



Modelamiento hidráulico para evaluar impactos ambientales de variaciones en la intensidad de lluvias en Trujillo, Perú

ARTÍCULO ORIGINAL

Hydraulic Modeling of Rainfall Intensity Impacts, Trujillo Perú

Modelagem Hidráulica dos Impactos da Intensidade da Chuva, Trujillo Perú



Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:

<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v8i23.289>

Dante Alexander Farroñay Diaz 
n00201759@upn.pe

Jean Carlos Ecurra Lagos 
jean.escurra@upn.pe

Universidad Privada del Norte. Lima, Perú

Artículo recibido 20 de marzo 2024 / Arbitrado 26 de abril 2024 / Publicado 2 de mayo 2024

RESUMEN

Durante los años 2017 y 2024, las lluvias desproporcionadas han sido más frecuentes debido al sobrecalentamiento de la Tierra y al cambio climático, lo que ha resultado en pérdidas económicas y sociales significativas. Por tanto, es importante los modelamientos hidráulicos para comprender y planificar acciones que permitan mitigar los impactos de estos desastres naturales. El presente artículo de investigación se enfocó en el diseño de un modelamiento hidráulico para evaluar los impactos ambientales ocasionados por las variaciones en la intensidad de la lluvia en Trujillo. Se emplearon datos históricos de intensidad de lluvias y datos georreferenciados, junto con el uso de softwares especializados, para crear un modelo que pueda ser utilizado en futuros proyectos o estudios de impacto ambiental. Este reporte de caso resalta la necesidad de metodologías avanzadas para la prevención y gestión de inundaciones, subrayando la relevancia de la planificación y el análisis técnico en la mitigación de riesgos asociados a eventos climáticos extremos.

Palabras clave: Modelamiento hidráulico; Inundaciones; Cambio climático; Prevención de desastres; Gestión ambiental

ABSTRACT

During 2017 and 2024, disproportionate rainfall has become more frequent due to global overheating and climate change, resulting in significant economic and social losses. Therefore, hydraulic modeling is important to understand and plan actions to mitigate the impacts of these natural disasters. This research article focused on the design of a hydraulic model to evaluate the environmental impacts caused by variations in rainfall intensity in Trujillo. Historical rainfall intensity data and georeferenced data, along with the use of specialized software, were used to create a model that can be used in future projects or environmental impact studies. This case report highlights the need for advanced methodologies for flood prevention and management, underlining the relevance of planning and technical analysis in the mitigation of risks associated with extreme weather events.

Key words: Hydraulic modeling; Floods; Climate change; Disaster prevention; Environmental management

RESUMO

Durante 2017 e 2024, a precipitação desproporcionada tornou-se mais frequente devido ao aquecimento global e às alterações climáticas, resultando em perdas económicas e sociais significativas. Por conseguinte, a modelação hidráulica é importante para compreender e planear acções para mitigar os impactos destas catástrofes naturais. Este artigo de investigação centrou-se na conceção de uma modelação hidráulica para avaliar os impactos ambientais causados pelas variações da intensidade da precipitação em Trujillo. Os dados históricos de intensidade de precipitação e os dados georreferenciados, juntamente com a utilização de software especializado, foram utilizados para criar um modelo que pode ser utilizado em futuros projectos ou estudos de impacto ambiental. Este relatório de caso destaca a necessidade de metodologias avançadas para a prevenção e gestão de inundações, sublinhando a relevância do planeamento e da análise técnica na mitigação dos riscos associados a eventos climáticos extremos.

Palavras-chave: Modelagem hidráulica; Inundações; Mudanças climáticas; Prevenção de desastres; Gestão ambiental

INTRODUCCIÓN

En la provincia de Trujillo, ubicada en la región de La Libertad, Perú, se ha registrado un aumento significativo en la intensidad de las lluvias en la última década. Este incremento en las precipitaciones ha planteado desafíos considerables en términos de gestión ambiental. El aumento en la intensidad de las lluvias ha incrementado la vulnerabilidad de las infraestructuras urbanas y las áreas naturales a inundaciones, erosión del suelo y degradación de la calidad del agua, fenómenos exacerbados por el cambio climático en la costa peruana, especialmente en la zona norte (1). Estos impactos negativos afectan tanto a los ecosistemas locales como a la calidad de vida de la población, como se evidenció en el distrito de La Esperanza, Trujillo, que sufrió daños significativos hace 7 años durante los meses de febrero y marzo (2).

