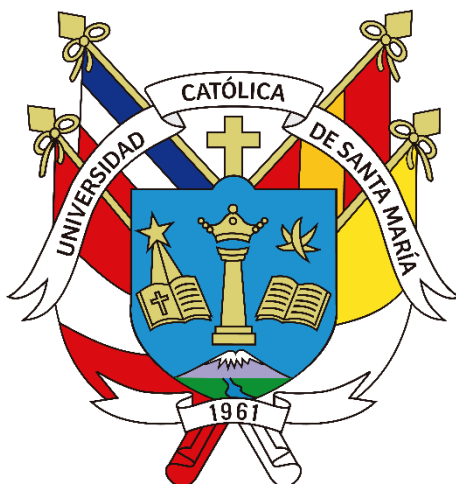


Universidad Católica de Santa María

Facultad de Arquitectura, Ingenierías Civil y del Ambiente

Escuela Profesional de Ingeniería Civil



METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DE PUENTES SOBRE CAUCES DE RÍO – CASO DE ESTUDIO: RÍO CHILI EN LA CIUDAD DE AREQUIPA, PERÚ

Tesis presentada por el Bachiller

Huarca Pulcha, Alan Sadam Husein

Para optar el Título Profesional de

Ingeniero Civil

Asesor

Mg. Noriega Aquise, Guillermo Yorel

Arequipa – Perú

2023

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA CIVIL
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 04 de Enero del 2023

Dictamen: 007417-C-EPIC-2023

Visto el borrador del expediente 007417, presentado por:

2015204411 - HUARCA PULCHA ALAN SADAM HUSEIN

Titulado:

**METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DE PUENTES SOBRE CAUCES DE RÍO ? CASO
DE ESTUDIO: RÍO CHILI EN LA CIUDAD DE AREQUIPA, PERÚ**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**1732 - CHAVEZ VEGA OSCAR FELIX
DICTAMINADOR**



**1783 - HIDALGO VALDIVIA ALEJANDRO VICTOR
DICTAMINADOR**



**1950 - ARROYO AMBIA ARTURO FELIX
DICTAMINADOR**



DEDICATORIA

A mis abuelitos Manuel e Isabel, que desde el cielo me cuidan y guían mis pasos.

*A mis padres Dorita y Flavio, que con amor y cariño, me acompañaron en todo momento,
esta tesis también es de ustedes.*

A mi hermano Carlos, por su apoyo incondicional.

A Alexander mi mejor amigo que junto a Karla y Máximo, me motivan a seguir mejorando.

A Elena por su amor, cariño, comprensión y apoyo incondicional.

*A mis amigos de la escuela José Vargas, Fernando Iquira, Thais Aguilar, que nos motivamos
siempre entre nosotros a cumplir con el objetivo que es la realización de nuestras tesis. Mis
mejores deseos y éxitos hacia ustedes*

A la Tuna la Facultad de Medicina Humana de la UCSM, que hizo de mí lo que soy.



AGRADECIMIENTO

*Al ingeniero Victor Rendón Dávila, por su amistad,
enseñanzas de alto nivel, consejos y apoyo incondicional.*

*Al ingeniero Oscar Chávez Vega por sus consejos y
apoyo incondicional.*

*Al Ingeniero Arturo Arroyo por su tiempo y
recomendaciones.*

*Al ingeniero Alain Espinoza Vigil, gran escritor,
profesional y amigo, que con su asesoría se logró cumplir los
objetivos trazados.*

*Al ingeniero Yorel Noriega Aquise por su asesoría y
tiempo brindado.*

*Al ingeniero Joel Ccancapa Puma por su tiempo y
apoyo incondicional.*



RESUMEN

En diversas partes del mundo, los puentes fallan mayormente debido a causas hidrológicas como socavación o desbordamiento de estas infraestructuras, Arequipa no es ajena a esta realidad. Actualmente no se cuenta con una metodología integral que permita determinar la vulnerabilidad hidrológica en un conjunto de puentes de cauce de río. Entonces, se propuso una metodología que pueda evaluar esta vulnerabilidad. Mediante una revisión bibliográfica exhaustiva, se elaboró una matriz de evaluación subdividida en 4 dimensiones: ambiental, técnica, social y económica. Se consideraron un total de 18 parámetros de evaluación distribuidos de la siguiente forma: 4 parámetros ambientales, 6 técnicos, 4 sociales y 4 económicos. Esta matriz fue validada aplicándola a los puentes del cauce del río Chili y también mediante un proceso de codificación de datos de entrevistas semiestructuradas a 6 ingenieros especialistas en la rama de hidrología e hidráulica.

La matriz se aplicó a 08 puentes con antecedentes de problemas hidrológicos del cauce del río Chili. La recolección de datos fue mediante visitas a campo, información periodística, consultas a la población, revisión del estado del arte, videos de comportamiento de caudal de río con los puentes y modelamiento hidráulico en el software HEC-RAS. Para el modelamiento hidráulico, fue necesario realizar un análisis estadístico hidrológico para obtener el caudal de modelamiento. Para este análisis, se consideró que el río es aforado y también la influencia de torrenteras aledañas que descargan caudal adicional en el río e influye directamente aguas abajo a los puentes. El caudal hallado fue validado con videos de un evento de máxima avenida ocurrido el 2012. Aplicando la matriz de evaluación se ordenó los puentes de mayor a menor vulnerabilidad, de tal forma que la priorización para atender estos puentes sigue el siguiente orden: Puente San Martín, Bajo Grau, Grau, Tingo, Bolognesi, Bailey, De fierro y San Isidro, con una puntuación de vulnerabilidad 3.56, 3.25, 3.19, 3.13, 3, 2.94, 2.88 y 2.75, respectivamente. Adicionalmente, se plantearon medidas de optimización estructural para reducir la vulnerabilidad en los puentes estudiados, brindándose recomendaciones generales y específicas a todos los puentes. Se concluye que la metodología planteada es óptima y puede adaptarse para estudios de puentes en otros cauces de río.

Palabras claves:

Vulnerabilidad, hidrología, hidráulica y puentes.

ABSTRACT

In various parts of the world, bridges mostly fail due to hydrological events such as scour or overflowing of these infrastructures. Arequipa is subject to this reality. Currently, there is no methodology available to determine the hydrological vulnerability of a set of riverine bridges. Therefore, a methodology to assess this vulnerability is proposed. Through an exhaustive bibliographic review, an evaluation matrix is proposed, subdivided into 4 dimensions: environmental, technical, social and economic. A total of 18 evaluation parameters were considered, distributed as follows: 4 environmental, 6 technical, 4 social and 4 economic parameters. This matrix was validated by applying it to the bridges of the Chili riverbed and also through a data coding process of semi-structured interviews with 6 engineers specialized in the field of hydrology and hydraulics.

The matrix was applied to 08 bridges with a history of hydrological problems in the Chili riverbed. Data was collected through field visits, journalistic information, consultations with the population, state of the art revision, videos of river flow behavior with the bridges and hydraulic modeling in the HEC-RAS software. For the hydraulic modeling, it was necessary to perform a hydrological statistical analysis to obtain the modeling flow. For this analysis, it was considered that the river is gauged and also the influence of nearby streams that discharge additional flow into the river and directly influence downstream to the bridges. The flow found was validated with videos of a maximum flood event that occurred in 2012. Applying the evaluation matrix, the bridges were ordered from most to least vulnerable, so that the prioritization to address these bridges follows the following order: San Martin Bridge, Bajo Grau, Grau, Tingo, Bolognesi, Bailey, De fierro and San Isidro, with a vulnerability score 3.56, 3.25, 3.19, 3.13, 3, 2.94, 2.88 and 2.75, respectively. In addition, structural optimization measures were proposed to reduce vulnerability in the bridges studied, providing general and specific recommendations for all bridges. It is concluded that the proposed methodology is optimal, and it can be adapted for bridge studies in other riverbeds.

Key words:

Vulnerability, hydrology, hydraulic and bridges.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1.	Problemática de la investigación	2
1.2.	Justificación de la investigación	5
1.3.	Objetivos de la investigación.....	5
1.3.1.	Objetivo general	5
1.3.2.	Objetivos específicos.....	5
1.4.	Hipótesis	6
1.5.	Cuadro de consistencia	6
1.6.	Alcances.....	7
1.7.	Limitaciones.....	7

CAPÍTULO II

2.	FUNDAMENTO TEÓRICO.....	10
2.1.	Antecedentes de la investigación	10
2.2.	Marco legal	13
2.3.	Marco teórico	14
2.3.1.	Puente	14
2.3.2.	Clasificación de puentes	14
2.3.3.	Vulnerabilidad	15

CAPÍTULO III

3.	METODOLOGÍA	18
3.1.	Tipo y nivel de investigación	18
3.2.	Diseño de investigación	18
3.3.	Métodos de investigación	18
3.3.1.	Área de estudio	19

3.3.2. Recolección de datos	20
3.3.3. Procesamiento de la información	20

CAPÍTULO IV

4. CONSIDERACIONES SOBRE LA VULNERABILIDAD HIDROLÓGICA.	24
4.1. Amenazas hidrológicas	24
4.1.1. Clasificación de Desastres Climáticos.....	24
4.1.2. Desastres climáticos de rápido desarrollo	24
4.2. Evaluación de vulnerabilidad hidrológica	25
4.2.1. Parámetros Ambientales	28
4.2.2. Parámetros Técnicos.....	29
4.2.3. Parámetros Sociales	29
4.2.4. Parámetros Económicos	29
4.2.5. Matriz de evaluación de vulnerabilidad hidrológica	29
4.3. Fundamento de variables de matriz de evaluación	33
4.3.1. Vulnerabilidad Ambiental	33
4.3.2. Vulnerabilidad Técnica.....	34
4.3.3. Vulnerabilidad Social	38
4.3.4. Vulnerabilidad Económica	41
4.4. Validación de Matriz de Evaluación.....	42
4.4.1. Proceso de codificación	43
4.4.2. Análisis de la validación.....	45
4.5. Medidas de reducción de la vulnerabilidad	45
4.5.1. Medidas de emergencia en inundaciones	46

CAPÍTULO V

5. ASPECTOS HIDROLÓGICOS	48
5.1. Introducción	48
5.2. Caudales del río Chili.....	48
5.3. Análisis estadístico de caudales	50
5.3.1. Periodo de retorno de la avenida de diseño	53
5.3.2. Caudal de río Chili.....	54

5.3.3. Modelamiento en HEC-HMS	57
5.3.4. Caudal de Modelamiento para HEC-RAS.....	59

CAPÍTULO VI

6. ASPECTOS HIDRAÚLICOS.....	62
6.1. Introducción	62
6.2. Recomendaciones del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.....	62
6.3. Datos para modelamiento hidráulico	62
6.3.1. Levantamiento Topográfico de cauce.....	62
6.3.2. Coeficientes de rugosidad en el tramo de estudio	63
6.3.3. Datos de puentes para modelamiento	67
6.4. Modelamiento en HEC-RAS	71
6.5. Resultados de HEC RAS	72

CAPÍTULO VII

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS	76
7.1. Evaluación de los puentes en estudio.....	76
7.1.1. Parámetros comunes en todos los puentes.....	77
7.1.2. Puente 01 – Grau	78
7.1.3. Puente 02 - Bajo Grau	83
7.1.4. Puente 03 – Bolognesi	90
7.1.5. Puente 04 - San Martín	95
7.1.6. Puente 05 - De Fierro.....	101
7.1.7. Puente 06 - San Isidro.....	105
7.1.8. Puente 07 – Tingo.....	110
7.1.9. Puente 08 – Bailey.....	114
7.2. Matriz de evaluación final	119
7.3. Comparativa.....	120
7.4. Propuestas de optimización.....	121

CAPÍTULO VIII

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	124
8.1. Conclusiones	124
8.2. Discusión.....	126

8.3. Recomendaciones y futuras líneas de investigación..... 126

REFERENCIAS

ANEXOS



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cuadro de consistencia.....	6
Tabla 2. Alcance de la investigación: identificación y clasificación de puentes por distrito.....	7
Tabla 3. Parámetros para hallar un factor por vulnerabilidad.....	11
Tabla 4. Matriz de evaluación de vulnerabilidad hidrológica.....	12
Tabla 5. Análisis de variables independientes y dependientes.....	18
Tabla 6. Coordenadas de puentes en estudio.....	19
Tabla 7. Bibliografía considerada para la elaboración de matriz de evaluación.....	27
Tabla 8. Matriz de evaluación de vulnerabilidad propuesta.....	30
Tabla 9. Parámetros de evaluación de vulnerabilidad ambiental por INDECI.....	33
Tabla 10. Parámetros de evaluación de vulnerabilidad física por INDECI.....	35
Tabla 11. Parámetro de estado de conservación de la edificación de CENEPRED.....	36
Tabla 12. Comparación en altura de gálibo según normativas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.....	37
Tabla 13. Parámetros de evaluación de vulnerabilidad económica por INDECI.....	38
Tabla 14. Parámetros de evaluación de vulnerabilidad educativa por INDECI.....	39
Tabla 15. Parámetro de capacitación en temas de riesgo del CENEPRED.....	39
Tabla 16. Localización de la edificación en exposición económica por CENEPRED.....	40
Tabla 17. Parámetro de material de construcción de edificación de CENEPRED.....	41
Tabla 18. Parámetro de antigüedad de construcción de edificación de CENEPRED.....	41
Tabla 19. Preguntas de entrevista semiestructurada para validar matriz de evaluación en puentes.....	43
Tabla 20. Codificación de entrevistas sobre matriz de evaluación.....	43
Tabla 21. Codificación de entrevistas sobre aplicación de matriz en municipios u otras entidades.....	44
Tabla 22. Caudales máximos anuales del río Chili.....	48
Tabla 23. Parámetros estadísticos de datos históricos.....	50
Tabla 24. Prueba de datos dudosos por el Método Water Resources Council.....	52
Tabla 25. Delta teórico para tipos de distribución del Manual de Hidrología del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018).....	52
Tabla 26. Cuadro de riesgos en porcentaje.....	53
Tabla 27. Periodo de retorno en función de riesgo y vida útil.....	54

Tabla 28. Caudales en función de datos históricos	54
Tabla 29. Caudal de modelamiento para HEC-RAS según su periodo de retorno	59
Tabla 30. Coeficientes de rugosidad para modelamiento	64
Tabla 31. Progresiva de cada puente a modelar	67
Tabla 32. Ancho y largo de los puentes en estudio	67
Tabla 33. Progresivas de secciones 3 y 2 de puentes	68
Tabla 34. Radio de contracción	69
Tabla 35. Cálculo de RC de cada puente	69
Tabla 36. Radio de expansión	69
Tabla 37. Cálculo de RE de cada puente	70
Tabla 38. Longitud de expansión y contracción de cada puente	70
Tabla 39. Progresivas de secciones típicas de cada puente	70
Tabla 40. Métodos de cálculo para cada puente en HEC RAS	71
Tabla 41. Método de recolección de datos para la cuenca del río Chili	76
Tabla 42. Evaluación de parámetros comunes en los puentes en estudio	77
Tabla 43. Evaluación de Puente 01 - Grau	78
Tabla 44. Evaluación de Puente 02 – Bajo Grau	83
Tabla 45. Evaluación de Puente 03 - Bolognesi	90
Tabla 46. Evaluación de Puente 04 – San Martín	95
Tabla 47. Evaluación de Puente 05 – De Fierro	101
Tabla 48. Evaluación de Puente 06 – San Isidro	105
Tabla 49. Evaluación de Puente 07 – Tingo	110
Tabla 50. Evaluación de Puente 08 – Bailey	114
Tabla 51. Puntuación final de vulnerabilidad de los puentes de estudio	119
Tabla 52. Resumen de puntuación final de puentes y priorización	120
Tabla 53. Recomendaciones de optimización estructural para cada puente	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Puentes en Arequipa: Incremento de caudal del río Chili	3
Figura 2. Resumen ejecutivo histórico al 100% de la temporada de lluvias 2016-2017	4
Figura 3. Área de estudio: Puentes del cauce de río Chili.....	19
Figura 4. Metodología de la investigación	21
Figura 5. Pasos para la elaboración de los parámetros de evaluación de la matriz.....	26
Figura 6. Tipos de vulnerabilidad de parámetros de matriz de evaluación.....	28
Figura 7. Procedimiento de validación de matriz por juicio expertos mediante entrevista semiestructurada.....	43
Figura 8. Valores Kn para la prueba de datos dudosos	51
Figura 9. Variación de caudal considerando distintos periodos de retorno	55
Figura 10. Metodología para sumar Hidrogramas en Colectores Consecutivos	56
Figura 11. Quebradas consideradas para el caudal de modelamiento HEC-HMS.....	56
Figura 12. Quebradas consideradas para el caudal de modelamiento.....	57
Figura 13. Hidrogramas aguas abajo en HEC-HMS para periodos de 100, 200 y 500 años.....	58
Figura 14. Modelo de distribución de caudales para cada puente.....	59
Figura 15. Topografía para modelamiento de tramo de estudio en formato TIFF.....	63
Figura 16. Ubicación de sección transversal de un puente en HEC RAS	68
Figura 17. Pendiente aguas arriba y abajo en HEC RAS	71
Figura 18. Caudales de modelamiento en HEC RAS.....	71
Figura 19. Régimen de flujo para HEC RAS	72
Figura 20. Resultados de HEC RAS	72
Figura 21. Vista 3D de Modelamiento Hidráulico Puentes 01, 02 y 03	73
Figura 22. Vista 3D de Modelamiento Hidráulico Puente 04	73
Figura 23. Vista 3D de Modelamiento Hidráulico Puente 06	74
Figura 24. Vista 3D de Modelamiento Hidráulico Puente 07	74
Figura 25. Vista 3D de Modelamiento Hidráulico Puente 08	74
Figura 26. Contaminación en Puente 01	79
Figura 27. Residuos que interrumpen el flujo en Puente 01	80
Figura 28. Estado de conservación del Puente 01	80
Figura 29. Protección contra el flujo en pilares y estribos Puente 01	81
Figura 30. Erosión en la base de tablero en Puente 01	81

Figura 31. Altura de Gálibo de Puente 01	82
Figura 32. Situación de pobreza o desarrollo humano de Puente 01	82
Figura 33. Proximidad a centros poblados de Puente 01	83
Figura 34. Contaminación en Puente 02	85
Figura 35. Residuos que interrumpen el flujo en Puente 02	85
Figura 36. Estado de conservación del Puente 02	86
Figura 37. Protección contra el flujo en pilares y estribos en Puente 02	86
Figura 38. Erosión en la base de tablero en Puente 02.....	87
Figura 39. Impacto de flujo en Puente 02 visto desde aguas arriba	87
Figura 40. Impacto de flujo en Puente 02 visto desde aguas abajo.....	88
Figura 41. Altura de Gálibo de Puente 02	88
Figura 42. Situación de pobreza o desarrollo humano de Puente 02	89
Figura 43. Proximidad a centros poblados de Puente 02	89
Figura 44. Contaminación en Puente 03	91
Figura 45. Residuos que interrumpen el flujo en Puente 03	92
Figura 46. Estado de conservación del Puente 03	92
Figura 47. Protección contra el flujo en pilares y estribos en Puente 03	93
Figura 48. Impacto de flujo en Puente 03	93
Figura 49. Altura de Gálibo de Puente 03	94
Figura 50. Situación de pobreza o desarrollo humano de Puente 03	94
Figura 51. Proximidad a centros poblados de Puente 03	95
Figura 52. Contaminación en Puente 04	97
Figura 53. Estado de conservación del Puente 04	97
Figura 54. Protección contra el flujo en pilares y estribos en Puente 04	98
Figura 55. Impacto de flujo en Puente 04	98
Figura 56. Altura de Gálibo de Puente 04	99
Figura 57. Situación de pobreza o desarrollo humano de Puente 04	99
Figura 58. Proximidad a centros poblados de Puente 04	100
Figura 59. Importancia de Puente 04	100
Figura 60. Contaminación en Puente 05	102
Figura 61. Estado de conservación del Puente 05	103
Figura 62. Protección contra el flujo en pilares y estribos en Puente 05	103
Figura 63. Situación de pobreza o desarrollo humano de Puente 05	104
Figura 64. Proximidad a centros poblados de Puente 05	104

Figura 65. Importancia de Puente 05	105
Figura 66. Contaminación en Puente 06	107
Figura 67. Residuos que interrumpen el flujo de río del Puente 06	107
Figura 68. Estado de conservación del Puente 06	108
Figura 69. Altura de Gálibo de Puente 06	108
Figura 70. Situación de pobreza o desarrollo humano de Puente 06	109
Figura 71. Proximidad a centros poblados de Puente 06	109
Figura 72. Material de Puente 07	111
Figura 73. Estado de conservación del Puente 07	112
Figura 74. Erosión de tablero en Puente 07	112
Figura 75. Altura de Gálibo de Puente 07	113
Figura 76. Situación de pobreza o desarrollo humano de Puente 07	113
Figura 77. Proximidad a centros poblados de Puente 07	114
Figura 78. Material de Puente 08	116
Figura 79. Estado de conservación del Puente 08	116
Figura 80. Protección contra el flujo en pilares y estribos de Puente 08	117
Figura 81. Impacto de flujo en Puente 08	117
Figura 82. Atura de Gálibo de Puente 08	118
Figura 83. Situación de pobreza o desarrollo humano de Puente 08	118
Figura 84. Proximidad a centros poblados de Puente 08	119
Figura 85. Priorización de puentes y puntuación final	121

INTRODUCCIÓN

Los puentes son infraestructuras muy importantes ya que aportan al desarrollo en diversos ámbitos a la población. En los últimos años, las tormentas son más frecuentes e intensas, debido al cambio climático e impermeabilización de los suelos que provoca que muchos puentes alrededor del mundo fallen. No se cuenta con una metodología que evalúe la vulnerabilidad de los puentes en determinado cauce de río y no se tiene conocimiento sobre cuáles puentes son más vulnerables hidrológicamente en el cauce de río Chili. En ese sentido, la presente investigación tiene la finalidad de cerrar esta brecha del conocimiento y plantear una metodología que puede ser replicada o transferible a otros cauces a través del estudio del caso del cauce del río Chili en la ciudad de Arequipa. Para este propósito, en los presentes capítulos se muestra, un análisis del estado del arte para proponer una matriz que permita hallar la vulnerabilidad de un grupo de puentes. Se muestra el proceso de codificación de datos de entrevistas semiestructuradas a expertos en hidrología e hidráulica, para validar la matriz propuesta. Un análisis estadístico hidrológico de los caudales del río en estudio, para obtener un caudal de modelamiento adecuado. Se muestra también, el procedimiento para el modelado de puentes en el software HEC-RAS, para hallar los NAME de cada puente. Adicional a esto, se recolecta los datos necesarios para aplicar la matriz de evaluación en los puentes estudiados para obtener la priorización respecto a la vulnerabilidad de los puentes. Por último, se brinda recomendaciones de forma general y específica a cada puente para reducir su vulnerabilidad.



CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Problemática de la investigación

Los puentes son importantes por su calidad de conexión entre poblaciones, alto costo de inversión y su función de crear rutas alternativas de transporte. Particularmente los puentes sobre cauces de río incluyen una mayor complejidad en el diseño, mantenimiento y gestión de su infraestructura, ya que se le agrega la variable del flujo del río. Los fenómenos naturales son una amenaza para la seguridad y capacidad de servicio de la red. Cualquier interrupción del funcionamiento de un puente genera lentitud en la conexión y comunicación con las poblaciones vecinas, produciendo grandes pérdidas económicas. Los impactos de las inundaciones han ido en aumento en los últimos años, debido a la urbanización que impermeabiliza el suelo de áreas próximas al cauce y cambio climático. Los eventos de lluvia que producen inundaciones son cada vez más frecuentes e intensos, provocando fallas en puentes de todo el mundo (Pregnotato et al., 2022).

No se cuenta con una metodología para determinar la vulnerabilidad de los puentes en una determinada cuenca. En ese sentido, la presente investigación tiene la finalidad de cerrar esta brecha del conocimiento y plantear una metodología que puede ser replicada o transferible a otros cauces a través del estudio del caso del cauce del río Chili en la ciudad de Arequipa. No se tiene conocimiento sobre cuales puentes son más vulnerables hidrológicamente en el cauce de río Chili para priorizar la inversión en su reforzamiento y/o rediseño. Entonces, surge la pregunta de investigación de la presente tesis: ¿Qué comprende una metodología óptima para evaluar puentes sobre cauces de río, específicamente en el río Chili?

Los factores que contribuyen al planteamiento del problema son:

- La restricción al paso vehicular en los puentes San Martín y Bajo Grau el año 2012 y 2011, debido al incremento del caudal del río Chili en temporada de lluvias (Méndez, 2012) (RPP Noticias, 2011).
- El puente Grau presenta rajaduras y desprendimientos en sus cimientos de sillar. El lado izquierdo del puente San Isidro se está hundiendo y el puente De Fierro, presenta problemas en una de sus bases de sillar (El Búho, 2012).
- Los puentes Grau y Bolognesi son puentes en funcionamiento desde la época colonial (Méndez, 2012), a los cuales se les debe someter a un estudio de vulnerabilidad hidrológica por su antigüedad e importancia.

- El puente Tingo fue cerrado al tránsito vehicular como medida de prevención frente a la crecida del río por las intensas lluvias en el 2020 y 2011 (El Búho -a, 2020) (Méndez, 2011) (RPP Noticias, 2011).
- El puente De Fierro fue restringido al tránsito vehicular en el 2019 por aumento de caudal del río Chili (Exitosa, 2019).
- Así mismo en el puente Bailey, que inicialmente fue un puente temporal que une los distritos de Hunter y Tiabaya, en temporada de lluvias se produce inundaciones de chacras en zonas aledañas, afectando a vecinos y agricultores. La Autoridad Nacional del Agua (en adelante ANA), recomendó el retiro del puente (Diario Sin Fronteras, 2021). Actualmente esta infraestructura fue reabierto al paso vehicular para descongestionar el tráfico de la avenida Arancota (Cruz, 2022).

En la Figura 1 se muestran tres (3) puentes en estudio.

Figura 1.

Puentes en Arequipa: Incremento de caudal del río Chili

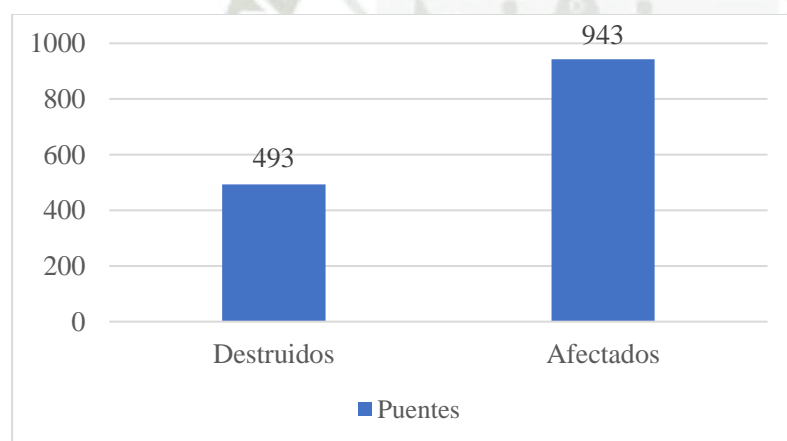


Nota: Andina (2019); El Búho – b (2020) y Captura de televisión, Canal N (2019).

Según Smith (1976) quien realizó una estadística de las fallas en 143 puentes en todo el mundo, el 49 % de las fallas en puentes son producidas por el tránsito de avenidas (inundaciones y movimiento de cimientos). En la Figura 2, se observa el resumen de daños de los puentes en el Perú, en la temporada de lluvia 2016-2017, según el Instituto de Defensa Civil (en adelante INDECI) siendo esta información alarmante. Los puentes que cruzan el río Chili no son ajenos a las estadísticas mencionadas, debido a que las represas de la ciudad de Arequipa han reducido su capacidad de almacenamiento por la falta de mantenimiento adecuado en la acumulación de sedimentos; en temporada de lluvias si estas se llenan, tienden a abrir sus compuertas y el agua excedente va al río Chili sobrecargándolo. Esta consecuencia genera vulnerabilidad en los puentes de la ciudad, debido a que el aumento de caudal produce mayor riesgo a este tipo de infraestructura, son en esas circunstancias donde se evalúa la restricción al tránsito vehicular en algunos puentes por el temor a que la crecida del agua origine daños a los usuarios y vecinos o su propio colapso.

Figura 2.

Resumen ejecutivo histórico al 100% de la temporada de lluvias 2016-2017



Nota: Comprende puentes peatonales y vehiculares. Adaptado de Instituto Nacional de Defensa Civil (2018).

1.2. Justificación de la investigación

Al tener la ciudad de Arequipa, el río Chili y quebradas, la hace poseedora de una geografía compleja. Si bien los estudios hidrológicos e hidráulicos se basan en probabilidades de ocurrencia de eventos, parámetros de estudio importantes como el cambio climático, la capacidad actual de represas y el coeficiente de permeabilidad en zonas aledañas por acción humana son dejados de lado. Esto ocasiona a largo plazo, en infraestructuras importantes como los puentes, que fallen por las mismas ocurrencias hidráulicas por ejemplo al descuidar la altura de gálibo, los puentes se hacen vulnerables ante crecidas importantes de agua.

Además, en la ciudad, pocos esfuerzos se hacen para reducir la vulnerabilidad de los puentes ante fenómenos hidrológicos, este es el caso de los puentes: Tingo, San Martín y Bajo Grau, que, por su condición de vulnerable ante la crecida de caudal, se ha planeado en cerrar su uso al público varias veces en temporadas de lluvias. La población que transita por allí debe tener la seguridad de que los puentes estén en un buen estado y no sean un peligro para ellos. De esta manera se garantiza que los puentes de la ciudad cumplan con las normas de diseño aun cuando sea necesario una inversión para reducir su vulnerabilidad.

El cierre de un puente en la ciudad de Arequipa generaría cuantiosas pérdidas económicas debido a los pocos puentes que conectan ambas partes de la ciudad, además del caos en el tráfico vehicular. Para evitar estos escenarios es necesario un análisis de vulnerabilidad hidrológica en los puentes que cruzan el río Chili.

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. *Objetivo general*

Proponer una metodología para evaluar puentes sobre cauces de río a través del caso de estudio del río Chili en la ciudad de Arequipa.

1.3.2. *Objetivos específicos*

- Elaborar una matriz de evaluación de vulnerabilidad hidrológica en puentes sobre cauce de río.
- Determinar la vulnerabilidad hidrológica de los puentes en estudio, a través de un análisis de distintos escenarios de ocurrencia basado en el modelamiento hidrológico y cálculo hidráulico.
- Realizar una comparativa y determinar la priorización de rediseño o reconstrucción de los puentes más vulnerables.
- Plantear medidas de optimización estructural.

1.4. Hipótesis

Mediante el estudio de los puentes sobre la cuenca del río Chili, se puede elaborar una matriz óptima de evaluación de vulnerabilidad hidrológica en puentes sobre cauce de río.

1.5. Cuadro de consistencia

En la Tabla 1 se muestra el cuadro de consistencia donde se indica los problemas identificados, objetivos e hipótesis.

Tabla 1.

