

**ESTUDIO HIDROLÓGICO Y GEOTÉCNICO APLICADO AL FENÓMENO DE  
EROSIÓN DE ORILLAS EN RÍOS**

**YENNIFER PATRICIA LLANOS ORTIZ**

**MARIA ALEJANDRA ORTIZ ORTIZ**



**UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BARRANQUILLA  
2019**

**ESTUDIO HIDROLÓGICO Y GEOTÉCNICO APLICADO AL FENÓMENO DE  
EROSIÓN DE ORILLAS EN RÍOS**

**YENNIFER PATRICIA LLANOS ORTIZ**

**MARIA ALEJANDRA ORTIZ ORTIZ**

**PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN PRESENTADO COMO REQUISITO  
PARCIAL PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO(A) CIVIL**

**ING. NAIRO TARAZONA BUITRAGO**

**ING. GUILLERMO ACUÑA ROBLES**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BARRANQUILLA  
2019**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

---

Presidente de Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Barranquilla, \_\_\_\_\_ 2019

**Dedicatoria**

A mi mamá, Yesenia E. Ortiz, por su amor y devoción, su apoyo ilimitado e incondicional, por tener siempre la fortaleza de salir adelante sin importar los obstáculos, por formarme como una mujer de bien y creer en mí. No hay palabras suficientes en este mundo para agradecerte. Te amo.

Maria Alejandra Ortiz.

**Dedicatoria**

A mi mamá, Sugey Ortiz, por su entrega y su esfuerzo para hacer de mí una mujer útil en la sociedad, por trabajar cada día con esmero y sin cansancio para darnos lo mejor a mí y a mi familia, por su apoyo incondicional y su ejemplo de amor a Dios. Agradezco tanto a Dios por escogerte como mi mamá, no pudo hacer mejor elección. Te amo infinitamente.

Yennifer Llanos Ortiz.

### **Agradecimientos**

A **DIOS**, por su amor, por darme fuerzas día a día para lograr tan anhelada meta y la brindarme sabiduría para enfrentar las situaciones difíciles de la vida.

A mis **PADRES Y HERMANOS**, por ser mi ejemplo, por sus consejos, esfuerzos y apoyo durante mi carrera, por impulsarme a ser mejor.

A mis **AMIGOS**, por compartir conmigo dentro y fuera de las aulas de clases durante este tiempo y brindarme su amistad.

A mis **PROFESORES**, por darme sus conocimientos con la mejor disposición, por hacer de mí una mejor persona con sus ejemplos de vida y una profesional integra con su pedagogía.

A mi **TUTOR y COTUTOR**, por su acompañamiento, confianza y supervisión para elaborar este proyecto de la mejor manera, por sus correcciones y toda la ayuda brindada.

A **ANEICUC y ANEIC COLOMBIA**, porque a través de ustedes pude complementar mis estudios, forjar nuevas amistades, crecer, conocer nuevas personas dentro y fuera de la ciudad, viajar y adquirir nuevas habilidades y experiencias.

A mi **FAMILIA**, porque de alguna u otra forma me demostraron su apoyo y su orgullo.

A **TI**, por tu paciencia y dedicación, por apoyarme durante este proceso. Gracias por estar ahí.

Maria Alejandra Ortiz.

### Agradecimientos

A **DIOS**, por su amor eterno y fidelidad, porque aún desde el vientre de mi madre me formó y estableció para mí un propósito eterno y porque todo lo que tengo y lo que soy se lo debo a Él.

A mis **PADRES**, por su gran amor y ejemplo, por ser un instrumento de Dios para guiarme, apoyarme y animarme durante mi carrera y por enseñarme el amor de Dios.

A mi **HERMANO**, por su amor y su apoyo, por animarme a salir adelante siempre y no desistir en el camino.

A mi **TIO RODOLFO ORTIZ**, por su amor, por ser un gran ejemplo de vida para mí y por siempre apoyarme en todo lo que necesité.

A toda mi **FAMILIA**, por su confianza en mí, por sus bellos deseos para mi vida y por su apoyo incondicional.

A mis **AMIGOS**, por cada sonrisa y cada lagrima que hemos compartido, por su apoyo incondicional en todo momento y por su hermosa amistad.

A mis **PROFESORES**, por entregar lo mejor de ellos en cada clase, por compartir no solo los conocimientos sino también sus experiencias de vida, porque través de cada una de ellas me enseñaron a ser mejor persona y a visionarme como una gran profesional.

A mi **TUTOR y COTUTOR**, por su acompañamiento y constancia en todo este proceso, por sus consejos para hacer de este un excelente proyecto de grado.

A la **UNIVERSIDAD DE LA COSTA**, por ser fuente de empleo para mi madre y por brindarme la oportunidad de cumplir tan anhelada meta.

Yennifer Llanos Ortiz.

### **Resumen**

En el presente trabajo de grado se realizó un estudio hidrológico comprendido entre un análisis estadístico de máximos y mínimos pertenecientes a las estaciones limnométricas de las Flores y San Jacinto, proyectando los niveles a las secciones de estudio y determinando su comportamiento hidráulico, y un estudio geotécnico de las secciones que tuvo en cuenta datos del Fondo de Adaptación como la estratigrafía y los parámetros del suelo, con el fin de determinar cómo fallaría el talud mediante la correlación de su factor de seguridad. Para el desarrollo de la presente investigación se tomaron dos secciones transversales del río Cauca en la región de la Mojana, específicamente entre los municipios de Nechí y San Jacinto de Cauca, lo que determinó una alta probabilidad de desbordamiento en toda la sección y en caso de presentarse un aumento considerable en el nivel del agua en el talud de la banca izquierda se vería afectado en cuanto a su estabilidad.

***Palabras clave:*** Erosión, Máximos, mínimos, comportamiento hidráulico, talud, factor de seguridad



**Abstract**

In this document a hydrological study was carried out between a statistical analysis of maximum and minimum belonging to the limnimetric stations of Las Flores and San Jacinto, projecting the levels to the study sections and determining their hydraulic behavior, and a geotechnical study of the sections using data from the Adaptation Fund such as stratigraphy and soil parameters, in order to determine how the slope would fail by correlating its safety factor. For the development of the present investigation, two cross sections of the Cauca river were taken in the mojana region, specifically between the municipalities of Nechí and San Jacinto de Cauca, which determined a high probability of overflow in the whole section and in case of If there is a considerable increase in the level of water in the slope of the left bank, it would be affected in terms of its stability.

**Keywords:** Erosion, Maximum, minimum, hydraulic behavior, slope, safety factor

## Tabla de Contenido

Lista de tablas y figuras.....	12
Introducción .....	16
1. Planteamiento del Problema .....	17
2. Objetivos.....	18
2.1. Objetivo General .....	18
2.2. Objetivos Específicos.....	18
3. Marco Teórico.....	19
3.1. Erosión Hídrica. ....	19
3.2. Erosión en Ríos .....	20
3.2.1. Estabilización de Ríos.....	20
3.2.2. Estabilización de Orillas del Rio.....	20
3.2.3. Falla de Orilla .....	21
3.2.4. Factores que Influyen en la Estabilización de Orillas.....	23
3.3. Reducción De Taludes Y Drenaje Subsuperficial.....	25
3.4. Métodos de Calculo.....	27
<i>Nota: Adaptado por Y. llanos y M. A. Ortiz.....</i>	<i>31</i>
3.5. Periodo de Retorno.....	31
3.6. Máximos y Mínimos .....	32
4. Estado del Arte.....	32

5. Metodología .....	37
5.1. Modelo Digital de Elevaciones .....	37
5.2. Estudio Hidrológico .....	41
5.3. Estudio Geotécnico .....	41
6. Análisis y Resultados .....	43
6.1. Análisis Hidrológico .....	43
6.1.1. Análisis de Máximos.....	48
6.1.2. Análisis de Mínimos .....	53
6.1.3. Interpolación de Niveles .....	57
6.1.4. Evaluación Hidráulica.....	64
6.1.5. Evaluación del Potencial Erosivo. ....	68
6.2. Análisis Geotécnico.....	70
7. Conclusiones.....	82
Referencias.....	84

**Lista de tablas y figuras****Tablas**

Tabla 1. Métodos de cálculo para erosión de orillas.....	31
Tabla 2. Parámetros del suelo. ....	42
Tabla 3. Valor de nivel de referencia de las estaciones o "Cota 0". ....	43
Tabla 4. Histórico de Datos Máximos, Estación Las Flores.....	43
Tabla 5. Histórico de Datos Mínimos, Estación Las Flores. ....	45
Tabla 6. Histórico de Datos Máximos, Estación San Jacinto. ....	47
Tabla 7. Histórico de Datos Mínimos, Estación San Jacinto.....	48
Tabla 8. Probabilidad de Ocurrencia de Eventos máximos, Histórico de las Flores.....	50
Tabla 9. Probabilidad de ocurrencia de eventos máximos, histórico San Jacinto. ....	52
Tabla 10. Probabilidad de Ocurrencia de Eventos mínimos, histórico de las Flores.....	54
Tabla 11. Probabilidad de Ocurrencia de Eventos mínimos, histórico de San Jacinto.....	56
Tabla 12. Datos de interpolación .....	57
Tabla 13. Datos de interpolación .....	62
Tabla 14. Comportamiento hidráulico máximo .....	64
Tabla 15. Comportamiento hidráulico sección #1 .....	66
Tabla 16. Comportamiento hidráulico sección #2.....	67
Tabla 17. Esfuerzo tractivo permisible para los estratos de suelo del estudio.....	69
Tabla 18. Propiedades de suelo para los estratos de la sección 1. ....	70
Tabla 19. Propiedades de suelo para los estratos de la sección 2. ....	70
Tabla 20. Factores de seguridad básicos mínimos directos.....	73
Tabla 21. Criterios de falla.....	72

Tabla 22. Resumen de resultados de factor de seguridad del primer escenario. Sección 1 – izquierda.....	74
Tabla 23. Resumen de resultados de factor de seguridad del primer escenario. Sección 1 - derecha .....	75
Tabla 24 Resumen de resultados de factor de seguridad del primer escenario. Sección 2 - derecha .....	76
Tabla 25 Resumen de resultados de factor de seguridad del primer escenario. Sección 2 - izquierda.....	77
Tabla 26. Resumen de resultados de factor de seguridad del segundo escenario. Sección 1 - izquierda.....	78
Tabla 27. Resumen de resultados de factor de seguridad del segundo escenario. Sección 1 - derecha .....	79
Tabla 28. Resumen de resultados de factor de seguridad del segundo escenario. Sección 2 - izquierda.....	80
Tabla 29. Resumen de resultados de factor de seguridad del segundo escenario. Sección 2 – derecha.....	81

## **Figuras**

Figura 1. Dirección del flujo en la curva de un meandro.....	21
Figura 2. Tipos de fallas de orilla. ....	22
Figura 3. Métodos de estabilización de taludes. ....	26
Figura 4. Métodos de drenaje de riberas. ....	27
Figura 5. Métodos de cálculo para falla de taludes.....	29
Figura 6. Análisis típico de superficie de falla. ....	30
Figura 7. Modelo Digital de Elevaciones (MDE), zona de estudio. ....	38

Figura 8. Secciones delimitadas y escogidas dentro del modelo digital de elevaciones. ....	39
Figura 9. Sección transversal PT-DSJ1-23. ....	40
Figura 10. Sección transversal CPT-DSJ1-24. ....	40
Figura 11. Ubicación de las estaciones limnimetricas del IDEAM. ....	41
Figura 12. Ajuste de probabilidad máximo Las Flores.....	50
Figura 13. frecuencia de niveles máximos, estación las Flores .....	51
Figura 14. Ajuste de probabilidad máximos San Jacinto.....	52
Figura 15. frecuencia de niveles máximos, estación San Jacinto .....	53
Figura 16. Ajuste de probabilidad mínimo Las Flores .....	54
Figura 17. frecuencia de niveles mínimos, estación las Flores. ....	55
Figura 18. Ajuste de probabilidad mínimo San Jacinto.....	55
Figura 19. Frecuencia de niveles mínimos, estación San Jacinto. ....	56
Figura 20. Distancia de interpolación entre estaciones y ubicación de secciones. ....	57
Figura 21. Niveles máximos sección 1 .....	58
Figura 22. Niveles máximos sección 2 .....	59
Figura 23. Análisis histórico de la zona de estudio .....	60
Figura 24. Análisis del modelo digital de elevaciones .....	61
Figura 25. Sección DSJ-23 incluyendo Dique.....	61
Figura 26. Sección DSJ-24 incluyendo Dique.....	62
Figura 27. Niveles mínimos sección 1.....	63
Figura 28. Niveles mínimos sección 2.....	63
Figura 29. Sección 1, máxima capacidad hidráulica.....	65
Figura 30. Sección 2, máxima capacidad hidráulica.....	66

Figura 31. Sección 1- 100 años, mínima capacidad hidráulica.....	67
Figura 32. Sección 2- 100 años, mínima capacidad hidráulica.....	68
Figura 33. Esfuerzo tractivo permisible en función del índice de plasticidad. ....	69
Figura 34. Pendiente aproximada de la sección 1.....	71
Figura 35. Pendiente aproximada de la sección 2.....	72
Figura 36. Escenarios de falla rivera izquierda sección 1.....	74
Figura 37. Escenarios de falla rivera derecha sección 1.....	75
Figura 38. Escenarios de falla rivera derecha sección 2.....	76
Figura 39. Escenarios de falla rivera izquierda sección 2.....	77
Figura 40. Escenarios de falla rivera izquierda sección 1.....	78
Figura 41. Escenarios de falla rivera derecha sección 1.....	79
Figura 42. Escenarios de falla rivera izquierda sección 2.....	80
Figura 43. Escenarios de falla rivera derecha sección 2.....	81

### **Lista de Ecuaciones**

Ecuación 1. Factor de Seguridad en Taludes.....	29
Ecuación 2. Criterio de falla de Mohr-Coulomb. ....	30

### **Introducción**

La erosión hídrica es un fenómeno de degradación del suelo que se presenta debido a la acción del flujo del agua o la caída de partículas de agua, como es el caso de las gotas de lluvia, y consiste en el desprendimiento, transporte y depósito consiguiente de las partículas del suelo, la erosión hídrica se presenta en suelos residuales poco cementados o en suelos aluviales (SUAREZ DIAZ, 1998).

El río Cauca es el segundo río más importante de Colombia, se posiciona como un eje socioeconómico de los 9 departamentos que recorre. En los últimos años, se ha visto afectado debido a procesos de erosión, por lo que se han presentado problemas en cuanto a navegabilidad e impacto ambiental, esto debido a los altos niveles de sedimentos que afloran, además de inundaciones, deslizamientos, sequías entre otros fenómenos ambientales, los cuales generan un alto impacto a la comunidad ribereña. (Carlos, Ricardo, & María, 2006)

En Colombia se han desarrollado normas técnicas para el control de erosión y para la realización de estudios geológicos, geotécnicos e hidrológicos, llevada a cabo por la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) que tienen por objetivo establecer lineamientos y parámetros técnicos que deben tenerse en cuenta en la realización de estudios de erosión para proyectos que estén dentro de la jurisdicción del CDMB; la norma establece que se deben analizar como mínimo la erosión en surcos y cárcavas de las laderas y taludes, la evolución lateral de los cauces en la historia y su proyección a futuro así como la socavación y profundización del cauce de las corrientes (CDMB, 2005).

En el presente trabajo de grado se realizará un análisis de las bancas del río Cauca considerando parámetros geotécnicos e hidráulicos, con una zona de estudio comprendida entre



las estaciones limnimétricas de las Flores y San Jacinto localizadas en la región de la Mojana; para el cumplimiento de los objetivos de este trabajo, se tendrá como base levantamientos del Fondo de Adaptación y se evaluará la condición de las riberas, así como su comportamiento hidráulico a partir de los datos suministrados, todo esto con el fin de comparar los resultados del estudio con el comportamiento real de la zona de estudio.

### **1. Planteamiento del Problema**

La erosión en la ribera de los ríos es un proceso natural, el cual se ve afectado por los efectos del cambio climático y las acciones del hombre como la tala de árboles, los cultivos y las obras de infraestructuras cerca a estas laderas, lo que ha conllevado a desbalances hidrológicos en las cuencas debido a los procesos de fricción y socavación; los sedimentos en el cauce de los ríos generan la pérdida de autorregulación de los estos. En Colombia, los ríos Magdalena, Cauca y Orinoquía son los más afectados por la erosión del suelo.

El arrastre de sedimentos debido a la erosión desencadena amenazas como la inestabilidad de puertos, la pérdida de la navegabilidad, la creación de barras de arena aguas abajo de las cuencas, reduce la pesca, además que estos sedimentos pueden arrastrar residuos de contaminantes; según el Estudio Nacional del agua realizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, en el año 2014, el proceso erosivo de los ríos produce cerca de 340 millones de toneladas de sedimentos cada año.

La erosión trae consigo una serie de problemáticas que afectan los suelos en gran manera, se pierden los nutrientes, la materia orgánica, la retención de humedad, la profundidad de los suelos y además se disminuye su productividad, lo que conlleva a la pobreza, la violación y el desarraigo de la tierra. El área degradada por erosión en Colombia es de 45.377.070 ha (40% de la superficie continental de Colombia), de las cuales el 20% se encuentran en un grado de erosión ligera, el 17% en grado de erosión moderada y el 3% en grado de erosión severa y muy severa según un estudio del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM.

La presente investigación busca encontrar la mejor manera de conjugar la geotecnia y la hidráulica, con el fin de modelar el fenómeno de la erosión, si bien, es un problema que involucra ambas áreas. Para ello, se utilizará la teoría de estabilidad de taludes la cual es muy utilizada en la geotecnia, además, se utilizará el software Google Earth antes y después del fenómeno de erosión en una sección de control, para así definir si la estabilidad de taludes es aplicable o no es aplicable para la determinación de las áreas de erosión en las orillas de los ríos.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo General**

Realizar un análisis de erosión de orillas incorporando los parámetros geotécnicos e hidrológicos, pertenecientes a la cuenca del río Cauca en la región de la Mojana, comparando estos resultados con el comportamiento histórico del río.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Evaluar los parámetros hidrológicos e hidráulicos de las secciones de estudio.

- Evaluar mediante análisis de estabilidad de taludes los procesos de falla en las orillas de la cuenca del Río Cauca en la región de la Mojana.
- Comparar los resultados de erosión con el comportamiento real de las secciones representativas del Río Cauca en la región de la Mojana.

### **3. Marco Teórico**

Esta sección describe y detalla sobre el campo de la modelación en el control de erosión de orillas, en la cual se definirán aspectos generales de la temática, como también los conceptos técnicos que influyen en la erosión y la sedimentación, comprendido en el marco teórico.

#### **3.1. Erosión Hídrica.**

Se define erosión como “el desprendimiento, transporte y deposición de partículas o masas pequeñas de suelo o roca, debido a la acción de las fuerzas generadas por el movimiento del agua” (Díaz, 1998). Se conocen varios tipos de erosión: erosión laminar, erosión en surcos, erosión en cárcavas y erosión por afloramiento de agua.

La erosión laminar, se produce debido al impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo, lo que produce desprendimiento. En la erosión por surcos, el agua de escorrentía fluye y a su paso va desprendiendo partículas de suelo y formando surcos, es decir, forma canales de poca profundidad y paralelos entre sí. En la erosión por cárcavas, los canales van siendo más profundos, el agua desprende y arrastra partículas que pueden generar mayores deslizamientos. La erosión se puede dar en los sitios de afloramiento de agua, formando pequeñas cavernas que pueden a su vez generar el desprendimiento de partículas o masas. (Díaz, 1998).

### **3.2. Erosión en Ríos**

#### **3.2.1. Estabilización de Ríos**

Actualmente, se diseñan diversas estructuras para la estabilización de ríos, con el objetivo de proteger las riberas y prevenir el desprendimiento lateral de canales aluviales a través de la erosión de orillas. Existen muchos métodos para la estabilización de ríos, dichos métodos se pueden clasificar de acuerdo con dos enfoques: fortalecer las orillas y reducir las fuerzas hidrodinámicas (Julien, 2002).

#### **3.2.2. Estabilización de Orillas del Rio**

En un canal aluvial el agua al fluir ejerce fuerzas de arrastre que levantan y desprenden partículas del suelo. Para que esto no se dé, el suelo debe ejercer una fuerza límite que resista las fuerzas erosivas que aplica el movimiento del agua. Estas fuerzas de resistencia varían de acuerdo a ciertas propiedades del material, dentro de estas propiedades tenemos: tamaño del grano, la distribución del tamaño y la naturaleza de la unión electroquímica que puede existir entre las partículas (ASCE Task Committee on Hydraulics, Bank Mechanics, and Modeling of River Width Adjustment, 2008).

En un meandro las fuerzas hidrodinámicas inducen flujo secundario, en el cual, la línea de corriente de superficie libre es desviada hacia la orilla exterior o cóncava y la línea de corriente cerca del lecho es desviada hacia la orilla interior o convexa (Ver figura 1). Como consecuencia a esto, la socavación en la punta de la orilla exterior desplaza el cauce hacia el exterior de la curva del río y causa una subida de la orilla exterior. El aumento de esta subida del material de la orilla exterior provoca una falla de orilla. (Julien, 2002)

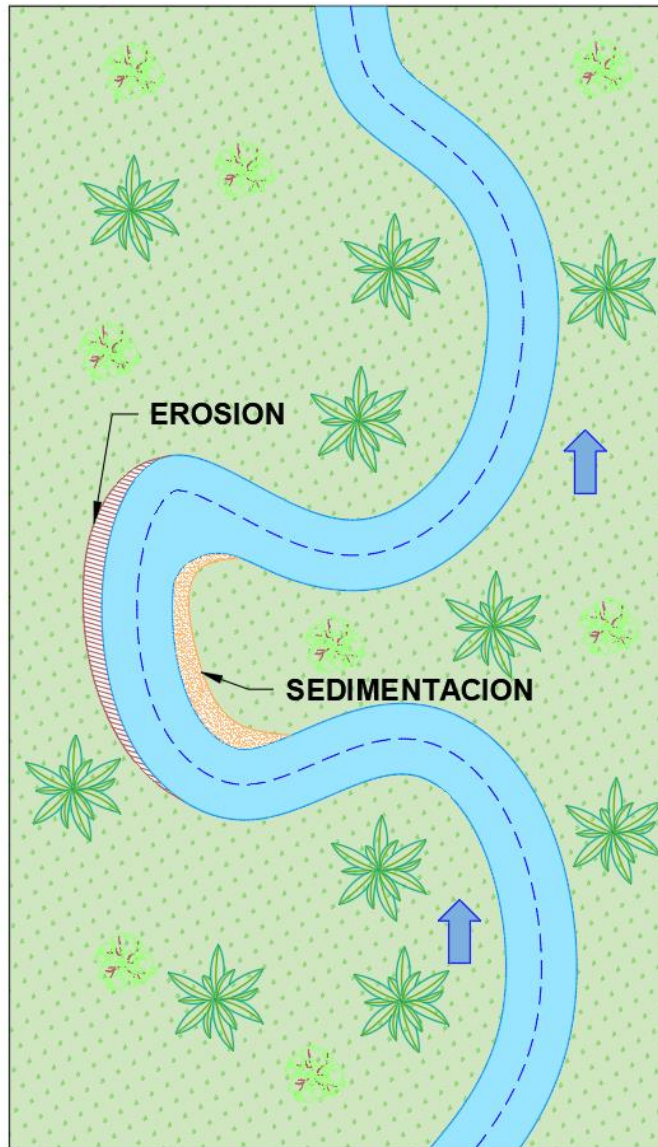


Figura 1. Dirección del flujo en la curva de un meandro.

Nota: Elaborado por Y. Ilanos y M. A. Ortiz

### 3.2.3. Falla de Orilla

Se conocen tres tipos de falla de orilla en los ríos aluviales (ver figura 2) que se distinguen dependiendo el tipo del material de la orilla, ya sea, cohesivo, no cohesivo o estratificado (Julien, 2002).

