

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
ESCUELA DE POSGRADO
Programa de Doctorado en Ingeniería Civil



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

**Efecto de la bioingeniería en eventos de cambios
climáticos en el río Chancay - Lambayeque**

**Tesis para optar el grado de
Doctor en Ingeniería Civil**

Autor:

Mg. Villegas Granados, Luis Mariano
Código ORCID: 0000-0001-5401-2566
DNI. N° 16665065

Asesor:

Dr. López Carranza, Atilio Rubén
Código ORCID: 0000-0002-3631-2001
DNI. N° 32965940

Línea de investigación
Gestión integrada de recursos hídricos

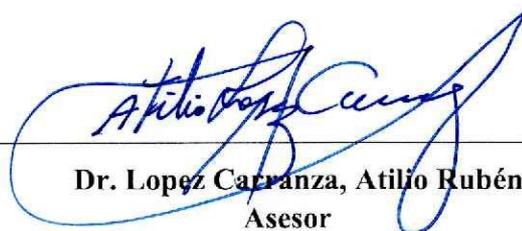
Nuevo Chimbote - PERÚ
2025



CERTIFICACIÓN DEL ASESOR

Yo, **Dr. López Carranza, Atilio Rubén**, mediante la presente certifico mi asesoramiento de la tesis titulada: **Efecto de la bioingeniería en eventos de cambios climáticos en el río Chancay – Lambayeque**, que tiene como autor al **Mg. Villegas Granados, Luis Mariano**, alumno del Doctorado en Ingeniería Civil, ha sido elaborado de acuerdo al Reglamento General de Grados y Títulos en la escuela de posgrado de la Universidad Nacional del Santa.

Nuevo Chimbote, abril del 2025



Dr. Lopez Carranza, Atilio Rubén
Asesor

DNI. N° 32965940

Código ORCID: 0000-0002-3631-2001



AVAL DE CONFORMIDAD DEL JURADO

Tesis titulada: **Efecto de la bioingeniería en eventos de cambios climáticos en el río Chancay – Lambayeque**, que tiene como autor al **Mg. Villegas Granados Luis Mariano**.

Revisado y Aprobado por el Jurado Evaluador:



Dr. Fernandez Mantilla, Jenisse del Rocio
Presidente
DNI N° 33264434
Código ORCID: 0000-0003-3336-4786



Dr. Ascurra Valle, Víctor Alejandro
Secretario
DNI N° 17866619
Código ORCID: 0000-0001-5755-5267



Dr. Lopez Carranza, Atilio Rubén
Vocal
DNI. N° 32965940
Código ORCID: 0000-0002-3631-2001



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

A los dos días del mes de abril del año 2025, siendo las 11:00 horas, en el aula P-01 de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador, designados mediante Resolución Directoral N° 328-2025-EPG-UNS de fecha 14.03.2025, conformado por los docentes: Dra. Jenisse del Rocio Fernández Mantilla (Presidenta), Dr. Víctor Alejandro Ascurra Valle (Secretario) y Dr. Atilio Rubén López Carranza (Vocal); con la finalidad de evaluar la tesis titulada : **"EFECTO DE LA BIOINGENIERÍA EN EVENTOS DE CAMBIOS CLIMÁTICOS EN EL RÍO CHANCAY-LAMBAYEQUE"**; presentado por el tesista **Luis Mariano Villegas Granados**, egresado del programa de **Doctorado en Ingeniería Civil**.

Sustentación autorizada mediante Resolución Directoral N° 399-2025-EPG-UNS de fecha 28 de marzo de 2025.

La presidenta del jurado autorizó el inicio del acto académico; producido y concluido el acto de sustentación de tesis, los miembros del jurado procedieron a la evaluación respectiva, haciendo una serie de preguntas y recomendaciones al tesista, quien dio respuestas a las interrogantes y observaciones.

El jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, declara la sustentación como Bueno, asignándole la calificación de 18.

Siendo las 12:00 horas del mismo día se da por finalizado el acto académico, firmando la presente acta en señal de conformidad.


Dra. Jenisse del Rocio Fernández Mantilla
Presidenta


Dr. Víctor Alejandro Ascurra Valle
Secretario


Dr. Atilio Rubén López Carranza
Vocal/Asesor



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: LUIS MARIANO VILLEGAS GRANADOS_PreviewUser
Título del ejercicio: Turnitin
Título de la entrega: TESIS DOCTORAL _VILLEGAS GRANADOS LUIS MARIANO.pdf
Nombre del archivo: TESIS_DOCTORAL _VILLEGAS GRANADOS_LUIS_MARIANO.pdf
Tamaño del archivo: 1.55M
Total páginas: 33
Total de palabras: 9,592
Total de caracteres: 50,983
Fecha de entrega: 12-abr.-2025 01:06p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2643649656



INFORME DE ORIGINALIDAD

15%	13%	4%	4%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
2	Submitted to Universidad Francisco de Paula Santander Trabajo del estudiante	1%
3	vsip.info Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	1%
5	web.bioucm.es Fuente de Internet	1%
6	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
7	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1%
8	1library.co Fuente de Internet	<1%
9	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	<1%
10	Morado Vázquez, María. "La adquisición del orden sujeto-verbo en la intransividad y la interfaz sintaxis-discurso: Un estudio sobre la	<1%

DEDICATORIA

A Dios por permitir el éxito de mis estudios doctorales, a mi esposa Josefina Yanet Piñella Cardenas a Mariana y Mariano mis Hijos por la fortaleza que me dan en cada decisión que asumo, a mis padres Segundo y Zoila y a mis hermanos Maritza, Luis, William y Tereza por su apoyo incondicional a lo largo de mis estudios, los quiero mucho.

Bendiciones para ustedes

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento al Dr. Ing. Atilio Rubén López Carranza por brindarme el apoyo correcto e incondicional y de manera especial al Ing. Guillermo Gustavo Arriola Carrasco, por ofrecerme su rotundo y necesario apoyo académico y metodológico en el desarrollo de mi tesis doctoral

Índice general

Certificación del asesor de tesis	ii
Aval del jurado evaluador	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimiento	v
Índice general	x
Resumen	xiv
Abstract	xv
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción y formulación del problema	1
1.1.1 Descripción del problema	1
1.1.2 Formulación del problema	2
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Formulación de la hipótesis	3
1.4. Justificación e importancia	3
II. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Antecedentes	4
2.2. Marco conceptual	9
2.2.1. Bioingeniería	9
2.2.2. Cambio climático	11
III. METODOLOGÍA	12
3.1. Método	12
3.2. Diseño de investigación	12
3.3. Población	12
3.4. Muestra	12
	X

3.5. Variables de estudio	12
3.5.1. Definición conceptual	12
3.5.2. Definición operacional	13
3.5.3. Indicadores	13
3.6. Técnica e instrumento de recolección de datos	13
3.7. Técnicas de análisis de resultados	14
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
4.1. Resultados	16
4.2. Discusión	27
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	29
5.1. Conclusiones	29
5.2. Recomendaciones	29
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
VII. ANEXOS	36

Índice de tablas

Tabla 1: Estaciones climáticas e hidrométrica de la cuenca Chancay-Lambayeque	17
Tabla 2: Métricas estadísticas de comparación de los modelos hidrológicos	19
Tabla 3: Parámetros hidráulicos obtenidos para el tramo de estudio	21
Tabla 4: Parámetros para determinar la altura del crecimiento del cultivo	23
Tabla 5: Análisis de varianza para los valores de altura de cultivo	24
Tabla 6: Análisis de varianza para los valores de cohesión	25
Tabla 7: Análisis de varianza para los valores del ángulo de fricción interno	25

Índice de figuras

Figura 1: Ubicación estaciones climáticas e hidrométrica de la cuenca Chancay-Lambayeque	16
Figura 2: Vista general de la extracción de datos del portal electrónico GloFAS	17
Figura 3: Caudales máximos obtenidos mediante simulación en LISFLOOD de GloFAS	18
Figura 4: Modelo hidrológico de la cuenca Chancay-Lambayeque con HEC-HMS	18
Figura 5: Comparación gráfica de los modelos hidrológicos LISFLOOD y HEC-HMS	19
Figura 6: Vista de los resultados de HEC-GeoRas para el tramo de estudio	20
Figura 7: Vista de la sección transversal típica en HEC-GeoRAS del tramo de estudio	20
Figura 8: Crecimiento de la especie vegetal <i>Gynerium sagittatum</i> (Aublet) P.	22
Figura 9: Rendimiento de follaje y seco de la especie <i>Gynerium sagittatum</i> (Aublet) P.	22
Figura 10: Correlación de la altura de crecimiento del cultivo	23
Figura 11: Diagrama de cajas de la distribución del crecimiento de la planta	24
Figura 12: Diagrama de cajas de la distribución de la cohesión	26
Figura 13: Diagrama de cajas de la distribución del ángulo de fricción interno	26

Resumen

El objetivo de esta tesis fue determinar el efecto de la bioingeniería en eventos de cambios climáticos en el río Chancay-Lambayeque, cuya metodología fue de método cuantitativo y diseño experimental. En la etapa inicial se determinó el caudal máximo considerando las precipitaciones en eventos climáticos en el río Chancay-Lambayeque, resultando $798.23 \text{ m}^3/\text{s}$, para un período de 140 años, usando además la información del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología y de la Autoridad Nacional de Agua, cuantificándose 12 estaciones climáticas y 1 hidrométrica. Después, se determinaron los parámetros hidráulicos del río Chancay-Lambayeque para el desarrollo de la bioingeniería y considerando la colocación de la especie vegetal *Gynerium sagittatum* (Aublet) P., obteniéndose las condiciones hidráulicas necesarias para la sección del tramo estudiado en inmediaciones del puente Saltur, pues el flujo fue subcrítico, velocidad de 3.50 m/s y tirante normal de 1.83 metros , siendo esta la altura mínima que debe colocarse la planta para mantenerse adecuadamente. Finalmente, se determinó el crecimiento de la especie vegetal y la estabilización del talud del río, en donde el modelo matemático de mejor ajuste de predicción de crecimiento fue la ecuación logística, permitiendo entender el desarrollo de esta planta bajo condiciones naturales, en tanto, se pudo notar un incremento significativo de las propiedades mecánicas, relacionadas a la cohesión y el ángulo de fricción con la colocación de la planta. Por lo expuesto, los hallazgos de esta investigación demuestran la viabilidad del uso de bioingeniería en el río Chancay-Lambayeque, específicamente en las inmediaciones del puente Saltur.

Palabras clave: Bioingeniería, caudal, tirante normal, velocidad.

Abstract

The objective of this thesis was to determine the effect of bioengineering on climate change events in the Chancay-Lambayeque river, whose methodology was quantitative and experimental design. In the initial stage, the maximum flow was determined considering rainfall during climatic events in the Chancay-Lambayeque river, resulting in 798.23 m³/s, for a period of 140 years, also using information from the Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología and the Autoridad Nacional de Agua, quantifying 12 climatic stations and 1 hydrometric station. Then, the hydraulic parameters of the Chancay-Lambayeque river were determined for the development of bioengineering and considering the placement of the plant species *Gynerium sagittatum* (Aublet) P., obtaining the necessary hydraulic conditions for the section of the studied stretch in the vicinity of the Saltur bridge, since the flow was subcritical, speed of 3.50 m/s and normal depth of 1.83 meters, this being the minimum height that the plant should be placed to be properly maintained. Finally, the growth of the plant species and the stabilization of the river slope were determined, where the mathematical model with the best fit for growth prediction was the logistic equation, allowing to understand the development of this plant under natural conditions, meanwhile, a significant increase in the mechanical properties, related to cohesion and the angle of friction, could be noticed with the placement of the plant. Therefore, the findings of this research demonstrate the viability of using bioengineering in the Chancay-Lambayeque river, specifically in the vicinity of the Saltur bridge.

Keywords: Bioengineering, flow, normal depth, velocity.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción y formulación del problema

1.1.1 Descripción del problema

A nivel mundial, los efectos negativos que está generando la conducta humana con la intensificación de las actividades de ingeniería, en relación al uso y explotación del suelo, se está viendo afectado, principalmente el clima y los cambios que se pueden dar en diferentes zonas geográficas (Cui et al., 2021). Es por ello, que se deben tomar medidas correctivas a corto plazo, que ayuden a disminuir dicho impacto, destacando algunas soluciones como las que utilizan elementos naturales, tales como plantas, árboles y en su conjunto diferentes especies vegetales (Zhang et al., 2020).

Esta preocupación se asume, comenzando en la proyección de un paisaje degradado por los factores indicados anteriormente, sin embargo, dicha efecto puede ser minimizado en gran medida con la revegetación de la superficie natural (Bordoloi & Ng, 2020); siendo esta última, una medida correctiva en la que se pueden emplear diversos procedimientos conocidas comúnmente como técnicas de bioingeniería y que a la vez estén basados en métodos de remediación ambiental ante el cambio climático (Ng et al., 2022), en tal sentido, urge la necesidad de estudiar este problema, con el fin de restaurar el paisaje de manera sostenible y sustentable, cuyo impacto al medio natural sea el menor posible (Von-der-Thannen et al., 2021).

Así mismo, se puede notar además que no sólo la desertificación, erosión y degradación química, han generado problemas al medio ambiente, pues han surgido también otros problemas como la remoción de masas, flujos hiperconcentrados y deslizamientos, por lo que urge tomar medidas correctivas al corto y mediano plazo (Pen & Lan, 2022). En ese contexto, es necesario emplear esas medidas de remediación que combinen la práctica tradicional de la ingeniería civil y los elementos vivos como la flora existente en las riberas de los ríos (Ni et al., 2024).

Como se ha podido notar en la problemática expuesta, lo que se busca solucionar, es la erosión originada por los procesos de la degradación del suelo, tal como sugieren Maxwald et al., (2020); por lo que, dichas medidas de reducción de este efecto nocivo en los ecosistemas, se puede dar mediante el control y mejoramiento del terreno natural, incrementando de esta manera, su resistencia y estabilidad (Tardio & Mickovski, 2023), que en gran medida sean de origen natural y no produzcan otros efectos negativos, tal es el caso de la aplicación de la bioingeniería, que en el último siglo ha ido sumando una mayor relevancia de aplicación, debido a su diversidad de aplicaciones en las obras civiles (Rey et al., 2019; Preti et al., 2022).

También, es necesario la evaluación a largo plazo de la bioingeniería, considerando el efecto que pueda generar el cambio climático (Mickovski, 2021); ya que los ecosistemas, son sistemas complejos, que actualmente experimentan diversas amenazas asociadas con el calentamiento global, la explotación intensiva y la degradación del hábitat provocada de manera alarmante por la acción humana (Vianna et al., 2020). Es por ello, que soluciones basadas en aspectos de bioingeniería, pueden lograr minimizar el impacto al medio ambiente, empleando para ello bajas inversiones económicas (Antônio et al., 2021), y con soluciones innovadoras de gran impacto para la sociedad, que consideren en gran medida, los efectos del cambio climático a corto y mediano plazo (Solé & Levin, 2022), siendo necesario para tal fin, el estudio de las propuestas bioingenieriles bajo diferentes condiciones de aplicación (Uzielli et al., 2025).

El Río Chancay - Lambayeque, ubicado en la cuenca Chancay - Lambayeque, perteneciente a la vertiente del Pacífico Norte, cuyos ríos se caracterizan principalmente por presentar un comportamiento hidrológico estacional, es decir, en los cuatro primeros meses del año presenta lluvias considerables, incluyendo en algunos casos niveles extremos, mientras que en los meses siguientes las precipitaciones son de regular a baja intensidad, sin embargo, el río correspondiente al ámbito de estudio del presente proyecto se ve expuesto a potenciales inundaciones y recurrentes efectos negativos en las principales obras civiles de la Región Lambayeque, sobre todo cuando se producen precipitaciones máximas influenciadas por el Fenómeno El Niño, es por ello que surge la importancia de la aplicación de alguna solución de bioingeniería que considere los diferentes eventos de cambios climáticos.

