

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Civil

“COMPARACIÓN DE LA SOCAVACIÓN LOCAL EN PILAS DE SECCIÓN CIRCULAR Y RECTANGULAR EN PUENTES”

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniero Civil

Autores:

Jose Ciro Chilon Yopla

José Luis Bustamante Cusquisiban

Asesor:

Mg. Ing. Marco Josué Rupay Vargas

0000-0002-7891-1838

Lima - Perú

2024

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	Ing. Sheyla Yuliana Cornejo Rodriguez
	Nombre y Apellidos

Jurado 2	Ing. Kely Elizabeth Núñez Vásquez
	Nombre y Apellidos

Jurado 3	Mg. Ing. Marcos Josué Rupay Vargas
	Nombre y Apellidos

Informe de Similitud

SOCAVACION_..docx

Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa

Detalles del documento

Identificador de la entrega
Envío: 7695-401422387

Fecha de entrega
3 sep 2025, 11:21 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
3 sep 2025, 11:34 p.m. GMT-5

Nombre del archivo
SOCAVACION_..docx

Tamaño del archivo
3.1 MB

83 páginas

9605 palabras

51.606 caracteres

turnitin Página 1 de 01 - Resumen general de similitud

Identificador de entrega: Envío: 7695-401422387

16% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluido los fuentes superpuestas, para el...

Filtrado desde el informe

- Idioma
- Texto citado
- Texto excluido

Fuentes principales

- 12%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  Trabajo y entregas prácticas del estudiante

Marcas de integridad

0% de alertas de integridad para revisar

No se han detectado marcas de integridad de texto superpuestas

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para detectar coincidencias de un porcentaje determinado de la longitud total de la coincidencia original. Si necesitas revisar una copia para que puedas revisar, un informe de alerta de superposición se mostrará en pantalla. Si necesitas recomendaciones, puedes descargar el informe.

Dedicatoria

La presente tesis la dedico a Dios por permitir llegar a esta instancia de mis estudios, ya que gracias a él he logrado concluir mi carrera, a los profesionales que compartieron sus conocimientos, y a mi esposa e hijos por el apoyo brindado moral y psicológicamente.

(José Ciro Chilón Yopla)

A Dios quien me ha brindado sabiduría y mucha fuerza para seguir adelante, por darme la vida y permitirme haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional, A mis Padres y hermano por brindarme siempre sus consejos sublimes y cariño incondicional, A todas las personas que estuvieron conmigo dándome ánimos para cumplir con mi objetivo.

(José Luis Bustamante Cusquisiban)

Agradecimiento

Mi agradecimiento la dedico a mis padres, profesores, colegas, participantes de la investigación y a todos los buenos profesionales que me guiaron y me dieron el apoyo.

También a la Universidad Privada del Norte, por prepararme para enfrentar los retos en el futuro.

(José Ciro Chilón Yopla)

Primeramente a Dios por cuidarme siempre y guiarme por el buen camino dándome sabiduría y fuerza para concluir con mi carrera, que fue un proceso lleno de desafíos, aprendizajes y crecimiento personal. A toda la familia UPN por su apoyo, en los momentos más difíciles y por ser el cimiento en la cual se construyó mi desarrollo profesional exitoso.

(José Luis Bustamante Cusquisiban)

Tabla de contenidos

JURADO EVALUADOR.....	2
Informe de Similitud.....	3
Dedicatoria.....	4
Agradecimiento.....	5
Índice de tablas	7
Índice de Figuras.....	8
Resumen	9
Palabras Claves	9
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	22
CAPÍTULO III: RESULTADOS	26
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	50
REFERENCIAS	53
ANEXOS	56
ANEXO N° 1. Modelamientos en Phytton.....	56
ANEXO N° 2. Simulación del fluido en el transporte de sedimentos.....	58

Índice de tablas

Tabla 1	19
Tabla 2	27
Tabla 3	29
Tabla 4	31

Índice de Figuras

Figura 1	28
Figura 2	30
Figura 3	32
Figura 4	37
Figura 5	42
Figura 6	46

Resumen

El objetivo principal de esta investigación fue determinar la influencia de la geometría de las pilas (circulares y rectangulares) en la magnitud y los patrones de socavación local en puentes bajo diferentes condiciones hidráulicas. Se empleó una metodología cuantitativa con un diseño de bloques completamente al azar, utilizando simulaciones en un canal hidráulico con modelos físicos de pilas. Se analizaron dos geometrías de pila (circular y rectangular) bajo variaciones de caudal y pendiente. Los datos se recolectaron mediante observación directa y fichas sistematizadas, y se analizaron utilizando modelos matemáticos y software estadístico. Los resultados mostraron la relación entre la geometría de la pila y la profundidad de socavación, evidenciando que la socavación es directamente proporcional al ancho de la sección del pilar. Se concluyó que la geometría de las pilas influye significativamente en la magnitud y los patrones de socavación local en puentes.

Palabras Claves

Socavación, Pilas, Geometría

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Realidad problemática

Los expediente técnicos y las obras de ejecución en puentes se ven vulneradas por la poca veracidad de los estudios transversales que ameritan dichas obras, es el caso de la socavación donde los expedientes no reflejan un estudio consciente respecto a este problema ya que un mal calculo en dicho estudio puede tener consecuencias letales en dicha obra, es el caso del puente de la solidaridad en la ciudad de Lima, así mismo en diversas partes del Perú las obras de puentes presentan diversidad de problemas a nivel de pre estudio y expediente técnico llegando a más de un 50% de obras ejecutadas con problemas en corto tiempo. (Contraloría, 2023); si bien es cierto la socavación en pilas debería ya estar trabajada y modelada numéricamente hasta nuestra época sin embargo el conocimiento empírico prevalece en dichos estudios.

A nivel internacional Jaramillo & Reyes (2019), en una investigación titulada Evaluación del efecto de la pila de puente de cara inclinada sobre la socavación local, se menciona comprender la profundidad del canal alrededor de las pilas de puentes, cuya cara lateral está inclinada como consecuencia de la socavación local, requiere el análisis de la interacción entre flujo y estructura a través de simulación física y numérica y mediciones de campo. A lo largo de los años, se han realizado pruebas mediante simulación física y mediciones de campo; sin embargo, este trabajo contribuye a través de la simulación numérica al estudio del efecto que produce la inclinación del frente de la pila sobre el fenómeno de socavación local. Se utilizó el software tridimensional ANSYS CFX el cual tiene la capacidad de simular la dinámica del flujo a través de la pila del puente. Así, se han analizado patrones de flujo de agua como dirección y velocidad para encontrar la relación que tienen con la socavación local. El estudio se realizó con

dos formas de pilares; la primera reduce la sección transversal desde la parte superior a la base inferior más pequeña, y la segunda forma reduce la sección transversal desde la parte inferior a la base superior más pequeña. Los resultados muestran que el primer tipo de forma fue favorable para generar mayor profundidad de socavación, encontrándose velocidades superiores al 50% en el frente del muelle.

Para Almonte Pilco & De La Cruz Vega (2022), en una investigación titulada: Evaluación y diseño de protección frente a la socavación hidráulica del puente Unocolla, Juliaca – Puno, manifiesta que, si el caudal del río aumenta, se producirá un fenómeno de socavación, en el que la subestructura del puente ya sea estribo y/o pilares, se verá afectada, resultando en un colapso parcial o total de la estructura. Todo lo anterior es la clave para lograr nuestros objetivos de investigación, lo cual es realizar una evaluación y diseño de protección contra el proceso de socavación hidráulica del puente Unocolla de la ciudad de Juliaca, Puno. La población será el puente Unocolla y la muestra será una subestructura del puente. El método utilizado es aplicado y su diseño es experimental puro, utilizando métodos cuantitativos, en el que se describe el problema de investigación como los resultados realistas. Para determinar los efectos de socavación se recolectó información topográfica, hidrológica y sedimentológica para posteriormente realizar un modelamiento hidráulico en el programa Hec – Ras. Se determinó profundidades de socavación en referencia a pilares, determinando en el pilar 1 profundidad de socavación 1.2 m, en el pilar 2 profundidad de socavación 2.46 m, en el pilar 3 profundidad de socavación 1.2 m, en el pilar 4 profundidad de socavación 1.2m, por lo cual se propone como alternativa de solución el proceso de enrocado

Guggari et al., (2024), en una investigación titulada: Análisis numérico para evaluar los efectos del espesor del pilar de la corona sobre la dilución del mineral

alrededor de los tajeos abiertos del subnivel: Análisis numérico para evaluar los efectos del espesor del pilar de la corona sobre la dilución del mineral, objetiza que se están utilizando tajeos abiertos de subnivel con relleno retrasado para extraer cuerpos minerales masivos, tabulares y de profunda inmersión para aumentar la productividad. Los pilares de corona en el yacimiento dividen las zonas mineras para aumentar la productividad al permitir la producción simultánea en dos o más zonas. A pesar de su efectividad, estas técnicas de minería pueden ir acompañadas de cantidades sustanciales de sobreexplotación, lo que resulta en una dilución considerable del mineral. Este estudio investiga los efectos del espesor del pilar de la corona bajo diversas condiciones de geominería sobre la rotura de muros colgantes. En condiciones de deformación plana, se utilizaron para el análisis numérico 240 modelos de elementos finitos no lineales con los criterios de falla elastoplástica de Mohr-Coulomb. Los resultados se analizan en términos de profundidad de relajación lineal equivalente (ELRD) y desprendimiento de rotura lineal equivalente (ELOS). Los resultados muestran que, al aumentar el espesor del pilar de corona de 5 m a 8 m, el ELRD y el ELOS se reducen aproximadamente un 45 % y un 74 %, respectivamente, para una propiedad de material determinada.

Shadabi, et al., (2025), en una investigación titulada: “Recuperación del suelo en pilas de energía bajo diversos modos operativos”, menciona que las pilas de energía presentan una solución viable para la descarbonización de la calefacción y la refrigeración y ofrecen ventajas económicas. Sin embargo, su adopción generalizada se ve limitada por la comprensión limitada del rendimiento a largo plazo. Este estudio emplea un modelo numérico termohidromecánico tridimensional validado y totalmente acoplado para investigar el rendimiento térmico a largo plazo de las pilas de energía bajo diferentes estrategias operativas. El modelo examina la operación continua (Modo 1), la parada

estacional (Modo 2) y un modo de parada diaria idealizado (Modo 3) en ciclos de corto plazo (1 año) y largo plazo (10 años). Los resultados muestran que la parada diaria (Modo 3) limita la deriva acumulada de la temperatura del suelo a ± 2 °C después de diez años, en comparación con más de 6 °C bajo carga continua. El Modo 3 también produce las temperaturas de fluido de salida más estables, superando al Modo 1 por hasta 2 °C en eficiencia de refrigeración. Los impactos térmicos están confinados espacialmente, con el 90% de la recuperación ocurriendo dentro de un radio de 4 m desde la pila. El Modo 3, como estrategia operativa ideal, establece un parámetro de rendimiento para la recuperación del suelo y la eficiencia energética del sistema. Estos hallazgos resaltan la importancia de la programación de la carga para mitigar la degradación térmica del suelo y mejorar el rendimiento a largo plazo. Los resultados sientan las bases para integrar pilas de energía en sistemas de almacenamiento térmico estacional o de calefacción híbrida, y orientar futuras estrategias de control inteligente.

Gong et al., (2025) en una investigación titulada: “ Investigaciones experimentales de erosión local alrededor de pilotes de una sola columna y de tres columnas con múltiples filas en corriente constante”, se menciona que la socavación local alrededor de grupos de pilotes es un fenómeno común en la ingeniería fluvial y costera, que frecuentemente reduce la capacidad portante de las cimentaciones. En este estudio, se realizaron pruebas experimentales en un canal para investigar la socavación local alrededor de pilotes dispuestos en tandems de una y tres columnas, con filas de 1 a 5. El objetivo fue examinar los efectos de los pilotes aguas arriba y los pilotes laterales sobre la socavación local alrededor de los pilotes aguas abajo y centrales, respectivamente. Se midieron y observaron los perfiles de elevación del lecho y las profundidades temporales de socavación, respectivamente. Los resultados revelaron que las partículas de sedimento se

acumularon en los espacios entre la tercera y la quinta fila en la configuración 5×1 , mientras que las cavidades locales de socavación se extendieron a estas áreas en la configuración 5×3 . Las profundidades temporales de socavación se ajustaron correctamente a una ecuación que divide el proceso de socavación local en tres etapas: socavación inicial, de desarrollo y de equilibrio. Los pilotes a ambos lados de los pilotes centrales contribuyeron a cavidades de socavación más grandes y profundas en comparación con las observadas en una disposición de una sola columna. Además, se observó que la profundidad de socavación en equilibrio disminuye linealmente con el aumento del número de hileras de pilotes. Se propusieron coeficientes para configuraciones de una y tres columnas a fin de estimar las reducciones en la profundidad de socavación en equilibrio, basándose en curvas bien ajustadas derivadas de los datos experimentales.