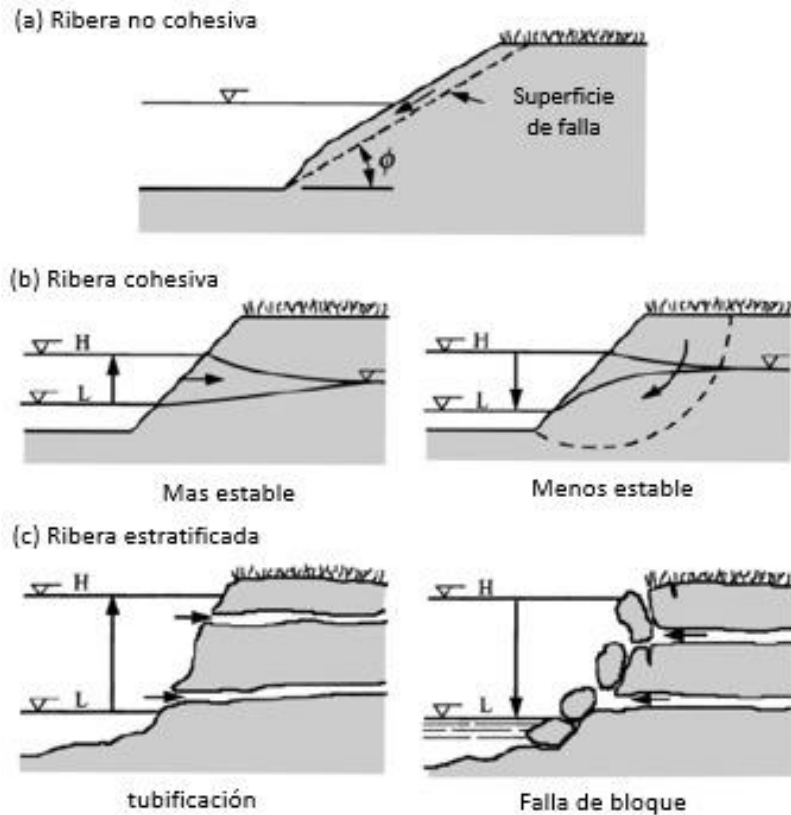


Figura 2. Tipos de fallas de orilla.

Nota: Adaptado por Y. Ilanos y M. A. Ortiz de (Julien, 2002)

En el tipo de material no-cohesivo, inmediatamente el ángulo de la orilla sobrepasa el ángulo de reposo del material, la degradación de material en la punta del margen exterior induce al deslizamiento del material granular como se observa en la figura 2a. Cuando se trata de material cohesivo (Ver figura 2b), las fuerzas de tensión aumentan la posibilidad de erosión de la orilla y la falla rotacional es característica. Cuando la corriente aluvial fluye en suelo estratificado, se moviliza el material no-cohesivo inferior, de tal manera que el material cohesivo superpuesto queda sin soporte y sujeto a grietas de tensión y falla en voladizo (ver figura 2c). (Julien, 2002).

En una serie de investigaciones realizadas, en donde se estudió la estabilidad de orillas en materiales cohesivos, se obtuvo como resultado que las tasas de erosión para las orillas de

materiales cohesivos son generalmente más bajas que las de los materiales no cohesivos (ASCE Task Committee on Hydraulics, Bank Mechanics, and Modeling of River Width Adjustment, 2008)

#### **3.2.4. Factores que Influyen en la Estabilización de Orillas**

Dentro de los factores que influyen en la erosión de orillas en canales aluviales, encontramos parámetros hidráulicos que controlan las fuerzas activas tales como la magnitud y duración de la descarga, la velocidad y la magnitud y la orientación del esfuerzo cortante aplicado; otras fuerzas activas que pueden contribuir a la erosión de orillas se deben a filtraciones, tuberías, ondas de superficie y hielo. Por otro lado, las fuerzas pasivas están relacionadas con el tamaño del material de orillas, la gradación y la cohesión. Otros factores que afectan perjudicialmente la estabilidad de la orilla son las actividades provocadas artificialmente, dentro de ellas encontramos el drenaje, la urbanización, la agricultura, la navegación comercial, el desarrollo de las llanuras de inundación y las fluctuaciones del nivel del agua derivadas de la generación de energía hidroeléctrica. La vegetación, siendo un factor biológico también desempeña un papel estabilizador significativo (Julien, 2002).

Durante las inundaciones, se presentan cambios significativos en la geometría del canal. También, la capacidad de transporte de sedimento es mucho mayor durante este fenómeno que cuando se tienen caudales intermedios o bajos y es en los tiempos de inundación en donde se presentan la mayoría de los casos de inestabilidad de ribera (Julien, 2002).

Las fuerzas activas anteriormente mencionadas, están involucradas al fenómeno de deslizamiento de tierras. Este fenómeno se refiere al movimiento hacia debajo de la tierra y de materiales orgánicos, lo podemos observar en el tipo de falla representado en la figura 2b. La

fuerza cortante que ejercen los materiales del suelo, la vegetación a través de la fuerza de la raíz o las actividades humanas de refuerzo de taludes, están para resistir dichas fuerzas activas. Es necesario agregar un conjunto de fuerzas adicional cuando una pendiente es influenciada por una corriente o río, fuerzas relacionadas con la eliminación de material del pie de la pendiente, las fluctuaciones en los niveles de agua subterránea y la vibración de la pendiente. Es importante resaltar que, si se elimina material del pie de la pendiente, se pierde resistencia por acercamiento y el pie de la pendiente presenta falla. Es por esto, que el material de la pendiente tiende a moverse descendiente al vacío para equilibrar fuerzas (Julien, 2002).

La estabilidad de las orillas se ve afectada de varias maneras debido a la presencia de agua en las riberas de los ríos y a su movimiento hacia o desde el río. El flujo de entrada desestabiliza la ribera del río mientras que la salida de agua del río hacia orillas vecinas lo estabiliza (Julien, 2002).

Otro fenómeno común a los bancos aluviales de los ríos es la tubificación, en los suelos estratificados se induce el flujo en capas más permeables debido a los cambios que sufre el río y al olaje producido por el viento y los barcos navegantes. Si el flujo a través de las capas permeables desaloja y transporta partículas finas el material se elimina poco a poco, de manera que socava parte del banco. Al no tener este material de cimentación para soportar las capas sobrepuestas cierta cantidad de material del banco cae y se generan grietas de tensión. Como consecuencia, estas grietas permiten la entrada de flujos superficiales, lo que reduce aún más la estabilidad del material afectado (Julien, 2002).

Una forma alternativa de erosión de orillas es el desgaste de masas. Al saturarse y estar socavado el banco debido al flujo de agua, los bloques del banco pueden colapsar y deslizarse en



el canal. La construcción de viviendas en las riberas de los ríos, a la operación de equipos sobre la llanura de inundación de la vegetación, la saturación de los bancos y la infiltración en la llanura de inundación puede afectar el proceso de erosión, causando que dicho fenómeno pueda verse agravado. (Julien, 2002)

### **3.3. Reducción De Taludes Y Drenaje Subsuperficial**

“El peso del suelo en la punta del talud contrarresta el peso del suelo en la parte superior del mismo y ayuda a la resistencia al corte del suelo contra la falla” (Julien, 2002).

Existen diversos métodos para la estabilización de taludes, en la figura 3a se observa, el método de reducción directa de la pendiente, el cual consiste en eliminar suelo de la pendiente para nivelar su ángulo, este método se usa preferiblemente cuando hay suficiente espacio disponible en la llanura de inundación; en algunos casos en donde sucede lo contrario, se puede nivelar la pendiente usando material de relleno, como se muestra en la figura 3b o mediante operaciones de corte y relleno, como se muestra en la figura 3c. Otro método de estabilización de taludes es el terraceo o escalonado, el cual difiere del método anteriormente mencionado solo en la forma final de la sección de pendiente. El método produce un banco o una serie de secciones escalonadas, como se muestra en la figura 3d (Julien, 2002).

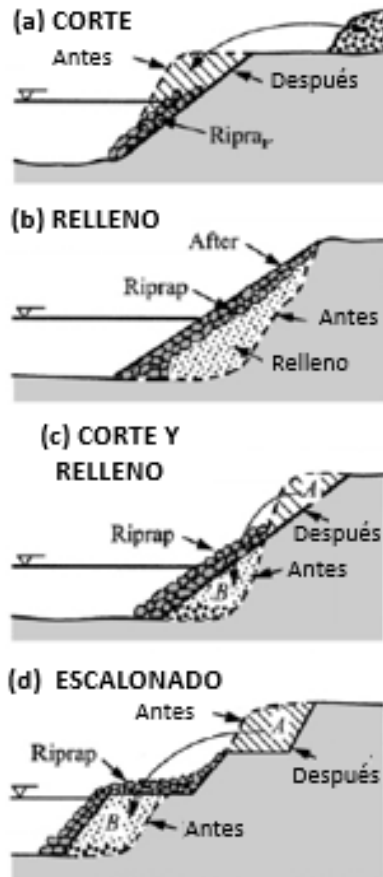


Figura 3. Métodos de estabilización de taludes.

Nota: (Julien, 2002) Adaptado por Y. Ilanos y M. A. Ortiz

“El control del agua subterránea dentro de un talud es a menudo un medio factible de estabilizarlo” (Julien, 2002).

Mediante la prevención de la infiltración de agua de la superficie en los suelos, y la provisión de drenaje subterráneo para eliminar el agua de la masa de suelo se puede lograr un control de aguas subterráneas. Estos, son dos métodos usados para un drenaje subsuperficial (Julien, 2002).

El primer método, normalmente se logra solo proporcionando un drenaje superficial óptimo. El segundo método si usa varias técnicas de drenaje subsuperficial, los drenajes subsuperficiales suelen ser más efectivos cuando solo es necesario eliminar una pequeña cantidad de agua para que se vea afectada la estabilización. Se conocen drenajes horizontales y

verticales (ver figura 4), dentro de los verticales encontramos un acuífero confinado delgado, este puede ser interceptado para reducir la presión artésiana. Los drenajes verticales pueden utilizarse en la estabilización de la ribera, como se representa en la figura 4b. Por otro lado, dentro de los drenajes horizontales tenemos un tubo ranurado que se usa para eliminar el exceso de agua de taludes de corte que presentan problemas de estabilidad. La estabilización de taludes de corte de carreteras con frecuencia implica el uso de una combinación de sistemas de ambos sistemas de drenaje (Julien, 2002).

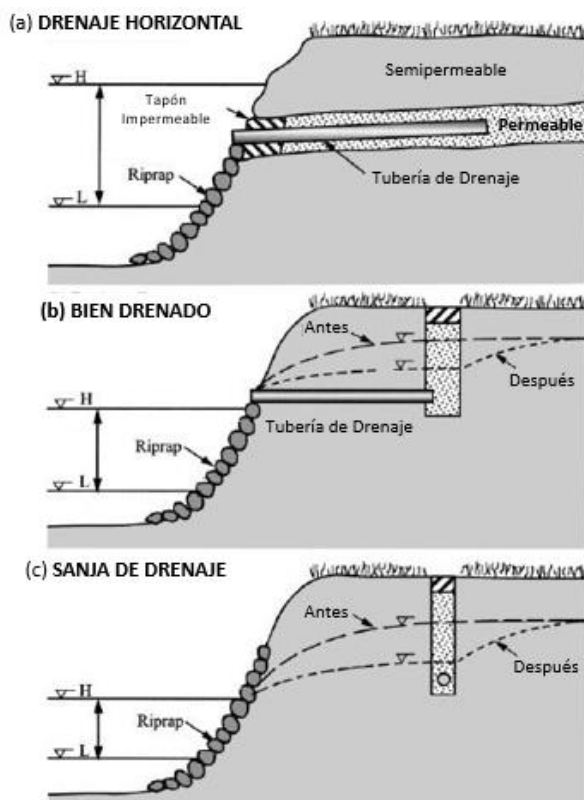


Figura 4. Métodos de drenaje de riberas.

Nota: (Julien, 2002), Adaptado por Y. Ilanos y M. A. Ortiz

### 3.4. Métodos de Calculo

Mediante el análisis de datos son generadas ecuaciones con el fin de predecir la erosión a futuro, determinar las mejores prácticas de manejo o seleccionar el método más conveniente para controlar la pérdida de suelo.

Para la determinación de un modelo de erosión de ríos es necesario delimitar y estudiar un área a profundidad, además de evaluar los factores y variables que mayor impacto tienen sobre el fenómeno en cuestión. Posteriormente se desarrollan ecuaciones multivariantes y se selecciona la mejor relación entre los factores que afectan la erosión y la cantidad estimada de suelo perdido. Si las predicciones son lo suficientemente exactas, el modelo puede utilizarse en otros sitios que cuenten con condiciones similares (Morgan, 2009). Por definición, los modelos son representaciones simplificadas de la realidad. Dependiendo de la exactitud deseada, los modelos pueden ser muy simples o complejos.

La estabilidad de las bancas del río juegan un papel determinante en la generación de un modelo de erosión, para evaluar la estabilidad se asume que la geometría general de la banca del río es similar a un talud, dando lugar a la utilización de los métodos de análisis de estabilidad desarrollados para los taludes.

Los taludes generalmente tienen un plano de falla circular o parabólico cuyo radio de acción está relacionado con las propiedades del material del talud, sus dimensiones y la presencia de flujo de agua, además de factores particulares que se dan para cada caso de estudio, como lo es la presencia de cargas dinámicas debido a sismos que puedan desestabilizar el talud. Para determinar la estabilidad de un talud se calcula un factor de seguridad (FS) que determina el factor de amenaza de que el talud colapse bajo el peor escenario posible al cual se diseña, el parámetro fue introducido por Fellenius y se expresa como la relación entre la resistencia al cortante real de la estructura del talud y los esfuerzos de corte críticos que son evaluados en el talud.

$$\text{Factor de Seguridad (FS)} = \frac{\text{Resistencia al corte}}{\text{Esfuerzo al cortante}}$$

Ecuación 1. Factor de Seguridad en Taludes.

Nota: (Suarez Diaz, 1998), Adaptado por Y. llanos y M. A. Ortiz

Se han desarrollado una serie de metodologías de cálculo que permiten definir el factor de seguridad del talud de estudio, la siguiente figura resume las metodologías más comunes usadas en la práctica.

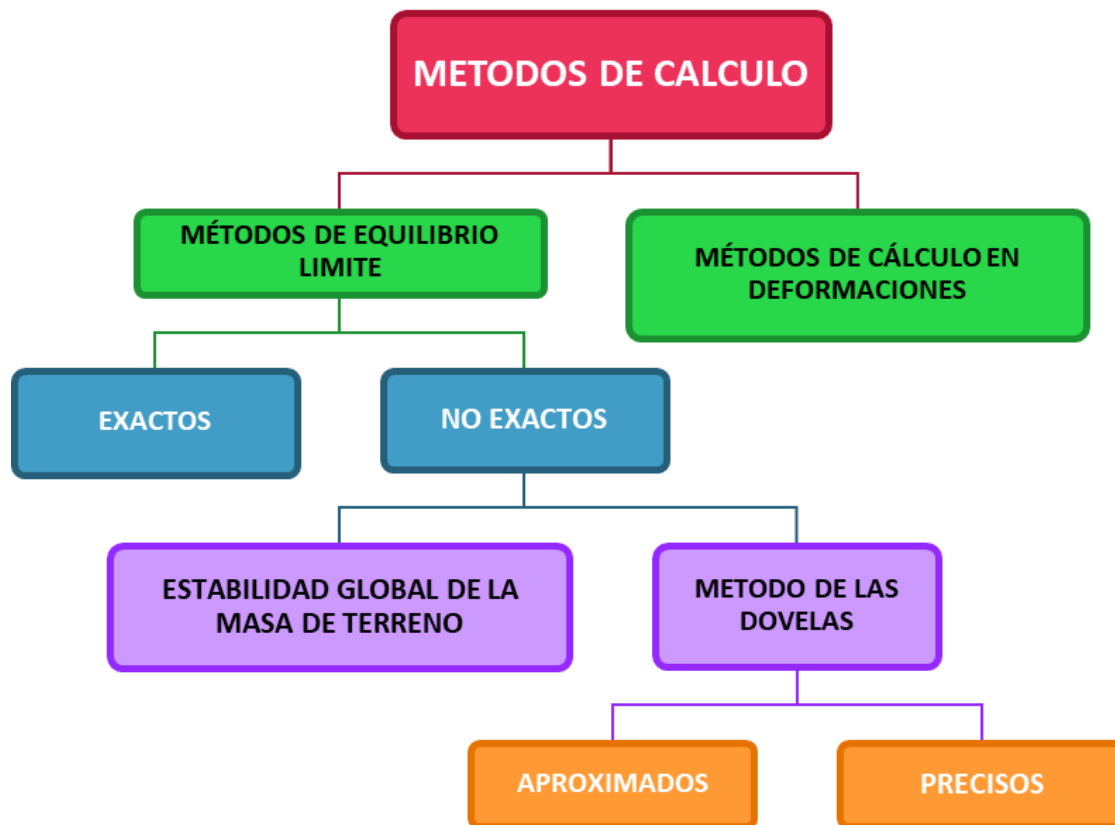


Figura 5. Métodos de cálculo para falla de taludes

Nota: Elaborado por Y. llanos y M. A. Ortiz

Para el análisis se divide la superficie de falla en secciones mucho menores denominadas dovelas y se calculan sus fuerzas actuantes y resistentes determinando un factor de seguridad (FS) al final del cálculo (Suarez Diaz, 1998).

Los metodos comunmente utilizados son los metodos de equilibrio limite que suponen que las fuerzas actuantes y resistentes de una superficie de falla cumplen con un equilibrio estático, satisfaciendo el criterio de mohr-coulomb que se muestra a continuacion:

$$\tau = c + \sigma_n \tan\phi$$

Ecuación 2. Criterio de falla de Mohr-Coulomb.

Nota: (Suarez Diaz, 1998), Adaptado por Y. Ilanos y M. A. Ortiz

Donde:

$c$  : Es la cohesion del material del suelo.

$\phi$  : Es el angulo de fricciòn interna.

$\tau$  : Es la tension cortante que actua en el plano de rotura.

$\sigma_n$  : Es la tension normal que actua en el plano de rotura.

La Figura 6 esquematiza el proceso típico de división de la superficie de falla de un talud en dovelas, en el cual no existe límite de división de la superficie de falla:

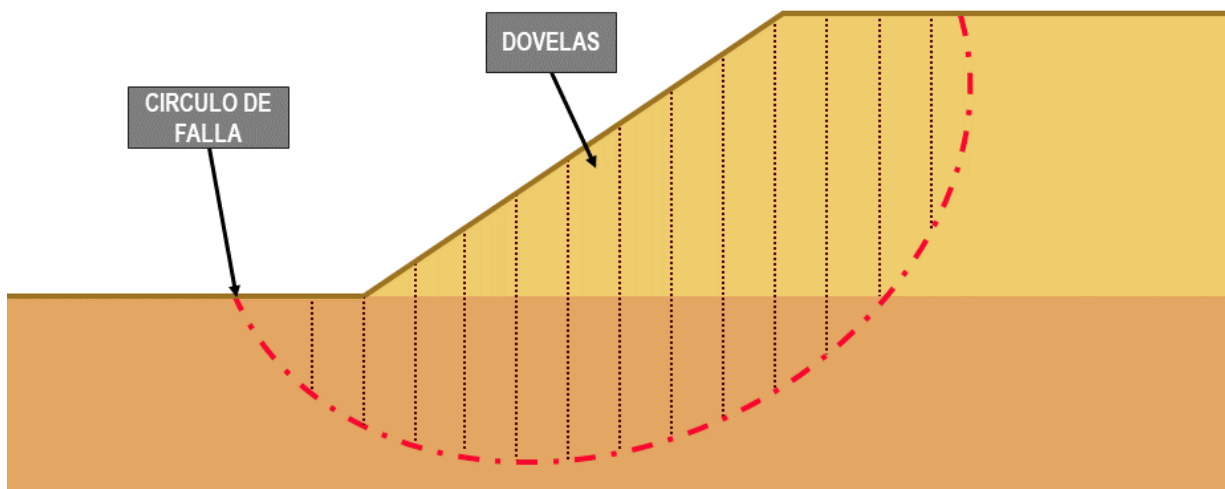


Figura 6. Análisis típico de superficie de falla.

Nota: Elaborado por Y. Ilanos y M. A. Ortiz

Dentro de la metodología de las dovelas existe una clasificación de las diferentes aproximaciones matemáticas, esta clasificación está basada en la precisión de los resultados del

factor de seguridad (FS) teniendo en cuenta las consideraciones que tiene cada metodología de cálculo, a continuación, se presentan los métodos más usados en la práctica.

Tabla 1.  
*Métodos de cálculo para erosión de orillas.*

<b>Metodología</b>	<b>Año</b>	<b>Tipo</b>	<b>Observaciones</b>
Bishop Simplificado	1955	Aproximado	Asume que no existen fuerzas cortantes entre dovelas. La solución no satisface condiciones de equilibrio para las dovelas sobrestimando los resultados.
Janbu Simplificado	1973	Aproximado	Asume que no existe fuerza cortante entre dovelas. Considera un factor de corrección para disminuir la sobrestimación de los resultados.
Spencer	1967	Preciso	Satisface las condiciones de equilibrio estático para cada dovela asumiendo laterales tienen la misma inclinación pero son desconocidas. Sus resultados son muy precisos.
Morgenstern y Price	1965	Preciso	Asume una función que relaciona las fuerzas cortantes y normales como una variable en cada dovela. El método satisface las condiciones de equilibrio estático. Sus resultados son muy precisos.

*Nota: Adaptado por Y. Ilanos y M. A. Ortiz*

### **3.5. Periodo de Retorno.**

El periodo de retorno se determina mediante el ajuste de datos medidos en diferentes distribuciones de probabilidad con base en valores extremos.

El periodo de retorno se refiere a la probabilidad en la que ocurrirá un fenómeno de cierta magnitud al menos una vez en un espacio de tiempo (Departamento Nacional De Infra-Estructura De Transportes De Brasil, 2005)

Es calculada como el inverso de la probabilidad, teniendo entonces que, para un periodo de retorno de 100 años de un evento máximo, se tenga una probabilidad de 1/100 o 1% de que se presente el evento en un año cualquiera de ese periodo.

### **3.6. Máximos y Mínimos**

Los máximos y mínimos se refieren a los valores de nivel o lluvia medidos en una estación limnimétrica o pluviométrica, estos datos máximos y mínimos pueden ser determinados cada hora, día, mes o año dependiendo el detalle del estudio y de la facilidad de datos.

## **4. Estado del Arte**

La erosión en ríos y su predicción son temas importantes que en la actualidad han sido estudiados en distintas formas, aplicaciones y métodos. Las inundaciones, deslizamientos, el colapso de riberas, entre otros fenómenos, derivan de este tópico. Muchos investigadores se han centrado en estudiar este tema ya que afecta de manera significativa a la población aledaña a los ríos.

En el año 2008 en Argentina y Estados Unidos, se hicieron investigaciones presentando el proceso de erosión en ríos como tema central, se estudió el tema de manera conceptual y se dio un criterio teórico en la contextualización del proceso de erosión de orillas en ríos, teniendo en cuenta algunos factores de gran influencia en el fenómeno. La primera investigación realizada en Argentina se basó en un principio de optimización de la tasa de disipación de energía del flujo en la instancia de máxima erosión; a través de una elaboración teórica, se encontró la relación general entre algunos factores, tales como, la profundidad de equilibrio, caudal unitario y tamaño del sedimento. (Farias, Pilán, Olmos, & Pece, 2008). Otra investigación tuvo lugar en Estados Unidos, en ella los autores desarrollaron un marco conceptual para las alternativas que abordan los problemas de erosión de orillas. Dentro de dichas alternativas se conservaron los vínculos ribereños a escalas temporales y espaciales apropiadas, se consideraron



las relaciones integrales entre los procesos físicos del banco y las funciones ecológicas, evitando también los efectos secundarios y acumulativos que conducen a la canalización progresiva de los ríos. (Florsheim, Mount, & Chin, 2008).

