



Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico

Presentado a:



Dirigido por:

Ing. Gonzalo Cifuentes Ospina

Gerente técnico

Magister en recursos hídricos e hidroinformática

Aqualogs SAS

Aprobado por:

GEOPARK COLOMBIA

Versión 02

Bogotá, Diciembre de 2025

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

DATOS DEL INFORME

Título	Estudio hidrológico y modelación hidráulica del Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		
Código del informe	AQ194	Versión del informe	02

CONTROL DE CALIDAD INTERNO AQUALOGS SAS

Elaborado por	GONZALO CIFUENTES OSPINA Gerente Técnico
	CARLOS PUENTES Director de Proyectos
	CAMILO FERRO Ingeniero de Proyectos JORGE MARIN Ingeniero de Proyectos
Fecha	Diciembre 5 del 2025

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

Tabla de contenido

1.	Introducción	8
2.	Levantamiento de campo.....	9
2.1.	Metodología.....	9
2.1.1.	Identificación de puntos de interés y rutas de levantamiento	11
2.1.2.	Comisiones de trabajo	15
2.1.3.	Formato estructuras.....	16
2.2.	Resultados de campos	17
3.	Modelación hidráulica.....	20
3.1.	Marco teórico	20
3.1.1.	Modelo hidráulico	20
3.1.2.	Parametrización de la fricción.....	23
3.1.3.	Malla computacional.....	24
3.1.4.	Fuentes, sumideros y condiciones de frontera	25
3.2.	Metodología de modelación.....	26
3.2.1.	Recursos disponibles	27
3.2.2.	Planteamiento de escenarios.....	29
3.2.3.	Esquema de modelación	30
3.2.4.	Observaciones con respecto a las simulaciones	38
3.3.	Resultados.....	40
3.3.1.	Modelación	40
3.3.2.	Profundidad de lámina de agua	41
3.3.3.	Perfiles de velocidad	50
3.3.4.	Validación del modelo hidráulico.....	57
3.3.5.	Principales variaciones espaciales y temporales de la inundación	59
3.3.6.	Análisis en plataformas y vías	61
3.3.7.	Propuestas de adaptación.....	70
4.	Conclusiones.....	74
5.	Bibliografía	77
6.	Anexos	78
6.1.	Anexo 1. Levantamiento de campo	78

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

6.2.	Anexo 2. Modelo hidráulico.....	78
------	---------------------------------	----

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

Tablas

Tabla 2-1. Comisión en campo.....	15
Tabla 2-2. Materiales y herramientas.....	15
Tabla 2-3. Ejemplo de formatos de levantamiento	17
Tabla 2-4. Resultados de las estructuras hidráulicas.....	17
Tabla 3-1. Escenarios de modelación hidráulica.....	30
Tabla 3-2. Lugares de condición de frontera.	35
Tabla 3-3. Caudales de entrada (m ³ /s)	38
Tabla 3-4. Profundidad máxima - Tiempo de retorno 2.33 años.....	42
Tabla 3-5. Profundidad máxima - Tiempo de retorno 5 años.....	43
Tabla 3-6. Profundidad máxima - Tiempo de retorno 10 años.....	45
Tabla 3-7. Profundidad máxima - Tiempo de retorno 20 años.....	47
Tabla 3-8. Profundidad máxima - Tiempo de retorno 50 años.....	48
Tabla 3-9. Profundidad máxima - Tiempo de retorno 100 años.....	49
Tabla 3-10. Velocidad máxima - Tiempo de retorno 2.33 años.....	51
Tabla 3-11. Velocidad máxima - Tiempo de retorno 5 años.....	52
Tabla 3-12. Velocidad máxima - Tiempo de retorno 10 años.....	53
Tabla 3-13. Velocidad máxima - Tiempo de retorno 20 años.....	54
Tabla 3-14. Velocidad máxima - Tiempo de retorno 50 años.....	55
Tabla 3-15. Velocidad máxima - Tiempo de retorno 100 años.....	56
Tabla 3-16. Estadísticas de profundidad máxima del modelo en un buffer de radio de 50 m en los puntos señalados por la comunidad. Simulaciones con un tiempo de retorno de 2.33 años.....	58
Tabla 3-17. Descripción de las propuestas	71

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

Figuras

Figura 2-1. Metodología de levantamiento en campo.....	10
Figura 2-2. Inventarios viales.	12
Figura 2-3. Rutas de levantamiento.	13
Figura 2-4. Vías recorridas clasificadas por día de campaña.....	14
Figura 2-5. Referencia visual levantamiento en campo	16
Figura 2-6. Inventario de estructuras levantado.....	19
Figura 3-1. Manejo de boxculverts en el modelo.....	22
Figura 3-2. Partes del mallado.....	24
Figura 3-3. Metodología de modelación hidráulica.	27
Figura 3-4. Dominio de modelación hidrológica.	28
Figura 3-5. Esquema gráfico de escenarios topográficos.....	29
Figura 3-6. Dominio de modelación hidráulica.	32
Figura 3-7. Malla de modelo hidráulico.	33
Figura 3-8. Distribución de tamaño medio del elemento	34
Figura 3-9. Condiciones de frontera de la modelación hidráulica.	35
Figura 3-10. Distribución de los parámetros de Manning en el dominio de modelación.....	37
Figura 3-11. Comparación entre escenario SC-CG en TR 2.33 y foto aérea real.....	59
Figura 3-12. Diferencia de profundidad entre escenario con y sin proyecto, bajo condiciones de TR 20 años.	60
Figura 3-13. Diferencia de profundidad entre escenario con y sin proyectos, bajo condiciones de tiempo de retorno de 20 años. Donde (I) vía de acceso a la locación Jacana, (II) vía de acceso a la locación Tigui Este y (III) vía de acceso a las locaciones Sinsonte-Guaco	61
Figura 3-14. Diferencia de profundidad entre el escenario con infraestructura de GeoPark y el escenario sin infraestructura, bajo condiciones históricas y un periodo de retorno de 20 años. Se presenta un acercamiento a la zona suroeste del modelo, en el área correspondiente a las plataformas Jacana y Tigui.	63
Figura 3-15. Diferencia de profundidad entre el escenario con infraestructura de GeoPark y el escenario sin infraestructura, bajo condiciones históricas y un periodo de retorno de 20 años. Se presenta un acercamiento a la zona este del modelo, en el área correspondiente a las plataformas Sinsonte y Guaco.....	64
Figura 3-16. Diferencia de profundidad entre el escenario con infraestructura de GeoPark y el escenario sin infraestructura, bajo condiciones históricas y un periodo de retorno de 20 años. Se presenta un acercamiento a la zona correspondiente a las plataformas Tigana.	65
Figura 3-17. Diferencia de profundidad entre el escenario con infraestructura de GeoPark y el escenario sin infraestructura, bajo condiciones históricas y un periodo de retorno de 20 años. Se presenta un acercamiento a la zona correspondiente a las plataformas Taro Taro, Buco y Granja Solar.....	66
Figura 3-18. Diferencia de profundidad entre el escenario con infraestructura de GeoPark y el escenario sin infraestructura, bajo condiciones históricas y un periodo de retorno de 20 años. Se presenta un acercamiento a la zona correspondiente a las plataformas Chiricoca y Tilo.....	67

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

Figura 3-19. Diferencia de profundidad entre el escenario con infraestructura de GeoPark y el escenario sin infraestructura, bajo condiciones históricas y un periodo de retorno de 20 años. Se presenta un acercamiento a la zona correspondiente a plataforma Max.....	67
Figura 3-20. Diferencia de profundidad entre el escenario con infraestructura de GeoPark y el escenario sin infraestructura, bajo condiciones históricas y un periodo de retorno de 20 años. Se presenta un acercamiento a la zona correspondiente a las plataformas Túa.	68
Figura 3-21. Diferencia de profundidad entre el escenario con infraestructura de GeoPark y el escenario sin infraestructura, bajo condiciones históricas y un periodo de retorno de 20 años. Se presenta un acercamiento a la zona correspondiente a la plataforma Jacamar.....	69
Figura 3-22. Diferencia de profundidad entre el escenario con infraestructura de GeoPark y el escenario sin infraestructura, bajo condiciones históricas y un periodo de retorno de 20 años. Se presenta un acercamiento a la zona correspondiente a la plataforma Chachalaca.....	70
Figura 3-23. Ubicación de estructuras hidráulicas propuestas.	71
Figura 3-24. Descarga de la estructura hidráulica – Propuesta 1.	72
Figura 3-25. Descarga de la estructura hidráulica – Propuesta 2.	73

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEOARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

1. Introducción

Este informe tiene como objetivo presentar los resultados de la modelación hidráulica desarrollada para el área de estudio del Bloque de Explotación Llanos 34, con el fin de dar cumplimiento a la Resolución 1089 del 13 de junio de 2024, resuelta por la resolución 2330 de octubre de 2024, en la cual se requiere a GeoPark Colombia S.A, elaborar el Estudio hidrológico y modelación hidráulica.

Para alcanzar este propósito, uno de los elementos fundamentales es la adecuada identificación y caracterización de las estructuras hidráulicas presentes en la zona, así como la recopilación, verificación y validación de la información necesaria para construir un modelo hidráulico representativo y confiable.

En este sentido, el informe se estructura en dos partes. La primera describe la metodología empleada y los resultados obtenidos durante la fase de campo. La segunda presenta el proceso de implementación del modelo hidráulico para el sector analizado, incluyendo los parámetros, supuestos y resultados del ejercicio de simulación.

El capítulo correspondiente al trabajo de campo se centra en la información relativa a las estructuras hidráulicas existentes en el área de estudio. Para el desarrollo de esta sección, se presenta inicialmente la información base disponible, seguida de la metodología empleada para su actualización o levantamiento. Asimismo, se describe la herramienta utilizada para la recolección sistemática de los datos en campo. Finalmente, se exponen los resultados obtenidos.

Por su parte, el desarrollo de la modelación hidráulica del área de estudio presenta en primera instancia, el marco teórico que sustenta el enfoque de modelación adoptado, incluyendo una descripción del modelo numérico seleccionado, sus fundamentos conceptuales y los principales parámetros que lo componen. Seguidamente, se detalla la configuración de la malla computacional, haciendo énfasis en su resolución, calidad geométrica y adaptación al dominio físico. También se describen las condiciones de frontera, así como la localización y caracterización de las fuentes y sumideros definidos en el modelo.

Adicionalmente, se expone la metodología de modelación implementada, la cual fue formulada considerando las características y limitaciones de la información disponible, así como los objetivos específicos del Estudio. Después, se presenta el esquema de modelación propuesto, incluyendo la secuencia de etapas y los criterios técnicos adoptados. El capítulo concluye con la identificación y análisis de las principales limitaciones que condicionan los alcances y la interpretación de los resultados obtenidos.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos a partir de la modelación hidráulica, los cuales permiten evaluar el comportamiento del flujo en el área de estudio bajo las condiciones establecidas. Estos resultados incluyen las superficies de inundación generadas, los niveles de lámina de agua y las velocidades del flujo, entre otros parámetros relevantes. A partir del análisis de dichos resultados, se formulan las conclusiones técnicas correspondientes, enfocadas en la identificación de los impactos potenciales de las infraestructuras del proyecto sobre la dinámica

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

hidráulica del sistema y en la verificación del cumplimiento de los objetivos del estudio establecidos por la ANLA.

2. Levantamiento de campo

El levantamiento en campo corresponde a la etapa en la cual se realizó la recolección de información necesaria para la construcción del modelo hidráulico, que permitió obtener datos precisos sobre las condiciones reales del terreno y garantizar su adecuada representación en la modelación.

Para el presente Estudio, el levantamiento de campo se realizó entre el 7 y el 17 de mayo de 2025, enfocado, en la identificación y caracterización de las estructuras hidráulicas existentes en el área de estudio, tales como alcantarillas, pontones, puentes y demás obras de control hidráulico. En cada una de ellas se registró su localización geográfica, dimensiones, materiales constructivos, condiciones operativas y estado actual. Este proceso contó con la participación de la comunidad local, cuya colaboración permitió una contextualización de la información recogida. Los datos detallados del levantamiento de campo se encuentran compilados en la carpeta ANEXOS\A1_LevantamientoCampo.

El objetivo principal de esta fase es asegurar la correcta representación de dichas estructuras en el modelo hidráulico, ya que constituyen elementos antrópicos que modifican el flujo y la continuidad del drenaje natural del terreno. La recopilación detallada de sus características geométricas y constructivas permite evaluar con mayor precisión el impacto de estas obras sobre el comportamiento hidrodinámico del sistema.

A continuación, se describe la metodología aplicada durante la campaña de levantamiento en campo, orientada a la obtención de los datos necesarios para la caracterización hidráulica del área de estudio. Asimismo, se presentan los resultados obtenidos, los cuales constituyen un insumo fundamental para la construcción y análisis del modelo hidráulico desarrollado en el presente Estudio.

2.1. Metodología

Esta sección describe la metodología utilizada para el levantamiento de información en campo. En la **Figura 2-1**, se presenta el esquema metodológico diseñado para obtener como resultados el inventario de las estructuras hidráulicas presentes en el área de estudio.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

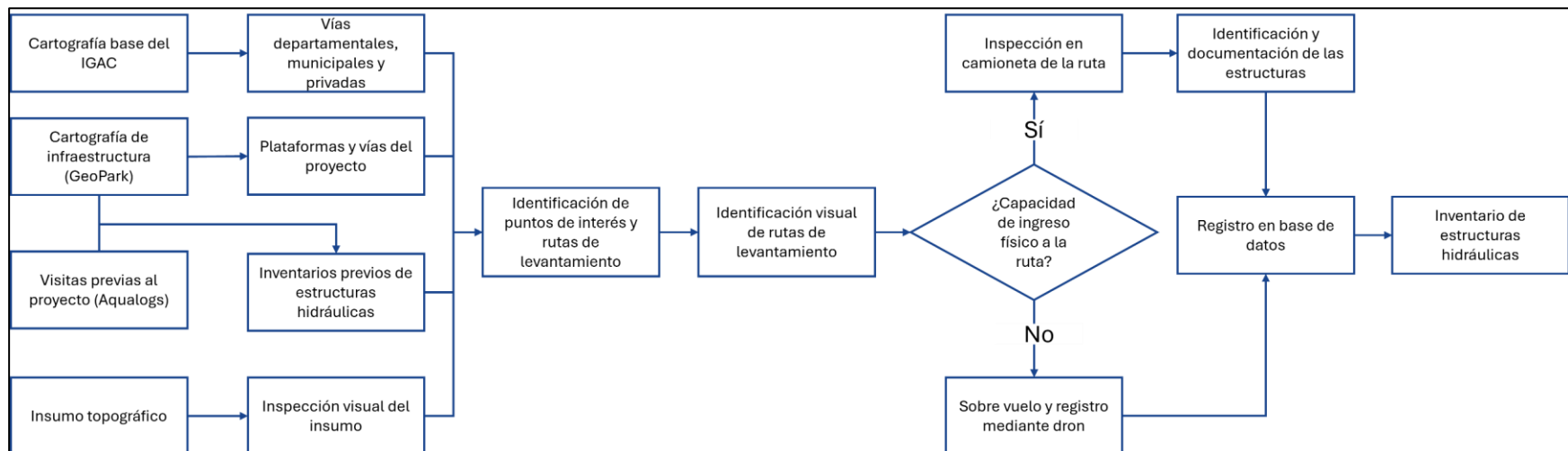


Figura 2-1. Metodología de levantamiento en campo.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

2.1.1. Identificación de puntos de interés y rutas de levantamiento

Previo a la ejecución del levantamiento de información en campo, fue fundamental realizar un diagnóstico preliminar que permite anticipar las condiciones y elementos que potencialmente se encontrarán en el área de estudio.

Este diagnóstico se basó en la revisión y análisis de información secundaria disponible, con el objetivo de optimizar la planificación del trabajo de campo. En particular, se analizaron capas cartográficas que contienen registros georreferenciados de estructuras hidráulicas existentes, tales como bases de datos institucionales, planos de infraestructura y sistemas de información geográfica.

Para la identificación preliminar de estructuras hidráulicas en el Bloque de Explotación Llanos 34 se integró información proveniente de diferentes fuentes secundarias, entre las cuales se incluyen:

- (I) El inventario preliminar generado durante una visita técnica realizada al área de estudio en el marco del proyecto AQ180 ejecutado por Aqualogs para GeoPark (marzo de 2024).
- (II) El documento titulado “Inventario de Puentes, Box Culvert y Alcantarillas – Vías Internas y de Acceso a Locaciones, Bloque Llanos-34”, que contiene información recopilada en junio y diciembre de 2024, elaborado por GeoPark.
- (III) La cartografía de infraestructura asociada al archivo geoespacial GDB_EIALL87_OrigenUnico_InfoAdicANLA correspondiente al año 2021, de GeoPark.
- (IV) Información Geográfica del Modelo de Almacenamiento Geográfico del Informe de Cumplimiento Ambiental – ICA 16 del Bloque Llanos 34.

Adicionalmente, se realizó un ejercicio de reconocimiento visual sobre el insumo topográfico, basado en la interpretación de rasgos geomorfológicos indicativos de posibles obras de drenaje o control hidráulico. Vale la pena destacar que la información secundaria utilizada fue levantada en diferentes temporalidades y para diferentes polígonos de estudio por lo que la información recopilada es netamente de referencia. Como resultado de la integración de estas fuentes, se identificaron inicialmente 780 posibles estructuras hidráulicas asociadas a las vías públicas, privadas y del proyecto existentes en el área de estudio. La distribución espacial de estas estructuras se presenta en la **Figura 2-2**.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

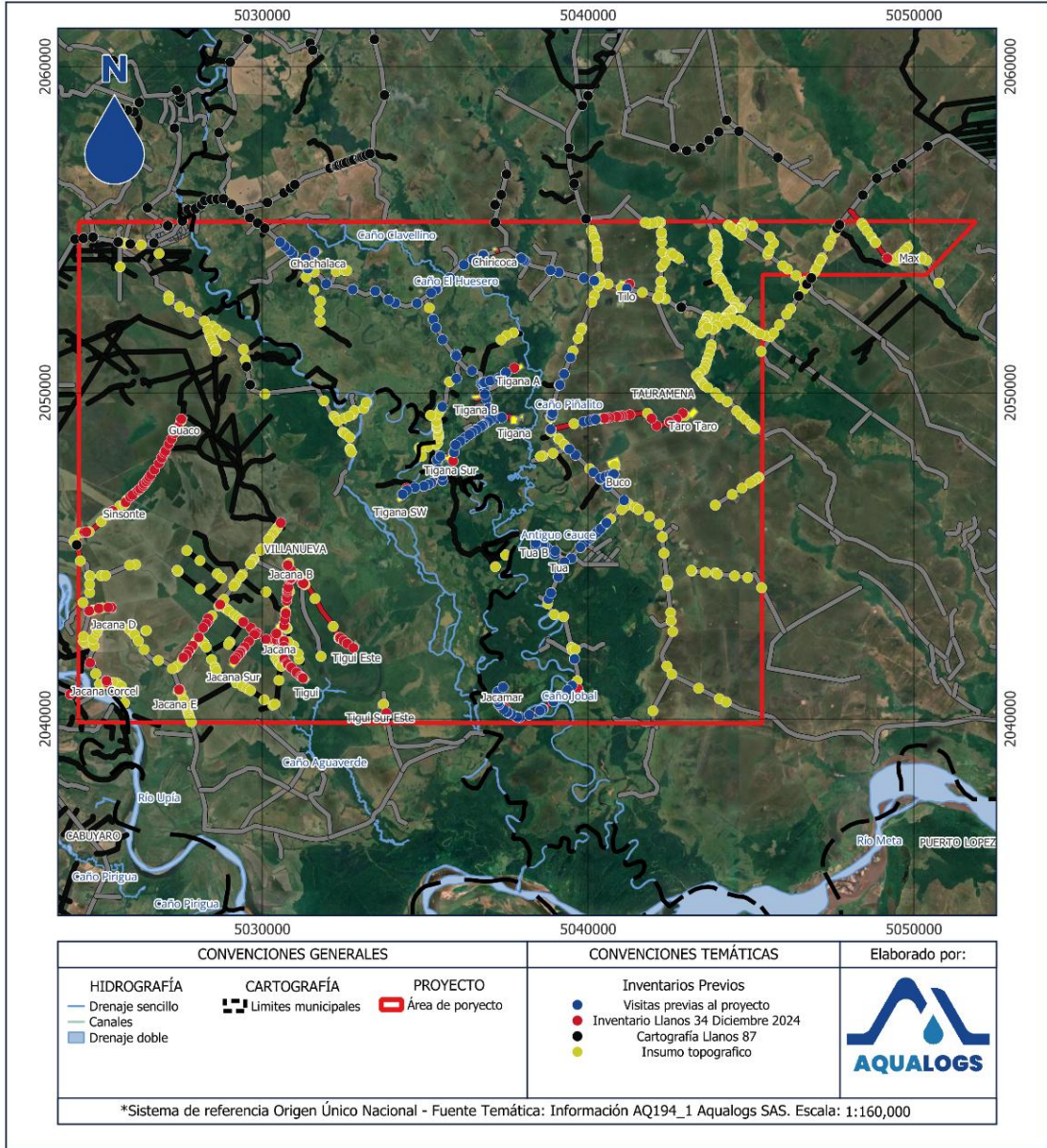


Figura 2-2. Inventarios viales.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Del total de estructuras identificadas con la información secundaria, 149 corresponden a registros obtenidos durante visitas previas al proyecto; 232 provienen de los inventarios elaborados para el Bloque Llanos 34; 128 fueron extraídas de la cartografía asociada al Estudio de Impacto Ambiental del Bloque Llanos 87 (estos 3 insumos presentan duplicidades entre sí); 599 fueron identificadas a partir del análisis del insumo topográfico. Finalmente se establecieron 586 estructuras corroboradas con las visitas de campo efectuadas en el marco del presente estudio y sobre lo cual se ahonda en el numeral 2.2.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

Posterior a la identificación preliminar de las posibles estructuras hidráulicas dentro del área de estudio, se procedió a la revisión de la cartografía vial correspondiente al área y sus alrededores. Esta actividad tuvo como objetivo principal la planificación de las rutas de levantamiento en campo, optimizando la cobertura y accesibilidad a los puntos de interés. Adicionalmente, se buscó identificar vías cercanas que pudieran albergar infraestructura hidráulica con capacidad de influir en el comportamiento hidrodinámico de las inundaciones dentro del área de estudio. En la **Figura 2-3** se presentan las vías identificadas en este análisis.

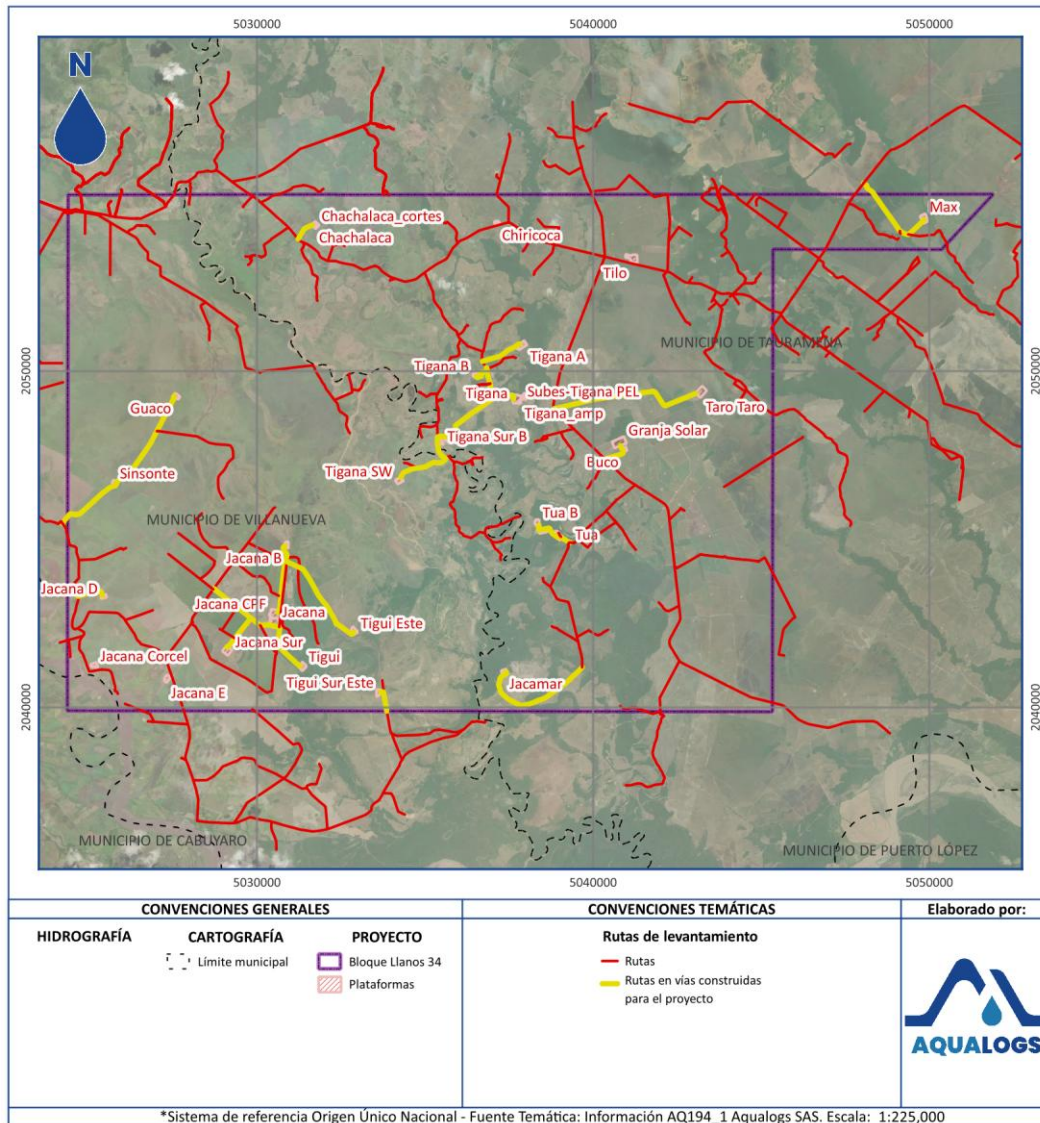


Figura 2-3. Rutas de levantamiento.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

En función del análisis previo, se estimó un recorrido total aproximado de 529 km de vías, abarcando tanto el interior como las zonas aledañas al área de estudio. Para la ejecución de esta actividad se

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

programó un tiempo estimado de 13 días, durante los cuales se contempló la cobertura completa de las vías identificadas.

La **Figura 2-4** ilustra la programación diaria de los recorridos, mostrando la codificación por color utilizada para distinguir los tramos de vía según el día de visita durante la campaña de levantamiento de estructuras hidráulicas.

Dentro de este periodo también se incluyó la gestión y obtención de los permisos de acceso a vías privadas, así como la recopilación *in situ* de información técnica de las estructuras observadas, incluyendo sus dimensiones, tipología, material constructivo y estado de conservación.

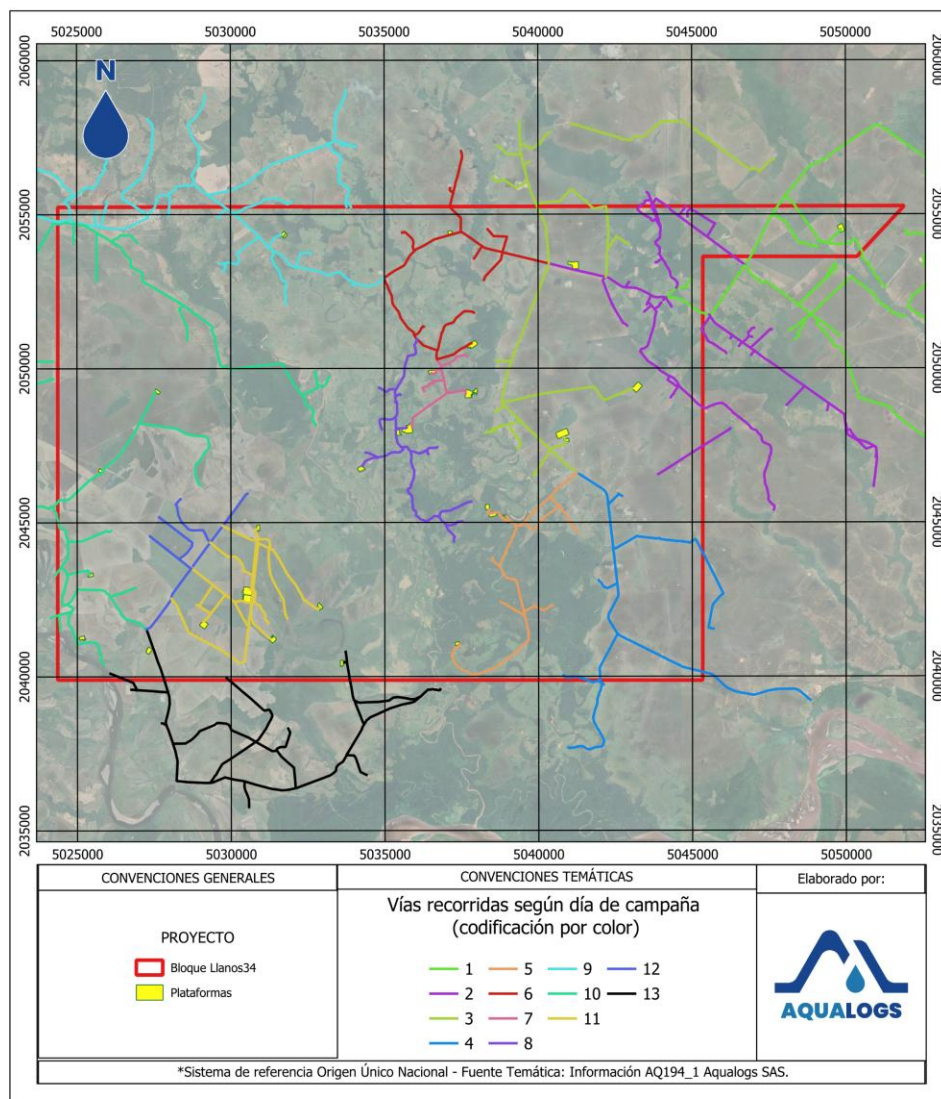


Figura 2-4. Vías recorridas clasificadas por día de campaña.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

2.1.2. Comisiones de trabajo

Con el fin de ejecutar el levantamiento de la infraestructura hidráulica presente en el área de estudio dentro del tiempo previsto, se conformó una única comisión de trabajo responsable de las actividades de campo. Las funciones asignadas a esta comisión incluyeron el desplazamiento entre las diferentes estructuras previamente identificadas, la recopilación detallada de sus características físicas, así como el diligenciamiento de los formatos establecidos para el registro estandarizado de la información.