Diversas investigaciones han abordado esta problemática, proporcionando una base sólida para justificar la utilidad de la aplicación de modelos para la gestión de riesgos y desastres modelaron hidrológicamente la quebrada San Idelfonso en Trujillo, sugiriendo soluciones de enrutamiento de desbordes, lo que evidencia la importancia de tales modelos en la planificación de infraestructura resiliente (3). También CENEPRED (4) evaluó el riesgo de inundación pluvial en Casa Grande, concluyendo que las probabilidades de impacto varían de bajo a muy alto riesgo no mitigable, destacando la necesidad de modelos predictivos para anticipar

y mitigar desastres. Igualmente, Chiroque (5) analizó la susceptibilidad a inundaciones en Chiclayo, recomendando medidas preventivas que podrían ser implementadas eficazmente con el apoyo de modelamientos hidrológicos. Además, Valdabenito (6) y Torres (7), realizaron modelamientos hidráulicos en diferentes regiones, utilizando herramientas avanzadas como Hec-Ras y ArcGIS, demostrando cómo estos modelos pueden evaluar y prever los peligros de inundación, permitiendo una gestión de riesgos más proactiva y eficaz. Estas investigaciones subrayan la relevancia de aplicar modelos hidrológicos e hidráulicos para una gestión integral y efectiva de riesgos y desastres ambientales.

El presente trabajo se propuso diseñar un modelamiento hidráulico específico para la provincia de Trujillo con el objetivo de evaluar los impactos ambientales causados por las variaciones en la intensidad de las lluvias. Los principales objetivos de este estudio incluyen analizar datos históricos de variación de intensidad de lluvias, identificar áreas vulnerables, realizar un modelamiento hidráulico para escorrentías de lluvia y proponer soluciones ante eventos desafortunados.

La importancia de este trabajo radica en la necesidad de una comprensión profunda de los impactos ambientales generados por las variaciones de las lluvias, lo que permitirá una gestión más efectiva de los eventos climáticos

extremos. Teóricamente, se enmarca en el contexto del cambio climático global, y a nivel práctico, contribuirá al diseño de infraestructura adecuada y a la toma de decisiones informadas para mitigar riesgos. La elección de software técnico, datos meteorológicos y topográficos actualizados garantizar la precisión y relevancia del modelo hidráulico para la provincia de Trujillo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se enmarca como una investigación aplicada y descriptiva según lo definido por Murillo (8) y Guevara (9). La investigación aplicada se centra en la aplicación práctica de conocimientos existentes y la generación de nuevos conocimientos mediante la investigación empírica, mientras que la investigación descriptiva tiene como objetivo describir con precisión las acciones, costumbres y actitudes actuales para comprender las circunstancias y fenómenos relevantes. El diseño del estudio es no experimental, utilizando datos de experiencias directas no manipuladas.

La población estudiada corresponde a la zona de la provincia de Trujillo, específicamente representada en formatos georreferenciados como raster, DEM, curvas de nivel, entre otros. La muestra se focaliza en un punto específico ubicado en el río Moche, con coordenadas UTM de 737375.70 m E y 9110233.46 m S, a una elevación aproximada de 257 m.

Los datos históricos de variación de intensidad de lluvias abarcan el período de 1982

a 2023, recalibrados al datum WGS 84-17s-32717 actualizado mediante fuentes como visores climáticos e informes de evaluación de datos nacionales. La recolección de datos se llevó a cabo mediante técnicas de observación y análisis documental, verificando fuentes documentales de acceso público, incluyendo páginas gubernamentales a nivel nacional, regional y municipal que proporcionaron las variables críticas para el estudio. Los instrumentos empleados fueron el diario de campo para registrar observaciones directas, la guía de observación para sistematizar las observaciones específicas en terreno, y la guía de análisis documental para estructurar la revisión sistemática de informes técnicos y datos relevantes.

El procedimiento de recolección de datos incluyó la identificación de portales de fuentes georreferenciadas nacionales y la descarga de archivos de información (DEM, raster, Shapefile, KML, curvas de nivel) siguiendo criterios de inclusión. Los datos fueron georreferenciados e interpolados al datum WGS 84 17S para minimizar el margen de error a menos de 50 metros. Se delimitó la provincia de Trujillo y se estimó el área de riesgo ante variaciones de intensidad de lluvias en QGIS, además de realizar simulaciones en escala de colores utilizando curvas de nivel obtenidas de Google Earth Pro.

Para la modelación hidráulica, se procedió con el corte del área seleccionada para la simulación en Iber, estimando el caudal máximo en metros cúbicos por hora. Se plantearon estructuras para

posibles escenarios de inundación utilizando Sketchup Pro 2022. La validación de los resultados se realizó con software técnico reconocido como QGIS, Iber, Google Earth Pro y Sketchup Pro 2022, con la colaboración de expertos del área de Ingeniería Ambiental de la Universidad Privada del Norte para garantizar la fiabilidad de la información y metodología empleada.

