

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

PROPUESTA DE RESTAURACIÓN DEL TRAMO URBANO DEL RÍO
RÍMAC MEDIANTE LA APLICACIÓN DE BIOINGENIERÍA

Tesis para optar el Título de **INGENIERO CIVIL**, que presenta el bachiller:

Joel Manuel Fernández Espinoza

ASESOR: Dr. Ronald Gutiérrez Llantoy

Lima, mayo del 2015

RESUMEN

El presente trabajo de tesis analiza y evalúa una propuesta de restauración del tramo urbano del río Rímac, mediante la aplicación de una alternativa de bioingeniería. Con ello se busca el establecimiento de una barrera de vegetación en los márgenes del río con el propósito de la reducción de la velocidad de escorrentía, estabilización del terreno y por consiguiente el control de la erosión.

La zona de estudio se encuentra ubicada dentro de la subcuenca Bajo río Rímac y presenta una longitud de 1 080 metros. Esta comprende los distritos de San Martín de Porres, Lima y el Rímac. Inicialmente, se recopiló y analizó información referente a la caracterización de la zona de estudio. Estas implicaron la definición de los parámetros geotécnicos e hidráulicos. Asimismo, de acuerdo a las visitas de campo se identificaron puntos críticos con potenciales fallas en voladizo (cantilever), zonas de inundación y acumulación de materiales sólidos.

Con el fin de analizar y determinar la conducta hidráulica del tramo para las condiciones actuales, se procedió a realizar un modelamiento hidráulico. En ese aspecto, se estimó previamente el valor del coeficiente de rugosidad de Manning (n), así como la definición de la información geométrica, hidrométrica y pendiente del terreno. En consecuencia se desarrolló la simulación para un régimen permanente y no permanente, en donde se obtuvieron mapas de inundaciones, variación de velocidades y esfuerzos cortantes, así como la elevación de la superficie de agua. Asimismo, se evaluó la estabilidad global del terreno mediante análisis estáticos y pseudo-estáticos para la determinación de factores de seguridad.

Con base en los resultados obtenidos para las condiciones actuales, se propuso la utilización del vetiver como alternativa de bioingeniería para el establecimiento de la barrera de vegetación en los márgenes del río. En consecuencia, para determinar la variación de la conducta hidráulica y de los factores de seguridad, se procedió a realizar un nuevo modelamiento hidráulico y análisis de estabilidad global con las consideraciones de la propuesta de solución.

Mediante la comparación de ambos escenarios se corroboró las asunciones iniciales en disminución de la velocidad y aumento del coeficiente de seguridad. Por consiguiente se comprobó que la utilización del vetiver como método de bioingeniería constituye una herramienta integral, pues permite mejorar las condiciones mecánicas, hidráulicas y medioambientales de tramo analizado.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Propuesta de restauración del tramo urbano del río Rímac mediante la aplicación de bioingeniería".
Área : Hidráulica - Investigación
Asesor : Dr. Ronald Gutiérrez
Alumno : JOEL MANUEL FERNÁNDEZ ESPINOZA
Código : 2009.0036.7.412
Tema N° : 58
Fecha : Lima, 05 de febrero de 2015



ANTECEDENTE

El tramo urbano del río Rímac sufre constantemente alteraciones morfológicas debido a sus características geométricas, geotécnicas, hidráulicas y al avance progresivo de las poblaciones ubicadas en las riberas del río. Debido a estos factores se produce el fenómeno de erosión que no solo pone en peligro su estabilidad, sino también a las estructuras viales y edificaciones comprendidas en este tramo.

Este proceso erosivo comienza con la socavación del talud al nivel de las aguas, el cual va creando una zanja en la base del mismo, debilitándolo y ampliando su zona de falla. A este fenómeno se le conoce como falla en voladizo o cantilever y se caracteriza por dejar grandes masas de tierra sin soporte. Estas se van desprendiendo progresivamente en bloques cuando hay aumento de caudal, creando una zona crítica. En este contexto, se generó la necesidad de plantear alternativas de solución con el fin de estabilizar y controlar estos fenómenos, además de recuperar y devolver el valor natural de este espacio.

OBJETIVO

El objetivo principal de la tesis es presentar una propuesta para la restauración de un tramo del río Rímac, perteneciente al área urbana, mediante la aplicación de una alternativa de bioingeniería. Este método se basa en el establecimiento de una barrera de vegetación en los márgenes del río con la finalidad de reducir su velocidad de escorrentía y por ende su efecto erosivo. Para ello, se investigará y evaluará la alternativa más óptima para las condiciones actuales que presenta el tramo.

El trabajo a realizar incluye el desarrollo de un modelo hidráulico y un análisis por estabilidad global de la zona en estudio, para el entendimiento de su comportamiento lo cual permitirá el establecimiento de la propuesta de restauración, así como evaluar escenarios sin y con la aplicación de bioingeniería para su posterior comparación.

METODOLOGÍA

1. Se realizará una revisión de información y estudios relacionados con la aplicación de métodos de bioingeniería para la restauración de paisajes.
2. Se recopilará y analizará la información referente a la zona de estudio, además de la realización de una visita para la identificación de puntos críticos.
3. En base a la revisión de información y a la visita de campo, se desarrollará un modelo hidráulico con distintos períodos de retorno, así como un análisis por estabilidad global para las condiciones actuales del tramo en estudio.
4. Se evaluará y establecerá una alternativa de bioingeniería para la restauración, mediante el desarrollo de un nuevo modelo hidráulico y análisis de estabilidad que englobe dicha propuesta, además de la discusión de resultados para los escenarios presentados.
5. Se elaborará la memoria descriptiva sobre el tema de tesis, en donde se incluirá las conclusiones y recomendaciones.

NOTA

Extensión máxima: 100 páginas.



INDICE

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	4
1.1. Introducción	4
1.2. Objetivos de la tesis	5
1.2.1. General.....	5
1.2.2. Específicos.....	5
1.3. Matriz de consistencia.....	6
CAPITULO II: ASPECTOS GENERALES	8
2.1. Restauración de ríos	8
2.2. Conceptos básicos de la hidráulica fluvial	9
2.2.1. Tipos de flujo	10
2.2.1.1. Flujo permanente.....	10
2.2.1.2. Flujo no permanente	11
2.2.2. Morfología de ríos	14
2.2.2.1. Clasificación tradicional de los ríos.....	15
2.2.2.2. Clasificación de ríos por Rosgen	166
2.2.3. Erosión fluvial	19
2.3. Bioingeniería	20
2.3.1. Sistemas de bioingeniería	20
2.3.1.1. Fajinas (Wattles).....	21
2.3.1.2. Capas de enramados	22
2.3.1.3. Cubiertas vivas	23
2.3.1.4. Trinchos con vegetación	24
2.3.2. Material vegetal	24
2.3.2.1. Función de cobertura	24
2.3.2.2. Función de armadura y anclaje del suelo.....	24
2.3.3. Protección de la vegetación	25
2.3.3.1. Colocación de capas germinadoras (Mulching).....	25
2.3.3.2. Refuerzo y protección con telas orgánicas o sintéticas	26
2.3.3.3. Sistemas sintéticos de confinamiento del suelo	27
2.4. Vetiver.....	28
2.4.1. Características morfológicas	28
2.4.2. Características fisiológicas	29
2.4.3. Características mecánicas	29
2.4.4. Características hidráulicas	32

2.5.	Ejemplos de restauración de ríos en grandes ciudades	34
2.5.1.	Contaminación y recuperación del estuario del río Támesis (Reino Unido).....	34
2.5.2.	Recuperación del cauce del río Cheonggyecheon (Corea del Sur)	35
2.5.3.	Recuperación del tramo urbano del río Manzanares (España)	36
2.5.4.	Proyecto Vía Parque Rímac – Río Verde (Perú).....	37
CAPITULO III: CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO		39
3.1.	Características geomorfológicas	39
3.1.1.	Parámetros de forma	39
3.1.2.	Parámetros de relieve.....	40
3.1.3.	Parámetros de la red hidrográfica	40
3.1.3.1.	Tipo de corriente.....	40
3.1.3.2.	Pendiente media del río principal (Sm).....	40
3.2.	Características climatológicas	40
3.2.1.	Precipitación	41
3.2.2.	Temperatura	41
3.2.3.	Humedad relativa	42
3.3.	Características geológicas y geotécnicas.....	43
3.3.1.	Geología regional.....	43
3.3.2.	Geodinámica externa – Procesos morfodinámicos.....	43
3.3.2.1.	Desprendimientos.....	43
3.3.2.2.	Falla cantilever.....	43
3.3.2.3.	Inundaciones.....	44
3.3.3.	Sismicidad.....	44
3.3.4.	Geotecnia de la zona de estudio	44
3.4.	Caudales máximos.....	45
3.4.1.	Estación hidrométrica Chosica.....	46
3.4.2.	Caudales máximos mediante distribuciones probabilísticas	46
3.5.	Ecología.....	47
3.6.	Puntos críticos en el tramo urbano	47
CAPITULO IV: PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....		48
4.1.	Ubicación	48
4.2.	Topografía.....	48
4.3.	Métodos en condiciones actuales	50
4.3.1.	Modelamiento hidráulico.....	50
4.3.1.1.	Parámetros Iniciales.....	50

4.3.1.2.	Simulación régimen permanente	53
4.3.1.3.	Simulación régimen no permanente	59
4.3.1.4.	Simulación calidad de agua.....	62
4.3.2.	Análisis por estabilidad global.....	63
4.4.	Métodos para las condiciones de la propuesta de solución	69
4.4.1.	Modelamiento hidráulico con vetiver	69
4.4.1.1.	Consideraciones previas al modelamiento.....	69
4.4.1.2.	Estimación de la rugosidad del vetiver (n)	70
4.4.1.3.	Simulación régimen permanente con vetiver.....	74
4.4.1.4.	Simulación régimen no permanente con vetiver.....	76
4.4.2.	Análisis de estabilidad global con vetiver.....	78
CAPITULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONSIDERACIONES DE DISTRIBUCIÓN.....		84
5.1.	Discusión de resultados	84
5.1.1.	Velocidad media del flujo.....	84
5.1.1.1.	Régimen permanente.....	84
5.1.1.2.	Régimen no permanente	85
5.1.2.	Incremento del tirante	87
5.1.3.	Esfuerzos cortantes	88
5.1.4.	Secciones transversales.....	89
5.1.5.	Análisis por estabilidad global.....	91
5.1.6.	Análisis calidad de agua	92
5.2.	Consideraciones para la distribución del vetiver.....	92
5.2.1.	Intervalo vertical (IV)	93
5.2.2.	Espaciamiento longitudinal.....	93
CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		95
6.1.	Conclusiones	95
6.2.	Recomendaciones	97

INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y MATRIZ DE CONSISTENCIA

1.1. Introducción

El presente trabajo de tesis pretende contribuir con el proceso de restauración del río Rímac, en particular, la zona correspondiente al tramo urbano. Este río, el cual pertenece a la vertiente del Pacífico, nace en la cordillera de los Andes en el Nevado de Paca y la laguna Ticticocha a 5 508 msnm y desemboca en el Océano Pacífico. Se estima que presenta una longitud de 134 km y una cuenca alrededor de 3 503.95 km².

El tramo urbano del río Rímac sufre constantemente alteraciones morfológicas debido a sus características geométricas y al avance progresivo de las poblaciones ubicadas en las riberas del río. Debido a estos factores se produce el fenómeno de erosión que no solo pone en peligro su estabilidad, sino también a las estructuras viales y edificaciones comprendidas en este tramo. Es por ello que en los últimos años la capacidad de erosión y transporte de materiales sólidos se ha visto incrementada, poniendo en riesgo incluso la vida de muchos pobladores.

Para el caso del tramo en estudio se observa que el proceso erosivo comienza con la socavación del talud al nivel de las aguas. Este fenómeno va creando una zanja en la base del mismo, debilitándolo y ampliando su zona de falla. Este proceso es denominado como falla en voladizo o cantilever y se caracteriza por dejar grandes masas de tierra sin soporte. Estas se van desprendiendo progresivamente en bloques cuando hay aumento de caudal, creando una zona crítica.

Según el Informe de estudio hidrológico de identificación de zonas de riesgo en los distritos de Lima Cercado y El Agustino, realizado por la Municipalidad Metropolitana de Lima en conjunto con la Autoridad Nacional del Agua en el 2009, el nivel de socavación en esta zona es de alrededor de 5.67m para un período de retorno de 100 años y de 6.98m para 500 años. Debido principalmente a que la cuenca del río Rímac desarrolla cambios geomorfológicos bruscos y al material arrastrado que aumenta la carga de sedimentos.

Por otro lado, el río Rímac ha sufrido a lo largo de su historia una serie de intervenciones como es el caso de la construcción del terraplén del Ferrocarril Central (1870), el Puente del Ejército (1936), la construcción de la Vía de Evitamiento, entre otros. De todas estas intervenciones, se ha llegado a la

conclusión de que el Puente del Ejército ha sido la principal causa de la formación de un tramo en forma de acantilado aguas abajo de este. Por consiguiente, se perdió el hábitat que existía en esta zona y la posibilidad de encontrar un espacio natural. De acuerdo a diversos estudios, éste proceso es irreversible y es impráctico realizar propuestas de restauración del río a un estado antes de 1936 (Kuroiwa, 2011).

En este contexto se genera la necesidad de plantear una solución, tomando como referencia casos de éxito en otros países, para la restauración del tramo urbano del río Rímac mediante la aplicación de métodos de bioingeniería compatibles con el medio ambiente. Ello con el fin de estabilizar y controlar el fenómeno erosivo de las riberas, así como restaurar la biodiversidad y calidad de agua. La solución planteada propone la formación de terrazas en los márgenes del río, en donde se establezcan barreras vivas de vegetación. Con ello se permitirá el amortiguamiento del impacto del río sobre el talud, mediante la disminución de su velocidad en los márgenes del mismo.

En el presente trabajo de tesis, se desarrollará la aplicación de medidas no estructurales a partir del modelamiento hidráulico y análisis de estabilidad para el tramo en estudio; asimismo, se presentarán los resultados obtenidos que permitirán evaluar una propuesta de solución. Mediante la aplicación de esta propuesta se analizarán escenarios con y sin la aplicación de bioingeniería. Ello con el fin de determinar la variación que genera la utilización de estos métodos y difundirlos para otros casos de estudio.

1.2. Objetivos de la tesis

1.2.1. General

Analizar y evaluar una propuesta para la restauración de un tramo del río Rímac, perteneciente al área urbana, mediante la aplicación de una alternativa de bioingeniería. Este método tiene base en el establecimiento de una barrera de vegetación en los márgenes del río con la finalidad de reducir su velocidad de escorrentía y por ende su efecto erosivo.

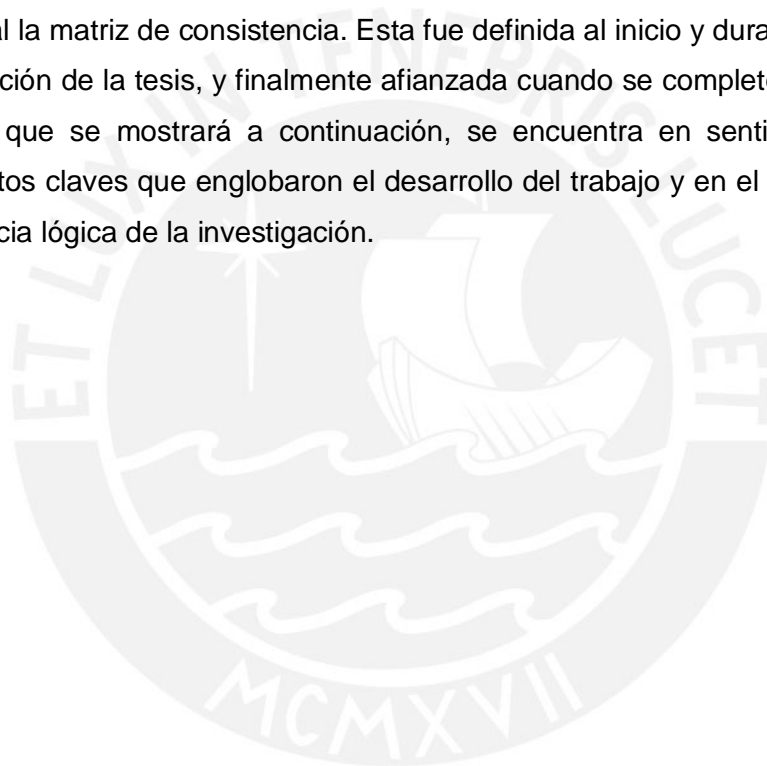
1.2.2. Específicos

- Describir y documentar información y estudios relacionados a la aplicación de bioingeniería en la restauración de paisajes.
- Establecer la caracterización hidráulica y geotécnica del tramo urbano del río Rímac (subcuenca Bajo río Rímac).

- Identificar las zonas vulnerables al desborde y erosión por acción de la escorrentía.
- Evaluar una propuesta de solución sobre la base del desarrollo de modelos hidráulicos y análisis de estabilidad de la zona en estudio para entender su comportamiento y establecer acciones objetivas de solución acorde a los resultados obtenidos.

1.3. Matriz de consistencia

Para evaluar el grado de coherencia y conexión lógica entre los elementos que conformaron el desarrollo del presente trabajo de tesis, se utilizó como herramienta principal la matriz de consistencia. Esta fue definida al inicio y durante el proceso de elaboración de la tesis, y finalmente afianzada cuando se completó el trabajo. En el cuadro que se mostrará a continuación, se encuentra en sentido horizontal los elementos claves que englobaron el desarrollo del trabajo y en el sentido vertical la secuencia lógica de la investigación.



MATRIZ DE CONSISTENCIA
Propuesta de restauración del tramo urbano del río Rímac mediante la aplicación de bioingeniería.

PROBLEMA	OBJETIVOS	JUSTIFICACIÓN	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	MÉTODOS
<p>Central</p> <p>¿Cuál es la mejor alternativa de solución para la restauración del tramo urbano del río Rímac?</p>	<p>General</p> <p>Analizar y evaluar una propuesta para la restauración de un tramo del río Rímac, perteneciente al área urbana, mediante la aplicación de una alternativa de bioingeniería.</p>	<p>Teórica</p> <p>El tramo urbano del río Rímac sufre constantemente alteraciones morfológicas debido al efecto erosivo de su escorrentía. Este proceso comienza con la socavación del talud al nivel de las aguas, en donde se va creando una zanja en la base del mismo (falla en cantilever), poniendo en riesgo la estabilidad del mismo y de construcciones aledañas.</p>	<p>General</p> <p>La utilización de material vegetal como barrera viva en los márgenes del río permite el control de la erosión y fortalecimiento del talud.</p>	<p>Independiente</p> <p>Condiciones actuales del tramo urbano del Río Rímac.</p>	<p>-Variación de la velocidad en los márgenes del río. -Variación del factor de seguridad en los taludes.</p>	<p>Perspectiva Metodológica</p> <p>La investigación tendrá un enfoque mixto cuantitativa y cualitativa. Tipo de investigación La investigación es descriptiva.</p>
<p>Específicos</p> <p>1. ¿Cuál es la información referente a la aplicación de métodos de bioingeniería?</p> <p>2. ¿Qué parámetros hidráulicos y geotécnicos influirán en el desarrollo de la propuesta de solución?</p> <p>3. ¿En qué condiciones actuales se encuentra el tramo urbano del río Rímac?</p> <p>4. ¿Cómo influirá la propuesta de solución en la conducta hidráulica y estabilidad del talud del tramo a estudiar?</p>	<p>Específicos</p> <p>1. Describir y documentar información y estudios de aplicación de bioingeniería en la restauración de paisajes.</p> <p>2. Establecer los parámetros hidráulicos y geotécnicos del tramo urbano del río Rímac.</p> <p>3. Identificar zonas vulnerables al desborde y erosión del río.</p> <p>4. Evaluar la propuesta de solución mediante el desarrollo de un modelo hidráulico y análisis de estabilidad.</p>	<p>Práctica</p> <p>El desarrollo de este estudio podrá servir como base para futuras aplicaciones de bioingeniería en la restauración de otros cauces con similares características.</p>	<p>Específicos</p> <p>1. La bioingeniería propone la utilización del material vegetal para estabilizar, conservar y controlar los sistemas biológicos.</p> <p>2. El río Rímac es de tipo perenne, caracterizado por la predominancia de grava mal gradada con alta capacidad portante.</p> <p>3. Se han identificado puntos críticos debido a procesos de inundación y erosión.</p> <p>4. La vegetación influye significativamente en la disminución de la velocidad y por ende en la reducción de efecto erosivo, además de mejorar las condiciones del suelo.</p>	<p>Dependiente</p> <p>Condiciones de la propuesta de solución (aplicación de bioingeniería).</p>	<p>-Características mecánicas, fisiológicas, hidráulicas y morfológicas del material vegetal.</p> <p>-Propiedades Físico -Mecánicas y parámetros geotécnicos. -Caudales máximos. -Zonificación sísmica.</p> <p>-Posibles zonas de inundación. -Potencial falla en cantilever.</p> <p>-Velocidades en los márgenes del tramo. -Análisis de estabilidad estático. -Análisis de estabilidad Pseudo-estático.</p>	<p>Diseño de investigación.</p> <p>Recopilación de información y estudios relacionados con la hidráulica de ríos y aplicación de métodos de bioingeniería para la restauración de paisajes. Visita de campo y recopilación de información referente a la zona de estudio. Desarrollo de un modelo hidráulico y un Análisis de estabilidad global para las condiciones actuales del tramo en estudio. Evaluación y establecimiento de la alternativa de bioingeniería mediante el desarrollo de un nuevo modelo hidráulico y análisis de estabilidad que englobe la propuesta de solución, además de la discusión de resultados. Elaboración de la memoria descriptiva e inclusión de conclusiones y recomendaciones.</p> <p>Límites de la investigación. No será posible realizar pruebas de laboratorio, debido a la falta de instrumentos y presupuesto.</p>

ASPECTOS GENERALES

2.1. Restauración de ríos

En la actualidad, la restauración de ríos es un tema de vital importancia para un país ya que involucra aspectos ambientales, sociales y económicos. De acuerdo con Ellen Wohl (Wohl, 2005), para lograr la restauración de un río se deben considerar tanto su variabilidad natural así como la interconexión de los procesos físicos, químicos y biológicos en sistemas de cuencas y escalas de tiempo (ver Figura 2-01).

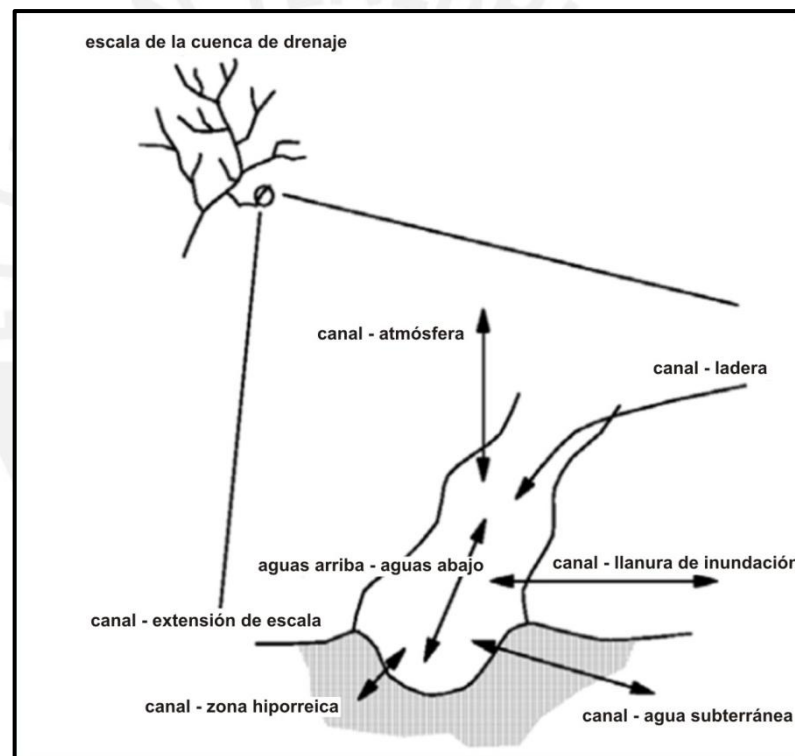


Figura 2-01: Diagrama esquemático de las conexiones existentes entre un tramo de río y el paisaje circundante, atmósfera y subsuelo (Wohl, 2005)

De acuerdo con estos aspectos, hoy en día se trabaja mediante dos enfoques. En primer lugar, seguir patrones en restauración por procesos tiende a ser exitosa ya que en ella se pueden identificar las causas de la degradación ecológica de un río, caso contrario sucede a través de la fijación de un punto final, pues este último solo proporcionará los síntomas. En segundo lugar, los proyectos de restauración obtienen buenos resultados si se trabaja mediante conceptos de cuencas enteras.

Asimismo, es importante señalar que el rol de la sociedad juega un papel fundamental para lograr los procesos de restauración, ya que estos determinarán la viabilidad de un proyecto. En la mayoría de los casos, el aspecto social se muestra como una limitación, puesto que la propia cultura y las expectativas que presentan los involucrados son más preponderantes que mejorar el ecosistema. Además, el escenario político también representa un ente preponderante, ya que por medio de este se obtendrá el financiamiento.

Por otra parte, el entendimiento temporal y espacial para un proceso de restauración es esencial. Como se mencionó anteriormente, trabajar sobre la base de cuencas enteras no solo traerá consigo el éxito del proceso, sino que brindará a su vez un auto-sostenimiento ecológico para el hábitat que se desarrolla. En ese aspecto, las magnitudes, duraciones y frecuencias de cambios de flujo, así como la información histórica proporcionarán datos significativos para medir cambios en la dinámica de los ríos y mediante ello evaluar la mejor opción de restauración.

Sin embargo, el proceso puede fracasar si es que no se tienen en consideración áreas importantes tales como ecología, geomorfología e hidrología, pues de estos dependerá el logro del equilibrio y auto-sostenimiento. La integración de estos aspectos permitirá una mejora en la calidad de agua, creación de un sistema natural en la cuenca del río, revegetación de las zonas ribereñas, entre otros.

En suma, para obtener resultados exitosos en los procesos de restauración se tiene que tener en consideración el dinamismo del río así como factores de interconexión, pues de ellos dependerá la recuperación. Para ello, se deberán generar nuevos conocimientos y analizar las variables involucradas, conocer las complejidades para así fijar escalas de tiempo y espacio, además del constante monitoreo para determinar la variabilidad de un río.

2.2. Conceptos básicos de la hidráulica fluvial

La hidráulica fluvial se encarga del estudio de todos los aspectos relacionados con las corrientes naturales, y su relación con las estructuras y construcciones localizadas en áreas de influencia de ríos y lagos. Esta rama no se puede llegar a comprender ni aplicar de manera aislada del conjunto de disciplinas que la complementan. Estas engloban conceptos de hidráulica, hidrología, estructuras hidráulicas, transporte de sedimentos, entre otros (Rocha, 1998).

2.2.1. Tipos de flujo

Existen dos criterios para la clasificación de los tipos de flujo en canales abiertos. Estos son determinados por la variabilidad espacial y temporal del flujo. Para el caso del presente trabajo, se tomará como criterio el parámetro temporal, en donde el flujo puede ser clasificado como permanente y no permanente. A continuación se presentan las principales características de estos tipos de flujos, así como las ecuaciones que los gobiernan.

2.2.1.1. Flujo permanente

Un flujo en régimen permanente significa que no sufre variaciones de sus propiedades a través del tiempo en un determinado punto. Estas incluyen su masa, presión, velocidad, peso específico, viscosidad, entre otras. El cálculo de este tipo de flujo se fundamenta en la Ecuación de la Energía, que utiliza un procedimiento iterativo llamado Método de Pasos Estándar (Estándar Step Method). Para ello se utiliza la siguiente expresión que representa la ecuación de la energía:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (2-01)$$

Donde:

Z_1, Z_2 = Elevación del fondo del canal en las secciones 1 y 2.

Y_1, Y_2 = Altura de agua en las secciones 1 y 2.

V_1, V_2 = Velocidad media (Caudal/ área)

g = Aceleración de la gravedad

h_e = Pérdidas de energía entre la sección 1 y 2

α_1, α_2 = Coeficiente de variación de la velocidad en la sección transversal o coeficiente de Coriolis.

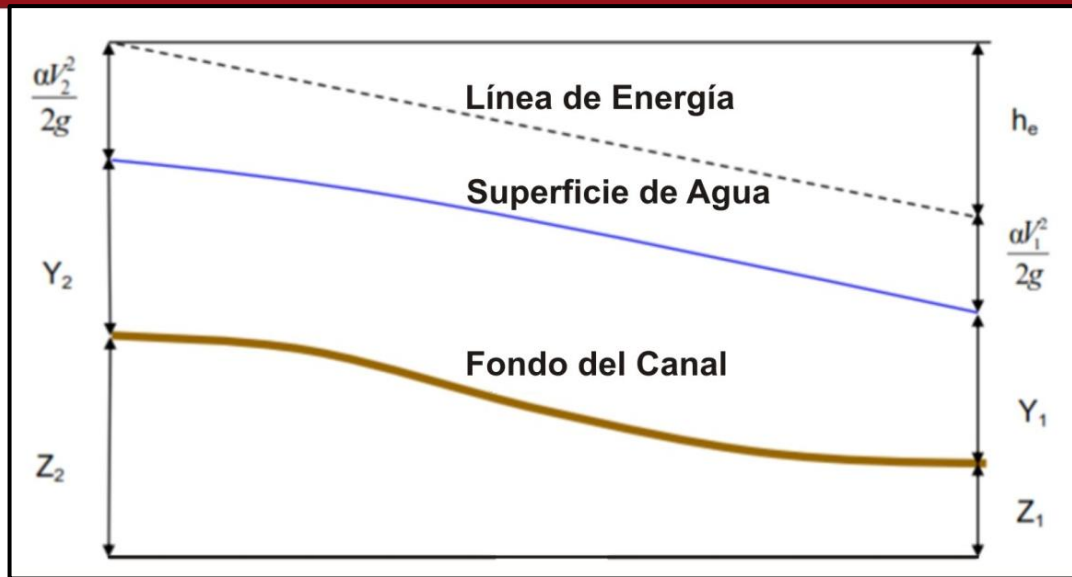


Figura 2-02: Representación de los términos de la ecuación de energía (US Army Corps of Engineers, 2010)

2.2.1.2. Flujo no permanente

Un flujo en régimen no permanente o variable se presenta cuando las propiedades del fluido (masa, peso específico, presión, velocidad, viscosidad, entre otros) varían en un punto determinado a través del tiempo. Este es el régimen que se acerca más al comportamiento de los ríos y por ende su modelación es compleja.

El estudio del flujo no permanente en ríos adquiere gran importancia para el caso del diseño de obras hidráulicas o problemas de predicción como es el caso de las inundaciones. Este método permite calcular los niveles de agua que se puede alcanzar en una sección, así como la evolución del caudal para un determinado tiempo. Con esta información se podrá plantear un diseño de defensas ribereñas, además de establecer políticas de control y regulación para el caso de grandes avenidas (Berezowsky, 1998).

El cálculo en régimen no permanente engloba ecuaciones diferenciales de Conservación de Masa (Continuidad) y el principio de Conservación de Momento. En la Figura 2-03 se puede observar el esquema típico de volumen de control de donde se derivan las ecuaciones de Continuidad y Momento.

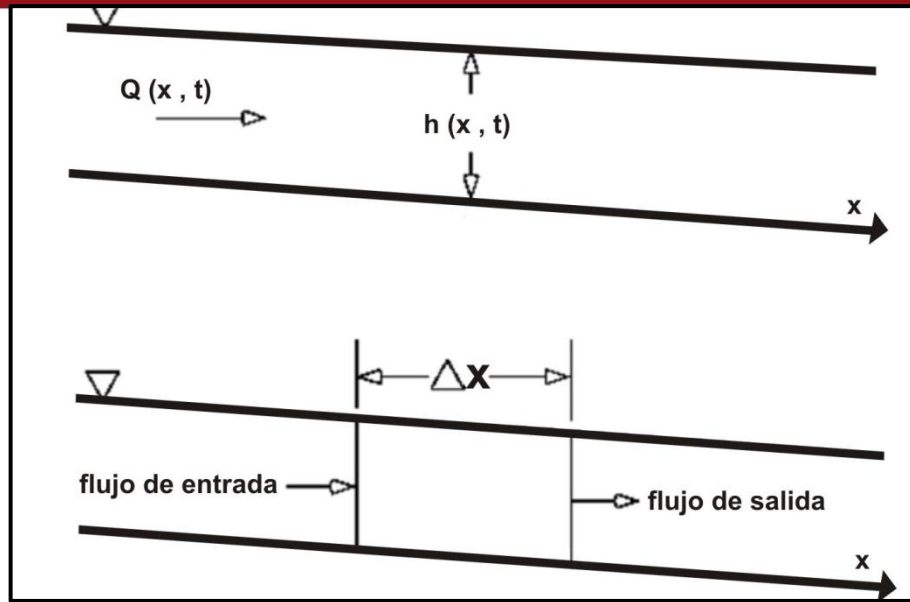


Figura 2-03: Esquema típico de Volumen de Control de donde se derivan las ecuaciones de Continuidad y Momento, (US Army Corps of Engineers, 2010)

a. Ecuación de Continuidad

La expresión de la conservación de la masa en función al volumen de control, señala que el gasto neto en el volumen será igual a la rapidez de cambio de almacenamiento dentro del volumen, (Ahmed, 2008). A continuación se presentan las expresiones que permiten dar forma definitiva a la ecuación de continuidad para régimen no permanente.

- Caudal de ingreso al volumen de control,

$$Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \frac{\Delta x}{2} \tag{2-02}$$

- Caudal de salida del volumen de control,

$$Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \frac{\Delta x}{2} \tag{2-03}$$

- Rapidez de cambio en almacenamiento,

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} \cdot \Delta x \tag{2-04}$$

- Variación de masa en el volumen de control cuando Δx es pequeño,

$$\rho \cdot \frac{\partial A_T}{\partial t} \cdot \Delta x = \rho \left[\left(Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \frac{\Delta x}{2} \right) - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \frac{\Delta x}{2} \right) + Q_i \right] \tag{2-05}$$

Donde,

A_T = Área total del flujo

Q_i = Flujo lateral que ingresa al volumen de control

ρ = Densidad del líquido

Mediante la simplificación y división por el factor $\rho\Delta x$, se puede expresar la forma de la ecuación de continuidad para un régimen no permanente como:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_i = 0 \quad (2-06)$$

b. Ecuación de Momento:

Para el volumen de control presentado anteriormente, la conservación del momento plantea que el régimen neto de momento que entra al volumen más la suma de todas las fuerzas externas que actúan sobre este será igual a la rapidez de variación del momento, (Ahmed, 2008). Para ello es indispensable la consideración de la presión, fuerza de gravedad y fuerza de fricción. A continuación se presentan las expresiones que conforman la ecuación de momento.

- Fuerza de presión neta,

$$F_{Pn} = -\rho \cdot g \cdot A \frac{\partial h}{\partial x} \cdot \Delta x \quad (2-07)$$

- Fuerza gravitacional,

$$F_g = -\rho \cdot g \cdot A \frac{\partial z_0}{\partial x} \cdot \Delta x \quad (2-08)$$

- Fuerza de fricción,

$$F_f = -\rho \cdot g \cdot A \cdot S_f \cdot \Delta x \quad (2-09)$$

Donde S_f es la pendiente de fricción positiva para la dirección x positiva del flujo.

- Variación neta de momento que entra al volumen de control,

$$-\rho \frac{\partial QV}{\partial x} \cdot \Delta x \quad (2-10)$$

- Rapidez de cambio de momento ($\rho Q \cdot \Delta x$ es el impulso del líquido en el volumen de control).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot Q \cdot \Delta x) = \rho \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} \cdot \Delta x \quad (2-11)$$

Con las expresiones presentadas anteriormente (2-07, 2-08, 2-09, 2-10 y 2-11) se obtiene la ecuación general que enuncia la conservación del momento para el volumen de control típico, (2-12).

$$\rho \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} \cdot \Delta x = -\rho \frac{\partial QV}{\partial x} \cdot \Delta x - \rho \cdot g \cdot A \frac{\partial h}{\partial x} \cdot \Delta x - \rho \cdot g \cdot A \frac{\partial z_0}{\partial x} \cdot \Delta x - \rho \cdot g \cdot A \cdot S_f \cdot \Delta x \quad (2-12)$$

Por otra parte, la elevación de la superficie de agua se expresa como $Z = z_0 + h$, por lo tanto se deriva la siguiente expresión en donde $\partial h/\partial x$ representa la pendiente de la superficie de agua.

