

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



**“ESTIMACION DE LA SOCAVACION DEL CAUCE DEL RIO MOCHE EN EL
EMPLAZAMIENTO DEL PUENTE HUACAS, LA LIBERTAD 2019”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: HIDRÁULICA

AUTORES:

BR. AGREDA GARCIA, Willam Jhordany

BR. BARTOLO LEON, Diego Eduardo

ASESOR:

Dr. CABANILLAS QUIROZ, Guillermo Juan

TRUJILLO – LA LIBERTAD – PERÚ

2020

DEDICATORIA

Esta tesis va dedicada a mi abuelo Conversión Garcia Gil, quien desde el cielo me cuida y quien me enseñó que las cosas no llegan fáciles, también va dedicada a mis padres Teresa Garcia Ulloa y Eduardo Agreda Sánchez quienes con su apoyo económico y moral hago posible ahora una de mis metas; el llegar a ser un profesional, quienes con sus consejos me enseñaron el camino de la responsabilidad y a siempre buscar ser mejor cada día.

Dedico principalmente este trabajo a Dios por haberme dado la vida y permitirme llegar a este momento; a mi madre por ser el pilar más importante de mi vida y demostrarme su cariño y apoyo incondicional, a mi padre por estar siempre apoyándome en las diferentes etapas de este proceso Universitario.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a mi familia, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios quien es el que nos cuida y protege desde lo más alto, Agradezco a mis hermanos Anthony y Kyara quienes son mi motivo de esfuerzo para ser un ejemplo ante ellos y que siempre busquen ser mejores como personas.

Agradezco a mis tíos y padrinos Nancy y Jamilo, quien, con consejos, con su apoyo moral y económico me ayudaron a salir adelante en momentos difíciles.

Por último y no menos importante, agradecer a mi abuela Virginia Ulloa quien me cuido desde niño y me brindo todo su amor, también a mi abuela Betty Sánchez quien me brindo su casa para poder vivir y así poder estudiar en esta Universidad para llegar a ser un profesional.

En estas líneas quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible esta investigación y que de alguna manera estuvieron conmigo en los momentos difíciles, alegres, y tristes. A mis padres por todo su amor, comprensión y apoyo, pero sobre todo gracias infinitas por la paciencia que me han tenido. No tengo palabras para agradecerles las incontables veces que me brindaron su apoyo en todas las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida. Gracias por darme la libertad de desenvolverme como ser humano.

De igual forma, agradezco a mi asesor de Tesis al Dr. Cabanillas Quiroz Guillermo Juan, que gracias a sus consejos y correcciones hoy puedo culminar este trabajo.

RESUMEN

La importancia de los modelos hidráulicos computacionales para la resolución de problemas de ingeniería, radica en la facilidad que se tiene para manejar y representar entornos complejos de la realidad además de resolver problemas importantes como lo es la socavación de los pilares de un puente, por lo tanto, nosotros consideramos más que importante elaborar un estudio que nos permita conocer los parámetros hidrodinámicos del cauce y estudiar su interacción con el puente en cuestión para así poder predecir futuros problemas que se puedan presentar en la sub estructura. Se realizó el modelamiento digital del cauce del río Moche y en él se colocó el "Puente Huacas" para el cual se introdujo con 130 m de longitud y 4 pilares, cada uno con medidas de 3.80 m de largo con 1.00 m de ancho. Se encontraron los diámetros, siendo los resultados: $D_{10} = 0.184$ $D_{30} = 0.256$ $D_{50} = 0.305$ $D_{60} = 0.368$, se analizaron los caudales registrados por la estación Quirihuac, de los últimos 69 años, de los cuales se determinó el caudal de máxima avenida para un periodo de retorno $T=500$ años, siendo un total de 487.91 m³/s, y se analizaron los caudales más representativos de la muestra, siendo el mayor de 1000 m³/s. Se construyó un modelo computacional hidráulico en 3 dimensiones para el cual se consideró una malla 0.50 m x 0.50 m, mediante la técnica "Fractional Area Volumen". Se determinó la socavación general máxima en 3.64 metros, para el sector aguas arriba del Puente Huacas. Para la estimación de la socavación local, se han encontrado los valores de 2.96 y 2.47m; en el modelo bidimensional se obtuvieron valores en los rangos desde 1.82m hasta 2.42 m.

ABSTRACT

The importance of computational hydraulic models for solving engineering problems lies in the ease it has to handle and represent complex environments of reality in addition to solving important problems such as the undermining of the pillars of a bridge, therefore Therefore, we consider it more than important to prepare a study that allows us to know the hydrodynamic parameters of the channel and study its interaction with the bridge in question in order to predict future problems that may arise in the substructure. The digital modeling of the riverbed of the Moche river was carried out and the "Huacas Bridge" was placed in it, for which it was introduced with 130 m in length and 4 pillars, each one measuring 3.80 m long and 1.00 m wide. The diameters were found, the results being: $D_{10} = 0.184$ $D_{30} = 0.256$ $D_{50} = 0.305$ $D_{60} = 0.368$., The flows recorded by the Quirihuac station for the last 69 years were analyzed, of which the maximum avenue flow was determined for a return period $T = 500$ years, being a total of $487.91 \text{ m}^3 / \text{s}$, and the most representative flows of the sample were analyzed, the highest being $1000 \text{ m}^3 / \text{s}$. A 3-dimensional hydraulic computational model was built for which a $0.50 \text{ m} \times 0.50 \text{ m}$ mesh is considered, since by means of the "Volume of fractional area" technique. The maximum general scour was determined at 3.64 meters, for the sector upstream of the Huacas Bridge. To estimate local scour, values of 2.96 and 2.47m have been found; In the two-dimensional model, values were obtained in the ranges from 1.82m to 2.42m.

INDICE

CAPITULO I: INTRODUCCION	1
CAPITULO II: PROBLEMA DE INVESTIGACION	2
2.1. Realidad Problemática	2
2.1.1. Estudio Granulométrico.....	20
2.1.2. Estimación del Caudal	24
2.1.3. Características Hidráulicas del Cauce	25
2.1.4. Estimación de la Socavación en los Pilares.....	27
2.2. Formulación del Problema	29
2.2.1. Problema General.....	29
2.2.2. Problemas Específicos	29
2.3. Objetivos de la Investigación	29
2.3.1. Objetivo General.....	29
2.3.2. Objetivos Específicos	29
2.4. Justificación de Estudio	30
CAPITULO III: MARCO DE REFERENCIA	31
3.1. Antecedentes de Estudio	31
3.2. Marco Teórico	32
3.2.1. Socavación.....	32
3.2.2. Profundidad de Socavación	33
3.2.3. Cálculo de la forma de Socavación	34
3.2.4. Socavación Localizada en Pilas	35
3.3. Marco Conceptual	36
3.3.1. Sedimentos de Fondo	36
3.3.2. Velocidad del flujo en el Lecho.....	36
3.3.3. Flujo Permanente	36
3.3.4. Flujo Transigente.....	36
3.4. Hipotesis	37
3.4.1. Hipotesis General	37
3.4.2. Hipotesis Específicas.....	37
3.5. Variables: Operacionalización de la Variable	38
CAPITULO IV: METODOLOGIA	39
4.1. Tipo y Nivel de Investigación	39
4.2. Población y Muestra	39
4.3. Técnicas e Instrumentos de Investigación	39
4.4. Diseño de Investigación	40
4.5. Procesamiento y Análisis de Datos	40
CAPITULO V: RESULTADOS	41
5.1. Análisis e Interpretación de Resultados	41
5.1.1. Levantamiento Topográfico	41

5.1.2.	Fotogrametria del Puente	44
5.1.3.	Hidrologia	46
5.1.4.	Modelamiento Numerico Unidimensional	64
5.1.5.	Modelamiento Numerico Bidimensional	69
5.1.6.	Modelamiento Numerico Tridimensional	81
5.2.	Prueba de Hipotesis	85
CAPITULO VI: DISCUSION DE RESULTADOS		86
CAPITULO VII: CONCLUSIONES		87
CAPITULO VIII: RECOMENDACIONES		89
CAPITULO IX: REFERENCIAS		90
□	Bedoya Cristancho, J. S. (2015). Modelación numérica de la socavación local en los estribos del puente sobre el Río Sunuba según las características hidrodinámicas de la zona. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.	90
□	Campa Rodríguez, A., & Astorga Bustillos, R. (2015). Métodos para el cálculo de la socavación local en pilas de puentes. Chihuahua: Tecnociencia.	90
□	Castellanos Rangel, C. (2016). Evaluación del impacto de las alteraciones climáticas en un puente de concreto preesforzado. Bogotá: Universidad Industrial de Santander.	90
□	Chow, V. T. (1983). Hdráulica de canales Abiertos. Ciudad de Mexico, Mexico: Diana.	90
□	Duque Escobar, G., & Escobar Potes, C. E. (2002). Texto para la asignatura de Mecánica de Suelos I. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.	90
□	Elbio Felipe, M. (2016). Socavación producida por el río Huallaga al puente colpa alta en la provincia de Huánuco, utilizando los métodos de artamanov, straub y maza, en el hec-ras. Lima: UDEP.	90
□	Enciso Navarro, P. D. (2015). Estudio Hidráulico y Estimación de Socavación en el Puente Interconexión Muyurina- Ayacucho. Ayacucho: Universidad Nacional San Cristobal de Huamanga.	90
□	Franco, F., & Scacchi, G. (2001). Aplicación del método de Lischtvan y Lebediev al calculo de la erosión general. La plata: Universidad del Litoral de Argentina.	90
□	García Gutiérrez., P. F. (2009). Modelo de transporte de sedimentos de carga de fondo en cauces fluviales. La paz: Tecnociencia.	90
□	Manterola, J. (2005). Evolución de los puentes en la Historia. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.	90
□	Ministerio de Transportes y comunicaciones, M. (2012). Manual de hidrología, hidráulica y drenaje. Lima: Ministerio de Transportes y comunicaciones.	90
□	Ochoa Rubio, T. (2013). Hidrología, Hidráulica y socavación en Puentes. Bogotá: Ecoe Ediciones.	90
□	Soto Castro, K. K. (2019). Estudio de máximas avenidas en la cuenca del Rio Moche mediante el software HEC-HMS. Trujillo: UNT.	90
□	Vide Martín, J. P. (1997). Ingeniería Fluvial. Catalunya: Universidad Politecnica de catalunya.	90
CAPITULO X: ANEXOS		91

INDICE DE IMAGENES

Imagen 1– Rio Sedimentado (Perú).....	2
Imagen 2 – Rio de Montaña Pedregoso (Campo Flor del Lago, Alemania).....	3
Imagen 3 – El Antiguo Puente de Piedra Tarr Steps (Reino Unido).....	4
Imagen 4 – Tronco Atravesado en Cauce (Riachuelo – Minesota – USA).....	5
Imagen 5 – Puente Tronco en los Alpes Franceses (Vallorcine).....	5
Imagen 6 – Tramo Meándrico en Rio.....	6
Imagen 7– Socavación en Pilar Puente Pescadero, Santander, Colombia.	7
Imagen 8 – Ubicación – Departamento de La libertad.....	8
Imagen 9 – Ubicación – Provincia de Trujillo	9
Imagen 10 – Ubicación del Distrito de Moche	10
Imagen 11 – Vista en planta – Puente Huacas – Imagen satelital 11/05/13.	10
Imagen 12 – Vista en planta – Puente Huacas – Imagen satelital 11/05/13.	11
Imagen 13 – Vista en planta – Puente Huacas – Imagen satelital 12/02/14.	12
Imagen 14 – Vista en planta – Puente Huacas – Imagen satelital 06/05/15.	12
Imagen 15 – Vista en planta – Puente Huacas – Imagen satelital 31/03/17.	13
Imagen 16 – Vista en perspectiva – Visita de campo a Puente Huacas.	14
Imagen 17 – Vista en perspectiva – Toma de medidas del tablero.	14
Imagen 18 – Vista en perspectiva – Puente Huacas.....	15
Imagen 19 – Vista en Perspectiva – Limpieza de la zona de extracción.	15
Imagen 20 – Toma de la muestra de material sedimentario	16
Imagen 21 – Sub estructura del puente – Toma de medidas.....	17
Imagen 22 – Sub estructura del puente – Perspectiva.....	18
Imagen 23 – Margen derecha del Puente Huacas.....	18
Imagen 24 – Ensayo granulométrico en laboratorio UPAO.	19
Imagen 25 – Estimación de caudal para un periodo de retorno de 500 años.....	25
Imagen 26 – Longitud del río.....	25
Imagen 27 – Valores del coeficiente de rugosidad	26
Imagen 28 – Cálculo del tirante Normal	27
Imagen 29 – Nomenclatura típica para el cálculo de la socavación.	32
Imagen 30 – Socavación de fondo.	33
Imagen 31 – Comportamiento del flujo en una pila cilíndrica	34
Imagen 32 – Zonas de la sección transversal del cauce.....	35
Imagen 33 – Mapeo con el Dron Topográfico – Mavic 2 Pro	41
Imagen 34 – Vista en Planta – Fotografía ortogonal del terreno levantado mediante drones.....	42
Imagen 35 – Perfil longitudinal – Topografía desde prog. 0+000 – hasta 2 + 227.00	42
Imagen 36 – Vista en planta – Modelo digital de elevaciones	43
Imagen 37 – Posiciones de las cámara y solapamiento de imágenes.	43
Imagen 38 – Vista en perspectiva – Tramo 1km aguas abajo del “Puente Huacas”	44

Imagen 39 – Mapa de localización de las capturas del Puente	44
Imagen 40 – Vista en perspectiva del levantamiento – “Puente Huacas”	45
Imagen 41 – Vista en perspectiva del levantamiento – “Puente Huacas”	45
Imagen 42 – Ubicación de la estación Quirihuac	46
Imagen 43 – Información de la estación Quirihuac	46
Imagen 44 – Distribución Normal – Hidroesta.....	62
Imagen 45 – Caudal de diseño para T=500 años	63
Imagen 46 – Software “HEC-RAS” interfaz “Geometric Data”	64
Imagen 47 – Características del Puente.....	65
Imagen 48 – Configuración para el modelo hidráulico del cauce	65
Imagen 49 – Planicie inundable	66
Imagen 50– Longitud de Galibo	66
Imagen 51 – Nivel del agua para un T=500 años.....	67
Imagen 52 – Niveles de Socavación Local	67
Imagen 53 – Resultados de Socavación General y Localizada	68
Imagen 54 – Resumen de Resultados de Socavación Localizada	68
Imagen 55 – Creación del ráster para el procesamiento de la data topográfica	69
Imagen 56 – Creación de las curvas de nivel para la representación gráfica del relieve..	69
Imagen 57 – Inserción de las estructuras del puente (Pilares y estribos) dentro del raster	70
Imagen 58 – Georreferenciación de la orto imagen.....	70
Imagen 59 – Asignación de la superficie digital de elevaciones al modelo hidráulico	71
Imagen 60 – La superficie ya creada dentro de la interfaz de IBER.....	71
Imagen 61 – Representación de los elementos rígidos (Pilares y estribos).....	72
Imagen 62 – Sectorización del uso de suelos para el modelo hidráulico	73
Imagen 63 – Clasificación del uso de suelos para el modelo numérico	73
Imagen 64 – Valores del coeficiente de rugosidad “n” - generalmente recomendados para el diseño – Asfalto.....	77
Imagen 65 – Configuración de la asignación de rugosidad	77
Imagen 66 – Asignación de los valores de rugosidad en función a los mapas de uso de suelo	78
Imagen 67 – Socavación local en los pilares y estribos del Puente Huacas – Vista en planta	78
Imagen 68 – Socavación del primer pilar de la margen izquierda del Puente	79
Imagen 69 – Socavación del segundo y tercer pilar desde el margen izquierdo – Puente Huacas.....	79
Imagen 70 – Socavación del cuarto pilar y el estribo de la margen derecha – Puente Huacas.....	80
Imagen 71 – Levantamiento de la estructura del puente mediante fotogrametría con Drones.	81

Imagen 72 – Creación de un archivo digital en 3 Dimensiones con la geometría del Puente.....	81
Imagen 73 – Vista en perfil de la geometría sólida del Puente.....	82
Imagen 74 – Asignación y creación de la superficie del terreno conteniendo la sub estructura del Puente.....	82
Imagen 75 – Formato tridimensional de la estructura del puente y el terreno del cauce del rio moche	83
Imagen 76 – Ingreso de los datos del sedimento en función a los diámetros característicos	83
Imagen 77 – Magnitud de la socavación alrededor de la cimentación expuesta en el segundo pilar desde la margen derecha y tercer pilar desde la margen izquierda – Profundidad socavada de 2.18m	84
Imagen 78 – Magnitud de la socavación alrededor de la cimentación expuesta en el tercer pilar desde la margen derecha y segundo pilar desde la margen izquierda – Profundidad socavada de 2.96 m.....	84
Imagen 79 – Corte transversal del tercer pilar – Vista en perspectiva	85

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Tabla de pesos y porcentajes retenidos – Muestra 01	20
Tabla 2 – Tabla de pesos y porcentajes retenidos – Muestra 02	20
Tabla 3 – Estación Quirihuac	24
Tabla 4 – Operacionalización de la Variable.....	38
Tabla 5 – Información de caudales – Estación hidrométrica Quirihuac.....	48
Tabla 6 – Modelo de Distribución Normal.....	50
Tabla 7 – Modelo de Distribución Gumbel.....	52
Tabla 8 – Modelo de Distribución Log. Gamma 3P.....	54
Tabla 9 – Modelo de Distribución Log. Normal 3P.....	55
Tabla 10 – Modelo de Distribución Log. Gumbel.....	57
Tabla 11 – Modelo de Distribución Log. Normal 2P.....	59
Tabla 12 – Modelo de Distribución Gamma 2P.	60
Tabla 13 – Pruebas de Bondad.	61
Tabla 14 – Parámetros de Distribución Normal.	62
Tabla 15– Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad mediante la ecuación de COWAN.....	74
Tabla 16 – Rugosidad para el cultivo	75
Tabla 17 – Rugosidad para uso residencial	75
Tabla 18 – Rugosidad para los arenales.....	75
Tabla 19 – Rugosidad para el cauce	76
Tabla 20 – Rugosidad para el cauce	76

INDICE DE FORMULAS

Fórmula 1 – Diámetros característicos	21
Fórmula 2 – Coeficiente de Curvatura	22
Fórmula 3 – Coeficiente de Uniformidad	22
Fórmula 4 – Profundidad de SocavaciónFuente: (Ochoa Rubio 2. , 2015)	28
Fórmula 5 – Caudal UnitarioFuente: (Ochoa Rubio 2. , 2015)	28
Fórmula 6 – Velocidad Media y Velocidad CríticaFuente: (Ochoa Rubio, 2013)	35
Fórmula 7 – Velocidad Media y Velocidad CríticaFuente: (Ochoa Rubio, 2013)	35
Fórmula 8 – Método de COWAN	74

INDICE DE GRAFICOS

Grafico 1 – Curva granulométrica- MUESTRA 01 Fuente: Autoría propia	21
Grafico 2 – Curva granulométrica- MUESTRA 02	23

CAPITULO I: INTRODUCCION

Desde que la historia como inicia con el descubrimiento de la herramienta como medio de ayuda para el hombre en el quehacer cotidiano, esta se vuelve aún mucho más indispensable y se sabe que hasta el día de hoy la herramienta es tan complementaria para el ser humano como el respirar aire fresco; este descubrimiento le ha abierto paso a través de su dominio y prevalencia en la naturaleza y contra aquello que obstaculice su paso.

Desde antes de volverse un ser seminómada es decir, casi sedentario, viviendo siempre al pie de cauces de ríos, empezó a dejar de ver a estos canales de agua trazados por la naturaleza como un obstáculo y más bien los empezó a ver como una oportunidad, tanto como para establecerse al pie de ellos, así como también para atravesarlos y llegar a otros lugares muy poco explorados y ricos en árboles frutales y otros tipos de vegetales que iban a favorecer su alimentación; nosotros en base a las investigaciones realizadas de manera muy general, suponemos que para el ser humano desde que empezó su caminata a través del ancho mundo, cruzaba ya los cauces buscando siempre partes poco profundas para evitar ser arrastrados por la corriente.

CAPITULO II: PROBLEMA DE INVESTIGACION

2.1. Realidad Problemática



*Imagen 1– Rio Sedimentado (Perú)
Fuente: Google Earth*

El rio mostrado en la Imagen superior, nos permite apreciar un rio sedimentado, con pequeñas formaciones de tierra o islotes a lo largo del cauce, en el cual nos podemos imaginar que el ser humano para cruzar estos ríos, además de buscar zonas poco profundas, también buscaría sectores en el rio en la que proliferen este tipo de morfologías, lo cual les facilitaría mucho llegar a la otra orilla sin perder la vida en el intento, podríamos nosotros creer que este tipo de formaciones en el cauce serían los primeros puentes primitivos de la historia, ya que se asemejan mucho a pequeñas mesetas cuya función que se les atribuyen es acortar el camino para cruzar un cauce de gran o regular magnitud.

Por otro lado, se sabe que el ser humano se inspira en la naturaleza y a la que llama su gran sabiduría la cual está llena de eventos probabilísticos y aleatorios o conocidos coloquialmente como “casualidades”, como en este caso el toparse con lechos arenados “fáciles de cruzar” y posiblemente ríos que ya no tenían estos islotes de arena, si no de piedra, lo cual sería aún más beneficioso.



*Imagen 2 – Río de Montaña Pedregoso (Campo Flor del Lago, Alemania)
Fuente: Panoramio de Google*

En la imagen superior, apreciamos un río con cauce pedregoso, muy inspirador para cruzarlo a pesar de ser un río de montaña, cabe resaltar que a través de millones de años el caudal circundante ha venido arrastrando gigantescas piezas de roca agrupándolas en ciertos sectores del río, lo cual representa una formación de mesetas o pequeños pilares naturales y en su gran mayoría muy estables debido a su imponente peso, podemos ver también que en algunos de ellos la maleza crece encima haciendo de la piedra una superficie mucho más rugosa, y adecuada para no resbalar al emplearlas como medio de paso de una ribera a otra, estas formaciones está demás decir que pudieron ser la inspiración para los primeros puentes que construyó el ser humano, muchos de ellos de hecho quizá no perduren hasta nuestros días, sin embargo la técnica ha ido evolucionando con el paso de los siglos, especialmente la técnica de colocación de pilares de piedra en el cauce.

Es importante recalcar que en los pueblos asentados muchas veces no se tenía o no se contaba con la suerte de formaciones rocosas que permitan atravesarlo, por lo que suponemos que el nómada o sedentario, buscaba estas morfologías en el río, rodeándolo, tanto aguas arriba como aguas abajo, y puesto ya que contaba con el uso de la herramienta como su aliado, con el tiempo, como nos ha demostrado la historia ha hecho uso de ella para crear sus propios emplazamientos rocosos que le permitan cruzar el cauce al pie de sus lugares donde habitaba.

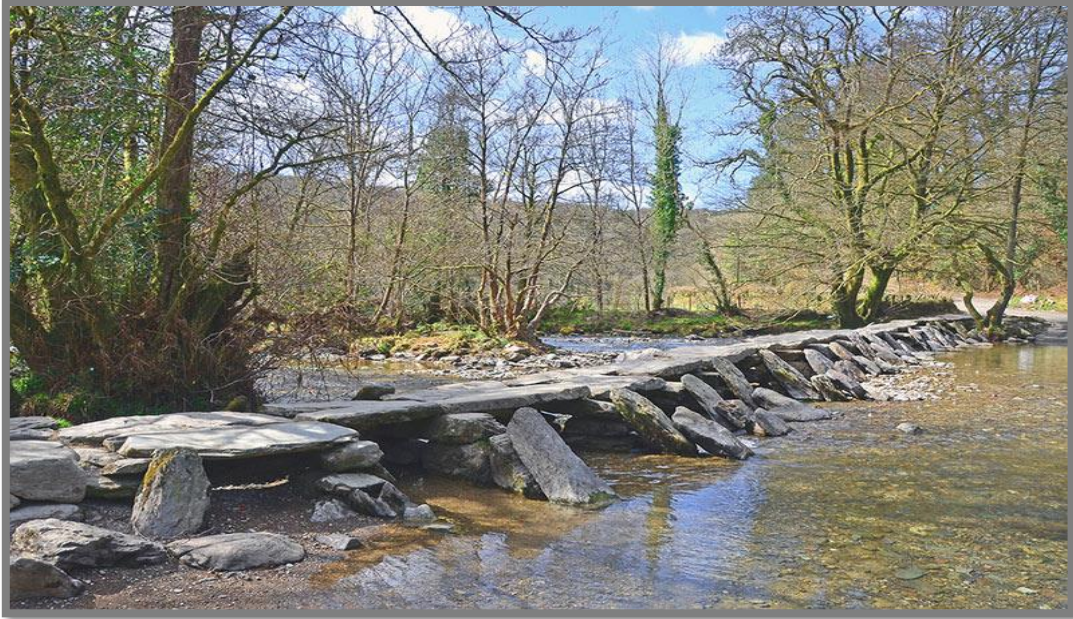


Imagen 3 – El Antiguo Puente de Piedra Tarr Steps (Reino Unido)

Fuente: Panorámico de Google

Uno de los ejemplos que pudo haber nacido producto de la inspiración en las mesetas de piedra es el puente Tarr Steps ubicado en el Parque Nacional Exmoor, en Somerset, emplazado en el río Barle. Que a su vez es el puente de piedra más largo en Gran Bretaña, cuenta con 17 vanos y 55 metros de envergadura (Manterola, 2005, pág. 15). La edad de Tarr Steps no se conoce con exactitud, pero numerosas investigaciones le ubican en la Edad de Bronce, aunque hay quienes lo datan alrededor del año 1400 antes de Cristo (Manterola, 2005, pág. 17).



*Imagen 4 – Tronco Atravesado en Cauce (Riachuelo – Minesota – USA)
Fuente: Panoramio de Google*

Este caso en particular, puede representar una de las formas más primitivas mediante las cuales se puede haber valido el hombre en su etapa primitiva para cruzar algunos cauces de corta envergadura en cuanto al ancho de su encausamiento, y lo que, a su vez, puede haber servido de inspiración en los que a nuestros días sería un puente losa o sin pilares, con estribos únicamente, no obstante, en esta representación rudimentaria solamente podría darse uso de manera peatonal.



*Imagen 5 – Puente Tronco en los Alpes Franceses (Vallorcine)
Fuente: Commons Attribution (Media commons)*

Con el paso de los siglos mucho más tarde, se mejoró la versión del diseño para el emplazamiento de los puentes de manera empírica, aquí por ejemplo tenemos un puente de uso peatonal en las montañas, en Vallorcine, Francia. Básicamente es un puente hecho a base de troncos que tiene pilares de piedra y un sendero nivelado con tablones, no se conoce con exactitud su datación, pero es posible que sea en los primeros siglos de la edad antigua, no obstante, seguramente ha sido remodelado con el paso de los años hasta alcanzar su diseño actual, puesto que al parecer sigue en actividad, normalmente este tipo de puentes son sugeridos en sectores estrechos de cauces no muy profundos.

Este tipo de estructura, hoy en día se asemeja mucho a un puente losa, el cual consta de un tablero apoyado en ambos extremos libremente, restringido en X; Y en planta y sin rotación en el eje central Z, en términos técnicos hemos descrito de manera visual, muy general, sin embargo, el comportamiento de este tipo de estructura es mucho más complejo, tal vez un poco costoso pero las ventajas radican que se pueden colocar en ríos con tendencia a erosión fuerte en su fondo, normalmente riachuelos “jóvenes” como se le conocen de acuerdo al libro de Morfología fluvial. (Vide Martín, 1997, pág. 27).



*Imagen 6 – Tramo Meándrico en Rio
Fuente: (Franco & Scacchi, 2001, pág. 53)*

En las secciones meándricas resulta complicado proyectar y construir un puente sin el adecuado estudio del comportamiento hidrodinámico de dicha sección, de hecho, debido al crecimiento de forma horizontal y desplazamiento de los meandros de un río, resulta poco práctico emplazar cualquier estructura hidráulica

en él sin considerar las posibles patologías que tendrán a desarrollarse y presentarse con el paso de los años, reduciendo así la vida útil de la estructura, o afectando su desempeño y estabilidad estructural, en este problema nos enfocaremos para la evaluación de un puente ya construido y de manera particular crearemos escenarios para así mediante la evaluación de su interacción con el cauce frente a máximas avenidas nos permita determinar posibles soluciones para prevenir el colapso de la estructura y preservar su integridad.



*Imagen 7– Socavación en Pilar Puente Pescadero, Santander, Colombia.
Fuente: (Castellanos Rangel, 2016, pág. 36)*

Debido a la acción del caudal circundante, la velocidad a la que este transita por el cauce del río y la acción de la gravedad debido a la inclinación de las pendientes, se produce lo que vemos en la imagen superior, que no es más que un desgaste debido a la abrasión del fondo y lo que esto genera es la exposición de la cimentación de los pilares del puente, este caso en particular se desarrolla en el puente Pescadero, ubicado en Santander, Colombia, que representa un caso poco ortodoxo pero la patología es frecuente, sumado a esto también podemos establecer que este fenómeno se desarrolla en cualquier sector o localización a lo largo de un río donde un puente que se ha emplazado represente un obstáculo que afecte directamente el desenvolvimiento natural del cauce, y altere su morfología.

Enfocándonos en problemas como el expuesto anteriormente y añadiendo que la peligrosidad y tendencia a la exposición de la cimentación de los pilares de un puente como producto de la abrasión del fondo del lecho del río se da bajo condiciones en las cuales el caudal tiene un incremento importante con respecto al caudal que transita continuamente y que además esta condición tiende a ser mucho más desfavorable cuando el emplazamiento del puente llega a hacerse en un meandro, ya que esto obliga al río a mantener su curso y de alguna manera evitar el desplazamiento lateral, esto requiere un proceso de un estudio hidráulico previo para así tomar las medidas necesarias, es por eso que nosotros nos hemos enfocado en un problema presentado a nivel local, en el cauce del río moche, sector campiña alta, en el puente denominado “Puente Huacas” el cual representa la casuística mencionada anteriormente y que será punto de interés y objeto de estudio de nuestra investigación, para lo cual, líneas más abajo empezaremos a describir y así justificar el hecho que amerite nuestra atención por ser una estructura emplazada en la cresta senoidal de un meandro.