En la **Tabla 2-1** se presentan los integrantes de la comisión encargada de la toma de datos en campo.

Tabla 2-1. Comisión en campo.

Cant.	Personal	Actividad
2	Ingeniero de proyectos	Responsable de la identificación in situ de las estructuras hidráulicas localizadas en el área de estudio, así como del levantamiento de sus características técnicas, incluyendo dimensiones, tipología y material constructivo. Adicionalmente, esta función contempla la socialización con los pobladores locales respecto a los objetivos y alcances de esta actividad, promoviendo la colaboración y el acceso a la infraestructura localizada en predios privados. Asimismo, se incluye la identificación de estructuras no accesibles mediante inspección directa, utilizando para ello sobrevuelos con dron u otros medios de observación remota, con el fin de complementar la cobertura y garantizar la integralidad del inventario.
1	Conductor	Desplazamiento terrestre entre las distintas infraestructuras hidráulicas previamente identificadas y aquellas observadas durante el recorrido en campo, con el propósito de garantizar la cobertura total del área de estudio y la recolección in situ de información técnica relevante. Este transporte se realizó siguiendo las rutas planificadas sobre la red vial disponible, permitiendo el acceso eficiente a cada punto de interés para la inspección, caracterización y registro de las estructuras.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

De igual forma, para la adecuada ejecución de las actividades de campo, se requirieron los materiales y equipos detallados en la **Tabla 2-2**.

Tabla 2-2. Materiales y herramientas.

Cant.	Material	Descripción
1	Camioneta	Principal medio de transporte.
1	Decámetro	Medición de longitudes.
1	Regleta de referencia	Regleta de referencias con marcas cada 20 centímetros, permitiendo la documentación fotográfica de las mediciones. Ver Figura 2-5 .
	GPS	Para georreferenciación de cada infraestructura y registro fotográfico
1	Dron	Instrumento de apoyo para la identificación de estructuras en zonas de difícil acceso

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark



Figura 2-5. Referencia visual levantamiento en campo

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

**El registro fotográfico de cada estructura se encuentra georreferenciado y en el Anexo A1 A1_LevantamientoCampo\Formato se encuentran los formatos de cada estructura con sus respectivas coordenadas.*

2.1.3. Formato estructuras

En el presente capítulo se describen los formatos empleados para la documentación de las estructuras hidráulicas identificadas durante la campaña de campo. Estos instrumentos, cuyos diseños se presentan en el Anexo (ANEXOS\A1_LevantamientoCampo\Formato), fueron elaborados para recopilar de manera sistemática y estandarizada la información técnica necesaria para la modelación hidráulica. La utilización de estos formatos (**Tabla 2-3**) garantiza la trazabilidad de los registros, facilita su integración en bases de datos geospaciales y asegura la consistencia de la información requerida para la representación precisa de las condiciones del sistema en el modelo numérico.

Los formatos definidos corresponden a tres categorías principales:

1. Alcantarillas: Incluye datos como el diámetro de la estructura y material de construcción.
2. Box culverts: Contiene información sobre sus dimensiones, registrando altura y ancho de la sección.
3. Puentes y otras estructuras: Se documentan elementos como puentes, pontones, quiebrapatas y estructuras artesanales.

Tabla 2-3. Ejemplo de formatos de levantamiento

Alcantarillas			Box culverts			Puentes y otros		
 Formato de toma de datos - obras hidráulicas AQ194_1_F01			 Formato de toma de datos - obras hidráulicas AQ194_1_F01			 Formato de toma de datos - obras hidráulicas AQ194_1_F01		
Fecha (dd/mm/aa) Coordenadas Fotografía 			Fecha (dd/mm/aa) Coordenadas Fotografía 			Fecha (dd/mm/aa) Coordenadas Fotografía 		
Código Estructura Número de tuberías Diámetro (Pulgadas) Material Estado			Código Estructura Número de tuberías Alto (m) Ancho (m) Material Estado			Código Estructura Estado		
Información de campo: Fecha del levantamiento, Coordenadas en origen Nacional y registro fotográfico. Parámetros: Material, Número de Tuberías, Elevación en el insumo topográfico y Diámetro en pulgadas. Implantación en el modelo: En el modelo la alcantarilla se implantará como se presentan en el capítulo siguiente. Variando los valores determinados en el formato, así: LRG: 0.026m (32 in) HAUT1: 0.026m (32 in) HAUT1: 0.026m (32 in) CLP: 0 LBUS: 0.014 * L / 0.026m (32 in) FRIC: 0.014 CIRC: 1 (Círculo) (Se incluirán dos veces estos valores, ya que, se trata de una alcantarilla doble)			Información de campo: Fecha del levantamiento, Coordenadas en origen Nacional y registro fotográfico. Parámetros: Material, Número de Tuberías, Elevación en el insumo topográfico, Alto y Ancho en metros. Implantación en el modelo: En el modelo la alcantarilla se implantará como se presentan en el capítulo siguiente. Variando los valores determinados en el formato, así: LRG: 2.5 m HAUT1: 2 m HAUT1: 2 m CLP: 0 LBUS: 0.014 * L / 0.026m (32 in) FRIC: 0.014 CIRC: 0 (Rectángulo)			Información de campo: Fecha del levantamiento, Coordenadas en origen Nacional y registro fotográfico Parámetros: No se toman por el método de implementación Implantación en el modelo: Se opta por removerlo del insumo topográfico de ser necesario.		

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

2.2. Resultados de campos

El levantamiento de información de estructuras hidráulicas se realizó durante un período de 10 días, en el cual se identificaron un total de 586 estructuras. En la **Tabla 2-4** se presenta discriminadamente las diferentes estructuras encontradas.

Tabla 2-4. Resultados de las estructuras hidráulicas.

Estructura hidráulica	Cantidad
Alcantarilla	453
Box culvert	46
Puentes	65

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

Estructuras artesanales	14
Quiebrapatas	8

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Los formatos de registro correspondientes a estas estructuras se encuentran consolidados en el ANEXOS\A1_LevantamientoCampo. En la **Figura 2-6** se presenta un mapa con la ubicación geográfica de las estructuras inventariadas, como insumo clave para su incorporación en el modelo.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEOPARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

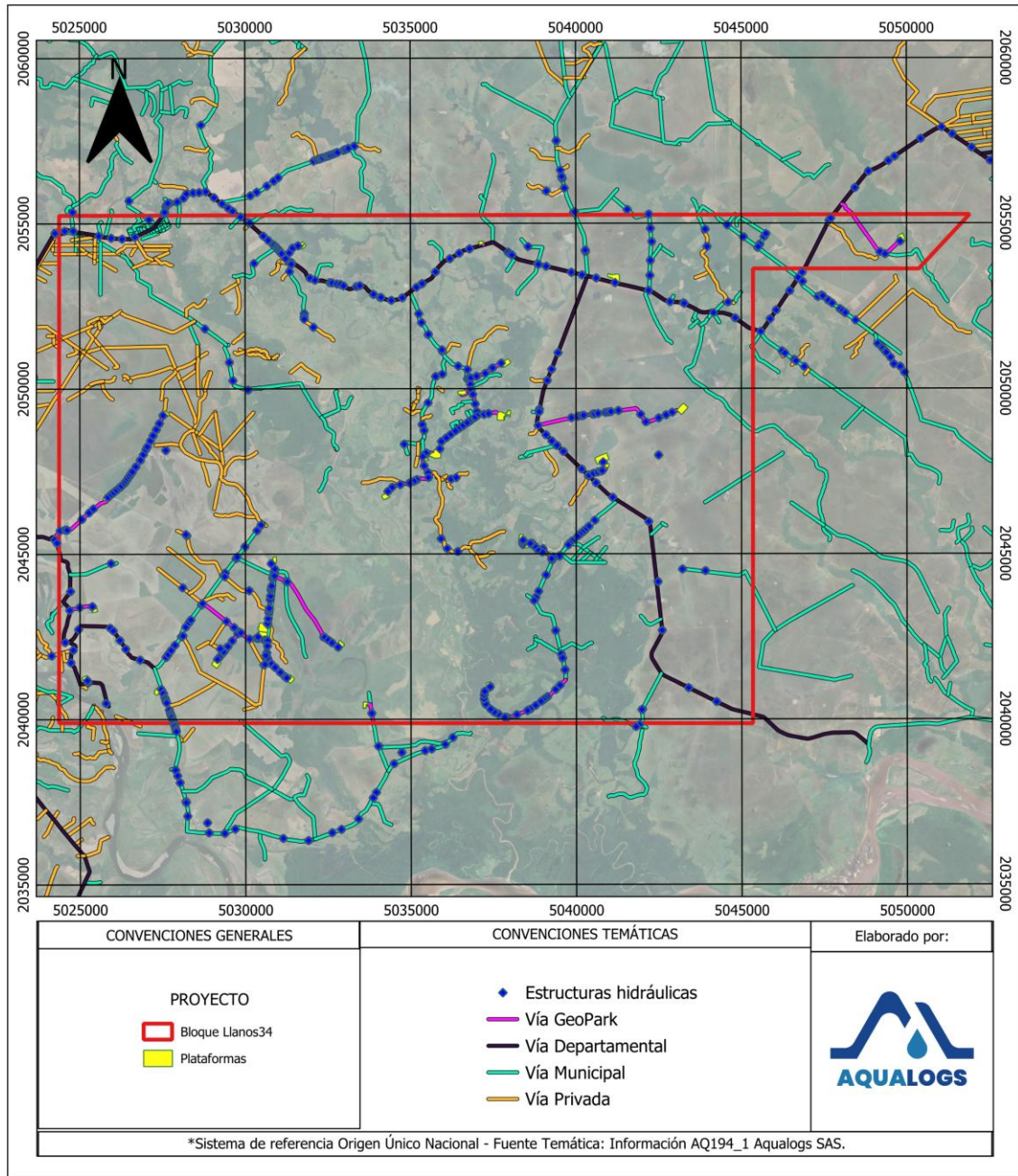


Figura 2-6. Inventario de estructuras levantado.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

3. Modelación hidráulica

3.1. Marco teórico

La modelación hidráulica es una herramienta matemática que permite evaluar el comportamiento y movimiento del agua sobre un territorio determinado, a partir de las condiciones climáticas, hidrológicas y geomorfológicas del terreno. Esta técnica se fundamenta en la aplicación de principios físicos, particularmente en las leyes de conservación de la masa y del momento (momentum), que gobiernan el flujo del agua en medios naturales o artificiales.

Mediante la solución de ecuaciones diferenciales que representan dichos principios, es posible simular con alta precisión la dinámica del agua en cauces, planicies de inundación y estructuras hidráulicas, permitiendo así analizar escenarios de escorrentía superficial para la identificación de zonas de inundación.

Con el propósito de presentar los principios, limitaciones y características consideradas en el desarrollo de la modelación hidráulica, el presente capítulo se estructura en cuatro secciones principales. En primer lugar, se describe el modelo hidráulico, seguido del proceso de generación del mallado y las particularidades geométricas asociadas. Posteriormente, se detallan las condiciones de contorno implementadas, incluyendo los coeficientes de rugosidad y los tipos de fronteras aplicadas. Finalmente, se presenta el modelo hidráulico seleccionado, con énfasis en su formulación matemática, supuestos de base y adecuación al contexto físico del área de estudio.

3.1.1. Modelo hidráulico

Para evaluar el comportamiento de las inundaciones en el área de estudio, se hizo uso de las ecuaciones de Saint-Venant en dos dimensiones (2D). Estas ecuaciones se derivan de los principios de conservación de la masa, mediante la ecuación de continuidad, y de la conservación del momento lineal, representado por las ecuaciones de movimiento del flujo (Hervouet, 2007). La formulación bidimensional permite modelar de manera más precisa la distribución espacial de la profundidad y la velocidad del agua, considerando tanto las variaciones en dirección longitudinal como transversal del flujo.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \cdot \nabla(h) + h * \text{div}(u) = S_h \text{ [Ecuación de continuidad]}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla(u) = -g * \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \text{div}(h * v_t * \nabla u) \text{ [Ecuación de momento } x]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \nabla(v) = -g * \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \text{div}(h * v_t * \nabla v) \text{ [Ecuación de momento } y]$$

Donde:

- h (m) profundidad del agua.
- u,v (m/s) componente de velocidad.
- g (m/s²) aceleración de la gravedad.
- v_t (m²/s) coeficiente de difusión del momento (momentum).

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

- Z (msnm) elevación del terreno.
- t (s) tiempo.
- x, y (m) coordenadas espaciales.
- S_h (m/s) Fuentes y sumideros del fluido.
- S_x y S_y (m/s²) Términos fuente para el viento, la fuerza de Coriolis, fricción del lecho y otras fuentes y sumideros de momento.

La resolución de las ecuaciones de Saint Venant se lleva a cabo mediante métodos numéricos que permiten aproximar su solución en los puntos discretizados del dominio de modelación. Esta discretización puede realizarse mediante diferentes enfoques, entre los cuales los más utilizados son el método de diferencias finitas, el método de elementos finitos y el método de volúmenes finitos. La elección del método específico depende tanto del software empleado como de las condiciones hidráulicas del área de estudio.

Para el tratamiento del término advectivo, los modelos hidráulicos incorporan esquemas numéricos específicos que buscan un adecuado equilibrio entre estabilidad, precisión y conservación de las propiedades físicas del flujo. Estos esquemas, como los de tipo upwind o los basados en Riemann, son especialmente importantes en zonas con gradientes pronunciados o condiciones transitorias.

El componente temporal de la modelación se aborda mediante esquemas de integración explícitos, implícitos o semi-implícitos, los cuales afectan la estabilidad y el tiempo de cálculo. La elección del esquema depende de las condiciones de flujo, la resolución temporal deseada y la relación con el tamaño de celda de la malla, en función del criterio de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL).

En cuanto al tratamiento de la turbulencia, esta se incorpora mediante modelos de cierre que representan los efectos del flujo turbulento sobre el comportamiento hidrodinámico. Los más utilizados en modelación bidimensional son los modelos de viscosidad turbulenta tipo eddy-viscosity, como el modelo de Smagorinsky o el modelo de Prandtl. Estos modelos agregan términos de disipación en las ecuaciones de momento, permitiendo representar de manera simplificada la transferencia de cantidad de movimiento a escalas no resueltas por la malla.

La solución de las ecuaciones discretizadas requiere de un solucionador (solver) que se encarga de resolver el sistema algebraico generado. Este solver puede ser directo o iterativo, y su elección afecta la eficiencia computacional y la convergencia del modelo. La correcta implementación de estas etapas garantiza que el modelo represente de forma adecuada la dinámica del agua en el terreno simulado.

Sin embargo, como se mencionó previamente, cada software de modelación hidráulica implementa uno o varios esquemas numéricos y solucionadores con características particulares para resolver las ecuaciones de flujo. Debido a la diversidad de enfoques disponibles, no se abordará en detalle cada una de las metodologías de solución incorporadas en los distintos programas. En su lugar, se seleccionó, en la medida de lo posible, aquella configuración que proporcione los resultados con menor error numérico y mayor estabilidad, garantizando así la representatividad y confiabilidad de la simulación hidráulica.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEOPARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

Por otro lado, además de considerar las distintas metodologías para la resolución del flujo superficial del agua, dadas las características particulares del problema a abordar, fue necesario establecer el tratamiento de las diferentes estructuras hidráulicas presentes en el área de estudio. Entre estas estructuras se incluyen alcantarillas y box culverts, las cuales representan elementos críticos que pueden modificar significativamente el régimen de flujo, tanto en términos de distribución de caudales como en los niveles de agua aguas arriba y aguas abajo. Por lo tanto, su adecuada representación en el modelo es fundamental para asegurar una simulación hidráulica precisa y coherente con las condiciones reales del terreno.

Este tipo de estructuras hidráulicas presenta un comportamiento hidrodinámico variable, condicionado por las características del flujo en sus extremos. Dependiendo de las condiciones de nivel y energía específica en la entrada y salida, pueden operar bajo régimen de flujo libre, como orificios sumergidos, o en condiciones intermedias influenciadas por la presencia de flujo crítico dentro del conducto.

Dicha variabilidad da lugar a múltiples configuraciones de operación, identificándose al menos seis regímenes hidráulicos distintos, cada uno con su respectiva formulación para el cálculo del caudal. Estas formulaciones consideran parámetros como la pendiente del conducto, la geometría de la estructura, la relación entre los niveles aguas arriba y aguas abajo, y la pérdida de carga por fricción y entrada/salida. En la **Figura 3-1** se muestra un ejemplo de las condiciones mencionadas.

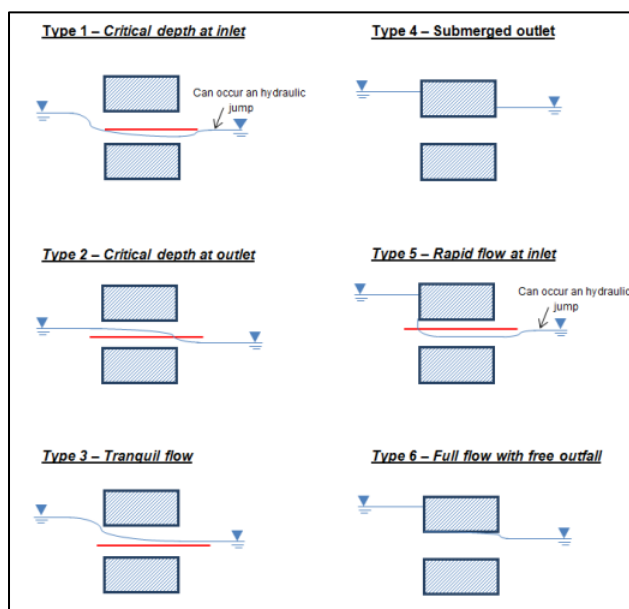


Figura 3-1. Manejo de boxculverts en el modelo.

Fuente. (R., 2018)

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

Para el cálculo del caudal que atraviesa la alcantarilla, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = C_D * A_C * \sqrt{2 * g * f(h, z, v, n, L, R)}$$

Donde:

- Q es el caudal [m³/s]
- C_D es el coeficiente de descarga
- A_C es el área crítica/Área del orificio
- g es la aceleración de la gravedad
- $f(h, z, v, n, L, R_h)$ una función asociada al caso en el cual se encuentre el flujo en la entrada y salida de la alcantarilla y depende de la altura del agua al inicio de la alcantarilla (h), la elevación de la alcantarilla a la entrada (z), la velocidad promedio del flujo (v), el coeficiente de Manning (n), la longitud de la alcantarilla (L) o el radio hidráulico (R_h).

Con base en lo anterior, se seleccionó como software de modelación TELEMAC-2D, debido a que presenta las características técnicas necesarias para llevar a cabo la simulación de eventos de inundación, considerando de manera explícita las estructuras hidráulicas identificadas en el área de estudio, tales como puentes, alcantarillas y canales (Smolders et al., 2016). Además, TELEMAC-2D ha demostrado, en múltiples estudios, un desempeño robusto y resultados confiables, siendo ampliamente utilizado en proyectos de modelación hidráulica a nivel internacional, gracias a su capacidad de resolver las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones mediante métodos numéricos avanzados y su flexibilidad en la definición de condiciones de frontera y parámetros físicos del sistema (R., 2018).

3.1.2. Parametrización de la fricción

La fricción es un parámetro fundamental en la modelación hidráulica, ya que controla la resistencia que ofrece el terreno al movimiento del agua, afectando directamente la distribución de velocidades, la pérdida de energía y, en consecuencia, el transporte de momento dentro del flujo. Este fenómeno se manifiesta como una fuerza opuesta al movimiento, cuya magnitud depende de las características del cauce, como rugosidad, pendiente, vegetación y tipo de suelo.

En este contexto, diversos investigadores han desarrollado formulaciones empíricas y semiempíricas para representar el efecto de la fricción en modelos numéricos. La adecuada representación de este parámetro es esencial para obtener resultados realistas en simulaciones de inundación y transporte en canales naturales o artificiales.

TELEMAC-2D ofrece la posibilidad de calcular la fricción hidráulica mediante seis formulaciones distintas, adaptándose a diferentes condiciones de flujo y características del terreno. Las ecuaciones disponibles en el modelo son: Manning, Strickler, Chézy, Nikuradse, Haaland, y Colebrook-White. Adicionalmente, para el tratamiento específico en las condiciones de frontera, el sistema permite una aproximación logarítmica del perfil de velocidad.

Para incorporar la fricción como una fuerza de resistencia al movimiento del flujo —específicamente como un esfuerzo cortante que actúa en la dirección opuesta a la del flujo— se utiliza el coeficiente de fricción C_f . Este coeficiente representa la relación entre la rugosidad del lecho y la pérdida de

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

energía por fricción. En el caso del uso del coeficiente de Manning, C_f se calcula mediante la siguiente expresión (R., 2018):

$$C_f = \frac{2 * g * n^2}{h^{\frac{1}{3}}}$$

Donde:

- C_f es el coeficiente de fricción hidráulica
- g es la aceleración de la gravedad
- h es la profundidad del flujo
- n es el número de Manning

3.1.3. Malla computacional

La malla computacional corresponde a la discretización espacial del dominio de estudio en elementos geométricos interconectados, usualmente triángulos o cuadriláteros, que permiten representar de forma numérica la superficie topográfica y las condiciones hidráulicas del área. En cada uno de estos elementos se resuelven las ecuaciones de lo que permite calcular las variables hidráulicas, como la velocidad, la profundidad y el caudal del agua, a lo largo del dominio modelado.

Una malla está conformada por un conjunto de elementos geométricos, los cuales, a su vez, se estructuran a partir de vértices (también denominados nodos) y aristas. Los nodos corresponden a puntos con coordenadas espaciales (x, y), en los cuales se almacenan tanto las propiedades necesarias para la resolución de las ecuaciones del modelo como las variables obtenidas del proceso de simulación.

Por su parte, las aristas constituyen los segmentos que conectan los nodos entre sí, definiendo así la forma y continuidad de los elementos. Estas conexiones permiten el intercambio de información entre los nodos vecinos, facilitando la propagación de las variables de flujo y garantizando la coherencia espacial de los cálculos durante la simulación hidráulica. Un ejemplo de malla computacional se muestra en **Figura 3-32**.

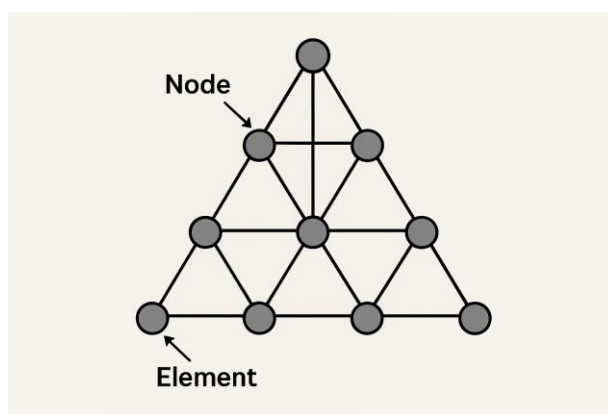


Figura 3-2. Partes del mallado.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

La generación de una malla computacional adecuada es fundamental para lograr una correcta representación de las soluciones hidráulicas en dominios con geometrías complejas, ya sea por las características morfológicas naturales del terreno o por la presencia de estructuras hidráulicas. Una malla bien diseñada permite ajustar con precisión el contorno del terreno, lo cual es esencial para captar los detalles relevantes que influyen en el comportamiento del flujo.

Asimismo, la calidad de la malla incide directamente en la estabilidad numérica y la precisión de los resultados obtenidos. Esto se debe a su influencia en la adecuada resolución de los gradientes de velocidad del flujo y en el cumplimiento del criterio de estabilidad de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL), que establece una relación entre la dimensión espacial de la malla, el paso de tiempo de la simulación y la velocidad del flujo (Chow & Maidment, 1998).

Una malla que cumpla con los criterios de calidad geométrica y de resolución espacial adecuados garantiza una modelación hidráulica confiable y eficiente, al permitir una correcta representación del dominio físico y de las condiciones de contorno. Además, la cantidad de nodos y elementos que componen la malla incide directamente en el tiempo de cálculo requerido, por lo que su diseño debe buscar un equilibrio entre la precisión del modelo y la eficiencia computacional. De esta forma, es posible construir un modelo robusto y representativo de los procesos hidrodinámicos, minimizando al mismo tiempo la carga computacional innecesaria (Hervouet, 2007).

3.1.4. Fuentes, sumideros y condiciones de frontera

Existen diversas fuentes y sumideros que generan cambios en el almacenamiento del agua dentro del dominio de modelación de un modelo hidráulico. Estas variaciones pueden deberse a múltiples procesos hidrológicos e intervenciones antrópicas, entre los que se destacan: la entrada de agua a través de los cauces que delimitan el dominio, la salida de agua mediante dichos cauces, el aporte directo de precipitación sobre la superficie del terreno, la pérdida de agua por evaporación y procesos de infiltración, el consumo de agua por parte de las poblaciones presentes en el área de estudio, así como posibles transvases provenientes de sectores externos al dominio modelado.

Cada una de estas fuentes y sumideros representa una alteración en el balance hídrico del sistema y, por tanto, deben ser considerados dentro del modelo hidráulico, siempre que su efecto sobre el almacenamiento de agua en el dominio no sea despreciable.

Para el caso específico del área de estudio, se consideraron de forma prioritaria las siguientes fuentes y sumideros en la modelación hidráulica: la entrada de agua a través de los distintos cauces que ingresan al dominio, el aporte hídrico derivado de la precipitación directa sobre la superficie, y la salida de agua mediante los cauces que drenan fuera del área modelada.

Por otro lado, otras posibles fuentes y sumideros, como el tránsito de agua subterránea, la evaporación y la evapotranspiración, se consideraron despreciables para la modelación de eventos de tormenta, dado que su magnitud e influencia temporal resultan menores frente a los procesos hidrológicos dominantes durante este tipo de eventos.

Con base en lo anterior, las condiciones de frontera establecidas para la modelación hidráulica se clasifican en dos tipos principales: (i) caudales impuestos (condiciones tipo Dirichlet), los cuales se

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

derivan de los resultados obtenidos a partir de la modelación hidrológica desarrollada para los eventos de diseño seleccionados, y (ii) condiciones de tipo libre, utilizadas en los sectores del modelo donde no se dispone de información suficiente para imponer condiciones específicas o donde se permite la libre salida o entrada del flujo según el comportamiento interno del sistema.

Adicionalmente, se incorporó la precipitación directa como una fuente externa en aquellas áreas del dominio donde no se identifica un cauce definido, permitiendo así representar adecuadamente el aporte hídrico superficial asociado a los eventos de lluvia. Esta estrategia garantizó una aproximación coherente con la dinámica hidrológica e hidráulica del área de estudio.

3.2. Metodología de modelación

Para llevar a cabo la modelación de los diferentes escenarios hidrodinámicos es necesario establecer una metodología integral que permita representar con precisión el comportamiento del flujo superficial. En primera instancia, se parte del modelo hidrológico, el cual suministra los caudales de entrada para cada uno de los eventos de diseño. Posteriormente, se incorpora el estudio de coberturas del suelo, que permite asignar las zonas de rugosidad mediante la definición de coeficientes de fricción, esenciales para simular la resistencia al flujo. Adicionalmente, se integró el insumo topográfico, el cual proporciona la base geométrica del terreno y permite representar las variaciones altimétricas requeridas para los distintos escenarios.

