

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL RÍO PACUARE BAJO DIFERENTES
ESCENARIOS DE OBRAS DE PROTECCIÓN CONTRA INUNDACIÓN EN LA
COMUNIDAD DE LA LUCHA DE SIQUIRRES, LIMÓN

MAURO DAVID RODRÍGUEZ ROJAS

CARTAGO, 2019

MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL RÍO PACUARE BAJO DIFERENTES
ESCENARIOS DE OBRAS DE PROTECCIÓN CONTRA INUNDACIÓN EN LA
COMUNIDAD DE LA LUCHA DE SIQUIRRES, LIMÓN

MAURO DAVID RODRÍGUEZ ROJAS

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Ing. Fernando Watson Hernández

Asesor

MSc. Marvin Villalobos Araya

Director Escuela
Ingeniería Agrícola

TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2019

Dedicatoria

· Inicialmente dedico mi trabajo a todas aquellas personas que me acompañaron en este proceso como lo son mi profesor asesor; Fernando Watson, mi profesora lectora Isabel Guzmán, el presidente del tribunal Armando Alvarado y a mi asesor del SENARA Luis Alejandro Ramírez por todo su apoyo.

A su vez dedico mi trabajo a mis padres que siempre me acompañaron, así como a mis compañeros y amigos

Agradecimiento

Hay muchas personas involucradas a lo largo de mi vida a quienes quisiera agradecer, inicialmente rescato la preparación que tuve en mi escuela y colegio ya que siempre me inculcaron a trabajar con humildad y perseverancia en todos mis objetivos

Seguidamente agradezco a mi padre German Rodriguez y a mi madre Eida Rojas así como a mis hermanos Moisés, Marlon y Marco por acompañarme siempre y por crear día a día un mejor hogar en familia.

Agradezco también a todas las personas, amigos y familiares que estuvieron de una u otra forma durante todo mi proceso universitario, así como a los profesores durante mi carrera universitaria es especial a el Profesor Marvin Villalobos, Fernando Watson y Isabel Guzmán

A Karina Cerdas por ser una de las personas más importantes en el transcurso no solo de mi vida, sino también a nivel universitario, por motivarme a estudiar y por estar siempre ahí apoyándome de una u otra forma

A todos los amigos que hice en mi vida universitaria de una u otra carrera en especial a Jeison Vindas, Natalia Rodriguez, Pamela Muñoz, Lucia Solano, Dimas Arrieta, Juan Orias, Federico Montero, Karen Monge, Nataly Gómez, Daniela Brenes, Nancy Barahona, Katherine Monge, Joselin Ortiz, Darío Guzmán, Esteban Morales, José Vázquez entre algunos otros compañeros.

Por último, agradezco a mis compañeros de trabajo durante todos los años de carrera, sin los cuales esto hubiera sido realmente difícil, Adrián Garita, Giancarlo Barquero, Alexander Chanto y Leonardo Corella.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	xi
1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 Objetivos.....	16
1.1.1 Objetivo General.....	16
1.1.2 Objetivos Específicos	16
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Gestión de inundaciones	18
2.2 Mecánica de ríos	19
2.2.1 Zonas del río	19
2.2.2 Morfología del río.....	20
2.3 Uso de suelo.....	21
2.4 Hidrodinámica del flujo.....	22
2.4.1 Modelo hidrodinámico unidimensional	22
2.4.2 Modelo hidrodinámico bidimensional	23
2.5 Modelo de elevación digital (MED)	25
2.6 Levantamiento LiDAR	25
2.7 Batimetría.....	26
2.8 Herramientas de análisis	26
2.8.1 IBER	26
2.8.1.1 Condiciones de contorno	27
2.8.1.2 Condiciones internas.....	27
2.8.1.3 Esquemas numéricos.....	27
2.8.1.4 Pre proceso y post proceso.....	27

2.8.1.5	Mallado	28
2.8.1.6	Rugosidad (n).....	29
2.9	Análisis social, económico y ambiental.....	31
3.	METODOLOGÍA	32
3.1	Análisis de los escenarios planteados	33
3.1.1	Área de estudio	33
3.1.2	Consideraciones para la modelación hidráulica.....	34
3.1.3	Modelación hidráulica bidimensional.....	36
3.1.3.1	Pre proceso.....	37
3.1.3.2	Postproceso	38
3.1.4	Geometría del área modelada	38
3.1.4.1	Escenario 1: Eliminación de sistema de diques actuales del modelo de elevación.	39
3.1.4.2	Escenario 2: Reubicación de diques aumentando área hidráulica del cauce	40
3.1.5	Análisis de simulaciones.....	41
3.2	Propuesta del escenario que técnicamente mejora la condición de vulnerabilidad	42
3.3	Impacto social, económico y ambiental del proyecto.....	43
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	44
4.1	Análisis de los escenarios planteados	45
4.1.1	Modelación hidráulica bidimensional.....	45
4.1.1.1	Análisis de la Cobertura.....	45
4.1.1.2	Distribución geométrica.....	46
4.1.1.3	Hidrodinámica	46
4.1.1.4	Mallado	48

4.1.1.5 Asignación de la rugosidad.....	48
4.1.2 Geometría de las áreas modeladas	49
4.1.2.1 Escenario 1: Eliminación de sistema de diques actuales del modelo de elevación.	49
4.1.2.2 Escenario 2; Reubicación de diques aumentando área hidráulica del cauce. ...	50
4.2 Análisis de diferentes factores al comparar los dos modelos hidráulicos.....	52
4.2.1 Inicio de la inundación.....	52
4.2.2 Pico de la inundación.....	55
4.2.2.1 Calados en el pico de la inundación.....	55
4.2.2.2 Remanso en el pico de la inundación.....	58
4.2.3 Comportamiento del calado y caudal específico en un lugar determinado	60
4.2.3.1 Sección del río Pacuare.....	60
4.2.3.2 Sección de vulnerabilidad.....	62
4.2.4 Comportamiento de calados Máximos	64
4.3 Propuesta del escenario que técnicamente mejora la condición de vulnerabilidad	68
4.3.1 Dimensiones del nuevo dique	68
4.3.2 Diseño del nuevo dique.....	72
4.4 Valor cualitativo de los impactos.....	73
4.4.1 Análisis social.....	73
4.4.2 Análisis económico.....	75
4.4.3 Análisis ambiental.....	76
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	81
ANEXOS	88

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1	Valores de coeficiente de rugosidad n	30
Cuadro 2	Rugosidad utilizada para la modelación hidráulica	48
Cuadro 3	Afectación del área en cada uno de los escenarios	73
Cuadro 4	Afectación presentada en cada escenario planteado	74
Cuadro 5	Área afectada al tomar como parámetro el escenario base	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Morfología de los cauces.....	20
Figura 2 Ubicación espacial de los diferentes parámetros.....	33
Figura 3 Diferentes hidrogramas para los ríos en la zona de estudio	35
Figura 4 Elevación digital de la zona de estudio	36
Figura 5 Uso de suelo para la zona en estudio.....	45
Figura 6 Datos de salida para la modelación hidráulica en la propuesta del método Iber para el río Siquirres.....	47
Figura 7 Datos de entrada para la modelación hidráulica en la propuesta del método Iber para el río Cimarrones	47
Figura 8 Rugosidad automática para la modelación hidráulica	49
Figura 9 Perfiles transversales del MED en condición actual y el MED con los diques modificados.....	50
Figura 10 Cobertura realizada en la modelación hidráulica para la propuesta de obra	51
Figura 11 Efecto inicial de la inundación para el modelo hidráulico en condición actual ...	52
Figura 12 Efecto inicial de la inundación para el modelo hidráulico con modificación de diques.	53
Figura 13 Efecto inicial de la inundación para el modelo hidráulico con la reubicación de diques.....	54
Figura 14 Calado para la modelación hidráulica en condición actual en el pico del hidrograma	55
Figura 15 Calado para la modelación hidráulica con modificación de diques en el pico del hidrograma.....	56
Figura 16 Calado para la modelación hidráulica con la reubicación de los diques en el pico del hidrograma	56
Figura 17 Corte longitudinal del fondo del río Pacuare.....	59
Figura 18 Comportamiento del calado en una sección del río Pacuare	60
Figura 19 Comportamiento del caudal específico en una sección del río Pacuare	61
Figura 20 Comportamiento del calado en una sección vulnerable cerca de la comunidad la Lucha	63

Figura 21 Comportamiento del caudal específico en una sección vulnerable cerca de la comunidad la Lucha.....	64
Figura 22 Calado para la modelación hidráulica en condición actual en el comportamiento máximo	65
Figura 23 Calado para la modelación hidráulica con modificación de diques en el comportamiento máximo	65
Figura 24 Calado para la modelación hidráulica con la reubicación de diques en el comportamiento máximo	66
Figura 25 Elevaciones a lo largo del margen izquierdo para el diseño de la altura del dique	69
Figura 26 Elevaciones a lo largo del margen derecho para el diseño de la altura del dique	70
Figura 27 Secciones analizadas en la modelación hidráulica de la propuesta de obra en donde se representa de color azul la cota de agua y de color rojo la cota del suelo.....	71
Figura 28 Dimensionamiento del dique llevado a cabo para el escenario 2.....	72

RESUMEN

En este proyecto se analizaron y generaron diferentes modelaciones hidráulicas para conocer la afectación sobre la comunidad de la Lucha, para esto en el escenario base brindado por el Servicio Nacional de Aguas Subterránea y Avenamiento (SENARA) se analizó el comportamiento del área de inundación, calado y del caudal específico para generar la modelación del primer escenario, el cual consiste en la eliminación de los diques que existen en ambas márgenes del río Pacuare, al comparar ambos modelos se presenta una variación de 1 382 ha de más en la mancha de inundación producida en el escenario con la eliminación de diques, es por esto que se presenta un segundo escenario el cual consiste en generar la reubicación de los diques a 200 m de ambos márgenes del río Pacuare, en donde se puede garantizar que el flujo cuente con la capacidad hidráulica entre dique y dique antes, durante y después del evento pico presentado, siendo este último el que mejora técnicamente la condición de vulnerabilidad sobre la comunidad de la Lucha, por último se analizaron los impactos social, económico y ambiental que tendrán cada uno de los escenarios sobre comunidades, personas, habitaciones y áreas protegidas.

Palabras clave: Inundación, Modelación Hidráulica, Obras de protección

ABSTRAC

In this project, different hydraulic models were analyzed and generated to determine the impact on the community of the Struggle, for this, in the baseline scenario provided by the National Underground Water and Drainage Service (SENARA, by its acronym in Spanish), the behavior of the flood area, draft was analyzed. and of the specific flow to generate the modeling of the first scenario, which consists in the modification of the dikes that exist in both margins of the Pacific River, when comparing both models there is a variation of 1 382 ha more in the flood spot produced in the scenario with the modification of dikes, this is why a second scenario is presented which consists in generating the relocation of the dikes at 200 m from both sides of the Pacific River, where the flow can be controlled with the hydraulic capacity between dike and dike before, during and after the peak event presented, the latter being the one that technically improves the condition of limitation on the community of the Struggle, finally the social, economic and environmental impacts that affect each aspect of communities, people, rooms and protected areas were analyzed.

Keywords: Flood, Hydraulic Modeling, Protection works.

1. INTRODUCCIÓN

Según informa el Instituto de Desarrollo Rural (INDER) (2015), en su publicación llamada; Caracterización del Territorio Siquirres – Guácimo se dice que *“El cantón de Siquirres posee una red fluvial bien definida, la misma cuenta con un grupo de ríos y quebradas que se pueden considerar el punto focal de las amenazas hidrometeorológicas del cantón”*, ciertamente, esa característica constituye una amenaza natural a las comunidades que se encuentran dentro esta red. Las precipitaciones en Siquirres se dan durante todo el año, siendo el mes más lluvioso Diciembre y el más seco Marzo (INDER, 2015).

La problemática a solucionar por medio de este proyecto está en función al plan de inversiones llevado a cabo por el SENARA en donde se realizó el proyecto llamado, *“Levantamiento topográfico con tecnología LiDAR y batimetría en las cuencas bajas de los ríos Reventazón-Parismina-Jiménez-Pacuare-Madre de Dios, estudios hidrológicos e hidráulicos para cada una de las cuencas, así como la propuesta y diseño de las obras de infraestructura para cada una de las afectaciones incluidas en el Plan General de Emergencia, ubicado en los cantones de Siquirres, Pococí, Guácimo y Matina, provincia de Limón”*, mediante el cual el SENARA brinda dos líneas de acción a considerar en el proyecto, la primera se realiza al eliminar los diques ubicados en ambas márgenes del río Pacuare, para saber si mejorara la condición de vulnerabilidad y una segunda línea de acción al aumentar el área hidráulica del río para conocer la afectación por inundación al alejar los diques del cauce del río, para la primer línea de acción se tomaron los resultados obtenidos en la modelación del río Pacuare y todo lo que esta implica, en donde se presentan las condiciones actuales del comportamiento del agua al generar la modelación con un periodo de retorno de 25 años, para dicho estudio, se analizaron aquellas zonas que pueden presentar más afectación por problemas de inundación, siendo la comunidad de la Lucha una de estas zonas, de modo que con este proyecto se plantea solucionar el problema que se presenta en esta comunidad, generando dos propuestas de modificación del modelo digital de terreno (MED), eliminando los diques en la primer propuesta y ampliando el área hidráulica al colocar los diques en un nuevo lugar para la segunda propuesta.

Durante los últimos 60 años, las zonas que se ubican alrededor del río Pacuare han sido territorios con un alto índice de crecimiento bananero según menciona Blanco (2017), donde se construían diques sin ningún tipo de planificación, sin embargo, en los alrededores se iniciaron los asentamientos poblacionales, aumentando el nivel de vulnerabilidad. En un inicio, los diques fueron diseñados para la protección del cultivo de banano, sin embargo, el efecto de las inundaciones se traslada a las demás zonas que forman la llanura de inundación del cauce, sobre todo en las zonas pobladas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Evaluar dos propuestas que permitan disminuir las condiciones de vulnerabilidad ante inundaciones de la comunidad de la Lucha, por medio de la generación y análisis de modelaciones hidráulicas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analizar los efectos sobre el área de inundación generada por los escenarios planteados utilizando simulación hidráulica bidimensional al modificar los diques ubicados en ambas márgenes del río Pacuare
- Definir la propuesta del escenario que técnicamente mejore la condición de vulnerabilidad por inundación en la comunidad de la Lucha
- Valorar cualitativamente el impacto social, económico y ambiental que los escenarios tendrán sobre la comunidad de la Lucha, otras comunidades y las actividades agrícolas de la zona.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Gestión de inundaciones

Las inundaciones son efectos naturales que pueden presentarse por diferentes factores los cuales dependen de la morfología de los ríos y de la topografía del terreno, en donde las partes bajas de las cuencas son más propensas a ser inundadas, ya que representan las partes más planas de las cuencas, factor que sin duda hace que las poblaciones se vean más afectadas ya que las mismas se han establecido en estos lugares lo que sin duda los pone en desventaja ante una eventual inundación (Grant, Oreamuno, Serrano y Vargas, 2004).

En el país muchos de los desarrollos económicos y sociales se han llevado a cabo sin tomar en cuenta características hidráulicas e hidrológicas, de modo que al igual que otros países muchas de los asentamientos se han desarrollado en las cercanías de los ríos ya que las tierras que se encuentran aquí suelen ser más fértiles, tienen también mejor y más fácil acceso al agua y hay mayor facilidad para el desarrollo de la infraestructura., esto ha provocado que en el país el desbordamiento de los ríos traiga consigo la afectación del orden social y destruya infraestructura vial como carreteras, viviendas, puentes, escuelas, centros de salud y transmisión eléctrica (Grant et al., 2004).

Costa Rica al contar con diferente relieve se puede distinguir diferentes efectos en las inundaciones, según la comisión nacional de emergencias las inundaciones se pueden presentar en llanuras, las cuales se dan principalmente por lluvias prolongadas, en donde el nivel del agua sube lentamente, causando daños sobre todo en cultivos y servicios básicos y por otro lado están los sectores montañosos, en donde se pueden presentar inundaciones por tormentas locales y repentinas (Monge et al., s.f).

Ante estos efectos se pueden plantear alternativas las cuales pueden tomarse para reducir el riesgo ante eventuales inundaciones, las cuales son de tipo no estructural y de tipo estructural, las primeras acciones son todas aquellas que se realizan a nivel político, como lo son las medidas para el desarrollo, advertencias, procesos legislativos y participación pública, las mismas están orientadas a la reducción del riesgo que puede existir ante cierto evento, sin embargo por otro lado pueden estar las medidas estructurales las cuales están directamente ligadas a menor probabilidad de ocurrencia, aunque en las mismas puede existir altas

consecuencias, estas abarcan la construcción de estructuras para evitar o reducir posibles impactos de inundaciones hasta un determinado evento, llamado también evento de diseño (Escuder, Matheu y Castillo, 2010).

Las consecuencias que se pueden presentar en esta alternativa pueden provocar el aumento del riesgo ante una eventual inundación, según Escuder et al. (2010), se pueden dar por los siguientes factores:

- Si el estado de la estructura es pobre o inestable, lo que aumenta las probabilidades de fallo.
- Al existir áreas con alta vulnerabilidad probables a ser inundadas ante un eventual fallo de las estructuras.
- Si se plantean asentamientos en zonas inundables debido a la disminución de una percepción de riesgo.
- Si las estructuras se convierten en un factor negativo que provoque remansos, crecidas o genere nuevas zonas de inundación.

2.2 Mecánica de ríos

Los ríos por lo general pueden presentar diferentes cambios en su recorrido, tanto de forma natural como por la intervención del ser humano, como lo es la rectificación, la construcción de diques, el dragado, los cambios en la vegetación y la calidad del agua, lo que genera que genera problemas en estabilidad y problemas ambientales de modo que los ríos deben ser estudiados antes de generar un cambio en el mismo y ver qué acción tendrá la dinámica del sistema fluvial (Grant et al., 2004).

2.2.1 Zonas del río

Para conocer cuales regiones de un río pueden presentar más problemas, se genera una clasificación de las zonas que señala algunas características de las mismas (Grant et al., 2004).

- **Zona alta:** Suele presentar fuertes pendientes en su recorrido, las partículas suelen ser de gran tamaño y presenta pocas zonas para la agricultura, en la

mayoría de los casos los niveles de agua suben sin que se presente desbordamiento.

- **Zona intermedia:** La pendiente de fondo de los cauces suele ser menor, las áreas bajas que son producto de procesos de sedimentación son que comúnmente propensas a efectos de inundación cuando se sobrepasa la capacidad hidráulica del cauce.
- **Zona baja:** Suelen ser zonas de gran extensión que presentan los mayores problemas de desbordamiento e inundación ya que cuentan con menor capacidad de drenaje y presenta por lo general mayor caudal.

2.2.2 Morfología del río

Este factor determina la forma en la que se puede encontrar un río, la cual determina el ancho del canal, pendiente, forma en planta y profundidad del flujo, de forma que puede ser estable cuando es capaz de transportar el sedimento producido, sin afectar variables morfológicas, a su vez se pueden caracterizar los cauces rectos, los cauces trenzados que son aquellos responsables de las llamadas islas dentro de los ríos, los meandros los cuales son más ondulados y cuentan con islas dentro de él (Rocha, s.f).

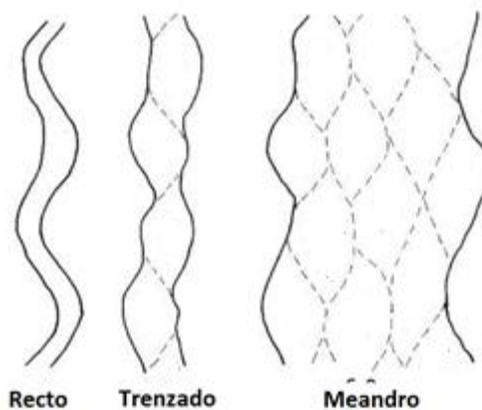


Figura 1 Morfología de los cauces.

Fuente Rocha, s.f

2.3 Uso de suelo

Según Zimmermann y Bracalenti (2014) menciona que muchos pueden ser los factores que favorecen el aumento de los niveles de agua que provocan las inundaciones, así como el incremento de las lluvias anuales en determinadas áreas, estos factores están sometidos a excesos de precipitación o precipitación efectiva, debido a la creciente impermeabilización del suelo.

Otro de los factores responsables de las inundaciones repentinas está determinada por lluvias intensas por sobrecarga de los sistemas de drenaje, estos problemas contribuyen directamente sobre la economía del lugar. A su vez Zimmermann y Bracalenti (2014) asegura que *“La calidad del suelo y las coberturas vegetales de los espacios productivos urbanos, permiten capturar eficientemente el escurrimiento pluvial, reduciendo la escorrentía superficial, facilitando la carga de las napas subterráneas y mejorando, en consecuencia, el funcionamiento de la infraestructura de drenaje”*, de modo que los espacios verdes productivos favorecen los riesgos ante eventuales inundaciones.

Los usos de suelo que se presentan a lo largo de una cuenca o cerca de los ríos determinan el comportamiento de una inundación, que se puede presentar ante una eventual lluvia, cuando se tiene gran parte del área de estudio cubierta por urbanización el hidrograma de crecida va en aumento, de modo que se presentan caudales picos más altos a medida que la impermeabilización del suelo aumenta (Zimmermann y Bracalenti, 2014).

En el uso de suelos se pueden caracterizar aquellos suelos mal drenados los cuales permanecen cubiertos de agua por gran parte del año, según menciona Comerma y Juan (2009), *“Desde el punto de vista del crecimiento vegetal, sean plantas cultivadas o no, la saturación con agua es más crítica durante el período de crecimiento, lo cual en las zonas tropicales puede ser durante todo el año, y dicha saturación debe afectar la zona de crecimiento de las raíces de las plantas”*, factor de gran importancia a la hora de caracterizar los suelos y su influencia a la sobrecarga de los sistemas de drenaje.