Tusher, et al., (2025) en una investigación titulada: “Predicción de la resistencia al corte de pilotes pretensados huecos de hormigón prefabricado mediante modelos de aprendizaje automático”, se menciona que los pilotes de hormigón prefabricado centrifugado y pretensado (SPC) se han vuelto habituales en los sistemas de cimentación profunda debido a la calidad de su material, su rápida instalación y su alta uniformidad a lo largo del pilote, lo que mejora tanto la capacidad de carga como el rendimiento estructural general. Sin embargo, la reducción del área de sección que surge del núcleo hueco es una preocupación para la capacidad de corte total del pilote SPC, particularmente en zonas sísmicas. Por el contrario, la resistencia del hormigón, los torones de alta resistencia y la aplicación de pretensado mejoran la capacidad de corte de los pilotes SPC. Como resultado, la participación de parámetros más complejos hace que la predicción de la resistencia al corte sea complicada. Este estudio explora el intrincado

dominio del modelado predictivo para la resistencia al corte de los pilotes SPC, empleando doce algoritmos de aprendizaje automático (ML) basados en datos que van desde la regresión hasta los modelos de impulso. Se ensambla, estructura y emplea meticulosamente un conjunto de datos completo que consta de 243 resultados de pruebas de resistencia al corte de pilotes SPC para entrenar y evaluar los modelos de ML. Las características de entrada de los modelos de ML propuestos incluyen la relación entre el espesor efectivo y el diámetro exterior, la relación entre el tramo de corte y la profundidad efectiva, el índice de torones de pretensado, el índice de torones de no pretensado, el índice de refuerzo de corte efectivo, la resistencia del hormigón del pilote y la tensión axial efectiva total. Se realizó el análisis de explicaciones aditivas de Shapley (SHAP) en los modelos de mejor rendimiento para evaluar la influencia de los parámetros individuales en la resistencia al corte de los pilotes SPC y luego se comparó con los códigos y disposiciones existentes a través del análisis de sensibilidad. El resultado muestra que XGB produjo la mayor precisión de predicción y la menor variación, lo que superó a los otros modelos mecánicos y disposiciones de códigos. Este estudio también demuestra que la resistencia al corte de los pilotes SPC puede mejorarse al aumentar la tensión axial efectiva total, la resistencia del hormigón del pilote y el índice de refuerzo de corte efectivo. Además, se ha establecido una interfaz gráfica de usuario (GUI) para el modelo XGB, que ayudará a los ingenieros en ejercicio y a futuros estudios a pronosticar con precisión la resistencia al corte de los pilotes SPC en aplicaciones de construcción.

La socavación de pilares en puentes se refiere a la erosión del material del lecho del río que ocurre alrededor de los pilares debido a la acción de las corrientes de agua; este fenómeno, que puede comprometer la estabilidad estructural de los puentes, se genera cuando las fuerzas del flujo movilizan las partículas del suelo o sedimentos,

disminuyendo la capacidad de soporte del terreno en contacto con los pilares; existen diferentes tipos de socavación (Hu et al., 2024) . La socavación general ocurre en todo el lecho del río como resultado de procesos naturales, como crecidas o cambios en la dinámica fluvial. Por otro lado, la socavación local afecta específicamente a las áreas cercanas a los pilares y estribos del puente debido a las turbulencias generadas por el flujo de agua que rodea estas estructuras. Finalmente, la socavación por contracción aparece cuando la presencia de pilares restringe la sección del río, aumentando la velocidad del flujo y erosionando el lecho de forma localizada (M. Islam et al., 2024).

El estudio de la socavación se aborda mediante distintos métodos experimentales. Los ensayos en laboratorio son una herramienta clave para comprender este proceso. Por ejemplo, los modelos físicos a escala permiten simular las condiciones reales de un río y observar la interacción del agua con los pilares en un entorno controlado (Sinha & Walton, 2021). En estos experimentos, se analizan variables como la velocidad del flujo, el tipo de sedimentos y la geometría de los pilares. Además, se emplean tecnologías avanzadas, como sensores para medir la profundidad de la socavación y partículas trazadoras para seguir el movimiento de los sedimentos; otro enfoque importante es el uso de simulaciones numéricas. Los modelos computacionales, basados en dinámicas de fluidos computacional (CFD), permiten recrear virtualmente el comportamiento del flujo de agua y su impacto sobre los pilares (Chen & Mitri, 2021). Estas herramientas, como ANSYS, OpenFOAM o HEC-RAS, ofrecen la ventaja de analizar múltiples escenarios y condiciones del río, así como de estudiar fenómenos como las turbulencias y las fuerzas que generan la socavación (Handte et al., 2022).

En los estudios realizados directamente en campo, se utilizan técnicas como la medición con ecosondas y sonares para monitorear los cambios en el lecho alrededor de

los pilares. También se emplean sistemas de marcaje con trazadores y sensores de presión para recopilar datos en tiempo real (Shi et al., 2023). Este monitoreo continuo es crucial para entender los patrones de erosión y evaluar el progreso de la socavación; además, se han desarrollado ensayos con materiales innovadores que buscan mitigar la socavación, como revestimientos de pilares con mantas geotextiles o enrocados; estas investigaciones permiten evaluar la efectividad de diversas soluciones frente a la erosión y proponer estrategias para minimizar los riesgos estructurales (Frommhold et al., 2012).

Definición de las variables

Melville y Coleman (2000): La geometría de las pilas se define como la forma en planta de estas, siendo las más comunes la circular y la rectangular. Estos autores sostienen que la geometría es un factor determinante en la magnitud de la socavación local, ya que influye directamente en los patrones de flujo, la formación de vórtices y la distribución de la presión alrededor del obstáculo.

Chow (1959): En su obra clásica de hidráulica, Chow define la geometría de una pila de puente como su configuración física, incluyendo su sección transversal (circular, rectangular, etc.) y su orientación con respecto a la dirección del flujo. Argumenta que la forma de la pila afecta la resistencia al flujo y, por ende, el desarrollo de la socavación, destacando que las formas más aerodinámicas (como la circular) tienden a generar menos turbulencia y, por consiguiente, menor socavación.

Neill (1964): Neill, un pionero en la investigación sobre socavación, considera la geometría de las pilas como una de las variables clave en sus estudios. Su enfoque se centra en cómo la forma de la pila, específicamente en términos de su sección transversal y el factor de forma, afecta la profundidad de la socavación. Su trabajo es fundamental para el desarrollo de fórmulas empíricas que ajustan la predicción de la socavación en función de la forma del pilar.

Richardson y Davis (1995): La magnitud de la socavación local se define como la profundidad máxima de erosión del lecho del río que se produce en la base de un obstáculo, como una pila de puente. Los patrones de socavación se refieren a la forma y extensión del hoyo de erosión alrededor de la estructura, que es el resultado de un complejo sistema de vórtices, incluyendo el vórtice en herradura y los vórtices de la estela.

Lagasse et al. (2001): Según estos autores, la socavación local es el resultado de la intensificación del flujo de agua y la turbulencia en la proximidad inmediata de las pilas, causando la erosión del sedimento circundante. Definen la magnitud como la profundidad de esta erosión y los patrones como las características del hoyo de socavación, que son influenciados por la geometría de la pila, la velocidad del flujo, y las propiedades del sedimento.

Melville y Coleman (2000): En su trabajo, definen la magnitud de la socavación local como la profundidad vertical máxima de erosión que ocurre en las pilas de los puentes. Los patrones de socavación se describen como la forma tridimensional de la fosa de erosión, la cual es generada por el vórtice de herradura que se forma en la base de la pila y por los vórtices de la estela que se desprenden aguas abajo.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo influye la geometría de las pilas, en términos de secciones circulares y rectangulares, en la magnitud y los patrones de socavación local en puentes bajo diferentes condiciones hidráulicas?

1.3 Objetivos

Determinar la influencia de la geometría de las pilas, en términos de secciones circulares y rectangulares, en la magnitud y los patrones de socavación local en puentes bajo diferentes condiciones hidráulicas.

1.4 Hipótesis

La geometría de las pilas, en términos de secciones circulares y rectangulares influyen significativamente en la magnitud y los patrones de socavación local en puentes bajo diferentes condiciones hidráulicas.

Tabla 1

Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
¿Cómo influye la geometría de las pilas, en términos de secciones circulares y rectangulares, en la magnitud y los patrones de socavación local en puentes bajo diferentes condiciones hidráulicas?	Determinar la influencia de la geometría de las pilas, en términos de secciones circulares y rectangulares, en la magnitud y los patrones de socavación local en puentes bajo diferentes condiciones hidráulicas.	La geometría de las pilas, en términos de secciones circulares y rectangulares influyen significativamente en la magnitud y los patrones de socavación local en puentes bajo diferentes condiciones hidráulicas.	V. Independiente: geometría en pilas V. Dependiente: Magnitud y patrones de socavación local en puentes bajo diferentes condiciones hidráulicas	Tipo: Cuantitativo Método: Científico Muestra de ensayo: 2 pilares en condiciones de caudal a 10m ³ /s, 20m ³ /s y 30 m ³ /s; pendientes del 5%, 10% y 15% Materiales y métodos:

<p>Variación de la magnitud de la socavación ¿Cómo afecta la geometría de las pilas (sección circular vs. sección rectangular) a la profundidad máxima de socavación bajo un flujo hidráulico uniforme?</p>	<p>Variación de la magnitud de la socavación Determinar cómo la geometría de las pilas (sección circular y sección rectangular) influye en la profundidad máxima de socavación bajo condiciones de flujo hidráulico uniforme.</p>	<p>Variación de la magnitud de la socavación Hipótesis: Las pilas con sección circular presentan una menor profundidad máxima de socavación en comparación con las pilas con sección rectangular bajo condiciones de flujo hidráulico uniforme debido a su forma aerodinámica que reduce la concentración de esfuerzos cortantes.</p>	<p>Ecuaciones de modelamiento hidráulico Toma de datos: Mediante observación directa fichas sistematizadas en Excel, tratamiento de datos en SPSS</p>
<p>Patrones de distribución del flujo ¿Cómo influye la geometría de las pilas en la formación de vórtices y en la distribución del flujo alrededor de las pilas bajo diferentes velocidades del agua?</p>	<p>Patrones de distribución del flujo Analizar el impacto de la geometría de las pilas en la formación de vórtices y la distribución del flujo alrededor de las pilas bajo diferentes velocidades del agua.</p>	<p>Patrones de distribución del flujo Hipótesis: Las pilas con sección rectangular generan patrones de flujo más intensos, incluyendo vórtices más grandes y concentrados, en comparación con las pilas con sección circular, especialmente a mayores velocidades del agua, debido a las esquinas y superficies planas que intensifican la turbulencia.</p>	
<p>Efecto de las condiciones hidráulicas ¿Qué diferencias se observan en la magnitud de la socavación para pilas con secciones circulares y rectangulares bajo condiciones de flujo crítico y flujo turbulento?</p>	<p>Efecto de las condiciones hidráulicas Comparar las diferencias en la magnitud de la socavación para pilas con secciones circulares y rectangulares bajo condiciones de flujo crítico y flujo turbulento.</p>	<p>Efecto de las condiciones hidráulicas Hipótesis: La magnitud de la socavación es más sensible en pilas con sección rectangular bajo condiciones de flujo turbulento que en pilas con sección</p>	
<p>Erosión en la base de las pilas ¿Qué tipo de geometría minimiza la erosión localizada en la base de las pilas de puentes bajo condiciones de flujo variable?</p>	<p>Erosión en la base de las pilas Identificar la geometría de las pilas que minimiza la erosión localizada en su base bajo condiciones de flujo variable.</p>		

circular, debido a que la geometría rectangular amplifica los efectos de las fluctuaciones de presión en el flujo.

