\Info Oficial\\3109.csv",
              header = TRUE) %>%
  as_tibble() %>%

  mutate(fecha = ymd_hms(as.character(fecha_archivo))) %>%
  mutate(anio = year(fecha)) %>%
  mutate(amd = as_date(fecha))

df %>%
  select(-fecha_archivo,-archivo)

anito <- 2020
xx <- df %>%
  filter(anio == anito)

g <- ggplot() +
  geom_smooth(data = xx,
             se = FALSE,
             mapping = aes(x = x,
                           y = h,
                           group = fecha,
                           col = factor(fecha)))
```

```
xaxis = list(title = "Desplazamiento (m)",  
            gridcolor = 'rgb(255,255,255)',  
            showgrid = TRUE,  
            showline = FALSE,  
            showticklabels = TRUE,  
            tickcolor = 'rgb(127,127,127)',  
            ticks = 'outside')
```

```
yaxis = list(title = "Elevación (m)",  
            gridcolor = 'rgb(255,255,255)',  
            showgrid = TRUE,  
            showline = FALSE,  
            showticklabels = TRUE,  
            tickcolor = 'rgb(127,127,127)',  
            ticks = 'outside')
```

```
var1 <- "La Cuesta" #Nombre de la estación hidrometeorológica
```

```
var2 <- as.character(anito) #Año del gráfico
```

```
jj <- ggplotly(g)
```

```
jj <- jj %>% layout(title = paste("Estación:",var1,"Año:",var2),
```

```
                xaxis = xaxis,
```

```
                yaxis = yaxis)
```

```
jj
```

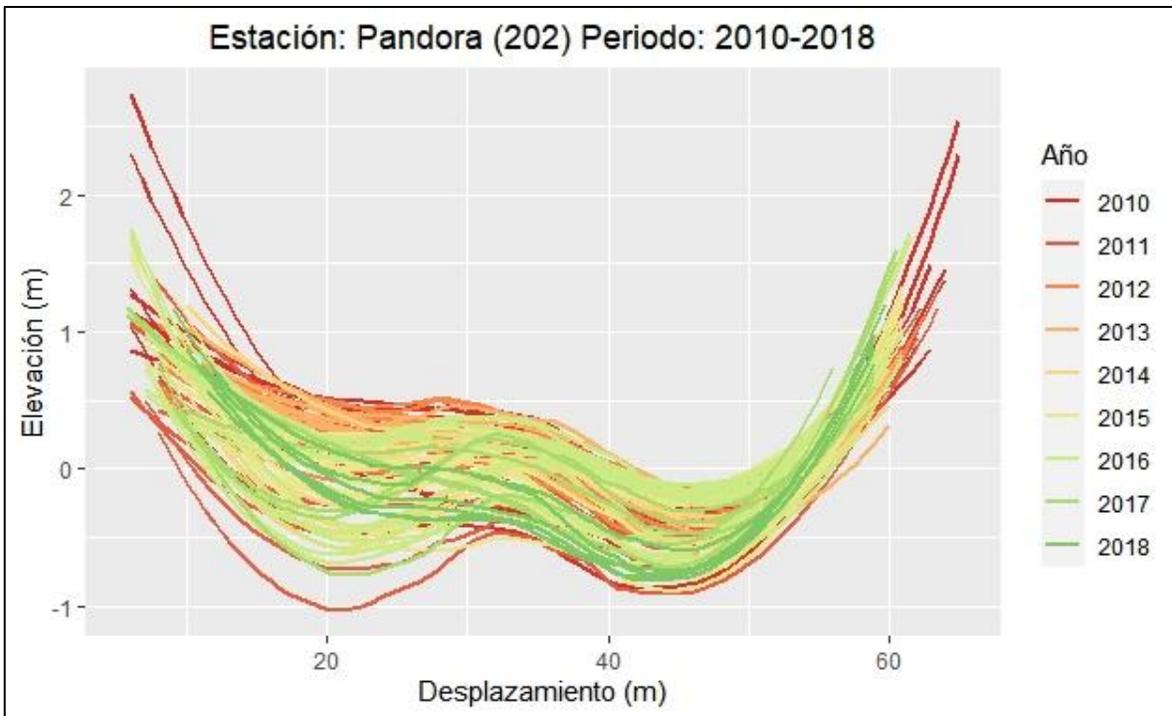


Figura 105. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 02-02 en todo el periodo de análisis.