2.4 Hidrodinámica del flujo

Son varios los elementos que se deben considerar para conocer el comportamiento hidrodinámico del flujo, los mismos consideran aspectos complejos para su análisis como lo son los hidrológicos, ambientales, geotécnicos e hidráulicos, con el fin de poder llevar a cabo medidas de mitigación que ayuden a crear pronósticos y obras de diseño de infraestructura, el cambio en los fenómenos que se pueden presentar en el estudio del flujo libre en una superficie que ocurre en la naturaleza es tan complejo que los modelos analíticos son difícilmente utilizados, es aquí donde los modelos y técnicas de simulaciones experimentales por medio de modelos numéricos son mayormente utilizados permitiendo de esta manera la determinación de las variables que caracterizan el flujo de los ríos (Ahmad y Simonovic, 2006).

En la actualidad estos modelos numéricos juegan un papel de gran importancia, la cual permite la planificación de diferentes obras, es por esto que según mencionan Ochoa et al (2016), se necesitan conocer una serie de parámetros para que el modelo numérico funcione, como lo es la Ecuaciones de Saint Venant la cual se obtiene a partir de las leyes físicas de la cantidad de movimiento y de la conservación de la masa, junto con la primera y segunda ley de la termodinámica, esta consideración se hace cuando si se tiene un flujo newtoniano e isótropo trabajando con las ecuaciones de Navier- Stokes, utilizadas normalmente para describir las variables promediadas, concentradas en las ecuaciones de Reynolds en un pequeño incremento de tiempo.

2.4.1 Modelo hidrodinámico unidimensional

Las ecuaciones utilizadas en este modelo son las descritas por primera vez en 1871 por Barre de Saint Venant las cuales se utilizan para medir el régimen gradualmente variable y el rápidamente variable, de forma que se puede medir de una forma simple lo que sucede con el nivel del agua en un canal abierto, a su vez este método toma una situación compleja tridimensional y la transforma en un problema unidimensional según Bladé y Gómez (2006), este método asume que la velocidad del flujo y la sección transversal a una determinada profundidad son constantes (DAAD, 2006).

Según mencionan Bladé y Gómez (2006), las ecuaciones que se necesitan para dimensionar correctamente el movimiento de la lámina no permanente libre en cauces, naturales o artificiales son las siguientes.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA (S_0 - S_1) \quad (3)$$

Donde

- t = Escala del tiempo
- x = Escala del eje longitudinal del río
- A = Área de la sección mojada
- Q = Caudal circulante
- g = Es la aceleración por la acción de la gravedad de la tierra
- h = Calado del agua
- S₀ = Pendiente de fondo
- S₁ = Pendiente motriz

De este modo los modelos unidimensionales en el corto o mediano plazo una idea generalizada de una situación eventual ante una descarga, la cual sirve para establecer zonas de inundación (DAAD, 2006).

2.4.2 Modelo hidrodinámico bidimensional

La utilización de este modelo se da principalmente cuando la variación en los ríos cambia un poco en las planicies de las inundaciones, asumiendo una distribución logarítmica de la velocidad y permite interacciones complejas de los cauces, lo que permite determinar el riesgo de inundación en áreas cercanas a los ríos al realizar simulaciones más exhaustivas acerca de los impactos sobre las estructuras (DAAD, 2006).

Es por esto que según Bladé y Gómez (2006), permite crear una simplificación en la ecuación de Reynolds mediante un promedio vertical de las ecuaciones tridimensionales, esta simplificación puede ser llevada si se consideran las siguientes hipótesis.

- Profundidad del agua relativamente pequeña en relación a las otras dimensiones del problema.
- Presiones en la vertical por medio de una distribución hidrostática
- Una pendiente en la solera reducida.

Al implementar estas hipótesis sobre la ecuación de Reynolds, se pueden obtener las siguientes ecuaciones bidimensionales del flujo en lámina libre.

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h + z_0)}{\partial x} - \frac{\tau_{0x} + \tau_{sx}}{\rho} + fhv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} \quad (5)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h + z_0)}{\partial y} - \frac{\tau_{0y} + \tau_{sy}}{\rho} + fhu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial x} \quad (6)$$

Donde

- t = Escala del tiempo
- x, y, z = Escalas de longitud en dirección y vertical
- xy, u, v = Velocidades del flujo en dirección del plano
- h = Calado del agua
- z_0 = cota del fondo
- g = Es la aceleración por la acción de la gravedad de la tierra
- τ_{0x} y τ_{0y} = Tensiones de fondo que actúan en la dirección xy del plano de referencia
- τ_{sx} y τ_{sy} = Tensiones de superficie que actúan en la dirección xy del plano de referencia
- ρ = Densidad del fluido
- f = Coeficiente de Coriolis que representa las fuerzas centrífugas por la rotación de la tierra

- T_{xx} y T_{xy} = Términos del tensor de esfuerzos turbulentos de Reynolds

2.5 Modelo de elevación digital (MED)

Según menciona Strahler (1984), “*El relieve topográfico, la peculiar configuración o forma de la superficie de la Tierra, es de un interés considerable para el geógrafo, ya que ejerce una influencia fundamental y de gran alcance sobre las formas de actividad humana*”, es por esto que el conocimiento de la topografía del lugar es fundamental para la investigación referida al estudio, aun mas cuando se caracterizan sus paisajes, relieve y evolución (Strahler, 1984).

La distribución de estos parámetros hace que los MED se puedan definir como un conjunto de datos numéricos capaces de describir la distribución espacial de una característica del territorio (Contreras y Odriozola, 2016).

2.6 Levantamiento LiDAR

Light Detection and Ranging (LiDAR) es un modelo tecnológico que utiliza un alcance laser la cual se utiliza para realizar una detección remota de una variedad de campos (Mourning, Nykl y Chelberg 2011).

En su forma cruda los datos de este modelo se presentan en puntos en 3D, en el cual se obtienen puntos de altura y puntos de elevación, constituyendo una red muy densa de datos correspondiente a los datos de posiciones de las elevaciones, esencialmente este sistema está compuesto por un transmisor, un receptor, un control y un procesamiento. Esta tecnología se ha utilizado al adquirir mucho éxito en los procesos de contorno y generación de curvas de nivel para generar modelos digitales del terreno y orto fotos digitales (Céspedes y Pérez, 2008).

2.7 Batimetría

Se conoce como batimetría a la técnica asociada a la medición de la profundidad de los cuerpos de agua, relacionada a océanos, mares, ríos o lagos, de modo que se puede decir que la batimetría es el equivalente a la altimetría de una forma submarina. (Romero y Pineda, 2007). Según menciona Calderón (2002), *“mediante la batimetría se puede describir la profundidad del mar, la configuración del fondo marino, el tipo de las estructuras morfológicas del lecho marino y de los obstáculos navegables situados en el mismo”*

Con la información que se puede recolectar por medio de este método se puede representar una carta batimétrica utilizada posteriormente para crear líneas a una misma profundidad dando como resultado la forma del fondo del cuerpo de agua (Romero y Pineda, 2007).

2.8 Herramientas de análisis

En el modelo unidimensional y en el modelo bidimensionales los fluidos utilizan diferentes herramientas para poder llevar a cabo el comportamiento del fluido a lo largo de un área de estudio, sin embargo, la aplicación de cada uno depende de los parámetros que se quieran mostrar por medio del trabajo, según menciona Ochoa et al (2016), en el modelo unidimensional se puede utilizar HEC-RAS, mientras que en el modelo bidimensional se puede utilizar IBER, este último utilizado en el proyecto, ya que según Cueva, Cañon y Cea (2018), *“permite definir geometrías de estructuras y tramos de canales de forma relativamente sencilla para ejemplificar directamente en clase situaciones de flujo uni y bidimensionales con la ventaja de apoyarse en métodos numéricos”*

2.8.1 IBER

Es una herramienta encargada de la modelación matemática del flujo de agua en un río la cual se utiliza para predecir los valores de algunas variables, como calado, velocidad, caudal, etc. A su vez se encarga de la simulación de un flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial (Ochoa et al., 2016).

Bladé et al. (2014) afirman que el funcionamiento de esta herramienta se basa en el método de volúmenes finitos que fueron integrados en un único código ampliado con nuevas capacidades y cuenta con diferentes modelos numéricos dentro de sus procesos los cuales se deben analizar y proyectar al programa.

2.8.1.1 Condiciones de contorno

Se realiza la caracterización entre contornos abiertos y contornos cerrados, encargados de provocar la salida o entrada de agua en el dominio del cálculo.

2.8.1.2 Condiciones internas

Utilizada principalmente para la modelación de estructuras hidráulicas como lo pueden ser los puentes, vertederos o compuertas, a su vez se utilizan ecuaciones diferentes a las planteadas por Saint Venant, en donde cambian algunas variables y además la ecuación de desagüe trabaja de diferente forma.

2.8.1.3 Esquemas numéricos

Son apropiados a la modelación de cambios de régimen y de frentes de inundación, en este caso se resuelven las ecuaciones de aguas someras por medio del método de volúmenes finitos para mallas bidimensionales no estructuradas. En los métodos de frentes de inundación Ochoa et al (2016), afirma que *“La altura de agua nunca se fuerza a cero, con el fin de evitar pérdidas de masa en el interior del dominio de cálculo”*

2.8.1.4 Pre proceso y post proceso

Es clave dada la variedad y cantidad de datos de entrada que se requieren para el análisis, en el pre proceso destaca la importancia al tener un archivo georreferenciado que cuenta con la rugosidad de Manning asociada al uso de suelo y a la asignación automática del mallado, este último parámetro es de los que más tiempo y esfuerzo puede llevar en el análisis de la simulación numérica, es deseable que la malla sea irregular, con el fin de tener menor cantidad

de elementos con transiciones suaves, para esto se pueden utilizar diferentes métodos de mallado por ejemplo el llamado error cordal

Iber cuenta también con una serie de aplicaciones las cuales se pueden adaptar a diferentes condiciones para poder predecir las mejores condiciones de diseño o para crear medidas aplicables al entorno, Bladé et al. (2014) menciona algunas aplicaciones en el programa.

- Cálculo de velocidades en un tramo de río
- Cálculo de zonas inundables en un tramo de río
- Canal de eslalon dentro del cauce de un río
- Estudio del efecto de una infraestructura en los niveles de inundación

IBER como tal requiere una serie de datos los cuales deben ser procesados por el software, permitiendo de esta manera llegar a completar la modelación hidráulica de un río, es por esto que Bladé et al. (2014) y otro de los artículos de Caro y Bladé (2018) mencionan algunos de los parámetros más importantes a tomar en cuenta

2.8.1.5 Mallado

Se han creado otras herramientas de análisis para la creación y edición del mallado, si las condiciones de las superficies son suficientemente planas se puede importar el archivo del modelo digital del terreno y trabajar con una superficie Non Uniform Rational B-Splines (NURBS). Por último, se puede trabajar con una herramienta que permite modificar la cota de los nodos de la malla a partir de un modelo digital del terreno en formato ASCII (Bladé, 2014).

El tamaño de malla se puede dar según el nivel de detalle a la geometría, en donde se deben de considerar factores como el ancho de estructuras, topografía y vulnerabilidad (Watson y Guzmán, 2018).

2.8.1.6 Rugosidad (n)

Este término influye en la resistencia hidráulica que pueda tener el agua bajo diferentes condiciones de cobertura, los dos parámetros más importantes para su cálculo es la presión de arrastre que este pueda tener y la viscosidad. En Iber se implementa la rugosidad igual a la que se tomaría para la ecuación de Manning, a su vez cumple un papel fundamental ya que se necesita para poder lograr un post proceso eficiente (Caro y Bladé, 2018).

Según menciona Chow (1998), no existe un método preciso para la selección de la rugosidad, por lo cual se toman en cuenta cuatro enfoques para su selección, el primero es entender los factores que pueden afectar el valor de n con el fin de disminuir el rango de incertidumbre en su selección, el segundo es consultar una tabla de valores comunes de n , el tercero es relacionarse y familiarizarse con la apariencia de algunos canales comunes y por último mediante un procedimiento analítico basado en la distribución de velocidades, es por esto que en el siguiente cuadro se muestran algunos valores de rugosidad con valores de mínimo, normal y máximo.

Por lo general los datos de entrada para asignar la rugosidad a cada tipo de cobertura pueden ser varios, en el cuadro 1 se muestran algunos valores de rugosidad para distintas coberturas.

Cuadro 1 Valores de coeficiente de rugosidad n

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
Corrientes naturales			
Corrientes menores			
<i>a. Corrientes en planicies</i>			
1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos.	0,025	0,03	0,033
2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas	0,03	0,035	0,04
3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arenas	0,033	0,04	0,045
<i>b. Corrientes montañosas</i>			
1. Fondo de gravas, cantos rodados y rocas	0,03	0,04	0,05
2. Fondo de cantos rodados con rocas grandes	0,04	0,05	0,07
Canales revestidos o desarmables no metal			
<i>a. Cemento</i>			
1. Superficie pulida	0,01	0,011	0,013
2. Mortero	0,011	0,013	0,015
<i>b. Asfalto</i>			
1. Liso	0,013	0,013	
2. Rugoso	0,016	0,016	
<i>c. Revestimiento vegetal</i>	0,03		0,5
Planicies de inundación			
<i>a. Pastizales sin matorrales</i>			
1. Pasto corto	0,025	0,03	0,035
2. Pasto alto	0,03	0,035	0,05
<i>b. Áreas cultivadas</i>			
1. Sin cultivo	0,02	0,03	0,04
2. Campo de cultivos maduros	0,03	0,04	0,05
<i>c. Arboles</i>			
1. Sauces densos, rectos y en verano	0,11	0,15	0,2
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0,03	0,04	0,05

Fuente: Chow, 1998

2.9 Análisis social, económico y ambiental

Según informa el periódico Al Día en su publicación sobre los damnificados en albergues para el año 2003 la cantidad de personas en estos lugares es mayor a las 1 757 personas las cuales presentaron afectaciones en sus viviendas por las fuertes y persistentes lluvias en la zona de Matina, Siquirres, Limón centro, Turrialba de Cartago y por el desbordamiento del río Reventazón el cual tuvo repercusiones directas sobre poblados como El Carmen, Imperio y la Lucha. (González, 2003, Diciembre 13). En el año 2004 se presentaron diferentes afectaciones a lo largo del año, en el mes de mayo más de 400 familias resultaron afectadas y para noviembre más de 2000 personas en donde más de 3 000 ha fueron dañadas por inundaciones en diferentes partes del Caribe, en donde se alcanzaron registros récord de precipitaciones en la zona. (Díaz s.f). Para el año 2008 se presentaron otros eventos provocando diferentes inundaciones en donde diferentes ríos de la zona de Siquirres, Matina y Talamanca comenzaron a desbordarse lo cual obligo a más de 4 000 personas a refugiarse en 50 albergues distribuidos en la zona. (Carvajal, 2008, Noviembre 25), mientras que en el año 2015 Juan Carlos Binns aspirante por el partido Renovación Costarricense agrego al periodico la prensa libre: *“Siquirres por su naturaleza, está bañado por el río Reventazón y Pacuare, ambos atraviesan la ciudad, de manera que somos vulnerables ante las inundaciones, lo que pasa es que el desarrollo urbano se ha hecho sin un control y sin ninguna planificación y método científico”*, lo cual unido al alto índice de inundación presentado en la zona trae consigo mayor área y población afectada. (Jiménez, 2015, Diciembre 07)

Los efectos sobre el ambiente provocados por inundaciones pueden ser diversos y contraproducentes, Corona, Jiménez, Cruz y Estrada (2017) afirman que *“los principales problemas tratados en la Estrategia Ambiental Nacional (EAN) (2011-2015) figuran la degradación de los suelos, afectaciones a la cobertura forestal, contaminación, pérdida de diversidad biológica, carencia y dificultades con la disponibilidad y calidad del agua, así como impactos del cambio climático”*, así mismo se menciona que los programas utilizados están en función a solventar riesgos provocados por lluvias, penetraciones al mar y riesgos sobre zonas protegidas.

3. METODOLOGÍA

3.1 Análisis de los escenarios planteados

3.1.1 Área de estudio

La Lucha es una comunidad ubicada en el distrito de Siquirres, entre los ríos Siquirres y Pacuare (Figura 1), zonas históricamente afectadas por inundaciones producidas por altas precipitaciones y por el relieve de la zona (Carvajal, 2008, Noviembre 25).

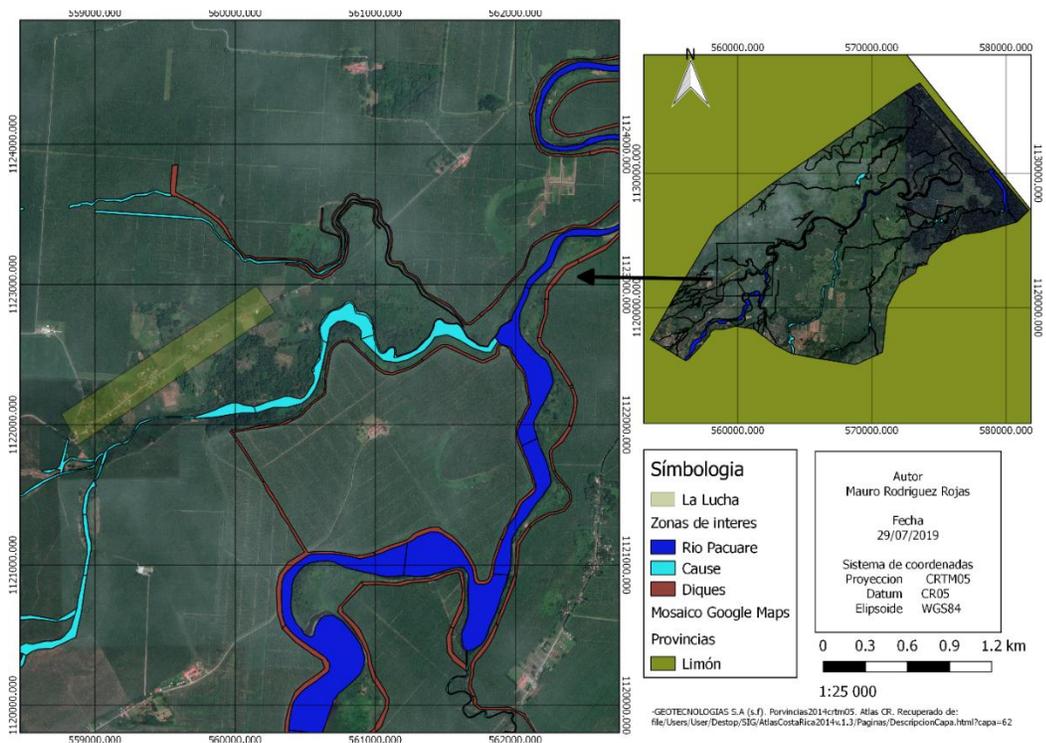


Figura 2 Ubicación espacial de los diferentes parámetros

El análisis del modelo hidráulico comprende alrededor de 290 km², los cuales se establecen por medio de sistemas de información Geográfica (GIS por sus siglas en inglés), el área se ubica en la región Huetar Caribe de Costa Rica, comprendida por diferentes coberturas analizadas de la siguiente manera; un río principal, causas, diques, carreteras, construcciones, cultivos, pastos y bosque, las coberturas que predominan son los boques, pastos y cultivos.

Dentro del área de influencia del proyecto, se encuentran los siguientes cauces; el Pacuare, el Siquirres, el Madre de Dios, el Cimarrones, el Salsipuedes y el Hondo; los diques se ubican

en diferentes zonas, sin embargo, el presente estudio se centra en los diques del río Pacuare, específicamente proponiendo dos escenarios, la eliminación de los diques en el escenario 1 y la movilización de diques para el escenario 2, propuestas que se desarrollaran más adelante. La importancia se avala a partir de la condición actual, en la cual se determinaron zonas con problemas de inundación con extensiones significativas, dentro de las cuales se pueden localizar infraestructuras tanto públicas como privadas, limitando además el desarrollo socioeconómico

3.1.2 Consideraciones para la modelación hidráulica

En esta sección se exponen los métodos utilizados para generar el modelo hidráulico, es importante mencionar que para completar el primer objetivo específico se necesitan conocer diferentes condiciones previas basadas en un modelo hidrológico e hidráulico, las cuales son brindadas por parte del SENARA en el plan de inversiones mencionado y que se fundamenta en la declaratoria de Emergencia del año 2015, amparado en el Plan General de la Emergencia N° 39056 los datos brindados por parte del SENARA se enuncian continuación, los cuales se analizaron para saber cuáles serán utilizados en la modelación hidráulica llevada a cabo.

- Un análisis hidrológico para eventos con periodos de retorno de 25 años, junto con una base hidrometeorológica derivada de la información, para la modelación hidráulica se utilizó el periodo de retorno de 25 años, los hidrogramas generados a partir de la información brindada son los siguientes.
- Un modelo precipitación-escorrentía, analizando los datos de lluvia necesarios los cuales se escogieron al analizar eventos extremos, en los que existieran registros detallados de precipitación y de escorrentía meteorológicas propiedad del Instituto costarricense de electricidad (ICE) y la Corporación Bananera Nacional (CORBANA), con lo cual se analizan para poder generar los hidrogramas de la Figura 3, los cuales se construyen a partir del plan de inversiones mencionado anteriormente.

