

Maestría en Ingeniería Civil

Determinación de los patrones de transporte de cuerpos flotantes en un río de montaña utilizando velocimetría de imagen de partículas (VIP), modelación hidrodinámica bidimensional y seguimiento de partículas (SP). Caso de estudio: Río La Miel.

Jordi Rafael Palacios Gonzalez

Bogotá, D.C., 05 de octubre de 2020

**Determinación de los patrones de transporte de cuerpos flotantes en un río de montaña
utilizando velocimetría de imagen de partículas (VIP), modelación hidrodinámica
bidimensional y seguimiento de partículas (SP). Caso de estudio: Río La Miel.**

Jordi Rafael Palacios Gonzalez

**Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Recursos
Hidráulicos y Medio Ambiente**

Ph. D Germán Ricardo Santos Granados

Director

Ph. D Jorge Alberto Escobar Vargas

Ph. D Gerald Augusto Corzo Pérez

Codirectores

Bogotá, D.C., 05 de octubre de 2020

La tesis de maestría titulada “Determinación de los patrones de transporte de cuerpos flotantes en un río de montaña utilizando velocimetría de imagen de partículas (VIP), modelación hidrodinámica bidimensional y seguimiento de partículas (SP). Caso de estudio: Río La Miel.”, presentada por Jordi Rafael Palacios Gonzalez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá, D.C., 05 de octubre de 2020.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre Teresa y a Rosita.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecerle al doctor Germán Santos y al doctor Gerald Corzo por brindarme una oportunidad única de crecer y por ser mis guías durante estos años.

A La Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, al programa de Maestría en Ingeniería Civil y a la dirección de posgrados, por permitirme hacer parte de esta grandiosa familia de asistentes de investigación.

Al doctor Jorge Escobar por enseñarme a ver el mundo de los fluidos ambientales de otra manera.

Al proyecto S-Multistor por apoyar a los investigadores colombianos y brindarme la oportunidad de crecer profesionalmente.

Al Instituto Javeriano del Agua, a la Maestría en Hidrosistemas de la Pontificia Universidad Javeriana y al Grupo EQUITAS por su apoyo total en la realización de esta investigación.

A José Oliveros por siempre estar para ayudarnos sin esperar recibir nada a cambio y a David Trujillo por su apoyo en la ardua tarea de la recolección de los insumos primarios.

A Edgar, a Toño y toda su familia por apoyarnos en la recolección de la información durante las campañas de campo y por siempre colaborarnos en todo lo requerido.

Por último, Agradecerle a mi familia, amigos y compañeros que pusieron su granito de arena para llegar a culminar este proceso de formación.

RESUMEN

En esta investigación, se desarrolló un ejercicio de modelado hidrodinámico junto con el seguimiento de partículas y el uso de velocimetría de imagen de partículas para determinar los patrones de transporte de cuerpos flotantes en el río la Miel. El desarrollo de este modelo se llevó a cabo utilizando el software Delft 3D. La información sobre el reconocimiento hidrofísico se recolectó en dos campañas de campo entre el 2019 y 2020. Para la construcción del modelo se tuvo en cuenta que la variación de las áreas y las condiciones hidráulicas solo están influenciadas por las reglas de operación de la hidroeléctrica La Miel I. Finalmente, el acoplamiento del modelo hidrodinámico se realizó con el modelo de seguimiento de partículas para determinar los patrones de transporte de cuerpos flotantes con diferentes tipos de masas. Se utilizó la técnica velocimetría de partículas como un proceso de validación de los resultados del modelo hidrodinámico. El resultado principal de esta investigación es la descripción física y numérica de los patrones de transporte de cuerpos flotantes con masas que van desde 0.5 kg hasta 80 kg utilizando el modelo numérico acoplado que se validó con los experimentos de campo en el río La Miel. Estos patrones de transporte se utilizan para la generación de una metodología para la búsqueda de personas desaparecidas en ríos. Los resultados también son un aporte al estudio de la dinámica de los ríos de montaña.

Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN.....	18
1.1	Motivación.....	18
1.2	Problema.....	19
1.3	Objetivos.....	20
1.3.1	Objetivo General.....	20
1.3.2	Objetivos Específicos.....	20
2	VELOCIMETRÍA DE IMÁGENES DE PARTICULAS, MODELACIÓN HIDRODINÁMICA Y SEGUIMIENTO DE PARTICULAS	22
2.1	Velocimetría de Imágenes de Partículas (VIP).....	22
2.2	Modelación Hidrodinámica	23
2.2.1	Modelación bidimensional promediada en la vertical (Aguas Someras).....	24
2.2.1.1	Deducción de las ecuaciones de aguas someras.....	25
2.2.2	Flujo en una dimensión (Saint Venant)	27
2.2.2.1	Deducción de las ecuaciones de Saint Venant 1D.....	27
2.2.3	Modelación hidrodinámica en ríos de montaña	30
2.3	Seguimiento de Partículas.....	31
2.3.1	Fundamentos básicos de seguimiento de partículas.....	32
2.4	Software de Modelación Implementados	34
2.4.1	Hec-Ras.....	34

2.4.2	<i>Delft3D-Flow</i>	35
2.4.3	<i>Delft3D-Part</i>	38
3	<i>DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO: RÍO LA MIEL (CUENCA DEL RÍO MAGDALENA), AGUAS DEBAJO DE LA HIDROELÉCTRICA LA MIEL I (CALDAS, COLOMBIA), MOYA DE JORGE</i>	40
3.1	<i>Río La Miel</i>	41
3.2	<i>Hidroeléctrica La Miel I</i>	42
3.3	<i>Zona de Estudio</i>	44
4	<i>METODOLOGÍA</i>	46
4.1	<i>Trabajo De Campo</i>	46
4.1.1	<i>Recolección de información topobatimétrica, aforos y velocidades de flujo</i>	48
4.2	<i>Velocimetría de Imágenes De Partículas (VIP)</i>	49
4.3	<i>Modelos Hidrodinámicos</i>	53
4.3.1	<i>Modelo unidimensional</i>	53
4.3.2	<i>Condiciones numéricas del modelo unidimensional</i>	57
4.3.3	<i>Modelo hidrodinámico bidimensional</i>	59
4.3.3.1	<i>Condiciones numéricas del modelo bidimensional</i>	63
4.4	<i>Modelo de Seguimiento de Partículas</i>	65
4.4.1	<i>Experimentos de campo para el seguimiento de partículas</i>	65
4.4.2	<i>Modelo computacional de seguimiento de partículas</i>	69

5	<i>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</i>	71
5.1	<i>Resultados del Trabajo de Campo</i>	71
5.1.1	<i>Identificación de los fenómenos hidráulicos de recirculación y rápidos</i>	71
5.1.2	<i>Generación del Modelo de Elevación Digital (DTM)</i>	75
5.1.3	<i>Generación del modelo digital de terreno (DTM)</i>	77
5.1.3.1	<i>Generación del modelo digital de elevación (DEM) a partir de las imágenes tomadas por los Drones</i>	77
5.1.3.2	<i>Corrección del DEM con la información del lecho tomada por el RTK</i>	78
5.1.3.3	<i>Análisis y ajuste de batimetrías</i>	79
5.1.3.4	<i>Generación DTM</i>	81
5.1.3.5	<i>Ajuste final de DTM Moya de Jorge</i>	82
5.2	<i>Resultados Velocimetría de Imágenes de Partículas</i>	83
5.2.1	<i>Conclusiones velocimetría de imágenes de partículas (VIP)</i>	86
5.3	<i>Resultados Modelos Hidrodinámicos</i>	86
5.3.1	<i>Modelo unidimensional</i>	86
5.3.1.1	<i>Conclusiones del modelo unidimensional</i>	93
5.3.2	<i>Resultados modelo hidrodinámico 2D</i>	94
5.3.2.1	<i>Conclusiones modelo hidrodinámico 2D</i>	99
5.3.3	<i>Calibración del Modelo Hidrodinámico Bidimensionales</i>	100
5.3.3.1	<i>Técnicas de Calibración en Modelos Hidrodinámicos Bidimensionales</i>	100

5.3.3.2	<i>Resultados Calibración del Modelo Hidrodinámico de La Moya de Jorge</i>	104
5.3.4	<i>Comparación entre el Modelo Hidrodinámico Unidimensional, Modelo Hidrodinámico Bidimensional y Velocimetría de Imágenes de Partículas.....</i>	110
5.4	<i>Resultados Modelos de Seguimiento de Partículas.....</i>	112
5.4.1	<i>Resultados experimentos de campo</i>	112
5.4.2	<i>Resultados modelo de seguimiento de partículas</i>	117
5.4.3	<i>Conclusiones técnicas de seguimiento de partículas.....</i>	124
6	<i>DISCUSIÓN GENERAL.....</i>	125
6.1	<i>Insumos Topográficos para la Modelación</i>	125
6.2	<i>Análisis de las Experiencias Obtenidas en la Modelación Hidrodinámica 1D Y 2D..</i>	126
6.3	<i>Comparación Entre el Uso Y el Entendimiento de los Modelos Numéricos Implementados en la Hidrodinámica</i>	127
7	<i>CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJO FUTURO</i>	128
	<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	131

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Materiales y equipos utilizados en la salida.</i>	46
<i>Tabla 2. Ubicación y valores de pendientes en rápidos</i>	73
<i>Tabla 3. Valores de las bases RTK segunda salida de Campo</i>	79
<i>Tabla 4. Valores Mallado No-Estructurado</i>	60
<i>Tabla 5. Valores Mallado Estructurado</i>	60
<i>Tabla 6. Condiciones numéricas del modelo hidrodinámico 2D</i>	65
<i>Tabla 7. Error cuadrático medio (ECM) y Raíz del error cuadrático medio (RECM) en los perfiles hidráulicos</i>	110
<i>Tabla 8. Condiciones del modelo de seguimiento de partículas</i>	69

Lista de Figuras

<i>Figura 1. Río La Miel</i>	40
<i>Figura 2. Hidroeléctrica La Miel I</i>	43
<i>Figura 3. Zona de estudio- Moya de Jorge</i>	44
<i>Figura 4. Zona de estudio- Moya de Jorge</i>	45
<i>Figura 5. Montaje recolección de información</i>	49
<i>Figura 6. Configuración inicial modelo VIP</i>	50
<i>Figura 7. Configuración PIVlab</i>	51
<i>Figura 8. Procesado de imágenes PIVlab</i>	51
<i>Figura 9. Puntos de Control RIVeR</i>	52

<i>Figura 10. Puntos de Control RIVeR.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 11. Sistema de Coordenadas.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 12. Perfil Longitudinal Modelo Hec-Ras.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 13. Composición geométrica del modelo.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 14. Secciones Transversales Modelo 1D.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 15. Condiciones Iniciales Modelo 1D.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 16. Condiciones de Frontera Modelo 1D.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 17. Valores de Manning para el Modelo 1D.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 18. a. Mallado no estructurado b. Mallado estructurado</i>	<i>59</i>
<i>Figura 19. Topobatimetría (XYZ) vista 3D.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 20. Topobatimetría (XYZ).....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 21. Profundidades vistas 3D.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 22. Profundidades.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 23. Condiciones generales del modelo hidrodinámico en 2D.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 24. Punto de lanzamiento de los globos para el experimento de campo.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 25. Volumen de control Moya de Jorge.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 26. Recolección de los globos.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 27. Recolección de los globos.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 28. Distribución espacial de moyas (recirculación) aguas abajo de la hidroeléctrica La Miel I.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 29. Distribución espacial de rápidos(chorros) aguas abajo de la hidroeléctrica La Miel</i>	<i>72</i>
<i>Figura 30. Ejemplo de levantamiento batimétrico</i>	<i>73</i>

<i>Figura 31. Esquema espacial de medición detallada sobre la moya de Jorge</i>	<i>74</i>
<i>Figura 32. Aforos y caracterización de velocidad por el ADCP La Moya de Jorge</i>	<i>75</i>
<i>Figura 33. Perfil DTM Alos Palsar</i>	<i>76</i>
<i>Figura 34. Perfil DTM generado con Drones</i>	<i>77</i>
<i>Figura 35. Modelo Digital de Elevación La Miel.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 36. Regresión para la Corrección del DEM.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 37. Ajuste Batimétrico.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 38. Superficie Batimétrica río La Miel aguas abajo de la hidroeléctrica La Miel I.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 39. DTM final Río La Miel aguas abajo de la hidroeléctrica La Miel I</i>	<i>82</i>
<i>Figura 40. DTM Moya de Jorge.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 41. Campo de Velocidades (VIP).....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 42. Vectores de Velocidades (VIP)</i>	<i>84</i>
<i>Figura 43. Sección Transversal.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 44. Caudal y Velocidades en Sección Moya de Jorge con RIVeR.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 45. Valores de Manning para el Modelo 1D</i>	<i>87</i>
<i>Figura 46. Perfil Reach 1</i>	<i>87</i>
<i>Figura 47. Perfil Reach 2</i>	<i>88</i>
<i>Figura 48. Perfil Reach 1-Lower.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 49. Perfil de velocidad Reach 1</i>	<i>89</i>
<i>Figura 50. Perfil de velocidad Reach 2</i>	<i>90</i>
<i>Figura 51. Perfil de velocidad Reach 1- Lower</i>	<i>90</i>
<i>Figura 52. Profundidades Modelo 1D.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 53. Esfuerzos Cortantes Modelo 1D.....</i>	<i>92</i>

<i>Figura 54. Velocidades Modelo 1D.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 55. Magnitud de la Velocidad promediada en la vertical</i>	<i>95</i>
<i>Figura 56. Velocidad promediada en la vertical en detalle Moya de Jorge</i>	<i>95</i>
<i>Figura 57. Velocidad promediada en la vertical en detalle Rápidos</i>	<i>96</i>
<i>Figura 58. Esfuerzos cortantes La Moya de Jorge.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 59. Profundidades modelo hidrodinámico 2D.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 60. Perfil del lecho y profundidades a través de todo el dominio computacional</i>	<i>99</i>
<i>Figura 61. Perfil hidráulico zona de estudio con RTK ajuste con media móvil.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 62. Configuraciones de n de Manning.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 63. Ubicación puntos RTK y puntos Modelo hidrodinámico 2D.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 64. Comparación entre perfil hidráulico medido con el RTK vs perfil resultado del modelo.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 65. Error relativo porcentual perfil hidráulico medido con el RTK contra perfil del resultado del modelo.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 66. Error relativo porcentual perfil hidráulico medido con el RTK contra perfil del resultado del modelo.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 67. Velocidad de modelo en el punto de comparación con mediciones ADCP.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 68. Comparación de Velocidades HecRas, Delft 3D y RIVeR.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 69. Posición partículas remanso</i>	<i>113</i>
<i>Figura 70. Posición partículas entrada a los rápidos.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 71. Posición partículas rápidos</i>	<i>114</i>
<i>Figura 72. Posición partículas tránsito entre moya y rápido</i>	<i>114</i>
<i>Figura 73. Posición partículas en la Moya</i>	<i>115</i>

<i>Figura 74. Posición partículas en el brazo derecho.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 75. Líneas de corriente de las partículas.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 76. Trayectoria de partículas primer y segundo lanzamiento.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 77. Trayectoria de partículas tercer, cuarto, quinto y sexto lanzamiento.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 78. Trayectoria de partículas séptimo lanzamiento.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 79. Seguimiento de partículas zona de estudio parte 1-4.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 80. Seguimiento de partículas zona de estudio parte 4-8.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 81. Seguimiento de partículas zona de estudio parte 9-10.....</i>	<i>123</i>

Lista de Ecuaciones

<i>Ecuación 1. Ecuación de continuidad (Forma Conservativa).....</i>	<i>25</i>
<i>Ecuación 2. Ecuaciones de cantidad de movimiento (Forma Conservativa).....</i>	<i>26</i>
<i>Ecuación 3. Ecuaciones de cantidad de movimiento (Forma No-Conservativa).....</i>	<i>26</i>
<i>Ecuación 4. Ecuación de continuidad (Forma Conservativa).....</i>	<i>28</i>
<i>Ecuación 5. Ecuaciones de cantidad de movimiento (Forma Conservativa).....</i>	<i>28</i>
<i>Ecuación 6. Ecuación de continuidad (Forma No-Conservativa).....</i>	<i>29</i>
<i>Ecuación 7. Ecuaciones de cantidad de movimiento (Forma No-Conservativa).....</i>	<i>29</i>
<i>Ecuación 8. Derivada total de la velocidad en x.....</i>	<i>32</i>
<i>Ecuación 9. Cálculo de posición futura.....</i>	<i>33</i>
<i>Ecuación 10. Continuidad en Delft3D.....</i>	<i>35</i>
<i>Ecuación 11. Cantidad de movimiento en Delft 3D.....</i>	<i>36</i>
<i>Ecuación 12. Coeficiente de Viscosidad Vertical.....</i>	<i>37</i>
<i>Ecuación 13. Viscosidad turbulenta.....</i>	<i>37</i>

<i>Ecuación 14. Tiempos entre cuadros.....</i>	<i>53</i>
<i>Ecuación 15. Error cuadrático medio</i>	<i>108</i>
<i>Ecuación 16. Raíz del error cuadrático medio.....</i>	<i>108</i>

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En esta investigación, se desarrolló un ejercicio de modelado hidrodinámico junto con el seguimiento de partículas y el uso de velocimetría de imagen de partículas para determinar los patrones de transporte de cuerpos flotantes en el río La Miel. El desarrollo de este modelo se llevó a cabo utilizando el software Delft 3D. La información sobre el reconocimiento hidrofísico se recolectó en dos campañas de campo entre el 2019 y 2020. Para la construcción del modelo se tuvo en cuenta que la variación de las áreas y las condiciones hidráulicas solo están influenciadas por las reglas de operación de la hidroeléctrica La Miel I. Finalmente, el acoplamiento del modelo hidrodinámico se realizó con el modelo de seguimiento de partículas para determinar los patrones de transporte de cuerpos flotantes con diferentes tipos de masas. Se utilizó la técnica velocimetría de partículas como un proceso de validación de los resultados del modelo hidrodinámico. El resultado principal de esta investigación es la descripción física y numérica de los patrones de transporte de cuerpos flotantes con masas que van desde 0.5 kg hasta 80 kg utilizando el modelo numérico acoplado que se validó con los experimentos de campo en el río La Miel. Estos patrones de transporte se utilizan para la generación de una metodología para la búsqueda de personas desaparecidas en ríos. Los resultados también son un aporte al estudio de la dinámica de los ríos de montaña.

1.2 Problema

Los ríos de montaña abastecen a una gran parte de la población mundial con agua dulce (Viviroli & Weingartner, 2004). Los componentes geomorfológicos de los ríos de montaña están compuestos de lecho rocoso o clastos muy gruesos que tienen poca variación en sus componentes (Blizard & Wohl, 1998; Grant, Swanson, & Wolman, 1990; E. E. Wohl & Thompson, 2000). Las pendientes promedio son altas y los fondos de los valles estrechos, lo que implica que la evolución temporal de sus componentes tiende a ser insignificante (Kalathil & Chandra, 2019; Rathburn & Wohl, 2003; E. Wohl, 2000). Estos ríos tienen llanuras aluviales bastante pequeñas, donde el almacenamiento de sedimentos no es un componente particularmente importante de la dinámica fluvial (Rathburn et al., 2004) y tienden a tener límites hidráulicamente irregulares, flujos altamente turbulentos y muchas zonas localizadas de separación de flujos que forman remolinos y vórtices (Bathurst, 1988; Furbish, 1993; Jarrett, 1990). Los rápidos y los fenómenos de recirculación son componentes fundamentales de la morfología del canal en los arroyos de montaña de alto gradiente (Jarrett, 1990). Solo el 13% de los ríos montañosos tienen datos (Bandyopadhyay, Rodda, Kattelman, Kundzewicz, & Kraemer, 1997), aunque la Organización Meteorológica Mundial recomienda el uso de redes de instrumentos de alta densidad en áreas montañosas, el número de estaciones de medición de caudales y niveles es escaso (OMM, 2006). De aquí parte la primera problemática en esta investigación que es la escasa información sobre ríos de alta montaña presente en el mundo y aún más en Colombia, debido a la complejidad para acceder a estos sistemas. Siguiendo la problemática presente debido a la complejidad para entender los patrones de transporte de cuerpos flotantes en componentes geométricos que presentan estos cauces caracterizados por la alta capacidad de transporte y almacenamiento limitado (E. Wohl, 2011). Por otro lado, en este caso en particular, la presencia de la hidroeléctrica La Miel I aguas

arriba del río hace que las condiciones de flujo sean determinadas por la descarga de La Miel I. También se observa la problema asociada con las limitaciones computacionales hasta ahora presentes en los modelos y la dificultad para poder representar la trayectoria de cuerpos de diferentes especies animales y vegetales como lo expresan (Erfemeijer, Van Beek, Bolle, Dickey-Collas, & Los, 2009; Lind, Hartford, & Assaf, 2004; Martinez, Miralles-Wilhelm, & Garcia-Martinez, 2011; Miyake et al., 2010; Penning-Rowsell, Floyd, Ramsbottom, & Surendran, 2005; Strom, Pasternack, Burman, & Dahlke, 2017) en sus investigaciones. Por último la principal problemática se relaciona con la falta de una metodología para la búsqueda de personas desaparecidas en ríos y la necesidad de utilizar los avances actuales en la tecnología para la solución de problemáticas sociales, algunos autores como (Jonkman, Vrijling, & Vrouwenvelder, 2008; Penning-Rowsell et al., 2005; Strom et al., 2017) han trabajado en metodologías para buscar personas en sistemas como inundaciones y aguas con alta velocidad, pero aún no se conoce un trabajado en la búsqueda de personas desaparecidas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Determinar los patrones de transporte de cuerpos flotantes en un río de montaña utilizando velocimetría de imagen de partículas (VIP), modelación hidrodinámica bidimensional y seguimiento de partículas (SP). Caso de estudio: Río La Miel.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar el levantamiento detallado y procesamiento de la información topobatimétrica.
- Desarrollar un modelo numérico bidimensional de un río de montaña que presente fenómenos hidráulicos complejos.

- Determinación de los patrones de transporte de cuerpo flotantes en un río de montaña.
- Establecer el punto de partida para un ejercicio de acoplamiento del modelo hidrodinámico y la técnica de Seguimiento de Partículas (SP).
- Concluir sobre las experiencias obtenidas en la representación de los modelos en los sistemas naturales complejos presentes en el río La Miel I.

CAPÍTULO II

2 VELOCIMETRÍA DE IMÁGENES DE PARTICULAS, MODELACIÓN HIDRODINÁMICA Y SEGUIMIENTO DE PARTICULAS

2.1 Velocimetría de Imágenes de Partículas (VIP)

La velocimetría por imágenes de partículas es una técnica que permite obtener un campo instantáneo de velocidades en un plano del fluido. Estos campos de velocidades se encuentran a partir de imágenes digitales de la posición de trazadores previamente sembrados en el agua a intervalos constantes de tiempo (Patalano et al., 2014). Basados en dos imágenes capturadas en un intervalo de tiempo conocido y mediante el uso de programas computacionales específicos se identifican las posiciones de los trazadores en cada imagen. Los desplazamientos se evalúan a partir de parejas de partículas individuales y se estiman a partir de correlación estadística de un conjunto de partículas (Sánchez Puga, 2015).

Las mediciones de velocidades y caudales de un río son cruciales para construir una relación confiable entre la entrada y la descarga. Sin embargo, generalmente se presentan varios inconvenientes, como condiciones de campo poco confiables, la imprecisión de las mediciones y técnicas de observación inadecuadas. Por ejemplo, la técnica del flotador se ha utilizado ampliamente para estimar la velocidad media de los ríos, ya que es económico y fácil de operar en campo. Sin embargo, las limitaciones del flotador son bien conocidas: la descarga máxima puede perderse por la de medición esporádica, ya que la observación continua es casi imposible. Los ADCP se han convertido en un instrumento de campo prometedor para medir con precisión la descarga de flujo. Sin embargo, puede ser muy difícil operarlos en condiciones de flujo alto o flujos muy bajos. Hay que tener en cuenta que los costos para adquirir un ADCP son altos y muchas

veces no pueden ser cubiertos por los proyectos e investigaciones. Como formas alternativas de medir la descarga de inundación o el campo de velocidad, se han considerado técnicas de medición de velocidad de flujo superficial no intrusivas para tales regímenes de flujo alto. Entre esas técnicas, se ha resaltado el método basado en imágenes para medir las velocidades de la superficie libre (Yu, Kim, & Kim, 2015).

La estimación de la velocidad del flujo en ríos reales utilizando la técnica de procesamiento de imágenes denominada velocimetría de imagen de partículas a gran escala (LSVIP) ha tenido amplia aceptación en las comunidades hidrométricas en las últimas décadas. Aunque LSVIP se ha probado con éxito en muchas condiciones de flujo, tiene limitaciones debido a condiciones de flujo difíciles como la rotación, la falta de luz, semillas, y condiciones de flujo ruidosas. Recientemente, se introdujo una técnica alternativa llamada STVI basada en imágenes espaciotemporales grabadas sucesivamente para superar las limitaciones de LSVIP (Yu et al., 2015).

La velocimetría de partículas es antigua y muy simple. Sin embargo, en su forma moderna, velocimetría de imágenes de partículas (VIP) que implica una medición precisa de los vectores de velocidad del fluido en un gran número de puntos simultáneamente, es un logro muy desafiante, complicado y relativamente reciente (Adrian, 2005).

2.2 Modelación Hidrodinámica

El análisis de los fluidos ambientales se realiza mediante la aplicación de los principios básicos de continuidad, energía y cantidad de movimiento (segunda ley de Newton) a un volumen de control. El método más utilizado es el análisis integral que consiste en elegir un volumen de control de tamaño finito. Los principios básicos se expresan matemáticamente mediante integrales de área y de volumen (Sotelo-Avila & Cafaggi-Félix, 2001).

Cuando se elige un volumen de control de tamaño infinitesimal que encierra a un punto de un campo de flujo tridimensional, el análisis se conoce como diferencial ya que se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales, comúnmente en derivadas parciales, como expresión matemática de los principios básicos: continuidad y cantidad de movimiento. La ecuación de energía se emplea cuando la transferencia de calor es importante. Es el caso de las conocidas ecuaciones de continuidad y de Navier-Stokes, consideradas como las más generales para cualquier tipo de flujo. La solución directa de dichas ecuaciones se restringe a casos sencillos, por la dificultad de la integración y por la necesidad de conocer e interpretar las condiciones de frontera que deben usarse en cada caso.

En el presente trabajo se implementa la modelación hidrodinámica en una y dos dimensiones, de las cuales a continuación se describen sus fundamentos físicos:

2.2.1 Modelación bidimensional promediada en la vertical (Aguas Someras)

El sistema de ecuaciones de aguas someras se basa en la integración de las ecuaciones de Navier-Stokes en la dirección vertical, conformado por la ecuación de continuidad y dos ecuaciones de momento horizontal (Wu, 2007). Estas ecuaciones describen la evolución de un flujo con distribución hidrostática de presiones, homogéneo (densidad constante) e incompresible en la superficie. La distribución hidrostática de presiones es precisa cuando la relación de aspecto del flujo, es decir, la relación entre las distancias verticales y las horizontales son pequeñas. Las ecuaciones de aguas poco profundas solo son relevantes cuando la escala horizontal del flujo es mucho más grande que la profundidad del fluido. El equilibrio hidrostático en la dirección vertical es la afirmación de que la gravedad equilibra el gradiente de presión en la ecuación de cantidad de movimiento vertical, lo que implica que las aceleraciones verticales son insignificantes.

Existen, sin embargo, gran cantidad de casos en los que, siendo el movimiento tridimensional éste ocurre principalmente en dos o incluso, en una dimensión, debido a que la dimensión o dimensiones restantes son muy pequeñas comparadas con las demás. Si a ello sumamos la presencia de una superficie libre, la resolución numérica de las ecuaciones de Euler o de Navier-Stokes es demasiado complicada en estos casos, y se suele recurrir a modelos simplificados como los de aguas someras (bidimensionales o unidimensionales), que permiten una aproximación razonable con un gran ahorro de tiempo de cálculo. Los modelos de aguas someras se emplean de forma usual en el estudio del flujo en canales, ríos y lagos, flujos de marea, corrientes marinas, avance de un frente de onda, arrastre de sedimentos, variación de concentración salina, dispersión de contaminantes, rotura de presas, flujos atmosféricos, tsunamis (Vasquez, 2006) y el correcto diseño de obras hidráulicas, (Bonillo, Puertas, Suárez, & Vásquez, 2000).

2.2.1.1 Ecuaciones de aguas someras bidimensionales

- Se consideran las variaciones en las dos dimensiones del plano horizontal.
- Las variaciones de la velocidad u otra magnitud de interés en la columna vertical de agua se promedian y se asumen como un único valor.
- Distribución de presiones hidrostática.

Para expresar las ecuaciones de Aguas Someras (Shinbrot, 1970) después de las suposiciones anteriormente mencionadas, se realiza desde la forma conservativa (1 y 2) y la forma no conservativa (3).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}((H + h)u) + \frac{\partial}{\partial y}((H + h)v) = 0$$

Ecuación 1. Ecuación de continuidad (Forma Conservativa)

Dónde:

u = componente de la velocidad horizontal

v = componente de la velocidad vertical

η : altura de la columna de fluido

h = es la desviación de la altura de la superficie horizontal media H : $\eta = H + h$

H = es la altura media de la superficie de presión horizontal

$$\frac{\partial(\rho\eta u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho\eta u^2 + \frac{1}{2} \rho g \eta^2 \right) + \frac{\partial(\rho\eta uv)}{\partial y} = S_x$$

$$\frac{\partial(\rho\eta v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\eta uv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho\eta v^2 + \frac{1}{2} \rho g \eta^2 \right) = S_y$$

Ecuación 2. Ecuaciones de cantidad de movimiento (Forma Conservativa)

Dónde:

ρ = densidad del fluido

g = gravedad

S_x = Fuentes y sumideros

S_y = Fuentes y sumideros

Utilizando la expansión de las derivadas anteriormente mencionados y aplicando la regla del producto, se obtiene la forma no conservativa de las ecuaciones de aguas poco profundas.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + f_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + f_y$$

Ecuación 3. Ecuaciones de cantidad de movimiento (Forma No-Conservativa)

Dónde:

ν = viscosidad cinemática

f_x = Fuentes y sumideros

f_y = Fuentes y sumideros

2.2.2 Flujo en una dimensión (Saint Venant)

Es común utilizar la ecuación de Saint Venant a lo largo del eje principal del flujo para representar con ella al flujo unidimensional. Este eje puede ser curvilíneo. El análisis diferencial del flujo unidimensional emplea un volumen de control limitado por las fronteras de la conducción y por secciones perpendiculares al flujo, separadas una distancia diferencial en donde se considera la media espacial de las variables en el centroide de cada sección (Sotelo-Avila & Cafaggi-Félix, 2001).

En aplicaciones de ingeniería hidráulica que involucran flujos de superficie libre, el cálculo de la profundidad del agua es un primer paso para hacer un análisis de las condiciones de flujo. Con este fin, la solución numérica de las ecuaciones integrales 1D es una aplicación común y se utiliza en los cálculos de ingeniería fluvial desde la segunda mitad del siglo XX. Las soluciones unidimensionales que se facilitaron con el desarrollo de las computadoras, para calcular la propagación de las ondas de inundación, especialmente en problemas de tipo represa (Nilay Işcen, Öktem, Yilmaz, & Aydin, 2017).

2.2.2.1 Las ecuaciones de Saint Venant 1D

- El flujo es unidimensional la profundidad y la velocidad varían solamente en la dirección longitudinal del cauce. Esto implica que la velocidad del agua es constante y que la superficie del agua es horizontal en cualquier sección transversal perpendicular al eje longitudinal del canal (Chow, 1985).
- Se supone que el flujo varía gradualmente a lo largo del canal de tal manera que la presión hidrostática prevalece y las aceleraciones verticales pueden despreciarse
- El eje longitudinal del canal es aproximadamente una línea recta.

- La pendiente del fondo del canal es pequeña y el lecho es fijo, es decir, los efectos de socavación y deposición son despreciables.
- Los coeficientes de resistencia para un flujo uniforme permanente turbulento pueden utilizarse para describir los efectos de la fricción Como el coeficiente de rugosidad de Manning.
- El fluido es incompresible y de densidad constante a lo largo del flujo.