1.1.2 Formulación del problema

¿Influye los eventos de cambio climático en la bioingeniería en el río Chancay - Lambayeque?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar el efecto de la bioingeniería en eventos de cambios climáticos en el río Chancay - Lambayeque.

1.2.2. Objetivos específicos

Determinar el caudal máximo considerando las precipitaciones en eventos climáticos en el río Chancay - Lambayeque.

Determinar los parámetros hidráulicos del río para el desarrollo de la bioingeniería considerando la especie vegetal *Gynerium sagittatum* (Aublet) P.

Determinar el crecimiento de la especie vegetal *Gynerium sagittatum* (Aublet) P. y estabilización del talud del río Chancay - Lambayeque.

1.3. Formulación de la hipótesis

El evento de cambio climático si influye en la bioingeniería en el río Chancay - Lambayeque.

1.4. Justificación e importancia

La presente investigación se justifica desde el aspecto social, ya que con la aplicación de la bioingeniería en eventos de cambios climáticos en el río Chancay - Lambayeque, se busca mejorar las condiciones de vida de los pobladores con una adecuada infraestructura que mitigue los posibles desbordes del río, a corto y mediano plazo, que pueda afectar a los habitantes de dicha zona.

Con respecto al aspecto teórico se justifica, ya que la aplicación del método de bioingeniería basado en la relación agua-suelo-plantas e influenciado por el cambio climático, permite conocer el desempeño de la especie vegetal a largo plazo y su efecto en la zona de estudio.

Desde el aspecto práctico, ya que este tipo de innovación bioingenieril de origen natural, busca optimizar la mejor alternativa de solución técnica, usando un tipo de especie vegetal natural, desde el punto de vista de la ingeniería civil.

De acuerdo al aspecto ambiental, se justifica, ya que la solución innovadora de la bioingeniería con la aplicación de la especie vegetal *Gynerium sagittatum* (Aublet) P. permite mitigar el impacto al medio ambiente, ya que se mejora en gran medida la estructura del suelo y se incrementa la materia orgánica necesaria para el óptimo crecimiento del cultivo, así como también, la disminución de los gases de efecto invernadero.

La limitación en cuanto a la aplicación de la bioingeniería considerando los eventos de cambios climáticos en dicha zona es que no existen muchas experiencias exitosas en el Perú y a nivel local, en cuanto a su aplicación y bondades de su práctica en ríos, por lo que esta tesis de investigación doctoral buscará brindar un aporte muy significativo respecto a su uso.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

A nivel internacional

Maffra y Sutili (2020) en su investigación “The use of soil bioengineering to overcome erosion problems in a pipeline river crossing in South America”, desarrollada en Brasil, con un diseño experimental y con una metodología del tipo aplicada. Así mismo, se tuvo por objetivo analizar un caso de una tubería expuesta en la que se utilizaron algunos enfoques de bioingeniería del suelo para prevenir los procesos de erosión natural en los cruces de ríos de tuberías. Los resultados alcanzados por los investigadores señalan que los métodos de bioingeniería del suelo, que utilizan vegetación en combinación con materiales inertes para la estabilización del terreno y la seguridad contra el desgaste del suelo, son una alternativa complementaria o incluso un sustituto de la práctica tradicional de la ingeniería civil. Concluyen en que actualmente, la aplicación en la prevención, mantenimiento o remediación de cruces de ríos, se aplican generalmente técnicas tradicionales de ingeniería, lo que muchas veces conduce a soluciones insuficientes, por lo que, en comparación con los métodos convencionales, las técnicas de bioingeniería del suelo utilizadas en este estudio de caso presentado, han demostrado ser ventajosas en los aspectos económico, ambiental y estético.

Zhang et al. (2020) en su artículo de investigación “Quantitative evaluation of soil anti-erodibility in riverbank slope remediated with nature-based soil bioengineering in Liaohe River, Northeast China”, aplicado en China, cuyo diseño de investigación fue del tipo experimental, mientras que la metodología fue aplicada. El objetivo de la citada investigación fue evaluar tres tipos de técnicas de bioingeniería de suelos basadas en la naturaleza en el área protegida del río Liaohe, considerando la antierosibilidad y estabilidad del suelo de pendiente. Los resultados de esta investigación, indican que a partir del análisis de las propiedades físicomecánicas del suelo, además del potencial de erosión del suelo y de la estabilidad del suelo, se pudo establecer que las medidas de bioingeniería basadas en la naturaleza aumentaron la estabilidad de las riberas pues mejoraron significativamente la antierosión del suelo y la resistencia al corte, por lo expuesto, concluyen que dentro de las diversas técnicas de mejoramiento con aplicación de bioingeniería, la que mejor adecuación tuvo fue la de estacas vivas, pues se pudo aumentar la estabilidad, el ángulo de fricción interno del suelo y la capacidad de resistencia a la tracción de las raíces a largo plazo.

Vallarino et al. (2021) en su investigación “Bioingeniería de taludes: Evaluación del uso de árboles y arbustos como posible mecanismo para incrementar el factor de seguridad”, desarrollada en Panamá, tuvo un diseño experimental y una metodología aplicada. El objetivo fue evaluar los efectos significativos que se obtienen en los taludes a partir de la incorporación de plantas y árboles como parte de una técnica eficaz de bioingeniería para zonas tropicales. Los hallazgos de la citada investigación indican un aumento de las características geomecánicas con la aplicación de la bioingeniería en un talud de hasta 5 metros, destacando la cohesión en un incremento de hasta 12%; mientras que el factor de seguridad cuando se coloca la vegetación, sube a 0.25%. Por lo expuesto, los autores concluyen en que, a partir de los resultados obtenidos, se puede aplicar este procedimiento de estabilización de talud, ya que, de las simulaciones realizadas, se puede incorporar las características propias de la planta, que incluye, la profundidad radicular, la cohesión relativa del suelo-planta, el crecimiento de la planta y la resistencia a la tracción, tanto de la raíz como del tallo, lo que permite mejorar notablemente la estabilidad al deslizamiento del talud.

Von-der-Thannen et al. (2021) en su artículo científico “Case study of a water bioengineering construction site in Austria. Ecological aspects and application of an environmental life cycle assessment model”, que fue desarrollado en Austria, presentó un diseño experimental y una metodología del tipo aplicada. Tuvo por objetivo evaluar un modelo optimizado del ciclo de vida ambiental basado en la bioingeniería en dicho país. Los resultados logrados indican que la alternativa de bioingeniería se comporta ligeramente mejor, en términos de demanda de energía y potencial de calentamiento global, que la medida convencional. Se muestra que el factor más relevante es el impacto de las máquinas en funcionamiento en el sitio de construcción, por lo que concluyen en que un modelo de evaluación ecológica integral para aplicaciones de estructuras de bioingeniería de suelo y agua, debe indicar los posibles efectos negativos causados durante la instalación y además deben integrar la evaluación de los posibles efectos positivos debido al desarrollo de plantas vivas en la etapa de uso de las estructuras hidráulicas y de sostenimiento.

Enríquez-De-salamanca (2022) en su investigación “Vegetation change in road slopes in the Mediterranean Region over 25 years”, desarrollada en España, desarrolló un diseño del tipo experimental y una metodología aplicada. Complementario a ello, se tuvo por objetivo, evaluar el cambio de vegetación en taludes de carreteras con influencia de escorrentía superficial a lo largo de 25 años en una zona Mediterránea de España. Los resultados sostienen que a partir del

estudio de 50 taludes de carreteras entre 5 a 8 años y entre 22 a 25 años después de la revegetación, la cobertura vegetal y la diversidad aumentaron con el tiempo, con diferencias entre los tipos de pendiente, es decir, la cobertura herbácea aumentó mucho entre los trabajos de revegetación y 2002 y fue similar en 2002 y 2019, mientras que la cobertura leñosa disminuyó desde la revegetación hasta 2002 pero aumentó mucho entre 2002 y 2019, por lo que concluyen en que se logró frenar la erosión al menos lo suficiente como para permitir el establecimiento temprano de plantas y, por lo tanto, el comienzo de la colonización, en tanto la similitud entre la vegetación circundante y los taludes fue mayor en los cortes de caminos y los que se encontraron expuesto al agua directamente.

Parsakhoo & Hosseini (2023) en su investigación titulada “Effect of bioengineering treatments on reduction of soil erosion from road cut slope and fill slope”, desarrollada en Irán, presentó un diseño experimental y una metodología aplicada. El objetivo fue evaluar el efecto que produce los tratamientos de bioingeniería, usando seis tipos cultivos naturales, en la disminución de la erosión del suelo en taludes de corte y relleno de carreteras. Los resultados mostraron que la escorrentía superficial y la erosión del suelo estaban estrechamente relacionadas con la estación, las pendientes de los costados de la carretera y el tipo de tratamiento de conservación. Además, la pérdida de suelo presentó variaciones significativas a lo largo de los meses debido a la distribución desigual de las precipitaciones y la erosividad de las mismas. Finalmente concluyen, en que el tipo de bioingeniería denominado como geo-cell (GC), es la que muestra un mejor desempeño, en comparación al suelo natural y a las demás muestras, pues se ve una mejora significativa en la tasa de reducción de pérdida de suelo de 53% a 86 %. Este efecto puede deberse al efecto de confinamiento de la estructura eco-amigable, ya que la GC distribuye las cargas sobre su área más grande, aumentando así la capacidad de carga del suelo y el factor de seguridad.

Tardío y Mickovski (2023) en su artículo de investigación “A novel integrated design methodology for nature-based solutions and soil and water bioengineering interventions: The Tardio&Mickovski methodology (TMM)”, que fue desarrollada en España, tuvo un diseño experimental y una metodología del tipo aplicada. En tanto, su objetivo fue diseñar una metodología TMM integrada aplicando diversos procedimientos y técnicas de bioingeniería, bajo los principios del crecimiento de las plantas, enraizamiento y estabilidad de taludes en diferentes condiciones de funcionamiento. Los resultados de la investigación indican que los diseños basados en los mecanismos de bioingeniería acoplados a la infraestructura existente y

los modelos de refuerzo de raíces de plantas se integran significativamente en el esquema propuesto de la metodología TMM. Asimismo, las conexiones con la etapa de seguimiento y las posibilidades de mejora continua se incorporan como una característica esencial del enfoque de este tipo de intervenciones. Por lo expuesto, con la metodología TMM se puede desarrollar infraestructura verde, tanto a nivel sostenible, como sustentable, ya que puede implementarse fácilmente en una amplia gama de proyectos y obras de restauración de la naturaleza, con un impacto positivo a largo plazo.

Said et al. (2023) en su artículo de investigación “Selección de especies de plantas silvestres como bioingeniería del suelo para la estabilidad de la pendiente del suelo en Kalimantan del Sur, para superar deslizamientos de tierra poco profundos”, desarrollado en Indonesia, implicó un diseño de investigación experimental y una metodología del tipo aplicada. Tuvo por objetivo establecer los efectos de estabilidad y resistencia que producen varias plantas mediante técnicas de bioingeniería en taludes de terreno. Los resultados obtenidos de la citada investigación, muestran que de las cinco tipos de plantas, la especie vegetal Elephant (Gajah) Grass, es la que destaca con los valores más altos de cohesión, ángulo de fricción interno, esfuerzo cortante, resistencia a la tracción y factor de seguridad (FS), en relación al suelo normal sin estabilizar. Sobre todo el incremento significativo se evidenció en el esfuerzo cortante, pues aumentó en 53.89% y el FS subió a 32.24%, Por lo señalado, los autores concluyen en que la especie Elephant Grass, es la que se puede aplicar como parte de la bioingeniería para la estabilidad de taludes, hasta una altura promedio recomendable de 4.50 metros. Por otro lado, tanto el diámetro, como la raíz de esta especie y la profundidad radicular, contribuyen de manera notable en las propiedades geomecánicas del terreno, por lo que se incrementado el FS.

Keybondori et al. (2025) en su artículo de investigación “Soil-bioengineering to stabilize gravel roadside slopes in the steep Hyrcanian Forests of Northern”, desarrollada en Irán, tuvo un diseño experimental y la metodología fue del tipo aplicada. El objetivo fue evaluar el desempeño de las raíces en la estabilización de capas de suelo superficiales, midiendo las propiedades biomecánicas de 13 raíces y su patrón de distribución en el suelo, correspondiente a los taludes de corte y relleno. Los resultados encontrados muestran que las especies vegetales *Athyrium filix-femina* y *Pteris cretica* son las más efectivas para la estabilización de taludes en sección de corte, proporcionando valores de refuerzo de raíces de 4.54 KPa y 4.51 KPa, respectivamente, con lo que se logra reducir la inestabilidad de la pendiente hasta en un 18%. También se pudo notar que los sistemas de raíces de estas especies se concentraron

principalmente en 0.10 metros a 0.20 metros superiores del suelo, proporcionando refuerzo del suelo y control de la erosión a largo plazo. Por lo señalado anteriormente, los citados autores concluyen en que, como alternativa sostenible a los métodos de ingeniería tradicionales, la bioingeniería del suelo ofrece una solución práctica para reducir los riesgos de deslizamientos de tierra y, al mismo tiempo, mejorar el comportamiento geomecánico de los taludes.

Uzielli et al. (2025) en su investigación “Comparative geotechnical analysis of slope stabilization through conventional, soil and water bioengineering, and combined solutions”, desarrollada en Italia, presentó un diseño experimental y metodología aplicada. Además, tuvo por objetivo analizar el comportamiento geotécnico mediante la estabilización de taludes aplicando técnicas de bioingeniería y con soluciones combinadas. Los resultados indican que una solución combinada ofrece la mejor opción en la zona de estudio, ya que garantiza una estabilidad suficiente a corto plazo, así como también, permite su incremento a lo largo del tiempo, debido a la mejora en la contribución mecánica de los componentes de la bioingeniería, que contempla una distribución adecuada de las tablaestacas, plantas enraizadas, estabilidad de ladera y factor de seguridad en condiciones de equilibrio límite. Finalmente, los autores concluyen en mostrar un aporte significativo mediante contribuciones innovadoras relacionadas al modelado geomecánico, usando para tal fin los métodos de solución mediante la bioingeniería.

A nivel nacional

Carrasco et al. (2023) en su artículo de investigación “¿Cómo la bioingeniería influye en la estabilización de laderas y en la mitigación de la erosión hídrica?”, tuvo un diseño descriptivo-documental y una metodología del tipo aplicada. Así mismo, el objetivo fue elaborar una revisión general de la aplicación de la bioingeniería en proyectos de ingeniería en el ámbito peruano y a la vez hacer una comparación con otros casos en Sudamérica. Los resultados muestran que existen 6 proyectos a nivel nacional, en los cuales se han aplicado técnicas de bioingeniería, sin embargo, Colombia lidera con más aplicaciones de este tipo en obras civiles. En tanto, se destacan el uso de técnicas de bioingeniería mediante muros krainer, hidrosiembra, revegetalización, pasto Vetiever, geomantos, redes orgánicas y terrazas escalonadas, los cuales han resaltado por mejorar las condiciones geotécnicas tanto a nivel de estabilidad de taludes como en la disminución importante de la erosión, sobre todo en relación al FS, ya que aumenta significativamente por la variación significativa del esfuerzo cortante y el ángulo de fricción interno del suelo. Por lo expuesto, los autores concluyen en que el uso extensivo del tipo de

vegetación pasto Vetiever, incrementa en gran medida las propiedades mecánicas del terreno de los taludes y por ende minimiza la erosión del suelo por efectos de la precipitación.

A nivel local

En el ámbito local no se han reportado tesis de posgrado y/o investigaciones que se relacionen al efecto de la bioingeniería en eventos de cambios climáticos en ríos o en cuencas hidrográficas, por lo que el presente proyecto de tesis doctoral, será un gran aporte tanto a nivel técnico y científico.