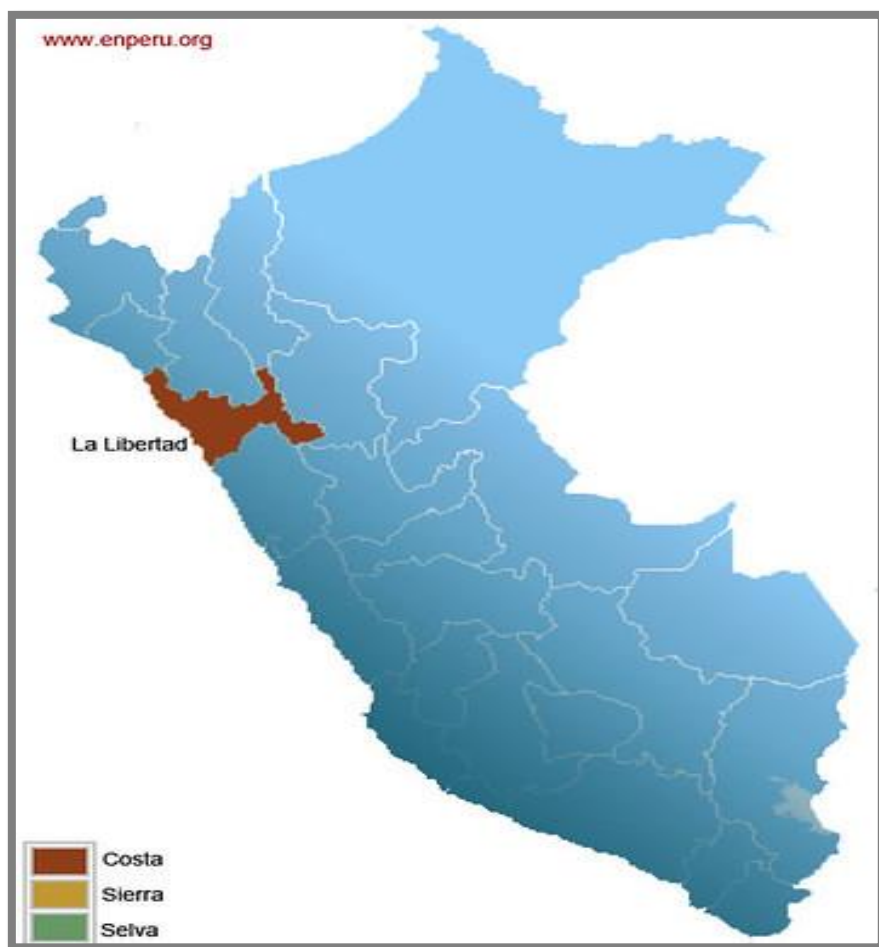


Imagen 8 – Ubicación – Departamento de La Libertad
Fuente: enperú.org

La Libertad se ubica en la costa norte del Perú. Por el norte limita con la Región Lambayeque; por el sur con la Región Ancash y con la Región Huánuco; por el este, con la Región San Martín y la Región Cajamarca; por el oeste con el Mar de Grau.



Imagen 9 – Ubicación – Provincia de Trujillo
Fuente: Mapa de Trujillo blog spot

La provincia de Trujillo se encuentra ubicada en la parte centro - occidental del departamento de La Libertad, es una de las 12 provincias de la región La Libertad, la Provincia de Trujillo cuenta con 11 distritos, que son los siguientes: Trujillo, El Porvenir, Florencia de Mora, Huanchaco, La Esperanza, Laredo, Moche, Poroto, Salaverry, Simbal y Víctor Larco Herrera, nos enfocaremos en el distrito de Moche.

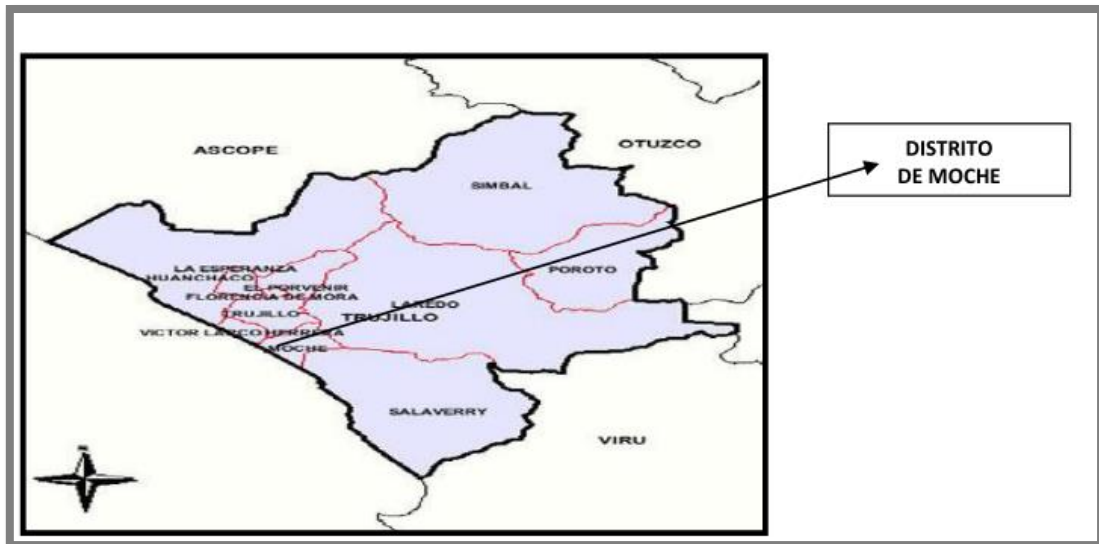


Imagen 10 – Ubicación del Distrito de Moche
Fuente: Google Maps

El Distrito de Moche, ocupa una superficie estimada de 29.27Km² aproximadamente (Fuente: Municipalidad Distrital de Moche) y los Límites del Distrito de Moche son:

- **Por el Norte:** Con los Distritos de Víctor Larco y Trujillo.
- **Por el Este:** Con el Distrito de Laredo.
- **Por el Sur:** Con el Distrito de Salaverry.
- **Por el Oeste:** Con el Océano Pacífico.

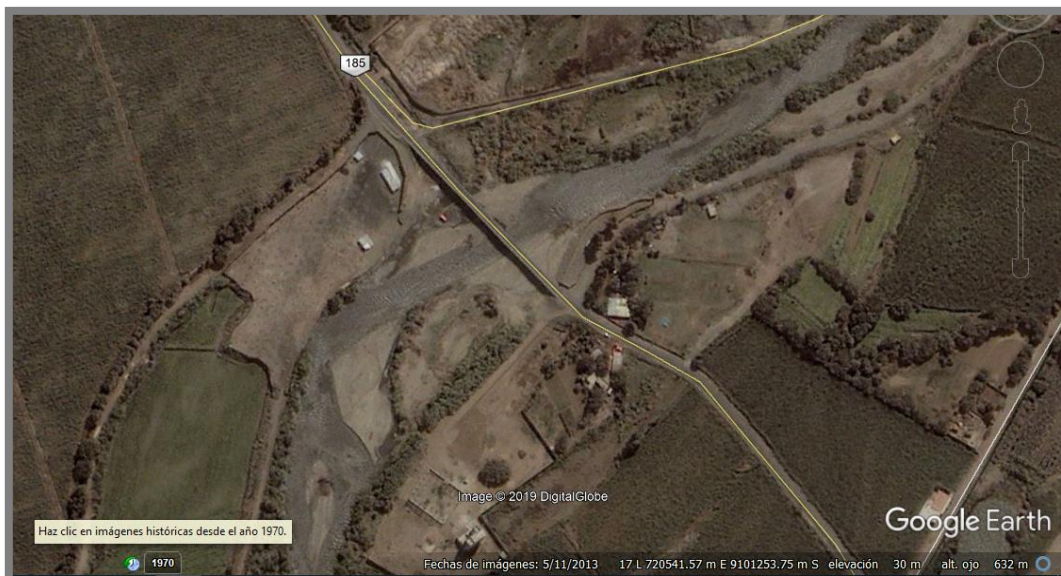
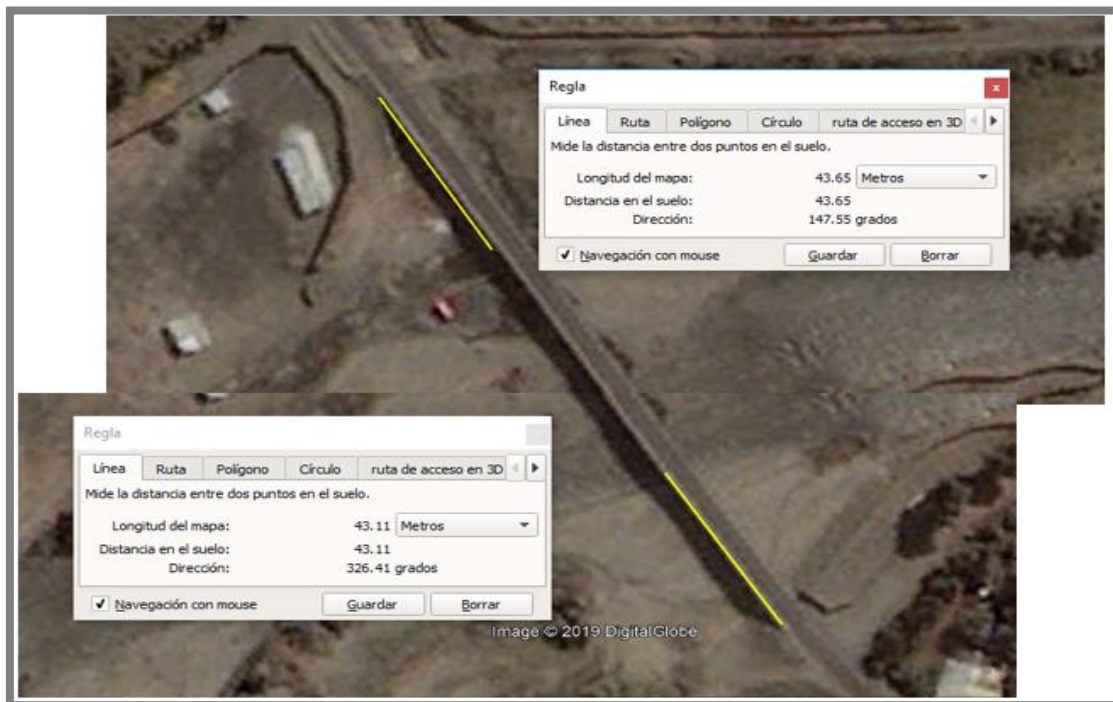


Imagen 11 – Vista en planta – Puente Huacas – Imagen satelital 11/05/13.
Fuente: Google Earth

El Puente Huacas tiene una longitud de 130m de envergadura y atraviesa el cauce del río moche de lado a lado, y como se puede verificar en la toma satelital de noviembre de 2013, recién culminado a fines de 2012 está emplazado justo en toda la cresta del meandro del río, cabe resaltar que dichos meandros se forman siempre en lugares con suelos abundantes en material fino y además con muy baja pendiente longitudinal de acuerdo a lo descrito en (Vide Martín, 1997, pág. 41) podemos incluso describir un posible desplazamiento del cauce hacia a margen derecha, que se describe una curva relativamente pronunciada.



*Imagen 12 – Vista en planta – Puente Huacas – Imagen satelital 11/05/13.
Fuente: Google Earth*

Sumado a esto, podemos apreciar que además la distancia medida desde el inicio del puente al borde del cauce es casi simétrica 43.65m en la derecha y 43.11m en la izquierda, lo que nos indica una falta de criterio para el margen que no ha sido tomado en cuenta por los ingenieros proyectistas ante proceso de erosión natural de la ribera por la parte derecha, la cual debido al desplazamiento natural del meandro hubiera sido requerida de manera imprescindible.



*Imagen 13 – Vista en planta – Puente Huacas – Imagen satelital 12/02/14.
Fuente: Google Earth*

Ante lo expuesto anteriormente se pretendió corregir el curso del río y así desplazar el meandro hacia la izquierda, tal como muestra esta imagen captada por Google en febrero de 2014, incluso el terreno “ganado” se ha estado empleando como terreno con fines de cultivo desde la fecha.



*Imagen 14 – Vista en planta – Puente Huacas – Imagen satelital 06/05/15.
Fuente: Google Earth*

Sin embargo, en las imágenes satelitales de junio de 2015 se puede apreciar que nuevamente se ha desplazado el meandro hacia la derecha, como originalmente estaba el curso del cauce del río en dicho sector, lo que nos refleja una preocupante y alarmante situación que pone en peligro toda la sub estructura del sector derecho del puente, debido a una tendencia hacia la erosión lateral de la ribera.



*Imagen 15 – Vista en planta – Puente Huacas – Imagen satelital 31/03/17.
Fuente: Google Earth*

El fenómeno del niño costero en el año 2017 nos muestra un escenario mucho más desfavorable, el cual, de manera muy explícita mediante las imágenes tomadas en el mes de marzo del mismo año, nos refleja una erosión orientada hacia la margen izquierda, contrario a la dirección original del meandro, producto de las descolmataciones que ha sufrido el cauce con el paso del tiempo, que han sido esfuerzos por evitar el desplazamiento natural del río hacia la derecha y empujarlo a manera de contra flecha al margen izquierdo, poniéndolo en peligro debido a las fuerzas abrasivas del paso del agua, además se puede denotar que no se tiene control sobre el ancho estable de esta sección, puesto que sigue el meandro trazando una ruta ramificada hacia el sector derecho, no con mucha fuerza o remarcación si no con una invasión moderada del terreno que anteriormente ha sido ganado colocando material del mismo lecho en la ribera, cabe resaltar que estas zonas invadidas por el cauce son propiedades privadas, según lo pudimos corroborar en la visita de campo realizada al lugar en el que se desarrolla nuestra investigación.

A pesar de los esfuerzos por darle una contra flecha al meandro del cauce, la naturaleza nos pone a prueba y nos refleja a su paso que no hemos planteado una solución eficiente frente a la protección tanto de la ribera como de la estructura emplazada, esta última viene a ser nuestra prioridad, para la cual crearemos escenarios en los que someteremos el entorno descrito a cargas de agua importantes debido a máximas avenidas extraordinarias.



*Imagen 16 – Vista en perspectiva – Visita de campo a Puente Huacas.
Fuente: Autoría propia*

Hicimos una visita técnica al Puente Huacas con la finalidad de obtener un panorama mucho más reducido del problema al cual nos enfrentamos que es una posible erosión de la ribera o socavación de los pilares frente a condiciones de máximas avenidas, además de esto la visita nos sirvió para avalar las características de la estructura inferior del puente que consta con 4 pilares empotrados en el fondo del lecho, cuenta con 5 vanos y sus pilares están separados de entre 18.94m al inicio y 30.72m en los vanos centrales, esto fue corroborado mediante el empleo de instrumentos de medición como winchas y distanciómetro digital.



*Imagen 17 – Vista en perspectiva – Toma de medidas del tablero.
Fuente: Autoría propia*

Procedimos a tomar las dimensiones del tablero del puente, tales como el ancho total de 5.75 m, así como también el ancho de las bermas laterales de 0.85m cada una.



*Imagen 18 – Vista en perspectiva – Puente Huacas.
Fuente: Autoría propia*

Empezamos por recorrer la margen izquierda del Puente Huacas con la intención de localizar puntos estratégicos para la recolección de las muestras que serán de utilidad al realizar nuestro estudio de mecánica de suelos.



*Imagen 19 – Vista en Perspectiva – Limpieza de la zona de extracción.
Fuente: Autoría propia*

Una vez localizado un punto estratégico al pie de la ribera y junto al puente, procedemos a limpiar la zona con la finalidad de retirar vegetación y material orgánico que pueda contaminar la muestra, y así obtener una extracción de material sedimentario lo más limpio posible para su posterior análisis granulométrico y físico-mecánico en laboratorio.



*Imagen 20 – Toma de la muestra de material sedimentario
Fuente: Autoría propia*

Posterior a la limpieza realizada, procedemos a tomar un promedio de 8kg de muestra del material presente en la ribera del río que nos permitirá tener una idea más acertada sobre el tipo de finos que transporta este cauce, además el hecho de clasificar la granulometría de este material nos conllevará a lograr recrear el entorno mediante el empleo de un software de dinámica de fluidos computacional.



*Imagen 21 – Sub estructura del puente – Toma de medidas.
Fuente: Autoría propia*

Además de la toma de las muestras de material en la ribera del cauce, procedimos a realizar un levantamiento de la sub estructura del puente, con la finalidad de recrear dicha estructura mediante el empleo de un software CDF y evaluar su interacción con el cauce, para ello hicimos uso de una libreta de anotaciones como la que se muestra en la fotografía, una wincha de mano y un distanciómetro digital.

Con ello pudimos determinar la separación de los pilares, los primeros a 18.94m y los restantes a 30.72m de longitud, además identificamos y medimos vigas interiores, tanto longitudinales como transversales.



*Imagen 22 – Sub estructura del puente – Perspectiva.
Fuente: Autoría propia*

En la imagen superior podemos observar los detalles mencionados anteriormente, como lo son las vigas longitudinales que confinan la losa del puente, además el detalle de los estribos y las vigas transversales, que se encuentra la primera a 4.43m de longitud con respecto al estribo en la margen izquierda, y la separación interior de las vigas longitudinales tiene un total de 2.50 m.



*Imagen 23 – Margen derecha del Puente Huacas.
Fuente: Autoría propia*

Para terminar, también hicimos una visita del lado de la margen derecha del Puente Huacas, pero nos fue imposible acceder debido a que son terrenos privados y para ingresar se requiere posiblemente de un permiso del dueño, al cual no pudimos localizar, sin embargo, debido a que nuestra propuesta de investigación se encuentra debidamente fundamentada, podemos aseverar que debido a este hecho fortuito prescindiremos de la visita de esta margen, además por tratarse de la simetría del puente, las medidas restantes han sido determinadas mediante el criterio de AASHTO – HS 20 44 LOADING, tabla 4.7, contando con la longitud total de 130m indicada en el letrero del puente, además de fórmulas matemáticas sencillas.



*Imagen 24 – Ensayo granulométrico en laboratorio UPAO.
Fuente: Autoría propia*

Por último, realizamos el ensayo granulométrico de la muestra tomada en el cauce del río, para así determinar y clasificar el tipo de material de arrastre del cauce, obteniendo como resultado Arenas con bajos contenidos de arcillas y limos.

2.1.1. Estudio Granulométrico

N TAMIZ"	FAC MALLA mm	PESO PARCIAL	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
#5/8	12.7	0	-	0.0000	100.0000
#3/8	9.52	297.90	29.9277	29.9277	70.0723
4	4.75	158.70	15.9433	45.8710	54.1290
8	2.36	102.10	10.2572	56.1282	43.8718
10	2	26.00	2.6120	58.7402	41.2598
20	0.85	103.10	10.3576	69.0979	30.9021
30	0.5	52.10	5.2341	74.3319	25.6681
40	0.425	55.60	5.5857	79.9176	20.0824
50	0.3	122.70	12.3267	92.2443	7.7557
60	0.25	15.30	1.5371	93.7814	6.2186
80	0.18	40.10	4.0285	97.8099	2.1901
100	0.15	5.60	0.5626	98.3725	1.6275
200	0.075	11.50	1.1553	99.5278	0.4722
FONDO	0.0	4.70	0.4722	100.0000	0.0000
TOTAL		995.40	100.0000		

*Tabla 1 – Tabla de pesos y porcentajes retenidos – Muestra 01
Fuente: Autoría propia*

N TAMIZ"	FAC MALLA mm	PESO PARCIAL	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
#5/8	12.7	0	-	0.0000	100.0000
#3/8	9.52	14.00	1.4161	1.4161	98.5839
4	4.75	36.20	3.6617	5.0779	94.9221
8	2.36	66.10	6.6862	11.7641	88.2359
10	2	17.90	1.8106	13.5748	86.4252
20	0.85	66.20	6.6963	20.2711	79.7289
30	0.5	37.30	3.7730	24.0441	75.9559
40	0.425	67.90	6.8683	30.9124	69.0876
50	0.3	197.10	19.9373	50.8497	49.1503
60	0.25	213.80	21.6265	72.4762	27.5238
80	0.18	183.50	18.5616	91.0378	8.9622
100	0.15	30.00	3.0346	94.0724	5.9276
200	0.075	33.80	3.4190	97.4914	2.5086
FONDO	0.0	24.80	2.5086	100.0000	0.0000
TOTAL		988.60	100.0000		

*Tabla 2 – Tabla de pesos y porcentajes retenidos – Muestra 02
Fuente: Autoría propia*

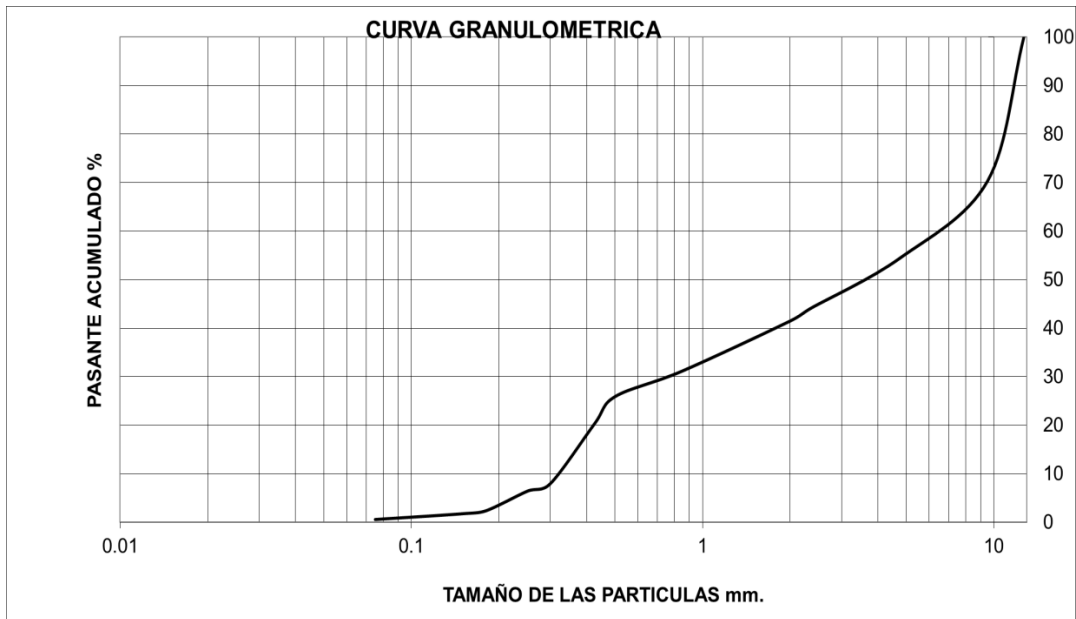


Grafico 1 – Curva granulométrica- MUESTRA 01
Fuente: Autoría propia

Mediante las fórmulas:

$$DX = D2 - \left(\frac{\%2 - X}{\%2 - \%1} \right) x (D2 - D1)$$

Fórmula 1 – Diámetros característicos
Fuente: (Duque Escobar & Escobar Potes, 2002)

Procedemos a encontrar los diámetros característicos, teniendo en cuenta la fórmula citada en el párrafo anterior:

$$D10 = 0.425 - \left(\frac{20.08 - 10}{20.08 - 7.75} \right) x (0.425 - 0.3)$$

$$\mathbf{D10 = 0.32}$$

$$D30 = 0.85 - \left(\frac{30.90 - 30}{30.90 - 25.66} \right) x (0.85 - 0.5)$$

$$\mathbf{D30 = 0.79}$$

$$D50 = 4.75 - \left(\frac{54.13 - 50}{54.13 - 43.87} \right) x (4.75 - 2.36)$$

$$\mathbf{D50 = 3.79}$$

$$D_{60} = 9.52 - \left(\frac{70.07 - 60}{70.07 - 54.12} \right) \times (9.52 - 4.75)$$

$$\mathbf{D_{60} = 6.51}$$

Con los diámetros característicos procederemos a evaluar los parámetros de Coeficiente de curvatura y coeficiente de uniformidad mediante las fórmulas:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}}$$

Fórmula 2 – Coeficiente de Curvatura
Fuente: (Duque Escobar & Escobar Potes, 2002)

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Fórmula 3 – Coeficiente de Uniformidad
Fuente: (Duque Escobar & Escobar Potes, 2002)

Coeficiente de uniformidad:

$$C_u = \frac{6.51}{0.32}$$

$$\mathbf{C_u = 20.15}$$

Coeficiente de curvatura:

$$C_c = \frac{0.79^2}{0.32 * 6.51}$$

$$\mathbf{C_c = 0.296}$$

En función a lo determinado con anterioridad, definiremos en la nomenclatura SUCS el tipo de suelo que tenemos:

SP: Arenas pobremente gradadas con bajo contenido de arcillas y limos.

Siguiendo este procedimiento, realizamos los cálculos para la segunda muestra, de la cual adjuntamos líneas abajo la curva granulométrica y los resultados de D10, D30, D60.

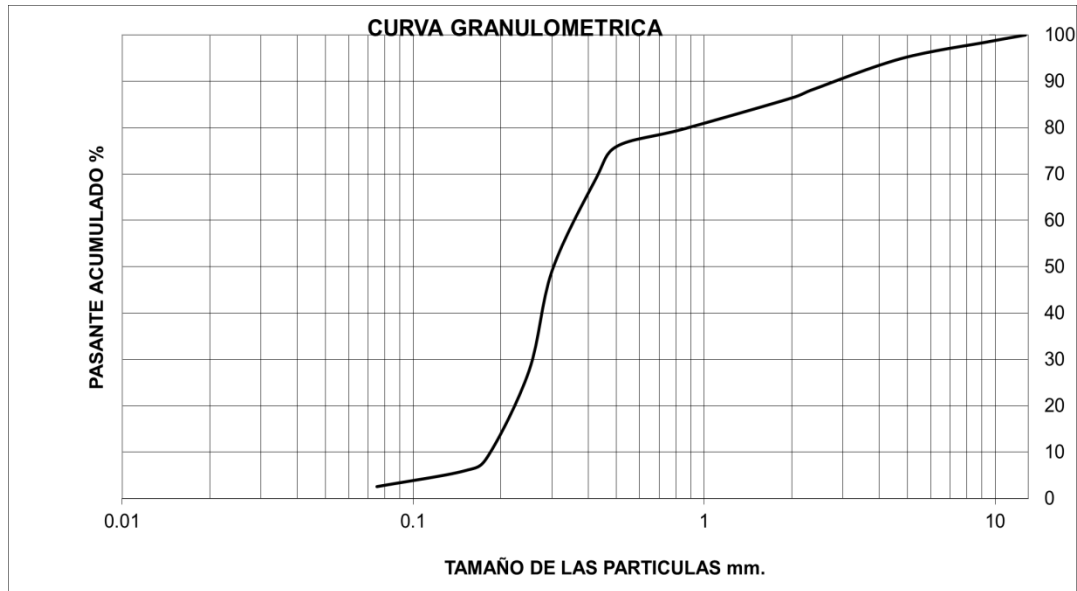


Gráfico 2 – Curva granulométrica- MUESTRA 02
Fuente: Autoría propia

Diámetros Característicos:

D10 = 0.184

D30 = 0.256

D50 = 0.305

D60 = 0.368

Coefficiente de uniformidad:

Cu= 2.00

Coefficiente de curvatura:

Cc= 0.97

Clasificación SUCS: SP Arenas pobremente gradadas con bajo contenido de arcillas y limos.

2.1.2. Estimación del Caudal

PROYECTO ESPECIAL CHAVIMOCHIC													
ESTACION	QUIRIHUAC												
Máx. de VALOR	Etiquetas de columna ▾												
Etiquetas de fila ▾	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Max. Caudal Ins (m3/s)
2013	8	52.2	130	26.96	10	3	0.3	0.15	0.1	9.76	3.42	8.2	130
2014	15	42.5	67.2	72.5	46.5	3.8	0.3	0.2	0.1	3	15	25	72.5
2015	80	80	225	56	25.2	6	0.4	0.05	0.05	1.5	18	38.5	225
2016	26.3	41.3	51.3	53.02	8.68	0.69	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	53.02
2017	18.5	22.9	370	111.2	32.5	6.8	1	0.6	0.8	1.5	1	9	370
2018	12.6	25	12.8	34.4	36.3	10.2	0.4	0.25	0.1	0.05	0.85	23.5	36.3
2019	4.5	42.8	63.1	49.5	26.8	2.8	0.2	0.04					63.1
Max. Caudal Ins (m:	80	80	370	111.2	46.5	10.2	1	0.6	0.8	9.76	18	38.5	370

*Tabla 3 – Estación Quirihuac
Fuente: Proyecto especial CHAVIMOCHIC*

Del Proyecto especial Chavimochic, publicado a través de la Web de la autoridad nacional del agua, obtuvimos un registro de caudales instantáneos en los últimos 7 años, no obstante, es imperativo recalcar que estos datos posiblemente no sean suficientes para estimar el caudal para una máxima avenida en un T= 500 Años, sin embargo, hasta no extender la investigación en el desarrollo de la tesis, contamos con esta información adjunta en el cuadro superior.

Aclaremos que consideramos dicho periodo de retorno, porque así son las exigencias del Manual de hidrología, Hidráulica y drenaje en cuanto a socavación en puentes.