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z_0}{\partial x} \quad (2-13)$$

Con la incorporación de esta última ecuación a 2-12 y dividiendo los términos por el factor $\rho \cdot \Delta x$, se obtendrá la forma definitiva de la ecuación de momento.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q \cdot V}{\partial x} + g \cdot A \cdot \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (2-14)$$

2.2.2. Morfología de ríos

También denominado como morfología fluvial, se encarga del estudio de la variabilidad de las formas que caracterizan a los ríos. Esta rama implica el estudio tanto de los cambios transversales y longitudinales, como también la predicción de su comportamiento en el futuro. Las características geotécnicas y las irregularidades de descargas en los ríos juegan un papel significativo en el comportamiento fluvial (Arbeláez, 2003). Por otra parte, la presencia de vegetación en las márgenes del mismo influye en la definición de su cauce, es decir, si esta desapareciera el recorrido del río se tomaría inestable.

2.2.2.1. Clasificación tradicional de los ríos

La clasificación de los ríos se basa principalmente en la relación que existe entre sus características geomorfológicas. El objetivo de clasificarlos se fundamenta en la necesidad de proveer las herramientas necesarias para la realización de asunciones, es decir, poder predecir el comportamiento que presentará con respecto a su apariencia, desarrollar relaciones empíricas para los tipos de corrientes individuales y por último poder extrapolar datos de otros ríos que presenten un tipo de corriente parecido (Arbeláez, 2003). De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se pueden encontrar tres grandes grupos de ríos, los cuales se describirán a continuación.

a. Ríos rectos

Son canales rectos que presentan un cauce único con una sinuosidad menor a 1.5 (Leopold, 1994). No son muy usuales de encontrar en la naturaleza, por lo que solo se evidencian en tramos cortos. Se caracterizan por presentar un valle estrecho con alta estabilidad lateral. Estos tipos de cauces, usualmente son considerados en un estado de transición hacia cauces meándricos, por lo que se tiene que tener especial cuidado al momento de construir infraestructura aledaña.

b. Ríos trenzados (braided)

Estos tipos de ríos se caracterizan por presentar múltiples canales de flujo a lo largo de su recorrido. Generalmente están formados por gravas, con una pendiente relativamente alta, su sección transversal es ancha y mantienen una profundidad baja. La mayoría de estos cauces presentan problemas para la construcción de estructuras debido a que son poco profundos, sus estratos aluviales son de gran espesor y poseen alta inestabilidad. Cabe resaltar que al ser ríos inestables, exhiben un grado de libertad mucho mayor con respecto a otros tipos de ríos (Rocha, 1998).



Figura 2-04: Ejemplos de ríos trezados (tipo braided). Izquierda: Río Rímac - Perú. Derecha: Río Satsunai – Japón (Gutiérrez, 2014)

c. Ríos meándricos

Se encuentran formados por un conjunto de curvas que presentan un dinamismo debido a la naturaleza del comportamiento del río. Según Leopold (1994), para que sean considerados como ríos meándricos su sinuosidad debe ser mayor a 1.5. Se caracterizan por presentar una pendiente baja y la carga de sedimentos está compuesta principalmente por material fino. La forma en que se desarrollan estos tipos de corrientes se debe principalmente al proceso erosivo y sedimentación que se generan en sus márgenes debido a la fuerza centrífuga que se propicia en la curvatura del mismo.



Figura 2-05: Ejemplos de ríos meándricos. Izquierda: Río Neches – Estados Unidos. Derecha: Río Amazonas – Perú, Colombia y Brasil (Amazon river expedition, 2015)

2.2.2.2. Clasificación de ríos por Rosgen

Rosgen (1994) propuso un sistema de clasificación diferente sostenido en la evolución de los cauces según los aspectos que presentan en su estado actual.

Para ello, Rosgen planteó niveles de descripción cualitativa y cuantitativa. El nivel 1 corresponde al aspecto cualitativo de la caracterización geomorfológica del cauce. El nivel 2 representa el aspecto cuantitativo, lo cual da lugar a la clasificación morfológica local del cauce.

Para el caso del primer nivel, Rosgen realizó una descripción general del cauce. En ella se describen la longitud del perfil, la morfología de las secciones transversales y la vista en planta de patrones. Esta es una forma de clasificación inicial que permite brindar un nivel general de interpretación. Además, con ello se puede organizar y priorizar la información para utilizarla en el siguiente nivel, en donde se desarrolla una descripción más detallada de la clasificación de corrientes. En la Figura 2-06, se puede observar el esquema para la clasificación general de Rosgen.

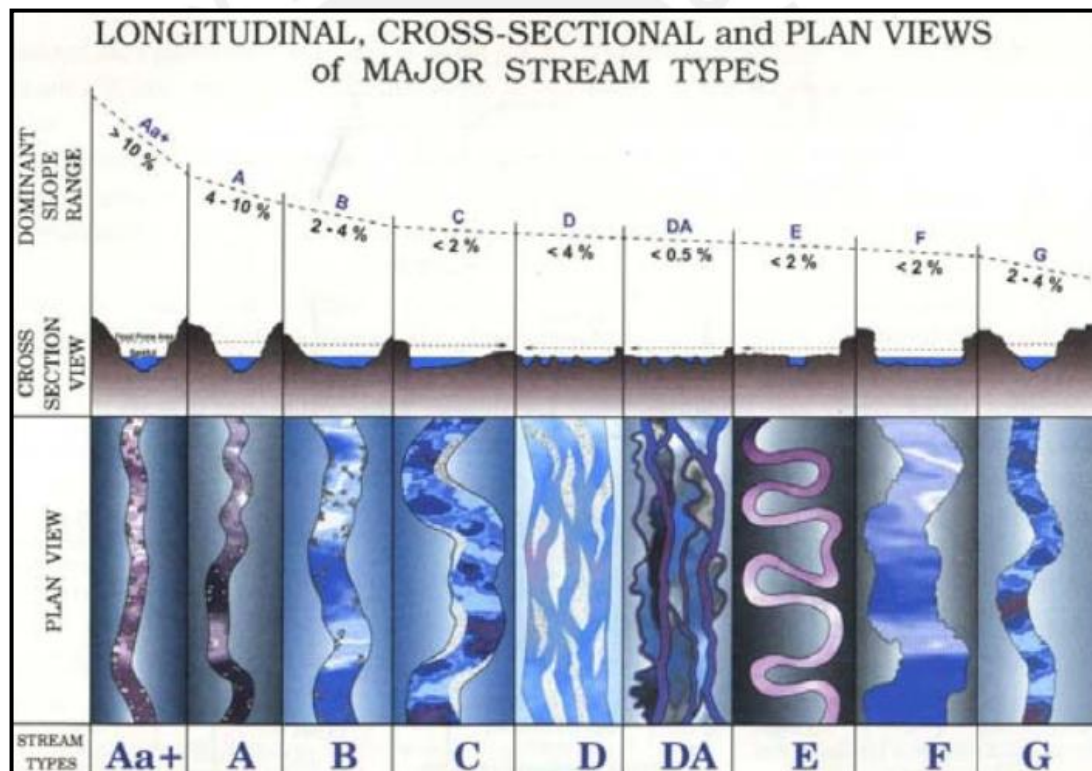


Figura 2-06: Esquema de vistas longitudinales, transversales y de planta de los principales tipos de flujo propuesto por Rosgen (Rosgen, 1994)

Con respecto al segundo nivel, Rosgen presentó una descripción de las variables morfométricas utilizadas para la clasificación del cauce. Entre ellas se encuentran, con respecto a la sección transversal, la relación de atrincheramiento, relación ancho/profundidad y características de los materiales dominantes. Para el perfil longitudinal se presentan las variables de pendientes y formas del lecho. Por último,

con respecto a la forma de planta, se muestran la sinuosidad, relación ancho banca llena / ancho meandro (Arbeláez, 2003). En la Figura 2-07, se observa el esquema propuesto por Rosgen para la clasificación morfológica de manera cuantitativa.

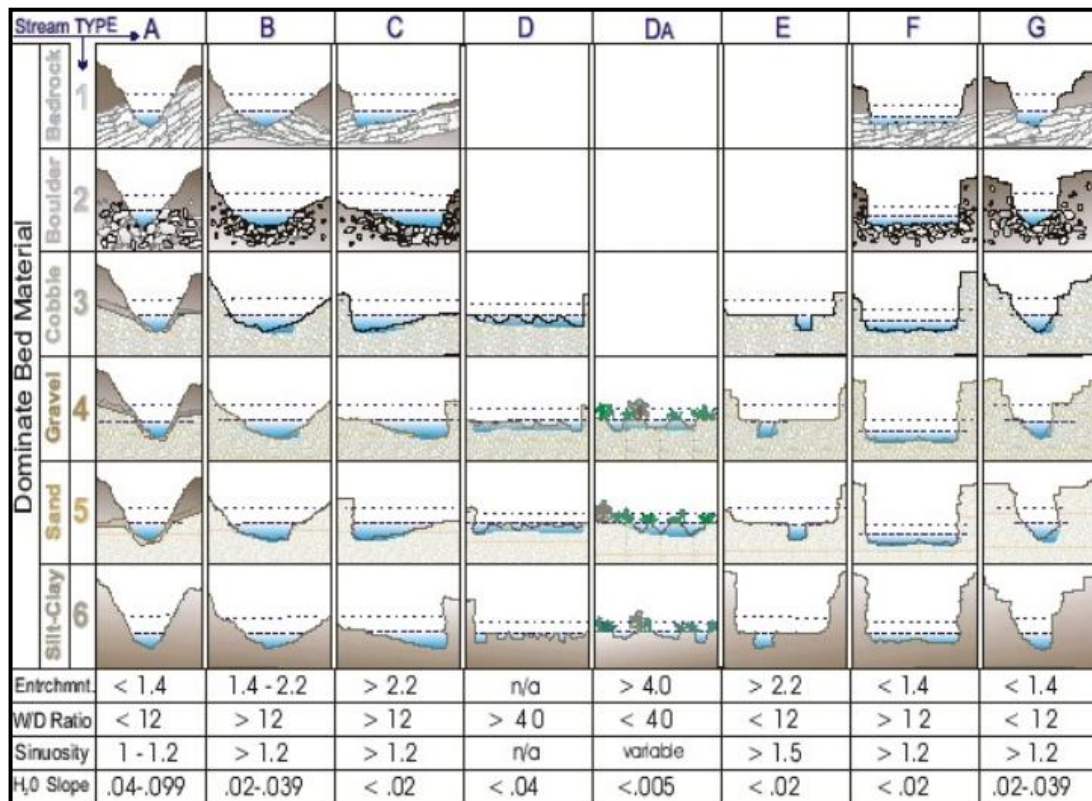


Figura 2-07: Esquema para la descripción morfológica cuantitativa propuesta por Rosgen (Rosgen, 1994)

Para efectos del presente estudio, es importante conocer la definición de la variable de atrincheramiento pues permitirá describir técnicamente la morfología del tramo en estudio. En este contexto, se define el atrincheramiento como la contención vertical del río y el grado en el cual este realiza una incisión en el fondo del valle. El grado de incisión puede ser determinado con una relación de atrincheramiento que relaciona el ancho de la zona propensa a inundaciones y el ancho de la sección del cauce lleno.

Por ejemplo ratios de atrincheramiento menores a 1.4 señalan que los cauces presentan gran incisión, entre 1.4 a 2.2 indican una incisión moderada y mayores a 2.2 indican canales con ligero atrincheramiento (ver Figura 2-08). Cabe resaltar que ratios de atrincheramientos cercanos a la unidad implicarán una mayor incisión y por ende una menor probabilidad al desbordamiento, caso contrario sucede para ratios de atrincheramiento mayores, en donde se evidenciará zonas de inundación.

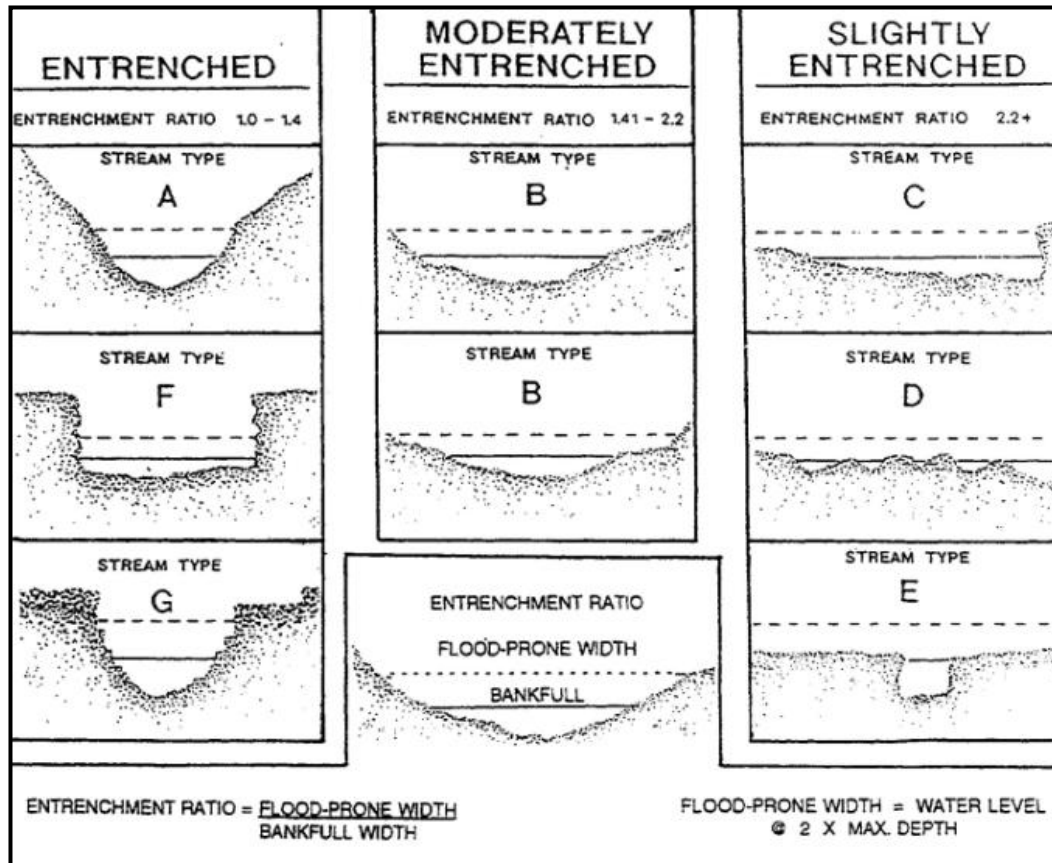


Figura 2-08: Clasificación de ríos de acuerdo a su relación de atrincheramiento (Rosgen, 1994)

2.2.3. Erosión fluvial

Es el desprendimiento y transporte de materiales producido por el movimiento del agua que circula por el cauce de un río. Generalmente, los procesos erosivos se generan debido a las características geotécnicas de los materiales de fondo y el talud, la geometría del cauce, pendiente y las características del flujo de agua (UDEP, 2002).

Debido a los procesos erosivos se pueden generar modificaciones en las paredes laterales de los taludes, lo cual implicaría la inestabilidad del mismo. En la mayoría de casos, los deslizamientos producidos por los efectos erosivos producen un represamiento de las aguas circundantes al cauce y por consiguiente avalanchas de tierra.

Entre los tipos de deslizamientos más comunes que se presentan debido a la erosión se pueden citar a la falla en cantiléver (caídos), rotacional, planar, entre otros. En la Figura 2-09 se aprecian los tipos de deslizamientos mencionados.

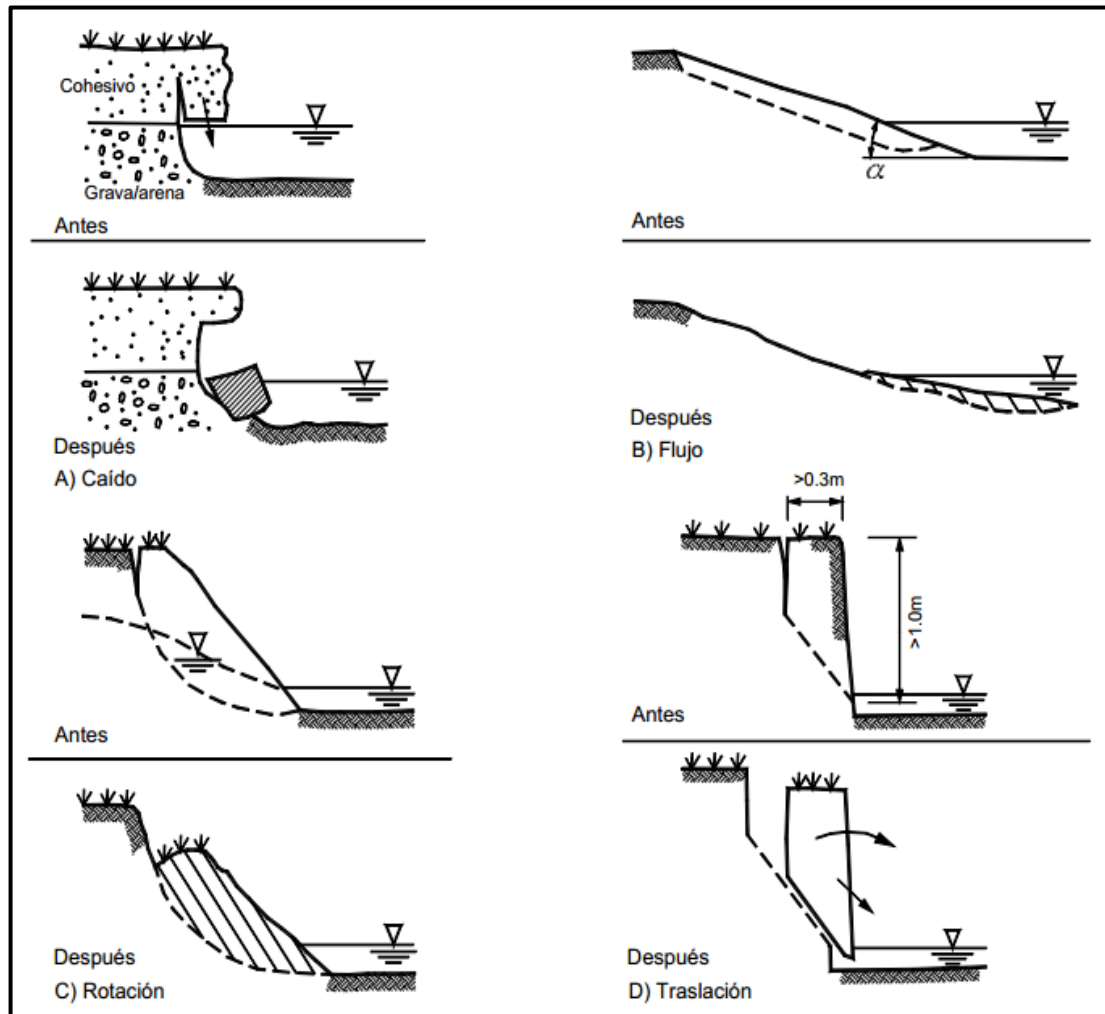


Figura 2-09: Tipos de fallas debido a efectos de erosión en ríos (Hagerty, 1998)

2.3. Bioingeniería

Se define como la aplicación multidisciplinaria que usa la vegetación como un componente de la ingeniería para la construcción y restauración de paisajes, estabilización de taludes y el control de la erosión. La función de estos elementos vivos es brindar un reforzamiento al talud, drenar o actuar como barreras para los sedimentos. Para ello, se tiene que tener estricto conocimiento no solo de la ciencia de las plantas sino también el comportamiento de los taludes y la mecánica de erosión de la zona a estudiar (Sangalli, 2008).

2.3.1. Sistemas de bioingeniería

A continuación se presentan algunos de los sistemas de bioingeniería aplicados satisfactoriamente en la restauración de paisajes y estabilización de taludes.

Muchos de estos varían de acuerdo a las condiciones geotécnicas e hidráulicas que presente la zona.

2.3.1.1. Fajinas (Wattles)

Son un conjunto semicilíndrico de ramas de hierbas de 0.15 a 0.30 metros de diámetro y de 2 a 10 metros de longitud, las cuales son atadas con fibras orgánicas o alambres cada 0.30 a 0.40 metros (ver Figura 2-10). Generalmente este sistema se elabora con especies vegetales típicas de la zona, ya que estas tendrán que soportar las condiciones climáticas a las que estarán expuestas. Las fajinas se colocan en forma semienterrada en zanjas cavadas en el suelo de poca profundidad, esto con el fin de garantizar la integración de las ramas vivas con el suelo y facilitar la germinación (Suárez, 2001). El procedimiento a seguir para la construcción de las fajinas se detalla a continuación:

- Se excavan zanjas en el lugar a proteger y revegetar.
- Mediante un manto de fibras orgánicas se cubre el talud de las zonas excavadas anteriormente.
- Se fijan las fajinas sobre los mantos mediante la utilización de estacas (ver Figura 2-11).
- El espacio entre las zanjas y fajinas es rellenado con suelo de cultivo con el propósito de sembrar vegetación entre ellas.

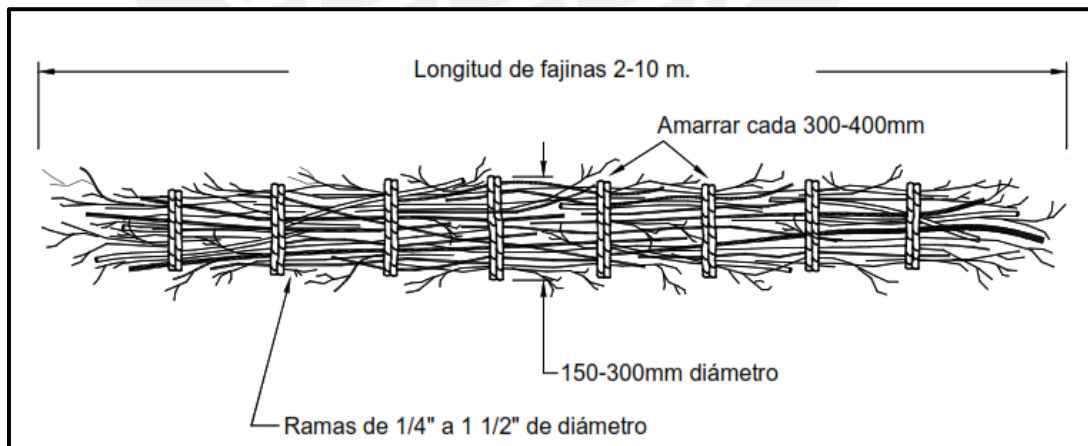


Figura 2-10: Forma típica de una Fajina (Suárez, 2001)

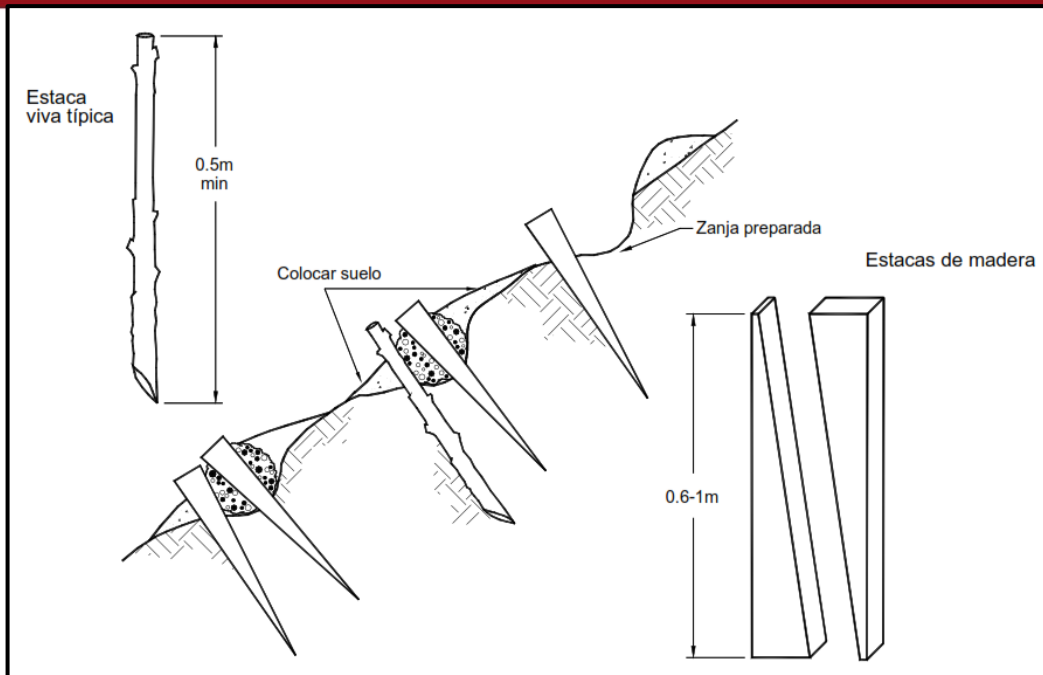


Figura 2-11: Proceso de colocación de Fajinas (Suárez, 2001)

2.3.1.2. Capas de entramados

Son capas de hierbas colocadas de manera entrecruzada con traslape, de tal forma que las puntas sobresalgan a la superficie del terreno (ver Figura 2-12). Cumplen la finalidad de reforzar el talud, favoreciendo el control de la erosión. Son usadas para taludes de baja pendiente donde se favorezcan las condiciones de crecimiento de material vegetal. El tipo de suelo a utilizar para rellenar las capas de entramados son suelos mixtos, tales como arena, grava y arcilla con presencia de abono para acelerar el crecimiento de la vegetación (McCullah, 2001).

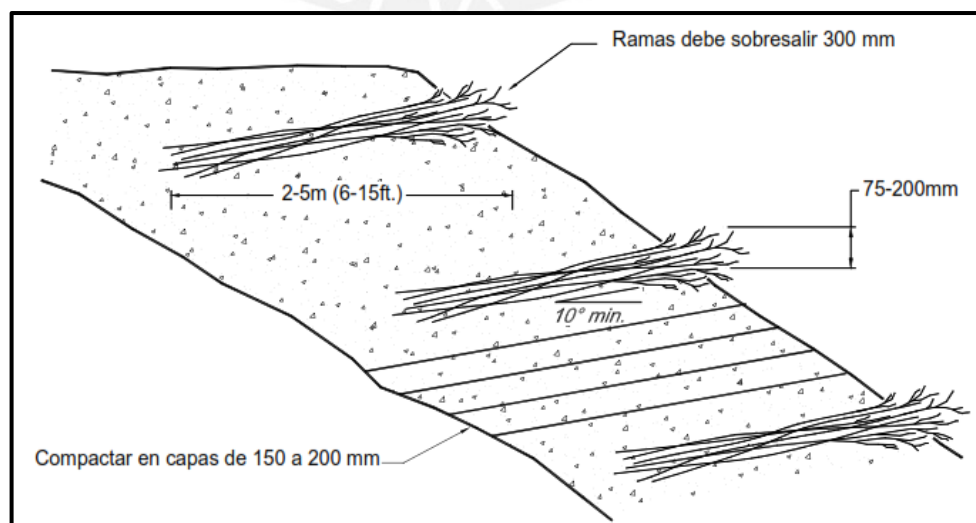


Figura 2-12: Proceso de colocación de capas de entramados (McCullah, 2001)

2.3.1.3. Cubiertas vivas

Son arreglos de troncos de madera en forma rectangular sobre la superficie del talud. El espacio entre las secciones rectangulares es relleno con ramas y suelo de cultivo. Generalmente estos tipos de sistemas son utilizados para taludes con alta pendiente y en arreglos de dos capas, logrando una profundidad de 0.5 m aproximadamente (Gray & Sotir, 1996). A continuación se expone a detalle el procedimiento para la construcción de cubiertas vías.

- Se excava una zanja al pie del talud con una profundidad mínima de 0.7 m, con el fin de garantizar una adecuada cimentación
- El espaciamiento de los travesaños horizontales son por lo general de 1.0 m, los cuales se encuentran enterrados de manera parcial a lo largo del talud.
- Se colocan los travesaños verticales con la ayuda de estacas, alambres y clavos para asegurar el armazón.
- Luego que el sistema se encuentra asegurado se rellena con ramas y suelo orgánico con espesores de 0.2 m aproximadamente.
- Opcionalmente, se puede colocar una malla de protección para sostener el sistema mientras se desarrolla el material vegetal. En la Figura 2-13 se muestra el procedimiento para la colocación de cubiertas vivas.

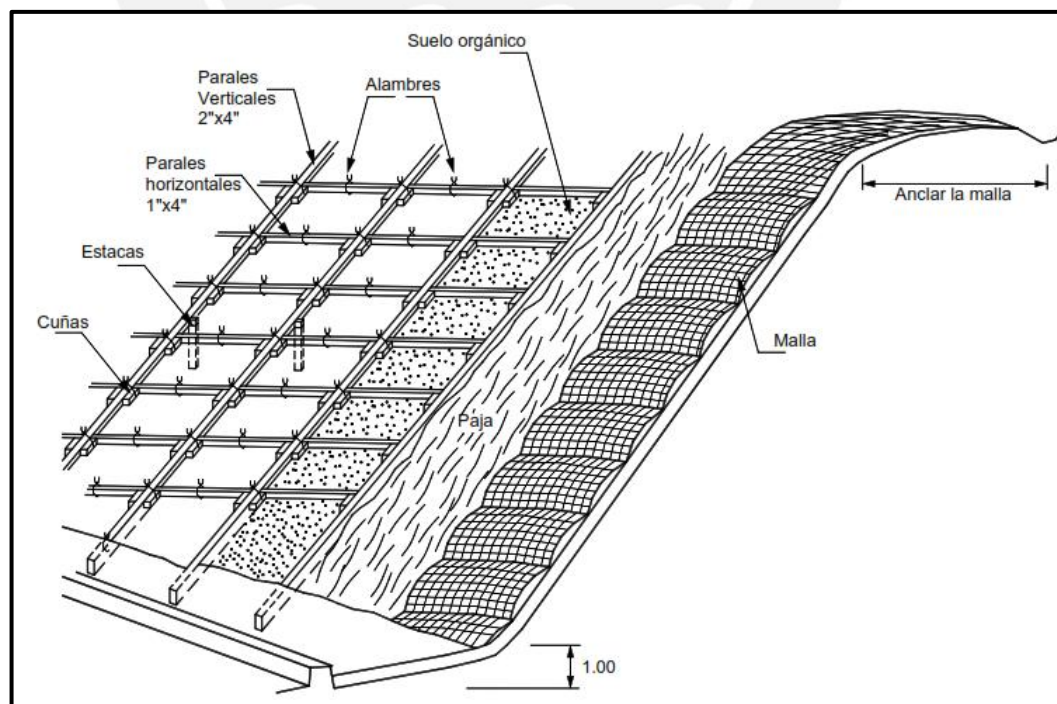


Figura 2-13: Proceso de colocación de cubiertas vivas (Gray & Sotir, 1996)

2.3.1.4. Trinchos con vegetación

Son utilizados en taludes que superan los 45°, en zonas donde la colocación de vegetación es complicada. Consiste en la inserción de trinchos con estacas vivas que se hincan en el talud para sostener un sistema de contención hecho de madera. Este sistema va acompañado de un filtro de geotextil o biomanto, el cual se rellena con suelo para sembrar la vegetación (Suárez, 2001).

2.3.2. Material vegetal

La vegetación cumple la finalidad de proteger y estabilizar los terrenos pues conforma un sistema vivo que se desarrolla de manera equilibrada y se adapta a condiciones límites. Entre las principales funciones que desempeñan estos materiales vivos, podemos encontrar los siguientes:

2.3.2.1. Función de cobertura

Debido a sus características morfológicas, las plantas desarrollan una cubierta densa en el terreno. Esta cobertura protege al suelo de agentes erosivos como la lluvia, viento, escorrentía superficial, entre otros. La dinámica que desempeña la cubierta vegetal es la de retener el agua, la cual posibilita la evaporación y consecuentemente la disminución del caudal de escorrentía superficial.

2.3.2.2. Función de armadura y anclaje del suelo

Las raíces que desarrolla la vegetación aumentan la estabilidad de terreno, por consiguiente la cohesión y ángulo de fricción interno. La mejora en las condiciones de estos parámetros dependerá del tipo de planta que se utilice y de las características que presente su raíz, en cuanto a forma y tamaño.

Existe diversidad de especies vegetales capaces de cumplir la función de estabilizar los terrenos, conformar barreras para la protección contra la erosión y mejorar las condiciones del talud con la activación biológica. La selección de estas especies dependerá de las condiciones que presente la zona a restaurar. En la Tabla 2-01 se presenta de forma resumida los principales tipos de vegetación utilizados para cumplir las funciones mencionadas anteriormente.

Tipo de Vegetación	Características
Gramíneas (Vetiver)	Versátiles y económicas, elevada tolerancia a agentes externos, establecimiento rápido, elevada densidad de cubierta.
Cañas y juncos (carrizos)	Se establecen bien en márgenes de ríos y lagos, crecimiento rápido.
Herbáceas	Enraizamiento profundo, atractivas en céspedes.
Leguminosas	Establecimiento económico, combinan bien con gramíneas.
Arbustos	Robustos y razonablemente económicos, muchas especies pueden ser sembradas, cubiertas del suelo, enraizamiento profundo, reducida necesidad de mantenimiento.
Árboles en general	Enraizamiento significativo, sin necesidad de mantenimiento cuando están bien establecidas.
Chopos y Salgueros	Enraízan fácilmente con estaca, versátiles, muchas técnicas de plantación, establecimiento rápido.

Tabla 2-01: Tipos de vegetación para uso como material para estabilizar y controlar la erosión (Gray & Sotur, 1996)

2.3.3. Protección de la vegetación

Con el objetivo de garantizar un adecuado establecimiento de la vegetación sobre el talud se recomiendan algunos sistemas de protección, tales como capas germinadoras, telas orgánicas, entre otros.

2.3.3.1. Colocación de capas germinadoras (Mulching)

Se les considera a todo tipo de materiales orgánicos e inorgánicos (paja, residuos orgánicos, aserrín, entre otros). Se utilizan con la finalidad de proteger a las semillas y ayudar a la germinación de la misma. Dependiendo del tipo de producto, la pendiente del terreno y la intensidad de lluvia varían los espesores de las capas (Gray & Sotur, 1996).

2.3.3.2. Refuerzo y protección con telas orgánicas o sintéticas

Para impedir la erosión del suelo producto de la escorrentía o el viento, se utilizan mantos orgánicos, los cuales están formados en su mayoría por filamentos vegetales tejidos entre sí para dar origen a una tela gruesa. La función de estos es brindar protección a las semillas, controlar la humedad natural y ayudar en la germinación. A medida que las plantas se establecen a lo largo de toda la pendiente, el manto se va desintegrando. Para la instalación de los biomantos en un determinado talud se deberá seguir el procedimiento sugerido por McCullah, (2001).

- Realizar una conformación del talud antes de la instalación de los mantos con el objetivo de obtener una zona uniforme.
- Colocar terreno suelto de 0.05 a 0.075 metros para el acomodo de las semillas.
- Proceder con la colocación de las semillas y nutrientes para el suelo.
- Anclar el biomanto desde la parte superior, generalmente se utiliza una longitud de anclaje de 0.2 metros.
- Desarrollar la tela hacia las partes inferiores del talud, para el caso de la longitud de traslape se utiliza por lo general 0.15 m.
- Para asegurar que la tela se adhiriera al terreno se colocan ganchos metálicos, el espaciamiento entre ellos varía dependiendo de la pendiente del talud. En la Figura 2-14 se muestra el proceso de colocación de los biomantos para la protección de la cobertura vegetal.

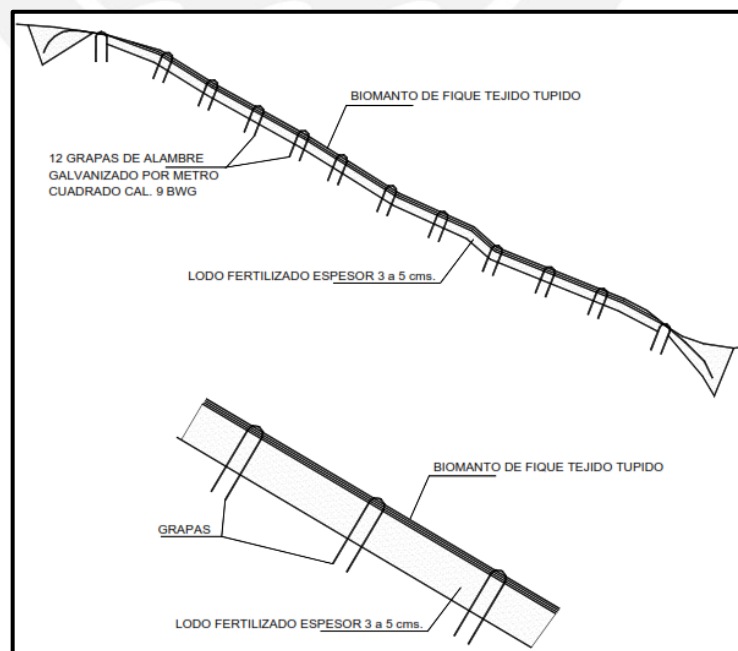


Figura 2-14: Proceso de colocación de biomantos para la protección de la vegetación (McCullah, 2001)

2.3.3.3. Sistemas sintéticos de confinamiento del suelo

Están compuestos por una serie de celdas en forma de panal que se tienden a lo largo del talud (ver Figura 2-15). Entre los espacios formados por las celdas se coloca tierra orgánica con el fin de estimular la germinación. Las dimensiones de estas celdas dependerán de la pendiente de la zona. Por ejemplo, para el caso de pendientes elevadas las celdas presentarán una altura mayor para la retención del material orgánico, caso contrario sucede para pendientes bajas donde esta altura es menor. Generalmente estas geoceldas son ancladas a la superficie con estacas y tensores, el espaciamiento y cantidad dependerán del diseño que se le proporcione.