2.2. Marco conceptual

2.2.1. Bioingeniería

La ingeniería biológica, tiene su origen en las palabras de origen alemán “Ingenieur-Biologie”, que equivale en su traducción a la palabra compuesta “bioingeniería” y en otros casos denominada como “ingeniería del paisaje”. El término asociado a la aplicación de ingeniería toma en cuenta los aspectos técnicos, científicos y tecnológicos con la finalidad de lograr una óptima estabilización del terreno natural para el control y mitigación del proceso erosivo y degradación (Palmett-Plata, 2019); por otro lado, el concepto relacionado al aspecto biológico analiza el comportamiento de los seres vivos principalmente las plantas y como estas influyen en la estabilización. También se considera conveniente que los elementos que formen parte de la bioingeniería sean los provenientes de especies propias de la zona de estudio, para que de esta manera sea muy factible su aplicación, incluyendo la incorporación de estacas vivas de especies arbóreas de tallo grueso, que a la vez faciliten el proceso de instalación, colocación y mantenimiento (González, 2019).

Por otro lado, la meta de la aplicación de la bioingeniería se asocia principalmente a tres criterios, comenzando con el criterio técnico, que involucra los procedimientos ingenieriles adecuados, luego el criterio ecológico, relacionado al uso conveniente de las plantas y elementos leñosos para mejorar la estabilización del terreno natural, y por último el criterio socioeconómico, asociado principalmente a minimizar los costos de construcción en beneficio de la población (Pepe et al., 2020); así mismo, lo descrito anteriormente se complementa con la ingeniería de procesos, que ayude a optimizar los procesos constructivos mediante un adecuado funcionamiento de los elementos estructurales de origen natural, con un énfasis en la aplicación de estabilidad de taludes y defensas de márgenes de ríos (Maxwald et al., 2020).

En ese contexto, la “ingeniería del paisaje” está demostrando un gran papel alentador en el desarrollo de metodología amigables con el medio natural, con un mayor énfasis en soluciones ecoamigables para el tratamiento de la erosión, pues dichos efectos se pueden notar en varias cuencas hidrográficas de todo el mundo, inclusive en las riberas aledañas a zonas urbanas (Miele et al., 2021); por otro lado, la aplicación de materiales naturales como las plantas, arbustos, troncos y tablaestacas hacen que estas construcciones como parte de la bioingeniería sean intervenciones del tipo dinámica (Martin et al., 2021); pues su crecimiento, extensión y distribución a lo largo de un río o como parte de un terraplén de una ribera, inclusive en otros ambientes húmedo, producen a lo largo del tiempo un fortalecimiento y la estabilidad necesaria de toda la estructura compuesta, por ende, genera un aumento en el desempeño estructural de un talud o en el mismo suelo (Francini et al., 2021); además, estos tipos de intervenciones puede involucrar la recuperación de las diferentes obras civiles como carreteras, oleoductos y vías férreas, pues en general, se utiliza en cualquier ambiente que sea necesario para recuperar o regenerar las condiciones normales del terreno sin provocar alteraciones significativas en el ecosistema (Mira et al., 2022).

Según afirma Palmett-Plata (2019), los procedimientos de bioingeniería se pueden organizar en tres grupos bien definidos, comenzando con los procesos de recubrimiento, luego la etapa de estabilización y finalmente las técnicas compuestas o llamadas también como mixtas. Tal como lo describe en su investigación el citado autor Palmett-Plata (2019) manifiesta que todo tipo de intervención bioingenieril va acompañado de materiales de origen natural que se acondicionan a la flora de un ecosistema, como es el caso de la ribera de los ríos de cuencas hidrográficas, inclusive hasta en zonas urbanas se han tenido buenas prácticas de conservación de terrenos y fertilización. En ese sentido, Rauch et al. (2022) indican que, dentro de estas etapas de bioingeniería, destaca las técnicas de revestimiento, las cuales están enfocadas en el sostenimiento, estabilización y mejoramiento del terreno natural sin alterara su composición natural, como es el caso de la hidrosiembra, mallas geotextiles y plantaciones con mantos similares a recubrimientos tipo alfombra, que muchas veces están sostenidos por estacas, rocas y troncos.

En el caso del revestimiento, éste se utiliza en suelos con pendientes moderadas, riberas o márgenes de ríos y con una finalidad preventiva y de acabado, es decir la vegetación utilizada va desde las ramas de matorrón, guayaba, sauce, limoncillo y chopo para armar las esteras de ramas (Preti et al., 2022); para la hidrosiembra y sobre el manto geotextil se puede sembrar

maní forrajero, tradescantia zebrina, tradescantia purpurea, que además de brindar un buen aspecto a la superficie, brindan agarre y estabilidad debido a sus extensas y profundas raíces, además las mallas orgánicas tienen una estructura plana, están fabricadas con materiales naturales, son biodegradables, sirven para soportar el talud hasta que la vegetación haya echado raíces (Palmett-Plata, 2019).

2.2.2. Cambio climático

El cambio climático puede considerarse hoy en día como un factor decisivo en el desarrollo de la vida actual de los seres humanos, pues el tema ha generado preocupación en todo el mundo, alentando a líderes y expertos globales a profundizar en discusiones y estudios y proponer soluciones, que conduzcan a acuerdos y esfuerzos internacionales, en tal sentido se requieren acciones de mitigación, adaptación y transformación, especialmente en ciudades con mayor densidad poblacional, donde se espera una mayor demanda de recursos en los próximos años, y en zonas costeras, que son más susceptibles a los impactos ambientales causados por el cambio climático (Rodrigues et al., 2023).

III. METODOLOGÍA

3.1. Método

El método es cuantitativo, según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018).

3.2. Diseño de investigación

El diseño es experimental, correspondiéndole cuasi experimental, según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018).

3.3. Población

La población corresponde al río Chancay - Lambayeque, en el tramo comprendido en las inmediaciones del puente Saltur.

3.4. Muestra

La muestra corresponde a 100 metros aguas arriba y 100 metros aguas abajo del puente Saltur. La muestra fue considerada no probabilística y por conveniencia, tal y como afirma Hernández (2021), ya que este tipo de selección, permite al investigador elegir de forma arbitraria y de manera conveniente, la cantidad de muestras a emplear en un estudio.

3.5. Variables de estudio

Variable independiente: Cambios climáticos en el río Chancay - Lambayeque.

Variable dependiente: Bioingeniería.

3.5.1. Definición conceptual

Variable independiente: Se refiere a aquellas variaciones que pueden darse en todo el mundo y en un futuro no tan lejano, que principalmente se ven influenciados por el aumento significativo de la temperatura y la alteración progresiva de los patrones climáticos de los vientos, precipitaciones, evaporación y humedad (Rodrigues et al., 2023).

Variable dependiente: La ingeniería biológica, proviene del alemán “Ingenieur-Biologie”, también llamada bioingeniería o ingeniería del paisaje, es decir en primer lugar el término ingeniería se refiere al uso de aquella información técnica y que complementada con la investigación de carácter científico-tecnológico permite optimizar los procesos de estabilización constructiva para el control, manejo y remediación de la erosión, y en segundo lugar el concepto biológico se refiere al desempeño y función de aquellos organismos vivos,

principalmente las plantas, tales como hierbas, juncos, hierbas, arbustos, árboles (Palmett-Plata, 2019).

3.5.2. Definición operacional

Variable independiente: Los cambios climáticos son las alteraciones del comportamiento hidrológico e hidráulico del río Chancay - Lambayeque causadas por el incremento de las precipitaciones y temperatura en la cuenca del mismo río, cuyos patrones se han visto influenciados por eventos extremos producto del Fenómeno El Niño.

Variable dependiente: La bioingeniería es una disciplina de la ingeniería general que usa los principios y conceptos basados en la física y matemática con la finalidad de dar solución a los diversos problemas asociados a la vida cotidiana, que para la presente tesis doctoral busca su aplicación en el río Chancay - Lambayeque.

3.5.3. Indicadores

Indicadores de la variable independiente

Precipitación y caudal.

Indicadores de la variable dependiente

Tipo de planta, profundidad radicular, raíz, altura de planta y diámetro de planta.

3.6. Técnica e instrumento de recolección de datos

Las técnicas de recolección de datos que se usaron fueron la observación y el análisis documental, ya que fue necesario evaluar in situ la zona de estudio y conocer a la vez el estado situacional en el que se encontraba

El análisis documental sirvió para analizar la disponibilidad bibliográfica de tesis y artículos científicos indexados en base de datos como SCOPUS, Science Direct, Web of Science y Latindex 2.0. En cuanto a las normativas aplicadas fue necesario revisar los manuales y especificaciones técnicas recomendadas y estandarizas en el Perú. Así mismo, se emplearon guías de observación para complementar la recolección de datos de laboratorio y de campo.

La información se obtuvo a partir de un recorrido en la zona de estudio, luego se emplearon equipos e instrumentos topográficos, los que permitieron llevar a cabo el levantamiento

topográfico de tramo de estudio. Los datos obtenidos se recopilaron en una libreta de campo y se complementó con un panel fotográfico del trabajo de campo.

El resto de procedimientos y actividades se complementaron con trabajos de gabinete que implicaron el procesamiento de datos, tabulaciones y ordenamiento de la información para los posteriores cálculos respectivos.

3.7. Técnicas de análisis de resultados

La información se procesó mediante el uso de los softwares Microsoft Excel, Microsoft Word, AutoCAD, AutoCAD Civil 3D, BloquesSWMM, Hidroesta 2, HEC-HMS, HEC-GeoRAS y ArcMap y las actividades de la presente tesis se desarrollaron en función a los objetivos específicos, tal y como se detallan a continuación.

En primer lugar, se evaluó el caudal máximo considerando las precipitaciones en eventos climáticos en el río Chancay-Lambayeque, usando para tal fin, la metodología del Global Flood Awareness System (GloFAS) del Copernicus Emergency Management Service (CEMS). Esta herramienta, combina la información obtenida de satélites, modelos y mediciones in situ, que proporcionan datos precisos sobre inundaciones en curso y también muestra proyecciones futuras relacionadas al cambio climático.

La forma de generación de pronósticos de GloFAS, es por medio del modelo de European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), ya que este conjunto de datos es el más reciente en la predicción meteorológica numérica en relación a los eventos de cambio climático del mundo, y a la vez emplea el modelo hidrológico tipo precipitación-escorrentía conocido como LISFLOOD para la generación de caudales a corto y largo plazo. Es por ello que, los resultados obtenidos predicen la distribución de caudales tanto a nivel estacional, como diario, para los umbrales de inundación de 1.50, 2, 5 y 20 años. En tanto, para relacionar adecuadamente los valores obtenidos en este apartado, se usó el software HEC-HMS para simular el comportamiento hidrológico de la cuenca Chancay-Lambayeque hasta el punto de la zona de estudio correspondiente al sector del puente Saltur, mediante las respectivas métricas estadísticas, recomendadas para modelos hidrológicos y generación de caudales.

Posteriormente se evaluaron los parámetros hidráulicos del río Chancay-Lambayeque, para conocer el desarrollo de la bioingeniería, considerando en este caso la especie vegetal

Gynerium sagittatum (Aublet) P., siendo necesario en esta etapa, el uso del software HEC-GeoRAS, para un caudal de diseño de período de retorno de 140 años, que permitió determinar los niveles alcanzados por el agua, así como la distribución de velocidades, área hidráulica, perímetro mojado y tipo de flujo, en el tramo evaluado. Por otro lado, con dichos hallazgos, también se pudo establecer en la zona de estudio, la altura mínima requerida para colocar y distribuir adecuadamente las plantas como parte del proceso de bioingeniería en la zona de estudio.

Luego, se evaluó el crecimiento de la especie vegetal *Gynerium sagittatum* (Aublet) P., usando un modelo matemático para predecir su desarrollo, mediante una ecuación del tipo logística, recomendada para aplicaciones en diferentes tipos de cultivos, cuyos parámetros relacionan la materia seca diaria, el período de crecimiento de la planta y dos constantes que están en función del crecimiento propio de la planta, bajo los efectos del cambio climático, lo que conllevó finalmente a la estabilización del talud en las inmediaciones del río Chancay, mostrando la influencia del enraizamiento de la planta, en relación a la cohesión y el ángulo de fricción interno del suelo.

Con respecto a la discusión de resultados se contrastó la información con fuentes de datos de tesis doctorales y artículos científicos de bases indexadas de alto impacto, que ayudaron a validar los hallazgos obtenidos en la presente tesis.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

Los resultados mostrados en este apartado, estuvieron relacionados a los objetivos específicos y la discusión de los hallazgos en relación a las referencias bibliográficas relevantes y actualizadas.

Resultados de acuerdo al primero objetivo específico

En relación al primer objetivo específico se evaluó el caudal máximo tomando en cuenta las precipitaciones en eventos climáticos en el río Chancay-Lambayeque, por lo que, inicialmente se determinaron las estaciones disponibles en la cuenca en mención (Figura 1), las cuales mediante una exploración preliminar en la fuente de datos gratuita del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y de la Autoridad Nacional de Agua (ANA), se cuantificaron 12 estaciones climáticas y 1 hidrométrica, tal como se muestran en la Tabla 1.

Figura 1

Ubicación de estaciones climáticas e hidrométrica de la cuenca Chancay-Lambayeque

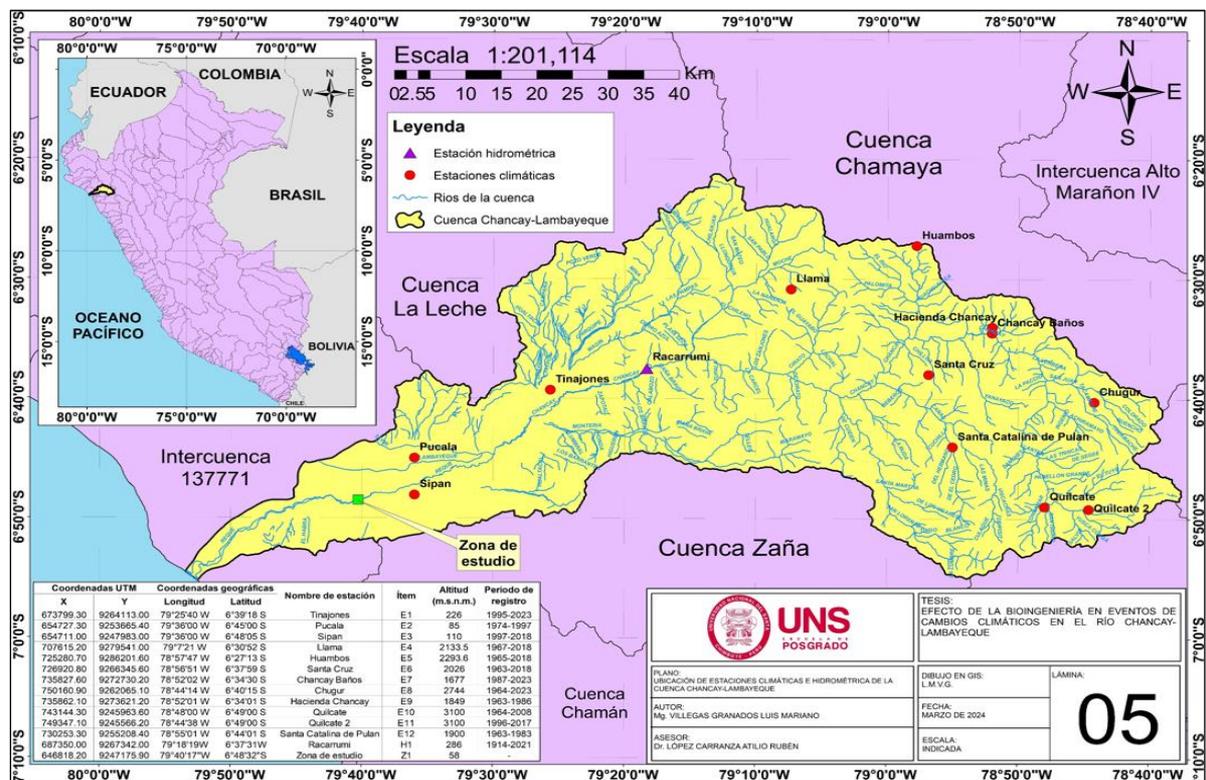


Tabla 1*Estaciones climáticas e hidrométrica de la cuenca Chancay-Lambayeque*

Ítem	Longitud	Latitud	Nombre de estación	Altitud (m.s.n.m.)	Periodo de registro
E1	79°25'40 W	6°39'18 S	Tinajones	226	1995-2023
E2	79°36'00 W	6°45'00 S	Pucala	85	1974-1997
E3	79°36'00 W	6°48'05 S	Sipan	110	1997-2018
E4	79°7'21 W	6°30'52 S	Llama	2133.5	1967-2018
E5	78°57'47 W	6°27'13 S	Huambos	2293.6	1965-2018
E6	78°56'51 W	6°37'59 S	Santa Cruz	2026	1963-2018
E7	78°52'02 W	6°34'30 S	Chancay Baños	1677	1987-2023
E8	78°44'14 W	6°40'15 S	Chugur	2744	1964-2023
E9	78°52'01 W	6°34'01 S	Hacienda Chancay	1849	1963-1986
E10	78°48'00 W	6°49'00 S	Quilcate	3100	1964-2008
E11	78°44'38 W	6°49'00 S	Quilcate 2	3100	1996-2017
E12	78°55'01 W	6°44'01 S	Santa Catalina de Pulan	1900	1963-1983
H1	79°18'19W	6°37'31W	Racarrumi	286	1914-2021

Cabe indicar que se consideraron sólo las estaciones climáticas con un período de registro mínimo de 15 años, según lo recomendado por el SENAMHI y las investigaciones de Arriola et al. (2022) y Arriola et al. (2023), para estudios en las regiones hidrológicas del Pacífico peruano, por lo cual se empleó este criterio como protocolo en el recojo y selección de la información. Después de recolectar la información climática (precipitaciones) e hidrométrica, se procedió a buscar la estación Racarrumi en el portal GloFAS (Figura 2) para establecer los caudales, bajo los efectos del cambio climático mediante simulación hidrológica LISFLOOD (Figura 3).