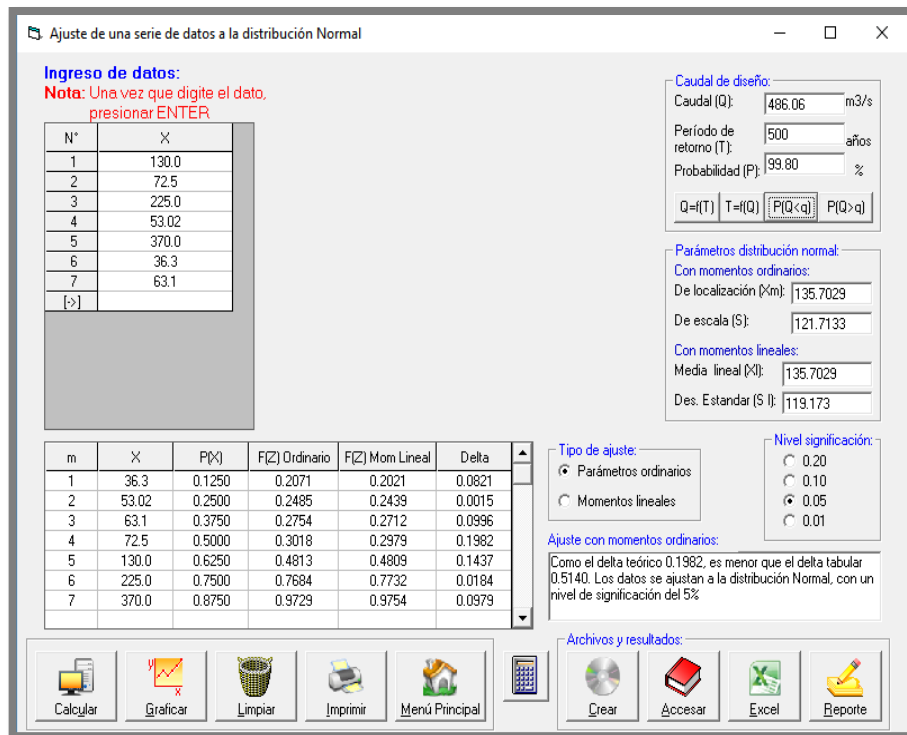


Imagen 25 – Estimación de caudal para un periodo de retorno de 500 años
 Fuente: Elaboración Propia

Ajustando los datos a una distribución Normal, podemos estimar el caudal para el Periodo de retorno de 500 años, que nos arroja un resultado de 486.06 m³/s.

2.1.3. Características Hidráulicas del Cauce



Imagen 26 – Longitud del río
 Fuente: Google Earth

Según lo que hemos podido apreciar en Google Earth y considerando 1km aguas arriba y 1km aguas abajo (2Km en total de topografía), identificamos un desnivel de 5m a lo largo de esa longitud, lo que nos da una pendiente aproximada de 0.5%, además de esto, medimos el ancho promedio del río, para el cual obtuvimos 80 metros.

	0.000	0.100	0.150
D. Corrientes naturales			
D-1. Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente < 100 pies)			
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

Imagen 27 – Valores del coeficiente de rugosidad
Fuente: (Chow, 1983)

Del libro (Hidráulica de canales Abiertos, 1983) de Ven te Chow, obtuvimos un estimado de la rugosidad, identificando nuestro cauce en el apartado de corrientes Naturales, como un río Limpio, serpenteante, con pozos y bancos de arena, además conteniendo matorrales y piedras, a un nivel medio nos arroja un valor de 0.045 para el coeficiente de rugosidad.

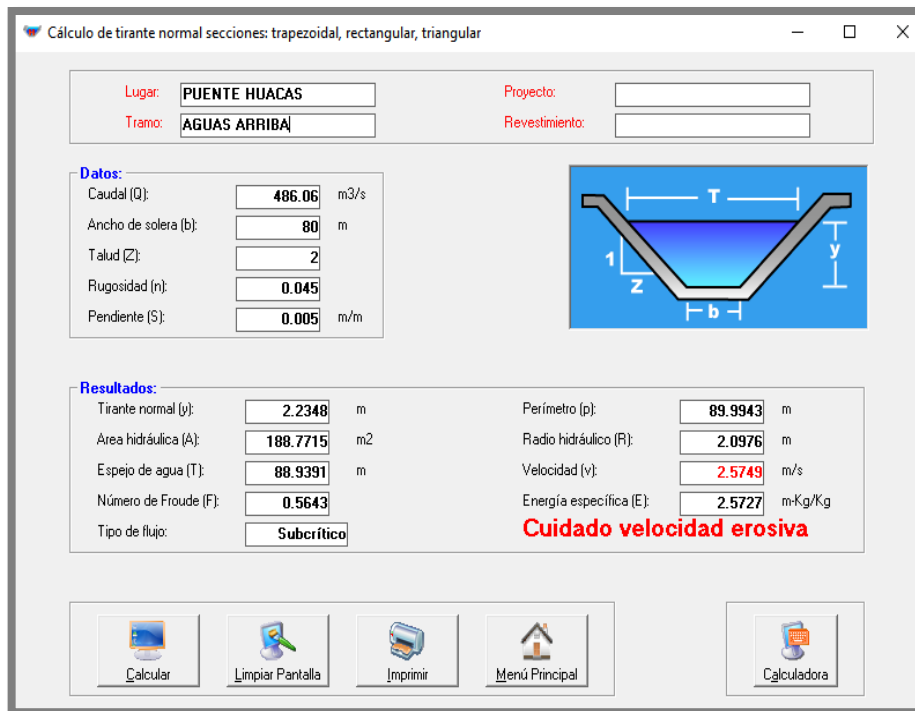


Imagen 28 – Cálculo del tirante Normal
Fuente: Autoría Propia

Empleando el software HCanales, hemos podido estimar el tirante y demás características hidráulicas del sector del cauce en estudio correspondiente al Puente Huacas.

2.1.4. Estimación de la Socavación en los Pilares

La sub estructura del Puente está conformada por sus pilares y sus estribos, sin embargo, hemos observado en campo que sus estribos se encuentran protegidos por una densa capa de material extraída del lecho del río, entonces nos enfocaremos en los pilares, para lo cual hemos creído pertinente emplear el método de Arunachalam.

$$d_s = 1.334q^{2/3} \left[1.95 \left(\frac{1.334q^{2/3}}{a} \right)^{-1/6} - 1 \right]$$

Fórmula 4 – Profundidad de Socavación
Fuente: (Ochoa Rubio 2., 2015)

$$q = \frac{Q_d}{A}$$

Fórmula 5 – Caudal Unitario
Fuente: (Ochoa Rubio 2., 2015)

Siendo:

Caudal unitario:

$$q = \frac{486.06 \text{ m}^3/\text{s}}{80 \text{ m}} = 6.07 \text{ [m}^3/\text{s-m]}$$

Teniendo en cuenta un ancho de 80 m aproximadamente en el cauce aguas arriba del Puente.

Ancho de los pilares:

$$a = 1.80 \text{ [m]}$$

Profundidad de socavación:

$$d_s = 3.01 \text{ [m]}$$

2.2. Formulación del Problema

2.2.1. Problema General

- ¿Cuál es la socavación en la sub estructura del Puente Huacas?

2.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuál es el caudal de máxima avenida para un periodo de retorno de 500 años?
- ¿Cuál es el tirante del cauce del rio moche en emplazamiento del Puente Huacas?
- ¿Cuál es el régimen de flujo del rio moche en el sector del Puente Huacas?
- ¿Cuál es la velocidad máxima del rio moche en el sector del Puente Huacas?
- ¿Cuál es el diámetro Característico d50 del material del lecho del rio?
- ¿Cuál es el ancho de los pilares del puente?
- ¿Cuál es el caudal unitario aguas arriba del Puente?
- ¿Cuál es la profundidad de socavación local en los pilares del Puente Huacas?

2.3. Objetivos de la Investigacion

2.3.1. Objetivo General

- Estimar la socavación del cauce del rio moche en el emplazamiento del Puente Huacas, La Libertad 2019.

2.3.2. Objetivos Especificos

- Elaborar el modelo digital del cauce del rio moche en el emplazamiento del Puente Huacas 1 km aguas arriba y 1 km aguas abajo.
- Calcular el diámetro característico (D50) del lecho del cauce del rio moche en el emplazamiento del Puente Huacas.
- Estimar el caudal correspondiente a la avenida con periodo de retorno de 500 años.
- Simular unidimensionalmente el comportamiento hidráulico del flujo en el cauce del rio moche en el emplazamiento del Puente Huacas, 1 km aguas arriba y 1 km aguas abajo.

- Simular bidimensionalmente el comportamiento hidráulico del flujo en el cauce del río Moche en el emplazamiento del Puente Huacas, 1 km aguas arriba y 1 km aguas abajo.
- Simular tridimensionalmente el comportamiento hidráulico del flujo en el cauce del río Moche en el emplazamiento del Puente Huacas, 1 km aguas arriba y 1 km aguas abajo.
- Estimar la socavación general en el cauce del río Moche en el emplazamiento del Puente Huacas, 1 km aguas arriba y 1 km aguas abajo.
- Estimar la socavación local del cauce del río Moche en el emplazamiento del Puente Huacas.

2.4. Justificación de Estudio

- Es imprescindible el hecho de que se elaboren modelos hidráulicos para la resolución de problemas de ingeniería, tan importantes como lo es la socavación de los pilares de un puente, especialmente uno emplazado en un sector meándrico, por lo tanto, nosotros consideramos más que importante elaborar un estudio que nos permita conocer los parámetros hidrodinámicos del cauce y estudiar su interacción con el puente en cuestión para así poder predecir futuros problemas que se puedan presentar en la sub estructura y plantear en función a estos resultados, posibles soluciones que ofrezcan controlar o solucionar a corto o largo plazo los problemas presentados debido al tránsito de máximas avenidas y la socavación o erosión obtenida como resultado de esta, para ello emplearemos modelos matemáticos de dinámica de fluidos computacional, los cuales a través de la resolución de complejas ecuaciones diferenciales nos permitirán recrear escenarios de simulación que representen la realidad de manera casi total del sector del cauce que es objeto de estudio de nuestra investigación.

CAPITULO III: MARCO DE REFERENCIA

3.1. Antecedentes de Estudio

- Tesis: (Enciso Navarro, 2015) "Estudio Hidráulico y Estimación de Socavación en el Puente Interconexión Muyurina- Ayacucho" Esta tesis tuvo como objetivo Fijar y Desarrollar los fundamentos para la estimación de socavación máxima, estimada a partir del desarrollo de modelos determinísticos para el puente Muyurina para lo cual al determinar y comparar los resultados de la sección del puente con el caudal del "Expediente Técnico", presenta una inundación y por lo tanto el sobre dimensionamiento del caudal que es de $460\text{m}^3/\text{s}$, A comparación del resultado del presente estudio que presenta un valor acorde a las sección del puente la cual se muestra en el la figura 3.18 de dicha tesis.
- Tesis: (Bedoya Cristancho, 2015): "Modelación numérica de la socavación local en los estribos del puente sobre el Río Sunuba según las características hidrodinámicas de la zona" El objetivo de esta investigación fue evaluar mediante un modelo numérico el fenómeno de socavación local en los estribos del puente sobre el Rio Sunuba teniendo en cuenta las características hidrodinámicas de la zona, los resultados obtenidos para el cálculo de la profundidad de socavación bajo el estribo derecho del puente sobre el río Sunuba no se pueden comparar, debido a que cada una de las metodologías utilizadas se basa en diferentes principios.
- Tesis: (Elbio Felipe, 2016): "Socavación producida por el río Huallaga al puente Colpa Alta en la provincia de Huánuco, utilizando los métodos de Artamanov, Straub y maza, en el HEC-RAS" Esta tesis tuvo como objetivo dar a conocer el procedimiento para realizar cálculos hidráulicos unidimensionales para un sistema natural (ríos) o para canales construidos, mediante la utilización del programa HEC-RAS 4.1.0, con el fin de plantear una alternativa de solución a problemas reales, basada en la simulación realizada.

3.2. Marco Teórico

3.2.1. Socavación

La socavación depende de muchos factores, que pueden agruparse en dos grupos principales: los factores geomorfológicos y los factores de transporte, además, la socavación puede clasificarse en dos tipos según su naturaleza: socavación general y socavación local. (Ochoa Rubio, 2013)

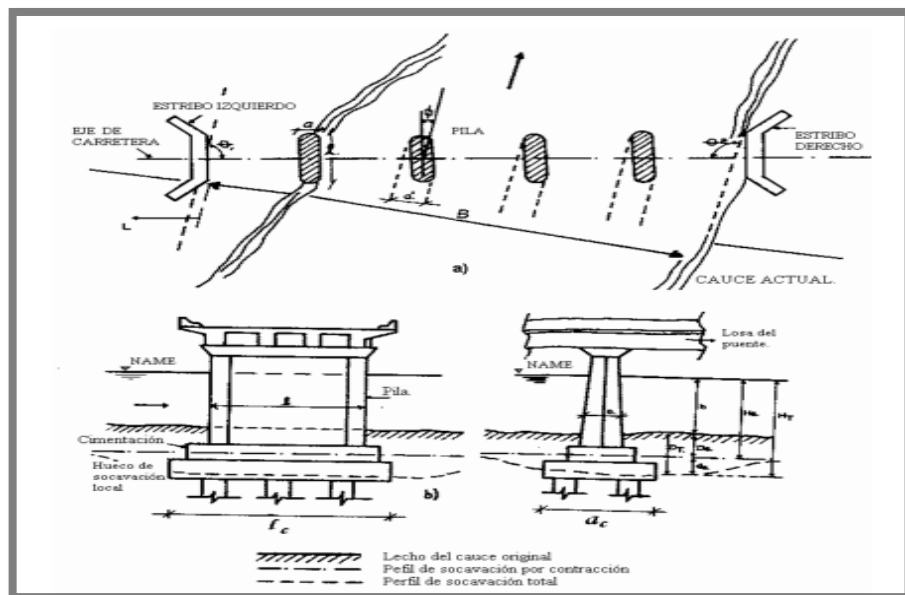


Imagen 29 – Nomenclatura típica para el cálculo de la socavación.
Fuente: Autoría propia

El cálculo de la profundidad de socavación en un puente ha inquietado a los diseñadores por mucho tiempo y ha atraído considerable interés por la investigación en este campo. El enfoque dado al cálculo de las máximas profundidades de socavación en la actualidad, parte de suponer que ésta depende de variables que caracterizan al flujo, al material del lecho en el cauce y a la geometría del puente, para terminar con una ecuación empírica de tipo determinístico.

3.2.2. Profundidad de Socavación

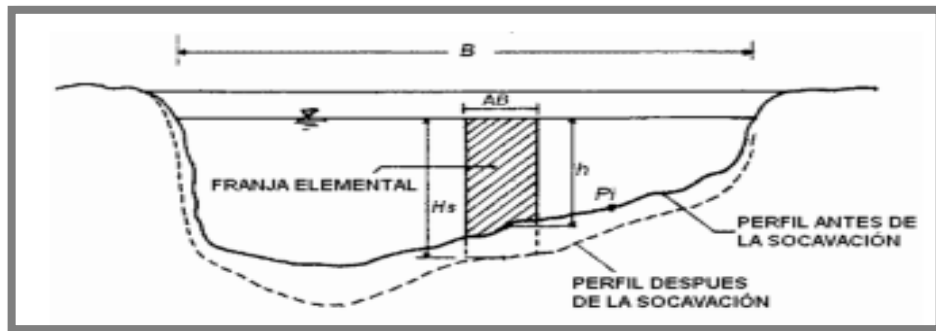


Imagen 30 – Socavación de fondo.
Fuente: (Ochoa Rubio, 2013)

Por otro lado, existen muchas ecuaciones para calcular la profundidad de socavación en pilas, pero, solo hay algunas aplicables para el caso de estribos y la socavación general por contracción u otras causas. Sin embargo, no existe una obvia similitud entre las ecuaciones, ni en su apariencia ni en sus resultados, además, se tiene poca verificación de su aplicabilidad con información de campo. Hay mucha incertidumbre sobre el uso de las ecuaciones y sobre cuál representa mejor las condiciones reales del río y del puente. Esto hace difícil establecer una sola ecuación que sea lo suficientemente precisa y segura para estimar las profundidades de socavación debido al alto grado de incertidumbre existente y a las muchas variables involucradas en el problema como son: flujo no permanente, caudal de diseño, geometría de las estructuras, turbulencia, tamaño y distribución del sedimento, características hidráulicas durante crecientes, ángulo de ataque del flujo, presencia de basuras y tiempo de duración de la creciente.

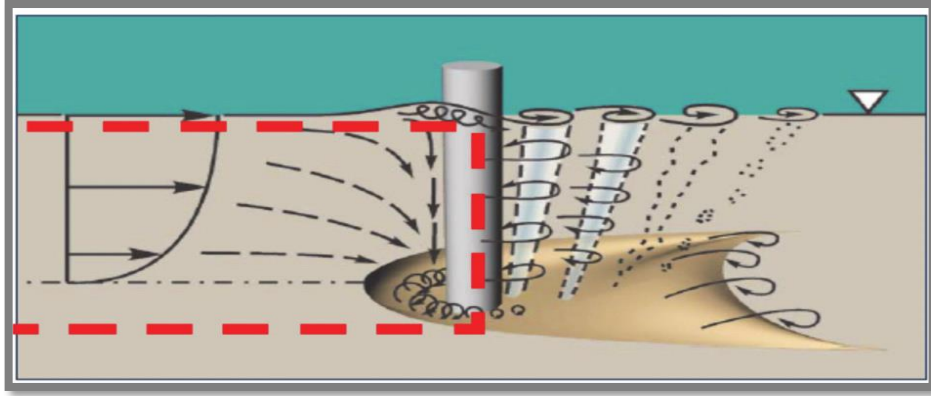


Imagen 31 – Comportamiento del flujo en una pila cilíndrica
 Fuente: (Ochoa Rubio 2., 2015, pág. 37)

3.2.3. Cálculo de la forma de Socavación

Algunos de los métodos para calcular profundidades locales de socavación requieren que se determine previamente la forma de socavación: en lecho móvil (vivo) o en agua clara. Para esto es necesario que se determine si el flujo en el cauce principal o en las laderas aguas arriba del puente está transportando o no materiales para luego escoger la ecuación que resulte apropiada. Las profundidades de socavación en lecho móvil pueden estar limitadas si existe una apreciable cantidad de partículas grandes en el fondo del cauce, caso en el cual es aconsejable usar también ecuaciones de socavación en agua clara y escoger la profundidad que resulte menor de las dos o la que a criterio resulte más representativa. Así mismo, ecuaciones de socavación en agua clara deben usarse si es poca la cantidad de material que es transportado desde aguas arriba a la contracción o si el material es muy fino como para ser retenido en el hueco de socavación. (Ochoa Rubio, 2013)

- Agua clara $V < V_c$ 3.6
- Lecho móvil $V > V_c$ 3.7

La velocidad media se determina según la ecuación de Manning y para calcular la velocidad crítica se usa cualquiera de las ecuaciones vistas en la Parte II, aunque es muy usual aplicar la siguiente ecuación recomendada en HEC-18.

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \dots\dots\dots 3.8$$

Fórmula 6 – Velocidad Media
Fuente: (Ochoa Rubio, 2013)

$$V_c = 6.19h^{1/6} D_{50}^{1/3} \dots\dots\dots 3.9$$

V_c = velocidad crítica por encima de la cual el material de lecho con tamaño D_{50} o más pequeño es transportado [m/s]
 h = profundidad del flujo [m]
 D_{50} = diámetro de la partícula de lecho en una mezcla cuyo 50% es menor [m]

Fórmula 7 – Velocidad Crítica
Fuente: (Ochoa Rubio, 2013)

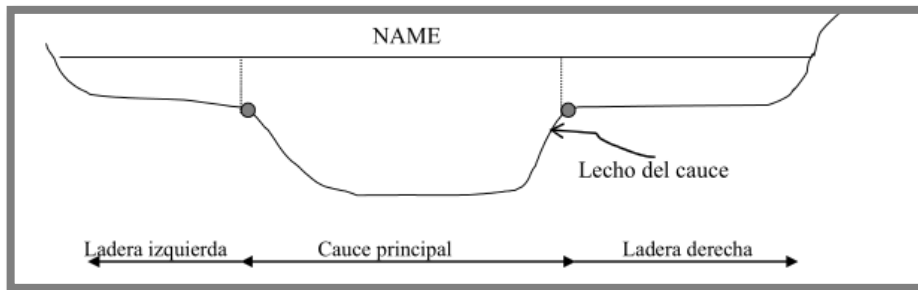


Imagen 32 – Zonas de la sección transversal del cauce.
Fuente: (Ochoa Rubio, 2013)

3.2.4. Socavación Localizada en Pilas Método de Arunachalam (1965, 1967)

Arunachalam realizó una modificación de la ecuación de Englis-Poona (1948) y propuso la siguiente expresión, (Breusers, H. N. C., Nicollet, G. y Shen, H. W. 1977).

$$d_s = 1.334q^{2/3} \left[1.95 \left(\frac{1.334q^{2/3}}{a} \right)^{-1/6} - 1 \right]$$

d_s = profundidad de socavación [m]

q = caudal unitario aguas arriba del puente [m³/s-m]

a = ancho de la pila [m]

3.3. Marco Conceptual

3.3.1. Sedimentos de Fondo

En el transporte de fondo que corresponde a material del lecho, o más bien al transporte de carga de fondo, se deben diferenciar los siguientes modos de transporte: Deslizante o resbalante, rodante, saltante. (García Gutiérrez., 2009).

3.3.2. Velocidad del flujo en el Lecho

La velocidad del flujo a nivel del lecho se establece en función de las condiciones de rugosidad con dos modelos, el de Rotta y el de Prandtl, a un nivel equivalente a un diámetro o a medio diámetro de partículas sobre el lecho, y a partir de los resultados se tiene disponible el valor de la constante “c”, (Ver ec. (10)) que es necesaria para poder evaluar todo el proceso. (García Gutiérrez., 2009).

3.3.3. Flujo Permanente

Flujo perenne o continuo, ocurre cuando las condiciones de borde se mantienen en el tiempo. La dirección y velocidad son constantes. (Duque Escobar & Escobar Potes, 2002)

3.3.4. Flujo Transigente

Cuando las condiciones de borde cambian en el tiempo y, por lo tanto, la velocidad y dirección también, aunque no siempre el caudal lo haga. (Duque Escobar & Escobar Potes, 2002)

3.4. Hipotesis

3.4.1. Hipotesis General

- La socavación en la sub estructura del Puente Huacas llega a ser de hasta 3.01 m de profundidad.

3.4.2. Hipotesis Específicas

- Empleando los datos de caudales instantáneos del proyecto especial Chavimochic obtuvimos un estimado de 486.06 m³/s para un T=500 años.
- El tirante del cauce del rio moche en emplazamiento del Puente Huacas es de 2.23m.
- El régimen de flujo del rio moche en el sector del Puente Huacas es Sub Crítico.
- La velocidad máxima del rio moche en el sector del Puente Huacas es de 2.57 m/s, presentándose como velocidad erosiva.
- El diámetro Característico d₅₀ del material del lecho del rio es de 0.305mm.
- El ancho de los pilares del puente es de 1.80 m.
- El caudal unitario aguas arriba del Puente es de 6.07 m³/s – m.
- La profundidad de socavación local en los pilares del Puente Huacas es de 3.01 m.

3.5. Variables: Operacionalización de la Variable

VARIABLE	DEFINICION CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA
X1= Máxima Avenida	Cantidad de masa del líquido que fluye a través de una sección de cauce en una fracción de tiempo	Máxima avenida en el río Moche	caudal	m ³ /s
Y2= Hidrodinámica	Parte de la hidráulica que se encarga de estudiar el comportamiento de los líquidos en movimiento	Características hidrodinámicas	Tirante	m
			Régimen de flujo	Froude
			Velocidad	m/s
Y1= Socavación	Remoción del material de fondo alrededor de una estructura empotrada en el cauce	Socavación en la sub estructura del puente	Diámetro Característico del suelo	mm
			Ancho del Pilar	m
			Caudal Unitario	m ² /s - m
			Profundidad de socavación	m
			Media	
			Baja	

Tabla 4 – Operacionalización de la Variable

Fuente: Autoría Propia

Variables Dependientes

Y1= Socavación

Y2= Hidrodinámica

Variable Independiente

X1= Máxima avenida

CAPITULO IV: METODOLOGIA

4.1. Tipo y Nivel de Investigación

- Aplicada – Correlacional

4.2. Población y Muestra

- La población que se ha considerado son todos los puentes del distrito de Trujillo.
- La muestra de estudio es el Puente Huacas, ubicado en el Distrito de Moche, Provincia de Trujillo, departamento de La Libertad.

4.3. Técnicas e Instrumentos de Investigación

Para el desarrollo de la investigación se necesitará de las siguientes técnicas:

- a) Topografía del área de intervención la cual consiste en la toma cuidadosa de datos correspondiente al relieve del cauce en estudio, todo ello a través de puntos georreferenciados los cuales de manera sistemática representarán tanto las elevaciones como las depresiones localizadas en los puntos más importantes del terreno, esta información inherente dará como resultado la aglomeración de una nube de puntos que tendrá como objetivo conformar una red de triángulos irregulares que posteriormente se interpolará y así conformarán curvas de nivel que de manera visual nos ofrecerá una versión digitalizada del terreno.
- b) Para la determinación de la socavación localizada, en los pilares del puente se emplearán todas las metodologías existentes, no obstante, se tienen que emplear únicamente los métodos que más se adecuen a la sub estructura del Puente Huacas. Para comparar resultados y tener un estimado mucho más preciso analizaremos la estructura emplazada en el cauce del rio moche mediante un software de modelamiento numérico unidimensional, bidimensional y tridimensional, en función a las condiciones que se representen en el problema. Cabe resaltar que para nuestra investigación no se requiere de conocer la profundidad a la cual se encuentra la cimentación del puente, sino, que proporcionará un resultado numérico absoluto de la magnitud de la socavación, este dato podrá ser usado más adelante para corroborar si la

profundidad asignada a la cimentación del puente fue suficiente o pequeña en comparación con la socavación encontrada.

- c) Levantamiento con wincha, de las medidas de todo el casco estructural del puente, incluyendo detalle de pilares y estribos que lo componen, distancias de separación entre ellos y medición del gálibo, con la finalidad de posteriormente construir un modelo digital (AutoCAD) en 3 dimensiones.

Instrumentos:

- ✓ Teodolito Azimutal
- ✓ Dron Topográfico – Mavic 2 Pro
- ✓ Estación Total
- ✓ Juego de Prismas
- ✓ Regla de 5m, con graduación
- ✓ Nivel de ingeniero
- ✓ Nivel esférico
- ✓ GPS

4.4. Diseño de Investigación

El diseño de la investigación es casi experimental, ya que mediante este trataremos de probar la existencia de una relación causal entre dos o más variables sin alterar la realidad en la que se desenvuelven o desarrollan.

4.5. Procesamiento y Análisis de Datos

- Para el procesamiento de la información topográfica extraída de campo emplearemos como software base Ms Excel, que es un programa de manejo de fórmulas matemáticas y archivos binarios, lo consideramos necesario puesto que nos ayudará a concatenar la información proveniente de la estación total que estará en formato X; Y; Z y posteriormente así trasladarla a AutoCAD CIVIL 3D, en donde realizaremos el análisis respectivo de la nube de puntos para la creación de la superficie de triangulación del terreno que se encuentra en evaluación.
- Para el modelamiento numérico emplearemos un software con la capacidad de resolución de ecuaciones diferenciales en dos dimensiones o tres dimensiones, en función a los requerimientos del proyecto.

CAPITULO V: RESULTADOS

5.1. Análisis e Interpretación de Resultados

5.1.1. Levantamiento Topográfico

Se realizó el levantamiento topográfico respetando las sugerencias y lineamientos expuestos en los objetivos específicos de nuestra investigación, mediante la técnica de mapeo con el uso de drones, el cual nos facilitó la realización de un reconocimiento del terreno obteniendo un corrido que abarcó 1km aguas arriba de la estructura de cruce de vía (Puente Huacas), hasta 1km aguas abajo, siendo un total de 2km, además se levantó el terreno correspondiente a la faja marginal contando 200 m aproximadamente desde la margen izquierda y derecha del cauce del rio moche.



*Imagen 33 – Mapeo con el Dron Topográfico – Mavic 2 Pro
Fuente: Autoría propia*

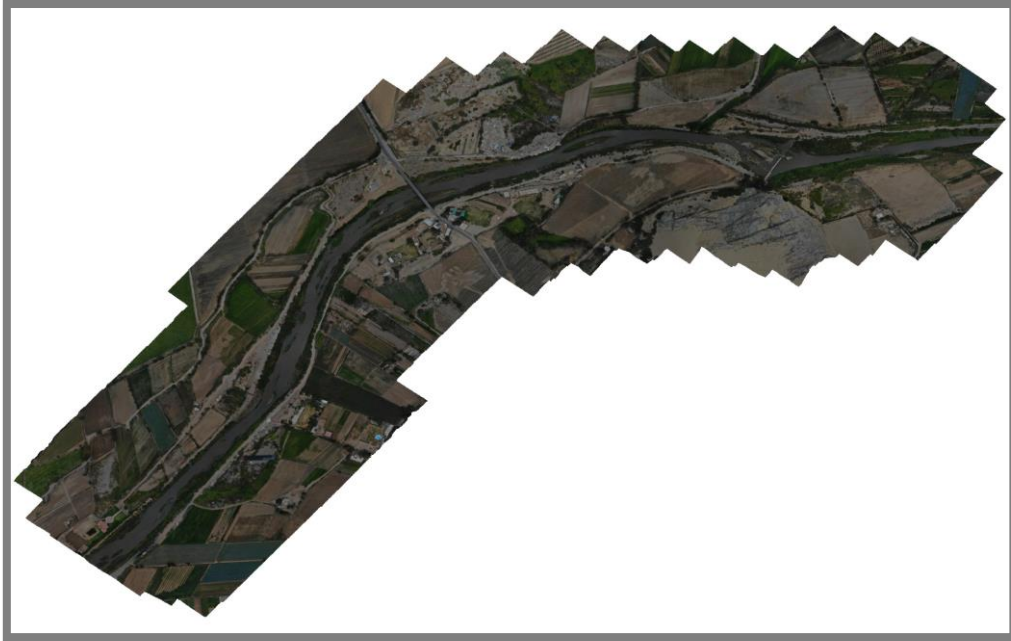


Imagen 34 – Vista en Planta – Fotografía ortogonal del terreno levantado mediante drones
Fuente: Autoría propia

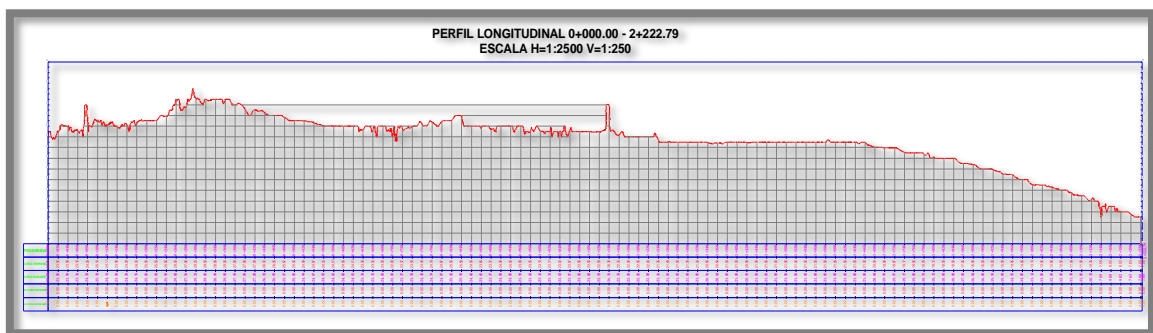


Imagen 35 – Perfil longitudinal – Topografía desde prog. 0+000 – hasta 2 + 227.00
Fuente: Autoría propia

Además, se realizó un perfil longitudinal del cauce con la intención de conocer las pendiente y forma del terreno, siendo una pendiente media de aproximadamente 0.0076 m/m, sin embargo, se puede notar que existen dentro del cauce pendientes suaves y fuertes de manera alternada, lo cual le da una morfología de cierto modo accidentada a lo largo de los 2km en estudio.