Las ecuaciones de Saint Venant después de las suposiciones anteriormente mencionadas, se pueden expresar en la forma conservativa (4 y 5) y la forma no conservativa (6 y 7).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q = 0$$

Ecuación 4. Ecuación de continuidad (Forma Conservativa)

Dónde:

Q = Caudal

A= Area

q = Caudal unitario

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e \right) - \beta q v_x + W_f B = 0$$

Ecuación 5. Ecuaciones de cantidad de movimiento (Forma Conservativa)

Dónde:

Q = Caudal

A= Área

β = factor de corrección de Cantidad de movimiento o coeficiente de Boussinesq

g= gravedad

h= elevación de la superficie del agua

Sf= Pendiente del agua

Se= Pendiente del lecho

q = Caudal unitario

v_x = Velocidad en el componente x del flujo lateral

W_f = factor de corte del viento

B= Base

En la ecuación 6 se presenta la forma no conservativa de la ecuación de continuidad, en la cual la velocidad de flujo promedio V es una variable independiente, en lugar de Q. Esta forma de la ecuación de continuidad puede deducirse para un ancho unitario de flujo dentro del canal despreciando el flujo de entrada lateral, tal como sigue. Para un ancho unitario de flujo y sustituyendo en (4).

$$y \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

Ecuación 6. Ecuación de continuidad (Forma No-Conservativa)

Dónde:

V = velocidad promedio

y = profundidad

La forma no conservativa de la ecuación de Cantidad de movimiento puede deducirse de una manera muy similar como con la ecuación de continuidad (4 y 5). Despreciando las pérdidas de Eddy, los efectos del esfuerzo cortante por viento y el flujo lateral, la forma no conservativa de la ecuación de Cantidad de movimiento para un ancho unitario de flujo se presenta en la ecuación 7.

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

Ecuación 7. Ecuaciones de cantidad de movimiento (Forma No-Conservativa)

Dónde:

V = velocidad promedio

y = profundidad

g = gravedad

S_0 = pendiente del lecho

S_f = pendiente de fricción

2.2.3 Modelación hidrodinámica en ríos de montaña

Las principales investigaciones y problemáticas que se presentan en la ingeniería hidráulica se pueden analizar y buscar soluciones representativas mediante la implementación y resolución de modelos hidrodinámicos. Estos problemas se caracterizan por tener dominios irregulares y muy extensos, que se extienden usualmente más allá de la zona de estricto interés para mitigar la influencia de las condiciones de borde, que resultan generalmente aproximadas (Badano D, 2013). Ahora en la actualidad con el gran desarrollo que han tenido las máquinas de procesamiento computacional en las últimas tres décadas, los modelos numéricos se han convertido en una herramienta muy atractiva para obtener modelaciones que representan lo más cercano a la realidad presente o futura de estos sistemas dinámicos no lineales aplicado a la hidrodinámica (Corzo, Santos, & Palacios, 2018).

La modelación hidrodinámica de los ríos de montaña constituye la base para comprender el comportamiento de los cauces y su interacción con el medio ambiente. Por un lado, los modelos hidrodinámicos que describen apropiadamente la dinámica del flujo hídrico pueden ser utilizados para representar otros procesos asociados, tales como, el transporte de sedimentos, la erosión del lecho, la erosión de márgenes, el transporte de contaminantes y demás. Por otro lado, la modelación permite la evaluación de distintas alternativas de diseño de obras fluviales (presas, espigones, muelles de atraque, protecciones de márgenes, dragados, etc.), así como también,

permite analizar, en el marco de los estudios de evaluación de impacto ambiental, las perturbaciones que las mismas le generan al medio físico ante diferentes escenarios de alimentación líquida y sólida (Basile, Pedro A. Riccardi & Peruzzo, Florencia & Garcia, 2016).

La simulación numérica del flujo en los arroyos de montaña se ve obstaculizada por la presencia de altos gradientes de velocidad, grandes componentes de rugosidad, alta turbulencia y gran variación en las características de los sedimentos (E. E. Wohl & Thompson, 2000). La resistencia al flujo es alta y las pérdidas de energía aumentan debido a la presencia de topografía de lecho variable, turbulencia de estela y saltos hidráulicos localizados que se forman detrás de elementos de resistencia sobresalientes (Bayazit, 1983; Papanicolaou, Bdour, & Wicklein, 2004).

2.3 Seguimiento de Partículas

El seguimiento preciso de partículas es una técnica importante para la visualización de campos de vectores de velocidad resultantes de simulaciones del movimiento de fluidos (Hin & Post, 1993). La técnica básica de seguimiento de partículas se basa en una integración numérica gradual del campo de velocidad. Especialmente las técnicas de integración numérica han sido bien estudiadas (Teitzel, Grosso, & Ertl, 1997). Una fuente de complicaciones es el uso de cuadrículas irregulares en las simulaciones de fluidos, como las cuadrículas curvilíneas estructuradas ya que sus celdas de son hexagonales con geometría deformada arbitrariamente, la estructura de adyacencia (topología) de las celdas de la cuadrícula es regular. Pero la geometría irregular hace que las operaciones críticas en los algoritmos de rastreo de partículas sean más complejas, como encontrar qué celda contiene un punto dado (Sadarjoen, de Boer, Post, & Mynett, 1998).

La técnica básica de seguimiento de partículas se basa en una integración numérica gradual del campo de velocidad. Especialmente las técnicas de integración numérica han sido bien estudiadas

(Sadarjoen et al., 1998). Este método es apropiado para condiciones con gradientes agudos en sólidos suspendidos (plumas, por ejemplo), donde la difusión numérica en modelos eulerianos requeriría un espaciado de malla muy pequeño para proporcionar soluciones razonables. Además, los modelos lagrangianos tienden a ser mucho más eficientes que sus contrapartes eulerianas (Lackey & Macdonald, 2007).

2.3.1 Fundamentos básicos de seguimiento de partículas

En simulaciones hidrodinámicas a gran escala, las dimensiones x e y son típicamente de 2 a 3 órdenes de magnitud más grandes que la dimensión z . Tales simulaciones a menudo usan las llamadas mallas curvilíneas transformadas en u . El cálculo de un camino de partículas se basa en la integración de las ecuaciones diferenciales ordinaria de la velocidad (Ecuación 8).

$$\frac{dx}{dt} = u(x)$$

$$\frac{dy}{dt} = v(y)$$

Ecuación 8. Derivada total de la velocidad en x

Dónde:

x = posición de la partícula

y = posición de la partícula

t = tiempo

$v(x)$ = campo de velocidad.

La posición inicial X_0 y Y_0 de la partícula proporciona la condición inicial en el momento inicial para: $X(t_0) = X_0$, $Y(t_0) = Y_0$. Los puntos posteriores se calculan en la ecuación 9. Utilizando un método de integración numérica la solución es una secuencia de posiciones de partículas ($x(t_0)$, $x(t_1)$, ...) ($y(t_0)$, $y(t_1)$, ...) en pasos de tiempo para, t_0, t_1 , hasta t_n

$$x(t_{n+1}) = x(t_n) + \int_{t_n}^{t_{n+1}} u(x) dt$$

$$y(t_{n+1}) = y(t_n) + \int_{t_n}^{t_{n+1}} v(y) dt$$

Ecuación 9. Cálculo de posición futura

Ahora rastreo de partículas en mallas rectangulares regulares la ubicación del punto es el proceso de determinar qué celda contiene un punto específico. En las cuadrículas uniformes, esto se logra fácilmente al dividir las coordenadas de un punto en los índices de celdas enteras (i, j, k) y los desplazamientos fraccionales (α , β , ϕ). La interpolación es el proceso de determinar un valor de datos en una posición arbitraria en una celda dada, utilizando los nodos de la cuadrícula circundante y las compensaciones fraccionarias, en las cuadrículas uniformes, esto se hace típicamente con interpolación trilineal de primer orden (Sadarjoen et al., 1998).

En la práctica, muchas aplicaciones en fluidos no utilizan mallas uniformes, sino mallas curvilíneas estructuradas. Las cuadrículas curvilíneas tienen una de las principales ventajas en que pueden seguir la forma de geometrías curvas o complejas, como las alas de los aviones y las líneas costeras y su principal desventaja es que sus algoritmos que funcionan en estas cuadrículas son más complejos, porque las celdas ya no son cubos regulares, pero pueden estar cortadas y tener caras curvas. Una estrategia a menudo aplicada en muchos sistemas de simulación de fluidos es transformar las cuadrículas curvilíneas en el espacio físico en una cuadrícula uniforme en un nuevo dominio. Otra estrategia es calcular la trayectoria de las partículas directamente en el espacio físico evitando las transformaciones entre los dos dominios. La interpolación en cuadrículas curvilíneas es más difícil porque los desplazamientos se hacen complejos de determinar en una celda curva, así mismo la ubicación de los puntos en las cuadrículas curvilíneas es más difícil porque ya no

existe una relación directa entre las coordenadas globales de un punto y los índices de las celdas, por ende, se debe realizar una búsqueda, verificando varias celdas si contienen el punto. Por lo general, hay una posición previa en una celda conocida que conecta a la nueva posición en la celda desconocida por una línea. A lo largo de esta línea, el algoritmo atraviesa las celdas adyacentes subsecuentes interceptando la línea con las caras de las celdas y verificando qué celda adyacente tiene esa cara en común (Sadarjoen et al., 1998).

2.4 Softwares de Modelación Implementados

En la presente investigación se decide implementar el software de modelación unidimensional Hec-Ras debido a la facilidad y rapidez para la obtención de información que nos permitiera tener un acercamiento y un entendimiento primario de los fenómenos presentes en la zona de estudio, para la modelación bidimensional y el seguimiento de partículas se decide utilizar el software Delft 3D, debido primero a que nos permite realizar el acoplamiento entre el modelo hidrodinámico bidimensional y la técnica de seguimiento de partículas por medio del módulo Part y también debido a que la sección de estudio se pudo trabajar con mallas estructuradas que es la configuración en la que el software genera los mejores resultados y tiene el menor costo computacional.

2.4.1 Hec-Ras

HEC-RAS (River Analysis System) es un programa cuya principal función es la delineación de planicies de inundación, es decir permite calcular el nivel del agua en cada sección transversal en el tramo de un río o canal artificial (a.C.E., 2010). El procedimiento por el que HEC-RAS resuelve las ecuaciones de flujo unidimensional no permanente es el método de diferencias finitas de cuatro puntos o esquema de Preissmann. En este esquema, las derivadas respecto al espacio y las variables son evaluadas en el interior de un punto $(n+\theta) \Delta t$. Así las variables en $(n+1) \Delta t$ entran en todos los términos en las ecuaciones. Para cada tramo de río (en medio de dos secciones transversales),

resulta un sistema de ecuaciones simultáneas. La solución simultánea es un aspecto importante en este esquema, esto permite que la información del tramo entero tenga influencia en la solución de cualquier otro punto del río (a.C.E., 2010). Por lo tanto, aplicando el esquema de Preissmann a las ecuaciones de Saint Venant para un tramo de cauce dividido en n secciones, en cada una de las cuales ha dos incógnitas (caudal Q y calado h), se obtienen 2(n-1) ecuaciones. Se requieren por lo tanto otras dos ecuaciones, una en el extremo aguas arriba del tramo y otra en el extremo aguas abajo, para poder resolver el sistema en el caso de flujo subcrítico. Estas dos ecuaciones pueden ser o bien las condiciones de contorno (caudal o hidrograma de entrada, nivel dado de la superficie del agua, entre otras), o en caso de nodos donde confluyen tres canales, la ecuación de conservación de la energía (Cuervo, 2012).

2.4.2 Delft3D-Flow

Es el módulo que el software DELFT3D que se presenta para la construcción de sistemas de modelado hidrodinámicos, Flow resuelve las ecuaciones de Navier Stokes para un fluido incompresible, bajo las aguas poco profundas y las suposiciones de Boussinesq. En la ecuación de momento vertical, las aceleraciones verticales se ignoran, lo que conduce a la ecuación de presión hidrostática. En los modelos 2D- 3D, las velocidades verticales se calculan a partir de la ecuación de continuidad. El conjunto de ecuaciones diferenciales parciales que se presenta en las ecuaciones 10 y 11 en combinación con un conjunto apropiado de condiciones iniciales y de contorno se resuelve en una cuadrícula de diferencias finitas, en la dirección vertical (Deltares, 2014).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial ((d + \zeta)U\sqrt{G\eta\eta})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial ((d + \zeta)V\sqrt{G\eta\eta})}{\partial \eta} = (d + \zeta)Q$$

Ecuación 10. Continuidad en Delft3D

Donde Q representa el caudal por unidad de área, U y V son las velocidades horizontales promediadas en la vertical, d es la profundidad por debajo de un nivel de referencia, ζ es el nivel de la superficie libre con respecto a un nivel de referencia, ξ y η representan las coordenadas cartesianas curvilíneas, $G\eta\eta$ y $G\xi\xi$ se relacionan con el radio de la Tierra R y la latitud φ .

La ecuación de profundidad promediada en profundidad se deriva de la integración de la ecuación de continuidad para fluidos incompresibles ($\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$) sobre la profundidad total, teniendo en cuenta la cinemática. Las condiciones de contorno a nivel de la superficie y del lecho del agua, y está dada por la ecuación 11.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\eta\eta}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\xi\xi}}{\partial \eta} - f v = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G\xi\xi}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{uv}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\eta\eta}}{\partial \xi} + \frac{u^2}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \frac{\partial \sqrt{G\xi\xi}}{\partial \eta} - f u = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G\eta\eta}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta$$

Ecuación 11. Cantidad de movimiento en Delft 3D

Donde u , v y w son las variables dependientes las cuales son las velocidades locales según las tres direcciones principales ξ , η y σ que son las variables independientes, f es el parámetro de Coriolis, σ es la coordenada vertical escalada. Las variaciones de densidad se desprecian, excepto en los términos de presión aroclínica, P_ξ y P_η representan los gradientes de presión. Las fuerzas F_ξ y F_η en las ecuaciones de momento representan el desequilibrio de las tensiones horizontales de Reynold. M_ξ y M_η representan las contribuciones debidas a fuentes externas. Para un sistema de modelado en 2D las aceleraciones verticales son despreciadas.

$$v v = v_{mol} + \max(v_{3D}, v^{vback})$$

Ecuación 12. Coeficiente de Viscosidad Vertical

En la ecuación 12 se presenta el coeficiente de viscosidad vertical, donde ν_{mol} corresponde a la viscosidad cinemática del agua, ν_{3d} es la componente de la viscosidad turbulenta en la vertical, ν^{back} es la background Eddy Viscosity (es un mínimo valor asignado a la contribución turbulenta). En modelos 2D, las aceleraciones verticales son despreciadas en la ecuación de la cantidad de movimiento. Los coeficientes de viscosidad y de difusión de fondo horizontal 2D, ν_H^{back} y D_H^{back} (es un coeficiente de difusión horizontal que debe de definir el usuario, introducido para la calibración), deben ser especificados por el usuario en el menú del programa. Adicionalmente, el delft3D, contiene el modelo de turbulencia en 2D denominado HLES (Gyssels et al 2013).

Ahora en los modelos en 3D la velocidad vertical es generada bajo la ecuación de continuidad. Donde la viscosidad turbulenta ν_H , esta principalmente asociada a la contribución del movimiento de la turbulencia horizontal y es mayor que la viscosidad turbulenta vertical ν_v por la superposición de tres partes (ecuación 13).

$$\nu_H = \nu_{SGS} + U_v + \nu_H^{back}$$

Ecuación 13. Viscosidad turbulenta

Donde la turbulencia horizontal es asociada a tres fenómenos el de la subescala de malla (ν_{SGS}), el otro debido a la turbulencia en 3D (U_v) y la última debida a la dispersión asociada al método RANS (ν_H^{back}).

2.4.3 Delft3D-Part

D-WAQ PART es un modelo de seguimiento de partículas de caminata aleatoria, que se basa en el principio de que el movimiento de sustancias disueltas (o en partículas) en el agua puede describirse mediante un número limitado (grande) de partículas discretas que están sujetas a advección debido a las corrientes y por dispersión horizontal y vertical. El movimiento de las partículas consta, por lo tanto, de dos elementos. Para cada paso de tiempo, el primer paso es el paso de advección debido a los esfuerzos cortantes de las corrientes (fondo) y el viento (superficie).

El módulo PART de Delft3D simula el transporte y los procesos simples de partículas mediante un método de seguimiento de partículas que utiliza los datos de flujo (2 o 3 dimensiones) del módulo FLOW. Los Tracks se siguen en dos o tres dimensiones a lo largo del tiempo, por lo que se obtiene una distribución de concentración dinámica calculando la masa de partículas en las celdas de la cuadrícula modelo (Miyake et al., 2010).

El módulo utiliza un esquema numérico de advección para partículas que es totalmente compatible con las propiedades locales de advección de conservación de masa del campo de flujo subyacente en el nivel discreto de ese campo (Postma, van Beek, van den Boogaard, & Stelling, 2013). La dispersión horizontal se explica por un paso aleatorio. La difusión vertical de profundidad variable calculada por el modelo de turbulencia hidrodinámica se incorpora mediante un algoritmo de rebote estocástico para mover las partículas en la vertical. El algoritmo se aproxima mucho a la solución analítica. Para el propósito de este estudio, se utilizaron partículas pasivas (Van Der Molen et al., 2015). Se supone que los procesos son deterministas, excepto por un desplazamiento aleatorio de la partícula en cada paso de tiempo. El método de seguimiento de partículas se basa en un método de paseo aleatorio ya que el comportamiento simulado es estocástico y el número de partículas es limitado (Fryer & Rubinstein, 1983).

Con respecto al coeficiente de dispersión horizontal, este explica todas las fluctuaciones aleatorias en la horizontal que no se resuelven en la hidrodinámica. Para simulaciones de seguimiento de partículas, el coeficiente de dispersión horizontal también depende del tiempo. En el período de tiempo inicial después de la liberación de las partículas, el grupo de partículas es relativamente pequeño y la mezcla de las partículas es causada solo por efectos de turbulencia a pequeña escala. Sin embargo, después de un tiempo, la "nube" de partículas se habrá extendido lo suficiente como para que los remolinos y circulaciones a mayor escala ahora contribuyan al efecto de mezcla. El coeficiente de dispersión modela los efectos de la turbulencia que no se incluyeron en la hidrodinámica. En cuanto a la difusión turbulenta, esta explica las desviaciones a pequeña escala del campo de velocidad hidrodinámica media. Estas desviaciones están parcialmente correlacionadas y, por lo tanto, conducen a un desplazamiento extra neto. Este desplazamiento extra neto tiene una dirección aleatoria. Por lo tanto, es apropiado modelar el efecto como dispersión (Delft3D-PART, 2009).

CAPÍTULO III

3 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO: RÍO LA MIEL (CUENCA DEL RÍO MAGDALENA), AGUAS DEBAJO DE LA HIDROELÉCTRICA LA MIEL I (CALDAS, COLOMBIA), MOYA DE JORGE

Para el presente trabajo de investigación se seleccionó como zona de estudio el río La Miel (figura 1) debido a sus características morfodinámicas de ríos de montaña y la presencia aguas abajo de la hidroeléctrica La Miel I, que genera un componente hidrológico que no se ve alterada por condiciones externas en el cauce. Presentando condiciones de flujo ideales que permiten estudiar los fenómenos hidráulicos presentes asociados a la geometría del cauce y permite tener un control sobre el entendimiento de los patrones de transporte de cuerpos con diferentes densidades.

Figura 1. Río La Miel



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

3.1 Río La Miel

La cuenca del río La Miel se localiza en la vertiente oriental de la Cordillera Central de los Andes colombianos. Es la principal fuente hídrica del oriente de Caldas, cubre una extensión de 1170 km² en un rango altitudinal que va desde los 160 m hasta los 3600 m de elevación (John Harold & Juan David, 2010) con una longitud aproximada de 68 km desde el nacimiento hasta el sitio de la hidroeléctrica Miel I. Su pendiente general es del 4% y tienen un área de drenaje aproximada de 700 km² (MIEL, 2016).

Cuenta con una superficie de 117.013,14 ha, de las cuales el 21,4% corresponde a Pensilvania, 1,4% a Manzanares, 5,2% a Marquetalia, 44,2% a Samaná, 16,8% a Norcasia, 3,8% a Victoria, 3,9% a Sonsón y 3,5% a La Dorada. Su drenaje principal es el río La Miel que nace en el Municipio de Pensilvania y desemboca en el Río Magdalena en el Municipio de La Dorada

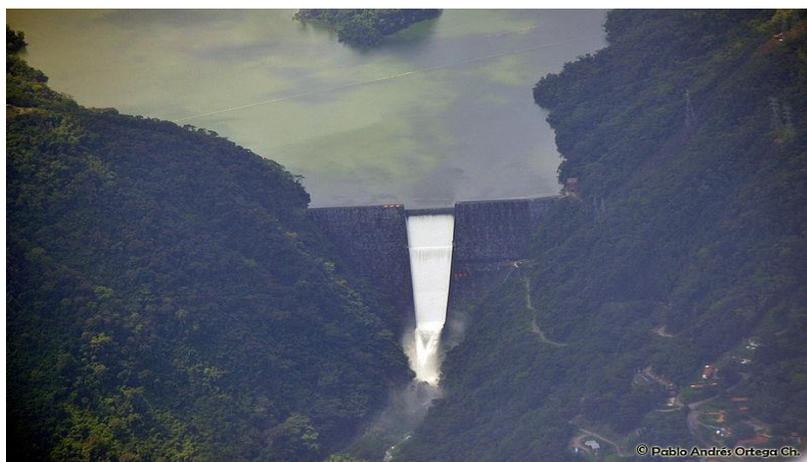
El río La Miel tiene su nacimiento en La Cuchilla de La Picota (aproximadamente a 3600 m.s.n.m.) en el municipio de Pensilvania (Caldas) y luego de 104 km de recorrido suroeste – noreste, desemboca en la margen izquierda del cauce del río Magdalena a 146 m.s.n.m. (López-Muñoz & Pérez-Gallego, 2014), es un cauce alterado por la central hidroeléctrica Miel I de ISAGEN que se encuentra en el municipio de Norcasia. Kilómetros más abajo del sitio de la presa sus aguas son retornadas a su cauce natural. El río sigue su recorrido hasta entregar sus aguas al Río Magdalena. La Miel cuenta con numerosos afluentes, pero su principal aportante es el Río Samaná Sur. Su caudal varía dependiendo la generación de la central, aunque en promedio La Miel registra caudales de 110 m³/s, en Puerto Plátano, lugar como se conoce la confluencia del Samaná y La Miel. A partir de esta unión La Miel aumenta considerablemente su caudal bañando San Miguel, corregimiento del municipio de Sonsón y finalmente Buenavista, corregimiento de La Dorada. En este lugar el río La Miel aporta un caudal promedio de 215 m³/s al río Magdalena.

3.2 Hidroeléctrica La Miel I

La regulación de los caudales permite satisfacer diversas demandas, como proveer de agua a ciudades e industrias, producción hidroeléctrica y suministro a zonas de regadío a través de canales a los que se deriva parte del agua embalsada (López Moreno & García Ruiz, 2003). En muchas ocasiones los embalses son gestionados para hacer frente a eventos hidrológicos extremos, reduciendo la intensidad de las avenidas o manteniendo un caudal ecológico durante periodos de estiaje (López-Moreno, Beguería, & García-Ruiz, 2002).

La construcción de grandes embalses se ha incrementado en las últimas décadas (Alonso, 2004). A partir de la década de los 50 del siglo XX se produjo un incremento exponencial de la activación de grandes presas debido al incremento de las necesidades de recursos hídricos. En Colombia la demanda energética es suplida en más del 60% por centrales hidroeléctrica, y la utilización de este tipo de energía ha presentado una tasa de crecimiento media anual del 2.8% a febrero de 2015. La proyección que realizó la Unidad de Planeación Minero-Energética del Ministerio de Minas y Energía, entre 2012 y 2020 se estima un crecimiento medio anual en la demanda de energía de 4.5% (UPME, 2013). Como se puede evidenciar hay una tendencia al aumento del consumo de energía eléctrica y para responder a esta demanda creciente, el país utiliza el recurso hídrico como principal fuente de generación de energía (Jiménez-Segura et al., 2014). Actualmente, en el territorio nacional existen alrededor de 43 hidroeléctricas en la cuenca del río Magdalena, de las cuales 33 están en operación. Sin embargo, las metas para la generación de electricidad a 2050 supera la implementación de 100 proyectos más (Angarita et al., 2018)

Figura 2. Hidroeléctrica La Miel I



Fuente: (Ortega, P, 2011)

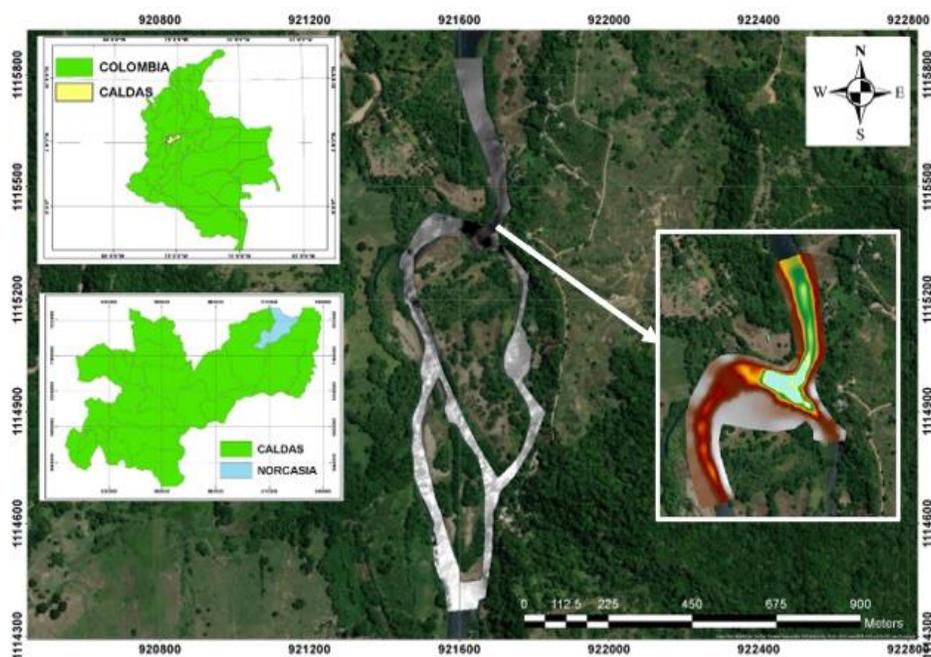
En el año 2000 la generadora de energía Isagen se interesó en el potencial hídrico del oriente de Caldas con los afluentes de los ríos Guarinó, La Miel, Moro, Manso, Samaná Sur, Pensilvania y Tenerife. Para conseguirlo, inició la construcción de Pantágoras, un gran muro de contención de 188 metros de altura con la capacidad para almacenar 571 millones de metros cúbicos de agua como se muestra en la figura 2. Actualmente es considerada como una de las presas más altas de Colombia y la quinta central eléctrica con mayor capacidad para producir energía en el país (Vargas Nieto, 2018).

La Central tiene una capacidad instalada de 396 MW en tres unidades. Inició su operación comercial en diciembre de 2002, el 24 de noviembre de 2006 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible le otorgó la licencia ambiental número 2282 a Isagen para construir el Transvase Manso el cual tenía como objetivo, incrementar la capacidad de generación de energía del proyecto Hidroeléctrico Miel I, pasando de una generación media de 1460 Gwh/año a una 2012 Gwh/año. La generación de energía firme para el proyecto sin trasvase es de 1135 Gwh/año y con el trasvase pasó a ser de 1348 Gwh/año; lo anterior equivale a un incremento de 213 Gwh/año, con el cual redireccionaría el cauce del río Manso hacia la hidroeléctrica para potenciar su

capacidad. Para redireccionar las corrientes hídricas del río Manso al embalse fue necesario hacer un túnel de 4.015 metros de largo y 300 metros de profundidad, el cual contaminó los acuíferos y ocasionó su filtramiento dentro de la estructura, cortando su cauce natural hacia aguas superficiales. La construcción, en los límites de los municipios de Samaná y Norcasia, inició operaciones en el 2013 pero trajo consigo delicados resultados: 18 quebradas secas, una parcialmente seca y tres con caudales disminuidos, afectando los recursos hídricos de veredas como Lagunilla, La Samaria y el corregimiento de Berlín y sus cultivos. En los casos similares al de La Miel, destruyen los acuíferos encargados de equilibrar el ecosistema, nutrir de agua los hábitats húmedos, como lagos y suelos, y abastecer a las comunidades (Vargas Nieto, 2018).

3.3 Zona de Estudio

Figura 3. Zona de estudio- Moya de Jorge



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la figura 3 se puede observar la zona final de estudio, seleccionada para la investigación debido a sus componentes geométricos. Presenta los fenómenos hidráulicos de remansos, rápidos (chorro)

y moyas (recirculaciones) en un área de 600 metros, como se puede observar en la figura 4, haciéndolo interesante para el estudio detallado de los patrones complejos de transporte de cuerpos flotantes y un caso especial de este tipo de configuraciones hidráulicas. La zona se encuentra aguas abajo de la hidroeléctrica La Miel I y comprende “la Moya de Jorge” ubicada en las coordenadas 5.638926667 -74.784415.

Las características hidrológicas de esta parte del río La Miel se rigen a partir de las reglas de operación del embalse que controla todos los procesos presentes aguas arriba. Debido al embalse y a las características de río de montaña con fondo rocoso no hay presencia de sedimentos y se puede decir que el río tiene unas características artificiales.

La zona de estudio está compuesta por dos brazos que se unen en el punto que lleva el nombre de la Moya de Jorge y donde se presenta el fenómeno de recirculación hidráulica. Después del paso por la Moya, el cauce sigue su trayectoria natural hasta unirse con Río Manzo de donde incorpora el sedimento que transporta el Manzo hasta desembocar en el Río Magdalena.

Figura 4. Zona de estudio- Moya de Jorge



Fuente: (Instituto Javeriano del Agua & Equitas, 2020)

CAPÍTULO IV

4 METODOLOGÍA

4.1 Trabajo De Campo

Para la recolección de la información se tuvo en cuenta que en la zona de estudio las condiciones hídricas se ven directamente afectadas por la presencia de la hidroeléctrica La Miel I. Las condiciones hidrológicas están ligadas directamente con las descargas de la hidroeléctrica de La Miel I, que es en promedio de $18 \text{ m}^3/\text{s}$. La carga de sedimentos es mínima debido a la presencia de la presa y a las características del lecho rocoso. Para la recolección de la información de campo se realizaron dos salidas, una entre los días 21 al 27 de julio de 2019 y la otra entre los días 20 y 23 de febrero de 2020. Se recolectó información de 19.8 km de cauce con un ancho que varía 5 m hasta 20m y profundidades que oscilan entre 0.2m hasta más de 3 m y un tipo de lecho en su mayoría rocoso. Se utilizaron los equipos descritos en la tabla 1.

Tabla 1. Materiales y equipos utilizados en la salida.

Nombre	Cant.	Uso	Foto
ADCP RiverRay TELEDAYNE.	1	Medidor de velocidades en la sección transversal y generador de aforos a 600 kHz de frecuencia.	
ECOSONDA Garmin ECHOMAP 50S	1	Medidor de profundidades con frecuencia de 200 kHz.	
GPSmap 60CSx	1	GPS de precisión moderada.	

Inversor	1	Generación de energía de corriente directa a alterna para cargar equipos a bordo.	
Mira	2	Regla graduada que permite medir diferencias de altura.	
Nivel	1	Permite medir desniveles entre puntos que se hayan a distintas alturas	
Trípode	3	Apoyo para los equipos de GPS, Nivel y Estación Total.	
PC Portátil	1	Colector de los datos de medición.	
Baterías 12V	5	Respaldo energético para los equipos de medición en campo.	
Cargador Batería 12V	1	Recarga de baterías portátiles	
Cuerdas 20M	3	Apoyo para amarre de los diferentes soportes metálicos	
Caja de herramientas	1	Organizador de herramientas de trabajo	

Caja de tornillos	1	Organizador de tornillos de soportes.	
Destornillador Múltiple	1	Apoyo para acople de soportes de equipos.	
Cable USB - Serial	3	Conexión de salida de datos de equipos de medición al PC portátil.	
Lubricante para cables y electrónicos	1	Lubricar y proteger juntas de cables y electrónicos de equipos de medición.	
Aire Comprimido	1	Apoyo para la limpieza de los equipos.	
Antenas bluetooth	2	Trasmisión de datos bluetooth	

Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

4.1.1 Recolección de información topobatimétrica, aforos y velocidades de flujo

En la primera y segunda salida de campo se realizó el levantamiento batimétrico en donde se utilizó la Ecosonda Garmin ECHOMAP 50S. Los aforos líquidos y mediciones de velocidades donde se utilizó el ADCP RiverRay TELEDYNE junto con los demás materiales y equipos mencionados en la tabla 1. En la figura 5 se observa un ejemplo de los montajes realizados a diario para la recolección de la información en las salidas de campo. En cuanto a los datos topográficos se realizó el levantamiento en la segunda salida de campo utilizando un dron Phantom 4 y el GPS-RTK.