Durante la preparación del trabajo se consideraron aspectos éticos que incluyen la responsabilidad social mediante la investigación, el respeto a la integridad intelectual citando a los autores pertinentes, la veracidad en la presentación de datos reales, la honestidad y transparencia en la elaboración del trabajo, y el respeto al medio ambiente y la vida al evitar cualquier perjuicio a personas, animales o ecosistemas.

Esta metodología proporciona un marco riguroso para la investigación y análisis de los impactos ambientales de las variaciones en la intensidad de las lluvias en la provincia de Trujillo, asegurando la precisión y relevancia de los

resultados obtenidos.

RESULTADOS

La provincia de Trujillo, ubicada en la zona norte de Perú, abarca un área de 1779 km² y tiene una población de 1.01 millones de habitantes, de los cuales el 48% son mujeres y el 52% son hombres, según datos del INEI de 2021. Esta región presenta cuencas hidrográficas significativas, como el río Moche, que desemboca en el océano Pacífico.

Coordenadas geográficas de Trujillo, Perú, en grados decimales. La latitud de Trujillo es de -8.1159900° y la longitud es de -79.0299800°. Teniendo como muestra de referencia la ubicación del trabajo (10).

En el siguiente informe, se revela que durante el mes de mayo se observan anomalías acumuladas de lluvia, especialmente durante los veranos (enero a marzo) de años extraordinarios como 1982 y 1998, así como durante los eventos del Niño Costero entre 2017 y 2023. Estos datos posicionan a la provincia de Trujillo como una "área húmeda" vulnerable a variaciones significativas en las precipitaciones.

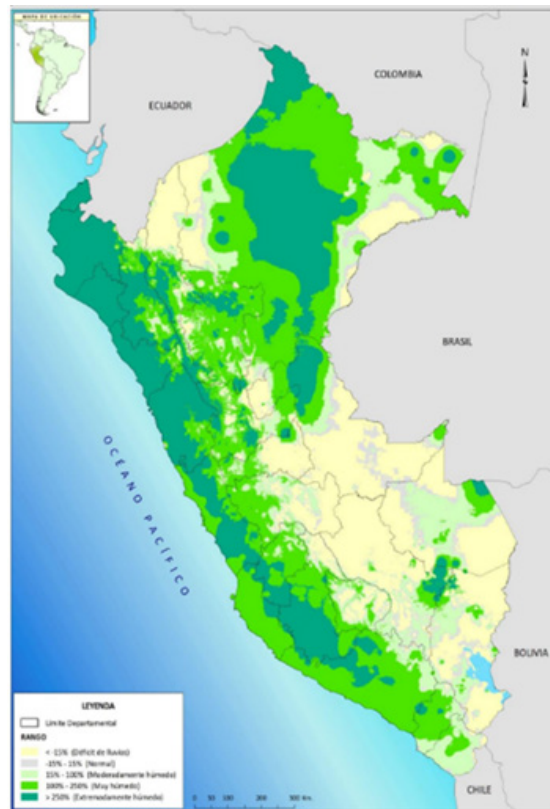


Figura 1. Acumulación de Lluvias enero a marzo desde 1982 a 2023. SENAMHI (11).

El análisis de datos históricos de lluvias mensuales, utilizando los índices C y E, muestra variaciones en la intensidad de las precipitaciones. El índice C se refiere al calentamiento en el Pacífico central, mientras que el índice E se refiere al Pacífico oriental. Estas variaciones están relacionadas

con excesos de lluvias en la región norte y centro occidental de Perú. En las siguientes figuras, el color naranja indica condiciones desfavorables de lluvia, mientras que el verde indica condiciones favorables

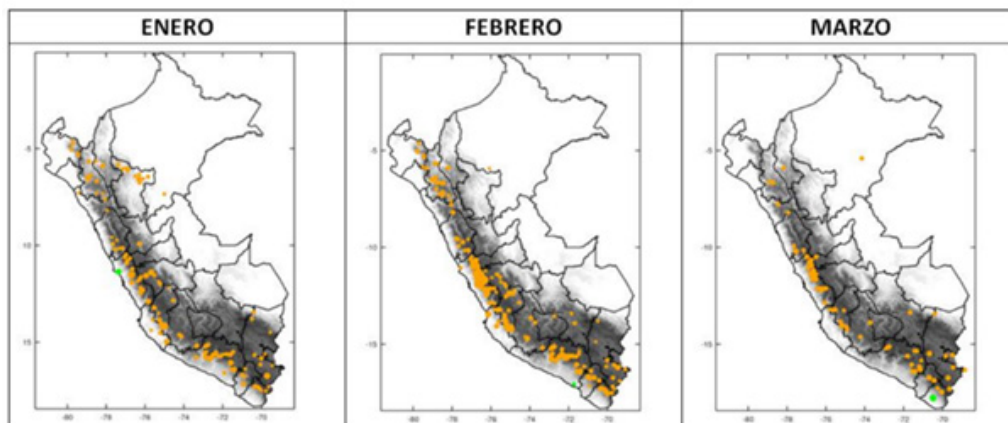


Figura 2. Nivel de Lluvias por Color en el Punto Fuente. SENAMHI (10).