De igual forma, se consideraron la localización de los cuerpos de agua, las principales vías de comunicación y las estructuras hidráulicas presentes (como puentes, alcantarillas y box culverts), con el fin de definir adecuadamente la geometría y el refinamiento de la malla computacional. Finalmente, se incorporaron los testimonios de la población local como insumo cualitativo para la validación del modelo, permitiendo contrastar los resultados obtenidos con eventos históricos conocidos y así ajustar los parámetros de simulación de manera más realista. La adecuada relación de los insumos y los resultados esperados se presentan en **Figura 3-3**.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

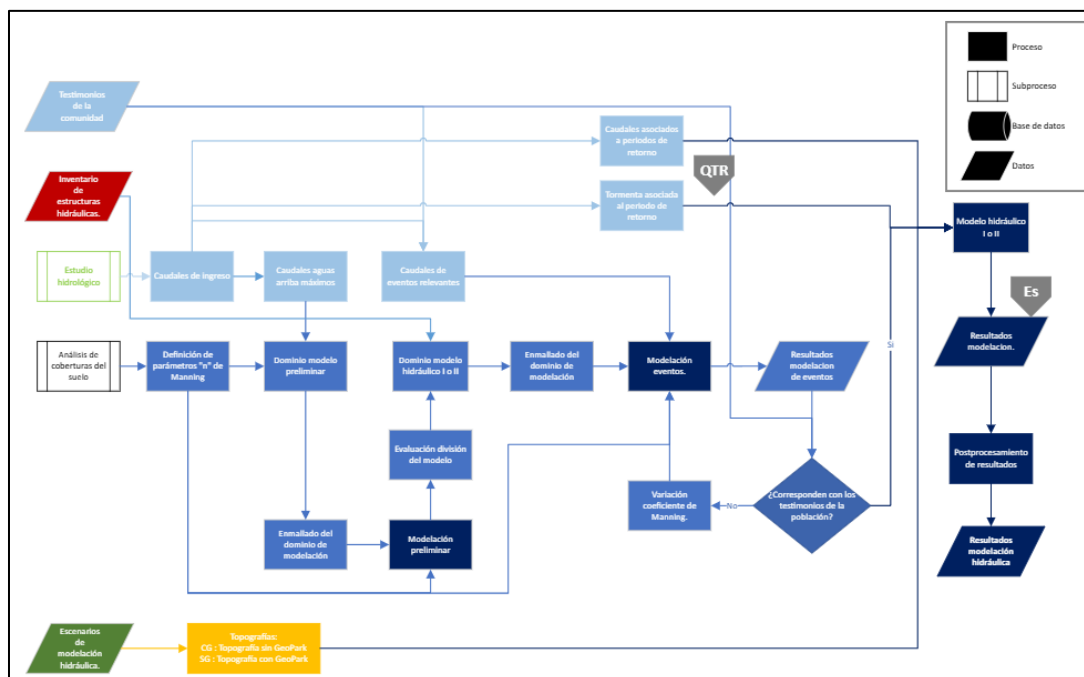


Figura 3-3. Metodología de modelación hidráulica.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

3.2.1. Recursos disponibles

Para la construcción del modelo hidráulico del área de estudio se contaba de diversas fuentes de información técnica que respaldan el desarrollo de este. Entre estas se incluye:

- La modelación hidrológica previamente elaborada para las cuencas situadas aguas arriba del sector de interés, descrita en el Tomo 3 (03_Análisis hidroclimatológico). La información obtenida a partir de las visitas de campo y las encuestas desarrolladas a los propietarios/habitantes del área modelada.
- El inventario detallado de las estructuras hidráulicas presentes en el área.
- La caracterización de las coberturas del suelo.
- Los escenarios definidos para la modelación hidráulica.

Estos elementos constituyen la base para la parametrización y validación del modelo propuesto.

Como se mencionó anteriormente, para el presente estudio fue necesario desarrollar un modelo hidrológico para las cuencas aguas arriba del área de modelación, con el objetivo de generar los caudales resultantes de las tormentas de diseño localizadas en las cuencas.

Los modelos desarrollados permitieron estimar la respuesta hidrológica del sistema ante eventos extremos, siendo los caudales generados los principales insumos para la modelación hidráulica posterior. El área de estudio que abarca el modelo hidrológico se observa en **Figura 3-4**. Es preciso recordar que para la estimación del caudal del río Upía en el punto de entrada del modelo hidráulico se utilizaron los registros hidrométricos de dos estaciones del IDEAM correspondientes a la estación

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

GUAICARAMO - AUT [35107040], ubicada aguas arriba del área de modelación, y la segunda a la estación VISO EL [35107020], localizada dentro de la zona de estudio. El detalle de esta estimación se presenta en el numeral 5.2 del informe “03_ANALISIS_HIDROCLIMATOLOGICO” del presente estudio.

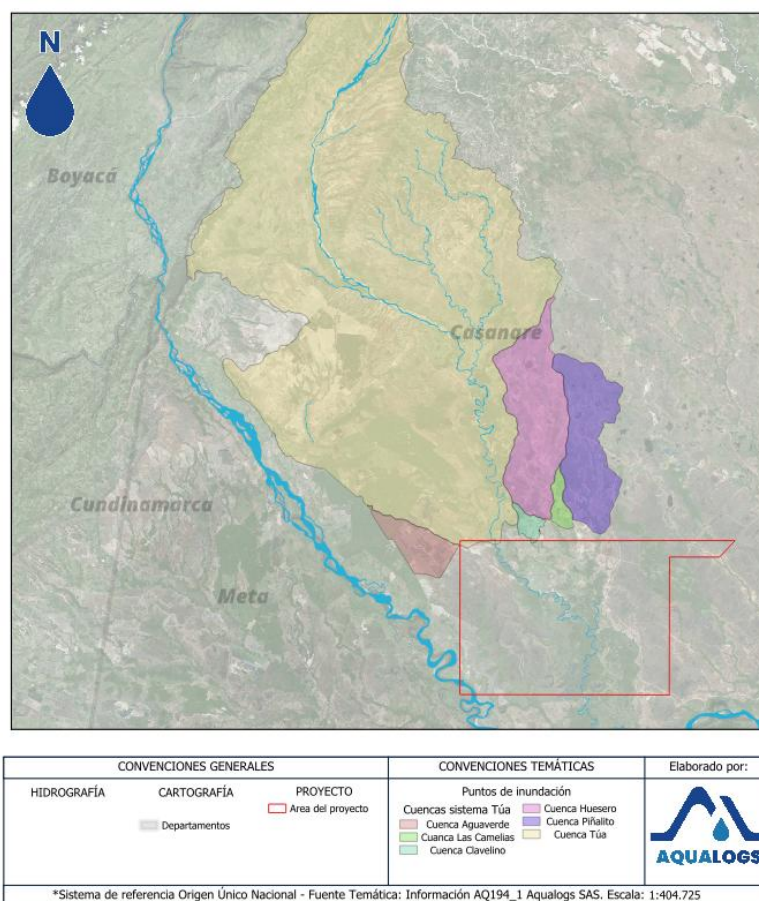


Figura 3-4. Dominio de modelación hidrológica.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

De forma similar, también se contó con la información obtenida a partir de los testimonios recolectados durante el trabajo de campo. Estos testimonios proporcionan un conjunto de fechas y estimaciones de profundidades asociadas a eventos de inundación significativos, los cuales fueron recordados por los habitantes locales debido a su impacto y magnitud. Esta información resulta útil para la validación cualitativa del modelo hidráulico, al permitir contrastar los resultados de la simulación con la experiencia empírica de las comunidades.

Asimismo, como resultado de la visita técnica al área de estudio, se elaboró un inventario detallado de las estructuras hidráulicas presentes en el sector. Este inventario incluye la localización geográfica precisa de cada infraestructura, así como sus principales características geométricas, tales como diámetro, ancho, largo y longitud. Además, se recopiló información sobre el material

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

constructivo de cada estructura y otras propiedades relevantes para su adecuada representación en el modelo hidráulico.

3.2.2. Planteamiento de escenarios

A partir de los insumos presentados en el capítulo anterior, se definen los escenarios hidráulicos. En primera medida, se tuvieron en cuenta las modificaciones antrópicas presentes en el área de estudio, las cuales generan alteraciones en la topografía y, por ende, en el comportamiento del flujo. Para ello, se plantearon dos escenarios:

1. Un escenario base (con infraestructura de GeoPark) que incorpora la infraestructura vial, facilidades y estructuras hidráulicas (como alcantarillas, puentes y box culverts).
2. Un escenario alternativo (sin infraestructura de GeoPark) en el que dichas estructuras son removidas para analizar el comportamiento natural del sistema hidrológico.

En **Figura 3-5**, se presenta una representación gráfica que ilustra ambos escenarios.

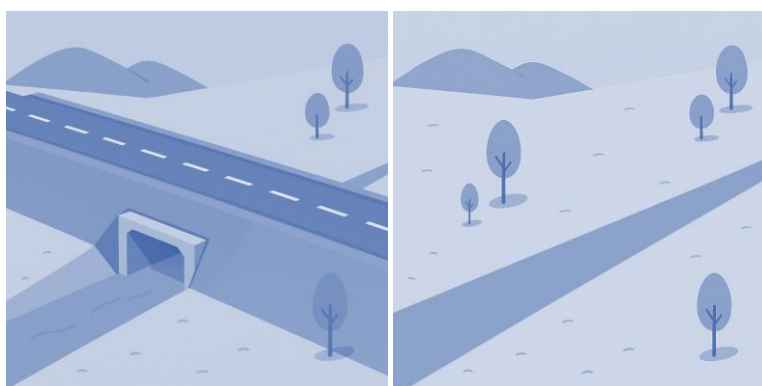


Figura 3-5. Esquema gráfico de escenarios topográficos.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Desde un enfoque técnico, se consideran las distintas condiciones de caudal que pueden presentarse en el área de estudio, las cuales deben ser evaluadas como escenarios hidrológicos representativos. La selección de dichos escenarios se realiza en cumplimiento de los requerimientos establecidos por la Autoridad en la Resolución 1089 de junio de 2024, resuelta por la resolución 2330 de octubre de 2024, específicamente en el artículo primero, numeral 4, el cual hace referencia a, que el análisis contemple caudales asociados a diferentes probabilidades de excedencia. Estas probabilidades se expresan mediante periodos de retorno de 2.33 años (retorno frecuente, evento ordinario), 5 años, 10 años, 20 años, 50 años y 100 años, con el fin de caracterizar el comportamiento del régimen hidrológico tanto en condiciones ordinarias como extremas de inundación.

Adicionalmente, se consideraron las alteraciones en la climatología local derivadas del cambio climático, dado su impacto potencial sobre el régimen hidrológico y la disponibilidad de recursos hídricos. Para ello, se incorporó en el análisis la evaluación de escenarios climáticos futuros definidos por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) -SSP2-.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

En la **Tabla 3-1**, se presentan los escenarios que se usaron en la modelación. Cada escenario cuenta con un identificador que integra las principales características que lo definen.

La primera parte del identificador corresponde al periodo de retorno hidrológico utilizado, representado por la letra T (por ejemplo, T20 = tiempo de retorno de 20 años).

La segunda parte indica la condición climatológica considerada, diferenciando entre los escenarios con cambio climático (CC) y aquellos que emplean la climatología histórica sin modificaciones (SC).

Finalmente, la tercera parte del identificador especifica la condición topográfica aplicada en el análisis: CG cuando se incorpora la topografía asociada a la infraestructura de GeoPark, y SG cuando dicha condición se omite.

Tabla 3-1. Escenarios de modelación hidráulica.

	Escenario			Identificador
	Periodo de retorno	Climatología	Condición topográfica	
1	T2.33	Histórico	Con infraestructura	T233_SC_CG
2	T5	Histórico	Con infraestructura	T5_SC_CG
3	T10	Histórico	Con infraestructura	T10_SC_CG
4	T20	Histórico	Con infraestructura	T20_SC_CG
5	T50	Histórico	Con infraestructura	T50_SC_CG
6	T100	Histórico	Con infraestructura	T100_SC_CG
7	T2.33	Cambio climático	Con infraestructura	T233_CC_CG
8	T5	Cambio climático	Con infraestructura	T5_CC_CG
9	T10	Cambio climático	Con infraestructura	T10_CC_CG
10	T20	Cambio climático	Con infraestructura	T20_CC_CG
11	T50	Cambio climático	Con infraestructura	T50_CC_CG
12	T100	Cambio climático	Con infraestructura	T100_CC_CG
13	T2.33	Histórico	Sin infraestructura	T233_SC_SG
14	T5	Histórico	Sin infraestructura	T5_SC_SG
15	T10	Histórico	Sin infraestructura	T10_SC_SG
16	T20	Histórico	Sin infraestructura	T20_SC_SG
17	T50	Histórico	Sin infraestructura	T50_SC_SG
18	T100	Histórico	Sin infraestructura	T100_SC_SG
19	T2.33	Cambio climático	Sin infraestructura	T233_CC_SG
20	T5	Cambio climático	Sin infraestructura	T5_CC_SG
21	T10	Cambio climático	Sin infraestructura	T10_CC_SG
22	T20	Cambio climático	Sin infraestructura	T20_CC_SG
23	T50	Cambio climático	Sin infraestructura	T50_CC_SG
24	T100	Cambio climático	Sin infraestructura	T100_CC_SG

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

3.2.3. Esquema de modelación

Con el fin de garantizar una modelación hidráulica eficiente y confiable sobre el área de estudio, se diseñó un esquema metodológico orientado a optimizar el uso de recursos computacionales, facilitar la verificación del modelo y asegurar la calidad de los resultados obtenidos.

En este contexto, el presente capítulo expone las características consideradas para la delimitación del área de modelación, la descripción de los diferentes modelos hidráulicos implementados para

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

representar adecuadamente las condiciones del área de estudio, así como la metodología empleada para llevar a cabo el proceso de verificación.

Para la delimitación del área de modelación hidráulica se consideraron varios criterios técnicos que aseguraran una adecuada representación de las condiciones hidrológicas y geomorfológicas del área de estudio.

El primer criterio estableció que el área modelada debe incluir al bloque de Explotación Llanos 34, dado que este constituye el objeto principal del análisis y, por tanto, su cobertura (especialmente en zonas con intervención por parte de GeoPark) es indispensable para evaluar los posibles efectos hidrodinámicos dentro de los límites del bloque.

En segundo lugar, se debía garantizar que las planicies de inundación quedasen completamente contenidas dentro del dominio del modelo. Esto evita que se generen cortes artificiales en los espejos de agua durante los eventos de inundación, lo cual podría forzar salidas de flujo no naturales hacia los bordes del modelo, distorsionando la respuesta hidráulica y afectando la confiabilidad de los resultados.

Un tercer criterio se relaciona con la inclusión de las infraestructuras presentes en el entorno, especialmente aquellas de tipo lineal como vías, diques o canales, que actúan como barreras físicas al flujo. Estas estructuras condicionan la extensión y dirección de las inundaciones, por lo que su representación explícita en el modelo fue fundamental para capturar correctamente los límites hidráulicos reales del sistema.

Por último, se consideraron las características morfológicas de las cuencas aportantes. En el caso de cuencas pequeñas o con bajo grado de desarrollo, donde no se identificó un cauce definido, fue necesario complementar la modelación hidráulica con el análisis de variables hidrológicas adicionales, tales como la tormenta de modelación, el flujo base del cauce y el grado de saturación del suelo, a fin de reproducir con mayor fidelidad los procesos de generación y concentración de escorrentía.

Una vez delimitado el dominio de modelación, fue necesario evaluar la metodología de modelación a implementar, considerando tanto la precisión deseada como la eficiencia computacional del proceso. En particular, cuando se trabaja con áreas extensas, el costo computacional asociado puede incrementarse significativamente, en algunos casos superando el de una estrategia basada en la subdivisión del dominio en áreas más pequeñas con modelos independientes. Esta decisión depende de las metodologías numéricas utilizadas, las cuales pueden presentar mejores desempeños en dominios más acotados, optimizando el tiempo de cálculo y el uso de recursos.

3.2.3.1. Dominio de modelación

Con base en lo expuesto previamente, se estableció como área de modelación el polígono naranja de la **Figura 3-6**. Esta definición considera los principales cuerpos hídricos de la zona, incluyendo el río Upía, el caño Aguaverde, el río Túa, así como los caños Camelias, Huesero y Piñalito. Adicionalmente, dentro del polígono se incluyen las estimaciones de caudales correspondientes a los caños Orocucito, Guadualito y Palamarita. El río Meta fue considerado en la modelación

hidráulica, representando su influencia hidrodinámica a través de las condiciones de frontera sur del modelo.

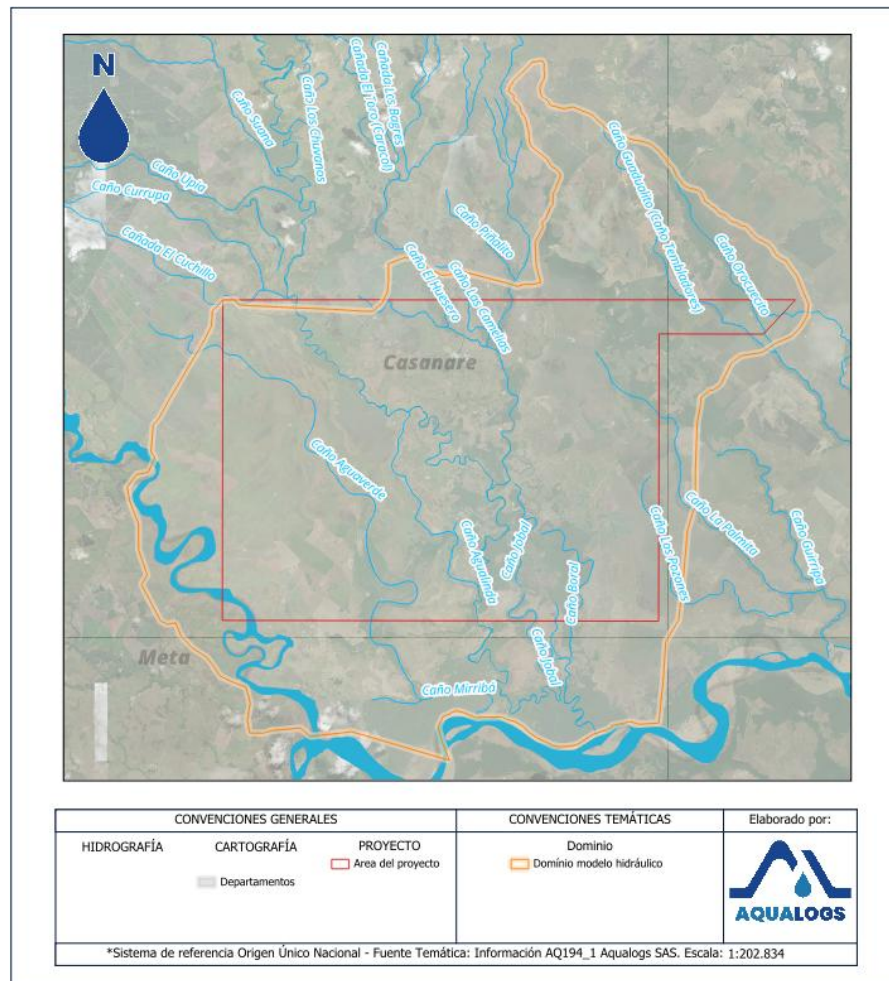


Figura 3-6. Dominio de modelación hidráulica.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

En la **Figura 3-7** se presenta la malla numérica utilizada en el modelo hidráulico para el área de estudio. Se trata de una malla no estructurada de tipo triangular, compuesta por aproximadamente 12.8 millones de elementos y 6.4 millones de nodos, en cada uno de estos puntos se cuenta con una “cota” generando así la superficie de modelación partiendo de una red de modelación. Es de resaltar que en el numeral 5.3.2 del informe “02_CONCEPTUALIZACIÓN_DEL_SISTEMA” del presente estudio, se presenta el detalle de los límites del dominio de modelación y cómo se seleccionó cada uno de estos.

La malla fue objeto de un proceso de revisión y control de calidad geométrica, con el objetivo de minimizar la presencia de triángulos con ángulos excesivos y favorecer una configuración cercana a triángulos equiláteros, lo que mejora la estabilidad numérica del modelo.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

Asimismo, se verificó manualmente que las estructuras hidráulicas y elementos de interés (como vías, cauces y drenajes secundarios) estuvieran representados con al menos tres elementos, garantizando una adecuada resolución espacial y evitando el paso no físico de flujo asociado a una discretización insuficiente (flujos parásitos).

El diseño seleccionado permite representar con mayor fidelidad la topografía y asegura un equilibrio entre detalle espacial, estabilidad numérica y eficiencia computacional.

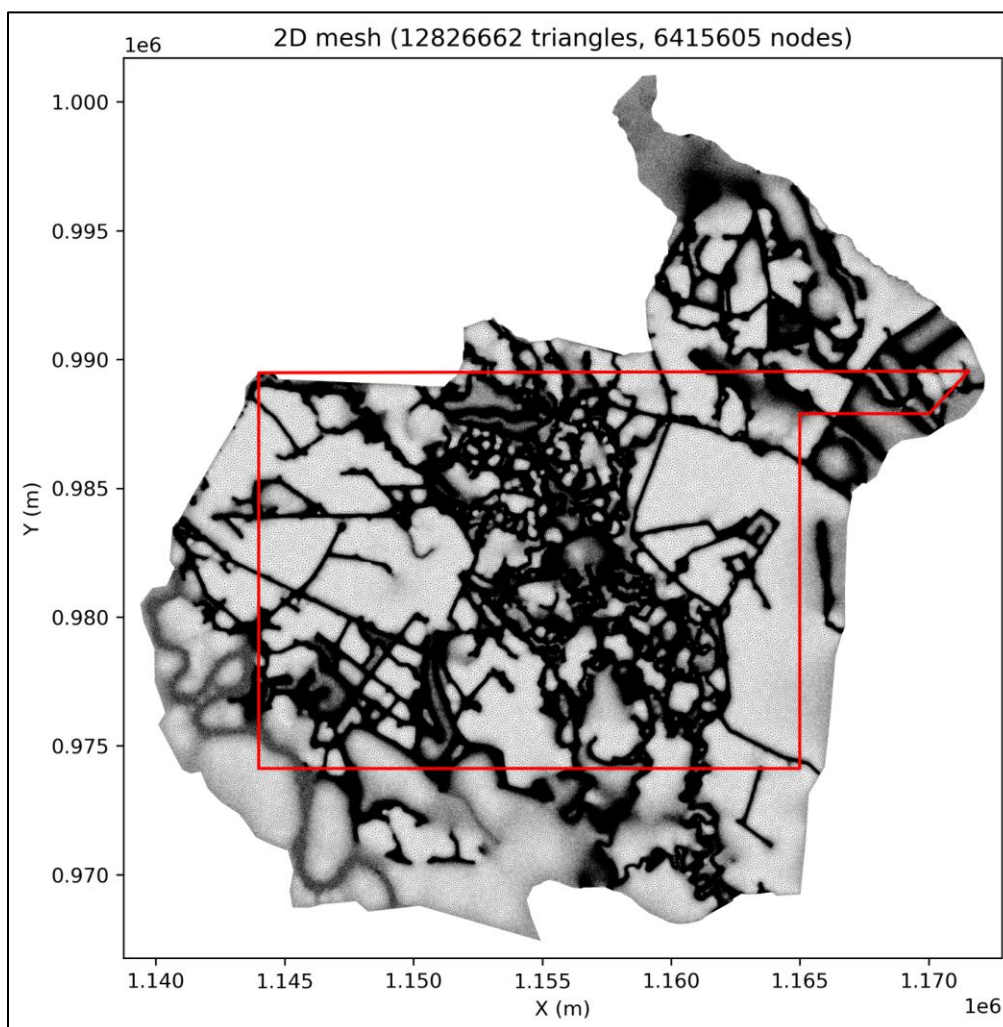


Figura 3-7. Malla de modelo hidráulico.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Con el fin de evaluar la resolución espacial efectiva de la malla, se realizó un análisis estadístico del tamaño medio de los elementos, calculado a partir de la longitud promedio de sus lados. Este

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

procedimiento permite cuantificar la variabilidad de la discretización y verificar la adecuación del refinamiento en las zonas de interés hidráulico.

Como resultado del análisis, se obtuvo una distribución concentrada en tamaños de elemento menores a 2.5 m (**Figura 3-8**), con una longitud media mínima de 0.92 m. Esto refleja un alto grado de refinamiento en las zonas de mayor interés hidráulico. En términos globales, más del 60 % de los elementos presentan longitudes medias inferiores a 5 m, lo que evidencia una resolución espacial fina y homogénea en la mayor parte del dominio. Esta característica contribuye a una representación más precisa del relieve y de las estructuras hidráulicas, favoreciendo la estabilidad numérica y la capacidad del modelo para reproducir gradientes locales de flujo y acumulación.

La configuración seleccionada garantiza una representación detallada del relieve y de las estructuras hidráulicas, permitiendo capturar adecuadamente los gradientes de nivel y los procesos locales de flujo superficial. En consecuencia, la malla puede considerarse adecuada para simulaciones hidráulicas transitorias a escala de infraestructura, combinando precisión geométrica con estabilidad numérica. Cabe aclarar que dentro de la definición de la malla se desarrolló un refinamiento no únicamente en las vías y los cauces, sino también en los canales, generando un sistema que está en capacidad de representar su influencia en las dinámicas de drenaje del área.

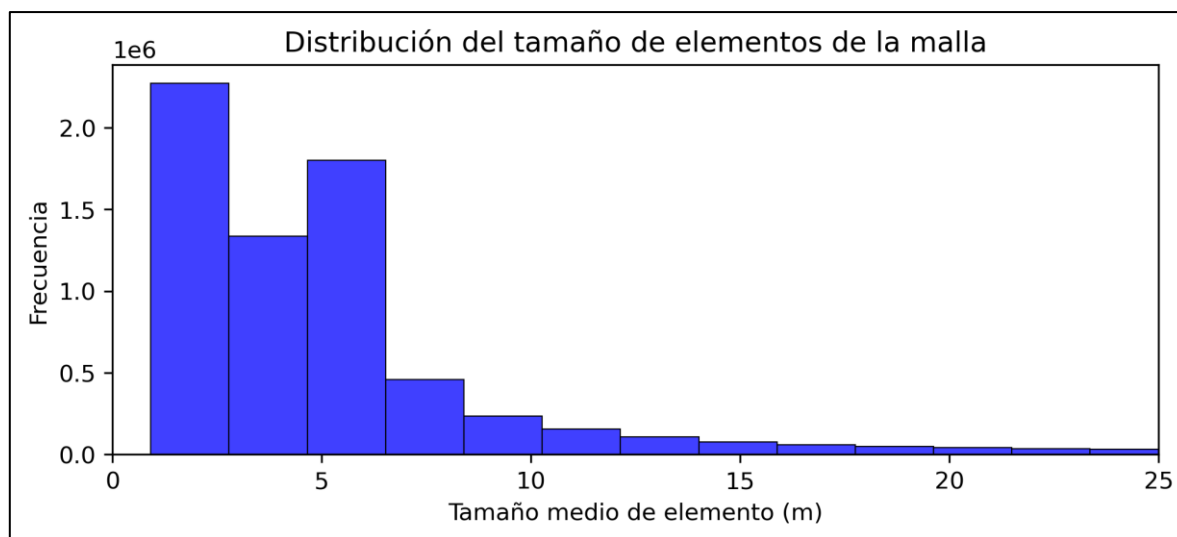


Figura 3-8. Distribución de tamaño medio del elemento

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

3.2.3.2. Condiciones de frontera

Con el fin de modificar y controlar el balance hídrico dentro del dominio, es necesario definir condiciones de frontera de tipo entrada y salida. Estas representan, respectivamente, los lugares por donde ingresa caudal al sistema y los puntos por los cuales se evacua hacia el exterior del dominio.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

En la **Figura 3-9** se ilustran las localizaciones de las condiciones de frontera adoptadas en el presente Estudio, las cuales fueron establecidas en función de la información hidrológica disponible y de la configuración hidráulica de la zona de estudio. Se debe tener en cuenta que, por conservación de la masa de agua en el modelo y un adecuado comportamiento de los flujos, las entradas son caudales (cauces en la frontera norte y tormentas en la superficie del terreno) y las salidas niveles (río Meta en el sur del modelo).

Para observar los valores introducidos en cada una de las fronteras se remite al lector al documento “Hidrología”, correspondiente al capítulo 3 del presente estudio.