Figura 5. Montaje recolección de información



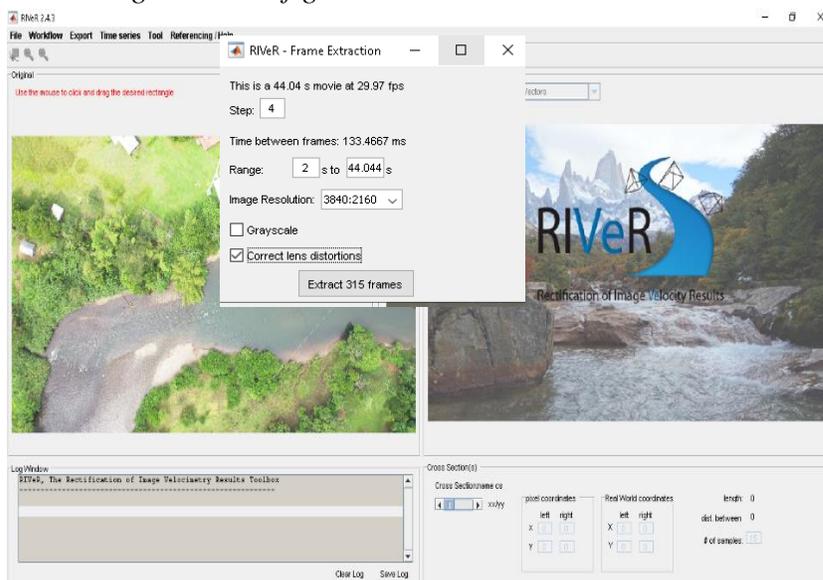
Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

4.2 Velocimetría de Imágenes De Partículas (VIP)

A partir de los experimentos de campo y el uso de drones se obtuvieron los videos que sirvieron de insumo de entrada para el VIP, los cuales se grabaron a una distancia lo suficiente para que se pudiera capturar un dominio Lagrangiano parecido al dominio del modelo computación. La velocimetría de imágenes de partículas se realizó a partir del software RIVeR 2.4.3 desarrollado por (Patalano, García, & Rodríguez, 2017), el cuál usa el procesamiento inicial de las velocidad en los pixeles a través del software PIVlab desarrollado por (Thielicke & Stamhuis, 2014).

Para la generación del modelo se analizaron una secuencia total de 315 fotogramas (fps) con un paso de 4 fotogramas (step) extraídas de un video de 44.044 segundos del que se tomó desde el segundo 2, para un total de 42.044 segundos, con una resolución de imagen de 3840:2160. Se usó una corrección del lente para calibrar la cámara, esto para que no se hubiese distorsión en los pixeles puesto que podría generar al mismo tiempo error en los resultados (figura 6).

Figura 6. Configuración inicial modelo VIP



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

La velocimetría basada en imágenes tiene como objetivo estimar los campos de velocidades instantáneas. Cualquier movimiento que pueda tener la cámara mientras graba una escena provocará desplazamientos de píxeles no deseados que sesgarán los resultados, por ende, se utiliza el proceso para la obtención de los campos de velocidades mediante el uso de PIVlab. Para esto es necesario seleccionar la región de interés en donde se encuentra el flujo. En nuestro caso se muestra dentro del rectángulo azul, donde se presentan dos entradas de flujo y una salida. Esta región fue seleccionada para que coincida con la zona de estudio de los modelos basados en la física. Para la separación de la zona donde se quería obtener la información de las demás partes de las imágenes se realizó la digitalización de máscaras que separaron el cauce de las demás partes del terreno como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Configuración PIVlab



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

PIVlab procesa los cuadros en un marco de trabajo euleriano, calcula el desplazamiento medio del trazador dentro de las ventanas de interrogación. Para su ejecución se hicieron dos pruebas una de la forma manual y otra automática. Se obtuvieron mejores resultados desde la forma automática. Después de la configuración implementada en la imagen 56 se realizó el procesado de las imágenes para obtener los resultados de los campos de velocidades (figura 8).

Figura 8. Procesado de imágenes PIVlab



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Los campos de velocidades obtenidos mediante la modelación en PIVlab deben ser rectificadas ya que la funcionalidad de PIVlab es eficiente en procesos a escala pequeña, la rectificación a mayor escala es la principal función que realiza el software RIVeR.

Para la rectificación como primer paso se cargó la sesión de procesamiento de imagen en RIVeR y se seleccionó una imagen de fondo para realizar las configuraciones necesarias.

Para que RIVeR realice la rectificación es necesario identificar los puntos de control (CP) que se utilizan para el cálculo de las velocidades superficiales. Al ser un punto de vista desde un plano en superficie (UAV) sólo fue necesario establecer una distancia única entre dos puntos como se muestra en la figura 9.

Figura 9. Puntos de Control RIVeR

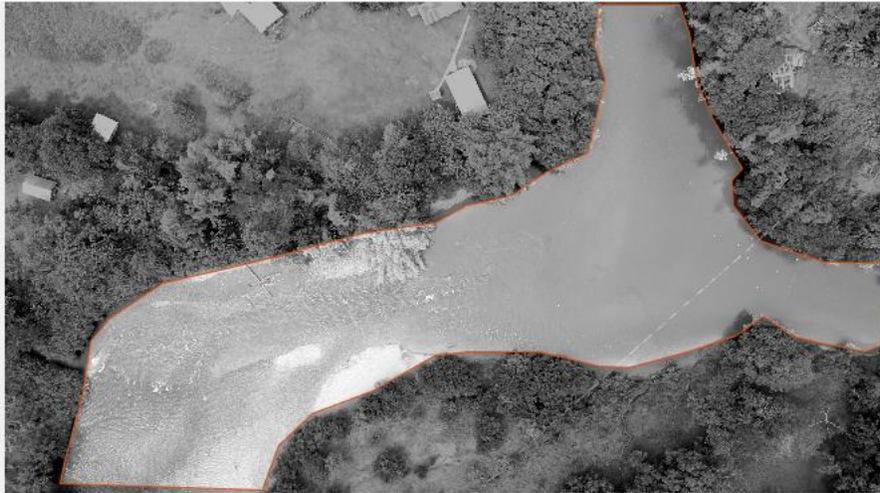


Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Después de los CP, RIVeR solicita que se defina la región de interés a rectificar para el modelo de imagen de seguimiento de partículas, debe tenerse en cuenta que no es la misma región establecido en PIVlab. En este caso, se dibujó un polígono desde la entrada los rápidos y la entrada del brazo

derecho hasta la salida de la Moya a partir de la imagen original, debido a que solo se rectificarán los resultados y los píxeles de la imagen de fondo de La Moya de Jorge (figura 10).

Figura 10. Puntos de Control RIVeR



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Los resultados obtenidos durante el procesamiento de la imagen en PIVlab son píxeles por fotograma. Para obtener velocidades reales, es necesario definir el tiempo entre cada cuadro que en el presente caso se utilizó de 133.4667 ms, que viene determinado por la ecuación 15.

$$t = \frac{1000}{fps} * step$$

Ecuación 14. Tiempos entre cuadros

4.3 Modelos Hidrodinámicos

4.3.1 Modelo unidimensional

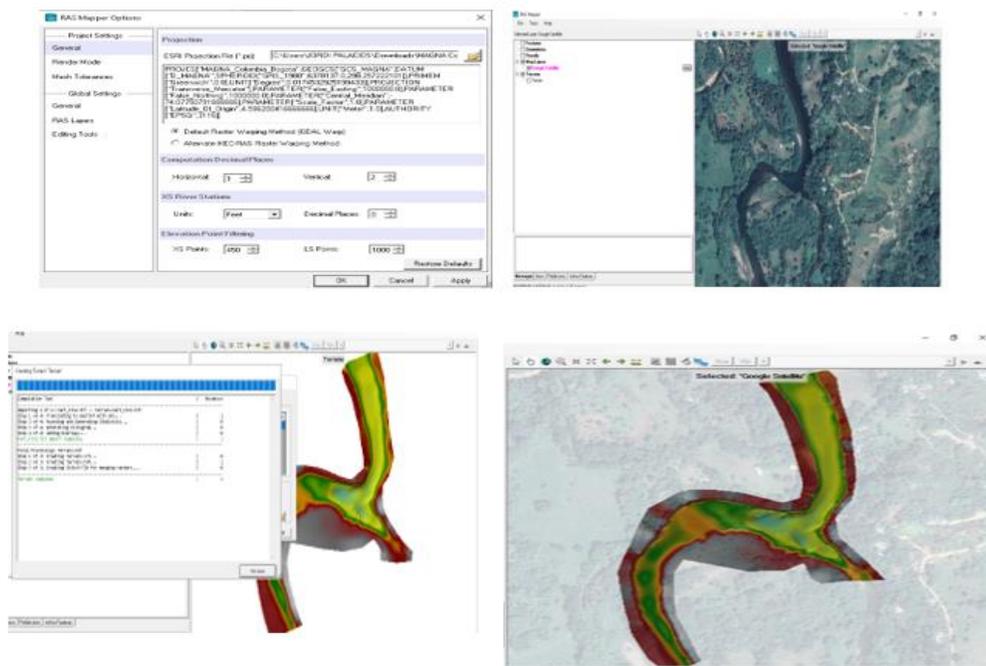
Con el fin de tener un primer acercamiento a la problemática de la zona de estudio, se realizó una caracterización unidimensional de las condiciones hidráulicas. Para el desarrollo de este modelo

hidrodinámico se utilizó el módulo RasMapper de Hec- Ras utilizando el DTM final de La Moya de Jorge.

Como primer paso para el desarrollo del modelo 1D se importó el archivo de sistema de coordenadas Magna Sirgas Bogotá, para georreferenciar el proyecto en el RasMapper antes de comenzar a cargar la información (MAGNA Colombia Bogotá. prj). Posteriormente se creó el “Terreno” el cual toma las características del DTM, en nuestro caso del correspondiente a La Moya de Jorge, y por último se le añadió una imagen Web de satelital, como se muestra en la figura 10. Para corroborar la información capturada por el “Terreno” se dibujó un perfil longitudinal de 750 metros a través de todo el dominio del modelo, el cual muestra que las elevaciones varían desde los 188.89 m.s.n.m hasta los 194.12 m.s.n.m. (figura 11).

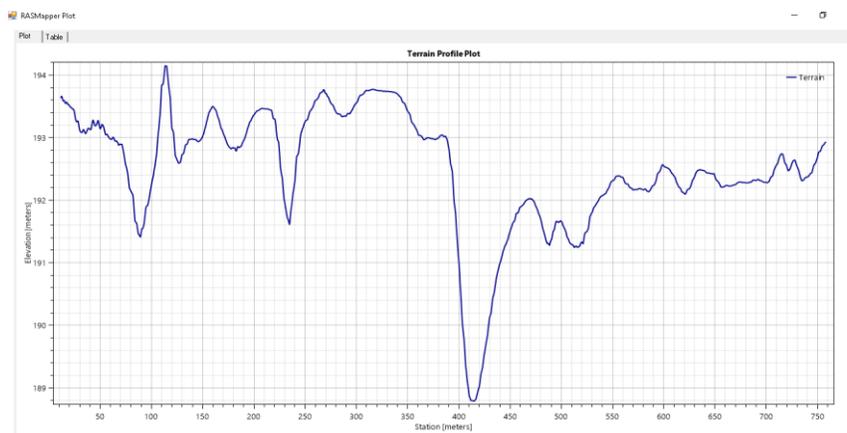
Posteriormente se generaron las secciones transversales del río a partir de un alineamiento donde se dibujaron las bancas del lecho y la dirección del flujo. El modelo se compone geoméricamente de dos brazos aguas arriba que se unen en el punto medio de la moya en un solo efluente aguas abajo (figura 12). Las secciones transversales se dibujaron perpendiculares al flujo cada 10 metros, ya que con este distanciamiento se puede capturar la información de la zona de estudio (figura 13).

Figura 11. Sistema de Coordenadas



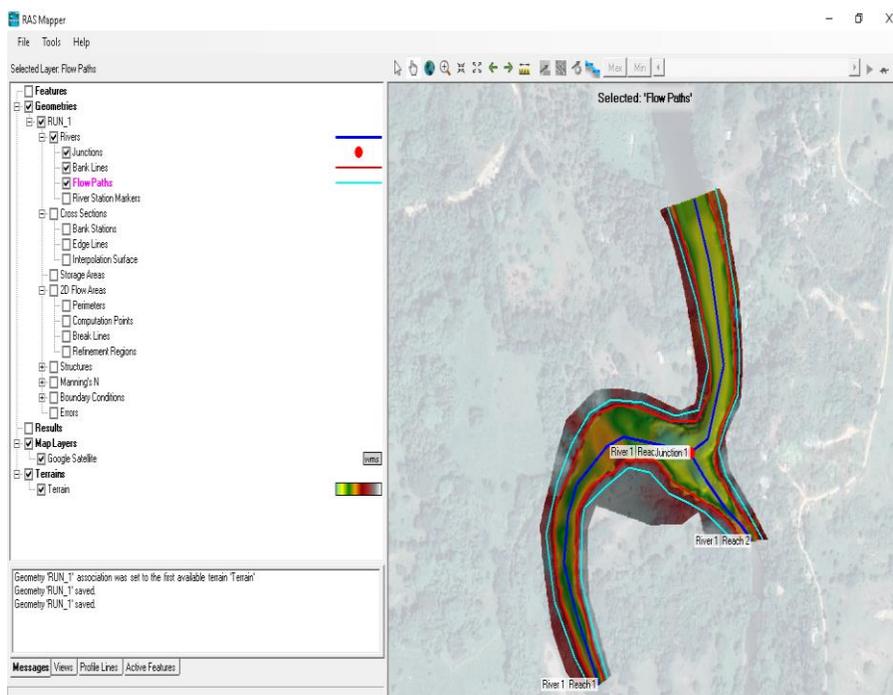
Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 12. Perfil Longitudinal Modelo Hec-Ras



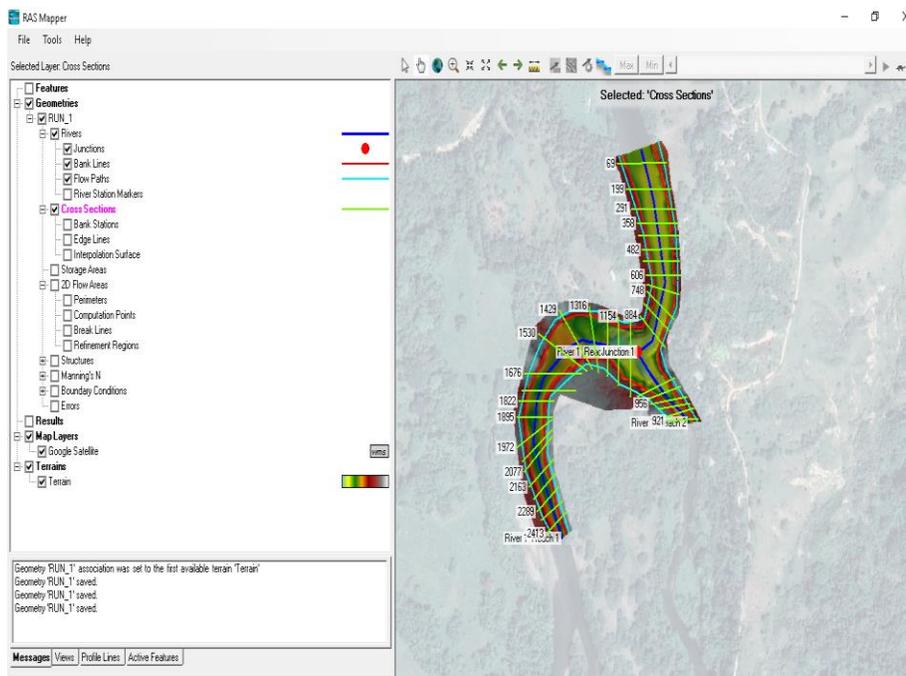
Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 13. Composición geométrica del modelo



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 14. Secciones Transversales Modelo 1D



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

4.3.2 Condiciones numéricas del modelo unidimensional

Para establecer las condiciones del modelo se partió de que el modelo no presenta dinámica sedimentológica (como se mencionó en el apartado de zona de estudio) y que sus condiciones hidrológicas, afectadas directamente por la intervención de la hidroeléctrica La Miel I, no varían en el tiempo.

Las condiciones del flujo del modelo hidrodinámico permanente en 1D se establecieron a partir del caudal de cada brazo del río obtenidas en la primera salida de campo. Para el brazo izquierdo (Reach 1) el cual transporta el mayor caudal, el valor fue de $14 \text{ m}^3/\text{s}$ y para el brazo derecho (Reach 2) el cual transporta el menor caudal, el valor fue $4 \text{ m}^3/\text{s}$. Por consiguiente, en el punto donde convergen el brazo izquierdo y el brazo derecho (Reach 1-Lower), el valor fue de $18 \text{ m}^3/\text{s}$ (figura 14).

Las condiciones de frontera se establecieron a partir de las pendientes del cauce, donde debido a los cambios bruscos de estas pendientes el régimen de flujo es mixto y por esto se tomaron condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo, las cuales fueron para Reach 1 aguas arriba de 0.0065 y aguas abajo el valor de la lámina en el punto Reach 1-Lower, para Reach 2 se establecieron las mismas condiciones y para Reach 1- Lower se establecieron condiciones de pendiente aguas abajo de 0.0075.. Cabe resaltar que el software utiliza estos valores de pendiente para calcular una profundidad normal y que los valores de estas pendientes fueron tomadas en la primera salida de campo (figura 15).

Figura 15. Condiciones Iniciales Modelo 1D

	River	Reach	RS	PF 1
1	River 1	Reach 1	2388	14
2	River 1	Reach 2	1048	4
3	River 1	Reach 1-Lower	880	18

Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 16. Condiciones de Frontera Modelo 1D

Steady Flow Boundary Conditions

Set boundary for all profiles Set boundary for one profile at a time

Available External Boundary Condition Types

Selected Boundary Condition Locations and Types

River	Reach	Profile	Upstream	Downstream
River 1	Reach 1	all	Normal Depth S = 0.0065	Junction=Junction 1
River 1	Reach 2	all	Normal Depth S = 0.0065	Junction=Junction 1
River 1	Reach 1-Lower	all	Junction=Junction 1	Normal Depth S = 0.0075

Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Finalmente, se le ingresaron al modelo los valores de Manning en sus respectivas secciones transversales, siendo un valor promedio de 0.04 y presentando un leve incremento en la zona de los rápidos de 0.041 a 0.045 (figura 16).

Figura 17. Valores de Manning para el Modelo 1D

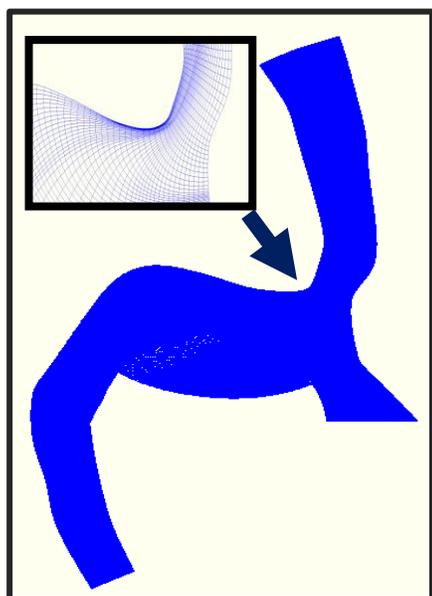
	River Station	Frctn (n/k)	n #1	n #2	n #3
19	1881	n	0.04	0.04	0.04
20	1858.00*	n	0.04	0.04	0.04
21	1835	n	0.04	0.04	0.04
22	1810.00*	n	0.04	0.04	0.04
23	1785	n	0.04	0.04	0.04
24	1759.00*	n	0.04	0.04	0.04
25	1733.00*	n	0.04	0.04	0.04
26	1707	n	0.04	0.04	0.04
27	1680.33*	n	0.04	0.04	0.04
28	1653.67*	n	0.04	0.04	0.04
29	1627	n	0.04	0.04	0.04
30	1595.40*	n	0.041	0.041	0.041
31	1563.80*	n	0.042	0.042	0.042
32	1532.20*	n	0.043	0.043	0.043
33	1500.60*	n	0.044	0.044	0.044
34	1469	n	0.045	0.045	0.045
35	1439.25*	n	0.044	0.044	0.044
36	1409.50*	n	0.043	0.043	0.043
37	1379.75*	n	0.041	0.041	0.041
38	1350	n	0.04	0.04	0.04
39	1322.67*	n	0.04	0.04	0.04
40	1295.33*	n	0.04	0.04	0.04
41	1268	n	0.04	0.04	0.04

Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

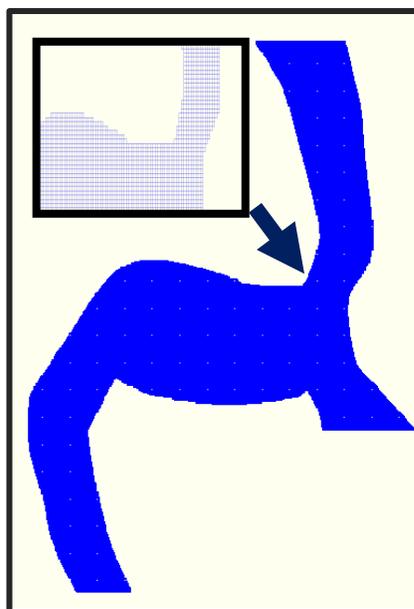
4.3.3 Modelo hidrodinámico bidimensional

Para la construcción del modelo bidimensional se implementó el sistema de modelado Flow del software Delft 3D con la mayor información posible. Se construyó un modelo completo de todo el río la Miel aguas abajo de la hidroeléctrica La Miel I, pero por la necesidad de detalle y costo computacional al final se opta por trabajar con la sección denominada La Moya de Jorge. Como primer paso se generó el mallado del modelo en x e y a partir de las líneas límites del DTM. Se analizaron dos mallas, la primera es una malla curvilínea no estructurada (Figura 18a) y la segunda, una malla estructurada (Figura 18b) con una ortogonalidad de 90°.

Figura 18. a. Mallado no estructurado



b. Mallado estructurado



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Los valores de los principales parámetros de la malla no estructurada se presentan en la tabla 2 y los de la malla estructurada, en la tabla 3.

Tabla 2. Valores Mallado No-Estructurado

Parametro	Valor
Distancia X	4 m
Distancia Y	6 m
Nodos en X	1532
Nodos en Y	407
Total Nodos	623.524

Tabla 3. Valores Mallado Estructurado

Parametro	Valor
Distancia X	1 m
Distancia Y	1 m
Nodos en X	349
Nodos en Y	499
Total Nodos	174.151

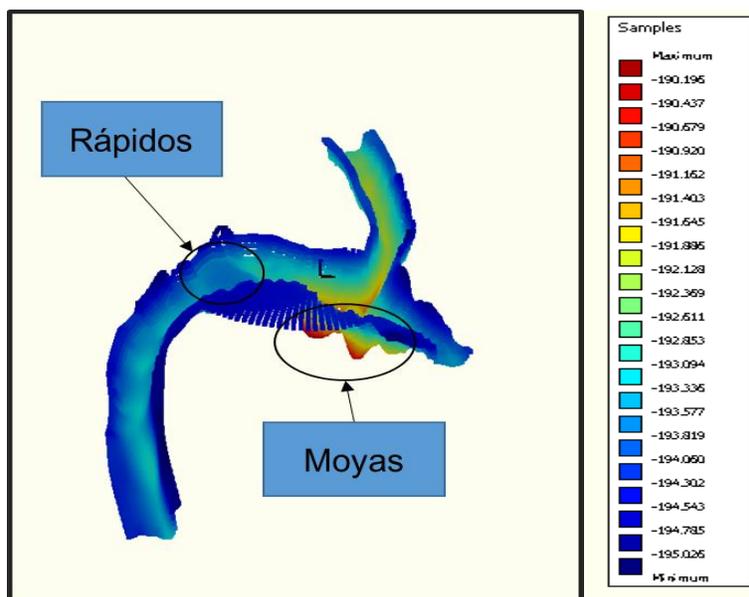
Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Se pudo determinar que la mejor malla para este caso fue la malla estructurada con una ortogonalidad de 90° , porque la relación x e y en las zonas curvas de la malla no estructurada genera problemas de estabilidad, puesto que, en esas zonas, y es mucho más grande que x y se generan advertencias de no convergencia de la solución de las ecuaciones. En cambio, la malla estructurada presenta convergencia en toda la región. También se puede observar que en la malla estructurada (tabla 3) consiste en cuadrículas de 1m x 1m con un total de nodos de 174151 que es 3.58 veces menor que en la malla no estructurada que se basa en rectángulos de 6m x 4m con un total de 623524 nodos. Por lo anterior se decidió trabajar con la malla estructurada a la cual se le realizó la prueba de independencia con cuadrículas de 0.5 m x 0.5m y cuadrículas de 2m x 2m, las cuales generaron los mismos resultados numéricos que la malla de 1m x 1m. Se pudo concluir que la malla estructurada de 1m x 1m y de 174151 nodos era la adecuada para capturar la información que deseábamos con el modelo bidimensional en el dominio computacional

Después de construida la malla se procedió a cargar la topobatimetría a partir del DTM, la cual se importó en formato XYZ (figura 19). En la figura 20 se observa en 3D, que el centro de La Moya de Jorge está conformado por dos moyas pequeñas. La zona de los rápidos se genera a partir de un cambio brusco de la elevación del lecho del río y viene precedida por un remanso. Es importante

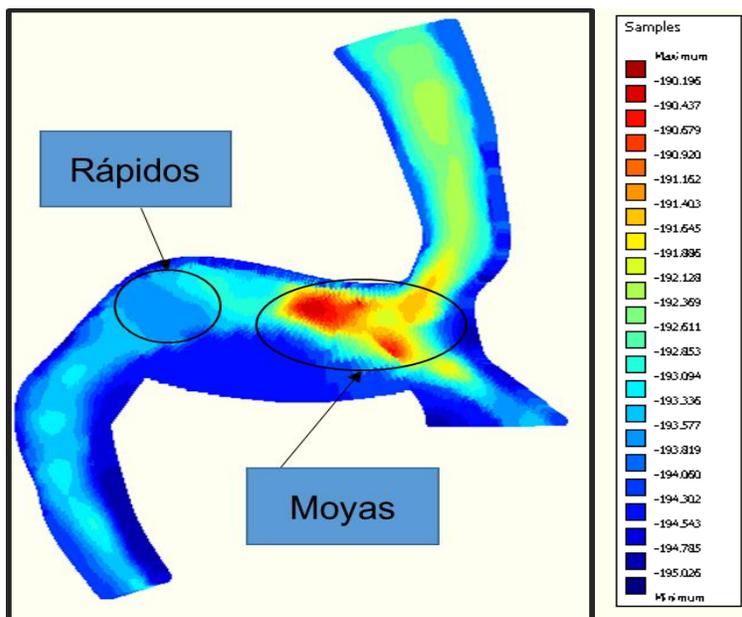
resaltar que, por la forma que el software carga la información, se multiplicaron todos los puntos Z por -1.

Figura 19. Topobatimetría (XYZ) vista 3D



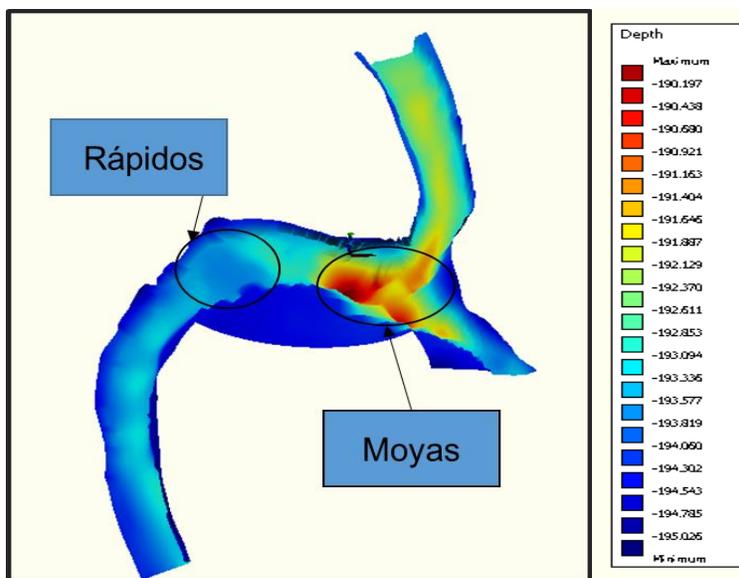
Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 20. Topobatimetría (XYZ)



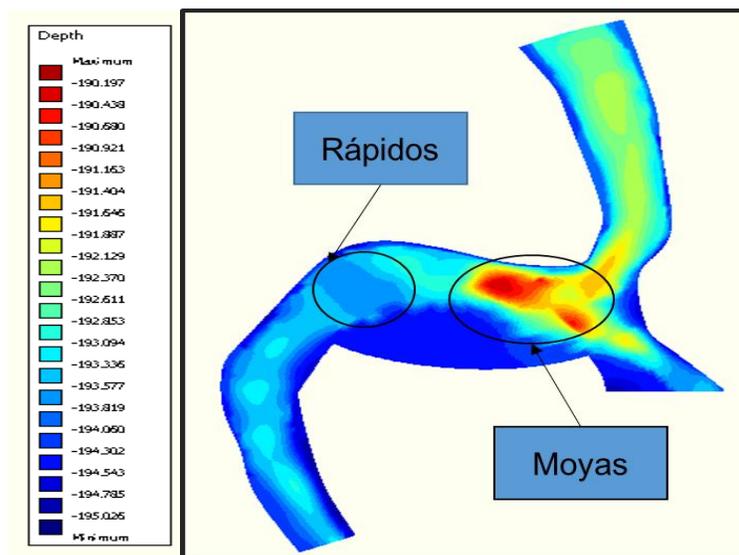
Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 21. Profundidades vistas 3D



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 22. Profundidades



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

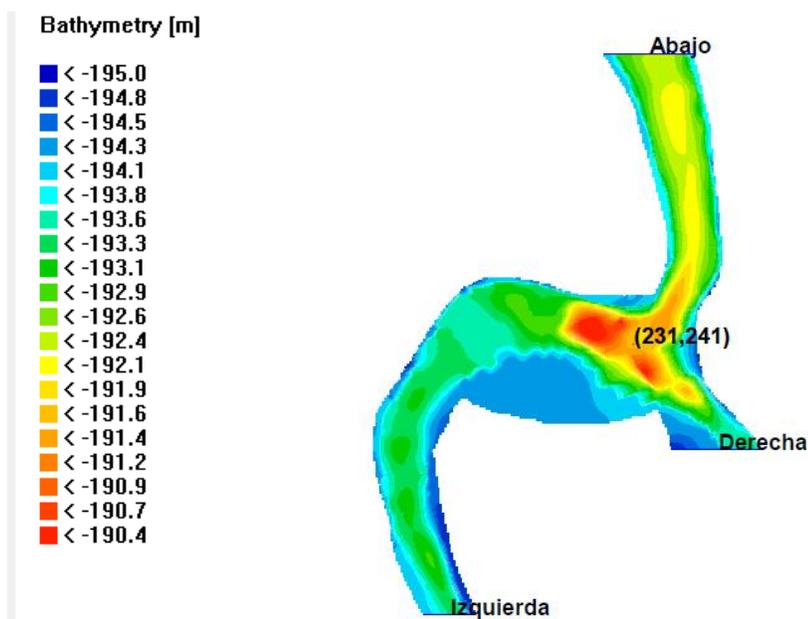
Para generar las profundidades (figura 21) es necesario interpolar la topobatemetría en cada nodo de la malla estructurada para esto se usó una interpolación triangular con niveles máximos de

195.025 m.s.n.m en los rápidos y mínimos de 190.197 m.s.n.m en La Moya de Jorge. La complejidad geométrica de la zona de estudio es evidente y se pudieron detallar las características de la moya, encontrándose lugares que presentan profundidades de 4 m y lugares donde las profundidades son de 3m (figura 22).

4.3.3.1 Condiciones numéricas del modelo bidimensional

Como se ha venido mencionando anteriormente debido a la presencia de la hidroeléctrica La Miel I, el río La Miel tiene un comportamiento de río artificial (un laboratorio a gran escala), por lo tanto, se decidió realizar el modelado 2D con condiciones de flujo que no cambian a través del tiempo y estableciendo tres condiciones de frontera abiertas del tipo Dirichlet presentes en el brazo izquierdo, brazo derecho y otra condición aguas abajo de cierre, para el resto del dominio predeterminadamente el software utiliza condiciones tipo Newman. Adicionalmente, se tiene una condición interna que corresponde a un punto de observación en la Moya, el punto resaltado (231,241) y es el punto de calibración donde se comparará con el valor del aforo del ADCP que se tomó en la salida de campo (figura 23).

Figura 23. Condiciones generales del modelo hidrodinámico en 2D



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la tabla 4 se pueden observar los valores numéricos de las condiciones del modelo. Realmente Delft 3D es un modelo de flujo no permanente y el flujo permanente es una condición límite. En nuestro caso, que, al no variar las condiciones a través del tiempo, se realizó una simulación por 3 horas cuando, los cambios en la solución eran insignificantes. El modelo tiene un tiempo inicial de calentamiento de 20 minutos y se estabiliza 1 hora después con una condición inicial de 195.4 m, que en este caso decidimos inundar todo el dominio computacional. Para el paso de tiempo se tomó de 0.001 segundos cercana a la condición de Courant, aunque para un modelo de diferencias finitas implícitas como lo es el Delft 3D. no es una condición que se requiera. Para las condiciones de frontera abierta se les asignó el valor tomado en la primera campaña de campo, es decir, en el brazo izquierdo $14 \text{ m}^3/\text{s}$, en el brazo derecho $4 \text{ m}^3/\text{s}$. Aguas abajo para cerrar el modelo y se utiliza una condición de nivel de 193.2099 m obtenida de las mediciones del RTK.