Existen muchos factores que influyen de una u otra manera en la erosión de orillas, dentro de estos factores encontramos la vegetación, el caudal del río, el ángulo de la pendiente, el clima, entre otros. Muchos investigadores, teniendo en cuenta antecedentes de colapso de la ribera en algunos ríos importantes han dedicado su estudio en profundizar y definir el papel de dichos factores en este fenómeno de la erosión. El río Murray, ubicado en el sur de Australia, fue la zona de estudio de una investigación realizada en el año 2014. La orilla del río Murray colapsó, arrastrando consigo vehículos desocupados y varios árboles. Los autores, realizaron un estudio con el fin de modelar el incidente del colapso de la orilla del río antes mencionado; examinar la influencia y la sensibilidad de las fluctuaciones del nivel del río y los factores climáticos en la estabilidad de la ribera; y determinar los factores desencadenantes dominantes que afectaron el colapso. Utilizando una integración del método de equilibrio límite, modelo de flujo transitorio insaturado y modelo de elevación digital e imágenes aéreas de alta resolución de un SIG se realizó el análisis de estabilidad de la ribera. Se obtuvo como resultado que el factor predominante en el colapso de la ribera del río fue la fluctuación del río más que la influencia climática (Liang, Jaksá, & B. Onstendorf, 2014)

De igual manera, en Australia para el año 2017 se investigó la relación empírica entre algunas variables y la erosión observada en la parte alta de la orilla del río Brisbane, a lo largo de 78 km del río. La curvatura, la potencia de flujo específico (medida de la capacidad de un río para realizar cambios geomorfológicos del cauce), la vegetación ribereña y, en algunos casos, la extracción de arena y grava fueron las variables tenidas en cuenta en la investigación, la relación

empírica se determinó utilizando un modelo de regresión de mínimos cuadrados generalizados. Dentro de los resultados obtenidos, no se encontró una relación significativa entre la curvatura, el poder de corriente específico y la erosión de la ribera; y se observó que el papel de la vegetación de ribera en relación con el suministro de sedimentos de la erosión de la ribera varió con la ubicación espacial, la susceptibilidad de un alcance a la erosión y la perturbación humana, como la extracción de arena y grava. (McMahon, y otros, 2017).

Por otra parte, a través de modelo físico, se estudió la influencia de tres factores en la estabilidad de la ribera debido a la caída del nivel del agua del río. Estos factores fueron, la velocidad de extracción del nivel del río, la elevación inicial del agua y el ángulo de la pendiente del río. Utilizando datos experimentales obtenidos en estudio y datos de campo de la cuenca Hotophia Creek en los Estados Unidos y el río Sieve en Italia se presentó un modelo de análisis de estabilidad de ribera que incorporó el efecto integral de todas las fuerzas que actúan sobre el plano de falla y la grieta de tensión. Para una óptima simulación de estabilidad de ribera, se examinaron y modificaron dos fórmulas empíricas, para así estimar la ubicación de la grieta por tensión y el ángulo del plano de falla. Se realizó una comparación de los resultados de la simulación del modelo considerando y no considerando la grieta de tensión, de lo cual se concluyó, la importancia y la necesidad de incluir la grieta de tensión para lograr una buena precisión en las simulaciones de estabilidad de la ribera. (Chen, Hseh, & Yang, 2017)

Investigar los procesos de erosión de los suelos afectados por la congelación-descongelación causados por el flujo concentrado de nieve y agua de deshielo de los glaciares puede ser un desafío. Debido a una alta tasa de erosión de orillas del río Rojo en Winnipeng, Canadá y a la preocupación que este fenómeno generó en la población durante 20 años se realizó un estudio con el objetivo de cuantificar la erosión fluvial a través de un alcance de 10 km del río. Este

estudio, incluyó mediciones de campo, pruebas experimentales y modelos numéricos para alcanzar su objetivo. Además, se empleó un método simple utilizando modelos numéricos hidrodinámicos para definir las tensiones de corte aplicadas en las riberas de los ríos en función del nivel del agua del río. Un modelo numérico llamado TEMP / W se usó para definir la profundidad de las heladas estacionales para estimar los efectos de congelación-descongelación en la zona de estudio. Los resultados obtenidos demostraron que los procesos estacionales de congelación-descongelación pueden reducir gravemente el esfuerzo cortante crítico y aumentar la erosionabilidad de las riberas de los ríos. (Navid Kimiaghalam, Masand Goharrokhi, Shawn P. Clark, Habib Ahmari, 2015)

En china, se llevaron a cabo experimentos de laboratorio para evaluar los efectos del gradiente de pendiente y la velocidad de flujo en la erosión del suelo por flujo concentrado de agua de fusión sobre superficies de suelo descongelados y no congeladas. Los canales se llenaron con los materiales del suelo limoso-arenoso recogidos de un delta de cuencas formadas por sedimentos depositados antes de ser saturados y almacenados en un congelador para congelar el suelo. Después de que el suelo estaba completamente congelado, los canales fueron sacados del congelador y colocados en la sala experimental para descongelar el suelo por un período de longitud suficiente hasta que todos los materiales del suelo se descongelaron. Las concentraciones de sedimentos se correlacionaron positivamente con el índice de flujo y el gradiente de la pendiente. Sin embargo, el efecto del caudal sobre la concentración de sedimentos no fue tan significativo como el del gradiente de la pendiente. El efecto del índice de flujo en la concentración de sedimentos disminuyó con el aumento en el gradiente de la pendiente, mientras que las concentraciones máximas de sedimentos en el flujo de agua sobre las

laderas descongeladas fueron más altas que en las laderas que no fueron congeladas. (Y. Y. Ban, T. W. Lei, Z. Q. Liu, C. Chen, 2016)

La erosión termo-erosional del banco del río es causada por la acción combinada de la erosión térmica y mecánica del permafrost por ríos árticos mientras que el sedimento superpuesto soporta el colapso temporalmente. En el noreste de Groenlandia en el verano de 2015, se descubrió un gran túnel termo-erosional que se formó en las orillas de una corriente de agua de deshielo. El túnel se observó durante ocho días, período durante el cual el túnel permaneció abierto pero la caída del lado del banco aumentó. La carga de solutos de corriente aumentó inmediatamente aguas abajo y se mantuvo a 800 m del túnel. Este estudio proporcionó una visión poco común de un evento extremo que afecta el permafrost, la geomorfología local y el hábitat del río. Con el cambio climático acelerado en las regiones árticas, se predijo un aumento de la degradación del permafrost y una temperatura más cálida del agua de la corriente, mejorando así el potencial para el desarrollo de nichos termo erosionales y el colapso de orilla de los ríos. (Docherty, Hannah, Riis, Milher, & Leth, 2017)

## **5. Metodología**

La metodología de estudio se dividió en tres fases, la primera consta de la selección de las secciones y los perfiles estratigráficos a través del modelo digital, la segunda fase consta en el estudio hidrológico del sector seleccionado, por último, se realizó la determinación de los parámetros geotécnicos y la modelación de las orillas a través del software Slide.

### **5.1. Modelo Digital de Elevaciones**

A través del modelo digital de elevaciones (MDE) y los ensayos de penetración estándar realizados por el Fondo de Adaptación en el marco del proyecto para la intervención integral de la región de La Mojana (ver Figura 7), se determinaron las secciones de estudio del río Cauca, para ello se realizó la delimitación espacial de las secciones mediante la ubicación geográfica de los puntos de ensayo de penetración en el MDE y una vez ubicados se trazó una línea de corte perpendicular que abarcara la totalidad del cauce con el software QGIS como se muestra en la Figura 8.

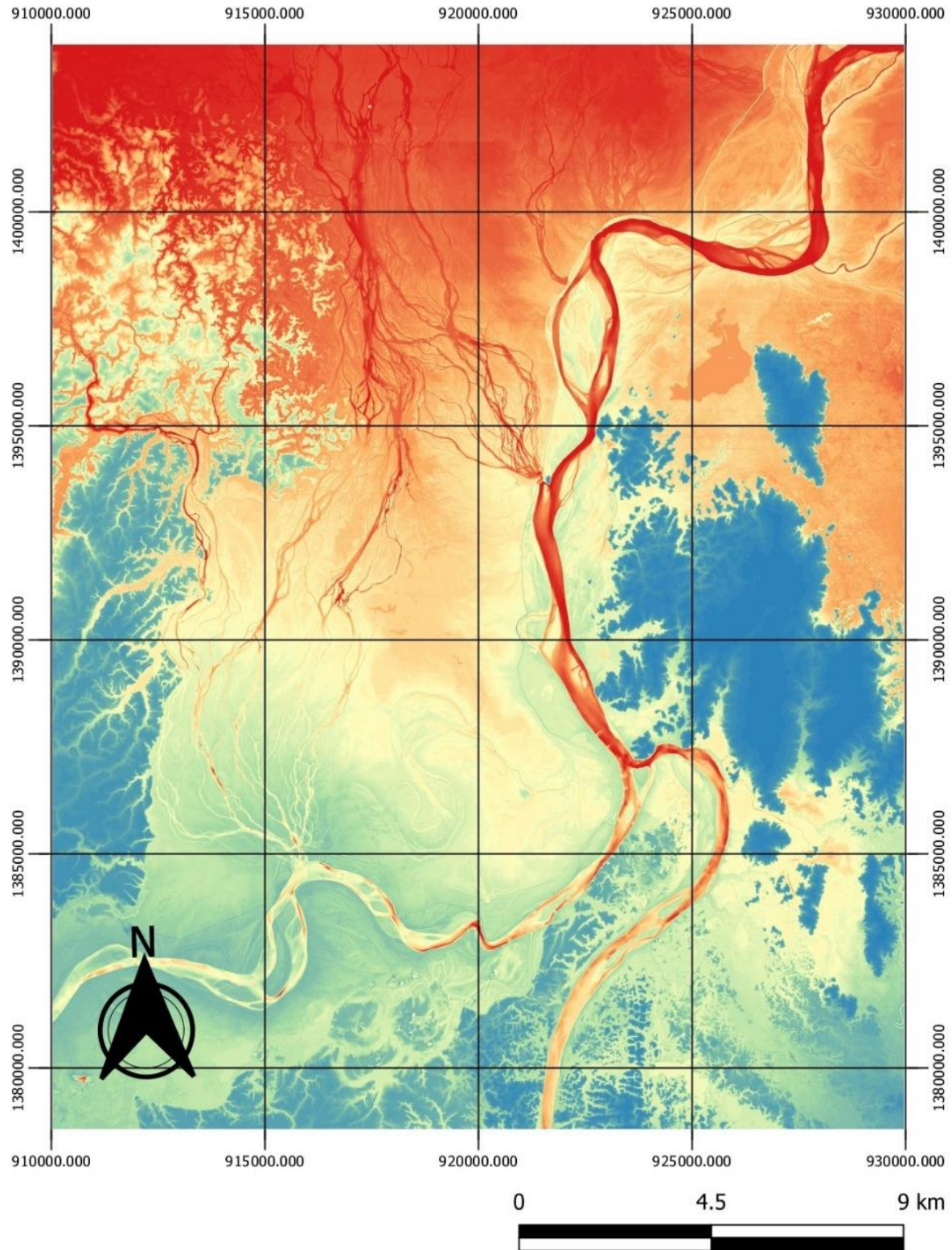


Figura 7. Modelo Digital de Elevaciones (MDE), zona de estudio.  
Nota: Elaborado por Y. Ilanos y M. A. Ortiz

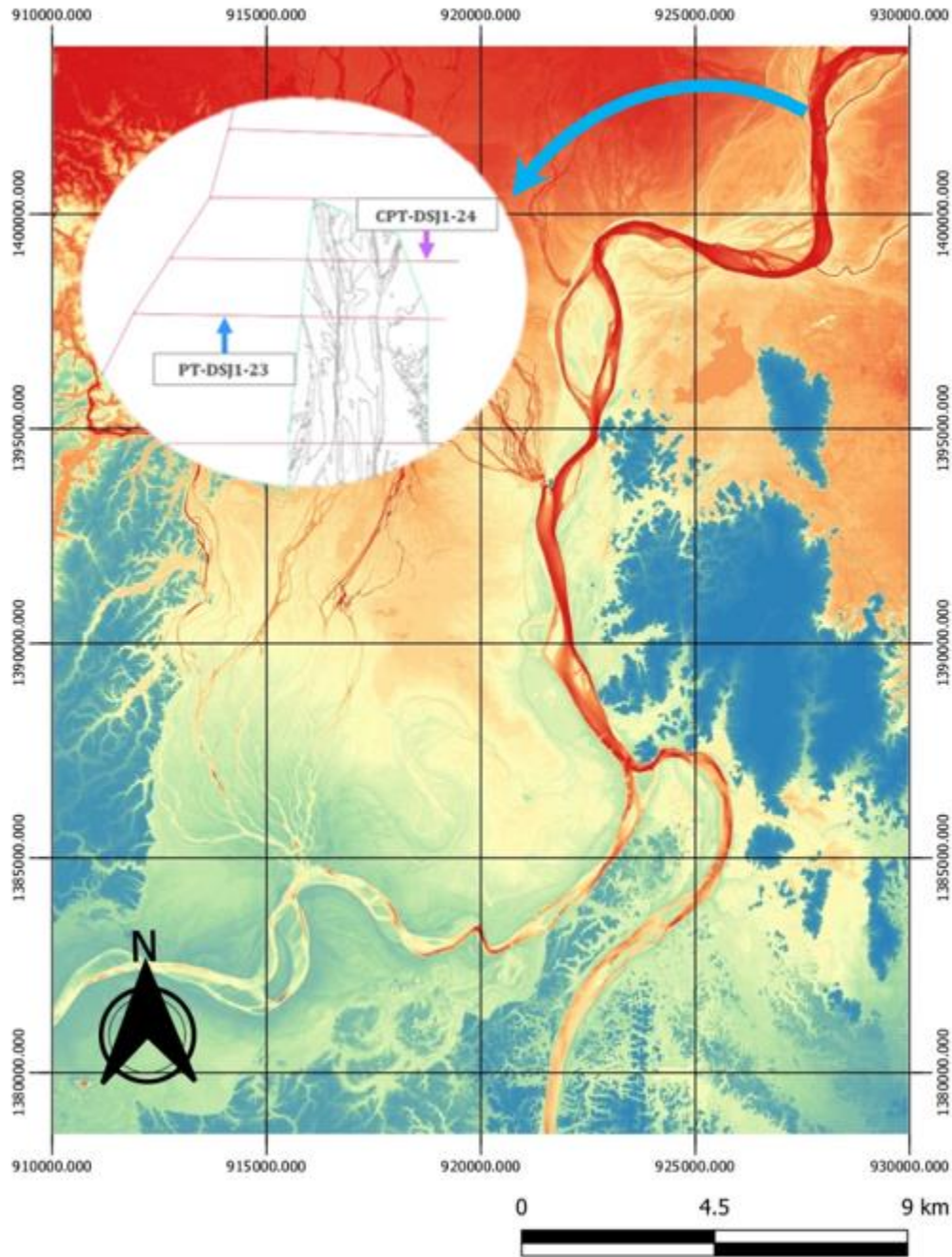


Figura 8. Secciones delimitadas y escogidas dentro del modelo digital de elevaciones.  
Nota: Elaborado por Y. Ilanos y M. A. Ortiz

A continuación, en la Figura 9 y la Figura 10 se muestran las secciones transversales PT-DSJ1-23.(Sección 1) y CPT-DSJ1-24 (Sección 2) escogidas junto a su respectiva estratigrafía obtenida de los ensayos de penetración realizados.

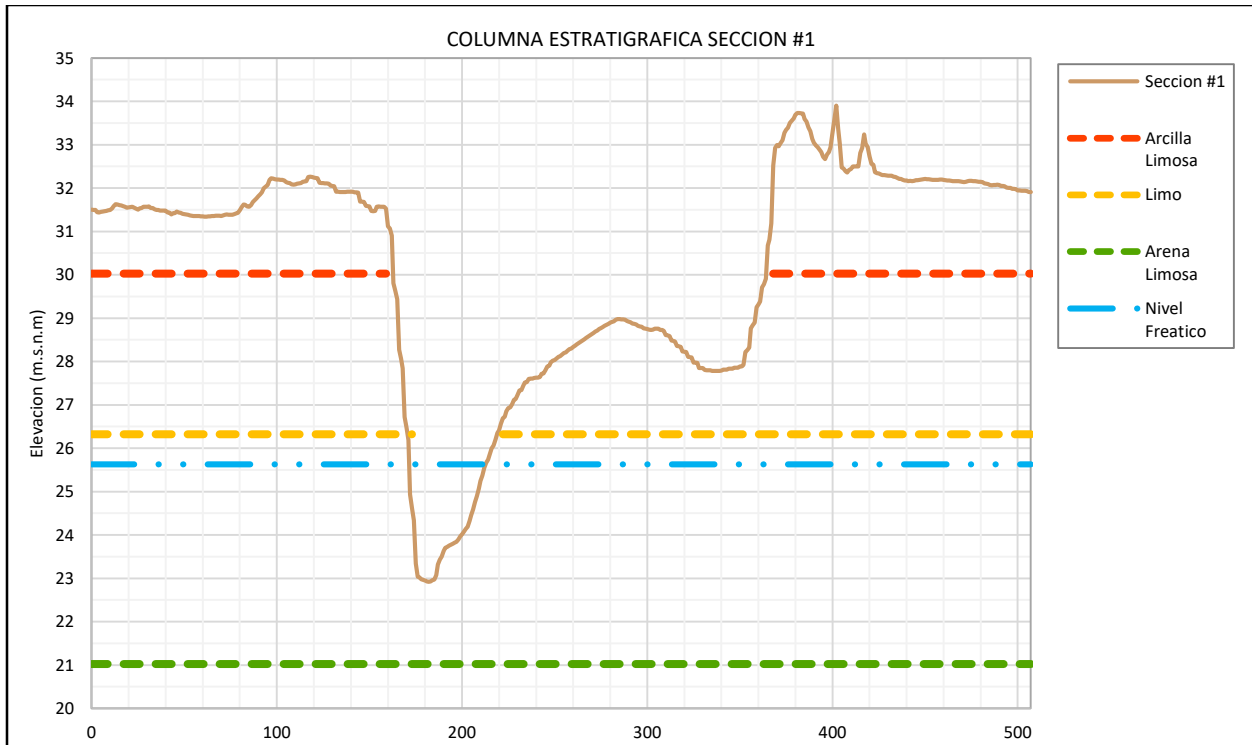


Figura 9. Sección transversal PT-DSJ1-23, Sección 1.  
 Nota: Elaborado por Y. Ilanos y M.A. Ortiz

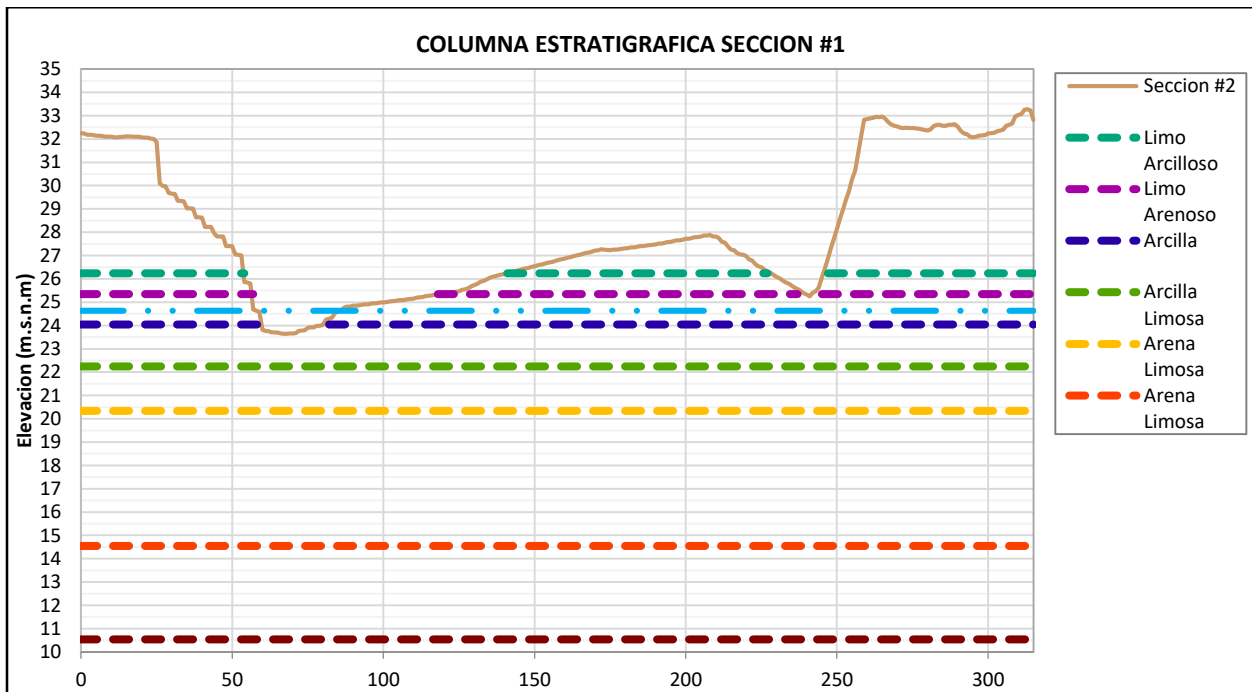


Figura 10. Sección transversal CPT-DSJ1-24, sección 2.  
 Nota: Elaborado por Y. Ilanos y M.A. Ortiz



## 5.2. Estudio Hidrológico

Mediante la obtención de los datos limnimétricos correspondientes a las estaciones de Las Flores y San Jacinto del Cauca (Ver Figura 11) se realizó un ajuste estadístico mediante el software Minitabs en el cual se determinaron los niveles de eventos máximos y mínimos para diferentes probabilidades de ocurrencia o periodos de retorno y luego fueron graficadas sobre las secciones escogidas para su análisis junto al MDE y así realizar el análisis en el software SLIDE®.

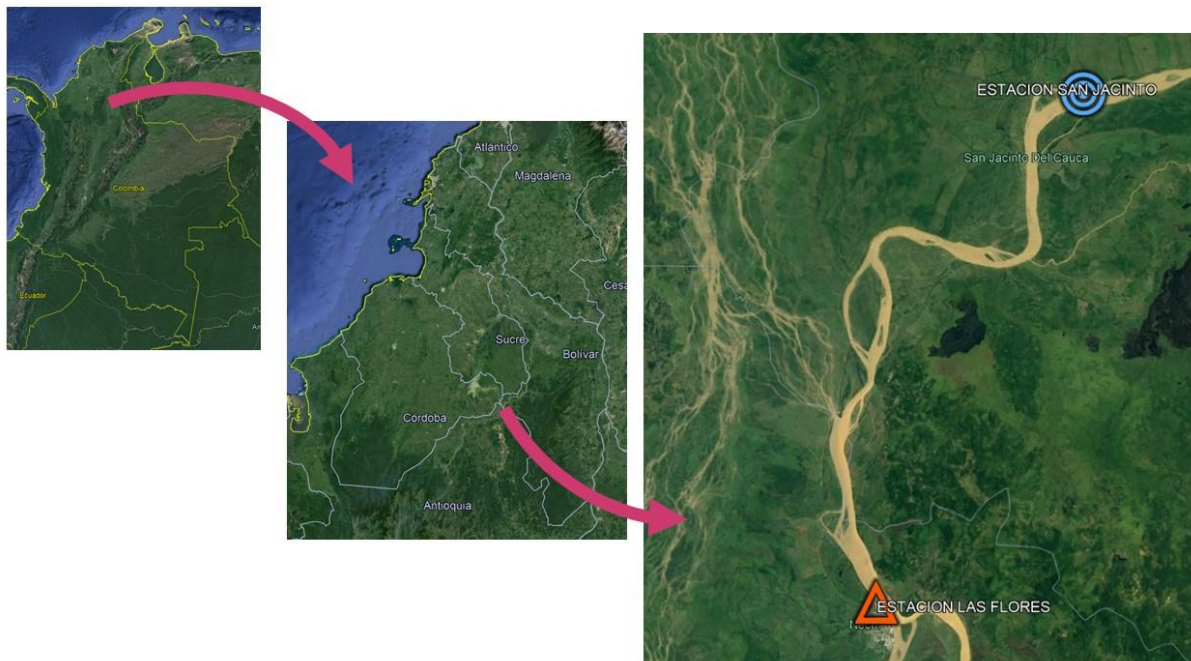


Figura 11. Ubicación de las estaciones limnimétricas del IDEAM.

Nota: Elaborado por Y. Ilanos y M.A. Ortiz

Por último, se evaluó la capacidad hidráulica máxima de cada sección con el software Hydraulic Toolbox.

## 5.3. Estudio Geotécnico

A través de la estratigrafía y los parámetros del suelo obtenidos del estudio del Fondo de Adaptación (Ver Tabla 2) se determinaron los criterios de falla y el factor de seguridad de las

riberas pertenecientes a las secciones escogidas (Ver Figura 9 y Figura 10) empleando la versión estudiantil del software geotécnico SLIDE®.