En el Punto C se observa un incremento gradual de la precipitación entre enero y marzo, siendo marzo el mes más lluvioso con un promedio de 60 mm, mientras que enero registra la menor precipitación con un promedio de 20 mm.

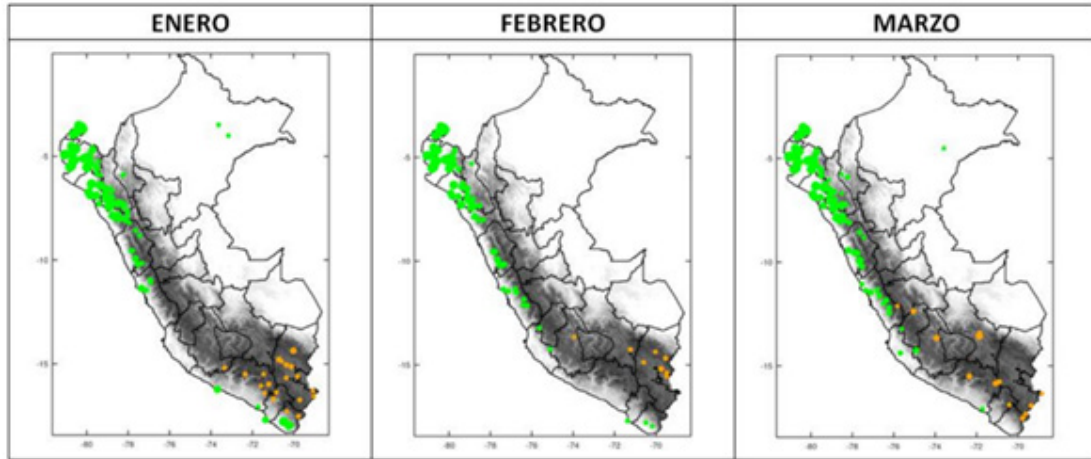


Figura 3. Nivel de Lluvias por Color en el Punto E. SENAMHI (11).

En el Punto E se observa un incremento gradual de la precipitación entre enero y marzo, siendo marzo el mes más lluvioso con un promedio de 76 mm, mientras que enero registra la menor precipitación con un promedio de 20 mm.

Desde 2017 hasta 2024, se ha observado un aumento en la intensidad de las lluvias durante los meses de enero, febrero y marzo. Esto se evidencia en los datos proporcionados por la estación climática de Quiruvilca.

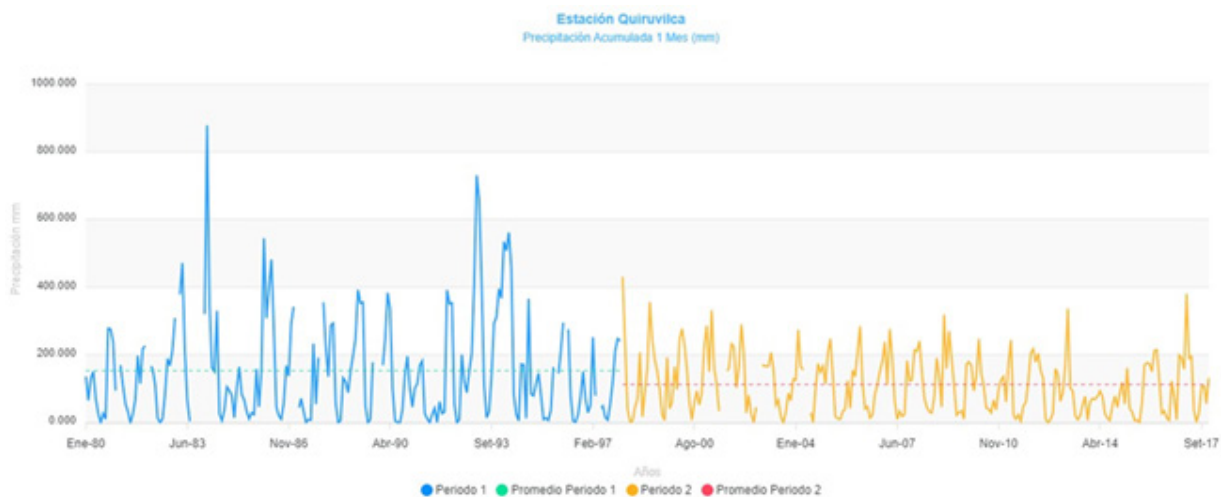


Figura 4. Datos de la Estación Climática de Quiruvilca. Análisis de Datos y Recursos Estadísticos del Agua – ANDREA (12).