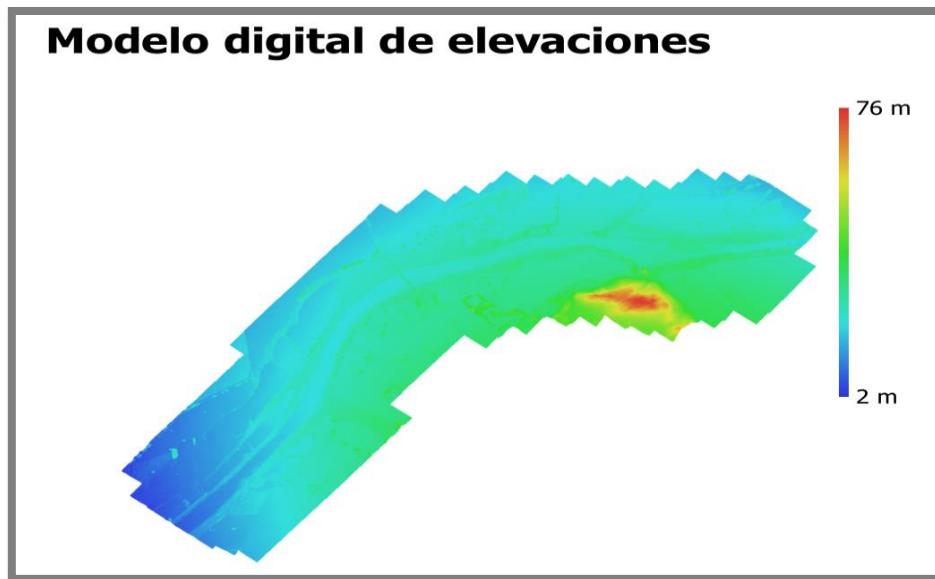


Imagen 36 – Vista en planta – Modelo digital de elevaciones
Fuente: Autoría propia

Una vez culminado el trabajo de campo, nos trasladamos a gabinete donde se ha procesado la información recaudada por el dron de exploración y mediante el cual se ha generado un modelo computacional que representa mediante una nube de “Puntos Densa” el relieve topográfico del terreno en estudio, a través de un mapa de bits en formato rasterizado.

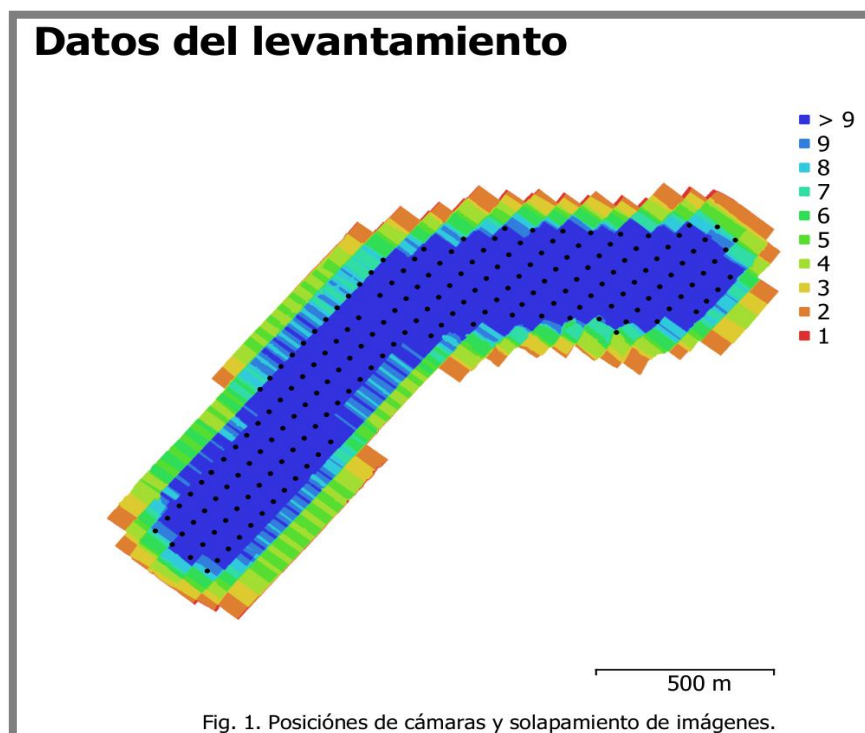
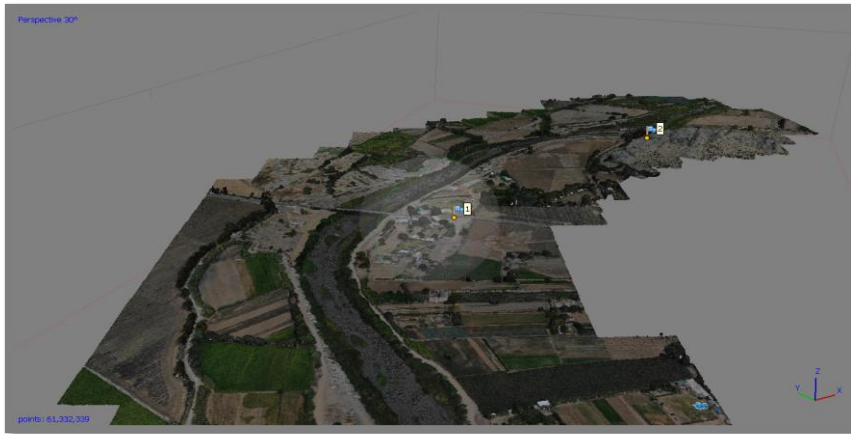


Imagen 37 – Posiciones de las cámara y solapamiento de imágenes.
Fuente: Autoría propia

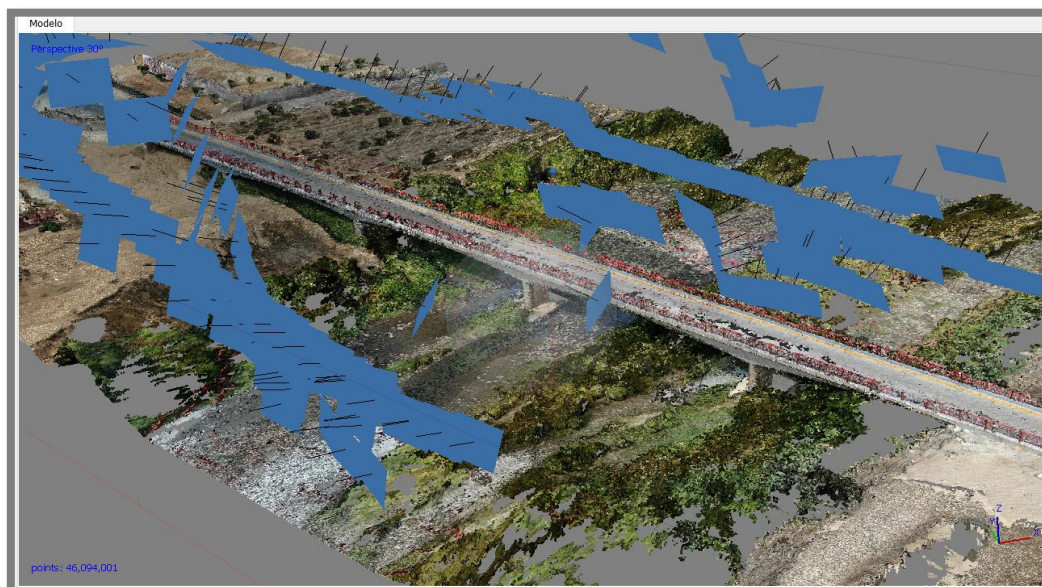
De la fuente de información recaudada por el dron, podemos apreciar la densidad de fotografías, para la cual se ha creado un mapa que representa las posiciones de las cámaras y solapamiento de imágenes, el cual es indispensable para un adecuado procesamiento y creación de la nube de puntos densa.



*Imagen 38 – Vista en perspectiva – Tramo 1km aguas abajo del “Puente Huacas”
Fuente: Autoría Propia*

5.1.2. Fotogrametría del Puente

Con la intención de obtener los detalles más relevantes de la estructura del puente, se realizó un estudio de fotogrametría con el apoyo de un dron al Puente Huacas, realizando tomas georreferenciadas alrededor de la estructura de manera manual.



*Imagen 39 – Mapa de localización de las capturas del Puente
Fuente: Autoría propia*



*Imagen 40 – Vista en perspectiva del levantamiento – “Puente Huacas”
Fuente: Autoría propia*



*Imagen 41 – Vista en perspectiva del levantamiento – “Puente Huacas”
Fuente: Autoría propia*

Nos centramos en la socavación de la sub estructura del puente, en el cual el día que se recolectó los datos, el bajo nivel de tirante nos permitió recaudar información y medir 0.494 cm de profundidad se socavación alrededor de estructura, lo cual nos indica la predisposición a la erosión del terreno del cauce.

5.1.3. Hidrología

5.1.3.1. Estudio de Caudales

Para la determinación del caudal máximo de aporte de la cuenca del río moche, se utilizaron los registros de caudales procedentes de las estaciones hidrométricas que actualmente se encuentran en funcionamiento, cabe resaltar que en el río moche la estación a la cual se nos ha permitido acceso a través del portal de la Autoridad Nacional del Agua es la estación Quirihuac.

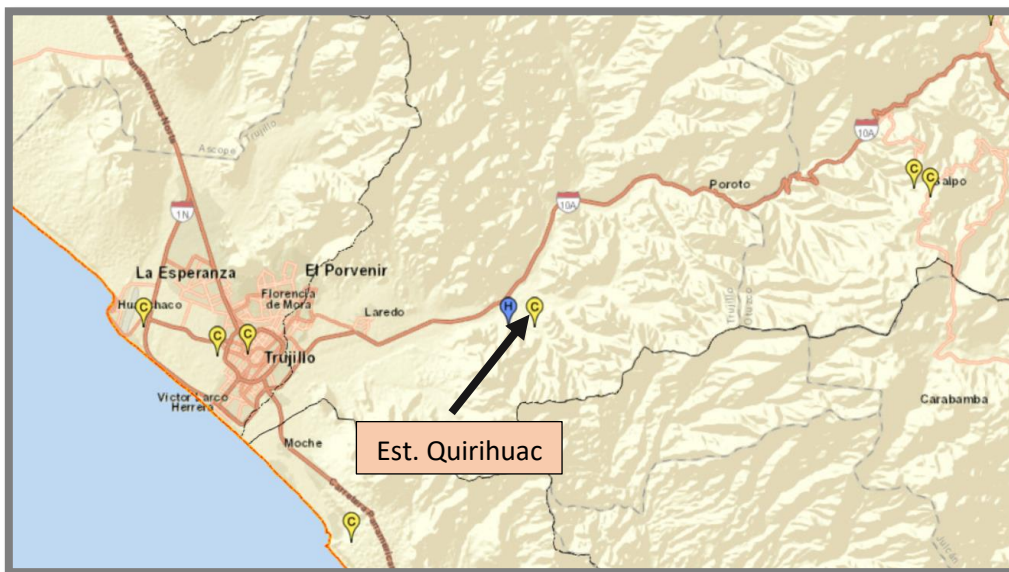


Imagen 42 – Ubicación de la estación Quirihuac
Fuente: SNIRH ANA

Se entró a través de la base de datos SNIRH del ANA, para recolectar información correspondiente a la estación QUIRIHUAC, ya que es la única estación a la cual se tiene acceso de manera libre.

Estación: QUIRIHUAC

Código	201401
Latitud	-8.083333
Longitud	-78.866667
Tipo 1	CONVENCIONAL
Tipo 2	HIDROMÉTRICA

Variable	Fuente	Fecha Inicio	Fecha	Hora	Valor	Cantidad	Datos	%	Descargar Estación	Descargar Datos
CAUDAL PRO IDIA	PECHAVIMOCHIC	01/01/1950	27/11/2019	00:00	0.1	24710	25533	97		
CAUDAL PRO IDIA	SENAMHI	01/01/1950	31/10/1990	00:00	3.4	13462	14914	90		
CAUDALINS	PECHAVIMOCHIC	01/01/2013	28/11/2019	06:00	0.1	7750	-	-		

Imagen 43 – Información de la estación Quirihuac
Fuente: SNIRH ANA

De la selección de datos que nos ofrece el ANA, hemos optado por descargar la data correspondiente a la fuente del proyecto especial CHAVIMOCHIC, el cual tiene una base de datos mucho más actualizada, que consta desde el año 1950 hasta la actualidad.

Etiquetas de columna													
Años	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Caudal Max
1950	4.5	17.02	15.4	21.45	4.38	1.04	0.51	0.22	0.13	2.07	2.85	56	56
1951	9.55	30.8	27.5	23.62	3.31	1.16	0.59	0.12		10.13	21.04	48.26	48.26
1952	37.93	90.67	170.17	116.87	20.53	3.51	1.2	0.62		1.08	0.56	8.15	170.17
1953	31.6	94.33	77	79.3	15.79	4.23	1.42	0.86	5.02	1.67	21.39	26.09	94.33
1954	35.37	16	93.26	17.93	9.56	2.42	1.02	0.43	1.38	28.85	15.79	8.32	93.26
1955	22.16	86.45	132.75	24.37	16.94	8.24	1.12	0.54	1.09	14.79	2.4	6.89	132.75
1956	86.49	102.33	212.88	87.43	29.23	3.76	1.01	0.49	1	9.4	1.06	0.57	212.88
1957	6.72	58.75	168.6	197.93	43.18	5.66	1.37	0.51	1.1	1.44	3.32	4.65	197.93
1958	32.24	22.62	88.33	34.26	12.41	2.91	0.63	0.45	0.35	2.72	0.37	1.28	88.33
1959	0.51	48.86	76.86	117.5	36.03	2.94	1.93	0.87	2.28	6.58	6.38	15.25	117.5
1960	30.87	66.21	198.63	33.07	6.27	1.64	0.53	1.45	0.85	4.08	2.47	7.85	198.63
1961	30.56	14.12	43.92	31.32	13.37	4.71	0.95	0.29	0.12	1.24	4.24	6.3	43.92
1962	67.42	78.51	180.31	117.73	20.98	4.62	1.4	0.65	0.67	0.52	3.55	1.27	180.31
1963	1.86	1.09	41.35	117.57	23.24	1.15	0.48	0.29	0.15	2.7	4.17	16.19	117.57
1964	17.49	51.08	85.27	119.19	34.44	3.64	1.85	2.31	2.32	8.48	18.63	2.31	119.19
1965	7.79	19.16	78.4	37.36	15.87	2.46	0.99	0.66	1.23	6.55	9.72	14.17	78.4
1966	58.45	22.01	22.67	20.33	10.29	2.38	0.51	0.26	0.59	14.09	15.2	1.86	58.45
1967	93.31	336.6	129.45	34.8	9.61	2.59	2.36	0.53	0.31	9.74	4.5	3.46	336.6
1968	1.43	5.31	23.42	13.92	1.25	0.45	0.2	0.43	1.14	12.7	8.49	2.92	23.42
1969	4.8	13.88	82.67	91.81	9.8	3.5	1.27	0.24	0.15	4.01	21.74	24.41	91.81
1970	96.1	13.68	31.62	38.45	31.28	5.3	1.94	1.72	4.47	21.34	18.83	25.54	96.1
1971	17.59	42.95	117.63	70.98	11.65	3.88	1.53	2.15	4.09	8.52	5.23	11.59	117.63
1972	20.86	34.59	138.25	58.07	13.52	5.28	1.85	0.88	0.82	6.16	3.86	14.03	138.25
1973	32.8	23.32	43.76	152.96	49.96	13.6	15.55	1.97	4.67	16.56	8.08	19.59	152.96
1974	28.61	47.9	50.29	31.28	7.89	4.32	1.92	0.53	1.12	12.38	2.08	2.08	50.29
1975	20.51	58.61	170.88	51.65	17.26	8.32	1.76	4.35	10.16	22	11.68	2.19	170.88
1976	19.84	23.2	112.85	26.05	12.37	7.92	1.79	0.69	0.51	0.27	0.29	1.38	112.85
1977	27.07	201.52	40	27	7.23	1.76	0.85	0.72	0.45	1.6	1.04	6.32	201.52
1978	1.52	4	11.2	11.68	24	1.04	0.29	0.13	1.28	0.4	8	4	24
1979	9.2	17.84	54.88	24.8	8	2.08	0.29	0.24	0.96	0.32	0.16	0.13	54.88
1980	0.59	0.96	16	14.93	1.12	0.16	0.08	0.06	0.05	13.6	25.6	56	56
1981	11.2	160	75	15.2	4	2	0.48	0.32	0.2	3.62	11.2	16	160
1982	15.16	25.6	15.2	28	8.48	1.79	0.66	0.37	0.88	14.48	16	90	90
1983	120	24	240	280	28.8	11.2	4	1.2	1.6	3.2	2.4	19.1	280
1984	8.32	97.6	152	12.24	21.12	12.56	3.02	2.37	1.25	3.2	14.4	15.92	152
1985	9.18	10.43	19.2	20.8	6.83	2.14	0.45	0.26	8.64	3.39	0.56	8.64	20.8
1986	72	16.75	29.7	38.94	19.62	2.08	0.64	0.37	0.77	1.44	6.78	23.23	72

1987	30.91	42.02	19.81	64	15.9	1.44	0.8	0.64	1.6	0.64	6.88	1.6	64
1988	27.84	32.29	16.32	98.53	39.52	8.9	1.18	0.48	0.22	6.4	14.48	6.08	98.53
1989	19.31	34.54	28.38	40	18.61	2.4	0.88	0.54	0.51	23.09	9.22	0.88	40
1990	1.6	9.28	21.38	5.2	2.4	1.41	0.48	0.2	0.26	6.88	22.64	21.38	22.64
1991	9.6	17.92	41.5	18.99	14.22	1.54	0.54	0.24	0.13	2.4	16	8	41.5
1992	6.48	1.66	18.46	26.06	11.84	2.02	0.32	0.13	0.06	0.54	0.64	0.05	26.06
1993	6.4	61.2	66.97	40	19.2	8	1.28	0.8	9.84	12.8	24	18.88	66.97
1994	24.8	204.8	44.8	42.4	28	9.6	4.32	1.84	5.12	0.8	6	15.2	204.8
1995	10.4	12.8	15.2	23.84	7.28	3.36	1.04	0.77	0.56	2.78	9.6	16	23.84
1996	21.6	64	56	28.8	14.4	4.8	2.88	0.72	0.27	4.8	6.08	0.48	64
1997	0.24	24	11.2	10.2	10.2	0.64	0.24	0.12	0.11	0.4	5.12	200	200
1998	220	750	1000	122.83	62	14	4.33	3.3	3.18	6.17	5.83	1.62	1000
1999	41.88	240.36	28.58	38	54	10.47	5.83	2.56	9.74	12.58	6.02	14.6	240.36
2000	12.34	63.01	68.58	71.02	44.3	10.06	7.08	3.05	2.06	2.96	1.69	8.45	71.02
2001	51.07	56.06	150	126.82	19.73	14.28	3.55	2.42	9.73	15.97	24.07	18.58	150
2002	11.38	28.97	98.55	109.46	18.19	8.25	5.51	1.31	0.64	8.67	11.65	18.14	109.46
2003	17.47	42.51	25.3	28.68	18.19	4.6	1.07	0.51	0.4	0.17	0.16	13.98	42.51
2004	4.12	26.34	39.41	17.96	5.44	2.34	0.13	0.1	0.07	16.96	17.14	38.36	39.41
2005	15.15	26.68	38.96	38.03	6.46	0.44	0.1	0.08	0.08	0.07	0.06	5.6	38.96
2006	14.57	40.17	46.6	45.08	6.23	2.93	0.28	0.1	0.09	0.08	3.1	18.97	46.6
2007	30.56	41.95	32.32	47.26	39.19	2.13	0.6	0.6	0.6	1.43	6.5	8.77	47.26
2008	13.57	19.42	53.72	43.88	23.37	6.03	1.27	0.38	0.14	17.8	20.64	2.73	53.72
2009	43.16	40.95	55.03	61.01	18.61	5.39	1.83	0.35	0.15	13.78	27.54	25.83	61.01
2010	4.7	26.36	28.1	43.97	36.24	2.17	0.57	0.25	2.87	0.2	2.5	4.7	43.97
2013	7.07	48.33	125	21.64	6.23	2.9	0.27	0.15	0.1	5.92	3.33	7.23	125
2014	13.17	35.9	65.13	58.37	39.87	3.8	0.25	0.17	0.07	2.02	14.67	22.47	65.13
2015	76.67	77.93	203.33	52	17.37	5.07	0.33	0.05	0.05	0.64	16	32.2	203.33
2016	23.03	33.45	43.3	42.01	7.61	0.52	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	43.3
2017	16	22.37	187.13	95.27	24.87	6.5	1	0.6	0.8	1.5	1	6.13	187.13
2018	11.73	20.47	12.8	32.5	142.9	9.6	0.4	0.25	0.1	0.05	0.77	19.97	142.9
2019	4.17	36.1	51.27	46.17	19.43	2.77	0.2	0.04	0.1	0.02	6.59		51.27
Caudal Max	220	750	1000	280	142.9	14.28	15.55	4.35	10.16	28.85	27.54	200	1000

Tabla 5 – Información de caudales – Estación hidrométrica Quirihuaac
Fuente: PECHAVIMOCHIC

Una vez obtenida la información hemos procedido a realizar un resumen de los caudales más representativos a lo largo de los últimos 69 años, en lo cual resaltamos el hecho de que se registró una máxima avenida de 1000 m³/s en el mes de marzo de 1998, se espera superar dicho caudal al momento de plantear las distribuciones estadísticas ajustando los datos a los modelos LOG PEARSON, LOG GUMBEL, LOG NORMAL, entre otros, los cuales son sugeridos dentro del manual de Hidrología del MTC.

5.1.3.2. Analisis Estadistico de Datos Hidrologicos

5.1.3.2.1. Modelos de Distribución

El análisis de frecuencias tiene la finalidad de estimar precipitaciones, intensidades o caudales máximos, según sea el caso, para diferentes períodos de retorno, mediante la aplicación de modelos probabilísticos, los cuales pueden ser discretos o continuos.

Basándonos en el análisis planteado en el manual de hidrología, nosotros hemos realizado el planteamiento de las distribuciones estadísticas correspondientes las cuales son:

DISTRIBUCION NORMAL - Momentos lineales					
m	X	P(X)	F(Z) Ordinario	F(Z) Mom Lineal	Delta
1	20.8	0.0145	0.2247	0.1367	0.2102
2	22.64	0.029	0.229	0.1413	0.2
3	23.42	0.0435	0.2308	0.1433	0.1874
4	23.84	0.058	0.2318	0.1443	0.1739
5	24	0.0725	0.2322	0.1448	0.1598
6	26.06	0.087	0.2371	0.1501	0.1502
7	38.96	0.1014	0.2692	0.1866	0.1678
8	39.41	0.1159	0.2704	0.1879	0.1544
9	40	0.1304	0.2719	0.1897	0.1415
10	41.5	0.1449	0.2758	0.1943	0.1309
11	42.51	0.1594	0.2784	0.1975	0.119
12	43.3	0.1739	0.2805	0.2	0.1066
13	43.92	0.1884	0.2821	0.2019	0.0937
14	43.97	0.2029	0.2823	0.2021	0.0794
15	46.6	0.2174	0.2892	0.2105	0.0718
16	47.26	0.2319	0.291	0.2127	0.0591
17	48.26	0.2464	0.2936	0.216	0.0473
18	50.29	0.2609	0.2991	0.2227	0.0382
19	51.27	0.2754	0.3018	0.226	0.0264
20	53.72	0.2899	0.3084	0.2344	0.0186
21	54.9	0.3043	0.3116	0.2385	0.0073
22	56.0	0.3188	0.3147	0.2424	0.0041
23	56.0	0.3333	0.3147	0.2424	0.0186
24	58.5	0.3478	0.3215	0.2511	0.0263
25	61.0	0.3623	0.3287	0.2604	0.0336
26	64.0	0.3768	0.3371	0.2714	0.0397
27	64.0	0.3913	0.3371	0.2714	0.0542
28	65.1	0.4058	0.3404	0.2757	0.0654
29	67.0	0.4203	0.3456	0.2826	0.0747
30	71.0	0.4348	0.3573	0.2983	0.0775

31	72.0	0.4493	0.3602	0.3021	0.0891
32	78.4	0.4638	0.3790	0.3277	0.0848
33	88.3	0.4783	0.4087	0.3690	0.0696
34	90.0	0.4928	0.4137	0.3762	0.0790
35	91.8	0.5072	0.4192	0.3839	0.0880
36	93.3	0.5217	0.4236	0.3902	0.0981
37	94.3	0.5362	0.4269	0.3948	0.1093
38	96.1	0.5507	0.4323	0.4025	0.1184
39	98.5	0.5652	0.4398	0.4131	0.1255
40	109.5	0.5797	0.4735	0.4616	0.1062
41	112.9	0.5942	0.4840	0.4768	0.1102
42	117.5	0.6087	0.4984	0.4977	0.1103
43	117.6	0.6232	0.4986	0.4980	0.1245
44	117.6	0.6377	0.4988	0.4983	0.1389
45	119.2	0.6522	0.5037	0.5053	0.1485
46	125.0	0.6667	0.5217	0.5314	0.1450
47	132.8	0.6812	0.5457	0.5660	0.1355
48	138.3	0.6957	0.5626	0.5902	0.1331
49	142.9	0.7101	0.5768	0.6104	0.1333
50	150.0	0.7246	0.5983	0.6407	0.1263
51	152.0	0.7391	0.6043	0.6491	0.1348
52	153.0	0.7536	0.6072	0.6531	0.1464
53	160.0	0.7681	0.6281	0.6819	0.1400
54	170.2	0.7826	0.6576	0.7216	0.1250
55	170.9	0.7971	0.6596	0.7243	0.1375
56	180.3	0.8116	0.6861	0.7587	0.1255
57	187.1	0.8261	0.7047	0.7820	0.1214
58	197.9	0.8406	0.7330	0.8161	0.1076
59	198.6	0.8551	0.7348	0.8182	0.1203
60	200.0	0.8696	0.7383	0.8222	0.1313
61	201.5	0.8841	0.7421	0.8266	0.1419
62	203.3	0.8986	0.7466	0.8318	0.1519
63	204.8	0.9130	0.7503	0.8359	0.1628
64	212.9	0.9275	0.7698	0.8575	0.1577
65	240.4	0.9420	0.8295	0.9160	0.1126
66	280.0	0.9565	0.8963	0.9660	0.0603
67	336.6	0.9710	0.9555	0.9931	0.0155
68	1000.0	0.9855	1.0000	1.0000	0.0145
DELTA TEORICO =					0.2102

Tabla 6 – Modelo de Distribución Normal
Fuente: Autoría Propia

DISTRIBUCION GUMBEL - Momentos lineales					
m	X	P(X)	G(Y) Ordinario	G(Y) Mom Lineal	Delta
1	20.8	0.0145	0.2273	0.1158	0.2128
2	22.64	0.029	0.2335	0.1222	0.2046
3	23.42	0.0435	0.2362	0.125	0.1927
4	23.84	0.058	0.2376	0.1265	0.1796
5	24	0.0725	0.2382	0.1271	0.1657
6	26.06	0.087	0.2452	0.1347	0.1583
7	38.96	0.1014	0.2906	0.1869	0.1892
8	39.41	0.1159	0.2922	0.1889	0.1763
9	40	0.1304	0.2943	0.1915	0.1639
10	41.5	0.1449	0.2997	0.1981	0.1548
11	42.51	0.1594	0.3034	0.2026	0.144
12	43.3	0.1739	0.3062	0.2061	0.1323
13	43.92	0.1884	0.3085	0.2089	0.1201
14	43.97	0.2029	0.3087	0.2092	0.1058
15	46.6	0.2174	0.3182	0.2212	0.1008
16	47.26	0.2319	0.3206	0.2243	0.0887
17	48.26	0.2464	0.3242	0.2289	0.0779
18	50.29	0.2609	0.3317	0.2385	0.0708
19	51.27	0.2754	0.3352	0.2431	0.0599
20	53.72	0.2899	0.3442	0.2548	0.0543
21	54.9	0.3043	0.3485	0.2605	0.0441
22	56.0	0.3188	0.3526	0.2659	0.0337
23	56.0	0.3333	0.3526	0.2659	0.0192
24	58.5	0.3478	0.3616	0.2779	0.0137
25	61.0	0.3623	0.3710	0.2906	0.0086
26	64.0	0.3768	0.3819	0.3055	0.0051
27	64.0	0.3913	0.3819	0.3055	0.0094
28	65.1	0.4058	0.3861	0.3112	0.0197
29	67.0	0.4203	0.3928	0.3205	0.0275
30	71.0	0.4348	0.4076	0.3410	0.0272
31	72.0	0.4493	0.4112	0.3459	0.0381
32	78.4	0.4638	0.4344	0.3785	0.0293
33	88.3	0.4783	0.4700	0.4288	0.0083
34	90.0	0.4928	0.4759	0.4372	0.0168
35	91.8	0.5072	0.4823	0.4462	0.0250
36	93.3	0.5217	0.4874	0.4535	0.0344
37	94.3	0.5362	0.4911	0.4588	0.0451
38	96.1	0.5507	0.4972	0.4675	0.0535
39	98.5	0.5652	0.5056	0.4794	0.0596
40	109.5	0.5797	0.5426	0.5315	0.0372
41	112.9	0.5942	0.5537	0.5472	0.0405
42	117.5	0.6087	0.5688	0.5681	0.0399
43	117.6	0.6232	0.5690	0.5684	0.0542
44	117.6	0.6377	0.5692	0.5687	0.0685