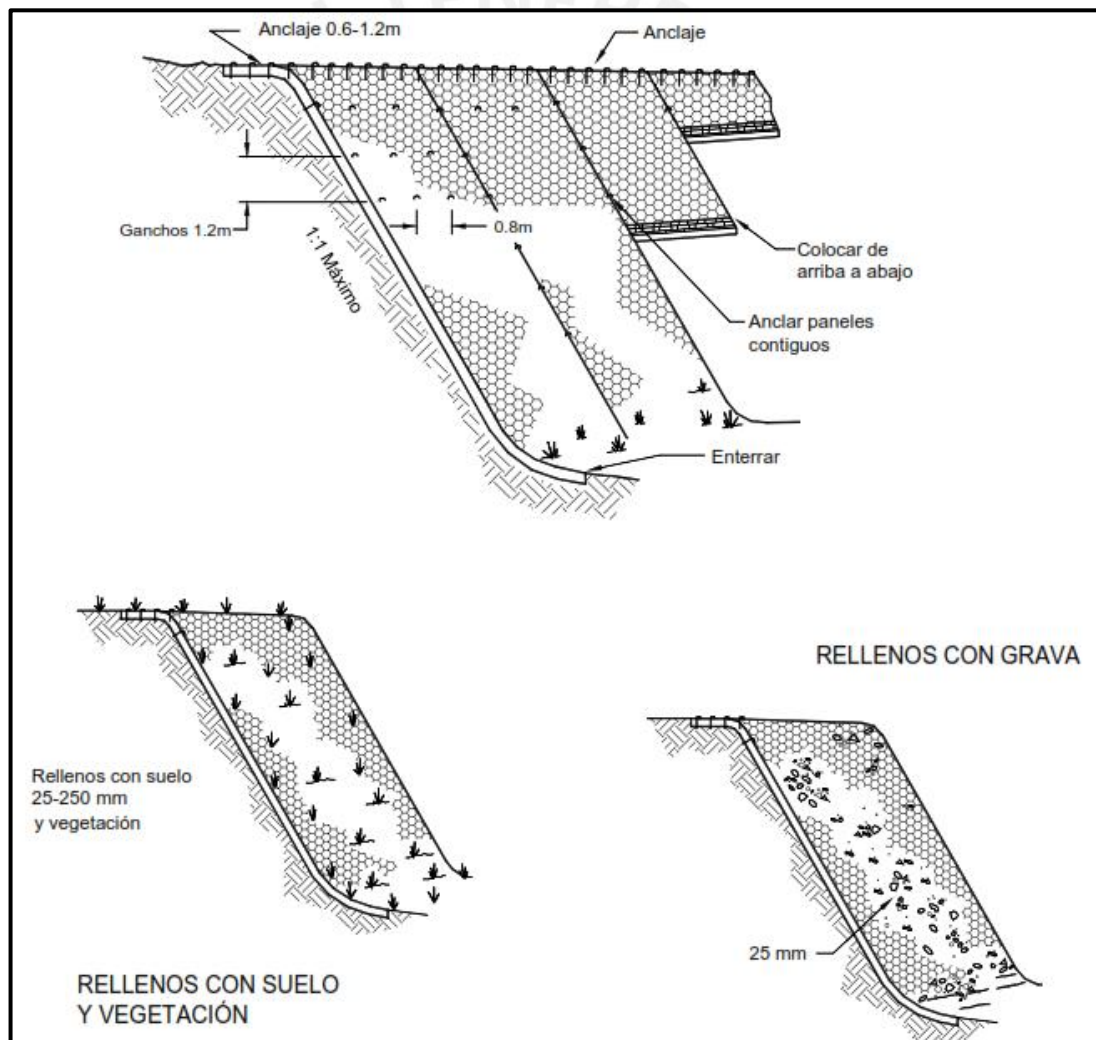


Figura 2-15: Protección de la vegetación con el Sistema de Confinamiento Celular (Suárez, 2001)

2.4. Vetiver

Conocido científicamente como *Chrosopogon Zizanioides*, es una gramínea nativa de la India utilizada para la construcción de barreras vivas para el control de la erosión. Inicialmente, esta planta fue desarrollada durante los años ochenta por el Banco Mundial para la conservación de suelos y agua en la India. Debido a los excelentes resultados, hoy en día, es ampliamente utilizado en todas partes del mundo como método de bioingeniería para la restauración de paisajes.

Muchas investigaciones a lo largo de los últimos quince años han demostrado que la aplicación de este material vegetal como sistema de revestimiento es uno de los métodos naturales más efectivos y de bajo costo para la protección ambiental y el control de erosión en suelos. Además, instituciones como el Banco Mundial y la Academia de Ciencias de Los Estados Unidos han promovido la utilización del mismo mediante la Red Internacional del Vetiver, creada desde 1994 (Ramirez, 2009). A continuación, se describirán las principales características que presenta el Vetiver como material vegetal aplicado a la bioingeniería.

2.4.1. Características morfológicas

El vetiver se caracteriza por presentar un sistema radicular profundo, masivo y denso. Puede penetrar el suelo en forma vertical de 2 a 3 metros en el primer año, y dependiendo de las condiciones del terreno alcanzar 5 metros, (Truong, Van, & Pinnars, 2008). Este material vegetal es capaz de perforar capas compactas de suelo y roca. Asimismo puede soportar largos períodos de sequía, debido a la presencia de savia en sus hojas, además de adecuarse favorablemente a las condiciones climáticas de la zona.



Figura 2-16: Vetiver desarrollado (Alberto & Lizcano, 2012)

Por otra parte, el Vetiver presenta tallos altos, erguidos y rígidos que pueden crecer hasta 3 metros en condiciones favorables. No es considerada como una planta que produzca maleza, ya que este material vegetal es estéril y por ende no produce semillas en el entorno que se aplica. Cabe resaltar que la aplicación de este sistema favorece a la infiltración de agua al suelo.

2.4.2. Características fisiológicas

El sistema Vetiver es tolerante a las variaciones climáticas extremas que se puedan presentar en el lugar de aplicación. Es capaz de soportar sequías prologadas, inundaciones y temperaturas que van desde -14°C a $+55^{\circ}\text{C}$, (Truong & Hart, 2001). No obstante, esta planta debe desarrollarse en espacios abiertos y libres de sombra ya que es intolerante a este.

Del mismo modo, la adaptabilidad es una característica significativa que presenta este material vegetal puesto que se puede aplicar en suelos con altos niveles de pH que van desde 3.0 hasta 12.5. Además de ser capaz de tolerar suelos con elevada acidez, alcalinidad, salinidad, entre otros.

2.4.3. Características mecánicas

Esta gramínea presenta raíces que poseen alta resistencia a la tracción. La tensión promedio de sus raíces es de 75 MPa (765 kg/cm^2) para un diámetro de raíz común de 0.7 – 0.8 mm. Este valor puede variar, dependiendo de las condiciones en las que se desarrolle la planta, entre 40 y 180 MPa para un rango de raíces entre 0.2 – 2.2 mm, (Truong P. , 2008). En la Figura 2-17 se puede observar la variación de la resistencia a la tracción con respecto al diámetro de la raíz.

Por otra parte, la masa del Vetiver refuerza la estructura del suelo con el aumento su resistencia al corte. Los valores de resistencia al esfuerzo cortante van desde 6 hasta 10 KPa/Kg de raíz/ m^3 , (Hengchaovanich & Nilaweera, 1998). Por este motivo, esta resistencia del suelo puede mejorar hasta en un 40%.

Asimismo, de acuerdo a la investigación “Resistencia al cizallamiento de suelos y taludes vegetados con cobertura vetiver” (Rufino & Mota, 2012) se demostró, según ensayos de corte directo con inserción de cobertura vetiver en un terreno de clasificación SUCS como limo arenoso, que aumentaron los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna, por consiguiente el incremento del factor de seguridad. En la Tabla 2-02 se observa la variación que genera la inserción de vetiver en los taludes, si bien el ángulo de fricción interno presenta una mínima variación, para el caso de la cohesión existe un aumento significativo, cerca de

67%. Por otro lado, el tiempo de plantación también juega un rol importante en el aumento de la cohesión, ya que mientras el vetiver se encuentre establecido por más tiempo, su cohesión será mucho mayor y por ende su resistencia al corte (Ver Figura 2-18).

Suelo/Talud	Ángulo de fricción interna	Cohesión
	(°)	KPa
Sin vegetación	14.6	23.4
Un año de siembra de la cobertura de vetiver	14.6	23.8
Dos años de siembra de la cobertura de vetiver	14.8	25.9
Tres años de siembra de la cobertura de vetiver	16.9	68.9
Cuatro años de la cobertura de vetiver	19.9	73.5
Talud del suelo		
Sin siembra de cobertura de vetiver	18.5	28.4
Con siembra de cobertura de vetiver	18.9	74.5

Tabla 2-02: Parámetros de resistencia al corte sin y con plantación de Vetiver (Rufino & Mota, 2012)

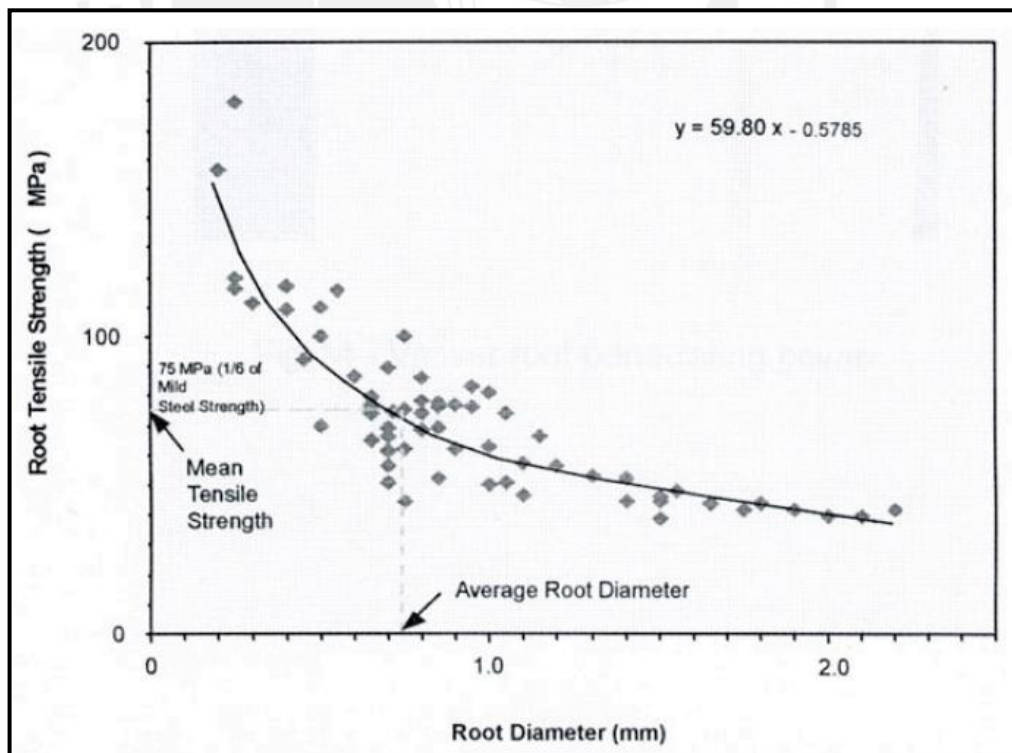


Figura 2-17: Resistencia a la tensión con respecto al diámetro de la raíz (Truong P. , 2008)

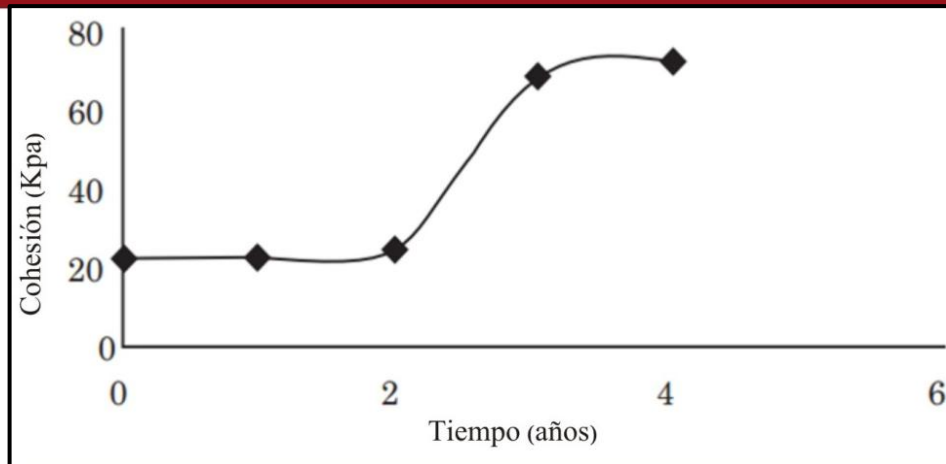


Figura 2-18: Variación de la cohesión a lo largo del tiempo de plantado el Vetiver (Rufino & Mota, 2012)

Es importante señalar la contribución del vetiver en la reducción de los planos de falla en taludes. Según ensayos desarrollados por Rufino & Mota (2012), en donde se realizó un análisis de estabilidad para taludes de 45° , se obtuvo que los planos de falla más altos correspondían a la simulación del talud sin vetiver con respecto a los que presentaban reforzamiento con vetiver (ver Figura 2-19). Además, el aumento del coeficiente de seguridad también fue evidente con la inserción de vetiver en el talud. De acuerdo a los análisis por métodos de Morgenstern-Price, Bishop y Janbu la variación fue de alrededor 63% (ver Tabla 2-03).

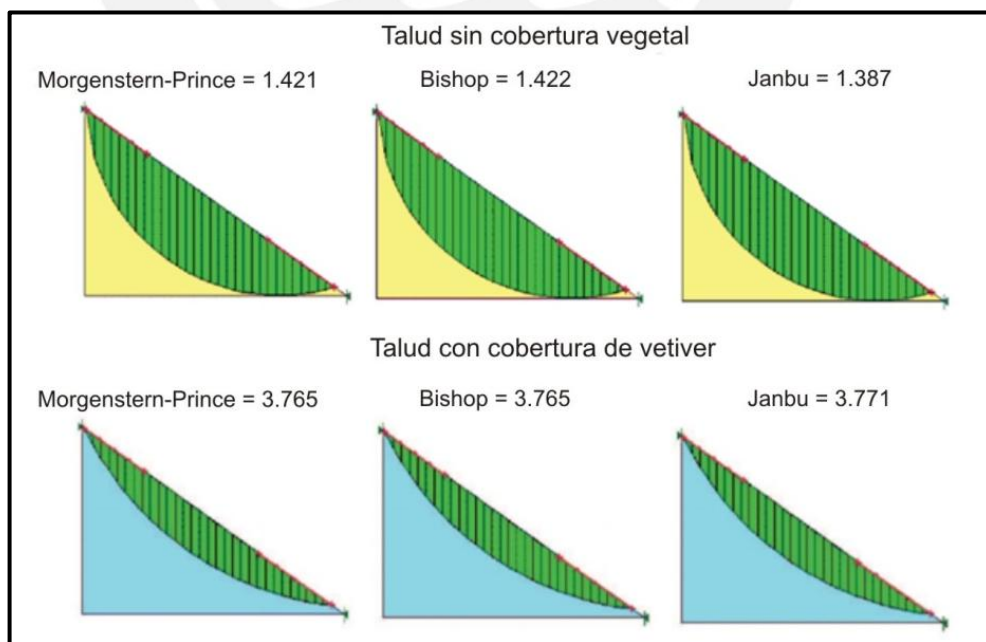


Figura 2-19: Análisis de estabilidad de taludes sin Vetiver y con reforzamiento de Vetiver luego de siete años de plantación (Rufino & Mota, 2012)

Talud	Morgenstern-Price	Bishop	Janbu
Sin cobertura vegetal	1.421	1.422	1.387
Con cobertura de vetiver	3.765	3.765	3.771

Tabla 2-03: Variación de los coeficientes de seguridad sin Vetiver y con cobertura de Vetiver (Rufino & Mota, 2012)

2.4.4. Características hidráulicas

El Vetiver establecido en etapa madura es extremadamente resistente al arrastre producido por flujos de alta velocidad, debido a la profundidad y fortaleza de sus raíces. Estudios realizados por la USQ (University of Southern Queensland, Australia), en donde se desarrollaron pruebas hidráulicas en una canaleta con la incorporación del Vetiver (ver Figura 2-20), demostraron el éxito de esta gramínea en reducir las velocidades de flujo, limitar el movimiento del suelo y por consiguiente disminuir el efecto erosivo. Según lo dicho, el Vetiver es capaz de soportar condiciones de flujo para velocidades superiores a 3.5m/s en ríos bajo situaciones de inundaciones y hasta 5m/s en canales de drenaje inundado, (Metcalf, Truong, & Smith, 2008).

Los esfuerzos cortantes que genera la escorrentía superficial es otro punto a considerar para un adecuado establecimiento y funcionalidad del Vetiver. Se ha comprobado que las raíces establecidas pueden soportar esfuerzos cortantes de 25 MPa en promedio, equivalentes a 1/3 de su esfuerzo a la tracción (Hengchaovanich & Nilaweera, 1998). La resistencia que presentan estos especímenes depende de la profundidad de establecimiento de sus raíces. En la Figura 2-21 se puede observar el incremento del esfuerzo cortante de las raíces de Vetiver y la variación del área de raíz en función a la profundidad.

Por otro lado, el espaciamiento entre las coberturas de Vetiver juega un rol importante en la resistencia hidráulica. Plantaciones densas en flujos profundos presentarán alta resistencia, por el contrario el incremento del espaciamiento disminuirá la misma. Además, estas coberturas se caracterizan por reducir significativamente el área efectiva de flujo en el canal.

Asimismo, las formas de colocación del material vegetal en el canal son importantes ya que de ello dependerá su resistencia. Por ejemplo, patrones en forma de diamante son más adecuados para canales bajos y lentos, donde la tasa de sedimentación es alta. Un patrón en forma de diamante permitirá que el agua circule a través del lecho del canal con lo que posibilita el lavado de sedimentos.

Sin embargo, para pendientes pronunciadas en donde los flujos son altamente erosivos y la sedimentación es poco probable o aceptable se recomiendan patrones en fila (Metcalf, Truong, & Smith, 2008).

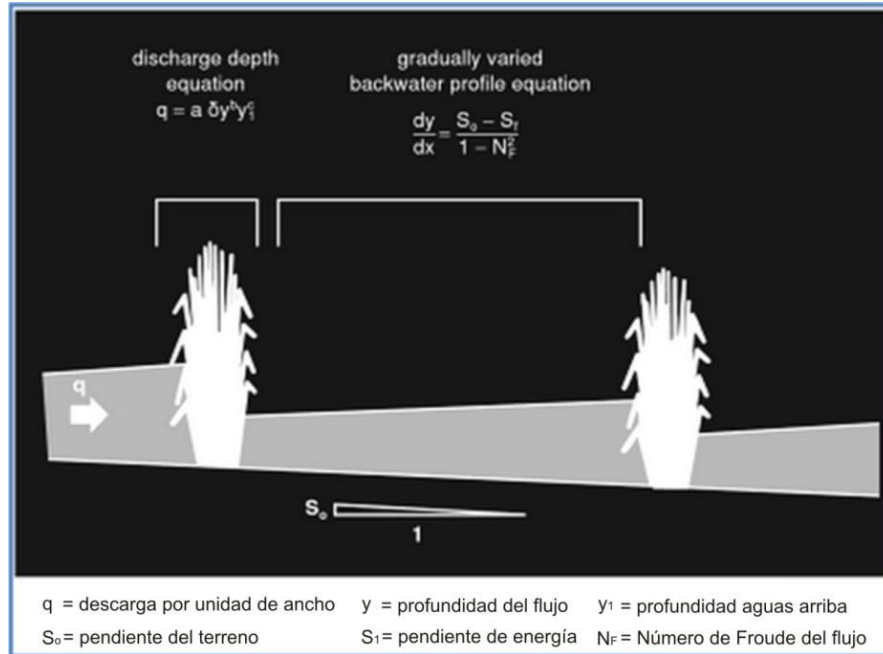


Figura 2-20: Modelo hidráulico de inundaciones a través de las barreras de Vetiver (Dalton, Smith, & Truong, 1995)

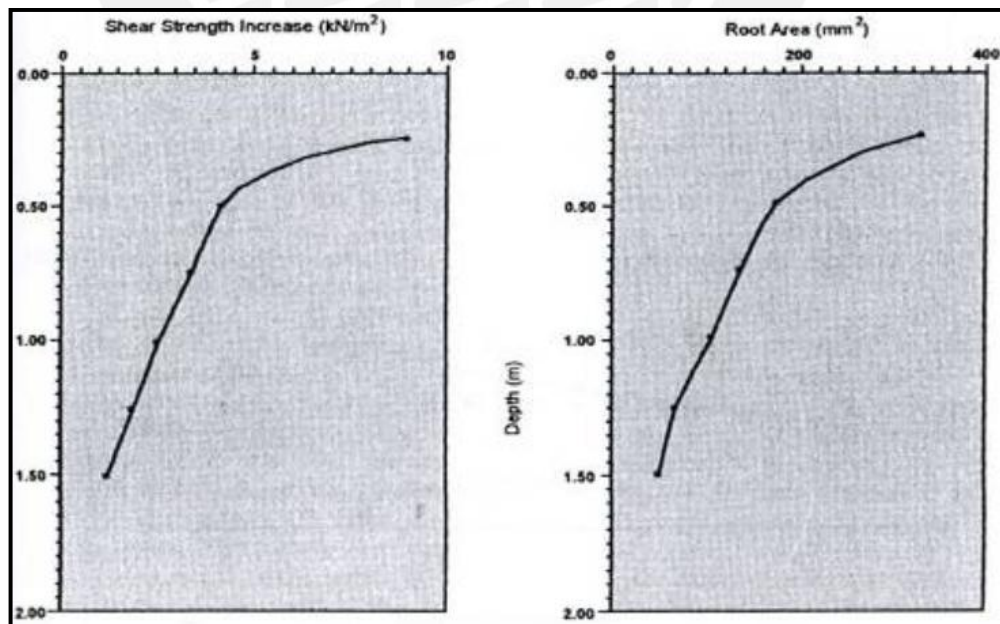


Figura 2-21: Izquierda: Incremento del Esfuerzo Cortante del Vetiver. Derecha: Variación del área de raíz (Hengchaovanich & Nilaweera, 1998)

En síntesis, el espaciamiento entre las coberturas de vetiver y el patrón que se utilice determinarán la resistencia que se presente al flujo. Además, en ríos donde el efecto erosivo es mayor, se recomienda que la cobertura se coloque en espacios estrechos (menores a 2 metros), pues ello garantizará mayor protección al canal.

2.5. Ejemplos de restauración de ríos en grandes ciudades

En la actualidad, muchos países han puesto énfasis en el cuidado del medio ambiente y este engloba a su vez la protección de sus reservas naturales. Los ríos que cruzan ciudades representan un eje fundamental para el desarrollo de las poblaciones, ya que este no solo abastece de agua sino que también contribuye con la imagen de la ciudad. En consecuencia, la restauración y conservación es esencial para el desarrollo del país, además que con ello se establece un nuevo paradigma de gestión urbana en contraste con la conservación del medio ambiente.

2.5.1. Contaminación y recuperación del estuario del río Támesis (Reino Unido)

En los años setenta, científicos y expertos en mediciones de parámetros medioambientales observaron cambios significativos en las condiciones del tramo urbano del río Támesis. Se presentaba una situación complicada, en donde la flora y fauna se vieron notoriamente afectadas. Científicos de la Universidad de Londres comenzaron a realizar mediciones de la migración de especies, de las altas cargas de sedimentos que presentaban las aguas e indicadores de oxígeno disuelto (Andrews, 1984).

Entre los principales contaminantes identificados, se establecieron cuatro como los de mayor relevancia según el Departamento de Ciencia e Investigación Industrial (1964). En primer lugar, los efluentes de aguas residuales alcanzaban un 74% en proporción a los contaminantes identificados en el río. Esta situación se presentó desde el siglo XIX cuando los drenajes pluviales se convirtieron en vías para el vertimiento de aguas residuales. En segundo lugar, los efluentes industriales se elevaron debido al crecimiento de fábricas de producción de jabón y gas, pues vertían al río grandes concentraciones de fenoles, alquitrán, naftalenos, entre otros. En tercer lugar, la introducción de detergentes sintéticos provocó un notorio deterioro del río, siendo el tetrapropileno benceno sulfonato activo el que provocó la reducción del coeficiente de intercambio de aireación superficial del mismo. Por último, la contaminación térmica debido a la construcción de centrales eléctricas en las riberas del río. Esta situación conllevó a que la temperatura de las aguas

circundantes se eleve en 3°C y por consiguiente a una disminución en la solubilidad del oxígeno alrededor del 6%.

Los objetivos principales en los que se sostuvo la restauración del estuario del río Támesis fue la de controlar los niveles de aguas residuales que se vertían al río, de tal forma que esta no comprometiera la vida acuática ni las alteraciones en los parámetros de calidad de agua. Para ello, se invirtió grandes sumas de dinero en investigación científica y en el desarrollo de tecnologías que permitan llevar un estricto control y monitoreo de la zona, además del desarrollo de un medio ambiente saludable.



Figura 2-22: Estuario del río Támesis. Izquierda: Residuos plásticos a orillas del río. Derecha: Vista área del Estuario en proceso de restauración (City of London Corporation, 2014)

2.5.2. Recuperación del cauce del río Cheonggyecheon (Corea del Sur)

Hace 500 años el río Cheonggyecheon, el cual atraviesa la capital de Corea del Sur (Seúl), sufría de inundaciones y de serios problemas de salubridad. A esto se le sumó la invasión por parte de la población a ciertos tramos del cauce, los cuales fueron alterando progresivamente su morfología pro. A raíz de la problemática presentada alrededor del río, a finales del siglo XIX el gobierno coreano planteó la construcción de una plataforma para el tránsito vehicular que cubría por completo el tramo urbano del mismo.

Es así que en los años 60 se culminaron las obras de la autopista Cheonggye Expressway, por donde transitaban 160 000 vehículos al día. En un inicio fue una solución innovadora, pero poco a poco se fue haciendo insostenible debido a las grandes sumas de dinero que se invertían en su mantenimiento. En ese aspecto, se replantearon nuevas soluciones para reactivar el cauce que había sido dejado de lado. La idea de restauración fue sembrada en 1999 por Kee Yeon Hwang, en

donde se planteaba una restauración del medio ambiente, recuperación de las aguas, entre otros (Ventura, 2008).

El proyecto de restauración se inició en julio 2003. Este contemplaba la construcción de 22 puentes a lo largo del tramo y la restauración de la calidad del agua. En consecuencia, las condiciones medioambientales mejoraron ya que se creó un microclima de refrigeración. Además, el cauce de Cheonggyecheon se convirtió en un espacio de cultura tanto para la familia como para los turistas.



Figura 2-23: Cauce del Río Cheonggyecheon. Izquierda: Autopista que cubría el tramo urbano del río. Derecha: Vista del Tramo Urbano recuperado (Ventura, 2008)

A la par con el proceso de restauración, se trabajó con la tecnología. Se crearon dispositivos para monitorear de forma independiente el ecosistema. Una red de sensores ubicuos instalados a lo largo del tramo del cauce permite monitorear la calidad del agua en tiempo real. Este control minimiza el daño producido por lluvias torrenciales y detecta la contaminación del agua. Hoy en día, el cauce de Cheonggyecheon es considerado uno de los principales atractivos turísticos de Corea, ya que planteó un nuevo estilo de planeamiento de ciudad que involucró la convivencia integrada de la sociedad y medio ambiente.

2.5.3. Recuperación del tramo urbano del río Manzanares (España)

Alrededor de los años ochenta el tramo urbano del río Manzanares presentaba altos índices de contaminación, a esto se le sumaba un inadecuado sistema de saneamiento en toda la ciudad. Debido a esta situación, las autoridades pusieron en marcha un plan de restauración para la recuperación de sus aguas.

Como primera fase se inició con la construcción de plantas de tratamiento, ya que el proceso de restauración requería, en primera instancia, el control y depuración de las aguas vertidas. Además, se realizaron gran variedad de estudios para determinar las causas probables de contaminación en el afluente, así como para la

evaluación de la propuesta de solución. Estos contemplaban análisis hidrológicos para regímenes de caudales extraordinarios, modelamientos hidráulicos y estudios de calidad de agua.

La propuesta de solución contemplaba tres pasos que permitirían lograr el equilibrio del ecosistema. En primera lugar, se sustituiría el río por una serie de embalses sucesivos. Luego, con el fin de generar mayor velocidad de escorrentía y evitar la formación de un cauce meándrico por el poco caudal del río se aperturaron compuertas. Por último, la construcción de secciones de canal adecuada a los caudales normales circundantes.



Figura 2-24: Vista del tramo urbano del río Manzanares. Izquierda: A inicios de las obras de restauración. Derecha: Vista aérea del tramo al finalizar las obras (Cristobal, 1986)

En resumen, el proceso de restauración involucró una serie de estudios y tecnologías aplicadas a lo largo del tramo urbano. Se aseguró la estabilización de taludes y el embellecimiento de los límites exteriores del río, así como la conservación de las especies que habitaban el río los cuales fueron principalmente peces. Hoy en día este tramo es considerado uno de los principales atractivos turísticos de Madrid, en donde aún se sigue estricto control y monitoreo de los parámetros ambientales para salvaguardar el equilibrio de este sistema natural.

2.5.4. Proyecto Vía Parque Rímac – Río Verde (Perú)

El proyecto Río Verde se fundamenta en el encauzamiento del río Rímac, en su recorrido urbano, de tal forma que se generen en sus márgenes espacios para la utilización de áreas verdes y servicios. Este proyecto de recuperación englobará los distritos de Lima, Rímac, El Agustino, Ate y parte de San Martín de Porres; más no

el distrito del Callao y la zona de estrangulamiento antrópico (zona en forma de acantilados) perteneciente a San Martín de Porres. Entre sus principales medidas se encuentra la construcción del gran parque Cantagallo de cerca de 25 hectáreas, el cual se localizará en la zona que comprende el centro histórico de Lima (Colegio de Ingenieros del Perú (CIP), 2012).

El río Rímac será reducido a un ancho de solo 45 metros, con lo cual permitirá ganar alrededor de 60 metros para la reforestación y el reverdecimiento, además de la creación de alamedas y paseos. En ese aspecto, lo que plantea el proyecto es generar un cauce formado con espacios donde se queden depositados los elementos sólidos que arrastra el agua en su recorrido (Kuroiwa, 2011).

Por otro lado, se propone la recuperación de 6 km de laderas con la construcción de muros de contención y áreas verdes, lo cual brindará un aporte ambiental significativo al proyecto. Es importante señalar el proceso de reubicación de viviendas que actualmente se está desarrollando en los márgenes del río. De acuerdo con el trazo de vía del Proyecto Vía Parque Rímac, se estima que aproximadamente 1000 casas tendrán que ser reubicadas. En la Figura 2-25 se puede observar la propuesta de recuperación planteada para este proyecto.

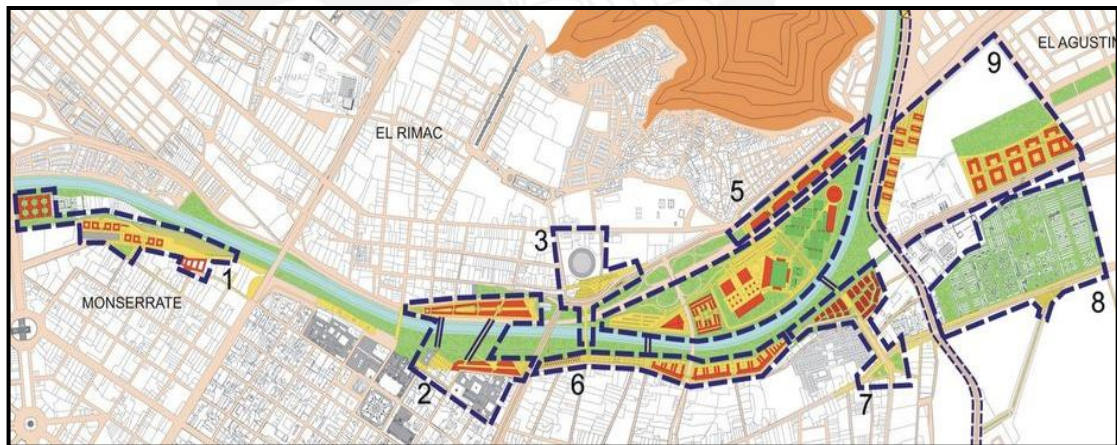


Figura 2.25: Propuesta de recuperación ambiental y urbana del río Rímac – Proyecto Río Verde (CIDEU, 2014)

CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El tramo urbano del río Rímac está comprendido en la subcuenca Bajo río Rímac (ver Anexo N° 01: Cuenca del río Rímac – Subcuenca Bajo río Rímac). Es importante señalar que la delimitación de subcuencas fue realizada en el “Estudio Hidrológico y Ubicación de la Red de Estaciones Hidrométricas de la Cuenca del río Rímac” (MINAG, 2010) mediante el método Pfafstetter (1989). Según esta delimitación y codificación, la cuenca del río Rímac se subdividió en 9 unidades hidrográficas de nivel 7, siendo la subcuenca Bajo río Rímac de código 1375541 Asimismo, esta subcuenca abarca políticamente la totalidad de los distritos del Rímac, Callao y Lima, y parte de San Juan de Lurigancho y San Martín de Porres.

3.1. Características Geomorfológicas

3.1.1. Parámetros de forma

La forma que posee una cuenca influye de manera significativa sobre la escorrentía, es decir, una cuenca que describa una forma alargada presentará por lo general un solo cauce principal, caso contrario sucede con una que exhiba forma ovalada. Entre los principales parámetros de forma que describen a una cuenca se encuentra el área, perímetro, longitud del río principal, coeficiente de compacidad, entre otros. Para el caso de la zona en estudio, en la Tabla 3-01 se presentan los valores de estos parámetros, tanto para la cuenca del río Rímac como para la subcuenca bajo río Rímac.

Parámetro		Unidad de medida	Cuenca Rímac	Subcuenca bajo río Rímac
Área de la cuenca		km ²	3503.95	441.03
Perímetro de la cuenca		km	419.50	156.24
Longitud del río principal		km	134.00	22.92
Ancho promedio		km	26.15	19.24
Coeficiente de compacidad		---	2.00	2.10
Rectángulo equivalente	L _{mayor}	km	193.10	72.00
	L _{menor}	km	18.15	6.10

Tabla 3-01: Parámetros de forma Cuenca del río Rímac – Subcuenca Bajo río Rímac (ANA, 2012)

3.1.2. Parámetros de relieve

El relieve de la cuenca representa el aspecto más importante con respecto a la incidencia sobre la escorrentía. Ello debido a que la pendiente juega un rol significativo en el tiempo de concentración de las aguas de los afluentes al curso principal. Entre los parámetros más utilizados para describir el relieve de la cuenca se encuentran la altitud media, altitud de frecuencia media, pendiente media, entre otros. A continuación se muestra en la Tabla 3-02 algunos de estos parámetros para describir el relieve de la cuenca.

Parámetro	Unidad de medida	Cuenca Rímac	Subcuenca bajo río Rímac
Altitud media de la cuenca	msnm	2939.87	363.75
Altitud de frecuencia media	msnm	3372.41	209.71
Pendiente media de la cuenca	m/m	0.0293	0.0303

Tabla 3-02: Parámetros de relieve Cuenca del río Rímac – Subcuenca bajo río Rímac (MINAG, 2010)

3.1.3. Parámetros de la red hidrográfica

Son los que definen las características del drenaje o cursos de agua. De estos se puede obtener información acerca de la morfología, materiales del suelo y cantidad de agua que circula. Están definidos por los siguientes parámetros:

3.1.3.1. Tipo de corriente

El cauce del río Rímac se describe como un tipo de corriente intermitente, ya que estos ríos se caracterizan por llevar agua la mayor parte del tiempo, principalmente en época de lluvias, y cesa en época de sequías (SENAMHI, 2015).

3.1.3.2. Pendiente media del río principal (Sm)

Este parámetro define la velocidad de escorrentía superficial de un río. La pendiente media del río Rímac presenta un valor de 0.0445 m/m, y para el río en la subcuenca bajo río Rímac este valor es de 0.096 m/m (MINAG, 2010).

3.2. Características Climatológicas

De acuerdo a los registros de distintas estaciones meteorológicas instalados a lo largo de la cuenca del río Rímac, se describen a continuación los parámetros que definen el clima del mismo.