La Figura 4, está basada en datos y recursos estadísticos del Agua (12), muestra dos periodos de análisis. Durante el Periodo Azul (1980-1998), se registró un promedio de precipitaciones de 152.768 mm con una desviación estándar de 152.639, mientras que en el Periodo Amarillo (1998-2017), el promedio de precipitaciones fue

de 112.107 mm con una desviación estándar de 86.547.

Esto indica que, aunque los años 1982 y 1998 registraron las lluvias más intensas, la variación en la intensidad de las lluvias ha sido significativa en los meses de enero, febrero y marzo

Tabla 1. Estación Laredo Promedio mm/mes de enero-febrero-marzo 2023.

Año/mes	Enero	Febrero	Marzo
2023	0.0129 mm/mes	0.0323 mm/mes	1.2968 mm/mes

Fuente: SENAMHI (11).

La Tabla 1, muestra el aumento en la variabilidad de las precipitaciones de enero a marzo de 2023, registrado por la estación hidrometeorológica de Laredo en la provincia de Trujillo.

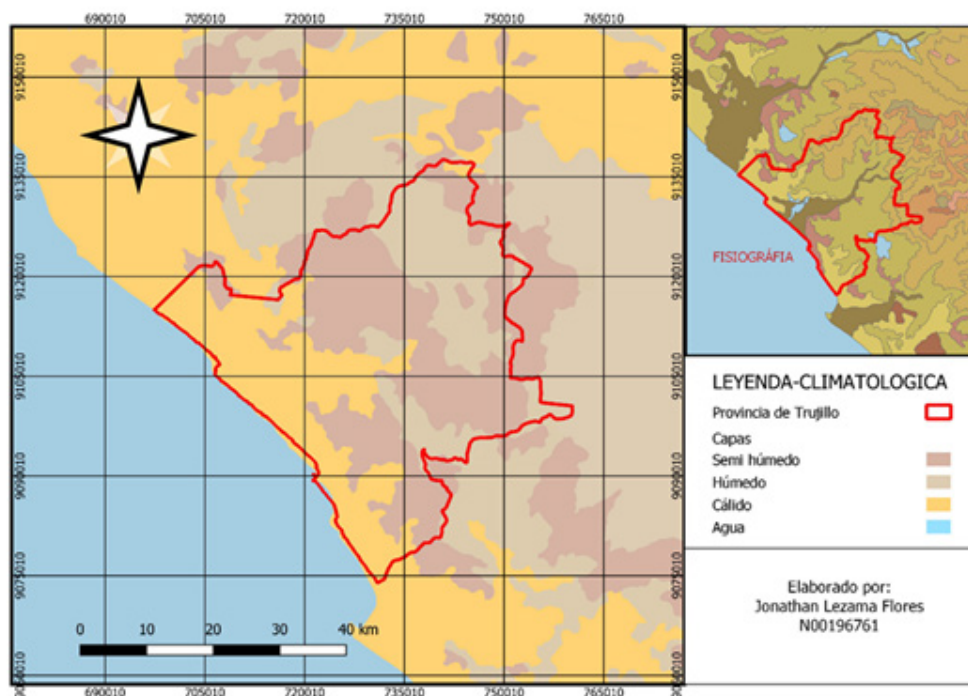


Figura 5. Mapa de Fisiografía y Clima en Base a la Hidrología.

En la Figura 5, anterior podemos presentar la fisiografía de la provincia de Trujillo y la interpolación de sus características hidrológicas basadas en el clima de la última década. Estos gráficos pueden variar según la naturaleza y otros factores.

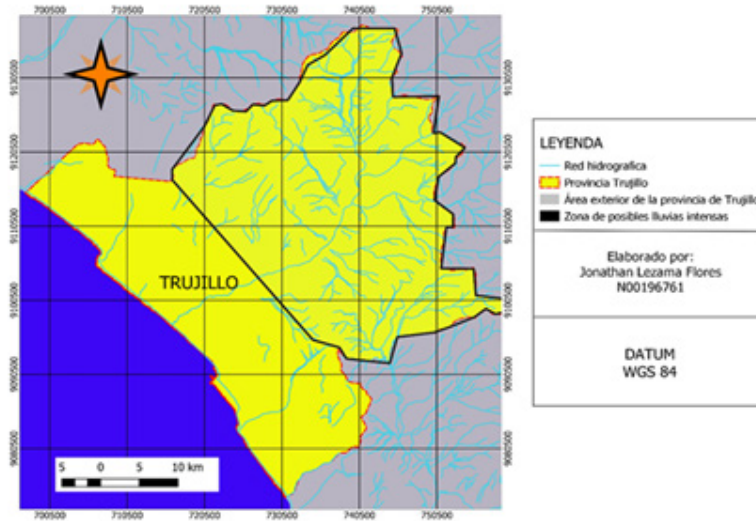


Figura 6. Mapa de Riesgo ante Variaciones de Lluvia.