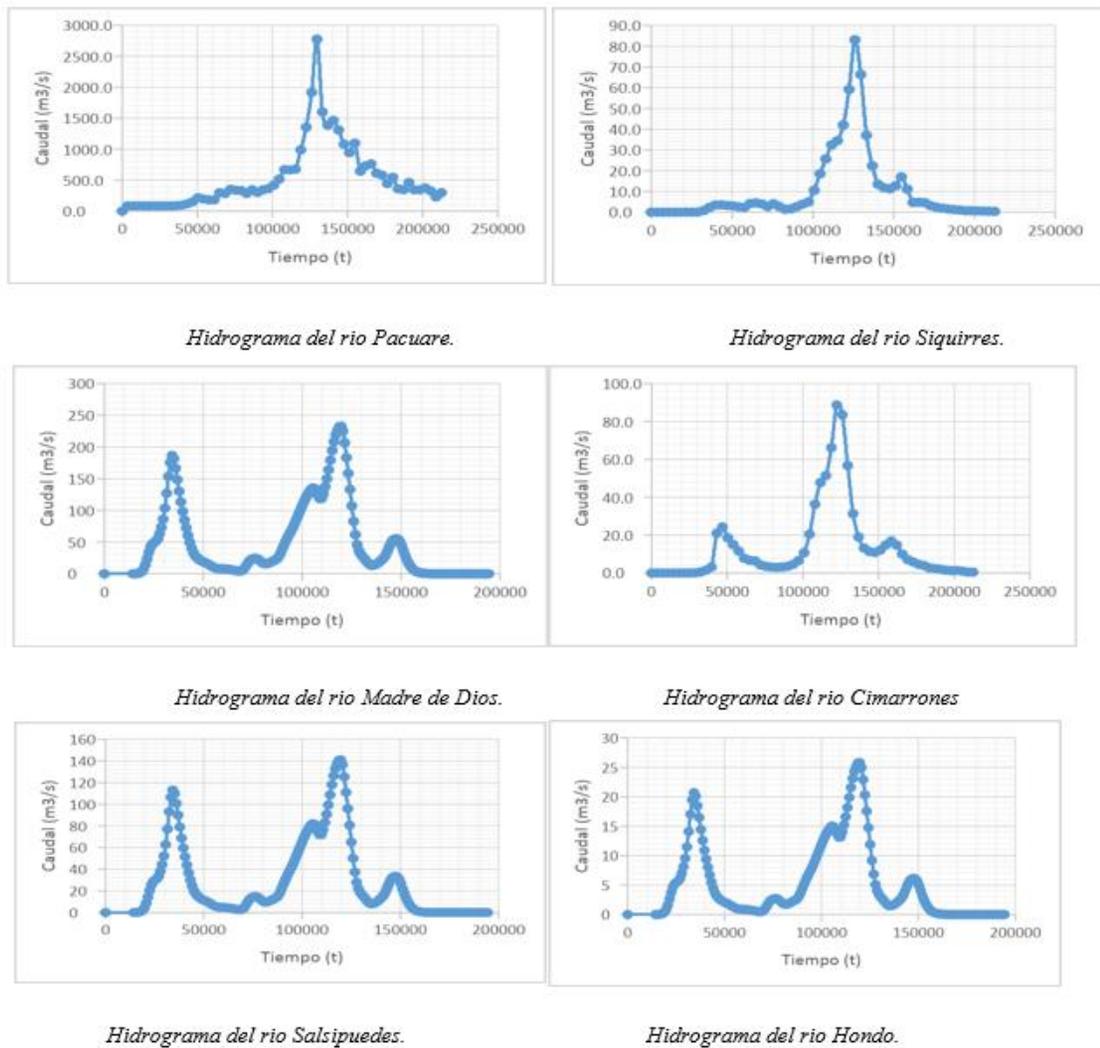


Figura 3 Diferentes hidrogramas para los ríos en la zona de estudio

- Una estimación del caudal de avenida máxima para un periodo de retorno de 25 años.
- Un Modelo de elevación digital (MED) por medio de un levantamiento con tecnología Detección y rango de imágenes láser conocido por sus siglas en inglés como LIDAR de 597 km², del cual se tomó una zona de estudio de 290 km², la misma se muestra en la Figura 4.

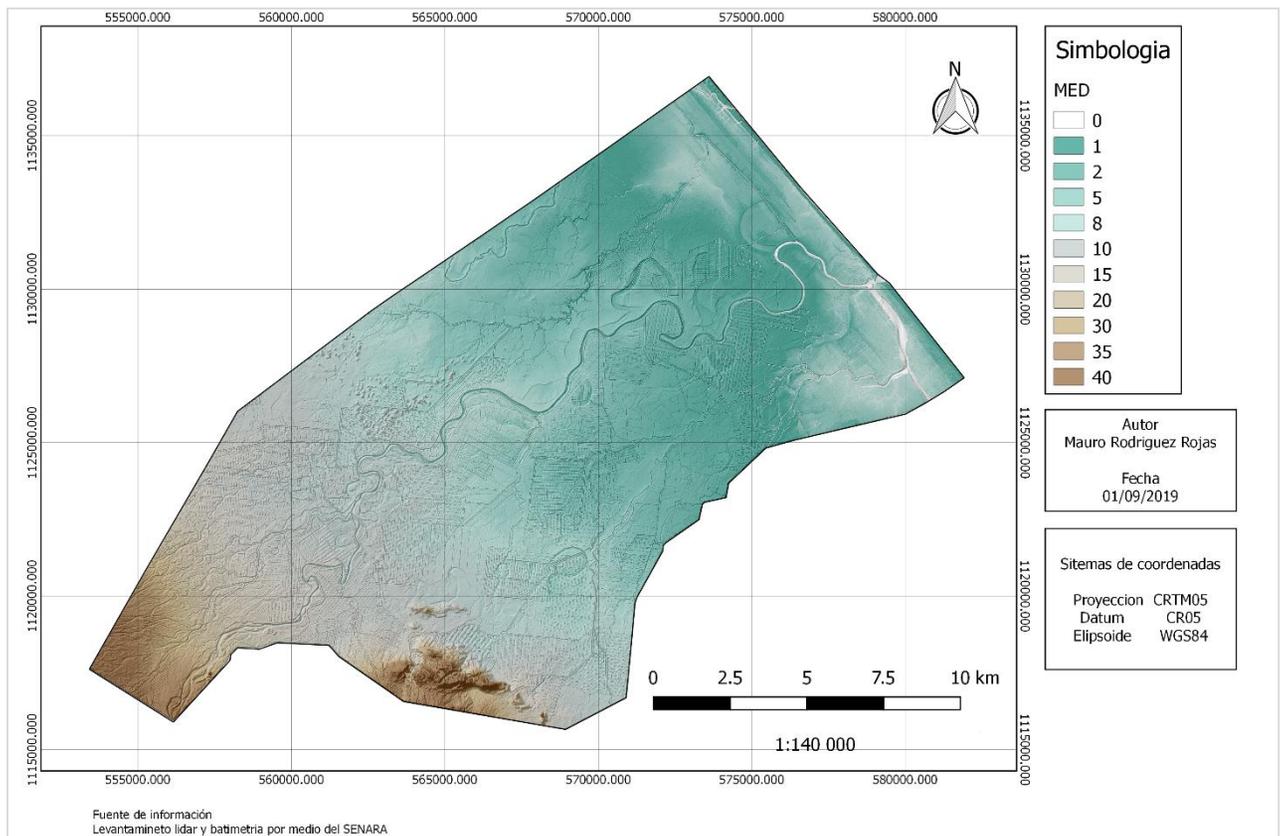


Figura 4 Elevación digital de la zona de estudio

- Batimetría ajustada al MED

La información mencionada anteriormente se utilizó para realizar las dos propuestas por medio de los objetivos específicos.

3.1.3 Modelación hidráulica bidimensional

En este paso se distinguieron tres procesos fundamentales, a la hora de realizar la simulación.

Para la propuesta 1 se simuló la crecida de un evento que un periodo de retorno de 25 años, en la cual se tomara en cuenta la simulación al eliminar los diques que se ubican en ambas márgenes del río Pacuare.

Para la propuesta 2 se tomará una distancia fija de 200 m sobre ambas márgenes en donde se llevará a cabo la modelación para conocer el comportamiento que tendrá el agua hasta dicha distancia, para poder generar la propuesta de diques en ambos lados del río Pacuare.

3.1.3.1 Pre proceso

La geometría incluyó, tanto los datos de simulación como las condiciones de contorno y datos iniciales, a su vez en este paso se aplicó la rugosidad y el mallado. Para llevar a cabo la propuesta 1 y la propuesta 2 se siguieron recomendaciones tomadas del cuadro 1 junto con las recomendaciones dadas por el SENARA y algunas de las rugosidades que se encuentran previamente establecidas en IBER, para la segunda propuesta se establecieron diferentes consideraciones, en cuanto longitud, área y detalle que se quiera observar en el cálculo, al resolver diferentes ecuaciones dentro de la malla, para el pre proceso se consideraron los siguientes pasos:

- a) Se generaron los datos del problema dentro del cual se deben tomar en cuenta, el instante inicial, tiempo máximo de simulación, intervalo de resultados y número de procesadores.
- b) Se dieron los datos de entrada para la hidrodinámica, al introducir las condiciones de contorno, por medio de las condiciones de entrada y las condiciones de salida, para los datos de entrada se asignaron de tal forma que los hidrogramas se introducen directamente en el programa, mientras que para los datos de salida se asignaron el tipo de salida distinguiendo las diferencias entre un flujo subcrítico y uno supercrítico, tomando como condiciones iniciales un calado de 0 m.
- c) Se generó la malla tipo no estructurada ya que da mejor detalle al presentar irregularidades dentro del cauce y a lo largo del área en estudio. (Ochoa et al., 2016). El tamaño de malla a utilizar esta en función del nivel de detalle que se quiera observar en la simulación, ya que al generar una malla muy fina (con bajos tamaños de malla) se presentaron tiempos de simulación más altos, por lo cual se utilizó una malla más

gruesa por medio de diferentes simulaciones llevadas a cabo, seguidamente se tiene que aplicar una elevación a la malla introduciendo el terreno en estudio, al convertir el MED en un archivo ASCII de modo que se asigna la altura automáticamente.

- d) Posteriormente se asigna la rugosidad a la superficie por medio del mapa de cobertura realizado en la modelación geométrica asignando automáticamente la rugosidad en IBER, tomando la información del cuadro 1 y algunos criterios de asignación recomendados por medio del SENARA son llevadas a IBER, los cuales fueron introducidos manualmente en la sección de uso de suelo.

3.1.3.2 Postproceso

Se obtuvieron los resultados de la simulación en los cuales se muestran los mapas de calados, velocidades, graficas, perfiles transversales y longitudinales, hidrogramas y videos de simulación, para poder ser analizados.

3.1.4 Geometría del área modelada

En la geometría del área en estudio se utilizaron diferentes herramientas con el fin de llevar esta información al modelo bidimensional IBER, siguiendo los siguientes pasos.

- a) Se generó un recorte al MED dado por parte del SENARA de modo que se seleccionó el área en estudio necesaria para la modelación hidráulica, de la cual se tomó un total de 290 km² como se muestra en la Figura 4.
- b) Se generó un análisis de cobertura por medio de los programas Quantum GIS (QGIS) y ArcGIS, en los cuales se distinguieron diferentes usos de suelos lo más actualizados posibles, para poder lograr esto se tomó el MED junto con una imagen del satélite de Google maps descargada de SAS planet (programa realizado por SASGIS), la cual se necesita para distinguir entre diferentes tipos de cobertura.

- c) Se realizó una evaluación de la calidad de la geometría y se realizaron las correcciones pertinentes, esto se debe garantizar para que no existan errores posteriormente.
- d) Seguidamente se establecieron dos escenarios de análisis de los eventos producidos

3.1.4.1 Escenario 1: Eliminación de sistema de diques actuales del modelo de elevación.

Este planteamiento trata de determinar si las intervenciones antrópicas producen un efecto más negativo, que las condicionan naturales en las que se encuentra actualmente el río Pacuare por influencia de los diques ubicados en las márgenes del mismo por lo que se requiere, identificar los diques en el trayecto de estudio sobre ambas márgenes del Río Pacuare y de modo que se generó un modelo de elevación digital sin estas obras a partir de la siguiente secuencia.

- a) Se construyó un polígono del dique al cual se le agregó una capa de puntos, dicha capa fue distribuida a lo largo de ambos lados del polígono del dique en donde se encuentran las partes bajas del mismo.
- b) Se agregó una columna con la altura para cada uno de los puntos, característica que se utilizó para poder crear una capa tipo ráster al interpolar los datos de altura que se encuentra en cada punto.
- c) Una vez que se tiene la interpolación de los datos de altura, la nueva capa ráster cuenta con información de altura entre el pie del talud del dique, de modo que dentro del archivo ráster solo existe información del pie la altura al pie del talud, esto quiere decir que las alturas que se encuentran en el MED original se modificaron de tal forma que solo existe información similar a la altura que se encuentra en ambos lados del dique, seguidamente se transforma este archivo a formato ACSII y es llevado al modelo hidráulico bidimensional.

- d) Se añaden los dos MED al programa bidimensional, el primero dado por el SENARA y el segundo al eliminar los diques, para generar la modelación hidráulica correspondiente.

3.1.4.2 Escenario 2: Reubicación de diques aumentando área hidráulica del cauce

Este escenario se construyó bajo el fundamento de poder dar el dimensionamiento, ubicación y diseño de nuevos diques en las márgenes del río Pacuare y poder determinar si los mismos brindan menor daño en comparación con el modelo base en condiciones naturales.

- a) Inicialmente se ubicó el centro del río Pacuare al trazar una línea en toda su longitud.
- b) Seguidamente se realizó un análisis del ancho promedio que tiene en el río en su recorrido, implementando un ancho promedio de 50 m, el cual se mantiene por la gran mayoría de su longitud.
- c) Este ancho analizado se utilizó para generar un buffer a lo largo de la extensión del río con el fin de encontrar un ancho similar a lo largo de la extensión del mismo, se estableció un ancho de 200 m en ambas márgenes, utilizado para poder generar un dimensionamiento del nuevo dique.
- d) Se realizó la modelación hidráulica, al considerar la influencia de los cauces del río Pacuare el cual estará influenciado por un caudal pico de $2\,776,9\text{ m}^3/\text{s}$, el río Siquirres por un hidrograma de entrada y salida sobre la unión al río Pacuare y el río Cimarrones por el comportamiento presentado por un hidrograma, utilizando la cobertura dada por los ríos antes mencionados y por la realizada a 200 m de ambas márgenes del río Pacuare.

- e) Se realizaron análisis de la modelación hidráulica planteada anteriormente al conocer la altura a la cual deberían construirse los nuevos diques, así mismo se analizó el resultado a partir de los espaciamientos de margen calculados

3.1.5 Análisis de simulaciones

Para el análisis de las simulaciones se establecieron criterios de valoración como:

- **Inicio de la inundación**
- **Pico de la inundación**
- **Calados en el pico de la inundación**
- **Remanso en el pico de la inundación**
- **Comportamiento del calado y caudal específico en un lugar determinado**
- **Sección del río Pacuare**
- **Sección de vulnerabilidad**
- **Comportamiento de calados Máximos**

3.2 Propuesta del escenario que técnicamente mejora la condición de vulnerabilidad

Determinar cuál de los dos escenarios presentan una mejora a las condiciones actuales de la comunidad de la Lucha garantizando procurando que se vea dañado con una mancha de inundación menor o en algún eventual caso que no presente afectaciones, así mismo garantizar que los calados presentados y caudales específicos en la zona no representen afectaciones significativas.

Las condiciones que se tomaron en cuenta para garantizar que la vulnerabilidad sobre la comunidad de la Lucha mejora son las siguientes.

- El dimensionamiento del dique el cual se generó a partir de la modelación hidráulica de su cota de agua en el momento máximo de la misma, al tener el dato de la cota de agua alcanzada por el nivel del agua a lo largo de la geometría analizada se comparó con la cota de suelo o nivel del terreno por medio del MED, al tener ambos parámetros se estableció el comportamiento que se tendrá a los 200 metros de cada margen del río en donde se construyeron secciones para poder trazar diferentes perfiles transversales y poder observar el comportamiento del agua contra el nivel del terreno en cada una de las secciones, por último se estableció un bordo libre constante de 0,5 m sobre el nivel máximo alcanzado del agua a lo largo de la geometría.
- El diseño se realizó haciendo variaciones del nivel del dique que se presenta en el dimensionamiento del mismo en donde se establece una altura (x) de acuerdo al valor encontrado en cada parte de la geometría, un ancho promedio de 8 m el cual se establece por medio de perfiles en el MED original mostrados en el Anexo 1 y un talud de 2:1 también analizado en el MED original, para el diseño cada 100 m se tuvo una nueva altura de dique que será mostrada en los grafios del dimensionamiento.

3.3 Impacto social, económico y ambiental del proyecto

Los análisis realizados en esta sección se dividen en tres criterios importantes, el primer análisis es el social, mientras que el segundo es factor económico expresado de forma cualitativa, los pasos seguidos para los análisis estuvieron comprendidos de la siguiente forma.

- Para el análisis social se identificaron aquellas zonas que presentan afectaciones a nivel de inundación por influencia de cada uno de los escenarios, comparando a nivel de área la afectación que se tendrá en cada uno de los mismos, así mismo se estableció el daño a nivel poblacional y por cantidad de habitaciones dañadas en las comunidades influenciadas directamente en cada escenario.
- El análisis económico se determinó por medio de la rentabilidad expresada en cantidad de pérdida de plantación que se tendrá en cada uno de los escenarios, este método tomando como base el modelo en condición actual y por medio de un análisis realizado por CORBANA.
- Para el análisis ambiental se evaluaron aquellas zonas del área en cada uno de los escenarios que puede ser eventualmente dañada, haciendo énfasis en áreas protegidas que se puedan encontrar cerca de la zona, así mismo el cambio en la morfología del río y las amenazas en el hábitat en cada escenario.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis de los escenarios planteados

En este punto de análisis se presentan los resultados al tomar las consideraciones de la modelación hidráulica brindadas por parte del SENARA en los factores hidrológicos e hidráulicos, de modo que se presentan los siguientes resultados de la mano de esta información.

4.1.1 Modelación hidráulica bidimensional

4.1.1.1 Análisis de la Cobertura

Para esta sección se llevó a cabo la construcción de la geometría por medio de QGIS y ArcGIS identificando aquellas zonas donde se requiere más nivel de detalle e identificando diferentes tipos de uso de suelo a lo largo de la zona de estudio, esto se realizó para distinguir entre los diferentes tipos de rugosidad que se tendrán en cada una, identificando siete tipos de uso de suelo, representados por la Figura 5, el planteamiento de esta cobertura fue utilizada para el escenario base y para el escenario 1.

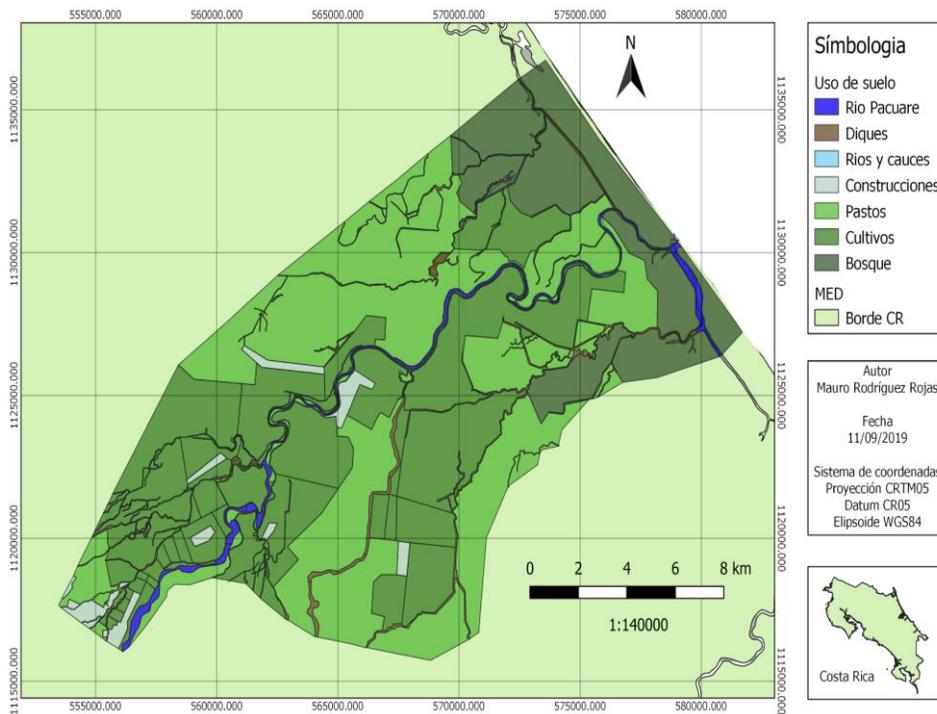


Figura 5 Uso de suelo para la zona en estudio

4.1.1.2 Distribución geométrica

Para este paso se analizaron aquellas zonas que corresponden a la base geométrica que será utilizada en IBER para determinar la asignación del mallado y la rugosidad a cada una de ellas, para esto se utilizó la estructura realizada al analizar el uso de suelo mencionado anteriormente, de esta manera se presenta la siguiente geometría, a la misma se le realizó el colapso de los puntos, líneas y superficie, este paso es de gran importancia para la modelación ya que al sobreponerse cualquiera de estos elementos se pueden presentar errores posteriormente, para poder llevar a cabo la construcción de la geometría de forma correcta se dio un zoom adecuado a la superficie y se verificó que no existieran partes de la geometría sin ser cubiertas por superficie.