45	119.2	0.6522	0.5741	0.5756	0.0780
46	125.0	0.6667	0.5924	0.6007	0.0743
47	132.8	0.6812	0.6159	0.6327	0.0652
48	138.3	0.6957	0.6321	0.6543	0.0636
49	142.9	0.7101	0.6454	0.6718	0.0648
50	150.0	0.7246	0.6650	0.6973	0.0597
51	152.0	0.7391	0.6704	0.7042	0.0688
52	153.0	0.7536	0.6729	0.7074	0.0807
53	160.0	0.7681	0.6913	0.7305	0.0769
54	170.2	0.7826	0.7163	0.7613	0.0663
55	170.9	0.7971	0.7180	0.7633	0.0791
56	180.3	0.8116	0.7397	0.7890	0.0719
57	187.1	0.8261	0.7545	0.8060	0.0716
58	197.9	0.8406	0.7766	0.8305	0.0640
59	198.6	0.8551	0.7779	0.8320	0.0771
60	200.0	0.8696	0.7806	0.8349	0.0890
61	201.5	0.8841	0.7835	0.8380	0.1005
62	203.3	0.8986	0.7869	0.8417	0.1116
63	204.8	0.9130	0.7897	0.8446	0.1234
64	212.9	0.9275	0.8043	0.8598	0.1233
65	240.4	0.9420	0.8474	0.9019	0.0946
66	280.0	0.9565	0.8945	0.9421	0.0620
67	336.6	0.9710	0.9386	0.9731	0.0324
68	1000.0	0.9855	0.9999	1.0000	0.0144
				DELTA TEORICO =	0.2128

Tabla 7 – Modelo de Distribución Gumbel
Fuente: Autoría Propia

DISTRIBUCION LOG GAMMA 3P - Momentos lineales					
m	X	P(X)	F(Z) Ordinario	F(Z) Mom Lineal	Delta
1	20.8	0.0145	0	0	0.0145
2	22.64	0.029	0	0	0.029
3	23.42	0.0435	0	0	0.0435
4	23.84	0.058	0	0	0.058
5	24	0.0725	0	0	0.0725
6	26.06	0.087	0	0	0.087
7	38.96	0.1014	0	0	0.1014
8	39.41	0.1159	0	0	0.1159
9	40	0.1304	0	0	0.1304
10	41.5	0.1449	0	0	0.1449
11	42.51	0.1594	0	0	0.1594
12	43.3	0.1739	0	0	0.1739
13	43.92	0.1884	0	0	0.1884
14	43.97	0.2029	0	0	0.2029
15	46.6	0.2174	0	0	0.2174
16	47.26	0.2319	0	0	0.2319

17	48.26	0.2464	0	0	0.2464
18	50.29	0.2609	0	0	0.2609
19	51.27	0.2754	0	0	0.2754
20	53.72	0.2899	0	0	0.2899
21	54.9	0.3043	0.0000	0.0000	0.3043
22	56.0	0.3188	0.0000	0.0000	0.3188
23	56.0	0.3333	0.0000	0.0000	0.3333
24	58.5	0.3478	0.0000	0.0000	0.3478
25	61.0	0.3623	0.0000	0.0000	0.3623
26	64.0	0.3768	0.0000	0.0000	0.3768
27	64.0	0.3913	0.0000	0.0000	0.3913
28	65.1	0.4058	0.0000	0.0000	0.4058
29	67.0	0.4203	0.0000	0.0000	0.4203
30	71.0	0.4348	0.0000	0.0000	0.4348
31	72.0	0.4493	0.0000	0.0000	0.4493
32	78.4	0.4638	0.0000	0.0000	0.4638
33	88.3	0.4783	0.0000	0.0000	0.4783
34	90.0	0.4928	0.0000	0.0000	0.4928
35	91.8	0.5072	0.0000	0.0000	0.5072
36	93.3	0.5217	0.0000	0.0000	0.5217
37	94.3	0.5362	0.0000	0.0000	0.5362
38	96.1	0.5507	0.0000	0.0000	0.5507
39	98.5	0.5652	0.0000	0.0000	0.5652
40	109.5	0.5797	0.0000	0.0000	0.5797
41	112.9	0.5942	0.0000	0.0000	0.5942
42	117.5	0.6087	0.0000	0.0000	0.6087
43	117.6	0.6232	0.0000	0.0000	0.6232
44	117.6	0.6377	0.0000	0.0000	0.6377
45	119.2	0.6522	0.0000	0.0000	0.6522
46	125.0	0.6667	0.0000	0.0000	0.6667
47	132.8	0.6812	0.0000	0.0000	0.6812
48	138.3	0.6957	0.0000	0.0000	0.6957
49	142.9	0.7101	0.0000	0.0000	0.7101
50	150.0	0.7246	0.0000	0.0000	0.7246
51	152.0	0.7391	0.0000	0.0000	0.7391
52	153.0	0.7536	0.0000	0.0000	0.7536
53	160.0	0.7681	0.0000	0.0000	0.7681
54	170.2	0.7826	0.0000	0.0000	0.7826
55	170.9	0.7971	0.0000	0.0000	0.7971
56	180.3	0.8116	0.0000	0.0000	0.8116
57	187.1	0.8261	0.0000	0.0000	0.8261
58	197.9	0.8406	0.0000	0.0000	0.8406
59	198.6	0.8551	0.0000	0.0000	0.8551
60	200.0	0.8696	0.0000	0.0000	0.8696
61	201.5	0.8841	0.0000	0.0000	0.8841
62	203.3	0.8986	0.0000	0.0000	0.8986

63	204.8	0.9130	0.0000	0.0000	0.9130
64	212.9	0.9275	0.0000	0.0000	0.9275
65	240.4	0.9420	0.0000	0.0000	0.9420
66	280.0	0.9565	0.0000	0.0000	0.9565
67	336.6	0.9710	0.0000	0.0000	0.9710
68	1000.0	0.9855	0.0000	0.0000	0.9855
DELTA TEORICO =					0.9855

Tabla 8 – Modelo de Distribución Log. Gamma 3P.

Fuente: Autoría Propia

DISTRIBUCION LOG NORMAL 3P - Momentos lineales					
m	X	P(X)	G(Y) Ordinario	G(Y) Mom Lineal	Delta
1	20.8	0.0145	-2.4646	0.0069	0.0076
2	22.64	0.029	-2.1861	0.0144	0.0146
3	23.42	0.0435	-2.0877	0.0184	0.0251
4	23.84	0.058	-2.0384	0.0208	0.0372
5	24	0.0725	-2.0202	0.0217	0.0508
6	26.06	0.087	-1.8113	0.035	0.0519
7	38.96	0.1014	-1.0259	0.1525	0.051
8	39.41	0.1159	-1.007	0.157	0.041
9	40	0.1304	-0.9827	0.1629	0.0324
10	41.5	0.1449	-0.9234	0.1779	0.033
11	42.51	0.1594	-0.8854	0.188	0.0286
12	43.3	0.1739	-0.8566	0.1958	0.0219
13	43.92	0.1884	-0.8345	0.202	0.0136
14	43.97	0.2029	-0.8328	0.2025	0.0004
15	46.6	0.2174	-0.7443	0.2283	0.011
16	47.26	0.2319	-0.7233	0.2348	0.0029
17	48.26	0.2464	-0.6922	0.2444	0.002
18	50.29	0.2609	-0.6319	0.2637	0.0029
19	51.27	0.2754	-0.604	0.2729	0.0024
20	53.72	0.2899	-0.5375	0.2955	0.0056
21	54.9	0.3043	-0.5074	0.3059	0.0016
22	56.0	0.3188	-0.4792	0.3159	0.0029
23	56.0	0.3333	-0.4792	0.3159	0.0174
24	58.5	0.3478	-0.4201	0.3372	0.0106
25	61.0	0.3623	-0.3618	0.3587	0.0036
26	64.0	0.3768	-0.2977	0.3830	0.0062
27	64.0	0.3913	-0.2977	0.3830	0.0083
28	65.1	0.4058	-0.2745	0.3919	0.0139
29	67.0	0.4203	-0.2378	0.4060	0.0143
30	71.0	0.4348	-0.1613	0.4359	0.0011
31	72.0	0.4493	-0.1437	0.4429	0.0064
32	78.4	0.4638	-0.0353	0.4859	0.0222
33	88.3	0.4783	0.1130	0.5450	0.0667
34	90.0	0.4928	0.1359	0.5541	0.0613

35	91.8	0.5072	0.1602	0.5636	0.0564
36	93.3	0.5217	0.1793	0.5711	0.0494
37	94.3	0.5362	0.1931	0.5766	0.0403
38	96.1	0.5507	0.2156	0.5853	0.0346
39	98.5	0.5652	0.2457	0.5970	0.0318
40	109.5	0.5797	0.3710	0.6447	0.0650
41	112.9	0.5942	0.4069	0.6580	0.0638
42	117.5	0.6087	0.4542	0.6752	0.0665
43	117.6	0.6232	0.4549	0.6754	0.0522
44	117.6	0.6377	0.4555	0.6756	0.0379
45	119.2	0.6522	0.4709	0.6811	0.0290
46	125.0	0.6667	0.5262	0.7006	0.0339
47	132.8	0.6812	0.5955	0.7243	0.0431
48	138.3	0.6957	0.6421	0.7396	0.0439
49	142.9	0.7101	0.6798	0.7517	0.0415
50	150.0	0.7246	0.7349	0.7688	0.0442
51	152.0	0.7391	0.7499	0.7733	0.0342
52	153.0	0.7536	0.7570	0.7755	0.0218
53	160.0	0.7681	0.8077	0.7904	0.0223
54	170.2	0.7826	0.8768	0.8097	0.0271
55	170.9	0.7971	0.8815	0.8110	0.0139
56	180.3	0.8116	0.9413	0.8267	0.0151
57	187.1	0.8261	0.9825	0.8371	0.0110
58	197.9	0.8406	1.0446	0.8519	0.0113
59	198.6	0.8551	1.0485	0.8528	0.0023
60	200.0	0.8696	1.0560	0.8545	0.0150
61	201.5	0.8841	1.0644	0.8564	0.0276
62	203.3	0.8986	1.0742	0.8586	0.0399
63	204.8	0.9130	1.0821	0.8604	0.0526
64	212.9	0.9275	1.1246	0.8696	0.0579
65	240.4	0.9420	1.2572	0.8957	0.0464
66	280.0	0.9565	1.4224	0.9225	0.0340
67	336.6	0.9710	1.6197	0.9474	0.0237
68	1000.0	0.9855	2.7609	0.9971	0.0116
				DELTA TEORICO =	0.0667

Tabla 9 – Modelo de Distribución Log. Normal 3P.
Fuente: Autoría Propia

DISTRIBUCION LOG GUMBEL - Momentos lineales					
m	X	P(X)	G(Y) Ordinario	G(Y) Mom Lineal	Delta
1	20.8	0.0145	0.0015	0.003	0.0129
2	22.64	0.029	0.0037	0.0063	0.0253
3	23.42	0.0435	0.0051	0.0083	0.0384
4	23.84	0.058	0.0059	0.0095	0.052
5	24	0.0725	0.0063	0.01	0.0662
6	26.06	0.087	0.0122	0.0179	0.0747
7	38.96	0.1014	0.109	0.1241	0.0076
8	39.41	0.1159	0.1138	0.129	0.0021
9	40	0.1304	0.1202	0.1355	0.0102
10	41.5	0.1449	0.1368	0.1523	0.0082
11	42.51	0.1594	0.1482	0.1637	0.0113
12	43.3	0.1739	0.1572	0.1727	0.0167
13	43.92	0.1884	0.1643	0.1798	0.0241
14	43.97	0.2029	0.1649	0.1804	0.038
15	46.6	0.2174	0.1955	0.2106	0.0219
16	47.26	0.2319	0.2032	0.2182	0.0287
17	48.26	0.2464	0.2149	0.2297	0.0315
18	50.29	0.2609	0.2386	0.2527	0.0223
19	51.27	0.2754	0.2499	0.2638	0.0254
20	53.72	0.2899	0.278	0.2909	0.0119
21	54.88	0.3043	0.291	0.3034	0.0133
22	56	0.3188	0.3034	0.3154	0.0154
23	56	0.3333	0.3034	0.3154	0.0299
24	58.45	0.3478	0.3301	0.341	0.0178
25	61.01	0.3623	0.3569	0.3667	0.0054
26	64	0.3768	0.387	0.3954	0.0102
27	64	0.3913	0.387	0.3954	0.0043
28	65.13	0.4058	0.398	0.4059	0.0078
29	66.97	0.4203	0.4154	0.4225	0.0049
30	71.02	0.4348	0.4517	0.4571	0.0169
31	72	0.4493	0.4601	0.4651	0.0108
32	78.4	0.4638	0.511	0.5137	0.0473
33	88.33	0.4783	0.5783	0.578	0.1001
34	90	0.4928	0.5884	0.5876	0.0956
35	91.81	0.5072	0.5989	0.5977	0.0917
36	93.26	0.5217	0.6071	0.6055	0.0853
37	94.33	0.5362	0.6129	0.6111	0.0767
38	96.1	0.5507	0.6224	0.6202	0.0717
39	98.53	0.5652	0.6348	0.6322	0.0696
40	109.46	0.5797	0.6841	0.6796	0.1044
41	112.85	0.5942	0.6974	0.6925	0.1032
42	117.5	0.6087	0.7144	0.7089	0.1057
43	117.57	0.6232	0.7146	0.7092	0.0914

44	117.63	0.6377	0.7148	0.7094	0.0771
45	119.19	0.6522	0.7202	0.7146	0.068
46	125	0.6667	0.7389	0.7327	0.0722
47	132.75	0.6812	0.761	0.7544	0.0799
48	138.25	0.6957	0.7751	0.7681	0.0794
49	142.9	0.7101	0.7860	0.7789	0.0758
50	150.0	0.7246	0.8012	0.7938	0.0765
51	152.0	0.7391	0.8052	0.7978	0.0660
52	153.0	0.7536	0.8070	0.7996	0.0534
53	160.0	0.7681	0.8199	0.8124	0.0518
54	170.2	0.7826	0.8364	0.8287	0.0537
55	170.9	0.7971	0.8374	0.8298	0.0403
56	180.3	0.8116	0.8505	0.8429	0.0389
57	187.1	0.8261	0.8590	0.8514	0.0330
58	197.9	0.8406	0.8710	0.8635	0.0305
59	198.6	0.8551	0.8718	0.8642	0.0167
60	200.0	0.8696	0.8732	0.8656	0.0036
61	201.5	0.8841	0.8747	0.8671	0.0094
62	203.3	0.8986	0.8765	0.8689	0.0221
63	204.8	0.9130	0.8779	0.8704	0.0352
64	212.9	0.9275	0.8852	0.8778	0.0423
65	240.4	0.9420	0.9057	0.8986	0.0364
66	280.0	0.9565	0.9265	0.9201	0.0300
67	336.6	0.9710	0.9458	0.9402	0.0252
68	1000.0	0.9855	0.9914	0.9896	0.0058
				DELTA TEORICO =	0.1057

Tabla 10 – Modelo de Distribución Log. Gumbel.
Fuente: Autoría Propia

DISTRIBUCION LOG NORMAL DE 2P. - Momentos lineales					
m	X	P(X)	G(Y) Ordinario	G(Y) Mom Lineal	Delta
1	20.8	0.0145	0.0283	0.0285	0.0138
2	22.64	0.029	0.0365	0.0367	0.0075
3	23.42	0.0435	0.0402	0.0405	0.0033
4	23.84	0.058	0.0423	0.0426	0.0157
5	24	0.0725	0.0431	0.0434	0.0293
6	26.06	0.087	0.0541	0.0545	0.0328
7	38.96	0.1014	0.1422	0.1426	0.0408
8	39.41	0.1159	0.1457	0.1461	0.0297
9	40	0.1304	0.1502	0.1507	0.0198
10	41.5	0.1449	0.162	0.1624	0.017
11	42.51	0.1594	0.17	0.1704	0.0105
12	43.3	0.1739	0.1762	0.1767	0.0023
13	43.92	0.1884	0.1812	0.1816	0.0072
14	43.97	0.2029	0.1816	0.182	0.0213

15	46.6	0.2174	0.2027	0.2031	0.0147
16	47.26	0.2319	0.208	0.2084	0.0239
17	48.26	0.2464	0.2161	0.2165	0.0303
18	50.29	0.2609	0.2325	0.2329	0.0283
19	51.27	0.2754	0.2404	0.2408	0.0349
20	53.72	0.2899	0.2602	0.2606	0.0296
21	54.9	0.3043	0.2695	0.2699	0.0348
22	56.0	0.3188	0.2785	0.2788	0.0404
23	56.0	0.3333	0.2785	0.2788	0.0549
24	58.5	0.3478	0.2979	0.2983	0.0499
25	61.0	0.3623	0.3180	0.3183	0.0443
26	64.0	0.3768	0.3411	0.3413	0.0357
27	64.0	0.3913	0.3411	0.3413	0.0502
28	65.1	0.4058	0.3497	0.3499	0.0561
29	67.0	0.4203	0.3635	0.3637	0.0568
30	71.0	0.4348	0.3932	0.3934	0.0416
31	72.0	0.4493	0.4002	0.4004	0.0490
32	78.4	0.4638	0.4446	0.4447	0.0192
33	88.3	0.4783	0.5078	0.5078	0.0295
34	90.0	0.4928	0.5177	0.5177	0.0250
35	91.8	0.5072	0.5283	0.5282	0.0210
36	93.3	0.5217	0.5366	0.5365	0.0148
37	94.3	0.5362	0.5426	0.5425	0.0064
38	96.1	0.5507	0.5524	0.5523	0.0017
39	98.5	0.5652	0.5655	0.5654	0.0003
40	109.5	0.5797	0.6198	0.6196	0.0401
41	112.9	0.5942	0.6352	0.6350	0.0410
42	117.5	0.6087	0.6552	0.6550	0.0465
43	117.6	0.6232	0.6555	0.6552	0.0323
44	117.6	0.6377	0.6558	0.6555	0.0181
45	119.2	0.6522	0.6622	0.6619	0.0100
46	125.0	0.6667	0.6850	0.6847	0.0184
47	132.8	0.6812	0.7129	0.7126	0.0318
48	138.3	0.6957	0.7310	0.7307	0.0354
49	142.9	0.7101	0.7454	0.7450	0.0352
50	150.0	0.7246	0.7657	0.7653	0.0410
51	152.0	0.7391	0.7710	0.7706	0.0319
52	153.0	0.7536	0.7736	0.7732	0.0199
53	160.0	0.7681	0.7912	0.7908	0.0231
54	170.2	0.7826	0.8140	0.8135	0.0314
55	170.9	0.7971	0.8154	0.8150	0.0183
56	180.3	0.8116	0.8339	0.8335	0.0223
57	187.1	0.8261	0.8459	0.8455	0.0198
58	197.9	0.8406	0.8630	0.8626	0.0224
59	198.6	0.8551	0.8640	0.8636	0.0089
60	200.0	0.8696	0.8660	0.8656	0.0036

61	201.5	0.8841	0.8682	0.8677	0.0159
62	203.3	0.8986	0.8707	0.8703	0.0279
63	204.8	0.9130	0.8727	0.8723	0.0403
64	212.9	0.9275	0.8831	0.8827	0.0444
65	240.4	0.9420	0.9119	0.9115	0.0301
66	280.0	0.9565	0.9401	0.9398	0.0164
67	336.6	0.9710	0.9641	0.9639	0.0069
68	1000.0	0.9855	0.9994	0.9994	0.0139
DELTA TEORICO =					0.0568

Tabla 11 – Modelo de Distribución Log. Normal 2P.

Fuente: Autoría Propia

DISTRIBUCION GAMMA 2 PARAMETROS - Momentos lineales					
m	X	P(X)	G(Y) Ordinario	G(Y) Mom Lineal	Delta
1	20.8	0.0145	0.0624	0.2618	0.0479
2	22.6	0.0290	0.0714	0.2754	0.0424
3	23.4	0.0435	0.0753	0.2811	0.0318
4	23.8	0.0580	0.0774	0.2841	0.0194
5	24.0	0.0725	0.0782	0.2852	0.0057
6	26.1	0.0870	0.0889	0.2995	0.0020
7	39.0	0.1014	0.1621	0.3780	0.0607
8	39.4	0.1159	0.1648	0.3804	0.0489
9	40.0	0.1304	0.1684	0.3836	0.0379
10	41.5	0.1449	0.1774	0.3917	0.0325
11	42.5	0.1594	0.1835	0.3970	0.0241
12	43.3	0.1739	0.1883	0.4011	0.0144
13	43.9	0.1884	0.1921	0.4042	0.0037
14	44.0	0.2029	0.1924	0.4045	0.0105
15	46.6	0.2174	0.2084	0.4177	0.0090
16	47.3	0.2319	0.2125	0.4210	0.0194
17	48.3	0.2464	0.2186	0.4258	0.0278
18	50.3	0.2609	0.2311	0.4355	0.0298
19	51.3	0.2754	0.2371	0.4401	0.0383
20	53.7	0.2899	0.2522	0.4513	0.0377
21	54.9	0.3043	0.2593	0.4565	0.0450
22	56.0	0.3188	0.2662	0.4615	0.0526
23	56.0	0.3333	0.2662	0.4615	0.0671
24	58.5	0.3478	0.2812	0.4721	0.0666
25	61.0	0.3623	0.2968	0.4829	0.0655
26	64.0	0.3768	0.3150	0.4951	0.0618
27	64.0	0.3913	0.3150	0.4951	0.0763
28	65.1	0.4058	0.3218	0.4996	0.0840
29	67.0	0.4203	0.3329	0.5068	0.0874
30	71.0	0.4348	0.3569	0.5222	0.0778
31	72.0	0.4493	0.3627	0.5258	0.0866
32	78.4	0.4638	0.3998	0.5486	0.0640

33	88.3	0.4783	0.4549	0.5812	0.0233
34	90.0	0.4928	0.4639	0.5864	0.0289
35	91.8	0.5072	0.4735	0.5920	0.0338
36	93.3	0.5217	0.4811	0.5963	0.0407
37	94.3	0.5362	0.4867	0.5995	0.0496
38	96.1	0.5507	0.4958	0.6047	0.0550
39	98.5	0.5652	0.5081	0.6117	0.0571
40	109.5	0.5797	0.5610	0.6414	0.0187
41	112.9	0.5942	0.5765	0.6500	0.0177
42	117.5	0.6087	0.5971	0.6615	0.0116
43	117.6	0.6232	0.5974	0.6616	0.0258
44	117.6	0.6377	0.5976	0.6618	0.0401
45	119.2	0.6522	0.6043	0.6655	0.0478
46	125.0	0.6667	0.6286	0.6790	0.0381
47	132.8	0.6812	0.6590	0.6960	0.0221
48	138.3	0.6957	0.6794	0.7075	0.0163
49	142.9	0.7101	0.6958	0.7167	0.0144
50	150.0	0.7246	0.7194	0.7303	0.0052
51	152.0	0.7391	0.7258	0.7339	0.0134
52	153.0	0.7536	0.7288	0.7357	0.0248
53	160.0	0.7681	0.7500	0.7481	0.0181
54	170.2	0.7826	0.7780	0.7649	0.0046
55	170.9	0.7971	0.7799	0.7660	0.0172
56	180.3	0.8116	0.8032	0.7804	0.0084
57	187.1	0.8261	0.8186	0.7901	0.0075
58	197.9	0.8406	0.8408	0.8046	0.0002
59	198.6	0.8551	0.8422	0.8056	0.0129
60	200.0	0.8696	0.8448	0.8073	0.0248
61	201.5	0.8841	0.8476	0.8092	0.0364
62	203.3	0.8986	0.8509	0.8115	0.0476
63	204.8	0.9130	0.8536	0.8133	0.0594
64	212.9	0.9275	0.8674	0.8230	0.0601
65	240.4	0.9420	0.9058	0.8519	0.0362
66	280.0	0.9565	0.9432	0.8851	0.0134
67	336.6	0.9710	0.9728	0.9195	0.0018
68	1000.0	0.9855	1.0000	0.9984	0.0145
DELTA TEORICO =					0.0874

Tabla 12 – Modelo de Distribución Gamma 2P.

Fuente: Autoría Propia

Una vez realizadas las distribuciones, procedemos a aplicar las pruebas de bondad de ajuste, en la teoría estadística, las pruebas de bondad de ajuste más conocidas son la χ^2 y la Kolmogorov – Smirnov, sin embargo, para el tratamiento de datos estadísticos hidrológicos se considera más adecuado la aplicación de Kolmogorov – Smirnov, procedimiento que es recomendado por el manual de hidrología y consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia D entre la función de distribución de probabilidad observada $F_o(x_m)$ y la estimada $F(x_m)$.

5.1.3.3. Pruebas de Bondad

RESUMEN	
DELTA TABULAR	0.1649
DELTA TEORICO - DELTA TABULAR	
NORMAL:	0.0453
GUMBEL:	0.0479
LOG GAMMA 3P	0.8206
LOG NORMAL DE 3 P:	0.0982
GAMMA 2 P:	0.0775
LOG NORMAL DE 2 P:	0.1081
LOG GUMBEL:	0.0592
MINIMO	0.0453
LA DISTRIBUCION A EMPLEAR SERA NORMAL	

Tabla 13 – Pruebas de Bondad.
Fuente: Autoría Propia

Una vez que se determina cuál es la distribución que más adecua a la data en estudio, se procede a colocar los parámetros obtenidos del análisis que en nuestro caso pertenecen a la distribución normal.

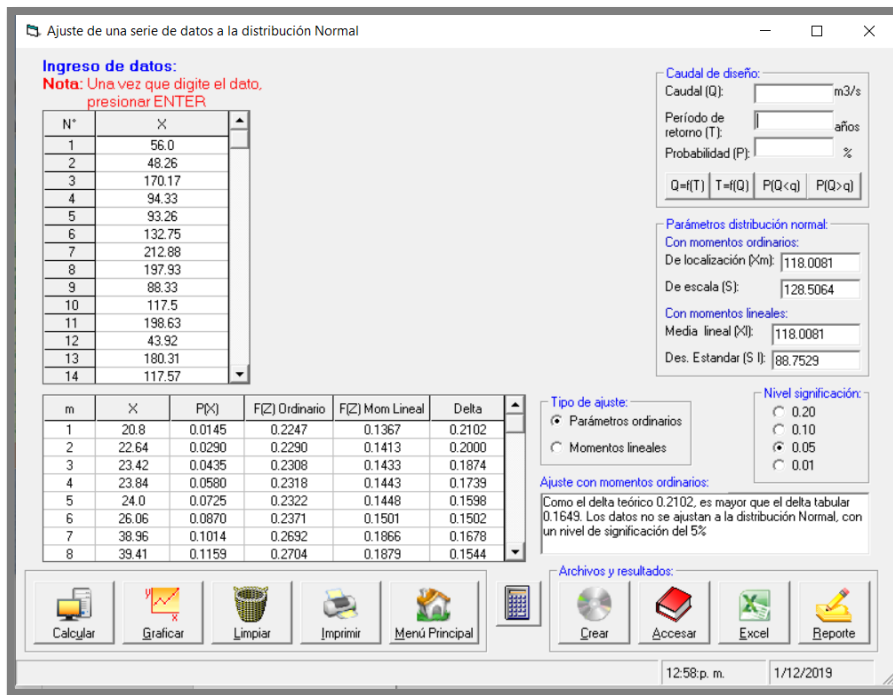


Imagen 44 – Distribución Normal – Hidroesta
Fuente: Autoría propia

Parámetros de la Distribucion Normal		
Con momentos ordinarios :		
Parámetro de localizacion	(Xm)=	118.0081
Parámetro de escala	(S)=	128.5064
Con momentos lineales :		
Media lineal	(Xl)=	118.0081
Desviación estándar lineal	(Sl)=	88.7529

Tabla 14 – Parámetros de Distribución Normal.
Fuente: Autoría Propia

Para la estimación de la profundidad de socavación, el período de retorno mínimo deberá ser igual al utilizado en el diseño del puente y para un caudal de no más de 500 años de periodo de retorno que es el caudal para verificar la estabilidad de la cimentación del puente. En ese caso, se considera que se trata de un evento extremo. (Ministerio de Transportes y comunicaciones, 2012).