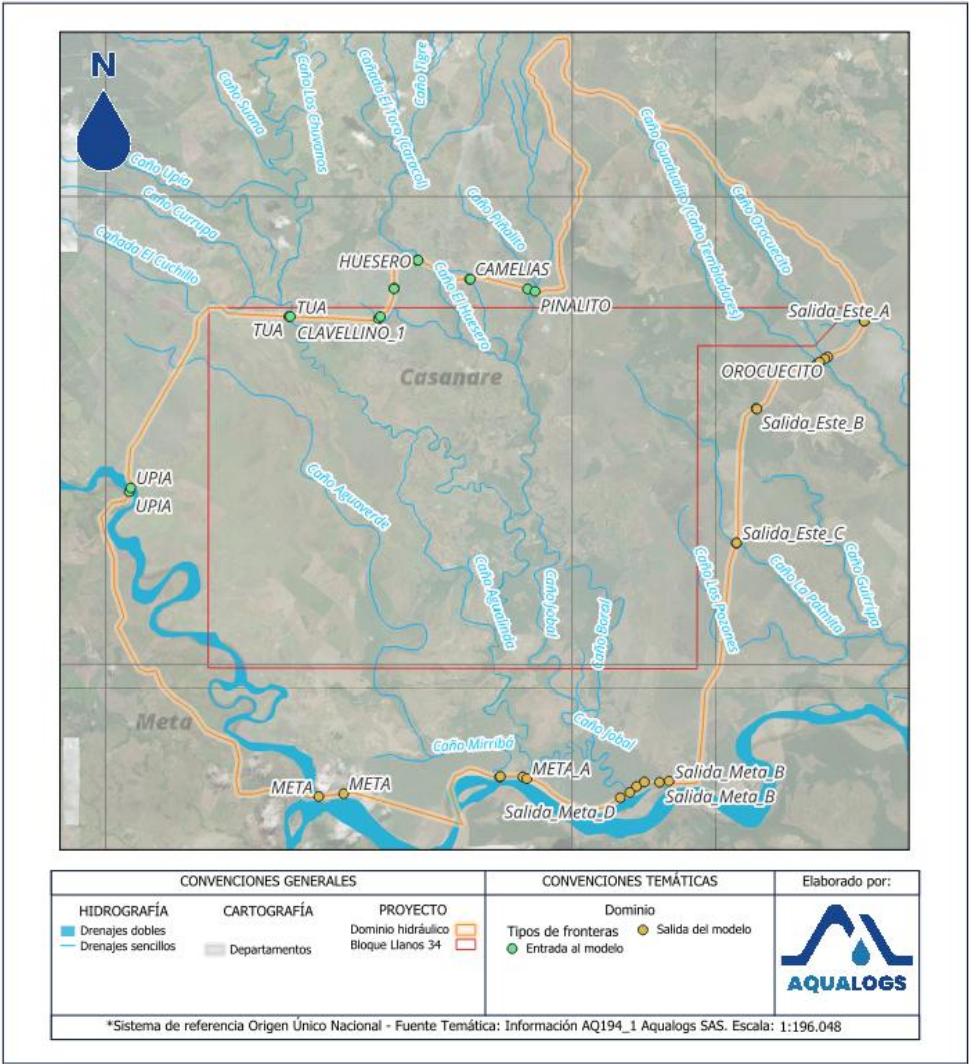


Figura 3-9. Condiciones de frontera de la modelación hidráulica.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Donde las condiciones de frontera son:

Tabla 3-2. Lugares de condición de frontera.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

ID frontera	Tipo	Descripción
TUA	IN	Entrada de caudal asociada al Río Túa
HUESERO	IN	Entrada de caudal asociada al Caño Huesero
CAMELIAS	IN	Entrada de caudal asociada al Caño Camelias
PINALITO	IN	Entrada de caudal asociada al Caño Piñalito
CLAVELLINO_2	IN	Primera entrada de caudal asociada al Caño Clavelino
CLAVELLINO_1	IN	Segunda entrada de caudal asociada al Caño Clavelino
UPIA	IN	Entrada de caudal asociada al Río Upía
GUADUALITO	OUT	Salida asociada al caño Guadualito
META_A	OUT	Desembocadura de uno de los cauces al río Meta
META_B	OUT	Desembocadura de uno de los cauces al río Meta
META	OUT	Desembocadura de uno de los cauces al río Meta
Salida_Este_C	Otras	Salida de uno de los cauces fuera del dominio.
Salida_Meta_C	Otras	Desembocadura de uno de los cauces al río Meta
Salida_Este_B	Otras	Salida de uno de los cauces fuera del dominio.
Salida_Meta_B	Otras	Desembocadura de uno de los cauces al río Meta
Salida_Este_A	Otras	Salida de uno de los cauces fuera del dominio.
Salida_Meta_D	Otras	Desembocadura de uno de los cauces al río Meta

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Es importante anotar que dentro de la totalidad del dominio del modelo se incluyó una tormenta (lluvia) correspondiente al hietograma presentado en el informe correspondiente a “Hidrología”, respetando los tiempos de retorno asignados (hietograma con $T_r = 2.33$ años para crecientes con $T_r = 2.33$ años; por ejemplo). La anterior asignación se desarrolló tomando en consideración que el área modelada es bastante extensa y buena parte de las tormentas en la zona se transitan al interior del área modelada, de forma que el fenómeno de lluvia escorrentía ocurre al interior del modelo hidráulico y no en sus fronteras de ingreso o aguas arriba de estas.

3.2.3.3. Definición de parámetros de rugosidad

Como se presentó en el Marco Teórico, el parámetro que define la forma en la cual el modelo se comporta frente a las inundaciones es el parámetro conocido como “Número de Manning”. En general la definición de este parámetro fue iterativa, empleando como marco inicial las tablas usuales de este parámetro contenidas en Chow et.al. (1998) asignando a cada cobertura un valor. De forma posterior a esta asignación inicial se realizó un ajuste en algunas coberturas, con el objetivo de lograr los resultados presentados en el numeral 3.3.4 Validación del modelo hidráulico.

En la **Figura 3-11** se presenta la distribución del parámetro de Manning en el dominio de modelación. Dentro del anexo “ANEXOS\A2_ModeloHidraulico\03_Modelos” se encuentran los archivos nativos del modelo, en caso de que se requiera su revisión.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

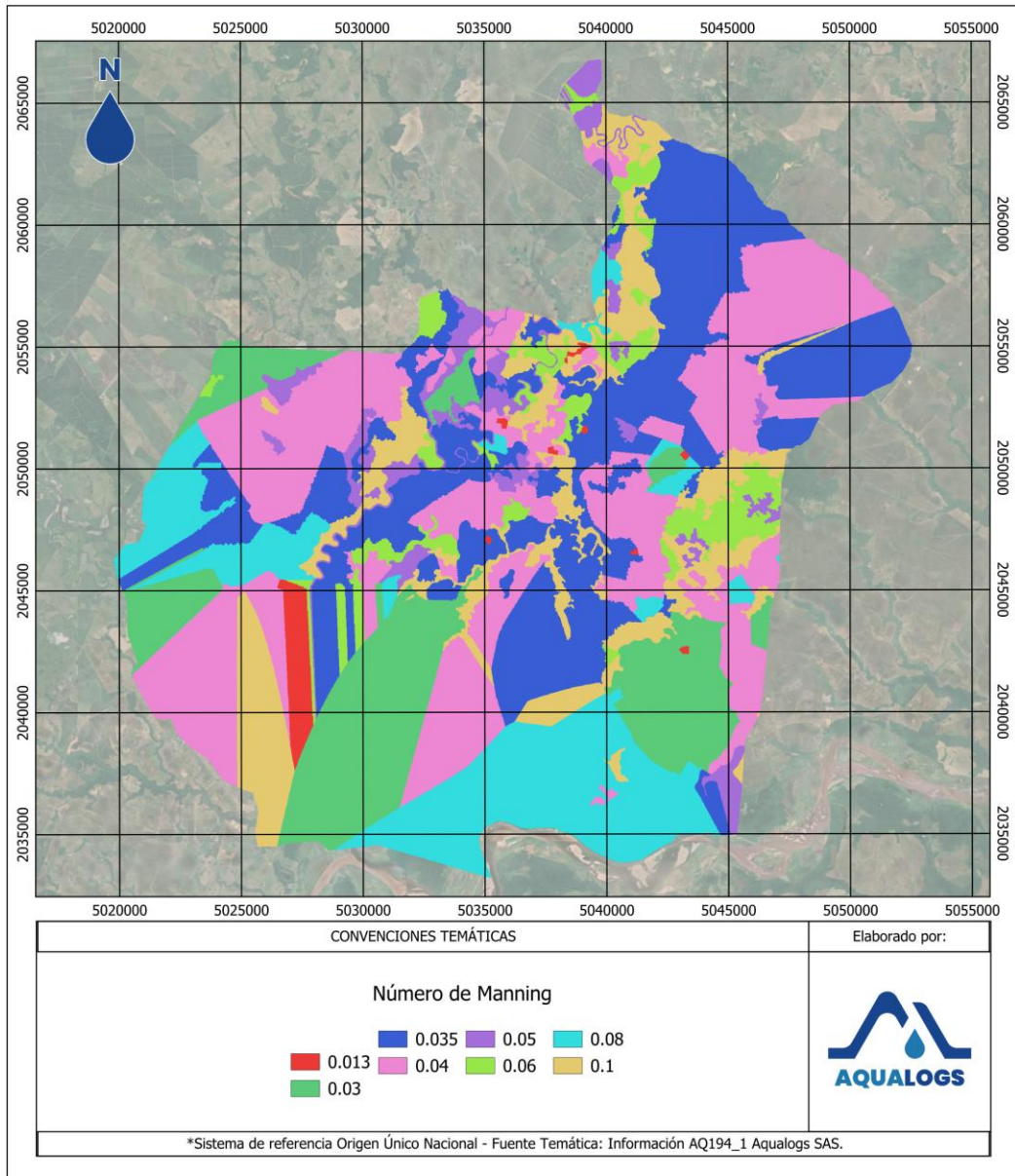


Figura 3-10. Distribución de los parámetros de Manning en el dominio de modelación.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Como se mencionó anteriormente, los coeficientes en el área se encuentran en el rango de 0.02 y 0.1, correspondiendo de acuerdo con Chow et.al. (1998) a rangos entre coberturas de “canales limpios” y “llanuras de inundación con alta vegetación” siendo consistentes con el área de modelación.

3.2.3.4. Modelación de escenarios

Con base en lo anterior y una vez obtenidos los resultados de la modelación hidrológica del área de estudio (documento de análisis hidroclimatológico), se procede a la ejecución de la modelación

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

hidráulica correspondiente a los escenarios definidos, los cuales incorporan las condiciones de caudal de escorrentía superficial de los distintos periodos de retorno, escenarios de cambio climático y configuración topográfica evaluados. A manera de resumen en la **Tabla 3-3**, se presenta el caudal pico alcanzado para cada uno de los cuerpos de agua de entrada de del modelo.

Tabla 3-3. Caudales de entrada (m³/s)

Escenario	Túa	Piñalito	Camelias	Huesero	Clavelino	Aguaverde
T: 2.33 SC	795.12	235.43	27.54	286.66	19.3	116.1
T: 5 SC	930.72	273.43	33.34	336.29	23.26	139.59
T: 10 SC	1037.02	314.31	38.06	376.71	26.49	158.73
T: 20 SC	1137.1	349.25	42.12	405.81	29.21	175
T: 50 SC	1254.92	393.91	47.13	438.22	31.89	194.95
T: 100 SC	1344.29	393.91	50.87	462.47	34.84	209.88
T: 2.33 CC	905.76	264.5	32.31	327.51	22.56	135.42
T: 5 CC	1252.29	392.95	47.02	437.47	31.8	194.52
T: 10 CC	1431.85	460.84	54.63	485.34	37.81	224.23
T: 20 CC	1554	510.62	60.31	546.07	42.22	249.97
T: 50 CC	1652.23	562.64	67.11	606.07	46.7	276.1
T: 100 CC	1773.83	600.63	71.26	645.58	49.43	292.05

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Finalizada la fase de simulación, se llevó a cabo el postproceso de los resultados, mediante el cual se extraen y estructuran los datos obtenidos en los formatos requeridos para su análisis, interpretación y reporte. Este postproceso incluye la generación de archivos de salida con la información hidrodinámica relevante, así como la elaboración de mapas temáticos e imágenes indicativas que representan de forma gráfica los resultados obtenidos en cada escenario modelado.

3.2.4. Observaciones con respecto a las simulaciones

La metodología establecida permite dar cumplimiento a lo requerido por la Autoridad Ambiental; sin embargo y teniendo en consideración la magnitud del modelo requerido, se identificaron limitaciones inherentes al proceso de modelación. Estas se derivan principalmente del alto costo computacional asociado a las simulaciones hidráulicas y a la disponibilidad limitada de información detallada en el área de estudio (especialmente en cuanto a mediciones de caudales con escala intra horaria).

Con el objetivo de presentar al lector un análisis de las capacidades del ejercicio desarrollado, a continuación, se presentan las limitaciones intrínsecas al modelo realizado. Cabe aclarar que estas son naturales al proceso de modelación y no se encuentran asociadas a la forma en la cual se desarrolló el estudio ni a la calidad técnica del presente estudio.

- Resolución espacial del modelo: Dada la amplitud del área de estudio, la resolución de la malla se optimiza en las zonas de mayor relevancia hidráulica, alcanzando un tamaño medio de elemento de hasta 0.92 m. En contraste, en áreas de menor importancia relativa

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

(principalmente planicies, alejadas de estructuras hidráulicas) se emplean tamaños medios de elemento que pueden ser superiores a 10 m.

- Condiciones de estabilidad numérica: los pasos de tiempo están condicionados por el número de Courant y por el tamaño del elemento más pequeño de la malla, lo que incrementa la demanda computacional en escenarios de alta resolución. Teniendo en consideración lo anterior, el tamaño se limita y con ello los resultados obtenidos en zonas de baja resolución (similar a anterior punto).
- Calibración y validación limitada: la ausencia o escasez de series temporales de caudales y niveles observados restringe la validación robusta del modelo. Para superar esta restricción se analizaron los resultados de las inundaciones con fotografías de eventos de inundación, con el objetivo de presentar consistencia en los datos encontrados.
- Representación simplificada de procesos físicos: teniendo en consideración el área modelada y haciendo un balance entre rendimiento computacional y variables introducidas, fenómenos como infiltración, evaporación y flujos subterráneos no se incluyeron en el modelo de inundación superficial; Estos procesos físicos tienen escalas temporales mucho más lentas que las analizadas en los fenómenos de inundación superficial.
- Dependencia de condiciones de frontera: la calidad de los resultados está fuertemente influenciada por la precisión de los caudales de entrada, precipitaciones y niveles aguas abajo utilizados como condiciones de contorno. Previendo lo anterior, el análisis de caudales de entrada se fundamentó en un análisis riguroso de los datos existentes y de un entendimiento adecuado de la información.
- Consideraciones con respecto a los flujos medios en escenarios de inundación: teniendo en consideración lo establecido por el acto administrativo que da origen al presente documento, es claro que el modelo se enfoca en eventos de inundación en la llanura que es donde se localizan las infraestructuras. Los caudales que dan origen a estos eventos son órdenes de magnitud superiores a los caudales medios, de forma que el caudal medio de cualquiera de los caudales en el área no resulta relevante a la hora de evaluar los eventos máximos, de forma que su influencia se entiende mínima.
- Limitaciones computacionales: la necesidad de altas capacidades de procesamiento y almacenamiento restringe el número de simulaciones y escenarios que pueden evaluarse en un horizonte temporal razonable. Para superar esta restricción, Aqualogs SAS desarrolló las simulaciones en equipos de Amazon Web Service (AWS) en equipos de 600 núcleos con 4.5 GHz de capacidad cada uno (con varias instancias en paralelo). Lo anterior significó un avance significativo en cuanto a cualquier equipo disponible en el mercado de PCs de sobremesa, Workstations o incluso servidores físicos.

Aun empleando una potencia de cómputo descomunal para modelaciones hidráulicas, el mejor rendimiento que se obtuvo para el modelo fue de 1.5 (es decir, modelar 1 hora de inundación toma 1.5 horas de cálculo). Lo anterior significa que la simulación de 55 horas

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

de inundación toma en media 80 horas (3.3 días). Lo anterior muestra que la herramienta de modelación no es un sistema versátil a la hora de evaluar múltiples escenarios.

Como se mencionó anteriormente y como es citado ampliamente en la literatura especializada, antes de analizar los resultados de un modelo, es preciso conocer sus limitaciones. Dentro de las actividades desarrolladas se buscó limitar la incertidumbre aplicando medidas de ingeniería adecuadas y de vanguardia que permitiesen llegar a resultados razonables y confiables, los cuales se presentan en el siguiente numeral.

3.3. Resultados

3.3.1. Modelación

La modelación hidrodinámica tiene como propósito principal reproducir y analizar el comportamiento del flujo del agua en diferentes escenarios de inundación, permitiendo estimar la extensión, la magnitud y la dinámica de los eventos que podrían presentarse ante diversas condiciones hidrológicas y geomorfológicas. A través de este tipo de modelaciones es posible identificar zonas susceptibles a anegamientos, evaluar medidas de mitigación y apoyar la toma de decisiones en la gestión del riesgo asociado a las inundaciones.

En el desarrollo del modelo se consideraron como principales variables la profundidad del agua y los componentes de la velocidad del flujo, dado que estas representan los parámetros fundamentales para el análisis de la magnitud y la dinámica de las inundaciones. Adicionalmente, se han modelado otras variables hidrodinámicas complementarias con fines de revisión y control de calidad del modelo; sin embargo, al no estar directamente relacionadas con los objetivos del presente estudio, no serán abordadas en este informe, aunque se encuentren disponibles en los resultados de la modelación (ANEXOS\A2_ModeloHidraulico\03_Modelos).

Los resultados numéricos generados por el modelo se almacenan en archivos de tipo Selafin, formato nativo de la suite TELEMAC, que contiene la información espacial y temporal de las variables simuladas. Con el fin de facilitar el manejo, la visualización y la integración de los datos en entornos SIG, las principales variables (profundidad y velocidad máximas) fueron exportadas al formato GeoTIFF (.tif), garantizando su compatibilidad con herramientas de análisis geoespacial (ANEXOS\A2_ModeloHidraulico\00_Raster).

Cabe señalar que, como se explicó previamente, la malla utilizada por TELEMAC es no estructurada, compuesta por triángulos de diferentes tamaños. La conversión a formato raster requiere su interpolación a una malla regular, para lo cual se seleccionó una resolución espacial de 5 m.

Los raster exportados también se presentan en mapas disponibles en formato PNG (ANEXOS\A2_ModeloHidraulico\01_Imagenes_png) y en PDF (ANEXOS\A2_ModeloHidraulico\02_Imagenes_pdf).

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

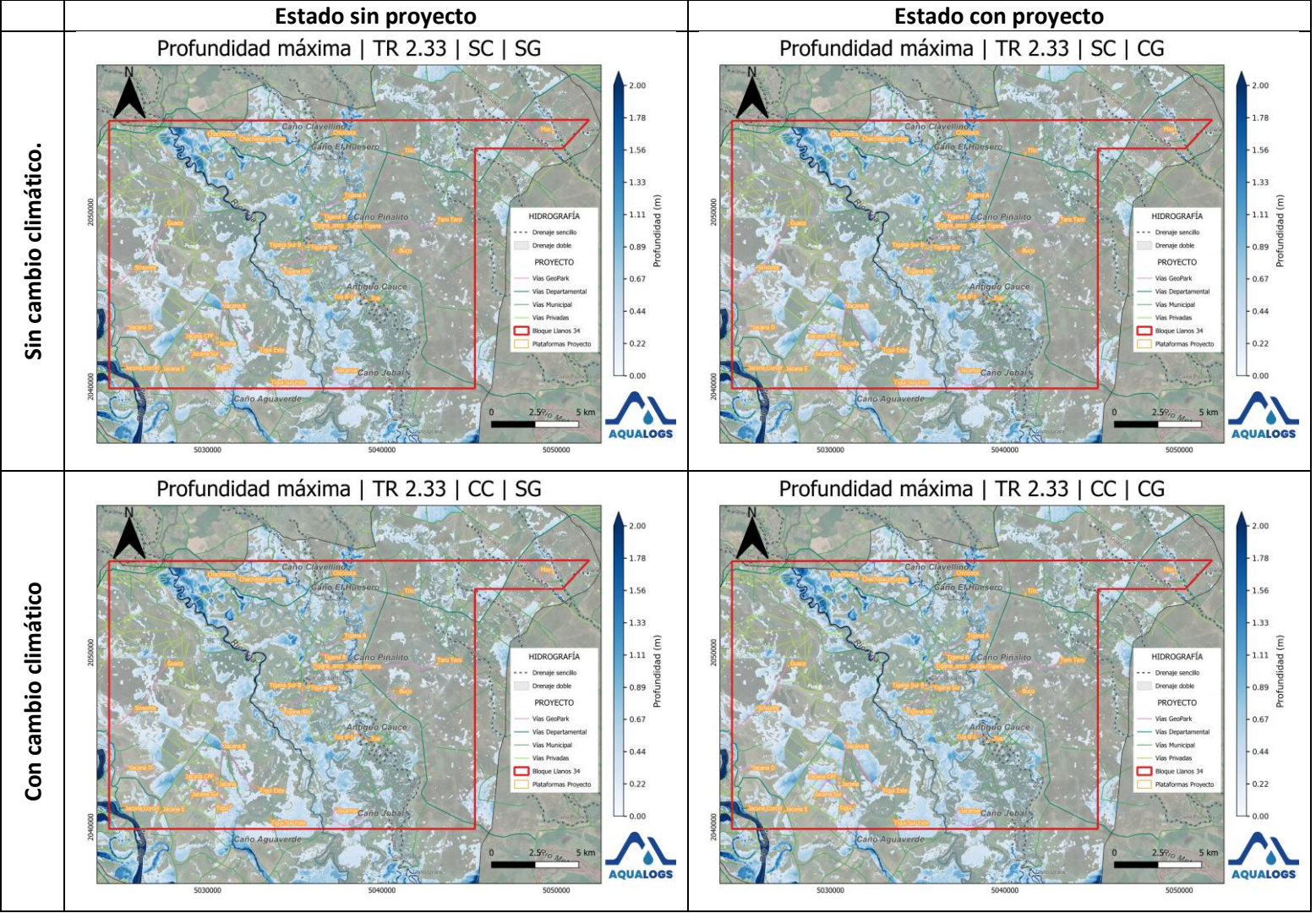
3.3.2. Profundidad de lámina de agua

De la **Tabla 3-4** a la **Tabla 3-9** se presentan las profundidades máximas de inundación obtenidas en el modelo hidráulico. En cada tabla se comparan los resultados correspondientes a los escenarios con y sin proyecto, considerando además las condiciones con y sin cambio climático para los distintos tiempos de retorno analizados (2.33, 5, 10, 20, 50 y 100 años).

Esta estructura permite identificar de manera integral cómo varía la magnitud y extensión de la inundación ante la implementación del proyecto y bajo diferentes condiciones de cambio climático, proporcionando una base comparativa sólida para la evaluación de impactos y el diseño de medidas de mitigación hidráulica.

En el escenario de periodo de retorno 2.33 años (**Tabla 3-4**), considerado representativo de eventos ordinarios, se establece una línea base adecuada para interpretar la dinámica típica de inundación en el área de estudio. En términos generales, la influencia del cambio climático se manifiesta principalmente en un incremento de la profundidad de la lámina de agua en sectores próximos a los cauces, lo cual sugiere que las zonas con antecedentes de desbordamientos podrían experimentar afectaciones más pronunciadas bajo escenarios futuros. Adicionalmente, se observa que, independientemente del escenario analizado (con o sin la infraestructura de GeoPark), el sector ubicado aguas arriba de la vía de acceso a la localización Jacamar presenta condiciones recurrentes de inundación, lo que indica una predisposición natural al encharcamiento asociada a la topografía y proximidad al Caño Jobal.

Tabla 3-4. Profundidad máxima - Tiempo de retorno 2.33 años.



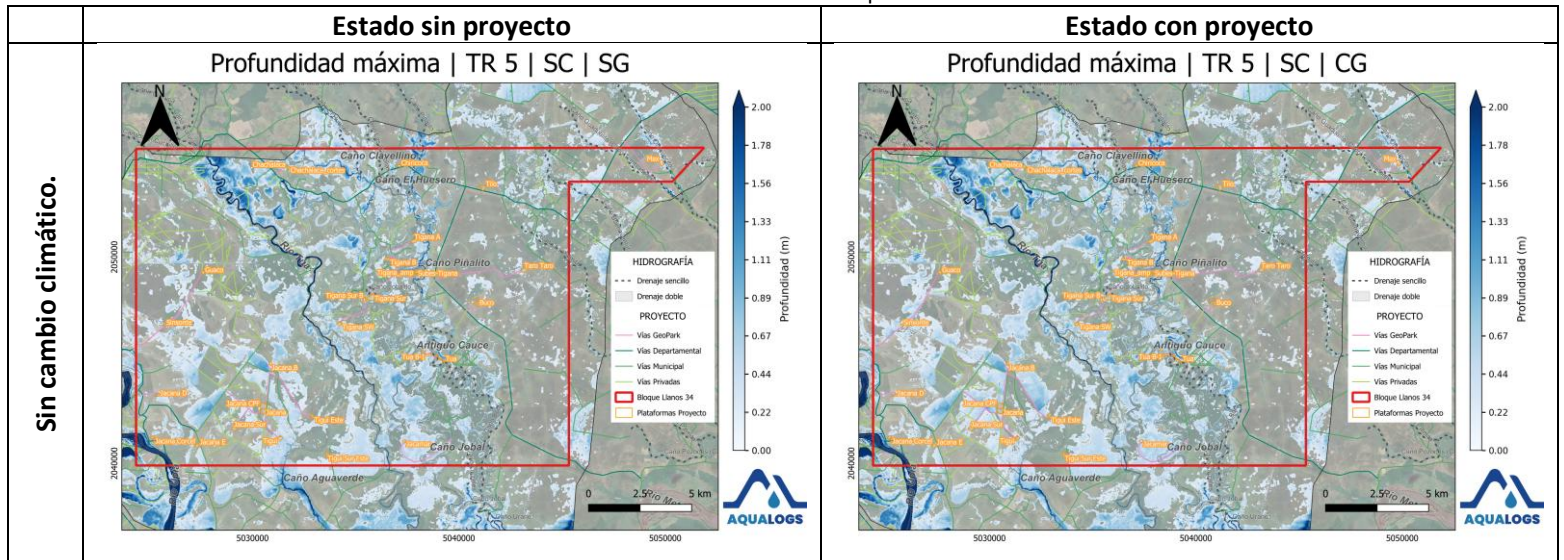
Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

El escenario correspondiente a un periodo de retorno de 5 años (**Tabla 3-5**) representa un evento de recurrencia intermedia, útil para evaluar cómo responde el sistema hidrológico bajo condiciones que superan la inundación ordinaria, pero que aún son frecuentes dentro de la climatología local. Este escenario permite identificar si, ante incrementos moderados en el caudal, se generan cambios en la conectividad hidráulica o en la extensión de las áreas propensas a anegamiento.

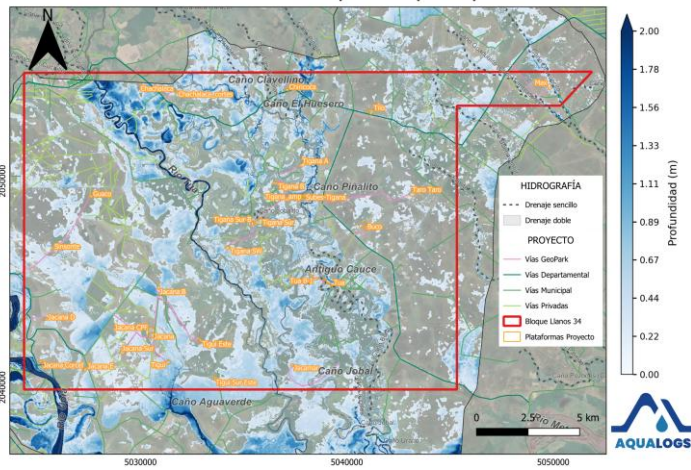
Los resultados muestran que la distribución espacial de las inundaciones mantiene un patrón muy similar al observado en el escenario de 2.33 años, sin evidenciar la formación de nuevas conexiones entre zonas inundadas. Las manchas de inundación presentan una expansión marginal, con incrementos laterales del orden de 10 a 30 metros, dependiendo de las características topográficas locales. De igual manera, las profundidades adicionales son moderadas: típicamente pueden incrementar 0.1 m en sectores previamente predispuestos al encharcamiento. Esto indica que, aunque el incremento de caudal amplifica ligeramente la magnitud del fenómeno, la dinámica general del flujo y la estructura espacial de las inundaciones permanecen estables.

Tabla 3-5. Profundidad máxima - Tiempo de retorno 5 años.

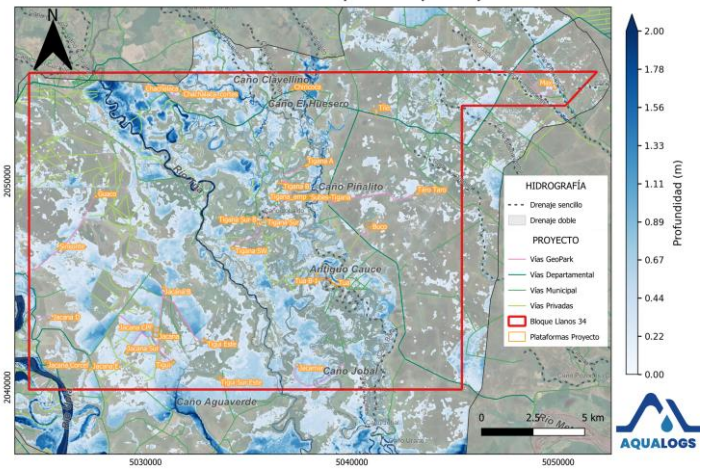


Con cambio climático

Profundidad máxima | TR 5 | CC | SG



Profundidad máxima | TR 5 | CC | CG



Fuente. Aqualogs SAS (2025).

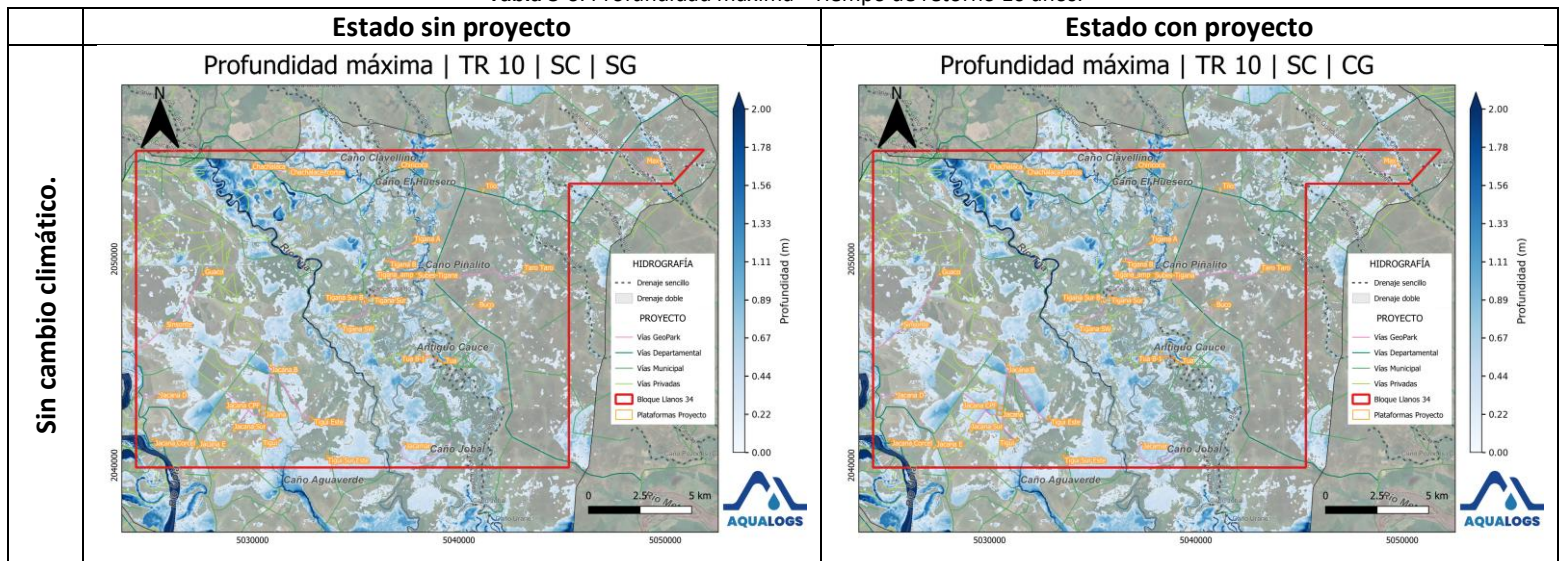
Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

En la **Tabla 3-6**, se presentan los resultados de la modelación para un periodo de retorno de 10 años, un escenario diseñado para evaluar el comportamiento del sistema ante eventos menos frecuentes, pero hidrológicamente más exigentes, en los cuales suelen acentuarse los desbordamientos y la expansión lateral del flujo.