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

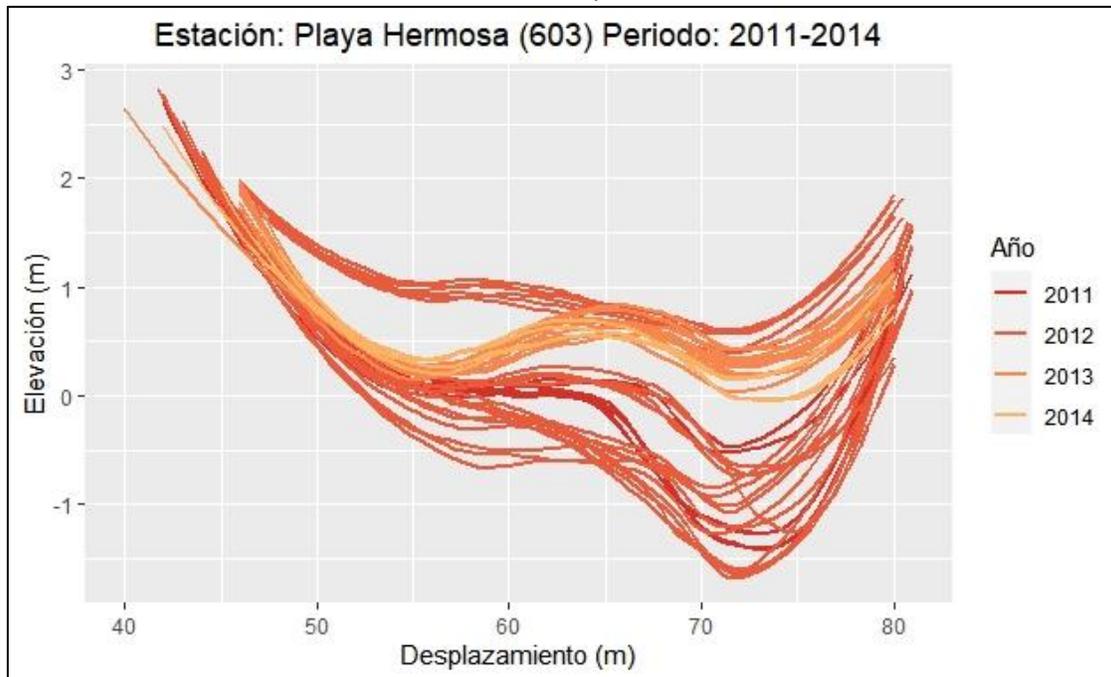


Figura 106. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 06-03 en todo el periodo de análisis.

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

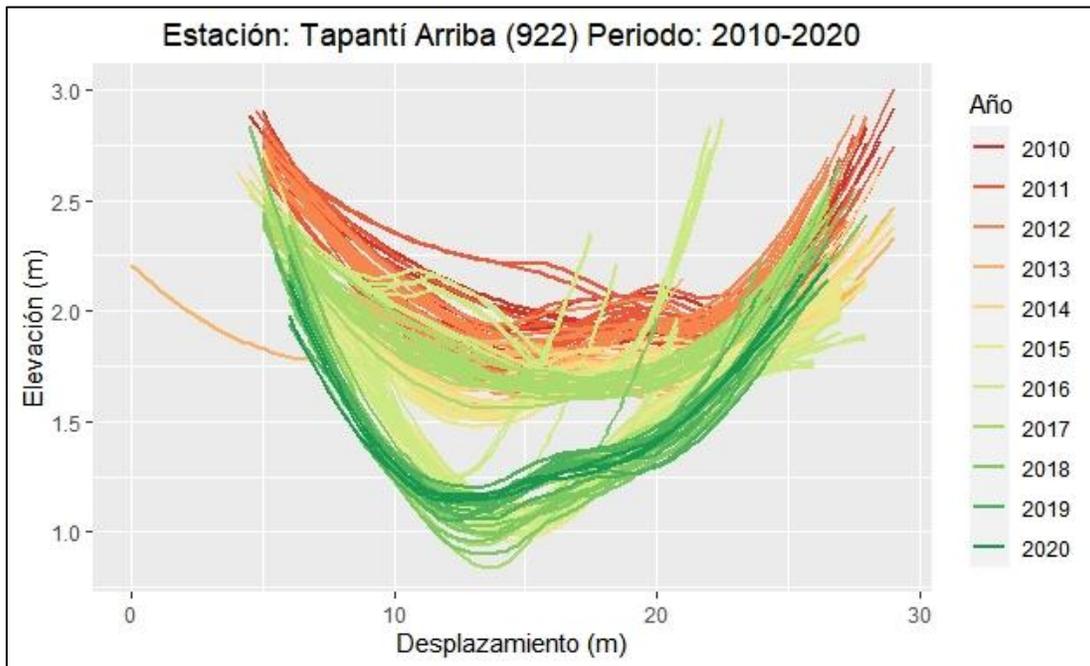


Figura 107. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 09-22 en todo el periodo de análisis.

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

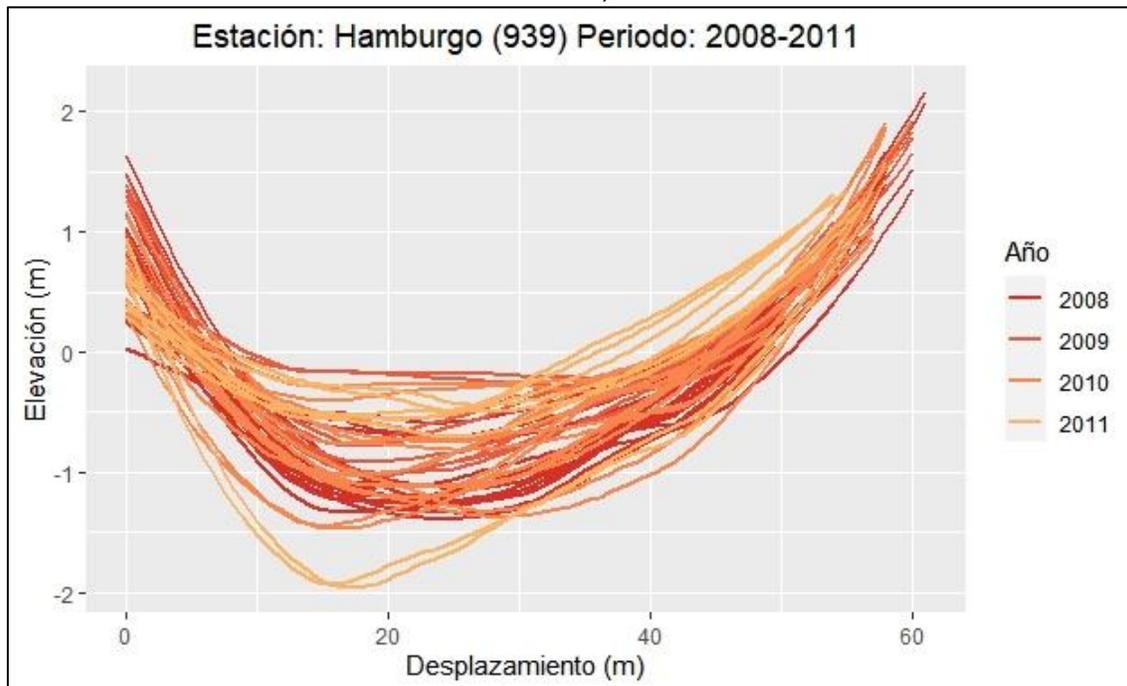