Tabla 4. Condiciones numéricas del modelo hidrodinámico 2D

Parámetro	Magnitud	Unidades
Inicio de la simulación	00:00:00	Horas:minutos:segundos
Fin de la simulación	03:00:00	Horas:minutos:segundos
Tiempo de paso	0.001	minutos
Condición inicial	195.4	m
Condición de frontera (Brazo izquierdo)	14	m^3/s
Condición de frontera (Brazo derecho)	4	m^3/s
Condición de frontera aguas abajo	193.2099	m

Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

4.4 Modelo de Seguimiento de Partículas

4.4.1 Experimentos de campo para el seguimiento de partículas

Para la interpretación y calibración de los modelos de seguimiento de partículas se desarrolló el siguiente experimento en el cual se arrojaron globos de helio con un volumen de agua que pudieran flotar y se transportaran por la corriente del cauce. Este experimento se realizó en todo el transecto del dominio que tiene La Moya de Jorge y es el mismo en el que se desarrollaron los modelos. Para la realización de estos experimentos se establecieron los siguientes pasos:

Se llenaron con agua 70 globos de helio con un volumen de agua suficiente para que pudiese flotar, los globos se seleccionaron con colores que pudieran ser reconocidos fácilmente en las imágenes obtenidas por los Drones.

Los globos se transportaron en lancha hasta el punto de lanzamiento ubicado aguas arriba de La Moya de Jorge, el cual se muestra en la figura 24. Este punto se seleccionó de manera que, desde su lanzamiento, los globos puedan atravesar todo el dominio perteneciente a La Moya de Jorge,

pasando por el remanso, los rápidos y los fenómenos de recirculación hasta llegar al punto donde la geometría del cauce vuelve a ser estable.

Posteriormente se realizó la primera serie de experimentos que constó de 2 experimentos de prueba y 3 experimentos de toma de información. Se comenzó lanzando 10 globos, posteriormente 20 globos y 50 globos, desde el punto de inicio del lanzamiento hasta el punto más lejano que pudiese capturar las imágenes de los Drones, en un volumen de control que incluía la Moya de Jorge donde se encuentra el fenómeno del rápido y las recirculaciones como se muestra en la figura 25, Este volumen se seleccionó para analizar los patrones de transporte de los globos de helio desde una perspectiva lagrangiana. Al final estos globos se recolectaban por el equipo técnico perteneciente a la salida como se observa en la figura 26. Es de resaltar que en los lanzamientos no se perdió ningún globo y que toda la información de los tres lanzamientos se capturó con los Drones.

Figura 24. Punto de lanzamiento de los globos para el experimento de campo



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 25. Volumen de control Moya de Jorge



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 26. Recolección de los globos



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Por último, se realizó un experimento en el que se lanzaron la totalidad de los globos desde el punto de lanzamiento hasta el punto de cierre del dominio del modelo. Los globos salían del punto de control, pasaban por el sector denominado aguas arriba y más adelante pasaban por los accidentes hidráulicos comenzando con el remanso, luego por el rápido y posteriormente la Moya. Se quería analizar la forma en la que los globos se transportaban por estos accidentes a través del tiempo y espacio. Por último, se recogían en el punto de cierre donde no tenía ninguna influencia los fenómenos hidráulicos, como se puede observar en la figura 27.

Figura 27. Recolección de los globos



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

La información obtenida de los laboratorios de campo consistió en el tiempo de viaje de los globos en el volumen de control definido por el área capturada por los Drones, el desplazamiento de los globos a través del volumen de control, el tiempo de viaje de los globos desde el principio hasta el final de la sección de estudio, los globos atrapados por La Moya de Jorge y los videos del

movimiento del agua sobre un volumen de control establecido para la generación de los modelos de velocimetría de imágenes de partículas.

4.4.2 Modelo computacional de seguimiento de partículas

Para realizar el acoplamiento entre el modelo hidrodinámico bidimensional calibrado y el método de seguimiento de partículas se utilizaron los módulos Flow y Part del software Delft 3D. Las salidas del modelo hidrodinámico, específicamente los campos de velocidades y el grillado se tomaron como los insumos primarios para realizar el transporte de partículas a través de la zona de estudio.

Tabla 5. Condiciones del modelo de seguimiento de partículas

Parámetro	Magnitud	Unidades
Inicio de la simulación	00:00:00	Horas: minutos: segundos
Fin de la simulación	03:00:00	Horas: minutos: segundos
Tiempo de paso	6	segundos
Numero de partículas	100	
Lanzamientos instantáneos	7	
Lanzamiento	4	m^3/s
Tasas de descomposición	0	1/día
Coefficiente de dispersión a	0.05	
Coefficiente de dispersión b	0.05	

Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la tabla 5 se muestran los valores de las condiciones para el modelo de seguimiento de partículas en el que se realizaron 6 lanzamientos:

El primero se realizó con 100 partículas con un radio de 0.10 m y 0.50 kg de masa. Para efectos de comparación con la simulación computacional, el instante del lanzamiento se hace coincidir

con la primera hora de la simulación. Se basa en que se puede observar que el modelo se estabiliza en la primera hora, este lanzamiento se realizó disminuyéndole a las condiciones medias de las bombas que se arrojaron en los experimentos de campo 0.02m de diámetro y 0.05 kg de masa.

El segundo lanzamiento se realizó con 100 partículas con un radio de 0.12 m y 0.55 kg de masa, arrojadas a una hora y veinte minutos del inicio de la simulación computacional, este lanzamiento se realizó con las condiciones de las bombas de helio utilizadas en los experimentos de campo.

El tercer lanzamiento se realizó con 50 partículas con un radio de 0.25 m y 1 kg de masa, arrojadas a una hora y cuarenta minutos del inicio de la simulación.

El cuarto lanzamiento se realizó con 30 partículas con un radio de 0.35 m y 2 kg de masa, arrojadas a dos horas del inicio de la simulación.

El quinto lanzamiento se realizó con 20 partículas con un radio de 0.5 m y 5 kg de masa, arrojadas a dos horas y veinte minutos del inicio de la simulación.

El sexto lanzamiento se realizó con 5 partículas con un radio de 0.75 m y 10 kg de masa, arrojadas a dos horas y treinta minutos del inicio de la simulación.

El séptimo lanzamiento se realizó con 2 partículas con un radio de 1 m y 80 kg de masa, arrojadas a dos horas y treinta y cinco minutos del inicio de la simulación.

Los valores seleccionados fueron tomados para conocer el transporte de cuerpos con diferentes masas y tamaños en la zona de estudio bajo sus características geométricas complejas.

CAPÍTULO V

5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

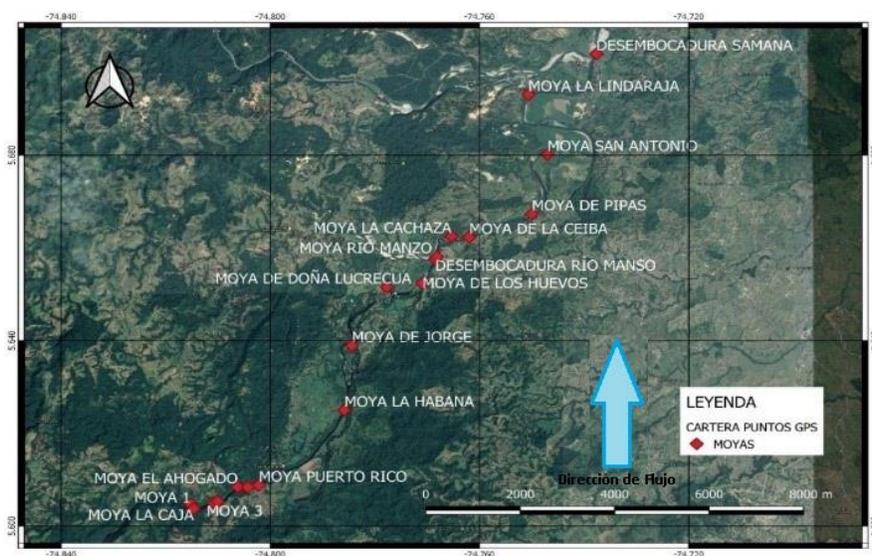
5.1 Resultados del Trabajo de Campo

En los siguientes numerales se presentan los resultados del procesamiento de la información obtenida en campo, pasando desde la identificación de los fenómenos hidráulicos presentes hasta la generación del modelo digital de terreno.

5.1.1 Identificación de los fenómenos hidráulicos de recirculación y rápidos

En la primera salida de campo se caracterizó hidráulicamente la parte baja del río desde la descarga de la hidroeléctrica La Miel I hasta la desembocadura del río La Miel en el río Samaná. Se identificaron los fenómenos hidráulicos causados por las diferentes variaciones geométricas del cauce, principalmente las moyas (fenómenos de recirculación) como se muestra en la figura 28 y los chorros (Rápidos) en la figura 29.

Figura 28. Distribución espacial de moyas (recirculación) aguas abajo de la hidroeléctrica La Miel I.



Fuente: (Instituto Javeriano del Agua & Equitas, 2020)

Figura 29. Distribución espacial de rápidos(chorros) aguas abajo de la hidroeléctrica La Miel



Fuente: (Instituto Javeriano del Agua & Equitas, 2020)

De la figura 28 se pudo determinar que la mayoría de las mojas son ocasionadas por controles geológicos, que son visibles en los cambios de geométricos abruptos del cauce y son normalmente secciones desnudas y superficiales del macizo presente en la región debido a su bajo potencial erosionable.

De la figura 29 se pudo determinar que los rápidos están ubicados principalmente en la parte media del tramo de la sección, donde se tienen características de piedemonte, baja deposición y mayores velocidades y una pendiente moderada.

También se pudo determinar que el cambio promedio de la altura en los rápidos es de 60 cm, con un máximo de 1 metro y un mínimo de 0.3 metros medidos desde donde el cauce tiene las profundidades más bajas, hasta cuando este regresa a su profundidad promedio o a un régimen de menor turbulencia aparente. Cambios de esta magnitud aceleran el flujo.

En la mayoría de los casos, estos chorros preceden la generación de mojas, y se ubican aguas arriba de estas. En la tabla 6, se presentan las coordenadas y valores de pendientes obtenidos.

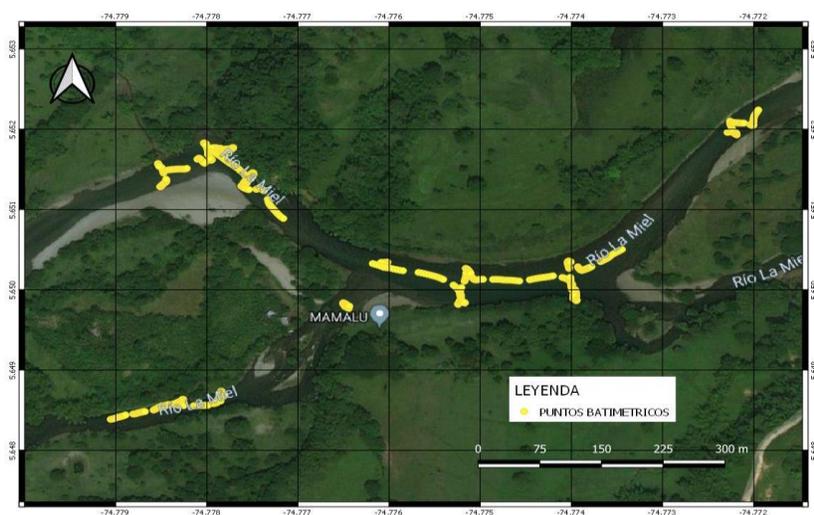
Tabla 6. Ubicación y valores de pendientes en rápidos

NOMBRE	N	W	ALT. INS. [m]	MIRA AGUAS ABAJO		MIRA AGUAS ARRIBA		DIST. MIRAS [m]	DIF. H [m]	PENDIENTE [%]	
				LECTURA [m]	PROF [m]	LECTURA [m]	PROF [m]				
RÁPIDO DE JORGE	DE	5.639138333	-74.784875	1.46	1.87	0.3	1.25	0.5	110	0.82	0.0075
RÁPIDO ESCUELA	LA	5.636545	-74.786106	1.52	2.22	0.55	0.82	0.17	180	1.02	0.0057
RÁPIDO HABANA	LA	5.628016667	-74.785685	1.5	2.44	0.31	1.89	0.3	120	0.54	0.0045
RÁPIDO DE JAMAICA	DE	5.621521667	-74.787711	1.53	1.92	0.32	1.12	0.32	120	0.8	0.0067
RÁPIDO DEL 14	DEL	5.648038333	-74.780526	1.47	2.43	0.23	1.87	0.44	70	0.77	0.0110
RÁPIDO LOS HUEVOS	LOS	5.653323333	-74.770485	1.5	2.81	0.45	2.73	0.67	120	0.3	0.0025
RÁPIDO DEL PASO	DEL	5.676438333	-74.749771	1.5	2.21	0.5	1.35	0.31	85	0.67	0.0079
PROMEDIO										0.66	0.0063

Fuente: (Instituto Javeriano del Agua & Equitas, 2020)

Para la obtención de la información batimétrica de la zona de estudio, se tomaron secciones transversales y diagonales al cauce cada 50 metros en donde se consideró necesario refinar y cada 100 a 300 metros en los tramos que presentaban configuraciones geométricas uniformes, en la figura 30 se puede observar un ejemplo del levantamiento.

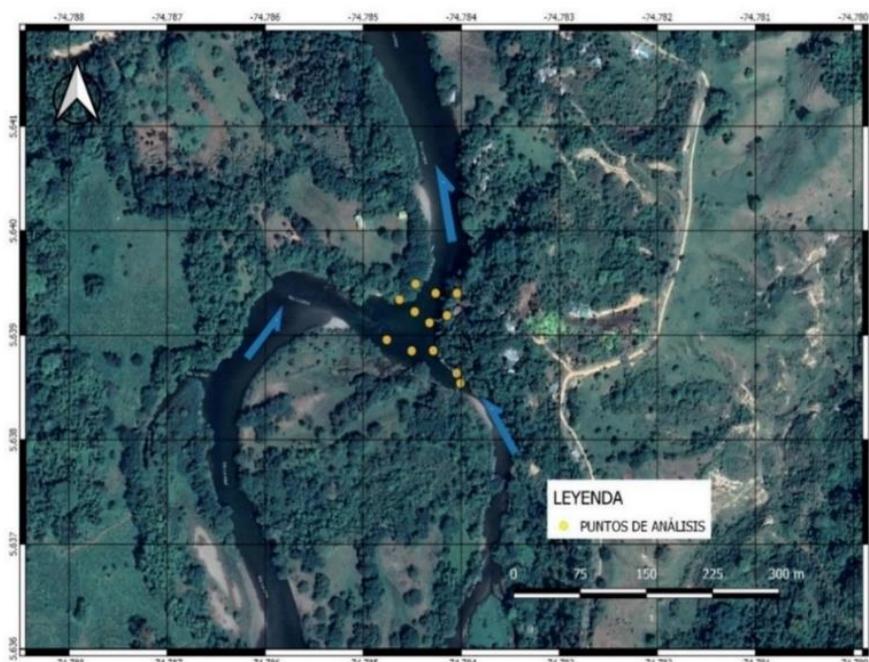
Figura 30. Ejemplo de levantamiento batimétrico



Fuente: (Instituto Javeriano del Agua & Equitas, 2020)

En la figura 31 se puede observar un ejemplo de los datos obtenidos en el levantamiento realizado en la Moya de Jorge caracterizada al detalle a partir del uso del ADCP de forma estática en varios puntos de interés (seleccionados a criterio). Se generó una serie de tiempo de la variación y del comportamiento de la velocidad en varios puntos de la moya, de donde se obtuvo una visión tridimensional de la velocidad al interior de la moya, de la transición y de la salida de esta. En la figura 32 se puede observar un ejemplo de los valores de velocidad, caudal y profundidad obtenidos por el ADCP en la moya de Jorge.

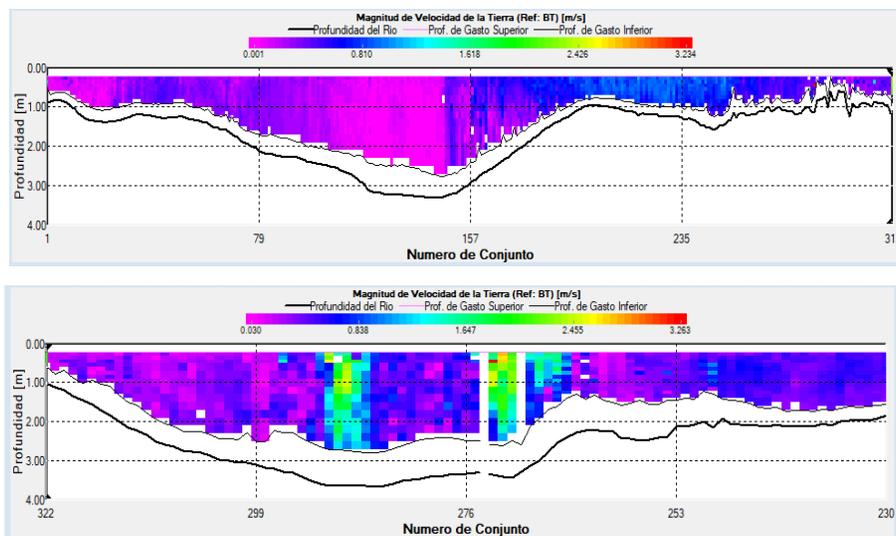
Figura 31. Esquema espacial de medición detallada sobre la moya de Jorge



Fuente: (Instituto Javeriano del Agua & Equitas, 2020)

Figura 32. Aforos y caracterización de velocidad por el ADCP La Moya de Jorge

PUNTO	LATITUD	LONGITUD	GASTO m ³ /s	V. MEDIA m/s
MOYA DE JORGE	5.638926667	-74.784415	22	0.171

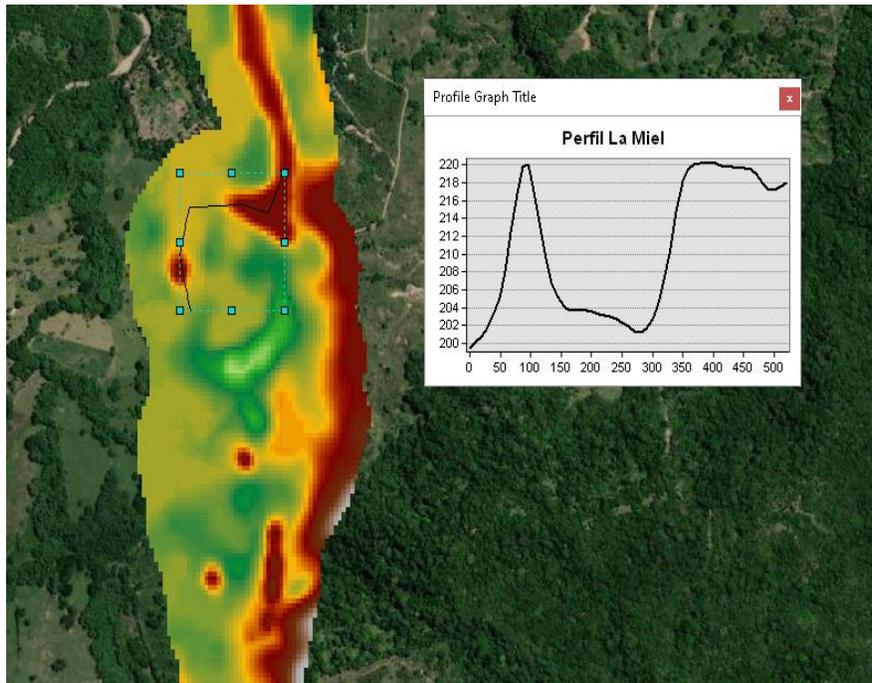


Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

5.1.2 Generación del Modelo de Elevación Digital (DTM)

La topografía para el modelo hidrodinámico bidimensional se elaboró a partir de dos metodologías diferentes. La primera se realizó a partir de imágenes satelitales obtenidas del ALOS PALSAR (figura 33) el cual tiene una resolución de 12.5 m y es un radar de apertura sintética tipo banda en forma de L de ALOS, que produjo observaciones detalladas de 2006 a 2011, para todo clima, de día y de noche, así como interferometría de paso repetido. Los datos de PALSAR provienen de múltiples modos de observación con polarización variable, resolución, ancho de franja y ángulo fuera del nadir. Fue uno de los tres instrumentos en el Satélite avanzado de observación terrestre-1 (ALOS), también conocido como DAICHI, desarrollado para contribuir a los campos de mapeo, observación regional precisa de la cobertura terrestre, monitoreo de desastres y topografía de recursos. ALOS fue una misión de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA).

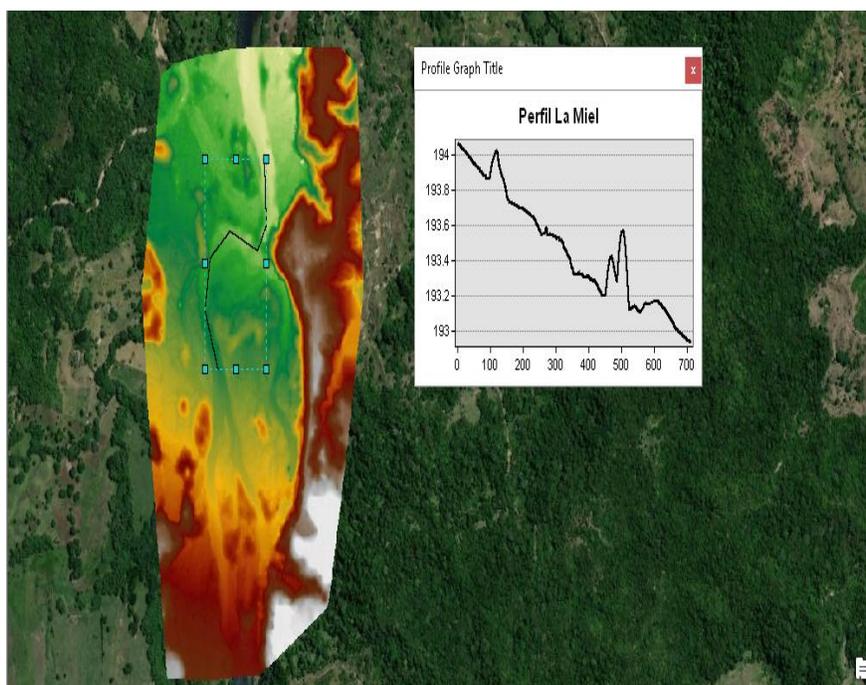
Figura 33. Perfil DTM Alos Palsar



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Al momento de construir el modelo computacional a partir de las imágenes obtenidas por el satélite Alos Palsar se pudo observar que debido a las características montañosas y la compleja geometría presente en el río La Miel, no era posible construir el modelo hidrodinámico con una resolución de 12.5m ya que no se lograba capturar la información necesaria para el nivel de detalle que se requería al momento de querer capturar los fenómenos hidráulicos presentes en el sistema, como se puede observar en el perfil longitudinal presentado en la figura 33 en el que hay una diferencia de 20 metros en la sección del río, algo que es contrario a la realidad. Por ende, se decidió realizar una nueva topografía a partir de imágenes tomadas por drones con una resolución de 25 cm como se muestra en la figura 34.

Figura 34. Perfil DTM generado con Drones



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

5.1.3 Generación del modelo digital de terreno (DTM)

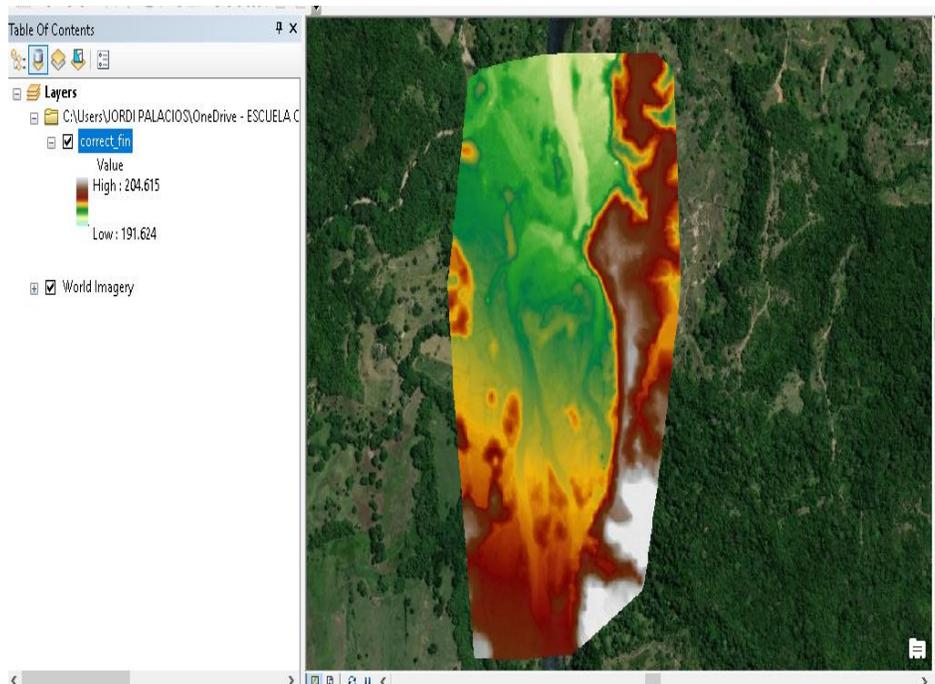
5.1.3.1 Generación del modelo digital de elevación (DEM) a partir de las imágenes tomadas por los Drones

Para la generación del DEM, se utilizaron una secuencia de 1366 fotos que se realizaron en 3 vuelos, el primero de 264 fotos, el segundo de 999 y el tercero de 103 fotos. Se utilizó el software Pix4D pro Mapper el cual puede combinar todo tipo de imágenes tomadas por aviones (tripulados y no tripulados) y terrestres para la obtención final de productos en 2D y 3D. Tras el procesamiento de las imágenes se obtuvieron la nube densa de puntos (DSM) y el modelo digital de elevación (DEM).

Para la zona de estudio, después de la obtención de la nube de puntos, se realizó su clasificación y se separaron los puntos del terreno natural de los puntos de los objetos, en este caso filtrando los

árboles y estructuras presentes. Esto permitió obtener la información pertinente del espejo de agua y las orillas del río. Al final del proceso se obtuvo la Figura 35 de elevación de terreno, con una condición de elevación mínima de 191.624 m.s.n.m y una elevación máxima de 204.615 m.s.n.m y un tamaño de píxel de 25 cm.

Figura 35. Modelo Digital de Elevación La Miel



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

5.1.3.2 Corrección del DEM con la información del lecho tomada por el RTK

Se realizó la corrección del DEM con la información del lecho obtenida por el RTK, escogiendo como el nivel base el del día 22 de febrero de 2020, (punto 0) cuando se realizó el levantamiento de los puntos en las orillas y partes del lecho del río. La diferencia entre los dos puntos es de 0.65 m.s.n.m como se muestra en la tabla 7.

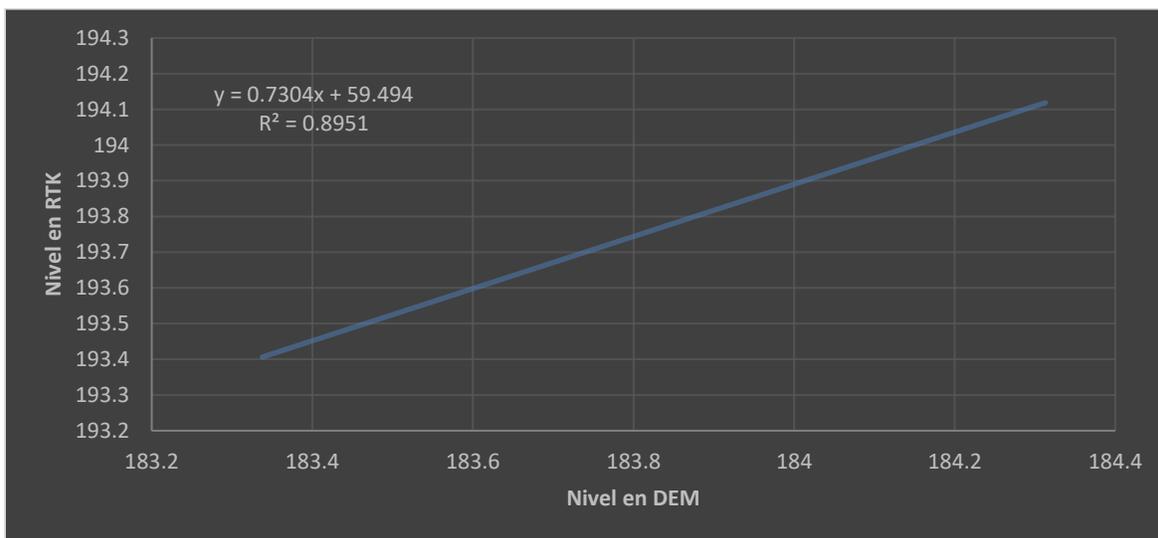
Tabla 7. Valores de las bases RTK segunda salida de Campo

Base y	Fecha	Zeta
Base 1	21 02 2020	194.963
Base 2	22 02 2020	195.613
Diferencia		0.65

Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Posteriormente se realizó un análisis de regresión lineal como se observa en la figura 36 en el que se obtuvo un r^2 de 0.8951 lo cual indica un ajuste bueno entre el nivel del RTK y el nivel del DEM. La ecuación característica de la recta obtenida fue $y = 0.7304x + 59.494$ la cual se les aplicó a todos los puntos del DEM para realizar la corrección general.

Figura 36. Regresión para la Corrección del DEM



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

5.1.3.3 Análisis y ajuste de batimetrías

A la batimetría tomada en campo debe ajustársele un valor de nivel de la superficie del agua (m.s.n.m) para poder encontrar el nivel del lecho ya que se tienen datos de profundidad por cada punto de la batimetría, pero no se conoce su elevación. Para este ajuste, se utilizó la técnica de

interpolación de la Distancia Inversa Ponderada (IDW) estimando los valores desconocidos de elevación sobre el nivel del mar de las batimetrías, especificando la distancia de búsqueda con los valores del RTK, los puntos más cercanos, el ajuste de potencia y las barreras. Este método de interpolación se realizó mediante un script en Python (Anexo 1). Posteriormente se calculó para cada punto de las batimetrías su correspondiente valor de nivel del lecho del río, que es la resta del nivel de superficie del agua (interpolado) y la profundidad registrada por la ecosonda, estableciendo al final los valores cada punto (figura 37), donde:

x = Coordenada x en sistema de coordenadas Magna Colombiana Bogotá

y = Coordenada y en sistema de coordenadas Magna Colombiana Bogotá

z = Valores de profundidad tomados del ecosonda

Inter= Valores de Nivel interpolados con IDW

Zreal = Valores finales de Nivel del Lecho

Figura 37. Ajuste Batimétrico

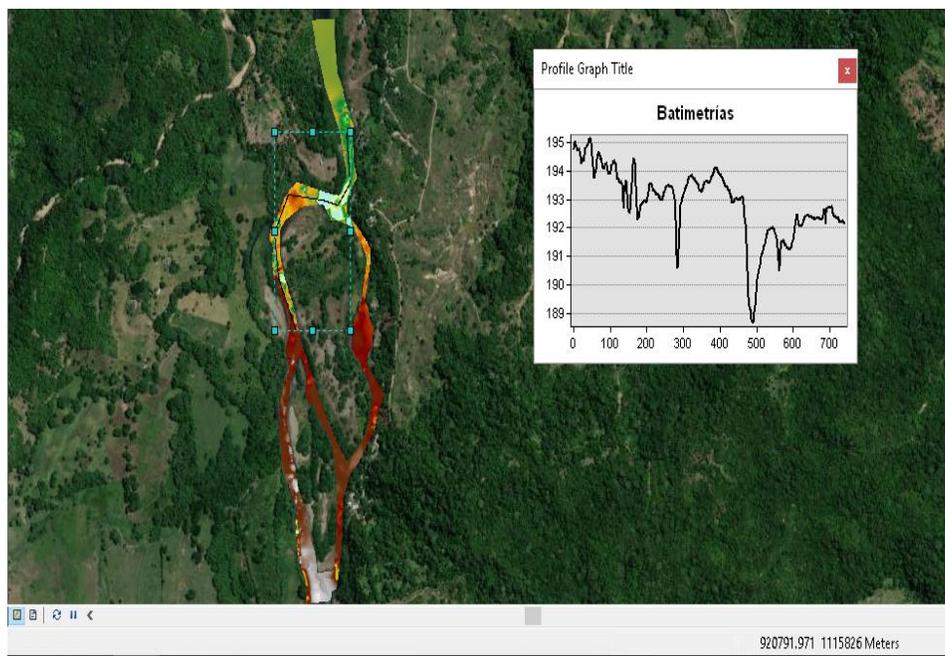
Bati\$							
FID	OID_	x	y	z	Inter	zreal	
0	0	921689.072324	1115626.82623	2.11	194.524345	192.414345	
1	0	921688.766064	1115626.9842	2.11	194.52434	192.41434	
2	0	921689.080743	1115626.09387	2.11	194.323727	192.213727	
3	0	921689.692881	1115625.46286	2.13	194.330308	192.200308	
4	0	921689.934037	1115625.15666	2.13	194.32532	192.19532	
5	0	921689.998871	1115625.08238	2.11	194.325248	192.215248	
6	0	921690.890326	1115625.0072	2.13	194.325302	192.195302	
7	0	921691.419793	1115625.08994	2.06	194.32509	192.26509	
8	0	921692.850518	1115625.59804	2.18	194.325089	192.145089	
9	0	921694.002285	1115625.84692	2.09	194.52781	192.43781	
10	0	921695.274409	1115625.6692	2.06	194.114082	192.054082	
11	0	921696.415656	1115624.917	2.21	194.096915	191.886915	
12	0	921697.027243	1115623.83167	2.3	194.094625	191.794625	
13	0	921697.12791	1115622.60794	2.3	194.102021	191.802021	
14	0	921696.977977	1115621.48648	2.3	196.549255	194.249255	
15	0	921696.967535	1115620.55021	2.23	196.683983	194.453983	
16	0	921696.827303	1115619.75322	2.3	196.979	194.679	
17	0	921696.724118	1115618.90056	2.3	196.713413	194.413413	
18	0	921696.723062	1115618.0292	2.32	195.810657	193.490657	
19	0	921696.443597	1115617.26014	2.4	195.825202	193.425202	
20	0	921696.210522	1115616.55583	2.37	195.767112	193.397112	
21	0	921696.079225	1115615.45293	2.47	195.576096	193.106096	
22	0	921696.002938	1115613.8493	2.35	195.334601	192.984601	



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Finalmente se interpolaron los puntos batimétricos utilizando el método Kriging en ArcMap para generar una superficie del lecho del río, como se observa en la figura 38. En el perfil del lecho y el área que va desde el rápido hasta el fin de la moya se observan claramente las complejas condiciones geométricas que presenta el río La Miel en la sección de La Moya de Jorge.