En este escenario se empieza a observar una leve conexión entre algunas manchas de inundación, particularmente en sectores localizados aguas arriba del río Túa, donde los desbordamientos adquieren mayor magnitud en comparación con los escenarios más frecuentes. A pesar de este incremento en la dinámica hidráulica, la mayor parte de las infraestructuras del proyecto no presentan aumentos significativos en la extensión o magnitud del anegamiento respecto a los escenarios de 2.33 y 5 años.

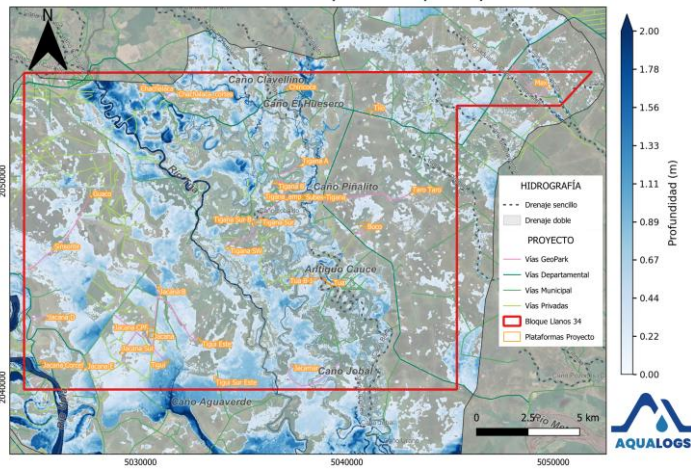
Bajo el escenario con cambio climático, las diferencias se acentúan en algunas zonas específicas, especialmente en tramos de las vías de acceso a Jacana CPF y Jacana Sur, donde se puede ver un incremento moderado en la lámina de agua y mayor expansión lateral de las manchas de inundación. Sin embargo, estas variaciones parten de áreas que incluso sin proyecto ya eran propensas a inundación.

Tabla 3-6. Profundidad máxima - Tiempo de retorno 10 años.

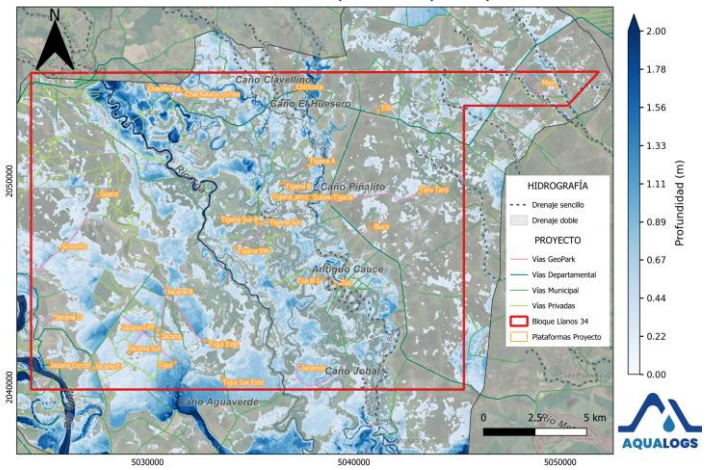


Con cambio climático

Profundidad máxima | TR 10 | CC | SG



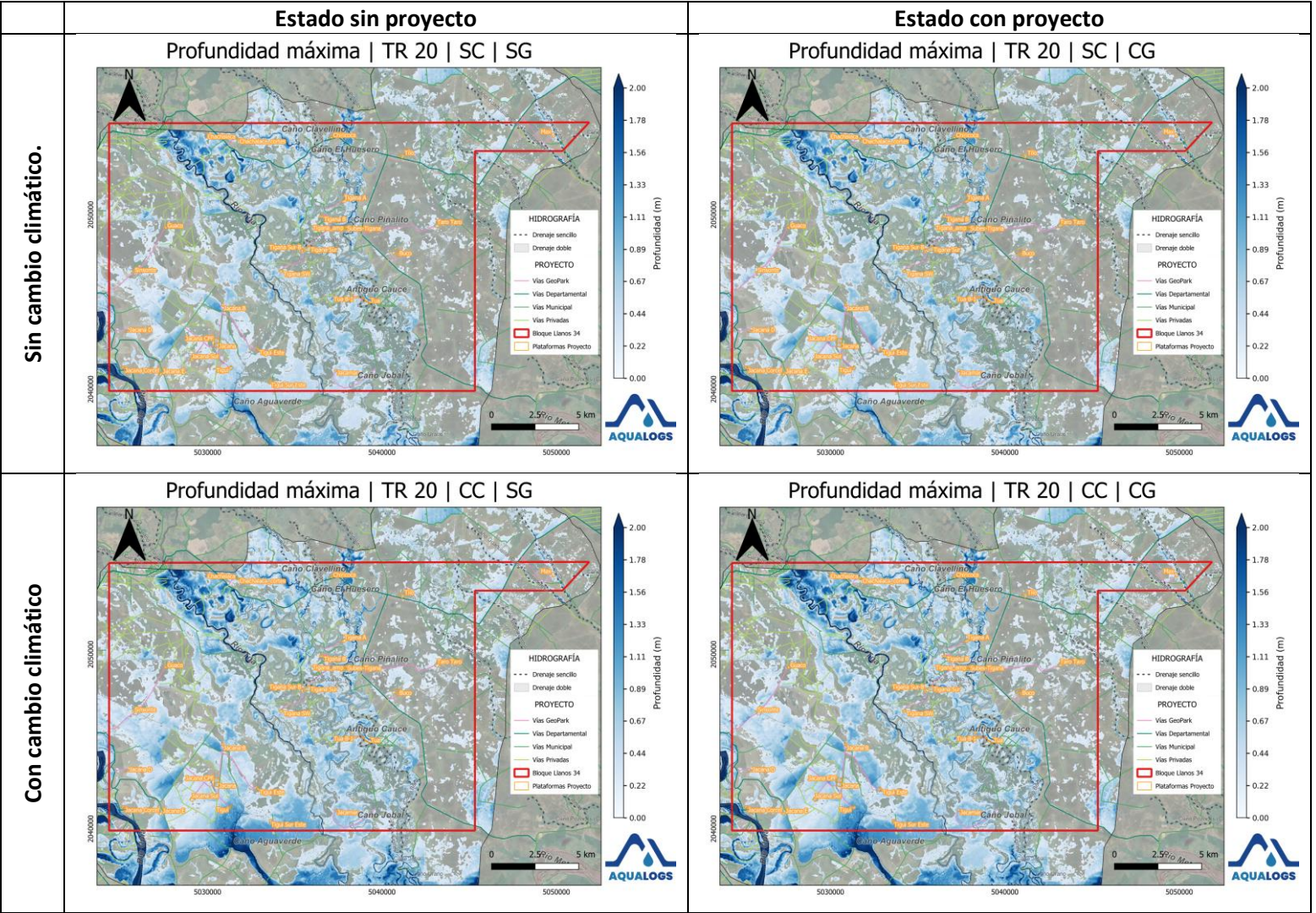
Profundidad máxima | TR 10 | CC | CG



Fuente. Aqualogs SAS (2025).

El escenario de TR = 20 años (**Tabla 3-7**) corresponde a un evento menos frecuente, pero de mayor magnitud, en el cual se ve un incremento tanto en la conectividad hidráulica como en la expansión de las zonas inundables, especialmente en sectores próximos a los cauces principales. Como es propio de un evento más severo, se observa una ampliación progresiva de las manchas de inundación y un aumento en las profundidades, particularmente en áreas influenciadas por los desbordamientos del río Túa y drenajes secundarios. Aun así, la estructura espacial del patrón de inundación no presenta cambios sustanciales respecto al escenario de 10 años: las zonas afectadas son las mismas, y las variaciones responden únicamente a la mayor magnitud del evento, no a la presencia de la infraestructura del proyecto. Las plataformas y sus vías de acceso muestran un comportamiento hidráulico estable, sin evidenciar nuevas áreas inundables ni incrementos significativos en la extensión del anegamiento.

Tabla 3-7. Profundidad máxima - Tiempo de retorno 20 años.

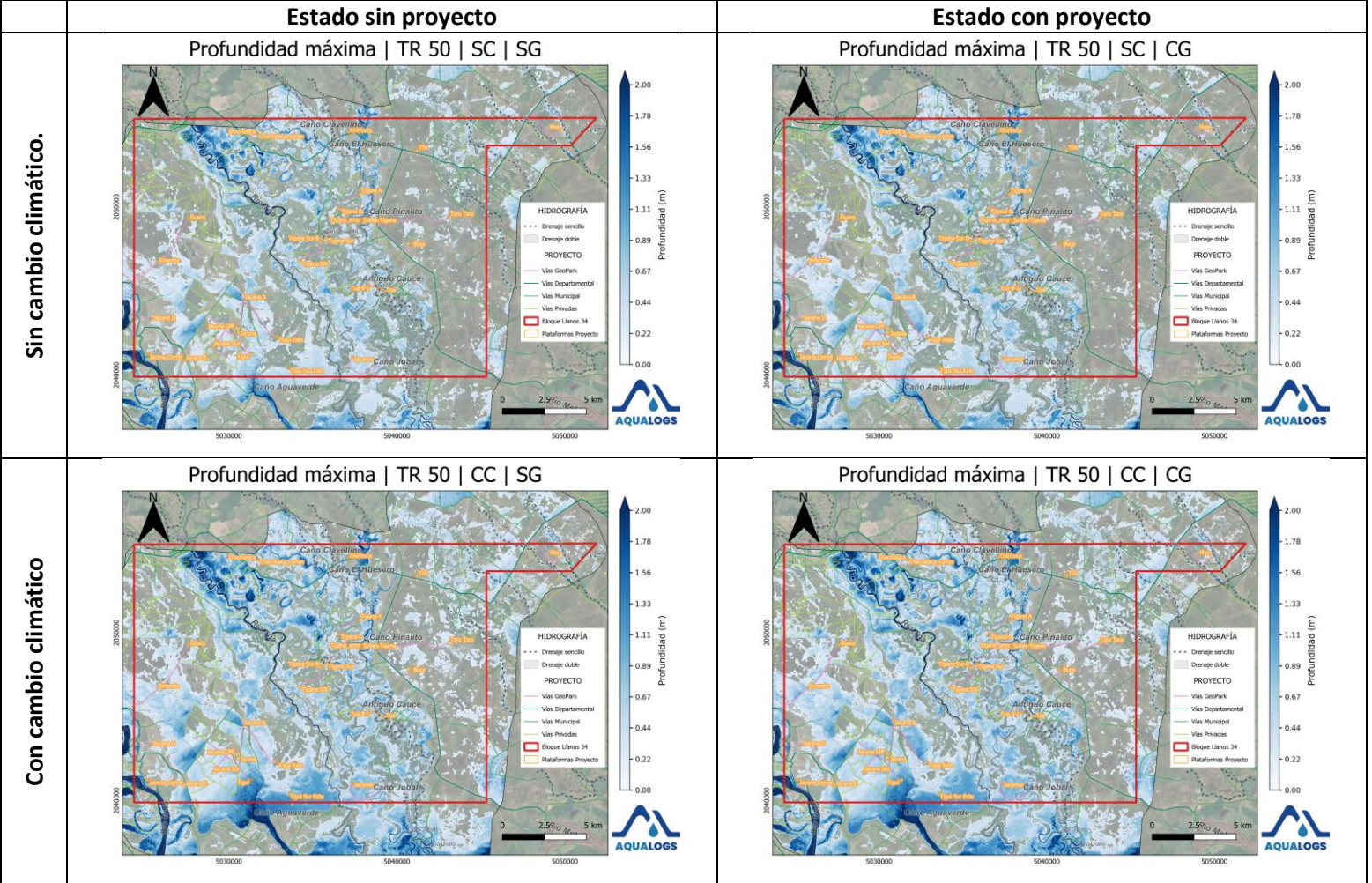


Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

El escenario de TR = 50 años (**Tabla 3-8**) corresponde a un evento hidrológicamente más severo, con menor frecuencia de ocurrencia y mayores demandas sobre la capacidad de conducción natural del sistema. En este caso se observa una ampliación adicional de las manchas de inundación, especialmente en sectores próximos a los cauces principales y zonas bajas de la llanura, donde las profundidades aumentan de manera consistente respecto a los escenarios de 20 y 10 años. No obstante, la estructura espacial general del fenómeno permanece prácticamente inalterada: no emergen nuevas áreas inundables ni se generan conexiones adicionales entre cuerpos de agua que no hayan aparecido en escenarios previos. La infraestructura del proyecto —plataformas y vías— mantiene un comportamiento estable, sin registrar afectaciones nuevas ni incrementos significativos en la extensión del anegamiento. En conjunto, el escenario TR50 refleja una intensificación gradual y esperada del proceso de inundación, pero sin implicar un cambio cualitativo en la dinámica del flujo ni en la relación entre las inundaciones y la infraestructura existente.

Tabla 3-8. Profundidad máxima - Tiempo de retorno 50 años.

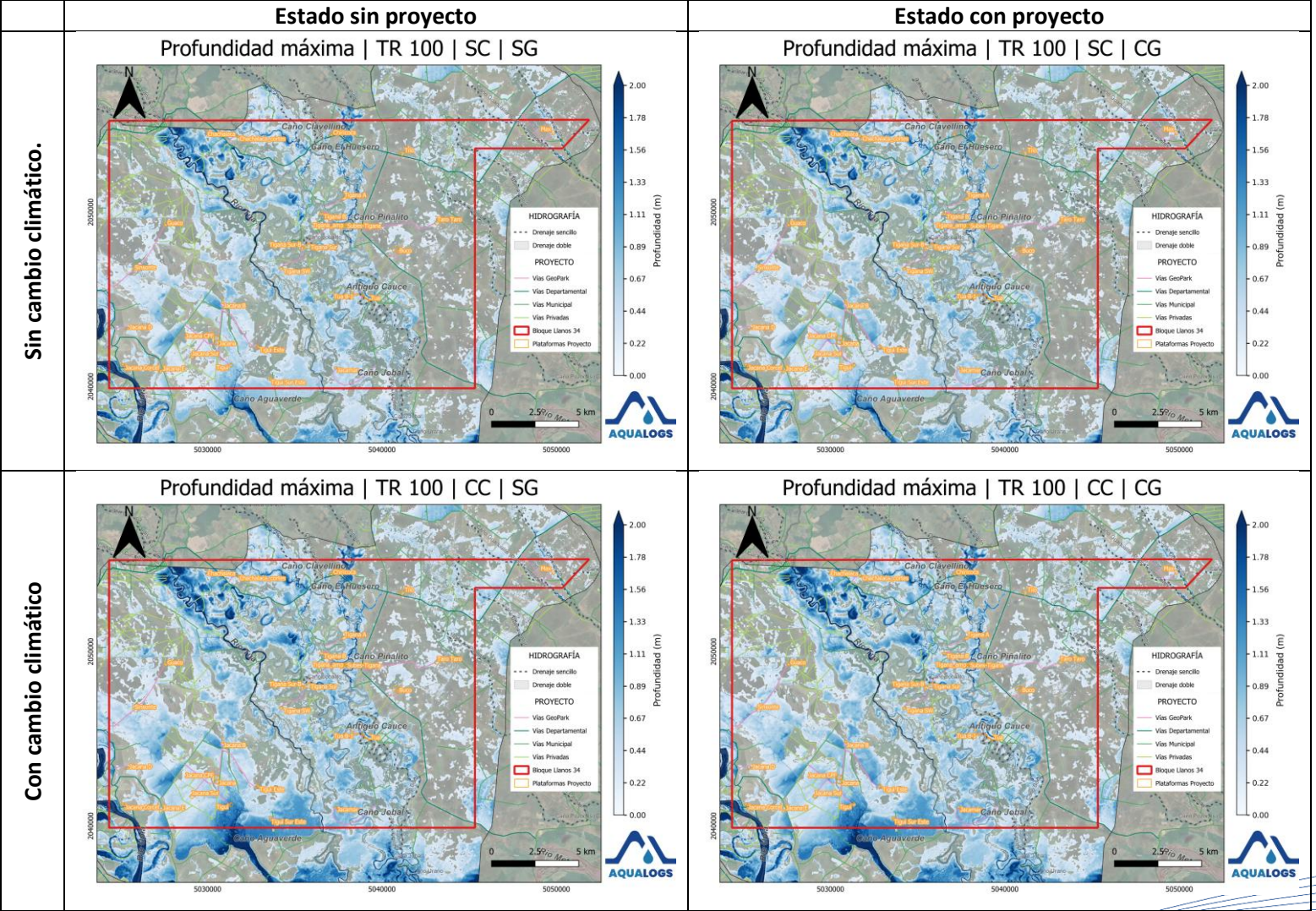


Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

El escenario de TR = 100 años (**Tabla 3-9**) representa el evento más extremo evaluado y evidencia un cambio importante en el comportamiento del sistema hidrológico frente a situaciones de muy baja frecuencia y alta magnitud. A diferencia de los escenarios de menor severidad, aquí se observa una conectividad mucho más amplia entre manchas de inundación, tanto en zonas próximas a los cauces principales como en sectores más alejados de estos. Esta conectividad se presenta no solo aguas arriba, donde el incremento en los niveles es esperable, sino también aguas abajo, donde la saturación generalizada del terreno y la reducción de los gradientes de drenaje favorecen la expansión lateral del agua. Bajo condiciones de cambio climático, este efecto se intensifica de forma notable, las manchas de inundación adquieren mayor extensión, las profundidades aumentan de manera más marcada y la continuidad entre áreas previamente aisladas se vuelve más evidente, generando un paisaje inundable más integrado y con menor capacidad de retención local. En este sentido, el cambio climático emerge como el factor que introduce las modificaciones más sustanciales en la dinámica de inundación dentro del área de estudio.

Tabla 3-9. Profundidad máxima - Tiempo de retorno 100 años.



Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEOPARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Los resultados en general permiten establecer que la infraestructura de GeoPark como vías y plataformas, no generan nuevas zonas susceptibles de inundación. Las variaciones observadas consisten en pequeños incrementos de la lámina de agua en sectores ya naturalmente propensos a encharcamientos, concentrados principalmente en las vías de acceso a las plataformas Jacana, Tigui Este y Sinsonte - Guaco.

Frente al contexto hídrico regional, la infraestructura de GeoPark no es el factor determinante en la dinámica de las inundaciones en el área de estudio, toda vez que las áreas que presentan diferencias entre escenarios corresponden a zonas que, aun en ausencia de infraestructura de GeoPark, ya mostraban una predisposición natural a la acumulación de agua debido a su topografía, baja pendiente, la presencia de cauces cercanos o condiciones geomorfológicas que favorecen el encharcamiento.

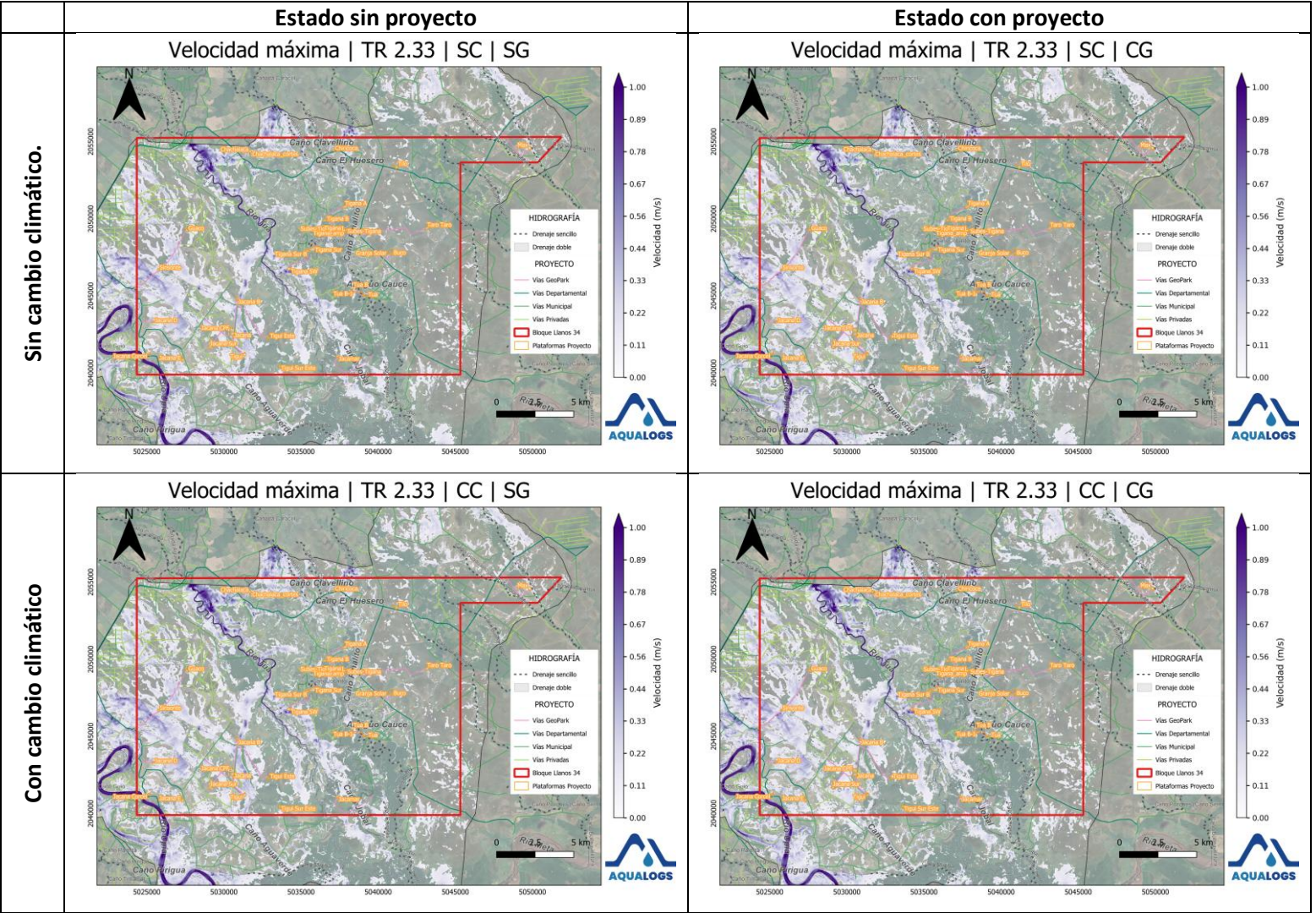
3.3.3. Perfiles de velocidad

De la **Tabla 3-10** a la **Tabla 3-15** se presentan las velocidades máximas de flujo obtenidas en el modelo hidráulico. En cada tabla se comparan los resultados de los escenarios con y sin proyecto, incluyendo además las condiciones con y sin cambio climático para los diferentes tiempos de retorno considerados (2.33, 5, 10, 20, 50 y 100 años).

El análisis de estos resultados permite identificar las zonas donde la dinámica del flujo superficial experimenta mayores variaciones principalmente en respuesta a las posibles condiciones climáticas futuras. De este modo, se evalúa no solo la magnitud del incremento en la velocidad, sino también su posible implicación sobre la erosión y estabilidad del terreno.

En el caso de TR 2.33 (**Tabla 3-10**), las velocidades dominantes en las zonas de llanura son bajas, típicamente inferiores a 0.3 m/s, reflejando una inundación de escasa energía y con desplazamientos de agua lentos. Los máximos de velocidad se concentran en los cauces principales y en tramos de desagüe natural, donde puntualmente se alcanzan valores cercanos a 1 m/s. En las plataformas y sobre las vías de acceso la velocidad superficial es generalmente reducida, por lo que el transporte sedimentario es limitado y el riesgo de erosión superficial es bajo en este escenario.

Tabla 3-10. Velocidad máxima - Tiempo de retorno 2.33 años.

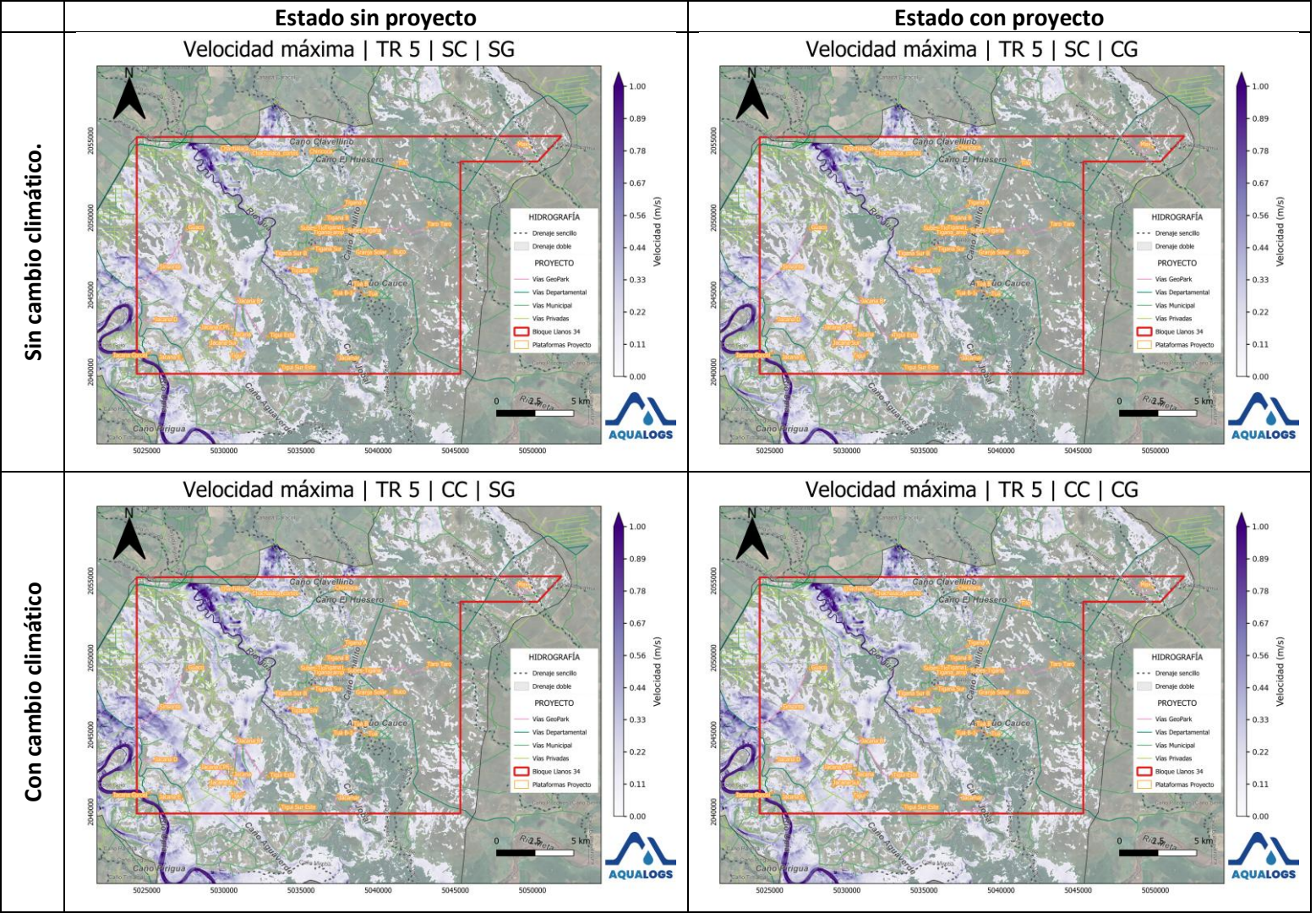


Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

Al aumentar la magnitud del evento, como lo es en un escenario TR5 (**Tabla 3-11**) se aprecia un ligero incremento generalizado de las velocidades, especialmente en los corredores de escorrentía y en las orillas de cauces secundarios. Las velocidades medias en la llanura pueden aumentar por encima de 0.1 m/s en sectores localmente confinados por la topografía o por las vías; sin embargo, los picos siguen concentrándose en los cauces principales (valores cercanos a 1 m/s). El mayor componente energético puede favorecer un leve aumento en el transporte de sedimentos.

Tabla 3-11. Velocidad máxima - Tiempo de retorno 5 años.