El factor de seguridad de estas secciones fue evaluado por los métodos de Spencer, Jambu, Bishop y Morgensten-Price, comparando la variación en los valores obtenidos por cada método y escogiendo como resultado el que tuviera menor valor de los cuatro. Esto permite determinar si la banca es segura, insegura o se encuentra en un estado limite.

Tabla 2.

*Parámetros del suelo.*

Material	Consistencia y compacidad	SUCS	$\gamma_d$ ( $kN/m^3$ )	$\gamma_h$ ( $kN/m^3$ )	Resistencia al corte no drenado	Resistencia al corte en términos de esfuerzos efectivos		Permeabilidad
					$S_u$ ( $kPa$ )	$c'$ ( $kPa$ )	$\varphi$ ( $^\circ$ )	$k$ ( $m/s$ )
Limos con algo de arcillas de color anaranjado	Firme	ML	16.5	18.13	131	30	21	1.01E-07
Limos con pocas arcillas de color marrón	Firme	ML	17.5	18.59	100	10	32	6.10E-07
Arcillas de humedad baja, plasticidad alta y consistencia muy firme	Muy firme	CH	18.4	19.35	124	15	21	5.29E-08
Limos de color verde aceituna, humedad media, plasticidad media	Medio firme	ML	17.3	NA	45	0	24	4.01E-08
Arcilla limosa de color verde aceituna. Humedad baja, plasticidad media, muy firme	Muy firme	CL-ML	17.7	NA	120	5	29	1.38E-07
Estrato con alto contenido orgánico. Consistencia muy débil	Muy blanda	CL	16.9	NA	10	5	10	7.82E-10
Depósito aluvial de arenas finas con algo de arena media a gruesa	Medio Suelta	SM	17.6	NA	NA	5	36	7.12E-06

Nota: (Fondo de Adaptacion, 2015), adaptado por Y. llanos y M.A. Ortiz

## 6. Análisis y Resultados

### 6.1. Análisis Hidrológico

Se realizó un análisis del comportamiento del río Cauca mediante la serie de datos históricos de niveles máximos y mínimos anuales, brindado por las estaciones limnimétricas del IDEAM con un histórico que abarca desde 1974 hasta 2015.

Los datos fueron adaptados a cota sobre el nivel del mar mediante los niveles de referencia de las estaciones Las Flores (8° 02' 11.04918"N, 74° 57' 08.88546" W) y San Jacinto Del Cauca (8°15'0.00"N, 74°43'0.00"W).

Tabla 3.

*Valor de nivel de referencia de las estaciones o "Cota 0".*

<b>COTA 0 (m.s.n.m)</b>	
LAS FLORES	27.696
SAN JACINTO	27.899

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

A continuación, se presentan los históricos de datos de las estaciones junto a su ajuste a cota topográfica.

Tabla 4.

*Histórico de Datos Máximos, Estación Las Flores.*

<b>AÑO</b>	<b>NIVEL MEDIDO (cm)</b>	<b>NIVEL MEDIDO (m)</b>	<b>COTA MEDIDA (m.s.n.m)</b>
1974	497	4.97	32.67
1975	742	7.42	35.12
1976	727	7.27	34.97
1977	539	5.39	33.09
1978	664	6.64	34.34
1979	676	6.76	34.46

AÑO	NIVEL MEDIDO (cm)	NIVEL MEDIDO (m)	COTA MEDIDA (m.s.n.m)
1980	666	6.66	34.36
1981	738	7.38	35.08
1982	726	7.26	34.96
1983	662	6.62	34.32
1984	755	7.55	35.25
1985	710	7.10	34.80
1986	748	7.48	35.18
1987	771	7.71	35.41
1988	764	7.64	35.34
1989	740	7.40	35.10
1990	741	7.41	35.11
1991	712	7.12	34.82
1992	621	6.21	33.91
1993	768	7.68	35.38
1994	758	7.58	35.28
1995	770	7.70	35.40
1996	798	7.98	35.68
1997	696	6.96	34.66
1998	781	7.81	35.51
1999	844	8.44	36.14
2000	832	8.32	36.016
2001	701	7.01	34.706

<b>AÑO</b>	<b>NIVEL MEDIDO (cm)</b>	<b>NIVEL MEDIDO (m)</b>	<b>COTA MEDIDA (m.s.n.m)</b>
2002	703	7.03	34.726
2003	811	8.11	35.806
2004	796	7.96	35.656
2005	835	8.35	36.046
2006	830	8.3	35.996
2007	855	8.55	36.246
2008	895	8.95	36.646
2009	790	7.9	35.596
2010	882	8.82	36.516
2011	718	7.18	34.876
2012	709	7.09	34.786
2013	698	6.98	34.676
2014	881	8.81	36.506
2015	793	7.93	35.626
<b>NIVEL MINIMO</b>	226	0.50	36.65

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

Tabla 5.

Histórico de Datos Mínimos, Estación Las Flores.

<b>AÑO</b>	<b>NIVEL MEDIDO (cm)</b>	<b>NIVEL MEDIDO (m)</b>	<b>COTA MEDIDA (m.s.n.m)</b>
1974	259	2.59	30.29
1975	226	2.26	29.96
1976	350	3.5	31.2
1977	264	2.64	30.34
1978	272	2.72	30.42
1979	328	3.28	30.98

<b>AÑO</b>	<b>NIVEL MEDIDO (cm)</b>	<b>NIVEL MEDIDO (m)</b>	<b>COTA MEDIDA (m.s.n.m)</b>
1980	309	3.09	30.79
1981	335	3.35	31.05
1982	432	4.32	32.02
1983	306	3.06	30.76
1984	392	3.92	31.62
1985	336	3.36	31.06
1986	400	4.00	31.7
1987	311	3.11	30.81
1988	308	3.08	30.78
1989	430	4.3	32
1990	391	3.91	31.61
1991	332	3.32	31.02
1992	330	3.3	31
1993	382	3.82	31.52
1994	461	4.61	32.31
1995	400	4.00	31.7
1996	458	4.58	32.28
1997	412	4.12	31.82
1998	350	3.50	31.2
1999	584	5.84	33.54
2000	524	5.24	32.936
2001	446	4.46	32.156
2002	388	3.88	31.576
2003	603	6.03	33.726
2004	491	4.91	32.606
2005	469	4.69	32.386
2006	463	4.63	32.326
2007	406	4.06	31.756
2008	524	5.24	32.936
2009	460	4.60	32.296
2010	377	3.77	31.466
2011	505	5.05	32.746
2012	496	4.96	32.656
2013	433	4.33	32.026
2014	526	5.26	32.956
2015	449	4.49	32.186

<b>AÑO</b>	<b>NIVEL MEDIDO (cm)</b>	<b>NIVEL MEDIDO (m)</b>	<b>COTA MEDIDA (m.s.n.m)</b>
<b>NIVEL MINIMO</b>	226	0.5	29.96

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

Tabla 6.

*Histórico de Datos Máximos, Estación San Jacinto.*

<b>AÑO</b>	<b>NIVEL MEDIDO (cm)</b>	<b>NIVEL MEDIDO (m)</b>	<b>COTA MEDIDA (m.s.n.m)</b>
1977	600	6	33.9
1978	378	3.78	31.68
1979	522	5.22	33.12
1980	491	4.91	32.81
1981	518	5.18	33.08
1982	514	5.14	33.04
1983	498	4.98	32.88
1984	529	5.29	33.19
1985	510	5.1	33
1986	570	5.7	33.6
1987	545	5.45	33.35
1988	541	5.41	33.31
1989	520	5.2	33.1
1990	519	5.19	33.09
1991	585	5.85	33.75
1992	480	4.8	32.7
1993	598	5.98	33.88
1994	610	6.1	34
1995	622	6.22	34.12
1996	598	5.98	33.88
1997	599	5.99	33.89
1998	544	5.44	33.34
1999	597	5.97	33.87
2000	572	5.72	33.62
2001	595	5.95	33.85
2002	330	3.3	31.2
<b>NIVEL MAXIMO</b>	622	6.22	34.12

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

Tabla 7.

Histórico de Datos Mínimos, Estación San Jacinto.

<b>AÑO</b>	<b>NIVEL MEDIDO (cm)</b>	<b>NIVEL MEDIDO (m)</b>	<b>COTA MEDIDA (m.s.n.m)</b>
1977	410	4.10	32.00
1978	228	2.28	30.18
1979	50	0.50	28.40
1980	111	1.11	29.01
1981	139	1.39	29.29
1982	140	1.40	29.30
1983	209	2.09	29.99
1984	181	1.81	29.71
1985	103	1.03	28.93
1986	189	1.89	29.79
1987	72	0.72	28.62
1988	100	1.00	28.90
1989	170	1.70	29.60
1990	136	1.36	29.26
1991	137	1.37	29.27
1992	227	2.27	30.17
1993	246	2.46	30.36
1994	181	1.81	29.71
1995	164	1.64	29.54
1996	236	2.36	30.26
1997	191	1.91	29.81
1998	84	0.84	28.74
1999	307	3.07	30.97
2000	198	1.98	29.88
2001	207	2.07	29.97
2002	303	3.03	30.93
<b>NIVEL MINIMO</b>	226	0.50	28.40

Nota: Elaborado por Y. llanos y M.A. Ortiz

### 6.1.1. Análisis de Máximos

Con los niveles históricos se realizó un ajuste de probabilidad de los máximos presentados anualmente en ambas estaciones mediante el software estadístico MINITAB, para



ello se realizaron diferentes ajustes probabilísticos y se escogió la distribución que mejor se adapta a los datos.

Los factores que influyen en la escogencia de una distribución de probabilidad sobre otra lo determinan principalmente el número de Anderson-Darling y el P-Valor (representados en las gráficas como AD y Valor p respectivamente).

El número estadístico de Anderson-Darling mide que tan bien siguen los datos una distribución específica, entre mejor se ajuste la distribución a los datos, menor será el número. El P-Valor define si el ajuste de los datos se ajusta a una hipótesis nula que normalmente se toma como 0.05, si el P-Valor de una distribución es menor que ese valor, automáticamente se descarta.

#### **6.1.1.1. Resultados Las Flores**

A partir de los niveles máximos se obtuvieron las distribuciones de probabilidad, resultando la distribución Logística (ver Figura 12) en un ajuste óptimo considerando que su número AD y Valor-p fueron los que tuvieron mejor comportamiento con respecto a las demás distribuciones.

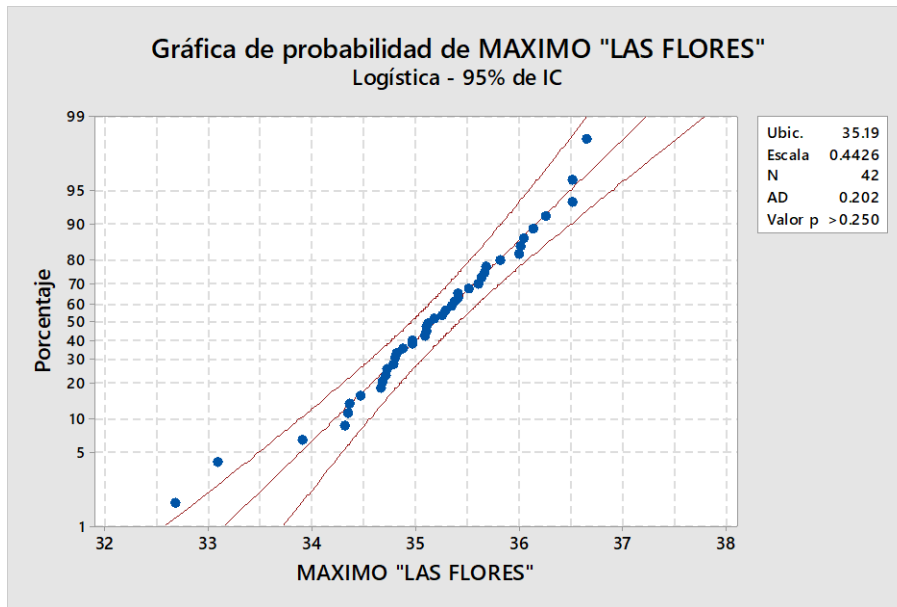


Figura 12. Ajuste de probabilidad máximo Las Flores

Nota: Elaborado por Y. llanos y M.A. Ortiz

A continuación, se presenta la probabilidad de ocurrencia de los eventos junto a su cota topográfica para los periodos de retorno más representativos.

Tabla 8.

*Probabilidad de Ocurrencia de Eventos máximos, Histórico de las Flores.*

<b>PERIODO DE RETORNO</b>	<b>PROBABILIDAD</b>	<b>NIVEL (m.s.n.m)</b>	<b>NIVEL MAXIMO (m.s.n.m)</b>
2	0.50	35.191	36.646
5	0.20	35.804	36.646
10	0.10	36.163	36.646
25	0.04	36.597	36.646
50	0.02	36.913	36.646
100	0.01	37.224	36.646

Nota: Elaborado por Y. llanos y M.A. Ortiz

La Figura 13 representa la probabilidad de ocurrencia de cualquier nivel máximo medido para estación de Las Flores.

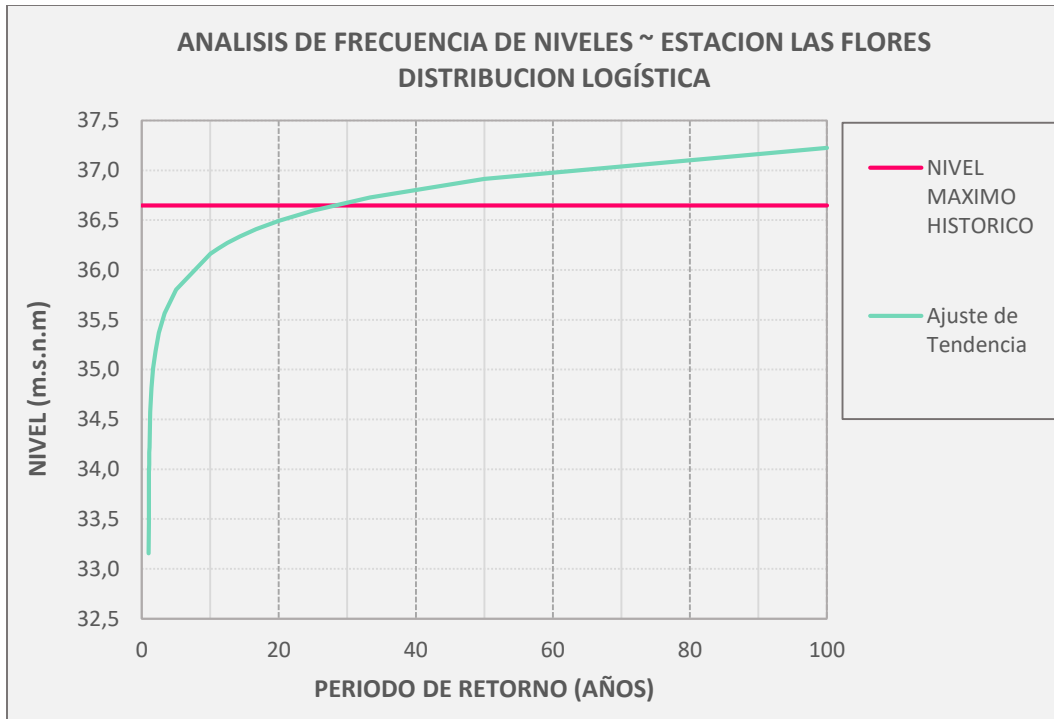


Figura 13. frecuencia de niveles máximos, estación las Flores

Nota: Elaborado por Y. llanos y M.A. Ortiz

#### 6.1.1.2. Resultados San Jacinto

La estación de San Jacinto se realizó el mismo procedimiento descrito en el ítem 6.1.1 de los niveles máximos, obteniendo que la distribución de probabilidad de valor extremo más

pequeños (ver Figura 4) tuvo un ajuste optimo considerando que su número AD y Valor-p fueron los que tuvieron mejor comportamiento con respecto a las demás distribuciones.

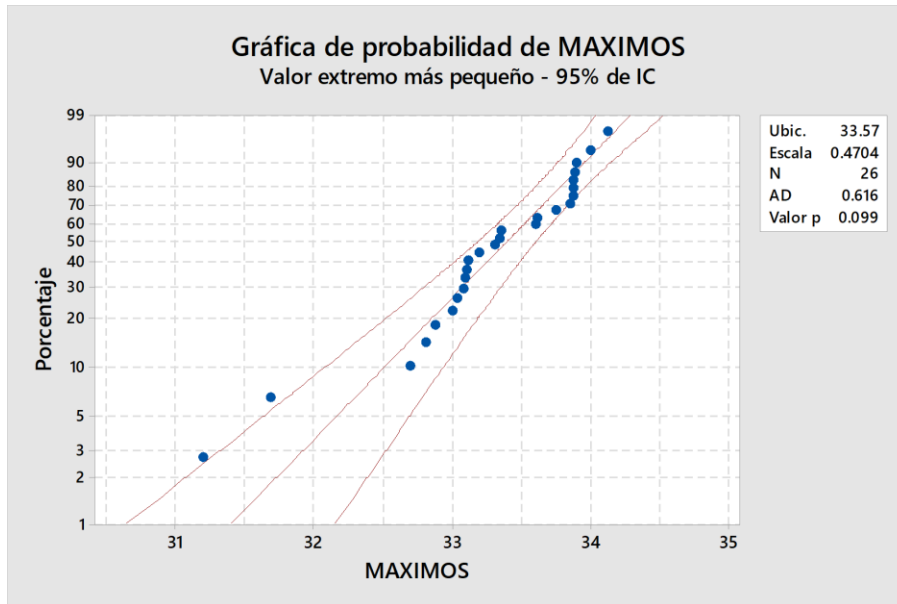


Figura 14. Ajuste de probabilidad máximos San Jacinto  
 Nota: Elaborado por Y. Ilanos y M.A. Ortiz

A continuación, se presenta la probabilidad de ocurrencia de los eventos junto a su cota topográfica para los periodos de retorno más representativos.

Tabla 9.

Probabilidad de ocurrencia de eventos máximos, histórico San Jacinto.

PERIODO DE RETORNO	PROBABILIDAD	NIVEL (m.s.n.m)	NIVEL MAXIMO (m.s.n.m)
2	0.50	33.394	34.119
5	0.20	33.791	34.119
10	0.10	33.959	34.119
25	0.04	34.117	34.119
50	0.02	34.209	34.119
100	0.01	34.285	34.119

Nota: Elaborado por Y. Ilanos y M.A. Ortiz

La Figura 15 representa la probabilidad de ocurrencia de cualquier nivel máximo medido para estación de San Jacinto.

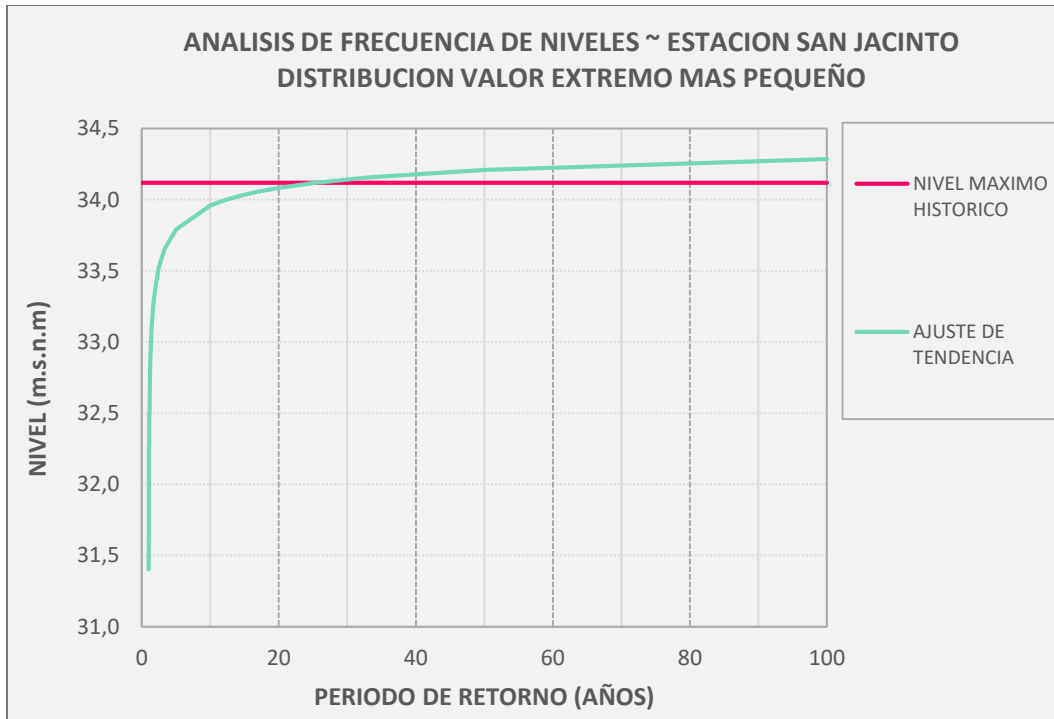


Figura 15. frecuencia de niveles máximos, estación San Jacinto

Nota: Elaborado por Y. llanos y M.A. Ortiz

### 6.1.2. Análisis de Mínimos

Con los niveles históricos se realizó un ajuste de probabilidad de los mínimos presentados anualmente en ambas estaciones mediante el software estadístico MINITAB, para ello se realizaron diferentes ajustes probabilísticos y se escogió la distribución que mejor se adapta a los datos.

#### 6.1.2.1. Resultados Las Flores

A partir de los niveles mínimos se obtuvieron las distribuciones de probabilidad, resultando la distribución Lognormal (ver Figura 13) en un ajuste óptimo considerando que su número AD y Valor-p fueron los que tuvieron mejor comportamiento con respecto a las demás distribuciones.

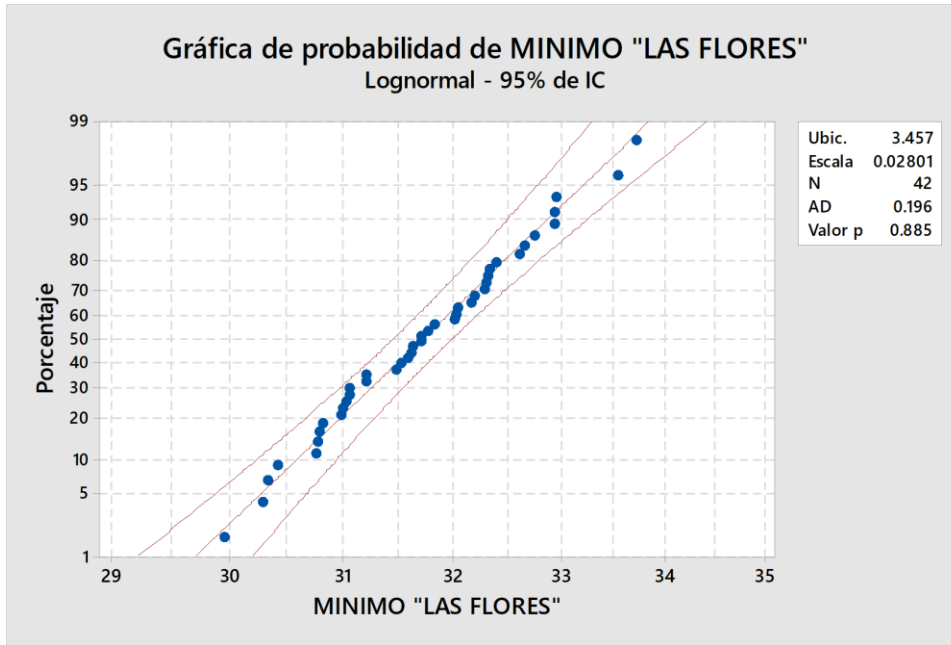


Figura 136. Ajuste de probabilidad mínimo Las Flores

Nota: Elaborado por Y. Ilanos y M.A. Ortiz

A continuación, se presenta la probabilidad de ocurrencia de los eventos junto a su cota topográfica para los periodos de retorno más representativos.

Tabla 10.

Probabilidad de Ocurrencia de Eventos mínimos, histórico de las Flores.