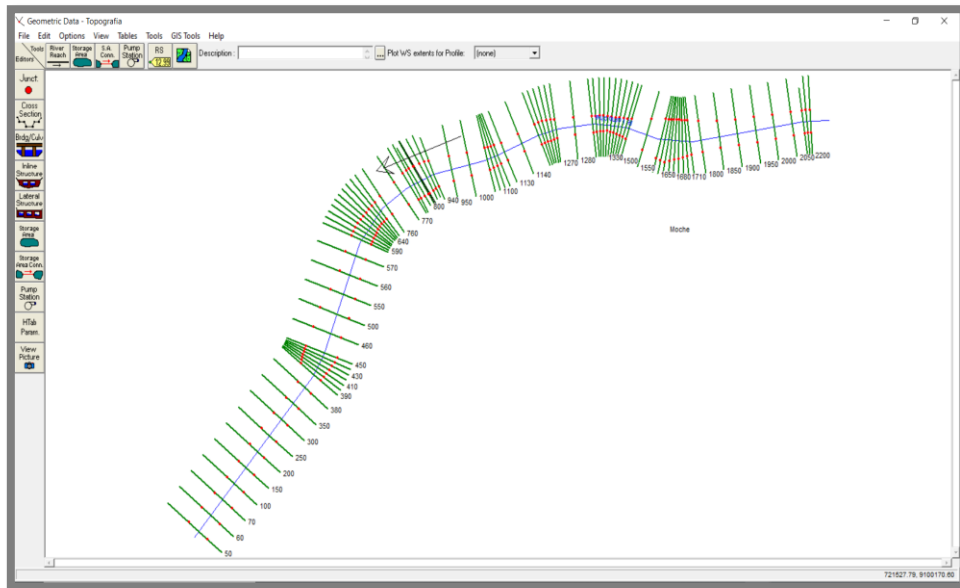
Imagen 45 – Caudal de diseño para T=500 años
Fuente: Autoría propia

Se calculó el caudal para un periodo de retorno de 500 años, llegando hasta el tope de 487.91 m³/s.

Sucede que el caudal calculado procedente del análisis estadístico no satisface las expectativas ni tampoco supera al caudal máximo que ha escurrido por el cauce del río Moche, el cual según la data obtenida ha llegado hasta 1000 m³/s en el año 1998, por lo tanto, creemos conveniente emplear este último en reemplazo del caudal obtenido bajo las solicitudes del manual de hidrología, por ser el más desfavorable de ambos resultados.

5.1.4. Modelamiento Numerico Unidimensional

Se planteó y realizó un modelo hidráulico contemplando los datos de ingreso de caudal aguas arriba del puente, teniendo en cuenta la topografía, la ubicación de los pilares y los estribos del mismo, no obstante, los resultados obtenidos se compararán en semejanza con los del modelo bidimensional y tridimensional respectivamente.



*Imagen 46 – Software “HEC-RAS” interfaz “Geometric Data”.
Fuente: Autoría propia*

Se importó la topografía en formato de secciones transversales, las cuales se organizaron de manera secuencial dentro de la interfaz “Geometric Data” del software “HEC-RAS”, dándole la forma del alineamiento que naturalmente describe el cauce del rio Moche.

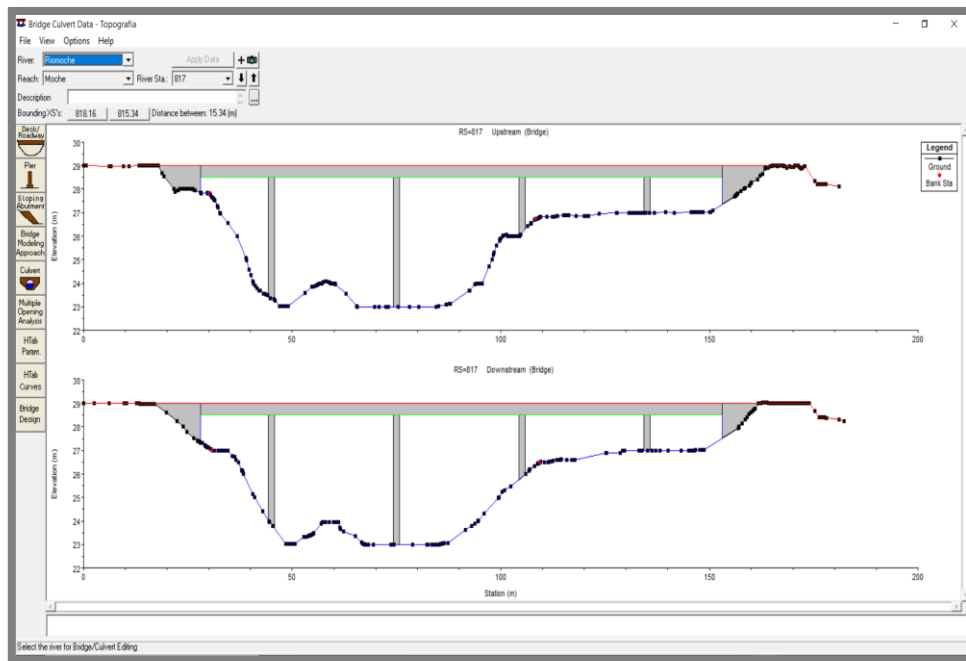


Imagen 47 – Características del Puente
Fuente: Autoría propia

Ingresamos las características del puente, tales como la geometría de los pilares, longitud de la losa, longitud de los estribos y espesor de la losa, para finalmente aplicarlo y ubicarlo dentro del modelo hidráulico.

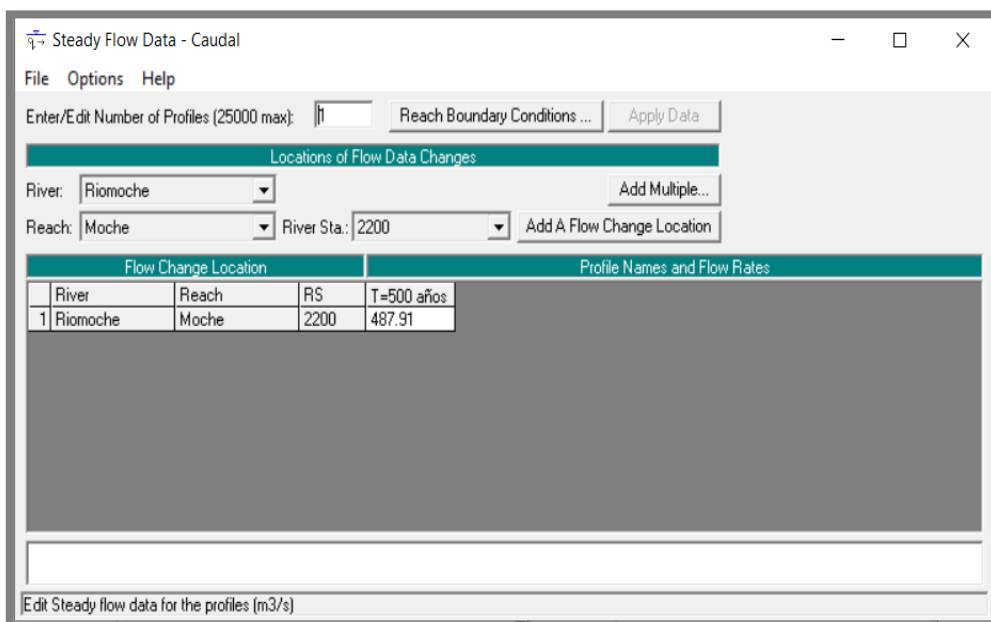


Imagen 48 – Configuración para el modelo hidráulico del cauce
Fuente: Autoría propia

Hecho esto, procedemos a ingresar la información correspondiente al caudal para un periodo de retorno de 500 años, además de configurar las condiciones de contorno para el modelo hidráulico del cauce.

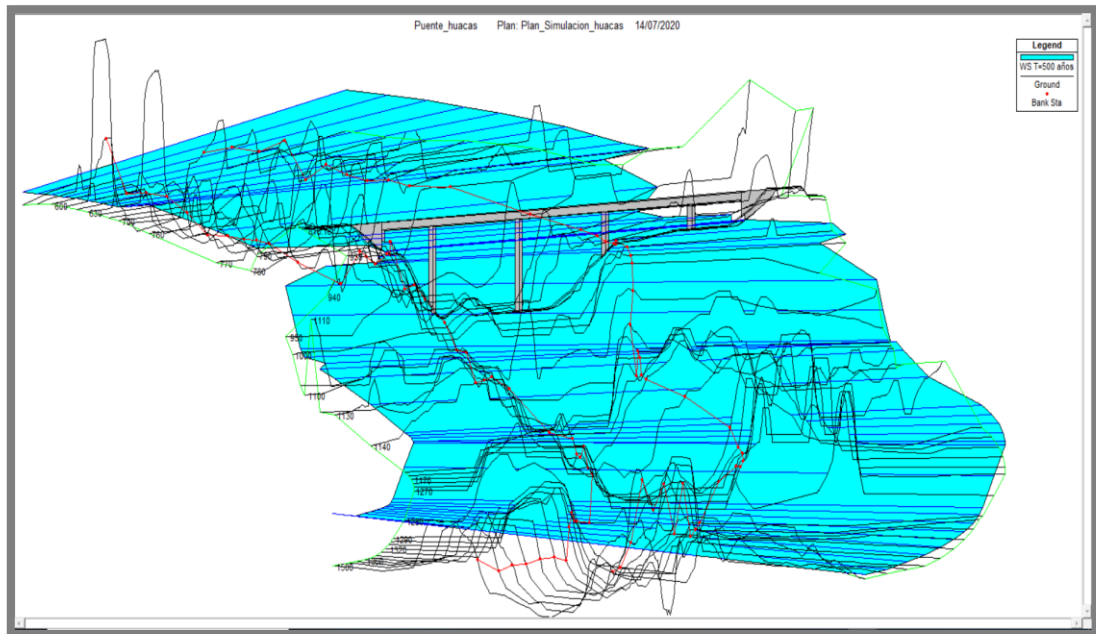


Imagen 49 – Planicie inundable

Fuente: Autoría propia

Finalmente calculamos el modelo, obteniendo así la planicie inundable, como también el desempeño hidráulico del puente bajo las condiciones de máxima avenida propuestas.

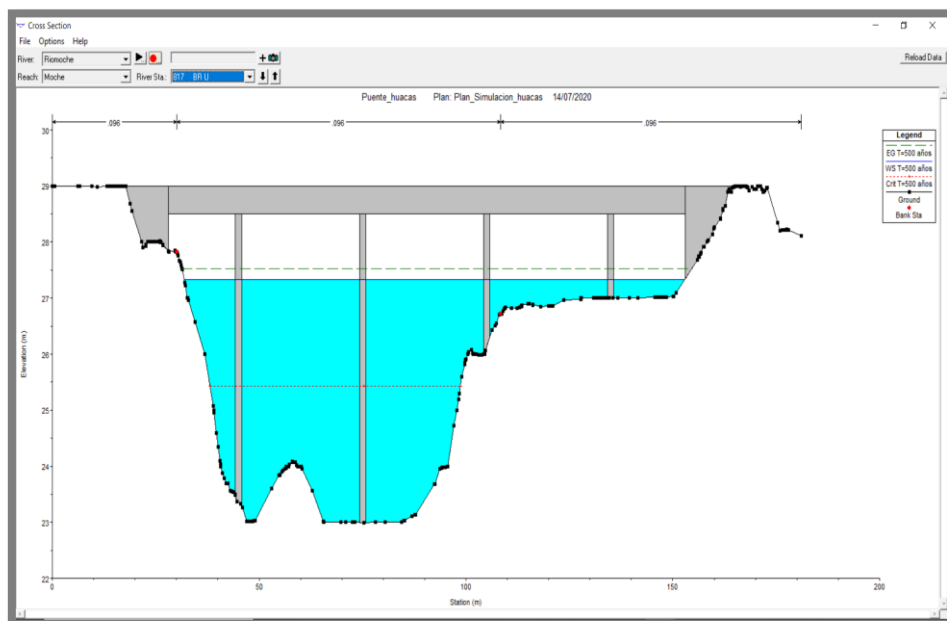


Imagen 50– Longitud de Galibo

Fuente: Autoría propia

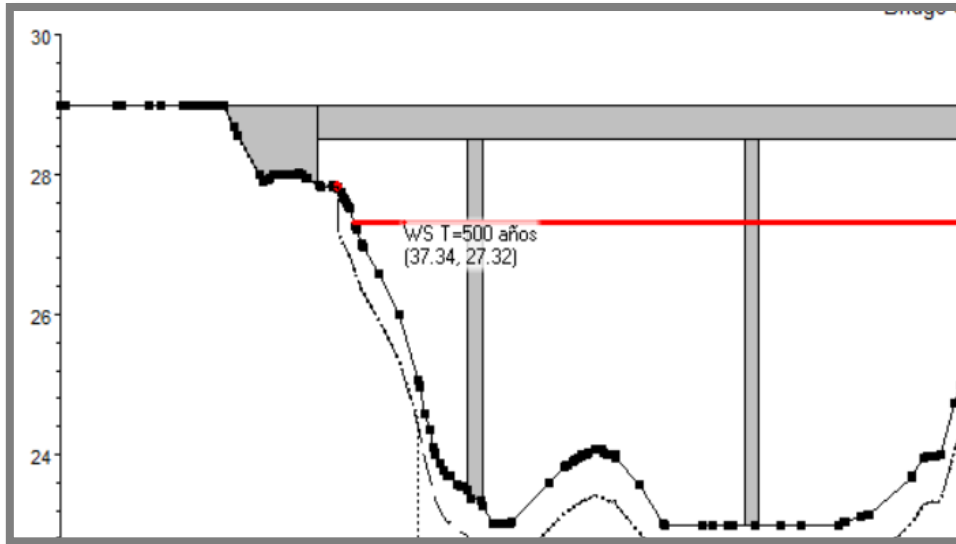


Imagen 51 – Nivel del agua para un T=500 años
Fuente: Autoría propia

Como se puede apreciar en la imagen superior, el puente no es cubierto en su totalidad por el nivel de agua lo que deja un gálibo de aproximadamente 1.18m, teniendo en cuenta que la cota del fondo de la loza es de 28.50 m.

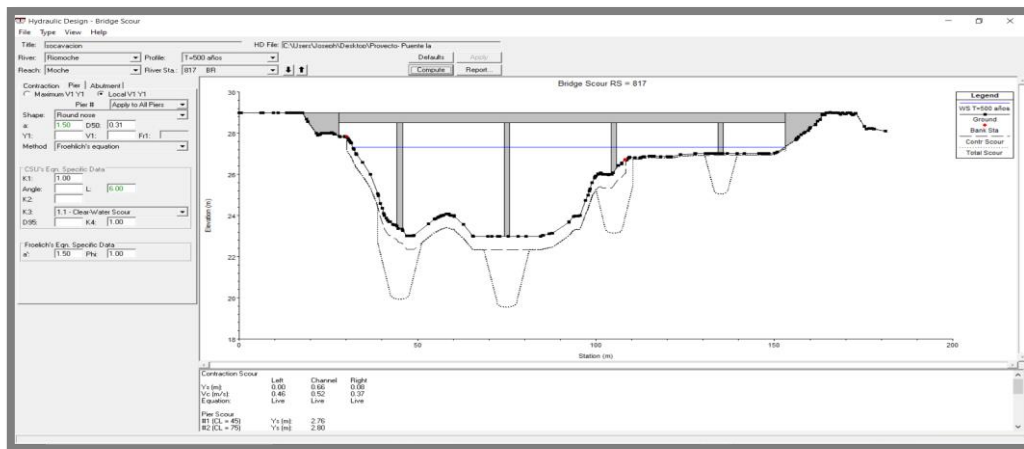


Imagen 52 – Niveles de Socavación Local
Fuente: Autoría propia

Finalmente, determinamos los niveles de socavación local en cada uno de los pilares y evaluamos el fenómeno de contracción de esta manera se determinará la socavación general en la sección a lo largo del emplazamiento de la estructura,

como se puede apreciar el gráfico nos muestra la socavación general y local respectivamente.

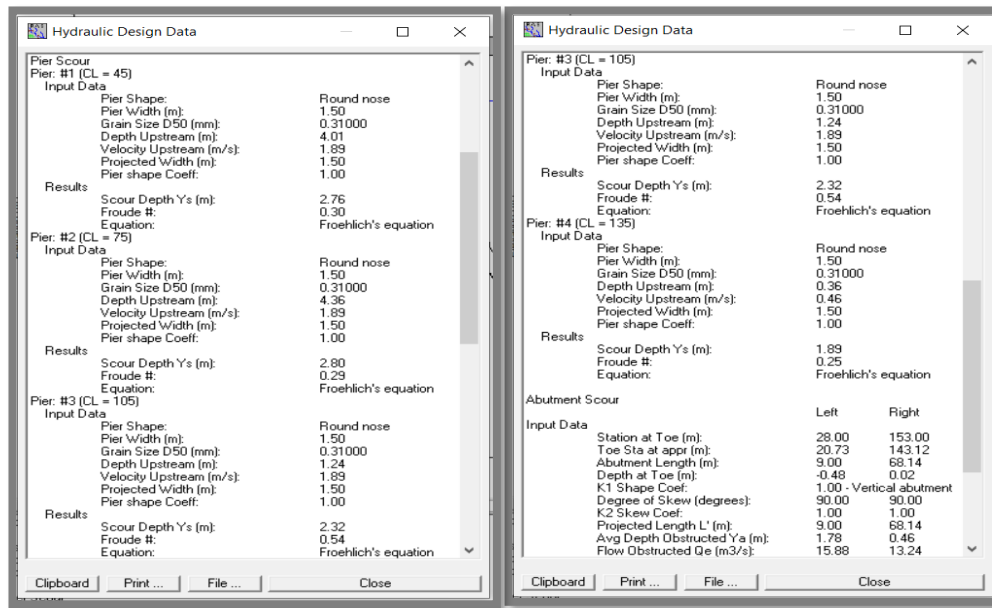


Imagen 53 – Resultados de Socavación General y Localizada
Fuente: Autoría propia

El software nos muestra un resumen de los resultados, en el cual podemos ubicar la socavación general y localizada en cada elemento de la sub estructura del puente.

Pier Scour		
#1 (CL = 45)	Ys (m):	2.76
#2 (CL = 75)	Ys (m):	2.80
#3 (CL = 105)	Ys (m):	2.32
#4 (CL = 135)	Ys (m):	1.89
Abutment Scour		
	Left	Right
Abutment Ys (m):		0.15

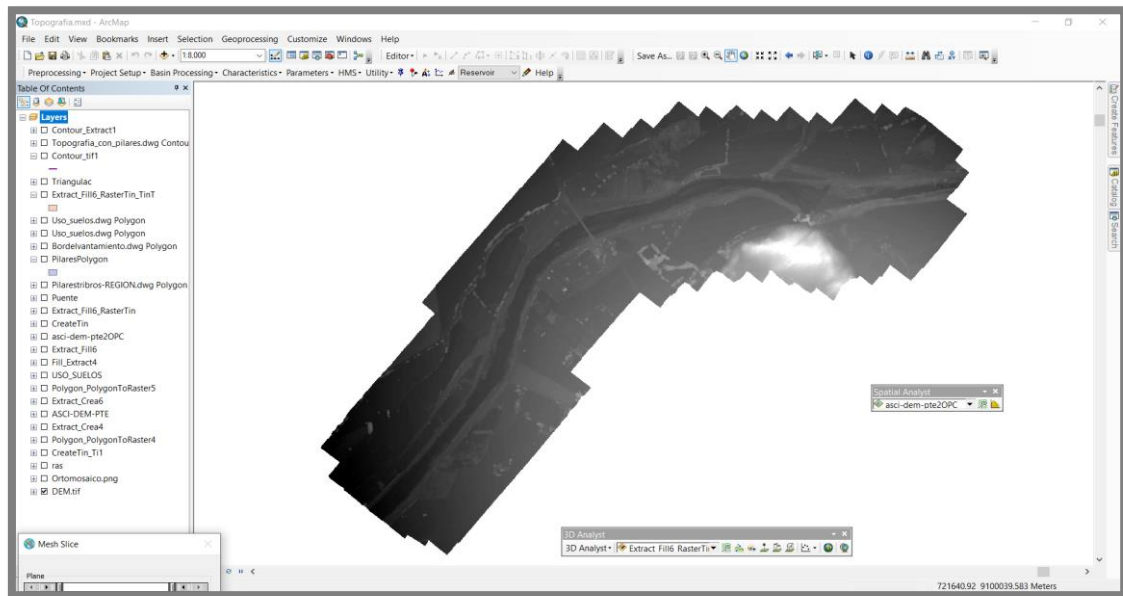
Imagen 54 – Resumen de Resultados de Socavación Localizada
Fuente: Autoría propia

Los pilares se han enumerado automáticamente de derecha a izquierda, siendo los resultados obtenidos para la socavación local los siguientes: P1: 2.76m, P2: 2.80m, P3: 2.32m y P4: 1.89m.

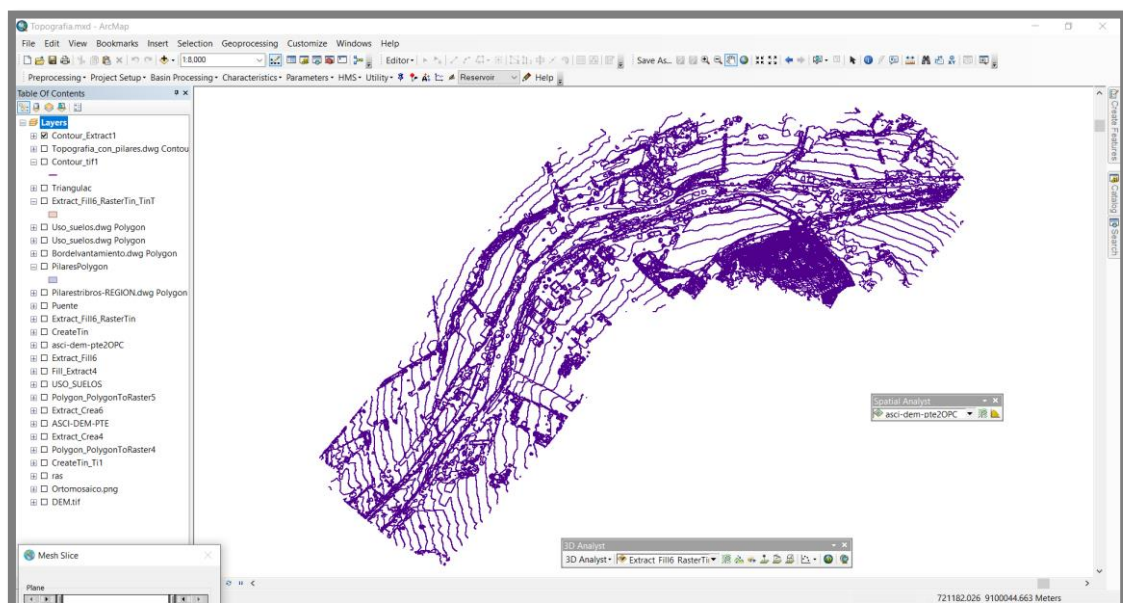
5.1.5. Modelamiento Numerico Bidimensional

5.1.5.1. Creación de Superficie en ArcGIS

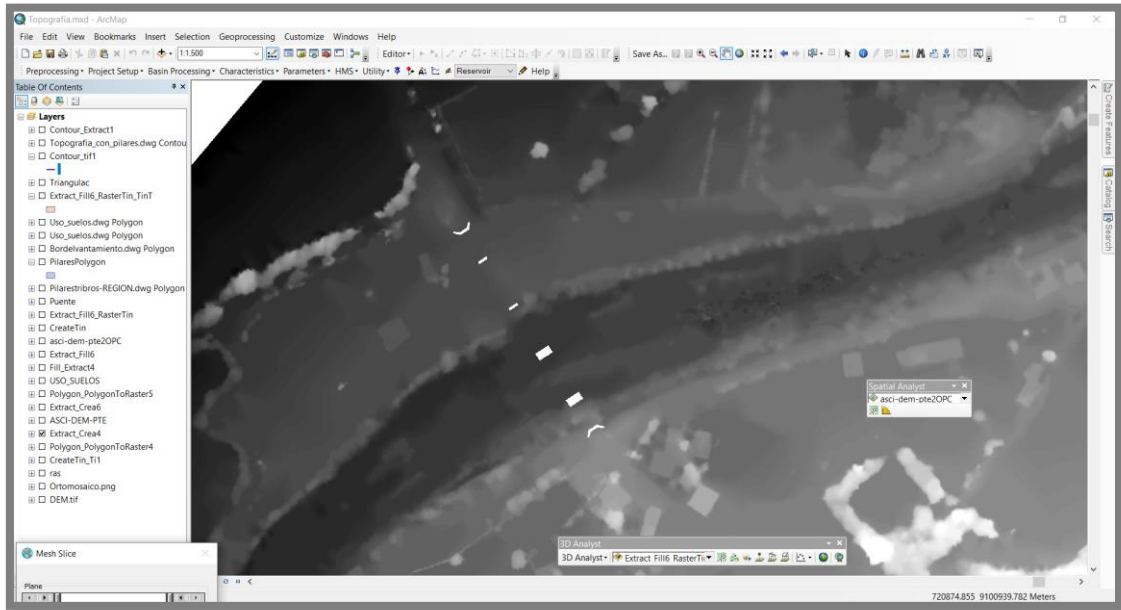
Mediante el apoyo del software, como lo es el ArcGIS, procedemos a crear una superficie de elevaciones digital con la finalidad de almacenar la información de las elevaciones del terreno dentro de los pixeles de la imagen.



*Imagen 55 – Creación del ráster para el procesamiento de la data topográfica
Fuente: Autoría propia*

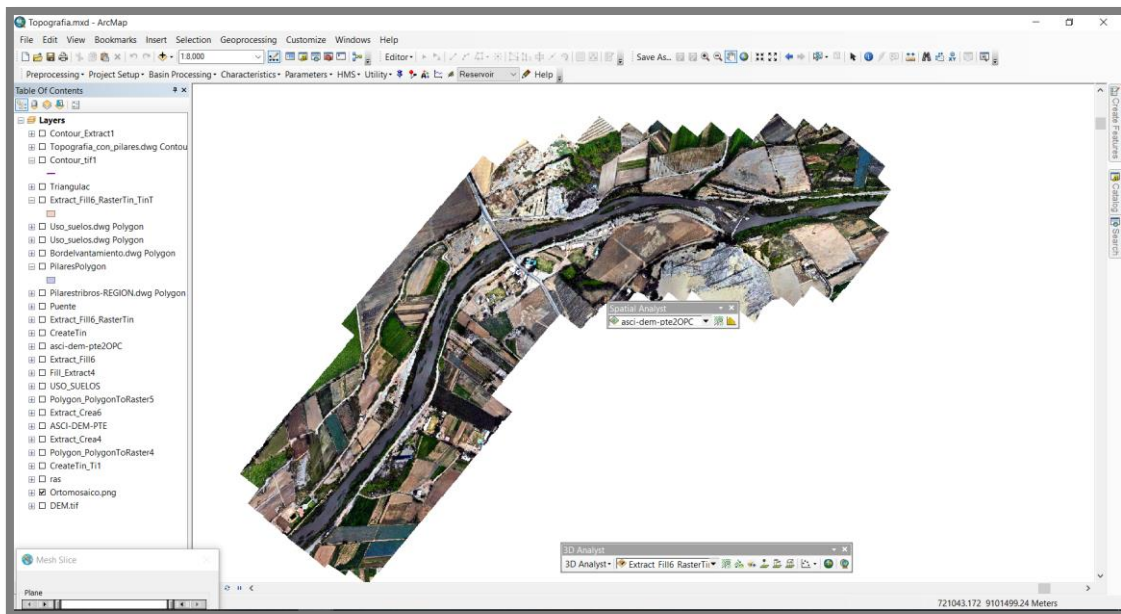


*Imagen 56 – Creación de las curvas de nivel para la representación gráfica del relieve
Fuente: Autoría propia*



*Imagen 57 – Inserción de las estructuras del puente (Pilares y estribos) dentro del raster
Fuente: Autoría propia*

Empleando una máscara realizamos la extracción de la información topográfica sectorizada para simular un elemento sólido o infinitamente rígido, lo que posteriormente en el software de modelo hidráulico será interpretado como estructuras de concreto armado.



*Imagen 58 – Georreferenciación de la orto imagen
Fuente: Autoría propia*

5.1.5.2. Creación de Malla en IBER

Una vez configurada la información correspondiente a las elevaciones del terreno que serán representadas mediante un DEM, procedemos a trasladar dicha data al software de modelamiento hidráulico, el cual consta de una herramienta inteligente que clasifica la información otorgándole precisión en función a lo accidentado que se encuentre el terreno, finalmente lo representará mediante una malla heterogénea.