La Figura 6, delinea la zona de riesgo mediante la interpolación de rasters en QGIS, utilizando datos de visores nacionales. Se identificó que el polígono en color negro delimita la zona vulnerable ante cambios en la intensidad de las lluvias. Las

redes hidrográficas de la provincia de Trujillo se perfilan como soluciones viables para gestionar el caudal, particularmente en las áreas de nivel medio y bajo, con el fin de mitigar los efectos adverso.

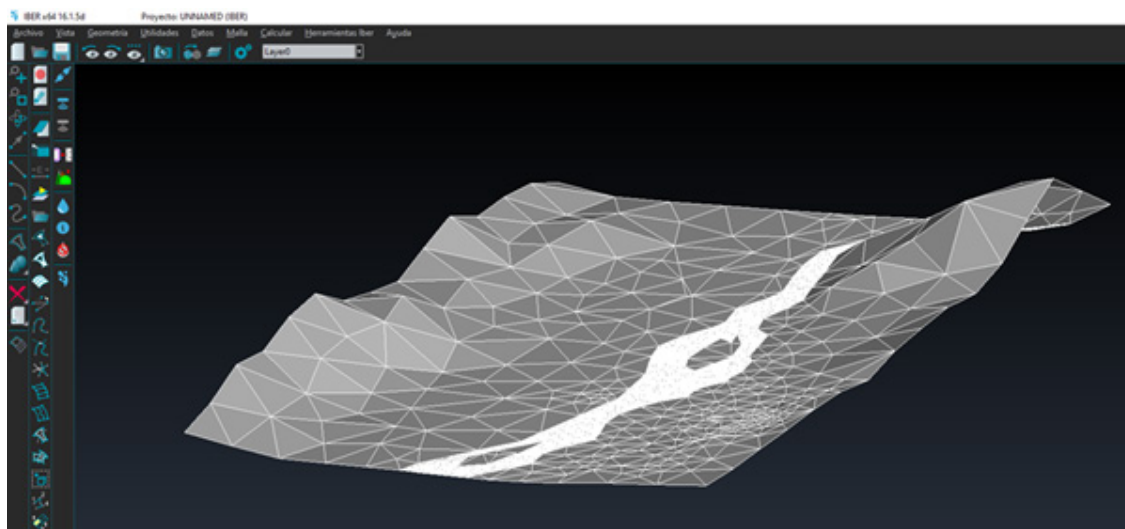


Figura 7. Modelación Hidráulica de Caudal Mayor – Iber.

En la Figura 7, se presenta una simulación de escorrentía fluvial/pluvial en una zona central de la provincia de Trujillo. El caudal máximo registrado fue de 50 litros por segundo, equivalente a 180 metros cúbicos por hora (13). La simulación indica que el río Moche puede gestionar este caudal, y se

recomienda la construcción de presas pequeñas en puntos estratégicos para controlar los caudales en las entidades hídricas mayores. Este estudio tiene como objetivo la prevención de riesgos y la gestión efectiva de eventos extremos.

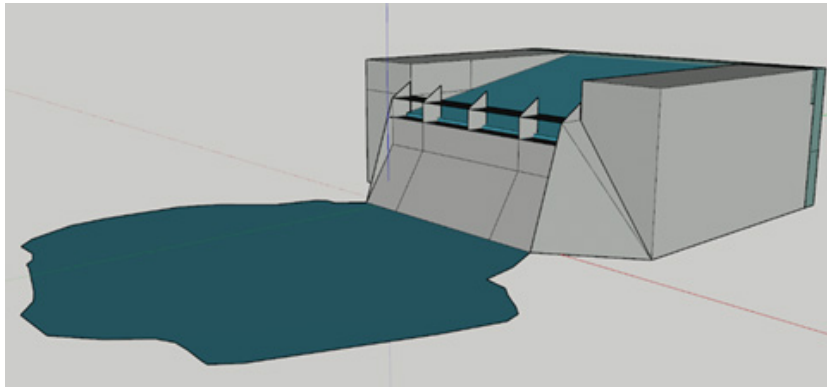


Figura 8. Presa de Simulación-Sketchu.