3.2.1. Precipitación

Según la Autoridad Nacional del Agua, entre los meses de diciembre a marzo se presenta el período de lluvias de mayor magnitud con el 72.52% en promedio de las estaciones, de las precipitaciones totales anuales. En los meses comprendidos entre mayo y setiembre se presenta el período seco con valores de precipitaciones que corresponden al 7.15% de las precipitaciones totales anuales, en promedio de las estaciones. Por último, entre los meses transitorios comprendidos de octubre a noviembre y abril las precipitaciones alcanzan en promedio de las estaciones el 20.33% de las precipitaciones totales anuales (ANA, 2012).

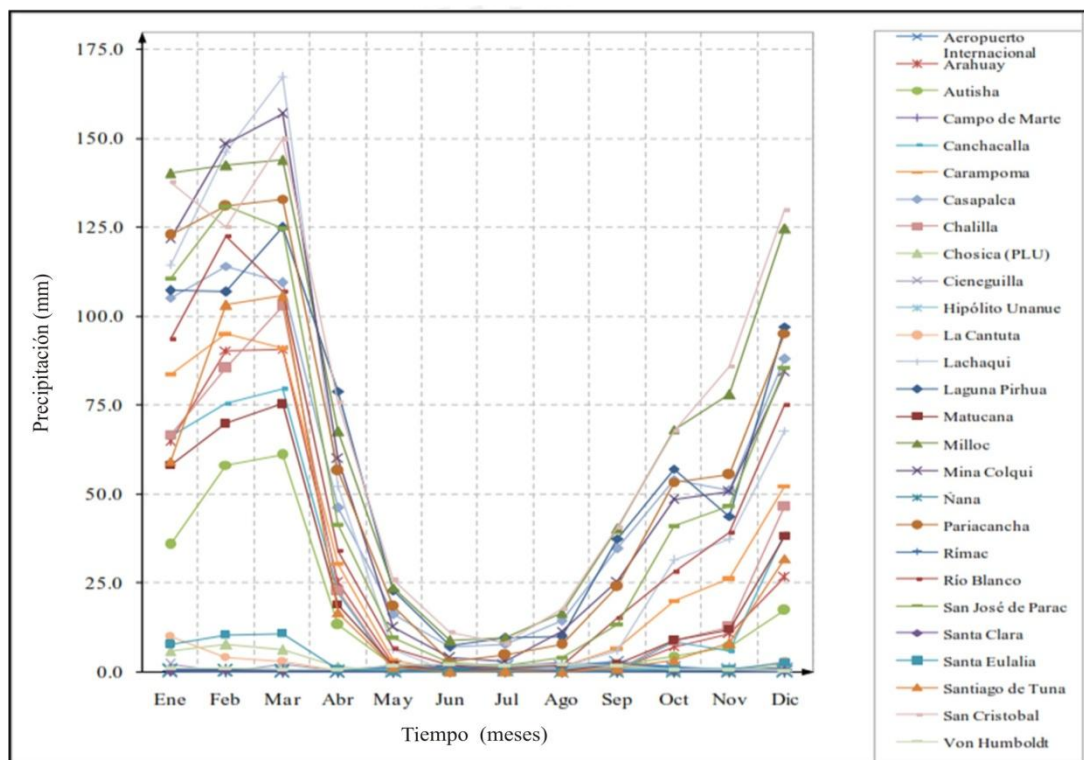


Figura 3-01: Variación mensual de la precipitación en las estaciones de la cuenca del río Rímac (MINAG, 2010)

3.2.2. Temperatura

Entre los meses de noviembre a marzo se registran las temperaturas más altas, siendo el mes de enero el que presenta los valores más elevados (ver Figura 3-02). Por otro lado, las temperaturas medias más bajas se presentan en el mes de julio (MINAG, 2010).

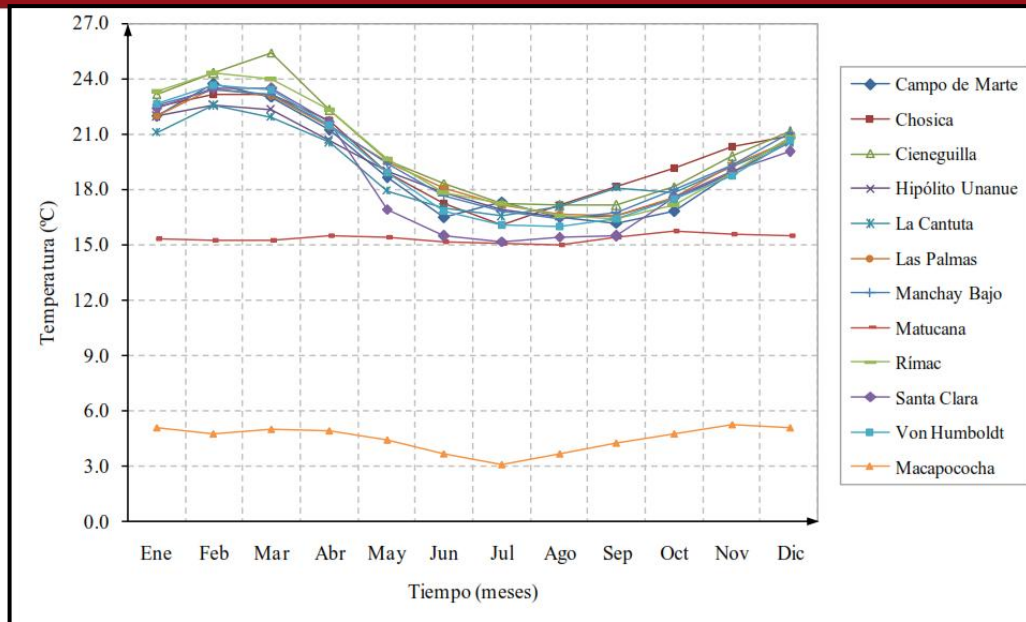


Figura 3-02: Variación mensual de la temperatura media (°C) en las estaciones de la cuenca del río Rímac (MINAG, 2010)

3.2.3. Humedad Relativa

Se registran mayores porcentajes de humedad en las estaciones cercanas al litoral marino, estos valores van decreciendo a medida que se va adentrando a la región andina (ver Figura 3-03). Cabe resaltar que se presentan valores de humedad altos en las noches, esto debido al descenso de temperatura a comparación del día, donde la humedad es baja.

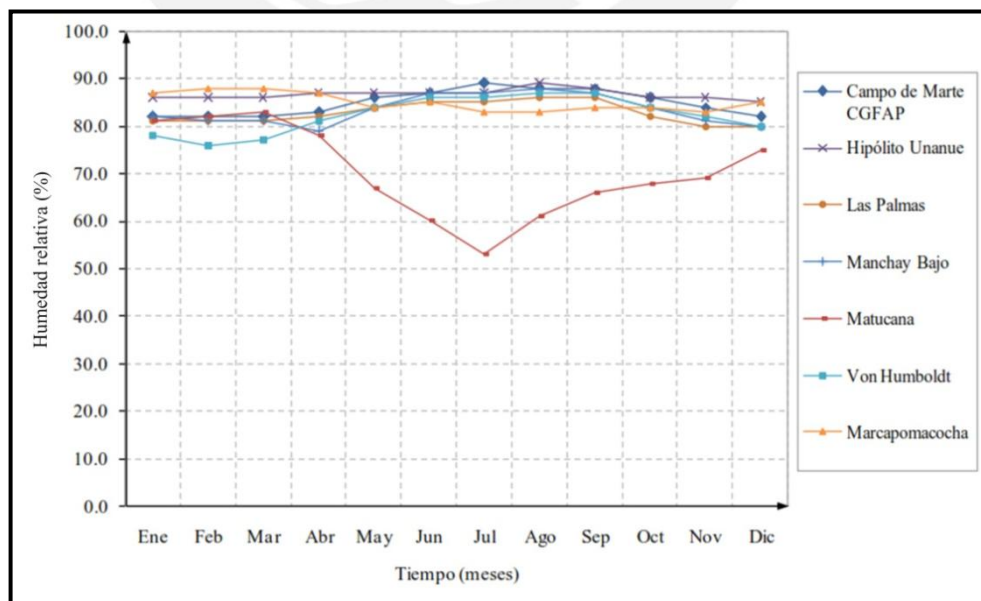


Figura 3-03: Variación mensual de la humedad relativa (%) en las estaciones de la cuenca del río Rímac (MINAG, 2010)

3.3. Características Geológicas y Geotécnicas

3.3.1. Geología Regional

De acuerdo a estudios de campo realizados por el INGEMMET, la cuenca del río Rímac presenta rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas que comprenden los períodos del Jurásico y Cuaternario reciente. Depósitos aluviales y coluviales constituyen el lecho del río, producto de las acumulaciones de materiales que han sido acarreados por las aguas de escorrentía superficial. Por otra parte, en la zona de estudio (subcuenca bajo río Rímac), el Batolito de la costa es la falla con mayor influencia en la subcuenca. Presenta formaciones de diques andesíticos y rocas como pizarras, cuarcitas y mármoles (CISMID, 2007).

3.3.2. Geodinámica Externa – Procesos morfodinámicos

Entre los principales procesos que se pueden encontrar en el área de estudio, producto de los flujos turbulentos y la dinámica torrencial de la cuenca del río Rímac, se presentan los siguientes:

3.3.2.1. Desprendimientos

Se describen como las caídas de fragmentos rocosos a lo largo de las laderas del cauce del río. Generalmente se producen debido a la desestabilización del material por efectos de movimientos sísmicos, acción erosiva de la precipitación o la alteración de la morfología por la invasión del lecho por parte de los pobladores.

3.3.2.2. Falla cantilever

Se denomina a la falla en voladizo que produce el colapso de un bloque en la ladera de un canal. Generalmente se produce luego de que el margen del río ha sido socavado. La causa principal de este tipo de falla se fundamenta en el lavado de la matriz de arena y eliminación de finos de una capa de estrato de grava a lo largo del margen del río. Por otro lado, los parámetros que influyen en su ocurrencia están relacionados con la geometría que presenta el canal, así como las condiciones de flujo (Reckendorf, 2010). En la Figura 3-04 se observa el mecanismo que presenta este tipo de falla. En la mayoría de casos, se desarrolla en ríos de lechos de grava en donde el material que se desprende por la erosión es la que crea el voladizo.

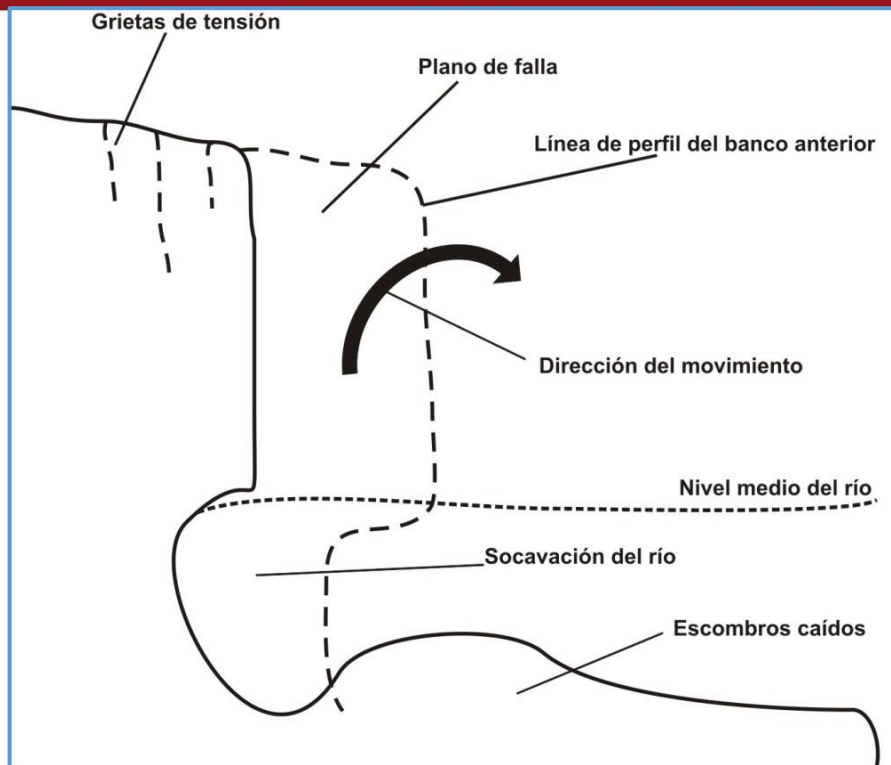


Figura 3-04: Esquema de mecanismo de falla en Cantilever (Talukdar, 2012)

3.3.2.3. Inundaciones

Se describen como el desborde del caudal del cauce del río y su posterior invasión a las superficies aledañas. Son originadas principalmente por la alteración de la morfología del lecho del río, por ocupación de las poblaciones en las laderas del mismo y por construcciones de infraestructura como muros de contención, puentes, bocatomas, entre otros.

3.3.3. Sismicidad

La cuenca del río Rímac se encuentra ubicada en una zona de alta actividad sísmica, y en particular el área en estudio (subcuenca bajo río Rímac). De acuerdo a la Norma Sismorresistente E.030, la subcuenca pertenece a la Zona 4 con un factor de zona $Z=0.45g$. En cuanto a las condiciones geotécnicas, el tipo de suelo es considerado S1 y S2, con factores respectivos de $S= 1.0$ y 1.2 , y periodos predominantes T_p de 0.4 y 0.6 , respectivamente.

3.3.4. Geotecnia de la zona de estudio

Según la información proporcionada por la Autoridad Nacional del Agua, se realizaron investigaciones geotécnicas en 8 puntos específicos a lo largo de la cuenca del río Rímac. Para intereses propios de la investigación se trabajó con la

información correspondiente al Sector Huáscar, distrito de San Juan de Lurigancho, (ver Anexo N° 02: Ubicación de Excavación Geotécnica C-01 – Sector Huáscar: San Juan de Lurigancho). Asimismo, se puede encontrar en el Anexo N° 03 los resultados de laboratorio correspondiente a ese sector.

De acuerdo a los resultados de laboratorio expuestos en el “Estudio del tratamiento del cauce del río Rímac para el control de inundaciones” (ANA, 2012), existe una predominancia de grava mal gradada (GP), la cual presenta a su vez un índice de plasticidad de cero por lo que se le considera un suelo no plástico. Por lo general, este tipo de terreno es excelente para el apoyo de cimentaciones ya que su capacidad de carga es alta.

Propiedades Físico-Mecánicas y Parámetros Geotécnicos	
SUCS	GP (Grava mal gradada)
Límite Líquido	NP
Límite Plástico	NP
Índice Plástico	---
Gravas (%)	76.01
Arenas (%)	23.65
Finos (%)	0.34
D50 (mm)	16.2
Permeabilidad (cm/seg)	> 10 ⁻²
Máximo peso unitario (Ton/m ³)	1.84 - 2.00
Ángulo de Fricción Interna (°)	36
Capacidad Portante (kg/cm ²)	2.00 -4.00
Cohesión (kg/cm ²)	0.4

Tabla 3-03: Propiedades Físico-Mecánicas y Parámetros Geotécnicos para la zona en estudio, elaboración propia basados en datos de la ANA y Granados (2006)

3.4. Caudales máximos

Para realizar la simulación hidráulica del tramo urbano del río Rímac fue necesaria la introducción de caudales máximos. Para ello, la Autoridad Nacional del Agua (2012) evaluó una serie histórica de caudales de la estación hidrométrica de Chosica correspondiente al período comprendido entre 1920 al 2011 para una

cantidad de 84 años, la cual es administrada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

3.4.1. Estación hidrométrica Chosica

Se encuentra ubicada en la provincia de Lima, distrito de Chaclacayo a una altitud de 906 msnm. Presenta un registro histórico desde 1912, con el registro de caudales naturales hasta el año 1964 y caudales regulados hasta la fecha (MINAG, 2010).

3.4.2. Caudales máximos mediante distribuciones probabilísticas

De acuerdo al estudio “Tratamiento del cauce del río Rímac y principales quebradas tributarias para mitigar efectos de eventos hidrológicos extremos” (ANA, 2012), la determinación de caudales máximos implicó la utilización del programa HidroEsta. Se evaluaron 8 modelos probabilísticos, considerando un nivel de significancia de 5%, método de estimación de parámetros, momentos lineales y pruebas de bondad de ajuste por Kolmogorov.

Entre las funciones con mejor ajuste se encontraron Normal, LogNormal 2 parámetros, LogNormal 3 parámetros, Gumbel, LogGumbel, Gamma 2 parámetros y Gamma 3 parámetros. Debido a que la data histórica presentó buena aproximación con la distribución Log Normal 2 parámetros (ver Figura 3-05), la ANA optó por emplear los caudales obtenidos por esta función. En la Tabla 3-04 se presentan los caudales máximos calculados por la ANA (2012).

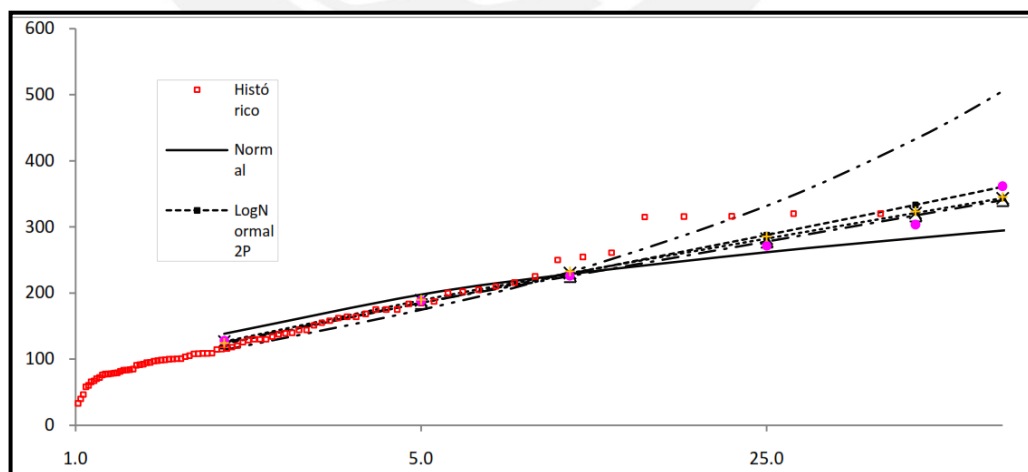


Figura 3-05: Tendencia de los datos históricos a las distribuciones probabilísticas (ANA, 2012).

T.R. (años)	Q max (m ³ /s)
2	122.9
5	185.0
10	229.1
25	287.7
50	333.3
75	360.7
100	380.5
200	429.5
500	497.4
1000	551.4

Tabla 3-04: Caudales máximos para distintos períodos de retorno (ANA, 2012)

3.5. Ecología

La subcuenca bajo río Rímac se encuentra ubicada dentro de la característica ecológica desierto desecado Subtropical (dd-S). Este tipo de área ecológica corresponde a las planicies y partes bajas de los valles costeros, desde el nivel del mar hasta los 1800 msnm (MINAG, 2010). El relieve topográfico que lo caracteriza es variado con zonas planas, onduladas y abruptas. Además, cabe resaltar que al ser una zona árida la vegetación es muy escasa.

3.6. Puntos críticos en el tramo urbano

Se han identificado zonas de alto riesgo en el tramo urbano debido a inundaciones y efectos de erosión (ver Anexo N° 04: Puntos críticos en el tramo urbano). Ello ha traído consigo daños a viviendas e infraestructura de servicios aledañas al cauce del río. Por ejemplo, el tipo de falla cantilever es la que se está generando de manera progresiva en el tramo comprendido entre el Puente del Ejército (Cercado de Lima) y el Puente de la Avenida Universitaria (San Martín de Porres). En ese aspecto, la solución que se propondrá con la utilización de métodos de bioingeniería para su restauración deberá tener presente todos estos problemas.

PROPUESTA DE SOLUCIÓN

4.1. Ubicación

Para el desarrollo del presente estudio y evaluación de la alternativa de solución se trabajó con un tramo que presenta una longitud de 1 080 metros, con 545 metros aguas arriba y 535 metros aguas abajo con respecto al Puente del Ejército, respectivamente. Esta zona comprende a los distritos de San Martín de Porres, Lima y Rímac. En la Figura 4-01 se muestra la localización del tramo de estudio.



Figura 4-01: Ubicación del tramo urbano del río Rímac a modelar (Elaboración Propia, 2014)

4.2. Topografía

La información topográfica fue proporcionada por la consultora Cesel Ingenieros de un estudio de consultoría de evaluación hidráulica del Puente del Ejército por encargo de la Municipalidad Metropolitana de Lima en el año 2010 (ver Anexo N° 05: Plano Topográfico de la zona de estudio (Referencia Puente del Ejército)). Esta información contempla el levantamiento batimétrico, así como las principales estructuras presentes (puentes, losas deportivas, pistas, entre otros). En la Figura 4-02 se puede visualizar parte de la información topográfica.

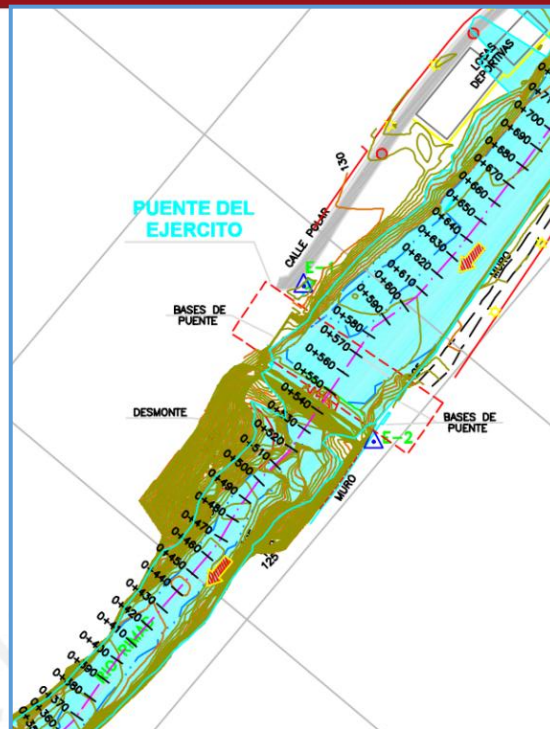


Figura 4-02: Información topográfica correspondiente a la sección del Puente del Ejército en el distrito de Lima (Cesel Ingenieros, 2010)

Por otra parte, según la clasificación de ríos propuesto por Rosgen (1994) en el Capítulo II, se identificaron dos tipos de secciones transversales características definidas aguas arriba y aguas abajo con respecto al Puente del Ejército. En el tramo aguas arriba, correspondiente a una sección en forma casi trapezoidal se le denominó como zona de atrincheramiento poco profundo, asimismo para el caso de la sección aguas abajo que presenta una forma casi rectangular profunda se le describió como zona de atrincheramiento profundo (tramo de estrangulamiento antrópico). En la Tabla 4-01 se encuentra la distribución de progresivas con respecto a la clasificación de secciones transversales aguas arriba y aguas abajo.

Clasificación	Progresivas
Zona de atrincheramiento poco profundo	0+570 al 1+080
Sector Puente del Ejército	0+505 al 0+570
Zona de atrincheramiento profundo	0+000 al 0+505

Tabla 4-01: Distribución de progresivas con respecto a la clasificación de las secciones transversales (Elaboración Propia)

4.3. Métodos en condiciones actuales

Con el fin de determinar la conducta hidráulica del río Rímac, así como analizar las condiciones actuales que presentan los taludes en los márgenes del tramo en estudio, se procedió a realizar un modelo hidráulico y análisis de estabilidad global.

4.3.1. Modelamiento hidráulico

Para realizar este modelo se empleó el software HEC-RAS (Hydrological Engineering Center – River Analysis System) Versión 4.1.0 creado por la United States Army Corps Engineers USACE. Dicho modelo permitirá evaluar el tramo bajo condiciones de caudales normales o eventos extremos, en donde se podrán obtener niveles de superficie de agua, profundidades, velocidades, zonas de desbordamiento, entre otros. Para ello, es importante definir previamente las condiciones iniciales para efectos de la simulación.

4.3.1.1. Parámetros Iniciales

a. Datos hidrométricos

La información hidrométrica corresponde a la serie de caudales máximos registrada en la estación de Chosica, la cual se puede observar en la Tabla 3-04 presentada en el capítulo anterior. Para el caso de la simulación hidráulica se trabajó con períodos de retorno de 50, 100 y 500 años, respectivamente.

T.R. (años)	Q max (m ³ /s)
50	333.3
100	380.5
500	497.4

Tabla 4-02: Información hidrométrica para el desarrollo del modelo hidráulico (ANA, 2012)

b. Coeficiente de rugosidad de Manning (n)

La resistencia al flujo se describe mediante la influencia de la fricción. La magnitud de esta resistencia es expresada como un coeficiente, en este caso el número de Manning (n) (Vu, 2007). La elección del valor de este coeficiente dependerá de las características que presente el tramo en estudio, así como las condiciones en las que se encuentre. En visitas de campo se observó en el cauce principal la presencia de montículos de arena y pozos de material

pedregoso, y en las laderas la formación de algunos arbustos. Con base en la descripción anterior y de acuerdo a las tablas expuestas en el libro de Ven Te Chow (ver Tabla 4-03) se puede considerar un coeficiente de rugosidad equivalente a 0.045.

Corrientes naturales	Mínimo	Normal	Máximo
a. Corrientes en planicies			
1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0.025	0.030	0.033
2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas	0.030	0.035	0.040
3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes	0.040	0.048	0.055
6. Igual al 4, pero con más piedras	0.045	0.050	0.060
7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0.075	0.100	0.150

Tabla 4-03: Coeficientes de Rugosidad según Manning para corrientes naturales (CHOW, 1994)

Por otra parte, una alternativa propuesta por el Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS por sus siglas en inglés (United States Geological Survey) es la comparación del tramo en estudio con algunos canales típicos cuyos coeficientes de rugosidad de Manning (n) son conocidos. El USGS brinda una amplia información de condiciones de canales que se encuentran al oeste de los Estados Unidos, en donde se pueden comparar la apariencia, geometría y características de rugosidad con las que presenta el río Rímac. De acuerdo a este método, el Clear Creek cerca de Golden (Colorado) presenta condiciones parecidas al tramo en estudio, debido a que está formado por material coluvial y predominancia de relieve en forma de acantilados (ver Figura 4-03). Según lo mencionado, el valor de coeficiente de rugosidad de Manning que se obtiene por este método es de 0.050.

Además, de acuerdo a la teoría propuesta por Anderson (1970), el valor del coeficiente de rugosidad de Manning puede ser calculado mediante las características geotécnicas del cauce en estudio (Fox, 2004). Para ello es necesario conocer el diámetro medio de la partícula (D_{50}) y mediante la aplicación de la ecuación 4-01 obtener el valor de Manning requerido.

$$n = 0.0395D_{50}^{1/6} \quad (4-01)$$

El valor del (D_{50}) es 16.2 mm, el cual se puede encontrar en la Tabla 3-03: Propiedades Físico-Mecánicas y Parámetros Geotécnicos expuesto en el Capítulo III. Cabe resaltar que para la aplicación de esta ecuación el valor del D_{50} debe encontrarse en unidades de pies. El valor que se obtendrá del desarrollo de la ecuación es 0.0242.



Figura 4-03: Vista de una sección transversal característica Clear Creek (Colorado) con $n = 0.050$ (USGS, 2014)

Sin embargo, para la realización del modelo se necesitará un coeficiente de rugosidad que represente la condición más crítica. En ese aspecto, de acuerdo a una publicación realizada por la U.S. Department of Transportation (N.H.I., 2005) existe una relación entre el coeficiente de rugosidad de Manning (n) y la profundidad del flujo (h). Este criterio aplica para canales de lecho gravoso con caudales pequeños, en donde la profundidad relativa de flujo (h/D_{50}) debe encontrarse entre 1.5 y 185. En este sentido, debido a que el tramo del río Rímac cumple con las consideraciones mencionadas, se tomó el valor de rugosidad de Manning de la USGS de 0.050 como valor crítico, puesto que a mayor rugosidad habrá un ligero incremento en los tirantes.

c. Pendiente del eje del tramo

Con el fin de afinar el modelo, fue necesario conocer las condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo del tramo en estudio. Para efectos de la simulación se empleó las pendientes definidas por la geometría del cauce. Para el tramo aguas arriba se utilizó una pendiente de 1% y para el caso de la sección aguas abajo el valor de 1.26%, respectivamente (ANA, 2012).

4.3.1.2. Simulación régimen permanente

En primera instancia se realizó la simulación para el flujo en régimen permanente con las condiciones descritas anteriormente. El detalle de este proceso se puede encontrar en el Anexo N° 06: Proceso de modelamiento en HEC-RAS. Asimismo, en el Anexo N° 07 se muestran los resultados obtenidos de la simulación en flujo permanente. A continuación se presentan los mapas de inundación, valores de velocidad, elevación de la superficie de agua y valores esfuerzo cortante para los períodos de retorno de 50, 100 y 500 años, respectivamente.



Figura 4-04: Mapa de inundación correspondiente a un período de retorno de 50 años para el flujo permanente en condiciones actuales (Elaboración Propia).



Figura 4-05: Mapa de inundación correspondiente a un período de retorno de 100 años para el flujo permanente en condiciones actuales (Elaboración Propia)



Figura 4-06: Mapa de inundación correspondiente a un período de retorno de 500 años para el flujo permanente en condiciones actuales (Elaboración Propia)

En la Figura 4-04 se puede observar la variación de superficie de agua correspondiente al período de retorno de 50 años, en donde no se presencian zonas de inundación. En la Figura 4-05, correspondiente al período de retorno de 100 años, se manifiestan zonas de inundación aguas arriba del Puente del Ejército. Desde las progresivas 1+080 a 1+025 la inundación se desarrolla en ambos márgenes del río y para las progresivas 1+000 y 0+975 la inundación se evidencia solo en el margen derecho. Para el caso de la Figura 4-06, correspondiente al período de retorno de 500 años, se presencia un aumento significativo de la

superficie de agua y por ende el incremento de las zonas de inundación. Aproximadamente, estas zonas se desarrollan desde las progresivas 1+080 a 0+840 para ambos márgenes del río.

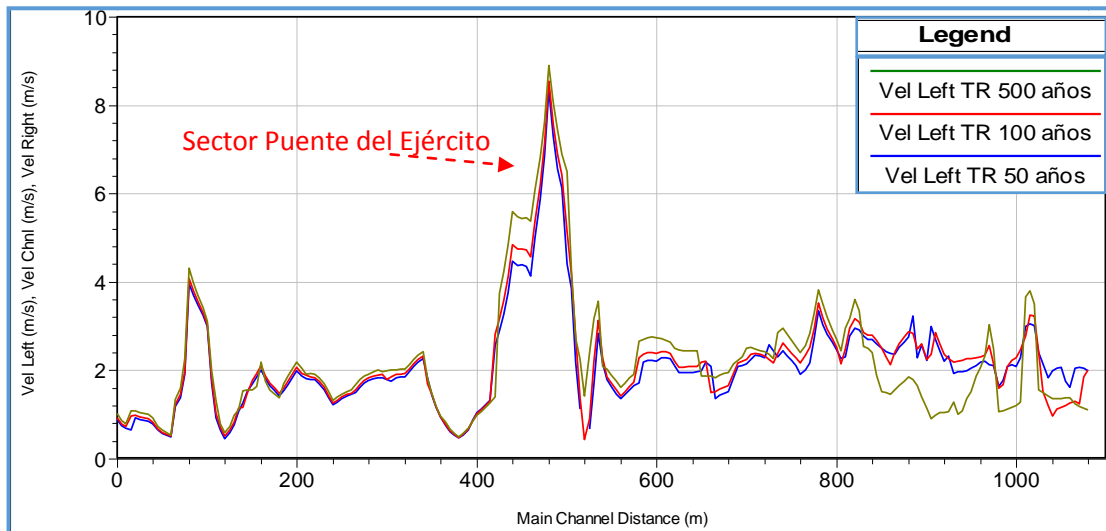


Figura 4-07: Variación de la velocidad en el margen izquierdo para 50, 100 y 500 años de período de retorno (Elaboración Propia)

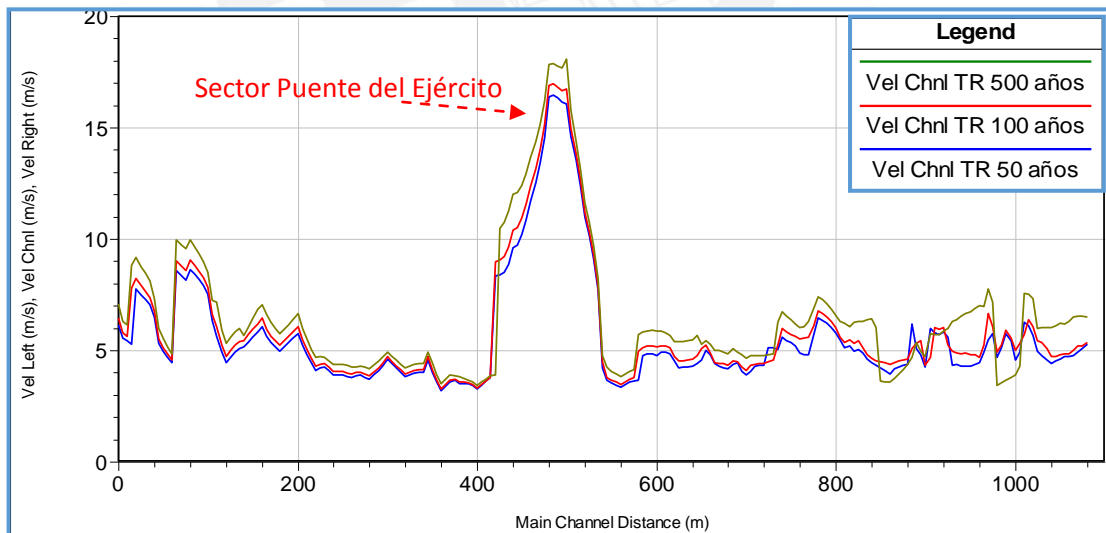


Figura 4-08: Variación de la velocidad en el canal principal para 50, 100 y 500 años de período de retorno (Elaboración Propia)

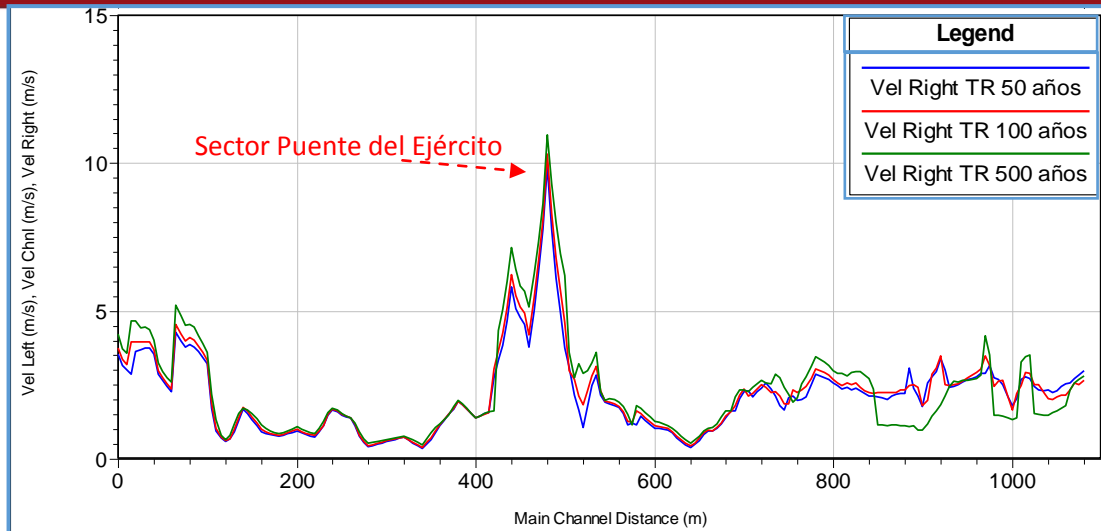


Figura 4-09: Variación de la velocidad en el margen derecho para 50, 100 y 500 años de período de retorno (Elaboración Propia)

En las Figuras 4-07, 4-08 y 4-09 se observan que los mayores valores de velocidad se desarrollan en el sector que comprende el puente del Ejército, tanto para el margen izquierdo, derecho y el canal principal. Ello se debe principalmente a las características morfológicas que presenta este sector. Asimismo, es importante señalar que los valores de velocidad media de flujo para los períodos de retorno de 50, 100 y 500 años son 4.96, 5.13 y 5.35 m/s en promedio, respectivamente.