4.1.1.3 Hidrodinámica

En este paso se llevaron a cabo las condiciones de entrada y de salida en la geometría realizada, los datos de entrada se establecen por medio de los hidrogramas de la Figura 3, para todos los ríos analizados, es importante mencionar que para cada uno de los hidrogramas se tomaron diferentes consideraciones para encontrar la tormenta de diseño y el caudal que tendrá al pasar el tiempo en cada uno de los ríos, en este caso se identifican 6 ríos o quebradas (planteados para el escenario base y el escenario 1), el río Cimarrones, el río Siquirres, el río Pacuare, el río Hondo, la quebrada Salsipuedes y por último el río Madre de Dios, a su vez se estableció un tiempo máximo de simulación al analizar los hidrogramas por separado encontrando un tiempo máximo de 212 400 s, por lo cual se utilizó un tiempo de simulación de 213 000 s, en el caso del escenario 2 los datos de entrada se asignaron a partir de la modelación presentada en el escenario 1, en donde se asignaron los datos de entrada para el río Siquirres dado por una cota presentada a lo largo de dicha modelación y en el caso del río Cimarrones se tomó el caudal de entrada según dicha simulación, estas dos últimas entradas se presentan en la Figura 6 y la Figura 7, mientras que para las condiciones de salida se establecieron 4 criterios diferentes, la primera salida se estableció por medio de la altura promedio que hay en las cercanías de la desembocadura, la cual es de 1,40 m por un nivel dado, la segunda salida es también al mar, se basa en dar un nivel a la salida al mar, cuando dicha salida está entre el borde ya sea de bosque, suelo, o pasto y el mar, el cual es de 0,20 m

a lo largo del tiempo total de simulación, se estableció a partir del promedio de la marea en la zona caribe según el Instituto Meteorológico Nacional, para lo que va del año 2019 según el ejemplo del Anexo 2, se establece en este periodo ya que de haber un evento máximo se presentaría a partir de este periodo y por ultimo para la tercer y cuarta salida se establece un régimen supercrítico ya que no se tendrá certeza la tendencia de salida del agua lo largo de la modelación, en el caso del escenario base y en el escenario 1 se utilizaron todas las salidas mencionadas, para el escenario 2 se utilizaron solamente la primer y segunda salida mencionadas.

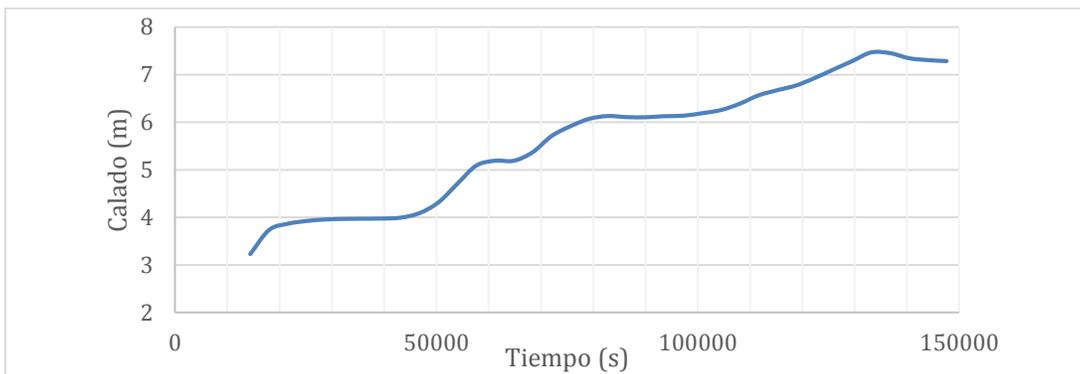


Figura 6 Datos de salida para la modelación hidráulica en la propuesta del método Iber para el río Siquirres

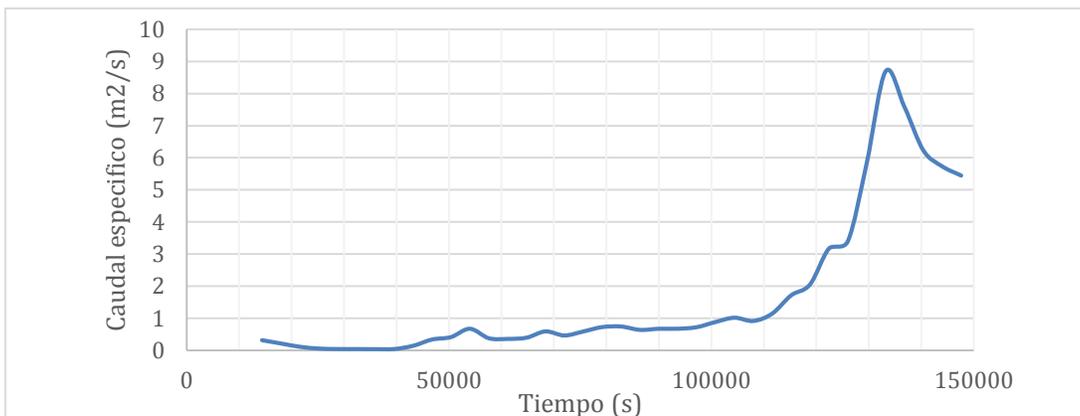


Figura 7 Datos de entrada para la modelación hidráulica en la propuesta del método Iber para el río Cimarrones

4.1.1.4 Mallado

Para este caso se utilizó el tipo de malla no estructurada la cual es recomendada para áreas irregulares y para definir mejor los cauces según se menciona en la metodología de dicho paso, a su vez se utilizaron dos distintos tamaños de mallados los cuales se relacionan directamente al nivel de detalle que se quiera observar en la modelación hidráulica, el mallado para el río Pacuare, otros ríos, cauces, y diques corresponde a un tamaño de 15 m, mientras que para el área restante se asignó un mallado de 50 m esto en el caso del escenario base y el escenario 1, mientras que para el escenario 2 se utilizó un tamaño de 30 m para el río Pacuare, río Siquirres, río cimarrones, diques y otros cauces, mientras que para el resto de la geometría se utilizó un mallado de 60 m., para las áreas que no se muestran se agregó al programa por medio de la asignación de los elementos restantes con un tamaño de 15 m.

4.1.1.5 Asignación de la rugosidad

Las rugosidades que se tomaran en cuenta para el proyecto, se menciona en el cuadro 1, en donde hay recomendaciones del valor de rugosidad a usar en el proyecto, sin embargo se utilizaron las rugosidades recomendadas por el SENARA, las mismas se analizaron en comparación con el cuadro 1 para tener certeza que los valores utilizados se encuentre cercanos a los recomendados, de esta manera en el cuadro 2 se resumen los valores utilizados en la modelación hidráulica, a su vez se presenta la Figura 8 en donde se observan la distribución de la rugosidad por medio de IBER.

Cuadro 2 Rugosidad utilizada para la modelación hidráulica

Tipo de cobertura	Rugosidad (n)
río principal	0,035
cauce	0,035
diques	0,023
construcciones	0,15
pastos	0,04
cultivo	0,04
bosque	0,12

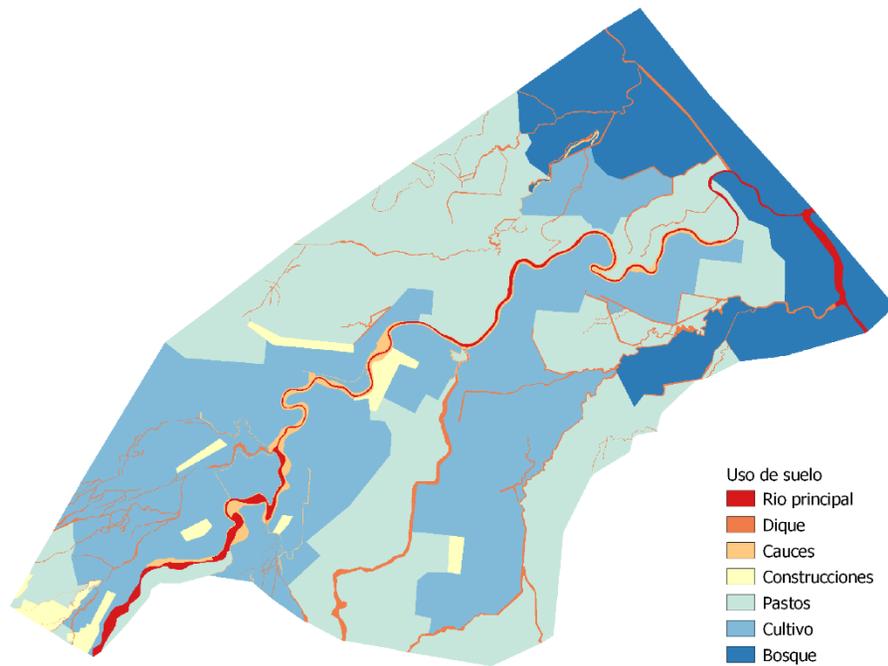


Figura 8 Rugosidad automática para la modelación hidráulica

4.1.2 Geometría de las áreas modeladas

4.1.2.1 Escenario 1: Eliminación de sistema de diques actuales del modelo de elevación.

En la siguiente Figura se visualizan diferentes perfiles en el MED original y el archivo con la interpolación realizada, con el fin de poder observar el resultado de la interpolación, así mismo se aprecia como el dique ya no existe en ninguna de las márgenes del río Pacuare, por medio del círculo azul que se ubica en cada sección.

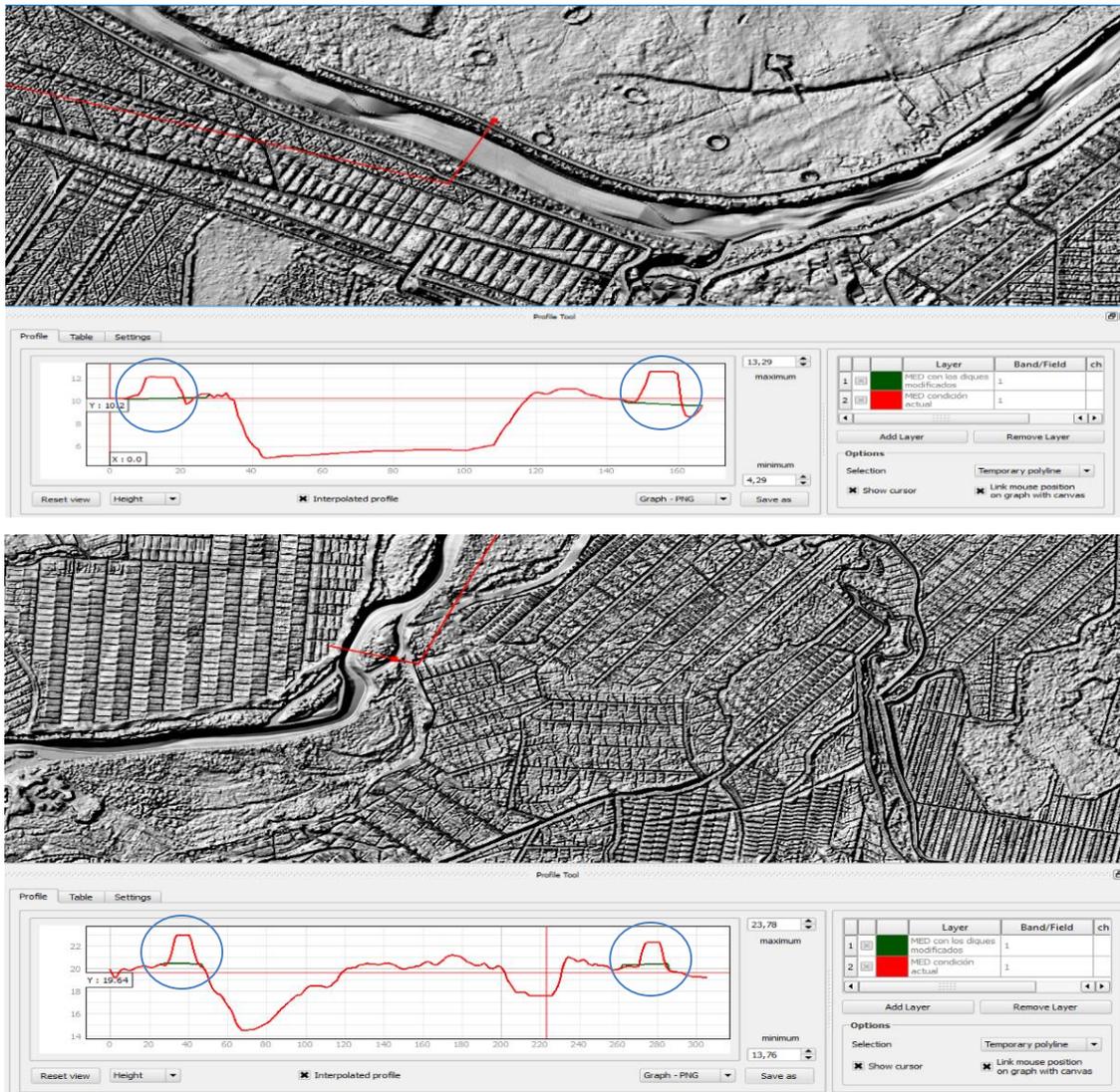


Figura 9 Perfiles transversales del MED en condición actual y el MED con los diques modificados

4.1.2.2 Escenario 2; Reubicación de diques aumentando área hidráulica del cauce.

Para poder generar la ubicación de los diques y posteriormente analizar los resultados generados para realizar la propuesta del dimensionamiento de los mismos, en la siguiente Figura se ilustra la cobertura utilizada para la modelación hidráulica.

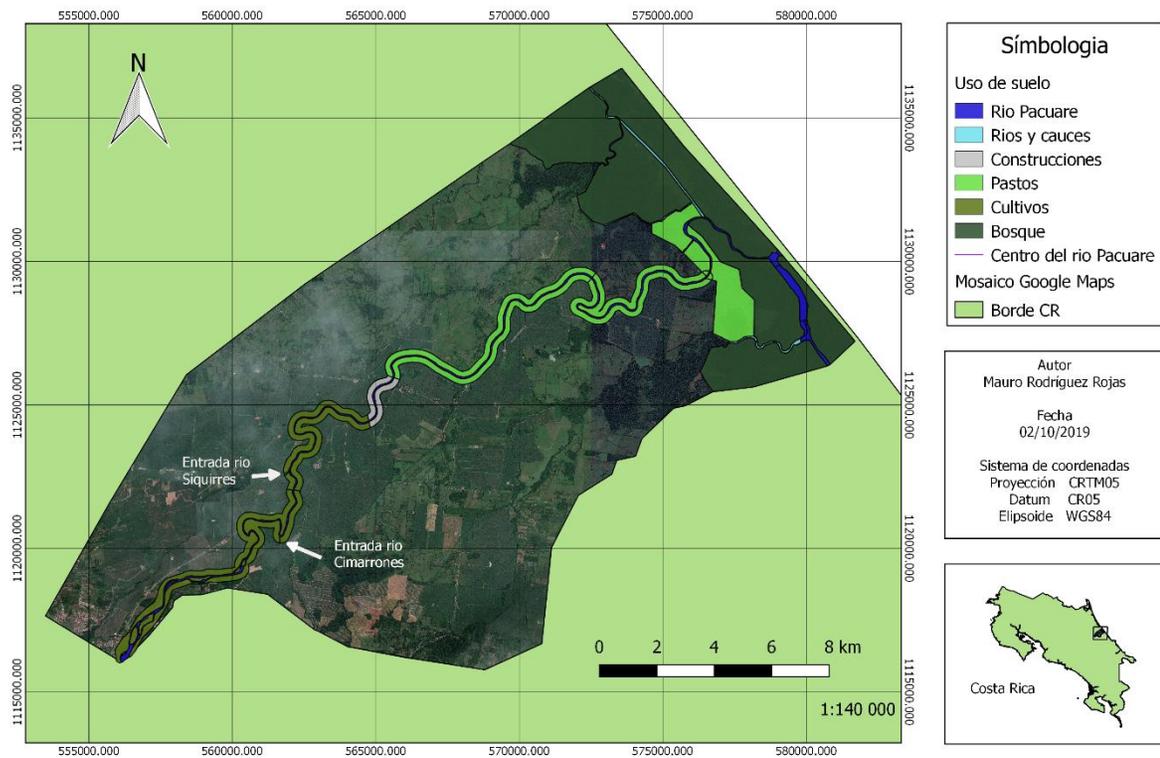


Figura 10 Cobertura realizada en la modelación hidráulica para la propuesta de obra

En la misma se considera una nueva cobertura, en donde se ubica un distanciamiento sobre el centro del río uniforme de 250 m a ambos márgenes ya que el ancho promedio del río es de 50 m, de modo que en ambos lados quedaría una cobertura de 200 m, así mismo se tomó en cuenta la cobertura después de la ubicación de los diques en condición actual hasta el margen con el mar, dado que se necesita dar la misma salida para conocer el verdadero comportamiento del modelo. Al tener esta estructura se asignaron los diferentes usos de suelo para cada una de las coberturas, como se muestra en la Figura anterior.

4.2 Análisis de diferentes factores al comparar los dos modelos hidráulicos

En esta sección se abarcarán los resultados, así como el análisis de los mismos al evaluar las condiciones presentadas en ambas modelaciones, presentando de este modo Figuras representativas de cada una de las modelaciones hidráulicas para poder realizar un análisis dependiendo del factor tomado en cuenta.

4.2.1 Inicio de la inundación

En la siguiente Figura se presentan las modelaciones respectivas al inicio de la inundación en los tres escenarios para la modelación hidráulica de cada uno.

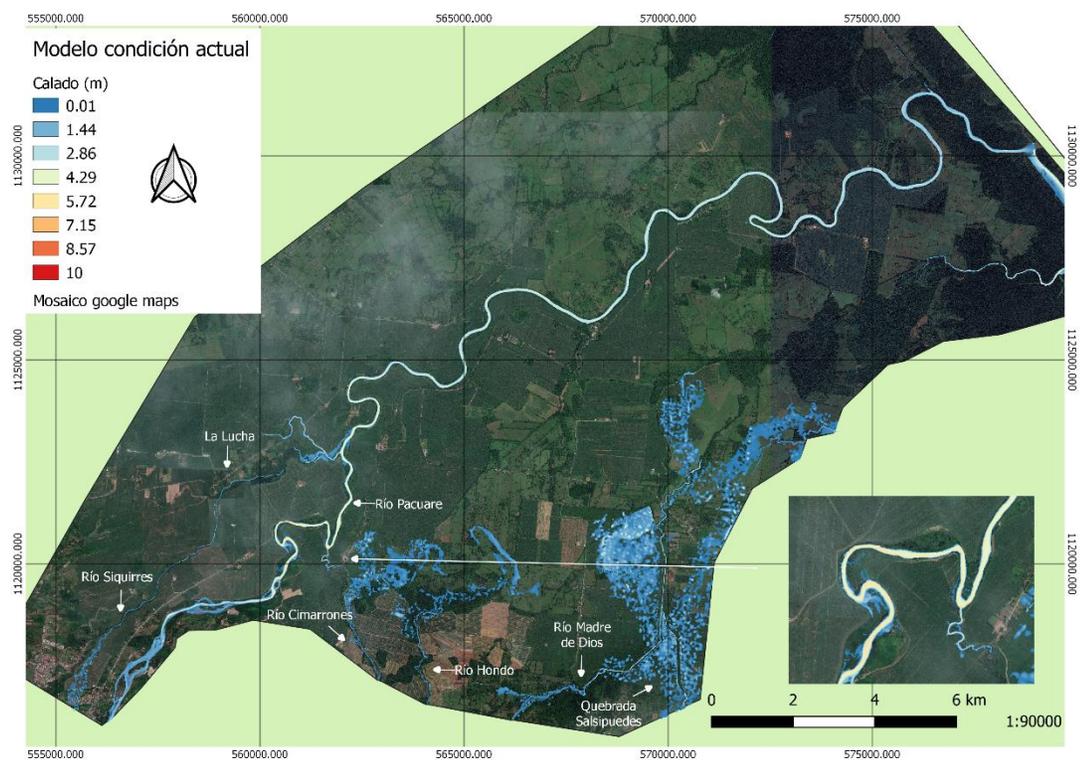


Figura 11 Efecto inicial de la inundación para el modelo hidráulico en condición actual

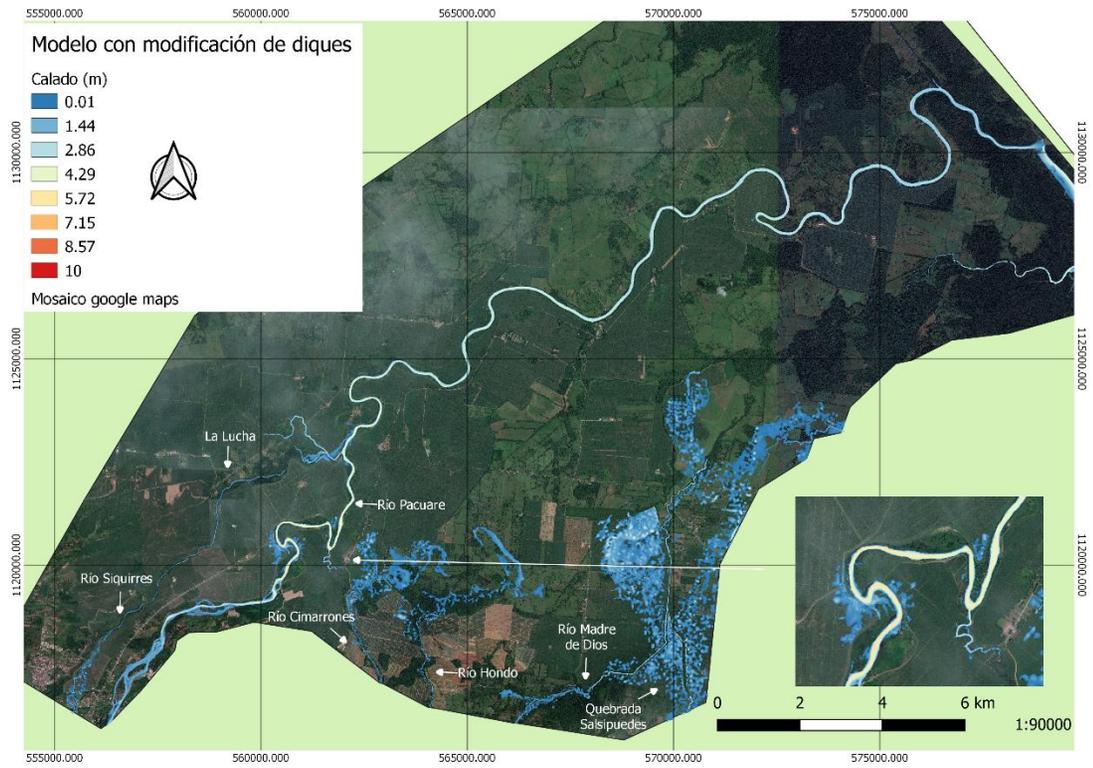


Figura 12 Efecto inicial de la inundación para el modelo hidráulico con modificación de diques.