Erosión en la base de las pilas
Hipótesis: Las pilas con sección circular minimizan la erosión localizada en su base bajo condiciones de flujo variable, ya que su geometría reduce la generación de vórtices secundarios y la concentración de esfuerzos cortantes en el lecho del río.

Nota: Se observa la matriz de consistencia del presente estudio

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

El enfoque de la presente investigación corresponde al cuantitativo debido que se tratarán datos numéricos objetivos y propios del experimento (Hernández Sampieri et al., 2014).

El diseño de la presente investigación está basado en el diseño de bloques completamente al azar con tratamientos en la geometría y lados y diámetro del pilar y velocidad crítica.

Tratamientos:

Pila con sección circular (Tratamiento 1).

Pila con sección rectangular (Tratamiento 2).

Unidades experimentales, simulaciones en un canal hidráulico utilizando modelos físicos de pilas bajo las mismas condiciones controladas.

Número de repeticiones, para garantizar la confiabilidad de los resultados, se consideran al menos 4 repeticiones por tratamiento, dando un total de $2 \text{ tratamientos} \times 4 \text{ repeticiones} = 8 \text{ experimentos}$

$2 \text{ tratamientos} \times 4 \text{ repeticiones} = 8 \text{ experimentos}$.

Con estas repeticiones se estarán analizando las líneas de tendencia para cada caso y cada método.

La población para la presente investigación corresponde a todos los proyectos de pilares en puentes de la región Cajamarca, la muestra ha sido establecida para pilares de sección rectangular y circular mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia

Las técnicas e instrumentos de recolección de datos se basan en la observación directa y el fichaje propios del método científico.

Se utilizaron ecuaciones de la mecánica de fluidos y modelamiento hidráulico derivadas de las ecuaciones generales de Navier Stokes.

Modelo General para la Profundidad de Socavación

El modelado matemático de la socavación local en pilares de puentes se basa en relaciones empíricas y teóricas que describen el flujo de agua, las características del sedimento y las interacciones entre ellos. Un modelo ampliamente utilizado es la ecuación de equilibrio de fuerzas que relaciona las variables hidráulicas y geométricas con la profundidad máxima de la socavación:

$$d_s = K \cdot D \cdot \left(\frac{V}{V_c}\right)^n$$

d_s : profundidad de socavacion

K : coeficiente dependiente de la forma del pilar (adimensional)

D : diámetro o ancho característico del pilar (m)

V : velocidad del flujo incidente $\left(\frac{m}{s}\right)$

V_c : velocidad crítica para el inicio del movimiento del sedimento $\left(\frac{m}{s}\right)$

n : exponente empírico relacionado con las condiciones hidráulicas y del sedimento

Descripción de los parámetros

Coefficiente de forma (K)

Este factor depende de la geometría del pilar, si el pilar es rectangular varia con relación al largo o ancho, para pilares circulares el valor de K es equivalente a 1, la velocidad crítica se calcula con la ecuación de Shields

$$V_c = \sqrt{\frac{g \cdot (s - 1) \cdot d_{50}}{\theta}}$$

Se considerará la aceleración de la gravedad 9.81 m/s^2 , “s” como la relación de densidad entre el sedimento y el agua; d_{50} , diámetro medio del sedimento, θ : es el parámetro de shield que depende del tipo de sedimento y las características de flujo.

El exponente empírico “n”, es un valor que se encuentra entre 0.5 y 1 dependiendo de la relación entre el flujo incidente y la velocidad crítica

Modelos específicos según la geometría

Pilares circulares, la forma cilíndrica genera un patrón de flujo más uniforme alrededor del pilar, y la socavación se aproxima bien con modelos empíricos como el propuesto por Melville y Sutherland (1988)

$$d_s = 2.4 \cdot D \cdot \left(\frac{V}{V_c} - 1 \right)^{0.43}$$

Los pilares rectangulares para el caso de las esquinas y los bordes generan mayor turbulencia, lo que aumenta la socavación. Una adaptación del modelo de Melville y Coleman (2000) incluye factores adicionales para corregir estas variaciones. (B es el ancho del pilar).

$$d_s = K \cdot D \cdot \left(1 + \frac{B}{D} \right) \cdot \left(\frac{V}{V_c} - 1 \right)^n$$

Donde:

d_s es el asentamiento de la cimentación.

K es un coeficiente de asentamiento que depende del tipo de suelo.

D es la profundidad de la cimentación.

B es el ancho de la cimentación.

V es la velocidad de carga.

V_c es la velocidad crítica de carga.

n es un exponente que depende del tipo de suelo.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

Se utilizaron en el presente estudio la comparativa entre 2 métodos Ecuación de Laursen y Toch (Modificada por Neill) y las ecuaciones de Ecuación de HEC-18 (Richardson y Davis, 2001).

Para el método Laursen y Toch (Modificada por Neill) se presentan los siguientes parámetros:

$$d_s = 1.5 \cdot a^{0.7} \cdot y^{0.3}$$

d_s : Profundidad de socavación máxima (m)

a : Ancho de la pila perpendicular al flujo (m)

y : Profundidad del flujo aguas arriba (m)

Para el método Ecuación de HEC-18 (Richardson y Davis, 2001)

$$d_s = 2 \cdot y \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot (a/y)^{0.65} \cdot Fr_1^{0.43}$$

K_1 : Factor de forma de la nariz de la pila.

Pila circular o nariz redondeada: 1.0

Pila cuadrada o nariz roma: 1.1

Pila con nariz aguda ($\theta \leq 30^\circ$): 0.9

K_2 : Factor de ángulo de ataque del flujo.

K_3 : Factor de características del lecho.

K_4 : Factor de acorazamiento del lecho.

Fr_1 : Número de Froude del flujo aguas arriba basado en la velocidad media y la profundidad del flujo.

Ecuaciones Específicas para Pilas Circulares:

Algunas investigaciones sugieren simplificaciones o modificaciones de las ecuaciones generales para el caso específico de pilas circulares, a menudo utilizando el diámetro (D) en lugar del ancho (a).

Ecuaciones Específicas para Pilas Rectangulares:

La ecuación de Laursen y Toch original se basó en datos de laboratorio con pilas rectangulares.

El factor de forma K1 en la ecuación de HEC-18 diferencia el caso de pilas cuadradas (roma) de las circulares.

Para pilas rectangulares con ángulos de ataque (θ) diferentes a 0 grados con respecto al flujo, se introduce el factor K2 en la ecuación de HEC-18, que depende de la relación entre la longitud (L) y el ancho (a) de la pila, así como del ángulo de ataque.

Tabla 2

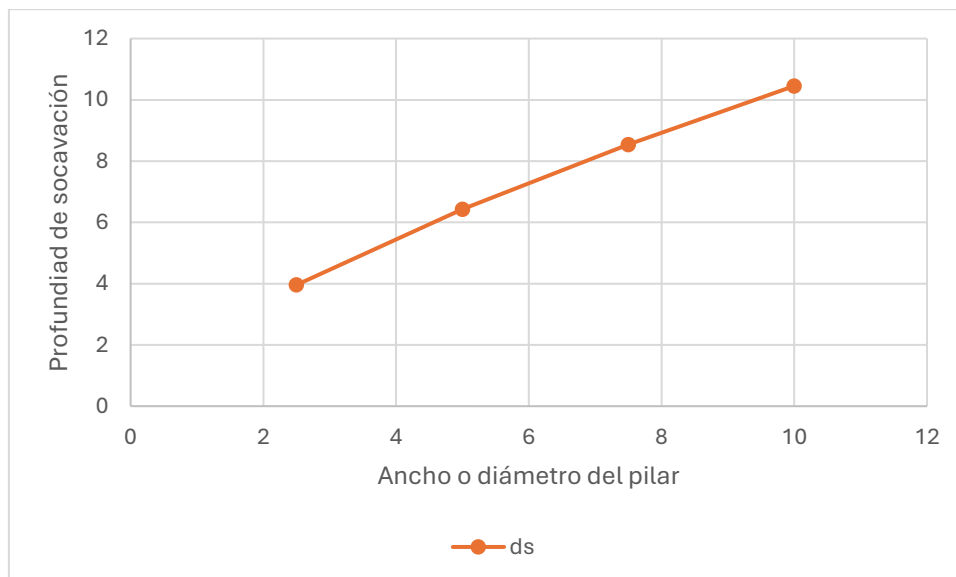
Diseño muestral para el primer todas ecuaciones generales

	a (D)	y	ds (profundidad de socavación)
Rectangular y Circular	2,5	3	3,960824882
Rectangular y Circular	2,5	3	3,960824882
Rectangular y Circular	2,5	3	3,960824882
Rectangular y Circular	2,5	3	3,960824882
Rectangular y Circular	5	3	6,434379003
Rectangular y Circular	5	3	6,434379003
Rectangular y Circular	5	3	6,434379003

Rectangular y Circular	5	3	6,434379003
Rectangular y Circular	7,5	3	8,54615017
Rectangular y Circular	7,5	3	8,54615017
Rectangular y Circular	7,5	3	8,54615017
Rectangular y Circular	7,5	3	8,54615017
Rectangular y Circular	10	3	10,45267953
Rectangular y Circular	10	3	10,45267953
Rectangular y Circular	10	3	10,45267953
Rectangular y Circular	10	3	10,45267953

Figura 1

Líneas de tendencia



Nota: Se muestra la línea de tendencia para ambas geometrías según el método 1; se observa a la brevedad que la profundidad de socavación es directamente proporcional al ancho de la sección del pilar bajo el método empírico general Laursen y Toch (Modificada por Neill).

Tabla 3

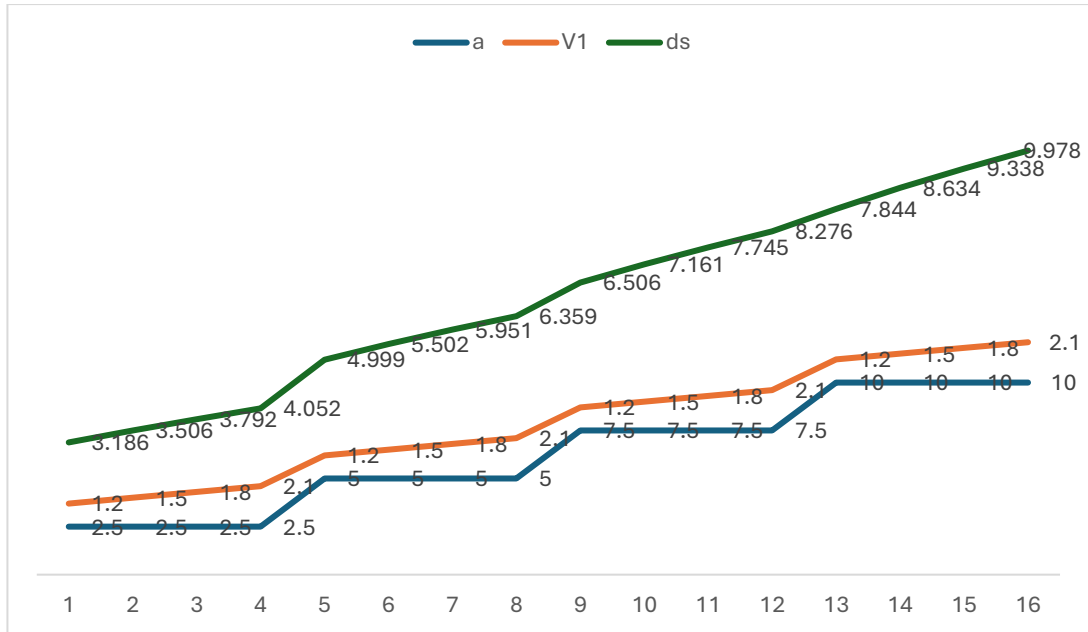
Método 2 geometría rectangular:

Geometría	a	y	K1	K2	K3	K4	V1	g	Fr	ds
Rectangular	2,5	4	1,1	1	1	1	1,2	9,81	0,19156526	3,18567072
Rectangular	2,5	4	1,1	1	1	1	1,5	9,81	0,23945657	3,50648665
Rectangular	2,5	4	1,1	1	1	1	1,8	9,81	0,28734789	3,79245229
Rectangular	2,5	4	1,1	1	1	1	2,1	9,81	0,3352392	4,05235277
Rectangular	5	4	1,1	1	1	1	1,2	9,81	0,19156526	4,99885318
Rectangular	5	4	1,1	1	1	1	1,5	9,81	0,23945657	5,50226733
Rectangular	5	4	1,1	1	1	1	1,8	9,81	0,28734789	5,95099552
Rectangular	5	4	1,1	1	1	1	2,1	9,81	0,3352392	6,35882309
Rectangular	7,5	4	1,1	1	1	1	1,2	9,81	0,19156526	6,50623432
Rectangular	7,5	4	1,1	1	1	1	1,5	9,81	0,23945657	7,16145069
Rectangular	7,5	4	1,1	1	1	1	1,8	9,81	0,28734789	7,74549078
Rectangular	7,5	4	1,1	1	1	1	2,1	9,81	0,3352392	8,27629688
Rectangular	10	4	1,1	1	1	1	1,2	9,81	0,19156526	7,84404143
Rectangular	10	4	1,1	1	1	1	1,5	9,81	0,23945657	8,63398291
Rectangular	10	4	1,1	1	1	1	1,8	9,81	0,28734789	9,3381129
Rectangular	10	4	1,1	1	1	1	2,1	9,81	0,3352392	9,97806296

Nota: Se observa el cálculo de la socavación en pilares rectangulares por el método HEC-18 (Richardson y Davis, 2001), para 16 muestras con variación de velocidad diferentes para cada ancho de estribo el cual ha sido variado a 2.5m, 5m, 7.5m y 10m

Figura 2

Profundidad de socavación Según el ancho del pilar y la velocidad crítica del fluido



Nota. Se observa la profundidad de la socavación para 16 muestras con variantes de sección en el pilar y velocidad en el fluido aplicando el método HEC-18 (Richardson y Davis, 2001). En términos sencillos, la profundidad a la que el agua erosiona el suelo alrededor del pilar, representada por la línea verde, tiende a ser mayor a medida que consideramos las diferentes combinaciones de ancho del pilar y velocidad del agua que se analizaron en las 16 muestras. Sin embargo, este aumento no es uniforme; a veces la profundidad de socavación crece más rápidamente que otras, lo que indica una relación intrincada entre el tamaño del pilar, la fuerza del agua y la erosión resultante. Para cada una de las 16 situaciones examinadas, el método HEC-18 predice una profundidad de socavación específica, comenzando en poco más de tres metros para la primera muestra y escalando progresivamente hasta casi diez metros en la última. Aunque la tendencia general es hacia una mayor erosión, hubo un pequeño retroceso en la profundidad de

socavación entre la muestra número 12 y la 13, antes de que continuara su ascenso hasta el valor más alto registrado en la muestra final.

Tabla 4

Método 2 geometría circular:

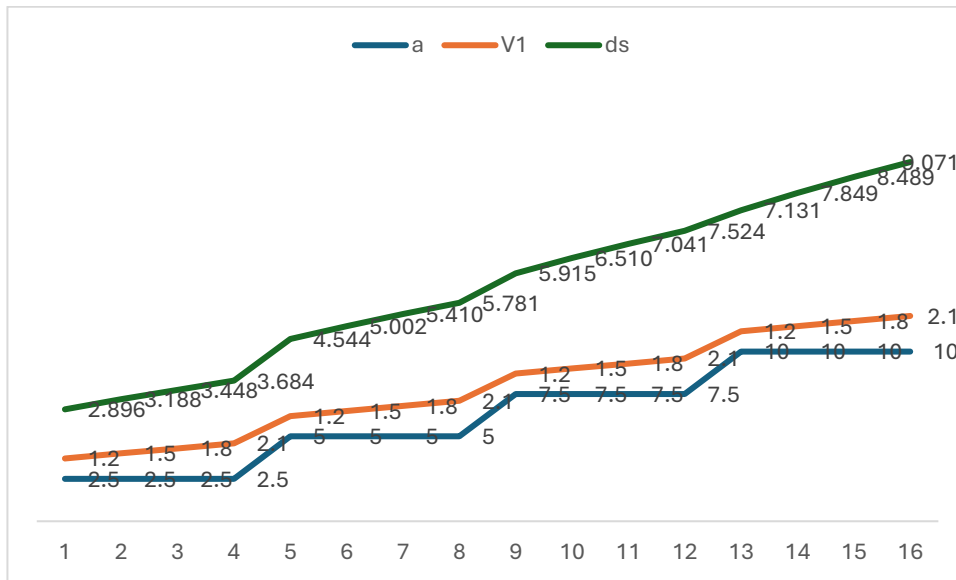
Geometría	a	y	K1	K2	K3	K4	V1	g	Fr	ds
Circular	2,5	4	1	1	1	1	1,2	9,81	0,19156526	2,8960643
Circular	2,5	4	1	1	1	1	1,5	9,81	0,23945657	3,18771514
Circular	2,5	4	1	1	1	1	1,8	9,81	0,28734789	3,4476839
Circular	2,5	4	1	1	1	1	2,1	9,81	0,3352392	3,68395707
Circular	5	4	1	1	1	1	1,2	9,81	0,19156526	4,54441198
Circular	5	4	1	1	1	1	1,5	9,81	0,23945657	5,00206121
Circular	5	4	1	1	1	1	1,8	9,81	0,28734789	5,40999592
Circular	5	4	1	1	1	1	2,1	9,81	0,3352392	5,78074826
Circular	7,5	4	1	1	1	1	1,2	9,81	0,19156526	5,91475847
Circular	7,5	4	1	1	1	1	1,5	9,81	0,23945657	6,51040971
Circular	7,5	4	1	1	1	1	1,8	9,81	0,28734789	7,04135526
Circular	7,5	4	1	1	1	1	2,1	9,81	0,3352392	7,52390626
Circular	10	4	1	1	1	1	1,2	9,81	0,19156526	7,13094676
Circular	10	4	1	1	1	1	1,5	9,81	0,23945657	7,84907537
Circular	10	4	1	1	1	1	1,8	9,81	0,28734789	8,48919354
Circular	10	4	1	1	1	1	2,1	9,81	0,3352392	9,07096632

Nota: Se observa el cálculo de la socavación en pilares circulares por el método

HEC-18 (Richardson y Davis, 2001), para 16 muestras con variación de velocidad diferentes para cada diámetro de estribo el cual ha sido variado a 2.5m, 5m, 7.5m y 10m

Figura 3

Profundidad de socavación Según el diámetro del pilar y la velocidad crítica del fluido



Nota: La tendencia general al aumento, la característica más notable de la línea verde es su tendencia general a ascender de izquierda a derecha. Esto indica que, a medida que las condiciones representadas en el eje horizontal cambian o se incrementan, la profundidad de la socavación tiende a ser mayor. En otras palabras, los factores que varían a lo largo del eje horizontal parecen tener una influencia positiva en la magnitud de la socavación. El Aumento Inicial Pronunciado, al principio del gráfico (hacia la izquierda), la pendiente de la línea verde parece ser relativamente pronunciada. Esto sugiere que, en las etapas iniciales de los cambios representados en el eje horizontal, la profundidad de socavación aumenta a una tasa relativamente alta. El incremento continuo con variaciones en la tasa, a medida que avanzamos hacia la derecha, la línea verde continúa ascendiendo, aunque la pendiente parece variar ligeramente. Hay secciones donde el aumento es un poco más gradual y otras donde vuelve a ser un poco más pronunciado. Esto podría

indicar que la relación entre los factores del eje horizontal y la profundidad de socavación no es perfectamente lineal, y que la influencia de estos factores puede cambiar en diferentes rangos. Los Valores Específicos, los valores etiquetados a lo largo de la línea verde (2.896, 3.188, 3.448, 3.684, 4.544, 5.002, 5.410, 5.781, 5.915, 6.510, 7.041, 7.524, 7.131, 7.849, 8.489, 9.071) nos dan una idea cuantitativa de cómo la profundidad de socavación va aumentando en los diferentes puntos del eje horizontal. Podemos ver un incremento constante, aunque con algunas fluctuaciones menores en la tasa de aumento. Por ejemplo, hay una ligera disminución entre el punto 12 (7.524) y el punto 13 (7.131), seguida de un nuevo aumento. El Valor Máximo Observado, el punto más alto de la línea verde se encuentra al final del gráfico, indicando que la mayor profundidad de socavación se alcanza en las condiciones representadas más a la derecha en el eje horizontal. El valor etiquetado en este punto es 9.071.

Análisis de la socavación bajo los modelos específicos según su geometría

para pilares circulares usando código Phyton:

```
import numpy as np
```

```
import pandas as pd
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
# Diámetros en metros
```

```
diametros = [2.5, 5, 7.5, 10]
```

```
# Velocidades (V) y velocidades críticas (Vc)
```

```
velocidades = [
```

(2.5, 2.0),

(3.0, 2.2),

(4.0, 2.5),

(5.0, 3.5)

]

Lista para almacenar resultados

resultados = []

Cálculo de socavación para cada combinación

for D in diametros:

for i, (V, Vc) in enumerate(velocidades, start=1):

if V > Vc:

ds = 2.4 * D * ((V / Vc) - 1) ** 0.43

else:

ds = 0 # No hay socavación si V <= Vc

resultados.append({

'Diámetro (m)': D,

'Caso': f'V={V} / Vc={Vc}',

'Socavación ds (m)': round(ds, 3)

})

```
# Convertir a DataFrame

df = pd.DataFrame(resultados)

# Mostrar tabla de resultados

print(df)

# -----

# Gráfico: barras agrupadas

# -----

# Crear gráfico de barras por grupo de diámetros

fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))

# Obtener valores únicos de casos y colores

casos = df['Caso'].unique()

colores = ['royalblue', 'darkorange', 'seagreen', 'firebrick']

# Agrupar y graficar

bar_width = 0.2

for i, caso in enumerate(casos):

    subset = df[df['Caso'] == caso]

    posiciones = np.arange(len(diametros)) + i * bar_width
```

```
ax.bar(posiciones, subset['Socavación ds (m)'], width=bar_width, label=caseo,  
color=colores[i])
```

```
# Etiquetas
```

```
ax.set_xticks(np.arange(len(diametros)) + 1.5 * bar_width)
```

```
ax.set_xticklabels([f'{d} m' for d in diametros])
```

```
ax.set_xlabel('Diámetro del Pilar (m)')
```

```
ax.set_ylabel('Socavación Máxima ds (m)')
```

```
ax.set_title('Comparación de Socavación por Diámetro y Velocidad')
```

```
ax.legend(title='Casos V / Vc')
```

```
ax.grid(True, linestyle='--', alpha=0.5)
```

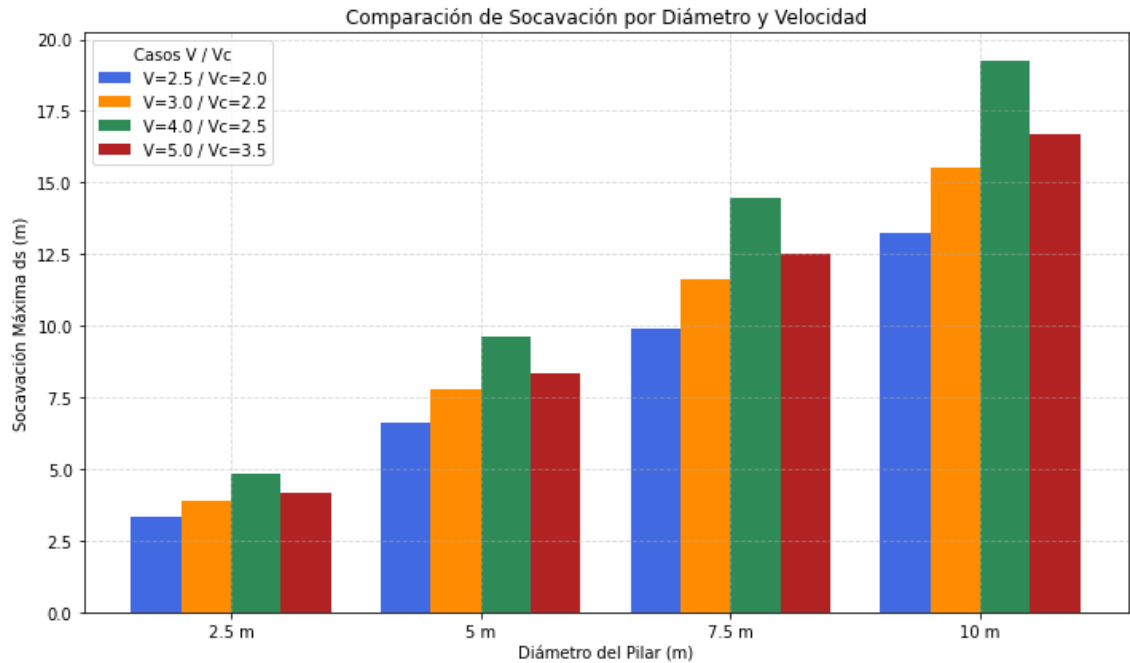
```
# Mostrar
```

```
plt.tight_layout()
```

```
plt.show()
```

Figura 4

Socavación máxima para los diferentes diámetros de pilares



Nota: En el eje horizontal (Diámetro del Pilar (m)): Representa el diámetro del pilar en metros. Los valores mostrados son 2.5 m, 5 m, 7.5 m y 10 m.