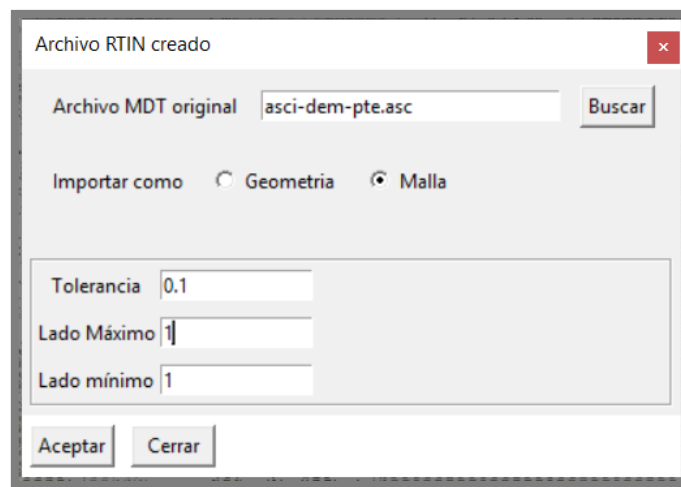


Imagen 59 – Asignación de la superficie digital de elevaciones al modelo hidráulico
Fuente: autoría propia

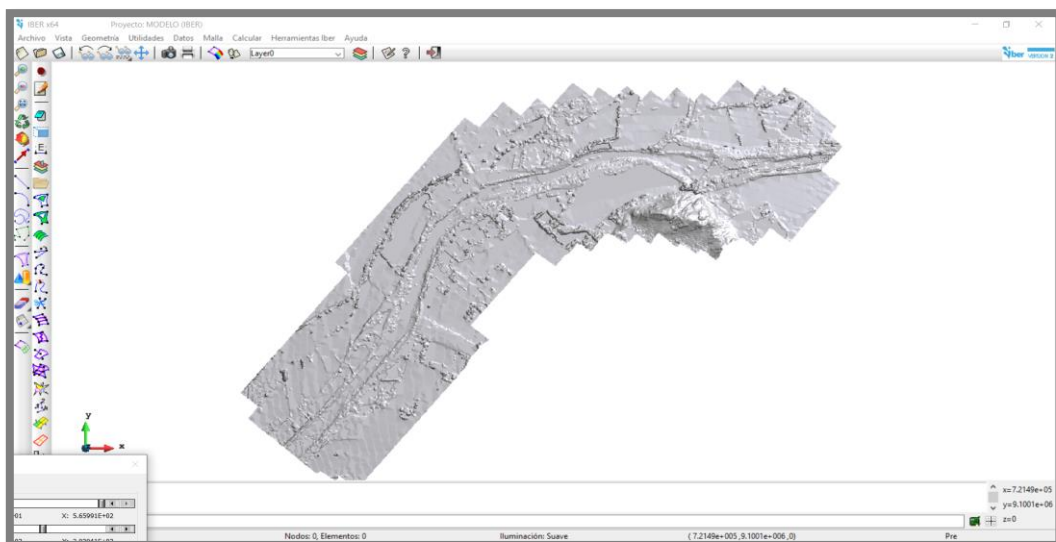


Imagen 60 – La superficie ya creada dentro de la interfaz de IBER
Fuente: Autoría Propia

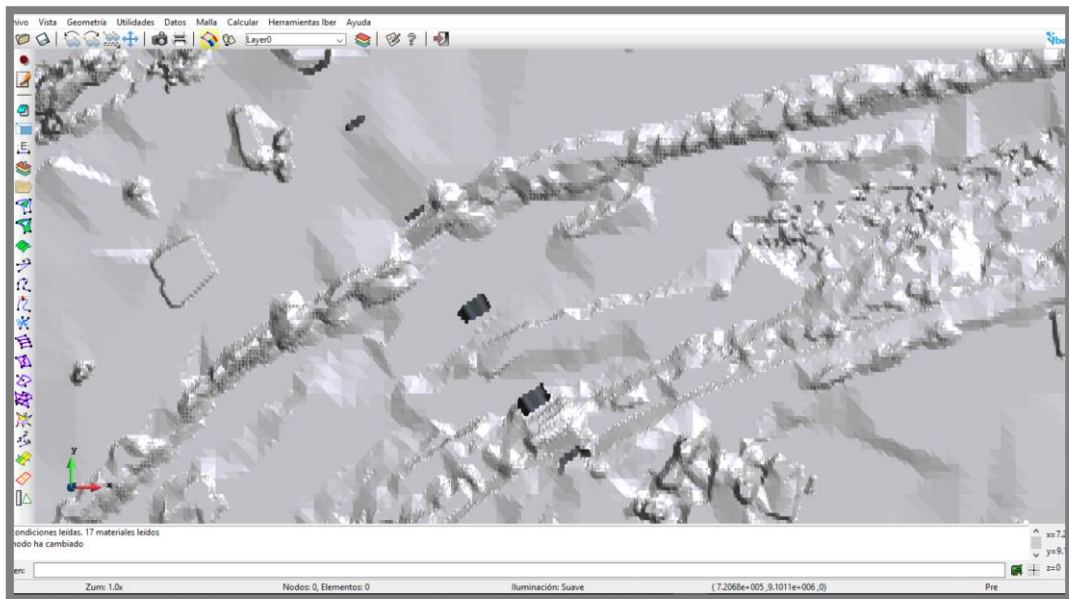


Imagen 61 – Representación de los elementos rígidos (Pilares y estribos)
Fuente: autoría propia

Tal como se había planteado al inicio, es imperativo representar mediante una extracción delimitada de información topográfica la existencia de un elemento rígido dentro del modelo, puesto que, tras el paso del agua, la teoría nos dice que empezará a erosionarse alrededor de esta estructura representando así la presencia de los pilares de un puente.

5.1.5.3. Asignación de Uso de Suelos

Es muy importante resaltar que existe la necesidad de representar la realidad lo más cercano posible, no obstante, aunque una superficie es heterogénea se debe establecer la resistencia que esta pone ante el escurrimiento del agua a través de ella.

El parámetro que representa dicha contraposición al escurrimiento se denomina rugosidad en el campo de la hidráulica, y está representado mediante los coeficientes de Manning identificados por la letra “n”, sin embargo aunque existen valores sugeridos por el manual de hidrología y por bibliografías como lo es Ven Te Chow, no se están considerando todas las superficies existentes, por lo tanto debido a la gran variedad que contemplan, se han desarrollado metodologías alternas que apoyan en la asignación de las rugosidades mediante la estimación

de estas a través de fórmulas empíricas, una de ellas es la metodología de Cowan, la cual es además recomendada por el Manual de hidrología de MTC.

5.1.5.3.1. Creación de los Formatos para Delimitación del Uso de Suelo

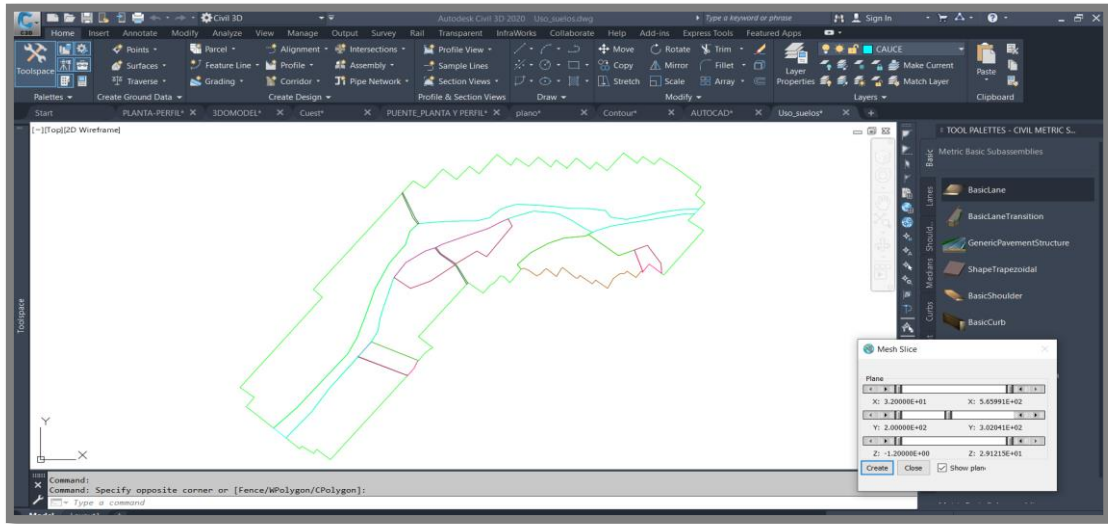


Imagen 62 – Sectorización del uso de suelos para el modelo hidráulico
Fuente: Autoría propia

Antes de asignar algún coeficiente, debemos primero identificarlos y clasificarlos, por ello planteamos la creación de un mapa para la determinación del uso de suelos dentro del sector de intervención del proyecto actual.

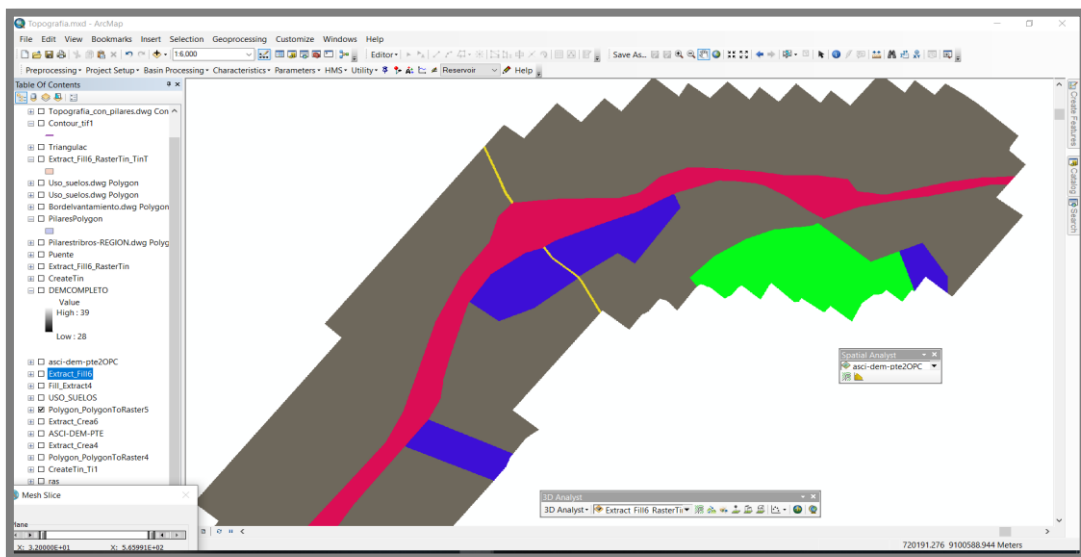


Imagen 63 – Clasificación del uso de suelos para el modelo numérico
Fuente: Autoría propia

Una vez creado el mapa de asignación de uso de suelos, procedemos a crear un archivo en formato ráster, el cual nos permitirá asignar la información de las rugosidades en el modelo hidráulico, previamente encontrando los valores para cada uno de los sectores establecidos para nuestro proyecto.

5.1.5.3.2. Estimación de los Valores de Rugosidad

Posterior a la creación de los mapas de asignación de rugosidad y parámetros de inserción en el modelo, realizamos la estimación de los valores empleando las tablas de la metodología de COWAN, establecidas dentro del libro (Hidráulica de canales Abiertos, 1983) de Ven te Chow.

METODO DE COWAN PARA LAS RUGOSIDADES			
CARACTERISTICAS			valores
Material	tierra	n ₀	0.020
	Roca		0.025
	Grava fina		0.024
	Grava gruesa		0.028
Grado de Irregularidad	Ligero	n ₁	0.000
	Menor		0.005
	Moderado		0.010
	Severo		0.020
Variaciones en la sección transversal del canal	Gradual	n ₂	0
	Ocasional		0.005
	Frecuente		0.010 – 0.015
Efecto relativo de obstáculos	Despreciable	n ₃	0
	Menor		0.010 - 0.015
	Apreciable		0.020 – 0.030
	Severo		0.040 – 0.0060
Vegetación	Baja	n ₄	0.005 – 0.010
	Media		0.010 - 0.025
	Alta		0.025 – 0.050
	Muy alta		0.050 – 0.100
Grado de sinuosidad	Menor	m ₅	1.00
	Apreciable		1.15
	Severo		1.30

Tabla 15– Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad mediante la ecuación de COWAN

Fuente: (Chow, 1983, pág. 105)

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5$$

Fórmula 8 – Método de COWAN

Fuente: (Chow, 1983, pág. 105)

5.1.5.3.3. Cálculo de los Coeficientes de Rugosidad

USO DE SUELO	1. Cultivo
n0=	0.02
n1=	0.01
n2=	-
n3=	0.01
n4=	0.009
m5=	1
N final	0.049

Tabla 16 – Rugosidad para el cultivo

Fuente: Autoría propia

$$N1 = (0.02 + 0.01 + 0.01 + 0.009) \times 1 = 0.049$$

USO DE SUELO	2. Residencial
n0=	0.02
n1=	0.01
n2=	-
n3=	0.015
n4=	0.025
m5=	-
N final	0.07

Tabla 17 – Rugosidad para uso residencial

Fuente: Autoría propia

$$N1 = (0.02 + 0.01 + 0.015 + 0.025) \times 1 = 0.07$$

USO DE SUELO	3. Arenales
n0=	0.025
n1=	0.01
n2=	0.015
n3=	0.005
n4=	0.01
m5=	1.15
N final	0.07475

Tabla 18 – Rugosidad para los arenales

Fuente: Autoría propia

$$N1 = (0.025 + 0.01 + 0.015 + 0.005 + 0.01) \times 1.15 = 0.07$$

USO DE SUELO	4. Cauce
n0=	0.02
n1=	0.02
n2=	0.006
n3=	0.003
n4=	0.047
m5=	1
N final	0.096

Tabla 19 – Rugosidad para el cauce

Fuente: Autoría propia

$$N1 = (0.02 + 0.02 + 0.006 + 0.003 + 0.047) \times 1 = 0.096$$

USO DE SUELO	5. Asfalto
n0=	0.02
n1=	0.02
n2=	-
n3=	0.004
n4=	0.013
m5=	-
N final	0.057

Tabla 20 – Rugosidad para el cauce

Fuente: Autoría propia

$$N1 = (0.02 + 0.02 + 0.004 + 0.013) \times 1 = 0.057$$

Como se hace notar, no todas las rugosidades existen dentro de la tabla adjunta en el libro de (Hidráulica de canales Abiertos, 1983) de Ven Te Chow, sino que, las nuestras como por ejemplo Arenales, cauce, y residencial, no se encuentran como tal, por lo tanto mediante la aplicación de los factores citados anteriormente podremos estimarlas y aplicarlas dentro del modelo en análisis.

c. Concreto			
1. Terminado con llana metálica (palustre)	0.011	0.013	0.015
2. Terminado con llana de madera	0.013	0.015	0.016
3. Pulido, con gravas en el fondo	0.015	0.017	0.020
4. Sin pulir	0.014	0.017	0.020
5. Lanzado, sección buena	0.016	0.019	0.023
6. Lanzado, sección ondulada	0.018	0.022	0.025
7. Sobre roca bien excavada	0.017	0.020	
8. Sobre roca irregularmente excavada	0.022	0.027	
d. Fondo de concreto terminado con llana de madera y con lados de			
1. Piedra labrada, en mortero	0.015	0.017	0.020
2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.017	0.020	0.024
3. Mampostería de piedra cementada, recubierta	0.016	0.020	0.024
4. Mampostería de piedra cementada	0.020	0.025	0.030
5. Piedra suelta o <i>riprap</i>	0.020	0.030	0.035
e. Fondo de gravas con lados de			
1. Concreto encofrado	0.017	0.020	0.025
2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.020	0.023	0.026
3. Piedra suelta o <i>riprap</i>	0.023	0.033	0.036
f. Ladrillo			
1. Barnizado o lacado	0.011	0.013	0.015
2. En mortero de cemento	0.012	0.015	0.018
g. Mampostería			
1. Piedra partida cementada	0.017	0.025	0.030
2. Piedra suelta	0.023	0.032	0.035
h. Bloques de piedra labrados			
	0.013	0.015	0.017
i. Asfalto			
1. Liso	0.013	0.013	
2. Rugoso	0.016	0.016	
j. Revestimiento vegetal			
	0.030	0.500

Imagen 64 – Valores del coeficiente de rugosidad “n” - generalmente recomendados para el diseño – Asfalto
Fuente: (Chow, 1983, pág. 109)

5.1.5.3.4. Asignación de Rugosidades en la Superficie

Procedemos a realizar la asignación de los mapas de uso de suelos en conjunto a los valores a los cuales están relacionados mediante algoritmos, para que el software de modelamiento hidráulico pueda interpretarlos y representarlos de manera visual.

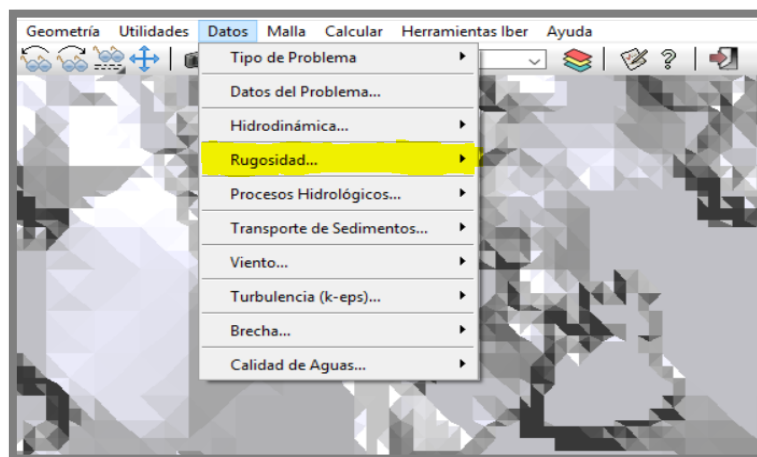


Imagen 65 – Configuración de la asignación de rugosidad
Fuente: Autoría propia

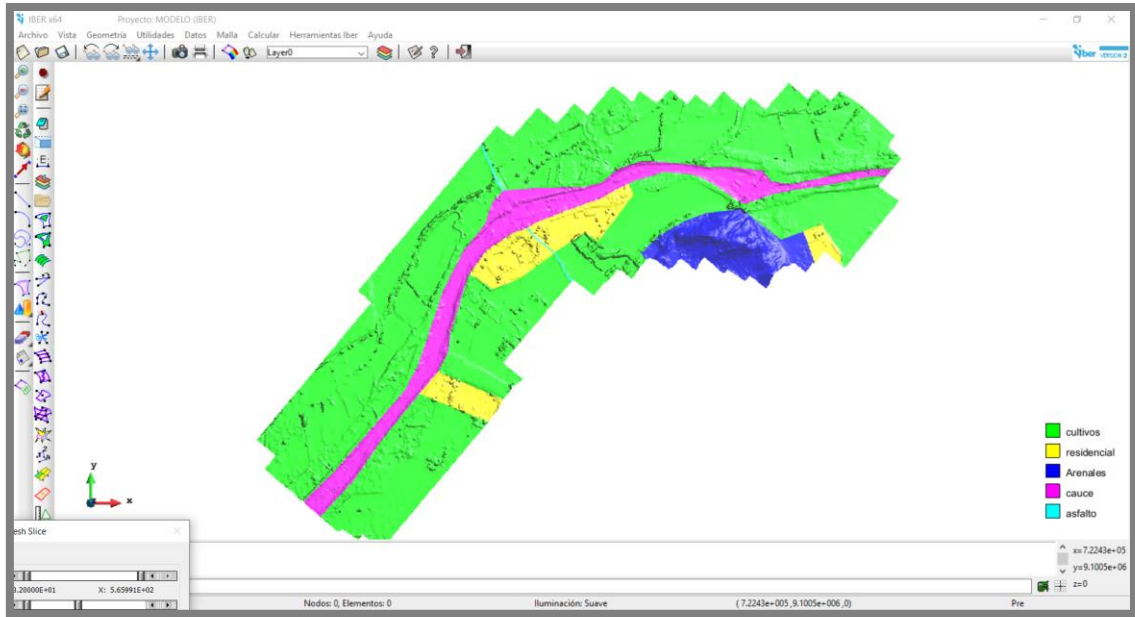


Imagen 66 – Asignación de los valores de rugosidad en función a los mapas de uso de suelo
Fuente: Autoría propia

5.1.5.4. Resultados del Modelo Hidraulico

El modelo hidráulico nos arroja diferentes resultados, sin embargo, es de nuestro interés únicamente conocer la magnitud de la erosión alrededor de los pilares.

5.1.5.4.1. Socavación Local

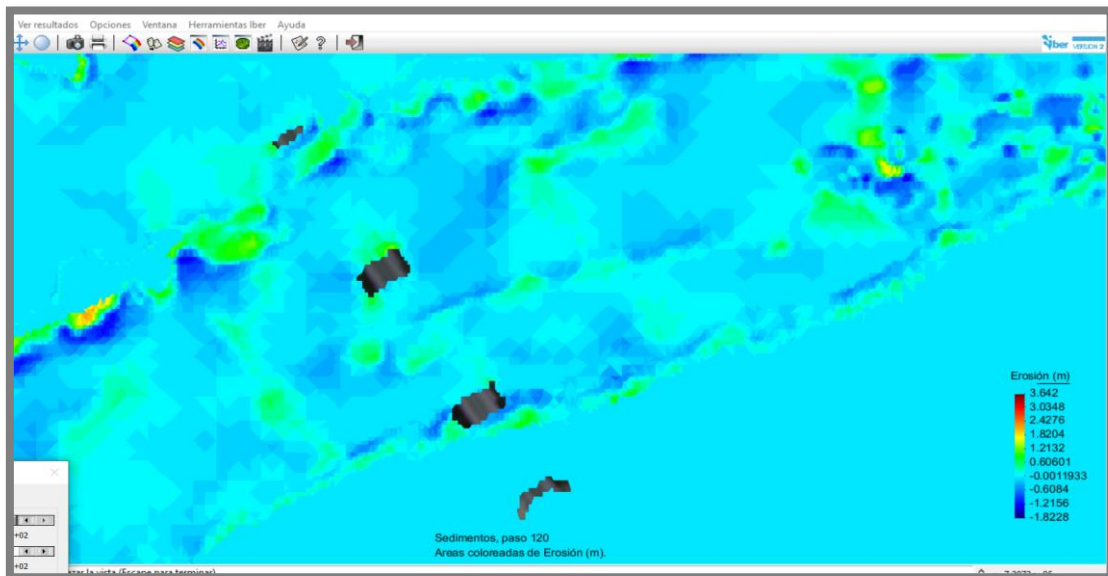


Imagen 67 – Socavación local en los pilares y estribos del Puente Huacas – Vista en planta
Fuente: Autoría propia

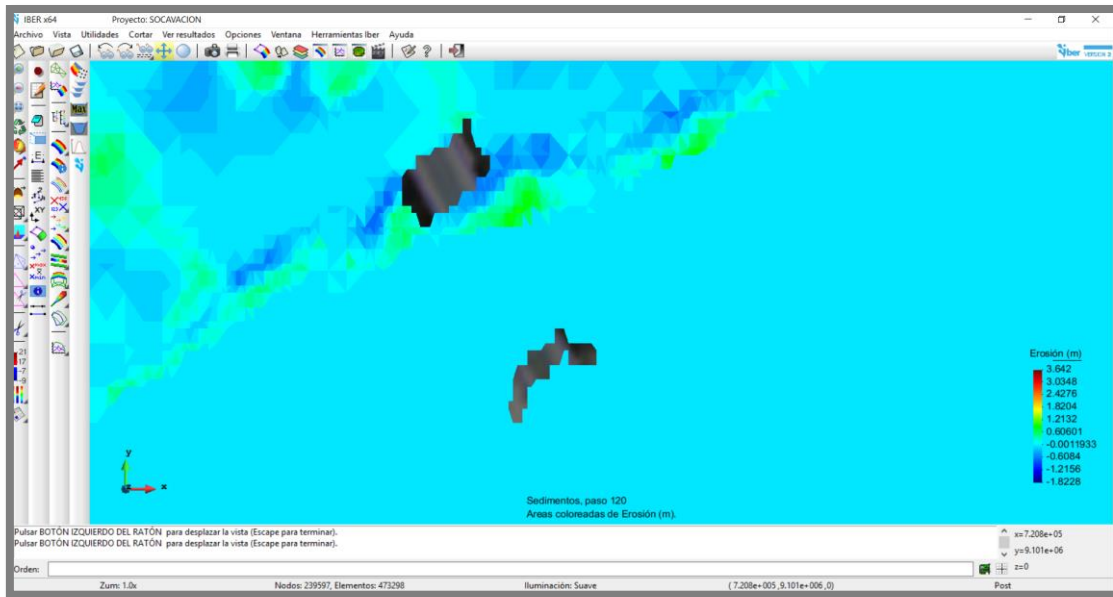


Imagen 68 – Socavación del primer pilar de la margen izquierda del Puente Fuente: Autoría propia

Como se puede apreciar en el gráfico no se observa erosión en el estribo de la margen derecha del puente, sin embargo, el primer pilar de izquierda a derecha está sufriendo socavación en un rango desde 1.80m hasta 2.47m.

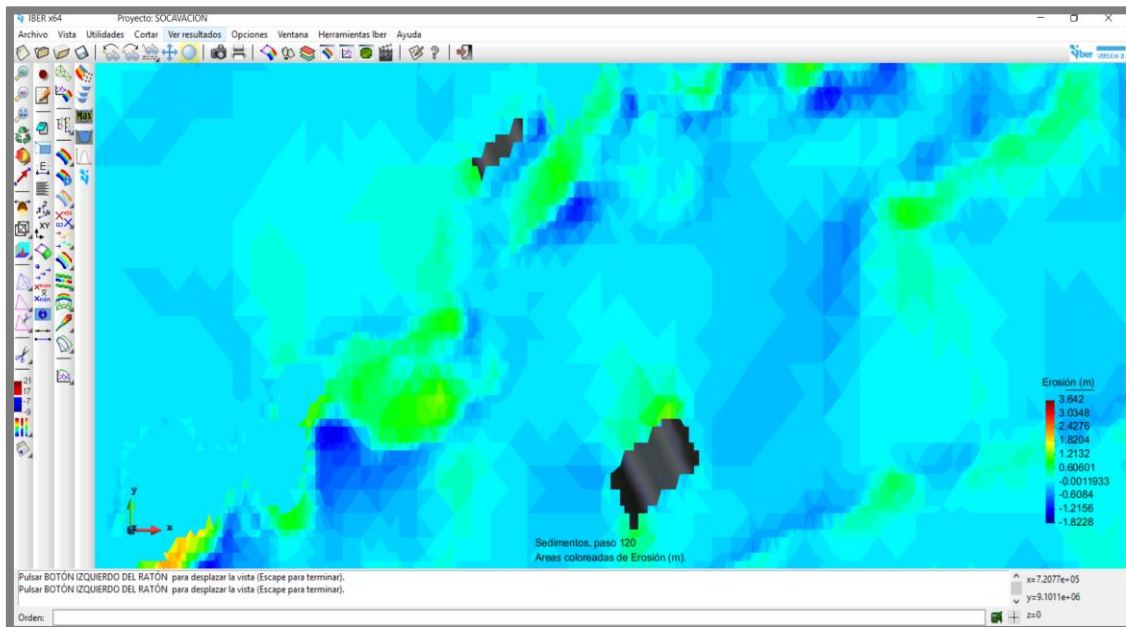
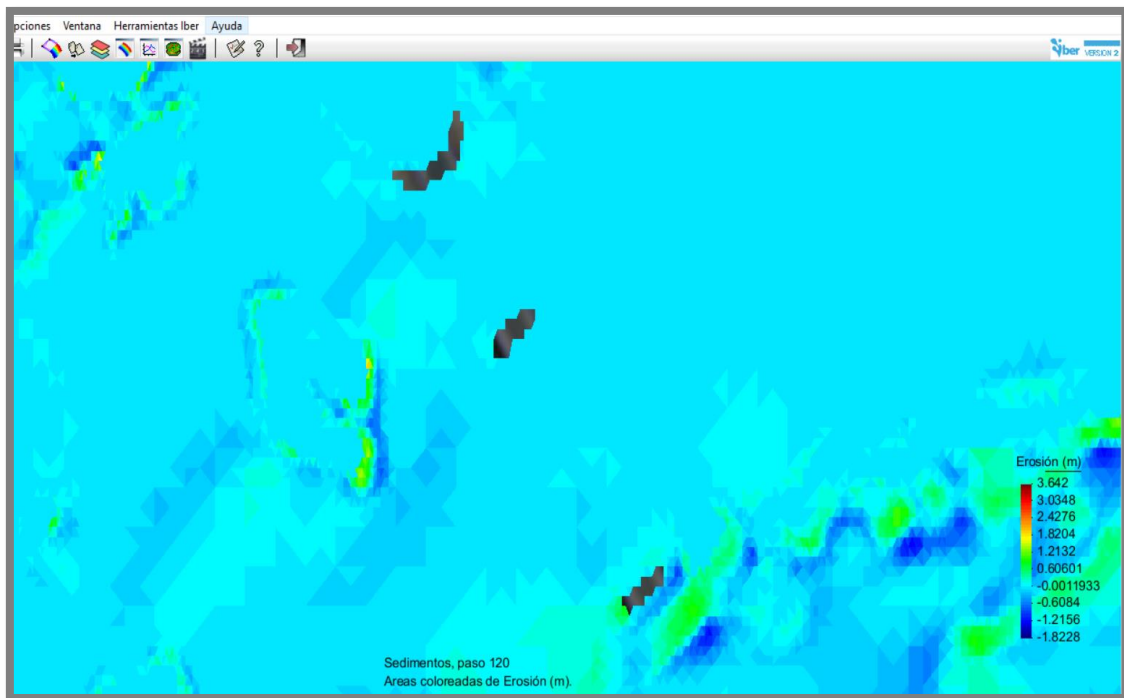


Imagen 69 – Socavación del segundo y tercer pilar desde el margen izquierdo – Puente Huacas Fuente: Autoría propia

El segundo y tercer pilar también se encuentran sufriendo daños por socavación la cual para el segundo se encuentra en un rango que va desde 1.21m hasta 1.82m y para el tercer pilar con valores entre 1.82m y 2.47m, esto último podría exponer la cimentación del pilar.



*Imagen 70 – Socavación del cuarto pilar y el estribo de la margen derecha – Puente Huacas
Fuente: Autoría propia*

Como se puede notar el cuarto pilar y el estribo de la margen derecha no se encuentran afectados de manera notable por la socavación.