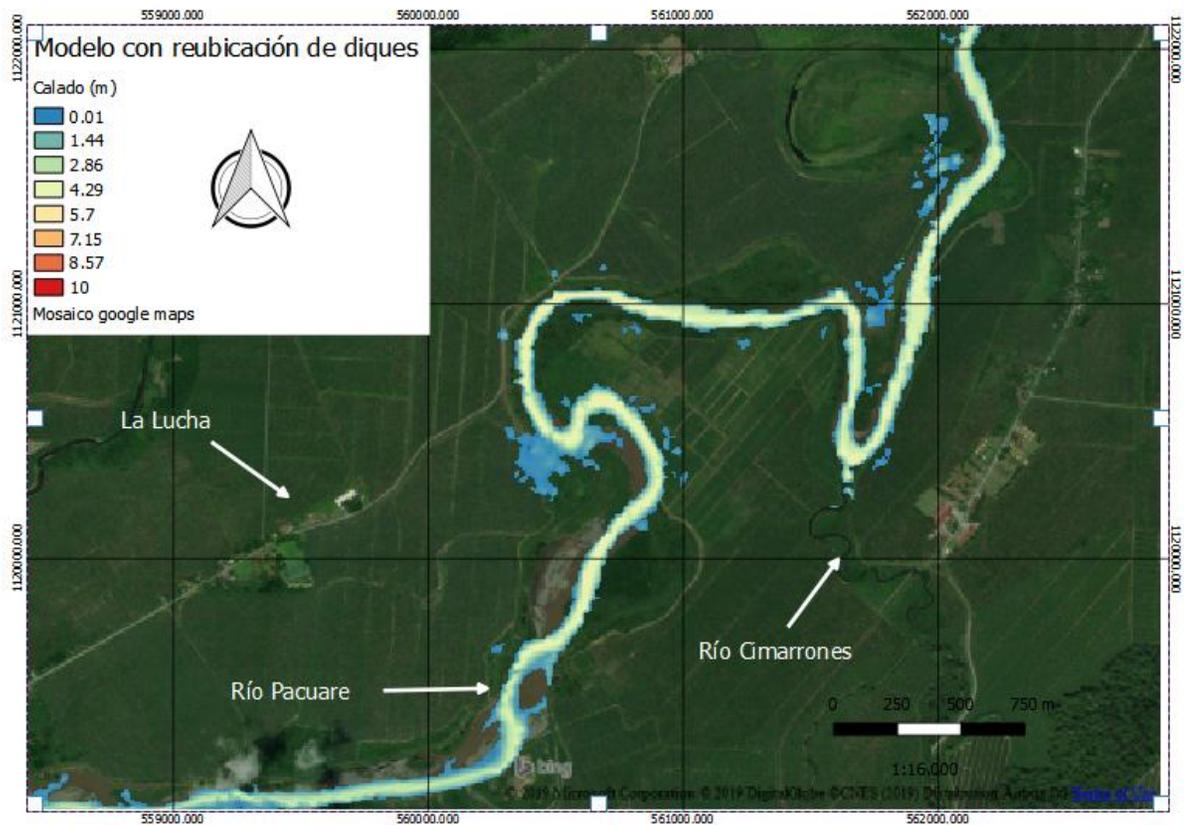


Figura 13 Efecto inicial de la inundación para el modelo hidráulico con la reubicación de diques

Al comparar los resultados obtenidos en las modelaciones para un periodo de retorno de 25 años en el escenario base y el escenario 1, se puede determinar por medio del calado un área inicial de inundación con un espejo de agua de 1 603,90 ha para la condición actual y 1 618, 84 ha en la modificación de los diques, de modo que existe una variación inicial de 14,95 ha, representado en la Figuras anteriores entre el escenario base y el escenario 1, en donde se ubican dos zonas claras con salida del agua diferenciada con respecto al resto del cauce, provocando una inundación inicial al no tener diques en zonas cercanas al río las cuales bajo la condición actual no se presentan, estas salidas de agua se identifican antes de la unión entre el río Pacuare y Siquirres, mientras que para la modelación con la reubicación de los diques la mancha de inundación inicial es 697,46 ha en donde se observa que la salida inicial se ubica en las mismas zonas que en el escenario base y el escenario 1, la diferencia tan significativa en hectáreas radica en que el modelo geométrico analizado es mucho menor que en el caso del escenario base y el escenario 1, en la Figura 13 se hace un acercamiento para

poder apreciar con más detalle, así mismo se idéntica en las Figuras un calado con un rango igual en las simulaciones en donde existe una variación desde los 0,01 a los 10 m, la velocidad oscila entre los 0 y los 5 m/s, sin embargo como se observa en las Figuras las zonas influenciadas por una inundación inicial no tienen cercanía a la comunidad de La Lucha, de modo que eventualmente dicho pueblo no se vería perjudicado en una inundación inicial para ambos modelos hidráulicos.

4.2.2 Pico de la inundación

En esta sección se analizarán los resultados en diferentes condiciones de los comportamientos que se tendrán al comparar los dos modelos hidráulicos realizados, a su vez se presentarán Figuras para simplificar la visualización de las mismas, seguidamente se analizaron comportamientos por medio de gráficos y otros factores tomados en cuenta, los mismos se presentan para un tiempo de simulación de 140 000 s, ya que aquí se da el efecto del evento pico, en dichas Figuras se hace un acercamiento el cual corresponde al tramo con influencia sobre la comunidad de la Lucha.

4.2.2.1 Calados en el pico de la inundación.

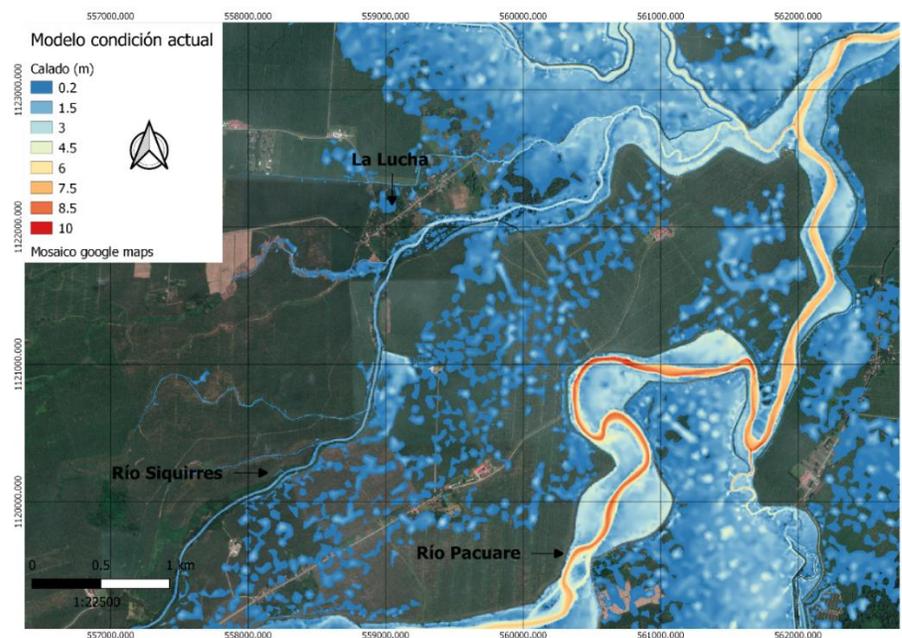


Figura 14 Calado para la modelación hidráulica en condición actual en el pico del hidrograma

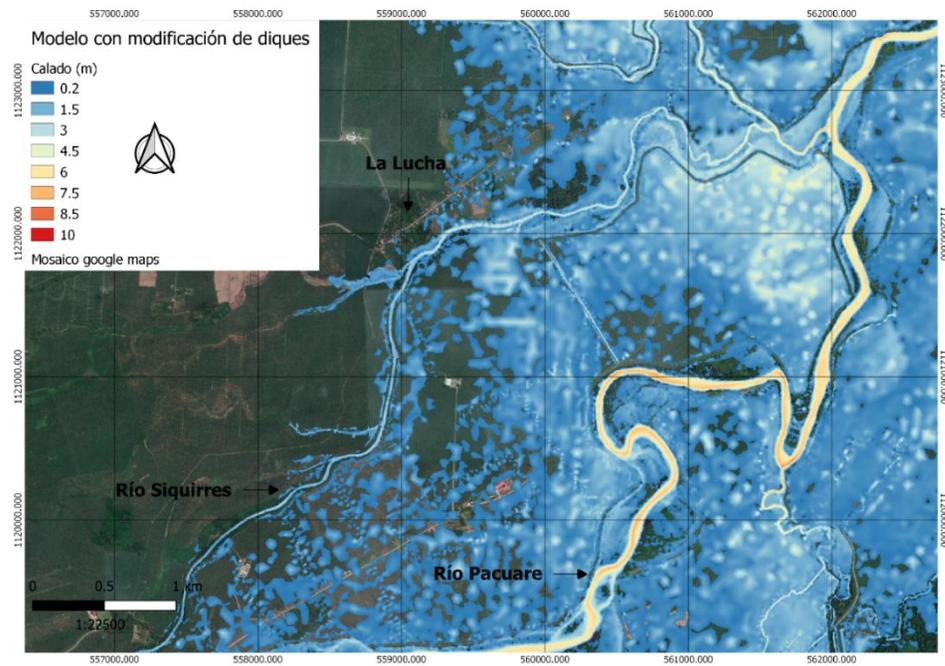


Figura 15 Calado para la modelación hidráulica con modificación de diques en el pico del hidrograma

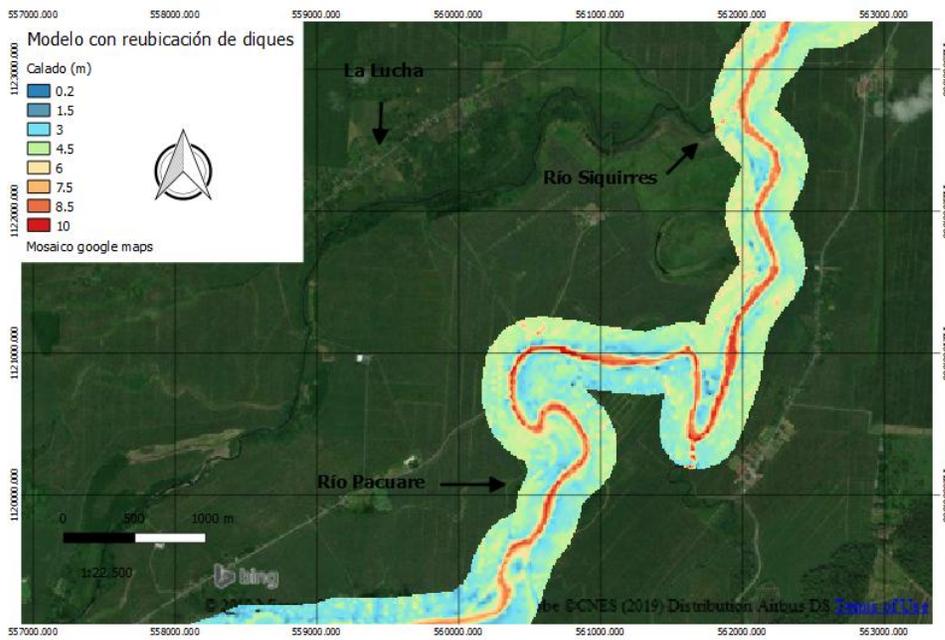


Figura 16 Calado para la modelación hidráulica con la reubicación de los diques en el pico del hidrograma

Al comparar lo que sucede en la Figuras anteriores para la modelación hidráulica al presentarse el pico del evento, se identifican diferentes zonas de inundación, así como diferentes niveles alcanzados en su calado, al analizar la Figura 15 con la modificación de diques se presenta una mancha de inundación en zonas donde no se presentan bajo la condición actual, dañando eventualmente zonas de cultivos entre el río Pacuare y el río Siquirres ubicados antes de la unión entre ambos ríos, así mismo para ambas modelaciones se presenta una mancha de inundación pequeña sobre la Lucha lo que provoca efectos negativos en dicha comunidad, en el caso del escenario 2 con la reubicación de los diques se presenta un comportamiento muy diferentes ya que el agua no tiene la capacidad de inundación más allá de los 200 m sobre cada lado del margen del río, como se muestra en la Figura 16

Al analizar la altura alcanzada los modelos, se identifican calados desde los 0,2 hasta los 10 m, sin embargo como se observa en la Figura con modificación de diques, la altura promedio en el área cubierta por cultivos y algunas construcciones oscila entre los 0,2 m y 3 m, mientras que en el río Pacuare se dan calados que no sobrepasan los 6 m, este comportamiento se debe a que gran cantidad del agua se encuentra en el río y no ocasionando problemas de inundación, a su vez en la Figura 14 del comportamiento del calado en condición actual se observan variaciones con respecto al otro modelo, en donde se da una altura promedio 0,2 m a los 1,5 m, observando un nivel del agua menor y con menos cantidad de área cubierta, sin embargo al analizar el río Pacuare los calados son superiores a los 6 m, en donde se observan zonas de hasta los 10 m, lo que representa que aunque el río tendrá que transportar mayor cantidad de agua, él mismo tiene la capacidad de poder hacerlo, el agua se ubica en su mayoría dentro del cauce natural y dentro también del área comprendida entre dique y dique, lo que demuestra que la ubicación y el dimensionamiento de los diques es importante para no tener inundaciones en lugares que si se presentan bajo la modificación de los diques, ahora bien en el modelo con la reubicación de los diques se alcanzan calados mayores que en ambos modelos en donde se tienen alturas promedio de 4,5 m y 6 m , y en el río Pacuare se alcanzan calados de hasta los 10 m, este comportamiento se debe a principalmente a la ubicación de los mismos, ya que el total del caudal ocupa un área menor que en el escenario base y en el escenario 1, por esto el nivel alcanzado es mayor.

Para el total del modelo, en el evento pico se presenta un total de área cubierta por agua influenciada por el río Pacuare y diferentes ríos y cauces de diferentes calados, en la condición actual se identifican 4 278, 35 ha, en la modificación de los diques de 5 660, 36 ha y el modelo con la reubicación de los diques de 3 622,52 ha , por lo cual existe una variación de 1 382,02 ha de más en el total del área analizada entre el escenario base y el escenario 1, en este último se presenta mayor cantidad de área cubierta por una eventual inundación, mientras que si se compara el escenario base con el escenario 2 en el cual se reubican los diques se tiene mayor área afectada por el escenario base cubriendo un área de 655,83 ha de más.

4.2.2.2 Remanso en el pico de la inundación

Otro de los factores analizados las Figuras es el remanso provocado sobre el río Pacuare el cuál influye directamente sobre el comportamiento de río Siquirres, presentando manchas de inundación en las cercanías de la unión entre ambos ríos, para analizar este comportamiento se presenta la Figura 17.

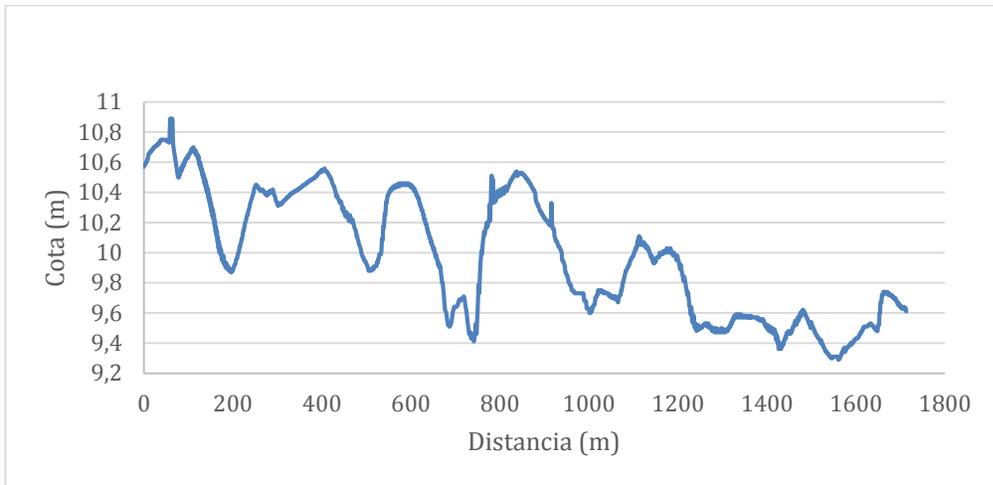


Figura 17 Corte longitudinal del fondo del río Pacuare

En la Figura anterior se aprecia el comportamiento del fondo del río después de la unión entre el río Pacuare y el río Siquirres por medio de un gráfico de su comportamiento, en donde existe una cota desde los 10,9 m a los 9,6 m en la distancia analizada, en dicha Figura se aprecia como existe un cambio en la altura repentino en el fondo, empezando aproximadamente en los 600 m hasta los 760 m, seguidamente hay una pared de 2 m que se tiene que superar sobre el fondo del cauce, es aquí donde sucede el remanso provocado por dicha pared, aguas atrás sobre el río Pacuare y el río Siquirres, teniendo afectaciones en esta zona para ambos modelos analizados.

4.2.3 Comportamiento del calado y caudal específico en un lugar determinado

Ahora bien al mostrar las Figuras anteriores se puede demostrar el comportamiento en un lugar específico del área, para conocer la variación de la cota y del caudal específico que se tendrá en dicho lugar a medida que el evento se presenta, en los siguiente gráficos se presentan los comportamientos para dichos factores, tomando en cuenta en este caso dos lugares de interés, el primero corresponde a una sección del río cercana a unión entre el río Pacuare y el río Siquirres, mientras que la otra Figura corresponde a una sección del área vulnerable cercana a la comunidad de la Lucha.

4.2.3.1 Sección del río Pacuare

Inicialmente se presenta el comportamiento del calado al comparar los escenarios, mostrando en la Figura 18 el tiempo contra el calado, esto para el tiempo de simulación del modelo, posteriormente se muestra otro grafico por medio de la Figura 19, comparando esta vez el tiempo contra el caudal específico en m^2/s .

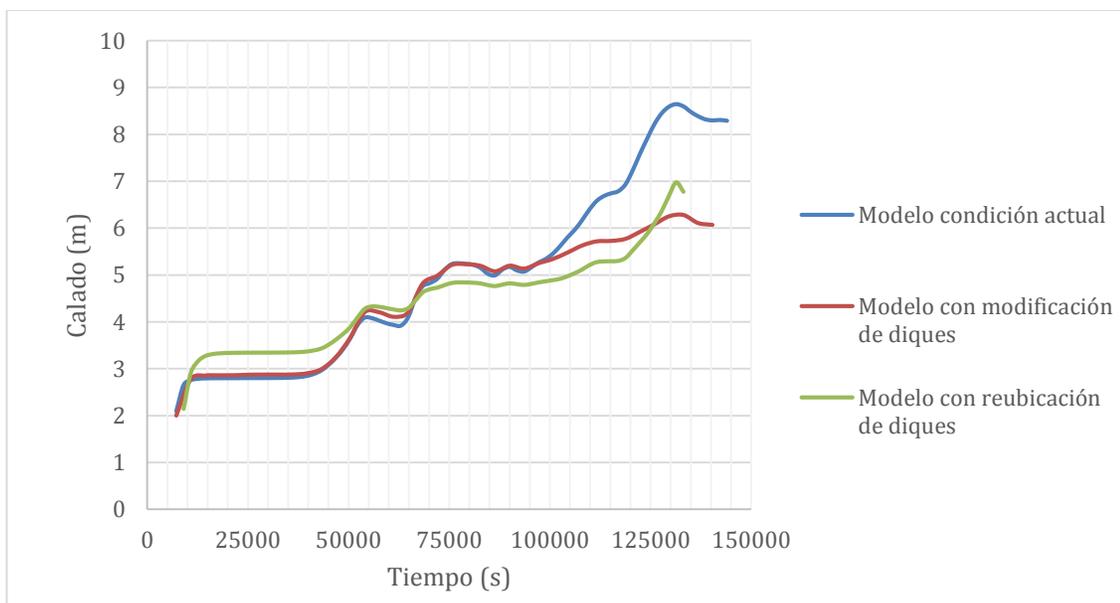


Figura 18 Comportamiento del calado en una sección del río Pacuare

Como se observa en el grafico anterior, los escenarios presentan comportamientos similares a lo largo de su simulación, en el interior del cauce principal, sin embargo mientras la simulación se acerca al evento pico, se presenta una condición de mayor calado en el modelo de condición actual sobre el río Pacuare lo comprueba el comportamiento mostrado en la Figura 14, en la cual se tiene menor cantidad de agua fuera de los diques, provocando una mancha de inundación menor, según el grafico el momento donde el calado es mayor en el modelo de condición actual se presenta a partir de los 100 000 s de simulación en donde el caudal de entrada al río Pacuare es de 417,9 m³/s, mostrado en el hidrograma de la Figura 4, para el modelo con la reubicación de los diques el comportamiento del calado es mayor antes de presentarse el evento pico, sin embargo al tener más área entre dique y dique el nivel de la cota de agua baja a medida que el evento se presenta si se compara con el modelo en condición actual.