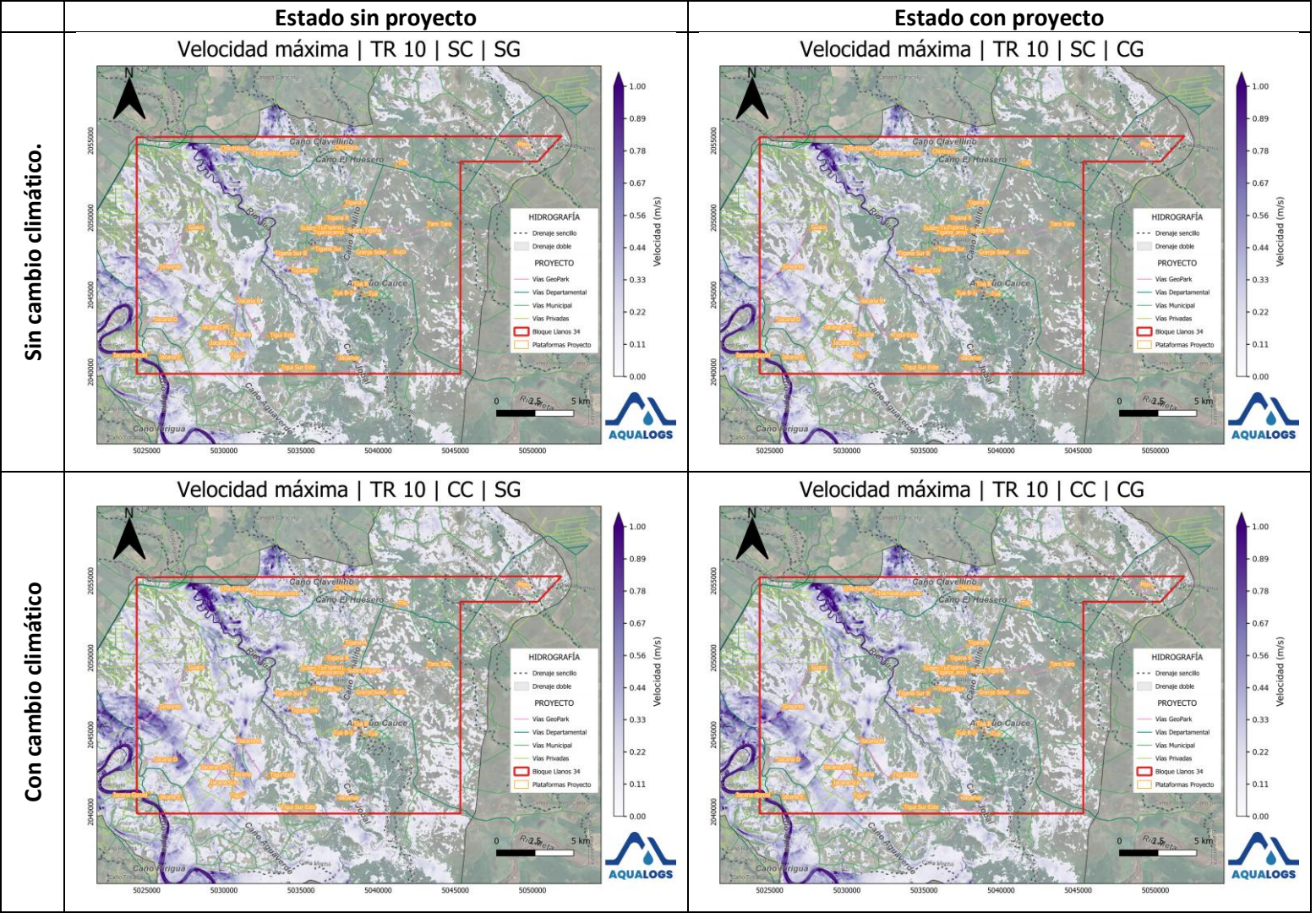


Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

En el escenario TR10 (**Tabla 3-12**) las velocidades máximas en cauces principales se incrementan de forma apreciable respecto a TR5, manteniéndose en torno a 1 m/s o superiores en tramos canalizados. En llanura, zonas con restricciones geomorfológicas, presentan velocidades por encima de 0.15 m/s, suficientes para movilizar material fino y, en puntos críticos, agravar procesos de socavación local. Las zonas con alcantarillas incluso pueden presentar velocidades ligeramente superiores a 1 m/s.

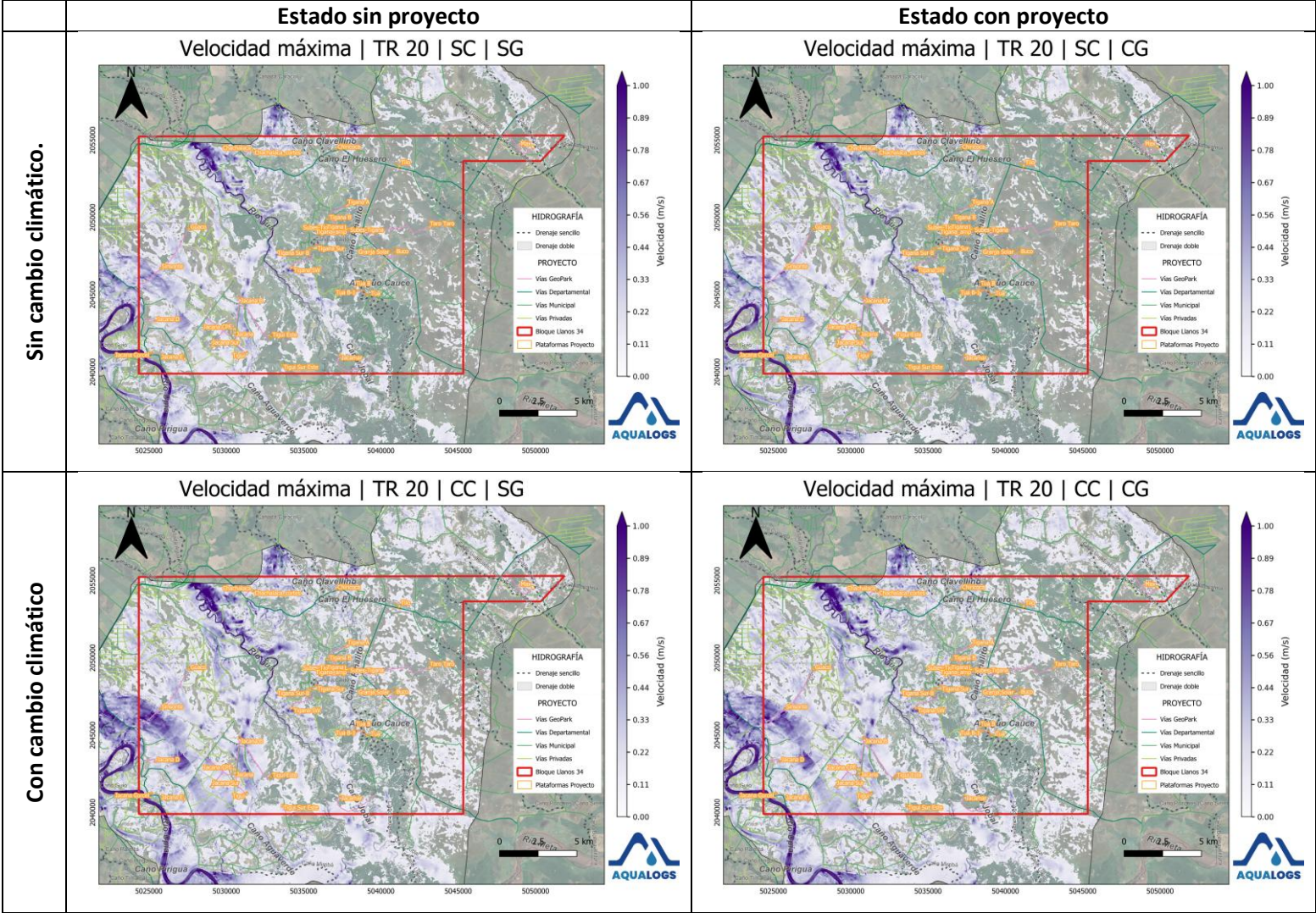
Tabla 3-12. Velocidad máxima - Tiempo de retorno 10 años.



Fuente. Aqualogs SAS (2025).

El TR20 (Tabla 3-13) trae consigo aumentos notables en la energía del flujo: las velocidades máximas en cauces se elevan y se observan incrementos más frecuentes por encima de 0.2 m/s o incluso 0.5 m/s en tramos específicos cercanos a desbordamientos. En la llanura, la extensión y la profundidad mayores generan corredores más continuos de flujo con velocidades medias superiores a las de escenarios anteriores; ello aumenta la probabilidad de transporte de sedimentos y erosión localizada en las vías y desbordes. No obstante, el patrón espacial general de velocidades se mantiene coherente con la topografía y las rutas preferenciales de escurrimiento.

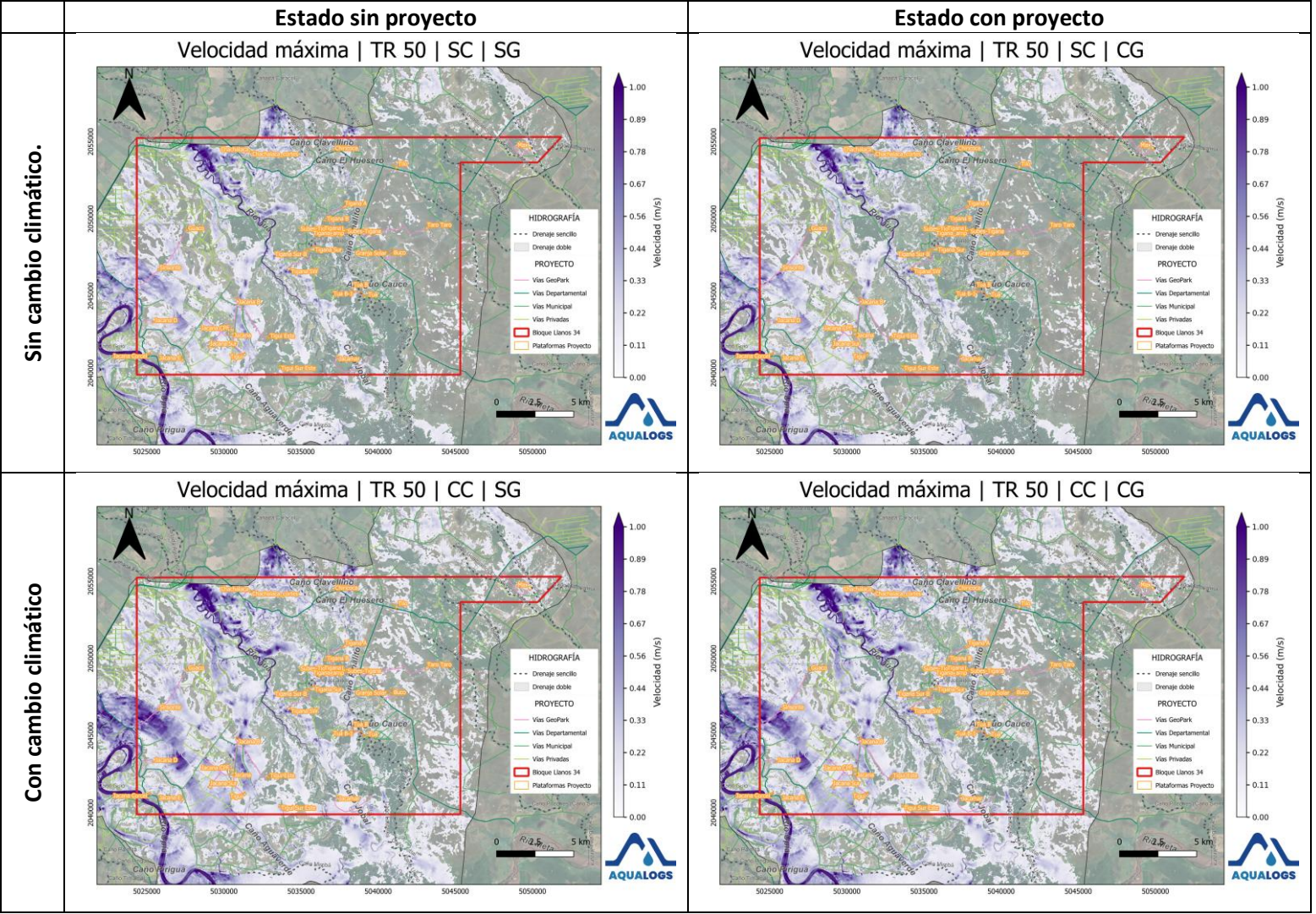
Tabla 3-13. Velocidad máxima - Tiempo de retorno 20 años.



Fuente. Aqualogs SAS (2025).

En TR50 (Tabla 3-14) la energía del flujo crece de manera consistente, los picos de velocidad en cauces pueden sobrepasar 1 m/s en sectores confinados, y en áreas de conectividad ampliada se registran velocidades medias significativamente mayores que en TR20. La mayor continuidad hidráulica entre manchas permite que el flujo circule con mayor velocidad a distancias mayores desde los cauces, incrementando el riesgo de remoción de sedimentos.

Tabla 3-14. Velocidad máxima - Tiempo de retorno 50 años.



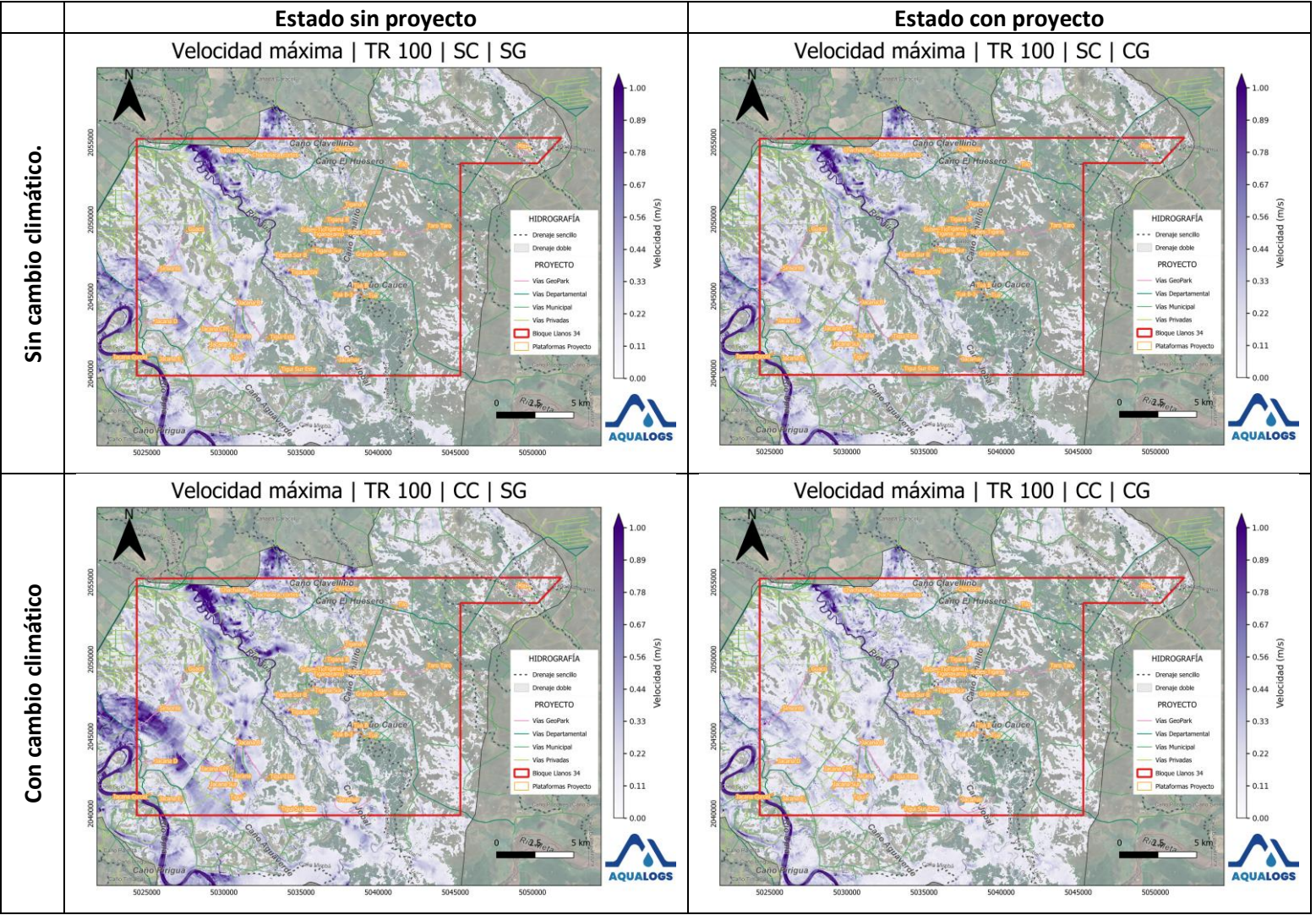
Fuente. Aqualogs SAS (2025).

t

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

El escenario TR100 (Tabla 3-15) exhibe el mayor incremento en velocidades tanto en cauces como en llanuras. La conectividad amplia y la mayor profundidad implican que velocidades significativas (por ejemplo, >0.5–1.0 m/s) pueden propagarse hacia zonas alejadas de los cauces, afectando tanto tramos aguas arriba como aguas abajo. Esta mayor energía aumenta la capacidad de transporte sólido, erosión y socavación, y hace que la interacción flujo–infraestructura sea más crítica, las alcantarillas pueden experimentar tensiones hidráulicas muy superiores a las proyectadas para escenarios menos extremos. Bajo cambio climático, los incrementos de velocidad se amplifican conjuntamente con las profundidades.

Tabla 3-15. Velocidad máxima - Tiempo de retorno 100 años.



Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

De manera similar a los resultados de profundidad de lámina de agua, los resultados de perfiles de velocidad permiten establecer que la infraestructura de GeoPark como vías y plataformas, no generan cambios significativos en las velocidades. Las variaciones observadas consisten en pequeños cambios en sectores ya naturalmente propensos a encharcamientos, concentrados principalmente en las vías de acceso a las plataformas Jacana, Tigui Este y Sinsonte - Guaco.

Frente al contexto hídrico regional, la infraestructura de GeoPark no es el factor determinante en la dinámica de las inundaciones en el área de estudio, toda vez que las áreas que presentan diferencias entre escenarios corresponden a zonas que, aun en ausencia de infraestructura de GeoPark, ya mostraban una predisposición natural a la acumulación de agua debido a su topografía, baja pendiente, la presencia de cauces cercanos o condiciones geomorfológicas que favorecen el encharcamiento.

3.3.4. Validación del modelo hidráulico

Los modelos de inundación en general no se calibran a partir de mediciones de caudal, puesto que al ser tan grandes las extensiones inundadas, es físicamente imposible correlacionar el caudal total que da origen al evento de inundación con el área inundada. Partiendo de lo anterior, la validación de estos modelos se realiza mediante el análisis conceptual de profundidades de inundación utilizando registros fotográficos, testimonios, imágenes satelitales, etc.

Con el objetivo de contrastar los resultados del modelo hidráulico con información empírica local, se compararon las profundidades reportadas por la comunidad durante el evento del 1 de mayo de 2024 con las profundidades simuladas para el escenario sin cambio climático (SC) y un tiempo de retorno de 2.33 años (**Tabla 3-16**). Para cada punto reportado como inundado, se calculó la profundidad máxima modelada promedio dentro de un radio de 50 m, de manera que se representara adecuadamente la variabilidad espacial de la inundación en torno a la zona reportada.

En ambos casos, el modelo reproduce de manera consistente las zonas de inundación señaladas por la comunidad, confirmando que las áreas efectivamente anegadas en campo también presentan acumulación de agua en la simulación. En el punto AQ194_1_F02_E4_F1, la comunidad reportó una profundidad aproximada de 0.4 m, mientras que el modelo estima valores medios de 0.22 m (SC–SG) y 0.24 m (SC–CG), con desviaciones estándar de 0.32 m y 0.33 m, respectivamente. Esto indica que el valor observado se encuentra dentro del rango de variabilidad espacial esperado en el entorno del punto, considerando que dentro del buffer de 50 m se alcanzan profundidades máximas de hasta 1.29 m y 1.33 m.

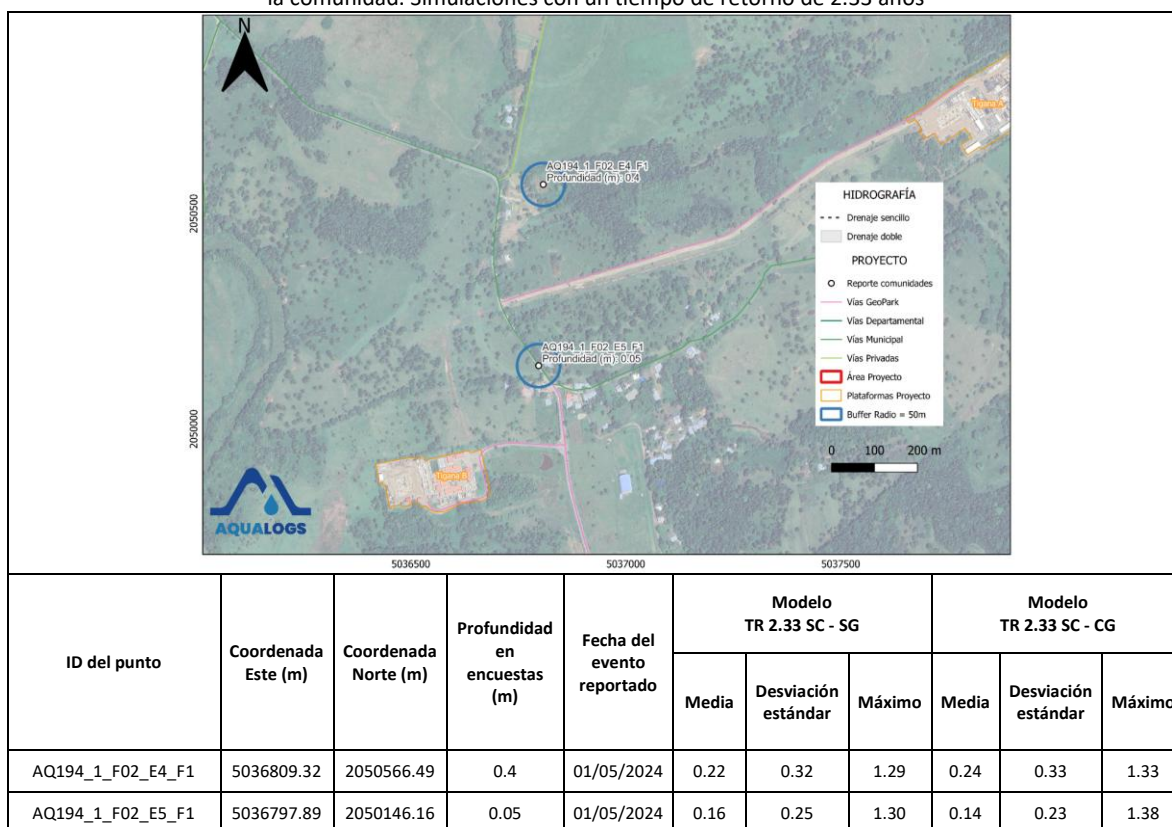
De manera similar, en el punto AQ194_1_F02_E5_F1, la observación local indicó una lámina de 0.05 m, mientras que el modelo simula 0.16 m (SC–SG) y 0.14 m (SC–CG), con desviaciones estándar de 0.25 m y 0.23 m, respectivamente. Nuevamente, el valor observado se encuentra dentro del rango de dispersión modelado, lo cual respalda la coherencia espacial y magnitudinal del modelo frente a los testimonios de la comunidad.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEOPARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

Aunque el evento real reportado por la comunidad no corresponde exactamente al TR = 2.33 años, los resultados muestran que las magnitudes y patrones espaciales simulados son consistentes con las condiciones reportadas por la comunidad, evidenciando que el modelo reproduce adecuadamente la ocurrencia de la inundación en los puntos observados.

Las diferencias entre los escenarios con y sin proyecto son menores a 0.05 m en promedio, lo que sugiere que la presencia del proyecto no altera significativamente la dinámica superficial local bajo este régimen de retorno.

Tabla 3-16. Estadísticas de profundidad máxima del modelo en un buffer de radio de 50 m en los puntos señalados por la comunidad. Simulaciones con un tiempo de retorno de 2.33 años



Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Adicionalmente, con el fin de contrastar los resultados del modelo hidráulico con observaciones en áreas, el 14 de julio de 2025 se realizaron vuelos con dron sobre varias plataformas del proyecto, aprovechando que durante esa fecha se registraban condiciones de anegamiento en los alrededores.

La **Figura 3-11** presenta una comparación entre la profundidad máxima simulada en el escenario sin cambio climático (SC), con proyecto (CG) y un tiempo de retorno de 2.33 años, frente a una imagen aérea capturada el 4 de julio de 2025 a las 6:27 a.m. en la zona de Jacana Central y su vía de acceso.

En la figura se destacan tres sectores (I, II y III) mediante círculos amarillos, donde es posible observar coincidencias notables entre las zonas inundadas simuladas y las áreas anegadas reales

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

captadas por el dron. Por ejemplo, la zona (I) muestran acumulación de agua tanto en la simulación como en la imagen aérea, mientras que la zona (III) aparece con casi nulo nivel de inundación, evidenciando una respuesta coherente del modelo ante las condiciones topográficas y de drenaje superficial. Asimismo, se aprecia que las plataformas operativas permanecen en áreas secas, lo cual coincide con las observaciones reales.

Estos resultados respaldan la validez espacial del modelo hidráulico, mostrando su capacidad para reproducir la distribución y extensión del anegamiento observada en campo, incluso bajo condiciones hidrometeorológicas reales que no corresponden exactamente al evento de diseño.

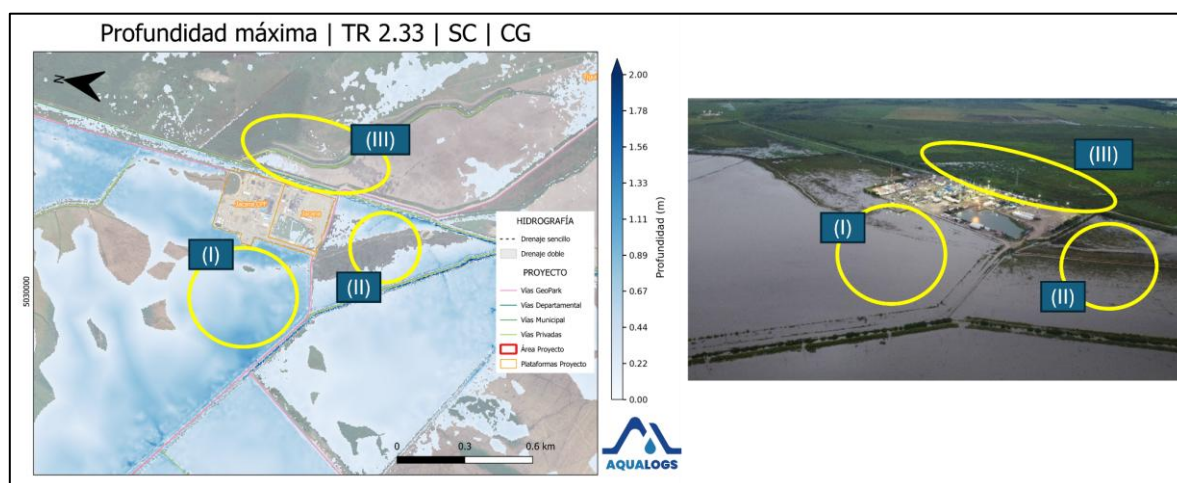


Figura 3-11. Comparación entre escenario SC-CG en TR 2.33 y foto aérea real.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

3.3.5. Principales variaciones espaciales y temporales de la inundación

Con el propósito de evaluar el efecto de las infraestructuras viales sobre el comportamiento hidráulico del área de estudio, se realizó un análisis comparativo entre los escenarios “con proyecto” y “sin proyecto”.

El procedimiento consistió en restar los resultados de profundidad máxima del escenario sin proyecto a los del escenario con proyecto (es decir: con proyecto – sin proyecto), lo cual permitió cuantificar las diferencias en la profundidad de la lámina de agua generadas por la presencia de las vías construidas por Geopark. De esta manera, los valores positivos indican incrementos en la profundidad del agua (mayor acumulación o retención del flujo superficial con proyecto), mientras que los valores negativos señalan disminuciones o reducciones locales de dicha profundidad en el escenario con proyecto.

La comparación se realizó para las simulaciones correspondientes al tiempo de retorno de 20 años (TR20) bajo condiciones históricas, dado que este periodo de retorno se emplea comúnmente en el diseño de estructuras hidráulicas y en la evaluación del riesgo de inundación (INVIAS, 2025). Adicionalmente, el TR20 corresponde al criterio adoptado para el diseño de las obras

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

implementadas por GeoPark en el Bloque Llanos 34, por lo que su utilización resulta especialmente pertinente para evaluar el efecto hidráulico de dicha infraestructura en el comportamiento del flujo superficial.

En este sentido, el uso del TR20, responde a la necesidad de garantizar coherencia técnica entre los supuestos de diseño y el análisis hidrodinámico. Evaluar los efectos de la infraestructura bajo el mismo periodo de retorno con el que fue concebida permite valorar de manera más representativa su desempeño hidráulico, así como identificar posibles modificaciones en los patrones de flujo generados por su implementación.

Los resultados se ilustran en la **Figura 3-12**, en la que las zonas en tonos rojos representan incrementos en la profundidad de la lámina (efecto del proyecto), mientras que las zonas en azul reflejan reducciones en la profundidad, asociadas a cambios en la dirección o redistribución del flujo superficial.