Figura 108. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 09-39 en todo el periodo de análisis.

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

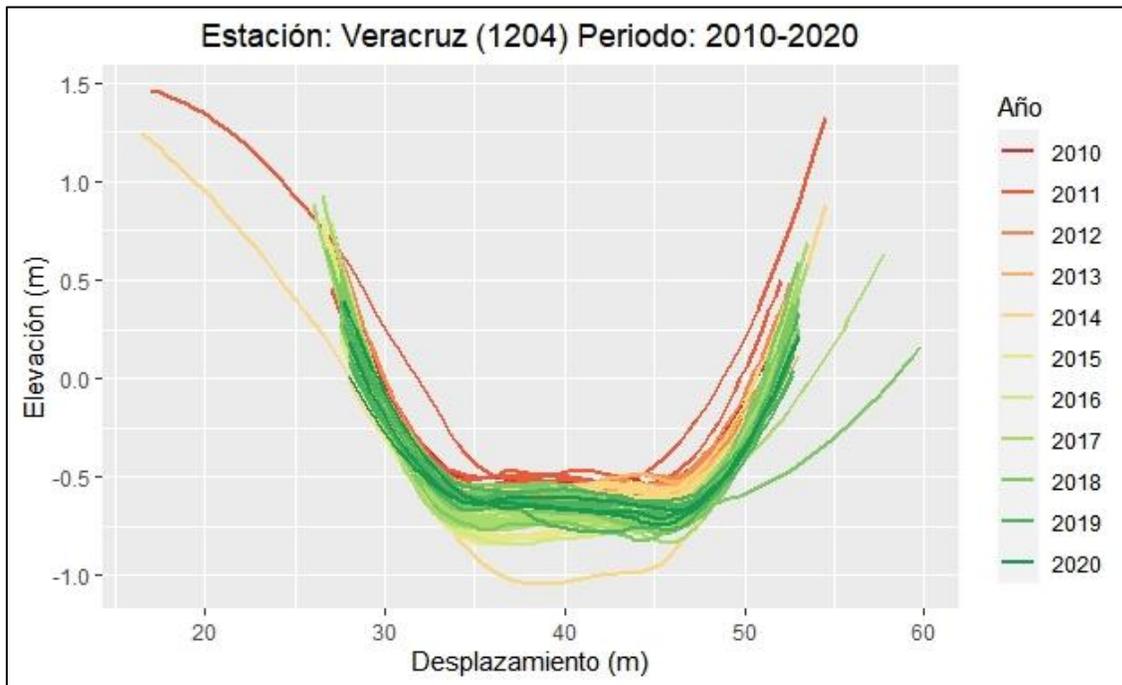


Figura 109. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 12-04 en todo el periodo de análisis.

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

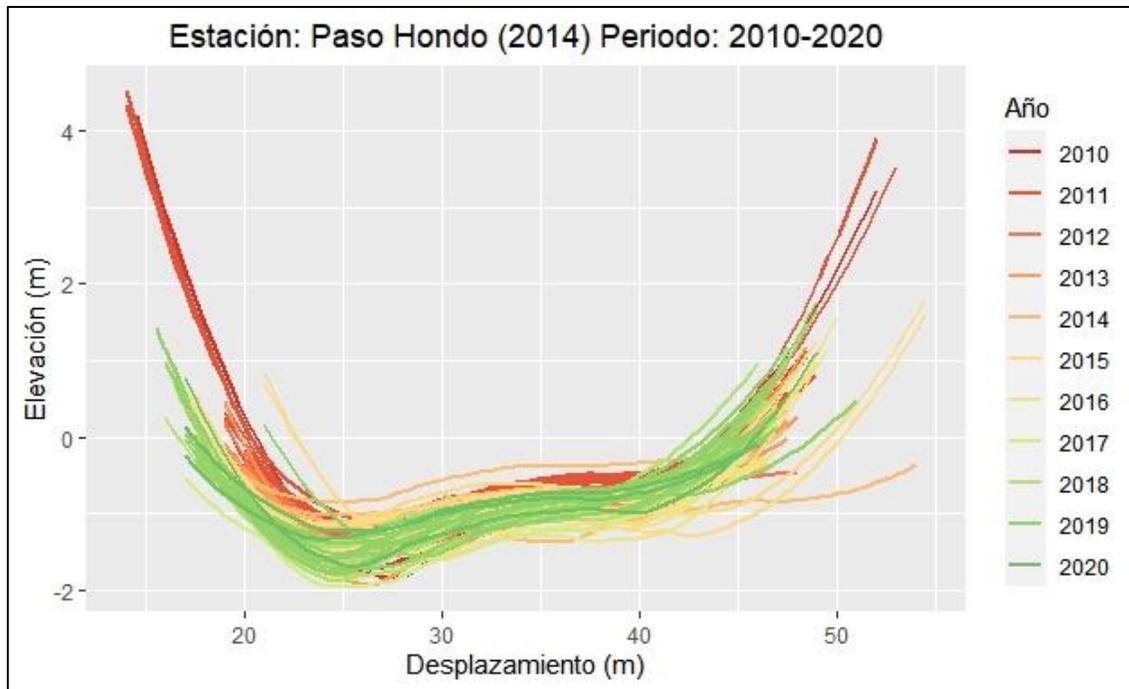


Figura 110. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 20-14 en todo el periodo de análisis.