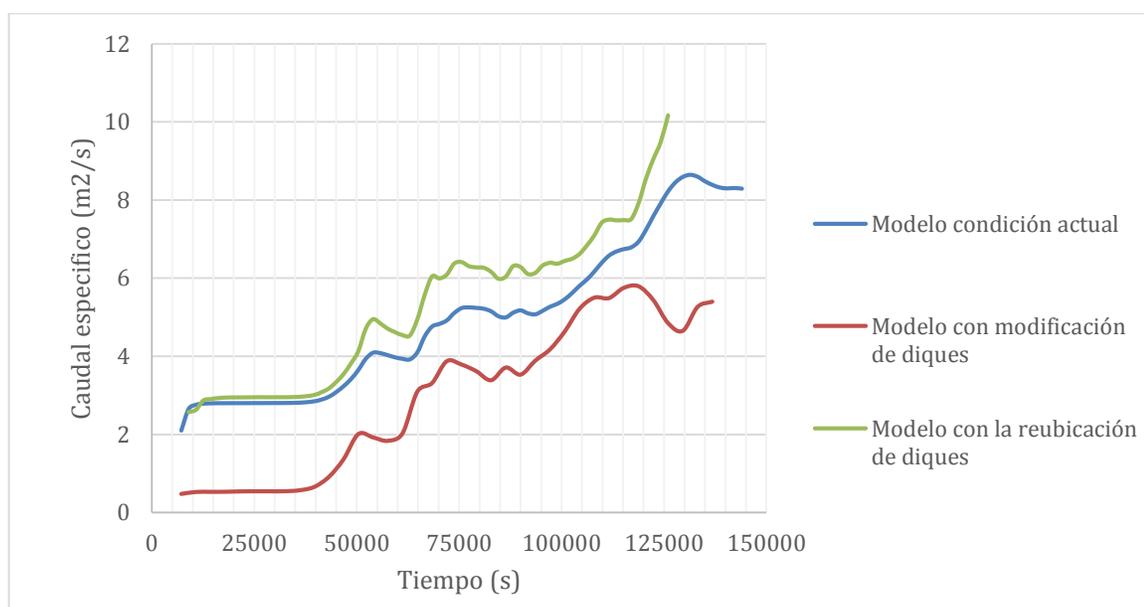


Figura 19 Comportamiento del caudal específico en una sección del río Pacuare

En el gráfico de la Figura 19 se aprecia el comportamiento del caudal específico en la misma sección, en donde se presenta un caudal específico menor en el modelo con modificación de diques a lo largo de la simulación, lo que garantiza que parte del caudal efectivo sobre el río toma diferentes direcciones, es tal el caudal que se presenta como

diferencia que para el momento del evento pico el modelo en condición actual presenta un caudal específico de $8,28 \text{ m}^2/\text{s}$, en el modelo con modificación de diques transporta $5,39 \text{ m}^2/\text{s}$ y el modelo con la reubicación de los diques transporta $10,17 \text{ m}^2/\text{s}$ en donde existe una variación de $2,89 \text{ m}^2/\text{s}$ entre el escenario base y el escenario 1, mientras que entre el escenario base y el escenario 2 hay una variación de $1,89 \text{ m}^2/\text{s}$ mayor en el escenario 2, este aumento en el nivel se presenta al tener la totalidad del caudal entre dique y dique en donde el agua no sale de ellos y se mantiene sobre la superficie de 200 m en ambas márgenes durante todo el evento.

4.2.3.2 Sección de vulnerabilidad

En este caso al igual que en la sección del río Pacuare se presentan gráficos del comportamiento del calado (Figura 20) y del caudal específico (Figura 21) a lo largo de la simulación, sin embargo, esta vez en una sección vulnerable cerca de la comunidad de la lucha como se mencionó anteriormente, en los análisis de los gráficos se tienen solo los eventos producidos en la modelación en condición actual y en la modelación con modificación de diques (escenario 1), ya que para el modelo con la reubicación de los diques (escenario 2) no se presenta influencia de calado ni de caudal específico en esta zona, esto se debe a que dicha reubicación garantiza que el agua permanece entre dique y dique, de modo que la comunidad de la lucha no se ve afectada.

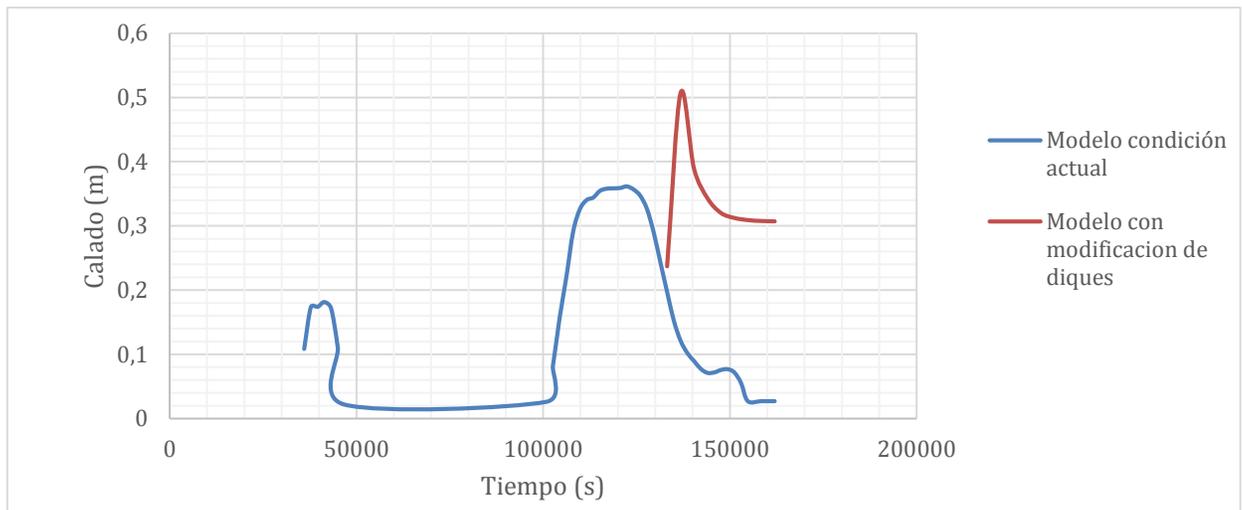


Figura 20 Comportamiento del calado en una sección vulnerable cerca de la comunidad la Lucha

En la Figura anterior se muestra la variación del calado en las cercanías de la comunidad de la Lucha, en donde se observa que el nivel aumenta cuando los diques son llevados abajo en cierto momento de la simulación, variando desde un calado de 0,51 m con modificación de diques como máximo y un calado de 0,36 m en el modelo de condición actual como máximo también, por lo que se presenta una variación máxima de calado de 0,15 m, valor que no representa un calado significativo en los comportamientos de ambas simulaciones, sin embargo como se observa en dicho grafico el calado en el modelo con modificación de diques se empieza a dar en un momento más lejano al inicio de la simulación, lo que demuestra que aunque el nivel alcanzado es mayor, el tiempo de permanencia del agua bajo efectos de inundación empieza a darse tiempo después que el efecto causado en el modelo en condición actual, a su vez se puede observar que después de alcanzado el nivel máximo ambos modelos empiezan a drenar el agua que se encuentra en dicha zona, donde se observa que el nivel promedio que se presenta después del evento pico en el modelo con modificación de diques es aproximadamente de 0,31 m, mientras que en el modelo en condición actual es de 0,027 m, lo que representa una gran diferencia entre ambos modelos.

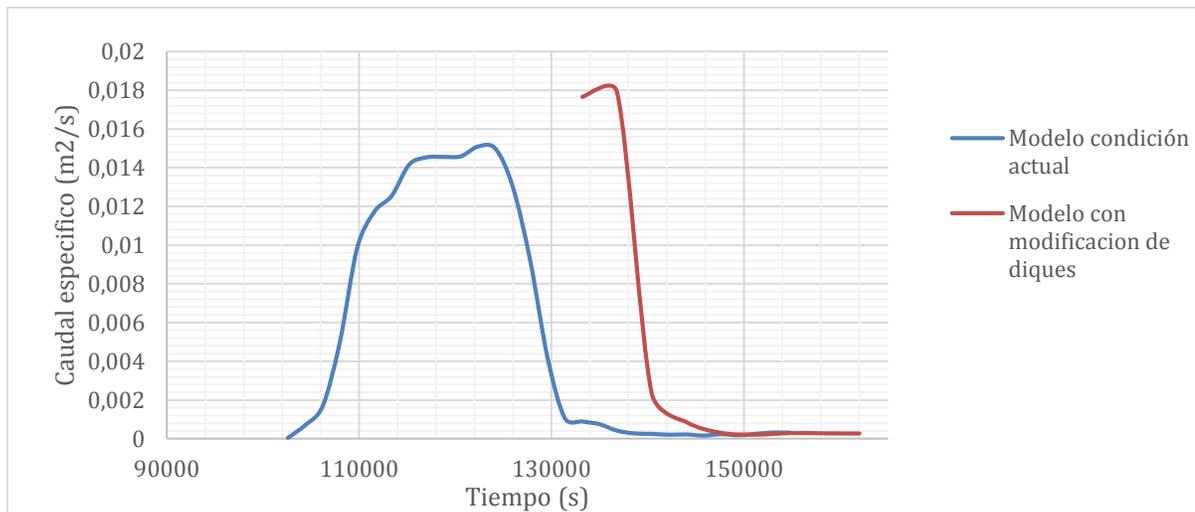


Figura 21 Comportamiento del caudal específico en una sección vulnerable cerca de la comunidad la Lucha

Ahora bien en el grafico mostrado en la Figura 21 se muestra el comportamiento del caudal específico en la misma sección cercana a la comunidad de la Lucha, en donde se observa un comportamiento relativamente similar en ambos modelos, en donde la variación del caudal específico se da desde los $0,018 \text{ m}^2/\text{s}$ hasta los $0 \text{ m}^2/\text{s}$, de modo que aun que en la Figura 21 del calado se muestran variaciones significativas, esta variación no tiene impacto directo sobre el comportamiento del caudal específico, a su vez en ambos modelos el comportamiento de la velocidad es muy similar, presentando velocidades máximas de $0,07 \text{ m/s}$ las cuales son considerablemente muy bajas.

4.2.4 Comportamiento de calados Máximos

En esta sección se presentan variaciones del calado máximo que se da en cada modelo analizado, al considerar el efecto que se tendría sobre la comunidad de la Lucha.

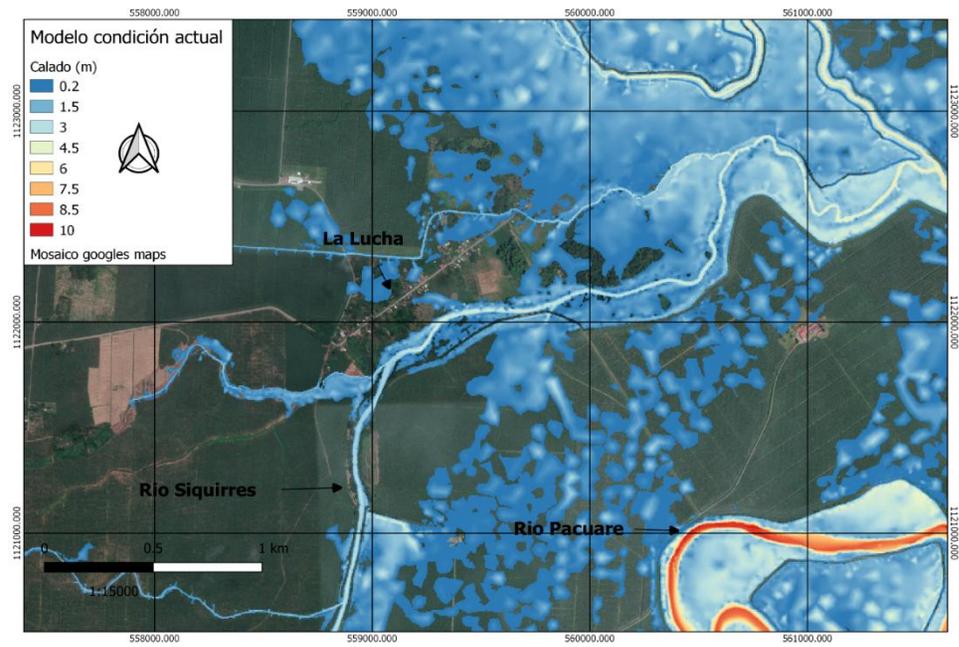


Figura 22 Calado para la modelación hidráulica en condición actual en el comportamiento máximo

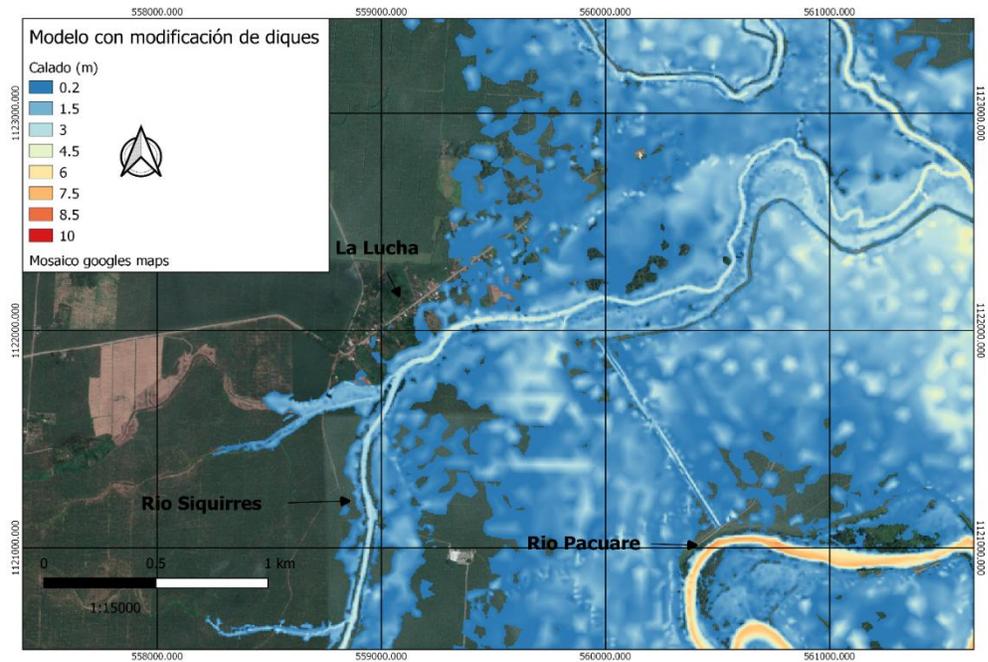


Figura 23 Calado para la modelación hidráulica con modificación de diques en el comportamiento máximo

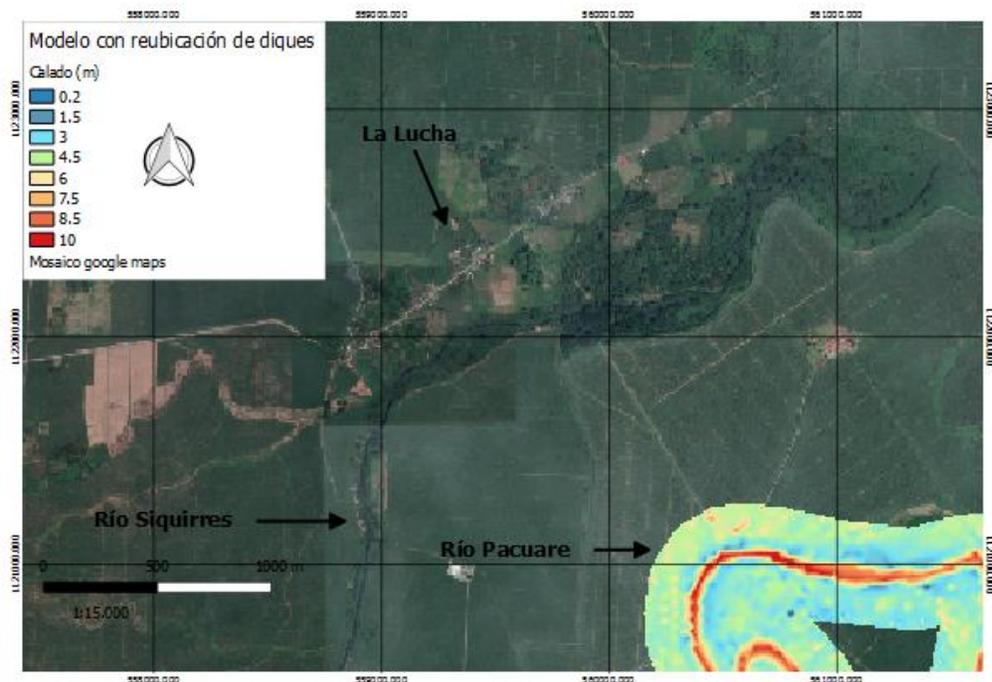


Figura 24 Calado para la modelación hidráulica con la reubicación de diques en el comportamiento máximo

Al comparar el comportamiento del calado que se presenta en la Figura 22 y 23, se observa como en ambas modelaciones la mancha de inundación es similar sobre la comunidad de la Lucha, aunque en la modelación con modificación de diques se tiene mayor mancha de inundación sobre diferentes coberturas, el comportamiento que se presenta es similar en ambos casos, sin embargo al analizar los resultados y los análisis encontrados por medio de los gráficos mostrados en las Figuras 20 y 21 de las secciones con vulnerabilidad se puede decir que la presencia del agua en condición actual sobre dicha comunidad se extiende con un nivel más bajo durante más tiempo de simulación y en menor cantidad de área, mientras que el modelo con modificación de diques logra cubrir mayor cantidad de área, en un tiempo menor y con calados mayores también, para el escenario 2 en donde se muestra la reubicación de los diques se observa que el agua no llega hasta la zona en análisis de modo que con este escenario se puede asegurar que no se tendrán repercusiones negativas sobre la comunidad de la Lucha.

Se observa también que la mancha de inundación mencionada anteriormente se distribuye en zonas más lejanas la unión entre el río Pacuare y el río Siquirres, esto para el modelo con modificación de diques, causando eventuales inundaciones en zonas que para el modelo en condición actual no se presentan.

Por último, se puede observar un comportamiento muy diferente en el calado en los modelos, donde se observa claramente como el calado en condición actual es mayor tanto para el río Pacuare como para el río Siquirres, oscilando entre los 6 m a los 10 m en el primero y entre los 1,5 m y los 3 m para el segundo, mientras que el comportamiento del calado en el modelo con modificación de diques oscila entre los 4,5 m y los 6 m para el río Pacuare y los 1,5 m y los 3 m para el río Siquirres.

4.3 Propuesta del escenario que técnicamente mejora la condición de vulnerabilidad

Se realizó la propuesta de obra al considerar las afectaciones producidas en diferente magnitud en los tres escenarios analizados en la sección anterior, donde se utilizaron los datos del hidrograma del río Pacuare y diferentes perfiles a lo largo del río.

4.3.1 Dimensiones del nuevo dique

La modelación en el momento máximo de la simulación se presenta en la siguiente Figura, en la misma se muestra el comportamiento del calado en dicha condición, a su vez se establecen diferentes secciones para determinar la dimensión del dique en cada una.

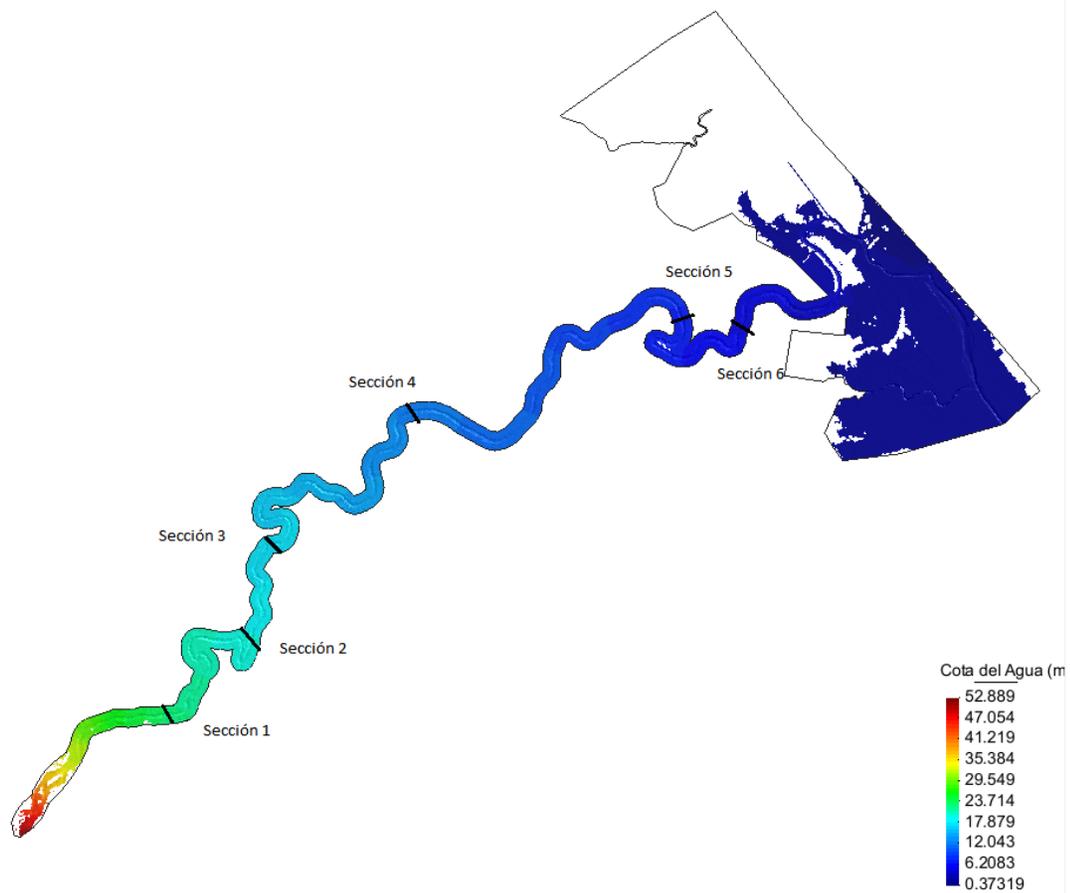


Figura 1 Modelación Hidráulica para el máximo de la propuesta de obra.