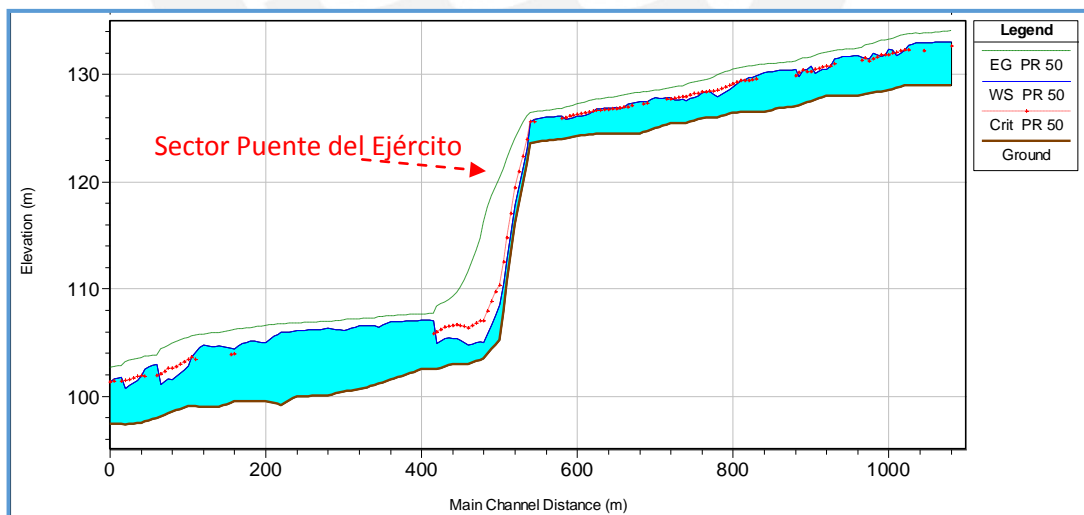


Figura 4-10: Elevación de la superficie de agua para el período de retorno de 50 años (Elaboración Propia)

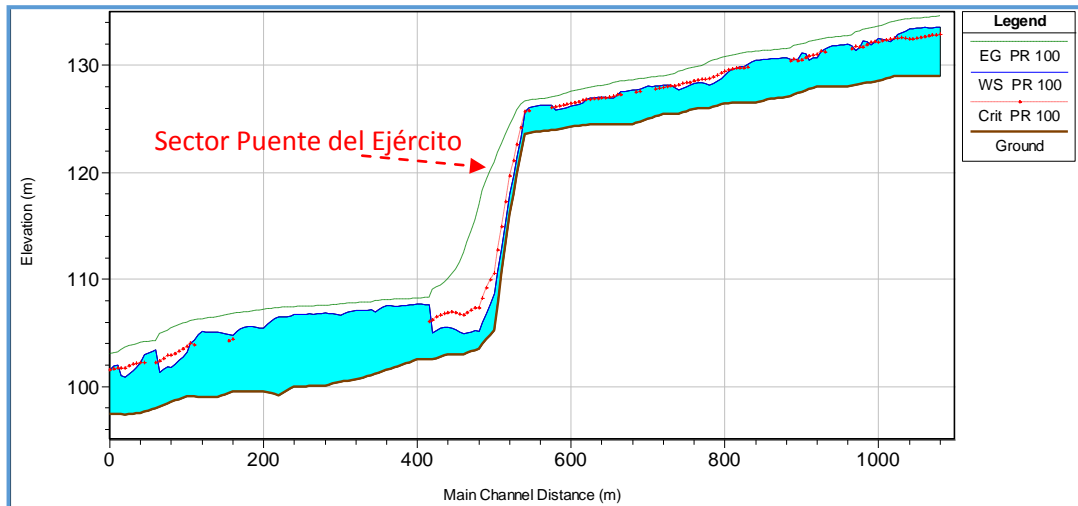


Figura 4-11: Elevación de la superficie de agua para el período de retorno de 100 años (Elaboración Propia)

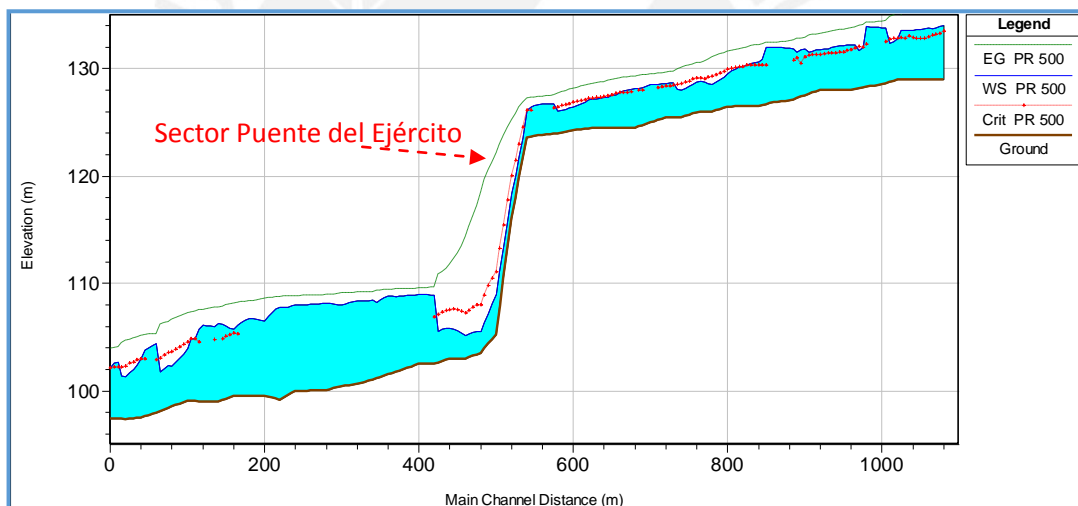


Figura 4-12: Elevación de la superficie de agua para el período de retorno de 500 años (Elaboración Propia)

En la Figuras 4-10, 4-11 y 4-12 se muestran las variaciones del perfil longitudinal de la superficie de agua con un incremento del valor de sus tirantes aguas abajo del puente del Ejército. En promedio se determinaron valores de tirantes de 3.7, 4 y 4.74 metros para los períodos de retorno de 50, 100 y 500 años, respectivamente.

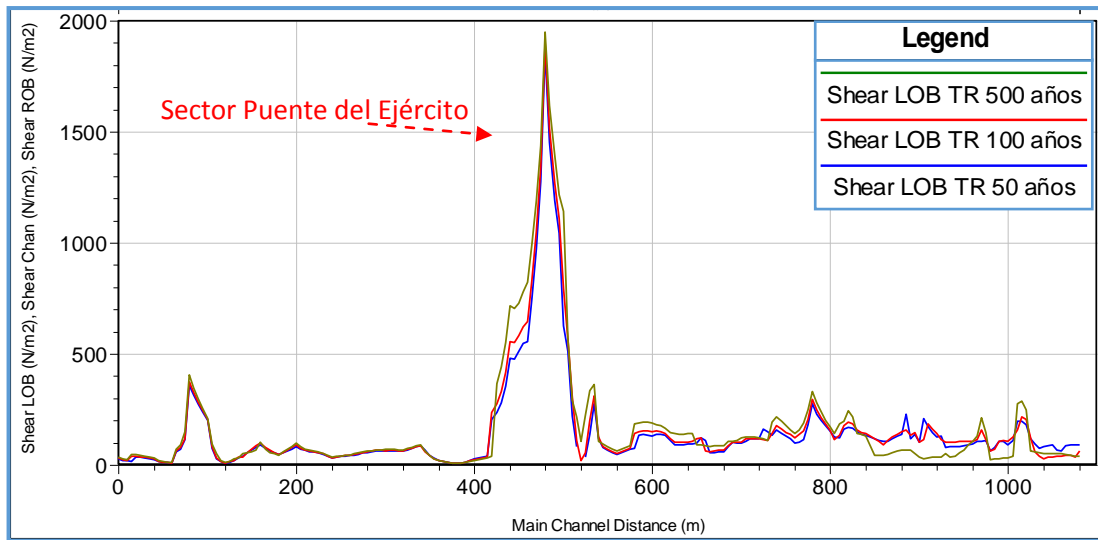


Figura 4-13: Esfuerzos cortantes en el margen izquierdo para 50, 100 y 500 años de período de retorno (Elaboración Propia)

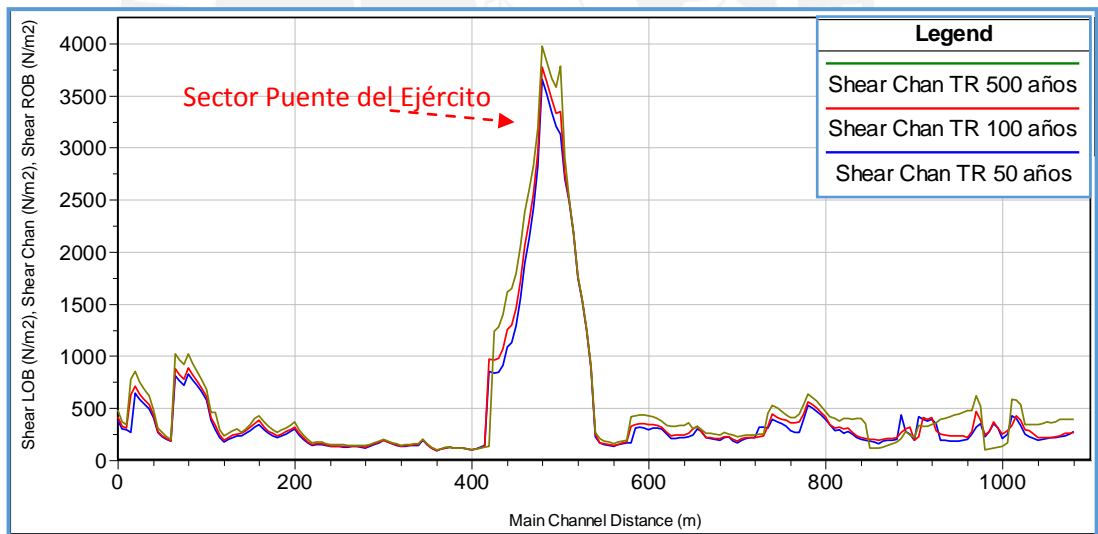


Figura 4-14: Esfuerzos cortantes en el canal principal para 50, 100 y 500 años de período de retorno (Elaboración Propia)

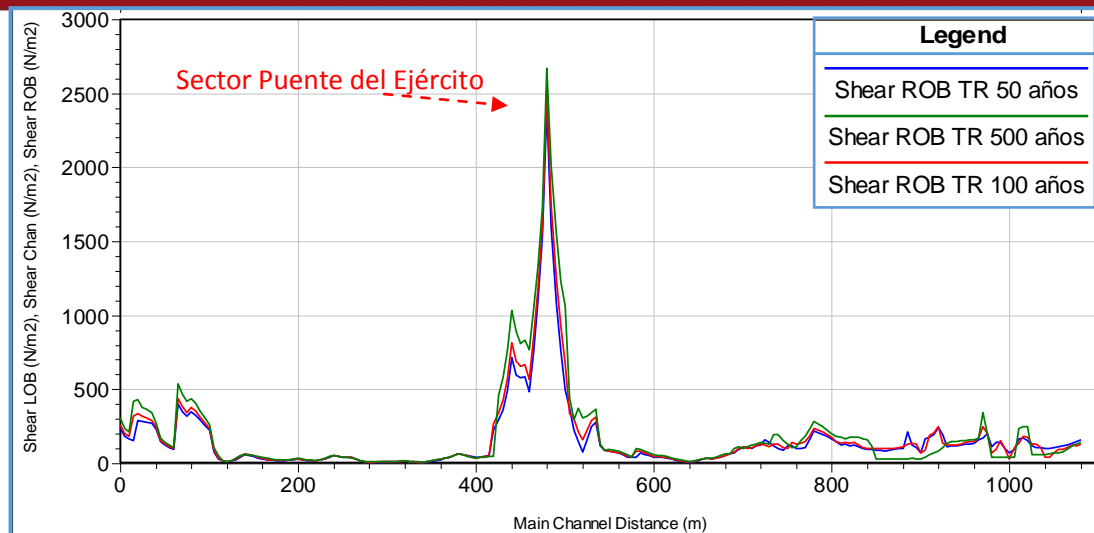


Figura 4-15: Esfuerzos cortantes en el margen derecho para 50, 100 y 500 años de período de retorno (Elaboración Propia)

En las Figuras 4-13, 4-14 y 4-15 se observa que los picos más altos en los valores del esfuerzo cortante se desarrollan en el sector que comprende el Puente del Ejército. En promedio se presentan valores de 340.15, 352.84 y 361.84 N/m² para los períodos de retorno de 50, 100 y 500 años, respectivamente.

4.3.1.3. Simulación régimen no permanente

Para el caso de la simulación en régimen no permanente fue necesaria la introducción de hidrogramas de flujo. En el Anexo N° 08 se puede encontrar el hidrograma de flujo utilizado aguas arriba. Dicho hidrograma fue extraído del informe “Estudio Hidrológico de Identificación de Zonas de Riesgo en los Distritos de Lima Cercado y El Agustino” (COOPERAZIONE INTERNAZIONALE, 2009), perteneciente a un período de retorno de 100 años. Asimismo, aguas abajo se empleó la condición de contorno *Normal Depth* en donde se introdujo un Friction Slope de 0.0126.

Por otro lado, para las condiciones iniciales (Initial Conditions) se introdujo un valor de flujo inicial de 75 m³/s aguas arriba del tramo en análisis. Este valor corresponde al máximo caudal registrado en un año del promedio histórico en la estación hidrométrica de Chosica, (SENAMHI, 2015). Al igual que la simulación anterior, en el Anexo N° 06 se detalla el proceso del modelamiento. En consecuencia, en el Anexo N° 09 se encuentran los resultados obtenidos de la simulación en flujo no permanente para el hidrograma de flujo de 100 años. A continuación se presenta el mapa de inundación, valores de velocidades, elevación de superficie de agua y

valores de esfuerzos cortantes. Cabe resaltar que los resultados corresponden a la máxima superficie de agua calculada en la simulación.



Figura 4-16: Mapa de inundación correspondiente al hidrograma de flujo de 100 años para el régimen no permanente en condiciones actuales (Elaboración Propia).

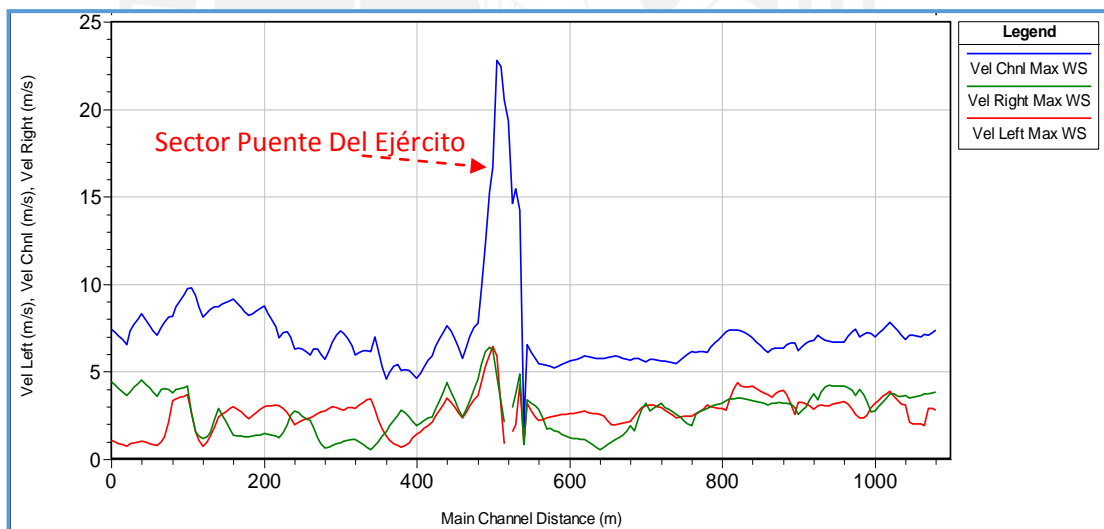


Figura 4-17: Variación de la velocidad correspondiente al hidrograma de flujo de 100 años (Elaboración Propia)

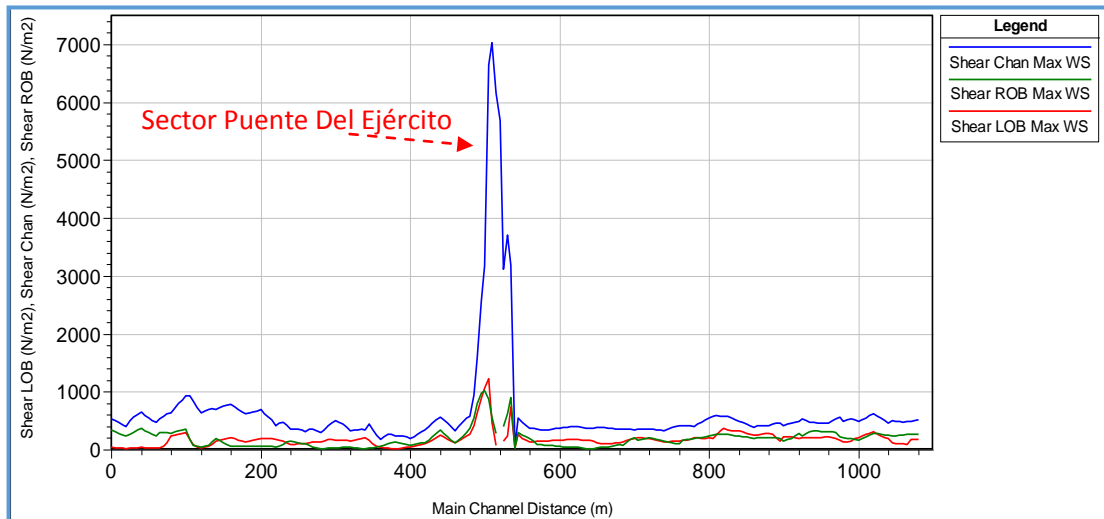


Figura 4-18: Variación del esfuerzo cortante correspondiente al hidrograma de flujo de 100 años (Elaboración Propia)

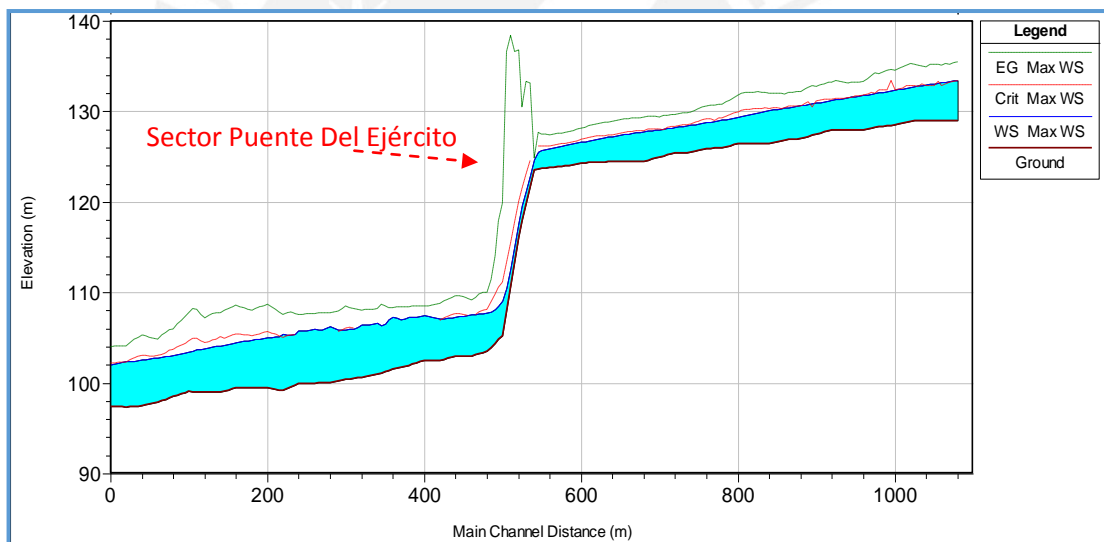


Figura 4-19: Elevación de la superficie de agua correspondiente al hidrograma de flujo de 100 años (Elaboración Propia)

En la Figura 4-16 se puede observar pequeñas zonas de inundación aguas arriba en el margen derecho. Por otra parte, los valores de velocidad y esfuerzo cortante mantienen sus picos alto en el sector Puente del Ejército (ver Figura 4-17 y 4-18). Asimismo, en la Figura 4-19 para el escenario de máxima superficie de agua se perciben valores altos de elevación del gradiente de energía en el sector Puente del Ejército.

4.3.1.4. Simulación calidad de agua

Entre otras aplicaciones del software HEC-RAS se tiene la del desarrollo de un modelo simple de calidad de agua. El propósito de esta aplicación es disponer de una herramienta capaz de simular el comportamiento de los componentes hidrológicos y de calidad del agua en un sistema de corrientes (Guano & Velastegui, 2014). Para la ejecución del mismo fue necesaria la introducción de información geométrica e hidrodinámica, datos meteorológicos y de calidad de agua. Para efectos de este análisis, se utilizó la simulación de flujo permanente para el período de retorno de 100 años con base en la recomendación del Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje (2012).

Por otra parte, la información meteorológica fue obtenida de los anuarios meteorológicos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) para el período comprendido del 2004 al 2011 (ver Anexo N° 10). Asimismo para la obtención de los registros de calidad de agua se recurrió a la data de monitoreo mensual de los recursos hídricos realizado por la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) y el Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL). Esta información se encuentra habilitada desde el 2004 hasta el 2011 (ver Anexo N° 10), por lo que se utilizó este período para el modelo de calidad de agua. En el Anexo N° 06 se puede encontrar el procedimiento de la simulación de calidad de agua. A continuación, se muestran gráficos esquemáticos de la variación de concentraciones de los nutrientes modelados a lo largo del tramo de estudio. Es importante señalar que estos resultados corresponden para la serie de tiempo final.

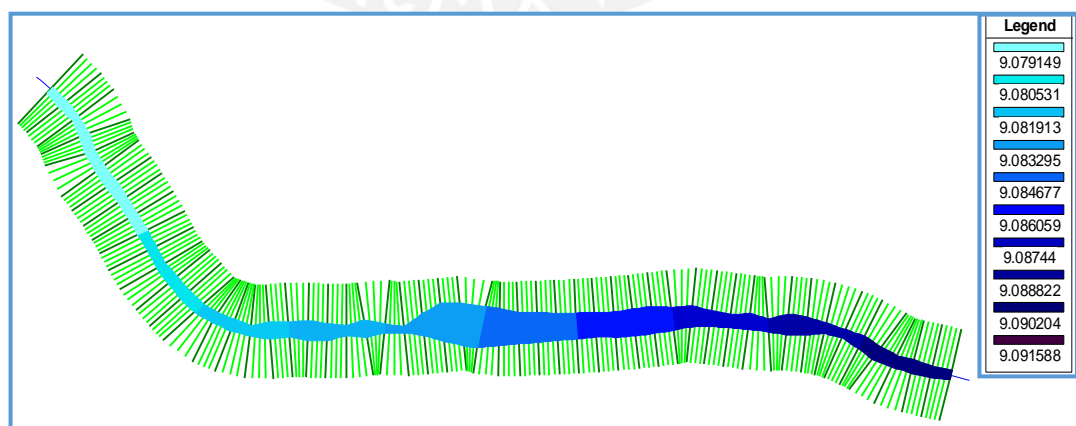


Figura 4-20: Esquema gráfico de la variación de las concentraciones de Oxígeno disuelto (OD) a lo largo del tramo de estudio (Elaboración Propia)

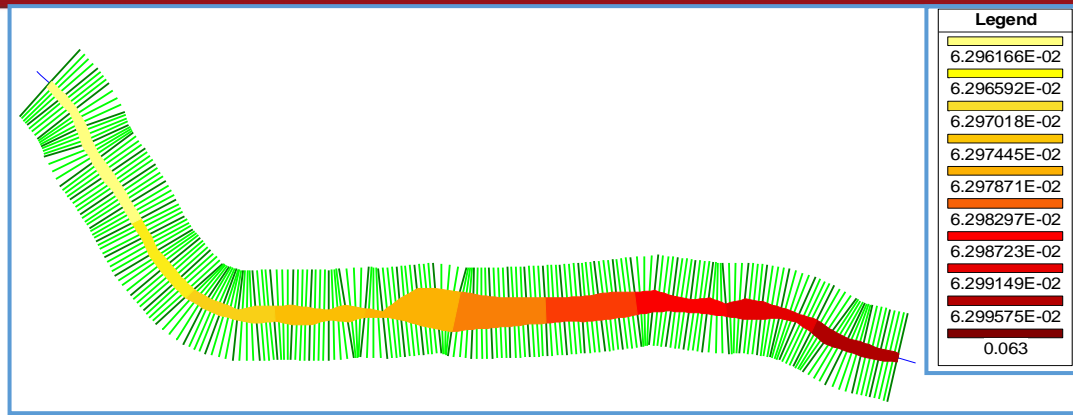


Figura 4-21: Esquema gráfico de la variación de las concentraciones de Nitritos (NO_2) a lo largo del tramo de estudio (Elaboración Propia)

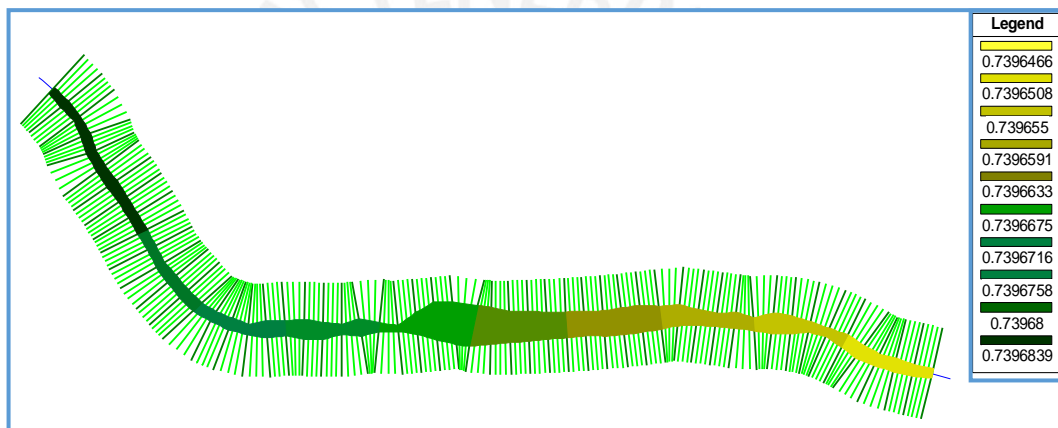


Figura 4-22: Esquema gráfico de la variación de las concentraciones de Nitratos (NO_3) a lo largo del tramo de estudio (Elaboración Propia)

4.3.2. Análisis por estabilidad global

Con el fin de evaluar las condiciones actuales que presentan los taludes de los márgenes del tramo en estudio, se procedió a realizar un análisis por estabilidad global. Para efectos de este análisis se utilizó el software de ingeniería SLIDE V5.0 (Slope Stability Analysis).

El SLIDE V5.0 está orientado al análisis de las fallas circulares y planares tanto globales como locales utilizando el concepto de equilibrio límite (ANDEX, 2013). Como parámetros de entrada se ingresaron las propiedades geotécnicas de la zona de estudio (peso unitario, ángulo de fricción interna y cohesión), ver Figura 4-23. Estos valores están contemplados en la Tabla 3-03: Propiedades Físico-Mecánicas y Parámetros Geotécnicos, expuesta en el capítulo anterior.

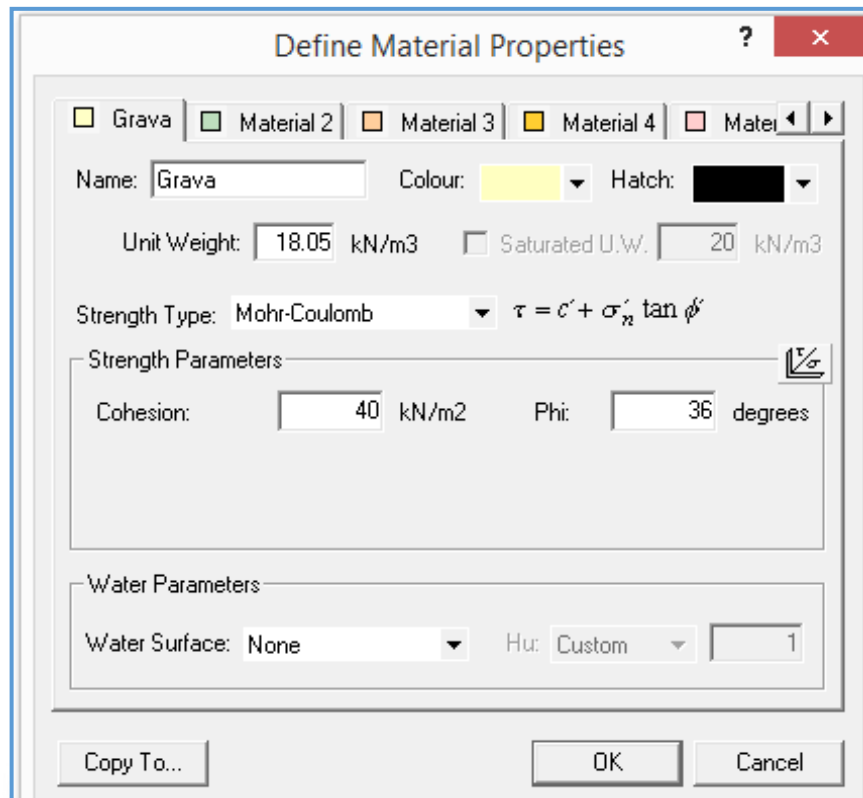


Figura 4-23: Definición de las propiedades del material a simular en SLIDE V5.0 (Elaboración Propia)

Asimismo, fue necesario definir una sobrecarga la cual represente el peso de las viviendas aledañas a los márgenes del río. Se asumió una sobrecarga de 2 ton/m (19.61 KN/m) pues este determina el valor crítico de una vivienda de dos pisos con 1 ton/m por cada piso. Con la introducción de estos parámetros se procedió a realizar; en primera instancia, un análisis de estabilidad estático. Para ello se tomaron cuatro estaciones características correspondientes a las zonas de atrincheramiento poco profundo y atrincheramiento profundo. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para este primer análisis.

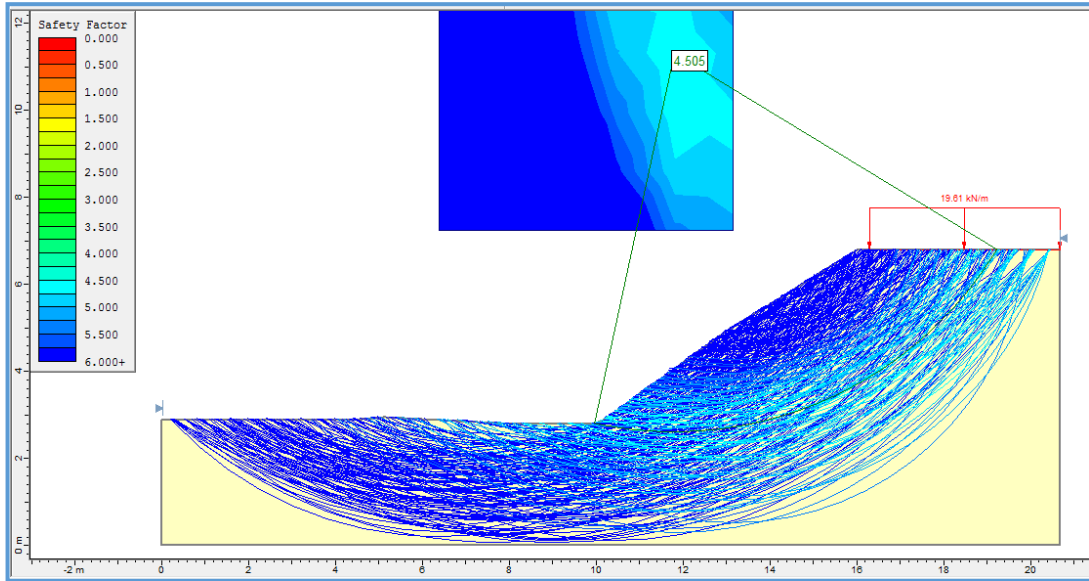


Figura 4-24: Análisis estático para la progresiva 0+900 margen derecho, correspondiente a la zona de atrincheramiento poco profundo – Bishop FS=4.505 (Elaboración Propia)

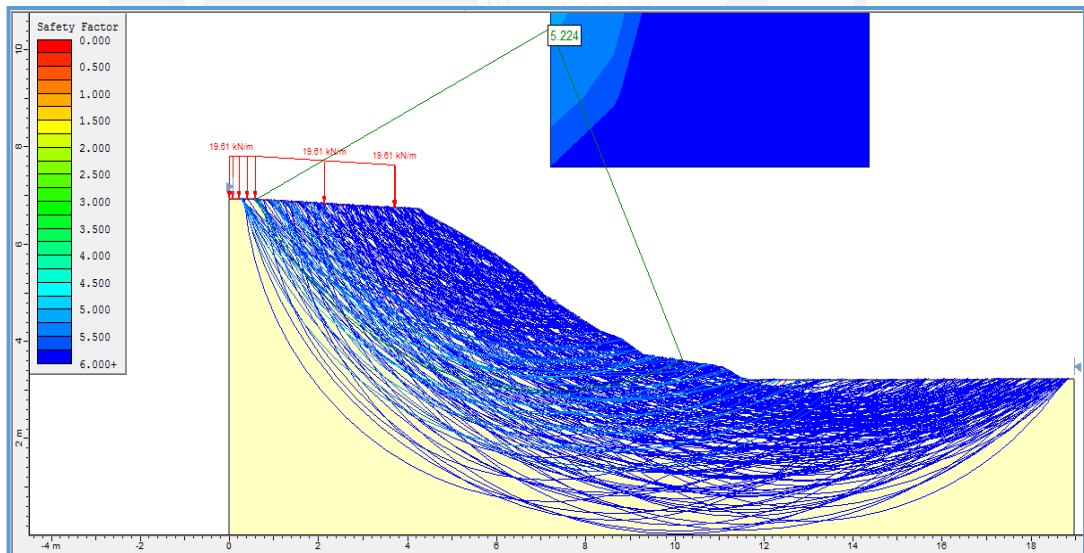


Figura 4-25: Análisis estático para la progresiva 0+780 margen izquierdo, correspondiente a la zona de atrincheramiento poco profundo – Bishop FS=5.224 (Elaboración Propia)

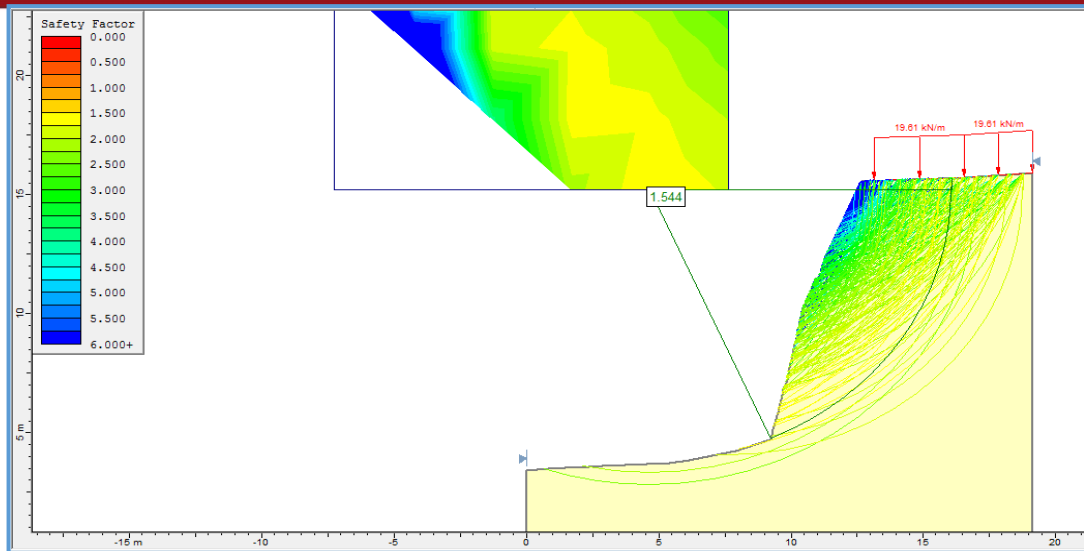


Figura 4-26: Análisis estático para la progresiva 0+380 margen derecho, correspondiente a la zona de atrincheramiento profundo – Bishop FS=1.544 (Elaboración Propia)

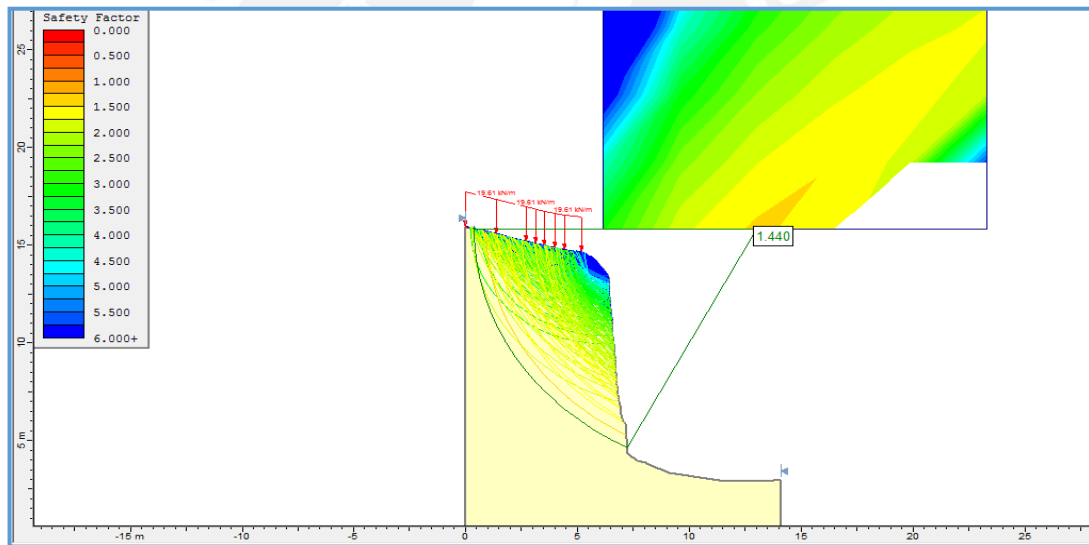


Figura 4-27: Análisis estático para la progresiva 0+100 margen izquierdo, correspondiente a la zona de atrincheramiento profundo – Bishop FS=1.440 (Elaboración Propia)

En segunda instancia, para las condiciones del tramo con presencia de sismo se procedió a realizar un análisis pseudo-estático. Con la base en la información expuesta en el Capítulo III, el tramo en estudio se encuentra ubicado en la zona 4, de acuerdo al mapa de zonificación sísmica (Norma E.030, 2014), con un factor de zona $Z = 0.45g$. Por otra parte, es aceptado internacionalmente que el coeficiente sísmico para un análisis pseudo-estático de diseño de taludes sea obtenido como una fracción que varía entre 1/2 a 1/3 de la máxima aceleración esperada (Ruesta,

Díaz, & Alva, 1995). En ese aspecto, el coeficiente de carga horizontal asumido fue de 0.225 positivo en dirección a la falla. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para este segundo análisis, además de una tabla resumen que incluye los resultados de ambos análisis (ver Tabla 4-04).