PERIODO DE RETORNO	PROBABILIDAD	NIVEL (m.s.n.m)	NIVEL MINIMO (m.s.n.m)
2	0.50	31.712	29.956
5	0.20	30.973	29.956
10	0.10	30.594	29.956
25	0.04	30.194	29.956
50	0.02	29.939	29.956
100	0.01	29.711	29.956

Nota: Elaborado por Y. Ilanos y M.A. Ortiz

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**17 representa la probabilidad de ocurrencia de cualquier nivel mínimo medido para estación de Las Flores.

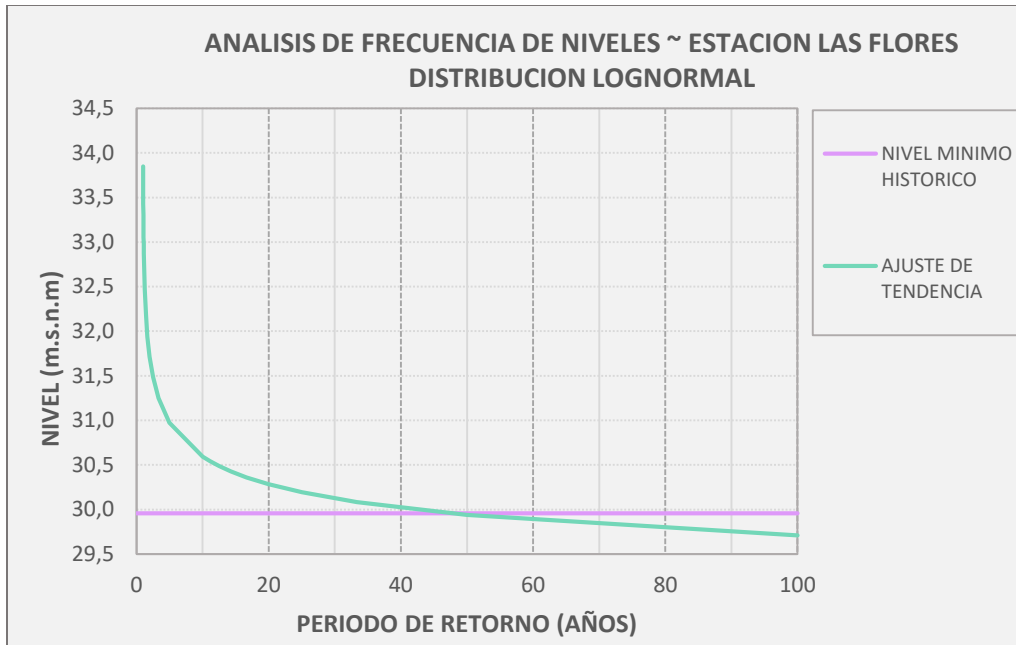


Figura 17. frecuencia de niveles mínimos, estación las Flores.

Nota: Elaborado por Y. Ilanos y M.A. Ortiz

**6.1.2.2. Resultados San Jacinto**

La distribución Loglogística (ver Figura 8) resultó en un ajuste óptimo para los datos de nivel mínimo de San Jacinto, considerando que su número AD y Valor-p fueron los que tuvieron mejor comportamiento con respecto a las demás distribuciones.

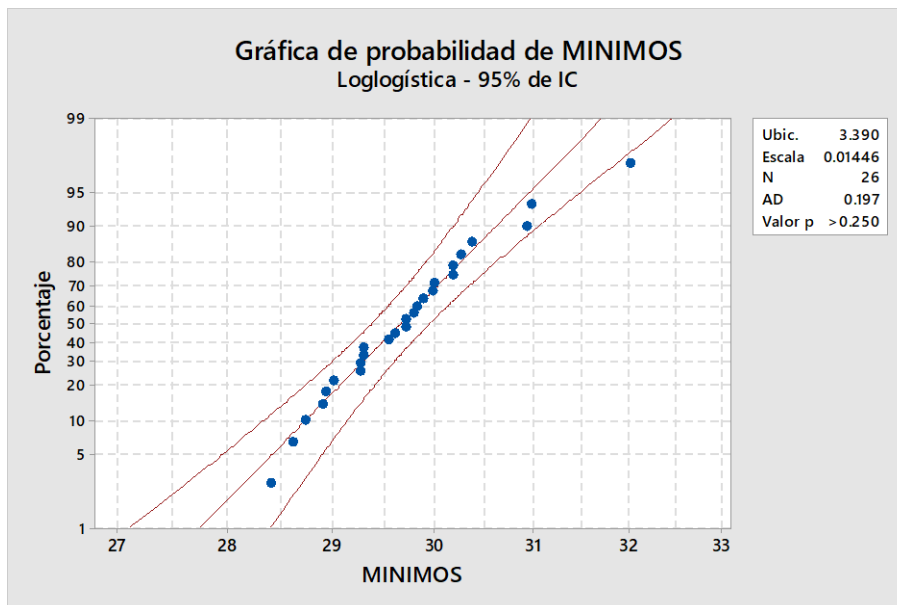


Figura 18. Ajuste de probabilidad mínimo San Jacinto

Nota: Elaborado por Y. Ilanos y M.A. Ortiz

A continuación, se presenta la probabilidad de ocurrencia de los eventos junto a su cota topográfica para los periodos de retorno más representativos.

Tabla 11.

Probabilidad de Ocurrencia de Eventos mínimos, histórico de San Jacinto.

PERIODO DE RETORNO	PROBABILIDAD	NIVEL (m.s.n.m)	NIVEL MINIMO (m.s.n.m)
2	0.50	29.661	28.399
5	0.20	29.072	28.399
10	0.10	28.733	28.399
25	0.04	28.329	28.399
50	0.02	28.038	28.399
100	0.01	27.754	28.399

Nota: Elaborado por Y. llanos y M.A. Ortiz

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**19 representa la probabilidad de ocurrencia de cualquier nivel mínimo medido para estación de San Jacinto.

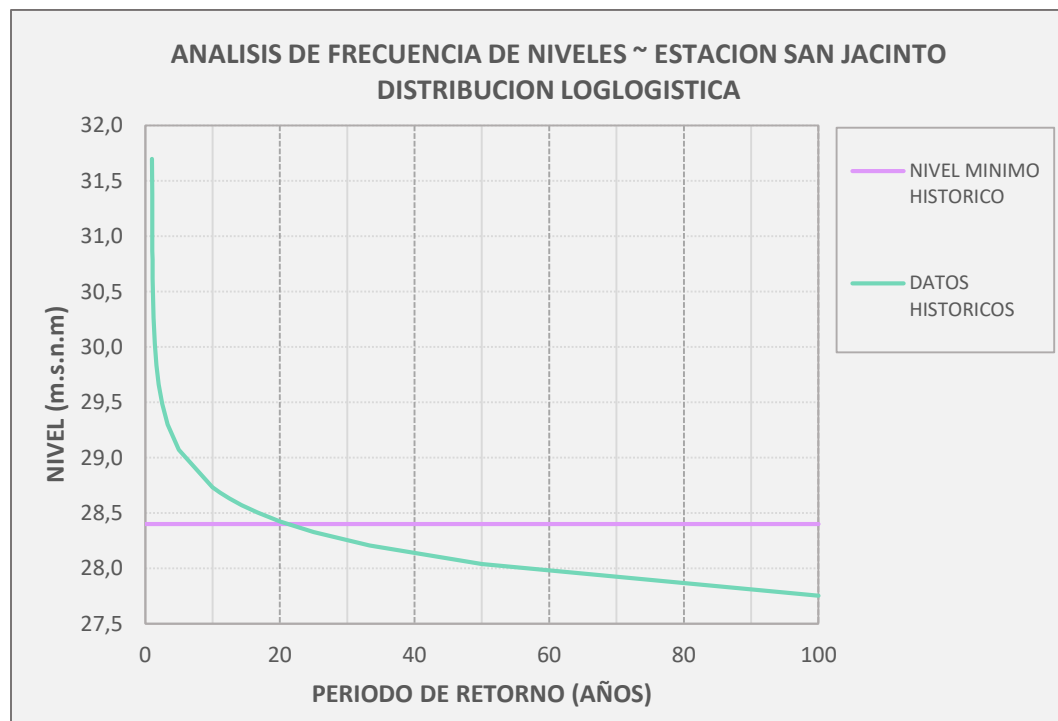


Figura 19. Frecuencia de niveles mínimos, estación San Jacinto.

Nota: Elaborado por Y. llanos y M.A. Ortiz



### 6.1.3. Interpolación de Niveles

La interpolación de los niveles en las secciones escogidas se realizó usando los resultados de los estudios estadísticos de cada estación y determinando las distancias entre las estaciones y las secciones.

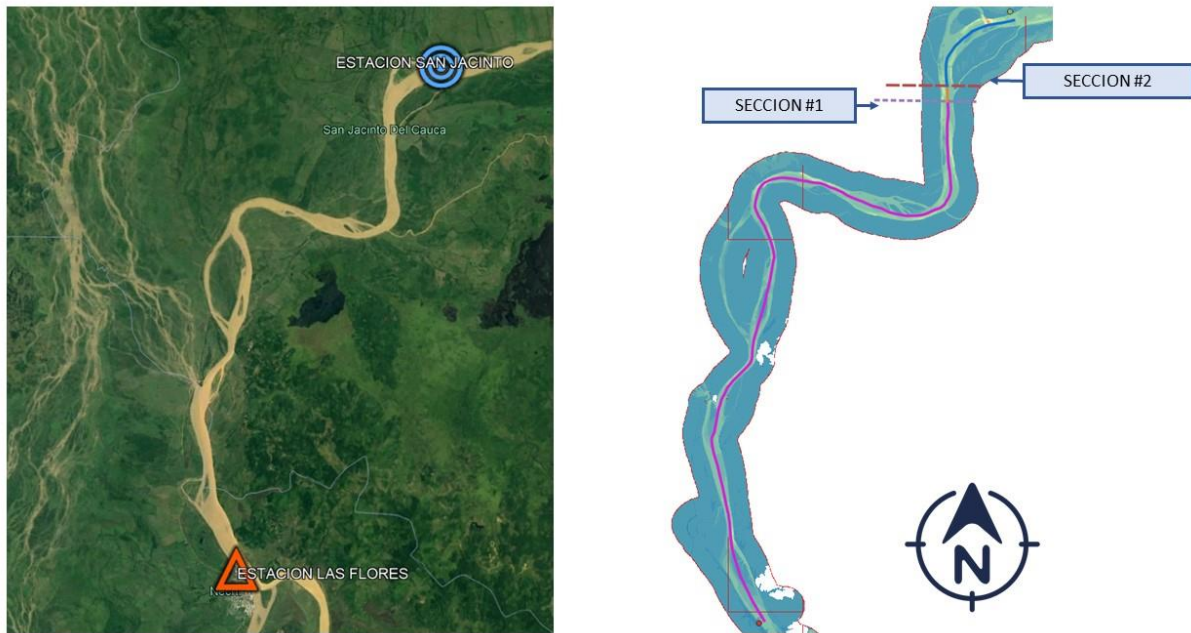


Figura20. Distancia de interpolación entre estaciones y ubicación de secciones.  
Nota: Tomado de Google Earth. Adaptado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

La longitud de separación entre las estaciones de Las Flores y San Jacinto que es de 23858 m, la distancia entre Las Flores y la sección 1 es de 20538 m y la distancia entre Las Flores y la sección 2 es de 20954 m.

Se evaluaron entonces los siguientes escenarios de interpolación.

#### 6.1.3.1. Interpolación de Máximos

Tabla 12.

Datos de interpolación

PERIODO DE RETORNO	LAS FLORES (msnm)	SAN JACINTO (msnm)	Sección DSJ1-23	Sección DSJ1-24
2	35.191	32.251	32.660	32.609

PERIODO DE RETORNO	LAS FLORES (msnm)	SAN JACINTO (msnm)	Sección DSJ1-23	Sección DSJ1-24
5	35.804	32.648	33.087	33.032
10	36.163	32.816	33.282	33.224
25	36.597	32.974	33.478	33.415
50	36.913	33.066	33.601	33.534
100	37.224	33.142	33.710	33.639

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

Graficando los niveles en las secciones se observa que para todos los niveles máximos sobrepasan las riberas, indicando que en el pasado hubo un evento máximo que genero una erosión de las orillas en la banca izquierda.

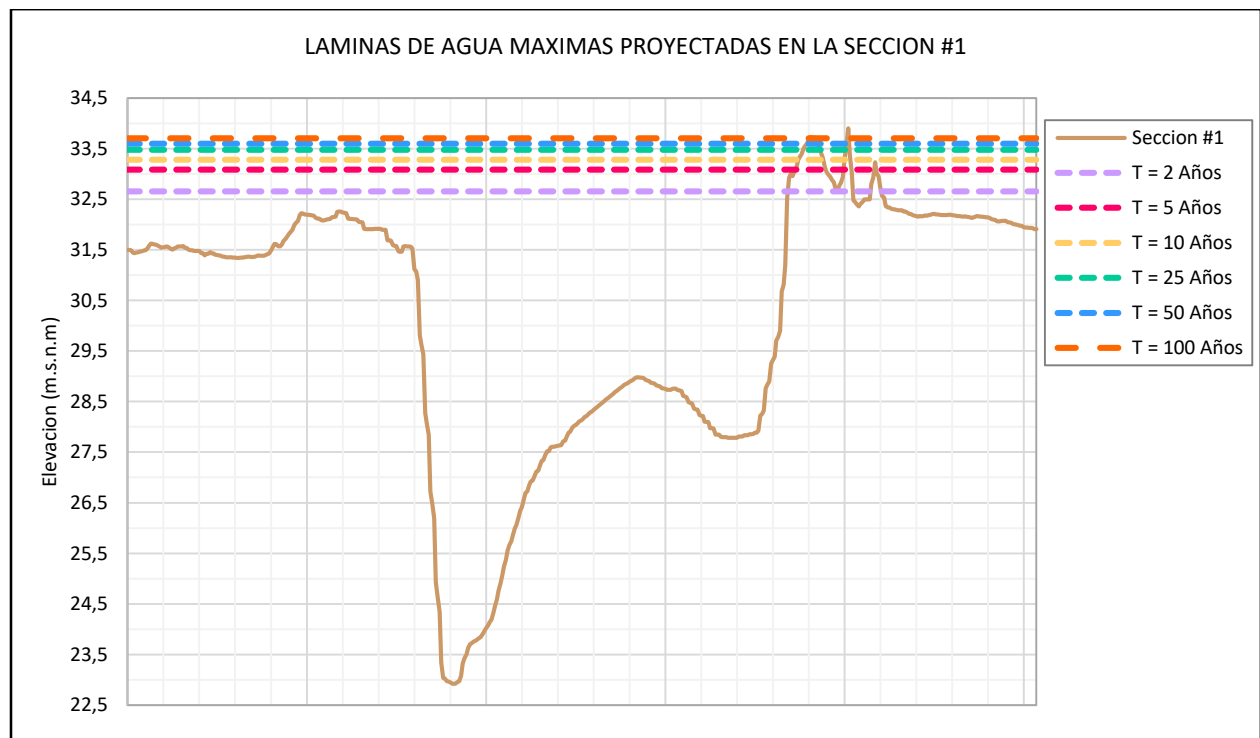


Figura 21. Niveles máximos sección 1

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

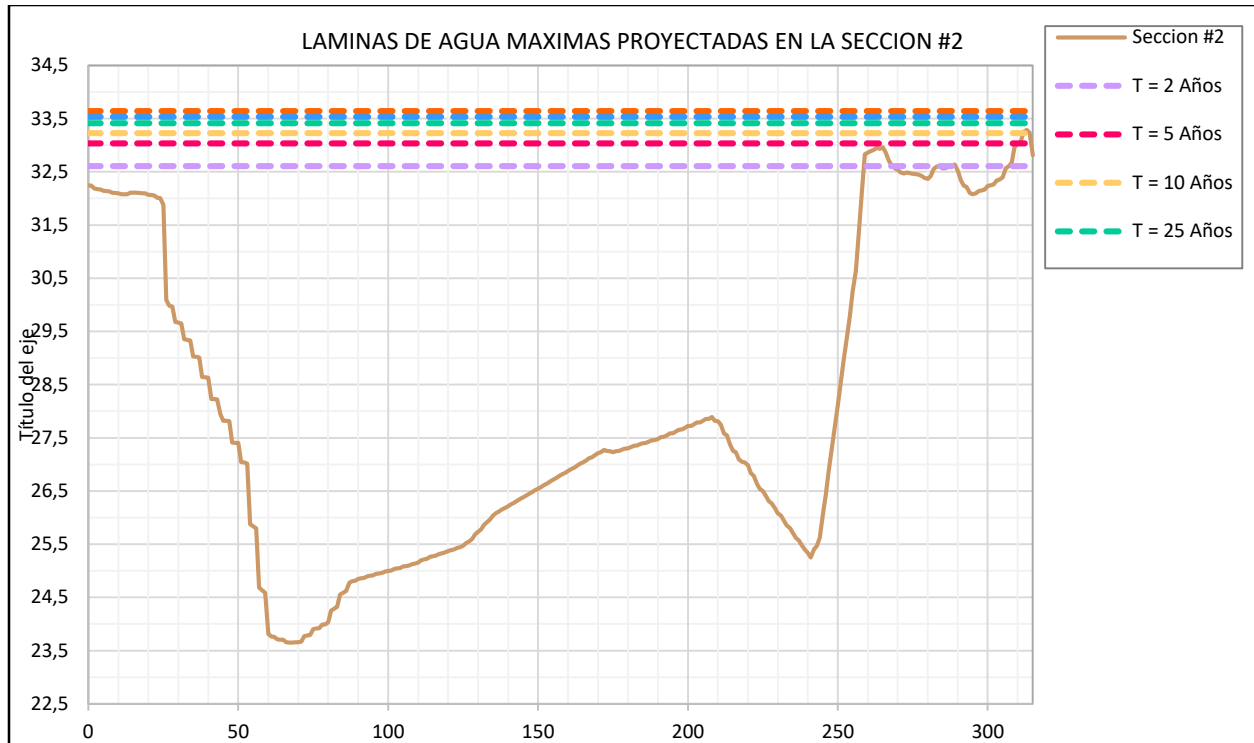


Figura 22. Niveles máximos sección 2

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

Mediante un análisis del comportamiento histórico del río a través de imágenes satelitales de Google Earth, se logró observar que para el año 2000 ocurrió un evento atípico de crecida en la región de la Mojana generando una mancha de inundación, en 2011 ocurrió un evento de máximo de iguales características que generó una afectación del margen izquierdo del río Cauca.

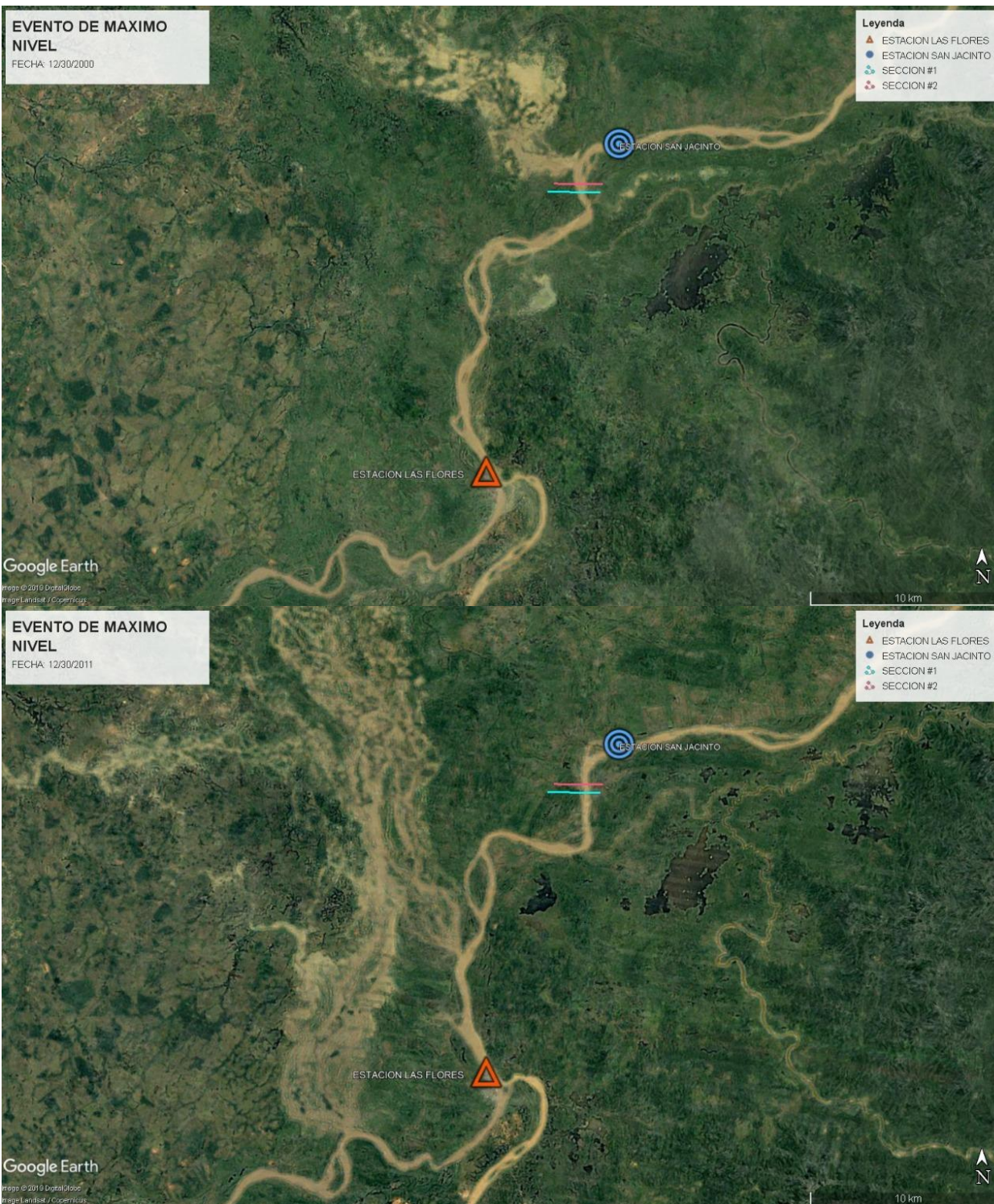


Figura 23. Análisis histórico de la zona de estudio

Nota: Tomado de Google Earth, Adaptado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

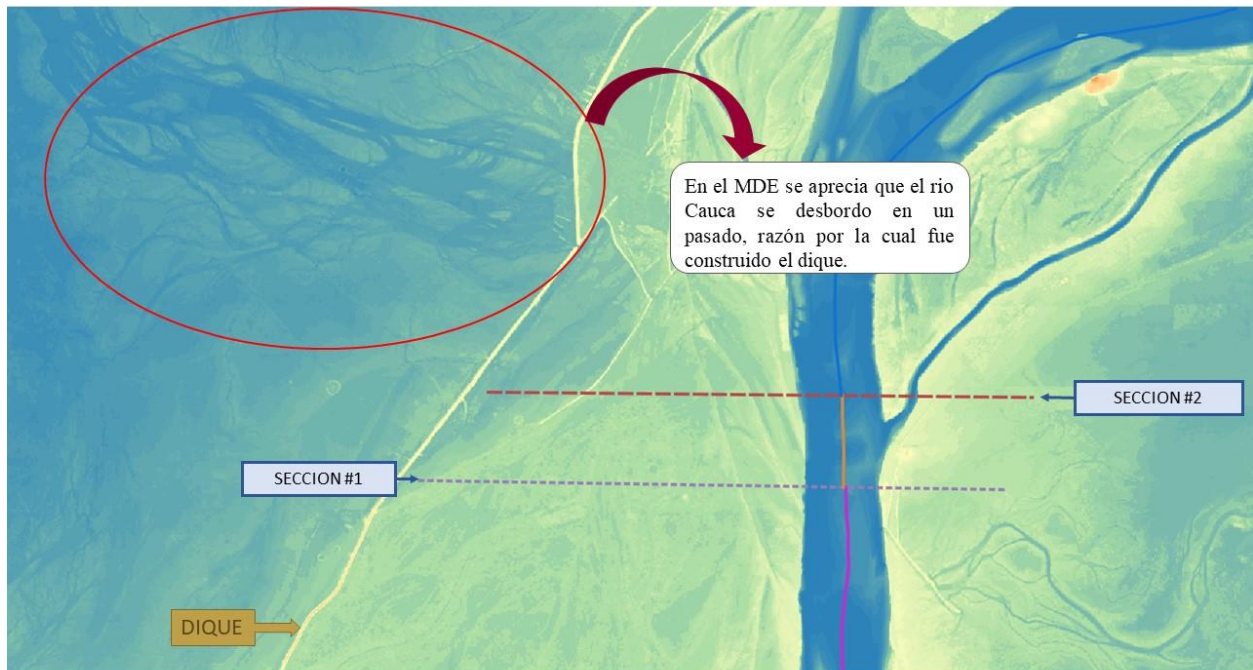


Figura 24. Análisis del modelo digital de elevaciones

Nota: Tomado de Google Earth. Adaptado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

Analizando el modelo digital de elevaciones para el periodo de retorno máximo de 100 años en las secciones de estudio, se observa que la corona del dique construido se encuentra por encima de la lámina de agua, esto indica que el dique representa una seguridad para las poblaciones aledañas en caso de eventos máximos.