Diferencia de profundidad| SC_CG - SC_SG | TR20

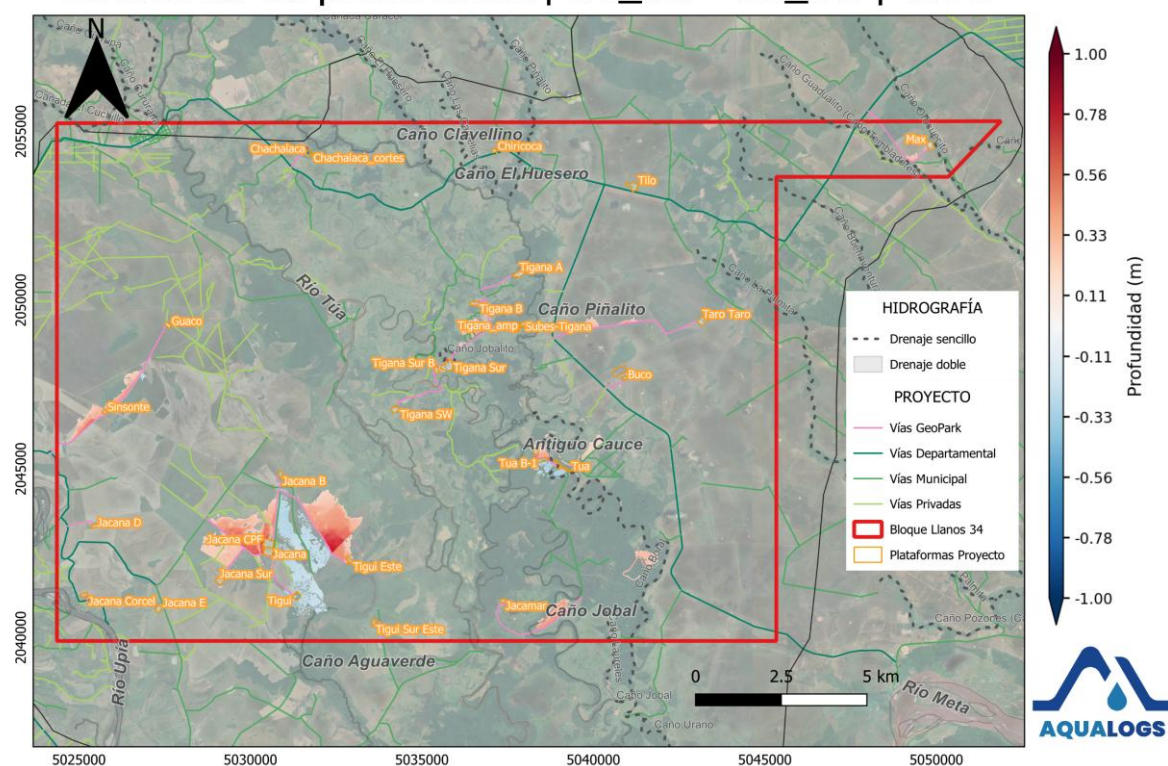


Figura 3-12. Diferencia de profundidad entre escenario con y sin proyecto, bajo condiciones de TR 20 años.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

En términos espaciales, los resultados muestran que las principales variaciones positivas (aumento de nivel de agua) se localizan en los círculos amarillo de la **Figura 3-13**: (I) Al este de la vía de acceso a la locación Jacana, con un aumento en promedio de 0.29 m. (II) Al este de la vía de acceso a la locación Tigüi Este, con un incremento promedio de 0.32 m y (III) al noroeste de la vía de acceso a

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

la locación Sinsonte que posteriormente permite el acceso a la locación Guaco, donde se evidenció valores máximos cercanos a 0.77 m.

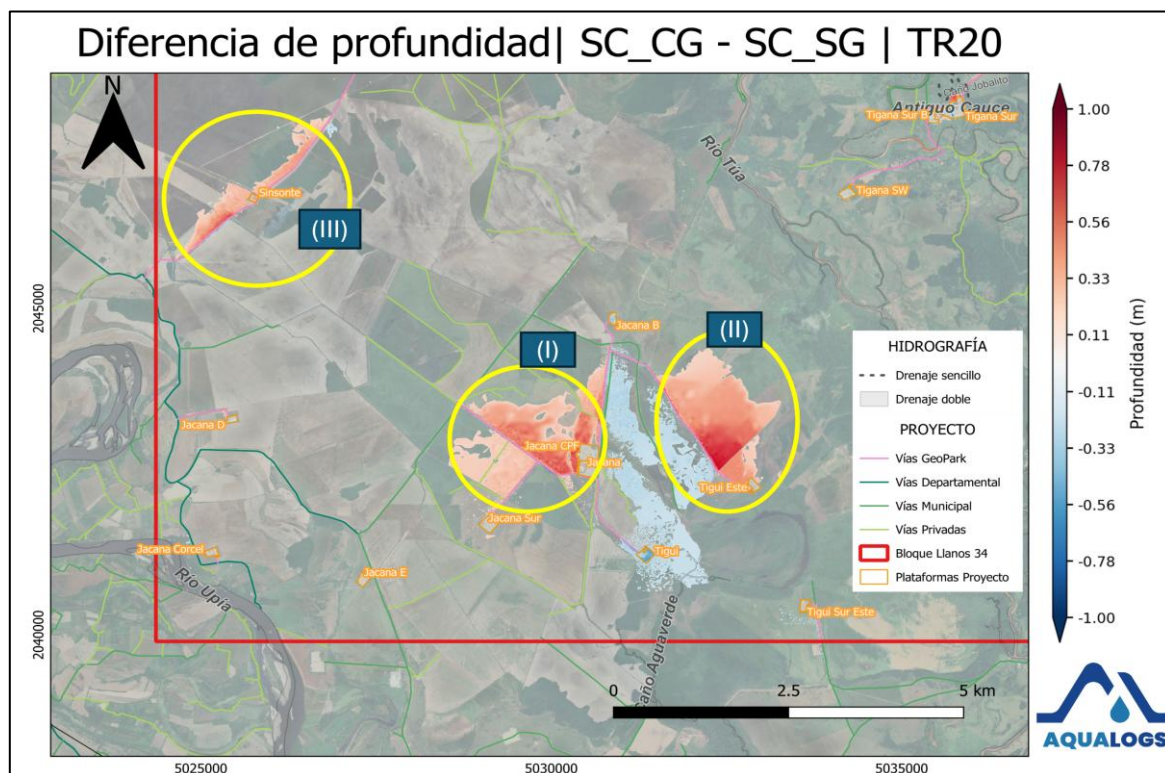


Figura 3-13. Diferencia de profundidad entre escenario con y sin proyectos, bajo condiciones de tiempo de retorno de 20 años. Donde (I) vía de acceso a la locación Jacana, (II) vía de acceso a la locación Tigui Este y (III) vía de acceso a las locaciones Sinsonte-Guaco

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

3.3.6. Análisis en plataformas y vías

3.3.6.1. Localización en plataformas Jacana | Tigui

En la **Figura 3-14** se presenta un acercamiento (zoom-in) a la zona donde se encuentran las plataformas Jacana y Tigui.

En primer lugar, se observa que las plataformas Tigui Sur Este, Jacana B y sus respectivas vías de acceso no presentan cambios significativos en la altura de la lámina de agua bajo un escenario de TR20, lo que indica que la infraestructura de GeoPark no genera efectos relevantes en estos sectores.

En el sector comprendido entre el costado noreste de la vía de acceso a la localización Tigui y el costado suroeste de la vía de acceso a la localización Tigui Este, así como en la propia plataforma Tigui, se evidencia una reducción en la profundidad de inundación en el escenario con proyecto

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEOARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

respecto al escenario sin proyecto (zonas en color azul). Esta disminución alcanza valores cercanos a 0.22 m, asociada a una redistribución local del flujo superficial en la zona de aguas arriba.

Por su parte, las plataformas Jacana Sur, Jacana, Jacana CPF y Tigui Este no presentan variaciones relevantes en la extensión o profundidad de la inundación entre el escenario con y sin proyecto. No obstante, se identifican incrementos en la lámina de agua en las vías de acceso a estas plataformas, específicamente, el sector sureste de la vía de acceso a Tigui Este, el sector noreste de la vía de acceso a Jacana y el sector noroeste de la vía de acceso a Jacana Sur.

Con el fin de caracterizar estos cambios, se seleccionaron dos puntos de control para la extracción de series temporales de profundidad a partir de los resultados de la simulación hidráulica (puntos verdes de la **Figura 3-14**). La ubicación de estos puntos se definió estratégicamente en zonas próximas a las vías de acceso y en sectores donde se identificó visualmente un cambio más significativo.

En el Punto 1, localizado en cercanías de la vía de acceso a la plataforma Jacana, las series de tiempo correspondientes a los escenarios con proyecto (SC_CG) y sin proyecto (SC_SG) presentan un comportamiento temporal similar, aunque con diferencias en la magnitud. La profundidad máxima difiere en aproximadamente 0.8 m, alcanzando este valor entre las 10 y 15 horas de simulación. A lo largo del periodo modelado (55 h), una vez establecida la inundación, la lámina de agua permanece prácticamente constante en ambos escenarios. Esto sugiere un drenaje superficial lento, y que aun sin el proyecto, la persistencia del agua en superficie sería prolongada, aunque con una magnitud inferior.

En el Punto 2, se identifica un incremento máximo cercano a 0.9 m entre las 10 y 15 horas de simulación. De manera similar al caso anterior, la lámina correspondiente al escenario sin proyecto no retorna completamente a valores nulos al finalizar el periodo de modelación, evidenciando una acumulación sostenida de agua asociada a la baja capacidad de evacuación del terreno, el cual presenta una morfología cóncava.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

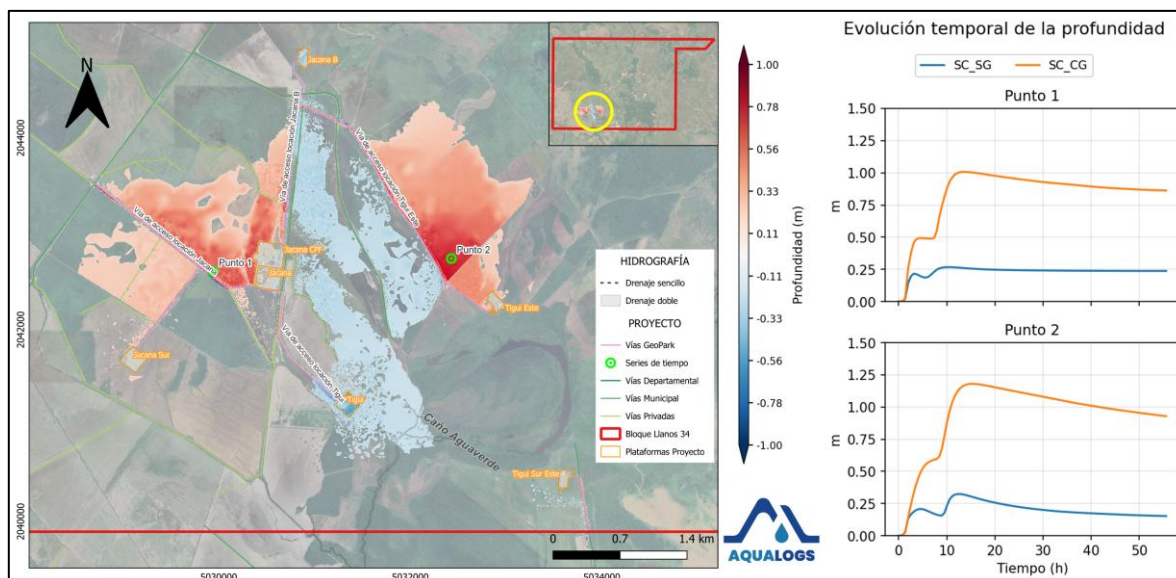


Figura 3-14. Diferencia de profundidad entre el escenario con infraestructura de GeoPark y el escenario sin infraestructura, bajo condiciones históricas y un periodo de retorno de 20 años. Se presenta un acercamiento a la zona suroeste del modelo, en el área correspondiente a las plataformas Jacana y Tigui.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

En resumen, en las zonas donde se observan diferencias entre los escenarios con y sin proyecto, estas no implican un cambio en la dinámica de inundación; es decir, no se generan áreas nuevas que antes no fueran susceptibles a inundación. Se trata de sectores que, aun antes de la construcción de la infraestructura, ya presentaban una tendencia natural a acumular lámina de agua durante eventos de crecient. La presencia del proyecto produce principalmente variaciones en la magnitud de la lámina de inundación, con pequeños incrementos localizados hacia aguas arriba y reducciones hacia aguas abajo. En conjunto, estas variaciones son coherentes con la topografía y la hidrodinámica preexistentes.

3.3.6.2. Localización en plataformas Sinsonte | Guaco

La **Figura 3-15** muestra la diferencia de profundidad entre el escenario con infraestructura de GeoPark y el escenario sin infraestructura, para condiciones de periodo de retorno de 20 años, con un acercamiento a la zona donde se ubican las plataformas Sinsonte y Guaco, junto con sus vías de acceso.

En general, la plataforma Guaco y sus áreas circundantes no presentan variaciones en la lámina de inundación debido a la presencia del proyecto, lo que indica que la infraestructura no modifica el comportamiento hidrodinámico local. Las diferencias más notorias se concentran en el entorno de la plataforma Sinsonte, donde se identifican incrementos en la acumulación de flujo hacia el noroeste de la vía de acceso, en comparación con el escenario sin proyecto. Estos aumentos son consistentes con una redistribución natural del escurrimiento superficial en una zona que, aun en condiciones previas al desarrollo, ya mostraba tendencia al encharcamiento.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

Con el fin de verificar esta dinámica, se extrajo la serie temporal correspondiente al Punto 3 (marcado en verde en la **Figura 3-15**), ubicado en las proximidades de la vía de acceso a Sinsonte. En este punto, el pico máximo de profundidad ocurre durante las primeras 5 horas de simulación, registrándose una diferencia aproximada de 0.7 m entre los escenarios. Posteriormente, la lámina de agua disminuye de manera gradual, aunque permanece durante varias horas, lo que evidencia que, incluso sin la presencia del proyecto, el sector es naturalmente propenso a acumulaciones persistentes de agua, especialmente durante las fases iniciales del evento de lluvia o escorrentía.

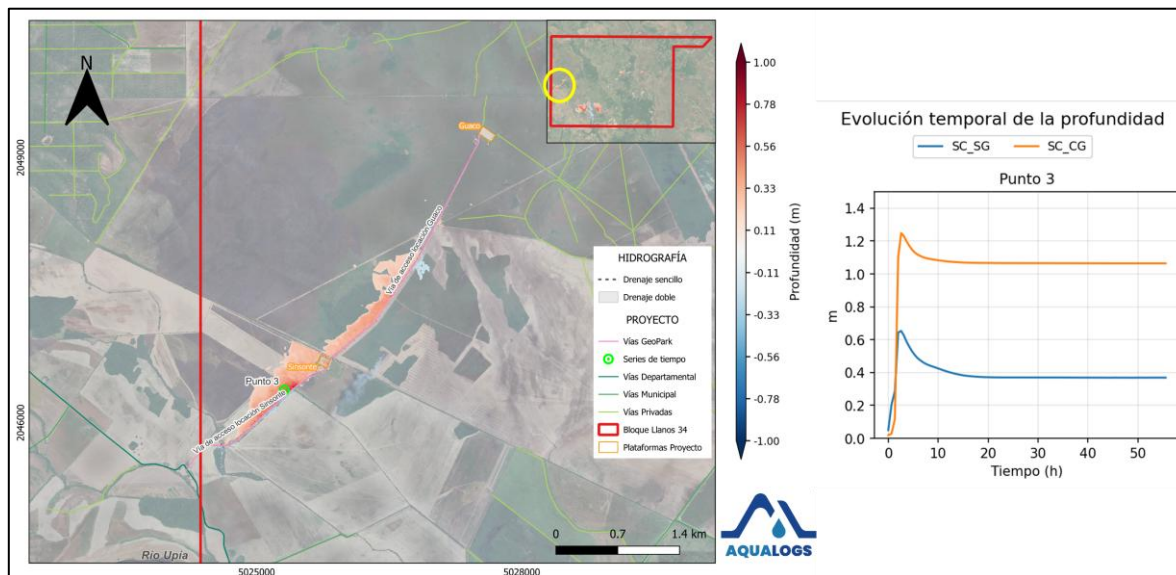


Figura 3-15. Diferencia de profundidad entre el escenario con infraestructura de GeoPark y el escenario sin infraestructura, bajo condiciones históricas y un periodo de retorno de 20 años. Se presenta un acercamiento a la zona oeste del modelo, en el área correspondiente a las plataformas Sinsonte y Guaco.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

3.3.6.3. Localización en plataformas Tigana

En la **Figura 3-16**, Se presenta un acercamiento a la zona donde se ubican las plataformas Tigana y sus respectivas vías de acceso. En general, las plataformas Tigana A, Tigana SW, Tigana Sur B, Tigana Sur, Subes–Tigana, Subes–Tigana PEL, Tigana AMP, así como las vías de acceso a Tigana Sur Oeste y Tigana A, no muestran cambios significativos en la extensión o profundidad de la inundación entre los escenarios con y sin proyecto. Esto indica que la presencia de la infraestructura no altera la dinámica de las inundaciones en estos sectores, ni en su patrón temporal ni en su magnitud.

El cambio más relevante se observa al costado noroeste de la vía de acceso a la localización Tigana Sur, donde se registra un aumento localizado en la lámina de agua en el escenario con proyecto. Para examinar este comportamiento, se extrajo la serie temporal en el Punto 4 (marcado en verde en la figura). En este punto, la diferencia máxima de profundidad entre los escenarios alcanza aproximadamente 0.5 m.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

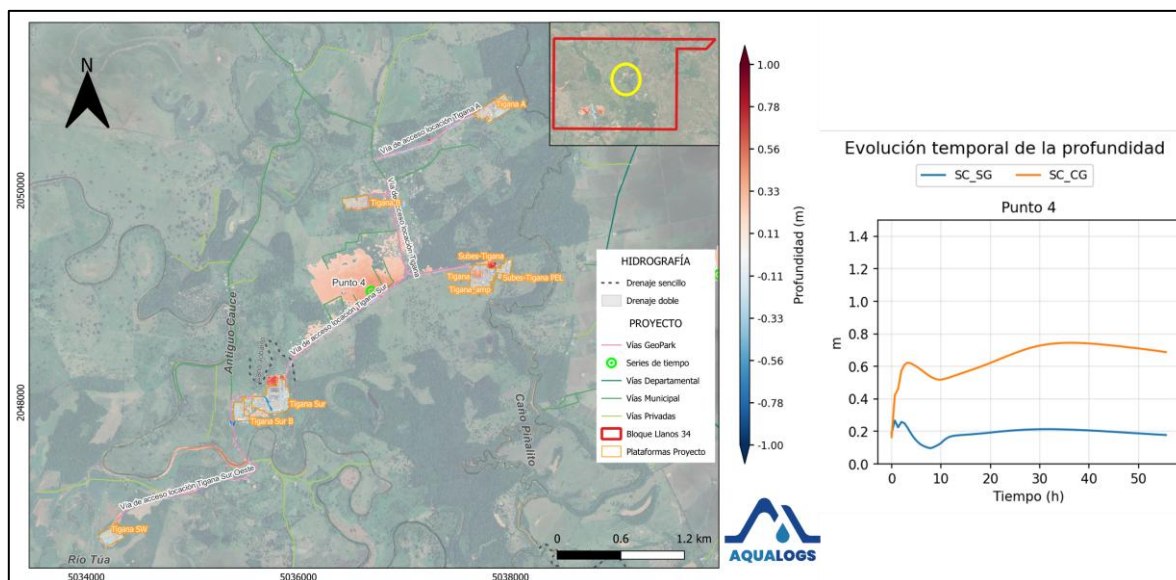


Figura 3-16. Diferencia de profundidad entre el escenario con infraestructura de GeoPark y el escenario sin infraestructura, bajo condiciones históricas y un periodo de retorno de 20 años. Se presenta un acercamiento a la zona correspondiente a las plataformas Tigana.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

3.3.6.4. Localización en plataformas Taro Taro | Buco | Granja Solar

La **Figura 3-17**, muestra un acercamiento a las localizaciones Taro Taro, Buco y Granja Solar, donde no se evidencian cambios significativos en la profundidad máxima de la lámina de agua al comparar los escenarios con y sin proyecto.

Por otro lado, en el costado norte de la vía de acceso a la localización Taro Taro se observa una acumulación puntual de flujo. Para analizar este comportamiento, se extrajo la serie temporal correspondiente al Punto 5. En este punto, la diferencia máxima de profundidad entre los escenarios es cercana a 0.3 m, aunque esta disminuye rápidamente en el tiempo, alcanzando valores del orden de 0.09 m hacia el final del horizonte de modelación. Esta rápida reducción sugiere que las variaciones inducidas por la infraestructura son de carácter transitorio y de baja persistencia, lo que indica que la dinámica local de drenaje no se ve modificada de manera relevante en este sector.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

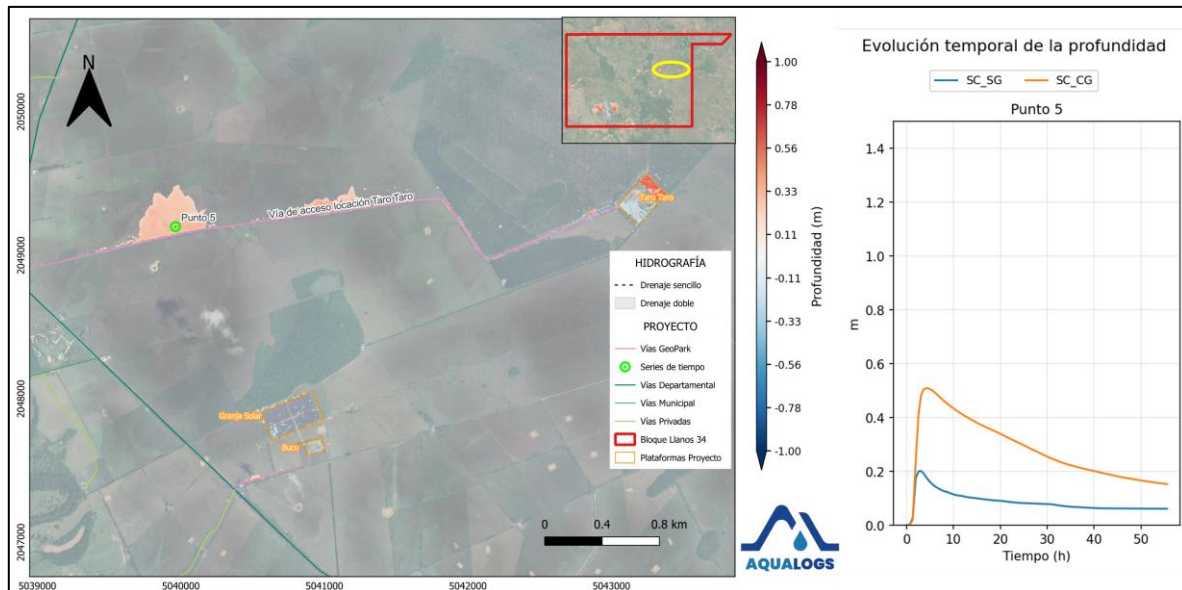


Figura 3-17. Diferencia de profundidad entre el escenario con infraestructura de GeoPark y el escenario sin infraestructura, bajo condiciones históricas y un periodo de retorno de 20 años. Se presenta un acercamiento a la zona correspondiente a las plataformas Taro Taro, Buco y Granja Solar.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

3.3.6.5. Localización en plataformas Chiricoca | Tilo

En la **Figura 3-18**, presenta la diferencia de profundidad de lámina de agua para un escenario sin cambio climático y con un periodo de retorno de 20 años, comparando las condiciones sin proyecto y con proyecto. En el acercamiento a la zona donde se ubican las plataformas Chiricoca y Tilo, se observa que no se generan cambios relevantes en la mancha de inundación asociados a la presencia de estas estructuras. Esto indica que la infraestructura existente en este sector no modifica de manera apreciable la extensión ni la dinámica local de la inundación.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

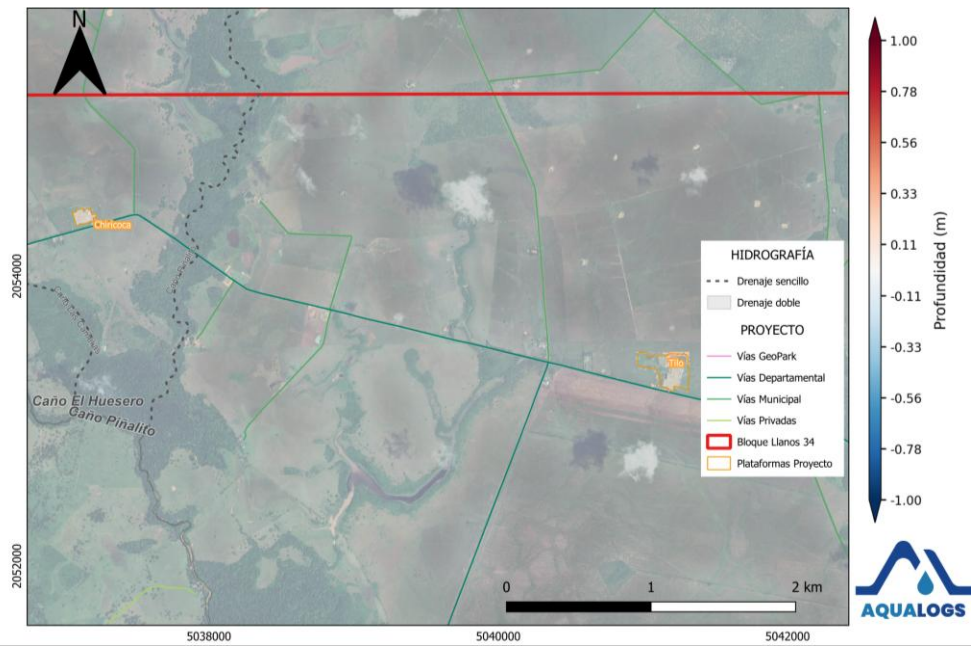


Figura 3-18. Diferencia de profundidad entre el escenario con infraestructura de GeoPark y el escenario sin infraestructura, bajo condiciones históricas y un periodo de retorno de 20 años. Se presenta un acercamiento a la zona correspondiente a las plataformas Chiricoca y Tilo.

3.3.6.6. Localización en plataforma Max

Para la plataforma Max (**Figura 3-19**), se tiene que no hay cambios significativos con la presencia de la estructura. En la vía de acceso a la locación Max, se identifica un incremento puntual de la lámina de inundación, con una diferencia aproximada de 0.4 m entre los escenarios con y sin proyecto.

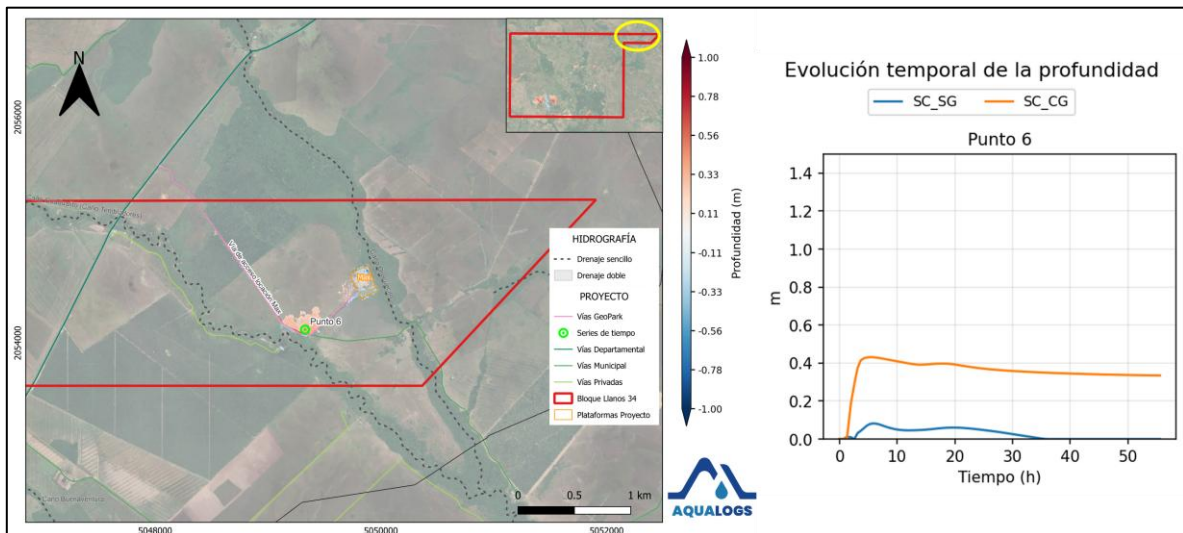


Figura 3-19. Diferencia de profundidad entre el escenario con infraestructura de GeoPark y el escenario sin infraestructura, bajo condiciones históricas y un periodo de retorno de 20 años. Se presenta un acercamiento a la zona correspondiente a plataforma Max.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

3.3.6.7. Localización en plataformas en localización Túa

Los alrededores de las plataformas Túa (**Figura 3-20**) muestran variaciones en la profundidad de la lámina de agua entre los escenarios con y sin proyecto. Hacia aguas arriba se observa un incremento en la acumulación (zonas en rojo), mientras que hacia aguas abajo se presenta una disminución (zonas en azul). Las mayores acumulaciones se localizan al norte de la vía de acceso a las locaciones Túa A y Túa B, un sector donde las inundaciones responden principalmente a la combinación de precipitación acumulada y desbordamientos del caño Boral, generando encharcamientos que disminuyen de manera lenta.

Para analizar esta dinámica, se extrajo la serie temporal correspondiente al Punto 7 (indicado en la figura), en la cual se identifica una diferencia máxima cercana a 0.4 m entre los escenarios con y sin proyecto.