Figura 38. Superficie Batimétrica río La Miel aguas abajo de la hidroeléctrica La Miel I

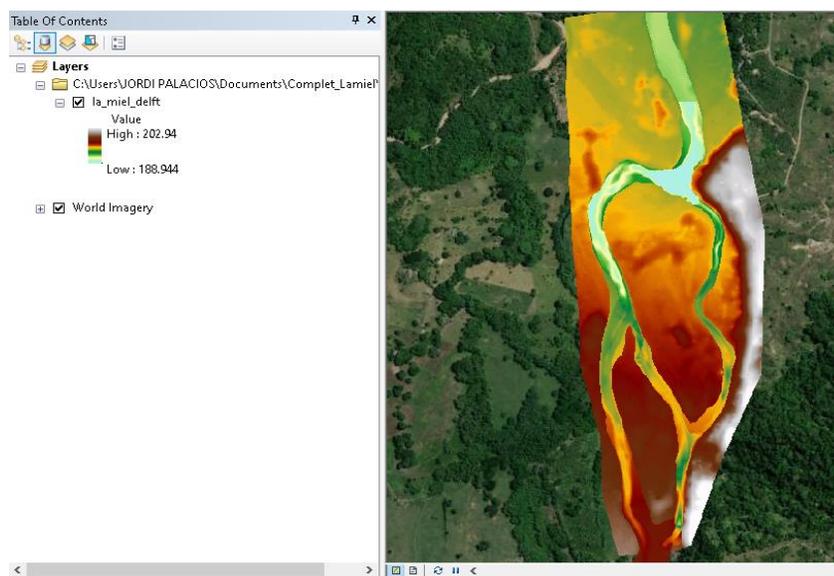


Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

5.1.3.4 Generación DTM

Para la generación del DTM se unió la superficie batimétrica (Lecho) del río La Miel con el DEM que se generó a partir de la topografía obtenida por los drones. Para esto se cortó la sección que corresponde a la superficie del agua en el DEM y se unió el DEM sin la superficie del río con la superficie batimétrica, este proceso se realizó por medio de ArcMap, al final el DTM completo del río La Miel aguas abajo de la hidroeléctrica La Miel I fue el presentado en la figura 39.

Figura 39. DTM final Río La Miel aguas abajo de la hidroeléctrica La Miel I

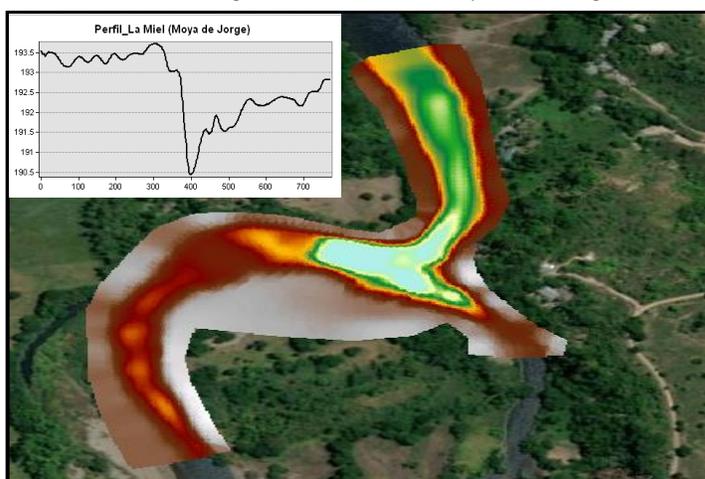


Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

5.1.3.5 Ajuste final de DTM Moya de Jorge

Finalmente, para llegar a un mejor detalle de la zona final de estudio que es La Moya de Jorge, se decide realizar un corte en la sección correspondiente como se muestra en la figura 40. El perfil mostrado en la figura 40 es el detalle la geometría de la sección de La Moya de Jorge.

Figura 40. DTM Moya de Jorge

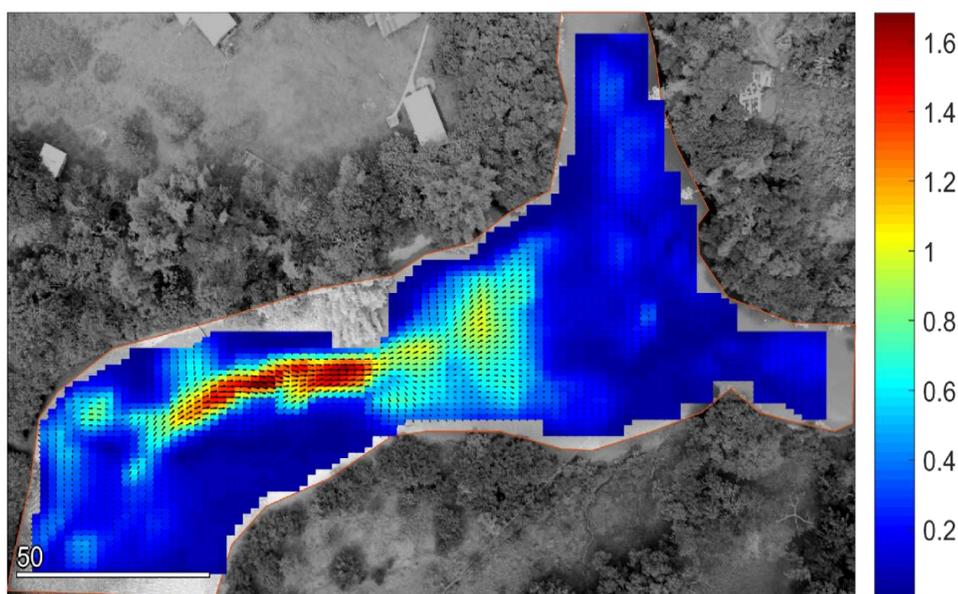


Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

5.2 Resultados Velocimetría de Imágenes de Partículas

A partir de la implementación de la técnica de velocimetría de imágenes de partículas se obtuvieron los campos de velocidad superficiales para toda la zona de estudio, utilizando una relación entre el tamaño del píxel y el paso del fotograma (píxeles/fotograma). En la figura 41 se puede observar que la técnica logra capturar las tendencias de velocidades esperadas espacial y temporalmente para los fenómenos hidráulicos presentes en la zona de estudio. Cuantitativamente se encontraron velocidades moderadas en el remanso de 0.6 m/s, velocidades máximas en los rápidos con un promedio de 1.6 m/s, en la entrada de La Moya velocidades medias de 1 m/s y valores entre los 0.2 y 0.4 m/s en La Moya y a la salida.

Figura 41. Campo de Velocidades (VIP)

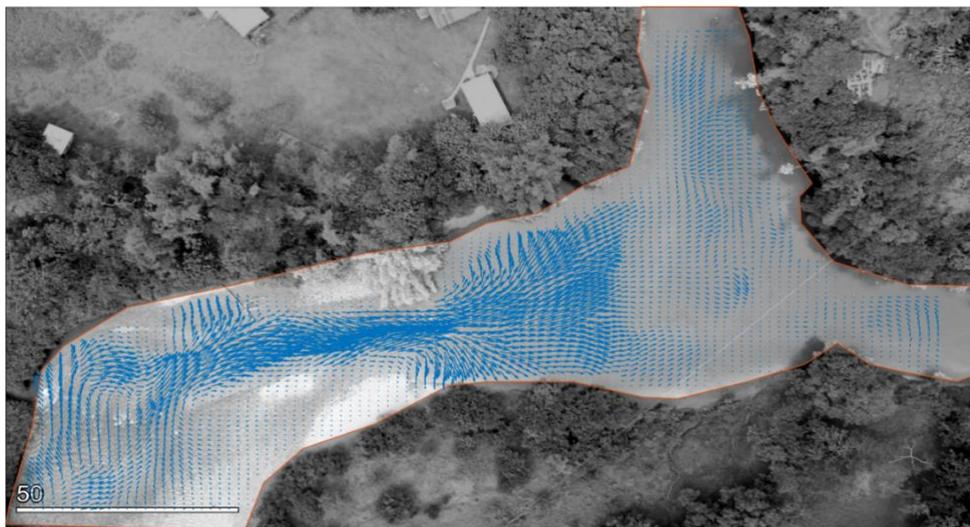


Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la figura 42 se presentan los vectores de velocidad de la técnica de velocimetría de imágenes de partículas en el que se observa que en las zonas de los rápidos los vectores tienen una tendencia uniforme y con la mayor magnitud.

En cuanto a la parte de La Moya, los vectores tienden a desagruparse debido a la desaceleración. Descomponiéndose en vectores con tres características, los de mayor magnitud se presentan en el medio y en la dirección del sentido del flujo, en el costado izquierdo debido a que es el lugar de mayor profundidad los valores de velocidad tienden a ser cercanos a 0 y es aquí donde se presentan los fenómenos de recirculación, en el costado derecho la velocidad también tiende a disminuir pero esta se ve influenciada por la interacción con la descarga del brazo derecho del cauce. Aguas abajo de la Moya las velocidades tienden a ser las promedio y vuelven a tener una tendencia uniforme.

Figura 42. Vectores de Velocidades (VIP)



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Por último, se tomó una sección transversal en La Moya, para realizar el cálculo de la descarga y las velocidades en la sección transversal, Primero se seleccionó el sitio de interés como se observa en la figura 43 y posteriormente se ingresó el valor de los niveles de lecho donde se usó la topobatimetría de La Moya de Jorge.

Para obtener una velocidad que representara las velocidades promediadas en la vertical se usó el coeficiente de velocidad media a partir de las velocidades superficiales., Este coeficiente siguiendo

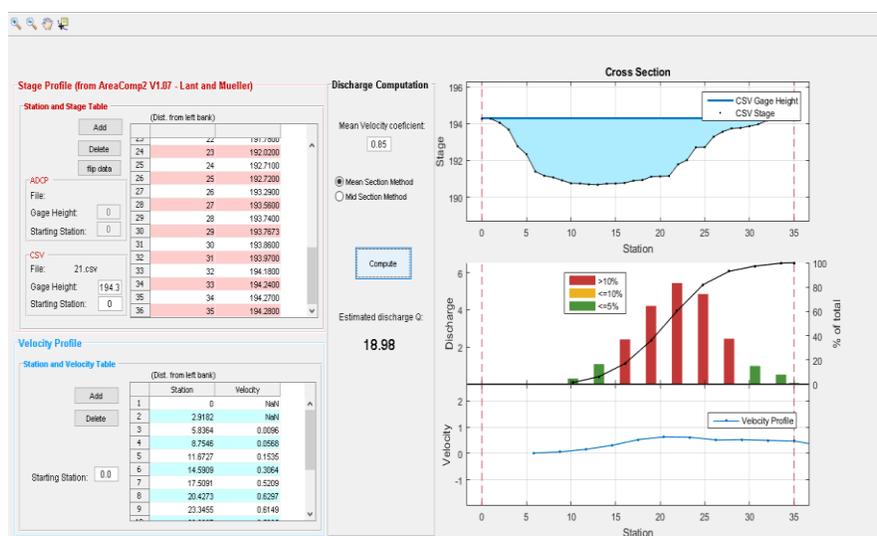
(Creutin, Muste, Bradley, Kim, & Kruger, 2003) se tomó como 0.85 determinado a partir de experimentos realizados en laboratorio. Sin embargo, este valor sigue siendo un tema de discusión, ya que es sensible a los efectos secundarios, como la rugosidad del lecho, la relación de aspecto del canal y el nivel de turbulencia. Después de encontrar la velocidad promediada en la vertical se determinó el caudal, el cual fue de $18.98 \text{ m}^3/\text{s}$ que es muy cercano al caudal medido en campo de $18 \text{ m}^3/\text{s}$ (el error relativo de 5.44 %) como se muestra en la figura 44. Esta sección será utilizada también más adelante para realizar la comparación entre el modelo hidrodinámico 1D, modelo hidrodinámico 2D y RIVeR.

Figura 43. Sección Transversal



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 44. Caudal y Velocidades en Sección Moya de Jorge con RIVeR



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

5.2.1 Conclusiones velocimetría de imágenes de partículas (VIP)

La técnica de VIP es una buena aproximación de las velocidades promedio superficiales de una zona de estudio utilizando la captura de videos en un lapso corto, ya sea con una cámara de celular, profesional o con un video de un dron. En nuestro caso, la técnica fue implementada como un proceso de validación de los resultados del modelo hidrodinámico bidimensional analizando la dirección y las magnitudes de los vectores velocidad en los accidentes hidráulicos (Rápidos y Moya). Obtuvimos bastante similitud entre los campos de velocidades obtenidos a partir de VIP y los de la modelación hidrodinámica.

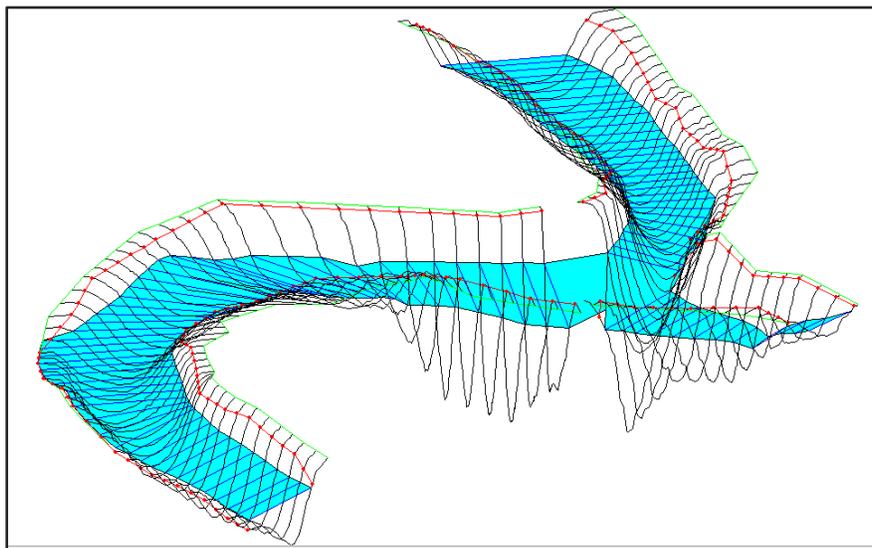
5.3 Resultados Modelos Hidrodinámicos

5.3.1 Modelo unidimensional

Para analizar los resultados del modelo en 1D a partir de una caracterización cualitativa realizada de la imagen completa del dominio (figura 45) se observó que debido a las características de la zona (Río de Alta Montaña) es muy poco probable que se presente una inundación o afectación parecida a las comunidades riverseñas, ya que todo fenómeno hidrológico de creciente en el Río

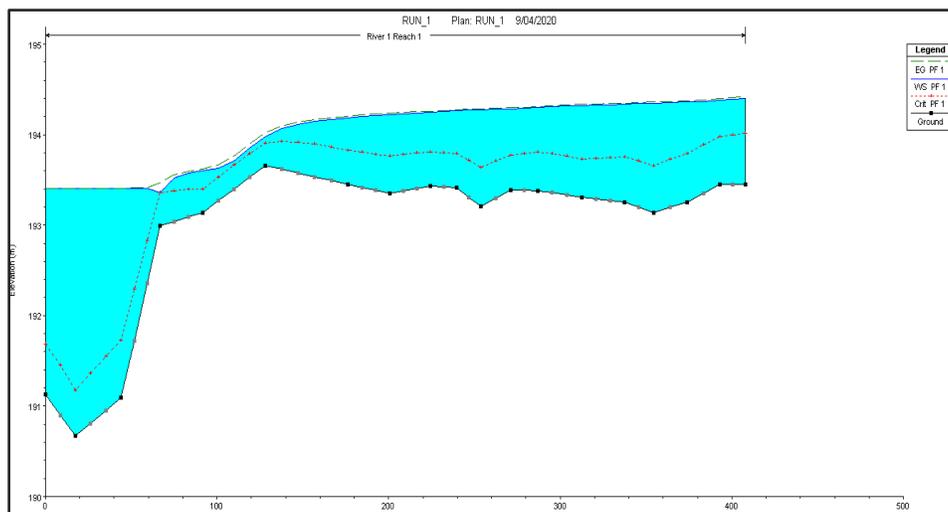
La Miel es absorbido por el embalse presente en la hidroeléctrica y al modelar su caudal promedio aguas abajo se puede describir la zona de estudio como un “laboratorio a escala real”.

Figura 45. Valores de Manning para el Modelo 1D



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 46. Perfil Reach 1

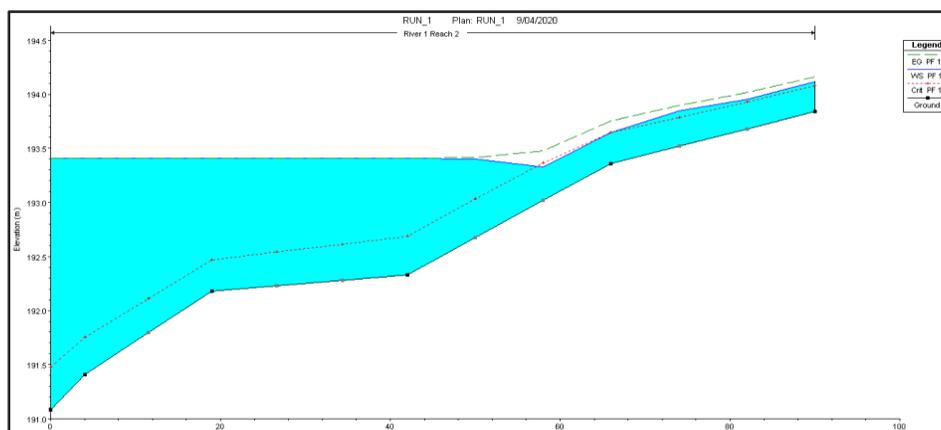


Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la sección del brazo izquierdo (figura 46), se puede observar que en la zona del remanso la profundidad hasta la sección 15 es en promedio de 1m, posteriormente se encuentra con el

fenómeno de los rápidos que tiene una profundidad de 0.5 metros y un nivel de 193.5 m.s.n.m. Se Presentan cambios abruptos en las profundidades debidas a la geometría en las secciones 1, 2 y 3. Aguas abajo la lámina aumenta en más de 3 metros, luego del paso del rápido a la Moya de Jorge.

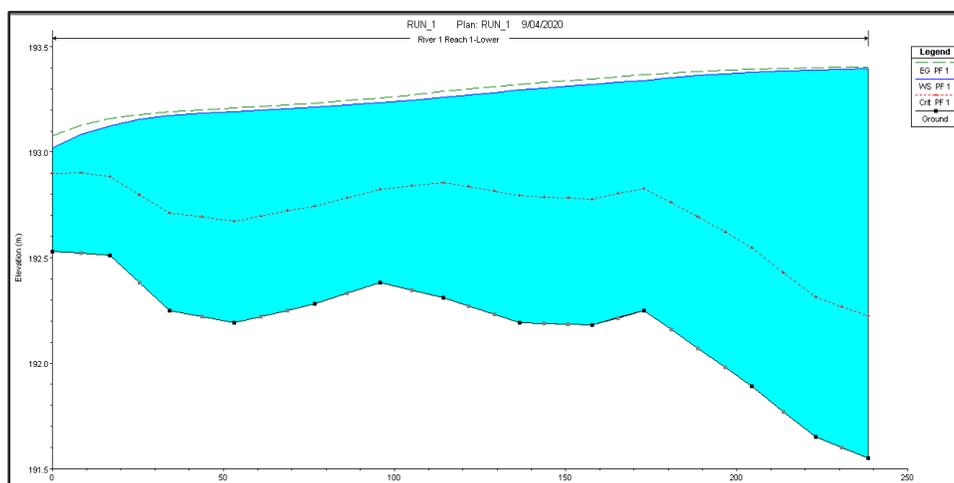
Figura 47. Perfil Reach 2



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En cuanto a la sección del brazo derecho (figura 47), se puede observar que la lámina de agua va desde una profundidad de aproximadamente 0.5 m en un nivel de 194 m.s.n.m a una lámina de más de 4 m de profundidad en la entrada de la moya, también se observa un pequeño paso de régimen subcrítico a supercrítico entre la sección 4 y 5 que es debido al cambio de pendiente.

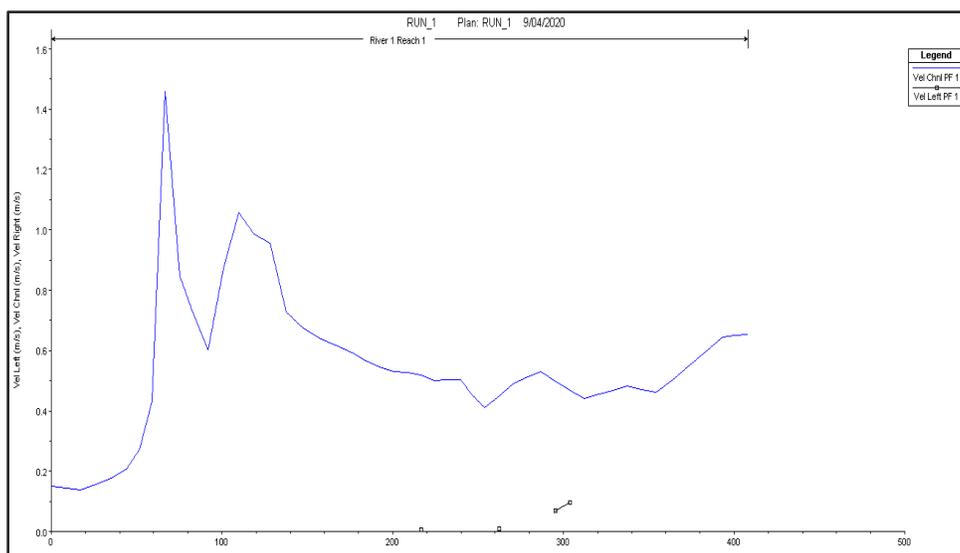
Figura 48. Perfil Reach 1-Lower



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En el punto donde convergen el brazo izquierdo y el brazo derecho (figura 48), se puede observar que después de pasar por La Moya de Jorge primero presenta una lámina de agua de 1.8 metros que gradualmente disminuye a la condición de borde aguas debajo de 48 cm. La pendiente es adversa, formándose un remanso.

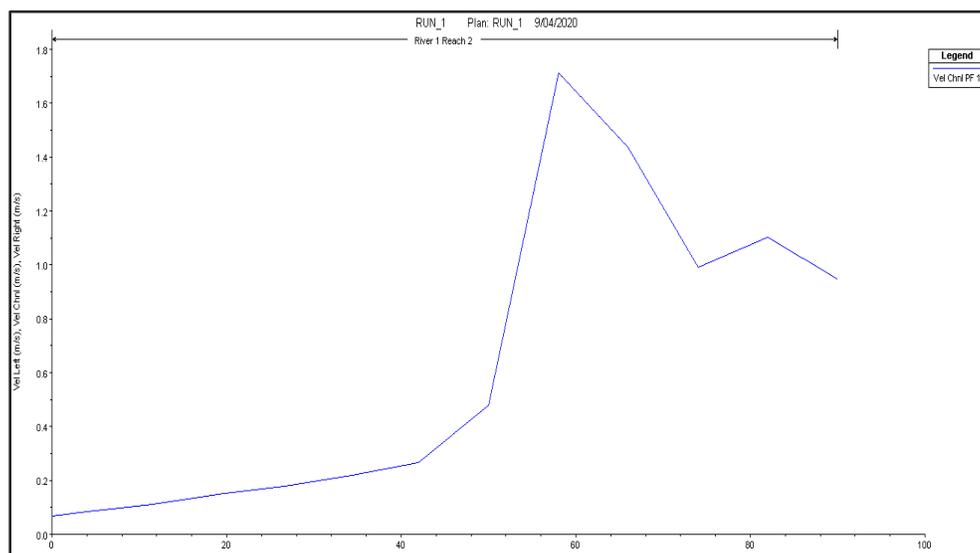
Figura 49. Perfil de velocidad Reach 1



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la sección Reach 1 (figura 49) se puede observar las variaciones en la velocidad en el brazo izquierdo del río. Comienza con una velocidad de 0.7 m/s, aumenta a una velocidad de 1.1 m/s, vuelve a disminuir a 0,6 a través del remanso, para llegar al rápido donde su velocidad es de 1.49 m/s y baja a menos de 0.1 m/s la Moya.

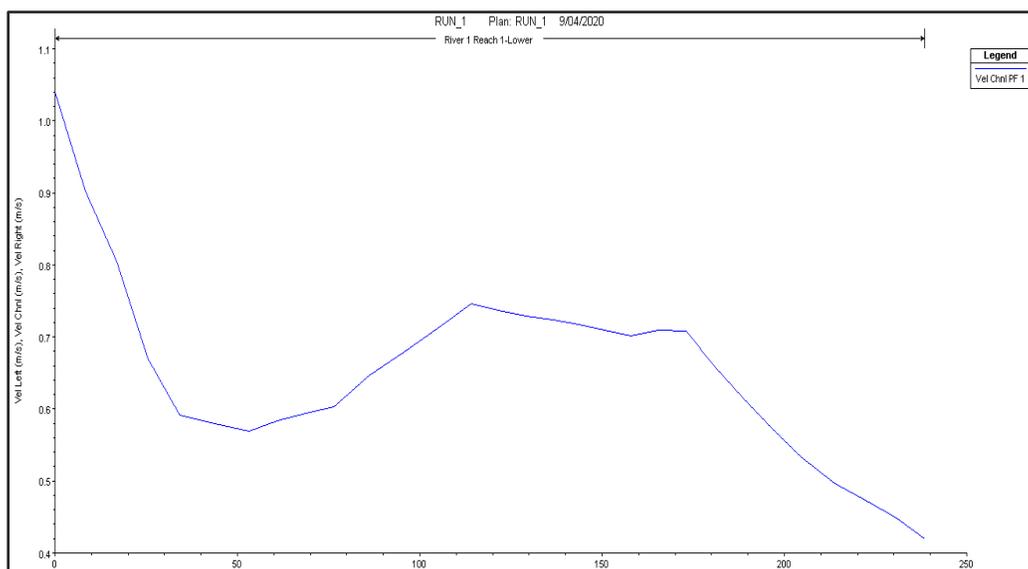
Figura 50. Perfil de velocidad Reach 2



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la sección Reach 2 (figura 50) se puede observar las variaciones en la velocidad generadas en el brazo derecho del río, donde comienza con una velocidad de 1.1 m/s aumenta a una velocidad de 1.7 m/s debido a que en la sección 5 se presenta un desnivel bastante grande que acelera el flujo y al final baja a menos de 0.1 m/s en la entrada a la Moya.

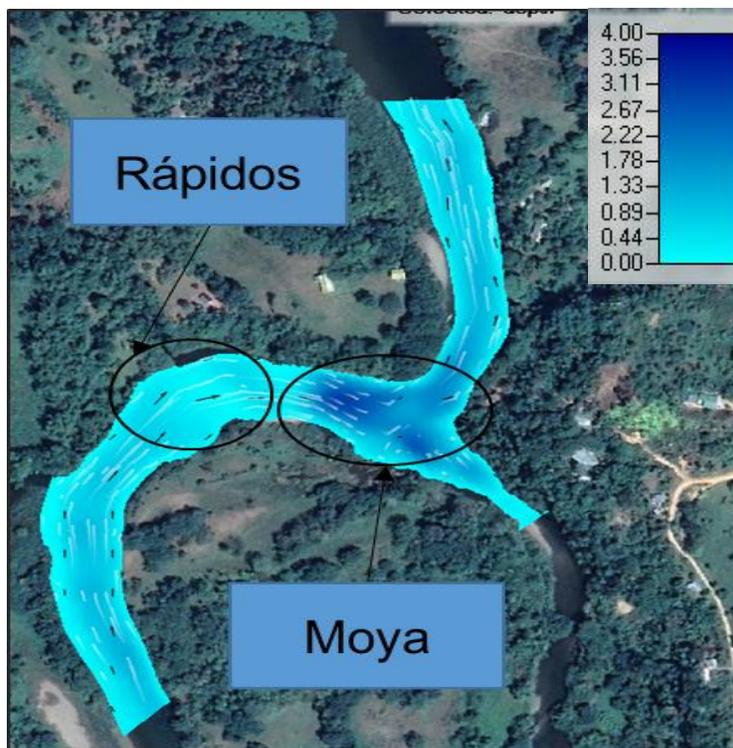
Figura 51. Perfil de velocidad Reach 1- Lower



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la sección Reach 1-Lower (figura 51) se puede observar que la menor velocidad se presenta a la salida de la Moya con valores de 0.41 m/s y que al seguir aguas abajo del cauce tiende a aumentar su velocidad, llegando a un valor final de 1.04 m/s.

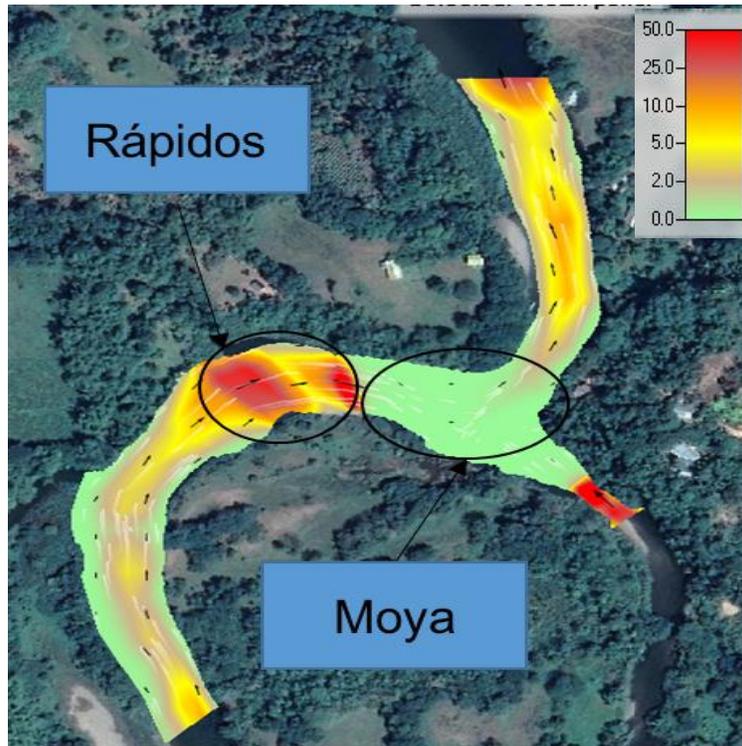
Figura 52. Profundidades Modelo 1D



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la figura 52 se puede apreciar un primer acercamiento de las profundidades de la lámina de agua para el modelo unidimensional, a través de toda la zona de estudio. El azul claro indica las profundidades más bajas, que se presentan en los rápidos, que no sobrepasan los 0.4 m y el azul oscuro muestra las profundidades máximas que sobrepasan los 3 m.