Cuadro de consistencia

Problema general	Objetivo general	Hipótesis general
¿Qué comprende una metodología óptima para evaluar puentes sobre cauce de río, específicamente en el río Chili?	Proponer una metodología para evaluar puentes sobre cauces de río, a través del caso de estudio del río Chili en la ciudad de Arequipa.	Mediante el estudio de los puentes sobre la cuenca del río Chili, se puede determinar una metodología para evaluar puentes sobre cauce de río.
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas
¿Qué parámetros debería tener una matriz de evaluación de vulnerabilidad hidrológica en puentes, sobre cauce de río?	Elaborar una matriz de evaluación de vulnerabilidad hidrológica en puentes sobre cauce de río.	Mediante el estudio de los puentes sobre la cuenca del río Chili, se puede elaborar una matriz óptima de evaluación de vulnerabilidad hidrológica en puentes sobre cauce de río.
¿Cuál es la vulnerabilidad hidrológica de los puentes que cruzan el río chili?	Determinar la vulnerabilidad hidrológica de los puentes en estudio, a través de un análisis de distintos escenarios de ocurrencia basado en el modelamiento hidrológico y cálculo hidráulico.	Mediante modelamientos, se podrán obtener las vulnerabilidades hidrológicas de cada puente en estudio.
¿Cuáles son los puentes más vulnerables que cruzan el río Chili y cuales se deben priorizar para invertir en su rediseño o reconstrucción?	Realizar una comparativa y determinar la priorización de rediseño o reconstrucción de los puentes más vulnerables.	Luego de una comparación en la vulnerabilidad hidrológica de los puentes que cruzan el río Chili, se podrá identificar los más vulnerables y por ende su priorización para un futuro rediseño.
Con los resultados obtenidos. ¿qué medidas de optimización se pueden plantear?	Plantear medidas de optimización estructural.	Los resultados obtenidos permitirán plantear medidas de optimización, por ejemplo, luego del modelamiento se podrá obtener el gálibo adecuado que debería tener cada puente.

Nota: Elaboración propia.

1.6. Alcances

El alcance del presente trabajo de investigación es el análisis de vulnerabilidad hidrológica de ocho (08) puentes que cruzan el río Chili. Para realizar el modelamiento tanto hidráulico e hidrológico de cada puente se utilizará el programa HEC-RAS. Se considerarán también los caudales de torrenteras aledañas que descargan en el río Chili.

En la Tabla 2 se muestran los motivos por los cuales se escogieron los puentes a estudiar.

Tabla 2.

Alcance de la investigación: identificación y clasificación de puentes por distrito

Ítem	Puente	Distritos	Observación
P01	Grau	Yanahuara - Cercado	Puente en funcionamiento desde época colonial (Méndez, 2012). Presenta rajaduras y desprendimientos en su base de sillar (El Búho, 2012).
P02	Bajo Grau	Yanahuara - Cercado	Restringido al tránsito vehicular por lluvias en el 2012 y 2011 (Méndez, 2012) (RPP Noticias, 2011).
P03	Bolognesi	Yanahuara Cercado	Las fuertes lluvias debilitaron su estructura (La República, 2019). Puente en funcionamiento desde época colonial (Méndez, 2012).
P04	San Martín	Umacollo, Yanahuara y Cercado	Restringido al tránsito vehicular por lluvias en el 2012 y 2011 (Méndez, 2012) (RPP Noticias, 2011).
P05	De Fierro	Sachaca	Restringido al tránsito vehicular por lluvias en el 2019 (Exitosa, 2019). Presenta problemas en una de sus bases de sillar (El Búho, 2012).
P06	San Isidro	Sachaca, Socabaya y José Luis Bustamante y Rivero.	El lado izquierdo del puente se está hundiendo (El Búho, 2012).
P07	Tingo	Tiabaya, Uchumayo, Hunter y Sachaca	Restringido al tránsito vehicular por lluvias en el 2020 y 2011 (El Búho - a, 2020) (Méndez, 2011) (RPP Noticias, 2011).
P08	Bailey	Hunter - Tiabaya	Inundaciones en zonas aledañas al puente, la Autoridad Nacional del Agua reiteró su retiro (Diario Sin Fronteras, 2021). Fue reabierto al paso vehicular (Cruz, 2022).

Nota: Elaboración propia.

1.7. Limitaciones

Dentro de las limitaciones, se tiene que la información disponible de los datos históricos de caudales en el río Chili es limitada, lo idóneo sería contar con un amplio registro de datos para poder realizar una adecuada estadística, además es necesario conseguir los planos de los puentes en estudio, si es que la información no está disponible se debe realizar un levantamiento de los puentes y sus cauces.

Como limitación, también está la dificultad de conseguir la profundidad de los estribos y pilares en la mayoría de los puentes, lo que dificulta el estudio de socavación. Si no se consiguen los datos para realizar el estudio de socavación en todos los puentes, esto desproporcionaría la evaluación metodológica, por este motivo sólo se plantea considerar en socavación, si estos están protegidos contra el flujo.





FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Estudios previos que plantean metodologías para analizar puentes incluyen:

El método de Bhatkoti et al. (2016) estudia los cambios en el riesgo de inundaciones de puentes debido al cambio climático; mencionan que un puente es diseñado para resistir una inundación de cierto periodo de retorno, sin embargo si este enfrenta un evento más grande puede fallar. El cambio climático puede afectar en la frecuencia de una inundación por lo cual se utilizaron varios modelos para determinar su influencia, en los resultados mencionan que todos los puentes son vulnerables al cambio climático y además que su magnitud depende del modelo de proyección usado. Los resultados muestran también que los aumentos de áreas impermeables aguas arriba del cruce del puente, aumentan la posibilidad de falla del mismo, siendo este un parámetro a considerar en la matriz de evaluación de vulnerabilidad propuesta. Si se mantiene constantes todas las consideraciones de la cuenca, el aumento de área impermeable reduce el margen de seguridad del francobordo que se le dio inicialmente.

El método de Bento et al. (2020), en el cual se formula una metodología para hallar el riesgo por socavación en cimentaciones de puentes. Uno de los factores que considera es la vulnerabilidad hidrológica, en el cual escoge algunos parámetros que pueden aumentar o reducir la probabilidad de falla, estos se muestran en la Tabla 3. Los parámetros consideran el tipo de cimentación, el material donde está apoyado las cimentaciones, historia de problemas de socavación, tipo de río, y la importancia del puente según el tráfico que transita por este.

Tabla 3.

Parámetros para hallar un factor por vulnerabilidad

Factor por tipo de cimentación	
Zapatas	1.00
Pilotes	0.75
Factor de problemas históricos por socavación	
Historia de problemas de socavación	1.50
Sin antecedentes de problemas de socavación	1.00
Factor de material de cimientos	
No hay información del material o es granular (limos, arenas, gravas, etc.)	1.00
Alguna evidencia de que el puente esta fundado en arcilla	0.75
Evidencia solida de que el puente este cimentado sobre arcilla o que existe una posibilidad de roca bajo los cimientos	0.50
Factor por el tipo de río	
Terreno montañoso	1.50
Terreno de montaña	1.30
Terreno montañoso bajo	1.20
Terreno de tierras bajas o estuario	1.00
Factor de importancia	
12-h flujo de tráfico: ≥ 30000	1.00
12-h flujo de tráfico: 10000-29999	0.90
12-h flujo de tráfico: 1000-9999	0.80
12-h flujo de tráfico: ≤ 1000	0.70

Nota: Bento et al. (2020).

El método propuesto por Liu et al. (2021), para evaluar el riesgo de inundación en áreas urbanas del sur de Taiwán, propone unos parámetros para evaluar la vulnerabilidad social del área de estudio entre los cuales son edad de las personas que viven en la zona de estudio, si son ancianos o niños, grado de instrucción de los ciudadanos(superior, secundaria o analfabetos), la economía de la población y si hay refugios, hospitales, equipamientos de seguridad en la zona. Además, para medir el grado de vulnerabilidad utiliza rangos entre extremadamente bajo, bajo, medio, alto y extremadamente alto.

El método propuesto por Espinoza & Booker (2022), en el cual para hallar la vulnerabilidad hidrológica en el puente Bajo Grau, considera entre sus parámetros de evaluación: la temperatura en relación al cambio climático, calidad del agua, materiales de construcción del puente, cuan cerca está a un poblado, la altura de gálibo en crecidas, si sus cimientos están protegidos contra la socavación, estado de erosión del tablero, si son inundados, y si cumple con la normativa vigente. La matriz de evaluación de puentes propuesta por Espinoza se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4.

Matriz de evaluación de vulnerabilidad hidrológica

Variable	Bajo < 25%	Medio 26 a 50%	Alto 51 a 75%	Muy alto 76 a 100%
Parámetros de Vulnerabilidad Ambiental (VA)				
Cambio climático - niveles de temperatura	Niveles promedio	Niveles ligeramente más altos que el promedio	Niveles más altos que el promedio	Niveles muchos más altos que el promedio
Composición y calidad del agua	Bajos niveles de contaminación	Medios niveles de contaminación	Altos niveles de contaminación	Muy altos niveles de contaminación.
Parámetros de Vulnerabilidad Física (VF)				
Materiales usados en la construcción	Concreto, acero o materiales de similar resistencia en buen estado	Concreto, acero o materiales de similar resistencia en un estado regular	Madera o adobe, sin refuerzo estructural en un mal estado	Adobe, caña y materiales de menor resistencia en estado precario
Proximidad a centros poblados	Lejos, > 5 Km.	Moderadamente cerca, 1 – 5 Km	Cerca, 0.2 – 1 Km	Muy cerca, 0.2 – 0 Km
Calidad del suelo en el cauce	Buenas condiciones, sin obstrucciones y/o variabilidad	Condiciones regulares, sin muchas obstrucciones y/o gran variabilidad	Malas condiciones, con obstrucciones y variabilidad	Muy malas condiciones, con obstrucciones y gran variabilidad
Características geométricas – altura del puente	La altura permite al agua fluir sin inconveniencia. Tiene más de 2 metros de varianza entre la superficie de agua y base de tablero	La altura permite al agua fluir sin inconvenientes. Tiene menos de 2 metros de varianza entre la superficie del agua y la base de tablero	La altura no permite al agua fluir con normalidad. El nivel de agua llega a la base de tablero	La altura no permite al agua fluir con normalidad. Los niveles de agua supera el tablero.
Erosión en la base de tablero	El tablero no es alcanzado por el flujo de agua	El tablero es alcanzado en la parte inferior por el agua, causando erosión	El tablero es alcanzado en un área más grande por el flujo de agua, causando más erosión.	Todo el tablero es alcanzado por el flujo de agua, eso produce erosión en la parte superior también.
Socavación en la cimentación	Los pilares son protegidos contra el flujo	Los pilares son moderadamente protegidos contra el flujo	Los pilares están pobremente protegidos contra el flujo	Los pilares están desprotegidos contra el flujo
Desbordamiento e inundación	El flujo no excede la altura de cubierta y no desborda	El caudal alcanza la altura de la plataforma y no desborda	El flujo alcanza la plataforma y desborda	El flujo excede la altura de plataforma, causando desbordamiento e inundaciones
Normativas vigentes	Cumple estrictamente la norma	Cumple moderadamente la norma	Bajo cumplimiento de la norma	No cumple la norma

Nota: Espinoza & Booker (2022).

Estos métodos son pertinentes para esta investigación, porque si bien consideran parámetros propios para hallar la vulnerabilidad hidrológica en puentes, no tienen en común ninguno. Lo cual motiva a seguir investigando y con parámetros adicionales, proponer una metodología para evaluación de puentes de cauce de río.

Se han realizado estudios sobre el cauce de río Chili y su riesgo de inundación, así como en la tesis de grado de Concha & Miranda (2016) titulada “Análisis del riesgo de inundación de la cuenca del río Chili en el tramo de Chilina a Uchumayo – Arequipa”, investigación que se toma como un antecedente porque se realiza un estudio preliminar de como interactúa el caudal del río con los puentes, más no profundiza en la vulnerabilidad de estos. Realizan un manual básico para modelar puentes en HEC-RAS. Para los datos necesarios de su modelamiento, utilizan la topografía de un estudio realizado por el ANA en el 2015, y además para abarcar las llanuras de inundación se utilizó adicionalmente la topografía de las cartas nacionales.

Ettinger et al. (2016) estudia los daños que causó la precipitación de febrero de 2013 en la ciudad de Arequipa, Perú; se estudia la vulnerabilidad de los edificios a amenazas hidromorfológicas como fue la inundación a lo largo del canal de la Avenida Venezuela en dicho evento. Entre los parámetros que usaron para determinar la vulnerabilidad, fueron si el edificio presentó inundación (rangos de altura), daños observados (alta, significativa, suave, sin daños) y la impermeabilidad de suelo (permeable o impermeable). Si bien estos parámetros son para determinar la vulnerabilidad de los edificios a inundación, se pueden adaptar para hallar la vulnerabilidad en puentes.

Espinoza (2019), en su tesis de grado titulada “Análisis de la vulnerabilidad hidrológica del puente Bajo Grau en la ciudad de Arequipa”, para lograr su objetivo principal que es hallar la vulnerabilidad hidrológica del puente en mención, se ve en la necesidad de formular diez (10) parámetros para dicha evaluación. Siendo este antecedente, pilar fundamental donde se apoya la presente tesis para profundizar y cerrar la brecha de conocimiento proponiendo una metodología de evaluación de puentes de cauce de río, que se pueda aplicar a diversos cauces en el Perú y en todo el mundo.

2.2. Marco legal

- Manual Básico para la Estimación del Riesgo - Instituto Nacional de Defensa Civil (2006), donde se tomarán los parámetros para elaborar la matriz de evaluación de vulnerabilidad hidrológica de puentes sobre cauce de río, porque nos da el punto de partida en vulnerabilidad ambiental y vulnerabilidad física de la estructura, que nos servirán para los objetivos planteados.

- Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje - Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008) para un adecuado manejo estadístico de datos de los caudales del río Chili, es necesario seguir las recomendaciones del manual citado, en el cual tenemos las fórmulas empíricas y teóricas, que nos ayudarán a obtener caudales para la modelación.
- Manual para la Evaluación de Riesgos originados por Fenómenos Naturales 02 Versión - Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción de Riesgo de Desastres (2014) para obtener el riesgo por fenómenos naturales se tomará como texto de consulta para obtener algunos parámetros en la elaboración de la matriz de evaluación de vulnerabilidad de la presente tesis.
- Manual de Puentes - Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018), donde se tomará la normativa vigente en relación con puentes, con el fin de obtener las recomendaciones de este manual para que la infraestructura tenga un adecuado funcionamiento y seguridad, si no se cumple con el reglamento se mencionara las recomendaciones pertinentes.

2.3. Marco teórico

2.3.1. Puente

La definición de puente según el Manual de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones _ b (2018), es:

Estructura requerida para atravesar un accidente geográfico o un obstáculo natural o artificial, cuya luz libre es mayor o igual a 6.00 m (20 ft) y forma parte o constituyen un tramo de una carretera o está localizado sobre o por debajo de ella. (p. 41)

2.3.2. Clasificación de puentes

Según el Manual de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones _ b (2018), nos dan las siguientes pautas para la clasificación de un puente.

2.3.2.1. Según la naturaleza de la vía soportada

“Se distinguen puentes para carretera, para ferrocarril, para trenes eléctricos de pasajeros, para acueductos, puentes para peatones y los puentes para aviones que existen en los aeropuertos; también existen puentes de uso múltiple” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones _ b, 2018, p. 58).

2.3.2.2. Según el material

“Existen puentes de piedra, madera, sogas, hierro, acero, concreto armado, concreto preesforzado, y últimamente de materiales compuestos (fibras de vidrio, fibras de carbón, etc.). La clasificación se hace considerando el material constitutivo de los elementos portantes principales” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones _ b, 2018, p. 58).

2.3.2.3. Según el sistema estructural principal

Según el Manual de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones _ b (2018), los puentes se clasifican en tres (03) grandes categorías:

- Puentes tipo viga (los puentes losa se clasifican dentro de esta categoría a pesar de tener un comportamiento diferente al de una viga).
- Puentes en arco.
- Puentes suspendidos.

2.3.2.4. Según la forma de la geometría en planta

“Los puentes pueden ser rectos, esviados o curvos” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones _ b, 2018, p. 59).

2.3.2.5. Según el tiempo de vida previsto

Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones _ b (2018), los puentes se clasifican en puentes temporales y definitivos si tienen una vida de servicio mayor a cinco (05) años.

2.3.3. Vulnerabilidad

Según el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción de Riesgo de Desastres (2014), la vulnerabilidad tiene tres (03) factores: exposición, fragilidad y resiliencia. Estos factores sirven como base para plantear los criterios de la matriz de vulnerabilidad hidrológica y su correspondiente evaluación.

2.3.3.1. Exposición

Esta referida a la decisión del ser humano a ubicarse en zona de impacto de un peligro. Se genera por la falta de planificación de crecimiento demográfico, una migración desordenada y políticas de desarrollo económico no sostenibles. A mayor exposición, es mayor la vulnerabilidad (Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción de Riesgo de Desastres, 2014).

2.3.3.2. Fragilidad

Se refiere a las condiciones de desventaja de una población y sus medios de vida frente a un peligro, está centrada en las condiciones físicas de la comunidad, por ejemplo, falta de uso de normativas en la construcción de sus viviendas, informalidad, etc. A mayor fragilidad, es mayor la vulnerabilidad (Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción de Riesgo de Desastres, 2014).

2.3.3.3. Resiliencia

Se refiere al nivel de capacidad de recuperación o asimilación de la población frente a la ocurrencia de un peligro. Está relacionado con la organización y condiciones sociales de la población. A mayor resiliencia, menor vulnerabilidad (Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción de Riesgo de Desastres, 2014).





CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1. Tipo y nivel de investigación

La presente investigación es de tipo básica, porque busca ampliar y profundizar el caudal de conocimientos científicos existentes sobre las metodologías de evaluación de vulnerabilidad hidrológica en puentes de cauce de río (Hernández et al. , 2014).

La presente investigación es de nivel descriptiva porque busca medir y recoger información respecto a parámetros para proponer una matriz de evaluación de vulnerabilidad hidrológica de los puentes (Hernández et al. , 2014).

3.2. Diseño de investigación

La presente investigación tiene un diseño no experimental, porque se observarán los fenómenos tal y como se dan en su contexto natural, para analizarlos; transeccional porque se recopilarán datos en un momento único, descriptivo porque se busca detallar las características la metodología de evaluación de vulnerabilidad hidrológica en puentes de cauce de río (Hernández et al. , 2014). En la Tabla 5 se muestra el análisis de variables independientes y dependientes.

Tabla 5.

Análisis de variables independientes y dependientes

	Variables	Dimensiones	Indicadores
Dependientes	Vulnerabilidad hidrológica en puentes de cauce de río	Político Social Ambiental Técnico	Señalados en la matriz de evaluación de vulnerabilidad Exposición del puente al flujo
Independientes	Puentes	Estado actual de la infraestructura	Estado de cimientos Erosión de tablero Protección contra socavación Material del puente

Nota: Elaboración propia.

3.3. Métodos de investigación

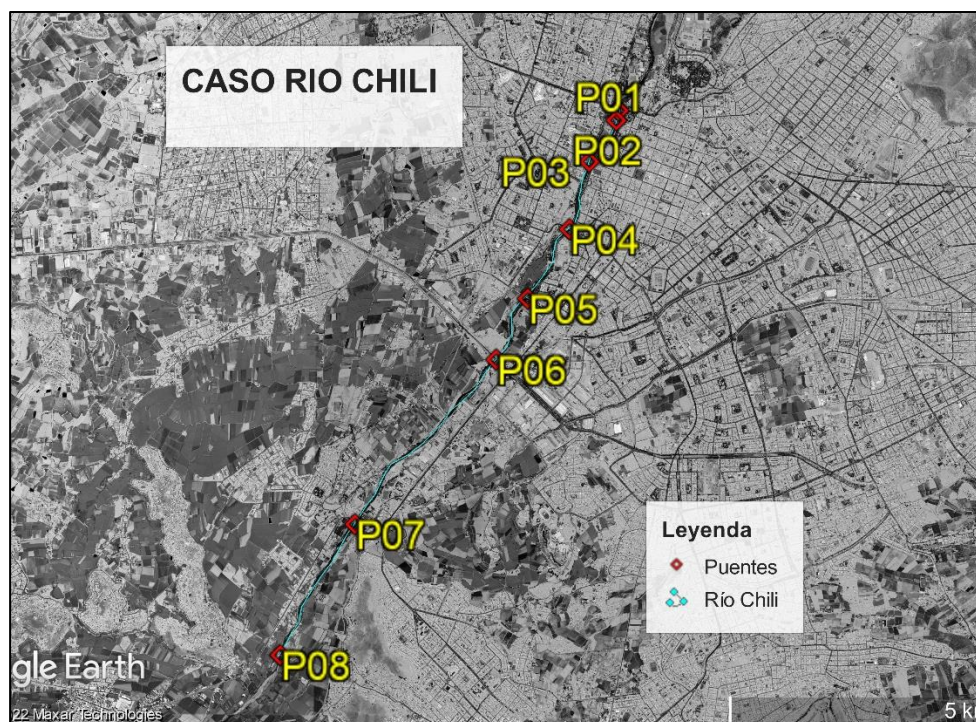
La presente investigación tiene un enfoque mixto. Cuantitativo, porque se realizará mediante la recolección y análisis de datos, para responder las preguntas de investigación y probar las hipótesis planteadas. Y cualitativo porque se basa en métodos de recolección de datos como las descripciones y observaciones (Hernández et al. , 2014).

3.3.1. Área de estudio

El área de estudio de la presente tesis es el cauce del río Chili, ubicado en la ciudad de Arequipa. Se tomaron ocho (8) puentes bajo las observaciones de la Tabla 1, se observa la delimitación del área de estudio en la Figura 3.

Figura 3.

Área de estudio: Puentes del cauce de río Chili



Nota: Adaptado de Google - a (2021).

Las coordenadas de los puentes a estudiar se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6.

Coordenadas de puentes en estudio

ID	Puente	Coordenadas E	Coordenadas N
P01	Grau	228818.31	8185914.97
P02	Bajo Grau	228796.23	8185811.33
P03	Bolognesi	228516.43	8185377.18
P04	San Martín	228317.62	8184668.51
P05	De Fierro	227889.84	8183938.37
P06	San Isidro	227566.04	8183297.10
P07	Tingo	226104.62	8181559.28
P08	Bailey	225336.65	8180183.00

Nota: Elaboración propia.

3.3.2. *Recolección de datos*

En primer lugar, es necesario contar con el expediente técnico de los puentes en estudio, los planos y memoria servirán para el modelamiento hidráulico. En caso sea necesario información más detallada de la topografía del lugar, es necesario un levantamiento topográfico de las zonas de estudio.

Para el modelamiento hidrológico, es necesario contar con los datos históricos de caudales máximos anuales aforados del río Chili, estos registros son tomados por la Autoridad Autónoma de Majes (en adelante AUTODEMA). Además, al considerar el caudal emitido por las torrenteras, es necesario tener los datos históricos de precipitación máxima, para obtener un caudal adicional aguas debajo de cada puente para la modelación hidráulica.

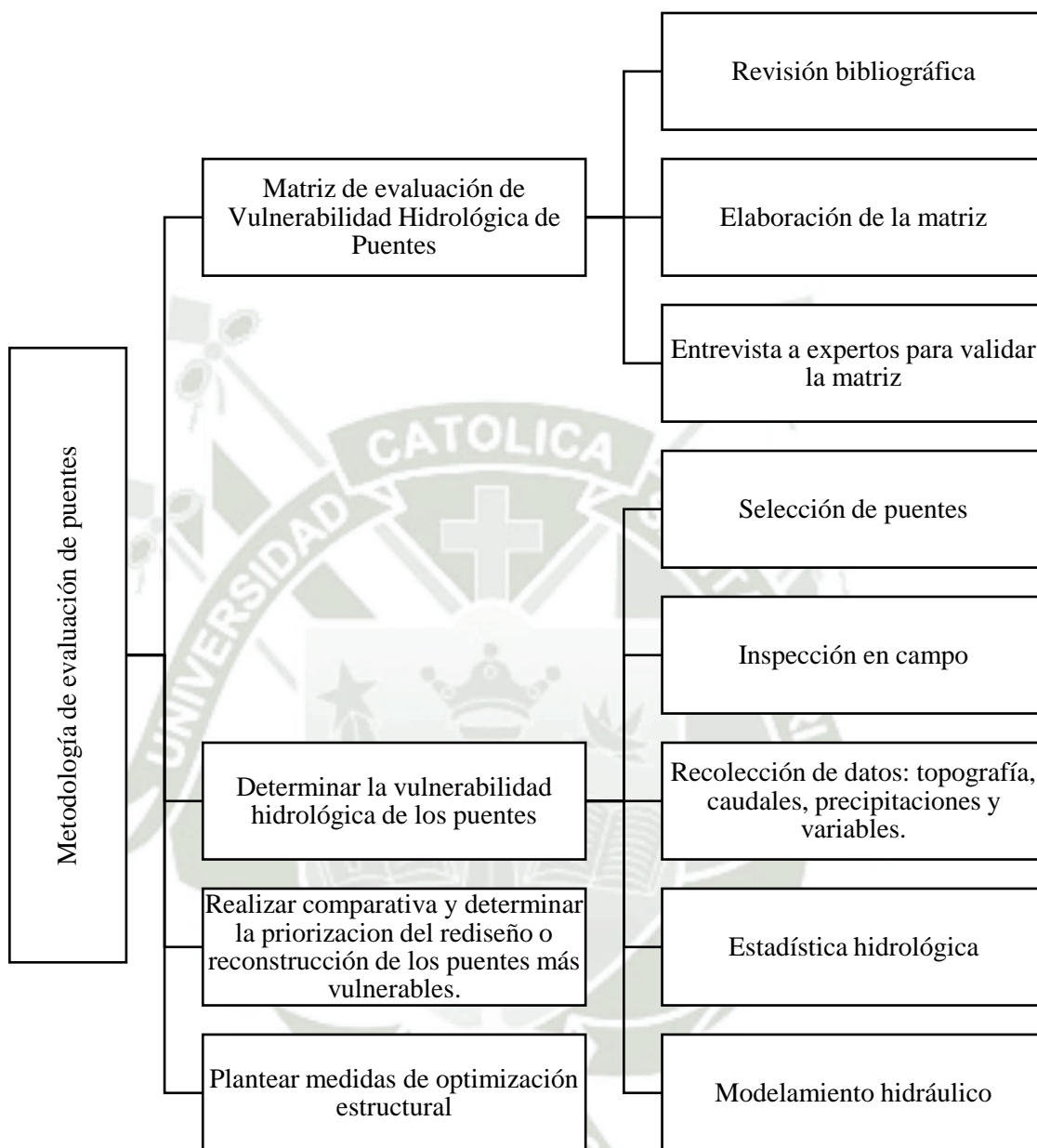
3.3.3. *Procesamiento de la información*

La Figura 4 muestra la metodología de forma esquemática.



Figura 4.

Metodología de la investigación



Nota: Elaboración propia.

3.3.3.1. Matriz de evaluación

Mediante una revisión bibliográfica se propone una matriz para hallar la vulnerabilidad hidrológica de puentes sobre cauce de río. Al obtener la matriz esta se aplicará al caso de estudio río Chili, a los puentes que hayan tenido problemas hidrológicamente. Luego de haber obtenido la matriz y evaluación, se consultará a la opinión de expertos en la rama para su validación mediante entrevistas semiestructuradas. Esta parte de la metodología se desarrolla en el Capítulo 4. Con esto, se propone una metodología que se pueda usar en cualquier cauce de río.

3.3.3.2. Procesamiento hidrológico

Al obtener los datos de las series mensuales de caudales, se procesa la información y se realiza un registro histórico de caudales máximos anuales, los cuales con un análisis estadístico (análisis de frecuencia de probabilidades) se puede estimar los caudales necesarios para el modelamiento hidráulico. Además, algunas torrenteras de la ciudad que desembocan directamente al río Chili producen un aumento de caudal que transita por debajo de los puentes ubicados aguas abajo. Por ese motivo se realizará un análisis para obtener un caudal adecuado de modelamiento y este será validado mediante grabaciones de videos de la interacción de los puentes ante avenidas máximas.

3.3.3.3. Procesamiento hidráulico

Los planos de los puentes en estudio son necesarios para el modelamiento hidráulico, así como la geometría de los estribos, altura de plataforma y los caudales que son extraídos del procesamiento hidrológico. Todos estos datos servirán para el cálculo de inundación de la superestructura. Como herramienta para estos fines se utilizará el programa HEC-RAS (River Analysis System, desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del US Army Corps of Engineers). Se realizará un modelamiento para todos los puentes.

3.3.3.4. Procedimiento para analizar la vulnerabilidad

Utilizando la matriz de evaluación propuesta en el Capítulo 4, se halla la vulnerabilidad hidrológica de los puentes en estudio, para luego hacer una comparación y hallar el puente más vulnerable. Luego se propone medidas para reducir la vulnerabilidad en los puentes.



CAPITULO IV

CONSIDERACIONES SOBRE LA VULNERABILIDAD HIDROLÓGICA

4.1. Amenazas hidrológicas

Las altas pendientes en zonas montañosas favorecen a una rápida evacuación del agua esto puede llegar a inundar los poblados de manera súbita. Además, el desplazamiento de partículas crece con la pendiente. En laderas muy pronunciadas una mínima alteración del suelo por transcurso del agua puede producir la caída de las rocas y tierra, lo cual afectaría a las construcciones de las localidades ubicadas en laderas inferiores. Al crecer los caudales de los ríos, en temporada de lluvias, produce un aumento en los niveles de agua lo cual trae consigo inundación en los puntos más bajos de las cuencas. Se recomienda construir por encima de los niveles máximos esperados de los ríos, para eso se define los caudales de diseño, que son hallados con los datos de aforo de medición de caudales, con lo cual. se hallan los caudales que en promedio presentarían cada “T” años. El periodo de retorno es el periodo de recurrencia promedio para que un caudal sea excedido (Kuroiwa , 2019).

4.1.1. Clasificación de Desastres Climáticos

Según Kuroiwa (2019) existen dos (02) tipos de desarrollo de desastres causados por las variaciones climáticas adversas:

- De rápido desarrollo, como las inundaciones y huracanes.
- De lento desarrollo, como la sequía, desertización y degradación de suelos.

“Los fenómenos más peligrosos de origen atmosférico y oceanográfico son las inundaciones de cursos de agua y las inundaciones causadas por tormentas tropicales y huracanes en las costas como el fenómeno de El Niño” (Kuroiwa , 2019). El fenómeno de El Niño está ocurriendo con más frecuencia.

4.1.2. Desastres climáticos de rápido desarrollo

4.1.2.1. Inundaciones

Según Kuroiwa (2019) las inundaciones han ocurrido siempre en la historia de la humanidad; que estos por comodidad se ubican muy cerca a los cursos de agua, ocupando sus planicies de inundación, los cuales son áreas de reserva que tienen los ríos, para evacuar el exceso de agua. Las inundaciones que provocan los ríos pueden ser de dos tipos:

- Flujos rápidos o inundaciones repentinas: son las inundaciones que se producen rápidamente en zonas montañosas, estas concentran el agua en su curso de evacuación.
- Desbordes de ríos y lagos: son fenómenos que ocurren lenta y generalmente por más de 12 horas.

4.1.2.1.1. Evaluación del peligro de inundación

Se estima los caudales máximos, el nivel que alcanza y su frecuencia de ocurrencia en una sección transversal de un río. Los métodos estándares solo consideran la evaluación de la profundidad del agua, velocidad, frecuencia de ocurrencia, rapidez del incremento del nivel de agua y duración del periodo crítico. La rapidez del incremento de nivel de agua permite planificar la evacuación de la población que podría ser afectada por inundaciones. Es muy diferente el caso de inundación del tipo desborde que la de flujo rápido. En la de flujo rápido, no es fácil alertar con tiempo suficiente a la población en riesgo, pero se les puede capacitar para que puedan interpretar las señales de la naturaleza, con eso se puede evacuar con prontitud el área inundable. La duración del periodo de inundación ocasiona daños directos e indirectos, indirectos, por ejemplo, si las vías de comunicación están inundadas por un largo periodo de tiempo, se puede interrumpir el transporte de producción de la zona afectada por ese periodo de tiempo (Kuroiwa , 2019).