La Figura 8, representa la propuesta de construir presas para mitigar los impactos ambientales causados por las variaciones en la intensidad de las lluvias, es crucial determinar la ubicación óptima de estas estructuras. Las presas deben ser estratégicamente ubicadas en áreas de acumulación natural de agua, como lagunas, lagos y quebradas, donde puedan captar

y regular eficazmente el caudal durante períodos de lluvias intensas. La cantidad y distribución de las presas dependerán del análisis hidrológico específico de la región, considerando factores como la topografía, el flujo de agua y las áreas vulnerables a inundaciones, asegurando así una gestión efectiva de riesgos y una protección ambiental adecuada.

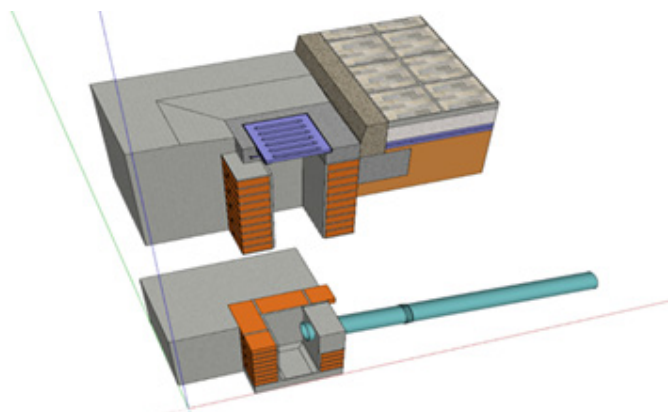


Figura 9. Alcantarillado para Lluvias de Simulación - Sketchup.

La Figura 9, muestra una propuesta de alcantarillado para lluvias diseñado para centros poblados y ciudades, con un sistema de drenaje planificado para desembocar en el río Moche. Este diseño tiene como objetivo evitar la acumulación de agua pluvial y fluvial en los distritos poblados de la provincia de Trujillo

DISCUSIÓN

Respecto al análisis de datos de variación de intensidad de lluvias en la provincia de Trujillo, los informes de investigación han destacado la importancia de monitorear continuamente los eventos climatológicos, especialmente la lluvia, para anticipar futuros sucesos (10-12). Según SENAMHI (10), la provincia de Trujillo se caracteriza por ser extremadamente húmeda y susceptible a cambios en la intensidad de la lluvia, especialmente entre los meses de enero a marzo, como se evidencia en los registros históricos de 1982-1998 y 2017-2023. ANA (11), complementa estos hallazgos al confirmar que en la estación de Quiruvilca, los mismos meses presentan la mayor variabilidad en la intensidad de las lluvias, medida en términos de desviación estándar y acumulación en milímetros. Sin embargo, se identificaron limitaciones relacionadas con datos desactualizados debido a la falta o mal funcionamiento de estaciones automáticas en la región, lo que sugiere la necesidad de mejorar la infraestructura de monitoreo para una gestión más precisa y oportuna de eventos climáticos extremos en la provincia.

Para la identificación de áreas vulnerables a intensas lluvias, tomando en cuenta a CENEPRED (2) y Chiroque (5), destacan la importancia de elaborar mapas georreferenciados para ubicar y estimar zonas de riesgo por intensidad de lluvias, ya sea mediante datos numéricos o escalas de colores. El uso de software como QGIS permitió delimitar polígonos y aproximar zonas expuestas a cambios en la intensidad de lluvias. Las limitaciones incluyeron la data expuesta en la web para el levantamiento geográfico, ya que no se pudo realizar un proyecto de campo debido a la escala de la zona y a restricciones económicas.

En cuanto a la modelación hidráulica Torres (7), plantea en su investigación se afirma la relevancia del uso de programas de modelación hidrológica y las herramientas que brindan los software y bases de datos vectoriales para exposiciones geográficas propuestas para la modelación hidráulica. En este trabajo, el software Iber proporcionó la modelación final. El estudio estuvo limitado a la elaboración del modelamiento hidráulico mediante medios externos, utilizando los programas QGIS, Google Earth Pro e Iber. La información geográfica obtenida de la web también fue una limitación, ya que no se llevó a cabo un proyecto de campo a escala de la zona de estudio debido a restricciones económicas. Otro impedimento fue la falta de estaciones hidrometeorológicas en Perú. Por consiguiente, los datos obtenidos son aproximados, dado lo complejo que es detallar fenómenos naturales como la lluvia y otros factores involucrados.