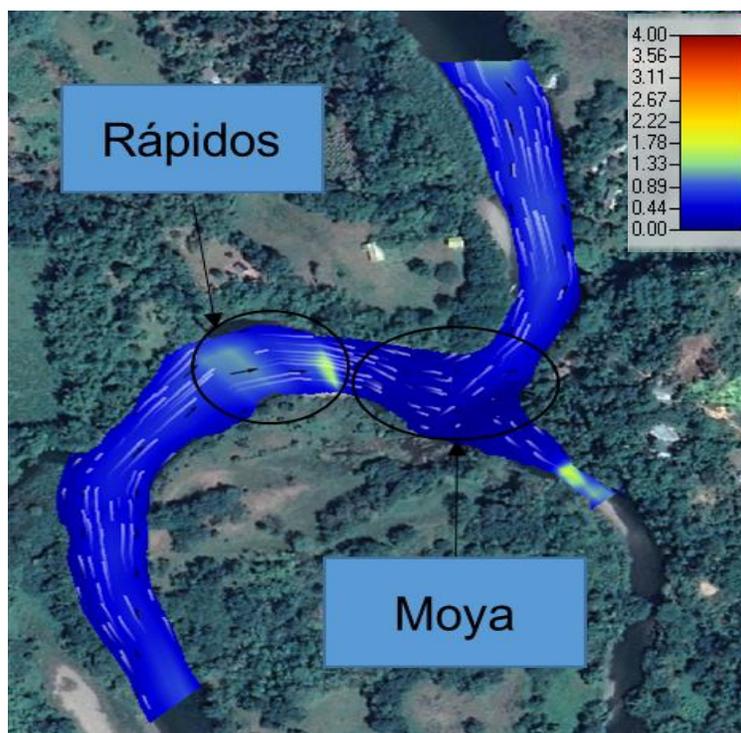
Figura 53. Esfuerzos Cortantes Modelo 1D



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Para los esfuerzos cortantes (figura 53) se puede observar que los mayores se presentan en los rápidos debido a la velocidad del flujo y alcanzan a tomar valores de $50 N/m^2$ pero no tiene ninguna afectación directa al lecho, ni presenta fenómenos de arrastre ya que su composición es completamente rocosa. Los valores mínimos de casi $0 N/m^2$ se presentan en Moya pues en este punto la velocidad es muy baja.

Figura 54. Velocidades Modelo 1D



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la figura 54 para el modelo unidimensional, se puede apreciar que en de toda la zona de estudio las mayores velocidades se presentan en una pequeña parte de la entrada derecha y principalmente en los rápidos, siendo velocidades que alcanzan los 1.49 m/s. Se observa una pequeña aceleración al final del dominio computacional la cual puede ser debida a la influencia de la condición de frontera. Las velocidades bajas se presentan en la zona de la moya de 0.1 que son debido a la gran profundidad como se ha venido mencionando anteriormente.

5.3.1.1 Conclusiones del modelo unidimensional

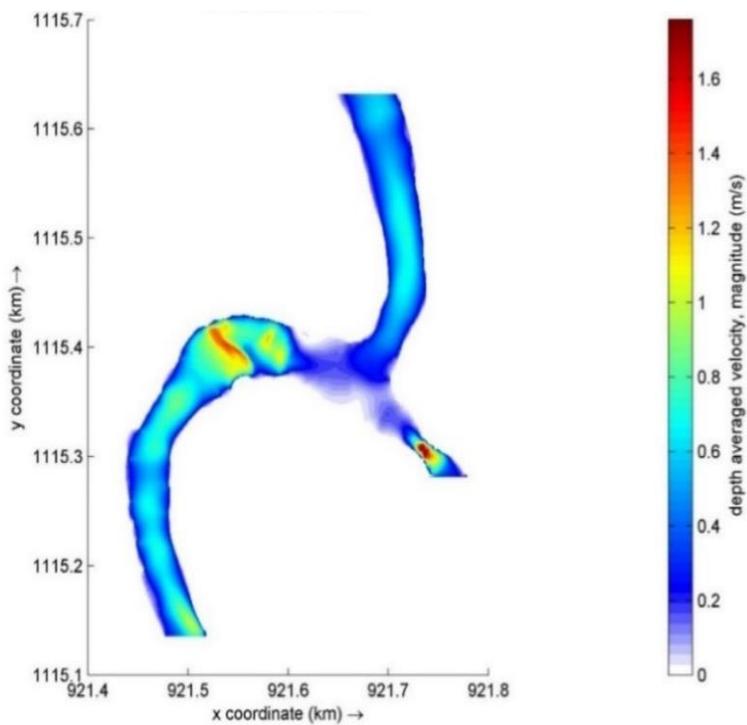
El modelo hidrodinámico en 1D puede representar de una manera general las condiciones del cauce y sirve para realizar una caracterización de la zona, presentando valores aproximados, pero no permite representar en detalle la información que se desea obtener de los cambios geométricos presentes en el río La Miel.

En las secciones de los rápidos el modelo hidrodinámico en 1D sobre estima los valores de velocidad y profundidad del cauce y en La Moya de Jorge, el modelo hidrodinámico en 1D subestima los valores de velocidad y profundidad, con desfases no muy grandes, pero si considerables para un análisis de la complejidad geométrica en ríos con características de alta montaña como La Miel.

5.3.2 Resultados modelo hidrodinámico 2D

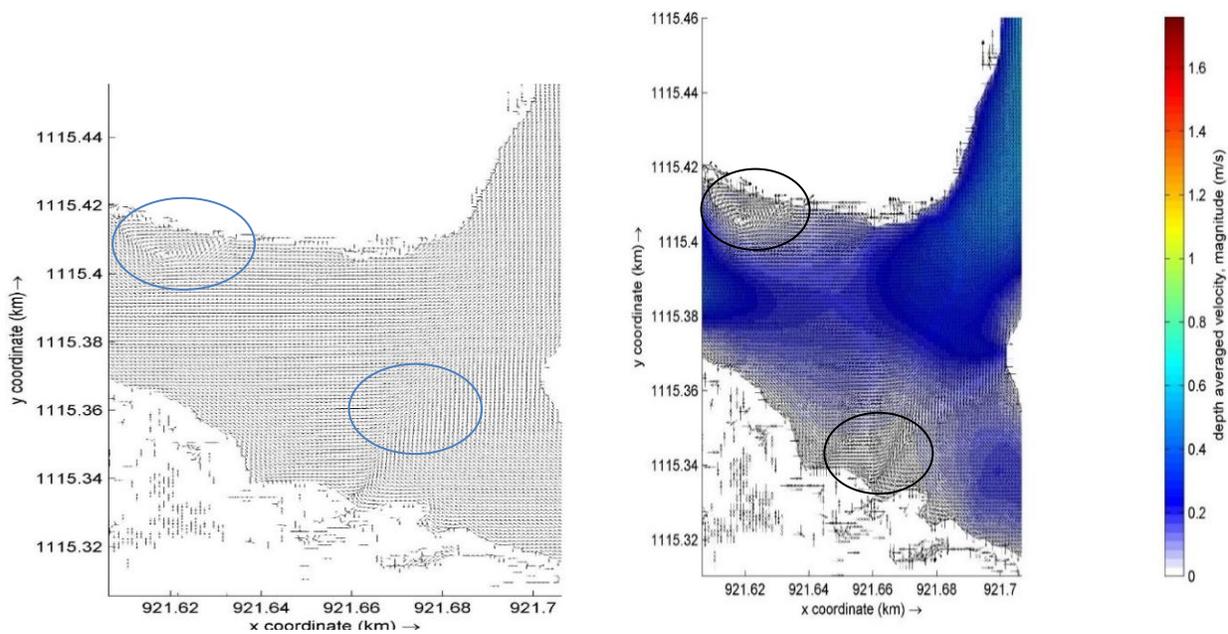
En la figura 55 se pueden observar los resultados de las velocidades del modelo hidrodinámico 2D, donde puede ver las velocidades máximas de 1.6 m/s en el área del rápido. Hay también secciones con velocidades muy bajas. Y las velocidades mínimas se presentan en La Moya de Jorge de 0.01 m/s a 0.2 m/s . El transporte de las partículas con este campo de velocidad, se acelera en los rápidos y se desacelera en la moya, donde posiblemente se generarán fenómenos de recirculación y luego seguirán la trayectoria aguas abajo.

Figura 55. Magnitud de la Velocidad promediada en la vertical



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

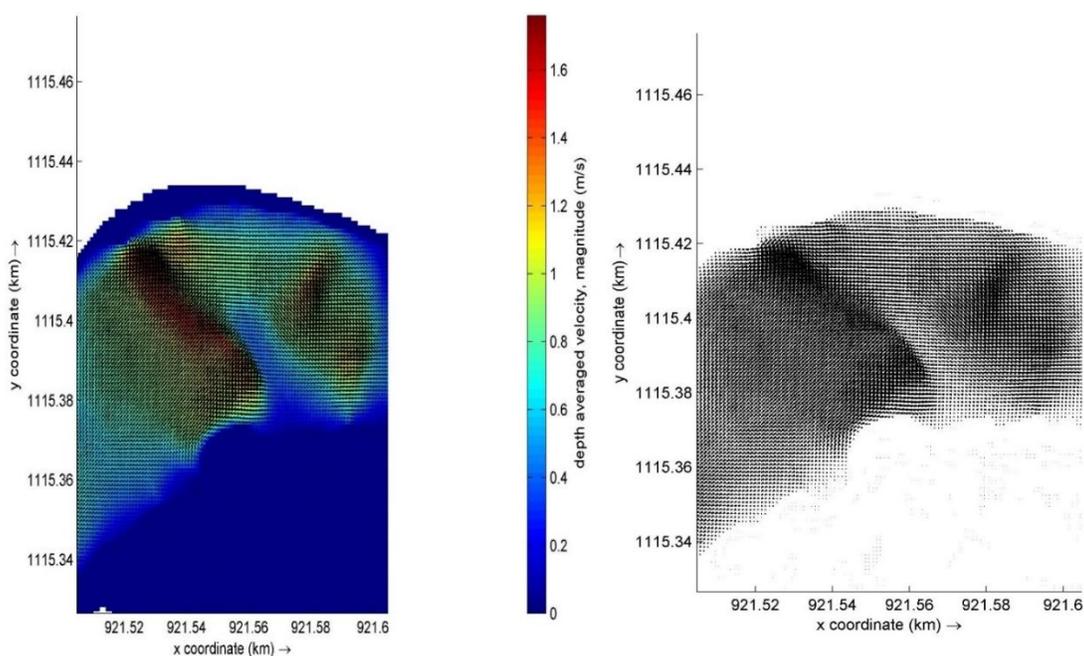
Figura 56. Velocidad promediada en la vertical en detalle Moya de Jorge



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la figura 56 las magnitudes de las velocidades y los vectores de velocidad se muestran en detalle en la parte que se refiere a La Moya de Jorge. Se denota la influencia de la confluencia de los dos brazos del río en los cambios de las direcciones de velocidad y la modificación de los patrones. También, en los puntos resaltados en azul y negro, los vectores muestran a un nivel bueno de detalle, los fenómenos de recirculación presentes en la Moya. Debido a la gran profundidad en las dos pequeñas moyas las magnitudes de la velocidad son bajas con un promedio de 0.168 m/s .

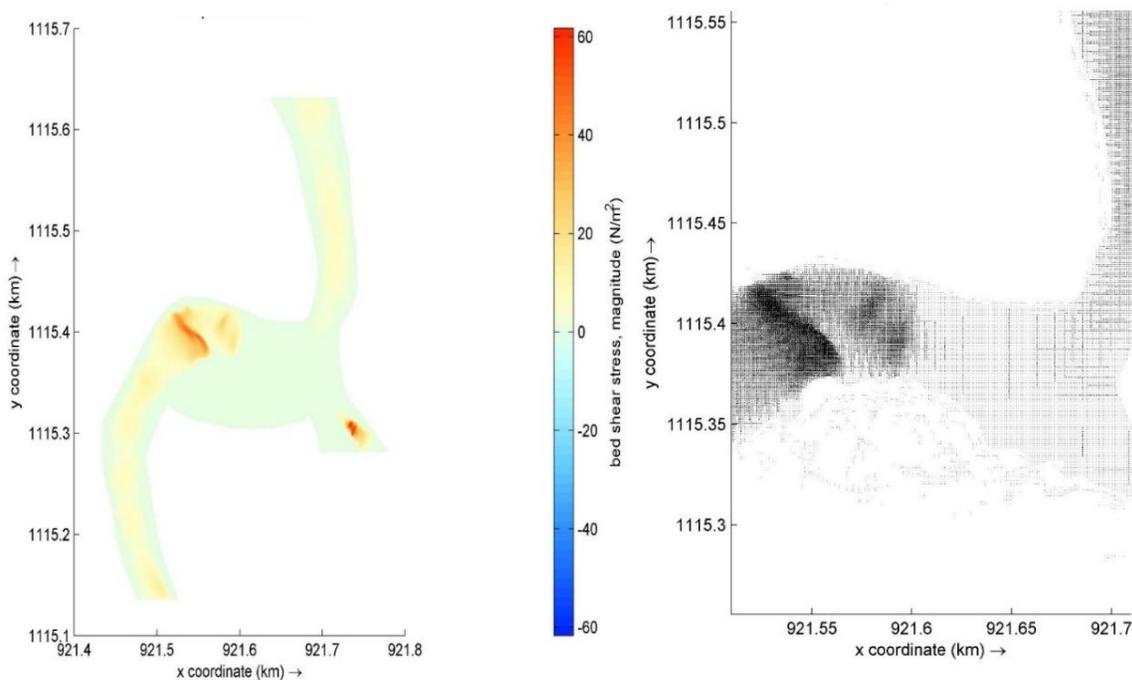
Figura 57. Velocidad promediada en la vertical en detalle Rápidos



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la figura 57 se muestran en detalle las magnitudes de las velocidades y los vectores de velocidad en los rápidos, donde se puede observar la aceleración del flujo cómo se ha venido comentando que debido a la geometría del lecho del río., Las velocidades son altas alcanzando 1.6 m/s en la una dirección de la moya de Jorge.

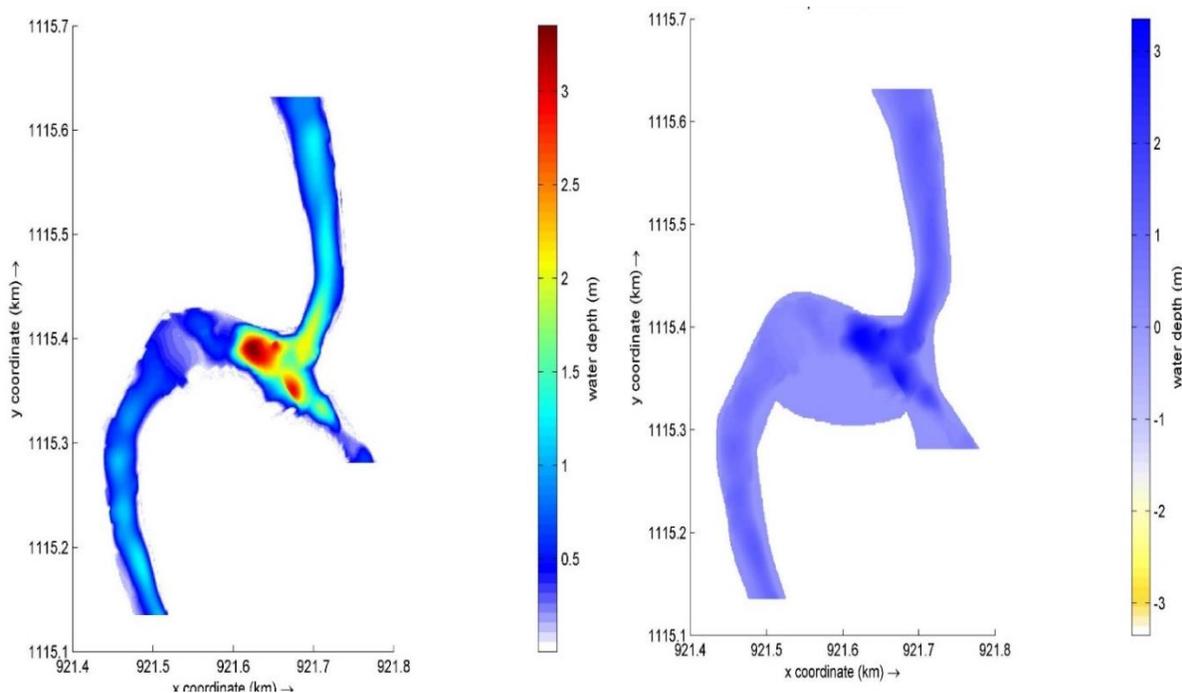
Figura 58. Esfuerzos cortantes La Moya de Jorge



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Se puede observar que los mayores esfuerzos cortantes (figura 58) en el modelo bidimensional se presentan en la parte de los rápidos y alcanzan a tomar valores de $60 \frac{N}{m^2}$. Comparando con el modelo 1D hay una diferencia de $10 \frac{N}{m^2}$, pero igualmente no tiene afectación directa al lecho, ni presenta fenómenos de arrastre ya que su composición es completamente rocosa. Los valores mínimos de $0.001 \frac{N}{m^2}$ se presentan en la Moya pues en este punto los cambios de velocidad son los más bajos.

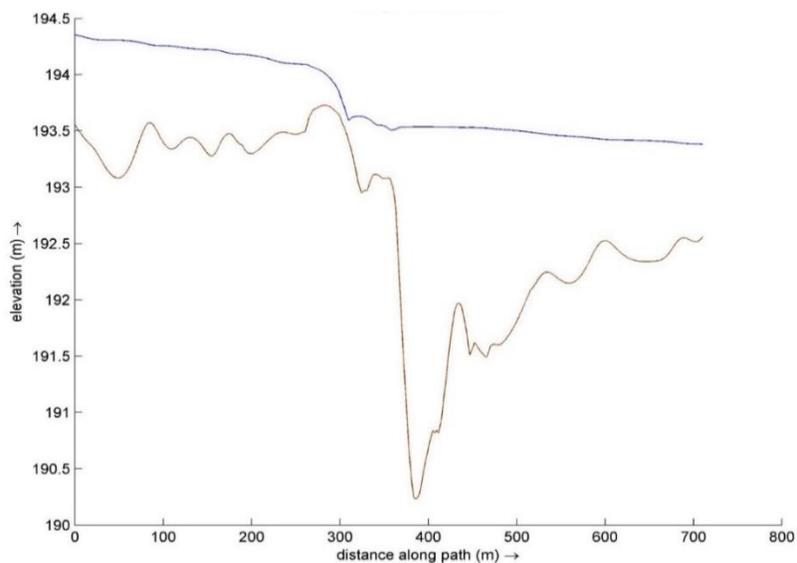
Figura 59. Profundidades modelo hidrodinámico 2D



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la figura 59 se puede observar la profundidad de la lámina de agua, donde En el área de los rápidos profundidades son mínimas del orden de 20 cm. Se encuentra una pequeña zona seca al lado derecho que se veía en las salidas de campo. Las profundidades en el área de la moya pueden alcanzar de más de 3.2 m. También es posible detallar que hay dos cambios profundidades máximas o lo que se podría llamar dos moyas, una se encuentra en el lado izquierdo desde donde se descargan los rápidos y otra más pequeña en la sección de la descarga del brazo derecho. Posteriormente, el flujo continúa con una profundidad promedio de 1.3 m.

Figura 60. Perfil del lecho y profundidades a través de todo el dominio computacional



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la figura 60 se muestra el perfil longitudinal desde aguas arriba a través del brazo izquierdo, pasando por los rápidos, La Moya de Jorge y aguas se mantiene hasta la condición de frontera. Al Comparar el lecho del río con el nivel del agua, se puede observar la influencia de la geometría compleja en la profundidad de la lámina de agua. También se logra observar como el modelo hidrodinámico bidimensional logra representar muy bien los cambios en la profundidad del agua a través de todo el dominio computacional observados en la realidad y analizados en campo.

5.3.2.1 Conclusiones modelo hidrodinámico 2D

La importancia de una información de calidad para la generación de modelos hidrodinámicos bidimensionales en detalle y para conocer fenómenos hidráulicos complejos se ve reflejado en los resultados del modelo hidrodinámico de La Moya de Jorge. En efecto, debido a que se tenía una topobatimetría detallada y se trabajaron con condiciones validadas en campo, se pudieron capturar

los resultados velocidades promedio de 1.6 m/s en los rápidos y de 0.171 m/s en las mojas. Estos valores fueron validados con los datos del ADCP obteniéndose un error relativo de 0.0155204.

Se pudo determinar que las mallas estructuradas tienen un mejor resultado que las no estructuradas en Delft 3D. El uso de mallas estructuradas es complejo en sistemas meandriformes y con configuraciones irregulares y pueden generar una menor representación de la realidad. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el costo computacional es menor, coincidiendo con lo expresado por (Langendoen et al., 2016; Parsapour-Moghaddam, Rennie, & Slaney, 2018). El modelo hidrodinámico bidimensional representa bien las variaciones de velocidad en la Moya, pero para un mayor nivel de detalle y comprender como se generan estos fenómenos, es necesario utilizar un modelo en tres dimensiones, ya que la distribución de velocidades en la dirección vertical es fundamental.

5.3.3 Calibración del Modelo Hidrodinámico Bidimensionales

A continuación, se presenta una descripción de técnicas implementadas en diferentes investigaciones y se presentan dos técnicas realizadas en esta investigación.

5.3.3.1 Técnicas de Calibración en Modelos Hidrodinámicos Bidimensionales

El procedimiento típico para calibrar un modelo hidrodinámico 2D bajo la condición de estado estacionario implica modificar los parámetros del modelo principalmente el n de Manning o el valor de la viscosidad de remolino (Eddy Viscosity) hasta que los resultados de niveles y velocidades del modelo coincidan estrechamente con las observaciones de campo. La calibración más simple para todos los estudios de modelado hidrodinámico es igualar la profundidad de flujo en el límite aguas arriba. A menudo se realiza una calibración adicional comparando la profundidad y la velocidad del flujo medidas en ubicaciones discretas y el patrón de flujo general.

(Giardino, Ibrahim, Adam, Toorman, & Monbaliu, 2009) calibraron un modelo hidrodinámico realizado en TELEMAC para el estuario IJzer en Bélgica, utilizando mediciones de velocidad promediadas en profundidad con ADCP comprendidas entre el 22 de agosto y el 5 de septiembre de 2005, durante un ciclo de mareas en la salida del estuario. Ensayaron diferentes valores del coeficiente de fricción y concluyeron que la influencia del factor de fricción del fondo en la hidrodinámica es insignificante. Se seleccionó un valor final para el coeficiente de Chézy igual a $65 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$. Se obtuvo un valor para el error de medición del ADCP, igual a 5 cm/s con un error relativo medio absoluto (ERMA) a la salida del canal de 0.35.

En el trabajo realizado por (Symonds et al., 2016) se calibraron 3 modelos desarrollados en Delft3D, Delft 3D FM y Mike 13 a partir de los datos de caudal obtenidos mediante dos dispositivos de perfilador de corriente Doppler acústico (ADCP) y datos medidos del nivel del agua de la bahía de Western Port en Australia. Se realizó un análisis armónico de los datos medidos, donde los niveles de agua medidos se comparan en un punto de medición con los tres modelos. Las diferencias en los niveles de agua altos y bajos fueron inferiores al 4% de la gama de mareas para todos los modelos, siendo las diferencias más pequeñas para el modelo Delft3D (menos del 2%).

(Papanicolaou, Elhakeem, & Wardman, 2010) utilizaron los datos de velocidad de la región de vertedero del núcleo principal y de las curvas del lugar de estudio usando LSPIV para la calibración de un modelo hidrodinámico 2D que simula el flujo alrededor de estructuras de presas de autopista emergentes. Los datos de LSPIV se filtraron usando un filtro iterativo, para determinar el coeficiente de correlación mínimo óptimo. Se determinó que el valor de correlación del coeficiente de 0,4 proporciona un tamaño de muestra adecuado, mientras que se eliminan los datos de mala calidad. La velocidad promediada en la profundidad utilizada para la calibración del modelo se

estimó como el 85% de la velocidad de la superficie obtenida de la Mediciones del LSPIV, Se compararon los valores estimados de velocidad media de profundidad del LSPIV con los perfiles de velocidad integrados en la profundidad, obtenidos de medidas detalladas Medidas de ADV., Las desviaciones de los valores de LSPIV del ADV fueron inferiores al 10%, lo que indica que el procedimiento LSPIV se llevó a cabo correctamente. Las predicciones del modelo fueron analizadas para un valor promediado del n de Manning de 0.055 y de viscosidad de Eddy de $0.06 \text{ m}^2/\text{s}$ sobre todo el dominio computacional y dos valores de Manning's n y Eddy's distribuidos. En la comparación de las profundidades los resultados obtenidos tuvieron un error cuadrático medio para la forma promediada de: 0.0227 y para la forma distribuida de: 0.0220. En la comparación de los resultados de velocidad el errores cuadrático medio para el valor promedio fue de: 0.2411 y para los valores distribuidas fue de: 0.1402.

(Jung et al., 2012) aplicaron al sistema central de llanuras de inundación de la cuenca de Atchafalaya, Louisiana el modelo hidrodinámico LISFLOOD-ACC, durante altos flujos típicos de las inundaciones de primavera en la región del Delta del Mississippi, con el propósito de demostrar la utilidad de los radares de apertura sintética interferométrica (InSAR) en la calibración del modelo de llanura inundable en 2D. Se compararon los esquemas de calibración de la rugosidad de Manning en canales y llanuras de inundación. En primer lugar, calibraron el modelo en términos de elevaciones de agua en un solo medidor de flujo in situ durante un periodo de 62 días desde el 1° de abril de 2008 al 1° de junio de 2008. En segundo lugar, calibraron el modelo en términos de los cambios de elevación del agua calculados a partir de las imágenes en 2D de ALOS PALSAR del 16 abril de 2008 al 1 de junio de 2009, con un intervalo de 46 días. El mejor ajuste muestra que la media del error absoluto es de 5,7 cm / 46 días para la calibración del nivel de agua de InSAR.

(Pestana et al., 2014) utilizaron el modelo Tuflow para realizar la calibración de un modelo hidrodinámico bidimensional en la llanura de inundación de la región del Bajo Río Tajo utilizando mapas de la extensión de las inundaciones, derivados del ERS-SAR y las imágenes de ENVISAT-ASAR, que proporcionan datos distribuidos para la calibración de los modelos. Los mapas de extensión de la inundación obtenidos para cada simulación se compararon con los mapas de extensión de inundaciones derivados de las imágenes del SAR y los coeficientes de rugosidad fueron utilizados para el ajuste. Las diferentes medidas de la similitud entre las extensiones de inundación simuladas e imaginadas (exactitud general, coeficiente kappa y omisión y errores de comisión) se derivaron de las matrices de confusión usando el software ENVI. Los modelos fueron también calibrados en términos de la etapa en la estación de medición Almourol, situada a 12 km río abajo de Tramagal, con un porcentaje de omisión de 16.46%.

(Cea & French, 2012) analizaron la sensibilidad relativa y la incertidumbre de la salida de un modelo bidimensional con respecto a la batimetría y la fricción del lecho. Para la calibración implementaron métodos de Monte Carlo, y presentan un nuevo modelo de error generalizado que permite tratar varias fuentes de error en la batimetría. Los resultados numéricos se comparan con series temporales de velocidad de flujo y nivel de agua observadas en múltiples lugares. Las simulaciones de Monte Carlo se utilizaron para estudiar la sensibilidad global de la salida del modelo con respecto a los parámetros de entrada. Generaron 250 corridas aleatorias en conjuntos de 8 parámetros de entrada cada uno utilizando Latin Hypercube Sampling (Iman, Helton, & Campbell, 1981). Para cada escenario batimétrico y de fricción, simularon el flujo de mareas en el estuario para un período de 9 días y obtuvieron resultados de nivel de agua y velocidad de las series temporales para las 5 estaciones de medición. Demostrando que la calibración que incorpora

la incertidumbre batimétrica puede ser significativamente más eficiente que una calibración clásica basada únicamente en el ajuste de un coeficiente de fricción del lecho.

(Palacio, García, & Garcia, 2010) realizaron en Colombia la calibración de un modelo hidrodinámico 2D para la bahía de Cartagena utilizando una metodología de ensayo error comparando los datos horarios de niveles de agua observados y los arrojados por la modelación en RMA2, donde modificaron los parámetros físicos de número de Manning y viscosidad de Eddy hasta llegar un RMS (error de la raíz media cuadrática) cercano al 5% del valor de la amplitud de la marea. La simulación se realizó en un lapso que comprendió tres periodos de marea alta, entre el 2 y el 5 de enero de 2000. La información de elevación de marea, que se comparó con los resultados del modelo, fue obtenida del Centro para el Estudio del Nivel del Mar de la Universidad de Hawái.

5.3.3.2 Resultados Calibración del Modelo Hidrodinámico de La Moya de Jorge

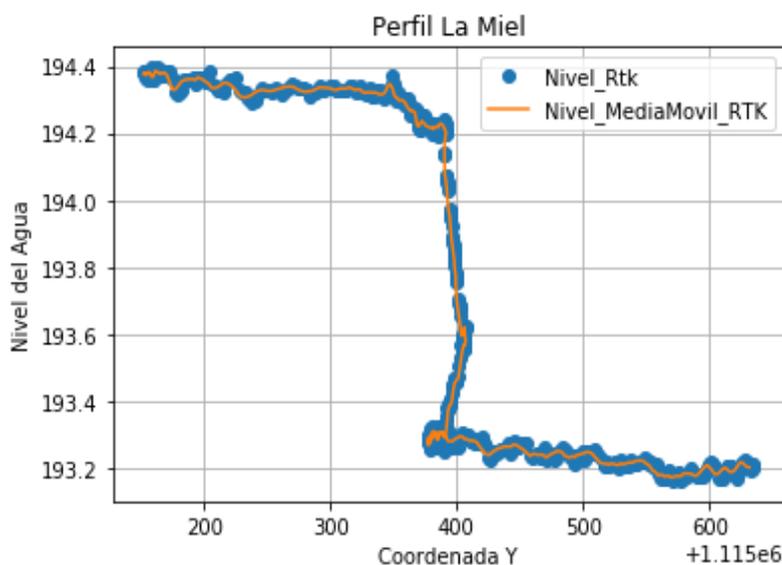
Para el proceso de calibración del modelo hidrodinámico 2D se implementaron dos metodologías. La primera utilizando el perfil hidráulico de la zona de estudio obtenido a partir de las mediciones con el RTK (figura 61) suavizado por medio de la media móvil con el fin de disminuir el ruido generado por el movimiento de la lancha con la que se tomaba la información en el cauce. La segunda, utilizando la velocidad promedio de 0.171 m/s tomada por el ADCP en la Moya de Jorge. En el anexo 2 se encuentran los scripts de en Python.

Se seleccionó como parámetro de ajuste los n de Manning, a partir de distintas configuraciones generadas con mapas (figura 62) a través del dominio computacional que se dividieron en cuatro zonas, un n para la zona del remanso, otro n para la zona del rápido, otro n para la zona de la moya y un n para la zona de aguas abajo. Estas cuatro zonas se seleccionaron debido a que, en los rápidos,

el remanso y la zona aguas abajo, el lecho se compone de piedras rugosas de mayor tamaño, que generan la mayor resistencia al flujo y donde se presentan los números de Manning más altos; en la zona de la moya la cual se compone de piedras rugosas de menor tamaño se presenta el número de Manning más bajo.

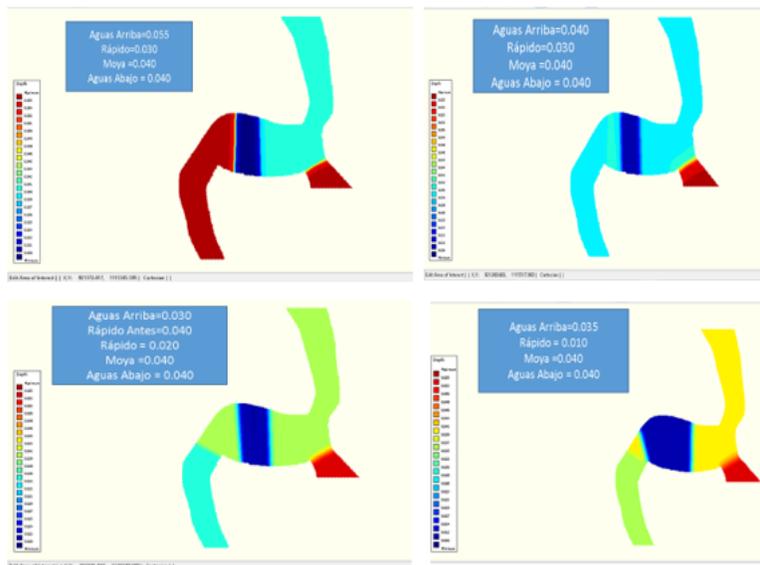
En la comparación entre los resultados de nivel del agua del modelo hidrodinámico bidimensional y los valores tomados por el RTK, se tuvo en cuenta que los valores del RTK y los de los modelos no se encuentran exactamente en las coordenadas debido a las fluctuaciones generadas por el movimiento de la lancha como se mencionó anteriormente. Adicionalmente, en el modelo no se puede seguir exactamente el mismo perfil como se muestra en la figura 63. Se realizaron diferentes configuraciones de números de Manning tomando valores entre 0.01 y 0.09 para las cuatro zonas especificadas La mejor configuración obtenida fue de 0.042 para zona del remanso, 0.042 parte la zona del rápido, 0.040 parte la zona de la moya y un 0.042 para la zona de aguas abajo.