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

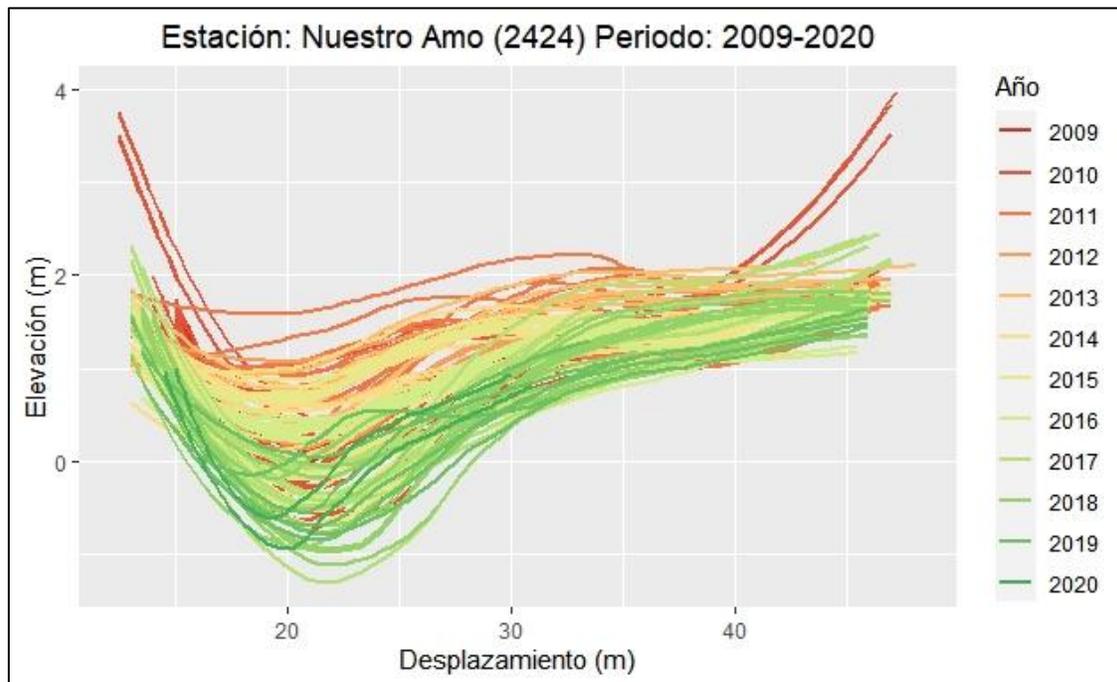


Figura 111. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 24-24 en todo el periodo de análisis.

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

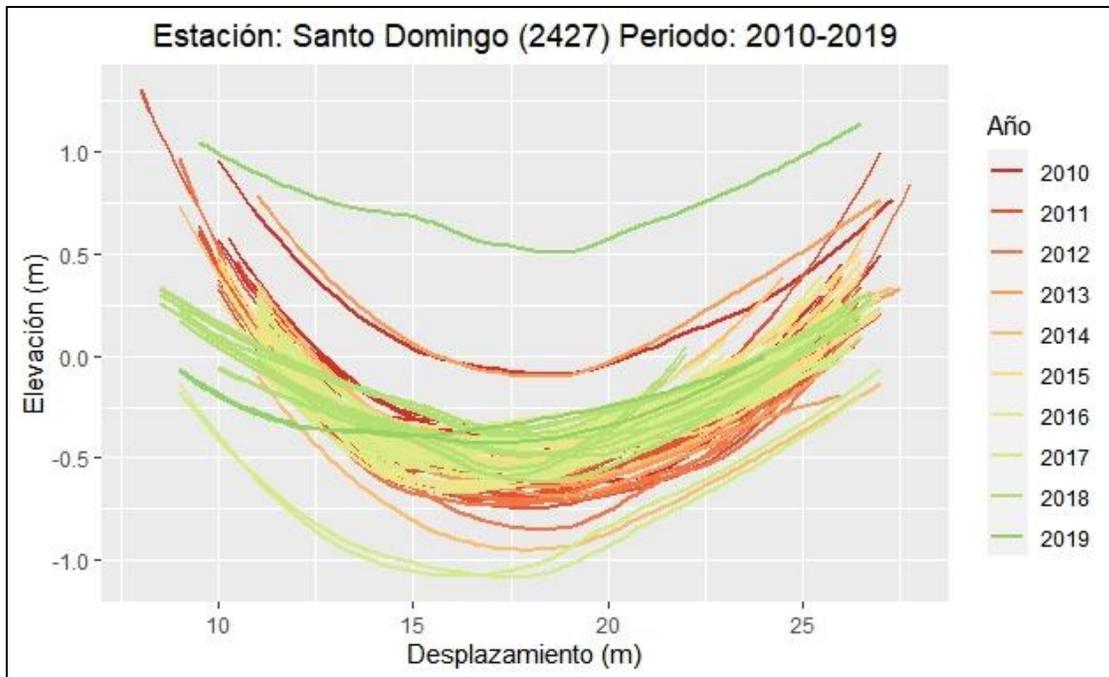


Figura 112. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 24-27 en todo el periodo de análisis.

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

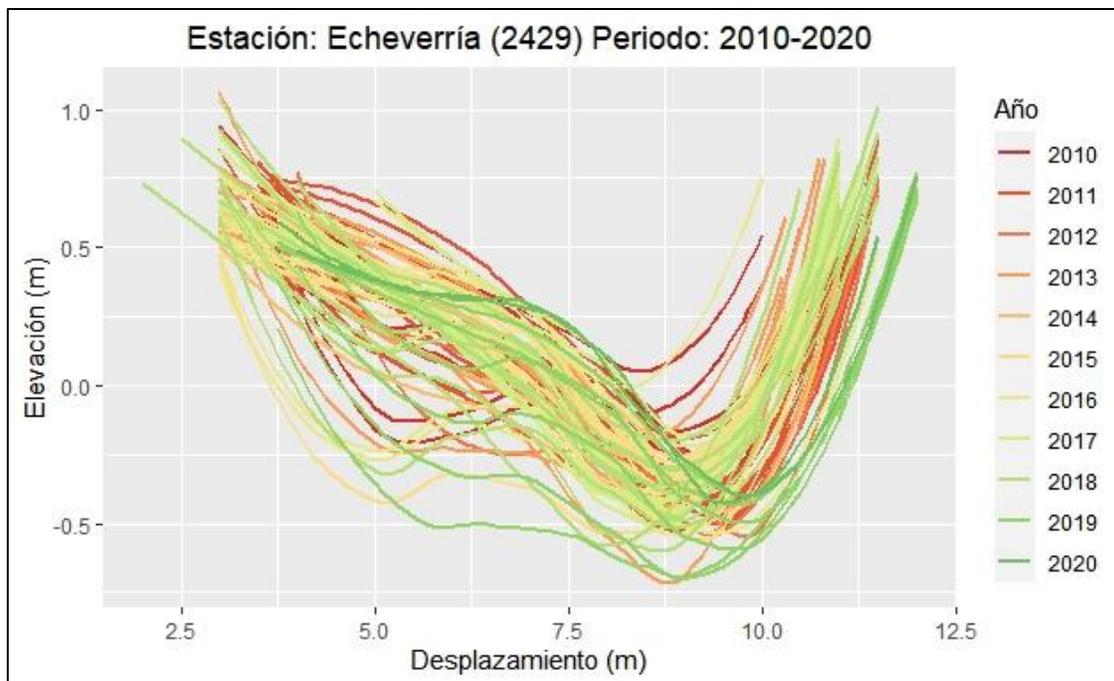