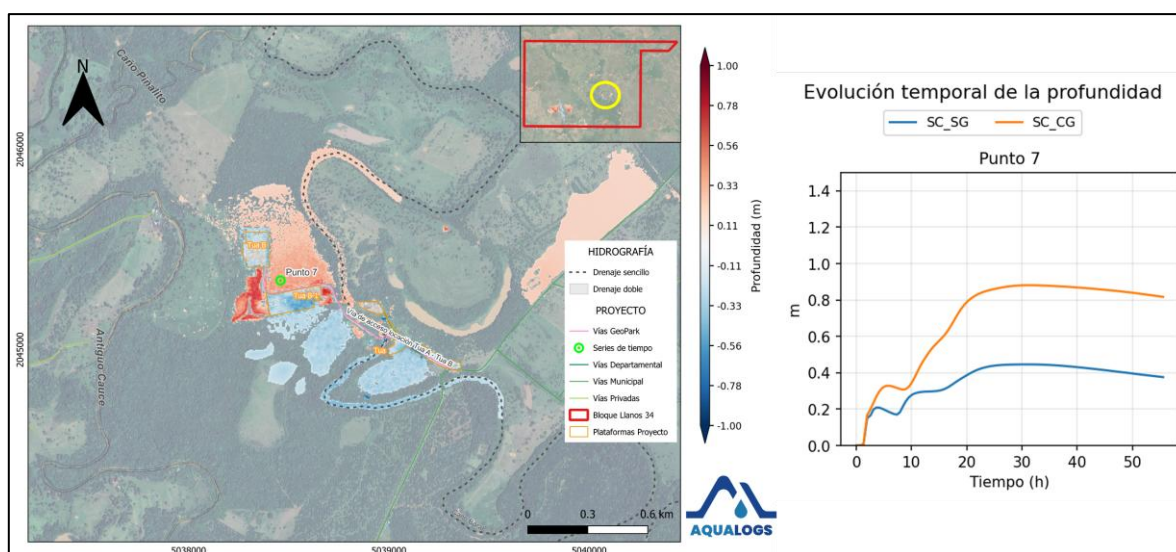


Figura 3-20. Diferencia de profundidad entre el escenario con infraestructura de GeoPark y el escenario sin infraestructura, bajo condiciones históricas y un periodo de retorno de 20 años. Se presenta un acercamiento a la zona correspondiente a las plataformas Túa.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

3.3.6.8. Localización en plataforma Jacamar

La plataforma Jacamar no presenta cambios significativos en la profundidad máxima de la lámina de agua entre los escenarios con y sin proyecto (**Figura 3-21**). Adicionalmente, se identificó un área de interés al norte del primer tramo de la vía de acceso a la locación Jacamar, donde se definió el Punto 8 para la extracción de la serie temporal de profundidad. Las inundaciones en esta zona están asociadas al desbordamiento del Caño Jobal. En este punto, la diferencia máxima entre los escenarios alcanza aproximadamente 0.5 m, aunque la lámina de agua permanece en el tiempo incluso en ausencia del proyecto, aunque en menor magnitud. Este comportamiento indica que las

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

condiciones topográficas y la baja pendiente del terreno favorecen la persistencia del encharcamiento.

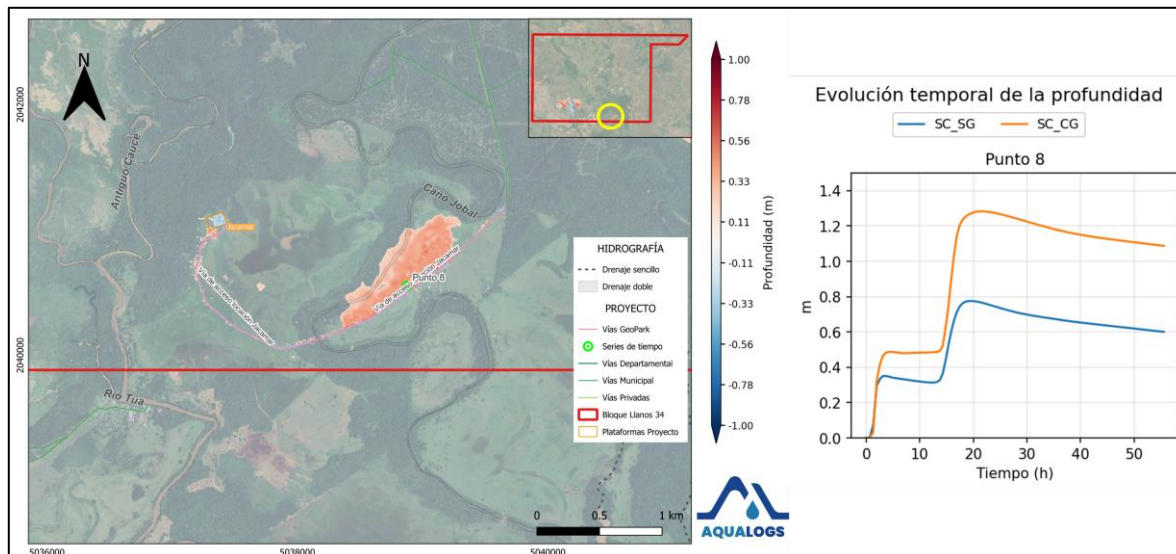


Figura 3-21. Diferencia de profundidad entre el escenario con infraestructura de GeoPark y el escenario sin infraestructura, bajo condiciones históricas y un periodo de retorno de 20 años. Se presenta un acercamiento a la zona correspondiente a la plataforma Jacamar.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

3.3.6.9. Localización en plataformas Chachalaca

En las plataformas Chachalaca no se observan cambios significativos en la profundidad máxima de la lámina de agua entre los escenarios con y sin proyecto (**Figura 3-22**). En el área donde se aprecia una mayor acumulación corresponde a un sector donde se encuentra una zona de préstamo, por lo que no representa una nueva área susceptible de inundación ni un impacto sobre la dinámica hídrica natural.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

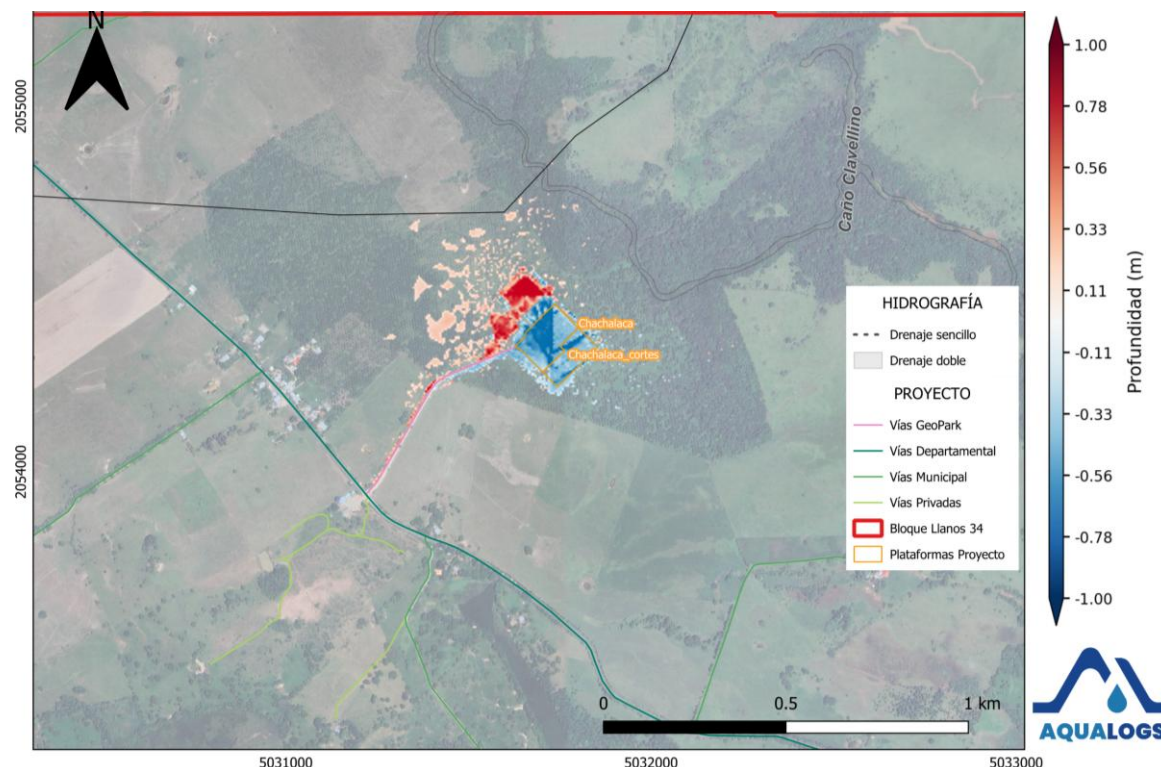


Figura 3-22. Diferencia de profundidad entre el escenario con infraestructura de GeoPark y el escenario sin infraestructura, bajo condiciones históricas y un periodo de retorno de 20 años. Se presenta un acercamiento a la zona correspondiente a la plataforma Chachalaca.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

3.3.7. Propuestas de adaptación

Con base en los resultados obtenidos del análisis espacial y temporal de las profundidades de inundación, se identificaron tres sectores principales (señalados con círculos amarillos de la **Figura 3-13**) donde se presentan leves aumentos en la profundidad de anegación durante los eventos simulados con y sin proyecto.

Considerando que estos puntos se encuentran próximos a las vías del proyecto, se plantea un conjunto de medidas de manejo y adecuación hidráulica orientadas a adaptar el sistema existente a los requerimientos que escenarios de cambio climático van a causar sobre la infraestructura en términos de caudal.

En particular, se propone el diseño e implementación de obras de drenaje transversal, principalmente alcantarillas. El objetivo de estas estructuras es preservar la continuidad del flujo superficial, evitando el represamiento y reduciendo los incrementos de nivel asociados a la presencia de la vía.

La **Figura 3-23** presenta la ubicación de las estructuras hidráulicas propuestas, mientras que en la **Tabla 3-17**, se detalla la descripción técnica de cada obra. En total, se proponen dos estructuras

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

hidráulicas principales para atender dos de las zonas donde se concentra un leve aumento en la profundidad de la inundación identificada por el modelo.

Adicionalmente, se destaca en la **Figura 3-23** un sector adicional señalado con un círculo amarillo (vía a plataforma Tigui Este), el cual, según los resultados de simulación, también experimenta un leve aumento en la profundidad de agua anegada. No obstante, tras la consulta directa con los propietarios de los predios circundantes a esta vía, se estableció que esta área se destina a actividades agrícolas, donde el anegamiento temporal del terreno resulta beneficioso para el desarrollo de los cultivos.

Puntualmente, en esta zona existen canales de riegos paralelos a la vía que permiten dar un manejo hidráulico interno a los predios de los cultivos para mantenerlos anegados cuando sea necesario. De esta manera los canales limitarían la funcionalidad de cualquier obra propuesta en este sector y por ende, no se propone la construcción de nuevas obras de drenaje, con el fin de mantener el uso actual del suelo y evitar posibles conflictos sociales o alteraciones en las prácticas productivas de la comunidad local.

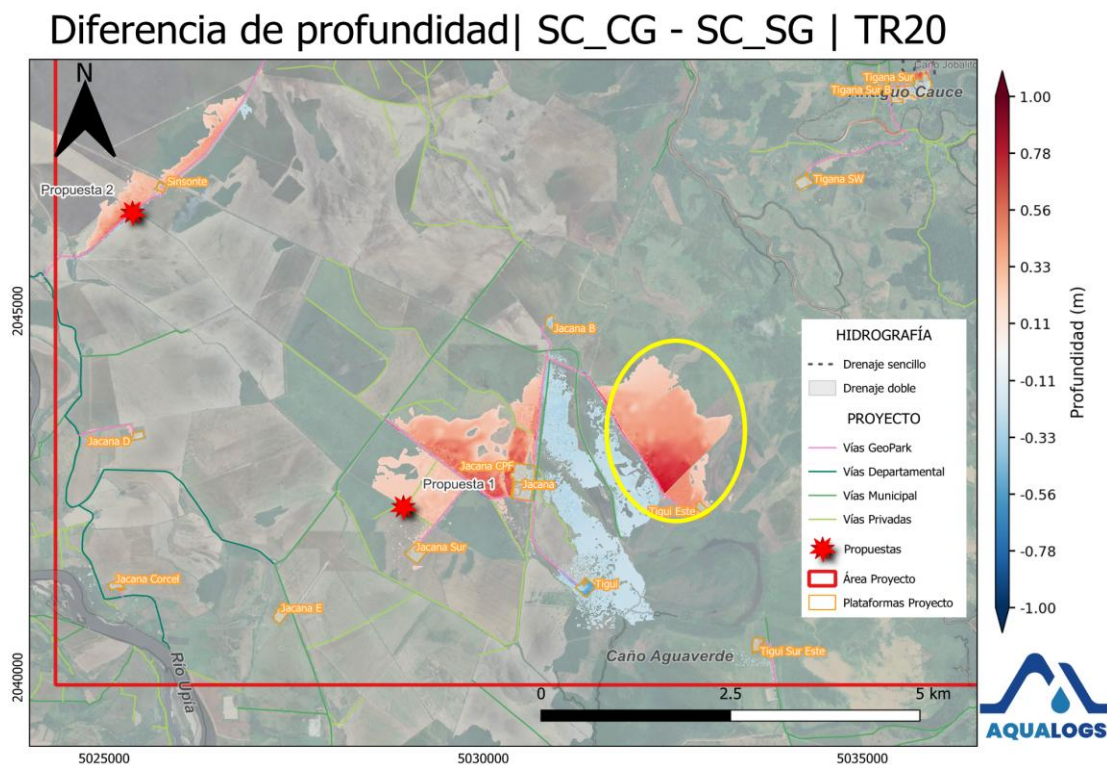


Figura 3-23. Ubicación de estructuras hidráulicas propuestas.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Tabla 3-17. Descripción de las propuestas

Nombre de la propuesta	Tipo de estructura	Número de conductos	Diámetro nominal (m)	Este	Norte
Propuesta 1	Alcantarilla circular	3 conductos en paralelo	1	5028952.23	2042317.96

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

Propuesta 2	Alcantarilla circular	2 conductos en paralelo	0.9	5025338.83	2046303.16
-------------	-----------------------	-------------------------	-----	------------	------------

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Esta obra se propone sobre una vía privada que no hace parte de la infraestructura de GeoPark. Aunque la vía de acceso a Jacana permite la continuidad del flujo y las estructuras tienen suficiente capacidad hidráulica, la propuesta de esta obra es estratégica ya que disminuye el represamiento causado por la vía privada y que mejora el drenaje en este sector.

En la **Figura 3-24** se muestra el comportamiento hidráulico de la Propuesta 1, correspondiente a las alcantarillas con IDs 530–531–532 del modelo hidráulico. En este punto, se instalaron tres conductos circulares en paralelo, cada uno con un diámetro de 1 m.

La curva de descarga presenta un ascenso progresivo del caudal combinado hasta alcanzar un máximo cercano a 0.65 m³/s alrededor de la hora 15 de simulación, seguido de una estabilización en torno a 0.45 m³/s, lo cual indica una adecuada capacidad de evacuación sin sobrepresión significativa.

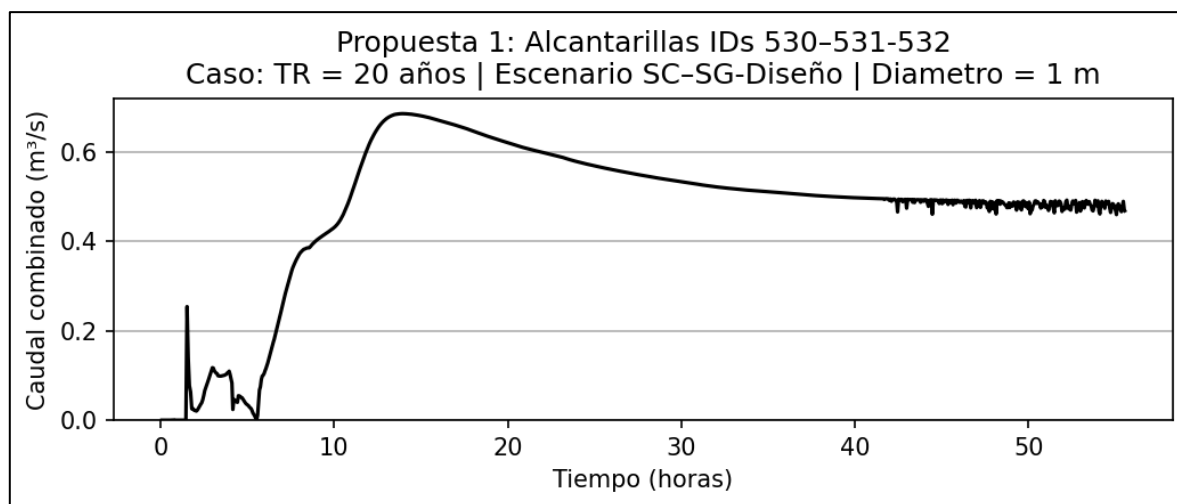


Figura 3-24. Descarga de la estructura hidráulica – Propuesta 1.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Por su parte, la **Figura 3-25** corresponde a la Propuesta 2, que considera dos alcantarillas circulares (IDs 162–163) de 0.9 m de diámetro cada.

En este caso, el caudal combinado alcanza un pico máximo de aproximadamente 2.0 m³/s en las primeras horas del evento, seguido de una rápida estabilización alrededor de 1.5 m³/s.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

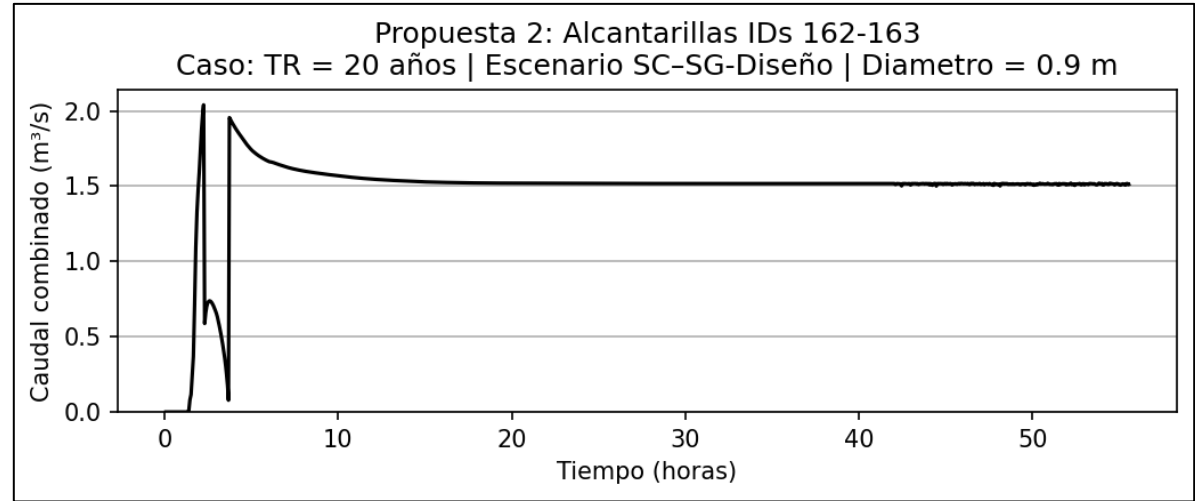


Figura 3-25. Descarga de la estructura hidráulica – Propuesta 2.

Fuente. Aqualogs SAS (2025).

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

4. Conclusiones

Siguiendo los objetivos establecidos para dar cumplimiento a los requerimientos establecidos por la ANLA en los actos administrativos que dieron origen al presente Estudio Hidrológico y Modelación Hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 (Resolución 1089 de 2024 y Resolución 2030 de 2024) se desarrollaron simulaciones de inundación para seis periodos de retorno (2.33; 5; 10; 20; 50 y 100 años), bajo dos escenarios con y sin cambio climático (usando condiciones SSP) y con y sin la infraestructura de GeoPark. De forma adicional, bajo el análisis de la información, se desarrollaron escenarios de obras que mejoraran las condiciones de drenaje en el área.

Del análisis de infraestructura existente realizado como insumo para el modelo hidráulico se destaca que de los 349.1 km de vías existentes en el bloque Llanos 34, solo el 10.80% (37.42 km) corresponden a vías construidas por GeoPark; 55.35% son vías públicas y 33.85% vías privadas de terceros. Además, se destaca que, en varios sectores, con mayor concentración en el lado oeste del bloque (sector Jacana), se presentan canalizaciones de agua en cultivos de arroz que junto con las vías, generan una influencia en la dinámica fluvial del área de estudio.

En cuanto al modelo hidráulico, el costo computacional de cada simulación tuvo una tasa de 1.5 horas de corrida numérica (costo computacional) por cada hora de inundación simulada. Esta tasa en equipos de altísimo rendimiento (servidores en Amazon Web Services - AWS) muestran que el modelo existente no es una herramienta que pueda permitir alta flexibilidad a la hora de recrear múltiples escenarios.

En términos hidráulicos, se evidencia que el área posee dinámicas de inundación en la llanura desde el escenario $T_r = 2.33$ años. Este escenario también conocido como de inundación ordinario muestra que existen zonas que se anegarán de forma recurrente y que permanecerán inundadas por periodos superiores a 55 horas, que fueron los simulados en el presente ejercicio de modelación. Conforme se aumentan los tiempos de retorno, aumentan -como es intuitivo- las profundidades de inundación; sin embargo, la gran extensión de la llanura hace que la diferencia no sea muy excesiva (inferior a un metro en zonas de llanura alejadas de los cauces principales) por un “amortiguamiento” a lo ancho de las inundaciones.

La zona nororiental del área modelada, en donde se encuentran las plataformas TaroTaro, Tilo y Max, no se presenta influencia directa de las áreas de inundación asociadas a los ríos Upía, Túa ni de ninguno de sus afluentes, de forma que estas zonas no revisten un interés mayor en términos de inundación.

En cuanto a las velocidades máximas en las áreas inundables (excluyendo las existentes al interior de las alcantarillas) se logró evitar dispersión numérica en el modelo, empleando un mallado de celda pequeña (en promedio de 5 metros de longitud representativa). Los resultados muestran una naturaleza con flujos inferiores a 1 m/s, siendo estos valores “altos” y asociados a cauces principales, puesto que el flujo usual en las zonas de llanura es de menos de 0.3 m/s. Estas velocidades muestran dinámicas de inundación muy lentas con y sin la infraestructura construida para el proyecto de GeoPark.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEOARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

Para comparar los escenarios con y sin GeoPark se desarrollaron simulaciones con superficies con y sin vías y plataformas, como se describe en el capítulo de conceptualización. Los resultados diferenciales con Geopark (CG) y sin GeoPark (SG) permiten evaluar condiciones de inundación diferencial antes y después del proyecto.

El análisis detallado de las plataformas y sus vías de acceso bajo escenarios con Geopark (CG) y sin GeoPark (SG), permite establecer que la infraestructura de GeoPark no genera nuevas zonas susceptibles a inundación. En todos los sectores evaluados, las áreas que presentan diferencias entre escenarios corresponden a zonas que, aun en ausencia del proyecto, ya mostraban una predisposición natural a la acumulación de agua debido a su topografía, baja pendiente, la presencia de cauces cercanos o condiciones geomorfológicas que favorecen el encharcamiento.

La gran mayoría de las plataformas evaluadas (por ejemplo, Tigui, Jacana Sur, Tigana A, Tigana SW, Tigana Sur B, Tigana Sur, Tigana, Subestación Tigana, Taro Taro, Bucu, Granja Solar, Chiricoca, Tilo, Max, Túa, Jacamar y Chachalaca) no presentan cambios significativos ni en la extensión ni en la profundidad máxima de la lámina de inundación, evidenciando que los polígonos de las plataformas permanecen prácticamente inalterados ante la presencia de la infraestructura.

Las variaciones observadas se concentran principalmente en las vías de acceso a tres plataformas. Los pequeños incrementos localizados en la lámina de agua, generalmente hacia aguas arriba de las vías, reflejan una redistribución del flujo superficial en sectores ya naturalmente propensos a encharcamientos, como el costado noreste de la vía de acceso a Jacana, el sector noreste de la vía a Tigui Este y el área norte de la vía de acceso a Sinsonte - Guaco.

De manera similar, los descensos en la lámina de agua hacia aguas abajo de algunas estructuras evidencian que la infraestructura puede producir pequeñas variaciones locales en la magnitud de inundación, pero sin alterar la propagación ni la persistencia del fenómeno. El análisis temporal en los puntos de control confirma que, aun en ausencia del proyecto, la lámina de agua tiende a mantenerse durante horas o hasta el final del periodo modelado, lo que indica que la persistencia del encharcamiento responde principalmente a la topografía y la baja capacidad de drenaje natural del terreno, más que a la presencia de la infraestructura de Geopark.

Cabe resaltar que, en puntos como Tigana A, la presencia de la plataforma o de sus vías de acceso no genera incrementos en la extensión ni en la magnitud de la inundación, evidenciando que la infraestructura no altera la dinámica de inundación en el área del polígono. De manera similar, la plataforma Jacamar y su vía de acceso, no genera nuevas áreas de inundación, toda vez que dicha zona presenta naturalmente una dinámica de inundación cíclica, producto del desbordamiento natural del Caño Jobal; No obstante, en la vía de acceso a la plataforma; se presenta una zona con pequeñas variaciones locales de la lámina de agua sin que esto signifique cambios en la dinámica natural de inundación de la zona. En ambos casos, la persistencia del encharcamiento responde principalmente a la topografía local y a la baja pendiente del terreno, indicando que las infraestructuras producen efectos localizados sobre la magnitud de la lámina de agua, sin generar nuevas áreas susceptibles de inundación.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

En resumen, la resta de capas permite identificar zonas con diferenciales de inundación a lo largo de la infraestructura del proyecto, siendo, como se mencionó anteriormente, las áreas más significativas asociadas a las vías de GeoPark, las que permiten el acceso a las localizaciones Jacana, Tigui Este y Sinsonte. En las plataformas del campo Tigana no se identificaron áreas considerables de inundación, ni dinámicas adicionales en comparación con las dos mencionadas anteriormente. En la plataforma Jacamar no se evidencian flujos retenidos en cercanías a la plataforma, sin embargo, una pequeña área en la vía si presenta algo de acumulación.

En la vía de la plataforma Sinsonte se propone la construcción de una nueva alcantarilla que permita mejorar el flujo de agua a lo largo de la vía. En un sector al sur de la localización Jacana se propone la construcción de una única alcantarilla en vía privada aguas abajo de la vía a la plataforma, esto teniendo en consideración que los propietarios de los predios desarrollan sistemas de agricultura que se benefician de la inundación; esta única alcantarilla permite evacuar el flujo retenido aguas abajo, mejorando el desempeño de las alcantarillas existentes aguas arriba en las vías de GeoPark. Resulta relevante considerar la viabilidad de tal obra desde la perspectiva de los propietarios y sus actividades comerciales, por lo que su construcción estará sujeta a la concertación previos con dichos actores.

En conclusión y sintetizando lo descrito, en las zonas donde se observan diferencias entre los escenarios con y sin proyecto, estas no implican un cambio en la dinámica de inundación; es decir, no se generan áreas nuevas que antes no fueran susceptibles a inundación. Se trata de sectores que, aun antes de la construcción de la infraestructura, ya presentaban una tendencia natural a acumular lámina de agua durante eventos de creciente. La presencia del proyecto produce principalmente variaciones en la magnitud de la lámina de inundación, con pequeños incrementos localizados hacia aguas arriba y reducciones hacia aguas abajo en plataformas específicas. Estas variaciones son coherentes con la topografía y la hidrodinámica preexistentes.

En conjunto, los resultados del análisis hidráulico permiten concluir con claridad que las medidas de manejo ambiental implementadas por Geopark en cumplimiento de los diseños técnicos y las obligaciones establecidas en la licencia ambiental aprobada por ANLA para el bloque Llanos 34 son suficientes para garantizar la conexión y continuidad de la dinámica hídrica en la zona y que la configuración natural del terreno; caracterizada por pendientes bajas, topografías cóncavas, cercanía a cauces menores y una capacidad de drenaje limitada, son condiciones que generan encharcamientos aun en ausencia de infraestructura de Geopark, lo anterior sumado las condiciones antrópicas asociadas a la red vial pública y privada y al uso de los suelos principalmente en el sector oeste del bloque. Ahora bien, para dos casos puntuales donde se presenta un leve aumento del nivel de agua por causa de las vías de acceso de GeoPark, se proponen medidas de manejo que permiten prevenir cualquier impacto y deben entenderse como acciones de optimización hidráulica que buscan favorecer la conectividad del flujo superficial, ya que los fenómenos de inundación observados corresponden a la dinámica natural del sistema.

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

5. Bibliografía

Chow, V. te., & Maidment, D. R. . (1998). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.

Hervouet, J.-M. (2007). *Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method*. John Wiley & Sons.

Instituto Nacional de Vías. (2025). *Manual de Drenaje para Carreteras* (Versión V.3) [Manual técnico]. INVIAS.

R., H. J. A. (2018). *Theory guide of opensource software TELEMAC-3D*.

Smolders, S., Leroy, A., Teles, M. J., Maximova, T., & Vanlede, J. (2016). Culverts modelling in TELEMAC-2D and TELEMAC-3D. In S. Bourban (Ed.), *Proceedings of the XXIIIrd TELEMAC-MASCARET User Conference 2016, 11 to 13 October 2016, Paris, France* (p. 21). HR Wallingford. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104551>

Estudio hidrológico y modelación hidráulica Bloque de Explotación Llanos 34 – Análisis hidráulico		 GEO PARK
Código: AQ_194	Versión: 02	GeoPark

6. Anexos

6.1. Anexo 1. Levantamiento de campo

Ver carpeta A1_LevantamientoCampo.

6.2. Anexo 2. Modelo hidráulico

Ver carpeta: A2_ModeloHidraulico

- 00_Raster
- 01_Imagenes_png
- 02_Imagenes_pdf
- 03_Modelos