Según Kuroiwa (2019) recomienda que para determinar la frecuencia de ocurrencia de las inundaciones se realiza mediante las técnicas conocidas de análisis de frecuencias de caudales. Sin embargo, uno de los métodos más efectivos para determinar valores extremos es a través de las visitas de campo, estudiando las condiciones de las orillas de los ríos y zonas aledañas también a través de la comunicación verbal o escrita, consultando entre personas de mayor edad que hayan vivenciado tales inundaciones. También, pueden servir de guía para estimar donde y con qué frecuencia ocurren inundaciones. Estas recomendaciones, se usarán para hallar la vulnerabilidad en nuestro caso de estudio mediante observaciones en campo, consultas a personas de mayor de edad que viven en la localidad, revisión bibliográfica y modelamientos hidráulicos e hidrológicos.

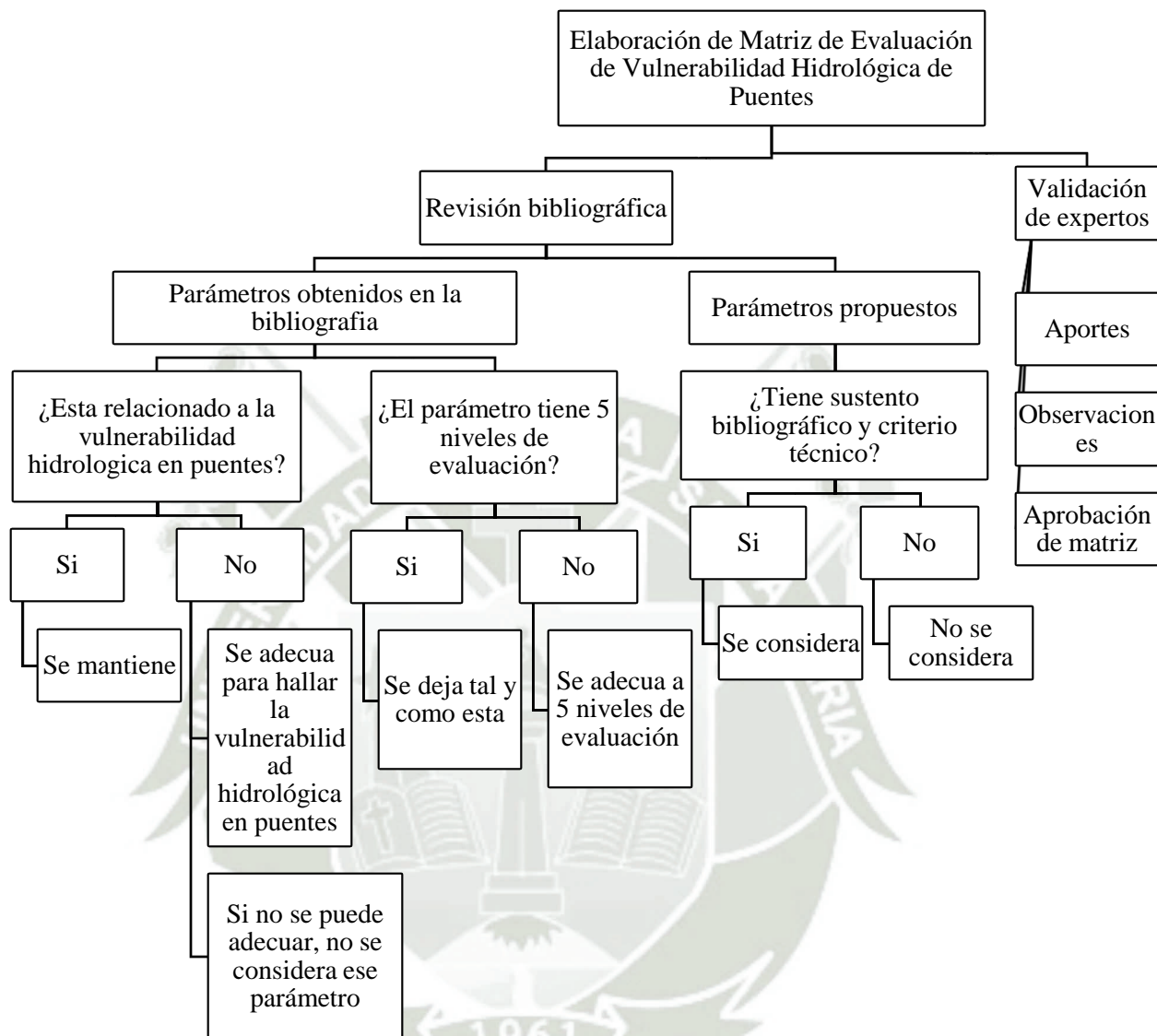
Es recomendable mapear las zonas inundadas después que ocurre el fenómeno, porque es una información de gran utilidad para proteger a la población y para los planes del uso del suelo (Kuroiwa , 2019).

4.2. Evaluación de vulnerabilidad hidrológica

El primer objetivo específico es la elaboración de la matriz de evaluación de vulnerabilidad hidrológica en puentes; para tal fin, se utilizó el procedimiento mostrado en la Figura 5. Se realizó una revisión y selección bibliográfica, para fundamentar los parámetros propuestos. La bibliografía utilizada se muestra en la Tabla 7.

Figura 5.

Pasos para la elaboración de los parámetros de evaluación de la matriz



Nota: Elaboración propia.

Tabla 7.

Bibliografía considerada para la elaboración de matriz de evaluación

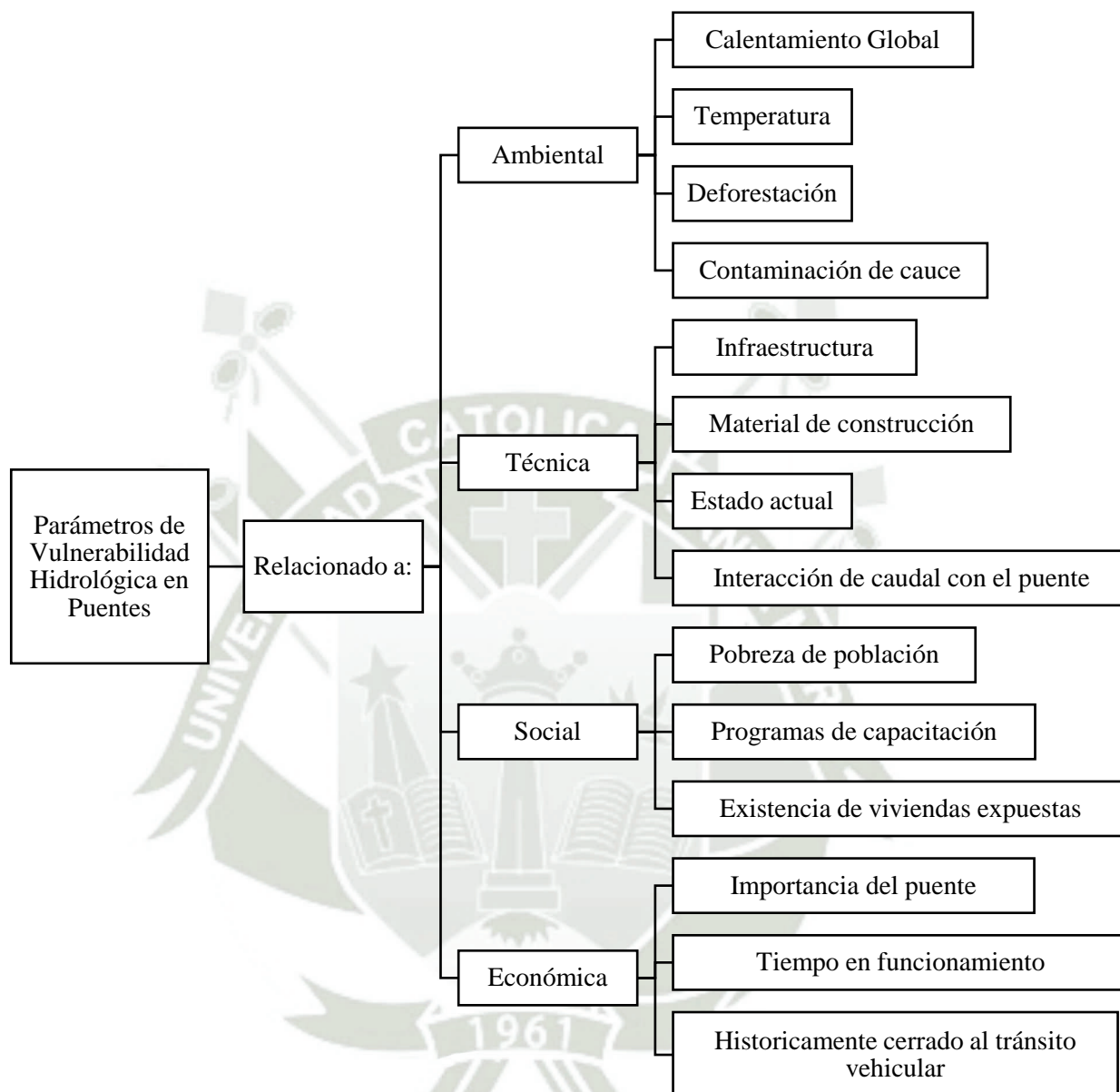
ID	Autor	Año	Relevancia
B1	Espinoza & Booker	2022	Parámetros propuestos por los autores en vulnerabilidad ambiental y física de los puentes.
B2	Liu, W., Hsieh, T. & Liu, H.	2021	Parámetros sociales, por ejemplo la economía de la población
B3	Bento, Gomes, Viseu, Couto & Pêgo	2020	Importancia del puente en cuanto al tránsito vehicular y problemas históricos del mismo.
B4	Julio Kuroiwa	2019	Recomendaciones y teoría en cuanto a la vulnerabilidad hidrológica en puentes.
B5	Alain Espinoza	2019	Interacción del puente frente a una inundación, como la altura de gálibo y erosión en puentes.
B6	Ministerio de Transportes y Comunicaciones _ a	2018	Recomendaciones técnicas en cuanto a altura de gálibo y material de construcción y tiempo de vida útil de los puentes.
B7	Ministerio de Transportes y Comunicaciones _ b	2018	Normativa en cuanto a la altura de gálibo en puentes.
B8	Bhatkoti, Moglen, Murray-Tuite & Triantis	2016	El coeficiente de escorrentía de la cuenca en el cual influye directamente en por qué fallan los puentes y también la reincidencia de tormentas debido al cambio climático.
B9	Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres	2014	Adaptación de parámetros de evaluación de edificaciones y otras infraestructuras, enfocado en puentes.
B10	Ministerio de Transportes y Comunicaciones	2008	Normativa en cuanto a protección de pilares en puentes y consideraciones en cuanto a altura de socavación y de gálibo.
B11	Instituto Nacional de Defensa Civil	2006	Parámetros que son adaptados para la vulnerabilidad en puentes.

Nota: Elaboración propia.

Para los parámetros propuestos de vulnerabilidad hidrológica en puentes, se consideró en relación con ciertas variables como se observa en la Figura 6.

Figura 6.

Tipos de vulnerabilidad de parámetros de matriz de evaluación



Nota: Elaboración propia.

Las variables son parámetros relacionados a las vulnerabilidades: Ambiental (A), Técnica (T), Social (S) y Económica (E).

4.2.1. Parámetros Ambientales

Están relacionados con el medio ambiente y cambio climático, debido a que el aumento de las temperaturas y contaminación ambiental ha cambiado en los últimos años, lo cual genera mayor reincidencia en la frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos. Se relacionan también con el grado de conservación y contaminación de los recursos naturales.

4.2.2. *Parámetros Técnicos*

Están referidos a la infraestructura, a su estado actual, material de construcción y comportamiento frente a avenidas máximas, así también al estado actual de las represas aguas arriba si el caudal del río es aforado.

4.2.3. *Parámetros Sociales*

Si bien se está estudiando la vulnerabilidad hidrológica de los puentes como infraestructura, se considera también, cómo se ve afectada la población aledaña si el puente se ve inundado o destruido. Esto se analiza a partir del nivel de organización y participación ciudadana para responder y prevenir ante situaciones de emergencia y también al acceso que tiene la población para poder hacer frente a un desastre (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2006)

4.2.4. *Parámetros Económicos*

Los puentes permiten actividades económicas, ya que interconectan a la población, más aún si estos son transitados por muchos vehículos diariamente, si estos son destruidos o restringidos a su uso, generan grandes pérdidas económicas. Se considera también al tiempo de funcionamiento del puente, debido a que, a mayor tiempo de vida útil es necesario mayor inversión en su mantenimiento.

4.2.5. *Matriz de evaluación de vulnerabilidad hidrológica*

La matriz de evaluación de vulnerabilidad hidrológica propuesta y validada mediante las entrevistas a expertos, se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8.

Matriz de evaluación de vulnerabilidad propuesta

ID	Variable	Muy bajo: 1	Bajo: 2	Medio: 3	Alto: 4	Muy alto: 5
A1	Cambio climático - niveles de temperatura	Niveles de temperatura promedio son iguales a las actuales	Niveles ligeramente superiores al promedio de temperatura	Niveles superan moderadamente a los niveles promedio.	Niveles de temperatura superiores al promedio	Niveles de temperatura muy superiores al promedio
A2	Composición y calidad del agua	Sin ningún grado de contaminación	Bajos niveles de contaminación	Nivel moderado de contaminación	Altos niveles de contaminación	Muy alto nivel de contaminación
A3	Condiciones ecológicas	Conservación de los recursos naturales, no se practica la deforestación y contaminación.	Nivel bajo de explotación de los recursos naturales y del nivel de contaminación.	Nivel moderado de explotación de los recursos naturales y del nivel de contaminación.	Alto nivel de explotación de los recursos naturales y del nivel de contaminación.	Nivel muy alto de recursos naturales, deforestación y contaminación.
A4	Residuos que interrumpen el flujo del río	El río está libre de residuos y/o basuras	El río presenta poca cantidad de basuras de ligero tamaño y peso, como bolsas de plástico y botellas.	Presenta residuos de tamaño pequeño a mediano en poca cantidad como ramas, piezas de autos y llantas.	Presenta residuos de tamaño mediano en cantidad regular como piezas de autos, llantas y troncos de árboles.	Presenta residuos de gran tamaño y en gran cantidad como troncos de árboles.
T1	Materiales usados en la construcción	Concreto armado	Acero	Materiales locales de resistencia considerable	Madera	Adobe, caña y materiales de menor resistencia
T2	Estado de conservación del puente	No presenta deterioro alguno	Tiene ligeros deterioros en los acabados debido al uso normal	No tiene deterioro y si la tienen, no lo comprometen y es subsanable, o que los acabados e instalaciones tienen deterioro visible debido al mal uso	La estructura acusa deterioros que la comprometen, aunque sin peligro de desplome y los acabados e instalaciones tienen visibles desperfectos	La infraestructura presenta un deterioro tal que hace presumir su colapso

T3	Protección contra el flujo en pilares y estribos	Los pilares y/o estribos están extremadamente protegidos ante avenidas extraordinarias, que hace presumir una vulnerabilidad cero.	Los pilares y/o estribos se encuentran altamente protegidos ante avenidas extraordinarias	Los pilares y/o estribos se encuentran medianamente protegidos ante avenidas extraordinarias	Los pilares y/o estribos se encuentran pobremente protegidos ante avenidas extraordinarias	Los pilares y/o estribos se encuentran desprotegidos ante avenidas extraordinarias
T4	Características geométricas – altura del puente (*)	La altura permite al agua fluir sin inconveniencia. Tiene más de 2 metros de diferencia entre la superficie de agua y base de tablero	La altura permite al agua fluir sin inconvenientes. Tiene menos de 2 metros de diferencia entre la superficie del agua y la base de tablero	La altura permite al agua fluir con normalidad. Tiene menos de 30 cm entre la superficie del agua y la base del tablero.	La altura no permite al agua fluir con normalidad. El nivel de agua llega a impactar a la base de tablero	La altura no permite al agua fluir con normalidad. Los niveles de agua supera al nivel del tablero.
T5	Profundidad de socavación en cimentación superficial (**)	Profundidad de socavación con un margen de seguridad de más de 1 m	Profundidad de socavación con un margen de seguridad de menos de 1 m.	Profundidad de socavación llega a base de cimentación,	Profundidad de socavación excede en menos de 1 m	Profundidad de socavación excede en más de 1 m
T6	Capacidad actual de las represas aguas arriba (***)	Capacidad entre el 81 y el 100%	Capacidad entre el 61 y el 80%	Capacidad de 41 a 60 %	Capacidad entre 21 y 40%	Capacidad entre 0 y 20%
S1	Situación de pobreza o Desarrollo humano	Población sin pobreza	Población con menor porcentaje de pobreza	Población con pobreza mediana	Población con pobreza alta	Población con pobreza total o extrema
S2	Programas de capacitación en la población y Prevención de Atención Desastres (PAD)	La población se capacita constantemente en PAD, actualizándose, participando en simulacros, siendo	La población se capacita constantemente en PAD, siendo su difusión y cobertura total	La población se capacita con regular frecuencia en PAD siendo su difusión y cobertura mayoritaria	La población esta escasamente capacitada en PAD, siendo su difusión y cobertura escasa	La totalidad de la población no cuenta ni desarrolla ningún programa de capacitación en PAD

		su difusión y cobertura total				
S3	Proximidad a centros poblados	Muy lejos, > 5 Km.	Lejos, 3 – 5 Km	Moderadamente cerca, 1 – 3 Km	Cerca, 0.2 – 1 Km	Muy cerca, 0 – 0.2 Km
S4	Material de viviendas aledañas al puente (****)	Albañilería y concreto armado	Madera y/o quincha reforzada con elementos diagonales	Quincha (caña con barro)	Adobe o tapial	Estera y/o cartón
E1	Tiempo en funcionamiento del puente	Menos de 10 años	Entre 10 a 25 años	De 25 a 50 años	De 50 a 75 años	Mas de 75 años en funcionamiento
E2	Importancia del puente según su volumen de tráfico vehicular	Transitan pocos vehículos al día y es considerado menos importante	Transitan vehículos diariamente no genera ingresos económicos y no se le considera un puente importante.	Transitan cantidad regular de vehículos por día, genera ingresos económicos	Transita gran cantidad de vehículos por día, genera ingresos económicos considerables y es considerado importante por la población	Transita alta cantidad de vehículos diariamente, genera altos ingresos económicos y es considerado un puente muy importante por la población.
E3	Cierre de puente al tránsito vehicular por riesgo hidrológico	Ninguna vez fue cerrado al tránsito vehicular por riesgo hidrológico	En algún momento se planeó cerrar el puente por riesgo hidrológico	Una vez se cerró el puente al tránsito vehicular por riesgo hidrológico	Dos veces se cerró el puente al tránsito vehicular por riesgo hidrológico	Mas de 2 veces fue cerrado el puente por riesgo hidrológico
E4	Historia de inundaciones (*****)	El puente nunca presentó inundación y/o riesgo.	Presento en 1 ocasión inundación y/o riesgo y afecto a zonas aledañas.	Presento en 2 ocasiones inundaciones y/o riesgo y afecto a zonas aledañas	Presentó en 3 ocasiones inundación y/o riesgo y afecto a zonas aledañas	Presento en más de 3 ocasiones inundación y/o riesgo y afecto a zonas aledañas

* Si el río transporta troncos u objetos voluminosos ya no serían 2 m, sino 2.5 m.

** Si es que no se cuenta con las profundidades de cimentación superficial o tiene como cimentación pilotes, no se aplicara el parámetro.

*** Si no es un río aforado por una represa, no se considera este parámetro

**** Se considera este parámetro si la población está muy cercana al puente

***** Se considera este parámetro en caso no existe información periodística para el parámetro E3

Nota: Elaboración propia.

4.3. Fundamento de variables de matriz de evaluación

En la presente sección se muestra el fundamento de cada parámetro propuesto en la matriz de evaluación.

4.3.1. Vulnerabilidad Ambiental

4.3.1.1. Cambio climático y niveles de temperatura (A1)

Los fenómenos climáticos pueden ocasionar desastres, cuando el clima varía ostensiblemente de su curso regular. El calentamiento global es notorio en los últimos años debido a que se ha agravado los efectos de estos fenómenos (Kuroiwa , 2019).

El Instituto Nacional de Defensa Civil (2006) considera este parámetro, en una valoración de cuatro niveles y evalúa la vulnerabilidad de 0 al 100% como se puede observar en la Tabla 9. Estos cuatro (4) niveles se adaptan a cinco (5) para la matriz de evaluación propuesta.

Tabla 9.

Parámetros de evaluación de vulnerabilidad ambiental por INDECI

Variable	Nivel de Vulnerabilidad							
	VB < 25 %		VM 26 a 50 %		VA 51 a 75 %		VMA 76 a 100%	
Condiciones atmosféricas	Niveles de temperatura promedio normales	de al	Niveles de temperatura ligeramente superior al promedio normal	de	Niveles de temperatura superiores al promedio normal	de	Niveles de temperatura superiores al promedio normal estables al promedio normal	de
Composición y calidad del aire y del agua	Sin ningún grado de contaminación.		Con un nivel moderado de contaminación		Alto grado de contaminación		Nivel de contaminación no apto	
Condiciones ecológicas	Conservación de los recursos naturales, crecimiento poblacional planificado, no se practica la deforestación y contaminación		Nivel moderado de explotación de los recursos naturales; ligero crecimiento de la población y del nivel de contaminación		Alto nivel de explotación de los recursos naturales, incremento de la población y del nivel de contaminación		Explotación indiscriminada de recursos naturales; incremento de la población fuera de la planificación, deforestación y contaminación.	

Nota: Instituto Nacional de Defensa Civil (2006).

4.3.1.2. Composición y calidad del agua (A2)

Según Espinoza (2019), cuando realizó las modelaciones hidráulicas en el puente Bajo Grau, para seis escenarios de diferentes periodos de retorno entre 100 y 1000 años, resultó que los tirantes impactan con la superestructura causando erosión y además la velocidad de flujo ocasiona socavación en lecho vivo. Consideró que si el agua está contaminada genera mayor erosión. Para estimar su valor se realizó inspecciones al flujo en años pasados.

Si el agua del río está contaminada genera mayor daño a los pilares y estribos del puente y si el río desborda, el agua contaminada produciría problemas a los pobladores, los haría más vulnerables a contraer enfermedades. Para este parámetro se tomó como referencia los niveles indicados en la Tabla 9, adaptándolos a 5 niveles para la matriz propuesta.

4.3.1.3. Condiciones ecológicas (A3)

Kuroiwa (2019) menciona que los suelos con baja capacidad de infiltración son muy peligrosos por ser poco permeables y Bhatkoti et al. (2016) concluyeron que el aumento de áreas impermeables aguas arriba del cruce del puente, aumenta su probabilidad de falla por inundaciones.

Este parámetro está propuesto por INDECI (2006) como se ve en la Tabla 9. Los parámetros incluyen la conservación de los recursos naturales y si no se practica la deforestación y contaminación, ya que esto influye directamente en la vulnerabilidad hidrológica, considerando también invasión a fajas marginales, etc.

4.3.1.4. Residuos que interrumpen el flujo del río (A4)

Las personas que viven a orillas de los ríos arrojan en su curso todo tipo de desechos, lo que, en épocas de lluvia agrava la fuerte erosión que arrastra grandes cantidades de materiales, destruyendo florestas y andenes. Estos desechos y sedimentos se deben eliminar en época de estiaje. Hay que considerar que cuando los ríos se cargan, transportan sedimentos, rocas, ramas y tallos de árboles que pueden obstruir el puente, que aumenta las cargas hidrodinámicas y la erosión (Kuroiwa, 2019).

Por lo mencionado en el párrafo anterior, se plantea los niveles de vulnerabilidad de este parámetro de acuerdo con el tamaño de los desechos encontrados en el cauce y su cantidad, como basuras de menor tamaño hasta troncos, que pueden ocasionar obstrucción en los puentes.

4.3.2. Vulnerabilidad Técnica

4.3.2.1. Materiales usados en la construcción (T1)

De los materiales usados para la construcción de puentes, un material resistente y en buen estado genera menor vulnerabilidad respecto a un material muy frágil y sensible a inundaciones como pueden ser el adobe o madera. Además, para la matriz se considera el uso de materiales locales como el sillar (ignimbrita). Se considera al concreto armado menos vulnerable que el acero, porque este es más pesado y puede resistir de mejor manera empujes hidrodinámicos que pueda ocasionar el flujo de agua. En materiales locales, se considera al sillar menos resistente que el acero, debido a que este tiene una resistencia menor a los impactos de los materiales que pueda arrastrar el flujo. Esto se corrobora por qué en visita a campo, se observa que se refuerza con concreto armado la base de pilares de puentes hechos de sillar.

Espinoza (2019) menciona que es importante considerar el material en función de su resistencia, debido a que, si el caudal impacta con la superestructura y su material de construcción es débil, este es más vulnerable. Como se puede observar en la Tabla 10, existen cuatro (04) niveles de vulnerabilidad, lo cual se recoge estos datos y se amplía un nivel más para la matriz de evaluación.

Tabla 10.

Parámetros de evaluación de vulnerabilidad física por INDECI

Variable	Nivel de Vulnerabilidad			
	VB < 25 %	VM 26 a 50 %	VA 51 a 75 %	VMA 76 a 100%
Materiales de construcción utilizadas en viviendas	Estructura sismorresistente con adecuada técnica constructiva (de concreto o acero)	Estructura de concreto, acero o madera, sin adecuada técnica constructiva	Estructuras de adobe, piedra o madera, sin refuerzos estructurales	Estructuras de adobe, caña y otros de menor resistencia, en estado precario.
Localización de viviendas	Muy alejada > 5 km	Medianamente cerca 1 – 5 km	Cercana 0.2 – 1 km	Muy cercana 0.2 – 0 km
Características geológicas, calidad y tipo de suelo	Zonas sin fallas ni fracturas, suelos con buenas características geotécnicas	Zona ligeramente fracturada, suelos de mediana capacidad portante	Zona medianamente fracturada, suelos con baja capacidad portante	Zona muy fracturada, suelos fallada, suelos colapsables. (relleno, mapa freática alta con turba, material inorgánico, etc.)
Leyes existentes	Con leyes estrictamente cumplidas	Con leyes medianamente cumplidas	Con leyes sin cumplimiento	Sin ley

Nota: Instituto Nacional de Defensa Civil (2006).

4.3.2.2. Estado de conservación del puente (T2)

Este parámetro fue adaptado del Cuadro 63 del Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción de Riesgo de Desastres (2014), el cual se observa en la Tabla 11, donde el parámetro original estudia a los edificios, siendo la matriz de evaluación propuesta para vulnerabilidad en puentes, se adapta a la infraestructura estudiada.

Tabla 11.

Parámetro de estado de conservación de la edificación de CENEPRED

Estado de conservación de la edificación
Muy malo: Las edificaciones en que las estructuras presentan un deterioro tal que hace presumir su colapso
Malo: Las edificaciones no reciben mantenimiento regular, cuya estructura acusa deterioros que la comprometen, aunque sin peligro de desplome y los acabados e instalaciones tienen visibles desperfectos
Regular: Las edificaciones que reciben mantenimiento esporádico, cuyas estructuras no tienen deterioro y si lo tienen, no lo comprometen y es subsanable, o que los acabados e instalaciones tienen visibles desperfectos
Bueno: Las edificaciones reciben mantenimiento permanente y solo tienen ligeros deterioros en los acabados debido al uso normal
Muy bueno: Las edificaciones reciben un mantenimiento permanente y que no presentan deterioro alguno

Nota: Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción de Riesgo de Desastres (2014).

4.3.2.3. Protección contra el flujo en pilares y estribos (T3)

Espinoza (2019) menciona que se tiene dificultad en conseguir la profundidad de desplante de las cimentaciones de los puentes, debido a la falta de información, como planos y especificaciones técnicas por parte de los municipios. Al no tener estos datos no se puede corroborar si la altura de socavación excede la profundidad de la cimentación. En consecuencia, se propuso tomar como un parámetro si los estribos de los puentes están protegidos contra la socavación mediante la observación, ya que esto disminuye la vulnerabilidad. Kuroiwa (2019) indica que para contrarrestar las altas velocidades se puede colocar enrocados o gaviones que son mallas de acero rellenas con piedras, además se debe diseñar los apoyos de los puentes para resistir las cargas hidrodinámicas y estar protegidos contra la erosión aguas arriba y abajo del puente. El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008) menciona que, para la protección de pilares, la solución más común es la colocación de mantos de escollera alrededor del pilar, que puede cubrir todo el pilar o solo el extremo aguas arriba. Se adapta el parámetro propuesto por Espinoza a cinco (05) niveles de evaluación.

4.3.2.4. Características geométricas – altura del puente (T4)

El Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008) indica que la altura de gálibo, que es el espacio libre entre el nivel de flujo máximo de crecida y el nivel inferior del tablero del puente, no debe ser menor a 2 metros en caso la corriente sea relativamente limpia. En cambio, si existe evidencia de transporte de troncos u otros objetos voluminosos, el gálibo mínimo debe ser 2.5 metros. El Manual de DG 2018 menciona que, en los puentes sobre cursos hídricos, el gálibo no será menor a 2.5 metros y si es un curso navegable se hará de acuerdo con las dimensiones y características de las naves que transitan por él (Ministerio de Transportes y Comunicaciones _ a, 2018). El Manual de

Puentes 2018 indica que si el río no arrastra palizada el gálibo debe ser como mínimo 1.5 metros y si arrastrase deberá ser como mínimo 2.5 metros (Ministerio de Transportes y Comunicaciones _ b, 2018). Esta información se analiza y se observa en la Tabla 12. Como se puede observar, no se puede indicar una altura de gálibo general para todos los puentes, porque depende del tipo de río, por ese motivo se coloca un asterisco en la parte inferior de la matriz de evaluación, indicando si el río transporta troncos u objetos voluminosos o si es una corriente limpia. Espinoza (2019) toma estas consideraciones y propone un parámetro de evaluación de vulnerabilidad hidrológica basado en cuatro (4) niveles de evaluación. Se toma como referencia y se adapta el parámetro a cinco (5) niveles.

Tabla 12.

Comparación en altura de gálibo según normativas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones

Comparación de Altura de Gálibo			
Manuales	Corriente limpia	Corriente con transporte de objetos voluminosos (troncos, etc.)	No indica
Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje 2008	Min. 2 m	Min. 2.5 m	
Manual de Diseño Geométrico 2018			Min. 2.5 m
Manual de Puentes 2018	Min. 1.5 m	Min. 2.5 m	

Nota: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008), Ministerio de Transportes y Comunicaciones - a (2018) y Ministerio de Transportes y Comunicaciones - b (2018).

4.3.2.5. Profundidad de socavación en cimentación superficial (T5)

En puentes con cimentaciones superficiales como zapatas, el fondo de la cimentación debe estar debajo de la profundidad de socavación máxima calculada estimada en por lo menos 1 metro. Si este se apoya sobre roca buena, resistente a la socavación, el puente se diseñará y se construirá conservando la integridad de la roca (Ministerio de Transportes y Comunicaciones _ b, 2018).