Eje vertical (Socavación Máxima ds (m)): Representa la profundidad máxima de socavación alrededor del pilar, medida en metros.

Barras agrupadas: Para cada diámetro de pilar, hay cuatro barras de diferentes colores, cada una representando un caso diferente de la relación entre la velocidad del flujo (V) y la velocidad crítica (Vc):

Azul: $V = 2.5 / Vc = 2.0$

Naranja: $V = 3.0 / Vc = 2.2$

Verde: $V = 4.0 / Vc = 2.5$

Rojos: $V = 5.0 / Vc = 3.5$

EL aumento de la socavación con el diámetro del pilar: En general, se observa una tendencia clara de que, a mayor diámetro del pilar, mayor es la socavación máxima. Podemos ver cómo la altura de las barras para cada caso de velocidad aumenta a medida que nos movemos de izquierda a derecha en el gráfico (de 2.5 m a 10 m de diámetro). El aumento de la socavación con la velocidad del flujo, para un mismo diámetro de pilar, la socavación máxima aumenta a medida que la relación V/V_c se incrementa. Esto significa que cuanto más rápido sea el flujo del agua en relación con su velocidad crítica, mayor será la erosión alrededor del pilar. Podemos comparar las alturas de las barras de diferentes colores para un mismo diámetro y ver que la barra roja (mayor V/V_c) siempre es más alta que la azul (menor V/V_c). Relación combinada, el efecto más significativo en la socavación máxima se da cuando ambos factores, el diámetro del pilar y la velocidad del flujo, son altos. Por ejemplo, para el pilar de 10 m de diámetro y el caso $V/V_c = 5.0/3.5$ (barra roja más a la derecha), se observa la mayor socavación de todas.

Código en python para el calculo de la socavación en pilares rectangulares.

```
import numpy as np

import pandas as pd

import matplotlib.pyplot as plt

# Parámetros empíricos

K = 2.4

n = 0.50
```

Datos: pilares rectangulares

Cada tupla es (D = altura frente al flujo, B = ancho del pilar)

pilares = [

(2.5, 1.0),

(5.0, 2.0),

(7.5, 3.0),

(10.0, 4.0)

]

Velocidades (V, Vc)

velocidades = [

(2.5, 2.0),

(3.0, 2.2),

(4.0, 2.5),

(5.0, 3.5)

]

Cálculo

resultados = []

for D, B in pilares:

for V, Vc in velocidades:

```

if V > Vc:

    factor_geom = 1 + (B / D)

    factor_vel = ((V / Vc) - 1) ** n

    ds = K * D * factor_geom * factor_vel

else:

    ds = 0

resultados.append({

    'D (m)': D,

    'B (m)': B,

    'V (m/s)': V,

    'Vc (m/s)': Vc,

    'Socavación ds (m)': round(ds, 3),

    'Caso': f'V={V}/Vc={Vc}'

})

# Convertir a DataFrame

df = pd.DataFrame(resultados)

print(df)

# Gráfico

fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))

casos = df['Caso'].unique()

```

```
colores = ['royalblue', 'darkorange', 'seagreen', 'firebrick']

bar_width = 0.2

for i, caso in enumerate(casos):

    subset = df[df['Caso'] == caso]

    posiciones = np.arange(len(pilares)) + i * bar_width

    etiquetas = [f'D={d}, B={b}' for d, b in pilares]

    ax.bar(posiciones, subset['Socavación ds (m)'], width=bar_width, label=caso,
color=colores[i])

ax.set_xticks(np.arange(len(pilares)) + 1.5 * bar_width)

ax.set_xticklabels(etiquetas)

ax.set_xlabel('Pilar Rectangular (D y B en metros)')

ax.set_ylabel('Socavación ds (m)')

ax.set_title('Socavación Local en Pilares Rectangulares - Modelo Melville y
Coleman')

ax.legend(title='Casos V / Vc')

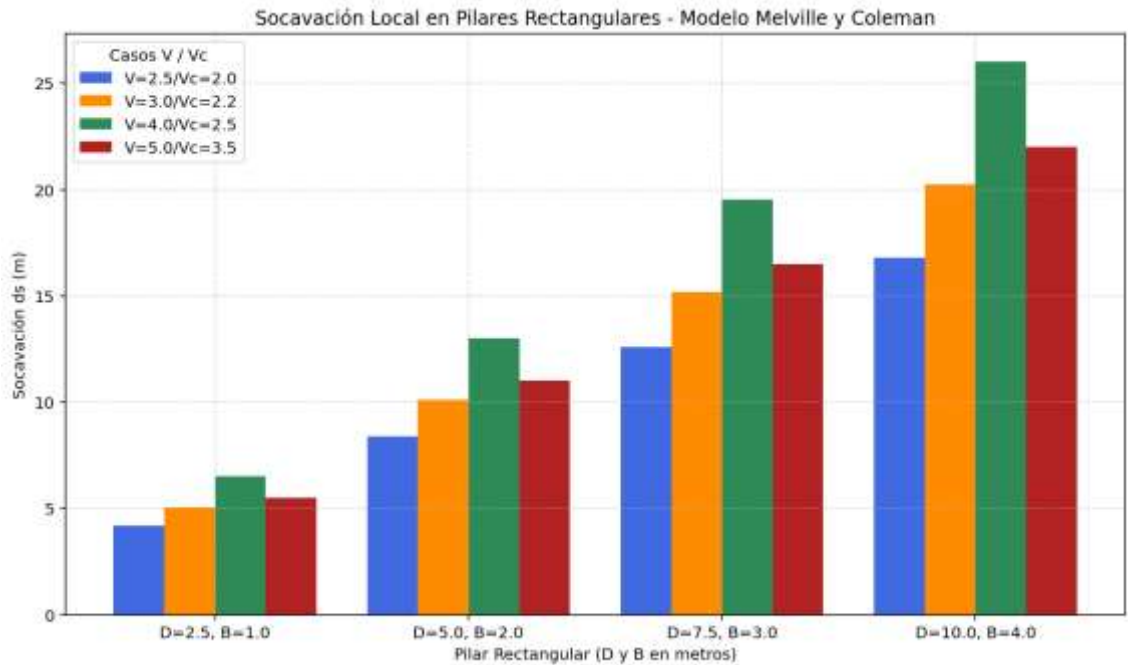
ax.grid(True, linestyle='--', alpha=0.5)

plt.tight_layout()

plt.show()
```

Figura 5

Socavación local en pilares rectangulares



Nota:

En el eje horizontal (Pilar Rectangular (D y B en metros)), representa las dimensiones de los pilares rectangulares. Cada grupo de barras corresponde a un pilar con un ancho (B) y una longitud (D) específicos en metros. Los valores mostrados son:

D=2.5 m, B=1.0 m

D=5.0 m, B=2.0 m

D=7.5 m, B=3.0 m

D=10.0 m, B=4.0 m

El eje vertical (Socavación ds (m)), indica la profundidad máxima de la socavación local alrededor del pilar, medida en metros. Barras agrupadas por caso de velocidad, al igual que en el gráfico anterior, para cada dimensión de pilar, hay cuatro

barras de diferentes colores, representando distintos escenarios de la relación entre la velocidad del flujo (V) y la velocidad crítica (V_c):

Azul: $V = 2.5 / V_c = 2.0$

Naranja: $V = 3.0 / V_c = 2.2$

Verde: $V = 4.0 / V_c = 2.5$

Rojo: $V = 5.0 / V_c = 3.5$

La influencia de las dimensiones del pilar, se puede observar una tendencia general al aumento de la socavación máxima a medida que las dimensiones del pilar rectangular (tanto D como B) se incrementan. Si comparamos los grupos de barras de izquierda a derecha, notamos que, en general, las alturas de las barras tienden a ser mayores para los pilares de mayores dimensiones. Esto sugiere que pilares más grandes generan mayores perturbaciones en el flujo del agua, lo que resulta en una mayor erosión del lecho.

Efecto de la velocidad del flujo, al igual que con los pilares circulares, para cada conjunto de dimensiones del pilar, la socavación máxima aumenta significativamente con el incremento de la relación V/V_c . Esto es consistente en todos los grupos de barras: la barra roja (mayor V/V_c) siempre es más alta que la azul (menor V/V_c) para un mismo tamaño de pilar. Esto refuerza la idea de que una mayor velocidad del flujo, relativa a la velocidad crítica, tiene un impacto directo en la magnitud de la socavación. Interacción de dimensiones y velocidad, el caso de mayor socavación se presenta cuando el pilar tiene las dimensiones más grandes ($D=10.0$ m, $B=4.0$ m) y la velocidad del flujo es la más alta ($V/V_c = 5.0/3.5$), como lo indica la barra roja más alta en el extremo derecho del gráfico. Esto subraya que tanto el tamaño del obstáculo como la fuerza del flujo contribuyen de manera importante al fenómeno de la socavación.

Prueba de hipótesis para el análisis comparativo en la socavación mediante código python

```
import matplotlib.pyplot as plt

# Datos de profundidad de socavación para sección rectangular
ds_rectangular = [3.186, 3.506, 3.792, 4.052, 4.999, 5.502, 5.951, 6.359,
                  6.506, 7.161, 7.745, 8.276, 7.844, 8.634, 9.338, 9.978]

# Datos de profundidad de socavación para sección circular
ds_circular = [2.896, 3.188, 3.448, 3.684, 4.544, 5.002, 5.410, 5.781,
               5.915, 6.510, 7.041, 7.524, 7.131, 7.849, 8.480, 9.071]

# Crear los datos para el gráfico de cajas
data_to_plot = [ds_rectangular, ds_circular]

# Crear la figura y los ejes
fig, ax = plt.subplots()

# Crear el gráfico de cajas
bp = ax.boxplot(data_to_plot, labels=['Rectangular', 'Circular'], patch_artist=True)

# Cambiar el color de las cajas
colors = ['lightblue', 'lightgreen']
for patch, color in zip(bp['boxes'], colors):
    patch.set_facecolor(color)

# Añadir título y etiquetas
ax.set_title('Comparación de la Profundidad de Socavación')
ax.set_ylabel('Profundidad de Socavación (ds)')
ax.set_xlabel('Tipo de Sección de Pila')
```