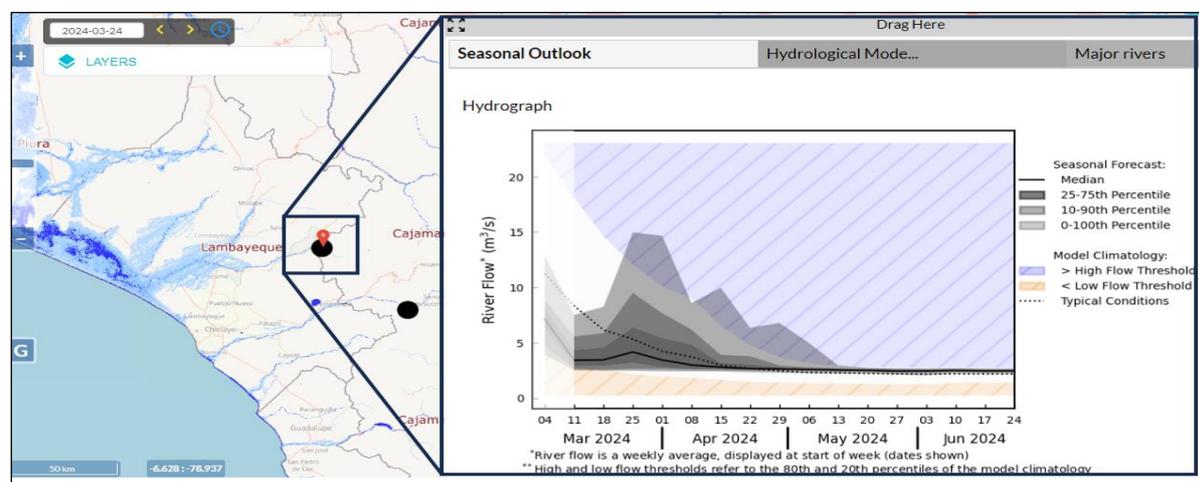
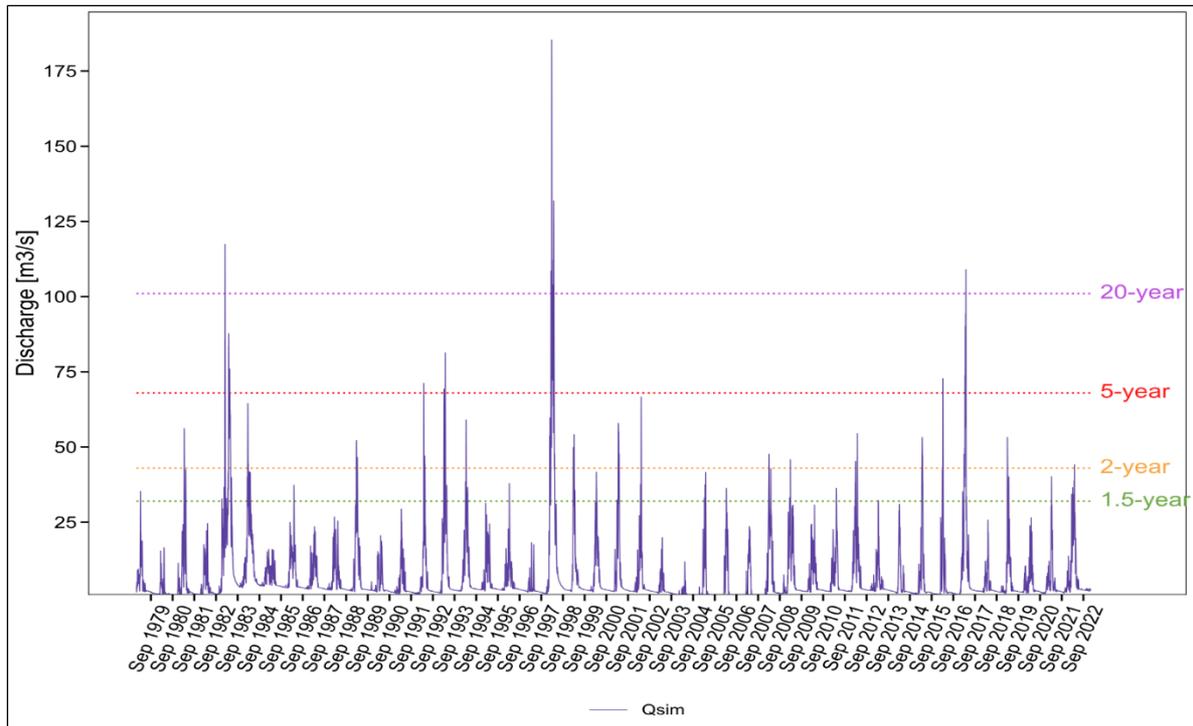
Figura 2*Vista general de la extracción de datos del portal electrónico GloFAS*

Figura 3

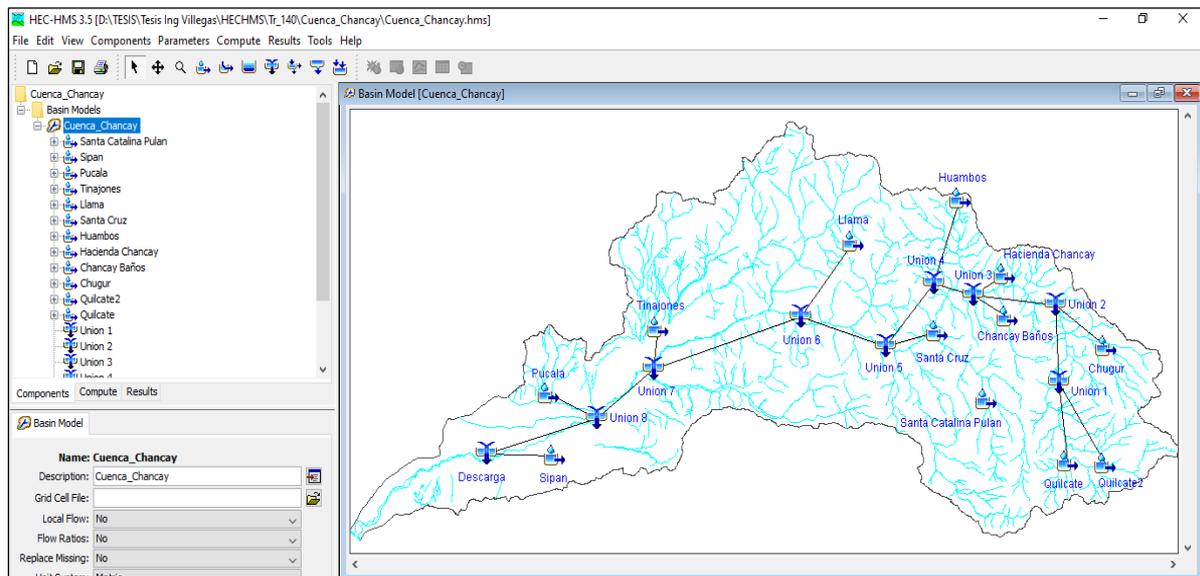
Caudales máximos obtenidos mediante simulación en LISFLOOD de GloFAS



Luego, para relacionar adecuadamente los valores obtenidos de los caudales máximos LISFLOOD de GloFAS, se elaboró un modelo hidrológico en HEC-HMS de la cuenca Chancay-Lambayeque, hasta el punto de la zona de estudio correspondiente al sector del puente Saltur, tal como se muestra en la Figura 4.

Figura 4

Modelo hidrológico de la cuenca Chancay-Lambayeque con HEC-HMS



Posteriormente se graficaron los caudales obtenidos con LISFLOOD y con HEC-HMS para una validación cruzada de cada modelo hidrológico (Figura 5), cuyas métricas estadísticas que se emplearon (Tabla 2), son las más usadas en el campo de la hidrología e hidráulica, tal y como lo describen los aportes científicos de Onyutha (2022), Caicedo et al. (2024) y Lujano et al. (2025). Por lo indicado, al aplicar dichas métricas mostraron rangos aceptables, tal como se muestra en la Tabla 2.

Figura 5

Comparación gráfica de los modelos hidrológicos LISFLOOD y HEC-HMS

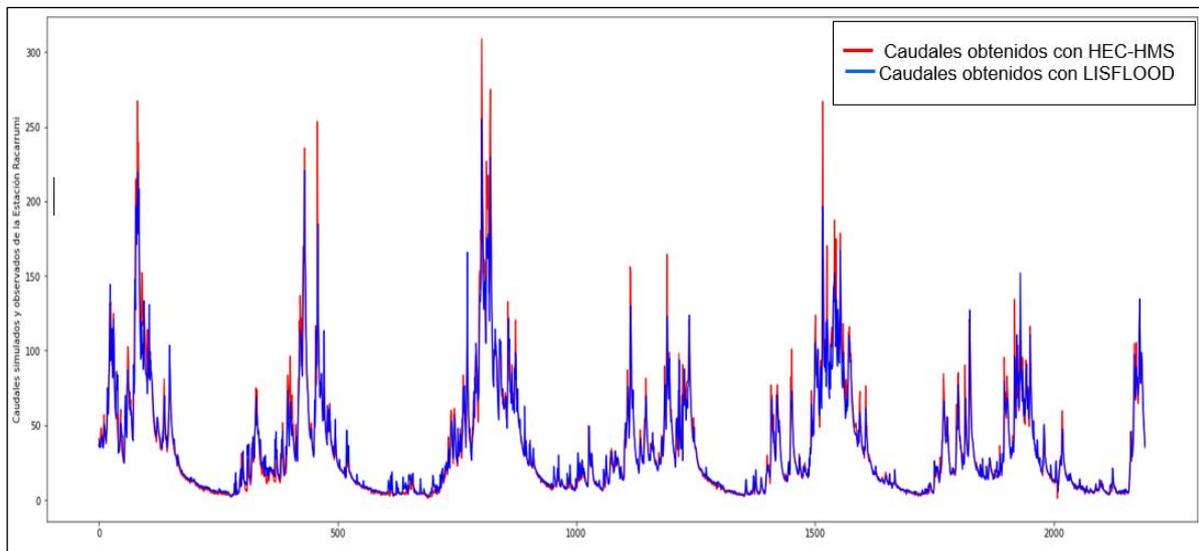


Tabla 2

Métricas estadísticas de comparación de los modelos hidrológicos

Indicador estadístico	Parámetro	Valor	Valor óptimo
Coefficiente de correlación	r	0.980	1
Criterio de Schultz	D	0.523	0
Criterio de Nash-Sutcliffe	E	0.951	1
Error de balance de masas	m	0.006	0
Eficiencia Kling-Gupta	KGE	0.865	1
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales	p	0.994	1

Como consecuencia de este análisis se pudo establecer un caudal máximo de 798.53 m³/s para el período de retorno de 140 años, que corresponde para un riesgo de falla admisible de 25% y vida útil de 40 años.

Resultados de acuerdo al segundo objetivo específico

En lo que corresponde al segundo objetivo específico se evaluaron los parámetros hidráulicos del río Chancay-Lambayeque para el desarrollo de la bioingeniería considerando la especie vegetal *Gynerium sagittatum* (Aublet) P., partiendo de la obtención previa del caudal máximo, siendo este aspecto relacionado con el modelo climático ECMWF, a través del portal GloFAS y usando el modelo hidrológico LISFLOOD para un período de retorno de 140 años. Así mismo, fue necesario el uso del software HEC-GeoRAS (Figura 6), para establecer los parámetros hidráulicos de la sección transversal del tramo en estudio (Figura 7), cuyos valores finales se muestran en la Tabla 3.

Figura 6

Vista de los resultados de HEC-GeoRas para el tramo de estudio

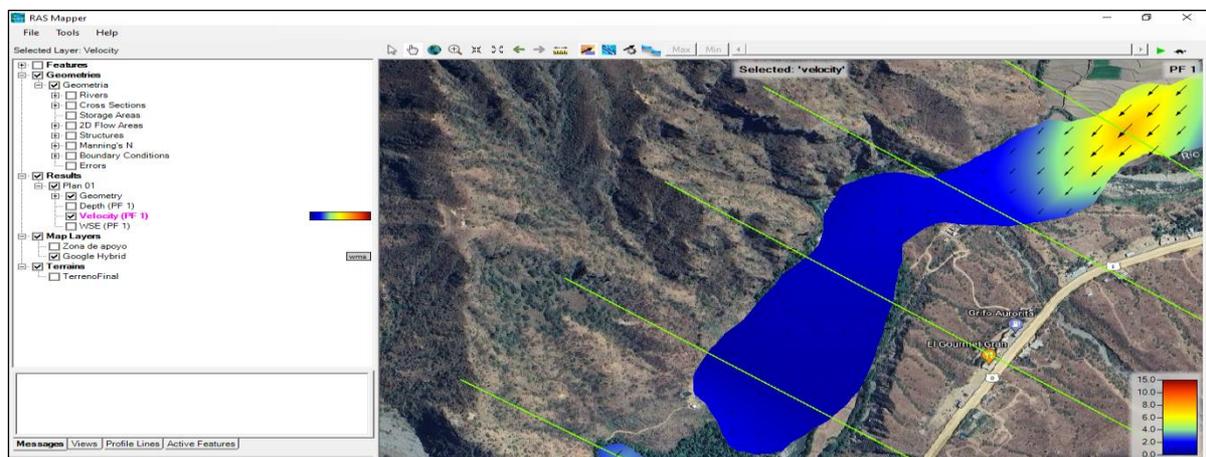


Figura 7

Vista de la sección transversal típica en HEC-GeoRAS del tramo de estudio

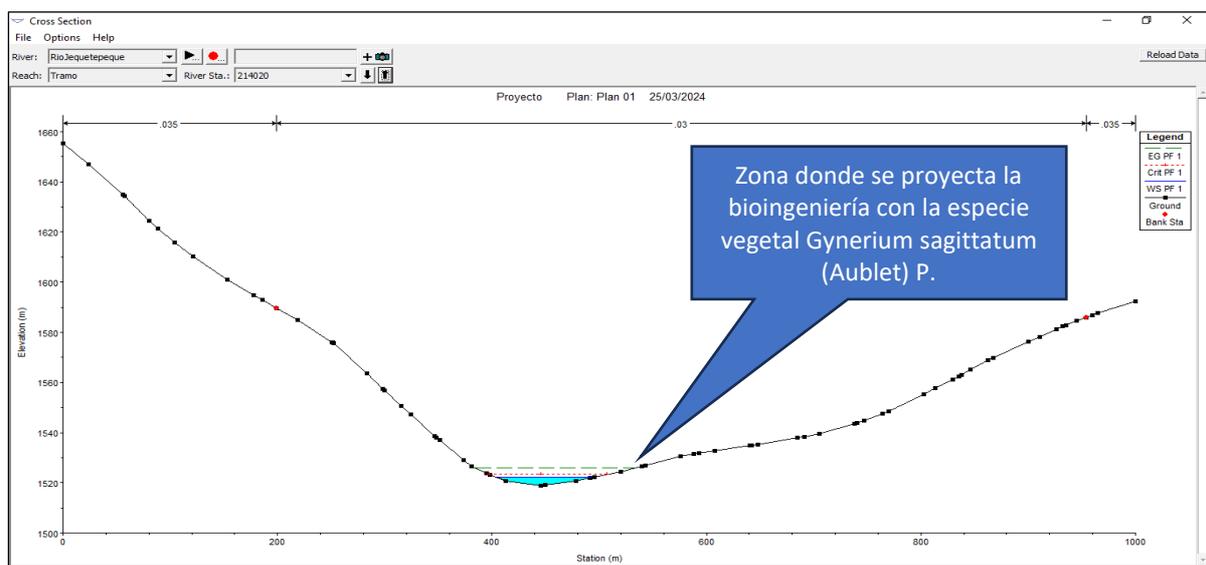


Tabla 3*Parámetros hidráulicos obtenidos para el tramo de estudio*

Parámetros hidráulicos	Unidad	Valor
Caudal	m ³ /s	798.53
Coefficiente de rugosidad	Adimensional	0.05
Tirante normal	m	1.85
Área hidráulica	m ²	253.69
Perímetro mojado	m	174.15
Radio hidráulico	m	1.46
Espejo de agua	m	174.05
Velocidad	m/s	3.15
Número de Froude	Adimensional	0.83

Con estos resultados se puede inferir que la planta *Gynerium sagittatum* (Aublet) P. debe ubicarse al menos a 1.85 metros, desde el fonde del río, con el fin de lograr un buen desarrollo de esta especie vegetal.