4.3.2.6. Capacidad actual de las represas aguas arriba (T6)

Espinoza (2019) recomienda realizar un estudio de las represas, porque estas están relacionadas con la vulnerabilidad de los puentes, debido a que, en los últimos años como consecuencia del cambio climático, las tormentas son más frecuentes e intensas (Bhatkoti et al. (2016); Pregnotato et al. (2022)). Además existen represas que han cumplido su vida útil y estas bajan su capacidad de almacenamiento, debido a la retención de sedimentos. Esto ocasiona que en las cuencas aforadas, transiten mayor caudal, debido a la baja capacidad de retención y mayor frecuencia de tormentas. Para los niveles de medición de vulnerabilidad se consideró la capacidad de las presas entre 0 al 100 %, esta información se solicita a las entidades correspondientes.

4.3.3. Vulnerabilidad Social

4.3.3.1. Situación de pobreza o desarrollo humano (S1)

Liu et al. (2021) consideran la evaluación de vulnerabilidad social para hallar el riesgo por inundaciones en áreas urbanas, uno de sus parámetros es la economía de la población. INDECI (2006) considera este parámetro en cuatro (4) niveles como se puede observar en la Tabla 13; se adaptó el parámetro a cinco (5) niveles de evaluación. Se consideró este parámetro debido a que, si la población está en condiciones de pobreza extrema, la vulnerabilidad producida hacia ellas sería más alta en esas situaciones.

Tabla 13.

Parámetros de evaluación de vulnerabilidad económica por INDECI

Variable	Nivel de Vulnerabilidad			
	VB < 25 %	VM 26 a 50 %	VA 51 a 75 %	VMA 76 a 100%
Actividad Económica	Alta productividad y recursos bien distribuidos. Productos para el comercio exterior o fuera de la localidad.	Medianamente productiva y distribución regular de los recursos. Productos para el comercio interior, a nivel local.	Escasamente productiva y distribución deficiente de los recursos. Productos para el autoconsumo.	Sin productividad y nula distribución de recursos.
Acceso al mercado laboral	Oferta laboral > Demanda	Oferta laboral = Demanda	Oferta laboral < Demanda	No hay oferta laboral
Nivel de ingresos	Alto nivel de ingresos	Suficientes niveles de ingresos	Nivel de ingresos que cubre necesidades básicas	Ingresos inferiores para cubrir necesidades básicas
Situación de pobreza o Desarrollo Humano	Población sin pobreza	Población con menor porcentaje pobreza	Población con pobreza mediana	Población con pobreza total o extrema

Nota: Instituto Nacional de Defensa Civil (2006).

4.3.3.2. Programas de capacitación de la población en Prevención y Atención de Desastres (PAD) (S2)

La educación y capacitación de la población en temas de prevención y atención de desastres, contribuye a una mejor organización y mayor participación para reducir los efectos de un desastre (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2006). Si el puente sufre un desborde del caudal del río, afectaría a la población cercana, si estos no están capacitados para prevenir un desastre de este tipo, serían más vulnerables. INDECI propone cuatro (4) niveles para evaluar este parámetro, tal y como se muestra en la Tabla 14.

Se adaptó este parámetro para cinco (5) niveles. El Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción de Riesgo de Desastres (2014) también considera este parámetro y se muestra en la Tabla 15.

Tabla 14.

Parámetros de evaluación de vulnerabilidad educativa por INDECI

Variable	Nivel de Vulnerabilidad			
	VB < 25 %	VM 26 a 50 %	VA 51 a 75 %	VMA 76 a 100%
Programas educativos formales (Prevención y Atención de Desastres – PAD)	Desarrollo permanente de temas relacionados con prevención de desastres	Desarrollo con regular permanencia sobre temas de prevención de desastres	Insuficiente desarrollo de temas sobre prevención de desastres	No están incluidos los temas de PAD en el desarrollo de programas educativos.
Programas de capacitación (educación formal) de la población en PAD	La totalidad de la población está capacitada y preparada ante un desastre	La mayoría de la población se encuentra capacitada y preparada.	La población esta escasamente capacitada y preparada.	No está capacitada ni preparada la totalidad de la población.
Campañas de difusión (TV, radio y prensa) sobre PAD	Difusión masiva y frecuente	Difusión masiva y poco frecuente	Escasa difusión	No hay difusión
Alcance de los programas educativos sobre grupos estratégicos	Cobertura total	Cobertura mayoritaria	Cobertura insuficiente menos la mitad de la población objetivo	Cobertura desfocalizada

Nota: Instituto Nacional de Defensa Civil (2006).

Tabla 15.

Parámetro de capacitación en temas de riesgo del CENEPRED

CAPACITACIÓN EN TEMAS DE GESTIÓN DEL RIESGO
La totalidad de la población no cuenta ni desarrollan ningún tipo de programa de capacitación en tema concernientes a gestión de riesgo
La población esta escasamente capacitada en temas concernientes a Gestión de Riesgos, siendo su difusión y cobertura escasa
La población se capacita con regular frecuencia en temas concernientes a Gestión de Riesgos, siendo su difusión y cobertura mayoritaria
La población se capacita constantemente en temas concernientes a Gestión de Riesgos, siendo su difusión y cobertura local
La población se capacita constantemente en temas concernientes a Gestión de Riesgos, actualizándose, participando en simulacros, siendo su difusión y cobertura total

Nota: Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción de Riesgo de Desastres (2014)

4.3.3.3. Proximidad a centros poblados (S3)

La cercanía a lugares poblados genera mayor vulnerabilidad debido a que si ocurre el desbordamiento o falla del mismo puente por amenazas hidrológicas, esto puede afectar inundando y perjudicando a los pobladores cercanos.

Para los niveles de este parámetro se consideró la Tabla 10 y también recomendaciones de vulnerabilidad económica del Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción de Riesgo de Desastres (2014) que se muestra en la Tabla 16, tomando estos niveles para la matriz de evaluación.

Tabla 16.

Localización de la edificación en exposición económica por CENEPRED

LOCALIZACIÓN DE LA EDIFICACIÓN
Muy cercana 0 km -0.2 km
Cercana 0.2 km – 1 km
Medianamente cercana 1 – 3 km
Alejada 3 – 5 km
Muy alejada > 5 km

Nota: Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción de Riesgo de Desastres (2014).

4.3.3.4. Material de viviendas aledañas a puente (S4)

Según Kuroiwa (2019) la vulnerabilidad de edificaciones en inundaciones depende de su resistencia a presiones hidrostáticas e hidrodinámicas, la resistencia de su cimentación a la erosión, su flotabilidad y su resistencia a la inmersión bajo el agua por algún tiempo. Bajo ese enfoque las construcciones de tierra como tapial o adobe, al estar sumergidas durante algún tiempo, pierden su resistencia y colapsan. Las construcciones de madera o tapial tienen poca resistencia a cargas horizontales, estas se pueden incrementar mediante elementos diagonales; su vulnerabilidad es alta, si la velocidad de inundación es lenta. Si estos elementos como la quincha permanecen inundados por un periodo de tiempo, el barro de la parte inferior se puede restaurar. Las viviendas de ladrillo y concreto armado son resistentes a la inundación y cargas horizontales, pero si el flujo tiene una velocidad mayor a 5 m/s, esta puede erosionar su cimentación y destruir la vivienda. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente y utilizando de referencia el parámetro de la Tabla 17, se propone un parámetro de evaluación de vulnerabilidad hidrológica considerando la resistencia a la inmersión bajo el agua y a fuerzas horizontales de presiones hidrostáticas e hidrodinámicas.

Tabla 17.

Parámetro de material de construcción de edificación de CENEPRED

MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN DE LA EDIFICACIÓN
Estera / cartón Madera Quincha (caña con barro) Adobe o tapia Ladrillo o bloque de cemento

Nota: Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción de Riesgo de Desastres (2014).

4.3.4. Vulnerabilidad Económica

4.3.4.1. Tiempo en funcionamiento del puente (E1)

En el Manual de Puentes 2018 se menciona que un puente definitivo debe ser diseñado para una vida en servicio de 75 años, siendo este el mayor número de años de vida útil (Ministerio de Transportes y Comunicaciones _ b, 2018). El manual de CENEPRED (2014) evalúa la vulnerabilidad en una edificación según su antigüedad, esto se observa en la Tabla 18. Con estos antecedentes se propone un parámetro que evalúe la vulnerabilidad hidrológica de los puentes según su tiempo de funcionamiento.

Tabla 18.

Parámetro de antigüedad de construcción de edificación de CENEPRED

ANTIGÜEDAD DE CONSTRUCCION DE LA EDIFICACIÓN
De 40 a 50 años De 30 a 40 años De 20 a 30 años De 10 a 20 años De 5 a 10 años

Nota: Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción de Riesgo de Desastres (2014).

4.3.4.2. Importancia del puente según su volumen de tráfico vehicular (E2)

Bento et al. (2020) proponen el parámetro de importancia del puente según el volumen de tráfico vehicular para hallar el factor de vulnerabilidad, este considera que a menor cantidad de vehículos que transiten menor vulnerabilidad tiene el puente. Si bien en el Manual de Diseño Geométrico 2018 (en adelante DG 2018) existe la clasificación de las carreteras por demanda, que pueden ser autopistas de primera clase, de segunda clase, carreteras de primera clase, trocha carrozable etc., estas se identifican mediante el IMDA (Índice Medio Diario Anual) y anchos de vía (Ministerio de Transportes y Comunicaciones _ a, 2018). Para realizar el IMDA es necesario mayor inversión de dinero y tiempo; lo cual, para fines prácticos de esta investigación solo se evaluará mediante visita a campo con inspecciones visuales y consultas a usuarios, sobre la importancia del puente y cantidad de flujo vehicular que por el transita.

4.3.4.3. Cierre de puente al tránsito vehicular por riesgo hidrológico (E3)

Kuroiwa (2019) menciona que el estudio de antecedentes de la localidad proporciona valiosa información para el estudio de vulnerabilidad, debido a que indican si en el pasado hubo inundaciones y cuáles son los sectores más afectados. Bento et al. (2020), considera como un parámetro de evaluación de vulnerabilidad, los problemas históricos de socavación de la infraestructura.

Este parámetro es propuesto por el autor, debido a que, en los periódicos de la localidad, se puede obtener datos de cuantas veces en los últimos años, ha sido planeado el cierre o cerrado al tránsito vehicular de un puente, en temporadas de lluvias. Si un puente ha sido planeado su cierre o bien cerrado al tránsito vehicular o peatonal en temporada de lluvias es porque notoriamente tiene una vulnerabilidad y obliga a las autoridades a tomar medidas preventivas. Si no se cuenta con información de periódicos, se consulta a los pobladores que puentes han tenido mayores problemas en relación con eventos hidrológicos. Bajo este enfoque, estos datos brindan información clara sobre la vulnerabilidad de los puentes.

4.3.4.4. Historia de inundaciones (E4)

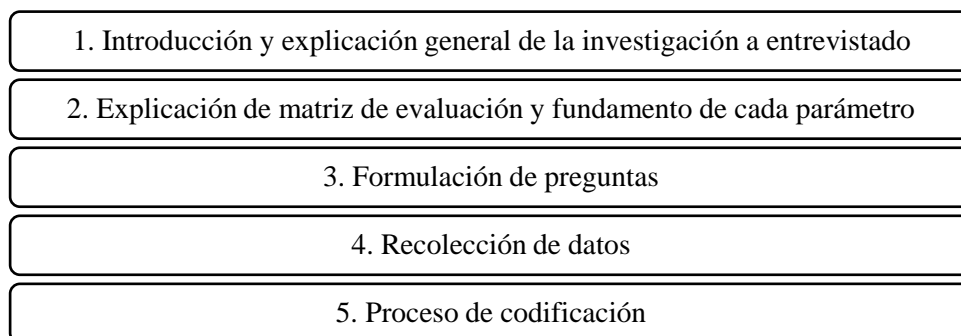
Tomando en cuenta las consideraciones del parámetro E3, si no se cuenta con información periódica sobre si alguna vez fue cerrado el puente al tránsito vehicular por eventos hidrológicos, se consultará a los pobladores cercanos al puente, sobre cuáles de estos han sido afectados en esa situación o han sufrido inundaciones, lo cual otorga información importante respecto a la vulnerabilidad.

4.4. Validación de Matriz de Evaluación

Según la National Defense Research Institute (2009), existen diversos tipos de entrevistas: sin estructura, semiestructuradas y estructuradas. Para fines de la presente investigación, se utilizó las entrevistas semiestructuradas porque se sigue un orden y también fluye la comunicación, lo cual es apropiado para una validación de la matriz de evaluación propuesta. Los entrevistados son expertos en la rama de hidrología e hidráulica. Las entrevistas se realizaron vía reunión virtual por plataformas digitales y también de forma presencial, de acuerdo con la disponibilidad de tiempo del entrevistado, y se les indicó que la reunión era grabada para una correcta recopilación de datos, guardando siempre la confidencialidad de los entrevistados. La estructura de la entrevista semiestructurada se muestra en la Figura 7. La información obtenida por parte de los entrevistados es anónima y confidencial, solo se usó con fines investigativos. Las preguntas formuladas se muestran en la Tabla 19.

Figura 7.

Procedimiento de validación de matriz por juicio expertos mediante entrevista semiestructurada



Nota: Elaboración propia.

Tabla 19.

Preguntas de entrevista semiestructurada para validar matriz de evaluación en puentes

ID	Preguntas
P1	¿En qué medida cree usted, que los criterios presentados permitirían una buena evaluación de diferentes tipos de puentes respecto a su vulnerabilidad hidrológica?
P2	¿Qué recomendaciones podría dar usted para mejorar u optimizar la matriz?
P3	¿Qué recomendaciones daría usted para implementar la evaluación, si es para el caso de una municipalidad provincial y/o entidades públicas, que proceso podría seguir?

Nota: Elaboración propia.

4.4.1. Proceso de codificación

El proceso de codificación de las entrevistas consiste en la selección de datos relevantes de las entrevistas realizadas y dar una interpretación de acuerdo con la respuesta brindada para un correcto análisis de datos. Este análisis de las entrevistas se muestra en la Tabla 20 donde se codifica las respuestas a las preguntas P1 y P2. La transcripción completa de las entrevistas se muestra en el Anexo 1.

Tabla 20.

Codificación de entrevistas sobre matriz de evaluación

Respuesta	Extracto importante	Interpretación
R.1.1.	“... los criterios presentados permitirán realizar una evaluación adecuada...”	Positiva
R.1.2.	“Mejorar el monitoreo de los puentes a través del tiempo, para verificar cada año cómo funciona la matriz”	Recomendación
R.2.1.	“Son criterios óptimos”	Positiva
R.2.2.	“No creo de hacer una optimización”	Positiva
R.3.1.	“... un análisis integral de los sistemas de infraestructura es importantísimo porque eso va a permitir una priorización para intervenirlos”	Positiva

R.3.2.	“... desde la perspectiva hidrológica la matriz es muy consistente ... y refleja un análisis holístico de los puentes”	Positiva
R.4.1.	“Nos permite una evaluación global de los diversos aspectos relacionados con el nivel operativo de un puente...”	Positiva
R.4.2.	“Hay que definir, independientemente de que se analice uno o varios puentes, que número entre 1 y 5 me definen que el puente es vulnerable...”	Recomendación
R.5.1.	“Precisamente para hacer todos estos estudios de vulnerabilidad, peligro y riesgo siempre con lleva una matriz de análisis cualitativo y cuantitativo, tal y como me has indicado...”	Positiva
R.5.2.	“... me parece que están los puntos más básicos”	Positiva
R.6.1.	“... todos los criterios están bien desarrollados...”	Positiva
R.6.2.	“... al momento de hacer el modelo hidráulico, determines con precisión los valores de rugosidad...”	Recomendación

Nota: Elaboración propia.

Las recomendaciones para implementar la matriz en municipios locales u otras entidades se muestra en la Tabla 21, que responden a la pregunta P3.

Tabla 21.

Codificación de entrevistas sobre aplicación de matriz en municipios u otras entidades

Respuesta	Extracto importante	Interpretación
R.1.3.	“... tu matriz de evaluación debe adecuarse y mejorarse para el lugar donde se quiere aplicar la evaluación”	Recomendación
R.2.3.	“No sería implementarlo porque algunas entidades ya tienen”	Recomendación
R.3.3.	“...implementarla de a pocos y elaborar una guía con notas claras y puntos concisos que sirvan de guía para los gobiernos de como implementar ...”	Recomendación
R.4.3.	“Lo primero, es familiarizarse con la metodología, que las personas de la municipalidad la puedan entender...Creo que el gran problema del estado es que planifica para el año, cuando en realidad, hay cosas que probablemente se tiene que pedir los recursos de aquí a dos años, con anticipación, para que llegue oportunamente...”	Recomendación
R.5.3.	“Las recomendaciones para estas entidades es que debes tener todos tus mapas cartográficos desarrollados”	Recomendación
R.6.3.	“Trabajar con el área de estudios... para que lo consideren al momento de evaluar la parte de impacto ambiental y gestión de	Recomendación

riesgos... Y lo pongan como parte de sus procedimientos o manuales...”

Nota: Elaboración propia.

4.4.2. Análisis de la validación

Realizando un análisis de las respuestas brindadas por los expertos, se concluye que los criterios considerados para la evaluación de puentes desde una perspectiva hidrológica son suficientes y representan una posibilidad concreta para analizar su vulnerabilidad de una forma eficaz. Como recomendaciones importantes es mejorar la matriz a través del tiempo, aplicando y mejorando, también hacer una evaluación en el rango entre 1 y 5, para ver desde que puntuación un puente ya se considera vulnerable y determinar con precisión los datos de rugosidad para obtener un modelo hidráulico óptimo.

Se recomienda para la aplicación de la matriz por entidades públicas, elaborar una guía o manual de aplicación y que poco a poco las entidades se familiaricen con la metodología. Y los resultados de estas deben mostrarse de forma clara y concisa mediante gráficos a la población para que estos puedan entender los resultados fácilmente. Además, es importante apuntar que, en caso se adapte la matriz para evaluar puentes en cauces con otras características, debe existir un análisis previo de tal forma que los criterios se adapten al área de estudio.

4.5. Medidas de reducción de la vulnerabilidad

Para las medidas de optimización estructural, se hizo una revisión bibliográfica sobre cómo reducir la vulnerabilidad hidrológica en puentes. Además, la Sección 7.4 muestra las propuestas de optimización para cada puente luego de la evaluación. Respecto a la revisión de literatura, Kuroiwa (2019) recomienda:

En cuencas altas y medias donde es captada la lluvia, Se recomienda la reforestación, que protege el suelo evitando su erosión y además incrementa el efecto esponja de este, el cual retiene el agua y la suelta poco a poco. Construcción de terrazas o andenes y cultivo de surcos con pequeña pendiente, casi paralelos a las curvas de nivel. Estos dos métodos permiten reducir la erosión del suelo y también la emisión de agua. En zonas montañosas permiten reducir los efectos destructivos de los flujos rápidos.

Para cuencas medias y bajas, es necesario dejar libre a ambos lados los planos de inundación que el río tiene como reserva para expandirse cuando se producen lluvias intensas. Para mayor seguridad en caso de inundaciones extraordinarias, se construyen muros de defensa en los límites de los planos de inundación. Las personas que viven aledañas a los ríos arrojan todo tipo de desechos a este, lo que agrava la erosión arrastrando grandes cantidades de materiales y la destrucción de andenes y florestas, si existen. Para reducir el riesgo por

inundación se puede incrementar la capacidad aumentando la profundidad y ancho de río, mediante la técnica de dragado y construyendo diques de defensa. Debido a que la descolmatación de sedimentos es costosa y es repetitiva año a año, se debe conservar en las cuencas medias, los lagos o remansos, o en todo caso si no existen tratar de crearlos si se tiene el espacio suficiente, debido a que amortiguan los golpes de agua y reducen la erosión. Se debe tener cuidado en que depositen demasiados sedimentos.

Los puentes son vulnerables al efecto erosivo de las aguas. Se puede reducir su vulnerabilidad protegiendo la cimentación de las estructuras mediante colocación de material grueso a la profundidad requerida; donde se pueden usar enrocados o gaviones que son mallas de acero rellenas con piedra, para contrarrestar las altas velocidades.

4.5.1. Medidas de emergencia en inundaciones

Kuroiwa (2019) recomienda limpieza adecuada de canales y acequias, evacuación de personas y propiedades muebles de las zonas amenazadas, construcción de defensas o refugios y mejoramiento de las existentes y reprogramación de actividades para reducir las interrupciones producidas por la inundación. El estudio de antecedentes de la localidad puede proporcionar valiosa información, esto se consigue por comunicación oral preguntando entre las personas de mayor edad y también en la revisión de periódicos y/o revistas para saber si han ocurrido inundaciones en el pasado y cuáles fueron los sectores afectados. Delimitadas las zonas de inundación, se debe identificar refugios adecuados para que la población no quede expuesta al peligro, estos refugios se deben ubicar en lugares cercanos por las limitaciones de personas discapacitadas, niños y ancianos.



CAPITULO V

ASPECTOS HIDROLÓGICOS

5.1. Introducción

Es necesario realizar un análisis estadístico de los caudales históricos del río en estudio para obtener el caudal de diseño para el modelamiento hidráulico, con el cual podremos analizar el parámetro de la matriz de evaluación Características geométricas -Altura del puente de manera cuantitativa. Al ser un río aforado, se utilizará los datos brindados por la entidad correspondiente, también se considerará caudales adicionales de torrenteras anexas mediante el software HEC-HMS y se calibrará con videos de inundaciones previas. Asimismo, se hará uso del software libre Hidroesta 2.0.

5.2. Caudales del río Chili

Se solicitó información histórica a AUTODEMA. La entidad brindó datos desde el año 2005 hasta octubre de 2022. Los datos desde 1960 al 2004 se extrajeron de la tesis de Espinoza (2019). De esta manera se tiene mayores datos para un análisis estadístico adecuado. Los caudales máximos anuales para el análisis estadístico se muestran en la Tabla 22 y los caudales máximos mensuales brindados por la entidad en el Anexo 2.

Tabla 22.

Caudales máximos anuales del río Chili

Año	Caudales Máximos Anuales (m^3/s)
1960	59.34
1961	82.96
1962	146.52
1963	146.16
1964	40.58
1965	29.16
1966	43.26
1967	78.51
1968	104.97
1969	63.06
1970	69.22
1971	78.16
1972	197.06
1973	183.94
1974	80.43
1975	112.8
1976	86.75
1977	106.84
1978	50.08
1979	9.7
1980	9.16
1981	80.08

1982	17.06
1983	9.21
1984	139.4
1985	88.58
1986	157.62
1987	41.19
1988	52.95
1989	50.67
1990	10.93
1991	108.75
1992	10.54
1993	59.84
1994	197.81
1995	14.99
1996	16.66
1997	19.37
1998	22.48
1999	179.24
2000	85.43
2001	174
2002	208.33
2003	45.99
2004	108.25
2005	62.84
2006	95.95
2007	24.34
2008	23.81
2009	97.65
2010	13.07
2011	137.35
2012	236.64
2013	107.3
2014	23.12
2015	28.78
2016	81.99
2017	46.47
2018	64.70
2019	145.64
2020	125.97
2021	63.63
2022	21.89

Nota: Adaptado de AUTODEMA (2022) y Espinoza (2019).

5.3. Análisis estadístico de caudales

Con los datos históricos, se realizó un análisis de consistencia y datos dudosos. Primero se obtuvo los parámetros estadísticos que se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23.

Parámetros estadísticos de datos históricos

Nº	AÑO	ORDEN	QMax	log(QMax)
1	1960	38	59.3	1.7733
2	1961	26	83.0	1.9189
3	1962	9	146.5	2.1659
4	1963	10	146.2	2.1648
5	1964	46	40.6	1.6083
6	1965	47	29.2	1.4648
7	1966	44	43.3	1.6361
8	1967	30	78.5	1.8949
9	1968	20	105.0	2.0211
10	1969	35	63.1	1.7998
11	1970	32	69.2	1.8402
12	1971	31	78.2	1.8930
13	1972	4	197.1	2.2946
14	1973	5	183.9	2.2647
15	1974	28	80.4	1.9054
16	1975	15	112.8	2.0523
17	1976	24	86.8	1.9383
18	1977	19	106.8	2.0287
19	1978	41	50.1	1.6997
20	1979	61	9.7	0.9868
21	1980	63	9.2	0.9619
22	1981	29	80.1	1.9035
23	1982	55	17.1	1.2320
24	1983	62	9.2	0.9643
25	1984	12	139.4	2.1443
26	1985	23	88.6	1.9473
27	1986	8	157.6	2.1976
28	1987	45	41.2	1.6148
29	1988	39	53.0	1.7239
30	1989	40	50.7	1.7048
31	1990	59	10.9	1.0386
32	1991	16	108.8	2.0364
33	1992	60	10.5	1.0228
34	1993	37	59.8	1.7770
35	1994	3	197.8	2.2962
36	1995	57	15.0	1.1758
37	1996	56	16.7	1.2217
38	1997	54	19.4	1.2871
39	1998	52	22.5	1.3518
40	1999	6	179.2	2.2534
41	2000	25	85.4	1.9316
42	2001	7	174.0	2.2405
43	2002	2	208.3	2.3188
44	2003	43	46.0	1.6627
45	2004	17	108.3	2.0344

Mínimo valor histórico registrado

46	2005	36	62.8	1.7982
47	2006	22	96.0	1.9820
48	2007	49	24.3	1.3863
49	2008	50	23.8	1.3768
50	2009	21	97.7	1.9897
51	2010	58	13.1	1.1163
52	2011	13	137.3	2.1378
53	2012	1	236.6	2.3741
54	2013	18	107.3	2.0306
55	2014	51	23.1	1.3640
56	2015	48	28.8	1.4591
57	2016	27	82.0	1.9138
58	2017	42	46.5	1.6672
59	2018	33	64.7	1.8109
60	2019	11	145.6	2.1633
61	2020	14	126.0	2.1003
62	2021	34	63.6	1.8037
63	2022	53	21.9	1.3402
Numero de datos n			63	63
Suma Σ			5079.2	111.2090
Máximo			236.6	2.3741
Mínimo			9.2	0.9619
Promedio \bar{x}			80.6	1.7652
Desviación estándar s			58.0814	0.3893
Coefficiente asimetría Cs			0.7779	-0.5533
Cs/6 k			0.1297	-0.0922

Máximo valor histórico registrado

Nota: Elaboración propia.

Con los parámetros estadísticos, se aplicó el Método de Water Resources Council, para el cual, primero se halla un valor K_n de la Figura 8, con ese valor y parámetros se obtiene el rango de valores límites donde deben estar los datos históricos, si un valor supera los límites, se le considera dato dudoso y es retirado del análisis.

Figura 8.

Valores K_n para la prueba de datos dudosos

Tamaño de muestra n	K_n	Tamaño de muestra n	K_n	Tamaño de muestra n	K_n	Tamaño de muestra n	K_n
10	2.036	24	2.467	38	2.661	60	2.837
11	2.088	25	2.486	39	2.671	65	2.866
12	2.134	26	2.502	40	2.682	70	2.893
13	2.175	27	2.519	41	2.692	75	2.917
14	2.213	28	2.534	42	2.700	80	2.940
15	2.247	29	2.549	43	2.710	85	2.961
16	2.279	30	2.563	44	2.719	90	2.981
17	2.309	31	2.577	45	2.727	95	3.000
18	2.335	32	2.591	46	2.736	100	3.017
19	2.361	33	2.604	47	2.744	110	3.049
20	2.385	34	2.616	48	2.753	120	3.078
21	2.408	35	2.628	49	2.760	130	3.104
22	2.429	36	2.639	50	2.768	140	3.129
23	2.448	37	2.650	55	2.804		

Fuente: U. S. Water Resources Council, 1981. Esta tabla contiene valores de K_n de un lado con un nivel de significancia del 10% para la distribución normal.

Nota: Chow et al. (1994).

En la Tabla 24, se muestra el rango de datos donde el valor máximo es 752.6 y mínimo 4.5 m³/s. Se corroboró que todos los valores históricos están dentro de este rango, por lo cual, se deduce que no existen datos dudosos.

Tabla 24.

Prueba de datos dudosos por el Método Water Resources Council

PRUEBA DE DATOS DUDOSOS (Método Water Resources Council)	
n =	63
Kn =	2.8544 *
<i>Kn: valor recomendado, varía según el valor de n (significancia: 10%)</i>	
Umbral de datos dudosos altos (xH: unid. logarítmicas)	
	xH = 2.88
Caudal máximo aceptado	$PH = 10^{xH}$
	PH = 752.6 m³/s
Umbral de datos dudosos bajos (xL: unid. logarítmicas)	
	xL = 0.65
Caudal mínimo aceptado	$PL = 10^{xL}$
	PL = 4.5 m³/s

Nota: Elaboración propia.

Para el análisis estadístico se utilizó el Software Hidroesta 2.0 que utiliza la prueba de bondad de ajuste de Smirnof - Kolgomorov, usando un nivel de significancia de 0.05. El Manual de Hidrología del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008) recomienda utilizar algunas funciones de distribución de probabilidad teóricas, las cuales fueron utilizadas en el software mencionado y se halló el delta teórico para cada uno. Estos se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25.

Delta teórico para tipos de distribución del Manual de Hidrología del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018)

Distribución	Delta teórico (parámetros ordinarios)
Normal	0.0937
Log Normal 2 parámetros	0.113
Log Normal 3 parámetros	0.0917
Gamma 2 parámetros	0.0807
Gamma 3 parámetros	0.0764
Log Pearson Tipo III	no se ajustan
Gumbel	0.0917
Log Gumbel	0.1761

Nota: Elaboración propia.

La distribución Gamma 3 parámetros tiene el menor delta teórico con un valor de 0.0764, por lo tanto, se halla con esta distribución los caudales de diseño para el periodo de retorno planteado.

5.3.1. Periodo de retorno de la avenida de diseño

Para la elección del periodo de retorno de la avenida de diseño se considera dependiente directamente del riesgo que se considere aceptable (Kuroiwa , 2019). Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008), en el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje, se presenta un cuadro de periodos de retorno “T”, de acuerdo al riesgo permisible “R” y para vida útil de la obra “n”. Este cuadro se presenta en la Tabla 26. Se basa en la formula:

$$R = 1 - (1 - 1/T)^n$$

Tabla 26.

Cuadro de riesgos en porcentaje

Riesgo admisible R	VIDA ÚTIL DE LAS OBRAS (n años)									
	1	2	3	5	10	20	25	50	100	200
0.01	100	199	299	498	995	1990	2488	4975	9950	19900
0.02	50	99	149	248	495	990	1238	2475	4950	9900
0.05	20	39	59	98	195	390	488	975	1950	3900
0.10	10	19	29	48	95	190	238	475	950	1899
0.20	5	10	14	23	45	90	113	225	449	897
0.25	4	7	11	18	35	70	87	174	348	695
0.50	2	3	5	8	15	29	37	73	154	289
0.75	1.3	2	2.7	4.1	7.7	15	18	37	73	144
0.99	1	1.11	1.27	1.66	2.7	5	5.9	11	22	44

Nota: Extraído de MONSALVE (1999) citado en Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008).

Asimismo, en el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje, mencionan que el nivel máximo de riesgo admisible para puentes es de 25% y vida útil de 40 años, para obtener la luz del puente y nivel de aguas máximas, y se recomienda un periodo de retorno “T” de 500 años para calculo de socavación. Además, mencionan que para el periodo de retorno se debe tener en cuenta la importancia y vida útil de la obra (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008). En el Manual de Puentes indica que el periodo de retorno depende de la importancia del puente y del riesgo admisible de falla (Ministerio de Transportes y Comunicaciones _ b, 2018), con lo cual es necesario realizar un análisis respecto al periodo de retorno a utilizar para hallar el Nivel de Aguas Maximas Extraordinarias (en adelante NAME) y socavación. Este análisis se observa en la Tabla 27, donde el Manual de Hidrología recomienda para hallar el NAME un periodo de retorno de 140 años, sin embargo, se considera tambien para el análisis, por ser puentes permanentes una vida útil de 75 años y por la importancia de los mismos un riesgo admisible de 14 % y así se obtiene un periodo de retorno aproximado de 500 años. Se analizará inicialmente con estos periodos de retorno.