En la Figura anterior se presenta el comportamiento del nivel del agua a lo largo de la geometría analizada, en donde se da una diferencia desde los 52,89 m hasta los 0,37 m.

Para este caso se conoce la distancia uniforme de 200 m sobre los márgenes del río Pacuare por lo que se realizaron hidrogramas a lo largo de ambas márgenes de dicho río, variando las condiciones del comportamiento del nivel del agua con respecto al terreno, en donde se muestran los resultados para el margen derecho y el margen izquierdo del río de la altura de dique alcanzada en la cual se tendrá un bordo libre en ambos casos de 0,5 m.

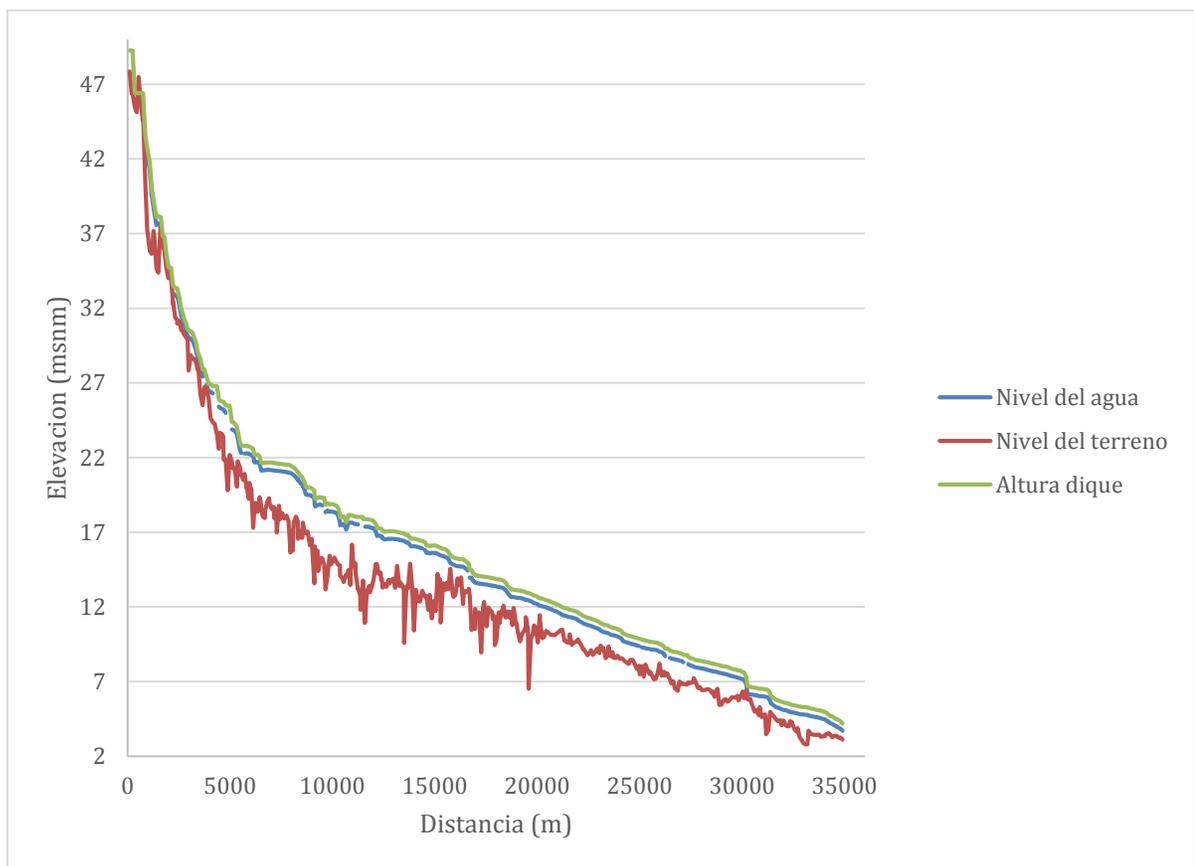


Figura 25 Elevaciones a lo largo del margen izquierdo para el diseño de la altura del dique

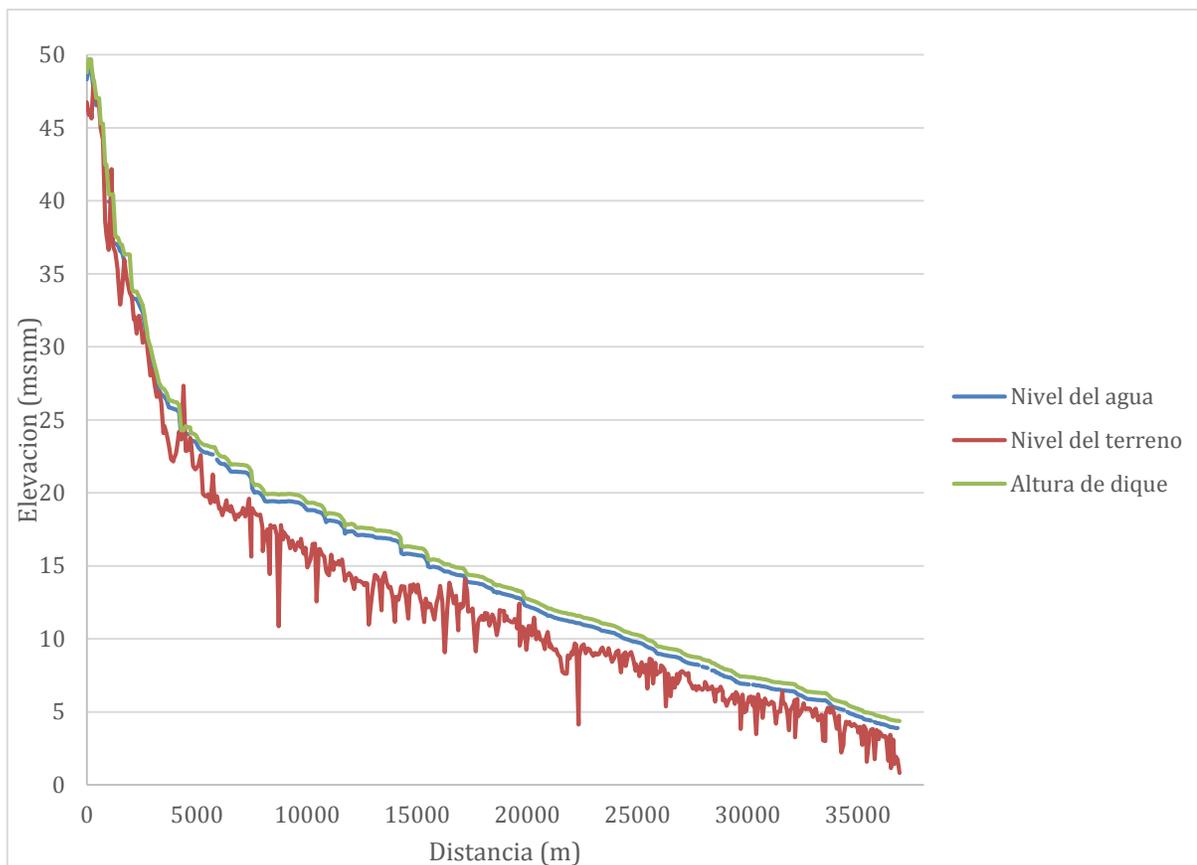


Figura 26 Elevaciones a lo largo del margen derecho para el diseño de la altura del dique

Al establecer los perfiles mostrados anteriormente para cada una de los márgenes del río Pacuare, se establece una condición en el dique que varía cada 100 m, para que la construcción del mismo se de lo más acorde posible al comportamiento del nivel del agua a si mismo se presentan diferentes variaciones en la altura del dique con respecto a la superficie del terreno en donde se encuentra una altura promedio de 2,71 m, con un máximo de 7,32 m, para el margen izquierdo del río, mientras que para el margen derecho la altura promedio es de 2,47 m, la máxima es de 9,01 m, en las Figuras anteriores se aprecia el comportamiento en sentido del flujo, desde la parte más alta de la topografía analizada por medio del MED hasta las cercanías de la ubicación de los diques actuales, ya que los mismos serán reubicados.

Seguidamente se establece el comportamiento de la altura a lo largo de las secciones mostradas en la Figura 27 para verificar este comportamiento de los hidrogramas en cada una de ellas.

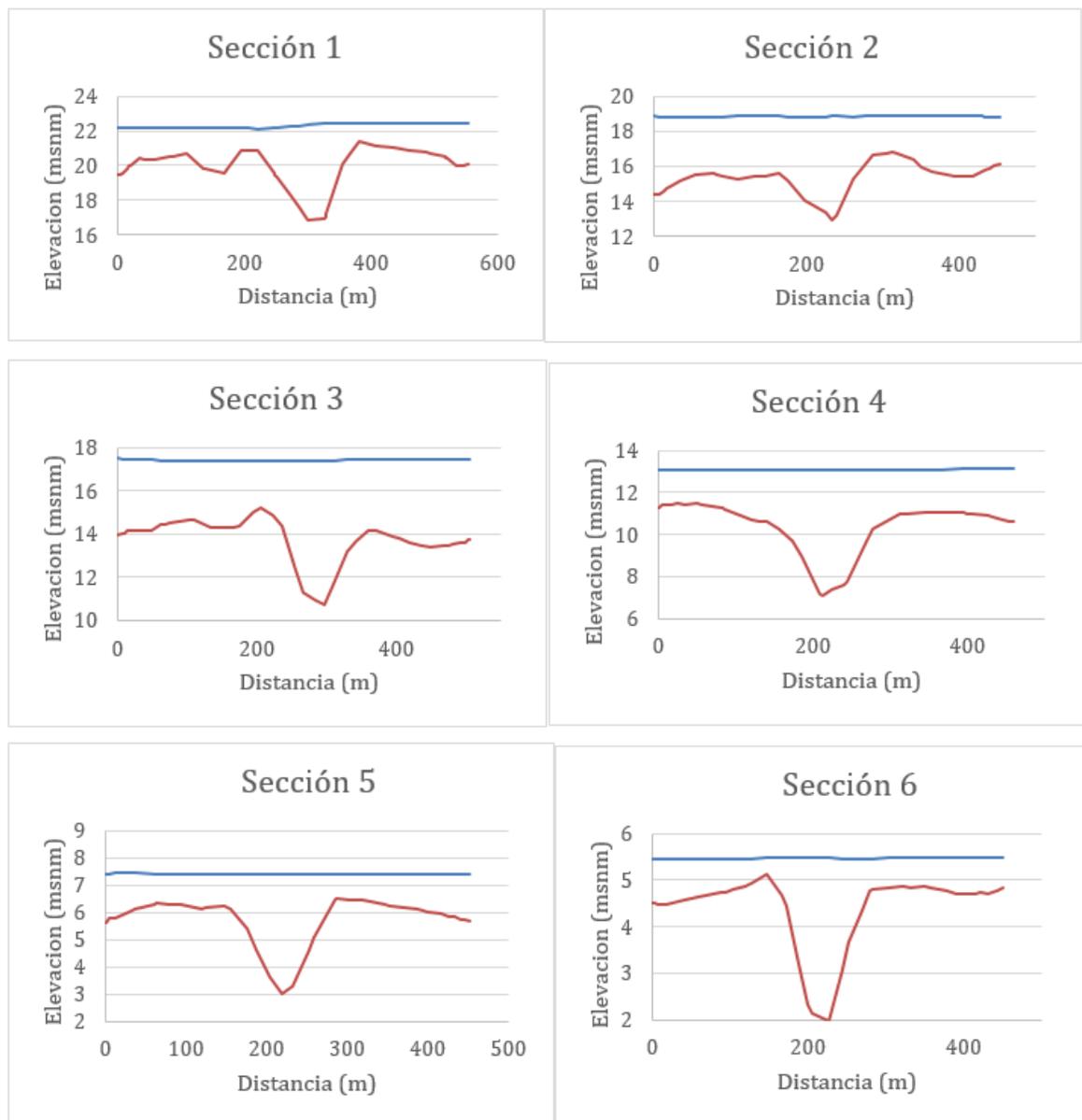


Figura 27 Secciones analizadas en la modelación hidráulica de la propuesta de obra en donde se representa de color azul la cota de agua y de color rojo la cota del suelo

En la Figura anterior se muestra el comportamiento de los hidrogramas que se presentan en cada sección al trazar un perfil transversal, esto último para garantizar que en comportamiento del nivel dado para el dique es el correcto analizado en los gráficos de las Figuras 25 y 26, de esta forma se puede garantizar que el dique ira cambiando en función a las necesidades que se tengan en cada uno de los tramos, garantizando un distanciamiento uniforme de 200 m sobre ambas márgenes y un dimensionamiento con forme a la variación que se presenta en cada uno de los gráficos mostrados.

4.3.2 Diseño del nuevo dique

Como se explica en la metodología dicho dimensionamiento fue llevado a cabo por el promedio de diferentes secciones a lo largo de los diques que existen en condición actual, de modo que al analizar diferentes estas secciones se estableció una que se pueda contemplar en la geometría del MED, la base inferior depende de la topografía del terreno, ya que en el caso de existir variaciones como pendientes laterales fuertes se tomó la decisión de rellenar las mismas, de modo que la base inferior puede cambiar, en la siguiente Figura se presenta la sección típica establecida.

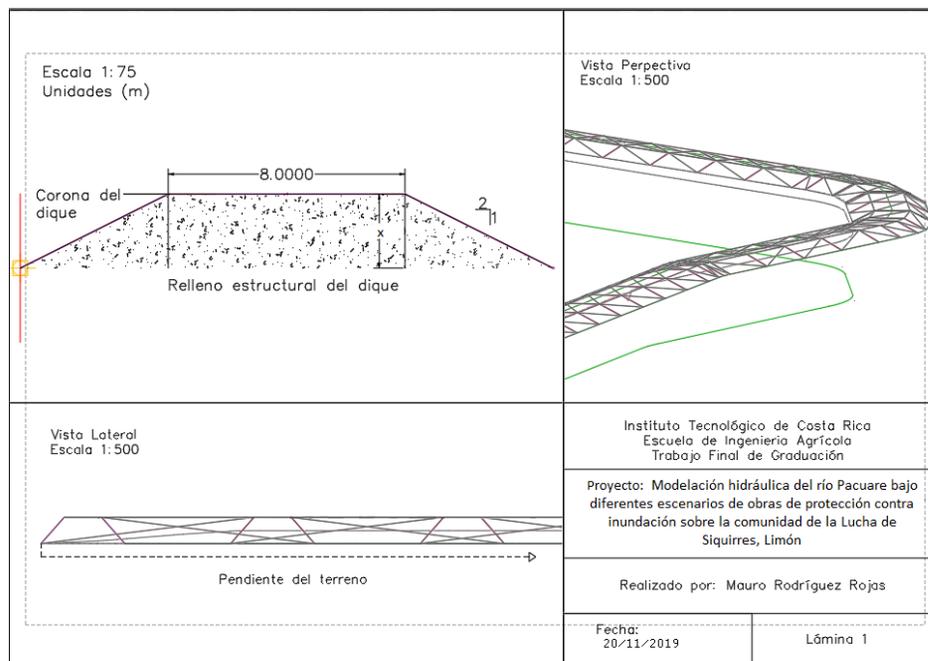


Figura 28 Dimensionamiento del dique llevado a cabo para el escenario 2.

En la Figura anterior se puede observar el comportamiento típico que tendrá la sección, sin embargo, en dicho diseño no se muestra la altura del dique ya que el valor X que se tomara depende de la altura entre el nivel del terreno y el nivel de agua cada 100 m, por lo que el diseño cambiará en función del lugar que se lleve la construcción del mismo, de igual forma se presentan las secciones analizadas para llegar al criterio del ancho y talud utilizados en el diseño anterior, por medio del Anexo 1.

4.4 Valor cualitativo de los impactos

4.4.1 Análisis social

El análisis comprende el área afectada por cada uno de los escenarios, de modo que se establece el siguiente cuadro comparativo, es importante mencionar que el mismo se realizó a partir del pico de la inundación cada uno de los eventos, de esta forma se establece hasta donde llegara la afectación a nivel de área.

Cuadro 3 Afectación del área en cada uno de los escenarios

Escenario	Área afectada (ha)
Condición actual	4 278,35
Eliminación sistema de diques	5 660,36
Reubicación de diques	3 622,52

El área cubierta por cada escenario representa la afectación a nivel poblacional, en donde claramente el daño más grande lo presenta el escenario con la eliminación de diques, causando daños en zonas de cultivos, poblados y carreteras que los otros dos escenarios no tienen repercusiones negativas, así mismo se observa como la reubicación de los diques puede llegar a favorecer en alrededor de 655,83 ha menos dañadas por influencia de inundación

Por otro lado, al implementar cada uno de los escenarios se tendrán repercusiones sobre distintas comunidades, en el siguiente cuadro se mencionan cuales comunidades se verían dañadas por cada uno de los escenarios, así como un aproximado de las personas por comunidad afectada utilizando un promedio de 3,65 personas por casa según el Anexo 3 (INEC, 2012).

Cuadro 4 Afectación presentada en cada escenario planteado

Escenario	Comunidad	Área afectada (ha)	Número de habitaciones afectadas	Número de personas afectadas
Condición actual	La Lucha	8,98	39	142
	Cultivez	15,18	24	88
	Imperio	-	-	-
	La perla	-	-	-
	Perlita	-	-	-
	Freeman	-	-	-
	Total	24,16	63	230
Eliminación sistema de diques	La Lucha	8,67	42	153
	Cultivez	62,34	141	515
	Imperio	-	-	-
	La perla	1,24	21	77
	Perlita	5,27	39	142
	Freeman	1,2	15	55
	Total	78,72	258	942
Reubicación de diques	La Lucha	-	-	-
	Cultivez	-	-	-
	Imperio	-	-	-
	La perla	0,7	15	55
	Perlita	16	67	245
	Freeman	12,3	48	175
	Total	29	159	475

Como se observa en el cuadro anterior todos los escenarios tienen repercusiones negativas sobre distintas comunidades, en donde la cantidad de personas afectadas es diferentes en cada uno de los escenarios, sin embargo para efectos del proyecto el escenario 2 con la reubicación de los diques es el único que no tendría repercusiones negativas sobre la comunidad de la Lucha aunque el mismo es el único que tiene afectación sobre la comunidad de Perlita y Freeman las cuales no se ven afectadas en el escenario base y en el escenario 1 con la eliminación del sistema de diques, de igual forma el escenario base es que asegura menor

cantidad de área dañada a comunidades, número de habitaciones dañada y cantidad de personas.

4.4.2 Análisis económico

Para este análisis se llevó a cabo una comparación entre la rentabilidad que puede generar cada uno de los escenarios a nivel de pérdida de área de siembra de banano, tomando en consideración que la mayor parte del área analizada se encuentra cubierta banano como lo es en los distritos de Siquirres y Pacuarito los cuales están influenciados en el análisis, de modo que se presenta el siguiente cuadro en donde se toma el escenario base como punto de partida el cual es afectado en 4 278,35 ha para conocer si el escenario 1 y el escenario 2 generan más o menos afectación.

Cuadro 5 Área afectada al tomar como parámetro el escenario base

Escenario	Área afectada (ha)
Eliminación sistema de diques	+ 1 382,01
Reubicación de diques	- 655,83

Los valores anteriores se pueden medir en función de pérdidas de producción en banano, ya que según informa el diario el financiero en una entrevista al gerente agropecuario de la compañía Colono Agropecuario y al director de CORBANA el valor por hectárea para el año 2011 fue de \$15 000 (Camacho, 2012, Febrero 26), lo que representaría para el escenario 1 una pérdida económica de \$20 730 150, mientras que para el escenario 2 se tendría una ganancia de \$9 837 450 sobre el escenario base al tener menor área afectada por inundación.

4.4.3 Análisis ambiental

Este análisis se llevó a cabo al tratar la afectación que se pueda tener en el proyecto y no en cada uno de los escenarios, de modo que se tomó la información del Sistema Nacional de Área de Conservación (SINAC) que respecta a las Áreas silvestres protegidas de Costa Rica hasta agosto del 2019 en donde se encuentra el Humedal Nacional Cariari y la Reserva Forestal Pacuare Matina dentro del área analizada para el proyecto, sin embargo ninguno de los escenarios tiene afectación sobre dichas áreas, por lo cual el daño ambiental producido está en función del movimiento de tierra para los diques al eliminarlos o al reubicarlos, a su vez si se analizan algunos ecosistemas cercanos que tengan implicación directa sobre el proyecto, se puede mencionar que para el escenario 1 con la eliminación del sistema de diques se tendrá mayor área afectada en donde algunas especies tendrán su hábitat natural, para el escenario 2 al disminuir el área afectada, los ecosistemas dañados serán menos en función siempre del área analizada.

Si se habla en el cambio que se puede dar en la morfología del río, el mismo presenta diferencias a lo largo de su recorrido, en donde se presentan zonas donde el río es recto, otras trezado y pocas zonas donde se observa meandro, al tratar los escenarios planteados en el proyecto la morfología de los ríos no se vería afectada en ninguno de ellos ya que en cada uno el río permanece igual y las variaciones que se dan son en función de las estructuras analizadas, en este caso los diques.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al comparar el escenario base con el escenario 1, inicialmente se presenta una variación entre ambos modelos de 14,95 ha de área afectada por inundación en donde se observan afectaciones en zonas más alta, cubiertas en su mayoría por cultivos y pastos, zona que no se ve afectada en el modelo en condición actual o escenario base del proyecto, caso contrario sucede si se compara el escenario base con el escenario 2, ya que este último presenta menor área afectada por inundación que el escenario base, logrando afectar 906,44 ha menos, seguidamente al analizar el evento pico el área afectada es más significativa, ya que se encuentra una diferencia de 1 382 ha mayor en el modelo con modificación de diques, mientras que en el modelo con reubicación de los diques presenta menor área afectada por inundación con respecto al modelo en condición actual o escenario base.