Resultados de acuerdo al tercer objetivo específico

Con los hallazgos obtenidos anteriormente, se procedió a desarrollar el tercer objetivo específico, que implicó evaluar el crecimiento de la especie vegetal *Gynerium sagittatum* (Aublet) P. y estabilización del talud del río Chancay-Lambayeque. Para entender adecuadamente el desarrollo de esta planta bajo condiciones naturales, se desarrolló un modelo matemático mediante una ecuación del tipo logística, para predecir el crecimiento y rendimiento de la especie vegetal *Gynerium sagittatum* (Aublet) P. bajo condiciones naturales (Figura 8), ya que dicho cultivo se colocó en el talud de la sección del río con el fin de lograr la adecuada estabilización del terreno.

Cabe agregar que el rendimiento de follaje obtenido en cada planta fue variable, con rango de 0.032 Kg. a 5.25 Kg. para los diámetros basales de 0.85 cm. hasta 27.65 cm. En tanto, los rendimientos en condiciones secas estuvieron entre valores de 0.022 Kg. a 4.23 Kg, tal como se puede apreciar las características de crecimiento en la Figura 9.

El modelo matemático para determinar el crecimiento de la planta, se desarrolló en base a las ecuaciones propuestas inicialmente por Cao et al. (2019) y Mancilla-Morales et al. (2019), de las cuales se estableció que la Ecuación (1), es la que presenta mejor ajuste, siendo en este caso una expresión matemática del tipo logística.

$$Altura = \frac{DMP_i * d}{d + (d + DMP_i) * e^{(-m*t)}} \quad (1)$$

Donde, DMPi es la materia seca diaria del cultivo, t es el período de crecimiento de la planta, d y m son coeficientes de ajuste para el crecimiento de la planta. Cabe agregar que la Ecuación (1), permite determinar la altura del cultivo en centímetros.

Figura 8
Crecimiento de la especie vegetal Gynierium sagittatum (Aublet) P.



Figura 9
Rendimiento de follaje y seco de la especie vegetal Gynierium sagittatum (Aublet) P.



Así mismo, se obtuvieron para la especie vegetal *Gynerium sagittatum* (Aublet) P. los coeficientes “d” y “m” de 4.50 y 0.02, respectivamente. Por otro lado, en la Tabla 4, se muestran los resultados de los parámetros usados para determinar la altura del crecimiento del cultivo, mientras que en la Figura 10, se muestran las correlaciones de dichas alturas.

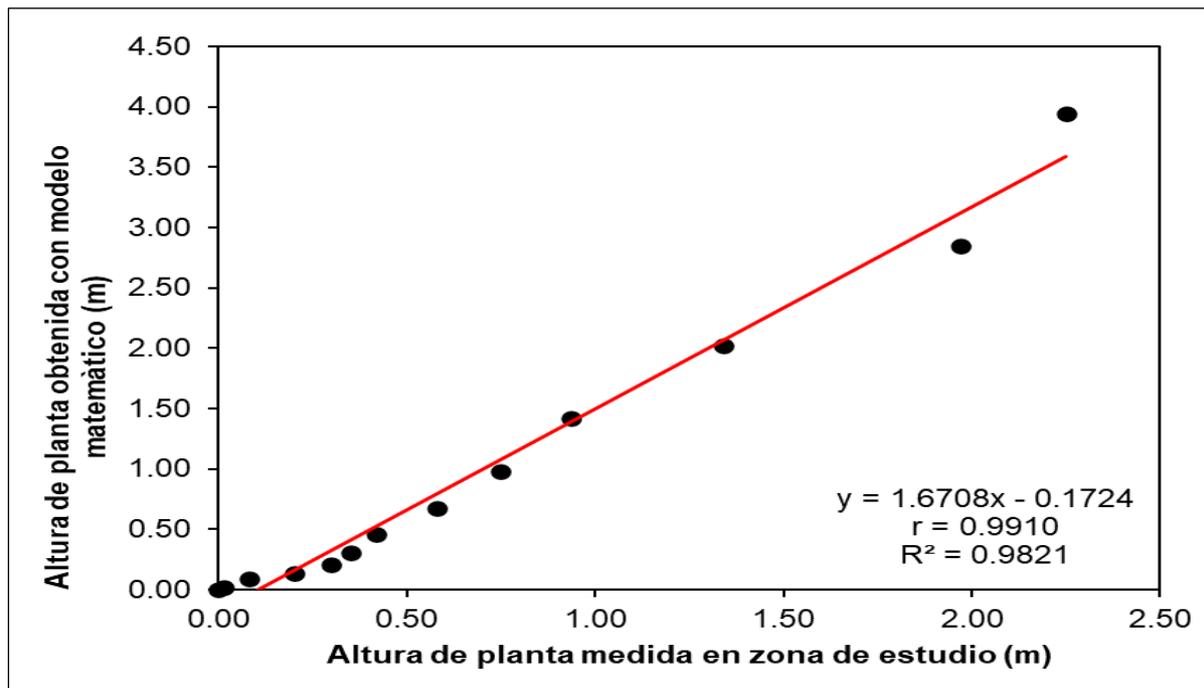
Tabla 4

Parámetros para determinar la altura del crecimiento del cultivo

Días (t)	Meses	DMPi (gr/m ²)	Coefficiente d	Coefficiente m	Altura calculada (cm)	Altura calculada (m)	Altura medida (m)
0	0.00	0	4.50	0.02	0.00	0.00	0.00
20	0.67	5	4.50	0.02	2.07	0.02	0.02
40	1.33	100	4.50	0.02	8.75	0.09	0.08
60	2.00	250	4.50	0.02	13.86	0.14	0.20
80	2.67	450	4.50	0.02	21.04	0.21	0.30
100	3.33	530	4.50	0.02	31.04	0.31	0.35
120	4.00	700	4.50	0.02	46.05	0.46	0.42
140	4.67	800	4.50	0.02	67.39	0.67	0.58
160	5.33	920	4.50	0.02	98.14	0.98	0.75
180	6.00	1046	4.50	0.02	141.76	1.42	0.94
200	6.67	1172	4.50	0.02	202.47	2.02	1.34
220	7.33	1298	4.50	0.02	285.03	2.85	1.97
240	8.00	1423	4.50	0.02	394.15	3.94	2.25

Figura 10

Correlación de la altura de crecimiento del cultivo



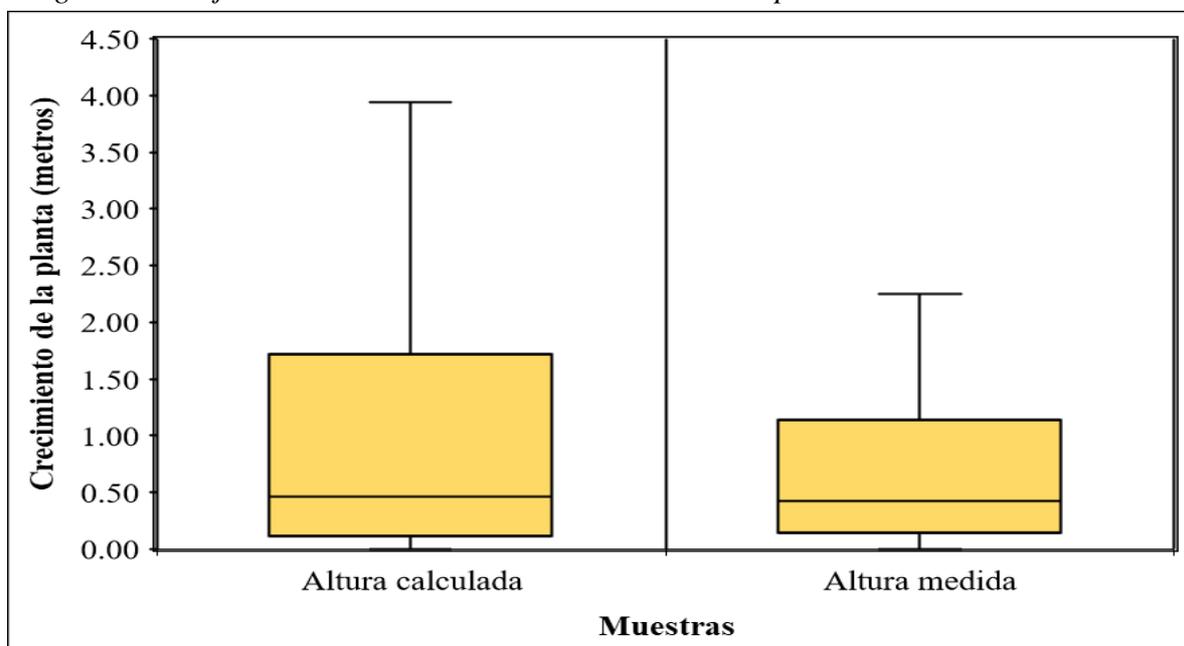
La validación de los resultados que permitieron comparar los valores de las alturas obtenidas con la Ecuación (1), respecto a las mediciones realizadas a la planta en las diferentes edades de crecimiento, fue usando coeficiente de correlación de Pearson (r) y el coeficiente de determinación (R^2), cuyos valores obtenidos fueron 0.99 y 0.98, respectivamente, lo que nos indican dichos valores, una alta correlación entre las alturas de la especie vegetal *Gynerium sagittatum* (Aublet) P.

Así mismo, para estudiar la existencia de diferencias significativas entre la altura calculada y la altura medida, se utilizó un análisis de varianza (ANOVA), cuyos resultados se muestran en la Tabla 5, mientras que en la Figura 11 se detalla los rangos del crecimiento.

Tabla 5
Análisis de varianza para los valores de altura de cultivo

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Valor F	Probabilidad p	Valor crítico para F
Entre grupos	0.593	1.00	0.593	0.574	0.456	4.259
Dentro de los grupos	24.778	24.00	1.032	-	-	-
Total	25.371	25.00	-	-	-	-

Figura 11
Diagrama de cajas de la distribución del crecimiento de la planta



Dichos hallazgos (Tabla 5), indican que no existen diferencias significativas, pues el valor del estadístico “p” fue mayor a 0.05 ($p = 0.456 > 0.05$), en tanto, el estadístico “F” fue menor al

estadístico “F crítico” ($F = 0.456 < F \text{ crítico} = 4.259$), por lo que se infiere que la altura (crecimiento) medida de la planta es estadísticamente igual a la altura calculada con la Ecuación (1).

En lo correspondiente a la estabilización del terreno, se realizó el ensayo de corte directo, para determinar las propiedades mecánicas, básicamente la cohesión y el ángulo de fricción interno del suelo. Esto se realizó particularmente para conocer la influencia del enraizamiento de la planta, respecto al comportamiento mecánico del suelo, tal y como lo sugieren Zhang et al. (2020), Karimzadeh et al. (2022), Lv et al. (2024) y Wang y Wang (2023), para conocer los efectos que puedan producir en las principales propiedades mecánicas. Los resultados de este ítem se muestran en la Tabla 6 y Tabla 7, correspondiente al análisis estadístico de la cohesión y ángulo de fricción interno del suelo, respectivamente, con el fin de conocer si existen diferencias significativas en ambas propiedades mecánicas. Además, en la Figura 12 y en la Figura 13, se describe la variación de la cohesión y el ángulo de fricción interno del suelo.

Tabla 6
Análisis de varianza para los valores de cohesión

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Valor F	Probabilidad p	Valor crítico para F
Entre grupos	0.017	1.00	0.017	8.405	0.019	5.318
Dentro de los grupos	0.016	8.00	0.002	-	-	-
Total	0.033	9.00	-	-	-	-

Tabla 7
Análisis de varianza para los valores del ángulo de fricción interno

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Valor F	Probabilidad p	Valor crítico para F
Entre grupos	105.625	1.00	105.625	36.136	0.0003	5.318
Dentro de los grupos	23.384	8.00	2.923	-	-	-
Total	129.009	9.00	-	-	-	-

Los resultados de la Tabla 6, indica que existen diferencias significativas en la cohesión, pues el valor del estadístico “p” fue menor a 0.05 ($p = 0.019 < 0.05$), en tanto, el estadístico “F” fue mayor al estadístico “F crítico” ($F = 8.405 > F \text{ crítico} = 5.318$), por lo que se infiere que la cohesión del suelo con la planta es estadísticamente mayor que la cohesión del suelo natural.

Por otro lado, los hallazgos de la Tabla 7, detallan la existencia de una diferencia significativa en el ángulo de fricción del suelo (ϕ), ya que se pudo notar que el valor del estadístico “p” fue menor a 0.05 ($p = 0.0003 < 0.05$), en tanto, el estadístico “F” fue mucho mayor al estadístico “F crítico” ($F = 36.136 > F \text{ crítico} = 5.318$), por lo que se infiere que el ángulo de fricción interno del suelo con la planta es estadísticamente mayor que la cohesión del suelo natural.