Figura 113. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 24-29 en todo el periodo de análisis.

Elaborado por: Alfaro, 2020

Fuente: ICE, 2020

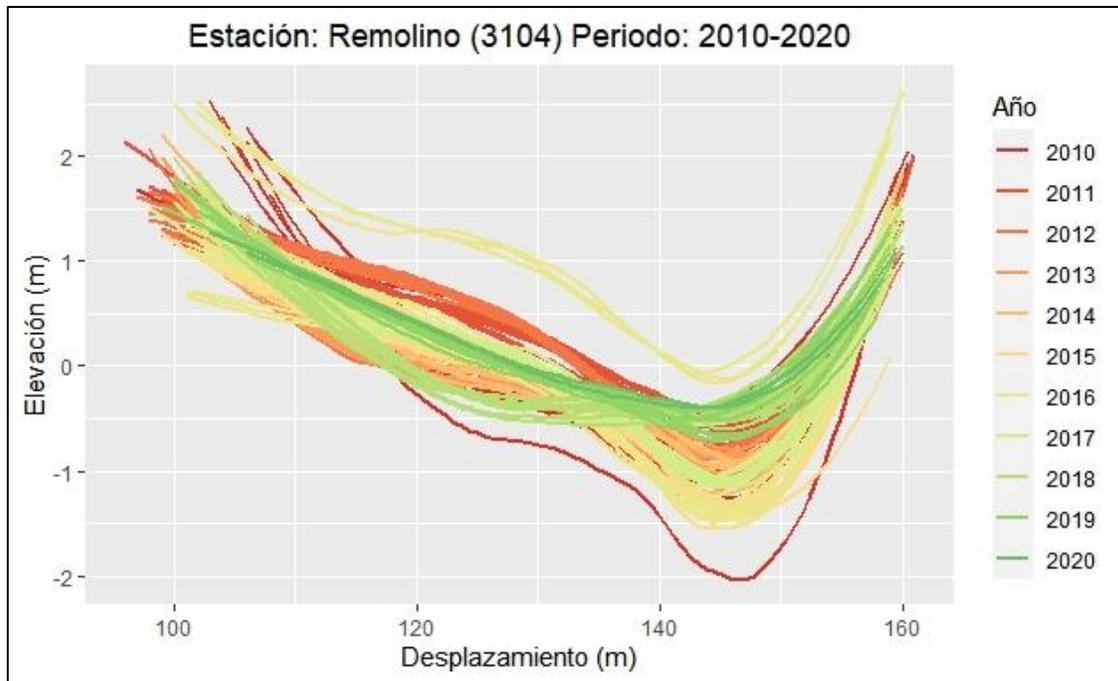


Figura 114. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 31-04 en todo el periodo de análisis.
 Elaborado por: Alfaro, 2020
 Fuente: ICE, 2020

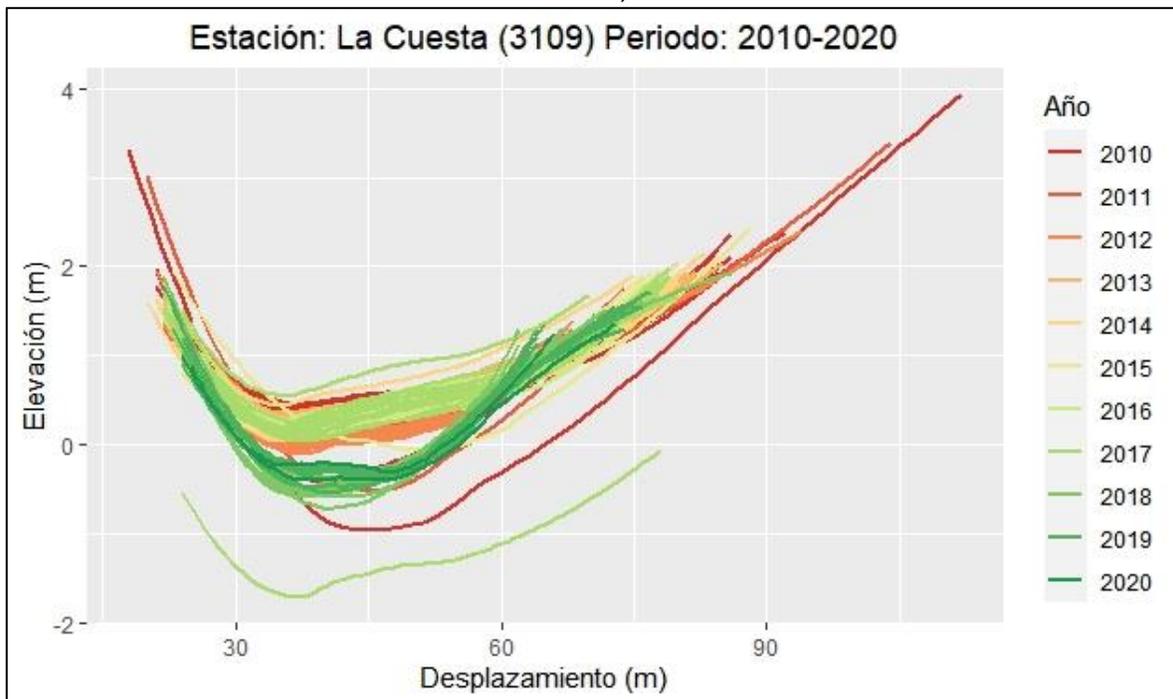


Figura 115. Representación gráfica de las secciones transversales de la Estación 31-09 en todo el periodo de análisis.
 Elaborado por: Alfaro, 2020
 Fuente: ICE, 2020