Figura 61. Perfil hidráulico zona de estudio con RTK ajuste con media móvil



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 62. Configuraciones de n de Manning



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 63. Ubicación puntos RTK y puntos Modelo hidrodinámico 2D



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la figura 64 se comparan los resultados de nivel de agua del modelo numérico con los valores del RTK. Se observa que en la parte del remanso el comportamiento del modelo es bueno debido a que la geometría no presenta cambios muy bruscos, pero al momento del paso por los rápidos y el tránsito hacia la moya el modelo pierde eficiencia debido a que por el cambio geométrico se

genera un resalto hidráulico, pasando el flujo de un régimen supercrítico a uno subcrítico., La velocidad del flujo cambia de 1.6 m/s a 0.17 m/s y se genera un estado de gran turbulencia y una fuerte disipación de la energía. La diferencia de nivel fue de 0.228 m con un error relativo porcentual entre los perfiles hidráulicos de 0.12% (figura 65) entre el RTK y el modelo hidrodinámico, siendo un valor considerable pero admisible considerando las limitaciones de los modelos hidrodinámicos puesto que se asume que las velocidades horizontales son mucho más grandes que las velocidades verticales.

En la figura 66 se puede observar la correlación entre el nivel de agua en el perfil medido por el RTK y el nivel de agua en el perfil resultado de la modelación. Se presenta un coeficiente de determinación de 0.9955 el cual nos indica que los resultados de la modelación y los valores tomados por el RTK tienen un buen ajuste. También se calculó el error cuadrático medio (ECM) y la raíz del error cuadrático medio (RECM) descritas por las ecuaciones 15 y 16. En la Tabla 8 se resume los valores de la ECM y la RECM para el perfil hidráulico de La Moya de Jorge, con resultados de $ECM=0.01373$ y $RECM = 0.11718$ lo que indica que los resultados de nivel del modelo y los niveles tomados en campo del RTK son cercanos.

En la figura 67 se presenta el resultado promedio de la velocidad en La Moya de Jorge. donde Se observa que durante los 30 primeros minutos el modelo es inestable debido a la condición inicial tomada de inundar todo el dominio. Después de los 30 minutos el modelo logra estabilizarse y se obtiene una velocidad promediada en la vertical de 0.173654 m/s que presenta un error relativo porcentual de 1.55204% con respecto a la velocidad tomada en campo con el ADCP de 0.171 m/s (Anexo 2).

De los métodos anteriores de calibración se puede concluir que los resultados son buenos, pero que no se pudo representar completamente el perfil hidráulico. Se observa que al usar el perfil hidráulico longitudinal se pudo comparar el modelo completamente y donde se observó la variación de 0.228m en la lámina de agua presente en el resalto hidráulico. También se confirma que los n de Manning seleccionados fueron los óptimos para la calibración del modelo hidrodinámico y que el pre y procesamiento de la información topobatimétrica junto con la selección de la información de las condiciones iniciales y de frontera fueron las indicadas.

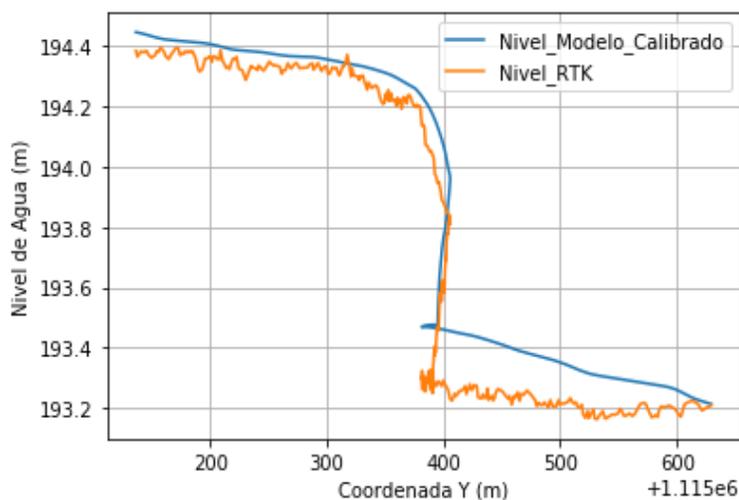
$$ECM = \frac{1}{N} \sum_j^N (M_j - P_j)^2$$

Ecuación 15. Error cuadrático medio

$$RECM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_j^N (M_j - P_j)^2}$$

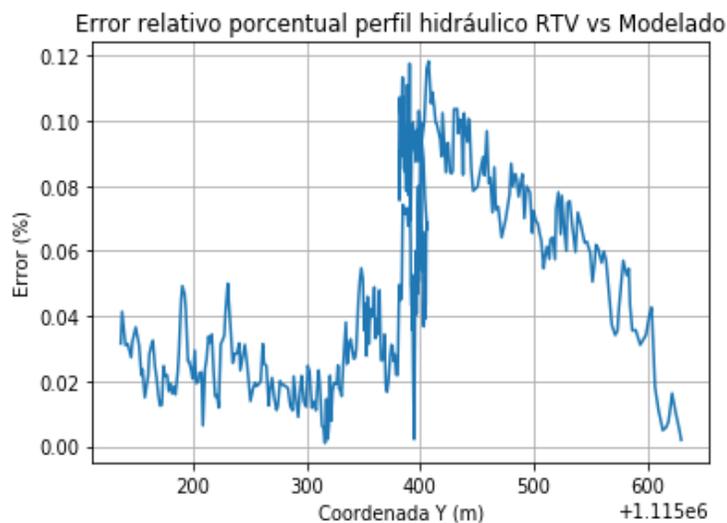
Ecuación 16. Raíz del error cuadrático medio

Figura 64. Comparación entre perfil hidráulico medido con el RTK vs perfil resultado del modelo



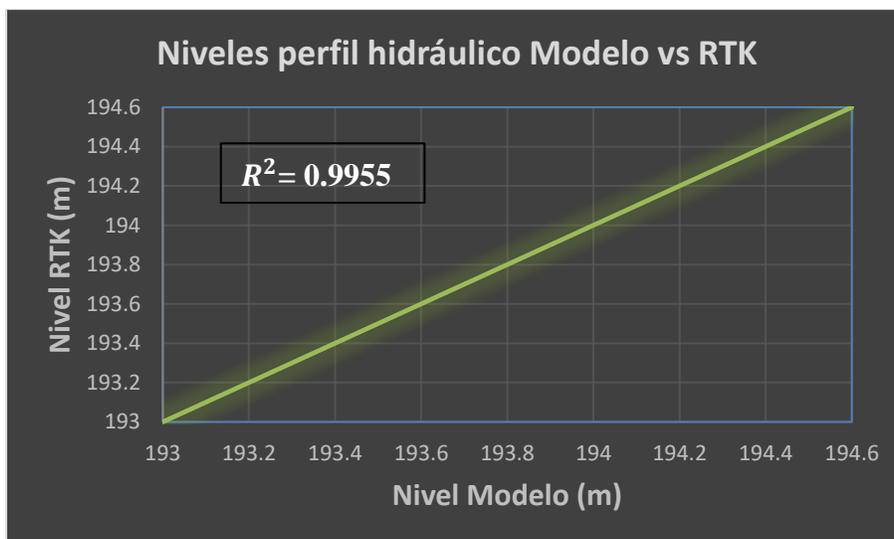
Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 65. Error relativo porcentual perfil hidráulico medido con el RTK contra perfil del resultado del modelo



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 66. Error relativo porcentual perfil hidráulico medido con el RTK contra perfil del resultado del modelo



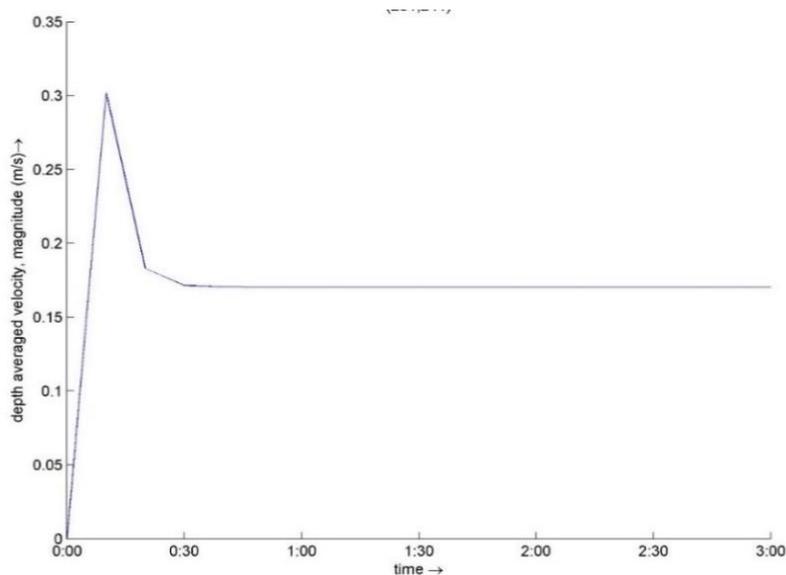
Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Tabla 8. Error cuadrático medio (ECM) y Raíz del error cuadrático medio (RECM) en los perfiles hidráulicos

Criterio de error	Profundidad de flujo (m)
ECM	0.0137324
RECM	0.1171855

Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 67. Velocidad de modelo en el punto de comparación con mediciones ADCP



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

5.3.4 Comparación entre el Modelo Hidrodinámico Unidimensional, Modelo Hidrodinámico Bidimensional y Velocimetría de Imágenes de Partículas

Para realizar la comparación entre el modelo numérico unidimensional Hec-Ras, el modelo numérico bidimensional Delft 3D y la técnica de seguimiento de imágenes de partículas mediante el software RIVeR, se utilizó la sección transversal de La Moya en la zona donde se presentan los fenómenos de recirculación principalmente a la margen izquierda (figura 68). Como variable de comparación se utilizó la velocidad promediada en la vertical., Como la metodología PIV calcula las velocidades superficiales del flujo, se usó el coeficiente de relación con la velocidad promediada en la vertical de 0.85. También se tuvo en cuenta que el modelo unidimensional toma

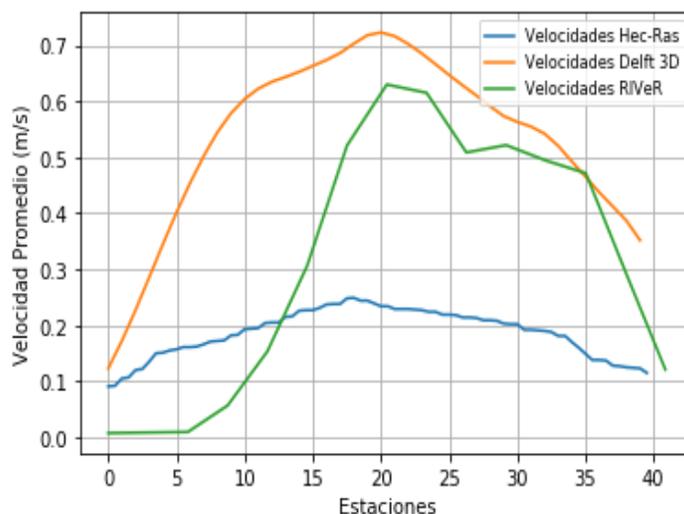
una velocidad promediada en ca la sección transversal. En la parte izquierda de la sección transversal, entre las estaciones 0 y 15, el modelo bidimensional sobreestima las velocidades y el modelo no logra capturar las zonas de recirculación que presentan alta turbulencia y velocidades casi nulas. El modelo en Hec-Ras también sobre estima las velocidades en todos los puntos, debido a las restricciones físicas y matemáticas propias de un modelo en una dimensión donde la velocidad es calculada en función de la profundidad de la lámina de cada estación.

En la parte media de la sección transversal, entre la estación 15 y la estación 25, se presentan las velocidades máximas. El modelo bidimensional continúa sobreestimando las velocidades, pero con una diferencia menor, puesto que en estas estaciones el cauce tiene un comportamiento más uniforme. En cuanto al modelo unidimensional presenta subestimación de la velocidad, con diferencias de hasta $0.4 \frac{m}{s}$, siendo un valor significativo y donde presenta mayor efecto las limitaciones numéricas del modelo.

Para la parte derecha de la sección transversal, entre la estación 25 y 40 se presenta la menor sobre estimación del modelo hidrodinámico bidimensional con un desfase que no supera los 0.1 m/s y en la estación 35 los valores son iguales a los obtenidos en RIVeR. En cuanto al modelo unidimensional continua su tendencia de subestimación hasta el final del modelo.

El valor máximo de velocidad en el modelo bidimensional fue de 0.722649, el valor máximo de velocidad en el modelo unidimensional es de 0.24900 y el valor máximo con la técnica de VIP es de 0.629700. Tomando como comparación los resultados de VIP el error relativo porcentual del modelo unidimensional Hec-Ras es de 70.4621% y del modelo Bidimensional en Delft 3D es de 14.760 %.

Figura 68. Comparación de Velocidades HecRas, Delft 3D y RIVeR



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

5.4 Resultados Modelos de Seguimiento de Partículas

Para la generación de los patrones de transporte de cuerpos flotantes, se aplicó la técnica de seguimiento de partículas mediante el acoplamiento de los resultados del campo de velocidades de la hidrodinámica con el acoplamiento del módulo Part del Delft 3D (acople Euleriano-Lagrangiano), para comparar los resultados se utilizaron los experimentos de campo explicados en el capítulo de metodología que se realizaron en la segunda salida de campo.

5.4.1 Resultados experimentos de campo

Para los resultados del análisis de los experimentos de campo, se tuvo en cuenta el lanzamiento de la totalidad de los 70 globos con una masa de 5 kg a través de la zona de estudio. Pasaron por el remanso, los rápidos, la moya y la salida aguas abajo. Para obtener la información de los patrones de transporte de cuerpos flotantes a partir de los experimentos de los globos, se analizó la información obtenida a través de las grabaciones en video realizadas con los drones, que se elevaron a una altura lo suficiente para obtener la información de la zona desde un enfoque lagrangiano.

Figura 69. Posición partículas remanso



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la figura 69 se puede observar que en el remanso los globos de helio permanecen agrupados y con un tránsito lineal, tienden a irse a las zonas de mayor velocidad presentes en los rápidos, pero no se ven cambios de posición bruscos.

Figura 70. Posición partículas entrada a los rápidos



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la figura 70 se puede observar que a la entrada a los rápidos los globos se desagrupan, tienden a irse hacia el borde izquierdo y se aceleran cambiando sus posiciones bruscamente. Al final todos los globos entran al rápido de una manera aleatoria y ninguno se queda atrapado. En la figura 71 se puede observar que en los rápidos los globos de helio siguen desagrupados, presentan un tránsito lineal, su velocidad aumenta y es la zona donde menor tiempo permanecen.

Figura 71. Posición partículas rápidos



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 72. Posición partículas tránsito entre moya y rápido



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la figura 72 se puede observar que en el tránsito entre la moya y los rápidos se presenta el mayor cambio geométrico, algunos globos de helio tendían a hundir y salir después de la moya, esto debido a la desaceleración que se genera y a lo que se cree una mayor magnitud de las velocidades verticales que las velocidades en x e y.

Figura 73. Posición partículas en la Moya



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Los globos en la moya presentan una desaceleración donde la velocidad pasa de 1.6 m/s a velocidades de $0.17 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, se generan fenómenos de recirculación y una des agrupación total de las bombas de helio. La mayoría de las bombas tiende a seguir a su salida hacia aguas abajo, pero como se puede ver en la figura 73 hay unos globos que se quedan en la zona de color negro, donde recirculan con y se quedan en la recirculación por un lapso largo de tiempo para luego transportarse hacia aguas abajo.

Algunos globos se transportaron hacia el brazo derecho donde la mayoría se quedaron atrapados. En promedio 5 globos siguieron su trayectoria hacia aguas abajo después de pasar de los rápidos, la moya y el brazo derecho a una velocidad muy baja (figura 74).

Figura 74. Posición partículas en el brazo derecho



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 75. Líneas de corriente de las partículas



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la figura 75 se observan las líneas de corriente a través del rápido, la moya y aguas abajo de los globos de helio. Para obtener las líneas de corriente se siguió la trayectoria de los globos más visibles en los videos a través del dominio, para ello se demarcaron trayecto a trayecto y de donde se pudo observar en un detalle más general los resultados de los fenómenos de transporte de cuerpos flotantes en nuestra zona de estudio.

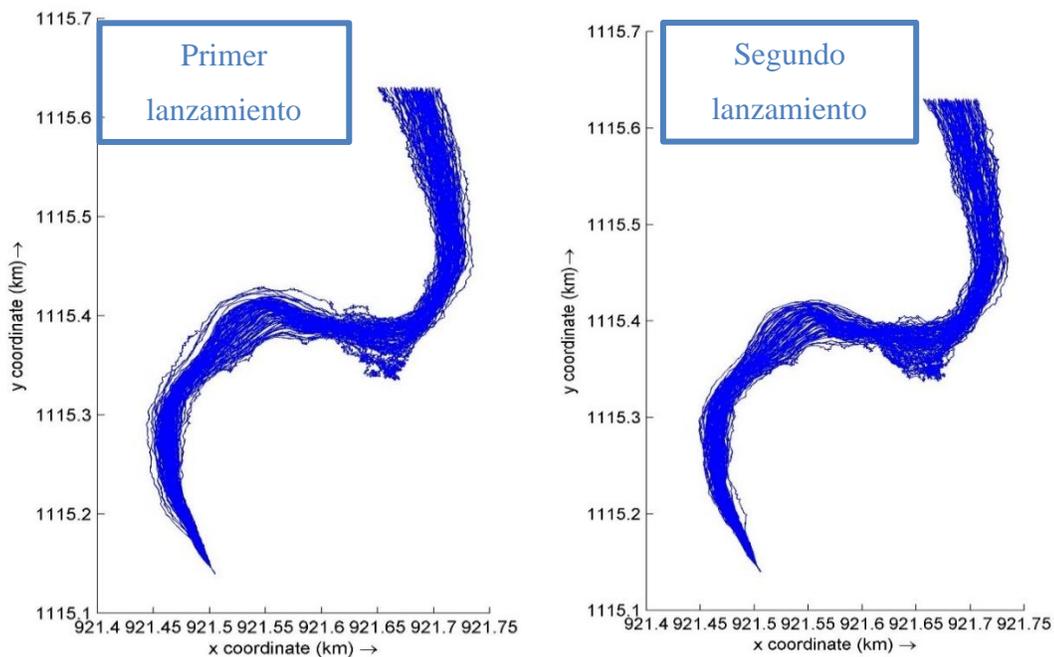
5.4.2 Resultados modelo de seguimiento de partículas

En la figura 76 se puede observar que los patrones de transporte de los cuerpos flotantes basados en las configuraciones reales de las bombas de helio, en la izquierda se observan los resultados para los globos de helio con 0.02 m de radio y 0.05 kg menos de masa que los experimentos de campo, en la derecha los resultados con las condiciones de los experimentos.

Las partículas al comienzo de la simulación y a través del remanso se comportan de una manera agrupada y constante. En los rápidos las partículas se aceleran y se desagrupan y la mayoría de las partículas tienden a irse hacia el costado izquierdo del lecho.

Posteriormente en la moya las partículas se desagrupan totalmente tomando trayectorias aleatorias, especialmente en los globos con condiciones reales. Se pueden observar los mismos patrones que en los experimentos de campo donde algunas partículas recirculaban a la izquierda de la moya, otras siguen su trayectoria normal y una cantidad significativa hacia el brazo derecho. Posteriormente las partículas siguen su rumbo hasta aguas abajo, pero con diferencias de tiempo que oscilan entre los 18 y 30 minutos, ya que algunas partículas permanecen recirculando por más de diez minutos. Tres partículas durante todo el tiempo de simulación se quedaron en la entrada del brazo derecho.

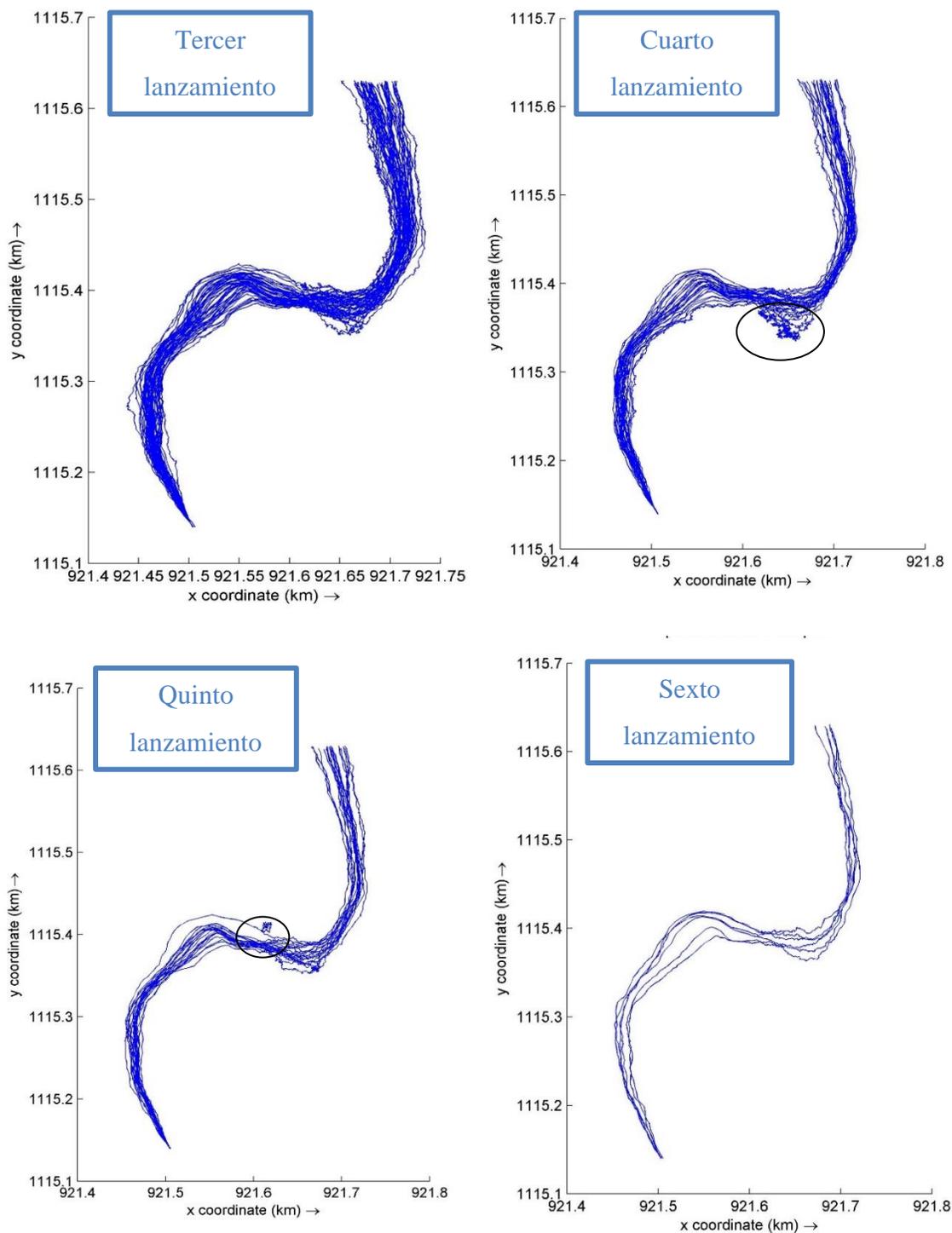
Figura 76. Trayectoria de partículas primer y segundo lanzamiento



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la figura 77 se muestran los patrones de transporte para las diferentes configuraciones de tamaños y masa descritos anteriormente. Se observa que a medida que se utilizan tamaños y masas más grandes las partículas tienden a tener una configuración menos aleatoria y más organizada, excepto en la cuarta configuración donde en el sector de la moya la mayoría de las partículas lanzadas tienden al brazo derecho y recirculan durante un lapso de más de 5 minutos. En el quinto lanzamiento se observan unas partículas que presentan recirculación en el tercer y sexto lanzamiento se ven patrones que no presentan fenómenos aleatorios significativos.

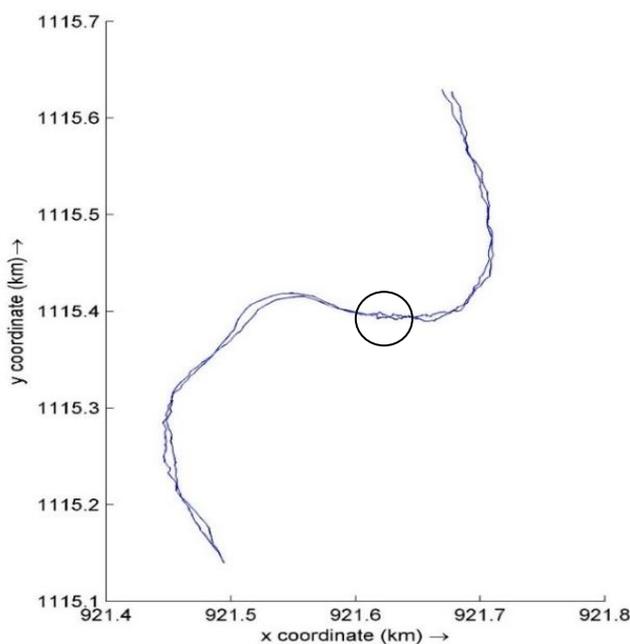
Figura 77. Trayectoria de partículas tercer, cuarto, quinto y sexto lanzamiento



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

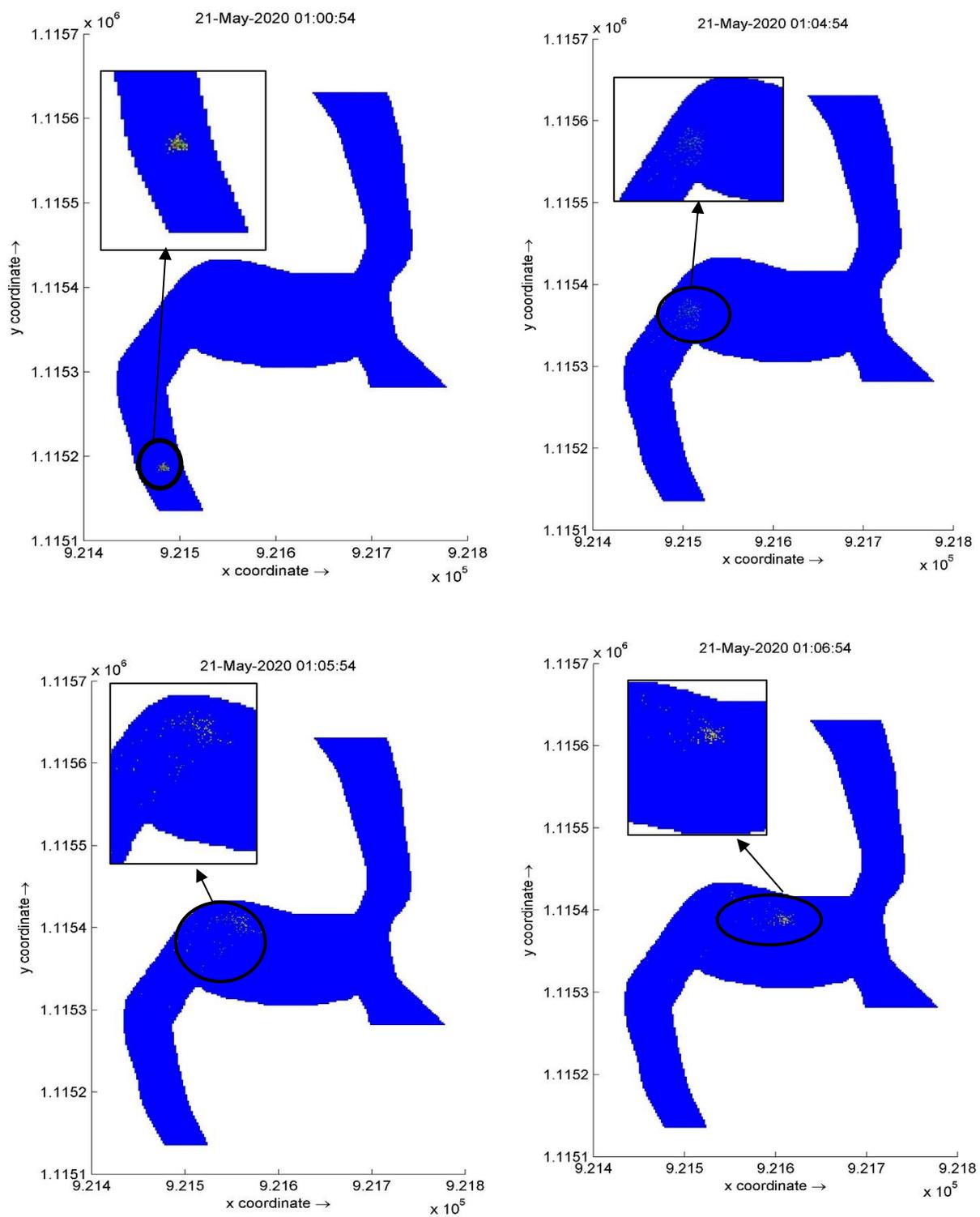
En la figura 78 se puede observar la trayectoria para dos cuerpos de 1 metro de radio y 80 kg de masa, para simular una partícula lo suficientemente grande de una masa semejante a un cuerpo de persona. Se observa que en el remanso una partícula en el comienzo se mueve de izquierda a derecha y en el momento en que llega al borde del cauce se mueve de derecha a izquierda y continua con el mismo patrón de transporte hasta llegar a los rápidos donde se mueve linealmente, pero con una aceleración. En el punto que terminan los rápidos y comienza la moya, donde está el mayor cambio en geometría, se observa como la partícula salta de un patrón lineal de celdas a una celda que está a distancia considerable y en una dirección diferente, por lo que se considera que en ese punto la partícula se hunde por unos segundos. Luego al paso por la moya sigue su patrón en forma de zigzag hasta llegar al final del dominio.