Figura 12

Diagrama de cajas de la distribución de la cohesión

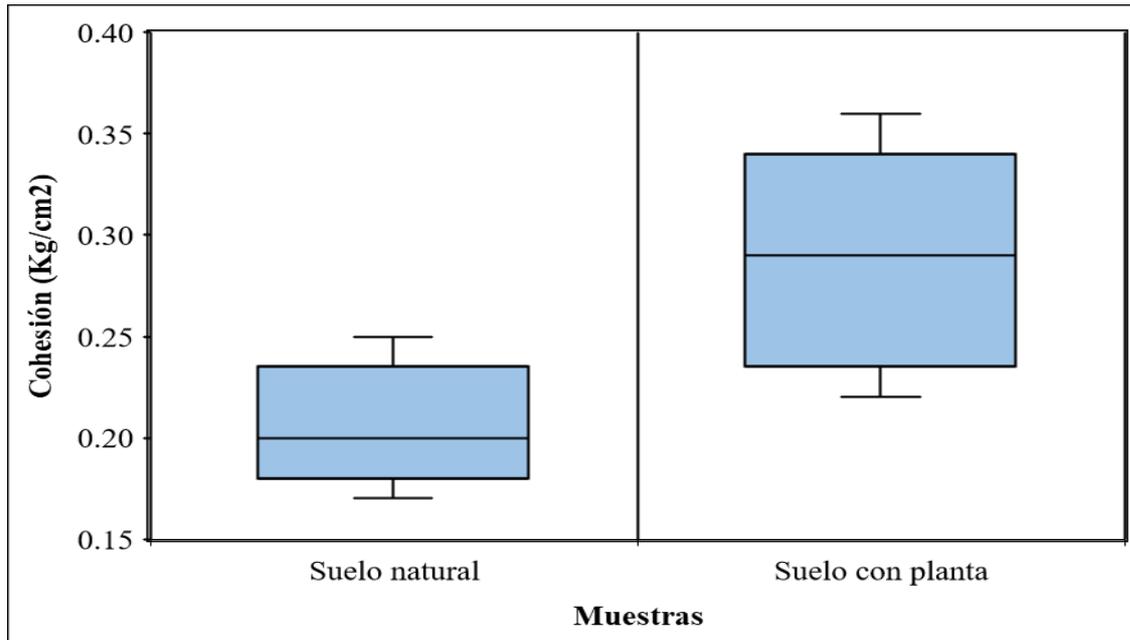
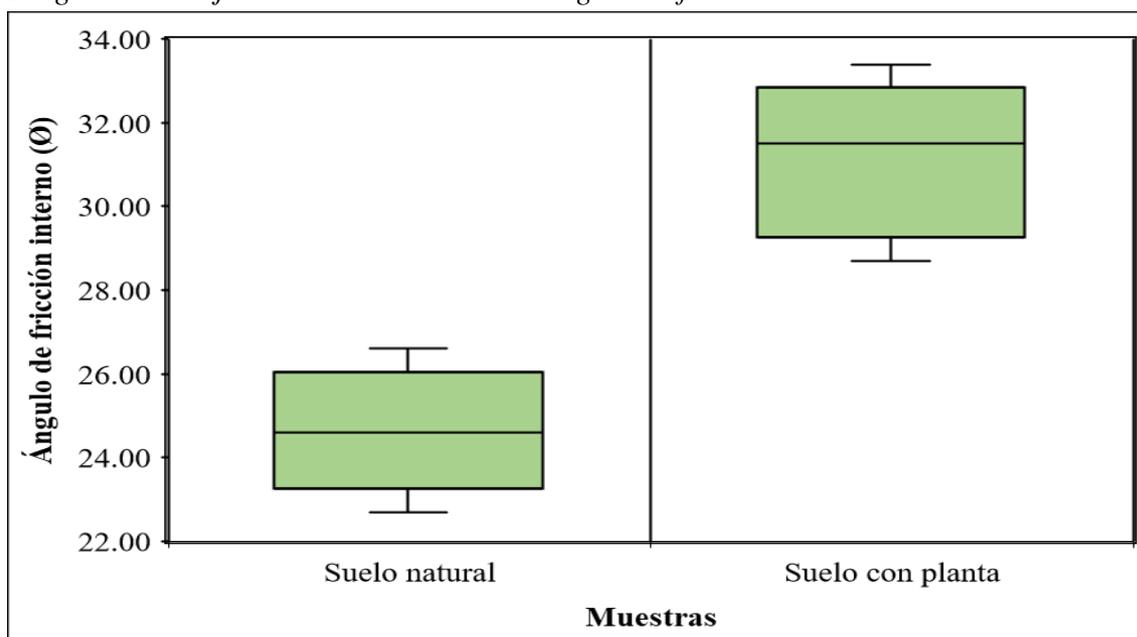


Figura 13

Diagrama de cajas de la distribución del ángulo de fricción interno



4.2. Discusión

De acuerdo a los hallazgos obtenidos, el caudal máximo encontrado, mediante los procedimientos descritos en la etapa de los resultados, implicó la consideración de la influencia de la precipitación en eventos de cambios climáticos, pues a pesar de que existen estudios relevantes como los de Arriola et al. (2020) y Vásquez et al. (2021) que han considerado la estimación de caudales extremos en la cuenca Chancay-Lambayeque, estas evidencias científicas, no han aplicado la incorporación de algún evento climático. Es por ello que deben considerarse los efectos combinados del cambio climático en investigaciones y estudios de campo, ya que la intensificación de las actividades de ingenierías en todo el mundo, son constantes, pues estas últimas han aportado al incremento significativo de los riesgos ocasionados por la inestabilidad de taludes y potenciales inundaciones, tal y como lo indican Cui et al. (2021) y Qin et al. (2022); en ese sentido, el sustento de la aplicación del modelo climático ECMWF, a través del GloFAS y usando el modelo hidrológico LISFLOOD para la estimación de caudales máximos y por ende de diseño, es el adecuado para la presente tesis.

En relación a los resultados considerando previamente el modelo climático aplicado en la presente tesis, se pudo conocer las características geométricas e hidráulicas de la zona de estudio, lo cual con el impacto de la bioingeniería se puede aplicar un tipo de especie vegetal para mejorar la estabilidad del cauce. En ese sentido, estos hallazgos guardan relación con lo señalado por Ni et al. (2024), pues manifiestan que el uso de las diversas técnicas de bioingeniería ayudan a promover la sostenibilidad de la ingeniería, pero basada en la interacción del suelo, la planta y el medio ambiente, por lo que es de suma importancia su aplicación. Por otro lado, como apuntan Yazdani et al. (2024), el conocimiento de la zona de estudio, así como los parámetros de diseño adecuados, permite entender el conocimiento real del comportamiento de la vegetación en el terreno, ya que con ello se obtendrá un significativo refuerzo geomecánico basado en procedimientos de bioingeniería; también con ello, se podrá entender a detalle, cual sistema de mecanismo suelo-planta-atmósfera, es el adecuado a optar como técnica de bioingeniería, ya que como indican Ng et al. (2022) y Zhang et al. (2025), el tipo de planta, los sistemas de raíces de la planta, el tipo de suelo y la precipitación, son componentes importantes en la aplicación de la bioingeniería y hoy en día, son reconocidos como una estrategia prometedora y sostenible para abordar nuevos desafíos en la ingeniería civil.

Según los hallazgos mostrados, se observa que el rendimiento del cultivo de la especie vegetal *Gynnerium sagittatum* (Aublet) P., obtenido con el modelo matemático se correlaciona adecuadamente con la altura medida en la zona de estudio, por lo cual su aplicación en la zona de estudio es la adecuada, bajo condiciones de un período de retorno de 140 años y considerando el efecto del cambio climático en la cuenca Chancay-Lambayeque. Además, como sugieren Maffra & Sutili (2020) y Holanda et al. (2021), se necesita un monitoreo permanente de las etapas del crecimiento del cultivo a largo plazo, que permita ajustar el rendimiento del cultivo, según sea necesario, considerando que estamos ante posibles cambios relacionados en su mayoría con cuestiones ambientales dinámicas que involucran, no sólo la hidrología y la hidráulica, también abarcan la geomorfología de la cuenca, el tipo de clima, la temperatura y otras variables que podrían afectar el comportamiento de las especies. A pesar de su potencial, la bioingeniería y sus efectos que pueda generar a largo plazo, aún se encuentra en sus primeras etapas de desarrollo y siendo una tecnología emergente que utiliza la vegetación como elemento sustentable, todavía enfrenta desafíos para ampliar su alcance de investigación, tal cual lo asevera Ni et al. (2024), ya que no se sabe con exactitud los alcances de los mecanismos de respuesta ecológica y la integración con disciplinas relacionadas, si no se tiene un monitoreo permanente y cuyos resultados no se hayan validado en modelos físicos o ensayos in situ.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se concluye que, la evaluación del caudal máximo relacionado a las precipitaciones máximas en eventos de cambios climáticos en el río Chancay-Lambayeque, fue de 798.23 m³/s, correspondiente a un período de 140 años, tal como se demostró mediante el modelo climático ECMWF, a través del GloFAS y usando el modelo hidrológico LISFLOOD, validado por el programa HEC-HMS y las respectivas métricas estadísticas.

Se concluye que, mediante la evaluación de los parámetros hidráulicos del río Chancay-Lambayeque, para el desarrollo de la bioingeniería considerando la especie vegetal *Gynerium sagittatum* (Aublet) P., se pudo obtener las condiciones hidráulicas necesarias para la sección del tramo de estudio en las inmediaciones del puente Saltur, para colocar este tipo de planta, ya que el tipo de flujo es subcrítico, con una velocidad de 3.50 m/s y un tirante normal de 1.83 metros, siendo esta la altura mínima que debe colocarse la planta para mantener dichas condiciones adecuadas.

Se concluye que, de acuerdo a la evaluación del crecimiento de la especie vegetal *Gynerium sagittatum* (Aublet) P. y estabilización del talud del río Chancay-Lambayeque, el modelo matemático de mejor ajuste para predecir el crecimiento de la planta en condiciones naturales, es la ecuación logística, tal y como se demostró en los resultados de esta tesis, en tanto, se pudo notar un incremento significativo de las propiedades mecánicas, relacionadas a la cohesión y el ángulo de fricción interno del suelo con la colocación de la planta, por lo que con estos hallazgos se puede indicar que se puede aplicar la bioingeniería en la zona de estudio

5.2. Recomendaciones

Se recomienda utilizar otros modelos climáticos, que incluyan no sólo la precipitación, si no además incorporen la temperatura, la evaporación, la infiltración, con la finalidad de determinar el caudal máximo en otros ríos del norte del Perú, por ejemplo, en el río Tumbes, río Piura y el río Jequetepeque, que permitan la validación de los hallazgos de la presente tesis doctoral.

Se recomienda agregar algún componente hidráulico, por ejemplo, el tránsito de avenidas del tipo hidráulico, con el fin de conocer que otros parámetros influyen en el desarrollo de la bioingeniería. Dichas condiciones pueden favorecer quizás en menor tiempo, el crecimiento de

la especie vegetal u otras de similares y pueden aplicarse en zonas de características parecidas, como por ejemplo en el río Piura, ya que es una zona árida que podría necesitar bioingeniería para una mejor capacidad hidráulica del cauce.

Se recomienda usar otro tipo de cultivo en relación al aplicado en la presente tesis, con el fin de comparar las correlaciones y modelos matemáticos de predicción del crecimiento y rendimiento obtenidos, con el fin de conocer su desempeño en la estabilización del suelo, relacionado directamente a la cohesión y el ángulo de fricción interno del suelo. Esta aplicación puede darse en el río Piura, ya que es un área casi plana y sería de vital importancia emplear algún tipo de especie vegetal para mejorar las condiciones del talud de dicho río.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antônio, G., Holanda, F., Santos, L., Mendonça, B., de-Jesus, R., & Silva, P. (2021). Evaluation of efficiency of the implementation of soil bioengineering technique. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(6), 3422-3436. doi:10.26848/RBGF.V14.6.P3417-3432
- Arriola, G., Villegas, L., & Sotomayor, G. (2020). Análisis de las curvas de infiltración para determinar caudales máximos en zonas de escasa información ante eventos extremos. *Revista Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 7(1). doi:10.26495/icti.v7i1.1352
- Arriola, G., Villegas, L., Fernandez, J., Vallejos, J., & Idrogo, C. (2023). Assessment of parameters of the generalized extreme value distribution in rainfall of the Peruvian North. *Revista Politecnica*, 52(2), 99-112. doi:10.33333/rp.vol52n2.10
- Bordoloi, S., & Ng, C. (2020). The effects of vegetation traits and their stability functions in bio-engineered slopes: A perspective review. *Engineering Geology*, 275. doi:10.1016/j.enggeo.2020.105742
- Caicedo, M., Villegas, L., Arriola, G. C., García, J., & Marín, N. (2024). Generation of flows applying a simple method of flood routing to monthly level in La Leche basin, Peru. *Revista Politecnica*, 53(1), 99-110. doi:10.33333/rp.vol53n1.09
- Cao, L., Shi, P., Li, L., & Chen, G. (2019). A new flexible sigmoidal growth model. *Symmetry*, 11(2). doi:10.3390/sym11020204
- Carrasco, G., Vargas, M., & Vargas, E. (2023). “¿Cómo la bioingeniería influye en la estabilización de laderas y en la mitigación de la erosión hídrica? *Perfiles de Ingeniería*, 19(20), 73-92. doi:10.31381/perfilesingenieria.v19i20.6313
- Cui, P., Peng, J., Shi, P., Tang, H., Ouyang, C., Zou, Q., & Lei, Y. (2021). Scientific challenges of research on natural hazards and disaster risk. *Geography and Sustainability*, 2(3), 216-223. doi:10.1016/j.geosus.2021.09.001
- Enríquez-De-salamanca, Á. (2022). Vegetation change in road slopes in the Mediterranean Region over 25 years. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 30(1), 94-105. doi:10.3846/jeelm.2022.16324
- Francini, A., Toscano, S., Romano, D., Ferrini, F., & Ferrante, A. (2021). Biological contribution of ornamental plants for improving slope stability along urban and suburban areas. *Horticulturae*, 7(9). doi:10.3390/horticulturae7090310
- González, F. (2019). *Bioingeniería aplicada en la estabilización de taludes en Guatemala*. Tesis Doctoral, Universidad de Almería, Departamento de Ingeniería, Almería.

Obtenido de
<https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?idFichero=kd9rQKeHlAQ%3D>

- Hernández, O. (2021). Aproximación a los distintos tipos de muestreo no probabilístico que existen. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 37(3). Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-21252021000300002#:~:text=Muestreo%20por%20conveniencia%3A%20La%20muetra,que%20establecen%20criterios%20a%20seguir.
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Ciudad de México, México: McGraw-Hill Interamericana Editores. Obtenido de <http://repositorio.uasb.edu.bo:8080/handle/54000/1292>
- Holanda, F., Filho, R., Pedrotti, A., Wilcox, B., Marino, R., & Santos, L. (2021). Soil bioengineering in northeastern Brazil: An overview. *Revista Ambiente e Agua*, 16(4). doi:10.4136/ambi-agua.2650
- Karimzadeh, A., Leung, A., & Gao, Z. (2022). Shear strength anisotropy of rooted soils. *Geotechnique*, 74(10), 1033-1046. doi:10.1680/jgeot.22.00103
- Keybondori, S., Abdi, E., Deljouei, A., Cislighi, A., Shakeri, Z., & Etemad, V. (2025). Soil-bioengineering to stabilize gravel roadside slopes in the steep Hyrcanian Forests of Northern Iran. *Ecological Engineering*, 214. doi:10.1016/j.ecoleng.2025.107569
- Lujano, E., Diaz, R., Lujano, R., Sanchez-Delgado, M., & Lujano, A. (2025). Hydrological performance of gridded meteorological products in Peruvian Altiplano basins. *Revista Brasileira de Recursos Hidricos*, 30. doi:10.1590/2318-0331.302520240068
- Lv, J., Wang, W., Dai, T., Liu, B., & Liu, G. (2024). Experimental study on the effect of soil reinforcement and slip resistance on shallow slopes by herbaceous plant root system. *Sustainability (Switzerland)*, 16(8). doi:10.3390/su16083475
- Maffra, C., & Sutili, F. (2020). The use of soil bioengineering to overcome erosion problems in a pipeline river crossing in South America. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5(1). doi:10.1007/s41062-020-0273-5
- Mancilla-Morales, J., Tornero-Campante, M., & López-Cruz, I. (2019). Evaluation of a mathematical model to predict growth and nitrogen content in tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) under greenhouse conditions. *Ingeniería agrícola y biosistemas*, 11(2), 111-125. doi:10.5154/r.inagbi.2018.06.013