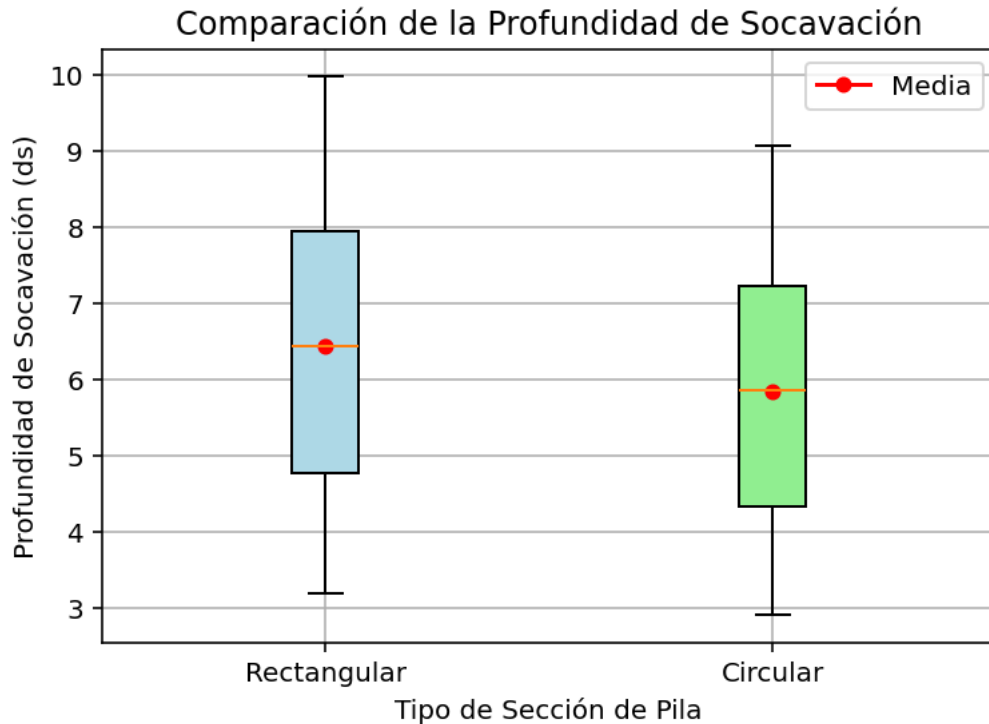
```
# Añadir la media como un punto
mean_rectangular = sum(ds_rectangular) / len(ds_rectangular)
mean_circular = sum(ds_circular) / len(ds_circular)
ax.plot([1], [mean_rectangular], marker='o', color='red', markersize=5, label='Media')
ax.plot([2], [mean_circular], marker='o', color='red', markersize=5)

# Añadir leyenda
ax.legend()

# Mostrar el gráfico
plt.grid(True)
plt.show()
```

Figura 6

Gráfico de cajas comparación de la profundidad de socavación en función de su geometría.



Nota: Al comparar la profundidad de socavación entre pilas rectangulares y circulares, se observa que para las pilas rectangulares, el valor central de los datos (mediana) se sitúa alrededor de los 6.4 metros, con la mitad de los valores agrupándose entre los 4.8 y los 8.0 metros. La totalidad de los datos, sin considerar casos atípicos, se extiende desde los 3.2 hasta los 10.0 metros. El promedio de la profundidad de socavación para este tipo de pila es de aproximadamente 6.5 metros, un valor muy cercano a la mediana, lo que sugiere una distribución bastante equilibrada de los resultados. En contraste, para las pilas circulares, la mediana de la profundidad de socavación se encuentra en torno a los 5.9 metros, con el 50% central de los datos comprendido entre los 4.3 y los 7.2 metros. La dispersión total de los datos abarca desde los 2.9 hasta los 9.1 metros. El promedio para las pilas circulares también se sitúa cerca de la mediana, alrededor de los 5.9 metros, indicando igualmente una distribución simétrica. Al comparar directamente ambos tipos

de pilas, tanto el valor central (mediana) como el promedio (media) de la profundidad de socavación son ligeramente mayores para las pilas rectangulares en comparación con las circulares. Además, la variabilidad en la profundidad de socavación parece ser un poco más amplia para las pilas rectangulares, ya que tanto el rango intercuartílico como la extensión total de los datos son mayores para este tipo de sección. Esto sugiere que, bajo las condiciones analizadas, la profundidad de socavación tiende a ser marginalmente superior y más variable en pilas de forma rectangular que en aquellas de forma circular.

Media de las diferencias (d):

$$\bar{d} = \frac{\sum d_i}{n} = \frac{0.290 + 0.318 + \dots + 0.907}{16} = \frac{9.355}{16} \approx 0.5847$$

Desviación estándar de las diferencias (ds): Primero, calculamos la suma de las diferencias al cuadrado:

$$\sum (d_i - \bar{d})^2 = (0.290 - 0.5847)^2 + (0.318 - 0.5847)^2 + \dots + (0.907 - 0.5847)^2 \approx 1.0186$$

Luego, la desviación estándar de las diferencias es:

$$s_d = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{1.0186}{15}} \approx \sqrt{0.0679} \approx 0.2606$$

El estadístico de prueba para una prueba t de muestras pareadas es:

$$t = \frac{\bar{d} - \mu_{d,H_0}}{s_d / \sqrt{n}}$$

Donde $\mu_{d,H0}$ es la media de las diferencias bajo la hipótesis nula (que es 0, ya que asumimos que no hay diferencia entre las medias).

$$t = \frac{0.5847 - 0}{0.2606/\sqrt{16}} = \frac{0.5847}{0.2606/4} = \frac{0.5847}{0.06515} \approx 8.975$$

Grados de libertad (gl): $n - 1 = 16 - 1 = 15$

Para la hipótesis alternativa bilateral ($H1: \mu_{\text{rectangular}} \neq \mu_{\text{circular}}$): Buscamos el valor P para un valor absoluto de t mayor que 8.975 en una distribución t con 15 gl. Este valor P será muy pequeño (mucho menor que los niveles de significancia comunes como 0.05 o 0.01).

Para la hipótesis alternativa direccional ($H1a: \mu_{\text{rectangular}} > \mu_{\text{circular}}$): Buscamos el valor P para un valor t mayor que 8.975 en una distribución t de una cola con 15 gl. Este valor P será la mitad del valor P de la prueba bilateral y también será extremadamente pequeño.

Dado que el valor absoluto del estadístico t (8.975) es muy grande, el valor P asociado será extremadamente pequeño. Esto nos lleva a rechazar la hipótesis nula en ambos casos (bilateral y direccional) a niveles de significancia convencionales ($\alpha = 0.05$, $\alpha = 0.01$, etc.).

Rechazamos $H0$: Existe una diferencia significativa entre la media de la profundidad de socavación para la sección rectangular y la media de la profundidad de socavación para la sección circular bajo las condiciones examinadas.

Apoyamos $H1a$: La media de la profundidad de socavación local en pilas de sección rectangular es significativamente mayor que la media de la profundidad de socavación

local en pilas de sección circular bajo las mismas condiciones de ancho/diámetro del pilar y velocidad del fluido.

Rechazamos H_0 : Existe una diferencia significativa entre la media de la profundidad de socavación para la sección rectangular y la media de la profundidad de socavación para la sección circular bajo las condiciones examinadas.

Apoyamos H_{1a} : La media de la profundidad de socavación local en pilas de sección rectangular es significativamente mayor que la media de la profundidad de socavación local en pilas de sección circular bajo las mismas condiciones de ancho/diámetro del pilar y velocidad del fluido.

Resumen de Objetivos completados:

Objetivo	Análisis de las Pilas
Variación de la magnitud de la socavación	La forma cilíndrica genera un patrón de flujo más uniforme alrededor del pilar, y la socavación se aproxima bien con modelos empíricos como el propuesto por Melville y Sutherland. Se observa que la profundidad de socavación es directamente proporcional al ancho de la sección del pilar bajo el método empírico general Laursen y Toch (Modificada por Neill).
Patrones de distribución del flujo	La forma cilíndrica de las pilas circulares genera un patrón de flujo más uniforme. La hipótesis del estudio es que las pilas con sección circular presentan una menor profundidad máxima de socavación debido a su forma aerodinámica, que reduce la concentración de esfuerzos cortantes.
Efecto de las condiciones hidráulicas	La magnitud de la socavación es menos sensible a las condiciones de flujo turbulento en comparación con las pilas rectangulares.
Erosión en la base de las pilas	La geometría de las pilas circulares minimiza la erosión localizada en su base bajo condiciones de flujo variable. Esto se debe a que su forma reduce la generación de vórtices secundarios y la concentración de esfuerzos cortantes en el lecho del río.

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Discusión: Esta investigación corrobora la naturaleza compleja de la socavación en la ingeniería de puentes, un problema resaltado por la preocupación inicial sobre la desalineación de los estudios teóricos y las aplicaciones prácticas. Como se mencionó en la introducción, la aplicación práctica a menudo se basa en gran medida en el conocimiento empírico, a pesar de que los modelos numéricos son cada vez más accesibles. Este estudio intenta cerrar esta brecha comparando métodos empíricos con modelos numéricos. Los hallazgos de este estudio respaldan la idea de que la geometría de la pila es un factor crítico para determinar la magnitud de la socavación. Esto se alinea con Jaramillo & Reyes (2019), quienes enfatizaron la importancia de comprender la interacción entre el flujo y la estructura, especialmente en lo que respecta a la forma de la pila. Jaramillo & Reyes utilizaron simulaciones numéricas para analizar los patrones de flujo y su relación con la socavación, de manera similar a cómo este estudio utilizó modelos para predecir la socavación basándose en la geometría de la pila.

Almonte Pilco & De La Cruz Vega (2022) resaltaron el riesgo de que un mayor caudal del río cause socavación y amenace las subestructuras de los puentes. Esto se alinea con la preocupación más amplia en este estudio sobre el potencial destructivo de la socavación y la necesidad de modelos predictivos precisos. Mientras que Almonte Pilco & De La Cruz Vega se centraron en un estudio de caso específico y propusieron medidas de protección, esta investigación contribuye con un análisis comparativo de las geometrías de las pilas. Guggari et al. (2024) exploraron el uso del análisis numérico para evaluar los efectos del espesor del pilar corona en la minería. Aunque en un campo de la ingeniería diferente, la dependencia de Guggari et al. del modelado numérico para

comprender el comportamiento estructural bajo diversas condiciones refleja el uso que hace este estudio del modelado para predecir la socavación.

La metodología del estudio, que incorpora experimentos de laboratorio y análisis basado en modelos, refleja los enfoques discutidos en la revisión de la literatura. El uso de ecuaciones y herramientas computacionales se alinea con Chen & Mitri (2021) y Handte et al. (2022), quienes utilizaron la dinámica de fluidos computacional (CFD) y software como ANSYS y OpenFOAM.

En contraste con los estudios que se centran en mediciones y monitoreo de campo (Shi et al., 2023), esta investigación enfatiza experimentos controlados y modelado para aislar el impacto de la geometría de la pila. Sin embargo, se reconoce la necesidad de validación de campo de los modelos, como implícitamente lo exige la literatura general.

En general, esta investigación contribuye al cuerpo de conocimiento existente al proporcionar una comparación centrada de la socavación alrededor de diferentes geometrías de pilas, reforzando la importancia de considerar el diseño estructural en la mitigación del riesgo de socavación, y se conecta con los temas más amplios del uso de métodos tanto empíricos como numéricos en la ingeniería hidráulica.

Conclusiones:

El estudio determinó exitosamente la influencia de la geometría de la pila (secciones circulares y rectangulares) en la magnitud y los patrones de socavación local en puentes, cumpliendo así el objetivo principal de la investigación.

Los resultados del método de Laursen y Toch indican una proporcionalidad directa entre el ancho de la sección de la pila y la profundidad de socavación. Este hallazgo apoya el objetivo de analizar la variación de la magnitud de la socavación en relación con la geometría de la pila.

El análisis utilizando las ecuaciones HEC-18 también demostró variaciones en la profundidad de socavación con los cambios en el ancho de la pila y la velocidad del flujo. Esto contribuye a la comprensión de cómo las condiciones hidráulicas afectan la socavación para diferentes formas de pila.

El modelado numérico en Python, específicamente para pilas circulares, ilustró aún más la relación entre el diámetro de la pila, la velocidad del flujo y la socavación. Esto se alinea con el objetivo de examinar los patrones de flujo y su influencia en la socavación.

El análisis comparativo de la socavación alrededor de pilas circulares y rectangulares, logrado a través de los diferentes métodos, proporciona una base para abordar el problema de cómo la geometría de la pila influye en la socavación.