Figura 78. Trayectoria de partículas séptimo lanzamiento



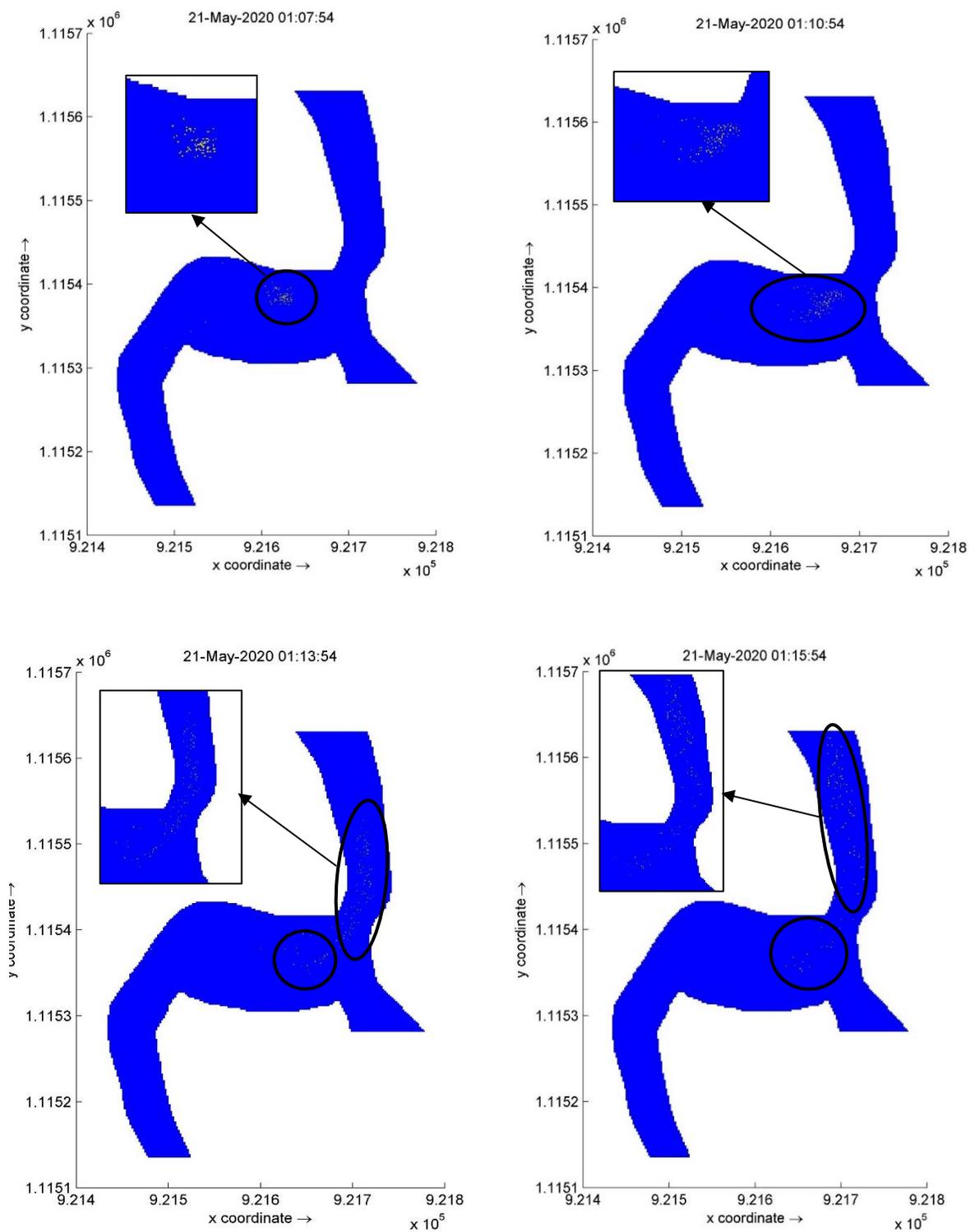
Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 79. Seguimiento de partículas zona de estudio parte 1-4



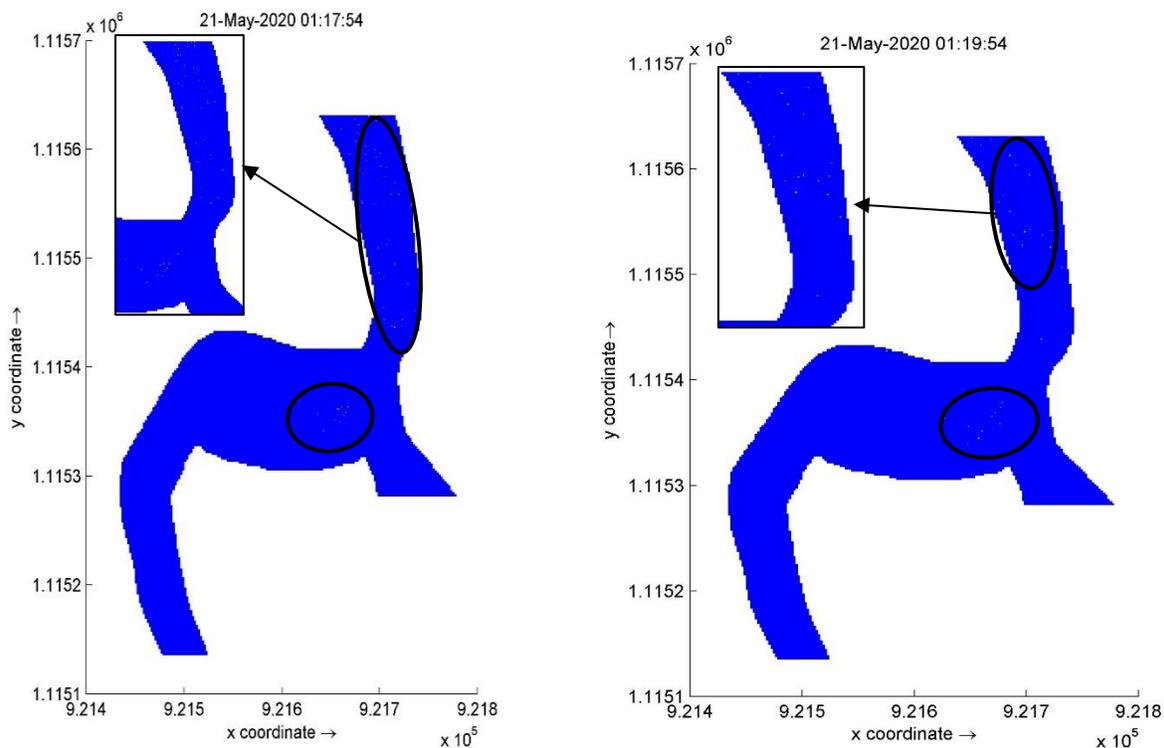
Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 80. Seguimiento de partículas zona de estudio parte 4-8



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

Figura 81. Seguimiento de partículas zona de estudio parte 9-10



Fuente: (Elaboración Propia, 2020)

En la secuencia de imágenes presentes en las figuras 79-81 se muestran los patrones de transporte de cuerpos flotantes de La Moya de Jorge, dónde el tiempo de viaje de las partículas es aproximadamente de 20 minutos y disminuye proporcionalmente con el peso y el diámetro de los cuerpos. Esto se puede verificar en la figura 78-80 donde al comienzo de la simulación los cuerpos se comportan de manera agrupada y constante, lo mismo a través del remanso, en los rápidos se aceleran y se desagrupan y la mayoría de las partículas tienden a irse hacia el costado izquierdo del lecho. Posteriormente a la entrada de la moya se desaceleran bruscamente y es el lugar donde las partículas duran más tiempo. En la moya se desagrupan totalmente tomando trayectorias aleatorias. Por último, siguen su trayectoria normal y una cantidad significativa de partículas toman un rumbo hacia el brazo derecho.

5.4.3 Conclusiones técnicas de seguimiento de partículas

Las técnicas de seguimiento de partículas basadas en los experimentos de campo y en la modelación computacional presentan resultados patrones similares en el transporte de cuerpos flotantes. ya que se comparó, En general, las trayectorias de viaje en estas dos técnicas son semejantes. Se obtuvieron resultados significativos como los patrones en el tránsito entre los rápidos y la moya y el comportamiento de las partículas en la moya y después del paso por la moya. Teniendo en cuenta que es un punto de partida ya que los análisis fueron cualitativos.

En el tránsito entre el rápido y la moya que es el punto donde las velocidades cambian de manera drásticas pasando de 1.6 m/s a velocidades inferiores a los $0.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, el modelo de seguimiento de partículas representó la desaceleración que se observa de los cuerpos flotantes y el hundimiento de algunos de ellos principalmente los de 0.5 kg y 0.55 kg , esto fue validado con los resultados de los videos de experimentos de campo.

CAPÍTULO VI

6 DISCUSIÓN GENERAL

A través de las experiencias obtenidas en la investigación se presentan las siguientes discusiones acerca de la modelación hidrodinámica de ríos desde la obtención de la información hasta el posprocesamiento.

6.1 Insumos Topográficos para la Modelación

En nuestro modelo hidrodinámico bidimensional como se menciona en el capítulo V utilizamos dos topografías para la generación del DTM una a partir de las imágenes generadas por el satélite ALOS y otra generada a partir de Drones, de donde se pudo observar que la topografía generada por el ALOS no es adecuada para un sistema montañoso como el de la zona de estudio, ya que su desfase fue de más de 20 m y se aleja totalmente de la realidad. En cuanto a la topografía generada por los Drones, aunque se realizaron ajustes, se logró representar adecuadamente la zona de estudio, por ende, se recomienda el uso de información primaria para realizar modelación hidrodinámica de sistemas complejos como los de alta montaña (hay que tener en cuenta que la resolución del ALOS es de 12.5m y de los Drones es de 25 cm).

Con respecto a la generación del DTM, es importante tener en cuenta que desde la toma de información topografía y batimétrica se genera incertidumbre y así sucede en cada paso que se realiza para la obtención final del DTM como se muestra en el capítulo VI. Para reducir esta incertidumbre, es importante conocer la zona de estudio y realizar cada procedimiento de la manera más adecuada posible, ya que al nivel de detalle que se trabaja pequeñas variaciones generan gran incertidumbre en el modelo.

6.2 Análisis de las Experiencias Obtenidas en la Modelación Hidrodinámica 1D Y 2D

Los modelos unidimensionales son fáciles y rápidos de construir y ejecutar, pero los resultados de estos modelos debido a todas las suposiciones físicas realizadas generan unas inexactitudes significativas. En este caso lo pudimos detallar en la representación del fenómeno del resalto hidráulico y la Moya. Sin embargo, los modelos 2D pueden realizar un mejor acercamiento a la realidad, pero se necesita mucho más tiempo y de insumos adecuados para la implementación para las simulaciones. Los modelos 1D como HEC RAS se recomiendan para estudios rápidos que no requieren demasiada precisión.

En cuanto a los modelos bidimensionales como Delft 3D, es importante mencionar la diferencia que se observa entre el uso de las mallas estructuradas y no estructuradas, donde la eficiencia de las mallas estructuradas es mucho mayor. En nuestro caso la solución numérica con la malla no estructurada de tamaño razonable no converge y al disminuir su tamaño a medidas donde fuese estable el modelo el costo computacional no se podía suplir, por lo que se tomó la decisión de utilizar una malla estructurada, que tuvo una convergencia completa a la solución y un costo computacional admisible

Se logró generar una representación bastante buena de las velocidades promedio, máximas, mínimas, niveles y profundidades. Sin embargo, al momento de analizar los fenómenos transporte y recirculación en la moya, los esfuerzos cortantes en la dirección vertical tienden a $0 N/m^2$, lo que indicaría que no existe la posibilidad de ejercer una fuerza en la dirección vertical significativa sobre un cuerpo. En la vida real no es así, por ende, es necesario utilizar un modelo 3D que represente las velocidades verticales, las cuales priman en este tipo de fenómenos hidráulicos. Hay que tener en cuenta que el costo computacional de un modelo 3D es mucho mayor que el

bidimensional, por ende, se podría implementar para analizar puntualmente la moya, pero no toda la zona de estudio desde el remanso hasta la salida aguas abajo.

6.3 Comparación Entre el Uso y el Entendimiento de los Modelos Numéricos Implementados en la Hidrodinámica

En esta investigación se partió del conocimiento en el funcionamiento de los modelos hidrodinámicos lo cual es un punto de partida que nos lleva a ser usuarios de los diferentes programas existentes ya sean para realizar representaciones de la realidad en 1D, 2D o 3D. Al ser usuarios no tenemos la capacidad de tomar decisiones como la obtención de la información, el preprocesamiento, procesamiento y posprocesamiento y mucho menos realizar un análisis con estricto criterio técnico. Por ende, se hizo necesario el entendimiento desde los componentes de campo, los componentes físicos y matemáticos, ya que son la caja de herramientas de la que se debe seleccionar aquellas necesarias para representar la realidad de la mejor manera. Esto nos llevó a tener un soporte técnico y científico para desarrollar la investigación en cada una de sus etapas.

CAPÍTULO VII

7 CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJO FUTURO

Para la construcción de un modelo hidrodinámico ya sea en una dimensión o dos dimensiones es necesario trabajar con información primaria y secundaria por diversos temas como las posibilidades de salidas de campo o información continua espacial y temporalmente, pero el trabajar con información primaria y el realizar un proceso cuidadoso de pre y procesamiento siempre nos llevará a resultados de alta calidad para la generación de los insumos como un modelo digital de terreno (DTM) que represente lo mejor posible las configuraciones geomorfológicas reales del cauce. En nuestro caso se pudo detallar en la representación de los fenómenos hidráulicos de los rápidos y la moya presentes en la zona de estudio.

Para la Moya de Jorge se realizó la modelación hidrodinámica con condiciones de flujo que no cambian en el tiempo a partir de los datos tomados en campo de donde se aplicaron dos metodologías de calibración una a partir de la comparación entre el perfil hidráulico y otra a partir de la comparación de las velocidades en la moya. Se pudo observar que a partir de la calibración por el perfil hidráulico, se logró comparar el modelo y las mediciones de campo tomadas por el RTK a través del dominio computacional, obteniendo un error del 0.12% y para la calibración por la comparación de velocidades que se realizó a partir de los datos de campo por el ADCP y el modelo, se obtuvo un error del 1.55204 % lo cual indica que se pudo capturar la información de los fenómenos hidráulicos asociados a los cambios geométricos de la zona de estudio.

Con los experimentos de campo y las herramientas implementadas se pudo obtener información cualitativa sobre los patrones de transporte de cuerpos flotantes en geometrías complejas principalmente lo referente a los fenómenos hidráulicos como los remansos, rápidos y moyas que concordaba de una buena manera con los análisis realizados a los resultados numéricos. El modelo de seguimiento de partículas a partir del modelo hidrodinámico sirvió para corroborar los patrones de transporte de cuerpos flotantes en la zona de estudio, el cual pudo representar lo observado en campo y representar el transporte en las configuraciones geométricas complejas presentes en La Moya de Jorge desde las aceleraciones en los rápidos, la desaceleración brusca en el tránsito entre los rápidos y la entrada a la moya y la aleatoriedad de los patrones en la moya.

Con esta investigación se pudo realizar un primer acercamiento a la generación de una metodología para la búsqueda de personas desaparecidas en ríos implementando soluciones a partir de herramientas numéricas y computacionales, donde se pudo detallar como cuerpos con pesos que variaban desde 0.5 kg hasta 80 kg se transportaban en accidentes hidráulicos para un río de montaña.

Se recomienda el uso de la técnica de velocimetría de imágenes de partículas (VIP) para usarse como un método de validación de los modelos computacionales, principalmente en lugares donde no se pueda acceder tener un fácil acceso a la información, ya que, se obtuvo un buen desempeño en la representación de las magnitudes y vectores de velocidad en las zonas de los rápidos y las moyas que son lugares que presentan cambios bruscos de velocidad.

Se recomienda el uso de la calibración por medio del perfil hidráulico para modelos hidrodinámicos bidimensionales, principalmente porque se puede comparar todo el dominio computacional y se puede analizar el rendimiento del modelo sin perder

Para siguientes investigaciones se plantea el análisis del sistema teniendo en cuenta las variaciones espaciales y temporales de las condiciones de flujo, principalmente que se pueda representar el comportamiento del río La Miel antes de la construcción de la hidroeléctrica La Miel I, ya que con esto se podría analizar que pasó con las personas desaparecidas en esa época, y cuales eran los patrones de transporte de los cuerpos flotantes en el río cuando tenía sus condiciones de flujo naturales.

También se propone el análisis de fenómenos como el de la moya en tres dimensiones puesto que es el lugar donde se presentan los mayores cambios en los patrones de flujo y donde se presenta la mayor influencia para los cuerpos flotantes, también se propone poder analizar cómo se transportarían otros tipos de cuerpos con diferentes configuraciones a través de ríos con diferentes características hidrológicas y geométricas.

BIBLIOGRAFÍA

- a.C.E., U. S. (2010). HEC-RAS River Analysis System. *User's Manual, Version 4.1*.
<https://doi.org/CPD-68>
- Adrian, R. J. (2005). Twenty years of particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*.
<https://doi.org/10.1007/s00348-005-0991-7>
- Alonso, R. L. (2004). Efectos hidrogeomorfológicos aguas abajo de embalses. *Cimbra*,
 357(March 2004), 22–28. Retrieved from <http://repositori.udl.cat/handle/10459.1/46507>
- Angarita, H., Wickel, A. J., Sieber, J., Chavarro, J., Maldonado-Ocampo, J. A., Herrera-R, G. A.,
 ... Purkey, D. (2018). Basin-scale impacts of hydropower development on the Mompós
 Depression wetlands, Colombia. *Hydrology and Earth System Sciences*.
<https://doi.org/10.5194/hess-22-2839-2018>
- Badano D, N. (2013). *Resolución de las ecuaciones de aguas poco profundas sobre mallas no
 estructuradas en gpu. XXXII*, 19–22.
- Bandyopadhyay, J., Rodda, J. C., Kattelman, R., Kundzewicz, Z. W., & Kraemer, D. (1997).
 Highland Waters — A Resource of Global Significance. In J. D. Ives & B. Messerli (Eds.),
Mountains of the World: A Global Priority (pp. 131–155). London: Parthenon.
- Basile, Pedro A. Riccardi, G., & Peruzzo, Florencia & Garcia, M. (2016). Two-dimensional
 hydrodynamic modelling of the lower Parana river. *Aqua-LAC*, 8(2), 1–13.
- Bathurst, J. C. (1988). *Velocity profile in high-gradient, boulder-bed channels*. 29–34. Budapest,
 Hungary: roc. Int. Conference on Fluvial Hydraulics, IAHR.
- Bayazit, M. (1983). Flow structure and sediment transport mechanics in steep channels.

Mechanics of Sediment Transport. Proc. Euromech 156, Istanbul, July 1982.

Blizard, C. R., & Wohl, E. E. (1998). Relationships between hydraulic variables and bedload transport in a subalpine channel, Colorado Rocky Mountains, USA. *Geomorphology*.

[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(97\)00055-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00055-X)

Bonillo, J. J., Puertas, J., Suárez, J., & Vásquez, M. E. (2000). Estudio numérico y experimental del flujo bidimensional y del transporte de contaminantes en lámina libre. *Ingeniería Hidráulica En Mexico*.

Cea, L., & French, J. R. (2012). Bathymetric error estimation for the calibration and validation of estuarine hydrodynamic models. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.

<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.01.004>

Chow, V. Te. (1985). Hidráulica de Canales abiertos. In *Editorial Mc. Graw Hill*.

<https://doi.org/9586002284>

Corzo, G. A., Santos, G. R., & Palacios, J. R. (2018). *Construcción de un modelo numérico hidrodinámico implementando soluciones basadas en la naturaleza con el software delft3d para la parte alta de la cuenca del río bogotá (villzapinzón)*. (December).

Creutin, J. D., Muste, M., Bradley, A. A., Kim, S. C., & Kruger, A. (2003). River gauging using PIV techniques: A proof of concept experiment on the Iowa River. *Journal of Hydrology*.

[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00081-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00081-7)

Cuervo, A. (2012). Comparación de los modelos hidráulicos unidimensional (HEC-RAS) y bidimensional (IBER) en el análisis del rompimiento de presas de materiales sueltos. *Tesis de Maestría*.

- Delft3D-PART. (2009). *Mauel Deltares: Particle Tracking* (2.13; Deltares, Ed.). Retrieved from <http://www.deltaressystems.com/hydro/product/621497/delft3dsuite>
- Erfteemeijer, P. L. A., Van Beek, J. K. L., Bolle, L. J., Dickey-Collas, M., & Los, H. F. J. (2009). Variability in transport of fish eggs and larvae. I. Modelling the effects of coastal reclamation. *Marine Ecology Progress Series*, 390, 167–181. <https://doi.org/10.3354/meps08173>
- Fryer, M. J., & Rubinstein, R. Y. (1983). Simulation and the Monte Carlo Method. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*. <https://doi.org/10.2307/2981504>
- Furbish, D. J. (1993). Flow structure in a bouldery mountain stream with complex bed topography. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/93WR00570>
- Giardino, A., Ibrahim, E., Adam, S., Toorman, E. A., & Monbaliu, J. (2009). Hydrodynamics and cohesive sediment transport in the IJzer Estuary, Belgium: Case study. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2009\)135:4\(176\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2009)135:4(176))
- Grant, G. E., Swanson, F. J., & Wolman, M. G. (1990). Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, Western Cascades, Oregon. *Bulletin of the Geological Society of America*. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1990\)102<0340:PAOOSB>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1990)102<0340:PAOOSB>2.3.CO;2)
- Hin, A. J. S., & Post, F. H. (1993). Visualization of turbulent flow with particles. *Proceedings of the 4th Conference on Visualization, VIS 1993*. <https://doi.org/10.1109/visual.1993.398850>
- Iman, R. L., Helton, J. C., & Campbell, J. E. (1981). An Approach to Sensitivity Analysis of

Computer Models: Part I—Introduction, Input Variable Selection and Preliminary Variable Assessment. *Journal of Quality Technology*.

<https://doi.org/10.1080/00224065.1981.11978748>

Instituto Javeriano del Agua, P. U. J., & Equitas. *Modelación numérica bidimensional y transporte de partículas flotantes para la búsqueda de cuerpos de desaparecido.* , (2020).

Jarrett, R. D. (1990). Hydrologic and Hydraulic Research in Mountain Rwers. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 26(3), 419–429. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1990.tb01381.x>

Jiménez-Segura, L. F., Restrepo-Santamaría, D., López- Casas, S., Delagado, J., Valderrama, M., Álvarez, J., & Gómez, D. (2014). Biota colombiana. *Ictiofauna y Desarrollo Del Sector Hidroeléctrico En La Cuenca Del Río Magdalena - Cauca, Colombia*, 15, 3–25. <https://doi.org/10.21068/c001>

John Harold, C., & Juan David, C. (2010). Mamíferos de la cuenca del río la miel (caldas): diversidad y uso cultural *. *Boletín Científico Centro de Museos de Historia Natural*, 14(1), 56–75.

Jonkman, S. N., Vrijling, J. K., & Vrouwenvelder, A. C. W. M. (2008). Methods for the estimation of loss of life due to floods: A literature review and a proposal for a new method. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9227-5>

Jung, H. C., Jasinski, M., Kim, J. W., Shum, C. K., Bates, P., Neal, J., ... Alsdorf, D. (2012). Calibration of two-dimensional floodplain modeling in the central Atchafalaya Basin Floodway System using SAR interferometry. *Water Resources Research*.

<https://doi.org/10.1029/2012WR011951>

Kalathil, S. T., & Chandra, V. (2019). Review of step-pool hydrodynamics in mountain streams.

Progress in Physical Geography: Earth and Environmental, 1–20.

<https://doi.org/10.1177/0309133319859807>

Lackey, T., & Macdonald, N. (2007). the Particle Tracking Model : Description and Processes.

Proceedings XVIII World Dredging Congress.

Langendoen, E. J., Mendoza, A., Abad, J. D., Tassi, P., Wang, D., Ata, R., ... Hervouet, J. M.

(2016). Improved numerical modeling of morphodynamics of rivers with steep banks.

Advances in Water Resources. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.04.002>

Lind, N., Hartford, D., & Assaf, H. (2004). Hydrodynamic models of human stability in a flood.

Journal of the American Water Resources Association. [https://doi.org/10.1111/j.1752-](https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01012.x)

[1688.2004.tb01012.x](https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01012.x)

López-Moreno, J. I., Beguería, S., & García-Ruiz, J. M. (2002). Influence of the Yesa reservoir

on floods of the Aragón River, central Spanish Pyrenees. *Hydrology and Earth System*

Sciences, 6(4), 753–762. <https://doi.org/10.5194/hess-6-753-2002>

López-Muñoz, M. T., & Pérez-Gallego, C. M. (2014). Dinámica espacial y temporal de los

géneros ficoperifíticos del río La Miel (cuenca del río Magdalena), aguas abajo del embalse

Amaní (Caldas, Colombia), entre 2006 y 2009. *Biota Colombiana*, 15(2), 127–159.

López Moreno, J. I., & García Ruiz, J. M. (2003). Influencia de los embalses sobre el régimen

fluvial en los Pirineos Centrales. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 29(0), 7.

<https://doi.org/10.18172/cig.1055>

- Martinez, C. E., Miralles-Wilhelm, F., & Garcia-Martinez, R. (2011). Quasi-three dimensional two-phase debris flow model accounting for boulder transport. *International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings*. <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2011-03.B-051>
- MIEL, U. T.-R. LA. (2016). *Plan de ordenamiento territorial y manejo de cuenca hidrográfica del río la Miel*. Medellín.
- Miyake, Y., Kimura, S., Kawamura, T., Kitagawa, T., Hara, M., & Hoshikawa, H. (2010). Estimating larval supply of Ezo abalone *Haliotis discus hannai* in a small bay using a coupled particle-tracking and hydrodynamic model: Insights into the establishment of harvest refugia. *Fisheries Science*, 76(4), 561–570. <https://doi.org/10.1007/s12562-010-0260-4>
- Nilay İçsen, B., Öktem, N., Yilmaz, B., & Aydin, I. (2017). On the use of shallow water equations in hydraulics. *Teknik Dergi/Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers*. <https://doi.org/10.18400/tekderg.299135>
- OMM, O. W. M. (2006). *Technical Regulation WMO-No-49*.
- Palacio, C., García, F., & Garcia, U. (2010). Calibración de un modelo hidrodinámico 2D para la bahía de cartagena. *DYNA (Colombia)*, 77(164), 152–166.
- Papanicolaou, A. N., Bdour, A., & Wicklein, E. (2004). One-dimensional hydrodynamic/sediment transport model applicable to steep mountain streams. *Journal of Hydraulic Research*. <https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9728402>
- Papanicolaou, A. N., Elhakeem, M., & Wardman, B. (2010). Calibration and verification of a 2D

hydrodynamic model for simulating flow around emergent bendway weir structures.

Journal of Hydraulic Engineering. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000280](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000280)

Parsapour-Moghaddam, P., Rennie, C. D., & Slaney, J. (2018). Hydrodynamic Simulation of an Irregularly Meandering Gravel-Bed River: Comparison of MIKE 21 FM and Delft3D Flow models. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184002004>

Patalano, A., García, C. M., Guillén, N., García, C., Díaz, É., Rodríguez, A., & Ravelo, A. (2014). Evaluación Experimental De La Técnica De Velocimetría Por Seguimiento De Partículas A Gran Escala Para La Determinación De Caudales En Ríos Serranos. *Aqua-LAC UNESCO*.

Patalano, A., García, C. M., & Rodríguez, A. (2017). Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV). *Computers and Geosciences*. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.009>

Penning-Rowsell, E., Floyd, P., Ramsbottom, D., & Surendran, S. (2005). Estimating injury and loss of life in floods: A deterministic framework. *Natural Hazards*, *36*(1–2), 43–64. <https://doi.org/10.1007/s11069-004-4538-7>

Pestana, R., Matias, M., Canelas, R., Roque, D., Araujo, A., Zeller, E. Van, ... Falcão, A. P. (2014). Calibration of 2D Hydraulic Inundation Models with SAR Imagery in the Floodplain Region of the Lower Tagus River. *ESA Living Planet Symposium*.

Postma, L., van Beek, J. K. L., van den Boogaard, H. F. P., & Stelling, G. S. (2013). Consistent and efficient particle tracking on curvilinear grids for environmental problems.

International Journal for Numerical Methods in Fluids. <https://doi.org/10.1002/flid.3705>

Rathburn, S., & Wohl, E. (2003). Predicting fine sediment dynamics along a pool-riffle mountain channel. *Geomorphology*. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00135-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00135-1)

Rathburn, S., Wohl, E., Jirka, G. H. G. H., Weitbrecht, V., Uijttewaal, W., Preziosi-Ribero, A., ... Wicklein, E. (2004). Large scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows. *Journal of Hydraulic Research*, 13(4), 369–376.
<https://doi.org/10.1017/S0022112071002258>

Sadarjoen, I. A., de Boer, A. J., Post, F. H., & Mynett, A. E. (1998). *Particle Tracing in σ -Transformed Grids using Tetrahedral 6-Decomposition*. 71–80.
https://doi.org/10.1007/978-3-7091-7517-0_7

Sánchez Puga, P. (2015). *VELOCIMETRÍA POR IMAGEN DE PARTÍCULAS (PIV) APLICADO A LECHOS FLUIDIZADOS*. Universidad Carlos III de Madrid.

Shinbrot, M. (1970). The shallow water equations. *Journal of Engineering Mathematics*.
<https://doi.org/10.1007/BF01534977>

Sotelo-Avila, G., & Cafaggi-Félix, A. (2001). La forma diferencial de las ecuaciones básicas del flujo unidimensional. *Ingeniería Investigación y Tecnología*.
<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2001.02n3.013>

Strom, M. A., Pasternack, G. B., Burman, S. G., & Dahlke, H. E. (2017). Hydraulic hazard exposure of humans swept away in a whitewater river. *Natural Hazards*.
<https://doi.org/10.1007/s11069-017-2875-6>

Symonds, A. M., Vijverberg, T., Post, S., Van Der Spek, B. J., Henrotte, J., & Sokolewicz, M.

- (2016). Comparison between mike 21 fm, delft3d and delft3d fm flow models of western port bay, Australia. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*.
- Teitzel, C., Grosso, R., & Ertl, T. (1997). *Efficient and Reliable Integration Methods for Particle Tracing in Unsteady Flows on Discrete Meshes*. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6876-9_4
- Thielicke, W., & Stamhuis, E. J. (2014). PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*. <https://doi.org/10.5334/jors.bl>
- UPME. (2013). Proyección de Demanda de Energía Eléctrica en Colombia. *Unidad de Planeación Minero Energética-UPME*, 1–50.
- Van Der Molen, J., Van Beek, J., Augustine, S., Vansteenbrugge, L., Van Walraven, L., Langenberg, V., ... Robbens, J. (2015). Modelling survival and connectivity of *Mnemiopsis leidyi* in the south-western North Sea and Scheldt estuaries. *Ocean Science*, *11*(3), 405–424. <https://doi.org/10.5194/os-11-405-2015>
- Vargas Nieto, D. M. (2018). Hidroeléctricas, ¿energía amigable con el medio ambiente? *Pesquisa Javeriana*, *12*. Retrieved from <https://www.javeriana.edu.co/pesquisa/hidroelectricas-energia-amigable-con-el-medio-ambiente/>
- Vasquez, R. T. (2006). *Modelo de aguas poco profundas obtenidos mediante la técnica de desarrollos asintóticos*. Universidad da Coruña.
- Viviroli, D., & Weingartner, R. (2004). The hydrological significance of mountains: from

regional to global scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(6), 1017–1030.

<https://doi.org/10.5194/hess-8-1017-2004>

Wohl, E. (2000). *Mountain Rivers* (American Geophysical, Ed.). Washington, DC: AGU.

Wohl, E. (2011). Threshold-induced complex behavior of wood in mountain streams. *Geology*.

<https://doi.org/10.1130/G32105.1>

Wohl, E. E., & Thompson, D. M. (2000). Velocity characteristics along a small step-pool channel. *Earth Surface Processes and Landforms*. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(200004\)25:4<353::AID-ESP59>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(200004)25:4<353::AID-ESP59>3.0.CO;2-5)

Wu, W. (2007). Computational River Dynamics. In *Computational River Dynamics*.

<https://doi.org/10.4324/9780203938485>

Yu, K., Kim, S., & Kim, D. (2015). Correlation analysis of spatio-temporal images for estimating two-dimensional flow velocity field in a rotating flow condition. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.005>

ANEXOS

ANEXO 1

```

import pandas as pd
import numpy as np
from pandas import ExcelWriter
Rtk=pd.read_excel('IDW1.xls','Rtk')
Bati=pd.read_excel('IDW1.xls','Bati')
Rtk.__delitem__('FID')
Rtk.__delitem__('Nombre')
Bati.__delitem__('FID')
Bati.__delitem__('OID_')
d=np.array(Bati.iloc[:,3:4])
print(d)
d1=d
i=1
p=2
for i in range(0,len(Bati-1)):
    pond = 0
    pondz = 0
    j=1
    for j in range(0,len(Rtk-1)):
        pond = pond + 1/((sqrt((a1[j]-a[i])**2 + (b2[j]-b[i])**2))**p)
        pondz = pondz + c3[j]/((sqrt((a1[j]-a[i])**2 + (b2[j]-b[i])**2))**p)
    j=j+1
    d1[i] = (pondz/pond) + 0.6842
    i=i+1
print(d1)

```

```

df = pd.DataFrame(d1)
len(df)
df.to_csv (r'C:\Users\JORDI PALACIOS\Documents\NORCASIA\2', index = False,
header=True)

```

ANEXO 2

```

import pandas as pd
import numpy as np
import pylab as pl

Delft=pd.read_excel('waterlevel.xlsx','water_level')
Delft_1=pd.read_excel('waterlevel_1.xlsx','waterlevel_1')
Delft_2=pd.read_excel('waterlevel_2.xlsx','waterlevel_2')
Delft_3=pd.read_excel('waterlevel_3.xlsx','waterlevel_3')
Delft_4=pd.read_excel('waterlevel_4.xlsx','waterlevel_4')
Delft_5=pd.read_excel('waterlevel_5.xlsx','waterlevel_5')
Delft_6=pd.read_excel('waterlevel_6.xlsx','waterlevel_6')
Delft_7=pd.read_excel('waterlevel_7.xlsx','waterlevel_7')
Delft_8=pd.read_excel('waterlevel_Complet.xlsx','waterlevel_Complet')
Delft_F_M=pd.read_excel('waterlevel_Fin_Man.xlsx','waterlevel_Fin_Man')
Delft_F=pd.read_excel('waterlevel_Final.xlsx','waterlevel_Final')
Rtk=pd.read_excel('RTK_Final.xlsx','RTK_Final')
Rtk.head()
Y=parry(Rtk_Fin.z)
print(Y)
X=np.array(Rtk_Fin.y)
len(X)
new_length = 408
new_x = np.linspace(Y.min(), Y.max(), new_length)

```

```
spl=make_interp_spline(new_x,Y, k=9)
A = spl(Y)
plt.plot(X,A[:-1])
plt.plot(Rtk_Fin.y,Rtk_Fin.z)
plt.xlabel('Coordenada Y')
plt.ylabel('Nivel del Agua')
plt.title('Perfil La Miel')
plt.grid()
plt.show()
plt.plot(Rtk_Fin.y,Rtk_Fin.z,'o')
plt.plot(Rtk_Fin.y,Rtk_Fin.z1)
plt.xlabel('Coordenada Y')
plt.ylabel('Water Level')
plt.title('Profile La Miel')
plt.legend(('Level_Rtk','Level_MedaMovil_RTK' ),prop = {'size': 10}, loc='upper right')
plt.grid()
plt.show()
plt.plot(Rtk_Fin.y,Rtk_Fin.z1)
plt.plot(Delft_F_M.Y,Delft_F_M.W)
plt.xlabel('Coordenada Y')
plt.ylabel('Nivel de Agua')
plt.title('Perfil La Miel')
plt.grid()
plt.show()
```