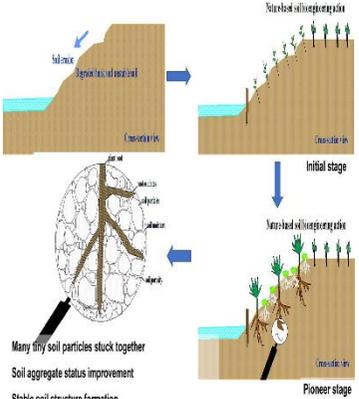
- Martin, F., Janssen, P., Bergès, L., Dupont, B., & Evette, A. (2021). Higher structural connectivity and resistance against invasions of soil bioengineering over hard-engineering for riverbank stabilisation. *Wetlands Ecology and Management*, 29(1), 27-39. doi:10.1007/s11273-020-09765-6
- Maxwald, M., Crocetti, C., Ferrari, R., Petrone, A., Rauch, H., & Preti, F. (2020). Soil and water bioengineering applications in central and South America: A transferability analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 12(24), 1-31. doi:10.3390/su122410505
- Mickovski, S. (2021). Re-thinking soil bioengineering to address climate change challenges. *Sustainability (Switzerland)*, 13(6). doi:10.3390/su13063338
- Miele, P., Di Martire, D., Di-Napoli, M., Guerriero, L., & Calcaterra, D. (2021). Temporal efficiencies of soil bioengineering techniques to mitigate geo-hydrological risks. *Ecological Engineering*, 170. doi:10.1016/j.ecoleng.2021.106338
- Mira, E., Rousteau, A., Tournebize, R., Labbouz, L., & Robert, M. E. (2022). The conservation and restoration of riparian forests along Caribbean Riverbanks using legume trees. *Sustainability (Switzerland)*, 14(7). doi:10.3390/su14073709
- Ng, C., Zhang, Q., Zhou, C., & Ni, J. (2022). Eco-geotechnics for human sustainability. *Science China Technological Sciences*, 65(12), 2809-2845. doi:10.1007/s11431-022-2174-9
- Ni, J., Xiao, Y., Shi, J., & He, J. (2024). Soil bioengineering using vegetation under climate change. *Biogeotechnics*, 2(1). doi:10.1016/j.bgtech.2023.100067
- Onyutha, C. (2022). A hydrological model skill score and revised R-squared. *Hydrology Research*, 53(1), 51-64. doi:10.2166/NH.2021.071
- Palmett-Plata, O. (2019). Bioengineering materials and techniques. *Journal of Physics: Conference Series*, 1257(1). doi:10.1088/1742-6596/1257/1/012005
- Parsakhoo, A., & Hosseini, S. (2023). Effect of bioengineering treatments on reduction of soil erosion from road cut slope and fill slope. *Journal of Forest Science*, 69(9), 367-376. doi:10.17221/55/2023-JFS
- Peng, J., & Lan, H. (2022). Ecological geology and eco-geological environment system. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 44(6), 877-893. doi:10.19814/j.jese.2022.06006
- Pepe, G., Baudinelli, E., Zanini, M., Calcaterra, D., Cevasco, A., Scarpellini, P., & Firpo, M. (2020). Application of bioengineering techniques as geo-hydrological risk mitigation measures in a highly valuable cultural landscape: Experiences from the cinque terre national park (Italy). *Sustainability (Switzerland)*, 12(20), 1-22. doi:10.3390/su12208653

- Preti, F., Capobianco, V., & Sangalli, P. (2022). Soil and Water Bioengineering (SWB) is and has always been a nature-based solution (NBS): a reasoned comparison of terms and definitions. *Ecological Engineering*, 181. doi:10.1016/j.ecoleng.2022.106687
- Qin, M., Cui, P., Jiang, Y., Guo, J., Zhang, G., & Ramzan, M. (2022). Occurrence of shallow landslides triggered by increased hydraulic conductivity due to tree roots. *Landslides*, 19(11), 2593–2604. doi:10.1007/s10346-022-01921-8
- Rauch, H., Von-der-Thannen, M., Raymond, P., Mira, E., & Evette, A. (2022). Ecological challenges* for the use of soil and water bioengineering techniques in river and coastal engineering projects. *Ecological Engineering*, 176. doi:10.1016/j.ecoleng.2021.106539
- Rey, F., Bifulco, C., Bischetti, G., Bourrier, F., De-Cesare, G., Florineth, F., . . . Stokes, A. (2019). Soil and water bioengineering: Practice and research needs for reconciling natural hazard control and ecological restoration. *Science of the Total Environment*, 648, 1210-1218. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.217
- Rodrigues, B., Molina Junior, V., & Canteras, F. (2023). Green Infrastructure as a solution to mitigate the effects of climate change in a coastal area of social vulnerability in Fortaleza (Brazil). *Environmental Advances*, 13. doi:10.1016/j.envadv.2023.100398
- Said, R., Adriani, Innocentia, E., & Apriani, R. (2023). Selección de especies de plantas silvestres como bioingeniería del suelo para la estabilidad de la pendiente del suelo en Kalimantan del Sur, Indonesia, para superar deslizamientos de tierra poco profundos. *Revista Ciencia y Construcción*, 3(4), 31-42. Obtenido de <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/131>
- Solé, R., & Levin, S. (2022). Ecological complexity and the biosphere: the next 30 years. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 377(1857). doi:10.1098/rstb.2021.0376
- Tardio, G., & Mickovski, S. (2023). A novel integrated design methodology for nature-based solutions and soil and water bioengineering interventions: The Tardio&Mickovski methodology. *Sustainability (Switzerland)*, 15(4). doi:10.3390/su15043044
- Uzielli, M., Geppetti, A., Borselli, L., Renzi, S., & Preti, F. (2025). Comparative geotechnical analysis of slope stabilization through conventional, soil and water bioengineering, and combined solutions. *Ecological Engineering*, 212. doi:10.1016/j.ecoleng.2024.107487
- Vallarino, R., Mejía, G., Centella, D., & Grajales, F. (2021). Bioingeniería de taludes: Evaluación del uso de árboles y arbustos como posible mecanismo para incrementar el factor de seguridad. *Revista de Iniciación Científica*, 7(2), 26-38. doi:10.33412/rev-ric.v7.2.3336

- Vásquez, A., Vasquez, A., Piedra, J., & Arriola, G. (2021). Evaluación de la ecuación general del USBR para el diseño de aliviaderos tipo Creager de descarga libre. *Revista Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 8(1), 106-120. doi:10.26495/icti.v8i1.1542
- Vianna, V., Fleury, M., Menezes, G., Coelho, A., Bueno, C., da Silva, J., & Luz, M. (2020). Bioengineering techniques adopted for controlling riverbanks' superficial erosion of the Simplicio Hydroelectric Power Plant, Brazil. *Sustainability (Switzerland)*, 12(19). doi:10.3390/SU12197886
- Von-der-Thannen, M., Hoerbinger, S., Muellebner, C., Biber, H., & Rauch, H. (2021). Case study of a water bioengineering construction site in Austria. Ecological aspects and application of an environmental life cycle assessment model. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 12(4), 599-609. doi:10.1007/s40095-021-00419-8
- Wang, B., & Wang, S. (2023). Shear strength analysis and slope stability study of straight root herbaceous root soil composite. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(23). doi:10.3390/app132312632
- Yazdani, F., Sadeghi, H., AliPanahi, P., Gholami, M., & Leung, A. (2024). Evaluation of plant growth and spacing effects on bioengineered slopes subjected to rainfall. *Biogeotechnics*, 2(2). doi:10.1016/j.bgtech.2024.100080
- Zhang, H., Zhao, Z., Ma, G., & Sun, L. (2020). Quantitative evaluation of soil anti-erodibility in riverbank slope remediated with nature-based soil bioengineering in Liaohe River, Northeast China. *Ecological Engineering*, 151. doi:10.1016/j.ecoleng.2020.105840
- Zhang, W., Huang, R., Xiang, J., Zhang, N., Ciantia, M., Liu, L., . . . Qin, C. (2025). Role of root morphological and architectural traits: Insights into root-inspired anchorage and foundation systems. *Biogeotechnics*, 3(1). doi:10.1016/j.bgtech.2024.100107

VII. ANEXOS

Anexo 1. Matriz de operacionalización de variable independiente

Variable Dependiente	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicador	Unidad del indicador	Escala de medición
Bioingeniería	<p>La ingeniería biológica, proviene del alemán “Ingenieur-Biologie”, también llamada bioingeniería o ingeniería del paisaje, es decir en primer lugar el término ingeniería se refiere al uso de aquella información técnica y que complementada con la investigación de carácter científico-tecnológico permite optimizar los procesos de estabilización constructiva para el control, manejo y remediación de la erosión, y en segundo lugar el concepto biológico se refiere al</p>	<p>La bioingeniería es una disciplina de la ingeniería general que usa los principios y conceptos basados en la física y matemática con la finalidad de dar solución a los diversos problemas asociados a la vida cotidiana, que para la presente tesis doctoral busca su aplicación en el río Chancay - Lambayeque.</p>	<p>Técnica de bioingeniería</p> 	Tipo de planta	Tipo	Ordinal
				Profundidad radicular	Longitud	De razón
				Raíz	Longitud	De razón
				Altura de planta	Longitud	De razón
				Diámetro de tallo de planta	Diámetro	De razón

	<p>desempeño y función de aquellos organismos vivos, principalmente las plantas, tales como hierbas, juncos, hierbas, arbustos, árboles (Palmett-Plata, 2019).</p>					
--	--	--	--	--	--	--

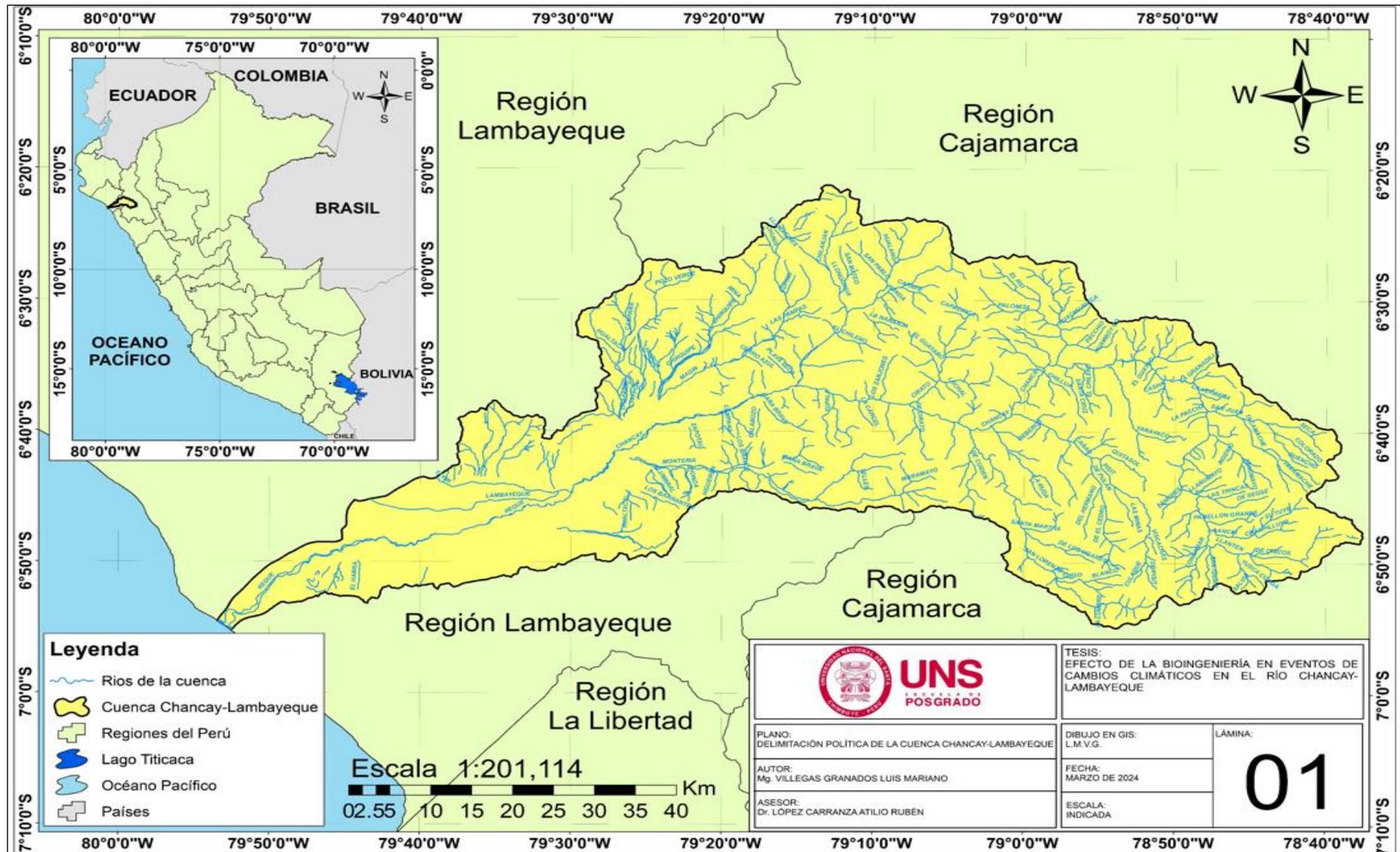
Anexo 2. Matriz de operacionalización de variable dependiente

Variable Independente	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicador	Unidad del indicador	Escala de medición
Cambio climático en el río Chancay - Lambayeque	Se refiere a aquellas variaciones que pueden darse en todo el mundo y en un futuro no tan lejano, que principalmente se ven influenciados por el aumento significativo de la temperatura y la alteración progresiva de los patrones climáticos de los vientos, precipitaciones, evaporación y humedad (Rodrigues et al., 2023).	Los cambios climáticos son las alteraciones del comportamiento hidrológico e hidráulico del río Chancay - Lambayeque causadas por el incremento de las precipitaciones y temperatura en la cuenca del mismo río, cuyos patrones se han visto influenciados por eventos extremos producto del Fenómeno El Niño.	Patrones del cambio climático	Precipitación	Milímetros	De razón
				Caudal	Metros cúbicos / segundo	De razón