Al hablar de los calados presentados a lo largo de las simulaciones se tienen diferencias en el nivel alcanzado a lo largo de la misma, para los 3 escenarios, sin embargo los niveles alcanzados en el escenario base se mantiene altos ya que como se observó la mayor cantidad de agua es capaz de permanecer sobre el río Pacuare, para el escenario 1 los calados son menores pero el área cubierta por manchas de inundación es mayor y por último para el escenario 2 los calados permanecen en su mayoría por arriba de los 3 m pero siempre dentro del área hidráulica que se encuentra entre dique y dique.

Al analizar la secciones del río Pacuare y las zonas vulnerables se presentan variaciones entre el escenario base y el escenario 1, dichas variaciones se dan en el calado y el caudal específico presentado en la zona vulnerable cercana a la comunidad de la Lucha, se observa que aunque el calado se da durante gran parte de la simulación en el modelo en condición actual el nivel promedio es de 0,18 m, drenando de buena forma hasta tener un nivel muy bajo de 0,02 m, mientras que para el modelo con modificación de diques aun que el nivel es alcanzado en un tiempo más largo de la simulación el nivel promedio es de 0,33 m con un drenado muy lento hasta un nivel de 0,31 m, lo que provocaría más afectaciones en la comunidad de la lucha, por ultimo con respecto al remanso que se da un estrechamiento que tiene repercusiones aguas atrás sobre la unión entre el río Pacuare y el río Siquirres, factor que determina la mancha de inundación que se presenta en esta zona para ambos modelos, por

último el escenario 2 presenta afectaciones en dicha zona ya que la misma se encuentra ubicada por afuera de los 200 m de ambas márgenes del río Pacuare.

A su vez se concluye que al analizar el dimensionamiento y el diseño del escenario 2 el cual técnicamente mejora las condiciones de vulnerabilidad cuenta con una distancia uniforme a lo largo de ambas márgenes del río Pacuare de 200 m, se presentan diferencias en su dimensionamiento con respecto a cada una de las secciones y perfiles analizados, asegurando de esta manera que si se tiene una distancia de 200 m en ambas márgenes del río Pacuare, se tendrá un dique diseñado de tal forma que el nivel del agua no podrá en riesgo a la comunidad de la Lucha ante eventuales inundaciones, estableciendo a su vez un bordo libre de 0,5 m a lo largo de la máxima altura alcanzada por el nivel del agua, para garantizar la efectividad de los resultados se deben de seguir las siguientes recomendaciones.

En el análisis de los diferentes impactos del proyecto se concluye que cada escenario tendrá diferentes efectos sobre la comunidad de la Lucha y otras comunidades, por lo cual se debe valorar cuál de los escenarios además de ser técnicamente mejor para fines del proyecto, toma en cuenta menor cantidad de afectación a nivel poblacional, pérdidas de producción y defensa de áreas protegidas.

Se enumeran una serie de recomendaciones a seguir para la elaboración del proyecto.

- En la modelación geométrica la cantidad de polígonos realizados para distinguir los usos de suelo aumentan el tiempo de simulación y aumentan las probabilidades de generar polígonos con errores, por lo cual se debe de tratar de disminuir el número de polígonos al generar uniones entre los mismos del mismo uso de suelo.
- El tiempo que conlleva una simulación es alto por lo cual se recomienda trabajar con varias simulaciones a la vez con características diferentes en mallado, rugosidad y uso de suelo.

- Realizar diferentes secciones como se hizo en este proyecto, para representar de mejor manera el diseño de los diques, ya que si se trabaja con solo un tramo pequeño y se generalizan estos resultados para todo el diseño no se tendrá un diseño real con forme a la topografía y el comportamiento del nivel del agua en el lugar.
- Generar perfiles para conocer el comportamiento de la altura del dique en diferentes condiciones al darse una distancia uniforme de construcción, en el caso de este proyecto es cada 100 m.
- A la hora de realizar los análisis del proyecto se recomienda que se tome el total del área analizada para poder contemplar diferentes comunidades aledañas y no solamente la comunidad sobre la cual se está trabajando en el proyecto, a su vez hacer énfasis en aquellas zonas de interés común como áreas protegidas del país.
- Generar un modelo adicional el cual cuente con diversidad de aplicaciones al combinar algunos de los escenarios, dicho modelo se debe establecer en función de las afectaciones presentadas en el escenario 2 sobre algunas comunidades.

BIBLIOGRAFÍA

Ahmad, S y Simonovic, S. (2006). *An intelligent decision support system for management of floods*. Water Resources Management 20: 391-410. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/226337535_An_Intelligent_Decision_Support_System_for_Management_of_Floods

Bladé, E., Cea, L., Coresteina, G., Escolanoc, E., Puertas, J., Vázquez E., Dolz, J y Coll, A. (2014). *Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos*. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/82390287.pdf>

Bladé E y Gómez M. (2006). *Modelación del Flujo en Lámina Libre sobre Cauces Naturales. Análisis Integrado en una y dos Dimensiones*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, FLUMEN, E.T.S. Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, UPC, Barcelona, España. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93706>

Blanco, E. (2017). *Conflictos Socio-Ambientales Y Cultivo Del Banano. Estudio De La Región Atlántico/Caribe De Costa Rica, 1950-2017*. Recuperado de: <http://revistes.ub.edu/index.php/ACS/article/download/22758/24034>

Calderón, H. (2002). *Un nuevo enfoque en el análisis y empleo de la información batimétrica aplicada a la cartografía marina*. Tercer Congreso de Geomática.

Camacho, A. (26 de febrero de 2012). *Bananeros ganaron \$639,8 millones*. El Financiero. Recuperado de: http://www.elfinancierocr.com/ef_archivo/2012/febrero/26/negocios3074014.html

Caro, C y Bladé, E. (2018). *Tratamiento De La Rugosidad Dentro De Un Modelo Hidrológico Basado En Esquema De Volúmenes Finitos*. Hidrología, Usos y Gestión del Agua. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Carlos_Caro_Camargo/publication/324216853_La_modelizacion_numerica_de_procesos_fluviales/links/5ac5534d0f7e9b1067d4c5ae/La-modelizacion-numerica-de-procesos-fluviales.pdf

Carvajal, M. (25 de noviembre de 2008). *Limonenses golpeados por derrumbes e inundaciones*. *La Nación*. Recuperado de: http://www.nacion.com/ln_ee/2008/noviembre/25/pais1787641.html

Céspedes, J y Pérez J. (2008). *LIDAR, una tecnología de última generación, para planeación y desarrollo urbano*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/4988/498850166010.pdf>

Chow, V. (1998). *Hidráulica de canales abiertos*. McGRAW-Hill INTERAMERICANA S.A

Comerma, G y Juan, A. (2009). *Suelos mal drenados en Venezuela*. Revista científica agronomía tropical vol. 59(1), 2009. Recuperado de: <https://www.proquest.com/products-services/ebooks/ebooks-main.html>

Contreras, F y Odriozola, M. (2016). *Aplicación de modelos de elevación digital para la delimitación de áreas de riesgo por inundaciones. San luis del palmar, corrientes, RCA. Argentina*. Centro de Ecología Aplicada del Litoral. Recuperado de: http://gaea.org.ar/contribuciones/CONTRIBUCIONES2016/11_CONTRERAS_FELIX-ODRIOZOLA_MARIANA.pdf

Corona, A., Jimenez, Y., Cruz, Y y Estrada, Y. (2017). *Problemas ambientales asociados a las inundaciones por fuertes lluvias en el Consejo Popular Veguita: Propuesta de una estrategia de mitigación*. Técnica Superior Unidad de Base Sílvicola de Yara. Cuba. Recuperado de: <http://scielo.sld.cu/pdf/mg/v33n4/mg10417.pdf>

Cueva, M., Cañon, J y Cea L. (2018). *El modelo iber como herramienta docente de ayuda al aprendizaje y análisis de fenómenos de flujo bidimensionales*. Universidad Nacional de Cajamarca - GEIH5 - Red de Jóvenes Profesionales, Cajamarca, Perú. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/333144702_EL_MODELO_IBER_COMO_HERRAMIENTA_DOCENTE_DE_AYUDA_AL_APRENDIZAJE_Y_ANALISIS_DE_FENOMENOS_DE_FLUJO_BIDIMENSIONALES

DAAD (Deutscher Akademischer Austausch Dienst). (2006). *Flood Manager E-learning*. Recuperado de: <http://daad.wb.tu-harburg.de/homepage/>

Díaz, L. (s.f). *Dos días de lluvia, Limón devastado*. La Nación. Recuperado de: http://www.nacion.com/In_ee/ESPECIALES/inundacion_limon/historia.html

Escuder, I., Matheu, E y Castillo, J. (2010). *Análisis y evaluación de riesgos de inundación: estimación del impacto de medidas estructurales y no estructurales*. Recuperado de: http://www.ipresas.upv.es/docs/Ponencia_IE_EM_15O_Final_2010_10_05.pdf

González, G. (13 de diciembre de 2003). *1 757 damnificados en albergues*. Al Día. Recuperado de: http://www.aldia.cr/ad_ee/2003/diciembre/13/nacionales2.html

Grant, A., Oreamuno, R., Serrano, A y Vargas, O. (2004). *Comisión sobre la problemática de inundaciones en la vertiente atlántica*. Colegio Federado De Ingenieros Y De Arquitectos De Costa Rica. Recuperado de: <http://cfia.or.cr/descargas/informe1.pdf>

IMN. (s.f). *Tabla de mareas*. Recuperado de: <https://www.imn.ac.cr/tablas-de-mareas>

INDER (2015). *Caracterización del Territorio Siquirres – Guácimo*. Recuperado de: <http://obturcaribe.ucr.ac.cr/documentos-publicaciones/planes-y-programas-n/inder/187-caracterizacion-siquirres-guacimo/file>

INEC (2012). *Características Sociales y Demográficas. Área de Censos de Población y Vivienda*. Recuperado de: http://inec.cr/sites/default/files/documentos/inec_institucional/estadisticas/resultados/repoblacenso2011-12.pdf.pdf

Jiménez, S. (07 de diciembre de 2015). *Inundaciones en Siquirres afectan a gente de bajos recursos*. La Prensa Libre. Recuperado de: <http://www.laprensalibre.cr/Noticias/detalle/50187/470/inundaciones-en-siquirres-afectan-a-gente-de-bajos-recursos>

Monge, G., Esquivel, L., Campos, N., Mendez, L., Sanchez, H., Rodriguez, M; Morales, L. (s.f). *Deslizamientos Inundaciones Sismos*. Comisión Nacional De Prevención De Riesgos y Atención de Emergencias. Recuperado de: https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/informacion_educativa/recomentaciones_consejos/documentos/Folleto_Deslizamientos.pdf

Mourning, C; Nykl, S; Chelberg, D. (2011). *An Analysis of Impostor Based Level of Detail Approximations for LIDAR Data*. School of Electrical Engineering and Computer Science. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/David_Chelberg/publication/220845571_An_Analysis_of_Impostor_Based_Level_of_Detail_Approximations_for_LIDAR_Data/links/0deec51

[71a856af45e000000/An-Analysis-of-Impostor-Based-Level-of-Detail-Approximations-for-LIDAR-Data.pdf](https://www.researchgate.net/publication/309212471_Modelacion_hidrodinamica_del_tramo_medio_del_rio_Ctalamochita_Provincia_de_Cordoba)

Ochoa, S., Reyna, T., Reyna, S., García, M., Labaque, M y Díaz, J. (2016). *Modelación hidrodinámica del tramo medio del río Ctalamochita, Provincia de Córdoba*. Revista facultad de ciencias exactas, físicas y naturales, vol. 3, no.2. Recuperado de : https://www.researchgate.net/profile/Teresa_Reyna/publication/309212471_Modelacion_hidrodinamica_del_tramo_medio_del_rio_Ctalamochita_Provincia_de_Cordoba/links/580606fa08ae03256b7691c7/Modelacion-hidrodinamica-del-tramo-medio-del-rio-Ctalamochita-Provincia-de-Cordoba.pdf

Rocha, A. (s.f). *La morfología fluvial y su incidencia en la estabilidad de las obras viales*. Instituto de la construcción y gerencia. Recuperado de: http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/ROCHA/Morfologia_fluvial_y_su_influencia.pdf

Romero, F y Pineda, N. (2007) *Batimetría del Lago de Yojoa*. Departamento de Investigación Forestal Aplicada. Recuperado de: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/training_material/docs/Batimetr%C3%ADa%20del%20Lago%20de%20Yojoa.pdf

SINAC. (2019). *Áreas Silvestres Protegidas de Costa Rica*. Recuperado de: <http://www.sinac.go.cr/ES/asp/Paginas/default.aspx>

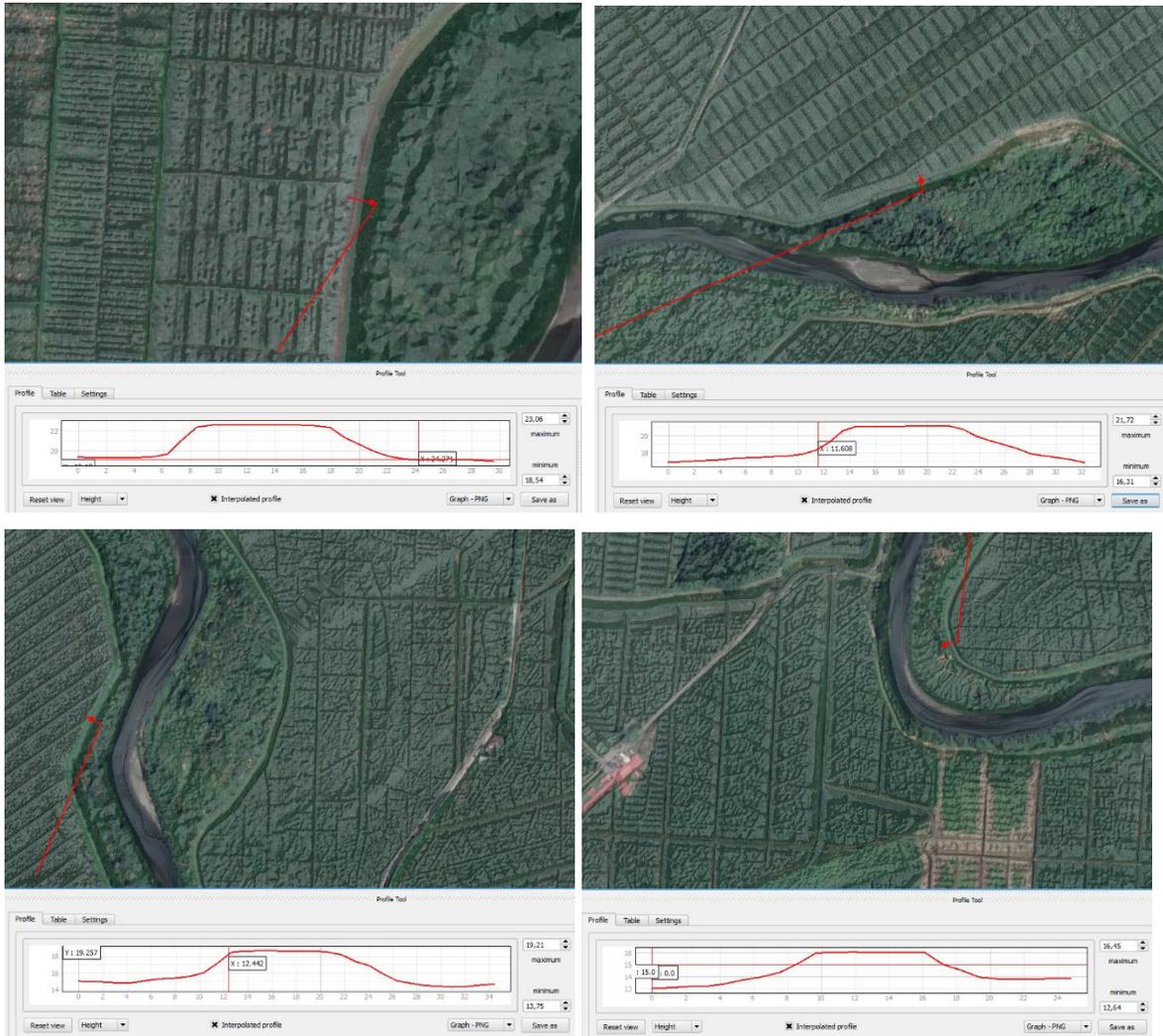
Strahler, A. (1984). *Geografía Física. Ediciones Omega S. A.* Barcelona. Recuperado de: https://www.academia.edu/9553071/Geograf%C3%ADa_F%C3%ADsica_1989_.Arthur_Newell_Strahler

Watson, F y Guzman, I. (2018). *Modelación hidrodinámica y de transporte de sedimentos en el río la Estrella, Limón*. Investiga TEC. Recuperado de: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9154/Modelacion_hidrodinamica_morfologica_río_la_estrella.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Zimmermann, E y Bracalenti, L. (2014). *Reducción de riesgo de inundación urbana mediante incremento de áreas para la agricultura y la forestación urbana y periurbana (upaf)*. Climate and Development Knowledge Network. Recuperado de: <https://www.ruaf.org/sites/default/files/Reduccion%20de%20riesgo%20de%20inundacion%20mediante%20incremento%20de%20%20areas%20de%20la%20agricultura%20urbana%20y%20peri-urbana%20Final.pdf>

ANEXOS

Anexo 1. Corte transversal de diferentes secciones del dique ubicado en ambas márgenes del rio Pacuare.



Anexo 2. Datos del comportamiento de la marea para lo que va del año 2019

Fuente: IMN., s.f

Día	Mes	Año	Hora	Altura	Fase lunar
01	03	2019	07:57 AM	00,29	Hacia Luna nueva
			09:00 PM	00,09	
			12:31 AM	00,00	
			03:13 PM	-00,05	
02	03	2019	08:41 AM	00,28	Hacia Luna nueva
			10:20 PM	00,09	
			01:11 AM	00,02	
			04:05 PM	-00,04	
03	03	2019	01:55 AM	00,05	Hacia Luna nueva
			05:01 PM	-00,02	
			09:29 AM	00,27	
			11:41 PM	00,10	
04	03	2019	02:47 AM	00,09	Hacia Luna nueva
			03:58 PM	-00,01	
			10:17 AM	00,27	
05	03	2019	12:32 AM	00,13	Hacia Luna nueva
			11:20 AM	00,24	
			04:08 AM	00,10	
			06:48 PM	00,00	

Anexo 3. Datos para el analisis social de la provincial de Limon.

Fuente: INEC, 2012

Continuación Cuadro 46...

Provincia, sexo de la jefatura del hogar y principales características de los hogares y las personas	Hogares Nucleares			Hogares Extensos			Hogares Compuestos			Otros Hogares		
	Total	Conyugal sin hijos	Conyugal con hijos	Mono-parental	Conyugal y otros familiares	Mono-parental, otros familiares	Jefe(a) y otros familiares	Nuclear y no familiares	Extenso y no familiares	Jefe(a) familiares y no familiares	Uni-personal	No familiares
Hogares con jefas mujeres^{1/}												
Total de hogares	33 026	1 005	2 692	13 956	1 048	5 737	1 903	410	294	119	5 585	277
Total de personas ^{2/}	102 011	2 010	10 902	41 440	5 688	26 780	4 972	1 705	1 808	487	5 585	634
Promedio de ocupantes	3,1	2,0	4,0	3,0	5,4	4,7	2,6	4,2	6,1	4,1	1,0	2,3
Ocupados por hogar	0,9	1,1	1,5	0,8	2,0	1,3	0,7	1,5	1,9	1,4	0,4	1,2
Relac. depend. demog. ^{3/}	58,2	21,6	47,9	63,2	50,2	61,7	69,7	42,7	52,6	56,1	55,1	24,1
Relac. depend. econ. ^{3/}	213,8	73,1	153,3	254,5	166,2	243,0	248,1	160,8	204,4	165,8	152,7	85,4
Hijos por mujer	2,8	2,3	2,3	2,7	2,6	2,8	2,9	2,2	2,6	2,3	3,5	1,5
Asist. educac. regular ^{4/}	68,1	14,8	70,9	73,5	60,6	63,2	65,0	57,2	54,1	55,0	35,3	44,9
Escolaridad prom. ^{5/}	7,6	8,1	8,1	7,8	7,3	7,5	6,9	7,8	7,1	7,0	7,1	8,9
Limón												
Total de hogares	111 444	12 035	45 376	15 251	11 174	6 569	3 317	1 503	817	241	14 438	723
Total de personas ^{2/}	384 432	24 070	186 155	45 826	59 400	30 986	8 653	6 905	5 302	1 014	14 438	1 683
Promedio de ocupantes	3,4	2,0	4,1	3,0	5,3	4,7	2,6	4,6	6,5	4,2	1,0	2,3
Ocupados por hogar	1,2	1,0	1,3	0,9	1,7	1,3	1,0	1,6	2,1	2,0	0,6	1,5
Relac. depend. demog. ^{3/}	55,0	21,1	59,2	66,0	56,0	64,7	45,1	50,4	57,3	33,8	36,0	18,8
Relac. depend. econ. ^{3/}	183,7	100,8	197,1	230,5	203,3	234,3	150,3	170,6	190,9	97,9	66,1	53,9
Hijos por mujer	2,4	2,3	2,2	2,6	2,7	2,7	3,2	2,1	2,4	2,5	3,4	1,8
Asist. educac. regular ^{4/}	64,2	19,8	68,5	71,0	58,7	61,5	51,6	60,0	51,8	41,3	26,5	33,5
Escolaridad prom. ^{5/}	7,3	7,1	7,6	7,7	6,9	7,4	6,9	7,1	6,7	6,5	6,7	7,7