5.1.6. Modelamiento Numerico Tridimensional

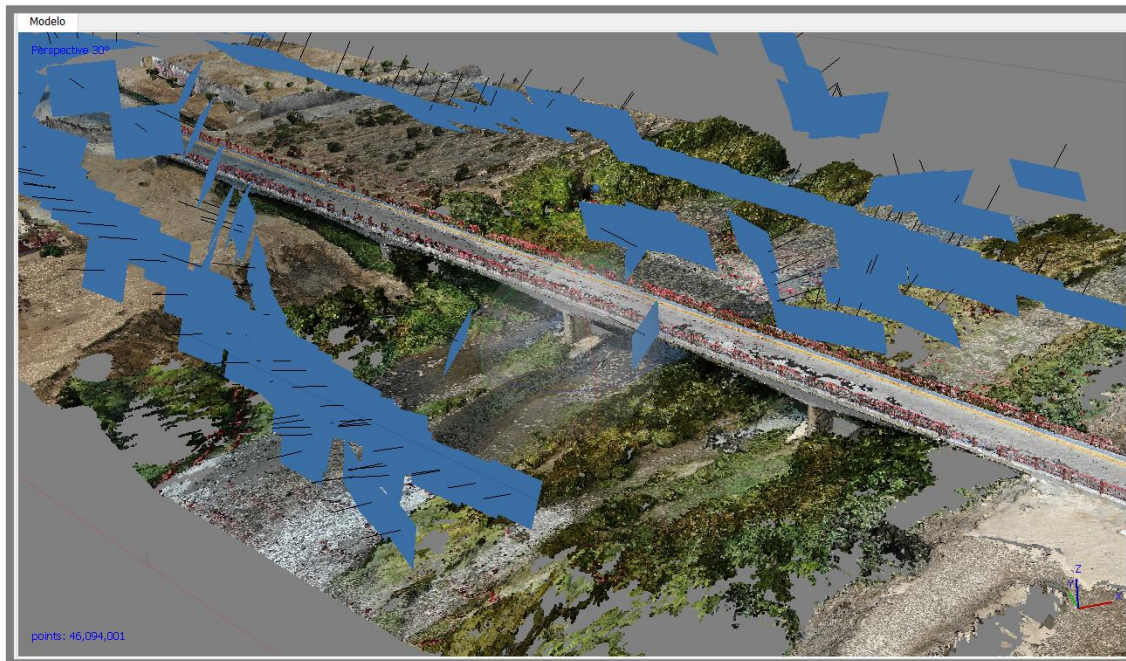


Imagen 71 – Levantamiento de la estructura del puente mediante fotogrametría con Drones.

Fuente: Autoría propia

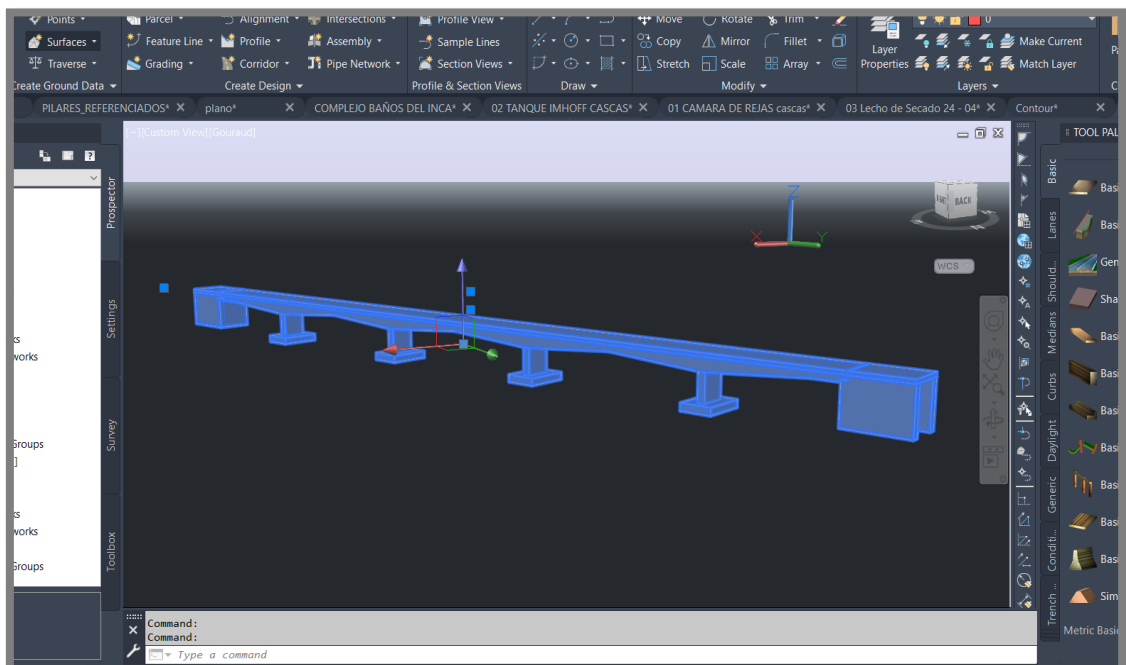
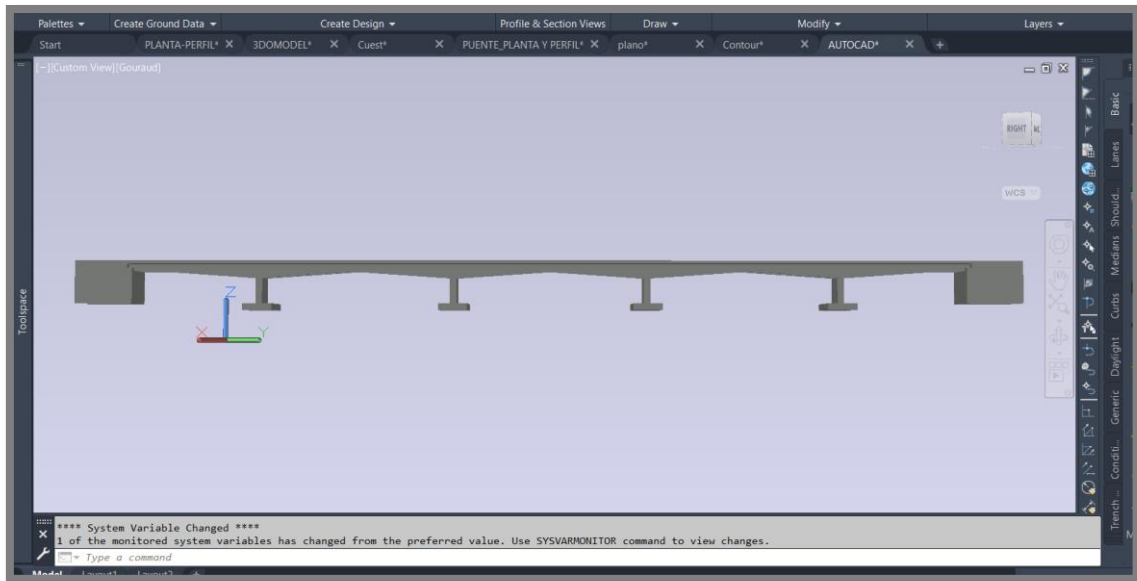
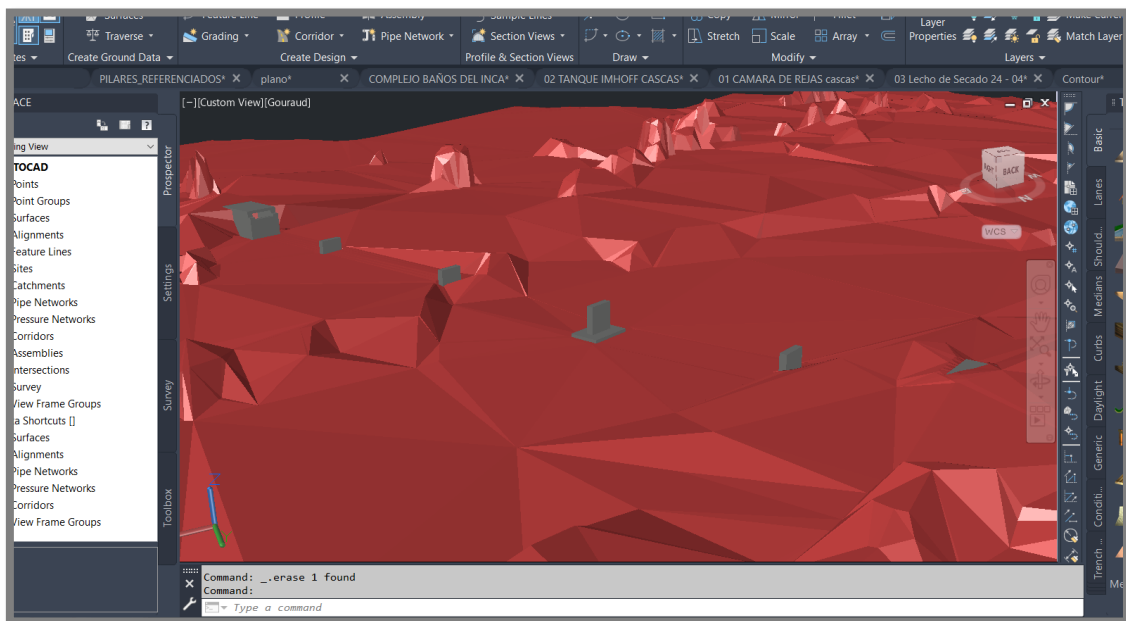


Imagen 72 – Creación de un archivo digital en 3 Dimensiones con la geometría del Puente Fuente: Autoría propia



*Imagen 73 – Vista en perfil de la geometría sólida del Puente
Fuente: Autoría propia*



*Imagen 74 – Asignación y creación de la superficie del terreno conteniendo la sub
estructura del Puente
Fuente: Autoría propia*

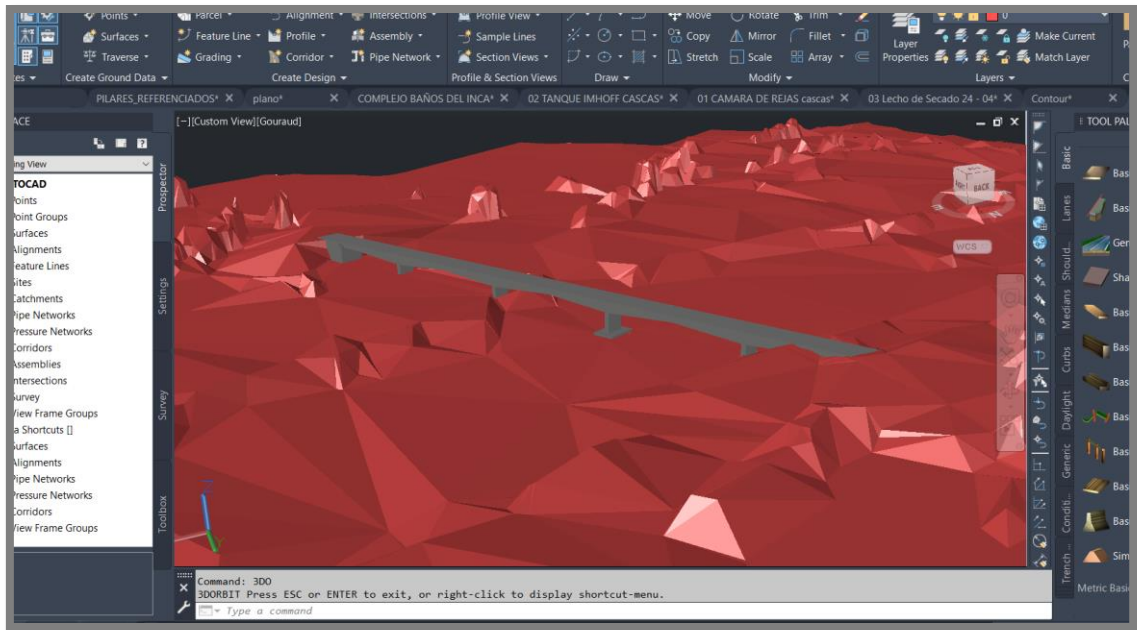


Imagen 75 – Formato tridimensional de la estructura del puente y el terreno del cauce del río moche
Fuente: Autoría propia

Sediment Definition [X]

Activate sediment scour model

Critical Shields Number definition

Prescribed val

Calculate value using Soulsby-Whitehouse

Local adjustments of Critical Shields Number

For slope effect

Bed Load Transport Rate equation

Meyer-Peter & Müller eq.

Nielsen equation

Van Rijn equation

Richardson-Zaki coefficient multiplier

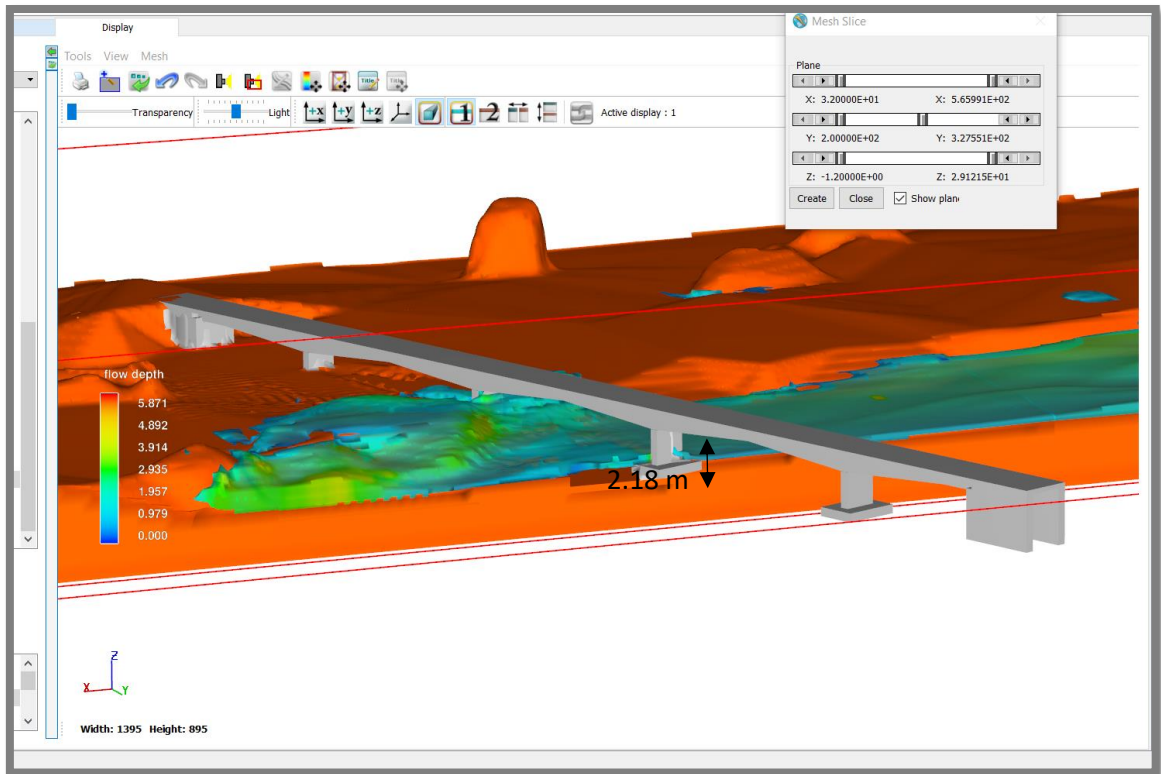
Molecular diffusion coefficient kg/m/s

Turbulent diffusion multiplier

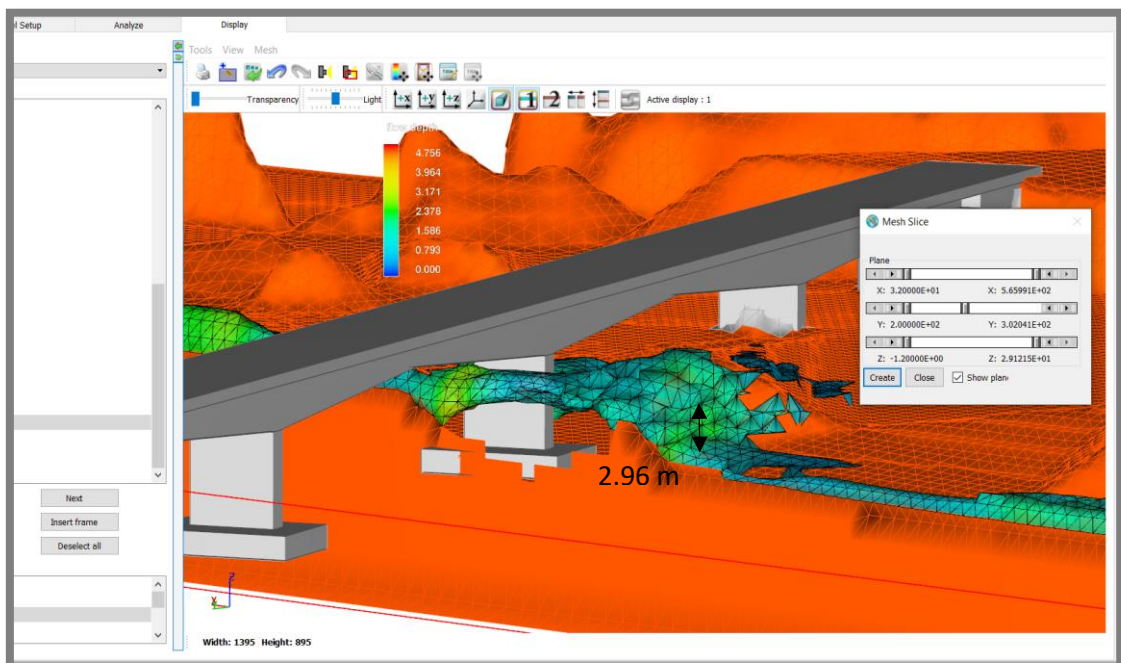
Number of sediment species Maximum packing fraction: Bed roughness / d50 ratio

Sediment 1: D10	10	6.7%
Sediment 2: D30	30	20.0%
Sediment 3: D50	50	33.3%
Sediment 4: D60	60	40.0%

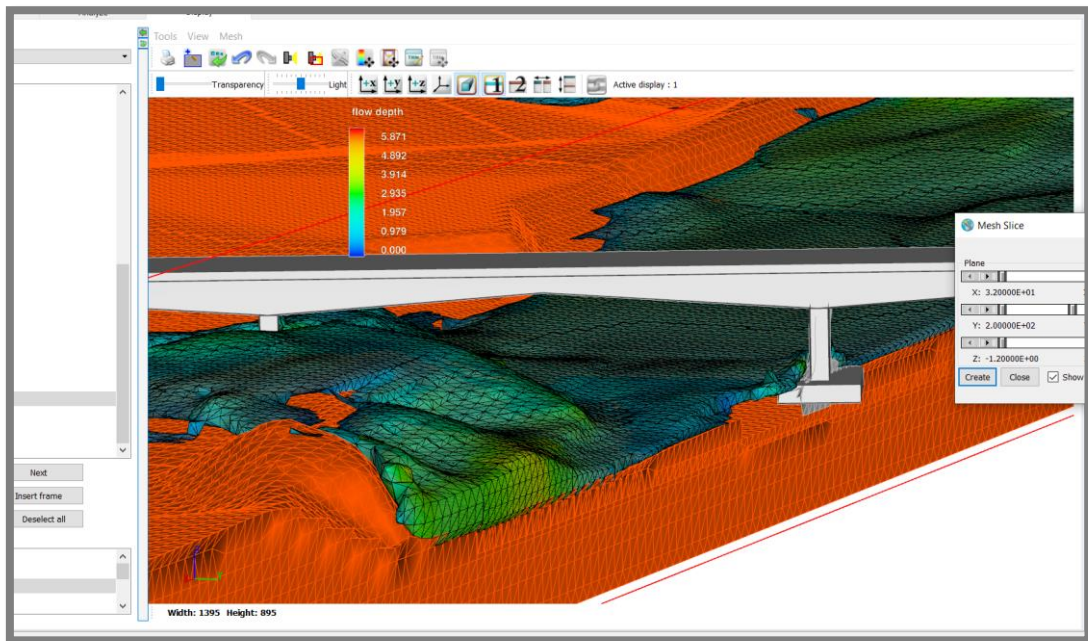
Imagen 76 – Ingreso de los datos del sedimento en función a los diámetros característicos
Fuente: Autoría propia



*Imagen 77 – Magnitud de la socavación alrededor de la cimentación expuesta en el segundo pilar desde la margen derecha y tercer pilar desde la margen izquierda – Profundidad socavada de 2.18m
Fuente: Autoría propia*



*Imagen 78 – Magnitud de la socavación alrededor de la cimentación expuesta en el tercer pilar desde la margen derecha y segundo pilar desde la margen izquierda – Profundidad socavada de 2.96 m.
Fuente: Autoría propia*



*Imagen 79 – Corte transversal del tercer pilar – Vista en perspectiva
Fuente: Autoría propia*

5.2. Prueba de Hipotesis

Siendo la hipótesis la siguiente: “La socavación en la sub estructura del Puente Huacas llega a ser de hasta 3.01 m de profundidad”, nosotros procedemos a decir que los valores encontrados mediante los modelos numéricos se aproximan bastante a lo propuesto y encontrado mediante fórmulas empíricas (Análisis unidimensional), y calculado mediante los modelos hidráulicos tanto bidimensional como tridimensional. Enfatizamos el hecho de que las fórmulas empíricas se consideran un análisis unidimensional ya que nos expresan resultados en un plano que representa la traslación en una dimensión del flujo de agua (eje X) y la socavación en una dimensión del lecho del cauce (Eje Y).

CAPITULO VI: DISCUSION DE RESULTADOS

- Mediante el empleo de fotogrametría como técnica y el uso de drones como herramientas realizamos la creación de un modelo digital de la estructura y sub estructura del Puente Huacas, obteniendo resultados satisfactorios que nos permitieron recrear las condiciones en las que se desarrolla el fenómeno natural de máxima avenida junto con el entorno que compone el emplazamiento del Puente Huacas.
- Con el apoyo de las herramientas del laboratorio de mecánica de suelos como lo son los tamices desde el número 200 hasta 5/8 realizamos la clasificación y distribución de la granulometría del suelo que compone el estrato superior del cauce del rio moche obteniendo así además los diámetros característicos como lo es el D30, D50 y D60, siendo el principal D50 = 0.305 mm.
- Se realizó un estudio de caudales empleando la data de la estación hidrométrica QUIRIHUAC, sin embargo, al realizar la proyección de un evento catastrófico en el cual se proyectó una frontera de 500 años para una máxima avenida, no se lograron obtener resultados satisfactorios, siendo un resultado de 487.91 m³/s para este análisis, consideramos no satisfactorio puesto que dentro de los registros del cauce existe un valor de 1000 m³/s sucedido en el mes de marzo de 1998, al cual mediante el análisis planteado se esperó superar para así obtener resultados conservadores.
- Se planteo un modelo unidimensional y no fue necesariamente comparado con metodologías que emplean el uso de técnicas sofisticadas como elementos finitos para la resolución de los cálculos del escurrimiento superficial y flujo en lamina libre, así como modelos de fraccionamiento de áreas y volúmenes como lo son los SOFTWARE IBER 2D Y FLOW 3D, sin embrago, ya que el análisis 1D determinan valores únicamente en una dirección se ha considerado únicamente para cumplir el objetivo de la investigación.
- Se creó mediante el uso de modelos digitales de elevaciones la superficie capaz de simular el tránsito de caudales a través de un modelo en dos dimensiones que representó esta topografía a través de un elemento MESH o un enmallado, al cual se le asignaron diferentes condiciones de contorno, así como también parámetros de rugosidad que representan la resistencia al flujo

de agua a través de la superficie del terreno en estudio, el modelo creado cumplió las expectativas esperadas siendo representativo y permitiendo conocer los valores de la socavación localizada en cada uno de los elementos que conforman la sub estructura del “Puente Huacas”.

- Para tener resultados mucho más cercanos a la realidad en la cual nos encontramos, se planteó la creación de un modelo hidráulico computacional en tres dimensiones para el análisis de la socavación alrededor de los pilares del Puente Huacas, este modelo no solamente forma parte de los objetivos de nuestra investigación, si no también es muy importante ya que representa de manera gráfica y visual los resultados de sus cálculos, ante los cuales se puede medir de manera directa como si de un modelo físico a escala se tratase, esto último es de gran ayuda para la indagación, identificación y estudio de fenómenos naturales producidos dentro de un entorno cerrado y bajo control del usuario que lo manipula, por lo tanto los resultados vertidos por el modelo hidráulico del software son muy fiables no solamente por las técnicas que emplea para determinarlos (Resolución de ecuaciones diferenciales en 3 dimensiones) sino también porque los valores obtenidos son bastante cercanos a los calculados mediante el modelo bidimensional.
- Mediante el planteamiento del modelo bidimensional hemos podido estimar tanto los valores aproximados para la socavación o erosión a lo largo y ancho del cauce, sino también los valores para la socavación localizada alrededor de los pilares del puente, siendo los valores de la socavación general de hasta 3.64m como máximo y para la socavación local 2.47m, y en el modelo tridimensional llegando a ser de hasta 2.96m de profundidad.

CAPITULO VII: CONCLUSIONES

- Se realizó el modelamiento digital del cauce del rio moche, creando una superficie de elevaciones en AutoCAD civil 3D, para luego trasladarle a los formatos respectivos en los que cada uno de los softwares interpretará los datos de ingreso de elevaciones del terreno, incluyendo el emplazamiento del “Puente Huacas” para el cual se introdujo un puente con 130 m de longitud, y 4 pilares, cada uno con medidas de 3.80 m de largo con 1.00 m de ancho.

- Se encontraron los diámetros característicos empleando la granulometría como base para interpolar los resultados correspondientes al porcentaje del cual se desea conocer el diámetro, siendo los resultados: $D_{10} = 0.184$ $D_{30} = 0.256$ $D_{50} = 0.305$ $D_{60} = 0.368$.
- Mediante los procedimientos de estadística hidrológica recomendados por el manual de hidrología del MTC, se analizaron los caudales registrados por la estación Quirihuac, de los últimos 69 años, de los cuales se determinó el caudal de máxima avenida para un periodo de retorno $T=500$ años, siendo un total de 487.91 m³/s, y se analizaron los caudales más representativos de la muestra, siendo el mayor de 1000 m³/s.
- Se realizó el modelo bidimensional en software IBER, además se contempló el análisis con celdas de 1.00 m x 1.00 m, para obtener precisión en los cálculos, introduciendo las condiciones de contorno entre las cuales está el ingreso del caudal, además se activó la herramienta para el transporte de sedimentos ingresando el D_{50} o diámetro medio de la partícula para su respectivo análisis.
- Se construyó un modelo computacional hidráulico en 3 dimensiones para el cual se consideró una malla 0.50 m x 0.50 m, puesto que mediante la técnica "Fractional Área Volumen" no se requiere espaciamientos demasiado pequeños para mostrar detalles, ya que esto demanda días o semanas para una sola simulación en un computador de escritorio estándar, todo esto según los lineamientos del manual del software.
- La socavación general del cauce se obtuvo del modelamiento numérico bidimensional que nos muestra un mapa de valores con intervalos diferentes, para el cual se determinó el máximo en 3.64 metros, para el sector aguas arriba del Puente Huacas.
- Para la estimación de la socavación local, se puede basar en los resultados de ambos modelos, siendo el modelo en 3 dimensiones el más cercano a la realidad física en la que nos encontramos, por ende los valores contemplados en los resultados de este modelo son 2.96 y 2.18m, sin embargo no se encuentran muy lejos de la socavación local en el modelo bidimensional para el cual se obtuvieron valores en los rangos desde 1.82m hasta 2.42 m

CAPITULO VIII: RECOMENDACIONES

- Para lograr mejores resultados en cuanto a los caudales se recomienda la instalación de aforadores para el control y registro de caudales máximos cerca de estructuras importantes como lo son en este caso los puentes, ya que nos permitirán a futuro tener nociones más realistas al calcular nuevas estructuras de cruce de vía en dicho cauce o realizar ajustes en las ya existentes.
- En el análisis tridimensional, se puede complementar con un análisis de transporte de sólidos a gran escala, como los que arrastra una máxima avenida tras su paso como por ejemplo troncos de árboles, todo ello en la actualidad y realidad en la que nos encontramos no es posible debido a nuestra limitada tecnología, de serlo en un futuro cercano supone una fuerte inversión por parte de los investigadores.
- Para ampliar la investigación podría realizarse de manera complementaria un modelo físico a escala adecuada, contemplando todas componentes de la realidad en la que se desenvuelve nuestro problema, sin embargo, debido a nuestro limitado financiamiento no podemos realizarlo, debido a que este tipo de procedimiento es muy costoso.

CAPITULO IX: REFERENCIAS

- ✓ Bedoya Cristancho, J. S. (2015). Modelación numérica de la socavación local en los estribos del puente sobre el Río Sunuba según las características hidrodinámicas de la zona. Bogotá: Pontifica Universidad Javeriana.
- ✓ Campa Rodríguez, A., & Astorga Bustillos, R. (2015). Métodos para el cálculo de la socavación local en pilas de puentes. Chihuahua: Tecnociencia.
- ✓ Castellanos Rangel, C. (2016). Evaluación del impacto de las alteraciones climáticas en un puente de concreto preesforzado. Bogotá: Universidad Industrial de Santander.
- ✓ Chow, V. T. (1983). Hdráulica de canales Abiertos. Ciudad de Mexico, Mexico: Diana.
- ✓ Duque Escobar, G., & Escobar Potes, C. E. (2002). Texto para la asignatura de Mecánica de Suelos I. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- ✓ Elbio Felipe, M. (2016). Socavación producida por el río Huallaga al puente colpa alta en la provincia de Huánuco, utilizando los métodos de artamanov, straub y maza, en el hec-ras. Lima: UDEP.
- ✓ Enciso Navarro, P. D. (2015). Estudio Hidráulico y Estimación de Socavación en el Puente Interconexión Muyurina- Ayacucho. Ayacucho: Universidad Nacional San Cristobal de Huamanga.
- ✓ Franco, F., & Scacchi, G. (2001). Aplicación del método de Lischtvan y Lebediev al calculo de la erosión general. La plata: Universidad del Litoral de Argentina.
- ✓ García Gutiérrez., P. F. (2009). Modelo de transporte de sedimentos de carga de fondo en cauces fluviales. La paz: Tecnociencia.
- ✓ Manterola, J. (2005). Evolución de los puentes en la Historia. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- ✓ Ministerio de Transportes y comunicaciones, M. (2012). Manual de hidrología, hidráulica y drenaje. Lima: Ministerio de Transportes y comunicaciones.
- ✓ Ochoa Rubio, T. (2013). Hidrología, Hidráulica y socavación en Puentes. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- ✓ Soto Castro, K. K. (2019). Estudio de máximas avenidas en la cuenca del Rio Moche mediante el software HEC-HMS. Trujillo: UNT.
- ✓ Vide Martín, J. P. (1997). Ingeniería Fluvial. Catalunya: Universidad Politecnica de catalunya.

CAPITULO X: ANEXOS