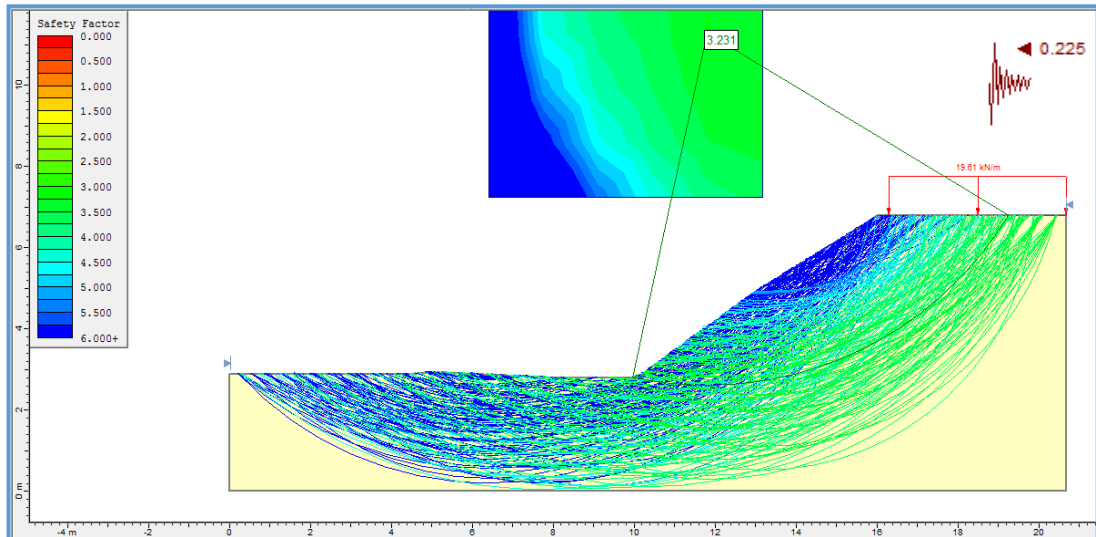


Figura 4-28: Análisis pseudo-estático para la progresiva 0+900 margen derecho, correspondiente a la zona de atrincheramiento poco profundo – Bishop FS=3.231 (Elaboración Propia)

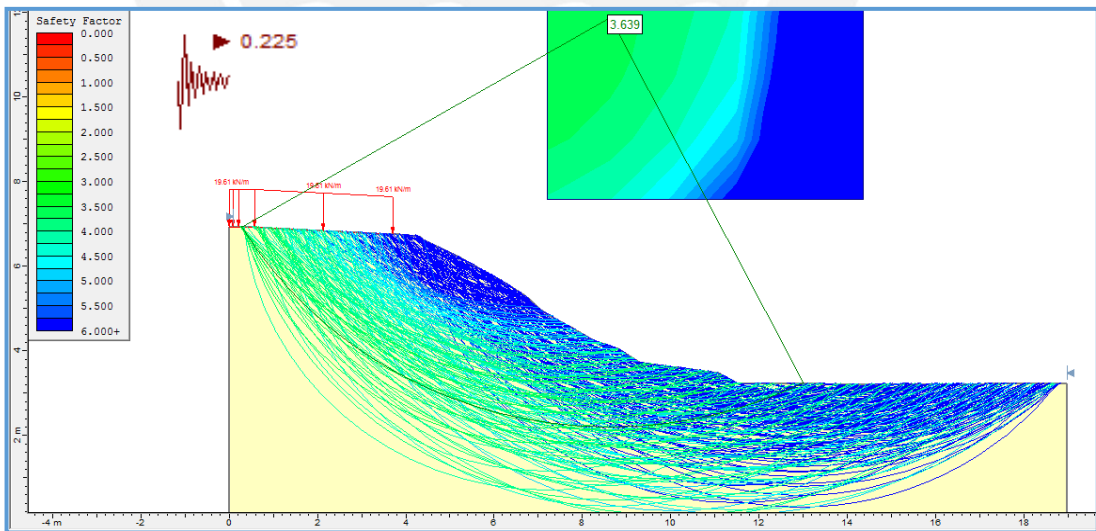


Figura 4-29: Análisis pseudo-estático para la progresiva 0+780 margen izquierdo, correspondiente a la zona de atrincheramiento poco profundo – Bishop FS=3.639 (Elaboración Propia)

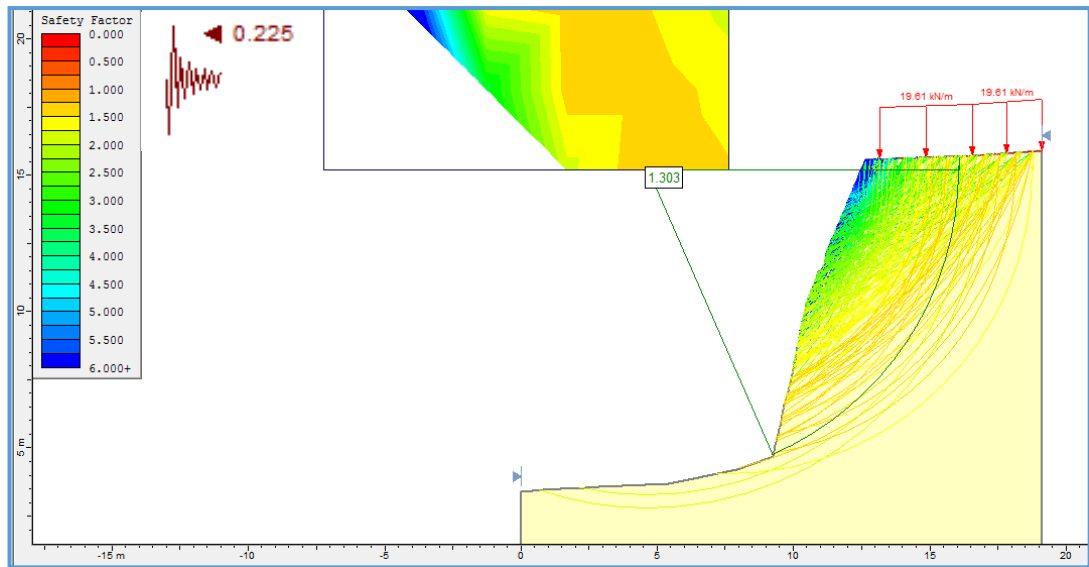


Figura 4-30: Análisis Estático para la progresiva 0+380 margen derecho, correspondiente a la zona de atrincheramiento profundo – Bishop FS=1.303 (Elaboración Propia)

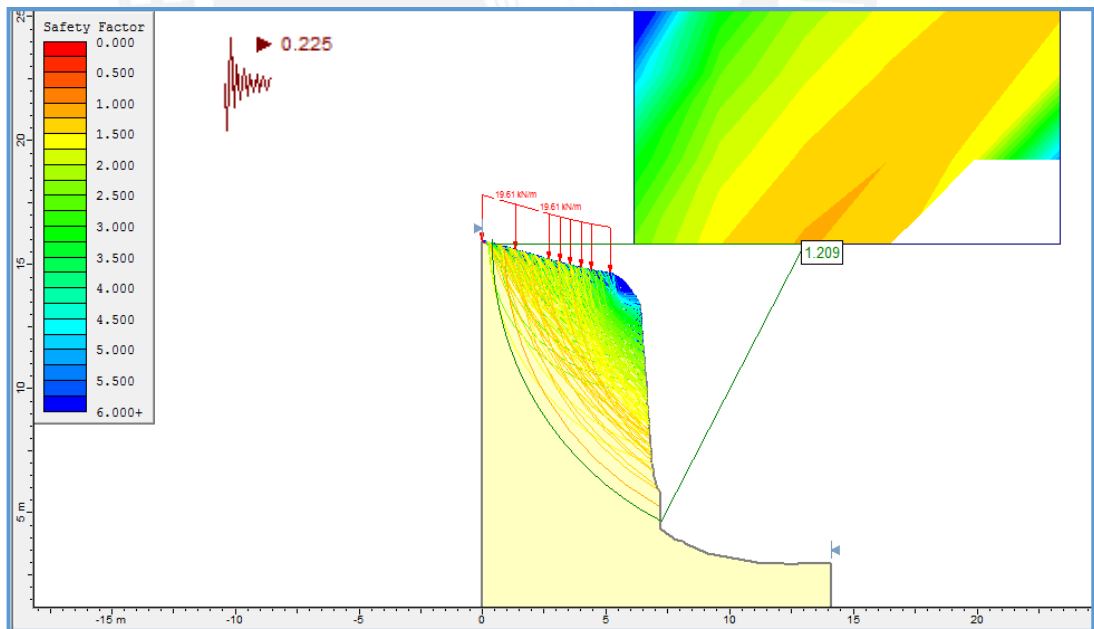


Figura 4-31: Análisis Estático para la progresiva 0+100 margen izquierdo, correspondiente a la zona de atrincheramiento profundo – Bishop FS=1.209 (Elaboración Propia)

Zona	Progresivas	FS (BISHOP)	
		Estático	Pseudo-estático
Atrincheramiento poco profundo	0+900	4.51	3.23
	0+780	5.22	3.64
Atrincheramiento profundo	0+380	1.54	1.30
	0+100	1.44	1.21

Tabla 4-04: Factores de seguridad para el análisis de estabilidad global en condiciones actuales (Elaboración Propia)

4.4. Métodos para las condiciones de la propuesta de solución

Con base en los resultados obtenidos de los métodos en condiciones actuales y de las características presentadas del tramo en estudio, expuestas en el Capítulo III, se propone la utilización del Vetiver como método de bioingeniería para la restauración del tramo urbano del río Rímac. La finalidad de uso de este material vegetal es la construcción de una barrera viva en los márgenes del río para el control de erosión y fortalecimiento del talud, además de los múltiples beneficios que presenta el mismo (ver Anexo N° 11: Propuesta de solución).

4.4.1. Modelamiento hidráulico con vetiver

Con el fin de cuantificar la variación de la conducta hidráulica con el uso del vetiver como método de bioingeniería para el control de la erosión en los márgenes del río, se procedió a realizar el modelamiento hidráulico en HEC-RAS. Según lo dicho, la presencia de esta gramínea puede ser representado por medio del incremento del valor de fricción del cauce (n de Manning). Para la elección de este coeficiente se tomaron en cuenta una serie de parámetros como es el caso de la densidad de la vegetación (tallos/m²), velocidades del flujo y características morfológicas del tramo. Asimismo, para efectos de la propuesta se trabajó para un período de retorno igual a 100 años, el cual recomienda el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) en el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje (2012).

4.4.1.1. Consideraciones previas al modelamiento

De acuerdo a los resultados obtenidos del modelamiento hidráulico con 100 años de período de retorno en condiciones actuales, se observó zonas de inundación aguas arriba del tramo analizado. Desde la progresiva 1+080 a 1+025, la inundación se presentó en ambos márgenes del río. Para el tramo comprendido entre las progresivas 1+000 y 0+975, la inundación sólo se observó en el margen derecho.

Con la finalidad de mejorar los resultados para el modelo en HEC-RAS con la propuesta de solución, se procedió a considerar una protección para los márgenes en las progresivas especificados anteriormente. Para ello se tuvo que calcular previamente una altura necesaria de protección, la cual implicó la adición de un borde libre al tirante máximo. En la Tabla 4-05 se muestran los bordes libres recomendados en función al caudal de diseño. Ya que se empleará una descarga máxima de $380.5 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente al período retorno de 100 años, el borde libre adoptado fue de 0.8m.

Descarga de Diseño (m^3/s)	Borde Libre (m)
Menos de 200	0.60
200-500	0.80
500-2000	1.00

Tabla 4-05: Bordes Libres recomendados según caudal de diseño, (Textbook for Group Training Course in River and Dam Engineering River Bureau. Ministry of Construction)

Asimismo, en la Figura 4-32 se indica la elevación del borde libre adoptado (0.8m.) con respecto a la superficie de agua, así como el nivel de la protección para los márgenes en donde se evidencia problemas de inundación. Cabe resaltar que estas consideraciones de protección deben ser incluidas en la nueva simulación en HEC-RAS con la aplicación de vetiver.

4.4.1.2. Estimación de la rugosidad del vetiver (n)

Para determinar el valor de rugosidad n de Manning se evaluaron tres alternativas, la primera mediante las tablas de rugosidades del libro de Ven T. Chow (1994), la segunda de acuerdo a la información proporcionada por la USGS y por último según la investigación propuesta por la Universidad Técnica de Delft (DUT, por sus siglas en inglés) "Reduction of wave overtopping by Vetiver grass" (Vu, 2007).

En primer lugar, con la utilización de las tablas de Ven T. Chow (1994), el valor de n de Manning que representa las condiciones de la vegetación de Vetiver en los márgenes del río es de 0.07. En segundo lugar, la alternativa propuesta por la USGS que se mencionó anteriormente propone la comparación de algunos canales típicos al oeste de los Estados Unidos, cuyos valores de coeficiente de rugosidad de Manning son conocidos, con las características presentadas por el tramo de estudio. De acuerdo a las propiedades del vetiver como barrera en los márgenes

laterales, el valor de n de Manning que se ajusta a las condiciones deseadas es de 0.079 (USGS, 2014). Este valor pertenece al arroyo Cache Creek ubicado en California (ver Figura 4-33), el cual presenta en sus márgenes densas plantaciones de árboles que hacen que mantenga una velocidad promedio de 2.4 m/s. Estas condiciones simularían la fricción que experimentaría el río con la inserción de vetiver en sus márgenes.

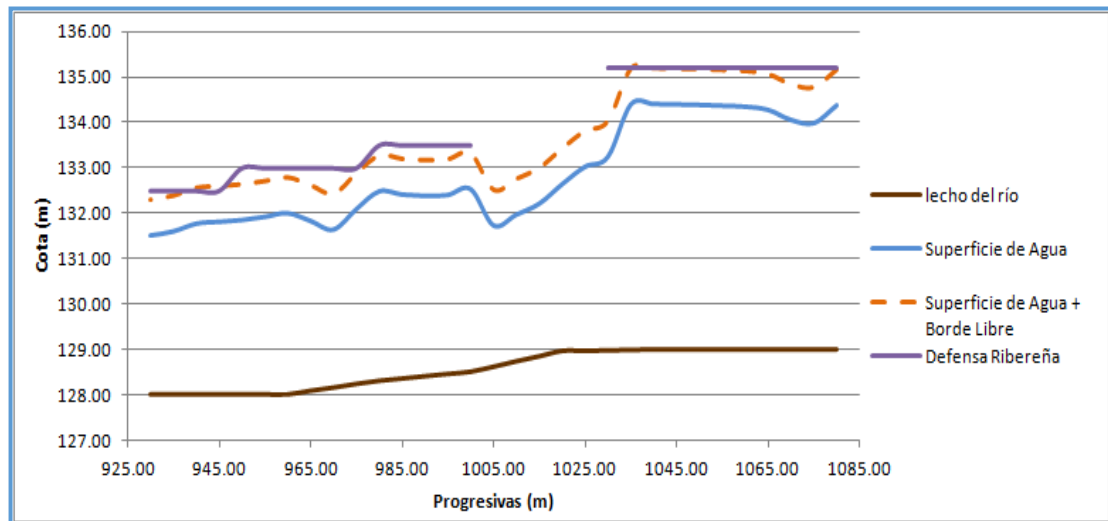


Figura 4:32: Elevación del borde libre adoptado y la altura de protección para inundaciones (Elaboración Propia)

Por último, bajo el sustento de la investigación propuesta por la Universidad Técnica de Delft, se estimó el valor de n de Manning según la densidad de vetiver (tallo/m²). La fuerza individual que presenta cada tallo así como la densidad de los mismos en un área determinada, hacen que esta cobertura presente una amplia resistencia y mayor capacidad para mantenerse rígida. De acuerdo a los estudios propuestos por Meyer & Dabney (1995) se concluye que el módulo de elasticidad y el momento de inercia del tallo de Vetiver son características importantes de resistencia. Por ejemplo, si las barreras de vetiver presentan alta densidad (tallo/m²), desarrollarán mayor resistencia debido al incremento en conjunto de su módulo su elasticidad.

En este contexto, la DUT realizó ensayos en donde se fue variando la densidad de vetiver en base a la cantidad de especímenes utilizados. En la Tabla 4-06 se puede observar las diferentes densidades utilizadas en el experimento. Estos ensayos de laboratorio se realizaron para los escenarios de uso de Vetiver con la variación de la densidad y sin el uso de esta gramínea. De acuerdo con los resultados, en la

Figura 4-34 se observa la variación del valor de n de Manning en función a la profundidad del flujo y cantidad de especímenes utilizados.

Cantidad de Especímenes utilizados	Densidad Vetiver (tallos/m ²)
106	530
53	265
32	160

Tabla 4-06: Densidades de pasto vetiver en función a la cantidad de especímenes utilizados (Vu, 2007)



Figura 4-33: Arroyo Cache Creek cerca del lago Lower (California) con $n=0.079$ (USGS, 2014)

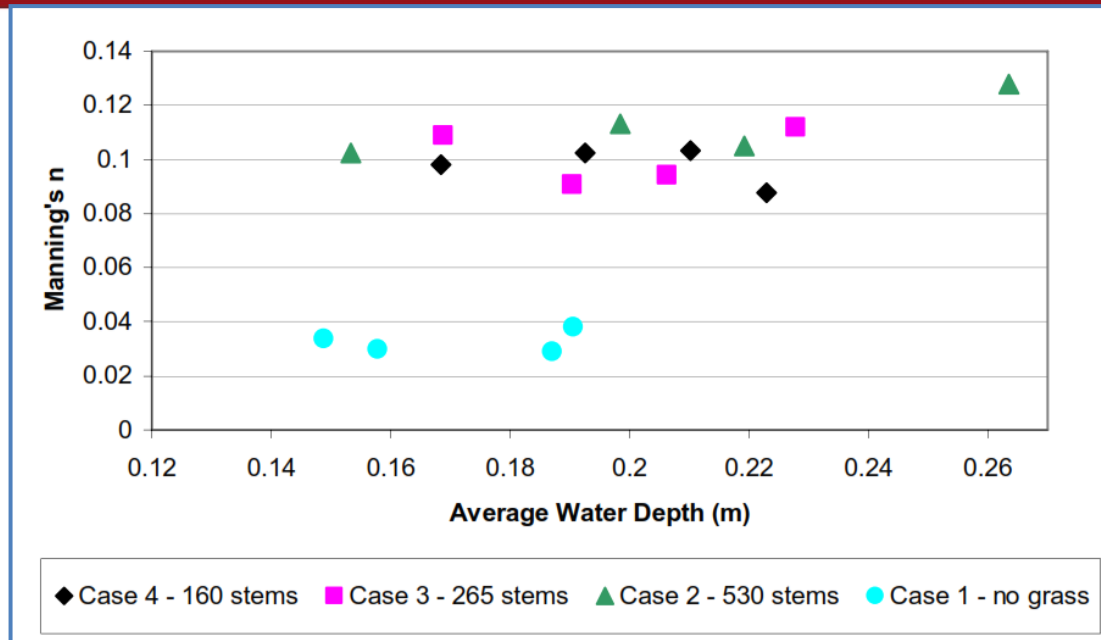


Figura 4-34: Variación del coeficiente de rugosidad de Manning versus la profundidad del flujo (Vu, 2007)

Por otra parte, estos valores fueron comparados con el estudio propuesto por Metcalfe, Truong & Smith (2008) “Características Hidráulicas de Coberturas de Vetiver para flujos profundos”, en donde se evaluó la resistencia de rugosidad de Manning (n) versus la profundidad del flujo para diferentes escenarios de caudal. Los valores propuestos por Metcalfe, Truong & Smith son similares a los de la DUT, por consiguiente sumados a las condiciones actuales que presenta el tramo en estudio se pudo estimar la rugosidad más adecuada.

Este valor dependerá de las características de la zona (atrincheramiento poco profundo y atrincheramiento profundo), así como de los meandros que presente el tramo. A continuación se indican los valores de rugosidades de Manning propuestos (ver Tabla 4-07), apoyados en los estudios expuestos por la Universidad Técnica de Delft, USGS y Metcalfe, Truong & Smith así como las características del tramo urbano del río Rímac.

Zona	Tramo (m)	Distancia (m)	Descripción	Coeficiente de Manning (n)	
				Margen Izquierdo	Margen Derecho
Atrincheramiento poco profundo	1+000 - 1+080	80	Recta	0.070	0.070
	0+895 - 1+000	105	Curva	0.079	0.070
	0+570 - 0+895	325	Recta	0.070	0.070
Sector Puente del Ejército	0+505 - 0+570	65	Tramo Puente	0.05	0.05
Atrincheramiento profundo	0+365 - 0+505	140	Recta	0.079	0.079
	0+220 - 0+365	145	Curva	0.079	0.098
	0+090 - 0+220	130	Recta	0.079	0.079
	0+000 - 0+090	90	Curva	0.098	0.079

Tabla 4-07: Valores de rugosidades de Manning propuestos para la simulación con uso de Vetiver (Elaboración Propia)

4.4.1.3. Simulación régimen permanente con vetiver

Con las consideraciones previas y los cambios realizados en la rugosidad, se procedió a realizar la simulación en régimen permanente del tramo en estudio para la solución propuesta. Los resultados del modelamiento se encuentran en el Anexo N° 12. A continuación se presenta el mapa de inundación, la elevación de superficie de agua, valores de velocidad y esfuerzo cortante.



Figura 4-35: Mapa de inundación correspondiente a un período de retorno de 100 años para el régimen permanente en condiciones de la propuesta de solución (Elaboración Propia)

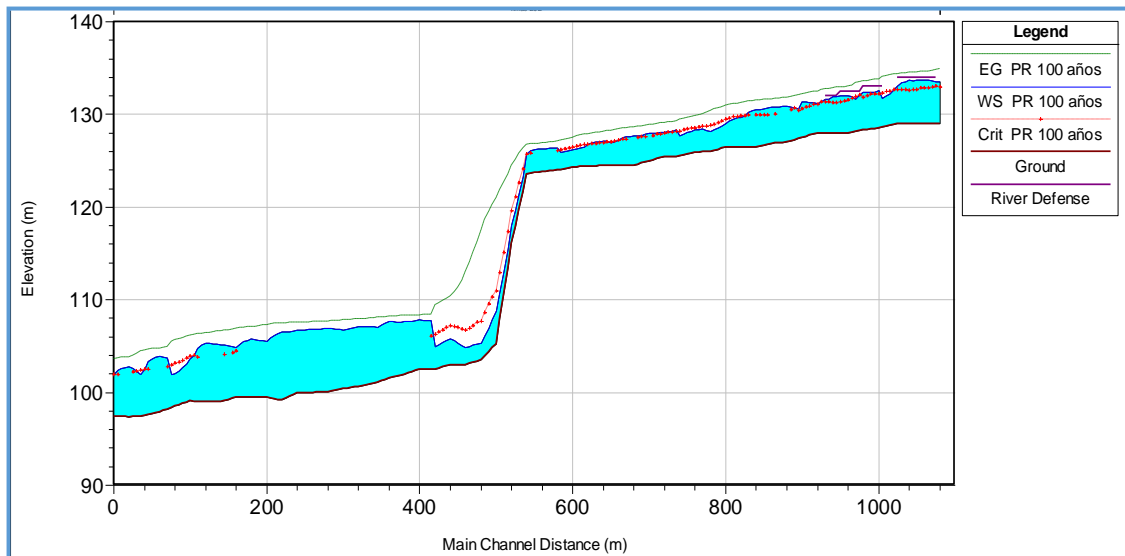


Figura 4-36: Elevación de superficie de agua con la protección aguas arriba para las condiciones de la propuesta de solución (Elaboración Propia)

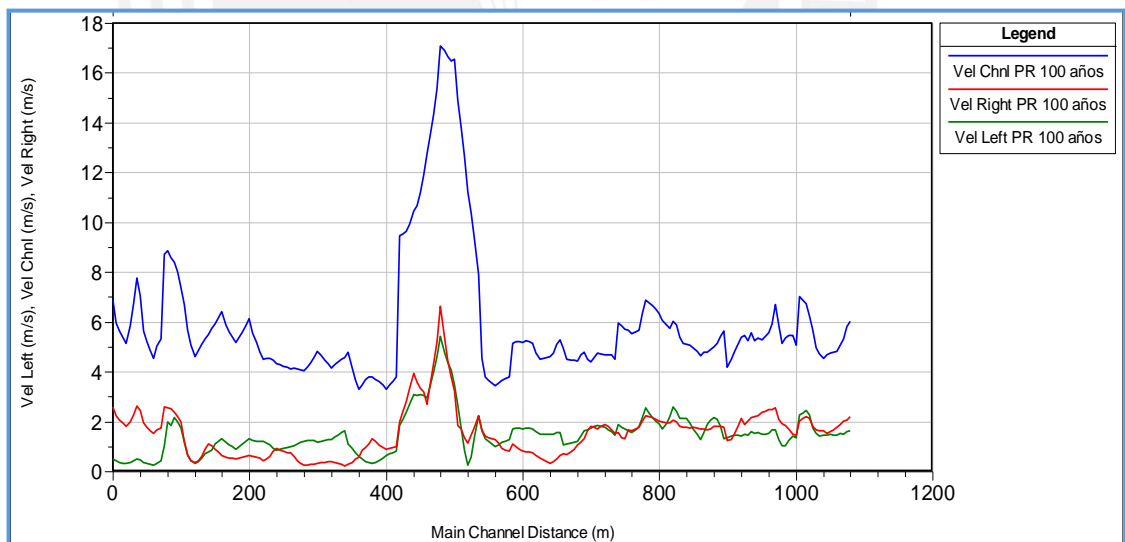


Figura 4-37: Variación de la velocidad para las condiciones de la propuesta de solución (Elaboración Propia)

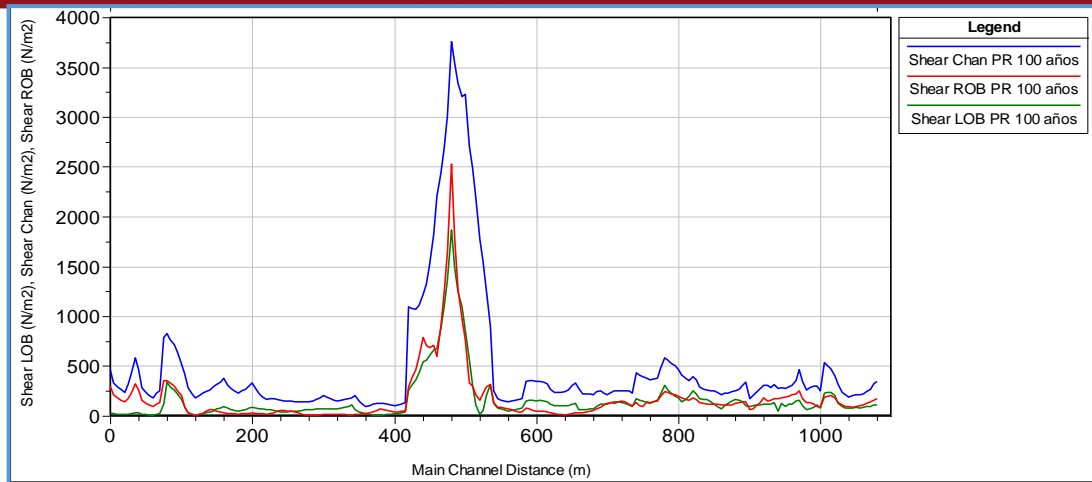


Figura 4-38: Variación del esfuerzo cortante para las condiciones de la propuesta de solución (Elaboración Propia).

4.4.1.4. Simulación régimen no permanente con vetiver

El mismo procedimiento realizado anteriormente para el flujo permanente se desarrolló para la presente simulación. Las nuevas rugosidades adoptadas también se tomaron de la Tabla 4-07, las cuales representarán la inserción de vetiver en el terreno. Cabe resaltar que también se tomaron las consideraciones de protección para inundaciones. En el Anexo N° 13 se encuentran los resultados del modelamiento para el escenario de máxima superficie de agua. A continuación se muestra el mapa de inundación, la elevación de la superficie de agua, valores de velocidad y esfuerzo cortante.



Figura 4-39: Mapa de inundación correspondiente al hidrograma de flujo de 100 años para el régimen no permanente en condiciones de la propuesta de solución (Elaboración Propia)

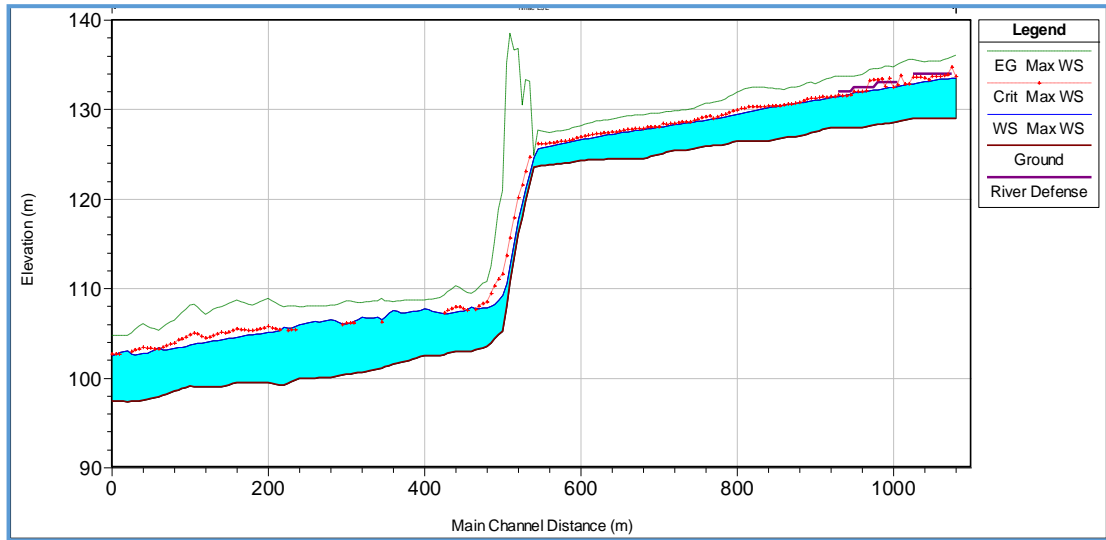


Figura 4-40: Elevación de superficie de agua con la protección aguas arriba para el hidrograma de flujo de 100 años en régimen no permanente con vetiver (Elaboración Propia)

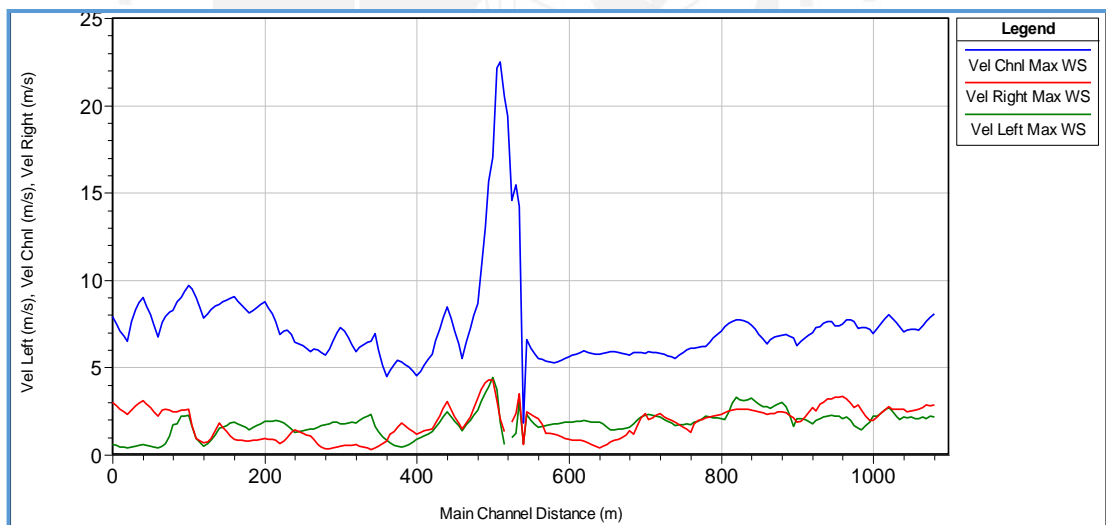


Figura 4-41: Valores de velocidad en el margen izquierdo, derecho y canal principal para el hidrograma de flujo de 100 años en régimen no permanente con vetiver (Elaboración Propia)

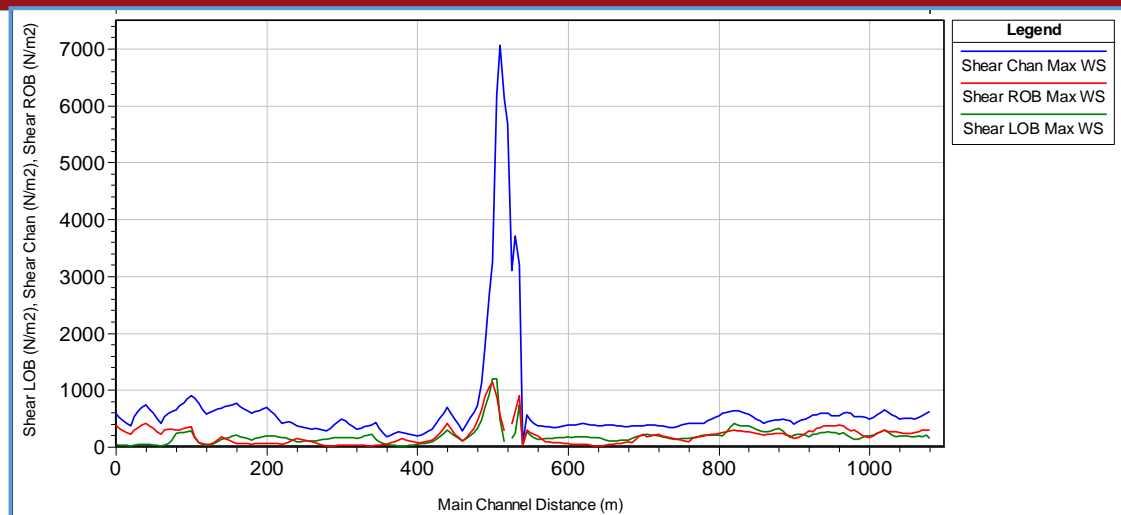


Figura 4-42: Valores de esfuerzo cortante en el margen izquierdo, derecho y canal principal para el hidrograma de flujo de 100 años en régimen no permanente con vetiver (Elaboración Propia)

4.4.2. Análisis de estabilidad global con vetiver

Muchas investigaciones han demostrado que la utilización de la vegetación en taludes contribuye de manera positiva en su estabilización. Por ende, la aplicación de vetiver para mejorar las condiciones de estabilidad en el tramo de estudio no es la excepción, pues aumentará su resistencia de esfuerzo cortante, pendiente y factor de seguridad.