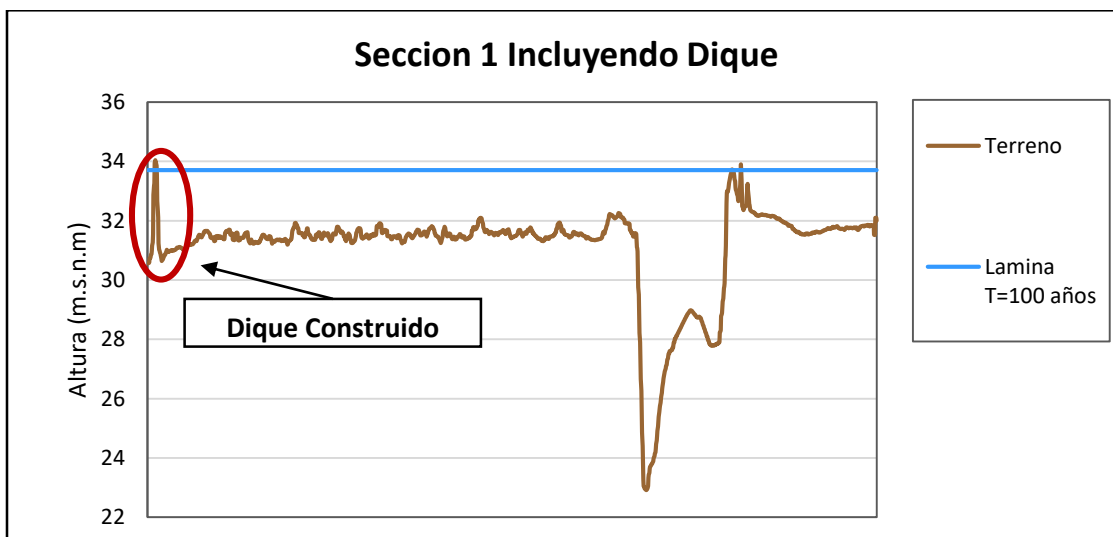


Figura 25. Sección 1 incluyendo Dique

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

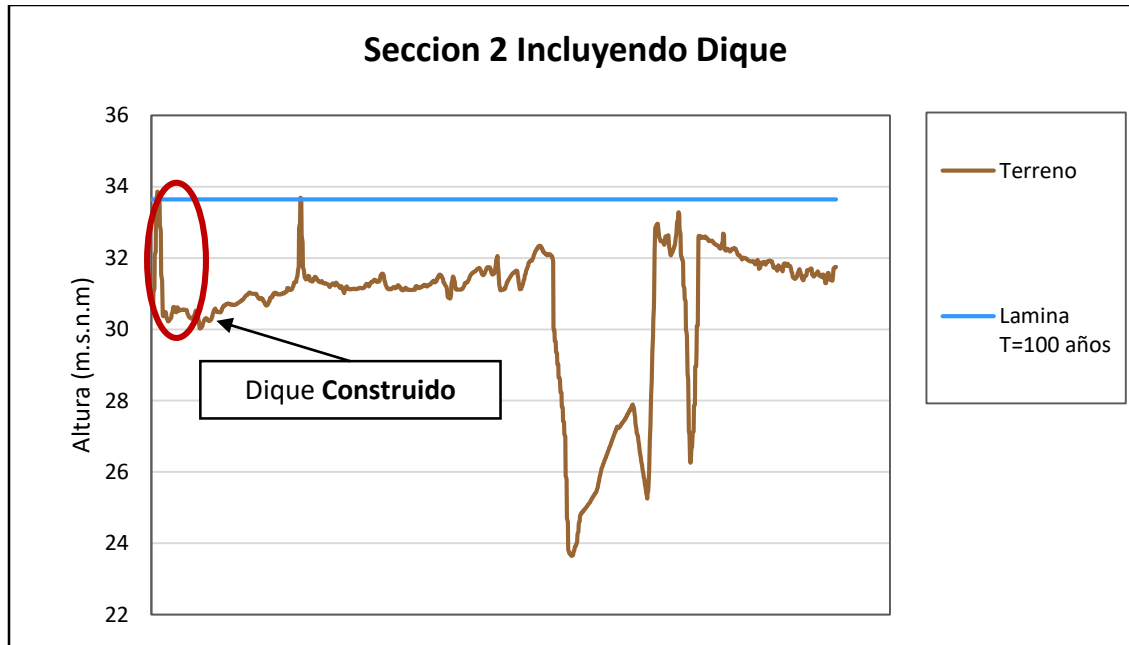


Figura 146. Sección 2 incluyendo Dique

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

### 6.1.3.2. Interpolación de Mínimos

Tabla 13.

Datos de interpolación

PERIODO DE RETORNO	LAS FLORES (msnm)	SAN JACINTO (msnm)	Sección DSJ1-23	Sección DSJ1-24
2	31.712	29.661	29.661	29.661
5	30.973	29.072	29.072	29.072
10	30.594	28.733	28.733	28.733
25	30.194	28.329	28.329	28.329
50	29.939	28.038	28.038	28.038
100	29.711	27.754	27.754	27.754

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

Graficando los niveles en las secciones se observa que los niveles mínimos son soportados hidráulicamente.

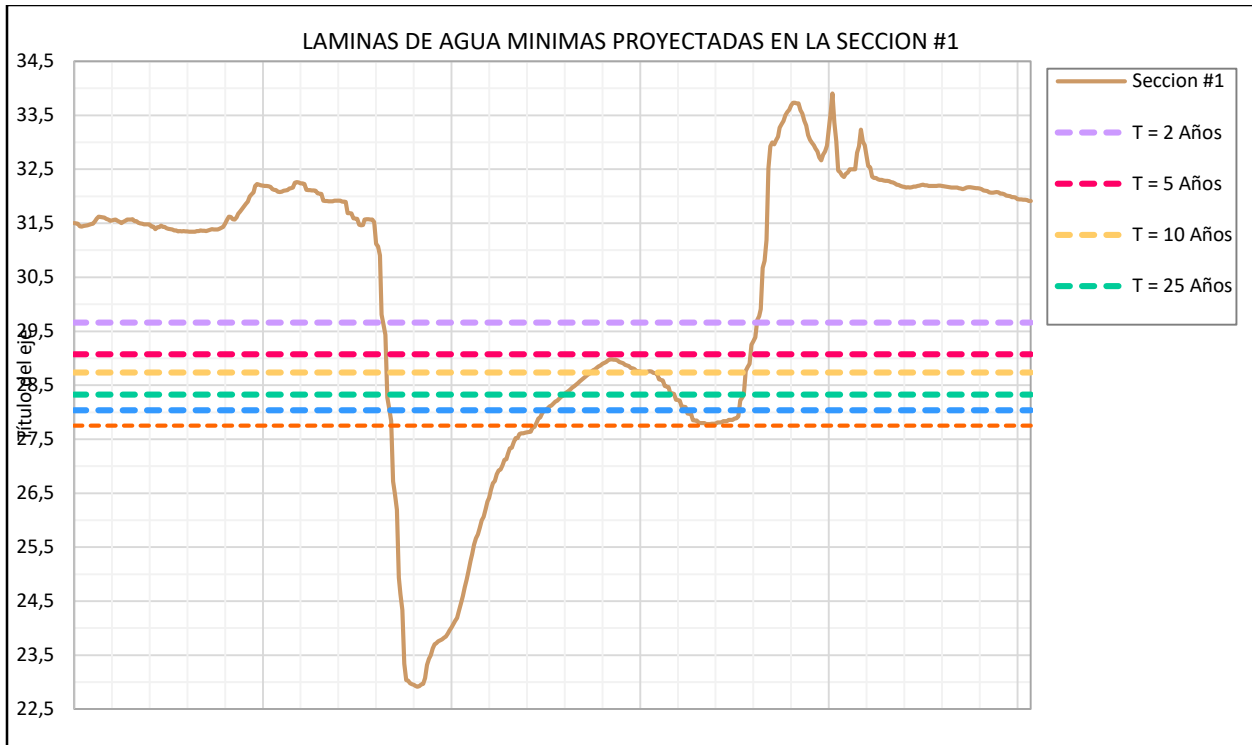


Figura 22. Niveles mínimos sección 1.  
 Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

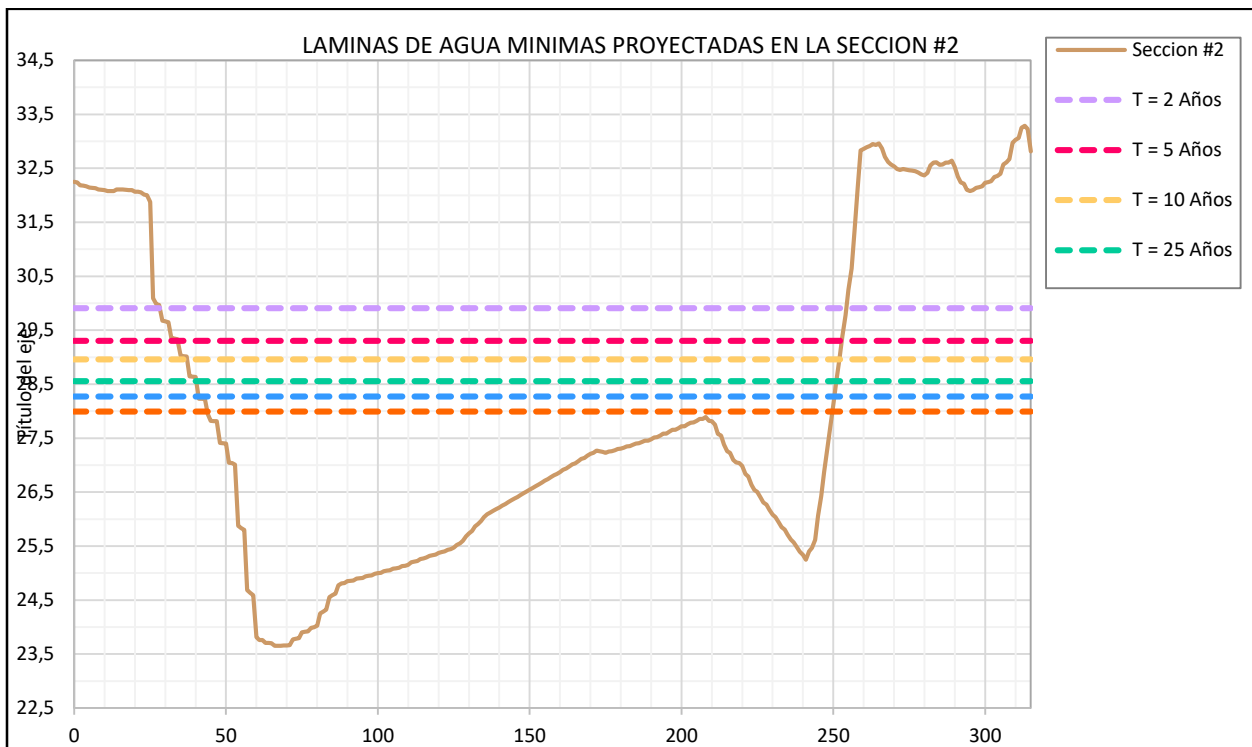


Figura 23. Niveles mínimos sección 2.  
 Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

### 6.1.4. Evaluación Hidráulica

Mediante el software Hydraulic Toolbox se evaluó la capacidad hidráulica de las secciones de estudio, determinando parámetros como, caudal, área de flujo, perímetro mojado, radio hidráulico, velocidad y esfuerzo tractivo.

Para el cálculo de las propiedades hidráulicas de las secciones se estimó un coeficiente Manning de 0.040 para las secciones, tomado de la Tabla 5-6 del libro Hidráulica de Canales Abiertos (Chow, 2004), correspondiente a corrientes en planicies limpias y serpenteantes.

#### 6.1.4.1. Capacidad Máxima

Debido a que los niveles máximos interpolados anteriormente sobrepasan las bancas de las secciones de estudio, se tendrán en cuenta las capacidades hidráulicas máximas que pueden soportar dichas secciones.

A continuación, se presentan los resultados:

Tabla 14.

Comportamiento hidráulico máximo

<b>Propiedades Hidráulicas</b>	<b>MAXIMA CAPACIDAD</b>	
	<b>Sección #1</b>	<b>Sección #2</b>
<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>	3632.051	3328.3
<b>Profundidad (m)</b>	8.584	8.423
<b>Área de Flujo (m<sup>2</sup>)</b>	859.287	1306.767
<b>Perímetro Mojado (m)</b>	214.77	242.746
<b>Radio Hidráulico (m)</b>	4.001	5.383
<b>Velocidad Promedio (m/s)</b>	4.227	2.547
<b>Tirante Normal (m)</b>	210.735	238.156
<b>Numero de Froude</b>	0.668	0.347
<b>Profundidad Critica (m)</b>	7.554	5.443
<b>Velocidad Critica (m/s)</b>	5.606	5.315
<b>Pendiente Critica (m/m)</b>	0.0109	0.01122
<b>Tirante Critico (m)</b>	202.337	217.512
<b>Esfuerzo Tractivo Máximo (N/m<sup>2</sup>)</b>	378.64	90.82



Propiedades Hidráulicas	MAXIMA CAPACIDAD	
	Sección #1	Sección #2
Esfuerzo Tractivo Promedio (N/m <sup>2</sup> )	176.483	58.045
Rugosidad de Manning	0.04	0.04

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

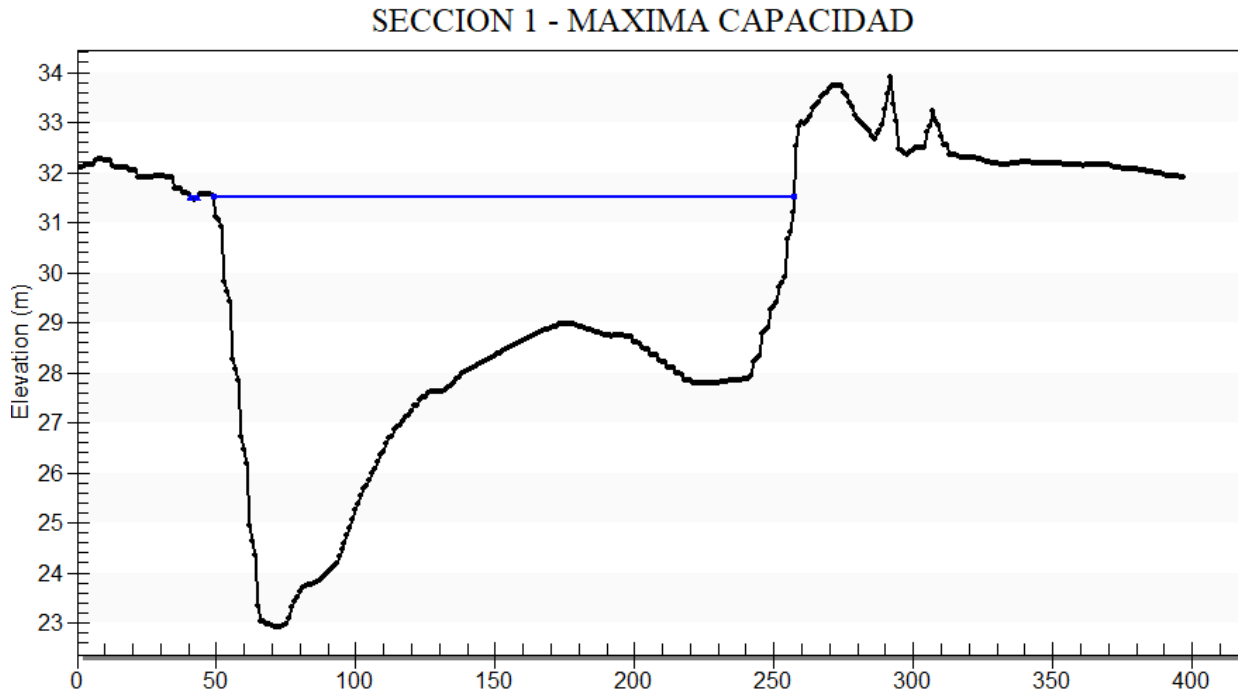


Figura 24. Sección 1, máxima capacidad hidráulica

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

## SECCION 2 - MAXIMA CAPACIDAD

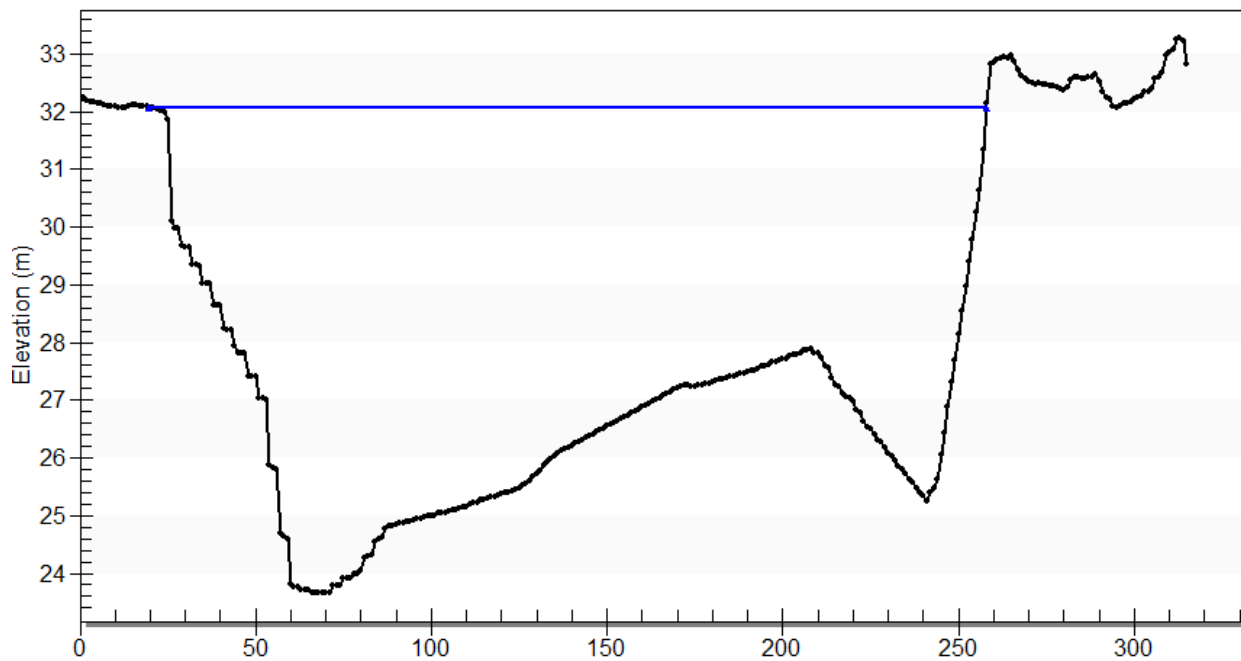


Figura 30. Sección 2, máxima capacidad hidráulica  
 Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

#### 6.1.4.2. Capacidad Mínima

Se determino para cada periodo de retorno su comportamiento hidráulico en las secciones escogidas obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 15.

Comportamiento hidráulico sección #1

Propiedades Hidráulicas	Sección #1 - Periodos de Retorno					
	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>	1464.143	948.673	799.846	641.359	556.071	563.952
<b>Profundidad (m)</b>	6.745	6.156	5.817	5.412	5.122	4.838
<b>Área de Flujo (m<sup>2</sup>)</b>	485.137	370.078	308.737	250.578	215.505	187.673
<b>Perímetro Mojado (m)</b>	200.974	195.845	160.811	132.911	112.928	78.252
<b>Radio Hidráulico (m)</b>	2.414	1.89	1.92	1.885	1.908	2.398
<b>Velocidad Promedio (m/s)</b>	3.018	2.563	2.591	2.56	2.58	3.005
<b>Tirante Normal (m)</b>	198.043	193.181	158.35	130.744	110.862	76.286
<b>Numero de Froude</b>	0.616	0.591	0.592	0.59	0.591	0.612
<b>Profundidad Critica (m)</b>	6.018	5.135	4.447	3.978	3.704	3.73
<b>Velocidad Critica (m/s)</b>	4.26	4.372	4.974	4.833	4.716	4.728

<b>Propiedades Hidráulicas</b>	<b>Sección #1 - Periodos de Retorno</b>					
	<b>2 años</b>	<b>5 años</b>	<b>10 años</b>	<b>25 años</b>	<b>50 años</b>	<b>100 años</b>
<b>Pendiente Crítica (m/m)</b>	0.01303	0.01289	0.01197	0.0122	0.0124	0.01238
<b>Tirante Crítico (m)</b>	185.921	111.451	63.785	55.748	52.037	52.357
<b>Esfuerzo Tractivo Máximo (N/m<sup>2</sup>)</b>	297.517	271.545	256.596	238.745	225.913	213.395
<b>Esfuerzo Tractivo Promedio (N/m<sup>2</sup>)</b>	106.478	83.352	84.685	83.161	84.177	105.789
<b>Rugosidad de Manning</b>	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

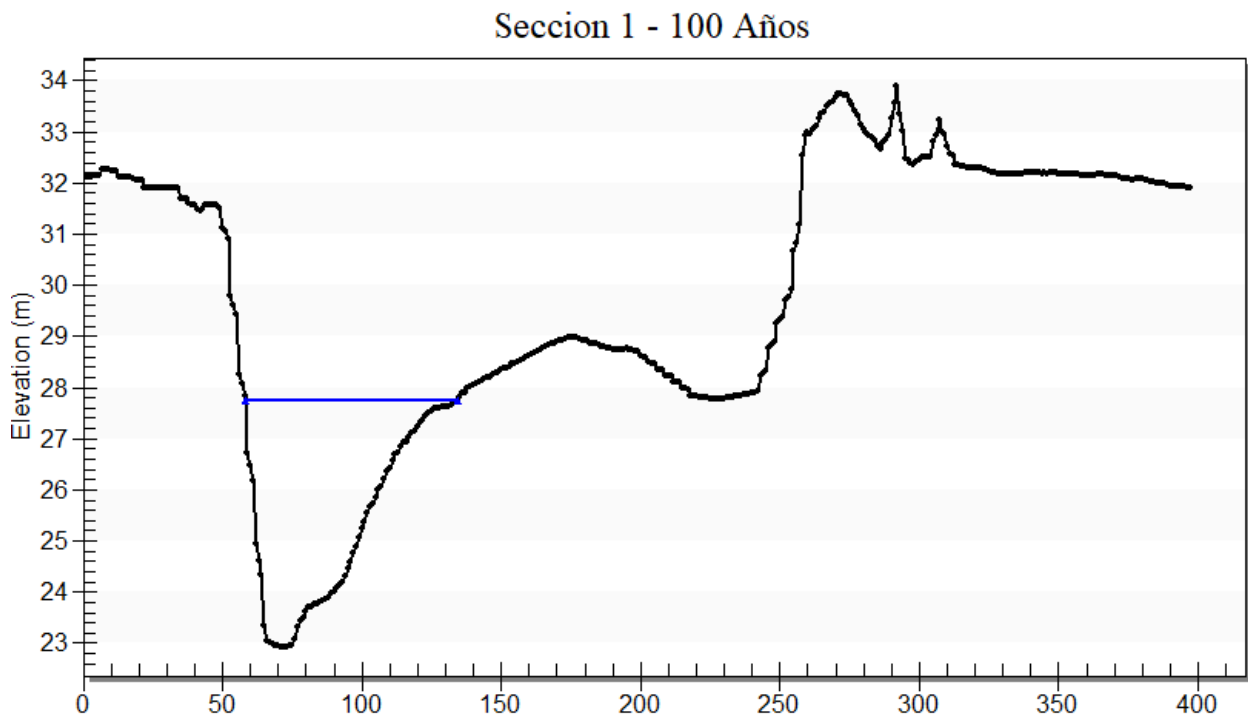


Figura 31. Sección 1- 100 años, mínima capacidad hidráulica

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

Tabla 16

Comportamiento hidráulico sección #1

<b>Propiedades Hidráulicas</b>	<b>Sección #2 - Periodos de Retorno</b>					
	<b>2 años</b>	<b>5 años</b>	<b>10 años</b>	<b>25 años</b>	<b>50 años</b>	<b>100 años</b>
<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>	1385.281	1029.573	846.343	646.466	518.202	418.797
<b>Profundidad (m)</b>	6.01	5.421	5.082	4.678	4.387	4.103
<b>Área de Flujo (m<sup>2</sup>)</b>	751.007	621.394	548.585	463.13	402.728	345.271
<b>Perímetro Mojado (m)</b>	226.356	219.999	216.162	212.046	208.339	195.157
<b>Radio Hidráulico (m)</b>	3.318	2.825	2.538	2.184	1.933	1.769
<b>Velocidad Promedio (m/s)</b>	1.845	1.657	1.543	1.396	1.287	1.213