Tabla 27.

Periodo de retorno en función de riesgo y vida útil

		Riesgo asumido de excedencia (R)					
		Porcentaje					
		0.1	0.14	0.15	0.2	0.25	0.5
Vida útil	años						
	10	95	67	62	45	35	15
	15	143	100	93	68	53	22
	20	190	133	124	90	70	29
	25	238	166	154	113	87	37
	30	285	199	185	135	105	44
	40	380	266	247	180	140	58
	50	475	332	308	225	174	73
	60	570	398	370	269	209	87
	70	665	465	431	314	244	101
75	712	498	462	337	261	109	
100	950	664	616	449	348	145	

Nota: Elaboración propia.

5.3.2. Caudal de río Chili

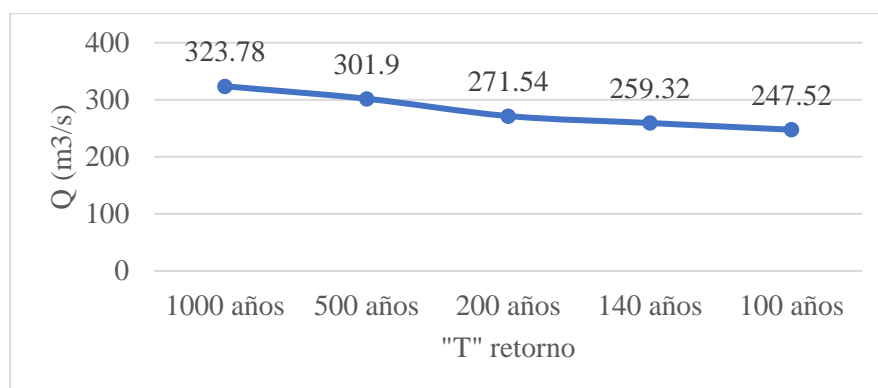
Se utiliza la distribución Gamma 3 parámetros por haber obtenido el menor delta teórico y se utiliza el Software Hidroesta 2.0 para hallar los caudales para distintos periodos de retorno entre ellos 140 y 500 años, los cuales se muestran en la Tabla 28 y de manera gráfica en la Figura 9.

Tabla 28.

Caudales en función de datos históricos

T (Periodo de retorno)	Q (m³/s)
1000 años	323.78
500 años	301.90
200 años	271.54
140 años	259.32
100 años	247.52

Nota: Elaboración propia.

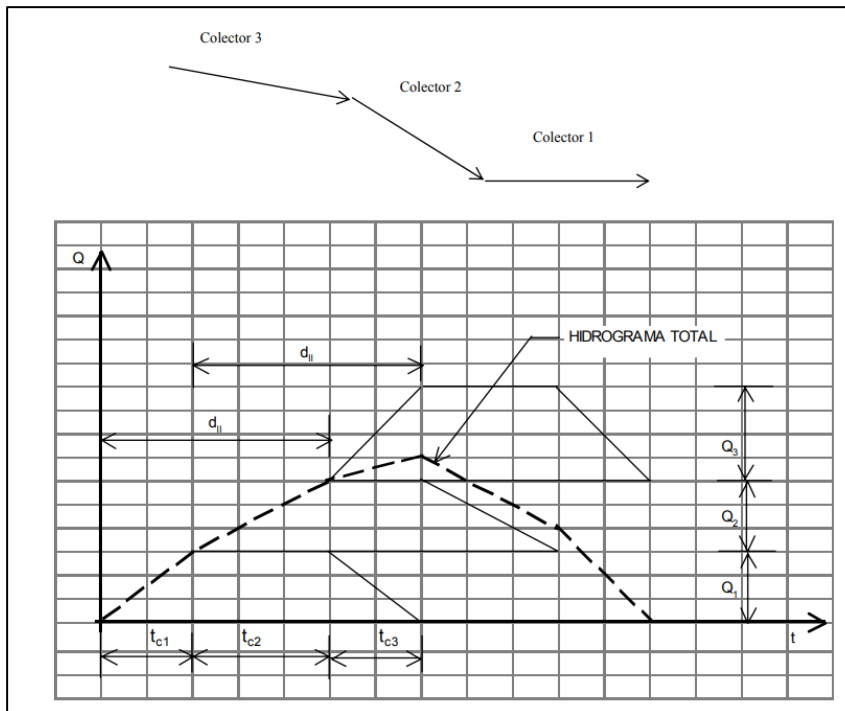
Figura 9.*Variación de caudal considerando distintos periodos de retorno*

Nota: Elaboración propia.

Al analizar la Figura 9 se deduce que el caudal para un periodo de retorno de 500 años es de 301.9 m³/s y no se diferencia mucho del de 1000 años que es 323.78 m³/s, además es cercano al valor máximo histórico de 236.64 m³/s que ocurrió en el año 2012. Sin embargo, estas mediciones de flujo se realizan aguas arriba de los puentes y no se considera la influencia de los caudales de las quebradas anexas al río que influyen directamente en el aumento de caudal aguas abajo. Entonces, se consideró la investigación realizada por Ramos & Saldivar (2022) que hallaron valores de caudales de torrenteras que desembocan en el río Chili en su margen izquierda, sin embargo, en su modelamiento no se considera una suma de los hidrogramas de diseño que muestre como aumenta el caudal del río mientras va aguas abajo. Tomando en consideración lo mencionado, se realizó un modelamiento en el software HEC-HMS con los datos de las cuencas, precipitaciones, tiempos de concentración, abstracción inicial, lag time, número de curva e impermeabilidad del estudio de Ramos & Saldivar (2022) que se muestran en el Anexo 3. En el modelo se suma los hidrogramas para colectores consecutivos, mediante la metodología mencionada en Breña (2003) como se observa en la Figura 10, que consiste en retardar el inicio de la tormenta aguas arriba el tiempo de concentración de la cuenca actual, este procedimiento inicia de aguas abajo hacia aguas arriba.

Figura 10.

Metodología para sumar Hidrogramas en Colectores Consecutivos

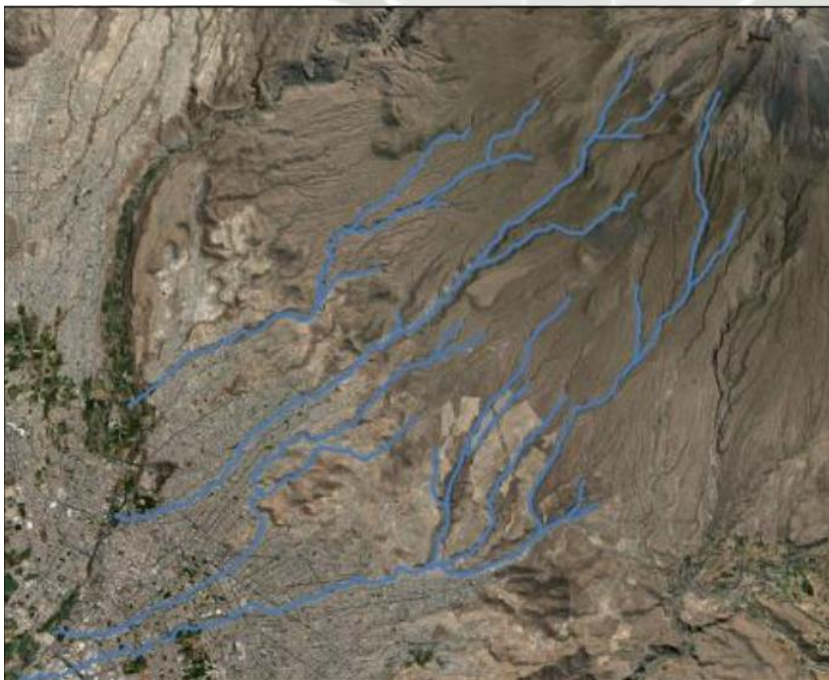


Nota: Breña (2003).

Ramos & Saldivar (2022) estudiaron las quebradas Del Pato, San Lázaro, Venezuela y Los Incas, respectivamente, estas se observan en la Figura 11.

Figura 11.

Quebradas consideradas para el caudal de modelamiento HEC-HMS

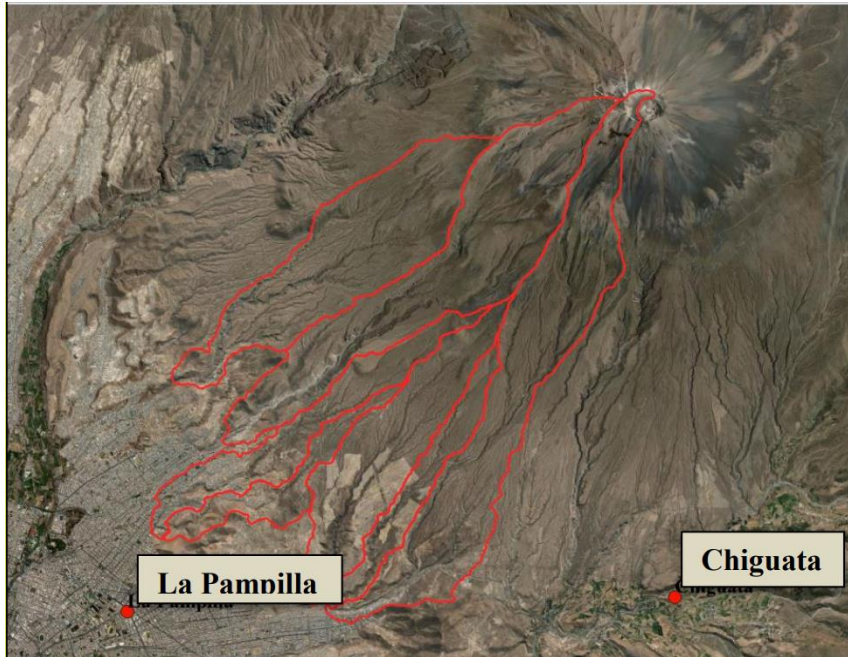


Nota: Ramos & Saldivar (2022).

Las cuencas de las quebradas fueron divididas en microcuencas para un adecuado modelamiento hidrológico, siendo el orden ascendente a descendente de la siguiente manera: Del Pato, San Lázaro, Venezuela A y B y los Incas A, B y C y usaron como estaciones meteorológicas: La Pampilla y Chiguata, como se observa en la Figura 12.

Figura 12.

Quebradas consideradas para el caudal de modelamiento



Nota: Ramos & Saldivar (2022).

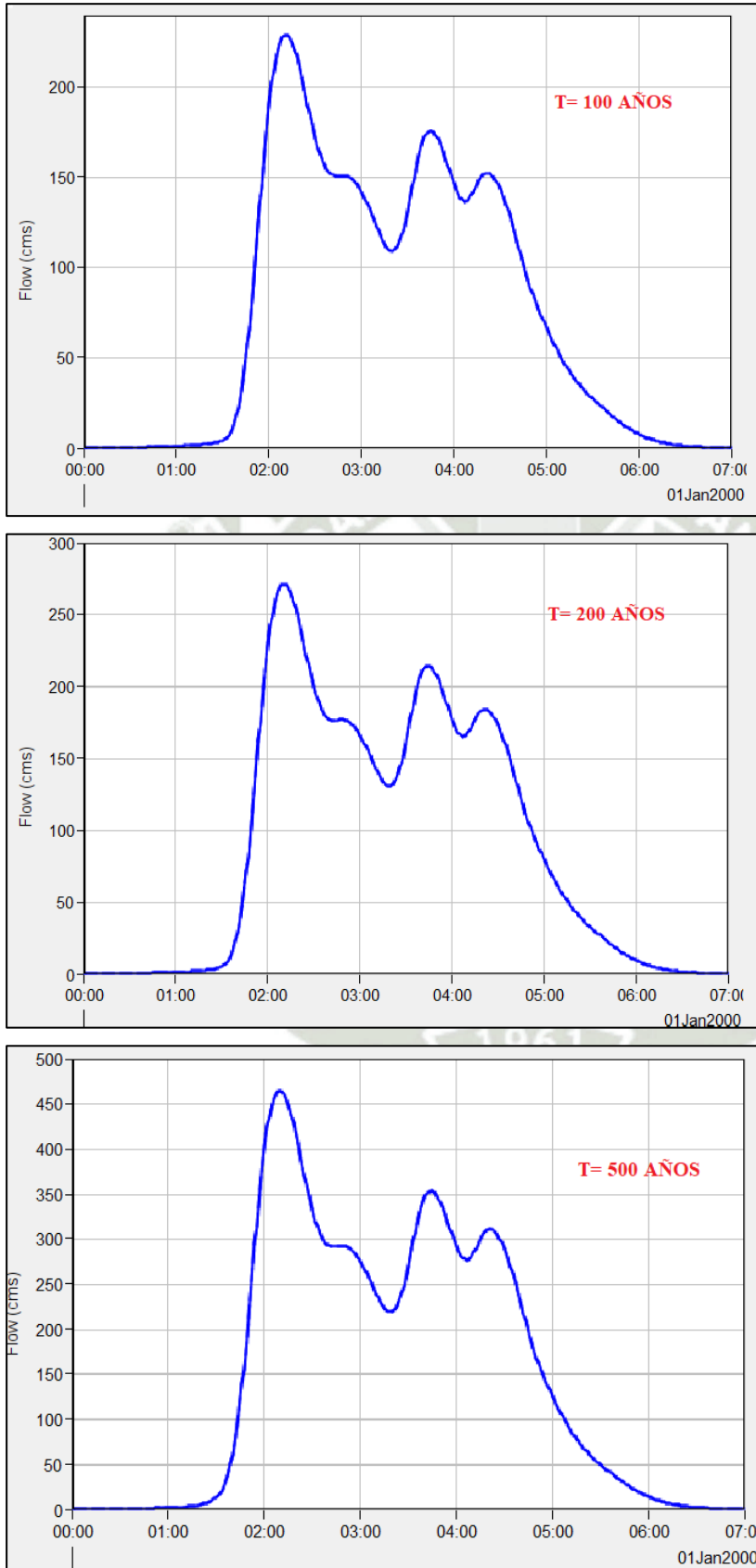
5.3.3. Modelamiento en HEC-HMS

En el Software HEC-HMS, para las curvas IDF, se utilizó la fórmula de Dick Peschke, considerando una duración de tormenta de 3 horas, que equivalen a 180 minutos. Luego se elaboró hietogramas de diseño mediante el Metodo de Bloques Alternos para las quebradas estudiadas cada 10 minutos. Para el modelamiento hidrológico, se ingresaron los datos obtenidos usando como LOSS METHOD, el modelo Número de Curva del SCS (SCS Curve Number) y como TRANSFORM METHOD el modelo de hidrograma unitario sintético del SCS (SCS Unit Hydrograph). Se colocó un intervalo de cómputo de 1 minuto.

Se obtuvo los siguientes hidrogramas luego de unirse la quebrada Los Incas, que es la última en el tramo. Estos se muestran en la Figura 13 para periodos de retorno de 100, 200 y 500 años, respectivamente.

Figura 13.

Hidrogramas aguas abajo en HEC-HMS para periodos de 100, 200 y 500 años



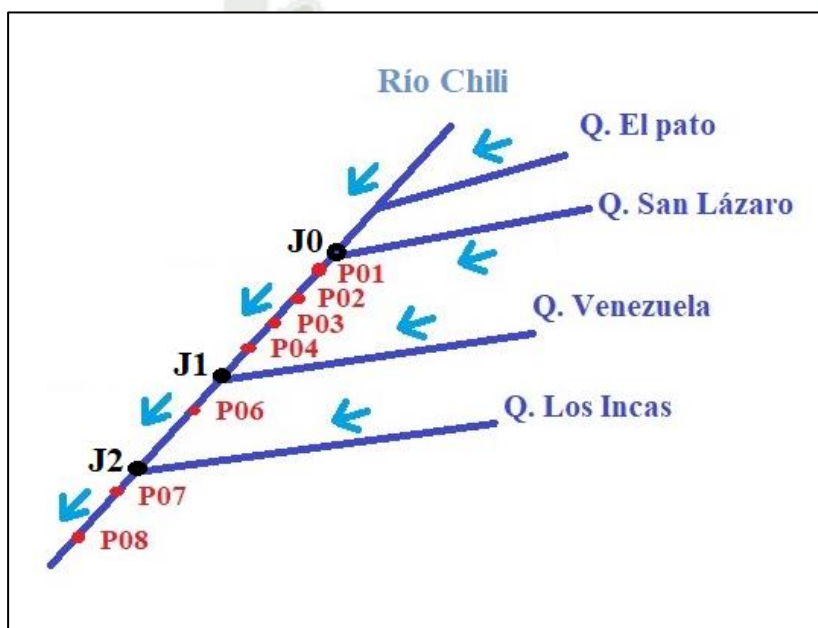
Nota: Elaboración propia.

5.3.4. Caudal de Modelamiento para HEC-RAS

Se realizó un análisis de caudales para el modelamiento hidráulico; el cual consiste en sumar directamente al caudal del río, la cantidad que desemboca en los puntos J0, J1 y J2, respectivamente. El caudal que desembocan en J0, J1 y J2, se obtiene del modelamiento en HEC HMS. Se muestra el modelo de manera grafica en la Figura 14 y los caudales de modelamiento en la Tabla 29.

Figura 14.

Modelo de distribución de caudales para cada puente



Nota: Elaboración propia.

Tabla 29.

Caudal de modelamiento para HEC-RAS según su periodo de retorno

TRAMO	CAUDAL DE MODELAMIENTO (m ³ /s)		
	Periodo de retorno (años)		
	100	200	500
Río	247.52	271.54	301.9
J0	140.9	170.7	288.6
J1	158.8	194.6	321.4
J2	229	271.5	464.2
P 01. 02. 03 y 04	388.42	442.24	590.5
P 05 y 06	406.32	466.14	623.3
P 07 y 08	476.52	543.04	766.1

Nota: Elaboración propia.

Considerando un margen de seguridad en cuestión de riesgo para los puentes, se vio conveniente utilizar un periodo de retorno de 500 años (tiempo de vida útil de 75 años y riesgo de 14%) para el modelamiento hidráulico debido a la importancia de los puentes estudiados. Así mismo, los caudales utilizados se corroboraron con videos de una maxima avenida ocurrida el 2012 en el tramo de estudio. Se obtuvo entonces, que los caudales de modelamiento para los puentes 01, 02, 03 y 04, es 590.5 m³/s; para los puentes 05 y 06, 623.3 m³/s y 766.1 m³/s para los puentes 07 y 08.





CAPITULO VI

ASPECTOS HIDRAÚLICOS

6.1. Introducción

Se realiza el modelamiento hidráulico para poder evaluar el parámetro de altura de gálibo e inundación, necesario para hallar la vulnerabilidad de los puentes. Primero se estudia la normativa peruana en cuanto a estudios hidrológicos e hidráulicos y se extrae las recomendaciones para el modelamiento. Con estas recomendaciones se consiguen los datos necesarios como son el coeficiente de rugosidad por el Método de Cowan y el levantamiento topográfico del área de estudio y puentes. Se utiliza el software Civil 3D para exportar la topografía en formato Tiff al programa HEC-RAS, en el cual con los demás datos se realiza el modelo y se muestran los resultados.

6.2. Recomendaciones del Ministerio de Transportes y Comunicaciones

Para el levantamiento topográfico, si no produce contracción del flujo de avenida y tiene una pendiente pronunciada, la topografía será 8 veces el ancho del cauce principal aguas arriba y 4 veces, aguas abajo. El levantamiento topográfico no debe ser menor a 150.00 m. aguas arriba y aguas abajo del eje del puente (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008). Al estar los puentes cercanos entre sí, se modelará en un solo modelamiento los 8 puentes en estudio, no modelando el puente De Fierro por ser muy alto y no correr con riesgo de inundación.

6.3. Datos para modelamiento hidráulico

6.3.1. Levantamiento Topográfico de cauce

Para el levantamiento topográfico de cauce de río se solicitó información a la ANA que hizo un levantamiento topográfico de la faja marginal del río Chili en el año 2015. Sin embargo, al no contrastar el área inundable aledaña, se sobrepuso el levantamiento de cauce sobre un DEM de imagen satelital ALOS PALSAR de 12.5 m (ASF DAAC, 2010), teniendo así una topografía adecuada para el modelamiento hidráulico. Para la generación del ráster se utilizó el software CIVIL 3D, donde se exportó la superficie topográfica a un archivo TIFF para ser utilizado en HEC-RAS, el cual se observa en la Figura 15.

Figura 15.

Topografía para modelamiento de tramo de estudio en formato TIFF



Nota: Adaptado de ASF DAAC (2010) y ANA (2015).

El archivo TIFF se importa al Software HEC RAS mediante el comando RAS Mapper, en el cual se define el río, las riberas y los límites de llanuras de inundación. Para las secciones de tramo de estudio se realizó cada 100 m de separación entre ellos y con un ancho de 120 m. Sin embargo, en ciertos tramos del cauce es necesario añadir más secciones para tener una correcta continuidad de caudal en el mismo.

6.3.2. Coeficientes de rugosidad en el tramo de estudio

Para hallar los coeficientes de rugosidad, se tomó como punto de partida la investigación realizada por Concha & Miranda (2016) donde utilizaron el método de Cowan y realizaron un análisis exhaustivo de los coeficientes para el mismo tramo de estudio de esta investigación. Los datos hallados por ellos fueron verificados y validados en campo. Adicionalmente se halló por el mismo método los coeficientes para las secciones adicionales consideradas. Los coeficientes de modelamiento se muestran en la Tabla 30.

Tabla 30.

Coefficientes de rugosidad para modelamiento

Sección		Izq.	medio	derecha
7600	n	0.053	0.053	0.053
7499	n	0.053	0.053	0.053
7421.28	n	0.053	0.043	0.053
7400	n	0.043	0.043	0.043
7382.29	n	0.053	0.053	0.053
7376.74	Bridge			
7370.8	n	0.053	0.043	0.053
7353.11	n	0.053	0.048	0.053
7299.999	n	0.048	0.048	0.048
7269.59	n	0.058	0.053	0.058
7260.67	n	0.058	0.053	0.058
7254	Bridge			
7247.59	n	0.058	0.053	0.058
7234.2	n	0.058	0.053	0.058
7200	n	0.058	0.053	0.058
7100	n	0.053	0.043	0.053
7000	n	0.053	0.043	0.053
6900	n	0.048	0.048	0.048
6799.99	n	0.058	0.058	0.058
6752.19	n	0.058	0.053	0.058
6745.84	n	0.058	0.053	0.058
6738.26	Bridge			
6731.43	n	0.053	0.043	0.053
6720.25	n	0.053	0.043	0.053
6700	n	0.053	0.043	0.053
6600	n	0.053	0.043	0.053
6499	n	0.053	0.043	0.053
6400	n	0.053	0.043	0.053
6350.68	n	0.053	0.053	0.058
6326.1	n	0.053	0.043	0.058
6299.99	n	0.053	0.043	0.058
6199.99	n	0.058	0.053	0.058
6154.87	n	0.058	0.053	0.058
6127.86	n	0.058	0.053	0.058
6113.74	n	0.053	0.043	0.058
6100	n	0.053	0.043	0.058
6036.16	n	0.053	0.043	0.058
6017.96	n	0.053	0.043	0.053
5999.99	n	0.053	0.043	0.053
5992.29	n	0.053	0.043	0.058
5985.86	n	0.053	0.043	0.058
5980.69	Bridge			
5975.25	n	0.048	0.048	0.048

5966.94	n	0.058	0.058	0.058
5929.88	n	0.053	0.043	0.053
5900	n	0.058	0.053	0.058
5853.56	n	0.043	0.043	0.043
5799.99	n	0.053	0.043	0.053
5756.16	n	0.053	0.043	0.053
5700	n	0.053	0.043	0.053
5599	n	0.053	0.043	0.053
5549.28	n	0.053	0.043	0.053
5499.99	n	0.053	0.043	0.053
5399.99	n	0.053	0.043	0.053
5300	n	0.053	0.043	0.053
5244.52	n	0.053	0.043	0.053
5199.99	n	0.053	0.043	0.053
5149.31	n	0.053	0.043	0.053
5100	n	0.053	0.043	0.053
5046.86	n	0.053	0.043	0.053
5000	n	0.053	0.043	0.053
4899.99	n	0.058	0.048	0.058
4799.99	n	0.058	0.048	0.058
4753.35	n	0.048	0.043	0.048
4699.99	n	0.053	0.043	0.053
4599.99	n	0.058	0.053	0.058
4500	n	0.058	0.053	0.058
4400	n	0.048	0.043	0.048
4340.54	n	0.058	0.043	0.058
4331.06	n	0.053	0.043	0.053
4321.45	Bridge			
4312.2	n	0.053	0.043	0.053
4300	n	0.053	0.043	0.053
4200	n	0.053	0.043	0.053
4100	n	0.053	0.043	0.053
4000	n	0.053	0.043	0.053
3900	n	0.053	0.043	0.053
3846	n	0.053	0.043	0.053
3800	n	0.053	0.043	0.053
3700	n	0.053	0.043	0.053
3600	n	0.053	0.043	0.053
3500	n	0.053	0.043	0.053
3400	n	0.053	0.043	0.053
3300	n	0.053	0.043	0.053
3200	n	0.053	0.043	0.053
3100	n	0.053	0.043	0.053
3000	n	0.048	0.043	0.048
2900	n	0.048	0.043	0.048
2800	n	0.048	0.043	0.048

2700	n	0.048	0.043	0.048
2600	n	0.048	0.043	0.048
2500	n	0.053	0.043	0.053
2400	n	0.053	0.043	0.053
2300	n	0.048	0.043	0.048
2200	n	0.048	0.043	0.048
2100	n	0.048	0.043	0.048
2000	n	0.048	0.043	0.048
1992.92	n	0.058	0.048	0.058
1987.26	Bridge			
1981.87	n	0.058	0.048	0.058
1971.38	n	0.058	0.048	0.058
1899	n	0.058	0.048	0.058
1799	n	0.048	0.048	0.048
1700	n	0.058	0.048	0.053
1600	n	0.053	0.048	0.058
1500	n	0.053	0.048	0.058
1400	n	0.058	0.043	0.058
1300	n	0.058	0.043	0.058
1200	n	0.058	0.043	0.058
1100	n	0.058	0.043	0.058
1000	n	0.058	0.043	0.058
948.4	n	0.058	0.043	0.058
918.83	n	0.058	0.043	0.058
895.15	n	0.058	0.043	0.058
863.15	n	0.058	0.043	0.058
831.66	n	0.058	0.043	0.058
820.98	n	0.058	0.043	0.058
799.99	n	0.058	0.043	0.058
773.51	n	0.058	0.043	0.058
753.53	n	0.058	0.043	0.058
742.28	n	0.058	0.043	0.058
733.77	n	0.058	0.043	0.058
718.84	n	0.058	0.043	0.058
700	n	0.058	0.043	0.058
600	n	0.058	0.043	0.058
500	n	0.058	0.043	0.058
400	n	0.058	0.043	0.058
387.34	n	0.058	0.043	0.058
380.75	n	0.048	0.048	0.048
376.1	Bridge			
370.14	n	0.048	0.043	0.048
363.68	n	0.048	0.043	0.048
300	n	0.048	0.043	0.048
200	n	0.048	0.043	0.048
100	n	0.048	0.043	0.048

Nota: Elaboración propia.

6.3.3. Datos de puentes para modelamiento

Primero es necesario ubicar las progresivas de los puentes, las cuales se muestran en la Tabla 31.

Tabla 31.

Progresiva de cada puente a modelar

ID	Puente	Progresivas
P01	Grau	7376.74
P02	Bajo Grau	7254.06
P03	Bolognesi	6738.26
P04	San Martín	5980.69
P06	San Isidro	4321.45
P07	Tingo	1987.26
P08	Bailey	376.1

Nota: Elaboración propia.

Concha & Miranda (2016) realizaron la medida de algunos de puentes del mismo tramo de estudio, los cuales fueron verificados en campo, excepto la del puente Bailey que estaba en construcción en ese entonces, por lo cual fue necesario medir el puente en campo. Las medidas de los puentes se muestran gráficamente en el Anexo 4. En la Tabla 32 se muestra el ancho y largo de cada puente.

Tabla 32.

Ancho y largo de los puentes en estudio

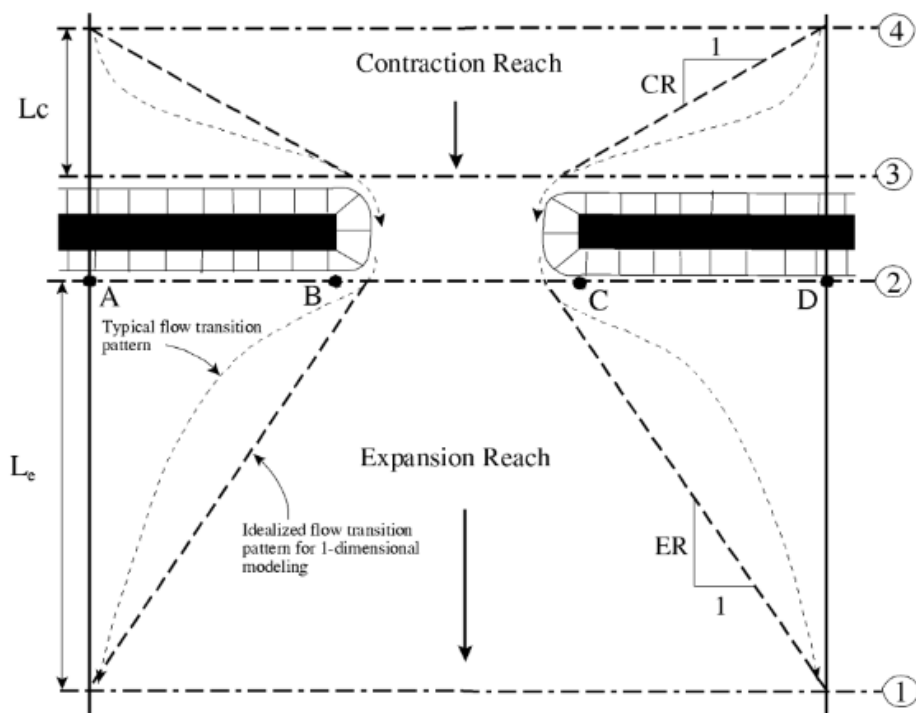
ID	Puente	Ancho (m)	Largo (m)
P01	Grau	8.7	66.4
P02	Bajo Grau	10.8	51.3
P03	Bolognesi	10.5	83.1
P04	San Martín	9.1	37.28
P06	San Isidro	11	72.1
P07	Tingo	8	69.28
P08	Bailey	7.4	46

Nota: Adaptado de Concha & Miranda (2016).

Es necesario ubicar las progresivas de las secciones 4, 3, 2 y 1, de modelamiento en puentes como muestra la Figura 16.

Figura 16.

Ubicación de sección transversal de un puente en HEC RAS



Nota: USACE (2022).

Las progresivas de las secciones 3 y 2, se ubican a 1 metro aguas arriba y abajo respectivamente del borde del puente, las progresivas halladas se muestran en la Tabla 33.

Tabla 33.