Para la simulación del vetiver en el SLIDE V5.0, se insertó un soporte definido por el programa. Para este caso, se utilizó el Soil Nail pues es el que se asemeja a la forma en que trabaja el vetiver en el talud. Para ello, se ingresó la capacidad de tensión que presenta la cobertura vegetal la cual se obtuvo después de realizar un cálculo estimado con la base en la información presentada anteriormente en las características mecánicas del vetiver (Capítulo II). Se consideró un radio promedio de espécimen de 0.10 metros y el valor promedio del esfuerzo a la tracción de 75 MPa, con ello se calculó el valor de la tensión que resultó aproximadamente 590 KN. En la Figura 4-43 se puede apreciar los parámetros mecánicos adoptados para la simulación con la cobertura de vetiver.

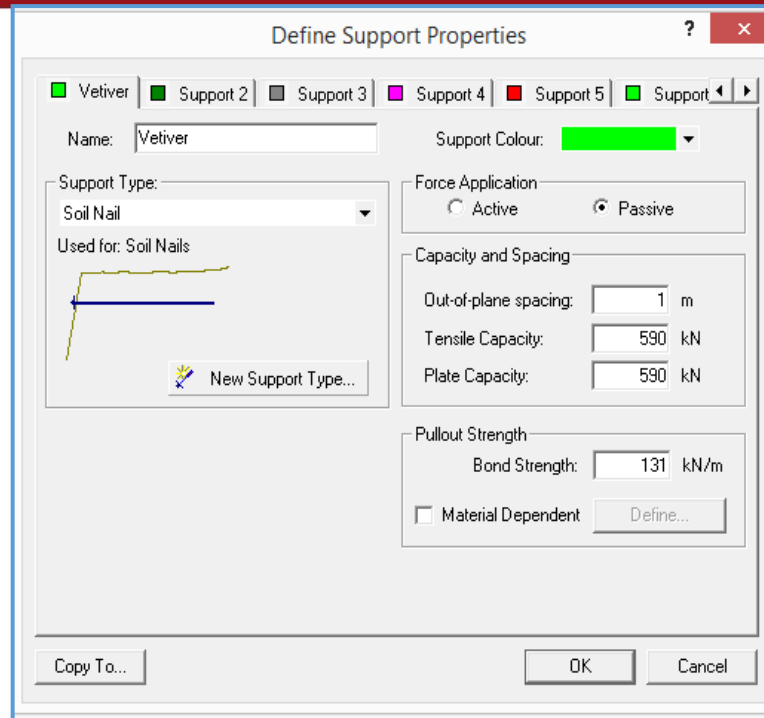


Figura 4-43: Definición de las propiedades del soporte de vetiver (Soil Nail) en el SLIDE V5.0 (Elaboración Propia)

Para el análisis en condiciones de la propuesta de solución se utilizaron las mismas características geotécnicas y de sobrecarga que se emplearon en el análisis para las condiciones actuales. Con estos parámetros y con la adición del soporte de Vetiver se desarrolló tanto el análisis de estabilidad estático como el pseudo-estático. Las secciones transversales analizadas fueron las mismas que se emplearon para el caso en condiciones actuales, pertenecientes a las zonas de atrincheramiento poco profundo y profundo, respectivamente. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para ambos análisis y una tabla resumen (Tabla 4-08) de los mismos.

Zona	Progresivas	FS (BISHOP)	
		Estático	Pseudo-estático
Atrincheramiento poco profundo	0+900	5.30	3.60
	0+780	5.64	3.82
Atrincheramiento profundo	0+380	2.78	2.22
	0+100	2.47	2.07

Tabla 4-08: Factores de seguridad para el análisis de estabilidad global en condiciones de la propuesta de solución (Elaboración Propia)

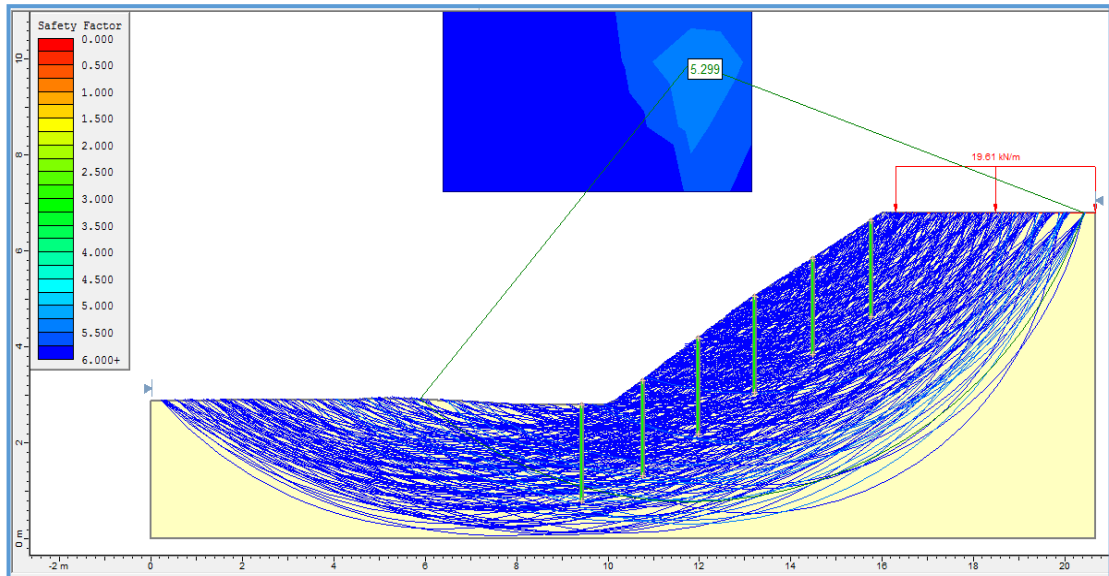


Figura 4-44: Análisis estático para la progresiva 0+900 margen derecho, correspondiente a la zona de atrincheramiento poco profundo – Bishop FS=5.299 (Elaboración Propia)

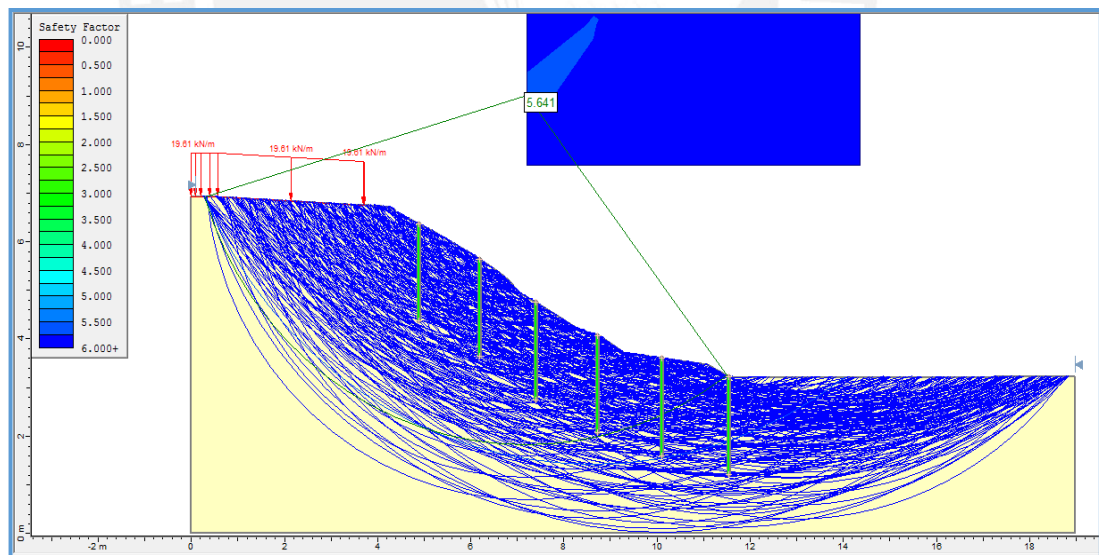


Figura 4-45: Análisis estático para la progresiva 0+780 margen izquierdo, correspondiente a la zona de atrincheramiento poco profundo – Bishop FS=5.641 (Elaboración Propia)

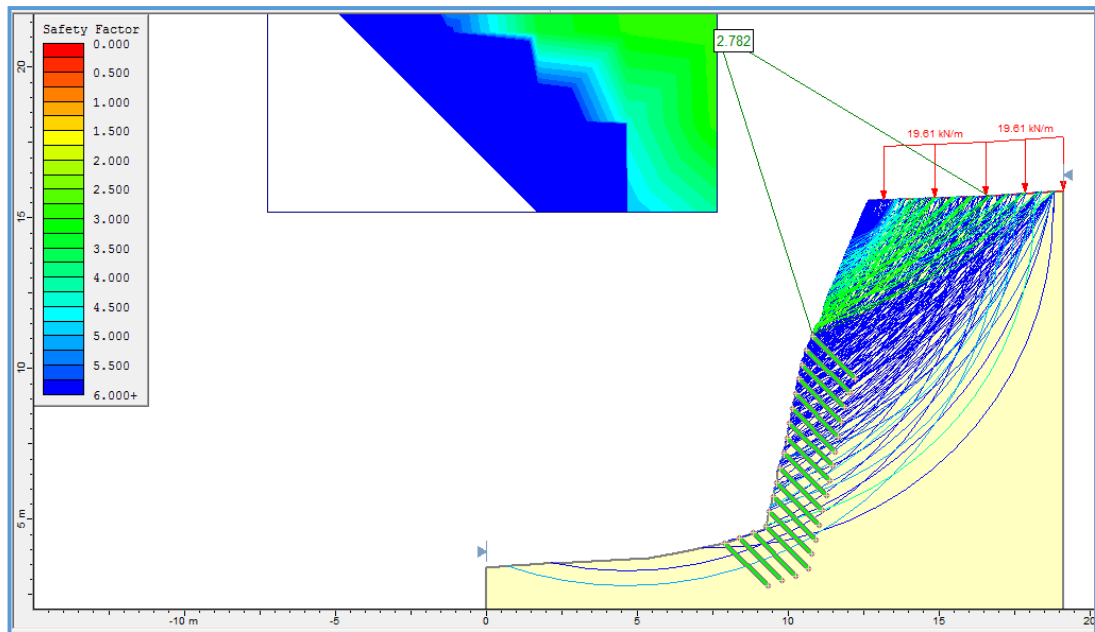


Figura 4-46: Análisis estático para la progresiva 0+380 margen derecho, correspondiente a la zona de atrincheramiento profundo – Bishop FS=2.782 (Elaboración Propia)

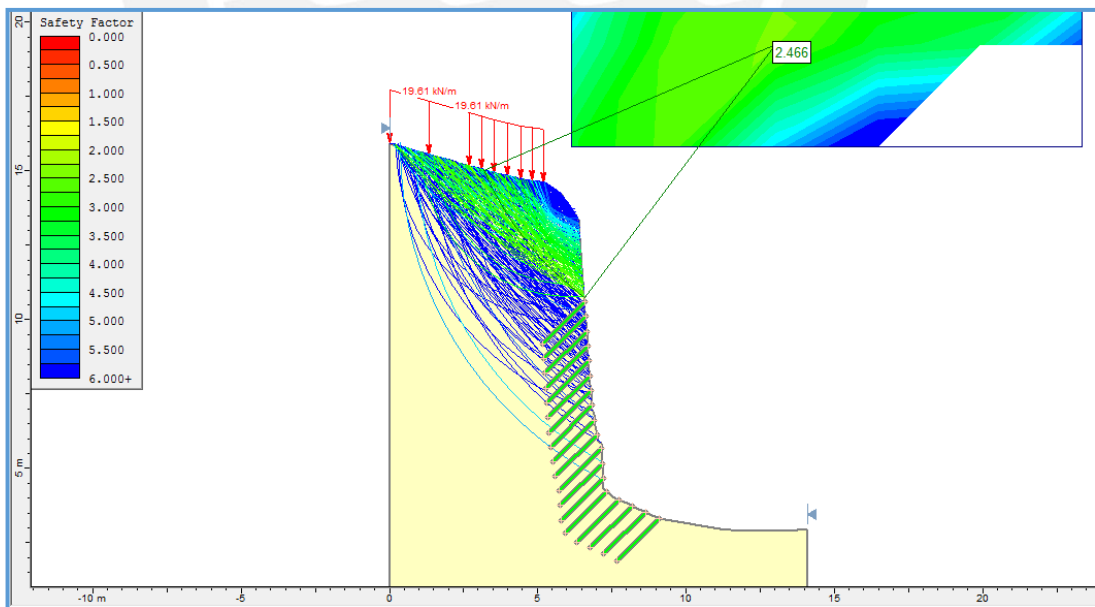


Figura 4-47: Análisis estático para la progresiva 0+100 margen izquierdo, correspondiente a la zona de atrincheramiento profundo – Bishop FS=2.466 (Elaboración Propia)

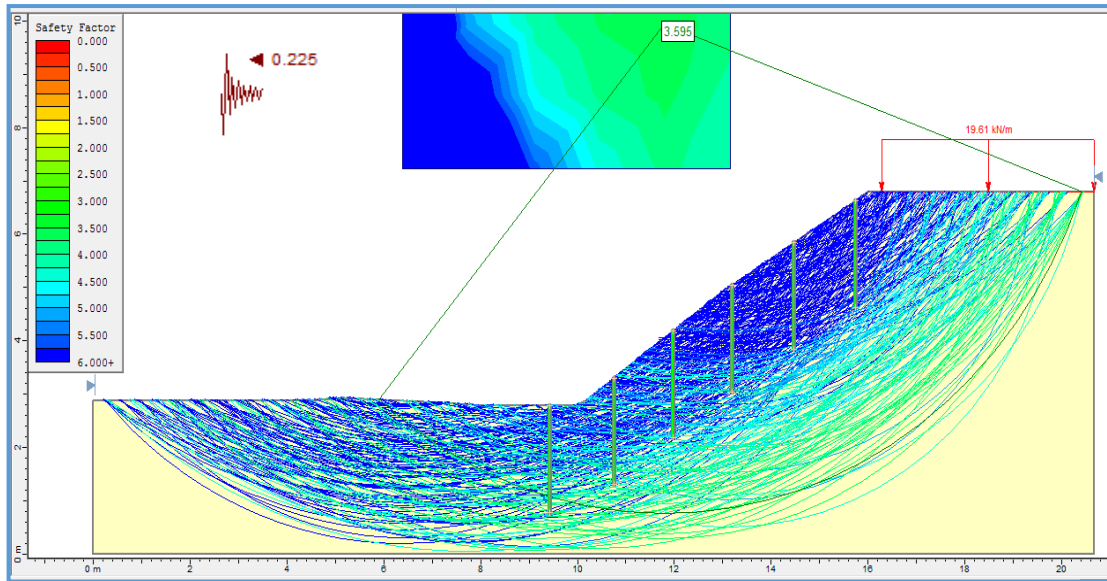


Figura 4-48: Análisis pseudo-estático para la progresiva 0+900 margen derecho, correspondiente a la zona de atrincheramiento poco profundo – Bishop FS=3.595, (Elaboración Propia)

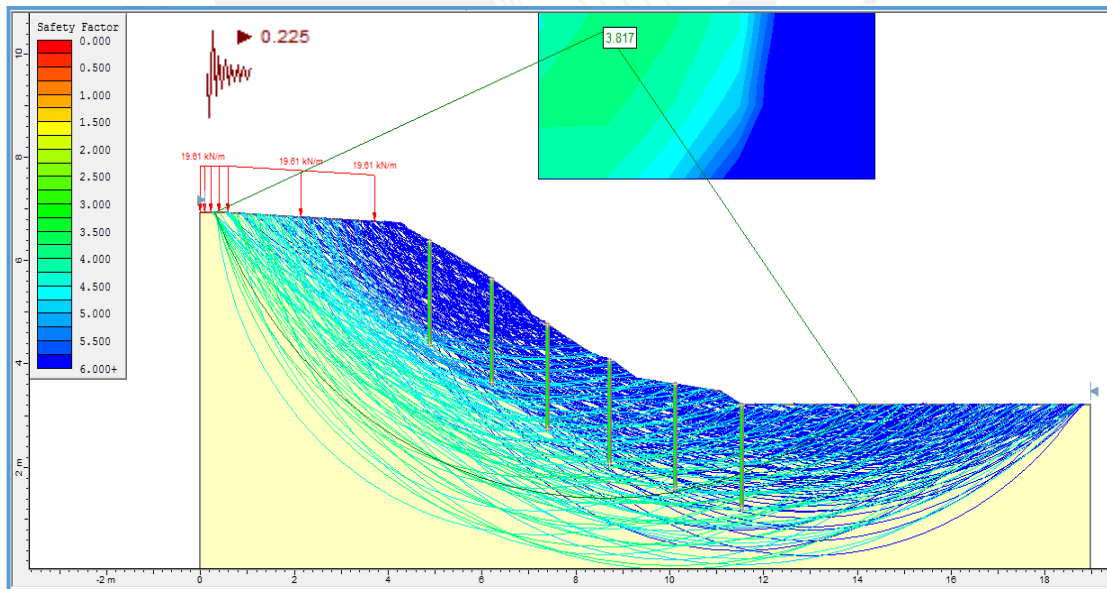


Figura 4-49: Análisis pseudo-estático para la progresiva 0+780 margen izquierdo, correspondiente a la zona de atrincheramiento poco profundo – Bishop FS=3.817, (Elaboración Propia)

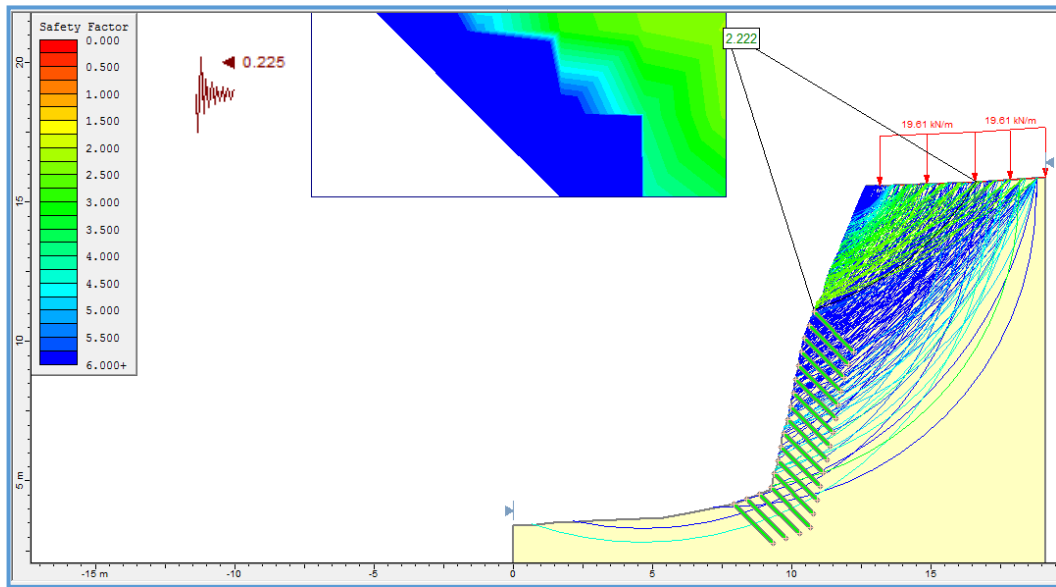


Figura 4-50: Análisis pseudo-estático para la progresiva 0+380 margen derecho, correspondiente a la zona de atrincheramiento profundo– Bishop FS=2.222, (Elaboración Propia)

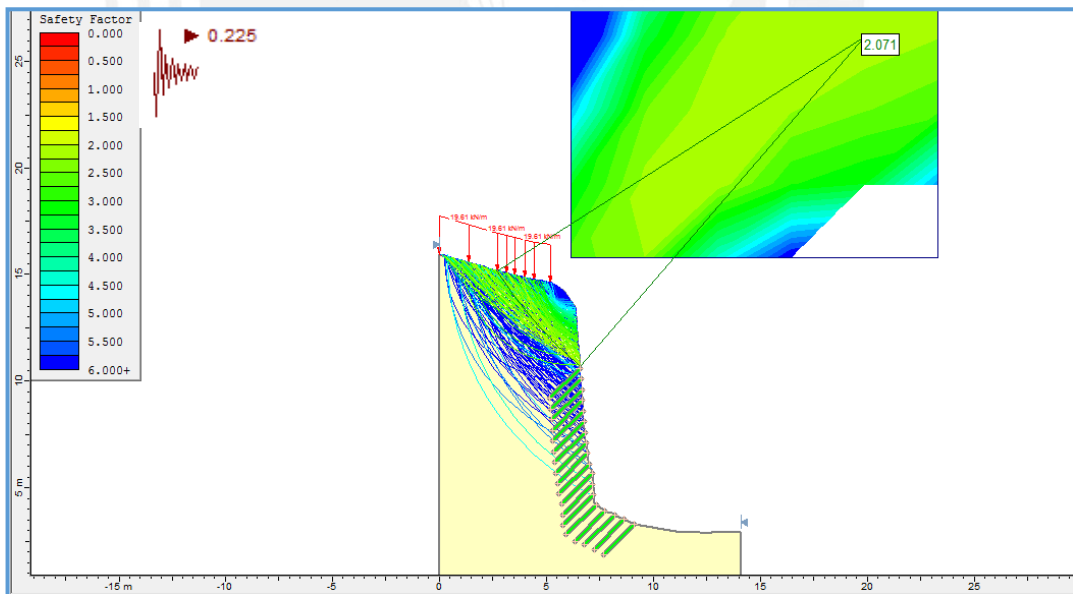


Figura 4-51: Análisis pseudo-estático para la progresiva 0+100 margen izquierdo, correspondiente a la zona de atrincheramiento profundo – Bishop FS=2.071, (Elaboración Propia)

DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONSIDERACIONES DE DISTRIBUCIÓN

5.1. Discusión de resultados

Esta investigación tuvo como propósito analizar y evaluar escenarios para las condiciones actuales y en condiciones de la propuesta de solución. Con base en ello, se discuten a continuación los resultados de estos métodos.

5.1.1. Velocidad media del flujo

Una de las asunciones iniciales fue la reducción de las velocidades en los márgenes del tramo analizado. Esto debido a que la velocidad de escorrentía se encuentra generando una potencial falla en cantilever en esta zona y por consiguiente el debilitamiento del talud. Con la base en los resultados de las simulaciones para los escenarios en condiciones actuales (sin vetiver) y condiciones de la propuesta de solución (con vetiver), a continuación se presenta la variación de la velocidad tanto para la simulación en régimen permanente como para el caso de régimen no permanente.

5.1.1.1. Régimen permanente

Comparando los resultados obtenidos para escenarios sin inserción y con inserción de vetiver se observa una importante variación de la velocidad en los márgenes laterales del tramo analizado, 33.67% en promedio para el margen izquierdo y 33.03% en promedio para el margen derecho. Estos resultados eran de esperarse, ya que al aumentar la rugosidad mediante la variación del coeficiente n de Manning, la velocidad disminuirá pues exhiben una relación inversamente proporcional.

En consecuencia, se puede comprobar los beneficios ofrecidos con la inserción de vetiver como barrera contra la erosión, pues disminuirá la velocidad y por ende reducirá el transporte de sedimentos. En las Figuras 5-01 y 5-02 se observa la variación de la velocidad para los escenarios con y sin la aplicación de vetiver, tanto para el margen izquierdo como para el margen derecho.

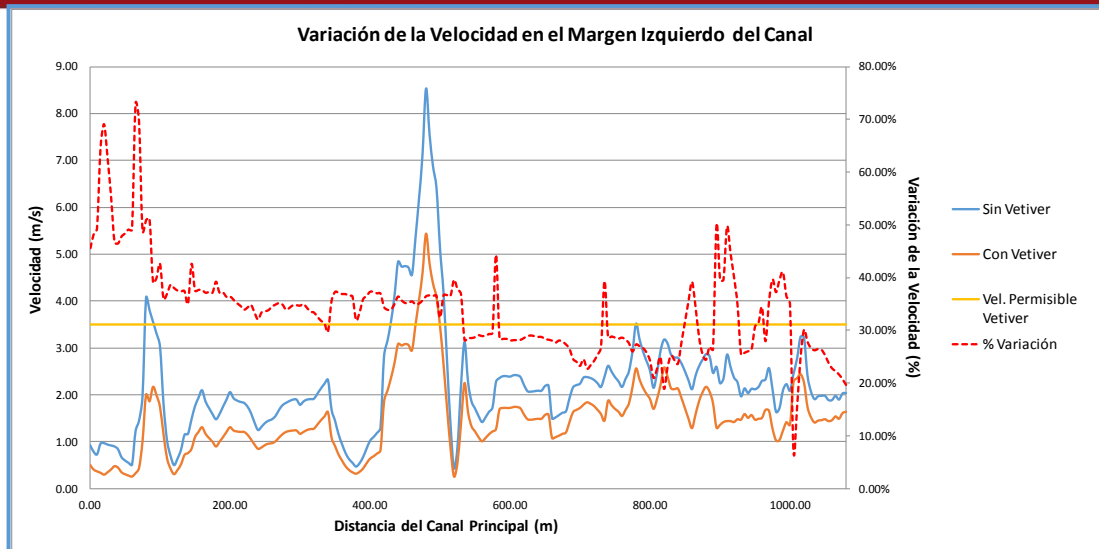


Figura 5-01: Variación de velocidades para la simulación en régimen permanente con y sin inserción de vetiver en el margen izquierdo del tramo (Elaboración Propia)

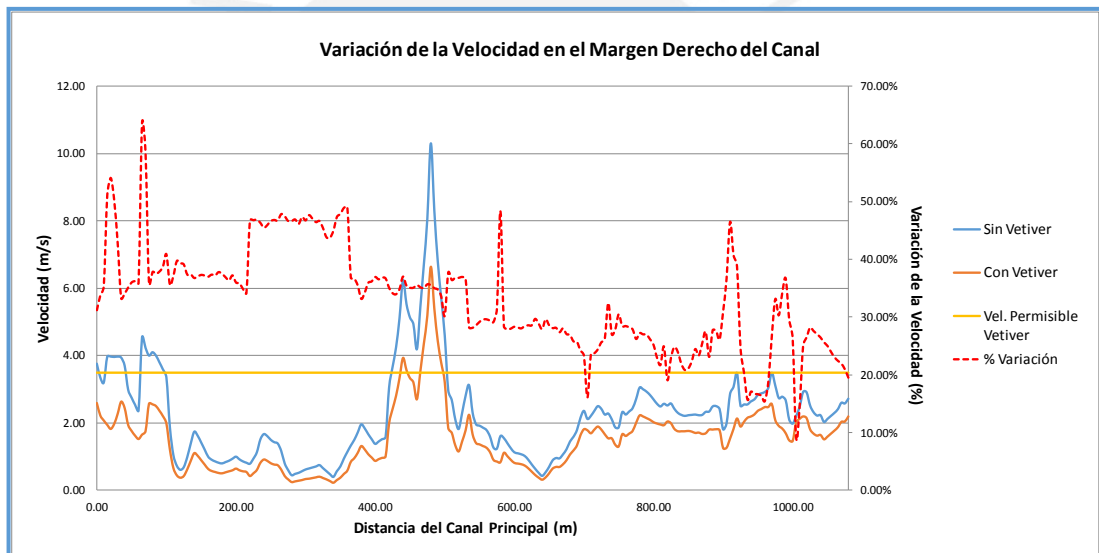


Figura 5-02: Variación de velocidades para la simulación en régimen permanente con y sin inserción de vetiver en el margen derecho del tramo (Elaboración Propia)

5.1.1.2. Régimen no permanente

Tomando como referencia los resultados correspondientes al escenario de máxima elevación de superficie de agua, se obtuvo de la simulación una variación en promedio de 33.91% para el margen izquierdo y de 33.22% para el margen derecho. Estos valores son parecidos, en promedio, a los obtenidos para el caso de la simulación en régimen permanente, sin embargo representan de manera más exacta el comportamiento del río. Por otra parte, es importante señalar que a pesar de la introducción del hidrograma de avenidas de 100 años de período de retorno,

la solución propuesta mostró un buen comportamiento ya que no se excedieron los valores de velocidad permisible que presenta el vetiver (3.5 m/s). En las Figuras 5-03 y 5-04 se puede apreciar la variación de la velocidad para los escenarios descritos anteriormente, tanto para el margen izquierdo como para el derecho.

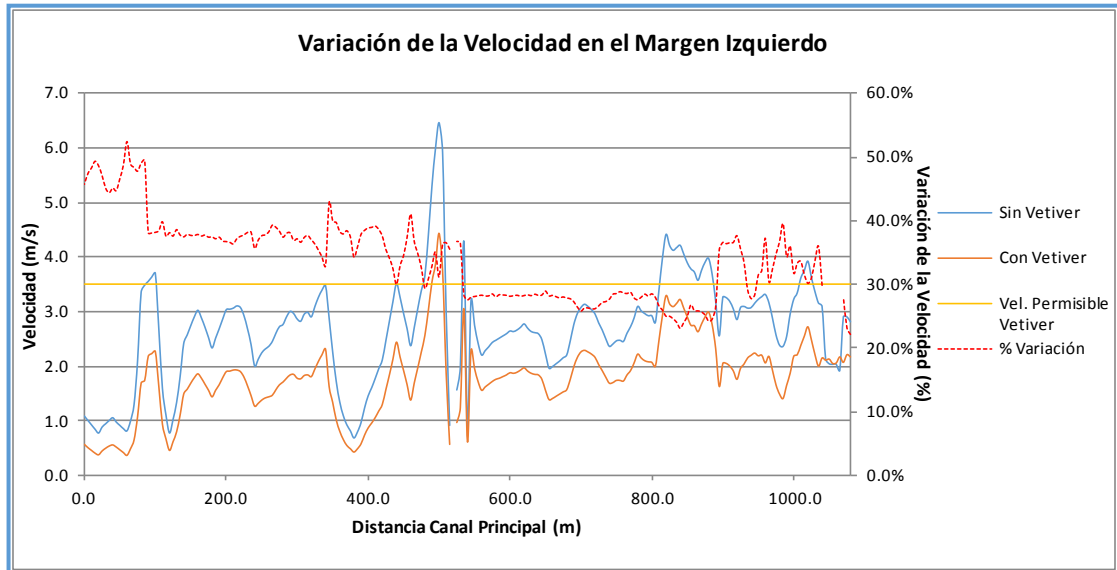


Figura 5-03: Variación de velocidades para la simulación en régimen no permanente con y sin inserción de vetiver en el margen izquierdo del tramo (Elaboración Propia)

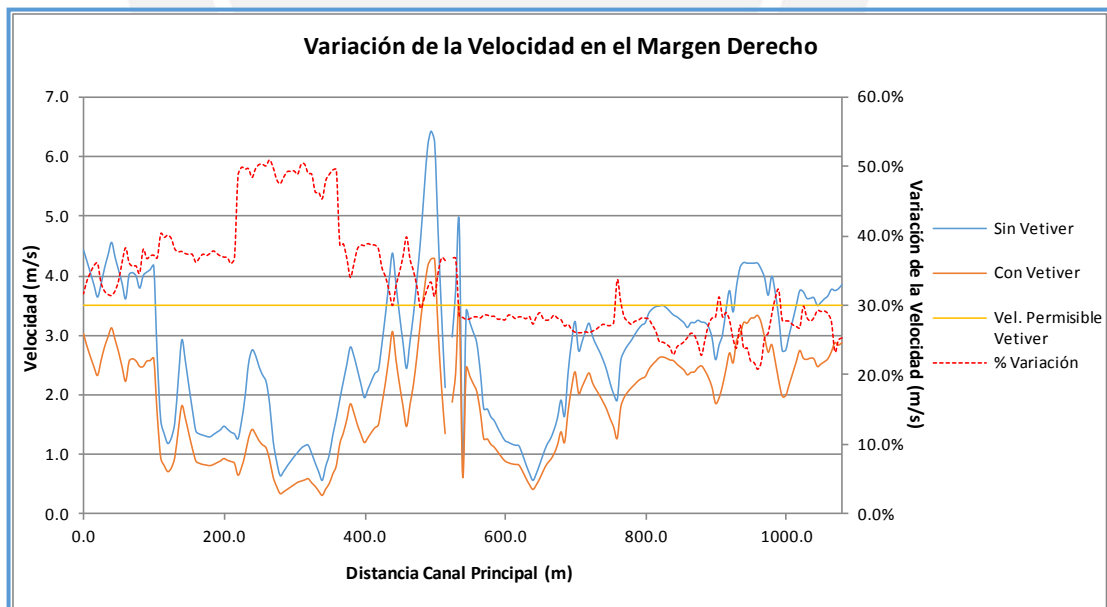


Figura 5-04: Variación de velocidades para la simulación en régimen no permanente con y sin inserción de vetiver en el margen derecho del tramo (Elaboración Propia)

5.1.2. Incremento del tirante

El incremento de la rugosidad en los márgenes del río a causa de la aplicación del vetiver influye en el aumento del valor del tirante. Para el caso de la simulación en flujo permanente (ver Figura 5-05), este incremento se representa en un 3.78% que equivale a un aumento de 0.17 metros en promedio a lo largo del canal. Por otro lado, de acuerdo con los resultados de la simulación en flujo no permanente (ver Figura 5-06), el valor del tirante se incrementó en un 3.13% equivalente a 0.15 metros en promedio. Es importante señalar que tanto para el régimen permanente como no permanente los mayores incrementos del tirante resultaron aguas abajo del puente del Ejército con variaciones hasta de 43.8%.

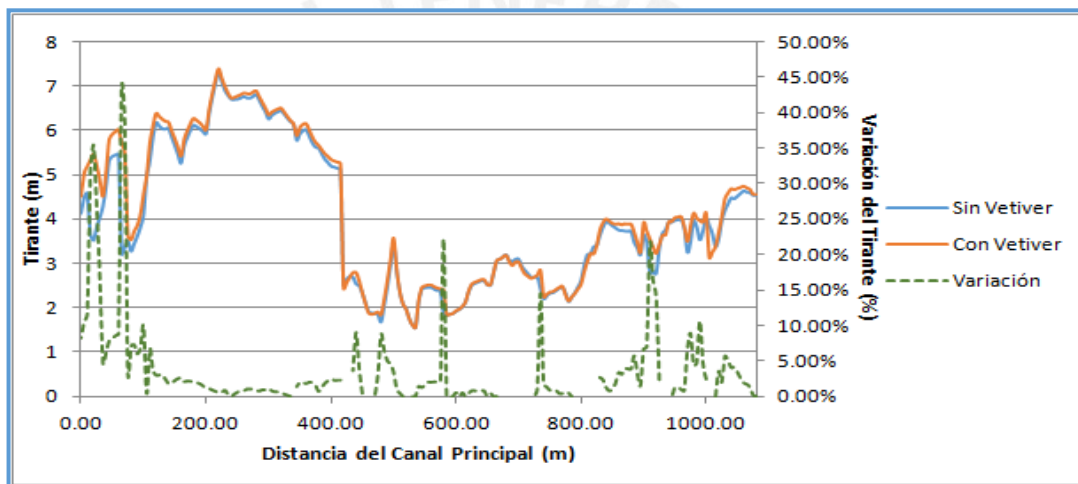


Figura 5-05: Variación del tirante para la simulación en régimen permanente con y sin inserción de vetiver a lo largo del canal (Elaboración Propia)

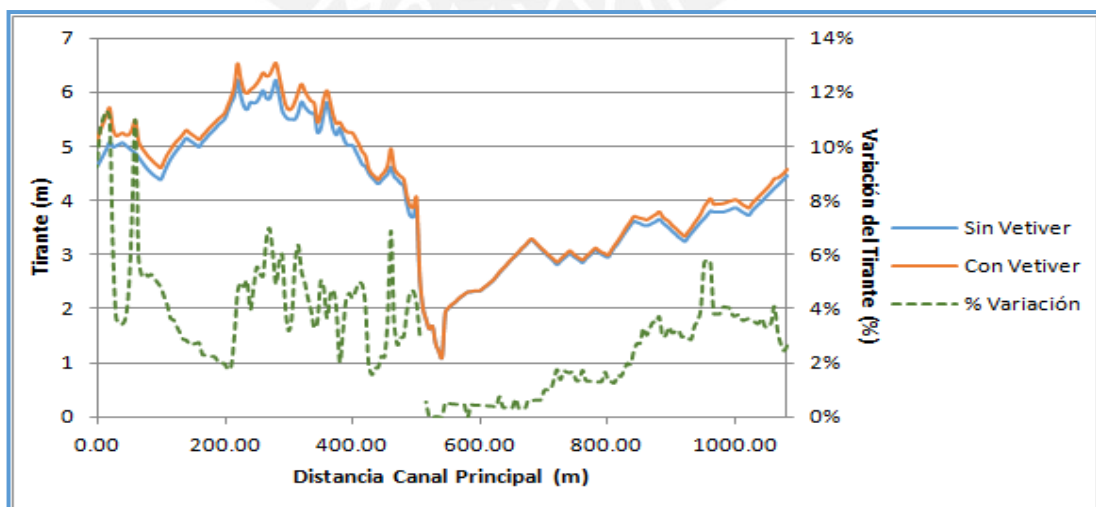


Figura 5-06: Variación del tirante para la simulación en régimen no permanente con y sin inserción de vetiver a lo largo del canal (Elaboración Propia)

5.1.3. Esfuerzos cortantes

Tanto en la Figura 5-07 como en la Figura 5-08 se observa la variación de valores de esfuerzos cortantes para la simulación con vetiver en el margen izquierdo y derecho, respectivamente. De acuerdo a las características hidráulicas del vetiver presentado en el Capítulo II y con base en los resultados para las simulaciones en flujo permanente y no permanente, se comprueba la capacidad de resistencia de esta gramínea a los valores de esfuerzo cortante en los márgenes del río. Cabe resaltar que los resultados de la simulación en régimen no permanente representa la mejor aproximación de este comportamiento.