Propiedades Hidráulicas	Sección #2 - Periodos de Retorno					
	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
Tirante Normal (m)	223.548	217.386	213.672	209.712	206.109	193.024
Numero de Froude	0.321	0.313	0.307	0.3	0.294	0.289
Profundidad Crítica (m)	4.041	3.613	3.322	3.003	2.762	2.547
Velocidad Crítica (m/s)	4.155	3.987	3.928	3.716	3.562	3.424
Pendiente Crítica (m/m)	0.0132	0.01358	0.01374	0.01425	0.01465	0.01503
Tirante Critico (m)	189.47	159.452	137.073	123.696	112.54	102.375
Esfuerzo Tractivo Máximo (N/m <sup>2</sup> )	64.801	58.453	54.798	50.435	47.298	44.238
Esfuerzo Tractivo Promedio (N/m <sup>2</sup> )	35.774	30.455	27.364	23.55	20.843	19.076
Rugosidad de Manning	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

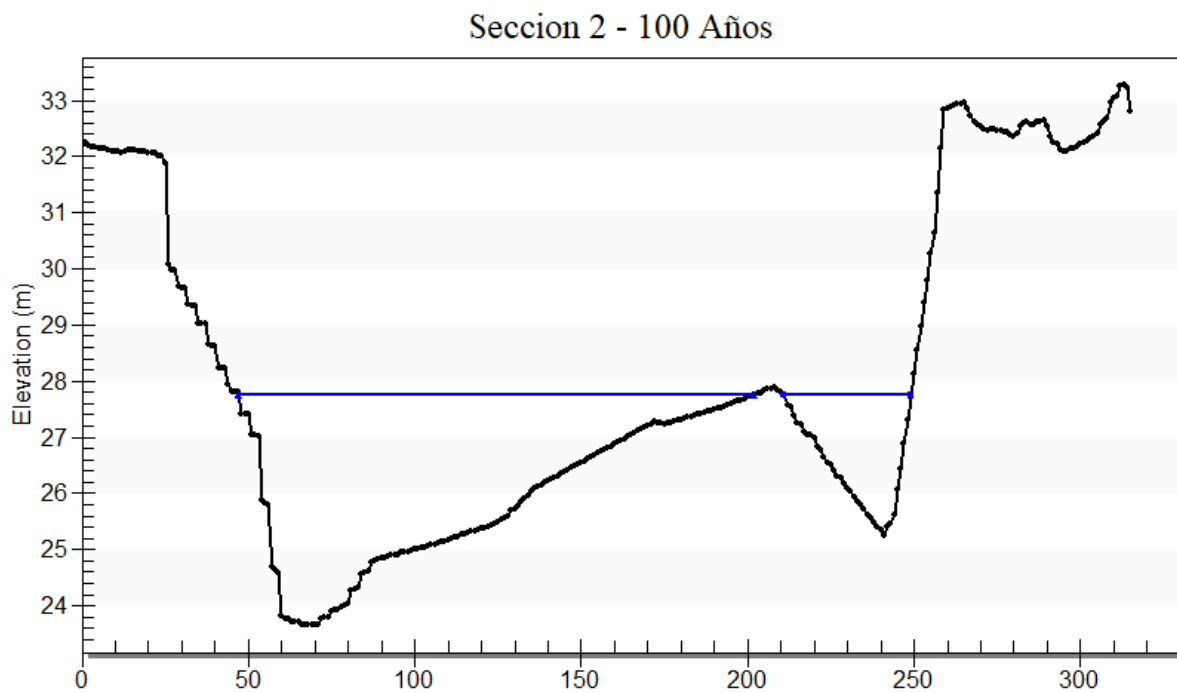


Figura 32. Sección 2- 100 años, mínima capacidad hidráulica

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

### 6.1.5. Evaluación del Potencial Erosivo.

A partir de los índices de plasticidad de cada material presente en las secciones se determinó el esfuerzo permisible mediante la Figura 33. Esfuerzo tractivo permisible en función del índice de plasticidad., los resultados son mostrados en la Tabla en donde se logra establecer que las secciones son altamente erosivas para todos los caudales provenientes de los periodos de

retorno escogidos, esto se debe a que los materiales predominantes son limos arcillosos y limos arenosos resultando en esfuerzos tractivos permisibles que son mucho menores en comparación a los esfuerzos determinados en los puntos 6.1.4.1 y 6.1.4.2.

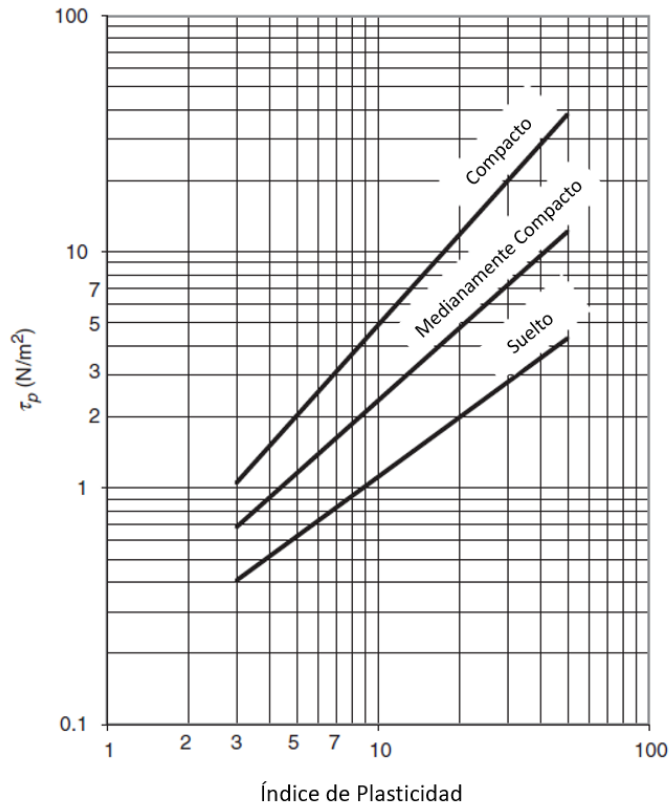


Figura 33. Esfuerzo tractivo permisible en función del índice de plasticidad.  
Nota: (A. Osman, 2006), adaptado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

Tabla 17.

Esfuerzo tractivo permisible para los estratos de suelo del estudio.

Material	Índice de Plasticidad	Esfuerzo tractivo Permisible (N/m <sup>2</sup> )
Estrato Dique A: Limos con algo de arcillas de color anaranjado	15.7	3.74
Estrato Dique B: Limos con pocas arcillas de color marrón	9.6	2.26
Estrato del dique C: Arcillas de humedad baja, plasticidad alta y consistencia muy firme	27.1	17.84
Fundación aluvial A: Limos de color verde aceituna, humedad media, plasticidad media	10.6	2.50

Material	Índice de Plasticidad	Esfuerzo tractivo Permisible (N/m <sup>2</sup> )
Fundación aluvial B Arcilla limosa de color verde aceituna, humedad baja, plasticidad media, muy firme	14	7.67

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

## 6.2. Análisis Geotécnico

Mediante los parámetros del suelo presentes en la Tabla 2 fue posible realizar la caracterización geotécnica de los estratos de suelo de las secciones 1 y 2. La estratigrafía y parámetros de resistencia del suelo fueron obtenidos del estudio geotécnico proporcionado por el Fondo de Adaptación (Fondo de Adaptacion, 2015) que presenta ensayos de Penetración con Cono (CPT) y Penetración Estándar (SPT).

Tabla 168.

Propiedades de suelo para los estratos de la sección 1.

SECCION 1						
Material	Consistencia	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Su (kPa)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	
Arcillas de humedad baja, plasticidad alta y consistencia muy firme	Muy Firme	18.35	124.4	15	21	
Limos de color verde aceituna, humedad media, plasticidad media	Medio Firme	18	45	17.3	15	
Deposito aluvial de arenas finas con algo de arena media gruesa	Medio Suelta	17.65	10.3	5	36	

Nota: Elaborado por Y. llanos y M.A. Ortiz

Tabla 19.

Propiedades de suelo para los estratos de la sección 2.

SECCION 2						
Material	Consistencia	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Su (kPa)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	
Limos con pocas arcillas de color marrón	Firme	17.5	100	10	32	
Limos de color verde aceituna, humedad media, plasticidad media	Medio Firme	18	45.7	17.3	15	
Arcillas de humedad baja, plasticidad alta y consistencia muy firme	Muy Firme	18.35	124.4	15	21	

Material	SECCION 2				
	Consistencia	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Su (kPa)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)
Arcilla limosa de color verde aceituna, humedad baja, plasticidad media, muy firme	Muy Firme	17.7	120.9	5	29
Deposito aluvial de arenas finas con algo de arena media gruesa	Medio Suelta	17.65	10.3	5	36

Nota: Elaborado por Y. Ilanos y M.A. Ortiz

La Figura 14 y la Figura 15 muestran una estimación de la inclinación de las bancas de las secciones, mostrando la sección 1 unas inclinaciones aproximadas de  $15.86^\circ$  para la banca izquierda y  $8.49^\circ$  para la banca derecha, la sección 2 muestra inclinaciones de  $7.51^\circ$  para la banca izquierda y  $16.10^\circ$  para la banca derecha, esto se realizó para determinar su influencia en los escenarios de falla.

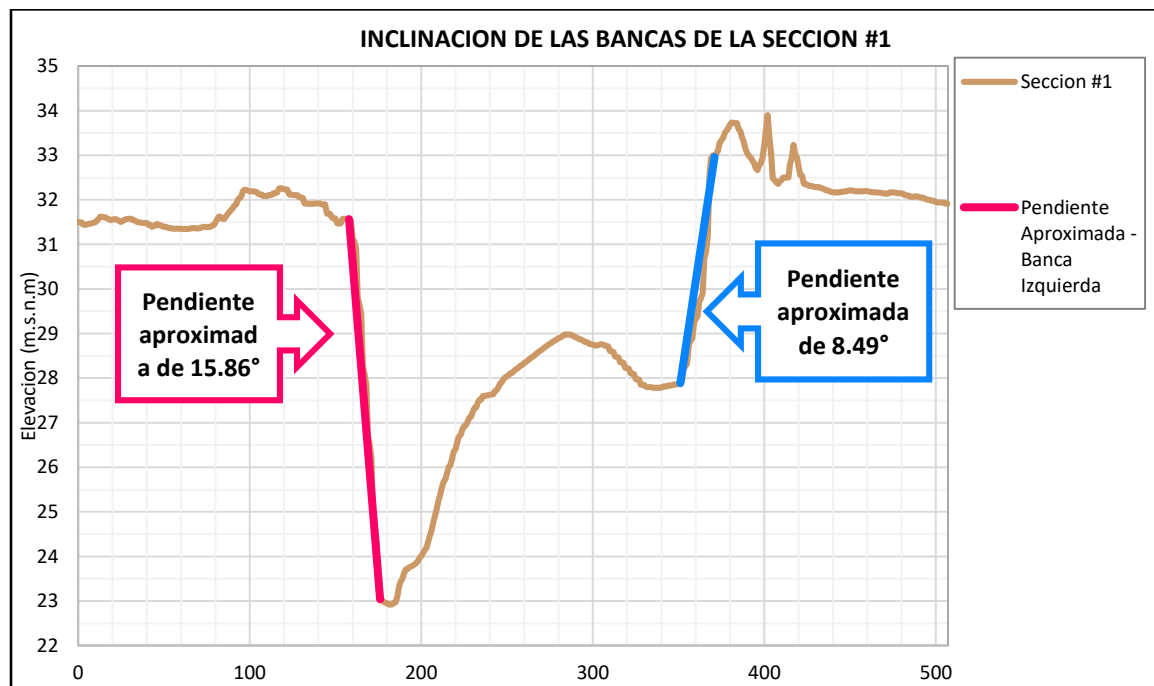


Figura 34. Pendiente aproximada de la sección 1.

Nota: Elaborado por Y. Ilanos y M.A. Ortiz

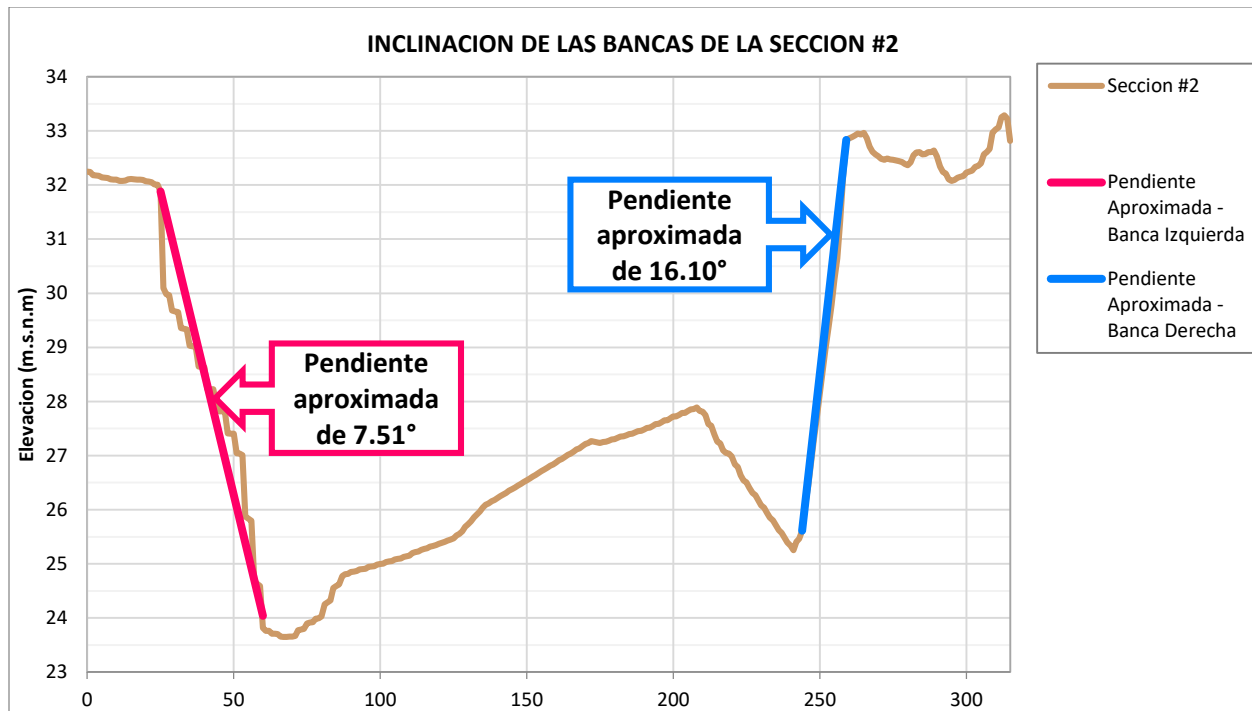


Figura 15. Pendiente aproximada de la sección 2.

Nota: Elaborado por Y. llanos y M.A. Ortiz

Las secciones de estudio fueron evaluadas para dos escenarios:

El primer escenario consiste en evaluar la estabilidad de las riberas con el nivel freático obtenido del estudio geotécnico proporcionado por el Fondo de Adaptación (Fondo de Adaptación, 2015) y mostrado en la Figura 9 y la Figura 10, los criterios de seguridad se presentan a continuación.

Tabla 20.

Factores de seguridad básicos mínimos directos

Condición	$F_{SBM}$		$F_{SBM}$	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1.10	1.00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes – Condición estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes – Condición Seudo-estatica con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1.05	1.00 (*)	No se permite	No se permite

(\*): Los parámetros sísmicos seudo estáticos de Construcción serán el 50% de los de diseño.



Nota: (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010) Adaptado por Y. Ilanos y M.A. Ortiz

Tabla 21.

Factores de seguridad recomendados para taludes nuevos, considerando una lluvia con período de retorno de diez años.

Riesgo económico	Riesgo para vida	Factor de seguridad recomendado contra pérdidas de vidas para una lluvia con periodo de retorno de diez años		
		Despreciable	Bajo	Alto
Factor de seguridad recomendado contra pérdidas económicas para una lluvia con periodo de retorno de diez años.	<b>Despreciable</b>	>1	1.2	1.4
	<b>Bajo</b>	1.2	1.2	1.4
	<b>Alto</b>	1.4	1.4	1.4

Nota: (Escobar Potes & Duque Escobar, 2016) Adaptado por Y. Ilanos y M.A. Ortiz

En general la definición de un valor aceptable de valor de FS depende de varios factores: Calidad de la exploración de campo, calidad y cantidad de ensayos de laboratorio, métodos de cálculo utilizados, tiempo que actúan las sollicitaciones, homogeneidad en el terreno, seguimiento al proyecto antes, durante y después de la construcción, consecuencias de falla total o parcial, entre otros.

La sección 1, en su banca izquierda presenta el siguiente comportamiento de falla (ver Figura ) el cual está dado por el método Morgenstern-Price con un factor de seguridad de 1.072, este valor indica que la banca izquierda bajo estos factores se encuentra en un estado limite y no es totalmente segura.

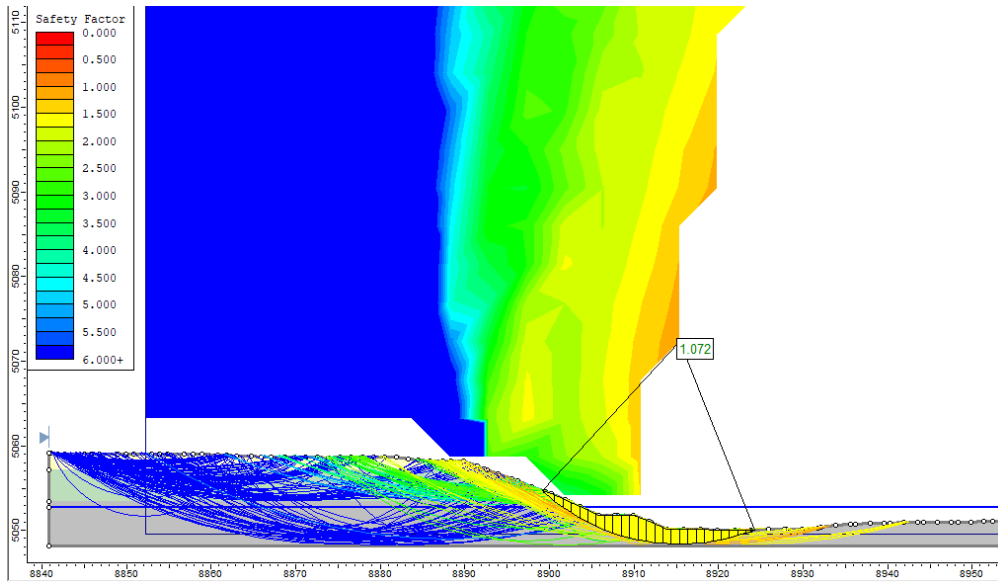


Figura 36 Escenarios de falla rivera izquierda sección 1  
 Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

A continuación, se presenta una tabla resumen con los factores de seguridad producto de los cuatro métodos de análisis de falla de taludes.

Tabla 17.

Resumen de resultados de factor de seguridad del primer escenario. Sección 1 – izquierda

<b>METODO</b>	<b>FACTOR DE SEGURIDAD</b>
Bishop Simplificado	1.08343
Janbu Simplificado	1.07456
Spencer	1.07428
Morgenstern-Price	1.07185

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

La sección 1, en su banca derecha presenta el siguiente comportamiento de falla (ver

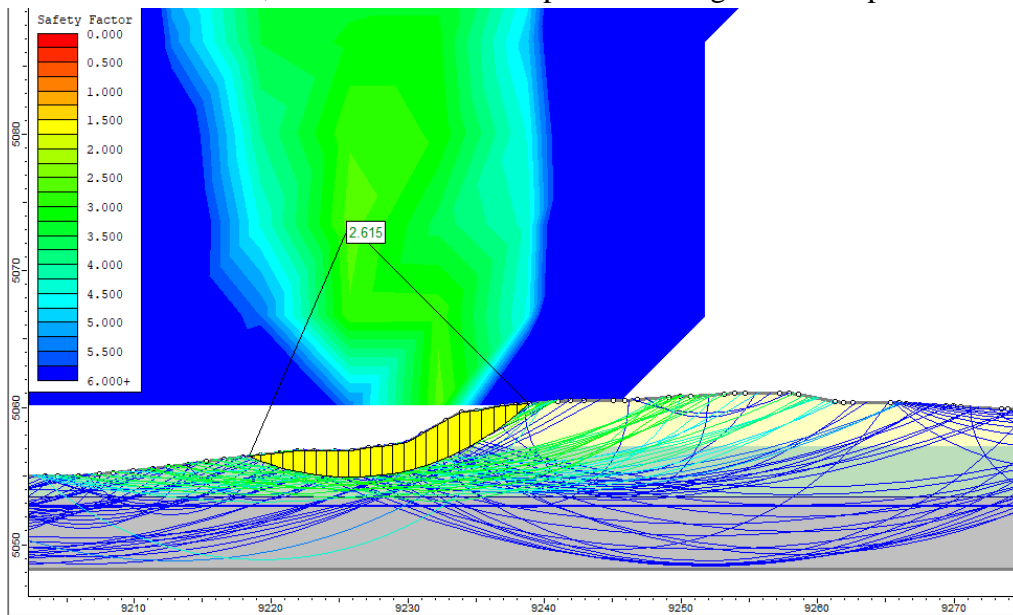


Figura ) el cual está dado por el método Jambu con un factor de seguridad de 2.615, este valor indica que la banca derecha bajo estos factores se mantiene segura y no presenta falla.

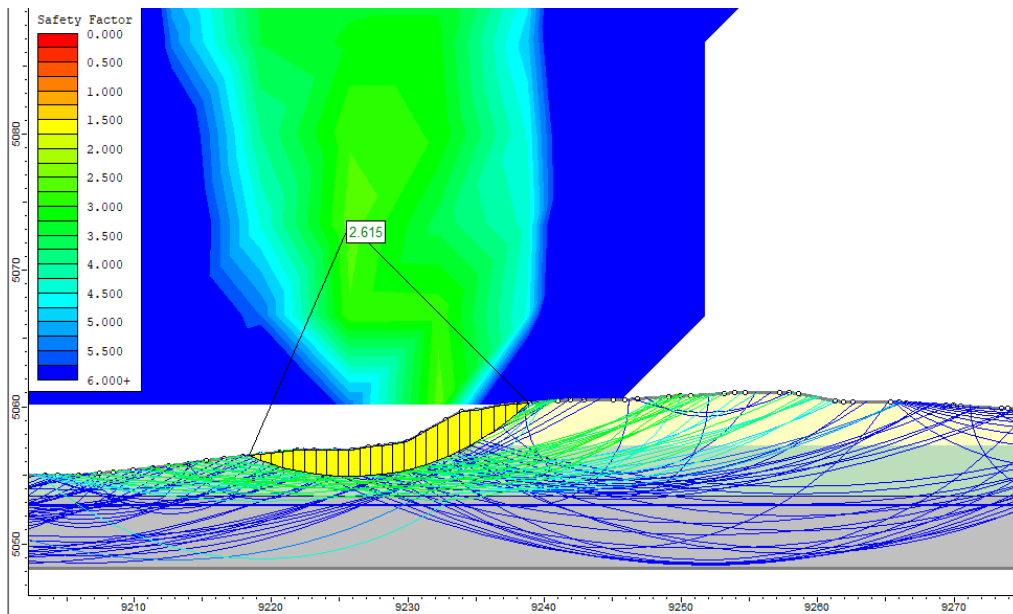


Figura 37. Escenarios de falla rivera derecha sección 1  
Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

A continuación, se presenta una tabla resumen con los factores de seguridad producto de los cuatro métodos de análisis de falla de taludes.