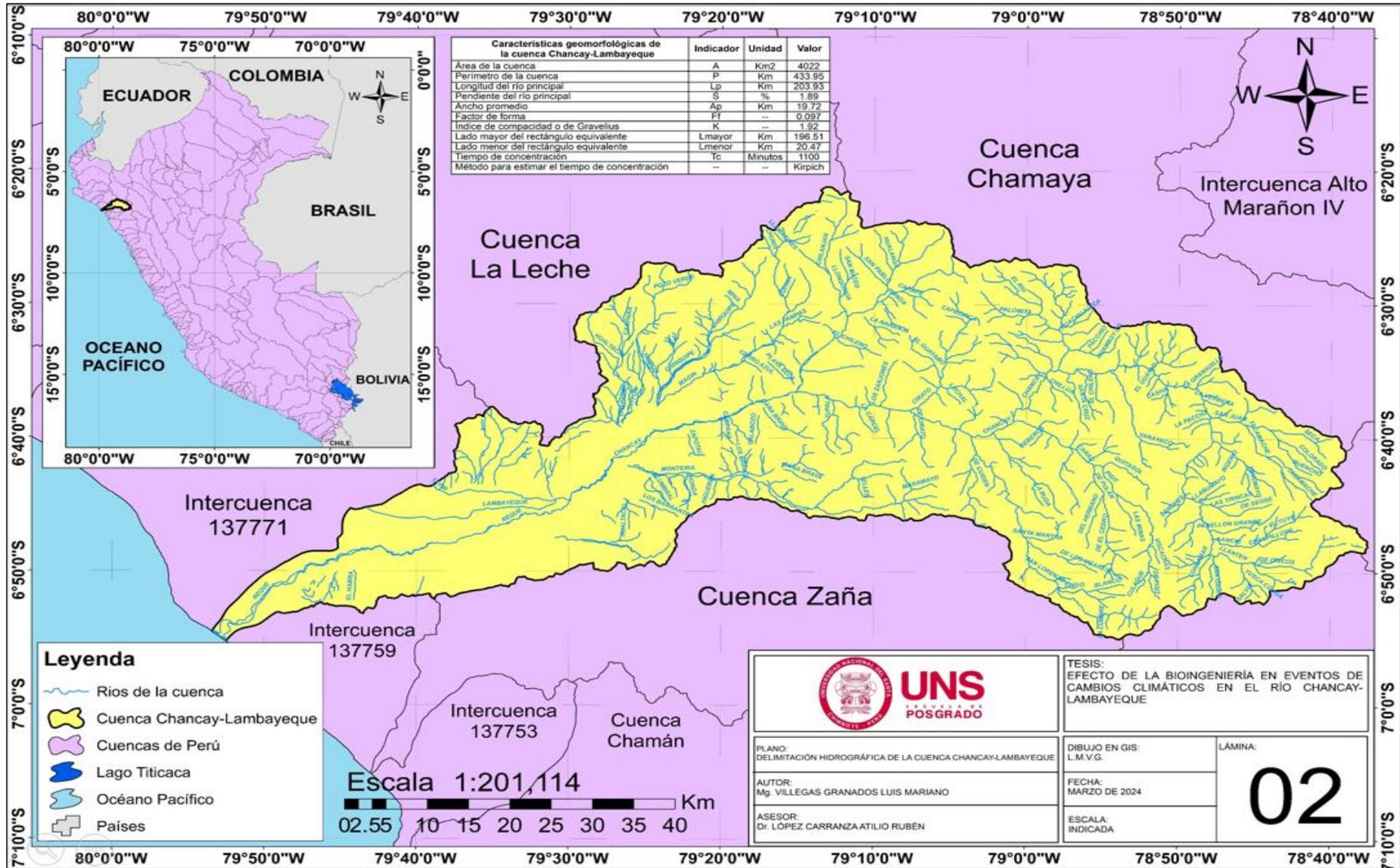
Anexo 3. Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores
¿Influye los eventos de cambio climático en la bioingeniería en el río Chancay - Lambayeque?.	<p>Objetivo General: Determinar el efecto de la bioingeniería en eventos de cambios climáticos en el río Chancay - Lambayeque.</p>	El evento de cambio climático si influye en la bioingeniería en el río Chancay - Lambayeque.	<p>Variable dependiente: Bioingeniería.</p>	Técnica de bioingeniería	Tipo de planta
	<p>Objetivos específicos:</p> <p>OE1: Determinar el caudal máximo considerando las precipitaciones en eventos climáticos en el río Chancay - Lambayeque.</p> <p>OE2: Determinar los parámetros hidráulicos del río para el desarrollo de la bioingeniería considerando la especie vegetal <i>Gynerium sagittatum</i> (Aublet) P.</p> <p>OE3: Determinar el crecimiento de la especie vegetal <i>Gynerium sagittatum</i> (Aublet) P. y estabilización del talud del río Chancay – Lambayeque.</p>		<p>Variable independiente: Cambios climáticos en el río Chancay - Lambayeque.</p>	Patrones del cambio climático	Profundidad radicular
					Raíz
					Altura de planta
					Diámetro de tallo de planta
					Precipitación
Caudal					

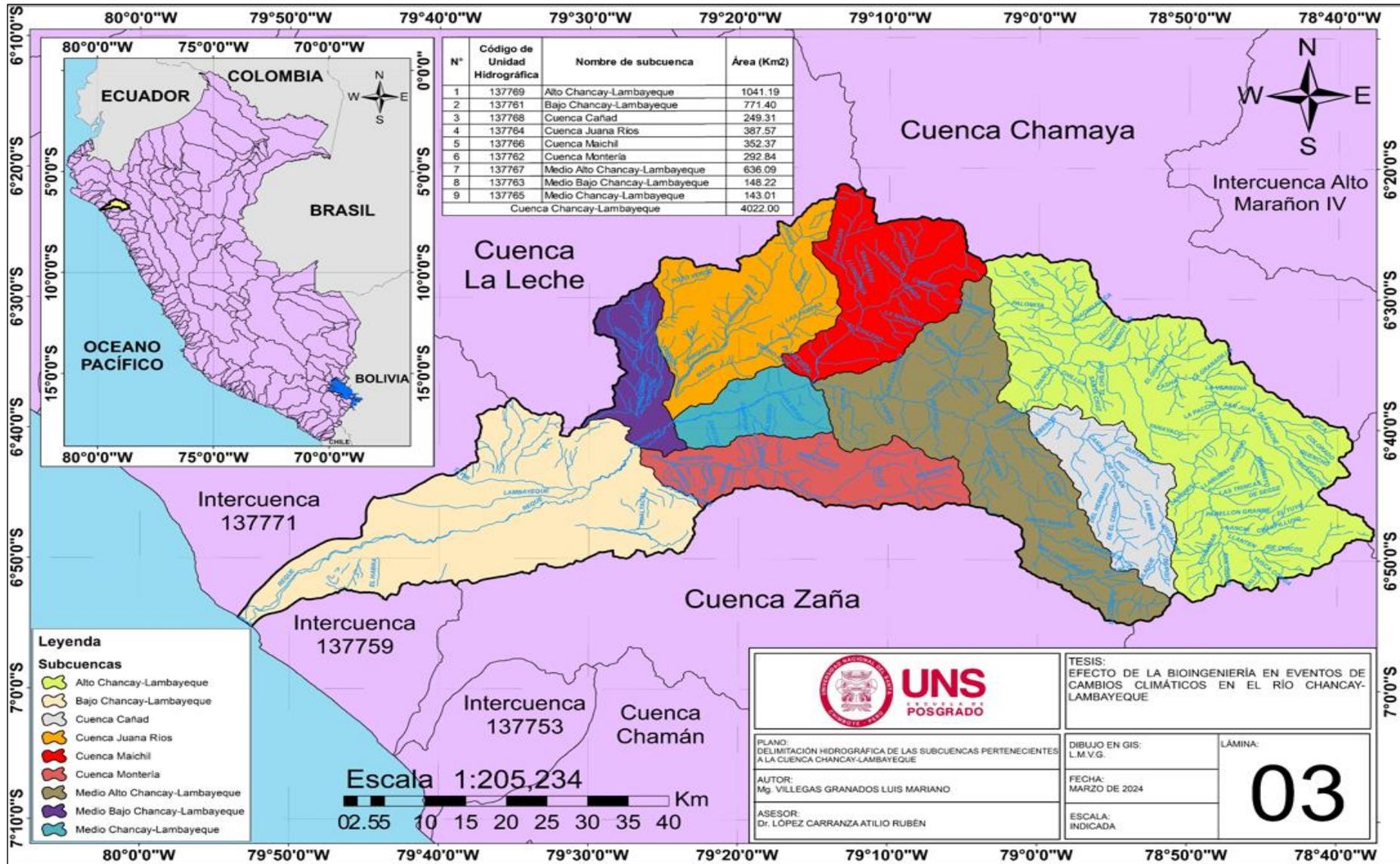
Anexo 4. Plano de delimitación política de la cuenca Chancay-Lambayeque



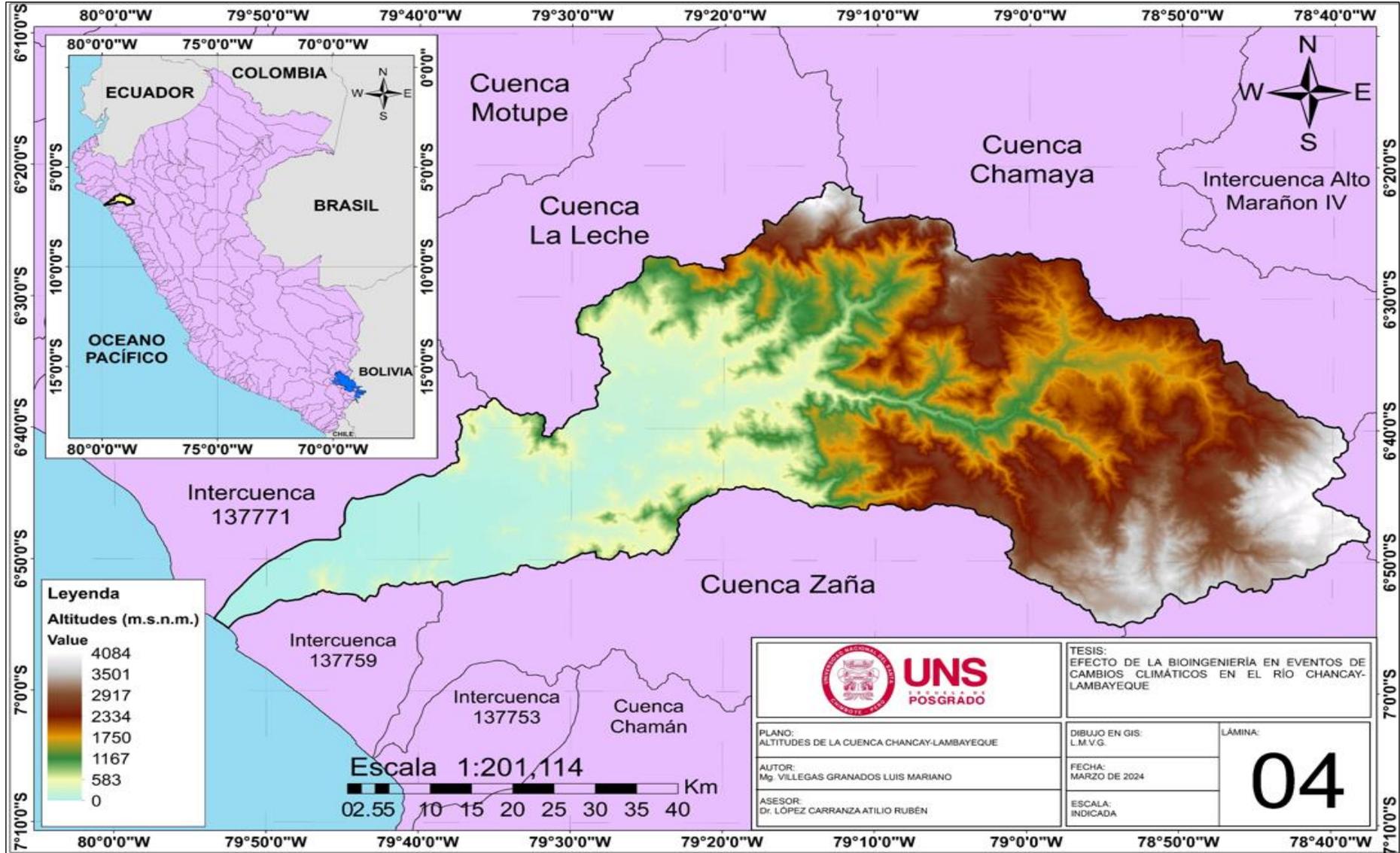
Anexo 5. Plano de delimitación hidrográfica de la cuenca Chancay-Lambayeque



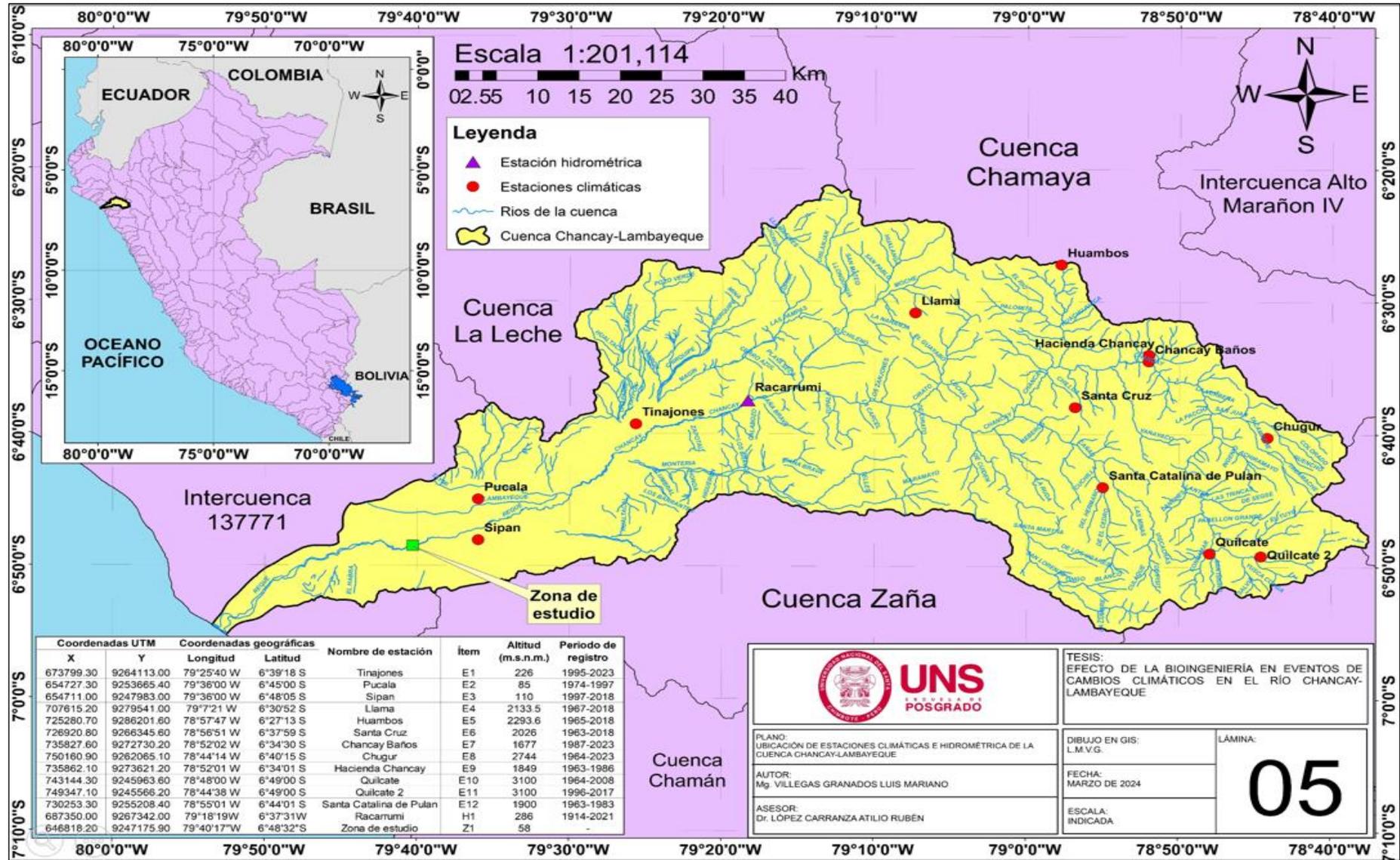
Anexo 6. Plano de delimitación hidrográfica de las subcuencas de la cuenca Chancay- Lambayeque



Anexo 7. Plano de altitudes de la cuenca Chancay- Lambayeque



Anexo 8. Plano de ubicación de estaciones climáticas e hidrométrica de la cuenca Chancay- Lambayeque



Anexo 9. Panel fotográfico



Foto N°1: Visita de la zona de estudio para el reconocimiento de los lugares donde se emplazará la bioingeniería.



Foto N°2: Vista general del tramo de estudio aguas arriba, en las inmediaciones del Puente Saltur, río Chancay-Lambayeque



Foto N°3: Vista general del tramo de estudio aguas abajo, en las inmediaciones del Puente Saltur, río Chancay-Lambayeque



Foto N°4: Proceso de crecimiento del cultivo vegetal Rendimiento de follaje y seco de la especie vegetal *Glycerium sagittatum* (Aublet) P. bajo condiciones naturales en el tramo de estudio



Foto N°5: Visita de campo aguas arriba para evaluación del rendimiento del cultivo vegetal Rendimiento de follaje y seco de la especie vegetal *Glycerium sagittatum* (Aublet) P. bajo condiciones naturales en el tramo de estudio



Foto N°5: Visita de campo aguas abajo para evaluación del rendimiento del cultivo vegetal Rendimiento de follaje y seco de la especie vegetal *Glycerium sagittatum* (Aublet) P. bajo condiciones naturales en el tramo de estudio