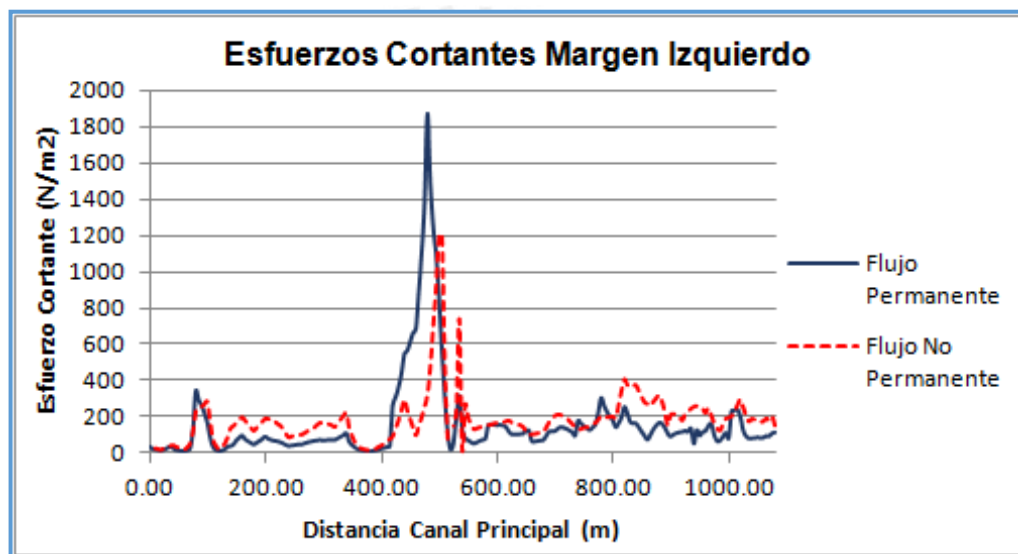


Figura 5-07: Esfuerzos Cortantes en el margen izquierdo con inserción de vetiver para el flujo permanente y no permanente, (Elaboración Propia).

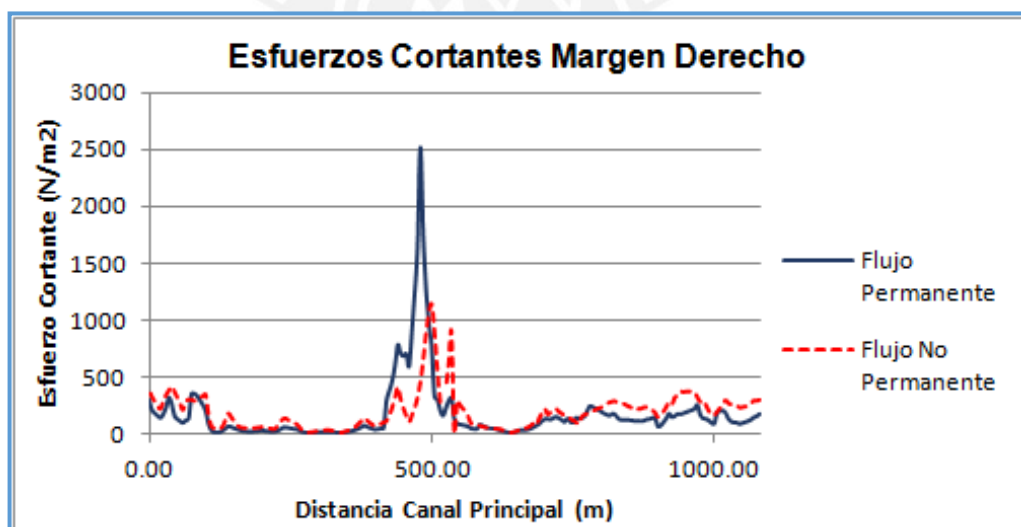


Figura 5-08: Esfuerzos Cortantes en el margen derecho con inserción de vetiver para el flujo permanente y no permanente, (Elaboración Propia).

5.1.4. Secciones transversales

Los resultados para la simulación antes de la utilización de vetiver evidencian valores altos de velocidad en sus secciones transversales debido a sus condiciones tanto geométricas como también los valores de rugosidad presentados. Con la aplicación de la propuesta para el caso de la zona de atrincheramiento poco profundo, aunque no representa la situación más crítica pues su solución es más estética que estructural, se observa un decrecimiento de la distribución de sus velocidades (ver Figuras 5-09 y 5-10). Por otra parte para las secciones del tramo que comprende la zona de atrincheramiento profundo, la cual representa la zona más vulnerable debido a su condición de estrangulamiento antrópico, se puede visualizar con la aplicación de la propuesta una importante reducción de distribución de velocidades con respecto al escenario sin inserción de vetiver (ver Figuras 5-11 y 5-12). Cabe resaltar, el incremento de la superficie de agua que se generan en las secciones debido al escenario con vetiver.

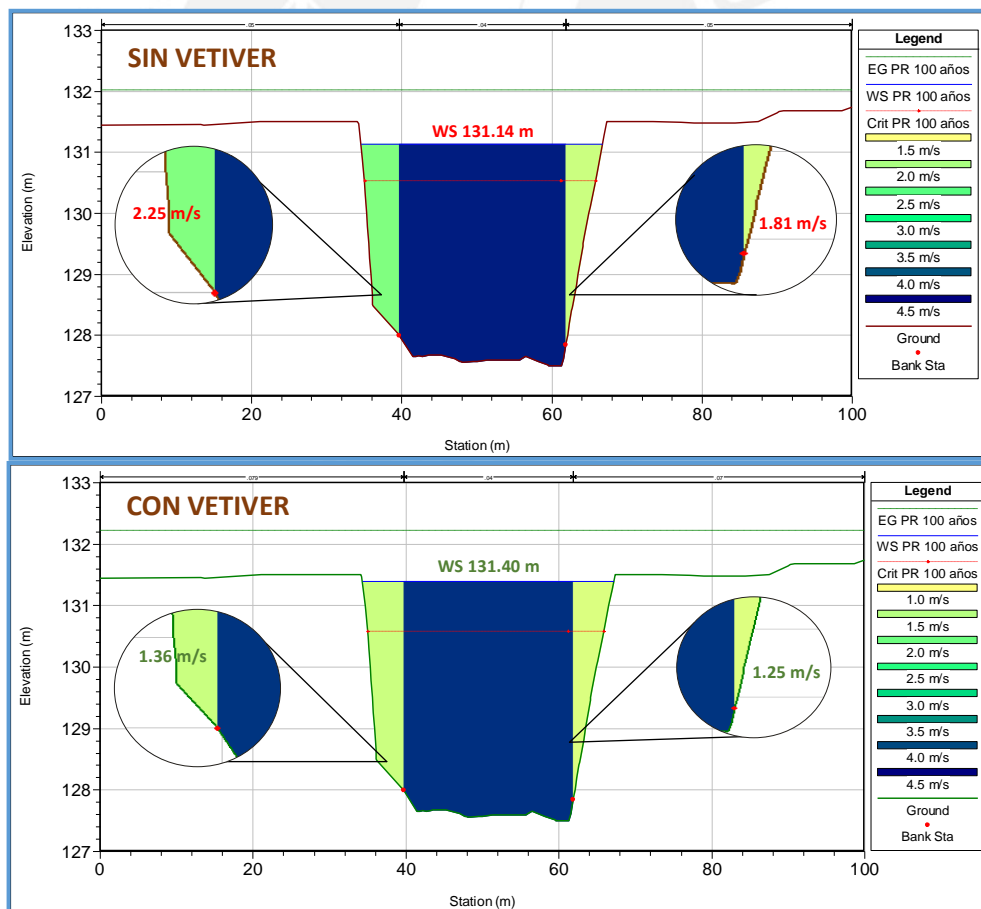


Figura 5-09: Sección transversal progresiva 0+900 en régimen permanente. Superior: Sin vetiver. Inferior: Con vetiver. (Elaboración Propia)

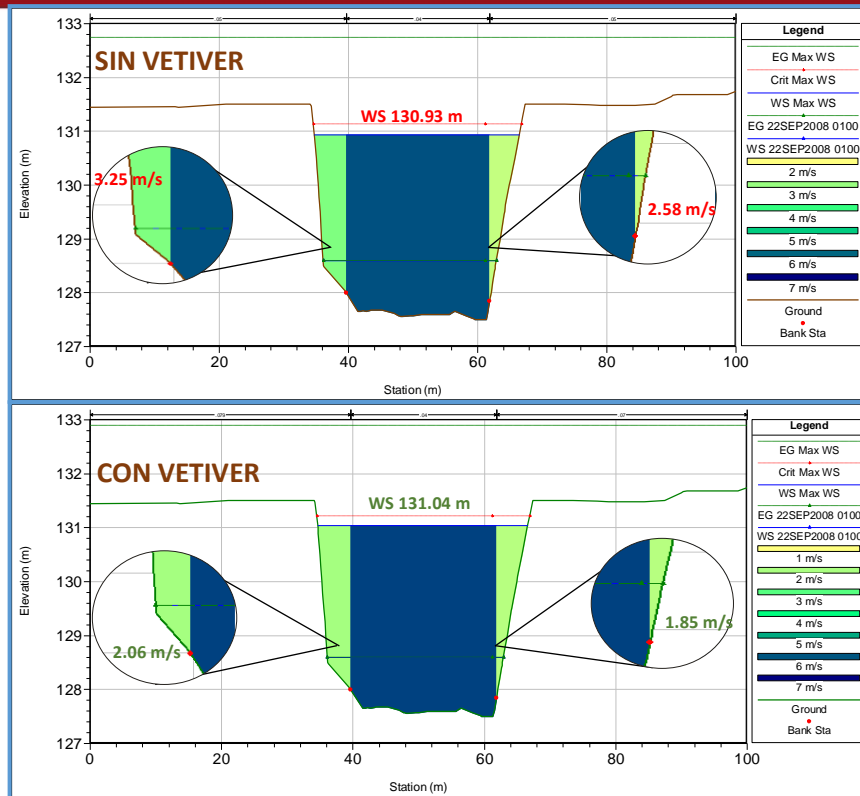


Figura 5-10: Sección transversal progresiva 0+900m en régimen no permanente. Superior: Sin vetiver. Inferior: Con vetiver. (Elaboración Propia)

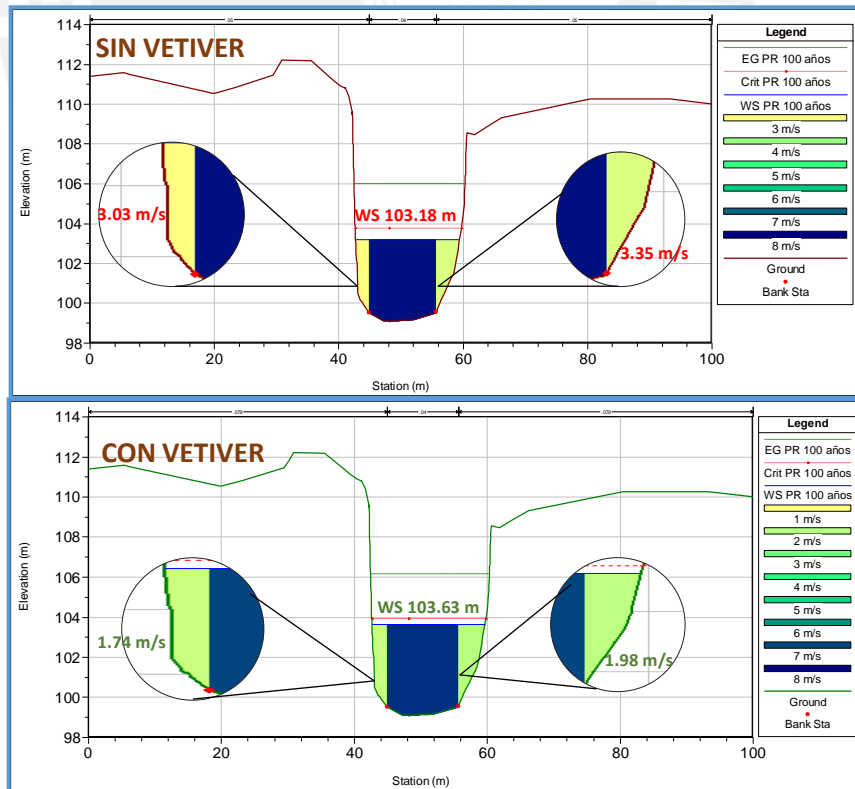


Figura 5-11: Sección transversal progresiva 0+100 en régimen permanente. Superior: Sin vetiver. Inferior: Con vetiver. (Elaboración Propia)

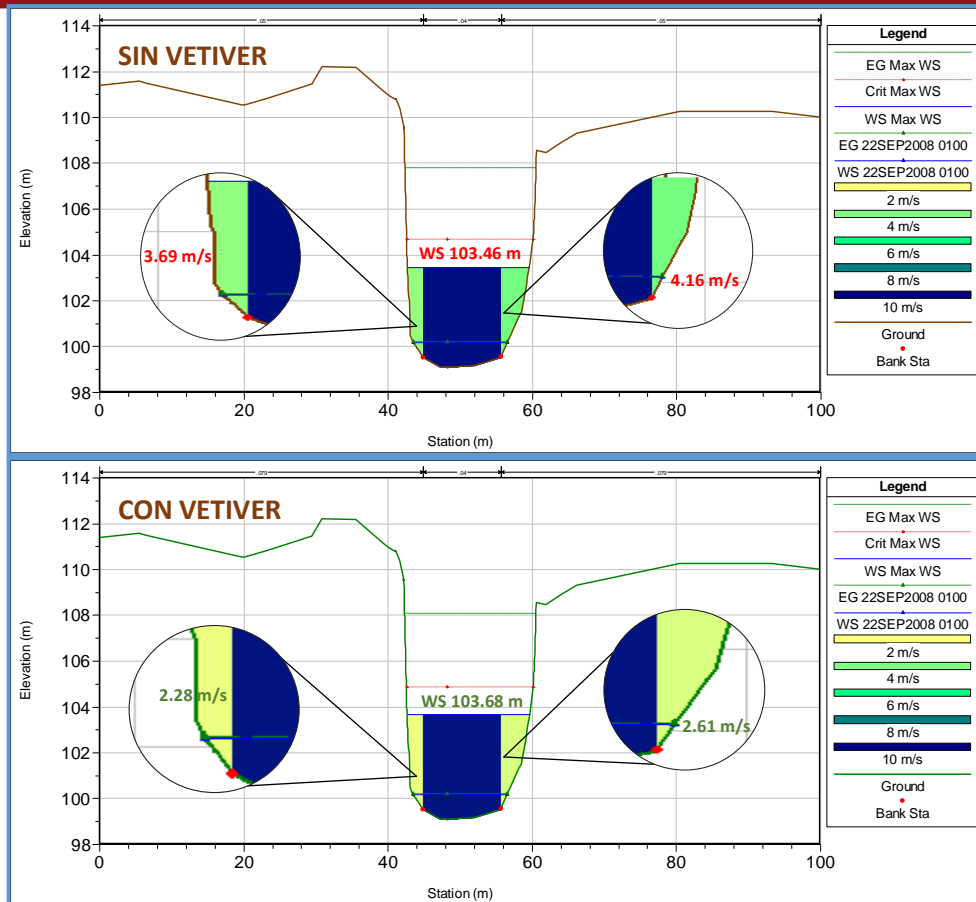


Figura 5-12: Sección transversal 0+100 en régimen no permanente. Superior: Sin vetiver. Inferior: Con vetiver. (Elaboración Propia)

5.1.5. Análisis por estabilidad global

Se realizó una comparación en cuanto a la estabilidad de taludes para el terreno natural sin vetiver y con el reforzamiento del vetiver. De acuerdo a estos resultados, el escenario en condiciones de la propuesta de solución para la zona de atrincheramiento profundo cambia significativamente, pues se evidencia un aumento del valor de factor de seguridad. Este porcentaje de variación es de alrededor 43.08% en promedio para el caso estático y 41.45% para el pseudo-estático.

Por otro lado, para el caso de la zona de atrincheramiento poco profundo la variación del factor de seguridad con inserción de vetiver es de menor magnitud, pues sus porcentajes se encuentran alrededor de 11.2% en promedio para el análisis estático y de 7.5% para en análisis pseudo-estático. Estos valores eran de esperarse, pues la zona de atrincheramiento poco profundo manifiesta un menor peligro de estabilidad y representa más una solución estética. Cabe resaltar que este análisis se realizó para cuatro secciones características que representan la

zona de atrincheramiento poco profundo y atrincheramiento profundo, para las demás se asume que su comportamiento es similar. En la Tabla 5-01 se muestra la comparación para los escenarios sin y con inserción de vetiver.

Zona	Progresiva	FS (BISHOP)		Variación (%)	FS (BISHOP)		Variación (%)
		Estático sin Vetiver	Estático con Vetiver		Pseudo-estático sin Vetiver	Pseudo-estático con Vetiver	
Atrincheramiento poco profundo	0+900	4.51	5.30	15.00%	3.23	3.60	10.25%
	0+780	5.22	5.64	7.38%	3.64	3.82	4.74%
Atrincheramiento profundo	0+380	1.54	2.78	44.46%	1.30	2.22	41.31%
	0+100	1.44	2.47	41.70%	1.21	2.07	41.59%

Tabla 5-01: Variación del factor de seguridad para los escenarios sin vetiver y con vetiver (Elaboración Propia).

5.1.6. Análisis calidad de agua

De acuerdo a la bibliografía revisada, se ha comprobado experimentalmente que la aplicación del sistema vetiver mejora los niveles de los parámetros de calidad de agua. Por ejemplo, estas barreras son capaces de reducir considerablemente valores elevados de Nitritos (NO_2) y Nitratos (NO_3) en el agua contaminada, además de la mejora en los indicadores de Oxígeno Disuelto (OD). Para efectos del presente estudio, solo se pudo realizar un modelo simple en HEC- RAS de análisis de calidad de agua para las condiciones actuales, con el fin de observar la variación de estos contaminantes a lo largo del tramo en estudio.

Para las condiciones de la propuesta de solución, esta variación se verá afectada debido a las propiedades que presenta el vetiver como depurador de contaminantes. Con ello se logrará la mejora en los niveles de calidad de agua, y por consiguiente la recuperación paulatina del ecosistema. Para ello, será importante en futuras investigaciones realizar pruebas de laboratorio, así como el de emplear modelos sofisticados de calidad de agua para medir esta variación.

5.2. Consideraciones para la distribución del vetiver

Con la base en los resultados obtenidos para el sector del tramo urbano analizado, se propuso una distribución del sistema vetiver en los márgenes del cauce, (Tabla 5-02). Para ello, se realizaron consideraciones de dimensionamiento transversal y longitudinal con respecto a la geometría de la sección. A continuación se describen las dimensiones que se tomaron en cuenta para la distribución de este material vegetal.

5.2.1. Intervalo vertical (IV)

Debido a que se debe garantizar una adecuada fijación del sistema para la protección contra la erosión y reforzamiento del talud, los cercos de esta gramínea deben estar espaciados de acuerdo a un Intervalo vertical (IV). El Intervalo vertical se describe como la distancia vertical entre los cercos de vetiver a medida que se desciende por la pendiente del talud. Este valor dependerá de la tipología que se presente en el tramo analizado, así como el valor de Manning (n) adoptado.

5.2.2. Espaciamiento Longitudinal

Se define como la distancia entre cada plantación de vetiver a lo largo del tramo. De este valor dependerá la densidad que se desee adoptar, en base al valor de Manning propuesto y a las velocidades calculadas en los márgenes del río.

Finalmente, en los planos de los Anexos N° 14 y 15 se detallan las distribuciones del vetiver para tramos característicos de la zona de atrincheramiento poco profundo y atrincheramiento profundo, correspondientes a las progresivas 0+900 y 0+100, respectivamente. Es importante señalar también que la forma de plantación de este sistema cumple un rol significativo en la fijación del material vegetal al terreno. En el Anexo N° 16, se puede encontrar una ficha de recomendación de las técnicas propagación del vetiver sobre el talud, la cual debe ser tomada en consideración pues ha garantizado el éxito de este sistema en aplicaciones de restauración de paisajes alrededor del mundo.

Zona	Tramo (m)	Distancia (m)	Descripción	Coeficiente de Manning (n)		Intervalo Vertical (m)		Espaciamiento Longitudinal (m)	
				Margen Izquierdo	Margen Derecho	Margen Izquierdo	Margen Derecho	Margen Izquierdo	Margen Derecho
Atrincheramiento poco profundo	1+000 - 1+080	80	Recta	0.070	0.070	1.50	1.50	0.35	0.35
	0+895 - 1+000	105	Curva	0.079	0.070	1.00	1.50	0.30	0.35
	0+570 - 0+895	325	Recta	0.070	0.070	1.50	1.50	0.35	0.35
Sector Puente Del Ejército	0+505 - 0+570	65	Tramo Puente	0.050	0.050	---	----	---	---
Atrincheramiento profundo	0+365 - 0+505	140	Recta	0.079	0.079	1.00	1.00	0.30	0.30
	0+220 - 0+365	145	Curva	0.079	0.098	1.00	0.50	0.30	0.25
	0+090 - 0+220	130	Recta	0.079	0.079	1.00	1.00	0.30	0.30
	0+000 - 0+090	90	Curva	0.098	0.079	0.50	1.00	0.25	0.30

Tabla 5-02: Distribución de vetiver a lo largo del tramo de estudio (zona de atrincheramiento poco profundo y atrincheramiento profundo), Elaboración Propia

CAPITULO VI:

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- En todas partes del mundo existe una estrecha relación entre las ciudades y los ríos que las cruzan. Casos exitosos como la recuperación del tramo urbano del río Támesis o la del cauce del río Cheonggyecheon son algunos de los ejemplos más significativos de soluciones sostenibles en el tiempo. En consecuencia, el tramo urbano del río Rímac requiere la búsqueda de soluciones inmediatas con un enfoque integral de la cuenca y el río.
- La aplicación de bioingeniería como método para la restauración del tramo urbano del río Rímac se muestra como la herramienta más adecuada para llevar a cabo este objetivo. Si bien se trabajó con parte de lo que comprende en su totalidad el tramo urbano, se puede concluir que esta sección representa la zona más crítica para los alcances que se desarrollaron en el presente trabajo de tesis, además de constituir el primer paso de restauración con miras a la recuperación del río Rímac con el enfoque de cuencas enteras.
- La utilización del vetiver como método de bioingeniería para la formación de una barrera viva contra la erosión en los márgenes del río constituye una herramienta integral, pues permite mejorar las condiciones mecánicas, hidráulicas y medio ambientales del tramo analizado.
- Los resultados obtenidos de la simulación con vetiver para un flujo permanente y no permanente respaldan las asunciones iniciales planteadas como método de bioingeniería en la restauración de ríos. Tal es así que la variación de las velocidades en los márgenes del cauce para escenarios con y sin vetiver es significativa. De esta forma se comprueba la importancia que presenta este material vegetal para el control de la erosión en márgenes de ríos debido al amortiguamiento del impacto de sus aguas sobre los taludes laterales del mismo.
- Con la base en el análisis de estabilidad global para escenarios con y sin inserción de vetiver, se confirman los beneficios que presenta esta gramínea en la estabilización de taludes. De acuerdo al análisis realizado tanto para una estabilidad estática y pseudo-estática mediante el método Bishop, existe un

incremento en el valor del factor de seguridad. Si bien, para el caso de la zona de atrincheramiento poco profundo este incremento es mínimo (cerca de 9% en promedio para ambos análisis), para el tramo de atrincheramiento profundo su incremento es significativo (alrededor de 42% en promedio para ambos análisis). Cabe resaltar que el vetiver también influye en el aumento de la cohesión y por ende la resistencia al corte del suelo, sin embargo es un proceso que se desarrolla a través del tiempo por lo que no forma parte de los resultados obtenidos en el presente trabajo de tesis.

- Las consideraciones sugeridas de distribución de vetiver en el tramo analizado están basadas de acuerdo a las características hidráulicas, geotécnicas y de geometría de sección. Para ello, es imprescindible conocer previamente la caracterización de la zona de estudio en cuanto a su morfología, topografía, composición granulométrica, caudales máximos, velocidades, entre otros, ya que estos parámetros determinarán las condiciones en las que se desarrollará la vegetación.
- Es evidente que para el tramo de atrincheramiento profundo, la distribución de vetiver adquiere mayor relevancia que para el caso de la zona de atrincheramiento poco profundo, pues esta última no representa una zona tan crítica como la primera. Según lo mencionado, dependiendo del coeficiente de Manning (n) adoptado, de las velocidades en los márgenes del río y de las características del talud habrá una variación del intervalo vertical y espaciamiento longitudinal.
- Si bien, el proyecto Vía Parque Rímac – Río Verde plantea una propuesta de recuperación del tramo urbano del río Rímac, se puede concluir, de acuerdo a la bibliografía revisada, que no representa una solución a largo plazo. El río Rímac se clasifica como un río trenzado (tipo braided), en donde el constante cambio de posición y forma es característica de estos. Al reducirse su ancho natural se le estaría restringiendo sus grados de libertad, en consecuencia se generaría un aumento de las velocidades, incremento del efecto erosivo y el comprometimiento de estructuras como vías, puentes, entre otros.
- En suma, la realización de este trabajo de investigación espera contribuir con el proceso de restauración del río Rímac. De la misma forma, demostrar que la utilización de material vegetal (vetiver) como método de bioingeniería representa considerables beneficios por su adaptabilidad y características mecánicas, además de ser compatible con el medio ambiente. Es importante

resaltar que la aplicación de vetiver para la restauración del tramo analizado del río Rímac servirá como base para futuras aplicaciones de esta gramínea en otros cauces con similares características.

6.2. Recomendaciones

- Debido a la reducida disponibilidad de información y a la falta de instrumentación no se pudieron realizar ensayos de laboratorio por lo que para efectos de la propuesta de solución se tomaron como referencias otras investigaciones concernientes a la aplicación del Vetiver en canales. Se espera en un futuro cercano se puedan contar con todas las herramientas necesarias para realizar estos tipos de pruebas.
- Independientemente de los procesos de plantación que se utilicen para la inserción del Vetiver en el terreno, se deberá tener en cuenta la distribución tanto longitudinal como transversal de esta cobertura vegetal (ver Tabla 5-02). Esto debido a que una correcta aplicación de la misma permitirá una mayor efectividad en los resultados
- Con el fin de lograr una solución integral, se recomienda la realización de estudios del río Rímac a nivel de cuenca. Estos deberán contemplar el trabajo multidisciplinario de distintos especialistas, con el propósito de lograr la integración de los aspectos técnicos, ambientales, sociales y económicos que requiere un proceso de restauración.
- Es importante señalar que la utilización de modelos más sofisticados es un factor importante que se deberá tener en cuenta para la realización de estudios futuros. Con ello se lograrán obtener resultados más afinados y acordes con la realidad. Además, estos deberán ser acompañados de pruebas en laboratorio, con el fin de corroborar los resultados de los mismos.
- En cuanto a la información, una de las principales limitaciones del desarrollo del presente trabajo, fue su disponibilidad. Hoy en día, muchas de los organismos públicos ponen trabas en el acceso a la información, lo cual dificulta el desarrollo de investigaciones y en muchos casos obliga al replanteo de los mismos. De acuerdo a lo mencionado, se sugiere la utilización de herramientas como la matriz de consistencia, la cual permitirá en primera instancia definir los lineamientos principales de la investigación y la delimitación del alcance, y con ello direccionar la búsqueda de información de acuerdo a su disponibilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, K. (2008). *Aplicaciones del Modelo HEC-RAS para el Análisis del Flujo No Permanente con Superficie Libre*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Alberto, C., & Lizcano, C. (2012). *Uso del Pasto Vetiver como una Propuesta de Bioingeniería en la Estabilidad de Taludes*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander - Escuela de Ingeniería Química.
- ANA. (2012). *Tratamiento del Cauce del Río Rímac y Principales Quebradas Tributarias para Mitigar Efectos de Eventos Hidrológicos Extremos*. Autoridad Nacional del Agua, Lima. Lima: Dirección de Estudios de Proyectos Hidráulicos Multisectoriales.
- ANDEX. (2013). *Proyecto Protección Rivereña del Río Sarin en el Tramo I*. Lima: Andex Del Norte S.A.
- Andrews, M. (1984). Thames Estuary: Pollution and Recovery. En P. Sheehan, D. Miller, G. Butler, & P. Bourdeau, *Effects of Pollutants at the Ecosystem Level* (págs. 195-227). Ottawa, Canada: Joanne M. Redgeway.
- Arbeláez, A. C. (2003). *Geomorfología Fluvial*. Cauca: Universidad de Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.
- Berezowsky, M. (1998). *Flujo No Permanente en Ríos*. Ciudad de México: UNAM.
- Castelló, E. M. (2009). *Determinación de la Capacidad Hidráulica del Canal Los Molinos-Córdoba*. Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales . Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.
- CISMID. (2007). Conglomerado de Lima Metropolitana en Cimentaciones. *Conferencia Internacional de Ingeniería Sísmica* (págs. 1-20). Lima: Apartado Postal 31-250.
- City of London Corporation. (3 de Junio de 2014). *Plastic Bags on the Thames foreshore*. Obtenido de Thames21, Wallbrook Wharf, City of London Corporation: <http://www.thames21.org.uk/>
- Colegio de Ingenieros del Perú (CIP). (2012). VÍA PARQUE RÍMAC, la obra modelo que transformará Lima. *Revista Técnica del Capítulo de Ingeniería Civil*, 20-21.

- COOPERAZIONE INTERNAZIONALE. (2009). *Estudio Hidrológico Identificación de Zonas de Riesgo en los Distritos de Lima Cercado y El Agustino, Lima Metropolitana, Provincia de Lima*. Lima: Municipalidad Metropolitana de Lima.
- Cristobal, F. (1986). Recuperation of the urban stretch of river Manzanares. *Revistas Científicas del CSIC*, 6-28.
- Chavarri. (2009). *Estudio Hidrológico de Identificación de Zonas de Riesgo en los Distritos de Lima Cercado y El Agustino*. Lima Metropolitana, Lima. Lima: Cooperazione Internazionale.
- Chomchalow, N. (2003). The Role of Vetiver in Controlling Water Quantity and Treating Water Quality: An Overview with Special Reference to Thailand. *Assumption University Bangkok*, 145-161.
- CHOW, V. T. (1994). *Open-Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Dalton, P., Smith, R., & Truong, P. (1995). *Hydraulic Characteristics of Vetiver Hedges: An Engineering Design Approach to Flood Mitigation on a Cropped Flood Plain*. Thailand: First International Vetiver Conference.
- Fox. (2004). Investigation of Flow and Local Scour Characteristics around a Partially Submerged Permeable . *WSDOT Barb*, 10-12.
- Granados, A. (2006). *Estabilización del Talud de la Costa Verde en la Zona Del Distrito de Barranco*. Lima: PUCP.
- Gray, D., & Sitar, R. (1996). *Biotechnical and Soil Bioengineering slope stabilization. Practical guide for erosion control*. New York: J. Wiley and Sons.
- Gray, D., & Sotir, R. (1996). *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization*. Londres: John Wiley. P.378.
- Guano, M., & Velastegui, V. (2014). *Manual básico para la modelación numérica de la calidad de agua en ríos: Programa computacional HEC-RAS Versión4.0. Ejemplo de aplicación a un tramo del río Machángara dentro de la zona de influencia de la ciudad de Quito*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Hagerty, J. (1998). *Erosion mechanisms on Midwest alluvial streams*. Methods and techniques for stabilizing channels and streambanks: IECA soil stabilization series:vol 1.

- Hengchaovanich, D., & Nilaweera, N. S. (1998). An assessment of strength properties of Vetiver grass roots in relation to slope stabilization. *Proc. First Int. Conf. on Vetiver*, 153-158.
- Kuroiwa, J. (2011). *Formación del Cañón Urbano de Lima, soluciones parciales de ingeniería*. Lima: SENAMHI.
- Leopold, L. (1994). *A view of the river*. Cambridge: Harvard University Press.
- Luque, R. (2013). *Control de Erosion y Sedimentos con Sistemas Veitiver en Margen de Río, Taludes, Carcavas y Minería en Venezuela*. Medellín: Preside Vetiver Antierosión, CA.
- McCullah, J. (2001). *Biotechnical Soil Stabilization for Slopes and Streambanks*. Las Vegas: IECA Professional Development Course. Training Manual.
- Metcalf, O., Truong, P., & Smith, R. (2008). Hydraulic Characteristics of Vetiver Hedges in Deep Flows. *National Centre for Engineering in Agriculture*, 15-25.
- MINAG. (2010). *Evaluación de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Rímac*. Autoridad Nacional del Agua (ANA), Lima. Lima: Ministerio de Agricultura.
- N.H.I. (2005). Design of Roadside Channels with Flexible Linings. En U. D. Transportation, *Hydraulic Engineering Circular N° 15, Third Edition* (págs. 95-97). Virginia: Federal Highway Administration.
- Orihuela, J. (2007). *Manual Sobre el Uso y Manejo del Pasto Vetiver (Chrysopogon Zizanioides)*. Lima: UNALM.
- Ramirez, J. (2009). *Normas Técnicas de la Tecnología Vetiver para la Implementación en Control de Erosión y Protección de Infraestructura*. Colombia: The Vetiver Network International.
- Reckendorf, F. (2010). *Streambank erosion causes, and large woody material (LWM) solutions for streambank erosion and sediment reduction*. Las Vegas: 2nd Join Federal Interagency Conference.
- Rocha, A. (1998). *Introducción a la hidráulica fluvial*. Lima: Facultad de Ingeniería Civil - Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rosgen, D. L. (1994). A classification of natural rivers. *ELSEVIER. CATENA*, 169-199.

- Ruesta, P., Díaz, J., & Alva, J. (1995). *El Coeficiente Sísmico en el Diseño de Presas de Tierra y de Enrocado*. Lima: CISMID.
- Rufino, M., & Mota, H. (2012). Resistência ao cisalhamento de solos e taludes vegetados com capim vetiver. *Ciência do Solo*, 113-120.
- Sangalli, P. (2008). *Bioingeniería o Ingeniería Biológicas. Introducción a la Bioingeniería o Ingeniería Biológica*. España: AEIP Asociación Española de Ingeniería del Paisaje.
- SENAMHI. (2015). *Dirección de Hidrología y Recursos Hídricos*. Lima: Ministerio del Ambiente (MINAM).
- SENCICO. (9 de junio de 2006). NORMA E.030 Diseño Sismorresistente. *El Peruano*, págs. 320739-210746.
- Suárez, J. (2001). *Control de Erosión en Zonas Tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Recuperado el 27 de Febrero de 2014
- Talukdar, B. (2012). River Bank Erosion - A Perspective. *The morphology of the Brahmaputra river* (págs. 40-45). Brahmaputra: IEI Guwahati.
- Truong, P. (2008). *Vetiver System for Infrastructure Protection*. Brisbane, Australia: Veticon Consulting.
- Truong, P., & Hart, B. (2001). *Vetiver System for Wastewater Treatment*. Bangkok, Thailand: Office of the Royal Development Projects Board.
- Truong, P., Van, T. T., & Pinners, E. (2008). *Vetiver System Applications: A Technical Reference Manual*. Thailand: The Vetiver Network International .
- UDEP. (4 de Agosto de 2002). Investigación Hidráulica y Sedimentológica del Tramo Urbano del Río Piura. (Velasco, Ed.) *PIRHUA*, 38-61.
- US Army Corps of Engineers. (2010). *HEC-RAS River Analysis System, User's Manual*. California: Public Release.
- USGS. (25 de Noviembre de 2014). *Surface-Water field techniques*. Obtenido de USGS, Science for a Changing World: [http://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/sws/fieldmethods/Indirects/nvalues/0053-79.htm#site description](http://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/sws/fieldmethods/Indirects/nvalues/0053-79.htm#site%20description)

USGS. (25 de Setiembre de 2014). Surface-Water Field Techniques. Reston, Virginia, United States.

Ventura, F. (2008). Elementos urbanos habitables. Recuperación del antiguo cauce del arroyo Cheonggyecheon. *I Congreso de Urbanismo y Ordenación del Territorio* (págs. 1-10). Bilbao: Ciudad y Territorio.

Vu, M. A. (2007). *Reduction of wave overtopping by Vetiver grass*. Delft: TU Delft.

Wohl, E. (2005). River restoration. *Water Resources research*, 1-12.