Progresivas de secciones 3 y 2 de puentes

ID	Puente	Secciones	
		3	2
P01	Grau	7382.09	7371.39
P02	Bajo Grau	7260.46	7247.66
P03	Bolognesi	6744.51	6732.01
P04	San Martín	5986.24	5975.14
P06	San Isidro	4327.95	4314.95
P07	Tingo	1992.26	1982.26
P08	Bailey	380.8	371.4

Nota: Elaboración propia.

La sección 4 se halla mediante la longitud de contracción, primero se tiene que obtener la longitud de obstrucción que es el promedio de las longitudes de los estribos a cada lado del puente y el ratio de contracción que se halla mediante la pendiente, esto se observa en la Tabla 34.

$$LC = L \text{ obstruccion} \times RC$$

Tabla 34.

Radio de contracción

Ratio de Contracción (RC)			
So(pie/milla)	nob/nc=1	nob/nc=2	nob/nc=4
1	1.0-2.3	0.8-1.7	0.7-1.3
5	1.0-1.9	0.8-1.5	0.7-1.2
10	1.0-1.9	0.8-1.4	0.7-1.2

Nota: Extraído de USACE citado en Concha & Miranda (2016).

Con los datos de pendiente y coeficientes de rugosidad se halla el ratio de contraccion RC, esto se observa en la Tabla 35.

Tabla 35.

Cálculo de RC de cada puente

ID	Puente	So (pie/milla)	norilla	ncauce	nor/nc	RC
P01	Grau	124.7	0.043	0.043	1	1.45
P02	Bajo Grau	107.08	0.043	0.043	1	1.45
P03	Bolognesi	0	0.053	0.048	1.10	1.65
P04	San Martín	213.62	0.058	0.053	1.09	1.45
P06	San Isidro	105.6	0.048	0.043	1.12	1.45
P07	Tingo	35.2	0.048	0.043	1.12	1.45
P08	Bailey	128.546	0.048	0.043	1.12	1.45

Nota: Adaptado de Concha & Miranda (2016).

Para obtener la longitud de expansión “LE”, es necesario hallar el ratio de expansión se utilizo la Tabla 36, donde primero, se halla la longitud entre bordes de estribos y la longitud de tramo del puente para hallar b/B. Luego de obtener el RE se multiplica por la longitud de obstrucción.

$$LE = L \text{ obstruccion } \times RE$$

Tabla 36.

Radio de expansión

Ratio de Expansión (RE)				
b/B	So(pie/milla)	nob/nc=1	nob/nc=2	nob/nc=4
0.1	1	1.4-3.6	1.3-3.0	1.2-2.1
	5	1.0-2.5	0.8-2.0	0.8-2.0
	10	1.0-2.2	0.8-2.0	0.8-2.0
0.25	1	1.6-3.0	1.4-2.5	1.2-2.0
	5	1.5-2.5	1.3-2.0	1.3-2.0
	10	1.5-2.0	1.3-2.0	1.3-2.0
0.5	1	1.4-2.6	1.3-1.9	1.2-1.4
	5	1.3-2.1	1.2-1.6	1.0-1.4
	10	1.3-2.0	1.2-1.5	1.0-1.4

Nota: USACE (2022).

Se muestra los datos para hallar el RE en la Tabla 37.

Tabla 37.

Cálculo de RE de cada puente

ID	Puente	So (pie/milla)	norilla	ncauce	nor/nc	b	B	b/B	RE
P01	Grau	124.7	0.043	0.043	1	37.8	66.4	0.6	1.65
P02	Bajo Grau	107.08	0.043	0.043	1	37	51.3	0.7	1.65
P03	Bolognesi	0	0.053	0.048	1.10	73.8	83.1	0.9	2
P04	San Martín	213.62	0.058	0.053	1.09	29	37.28	0.8	1.65
P06	San Isidro	105.6	0.048	0.043	1.12	57.42	72.1	0.8	1.65
P07	Tingo	35.2	0.048	0.043	1.12	56	69.28	0.8	1.65
P08	Bailey	128.546	0.048	0.043	1.12	36	46	0.8	1.65

Nota: Adaptado de Concha & Miranda (2016).

Se halla la longitud de contracción y expansión de cada puente. Los resultados se muestran en la Tabla 38.

Tabla 38.

Longitud de expansión y contracción de cada puente

ID	Puente	L obstrucción (m)	RC	RE	LC (m)	LE (m)
P01	Grau	14.3	1.45	1.65	20.7	23.6
P02	Bajo Grau	6.65	1.45	1.65	9.6	11.0
P03	Bolognesi	4.65	1.65	2	7.7	9.3
P04	San Martín	4.16	1.45	1.65	6.0	6.86
P06	San Isidro	7.34	1.45	1.65	10.6	12.1
P07	Tingo	6.64	1.45	1.65	9.6	11.0
P08	Bailey	5.00	1.45	1.65	7.3	8.3

Nota: Adaptado de Concha & Miranda (2016).

Las progresivas para cada puente se observan en la Tabla 39.

Tabla 39.

Progresivas de secciones típicas de cada puente

ID	Puente	SECCIONES					
		4	3	BU	BD	2	1
P01	Grau	7402.8	7382.1	7381.1	7372.4	7371.4	7347.8
P02	Bajo Grau	7270.1	7260.5	7259.5	7248.7	7247.7	7236.7
P03	Bolognesi	6752.2	6744.5	6743.5	6733.0	6732.0	6722.7
P04	San Martín	5992.3	5986.2	5985.2	5976.1	5975.1	5968.3
P06	San Isidro	4338.6	4328.0	4327.0	4316.0	4315.0	4302.8
P07	Tingo	2001.9	1992.3	1991.3	1983.3	1982.3	1971.3
P08	Bailey	388.1	380.8	379.8	372.4	371.4	363.2

Nota: Elaboración propia.

Las áreas inefectivas de flujo se consideraron a 1 metro hacia el extremo exterior de cada estribo o pilar según se dé el caso, en las secciones 2 y 3 y de cota la parte inferior del tablero. Para los coeficientes de contracción se consideró las recomendaciones brindadas por USACE (2022) que recomienda un coeficiente de transición gradual para contracción de 0.1 y expansión de 0.3 y en sección de puentes típicos 0.3 de contracción y 0.5 en expansión, estos últimos fueron considerados en las secciones 4, 3 y 2 de cada puente. Además, para el cálculo del flujo en cada puente, se utilizó los métodos de Energía, Momentum y Yarnell con los

coeficientes mostrados en la Tabla 40, donde el programa considera el más crítico. En caso de que el flujo sea superior al puente, se utiliza el método de energía.

Tabla 40.

Métodos de cálculo para cada puente en HEC RAS

ID	Método de cálculo		
	Energía	Momentum Cd	Yarnell K
P01	SÍ	1.33	0.9
P02	SÍ	0	
P03	SÍ	1.39	1.05
P04	SÍ	0	
P06	SÍ	2	1.25
P07	SÍ	2	1.25
P08	SÍ	0	

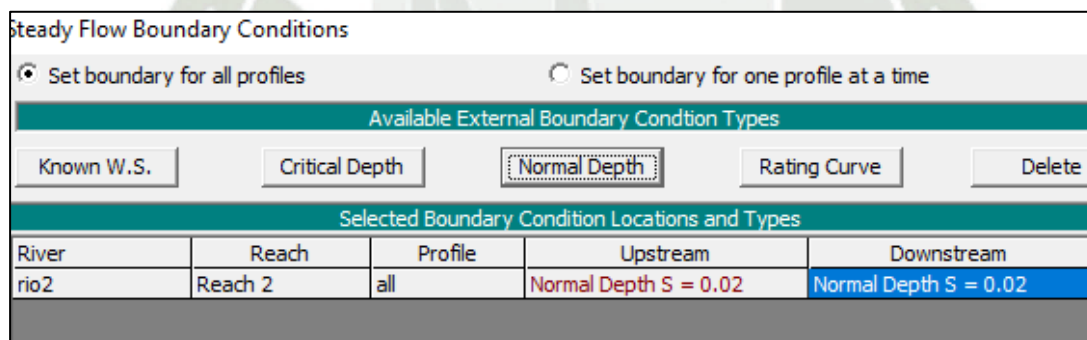
Nota: Adaptado de Concha & Miranda (2016).

6.4. Modelamiento en HEC-RAS

Se consideró para el modelamiento una pendiente aguas arriba y aguas abajo de 0.02, con un tirante normal y un flujo constante (Figura 17). Luego de haber recolectado toda la información necesaria, se sube al programa los caudales hallados en la Sección 5.3.2, esto se muestra en la Figura 18 y se corre la información con un flujo mixto (Figura 19).

Figura 17.

Pendiente aguas arriba y abajo en HEC RAS

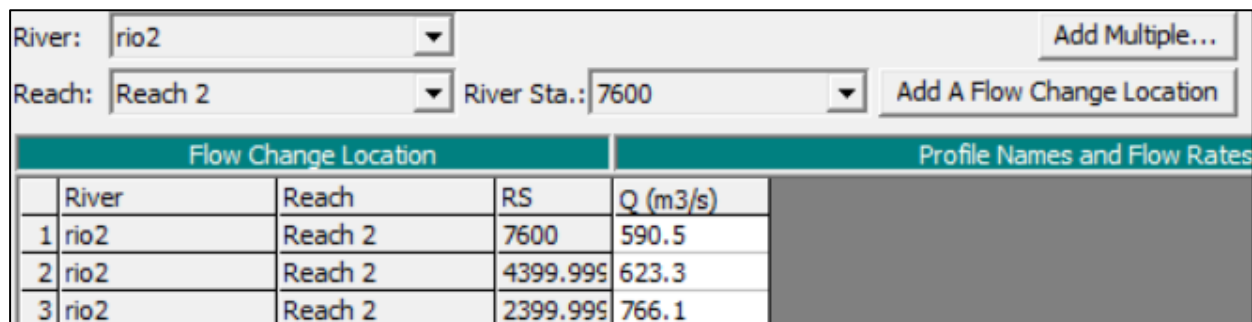


Steady Flow Boundary Conditions				
<input checked="" type="radio"/> Set boundary for all profiles		<input type="radio"/> Set boundary for one profile at a time		
Available External Boundary Condition Types				
Known W.S.	Critical Depth	Normal Depth	Rating Curve	Delete
Selected Boundary Condition Locations and Types				
River	Reach	Profile	Upstream	Downstream
rio2	Reach 2	all	Normal Depth S = 0.02	Normal Depth S = 0.02

Nota: Elaboración propia.

Figura 18.

Caudales de modelamiento en HEC RAS

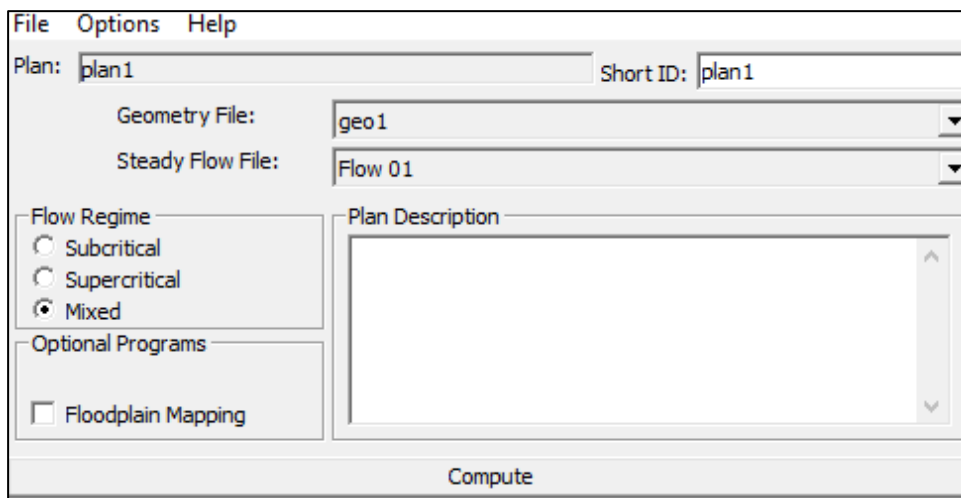


River:	rio2	Add Multiple...		
Reach:	Reach 2	River Sta.:	7600	Add A Flow Change Location
Flow Change Location				Profile Names and Flow Rates
	River	Reach	RS	Q (m3/s)
1	rio2	Reach 2	7600	590.5
2	rio2	Reach 2	4399.999	623.3
3	rio2	Reach 2	2399.999	766.1

Nota: Elaboración propia.

Figura 19.

Régimen de flujo para HEC RAS



Nota: Elaboración propia.

6.5. Resultados de HEC RAS

Se muestra la tabla de resultados de los puentes donde se observa la cota mínima de tablero de estos y el NAME (Figura 20), donde se concluye según el modelamiento, que los puentes que son impactados por el flujo de agua son el 02, 04, 07 y 08. Además, se muestra en la Figura 21, 22, 23, 24 y 25 una vista 3D de los puentes obtenido del modelamiento hidráulico. El análisis de corroboración de altura de galibo mínimo, se realiza en el capítulo 7.

Figura 20.

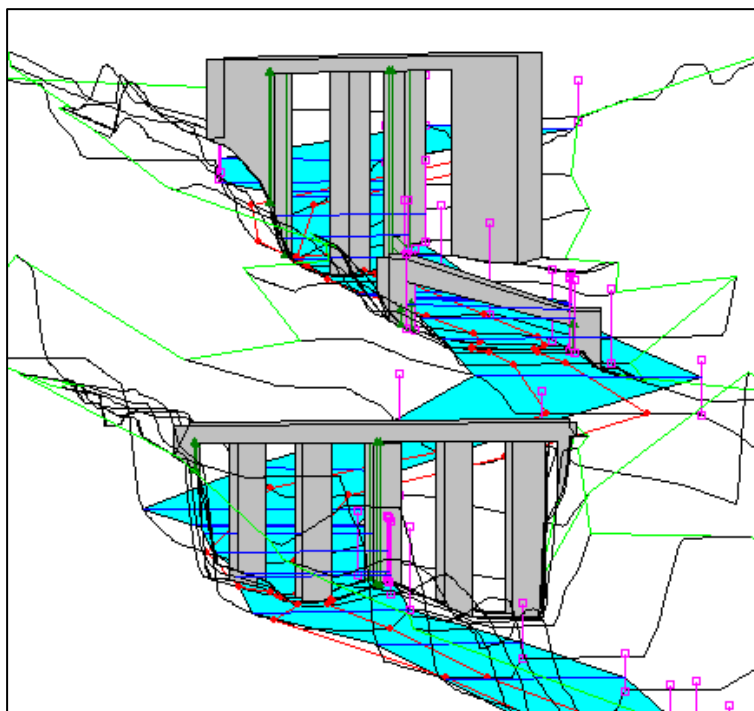
Resultados de HEC RAS

HEC-RAS Plan: plan1 River: rio2 Reach: Reach 2 Profile: Q (m3/s)											
Reach	River Sta	Profile	E.G. US.	Min El Prs	BR Open Area	Prs O WS	Q Total	Min El Weir Flow	Q Weir	Delta EG	BR Sluice Coef
			(m)	(m)	(m2)	(m)	(m3/s)	(m)	(m3/s)	(m)	
Reach 2	7376.74	Q (m3/s)	2369.83	2382.00	403.09		590.50	2382.00		2.19	
Reach 2	7254	Q (m3/s)	2362.17	2362.90	170.75		590.50	2360.40	15.26	0.33	
Reach 2	6738.26	Q (m3/s)	2354.87	2363.00	350.89		590.50	2364.11		1.42	
Reach 2	5980.69	Q (m3/s)	2339.76	2338.13	127.37		590.50	2339.00	34.35	0.78	
Reach 2	4321.45	Q (m3/s)	2303.09	2309.00	394.26		623.30	2307.50		0.70	
Reach 2	1987.26	Q (m3/s)	2256.35	2254.10	174.51	2256.04	766.10	2256.10	10.70	1.41	0.50
Reach 2	376.1	Q (m3/s)	2221.50	2218.70	91.95		766.10	2219.12	368.51	0.34	

Nota: Elaboración propia.

Figura 21.

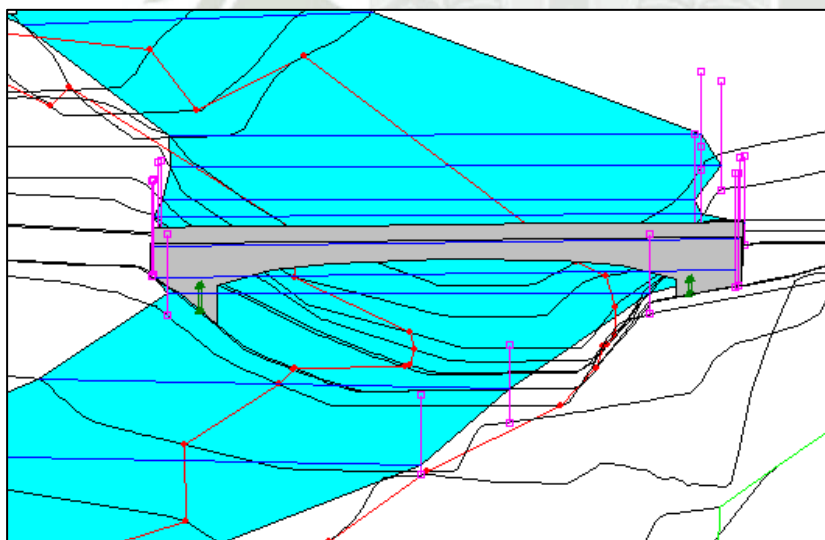
Vista 3D de Modelamiento Hidráulico Puentes 01, 02 y 03



Nota: Elaboración propia.

Figura 22.

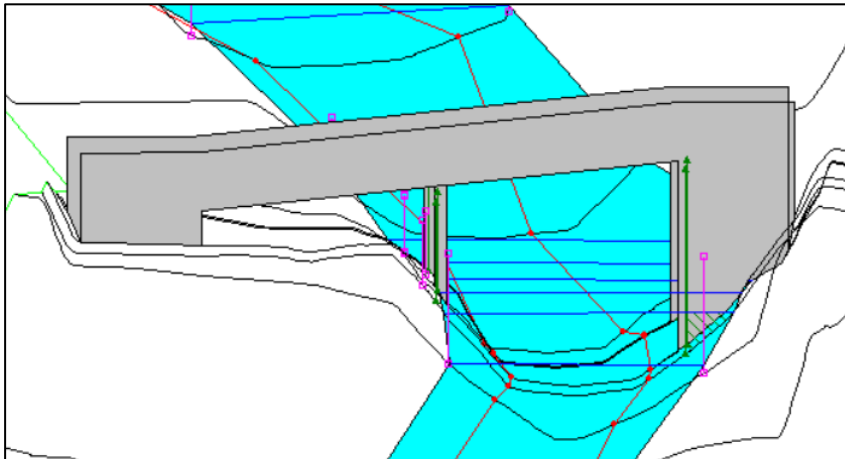
Vista 3D de Modelamiento Hidráulico Puento 04



Nota: Elaboración propia.

Figura 23.

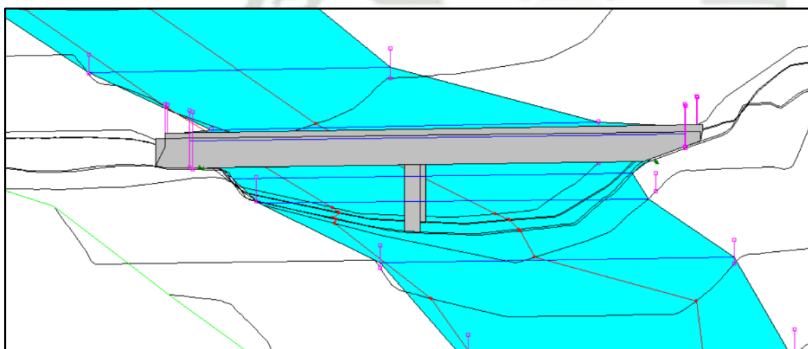
Vista 3D de Modelamiento Hidráulico Puente 06



Nota: Elaboración propia.

Figura 24.

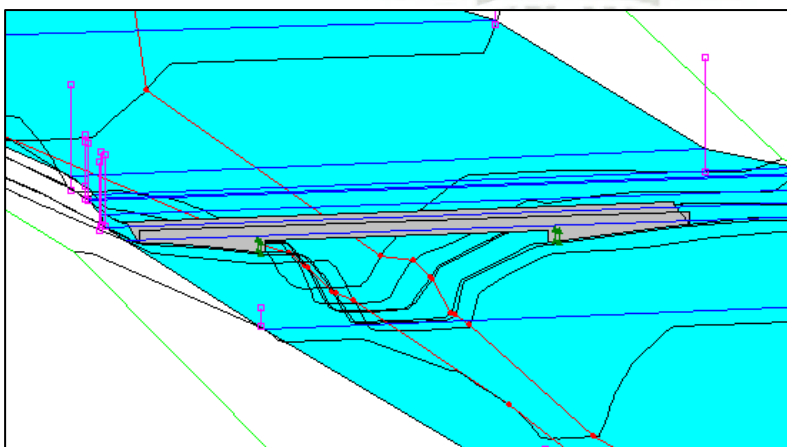
Vista 3D de Modelamiento Hidráulico Puente 07



Nota: Elaboración propia.

Figura 25.

Vista 3D de Modelamiento Hidráulico Puente 08



Nota: Elaboración propia.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. Evaluación de los puentes en estudio

Para aplicar la matriz de evaluación de vulnerabilidad hidrológica de puentes en el cauce de estudio, primero se identificó como conseguir los datos de evaluación de los parámetros, luego, cuáles de ellos tienen similitud en todos los puentes o mayoría de ellos. Esto se puede observar en la Tabla 41.

Tabla 41.

Método de recolección de datos para la cuenca del río Chili

ID	Variable	Método de recolección de datos	Similitud de parámetros en caso de estudio río Chili
A1	Cambio climático - niveles de temperatura	Investigaciones locales y/o registros locales	SÍ
A2	Composición y calidad del agua	Investigaciones locales y/o evaluación in situ	SÍ
A3	Condiciones ecológicas	Observación in situ	
A4	Residuos que interrumpen el flujo del río	Observación in situ	
T1	Materiales usados en la construcción	Observación in situ	
T2	Estado de conservación del puente	Observación in situ	
T3	Protección contra el flujo en pilares y estribos	Observación in situ	
T4	Características geométricas – altura del puente (*)	Modelamiento en HEC-RAS, grabaciones de avenidas máximas pasadas y su interacción con los puentes.	
T5	Profundidad de socavación en cimentación superficial (**)	Memoria técnica y/o planos de replanteo y/o ensayos destructivos o no destructivos para encontrar la profundidad de cimientos y con modelado en HEC-RAS para su comparación.	
T6	Capacidad actual de las represas aguas arriba (***)	Solicitar información a entidades correspondientes y/o búsqueda bibliográfica	SÍ
S1	Situación de pobreza o Desarrollo humano	Búsqueda bibliográfica y/o observación in situ	
S2	Programas de capacitación en la población en Prevención y Atención de Desastres (PAD)	Consulta a pobladores cercanos	
S3	Proximidad a centros poblados	Observación in situ y mediante la herramienta Google Earth	
S4	Material de viviendas aledañas al puente (****)	Observación in situ	

E1	Tiempo en funcionamiento del puente	Búsqueda bibliográfica y/o consulta a entidades correspondientes
E2	Importancia del puente según su volumen de tráfico vehicular	Observación in situ y consulta a pobladores cercanos
E3	Cierre de puente al tránsito vehicular por riesgo hidrológico	Búsqueda bibliográfica en periódicos locales
E4	Historia de inundaciones (*****)	Consulta a pobladores que vivan cerca al puente

Nota: Elaboración propia.

7.1.1. *Parámetros comunes en todos los puentes*

En la Tabla 42 se evalúan los parámetros que tienen en común todos los puentes en estudio y se observa su puntuación.

Tabla 42.

Evaluación de parámetros comunes en los puentes en estudio

ID	Evaluación	Puntuación
A1	Según Libélula, C. A. y D. S. A. (2018) en escenarios climáticos para el 2010-2030 en Arequipa Metropolitana, donde están ubicados los puentes en estudio, concluyen que, es evidente el aumento de temperatura por cambio climático, esto es favorecido por la pérdida progresiva de la campiña en la ciudad. Por ese motivo se evalúa este parámetro con un nivel de vulnerabilidad alto.	4
A2	Mediante un estudio de la contaminación del agua del río Chili, donde se tomaron 5 puntos en su trayectoria, se encontró que las partes más contaminadas mediante parámetros microbiológicos están entre el puente San Martín y Tiabaya, donde superan el estándar de calidad ambiental y presentan mala calidad de agua (Vargas, 2021), es en esta zona donde se encuentran ubicados los ocho (08) puentes en estudio. Por esta reciente investigación se le puntúa con un nivel alto de contaminación.	4
T9	Actualmente, la represa de Aguada Blanca es la reguladora de caudal del río Chili. Esta represa ya cumplió con su vida útil y por falta de mantenimiento en limpieza de sedimentos, su capacidad de almacenamiento se redujo al 50% (Podestá, 2017). Se solicitó información a AUTODEMA, autoridad encargada del mantenimiento de esta represa e indicaron que efectivamente se ha perdido cerca del 50%, pero la información que se tiene no es oficial. Con estos datos se evalúa un nivel medio de vulnerabilidad y se sugiere realizar un estudio actual de batimetría a la represa de Aguada Blanca para tomar acciones en beneficio de la población de Arequipa.	3

Nota: Elaboración propia.

A continuación, se muestra la evaluación de los parámetros restantes de cada puente y su puntuación, cabe mencionar que las fotografías y visitas a campo se realizaron los días 19, 27 y 29 de setiembre del 2022.

7.1.2. Puente 01 – Grau

En la Tabla 43 se muestra la evaluación del puente Grau mediante la matriz de evaluación propuesta.

Tabla 43.

Evaluación de Puente 01 - Grau

ID	Evaluación	Puntuación
A3	Se le evalúa con un nivel medio, debido a que presenta un nivel moderado de contaminación y de explotación de recursos naturales, como se observa en la Figura 26 y 27.	3
A4	Se evalúa con un nivel medio porque el sitio presenta residuos de tamaño pequeño a mediano, en poca cantidad como ramas y bolsas de plástico, cantidad moderada de algas y pastizales, como se puede ver en la Figura 27.	3
T1	Se observa en la Figura 28 que el puente es de material local como el sillar que tiene una resistencia considerable	3
T2	Se observa en la Figura 28, 29 y 30, que el puente tiene poco deterioro, que no lo compromete y es subsanable, y los acabados o instalaciones tienen deterioro visible debido al mal uso.	3
T3	Se observa en la Figura 30, que los pilares del puente se encuentran desprotegidos ante avenidas extraordinarias. Por ese motivo se le asigna un nivel muy alto de evaluación.	5
T4	En la Figura 31, se observa que el puente tiene más de 2 metros de altura de gálibo.	1
S1	En la Figura 32 se observa que existen viviendas de material de albañilería de ignimbrita y ladrillo, cerca al puente, la zona aledaña es de negocios y viviendas, sin índices de pobreza.	1
S2	Se consultó a tiendas y/o negocios de la población que vive cerca al puente e indicaron que la municipalidad no les da capacitaciones sobre prevención y atención de desastres producidas por eventos hidrológicos. Mencionaron que eventualmente la municipalidad viene a hacer limpieza de cauce y del río. Por ese motivo se coloca un nivel alto de evaluación.	4
S3	Se utilizó la herramienta de Google Earth y también visita a campo lo cual se puede observar en las Figura 33, que la población vive a menos de 0.2 kilómetros. Se le evalúa con un nivel muy alto.	5

S4	Se observa que las viviendas son de material de albañilería de ladrillos y/o bloques de sillar. Hidrológicamente tiene un nivel de vulnerabilidad muy bajo	1
E1	El puente fue decretado al tráfico libre, el 15 de diciembre de 1888 (Carpio, 1983). Teniendo un tiempo de funcionamiento de 134 años a la actualidad, siendo este evaluado con un nivel muy alto de vulnerabilidad.	5
E2	En visita a campo se logró constatar que es un puente por el cual transita alta cantidad de vehículos entre autos, bicicletas, peatones y transporte público, además. promueve altos ingresos económicos y es considerado muy importante por la población, bajo este criterio se coloca un nivel muy alto de evaluación.	5
E3	Observando la Tabla 3, donde se realizó una revisión bibliográfica de periódicos locales se observa que el puente en mención fue cerrado al tránsito vehicular cero (0) veces por un evento hidrológico.	1

Nota: Elaboración propia

Figura 26.

Contaminación en Puente 01



Nota: Elaboración propia.

Figura 27.

Residuos que interrumpen el flujo en Puente 01



Nota: Elaboración propia.

Figura 28.

Estado de conservación del Puente 01



Nota: Elaboración propia.

Figura 29.

Protección contra el flujo en pilares y estribos Puente 01



Nota: Elaboración propia.

Figura 30.

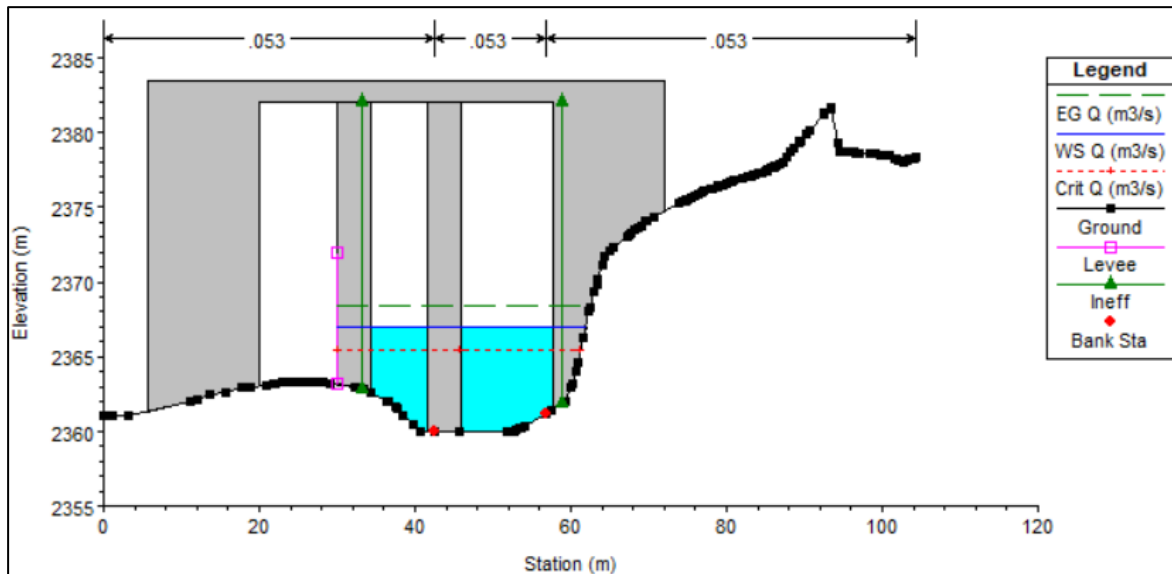
Erosión en la base de tablero en Puente 01



Nota: Elaboración propia.

Figura 31.

Altura de Gálibo de Puente 01



Nota: Elaboración propia.

Figura 32.