Por último, se discuten las ideas de solución ante eventos desafortunados por variaciones de lluvias. Tomando en cuenta la investigación de Anticona (3), donde se propone un enrutamiento hacia el río Moche para la problemática del desborde de la Quebrada San Idelfonso debido a las lluvias. Sin embargo, no se consideró que el caudal máximo que puede soportar el río Moche es de 180 metros cúbicos/hora, lo cual descarta enrutamientos de fuentes de agua mayores a esta cantidad. Por ello, se propone la construcción de presas en áreas aledañas a quebradas, lagunas y otros cuerpos de agua. Para las zonas pobladas, se propone la instalación de alcantarillados para lluvias o imbornales, que desembocarían en el río Moche, con el fin de evitar acumulaciones de agua pluvial y fluvial en los distritos poblados de la provincia de Trujillo. Las limitaciones en estas ideas de solución incluyen la complejidad de las zonas donde se podrían implementar, resultando en solo un boceto de lo que se quiere lograr.

CONCLUSIONES

La hipótesis previamente establecida no es rechazada, dado que se logró desarrollar el modelamiento hidráulico en la zona delimitada, y se estima que podría proporcionar apoyo para investigaciones futuras orientadas hacia una evaluación de impacto ambiental.

Se logró analizar los datos históricos de variaciones de intensidad de lluvias en la provincia de Trujillo, concluyendo que, en los meses de enero a marzo, ocurre el mayor índice

de lluvias, siendo registrado el año actual 2023 con un mínimo de 0.0129 mm/mes y un máximo de 1.2968 mm/mes.

Se identificaron las áreas vulnerables a variaciones de intensidad de lluvias intensas, como se muestra en la figura N° 8, donde se diferencia con un polígono de borde negro la zona más propensa a cambios en la intensidad de lluvias.

Se logró la modelación hidráulica del área seleccionada para esorrentías de lluvia, obteniéndose un caudal máximo registrado de 180 metros cúbicos/hora. Se propusieron ideas de solución para mitigar los impactos ambientales generados por variaciones en la intensidad de lluvias. Estas incluyen la construcción de presas en zonas de lagunas, lagos y quebradas, y la elaboración de alcantarillados para lluvias o imbornales en los centros poblados y ciudades, con el objetivo de evitar eventos desafortunados causados por las lluvias.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Guerrero P, Rodríguez R, Leiva G. Desastres naturales: evaluación del riesgo y el flujo de derrubios en la quebrada San Idelfonso, Trujillo, La Libertad, Perú. 2021. <https://acortar.link/XHy9Bl>
2. CENEPRED. Informe de evaluación de riesgos por inundación pluvial en el centro poblado La Esperanza, Distrito de La Esperanza, Provincia de Trujillo, Departamento de La Libertad. 2017. <https://acortar.link/r9Ez5b>

- 3.** Anticona S, Cabanillas M. Modelamiento hidrológico de la quebrada San Idelfonso mediante SIG en Trujillo, La Libertad 2020. 2021. <https://acortar.link/ojPqyh>
- 4.** CENEPRED. Informe de evaluación de riesgo por inundación pluvial por lluvias intensas en el sector 1, distrito de Casa Grande, provincia de Ascope, departamento La Libertad. 2018. <https://acortar.link/H4O7Sc>
- 5.** Chiroque H. Evaluación de peligro por inundación pluvial en el predio La Despensa, distrito de Leonardo Ortiz, provincia de Chiclayo, región Lambayeque. 2021. <https://acortar.link/XYotq7>
- 6.** Valdabenito F. Análisis de inundaciones fluviales para la zona periurbana de Chillán-Chillán Viejo mediante modelamiento hidráulico. 2018. <https://acortar.link/SLBf9u>
- 7.** Torres Q. Modelación hidrológica para el estudio de inundación, en el departamento de Cundinamarca, del río Frío a la altura del municipio de Chía. 2017. <https://acortar.link/raHPJW>
- 8.** Murillo W. La investigación aplicada. 2008. <https://acortar.link/6wueLJ>
- 9.** Guevara G, Verdesoto A, Castro N. Metodologías de investigación educativa descriptivas, experimentales, participativas y de investigación-acción. 2020. <https://acortar.link/ebURKc>
- 10.** Senamhi. Informe N°01-2023/ SENAMHI-DMA-SPC-DHI-SEH. 2023. <https://acortar.link/zwU36N>
- 11.** Senamhi. Informe N°34 – 2023/SENAMHI-DMA-SPC. 2023. <https://acortar.link/1UUhkF>
- 12.** ANA. Análisis de datos y recursos estadísticos del agua-ANDREA. 2023. <https://acortar.link/Z1tXaW>
- 13.** Sedalib. Diagnóstico hídrico rápido de la cuenca del río Moche como fuente de agua y servicios ecosistémicos hídricos para la EPS SEDALIB S.A. 2018. <https://acortar.link/5FxRlj>