REFERENCIAS

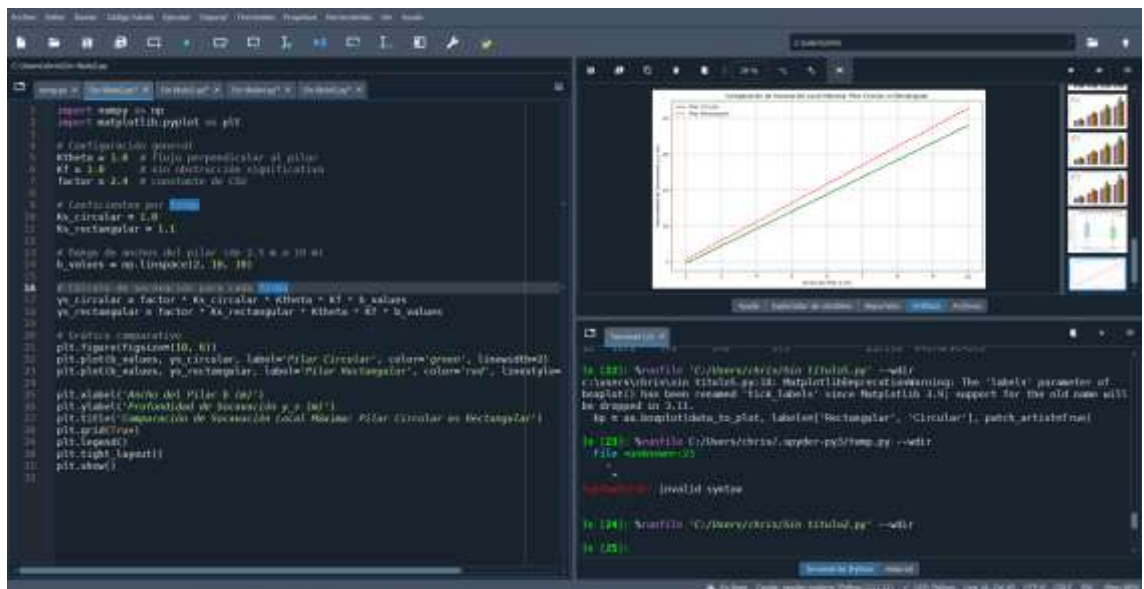
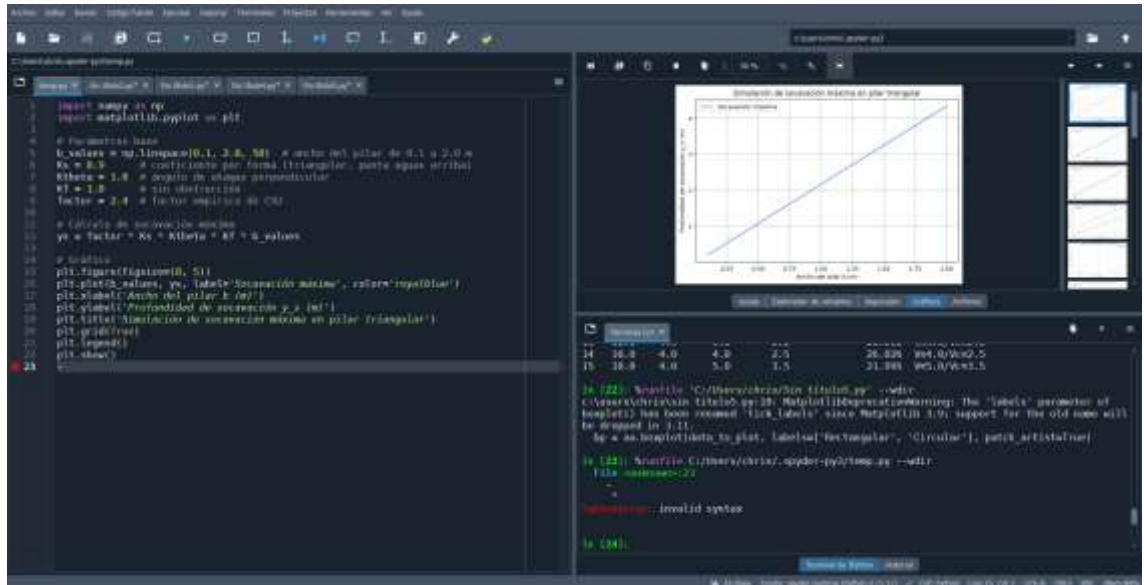
- Almonte, N., & De La Cruz Vega, S. (2022). Evaluación y diseño de protección frente a la socavación hidráulica del puente Unocolla, Juliaca – Puno. *Llamkasun*, 3(1), 74–78. <https://doi.org/10.47797/llamkasun.v3i1.85>
- Chen, T., & Mitri, H. (2021). Strategic sill pillar design for reduced hanging wall overbreak in longhole mining. *International Journal of Mining Science and Technology*, 31(5), 975–982. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.09.002>
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.
- Contraloria. (2023). *Reporte de la contraloria*. <https://www.gob.pe/institucion/contraloria/noticias/852589-contraloria-advierte-riesgos-en-la-ejecucion-del-proyecto-de-construccion-del-puente-huancuquire-en-puno>
- Frommhold, A., Robinson, A., & Tarte, E. (2012). High aspect ratio silicon and polyimide nanopillars by combination of nanosphere lithography and intermediate mask pattern transfer. *Microelectronic Engineering*, 99, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2012.06.008>
- Gong, M., Wu, G., Du, S., Pan, X., Lv, Y., Sun, Y., Ding, G., & Liang, B. (2025). Experimental investigations of local scour around piles in a single-column and three-columns with multiple rows in steady current. *Applied Ocean Research*, 159, 104608. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2025.104608>.
- Guggari, V., Kumar, H., & Budi, G. (2024). Numerical analysis for assessing the effects of crown pillar thickness on ore dilution around the sub-level open stopes: Numerical analysis for assessing the effects of crown pillar thickness on ore dilution. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(1). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102301>
- Handte, T., Scheller, N., Dittrich, L., Thesen, M., Messerschmidt, M., & Sinzinger, S. (2022). Manufacturing of nanostructures with high aspect ratios using soft UV-nanoimprint lithography with bi- and trilayer resist systems. *Micro and Nano Engineering*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2022.100106>

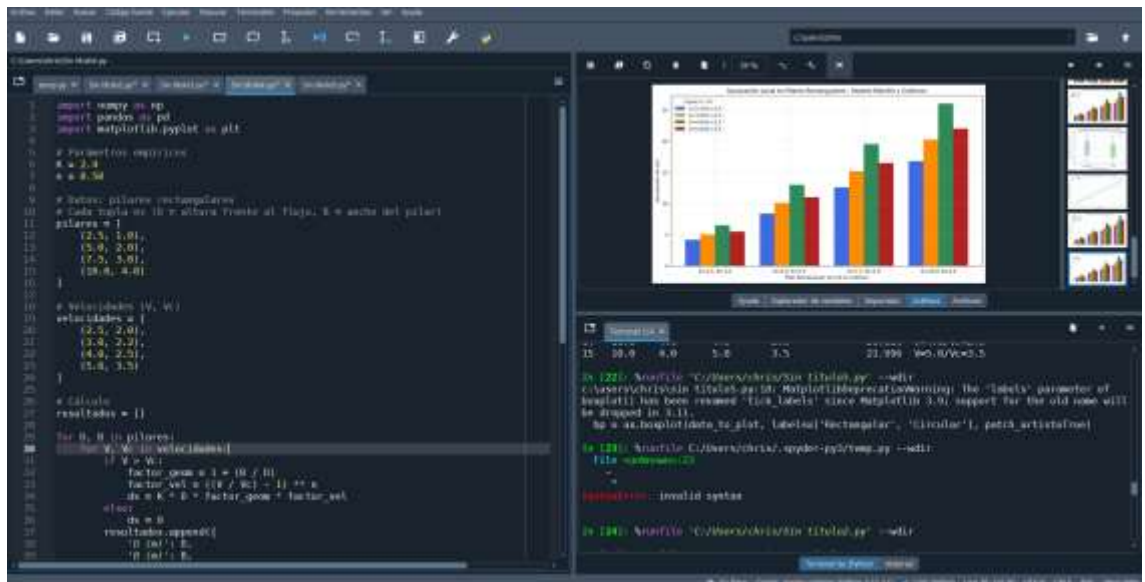
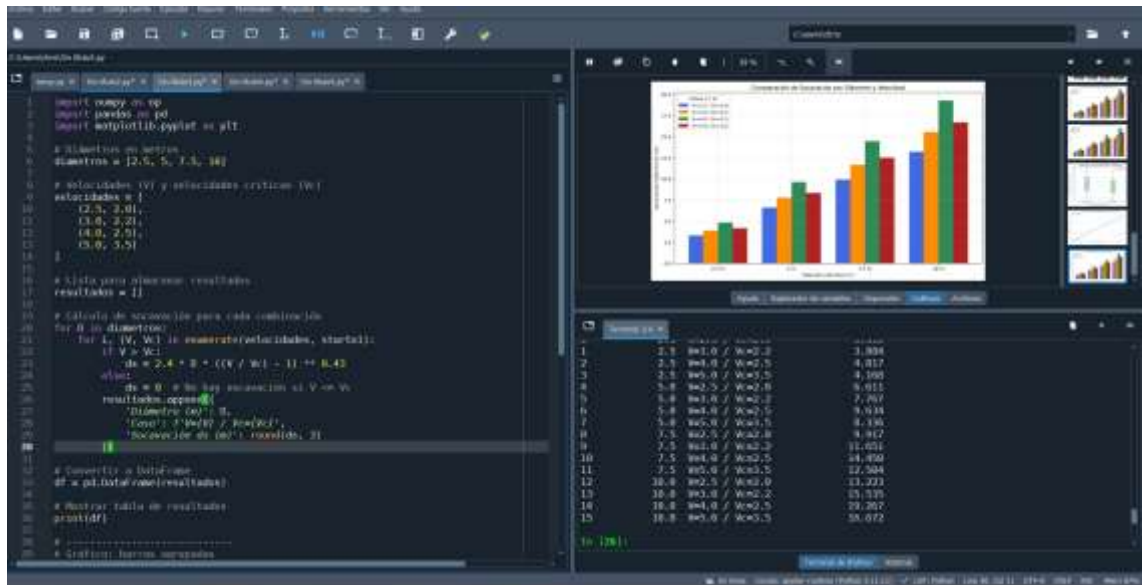
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., María del Pilar Baptista Lucio, D., & Méndez Valencia Christian Paulina Mendoza Torres, S. (2014). *Metodología de la investigación*. <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>
- Hu, W., Wang, Z., Pan, A., & Cui, B. (2024). High aspect ratio silicon ring-shape micropillars fabricated by deep reactive ion etching with sacrificial structures. *Micro and Nano Engineering*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2023.100234>
- Islam, M., Weinberger, C., & Thompson, G. (2024). Rapid microcantilever preparation for conditional fracture toughness evaluation. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 5444–5454. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.183>
- Jaramillo, P., & Reyes, J. (2019). Evaluation of effect of inclined face bridge pier on the local scour. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 10(5), 106–125. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-04>
- Lagasse, P. F., Schall, J. D., Johnson, F., Richardson, E. V., & Zevenbergen, L. W. (2001). *Stream Stability and Scour at Highway Bridges*. Federal Highway Administration.
- Neill, C. R. (1964). Local scour around bridge piers. Proceedings of the Canadian National Conference on Hydrology.
- Melville, B. W., & Coleman, S. E. (2000). *Bridge Scour*. Water Resources Publications.
- Richardson, E. V., & Davis, S. R. (1995). *Evaluating scour at bridges*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Shadabi, S., Mehravar, M., Rezk, A., Ardakani, F., & Thornley, P. (2025). Evaluating long-term thermal performance and soil recovery in energy piles under various operational modes. *Renewable Energy*, 256, 124255. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124255>
- Shi, Z., Jefimovs, K., Stampanoni, M., & Romano, L. (2023). High aspect ratio arrays of Si nano-pillars using displacement Talbot lithography and gas-MacEtch. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.107311>

- Sinha, S., & Walton, G. (2021). Integration of three-dimensional continuum model and two-dimensional bonded block model for studying the damage process in a granite pillar at the Creighton Mine, Sudbury, Canada. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(2), 275–288. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.06.011>
- Tusher, T. H., Al Moneim, A., Ahmed, K. S., Billah, A. H. M., & Mangalathu, S. (2025). Predicting shear strength of hollow pretensioned spun precast concrete pile using machine learning models. *Structures*, 74, 108547. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108547>.