Tabla 23.

Resumen de resultados de factor de seguridad del primer escenario. Sección 1 - derecha

<b>METODO</b>	<b>FACTOR DE SEGURIDAD</b>
Bishop Simplificado	2.65417
Janbu Simplificado	2.61546
Spencer	2.65527
Morgenstern-Price	2.65470

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

La sección 2, en su banca derecha presenta el siguiente comportamiento de falla (ver Figura ) el cual está dado por el método Jambu con un factor de seguridad de 2.284, este valor indica que la banca derecha bajo estos factores se mantiene segura y no presenta falla.

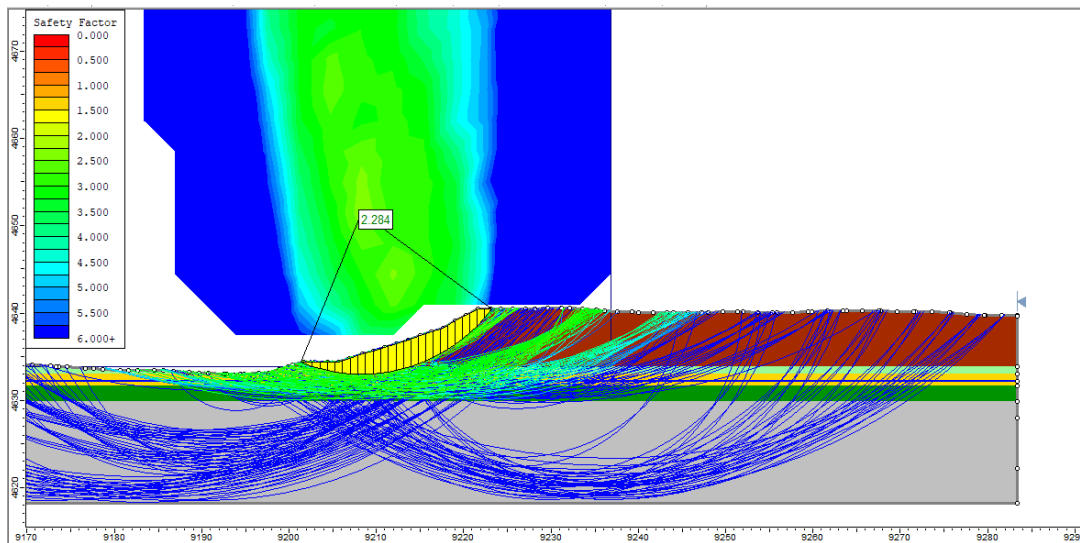


Figura 38. Escenarios de falla rivera derecha sección 2

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

A continuación, se presenta una tabla resumen con los factores de seguridad producto de los cuatro métodos de análisis de falla de taludes.

Tabla 184.

Resumen de resultados de factor de seguridad del primer escenario. Sección 2 - derecha

<b>METODO</b>	<b>FACTOR DE SEGURIDAD</b>
Bishop Simplificado	2.4153
Janbu Simplificado	2.2835
Spencer	2.4053
Morgenstern-Price	2.3999

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

La sección 2, en su banca izquierda presenta el siguiente comportamiento de falla (ver Figura ) el cual está dado por el método Jambu con un factor de seguridad de 4.166, este valor indica que la banca izquierda bajo estos factores se mantiene segura y no presenta falla.

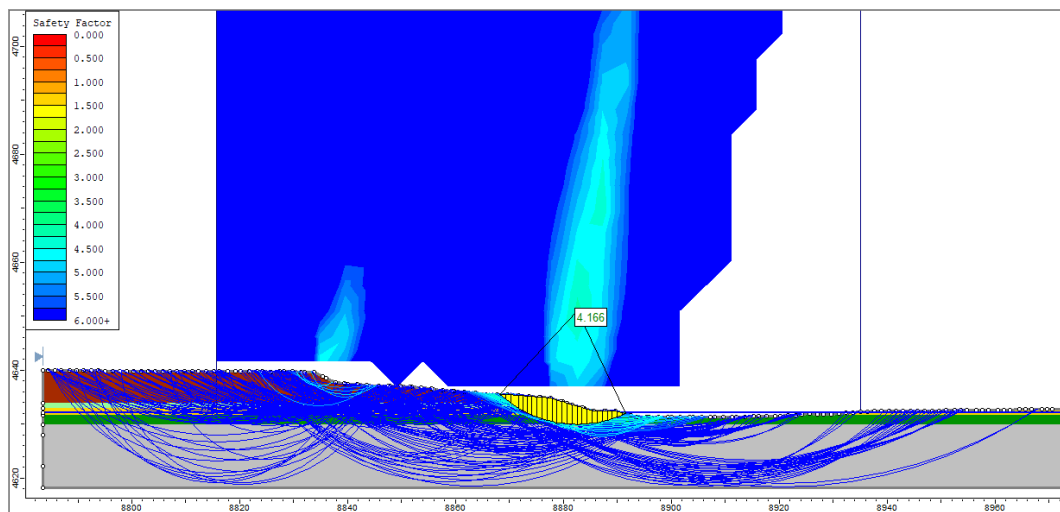


Figura 39. Escenarios de falla rivera izquierda sección 2

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

A continuación, se presenta una tabla resumen con los factores de seguridad producto de los cuatro métodos de análisis de falla de taludes.

Tabla 195

Resumen de resultados de factor de seguridad del primer escenario. Sección 2 - izquierda

<b>METODO</b>	<b>FACTOR DE SEGURIDAD</b>
Bishop Simplificado	4.4180

Janbu Simplificado	4.1661
Spencer	4.4250
Morgenstern-Price	4.4255

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

El segundo escenario consiste en evaluar la estabilidad de las riberas con la máxima capacidad hidráulica obtenidas con anterioridad a las secciones estudiadas en el presente trabajo.

La sección 1, en su banca izquierda presenta el siguiente comportamiento de falla (ver Figura) el cual está dado por el método Janbu con un factor de seguridad 0.219, valor indica que la banca izquierda bajo estos factores es insegura y tiene una probabilidad de falla alta, mostrando coherencia con el análisis de las imágenes satelitales realizado en el inciso 6.1.3.1.

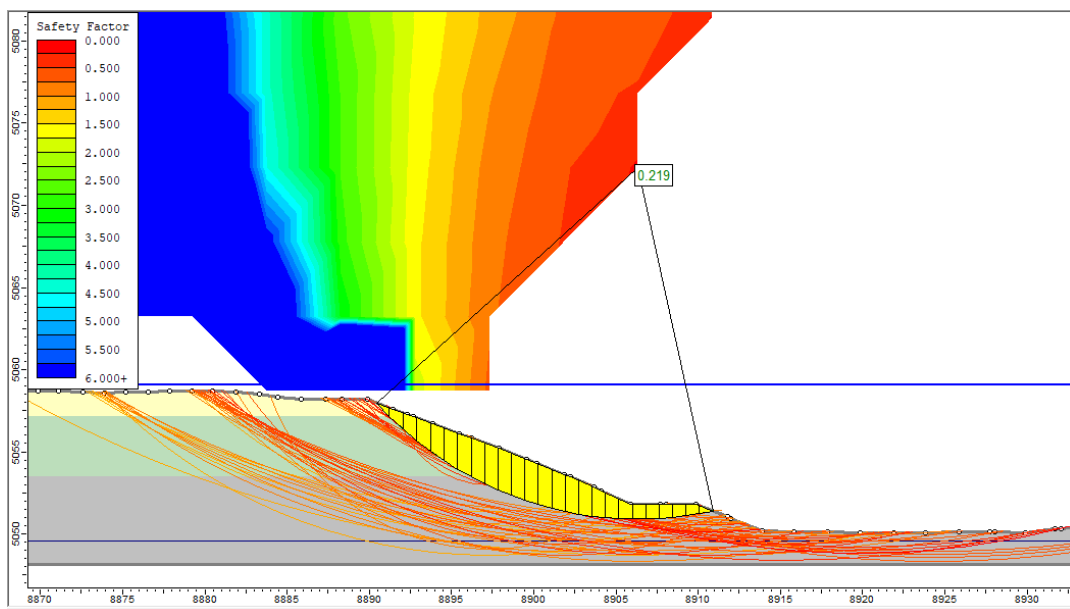


Figura 40. Escenarios de falla rivera izquierda sección 1

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

A continuación, se presenta una tabla resumen con los factores de seguridad producto de los cuatro métodos de análisis de falla de taludes.

Tabla 206.

Resumen de resultados de factor de seguridad del segundo escenario. Sección 1 - izquierda

<b>METODO</b>	<b>FACTOR DE SEGURIDAD</b>
Bishop Simplificado	0.21929
Janbu Simplificado	0.27033
Spencer	0.36200
Morgenstern-Price	0.37238

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

La sección 1, en su banca derecha presenta el siguiente comportamiento de falla (ver Figura ) el cual está dado por el método Spencer con un factor de seguridad 1.102, este valor indica que la banca derecha bajo estos factores se encuentra en un estado limite y no es totalmente segura.

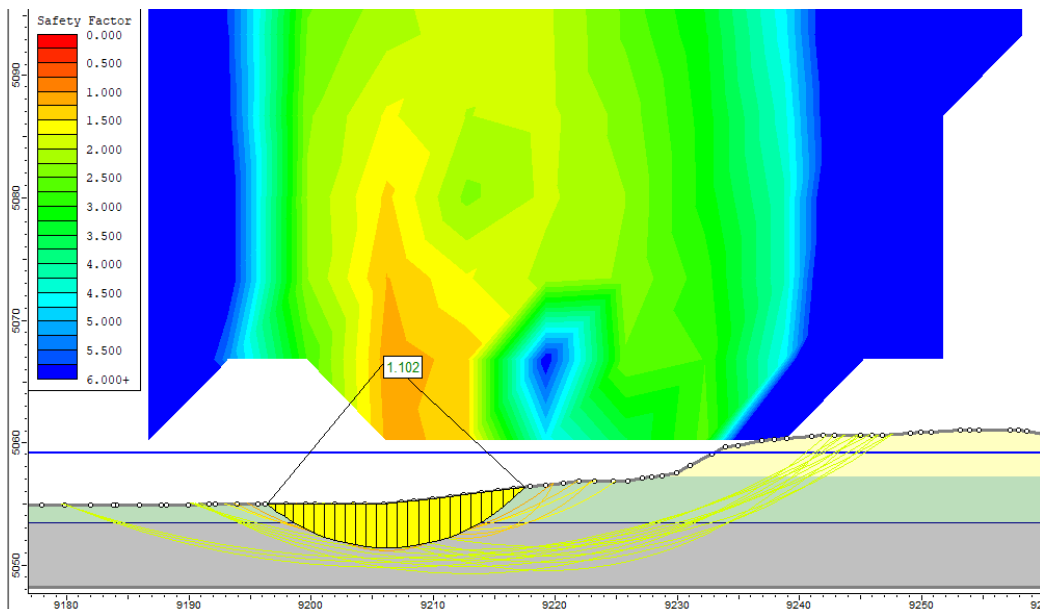


Figura 41. Escenarios de falla rivera derecha sección 1

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

A continuación, se presenta una tabla resumen con los factores de seguridad producto de los cuatro métodos de análisis de falla de taludes.

Tabla 217.

Resumen de resultados de factor de seguridad del segundo escenario. Sección 1 - derecha

<b>METODO</b>	<b>FACTOR DE SEGURIDAD</b>
Bishop Simplificado	1.10471
Janbu Simplificado	1.12771

Spencer	1.10222
Morgenstern-Price	1.10415

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

La sección 2, en su banca izquierda presenta el siguiente comportamiento de falla (ver Figura 16) el cual está dado por el método Bishop con un factor de seguridad de 1.832, este valor indica que la banca izquierda bajo estos factores se mantiene segura y no presenta falla.

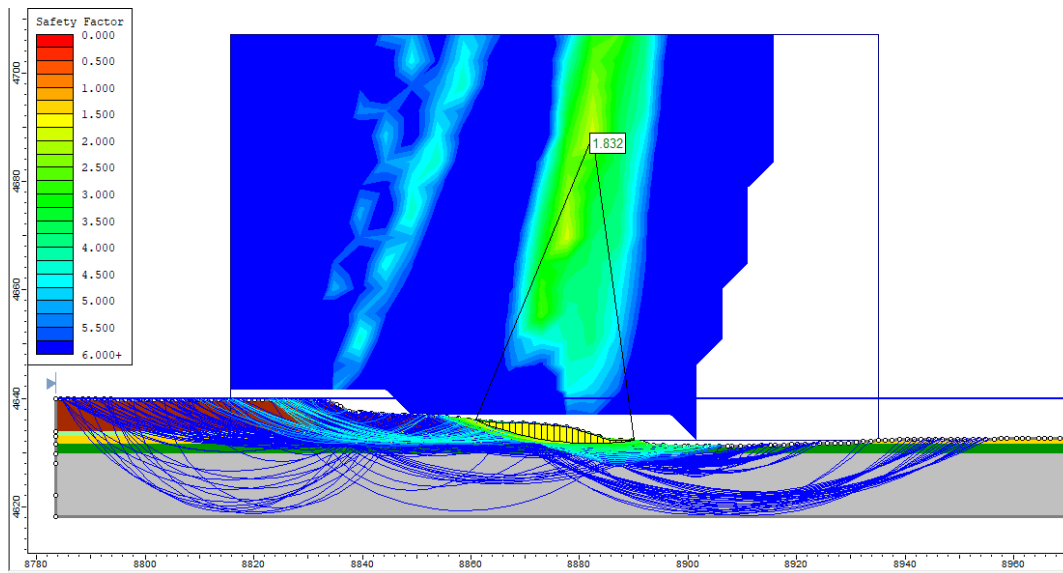


Figura 16. Escenarios de falla rivera izquierda sección 2

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

A continuación, se presenta una tabla resumen con los factores de seguridad producto de los cuatro métodos de análisis de falla de taludes.

Tabla 228.

Resumen de resultados de factor de seguridad del segundo escenario. Sección 2 - izquierda

<b>METODO</b>	<b>FACTOR DE SEGURIDAD</b>
Bishop Simplificado	1.8317
Janbu Simplificado	1.8572
Spencer	1.8487
Morgenstern-Price	1.8491

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz



La sección 2, en su banca derecha presenta el siguiente comportamiento de falla (ver Figura ) el cual está dado por el método Bishop con un factor de seguridad 1.432, este valor indica que la banca derecha bajo estos factores se mantiene segura y no presenta falla.

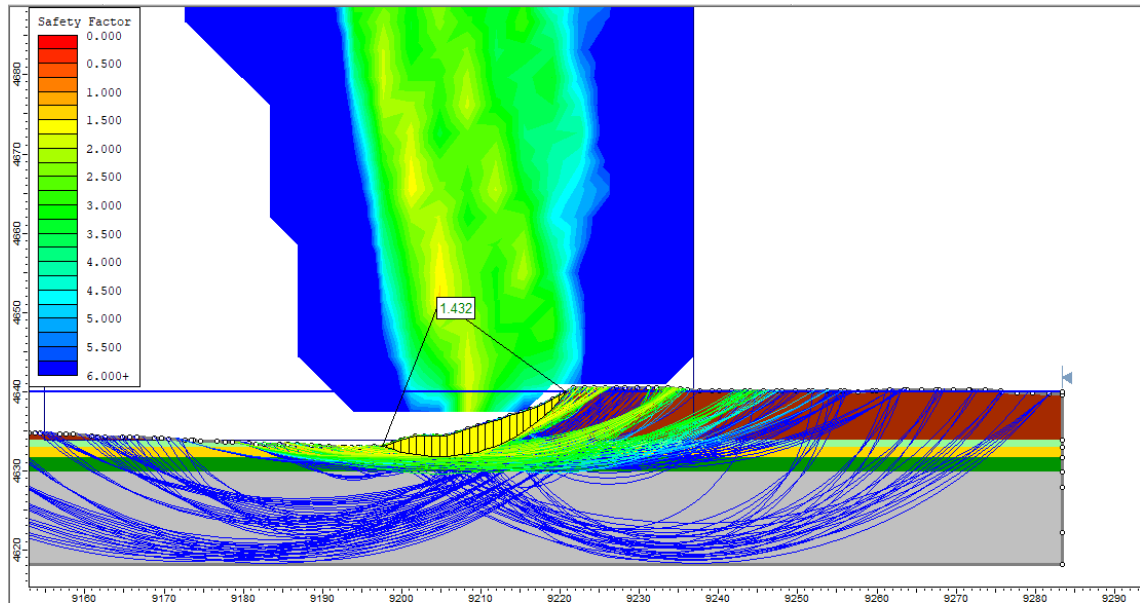


Figura 43. Escenarios de falla rivera derecha sección 2  
 Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

A continuación, se presenta una tabla resumen con los factores de seguridad producto de los cuatro métodos de análisis de falla de taludes.

Tabla 239.

Resumen de resultados de factor de seguridad del segundo escenario. Sección 2 - derecha

METODO	FACTOR DE SEGURIDAD
Bishop Simplificado	1.4315
Janbu Simplificado	1.4508
Spencer	1.5524
Morgenstern-Price	1.5541

Nota: Elaborado por Y. Llanos y M.A. Ortiz

## 7. Conclusiones

A partir del análisis hidrológico se estimaron los diferentes periodos de retorno de niveles y caudales en las secciones transversales de interés y se estimaron los esfuerzos cortantes actuantes de cada uno de estos eventos sobre el material que compone los taludes. Para todos los escenarios hidrológicos evaluados el esfuerzo cortante actuante es superior al esfuerzo cortante permisible de material que componen la orilla, por lo que además de los procesos de falla de taludes puede estar ocurriendo de erosión.

El estudio de los parámetros hidrológicos e hidráulicos determinados en el desarrollo del trabajo permiten observar que con anterioridad se presentó un evento atípico que genero la falla de la banca izquierda de las dos secciones escogidas, pues los resultados de los niveles máximos de la lámina de agua al ser superpuestos en el MDE muestran un desborde para todos los periodos de retorno estimados en la investigación. Por lo anterior, un análisis detallado del MDE evidenció la construcción de un dique en cercanía de las secciones, funcionando como estructura de contención, pues al superponer los niveles máximos de un periodo de retorno de 100 años muestra un comportamiento excelente.

Para la sección 1 en el primer escenario de falla donde se evaluó el nivel freático en las secciones se presentó un comportamiento de la banca izquierda en un estado limite presentando un valor muy cercano a la falla, mientras que la banca derecha se mantiene segura, la sección 2 mostró un comportamiento seguro en sus bancas; en el segundo escenario de falla se evaluó el comportamiento de las secciones con la capacidad hidráulica máxima y los resultados arrojados muestran que en la sección 1 su banca izquierda es insegura y tiene una probabilidad de falla

alta, mientras la banca derecha se encuentra en un estado limite, para la segunda sección se presenta seguridad en ambas bancas.

Los resultados de los escenarios permiten concluir que la sección 1 presenta menores valores de factor de seguridad en la banca izquierda que indica inseguridad, debido principalmente a la presencia del estrato arenoso de baja cohesión y compacidad media a suelta. Además de esto, la banca izquierda tiene una inclinación pronunciada, estos dos factores generan la inestabilidad mostrada; la sección 2 cuenta con inclinaciones suaves en sus bancas, además de esto las propiedades del suelo tienen unas características firmes que generan factores de seguridad más elevados en comparación de la sección 1.

Al verificar el comportamiento histórico del río mediante imágenes satelitales se evidenciaron varios eventos de desbordamiento en años pasados que tuvieron como punto de incidencia el margen izquierdo del río Cauca; estas observaciones permiten concluir una correlación entre el estudio hidrológico y los escenarios de falla evaluados, pues el MDE señala desbordamientos para eventos de nivel máximo sobre la banca izquierda, además de señalar una pérdida de material, mientras que el estudio geotécnico muestra que la banca izquierda es insegura y presenta alta probabilidad de falla.

Aledaño a las secciones de estudio se encuentra la población de San Jacinto del Cauca, teniendo en cuenta el análisis de resultados y la inseguridad que presenta la banca izquierda del río es necesario implementar obras de estabilización de taludes en ella. Dentro de las obras de estabilización se pueden realizar muros de contención, tablo estacado, entre otras.

### Referencias

- A. Osman, A. (2006). *Open Channel Hydraulics*.
- ASCE Task Committee on Hydraulics, Bank Mechanics, and Modeling of River Width Adjustment. (2008). *Streambank Erosion and River Width Adjustment*.
- Carlos, R., Ricardo, B., & María, S. (2006). *Modelación morfológica del río Cauca en el tramo La Balsa-Juanchito*. Cali.
- CDMB. (2005). *NORMAS TECNICAS PARA EL CONTROL DE EROSION Y PARA LA REALIZACION DE ESTUDIOS GEOLOGICOS GEOTECNICOS E HIDROLOGICOS*. Bucaramanga: CDMB.
- Chen, C.-H., Hseh, T.-Y., & Yang, J.-C. (2017). *Investigating effect of the water level variation and surface tension crack on riverbank stability*. Taiwán.
- Chow, V. (2004). Desarrollo del flujo uniforme y de sus ecuaciones. In V. T. Chow, *Hidraulica de Canales Abiertos* (pp. 108-111).
- Departamento Nacional De Infra-Estrutura De Transportes De Brasil. (2005). *MANUAL DE HIDROLOGIA BÁSICA PARA ESTRUTURAS DE DRENAGEM*. RIO DE JAINEIRO.
- Díaz, J. S. (1998). *Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga: Ingeniería de Suelos Ltda.
- Docherty, C., Hannah, D., Riis, T., Milher, A., & Leth, S. R. (2017). *Large thermo-erosional tunnel for a river in northeast Groenland*. Groenland.
- Farias, H. D., Pilán, M. T., Olmos, L. A., & Pece, F. J. (2008). *Erosión general en ríos aluviales*. Argentina.
- Florsheim, J. L., Mount, J. F., & Chin, A. (2008). *Bank erosion as a desirable attribute of rivers*.

- Fondo de Adaptacion. (2015). *Evaluacion geotecnica y estructural de hasta 28 obras de proteccion hidraulica localizadas en los 11 municipios que conforman el nucleo de la region de la mojana*.
- González, Á. J. (1999). Estimativos de Parametros Efectivos de Resistencia con el SPT. X *Jornadas Geotecnicas de la Ingeniería Colombiana* (p. 12). Bogotá: SCG.
- Julien, P. (2002). *River Mechanics*. Springer.
- Liang, C., Jaksa, M., & B. Onstendorf, L. k. (2014). *Influence of river level fluctuations and climate on riverbank stability*. Australia.
- McMahon, J. M., Olley, J. M., Brooks, A. P., Smart, J. C., Rose, C. W., Curwen, G., . . . Stewart-Koster, B. (2017). *An investigation of controlling variables of riverbank erosion in subtropical Australia*. Australia.
- Morgan, R. (2009). *Soil erosion and conservation*. John Wiley & Sons.
- Navid Kimiaghali, Masand Goharrokhi, Shawn P. Clark, Habib Ahmari. (2015). Acomprehensive fluvial geomorphology study of riverbank erosion on the River in Winnipeng, Manitoba, Canada. *Journal of Hydrology*, 1488-1498.
- SUAREZ DIAZ, J. (1998). CARACTERIZACION DE LOS MOVIMIENTOS. In J. SUAREZ DIAZ, *DESLIZAMIENTOS Y ESTABILIDAD DE TALUDES EN ZONAS TROPICALES* (pp. 8-10). Bucaramanga: Ingenieria de Suelos Ltda.
- Suarez Diaz, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga: Ingeniería de Suelos Ltda.
- Y. Y. Ban, T. W. Lei, Z. Q. Liu, C. Chen. (2016). Comparative study of erosion processes of thawed and non-frozen soil by concentrated meltwater flow. *CATENA*, 153-159.