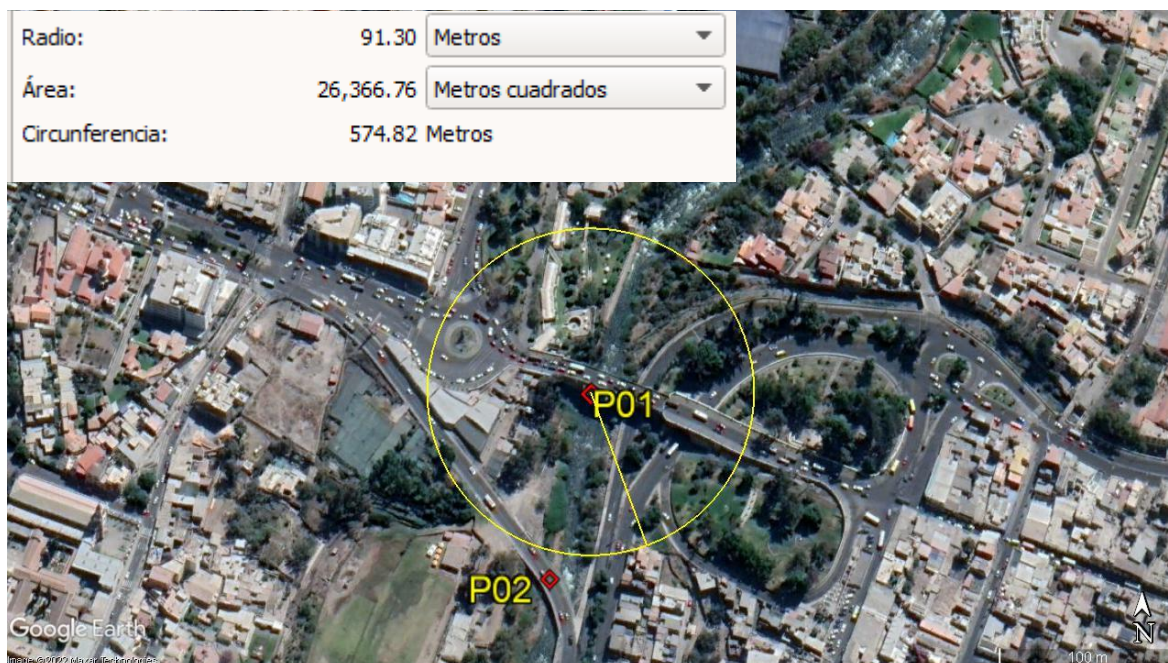
Situación de pobreza o desarrollo humano de Puente 01



Nota: Elaboración propia.

Figura 33.

Proximidad a centros poblados de Puente 01



Nota: Adaptado de Google - a (2022).

7.1.3. Puente 02 - Bajo Grau

En Tabla 44, se observa la evaluación y puntuación del puente 02 utilizando la matriz de evaluación.

Tabla 44.

Evaluación de Puente 02 – Bajo Grau.

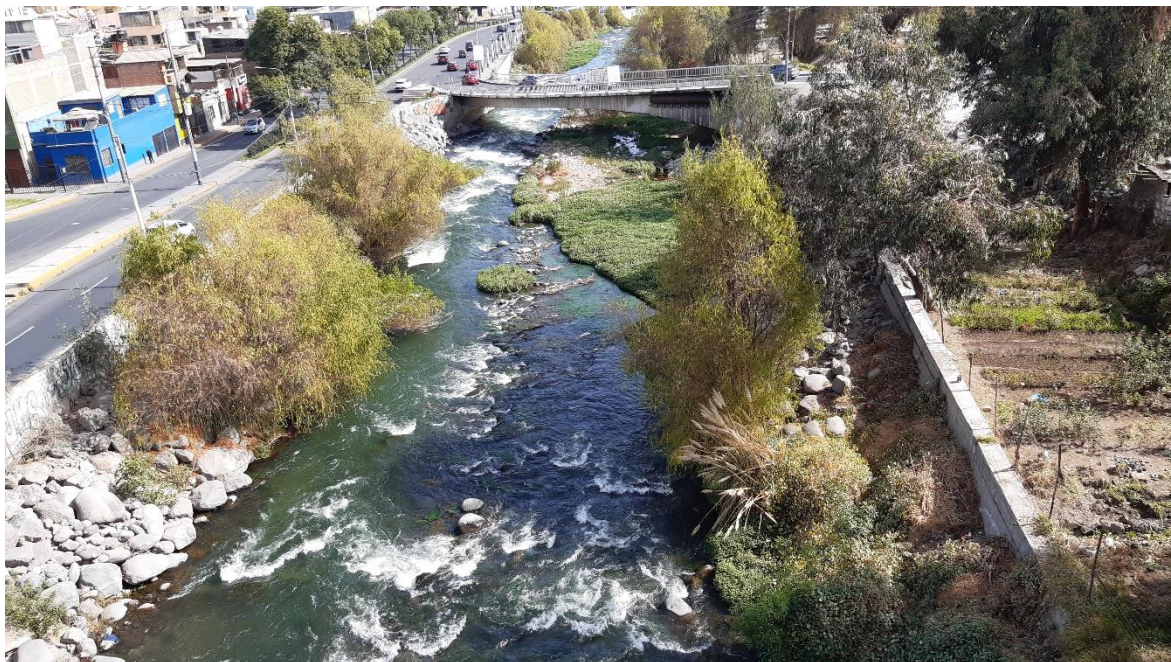
ID	Evaluación	Puntuación
A3	Se coloca un nivel medio, debido a que presenta un nivel moderado de contaminación y de explotación de recursos naturales, como se observa en la Figura 34 y 35.	3
A4	Se coloca un nivel medio porque el sitio presenta residuos de tamaño pequeño a mediano, en poca cantidad como ramas, bolsas de plástico, algas y pastizales, como se puede observar en la Figura 35.	3
T1	Se observa en la Figura 36 que el puente es de material de concreto armado.	1
T2	Se observa en la Figura 36 y 37, que el puente tiene poco deterioro, que no lo compromete y es subsanable, y los acabados o instalaciones tienen deterioro visible debido al mal uso.	3
T3	Se observa en la Figura 38 que los estribos del puente se encuentran medianamente protegido ante avenidas mediante la colocación de rocas cerca a ellos. Por ese motivo se le asigna un nivel medio de evaluación.	3

T4	En la Figura 39 y 40, se observa que el flujo impacta con la base del tablero, siendo el lado izquierdo del puente el de mayor riesgo. Mediante el modelamiento hidráulico (Figura 41) se observa que el flujo rebasa el tablero por lo cual se considera un nivel de evaluación muy alto.	5
S1	En la Figura 42, se observa que existen viviendas de material de albañilería de ignimbrita y ladrillo, cerca al puente, la zona aledaña es de negocios y viviendas, sin índices de pobreza.	1
S2	Se consultó a tiendas y/o negocios de la población que vive cerca al puente e indicaron que la municipalidad no les da capacitaciones sobre prevención y atención de desastres producidas por eventos hidrológicos. Mencionaron que eventualmente la municipalidad viene a hacer limpieza de cauce y del río. Por ese motivo se coloca un nivel alto de evaluación.	4
S3	Se utilizó la herramienta de Google Earth y también visita a campo lo cual se puede observar en la Figura 43. Se observa que la población vive a menos de 0.2 kilómetros. Lo cual se da una evaluación de nivel muy alta.	5
S4	Se observa que las viviendas son de material de albañilería de ladrillos y/o bloques de sillar. Hidrológicamente tiene un nivel de vulnerabilidad muy bajo.	1
E1	La construcción del puente se inició en 1989 (Paredes, 2019). Aproximadamente tiene un tiempo de funcionamiento de 30 años, lo cual hace que se le puntué con un valor medio de vulnerabilidad.	3
E2	En visita a campo se logró constatar que es un puente por el cual transita alta cantidad de vehículos entre autos, bicicletas, peatones y transporte público, además, promueve altos ingresos económicos y es considerado muy importante por la población, bajo este criterio se coloca un nivel muy alto de evaluación.	5
E3	Se observa en la Tabla 3, donde se realizó una revisión bibliográfica de periódicos locales se observa que el puente en mención fue cerrado al tránsito vehicular dos (02) veces por un evento hidrológico.	4

Nota: Elaboración propia.

Figura 34.

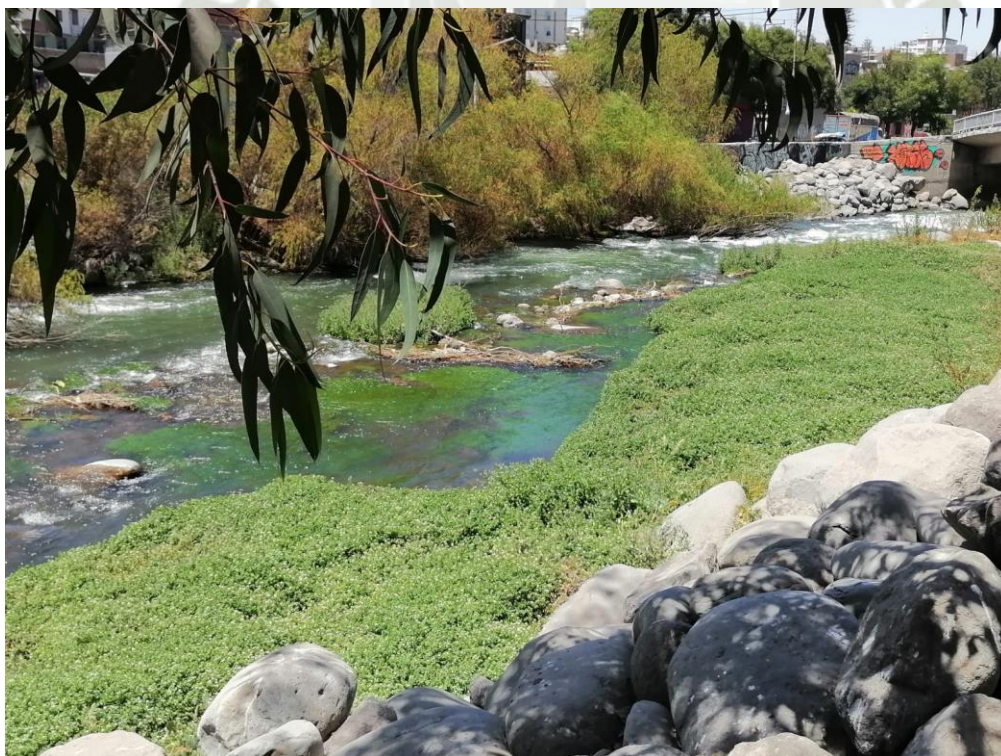
Contaminación en Puente 02



Nota: Elaboración propia.

Figura 35.

Residuos que interrumpen el flujo en Puente 02



Nota: Elaboración propia.

Figura 36.

Estado de conservación del Puente 02



Nota: Elaboración propia.

Figura 37.

Protección contra el flujo en pilares y estribos en Puente 02



Nota: Elaboración propia.

Figura 38.

Erosión en la base de tablero en Puente 02



Nota: Elaboración propia.

Figura 39.

Impacto de flujo en Puente 02 visto desde aguas arriba





Nota: Captura de televisión, Zavala (2012) y Captura de video, diegosalazarvideos (2012).

Figura 40.

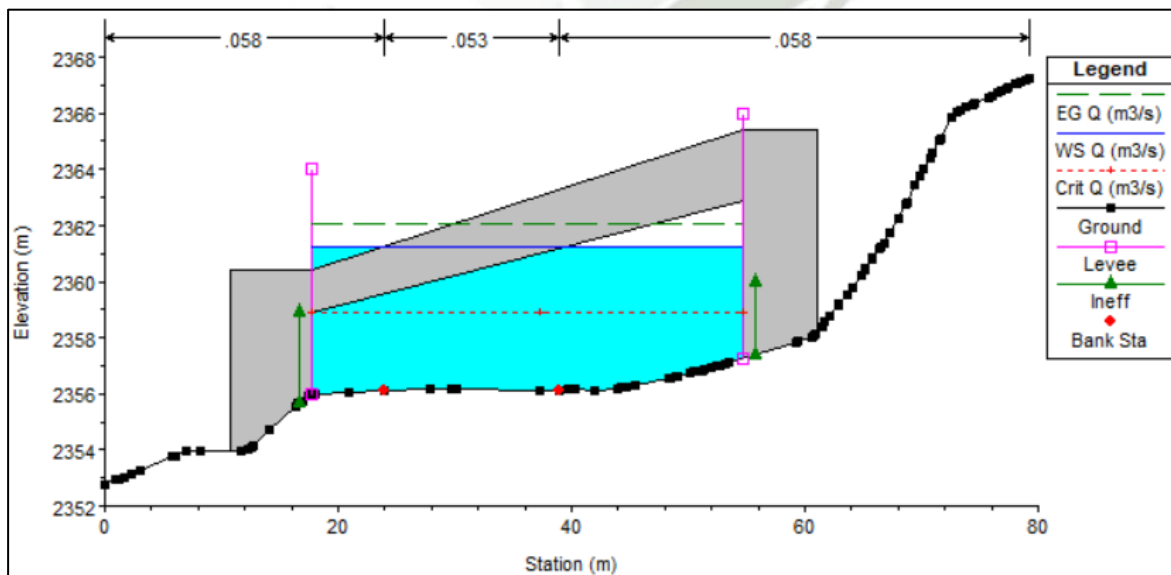
Impacto de flujo en Puente 02 visto desde aguas abajo



Nota: Captura de video, FCopaP (2012).

Figura 41.

Altura de Gálibo de Puente 02



Nota: Elaboración propia.

Figura 42.

Situación de pobreza o desarrollo humano de Puente 02



Nota: Elaboración propia.

Figura 43.

Proximidad a centros poblados de Puente 02



Nota: Adaptado de Google - b (2022).

7.1.4. *Puente 03 – Bolognesi*

En la Tabla 45, se observa la evaluación y puntuación del puente 03 aplicando la matriz propuesta.

Tabla 45.

Evaluación de Puente 03 - Bolognesi

ID	Evaluación	Puntuación
A3	Se coloca un nivel medio, debido a que presenta un nivel moderado de contaminación y de explotación de recursos naturales. Además, se observa en la Figura 44 que aguas arriba cerca al puente, botan en la orilla del río restos de tierra y/o piedras	3
A4	Se coloca un nivel medio porque el sitio presenta residuos de tamaño pequeño a mediano, en poca cantidad como ramas, algas y bolsas de plástico, como se puede ver en la Figura 45.	3
T1	Se observa en la Figura 46 que el puente es de material local como el sillar que tiene una resistencia considerable.	3
T2	Se observa en la Figura 46, que el puente tiene poco deterioro, que no lo compromete y es subsanable, y los acabados o instalaciones tienen deterioro visible debido al mal uso.	3
T3	Se observa en la Figura 47 que el pilar del puente se encuentra altamente protegido ante avenidas mediante la implementación de protección de cimientos de pilares. Por ese motivo se le asigna un nivel bajo de evaluación.	2
T4	Se observa en la Figura 48 que el puente tiene una altura de gálibo mayor a 2 metros. Esto se corrobora también con la Figura 49 de modelamiento.	1
S1	En la Figura 50, se observa que existen viviendas de material de albañilería de ignimbrita y ladrillo, cerca al puente, la zona aledaña es de negocios y viviendas, sin índices de pobreza.	1
S2	Se consultó a tiendas y/o negocios de la población que vive cerca al puente e indicaron que la municipalidad no les da capacitaciones sobre prevención y atención de desastres producidas por eventos hidrológicos. Mencionaron que eventualmente la municipalidad viene a hacer limpieza de cauce y del río. Por ese motivo se coloca un nivel alto de evaluación.	4
S3	Se utilizó la herramienta de Google Earth y también visita a campo lo cual se puede observar en la Figura 51. Se observa que la población vive a menos de 0.2 kilómetros. Por lo tanto, se le evalúa con un nivel muy alto.	5
S4	Se observa que las viviendas son de material de albañilería de ladrillos y/o bloques de sillar. Hidrológicamente tiene un nivel de vulnerabilidad muy bajo.	1

E1	El puente fue inaugurado en 1608 (Caja1, 2021) lo cual hace que tenga 414 años en funcionamiento aproximadamente. Por ese motivo se le puntúa con un nivel muy alto.	5
E2	En visita a campo se logró constatar que es un puente por el cual transita alta cantidad de vehículos entre autos, bicicletas, peatones y transporte público y es un puente con valor histórico para la población, promueve altos ingresos económicos y es considerado muy importante por la población, bajo este criterio se coloca un nivel muy alto de evaluación.	5
E3	Observando la Tabla 3, donde se realizó una revisión bibliográfica de periódicos locales se observa que el puente en mención fue cerrado al tránsito vehicular cero (0) veces por un evento hidrológico.	1

Nota: Elaboración propia

Figura 44.

Contaminación en Puente 03



Nota: Elaboración propia.

Figura 45.

Residuos que interrumpen el flujo en Puente 03



Nota: Elaboración propia.

Figura 46.

Estado de conservación del Puente 03



Nota: Elaboración propia.

Figura 47.

Protección contra el flujo en pilares y estribos en Puento 03



Nota: Elaboración propia.

Figura 48.

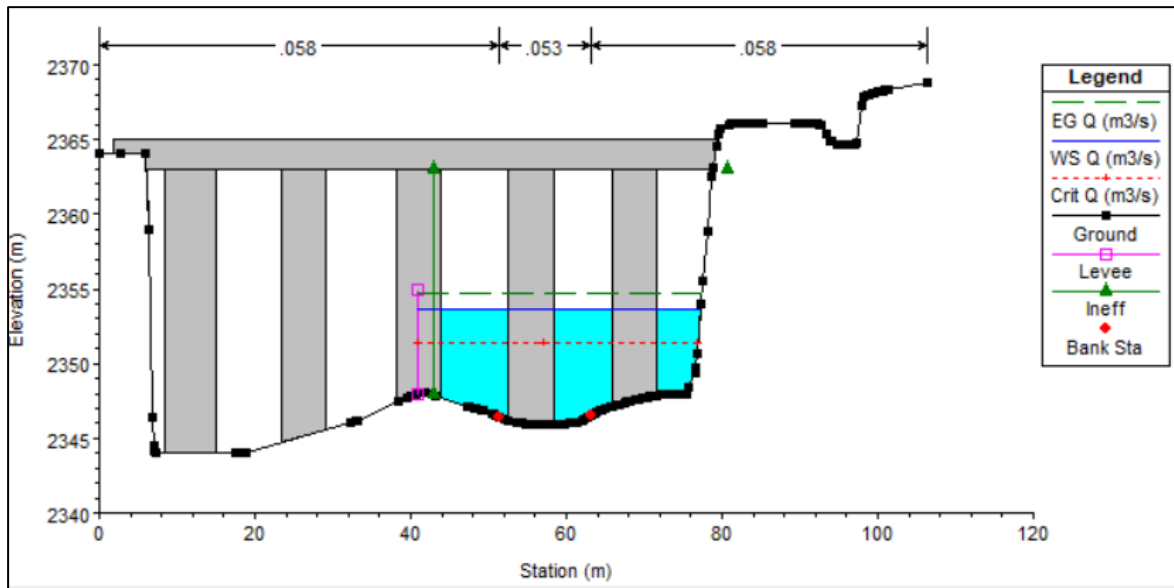
Impacto de flujo en Puento 03



Nota: Captura de video, diegosalazarvideos (2012).

Figura 49.

Altura de Gálibo de Puente 03



Nota: Elaboración propia.

Figura 50.

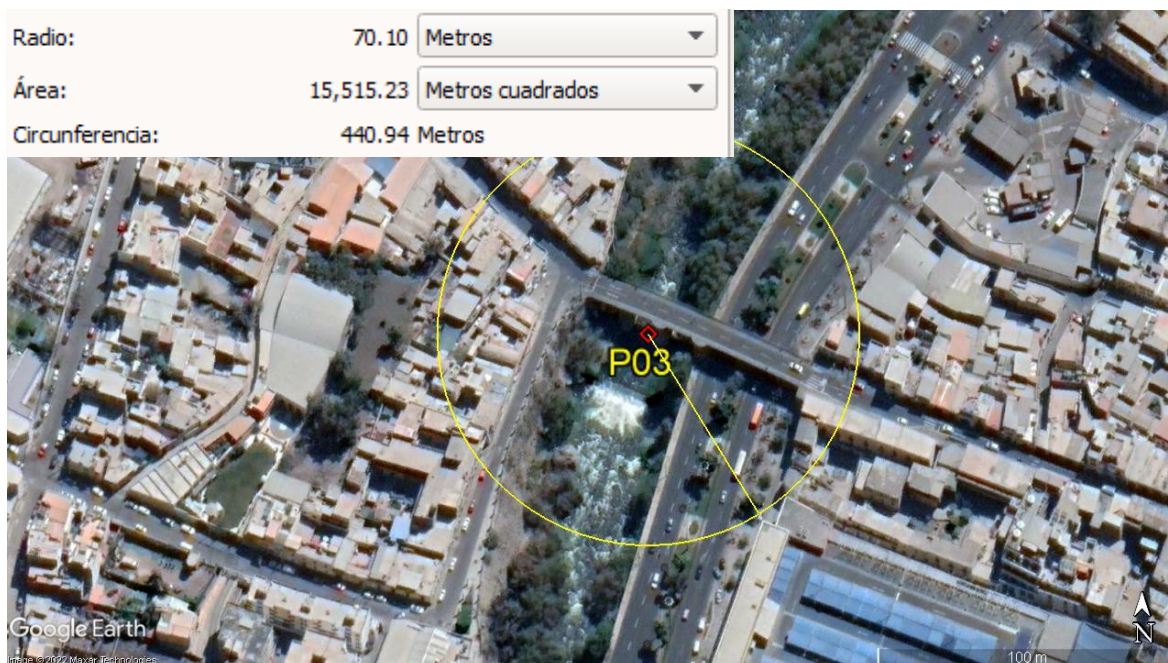
Situación de pobreza o desarrollo humano de Puente 03



Nota: Elaboración propia.

Figura 51.

Proximidad a centros poblados de Puente 03



Nota: Adaptado de Google - c (2022).

7.1.5. Puente 04 - San Martín

En la Tabla 46, se observa la evaluación y puntuación del puente 04 utilizando la matriz propuesta.

Tabla 46.

Evaluación de Puente 04 – San Martín.

ID	Evaluación	Puntuación
A3	Se coloca un nivel medio, debido a que presenta un nivel moderado de contaminación y explotación de recursos naturales, como se puede observar en la Figura 52.	3
A4	Se coloca un nivel alto porque se observa en el sitio, algas y pastizales en cantidad, además de troncos, llantas y bolsas de plástico, esto se observa en la Figura 52.	4
T1	Se observa en la figura 53 que el puente es de material de concreto armado.	1
T2	Se observa en la Figura 53, que el puente acusa deterioros que lo comprometen, aunque sin peligro de desplome y los acabados e instalaciones tienen visibles desperfectos. También se considera la existencia de fisuras en un lado del puente y además en algunas partes el acero del puente está desprotegido. Se le evalúa con un nivel alto de vulnerabilidad.	4

T3	Se observa en la Figura 54, que el estribo del puente se encuentra desprotegidos ante avenidas extraordinarias. Por ese motivo se le asigna un nivel muy alto de evaluación.	5
T4	Se observa en la figura 55 que el flujo de agua está próximo a impactar en una avenida máxima ocurrida el 2011 y en el modelamiento hidráulico en la Figura 56, se observa que impacta al tablero y rebasa, por ese motivo se coloca una evaluación de vulnerabilidad muy alta.	5
S1	En la Figura 57 se observa que existen viviendas de material de albañilería, cerca al puente, la zona aledaña es de viviendas negocio y también zona de cultivo, sin índices de pobreza.	1
S2	Se consultó a tiendas y/o negocios de la población que vive cerca al puente e indicaron que la municipalidad no les da capacitaciones sobre prevención y atención de desastres producidas por eventos hidrológicos. Mencionaron que eventualmente la municipalidad viene a hacer limpieza de cauce y del río. Por ese motivo se coloca un nivel alto de evaluación.	4
S3	Se utilizó la herramienta de Google Earth y también visita a campo lo cual se puede observar en la Figura 58. Se observa que la población vive a menos de 0.2 kilómetros. Por lo tanto, se le evalúa con un nivel muy alto.	5
S4	Se observa que las viviendas son de material de albañilería de ladrillos y/o bloquetas de concreto. Hidrológicamente tiene un nivel de vulnerabilidad muy bajo.	1
E1	El puente fue inaugurado el 11 de agosto de 1959 (Frase Corta, 2022). Lo cual tiene 63 años en funcionamiento aproximadamente, por lo tanto, se le puntúa con una vulnerabilidad alta.	4
E2	En visita a campo se logró constatar que es un puente por el cual transita una alta cantidad de vehículos, genera altos ingresos económicos y es considerado muy importante por la población, bajo este criterio se coloca un nivel muy alto de evaluación. En la Figura 59 se observa al puente con alto tránsito vehicular.	5
E3	Observando la Tabla 3, donde se realizó una revisión bibliográfica de periódicos locales se observa que el puente en mención fue cerrado al tránsito vehicular dos (02) veces por un evento hidrológico.	4

Nota: Elaboración propia

Figura 52.

Contaminación en Puente 04



Nota: Elaboración propia.

Figura 53.

Estado de conservación del Puente 04



Nota: Elaboración propia.

Figura 54.

Protección contra el flujo en pilares y estribos en Puesto 04



Nota: Elaboración propia.

Figura 55.

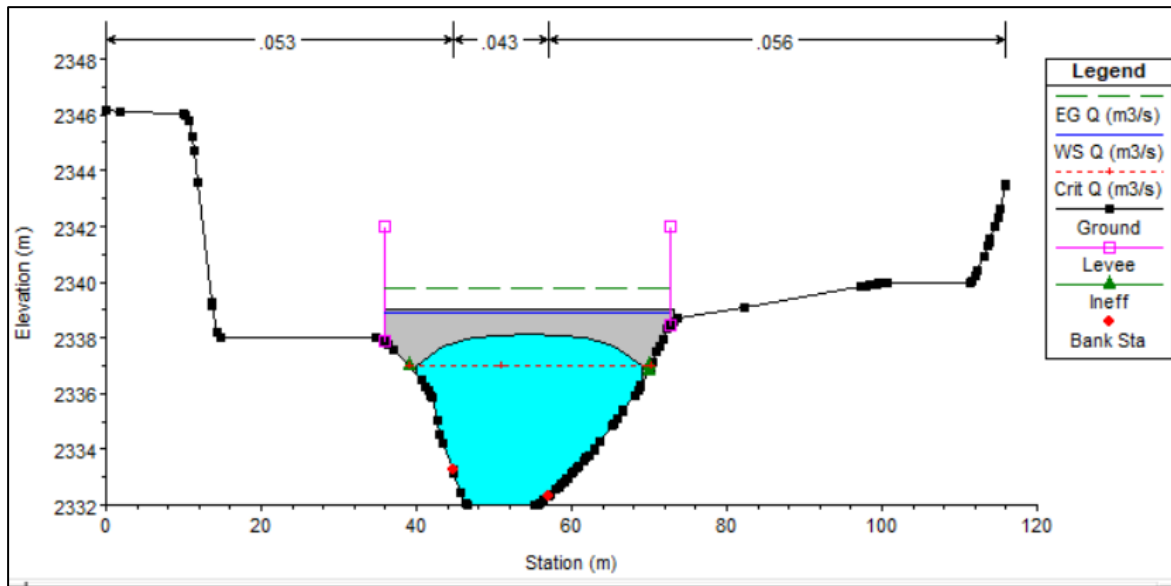
Impacto de flujo en Puesto 04



Nota: Captura de video, Frase Corta (2011).

Figura 56.

Altura de Gálibo de Puente 04



Nota: Elaboración propia.

Figura 57.

Situación de pobreza o desarrollo humano de Puente 04



Nota: Elaboración propia.

Figura 58.

Proximidad a centros poblados de Puente 04



Nota: Adaptado de Google – d (2022) .

Figura 59.

Importancia de Puente 04



Nota: Elaboración propia.

7.1.6. *Puente 05 - De Fierro*

En la Tabla 47, se observa la evaluación y puntuación del puente 05 utilizando la matriz propuesta.

Tabla 47.

Evaluación de Puente 05 – De Fierro.

ID	Evaluación	Puntuación
A3	Se coloca un nivel bajo, debido a que presenta un bajo nivel de contaminación y de explotación de recursos naturales, como se observa en la Figura 60.	2
A4	Se coloca un nivel muy bajo porque el sitio se encuentra libre de basuras de ligero tamaño y peso, esto se observa en la Figura 60.	1
T1	Se observa en la Figura 61 que el puente es de material de acero.	2
T2	Se observa en la Figura 61 que el puente acusa deterioros que lo comprometen, aunque sin peligro de desplome y los acabados e instalaciones tienen visibles desperfectos. También se considera que hace pocos años, por este puente transitaban también vehículos como autos, y en la actualidad solo transitan peatones, ciclistas y motociclistas, lo cual es un indicador de que la resistencia del puente ha bajado con el transcurso de los años y esto se considera para su evaluación.	4
T3	Se observa en la Figura 62, tomada in situ, que el pilar del puente se encuentra altamente protegido ante avenidas mediante la implementación reciente de una protección de cimiento. Por ese motivo se le asigna un nivel bajo de evaluación.	2
T4	El puente en estudio tiene una altura que imposibilita que el flujo de agua impacte al tablero y supera por mucho la altura de gálibo mínima de 2 metros. Por eso se le evalúa con un nivel muy bajo.	1
S1	En la Figura 63 se observa que existen viviendas de material de albañilería, cerca al puente, la zona aledaña es residencial y también zona de cultivo, sin índices de pobreza.	1
S2	Se consultó a tiendas y/o negocios de la población que vive cerca al puente e indicaron que la municipalidad no les da capacitaciones sobre prevención y atención de desastres producidas por eventos hidrológicos. Mencionaron que eventualmente la municipalidad viene a hacer limpieza de cauce y del río. Por ese motivo se coloca un nivel alto de evaluación.	4
S3	Se utilizó la herramienta de Google Earth y también visita a campo lo cual se puede observar en la Figura 64. Se observa que la población vive a menos de 0.2 kilómetros. Por lo tanto, se le evalúa con un nivel muy alto.	5

S4	Se observa que las viviendas son de material de albañilería de ladrillos y/o bloquetas de concreto. Hidrológicamente tiene un nivel de vulnerabilidad muy bajo.	1
E1	El puente fue inaugurado el 1 de enero de 1871 (Martínez, 2022). Lo cual hace que tenga en funcionamiento un aproximado de 151 años, por lo tanto, se le puntúa con un nivel muy alto.	5
E2	En visita a campo se logró constatar que es un puente por el cual transita gran cantidad de vehículos como motocicletas y bicicletas por día, además que transitan gran cantidad de peatones y es un puente con valor histórico para la población, genera ingresos económicos considerables y es considerado importante por la población, bajo este criterio se coloca un nivel alto de evaluación. En la Figura 65 se tiene una vista de la plataforma del puente y campiña de la ciudad.	4
E3	Observando la Tabla 3, donde se realizó una revisión bibliográfica de periódicos locales se observa que el puente en mención fue cerrado al tránsito vehicular una (01) vez por un evento hidrológico.	3

Nota: Elaboración propia

Figura 60.

Contaminación en Puente 05



Nota: Elaboración propia.

Figura 61.

Estado de conservación del Puente 05



Nota: Elaboración propia.

Figura 62.

Protección contra el flujo en pilares y estribos en Puente 05



Nota: Elaboración propia.

Figura 63.