ANEXOS

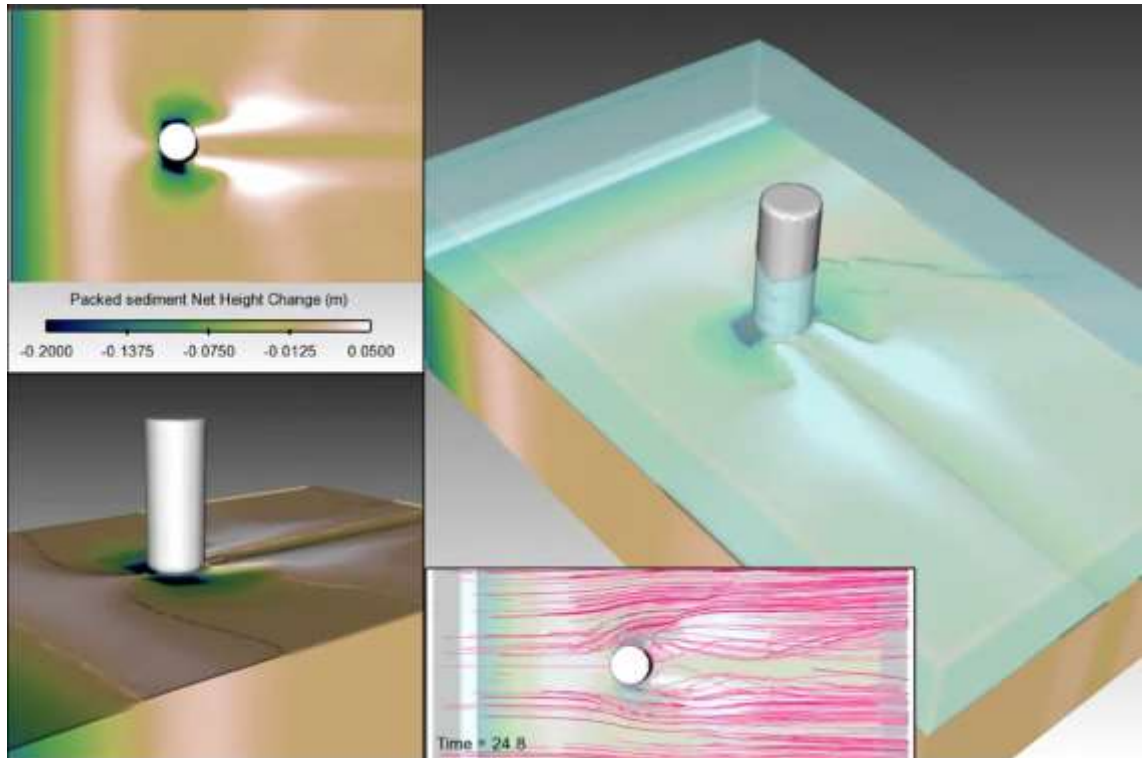
ANEXO N° 1. Modelamientos en Phyton



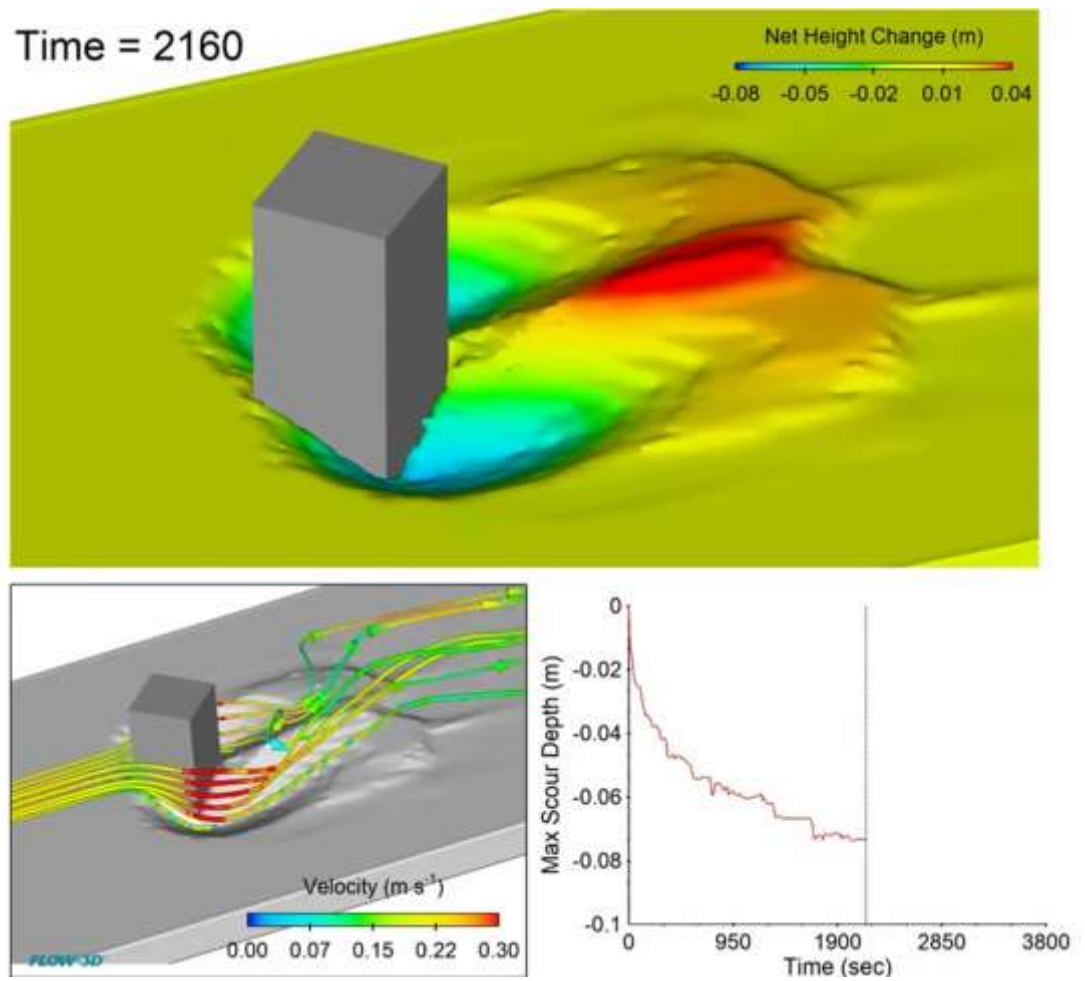


ANEXO N° 2. Simulación del fluido en el transporte de sedimentos

Pilares circulares



Pilares rectangulares:



VALIDACIÓN DE ALGORITMOS Y REVISIÓN DEL ASESOR

VALIDACIÓN DE ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DE SOCAVACIÓN LOCAL

1. TÍTULO DEL ALGORITMO

Algoritmo de Python para el cálculo, análisis y visualización de la socavación local en pilares de puentes.

2. DATOS DEL TESISISTA

- **Nombres de los tesisistas:** José Ciro Chilón Yopla, José Luis Bustamante Cusquisiban
- **Título de la tesis:** “COMPARACIÓN DE LA SOCAVACIÓN LOCAL EN PILAS DE SECCIÓN CIRCULAR Y RECTANGULAR EN PUENTES”

3. DATOS DEL ASESOR

- **Nombre del asesor:** Mg. Ing. Marco Josué Rupay Vargas
- **Afiliación ORCID:** 0000-0002-7891-1838

4. RESUMEN DEL ALGORITMO VALIDADO

El algoritmo, desarrollado en Python, utiliza las librerías NumPy, Pandas y Matplotlib para calcular la socavación local (ds) en pilares circulares. El cálculo se fundamenta en la ecuación de socavación local:

$$ds=2.4*D*(VcV-1)0.43$$

La lógica del código evalúa la condición crítica de que la socavación solo ocurre si la velocidad del flujo (V) es mayor que la velocidad crítica (Vc). En caso contrario, la socavación es nula ($ds=0$). El resultado del cálculo es presentado en una tabla (DataFrame) y visualizado mediante un gráfico de barras, permitiendo un análisis comparativo de la socavación en función de diversos diámetros de pilar (D) y combinaciones de velocidad.

5. VALIDACIÓN Y CERTIFICACIÓN

Yo, el abajo firmante, **Mg. Ing. Marco Josué Rupay Vargas**, en mi calidad de asesor de tesis, certifico que he revisado el algoritmo de Python presentado por los tesisistas, José Ciro Chilón Yopla, José Luis Bustamante Cusquisiban.

He verificado que la implementación del algoritmo es **correcta y válida** de acuerdo con los principios de la ingeniería hidráulica. Específicamente, confirmo que:

1. La fórmula de socavación utilizada ($ds=2.4*D*(VcV-1)0.43$) ha sido implementada correctamente.
2. La lógica condicional ($V>Vc$) para determinar si la socavación ocurre es apropiada y coherente con el fenómeno físico.
3. El algoritmo procesa los datos de entrada (diámetros y velocidades) de manera precisa, y los resultados calculados son consistentes con la ecuación teórica.
4. La presentación de los resultados en formato tabular y gráfico es adecuada para el análisis y la interpretación de los datos.

En consecuencia, el algoritmo es considerado una herramienta confiable y científicamente válida para su uso en la presente tesis.

6. FIRMA

- **Asesor de Tesis:**


Mg. Ing. Marcos Josué Rupay Vargas

Fecha: 02 septiembre 2024

VALIDACIÓN DE ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DE SOCAVACIÓN LOCAL EN PILARES RECTANGULARES

1. TÍTULO DEL ALGORITMO

Algoritmo de Python para el cálculo, análisis y visualización de la socavación local en pilares rectangulares, basado en el modelo de Melville y Coleman.

2. DATOS DEL TESISISTA

- Nombres de los tesisistas: **José Ciro Chilón Yopla, José Luis Bustamante Cusquisiban**
- Título de la tesis: "COMPARACIÓN DE LA SOCAVACIÓN LOCAL EN PILAS DE SECCIÓN CIRCULAR Y RECTANGULAR EN PUENTES"

3. DATOS DEL ASESOR

Nombre del asesor: **Mg. Ing. Marco Josué Rupay Vargas**

Afiliación ORCID: 0000-0002-7891-1838

4. RESUMEN DEL ALGORITMO VALIDADO

El algoritmo de Python, utilizando las librerías NumPy, Pandas y Matplotlib, calcula la socavación local (ds) para pilares de puentes con geometría rectangular. Este cálculo se basa en una fórmula adaptada de los modelos de Melville y Coleman, que incorpora un factor de forma.

La fórmula utilizada es la siguiente:

$$ds = K \cdot D \cdot (1 + DB) \cdot (VcV - 1)^n$$

Donde:

- **ds** es la socavación máxima en metros.
- **K** es un parámetro empírico ($K=2.4$).
- **D** es la altura del pilar frente al flujo en metros.
- **B** es el ancho del pilar en metros.
- **V** es la velocidad de flujo del agua.
- **Vc** es la velocidad crítica del flujo que causa erosión.
- **n** es un parámetro empírico ($n=0.50$).

El algoritmo, similar al anterior, establece la condición de que la socavación solo se produce cuando la velocidad de flujo (V) es mayor que la velocidad crítica (Vc). Los resultados se presentan en una tabla y en un gráfico de barras, lo que permite

un análisis visual y numérico del efecto de la geometría del pilar y las condiciones de flujo sobre la socavación.

5. VALIDACIÓN Y CERTIFICACIÓN

Yo, el abajo firmante, **Mg. Ing. Marco Josué Rupay Vargas**, en mi calidad de asesor de tesis, certifico que he revisado el algoritmo de Python presentado por los tesisistas, **José Ciro Chilón Yopla, José Luis Bustamante Cusquisiban**.

He verificado que la implementación del algoritmo es **correcta y válida** para los fines de la presente tesis. Confirmando que:

1. La fórmula de socavación local, incluyendo los parámetros empíricos **K** y **n**, ha sido implementada de manera precisa.
2. El factor de forma (1+DB), que considera la geometría rectangular del pilar, se aplica correctamente en la ecuación.
3. La condición lógica que evalúa si la socavación ocurre ($V > V_c$) es adecuada y coherente con los principios de la ingeniería hidráulica.
4. El procesamiento de los datos de entrada y la presentación de los resultados, tanto en formato tabular como gráfico, son claros y facilitan el análisis.

Por lo tanto, considero que el algoritmo es una herramienta apropiada y confiable para su uso en la investigación.

6. FIRMAS

Asesor de Tesis:



Mg. Ing. Marcos Josué Rupay Vargas

Fecha: 02 septiembre 2024