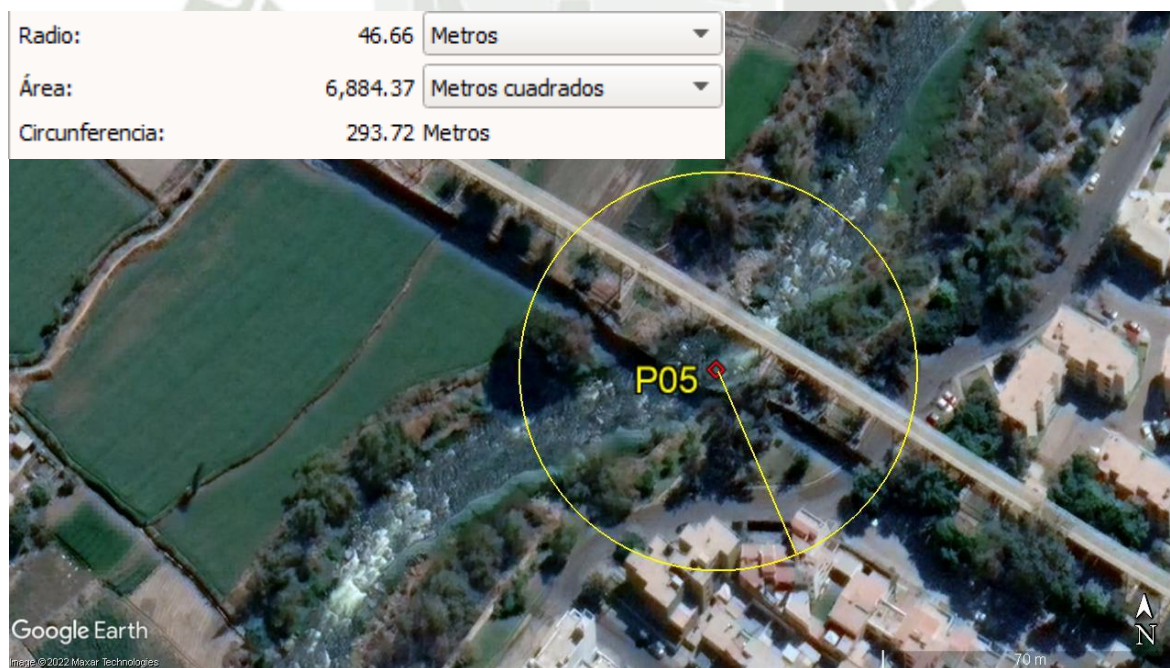
Situación de pobreza o desarrollo humano de Puente 05



Nota: Elaboración propia.

Figura 64.

Proximidad a centros poblados de Puente 05



Nota: Adaptado de Google – e (2022).

Figura 65.

Importancia de Puente 05



Nota: Elaboración propia.

7.1.7. Puente 06 - San Isidro

En la Tabla 48, se observa la evaluación y puntuación del puente 06 aplicando la matriz propuesta.

Tabla 48.

Evaluación de Puente 06 – San Isidro

ID	Evaluación	Puntuación
A3	Se coloca un nivel medio, debido a que presenta un nivel moderado de explotación de recursos naturales y contaminación. Además, se observa que echan desechos de tierra a orillas de río como se observa en la Figura 66.	3
A4	Se coloca un nivel bajo, debido a que en el sitio se encuentra poca cantidad de basuras de ligero tamaño y peso a orillas del cauce, esto se observa en la Figura 67.	2
T1	Se observa en la Figura 68 que el puente es de material de concreto armado y se evalúa como un nivel muy bajo.	1
T2	Se observa en la Figura 68 que el puente presenta ligero deterioro en los acabados debido al uso normal. Por eso se le asigna un nivel bajo.	2
T3	Se observa en la Figura 68 que los estribos y pilar del puente, se encuentran medianamente protegidos ante avenidas mediante la colocación de rocas alrededor de ellos. Por ese motivo se le asigna un nivel medio.	3

T4	Se observa en la Figura 69 que el puente tiene una altura de galibo mayor a 2 metros por eso se le considera con un nivel muy bajo de evaluación.	1
S1	Se observó que existen viviendas de material de albañilería, en la parte alta, cerca al puente. Se observa en la Figura 70, que alrededor del puente están ubicadas estas viviendas, se evalúa por el material de construcción de su vivienda que son de nivel muy bajo que es una población sin pobreza.	1
S2	Se consultó a tiendas y/o negocios de la población que vive cerca al puente e indicaron que la municipalidad no les da capacitaciones sobre prevención y atención de desastres producidas por eventos hidrológicos. Mencionaron que eventualmente la municipalidad viene a hacer limpieza de cauce y del río. Por ese motivo se coloca un nivel alto de evaluación.	4
S3	Se utilizó la herramienta de Google Earth y también visita a campo lo cual se puede observar en la Figura 71. Se observa que la población vive a menos de 0.2 kilómetros. Por lo tanto, se le evalúa con un nivel muy alto.	5
S4	Se observa que las viviendas son de material de albañilería de ladrillos y/o bloquetas de concreto. Hidrológicamente tiene un nivel de vulnerabilidad muy bajo.	1
E1	El puente fue inaugurado en diciembre de 1966 (Eguiluz, 2016). Lo cual indica que tiene 56 años en funcionamiento aproximadamente. Por lo tanto, se le asigna un nivel alto de vulnerabilidad.	4
E2	En visita a campo se logró constatar que es un puente por el cual transita alta cantidad de vehículos por día, genera ingresos altos ingresos económicos y es considerado muy importante por la población, bajo este criterio se coloca un nivel muy alto de evaluación.	5
E3	Observando la Tabla 3, donde se realizó una revisión bibliográfica de periódicos locales se observa que el puente en mención fue cerrado al tránsito vehicular cero (0) veces por un evento hidrológico.	1

Nota: Elaboración propia.

Figura 66.

Contaminación en Puente 06



Nota: Elaboración propia.

Figura 67.

Residuos que interrumpen el flujo de río del Puente 06



Nota: Elaboración propia.

Figura 68.

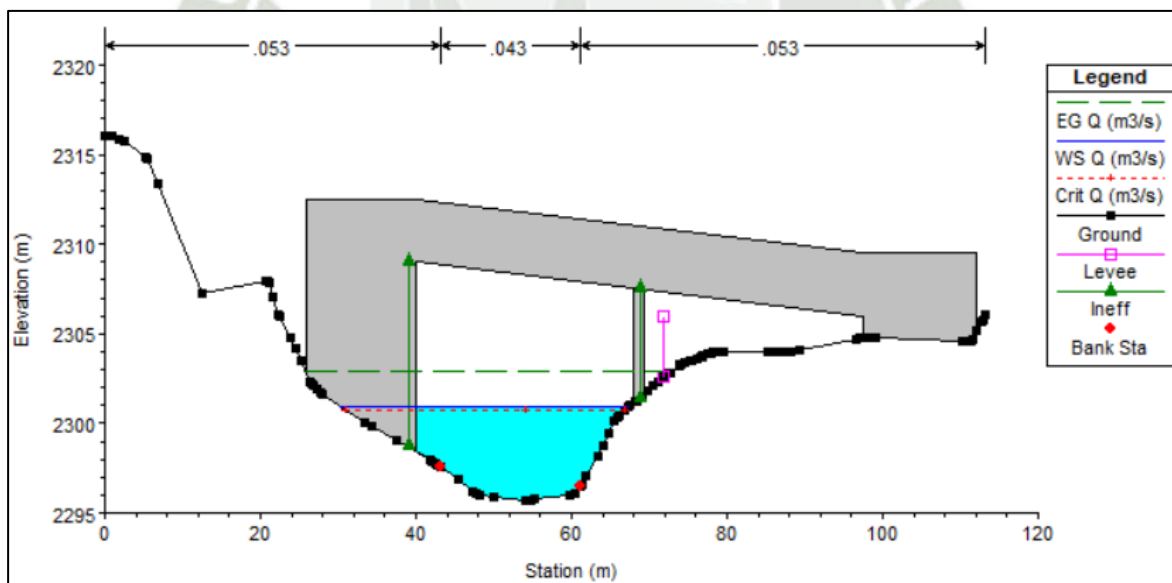
Estado de conservación del Puente 06



Nota: Elaboración propia.

Figura 69.

Altura de Gálibo de Puente 06



Nota: Elaboración propia.

Figura 70.

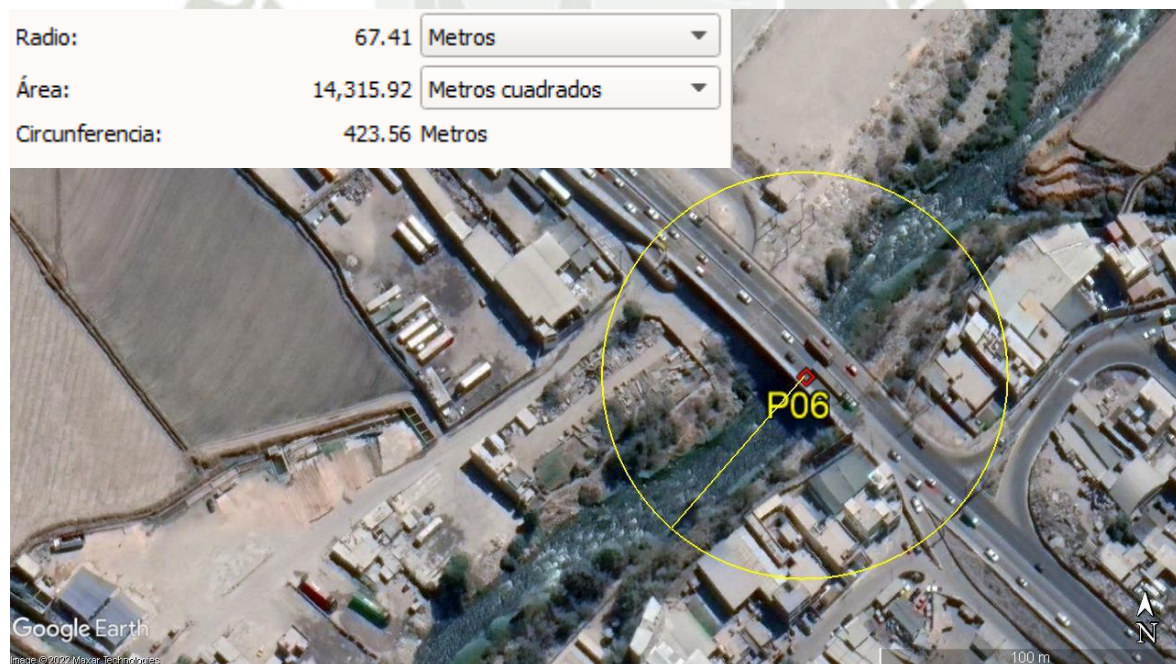
Situación de pobreza o desarrollo humano de Puente 06



Nota: Elaboración propia.

Figura 71.

Proximidad a centros poblados de Puente 06



Nota: Adaptado de Google – f (2022).

7.1.8. Puente 07 – Tingo

En la Tabla 49, se observa la evaluación y puntuación del puente 07.

Tabla 49.

Evaluación de Puente 07 – Tingo

ID	Evaluación	Puntuación
A3	Se coloca un nivel medio, debido a que presenta un nivel moderado de explotación de recursos naturales y contaminación.	3
A4	Se coloca un nivel bajo, debido a que en el sitio se encuentra poca cantidad de basuras de ligero tamaño y peso a orillas del cauce, esto se observa en la Figura 72.	2
T1	Se observa en la Figura 72 que el puente es de material de concreto armado y se evalúa como nivel muy bajo.	1
T2	Se observa en la Figura 73 y 74 que el puente presenta ligero deterioro en los acabados debido al uso normal. Por eso se le asigna un nivel bajo.	2
T3	Se observa en la Figura 73 que los estribos y pilar del puente, se encuentran pobremente protegidos ante avenidas mediante la colocación de rocas alrededor de ellos. Por ese motivo se le asigna un nivel alto.	4
T4	Se observa en la Figura 75 que el flujo de agua impacta a la base de tablero por ese motivo se le asigna un nivel 4 de evaluación.	4
S1	Se observó que existen viviendas de material bloqueta y techos de calamina a orillas del río, cerca al puente. Se observa en la Figura 76 que alrededor del puente están ubicadas estas viviendas, se evalúa por el material de construcción de su vivienda que son de nivel bajo que es una población con menor porcentaje de pobreza.	2
S2	Se consultó a tiendas y/o negocios de la población que vive cerca al puente e indicaron que la municipalidad no les da capacitaciones sobre prevención y atención de desastres producidas por eventos hidrológicos, pero comentaron que ellos mismos se organizan si se produjese una emergencia, pero no preventivamente. Mencionaron que eventualmente la municipalidad viene a hacer limpieza de cauce y del río. Por ese motivo se coloca un nivel alto de evaluación.	4
S3	Se utilizó la herramienta de Google Earth y también visita a campo lo cual se puede observar en la Figura 77. Se observa que la población vive a menos de 0.2 kilómetros. Por lo tanto, se le evalúa con un nivel muy alto.	5

S4	Se observa que las viviendas son de material de albañilería de ladrillos y/o bloquetas de concreto, la mayoría de sus techos son de calamina. Hidrológicamente tiene un nivel de vulnerabilidad muy bajo.	1
E1	El puente Tingo fue inaugurado el 23 de diciembre de 2011, lo cual hace que tenga un tiempo de funcionamiento de 11 años aproximadamente, siendo este evaluado con un nivel bajo.	2
E2	En visita a campo se logró constatar que es un puente por el cual transita alta cantidad de vehículos por día, genera ingresos altos ingresos económicos y es considerado muy importante por la población, bajo este criterio se coloca un nivel muy alto de evaluación.	5
E3	Observando la Tabla 3, donde se realizó una revisión bibliográfica de periódicos locales se observa que el puente en mención fue cerrado al tránsito vehicular dos (02) veces por un evento hidrológico.	4

Nota: Elaboración propia.

Figura 72.

Material de Puente 07



Nota: Elaboración propia.

Figura 73.

Estado de conservación del Puente 07



Nota: Elaboración propia.

Figura 74.

Erosión de tablero en Puente 07



Nota: Elaboración propia.

Figura 77.

Proximidad a centros poblados de Puente 07



Nota: Adaptado de Google – g (2022).

7.1.9. Puente 08 – Bailey

En la Tabla 50, se observa la evaluación y puntuación del puente 08.

Tabla 50.

Evaluación de Puente 08 – Bailey

ID	Evaluación	Puntuación
A3	Se coloca un nivel medio, debido a que presenta un nivel moderado de explotación de recursos naturales y contaminación. Se observó también in situ que algunos pobladores botan desechos de tierra cerca a la orilla del río.	3
A4	Se coloca un nivel bajo, debido a que en el sitio se encuentra poca cantidad de basuras de ligero tamaño y peso a orillas del cauce, esto se observa en la Figura 78.	2
T1	Se observa en la Figura 78 que el puente es de material de acero y se evalúa como nivel bajo.	2
T2	Se observa en la Figura 79 que el puente no presenta deterioro alguno, debido a sus pocos años en funcionamiento. Por ese motivo se le asigna un nivel muy bajo.	1
T3	Se observa en la Figura 80 que los estribos se encuentran medianamente protegidos ante avenidas mediante la colocación de rocas alrededor de ellos. Por ese motivo se le asigna un nivel medio.	3
T4	Se observa en la Figura 81 que el río desbordó aguas arriba, en una avenida extraordinaria. Mediante el modelamiento hidráulico en la Figura 82, se observa	5

	que existe inundación del puente. Por lo cual se considera un nivel alto de vulnerabilidad.	
S1	Se observó que solo existen un par de viviendas aledañas al puente, estas son de material de concreto armado, pero muy cercanas. También se observa en la Figura 83 que alrededor del puente son terrenos de cultivo por lo cual se le coloca un nivel muy bajo, que es una población sin pobreza.	1
S2	Se consultó a un poblador que vive en una de las dos viviendas aledañas al puente, siendo este dedicado a la agricultura, que existe dejadez de parte de las autoridades locales por el sector agricultura y no capacitan a los pobladores respecto a prevención y atención de desastres. Por ese motivo se coloca un nivel muy alto de evaluación.	5
S3	Se utilizó la herramienta de Google Earth y también visita a campo lo cual se puede observar en la Figura 84. Se observa que la población vive a menos de 0.2 kilómetros. Y también que los locales de eventos y restaurantes están a pocos metros. Por lo tanto, se le evalúa con un nivel muy alto	5
S4	Se observa que existe un par de viviendas de concreto armado muy cerca y otras del mismo material cerca, como son los negocios de venta de comida y salón de eventos.	1
E1	El puente Bailey fue instalado en octubre de 2016 (LR Arequipa, 2021), lo cual hace que tenga un tiempo de funcionamiento de 6 años, siendo este de un nivel muy bajo, menor a 10 años.	1
E2	En visita a campo se logró constatar que es un puente por el cual transitan gran cantidad de vehículos por día, genera ingresos económicos considerables y es considerado importante por la población, bajo este criterio se coloca un nivel alto de evaluación.	4
E3	Observando la Tabla 3, donde se realizó una revisión bibliográfica de periódicos locales se observa que el puente en mención fue cerrado al tránsito vehicular una (01) vez por un evento hidrológico.	3

Nota: Elaboración propia.

Figura 78.

Material de Punte 08



Nota: Elaboración propia.

Figura 79.

Estado de conservación del Punte 08



Nota: Elaboración propia.

Figura 80.

Protección contra el flujo en pilares y estribos de Puente 08



Nota: Elaboración propia.

Figura 81.

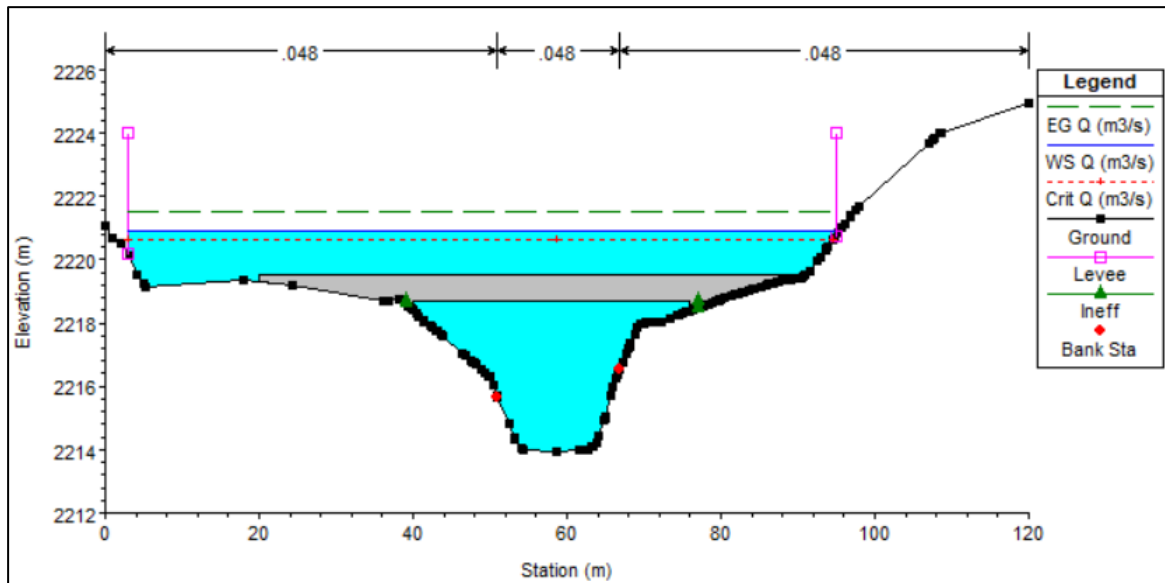
Impacto de flujo en Puente 08



Nota: Captura de video, Corrales (2019).

Figura 82.

Atura de Gálibo de Puente 08



Nota: Elaboración propia.

Figura 83.

Situación de pobreza o desarrollo humano de Puente 08



Nota: Elaboración propia.

Figura 84.

Proximidad a centros poblados de Puente 08



Nota: Adaptado de Google – h (2022).

7.2. Matriz de evaluación final

En la Tabla 51 se muestra el promedio final ponderado de vulnerabilidad de los puentes luego de haber aplicado la matriz de evaluación. Con estos resultados se halló el orden del puente más vulnerable al menos vulnerable.

Tabla 51.

Puntuación final de vulnerabilidad de los puentes de estudio

ID	Variable	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08
A1	Cambio climático - niveles de temperatura	4	4	4	4	4	4	4	4
A2	Composición y calidad del agua	4	4	4	4	4	4	4	4
A3	Condiciones ecológicas	3	3	3	3	2	3	3	3
A4	Residuos que interrumpen el flujo del río	3	3	3	4	1	2	2	2
T1	Materiales usados en la construcción	3	1	3	1	2	1	1	2
T2	Estado de conservación del puente	3	3	3	4	4	2	2	1
T3	Protección contra el flujo en pilares y estribos	5	3	2	5	2	3	4	3
T4	Características geométricas – altura del puente (*)	1	5	1	5	1	1	4	5
T5	Profundidad de socavación en cimentación superficial (**)	-	-	-	-	-	-	-	-
T6	Capacidad actual de las represas aguas arriba (***)	3	3	3	3	3	3	3	3
S1	Situación de pobreza o Desarrollo humano	1	1	1	1	1	1	2	1

S2	Programas de capacitación en la población en Prevención y Atención de Desastres (PAD)	4	4	4	4	4	4	4	5
S3	Proximidad a centros poblados	5	5	5	5	5	5	5	5
S4	Material de viviendas aledañas al puente (****)	1	1	1	1	1	1	1	1
E1	Tiempo en funcionamiento del puente	5	3	5	4	5	4	2	1
E2	Importancia del puente según su volumen de tráfico vehicular	5	5	5	5	4	5	5	4
E3	Cierre de puente al tránsito vehicular por riesgo hidrológico	1	4	1	4	3	1	4	3
E4	Historia de inundaciones (*****)	-	-	-	-	-	-	-	-
PROMEDIO		3.19	3.25	3.00	3.56	2.88	2.75	3.13	2.94

Nota: Elaboración propia.

Aplicando la matriz de evaluación de vulnerabilidad hidrológica propuesta en el cauce del río Chili, se obtiene como resultado que los puentes San Martín, Bajo Grau, Grau y Tingo son los más vulnerables con una puntuación de 3.56, 3.25, 3.19 y 3.13 respectivamente.

7.3. Comparativa

Se realiza una tabla resumen de los ocho puentes considerando que los que tienen puntuación promedio mayor igual a 3 tienen vulnerabilidad alta, valores menores a 3 y mayor igual a 2.5, vulnerabilidad media y menores a 2.5 tienen vulnerabilidad baja. Siendo 2.5 la mitad del valor máximo de evaluación. Esta evaluación y orden de vulnerabilidad se muestra en la Tabla 52 y de manera gráfica en la Figura 85.

Tabla 52.

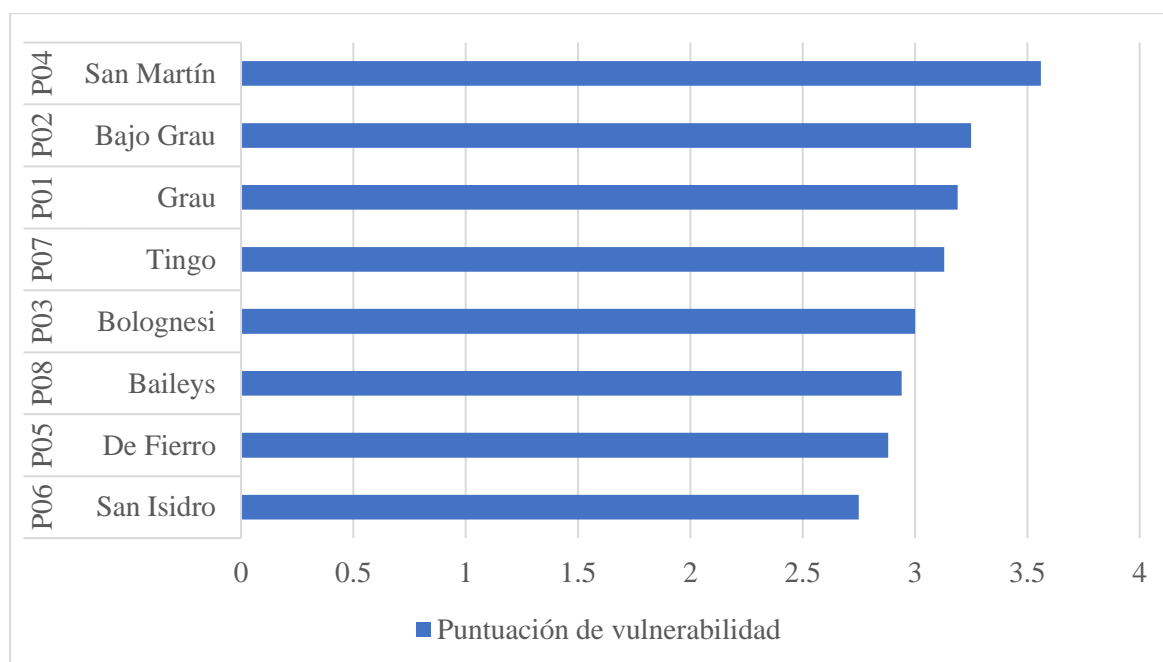
Resumen de puntuación final de puentes y priorización

Prioridad	ID	Puente	Puntuación	Vulnerabilidad
1	P04	San Martín	3.56	Alta
2	P02	Bajo Grau	3.25	Alta
3	P01	Grau	3.19	Alta
4	P07	Tingo	3.13	Alta
5	P03	Bolognesi	3	Alta
6	P08	Bailey	2.94	Media
7	P05	De Fierro	2.88	Media
8	P06	San Isidro	2.75	Media

Nota: Elaboración propia.

Figura 85.

Priorización de puentes y puntuación final



Nota: Elaboración propia.

Se recomienda reducir la vulnerabilidad de los puentes de acuerdo con el orden mostrado en la Figura 85.

7.4. Propuestas de optimización

De acuerdo con el análisis de vulnerabilidad de los puentes se recomienda realizar las siguientes acciones para reducir su vulnerabilidad.

Como recomendaciones generales: Se recomienda en partes altas y medias, reforestar y conservar la campiña del área de estudio. tomar medidas para controlar la contaminación del agua en el río Chili. Limpieza constante al cauce, mínimo 2 veces al año. Realizar un estudio actual de batimetría a la represa de Aguada Blanca para tomar acciones en beneficio de la población de Arequipa, como la construcción de una nueva represa reguladora. Resoluciones administrativas más rigurosas para que los pobladores respeten la faja marginal y evitar así su invasión y dejar libre los planos de inundación del cauce. Además, se recomienda realizar programas de capacitación y sensibilización constante, sobre gestión de riesgo de inundaciones por el Gobierno Regional, local o entidades privadas. Especialmente sobre casos de inundación y rotura de presa.

En la Tabla 53, se muestra recomendaciones específicas para cada puente.

Tabla 53.

Recomendaciones de optimización estructural para cada puente

ID	Recomendaciones
P01	Al ser el puente de sillar necesita un reforzamiento en sus pilares por el efecto erosivo del flujo y por tener más de 134 años en funcionamiento se recomienda complementar la investigación un análisis estructural.
P02	Al ser un puente importante y que ha sufrido el impacto del flujo de río en varias ocasiones debido a su poca altura de gálibo, se sugiere un nuevo diseño geométrico al puente considerando una mayor altura de gálibo que pueda unirse adecuadamente con la Av. La Marina.
P03	Al tener el puente más de 414 años en funcionamiento se sugiere complementar la investigación con un análisis estructural.
P04	Al realizar la visita a campo se observó fisuras en forma vertical cerca al estribo derecho del puente visto aguas arriba y además en algunas partes el acero del puente esta desprotegido. Se sugiere complementar la investigación con un estudio de patología del concreto al puente y un análisis estructural. Además, se sugiere aumentar en lo posible la altura de gálibo del puente con un nuevo diseño geométrico, debido a que este es vulnerable a ser impactado por el flujo de agua en temporadas lluviosas.
P05	Al tener el puente más de 151 años en funcionamiento se sugiere complementar el estudio con un análisis estructural del puente.
P06	Se sugiere más control para evitar que se dispongan de desmonte y desechos cerca al puente, que pueda ahorcar el flujo de agua en una máxima avenida.
P07	Se recomienda generar ordenanzas para así evitar que más pobladores sigan construyendo en zonas aledañas al río y el puente, invadiendo la faja marginal. Además, se sugiere un nuevo diseño geométrico, que considere aumentar la altura de gálibo para mayor seguridad frente a eventos de máximas avenidas.
P08	Debido a que solo 1 vez fue cerrado al tránsito vehicular por eventos hidrológicos y en conversación con el poblador que vive aledaño al puente, se recomienda complementar la investigación con un estudio para la implementación de defensas ribereñas aguas arriba del mismo, para evitar inundaciones futuras de áreas de cultivo, viviendas y del mismo puente.

Nota: Elaboración propia.



CAPITULO VIII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

- Tomando como base una revisión exhaustiva de la literatura disponible, se elaboró una matriz de evaluación de vulnerabilidad hidrológica subdividida en 4 dimensiones: ambiental, técnica, social y económica. Se consideraron un total de 18 parámetros de evaluación distribuidos de la siguiente forma: 4 parámetros ambientales, 6 técnicos, 4 sociales y 4 económicos. Cada parámetro tiene 5 niveles de evaluación: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto, con valores entre a 1 a 5 respectivamente. Para hallar la ponderación final se realizó un promedio de las puntuaciones de las evaluaciones de los parámetros. Los puentes con un promedio mayor o igual a 3 se consideraron puentes con vulnerabilidad alta, entre mayor o igual a 2.5 y menor a 3 como vulnerabilidad media y menores a 2.5 como vulnerabilidad baja, esto fue validado con los resultados obtenidos luego de aplicar la matriz. La matriz fue validada por 6 ingenieros expertos en la rama de hidráulica de puentes, mediante entrevistas semiestructuradas y un proceso de codificación de datos. Además, también se validó la matriz aplicándola al cauce de estudio, demostrando su eficacia. Entonces, se concluye que la matriz permite un óptimo análisis de vulnerabilidad de puentes sobre cauces de río. Se puede decir entonces, que la matriz y la metodología empleada, pueden ser replicadas para estudios de otros puentes de cauce de río y al mismo tiempo pueden ser optimizadas en la medida que se añadan más parámetros.
- Se determinó la vulnerabilidad de los puentes a través de un análisis hidrológico y modelamiento hidráulico. Respecto al estudio hidrológico, el parámetro de entrada más relevante fue la serie de caudales máximos anuales, debido a que el cauce es aforado. De allí, se obtuvieron 63 datos históricos. Mediante la estadística hidrológica, se determinó escenarios críticos en función a las recomendaciones normativas para estimar caudales. Además, se consideraron caudales adicionales debido a las torrenceras anexas al cauce. Se realizó un análisis para estimar los caudales de modelamiento y se consideró un caudal de 590.5 m³/s para los puentes 01, 02, 03 y 04, debido a que se ven afectados por el flujo de las quebradas El Pato y San Lázaro; 623.3 m³/s para los puentes 05 y 06, por el aumento de caudal de la quebrada Venezuela y para los puentes 07 y 08 un caudal de 766.1 m³/s, por la influencia de la quebrada Los Incas. Estos caudales fueron validados mediante grabaciones de la interacción de los puentes con una avenida máxima ocurrida el 2012. Respecto al modelamiento hidráulico, se utilizó el software HEC-RAS con el cual se hallaron los NAME de cada puente obteniendo como resultados que los puentes 02, 04, 07 y 08 son impactados por el flujo.

- Aplicando la matriz de evaluación, se realizó la comparativa en cuanto a vulnerabilidad de los puentes en estudio y se ordenaron de más vulnerables a menos vulnerables, de tal forma que la priorización para atender estos puentes sigue el siguiente orden: Puente San Martín, Bajo Grau, Grau, Tingo, Bolognesi, Bailey, De fierro y San Isidro, con una puntuación de vulnerabilidad 3.56, 3.25, 3.19, 3.13, 3, 2.94, 2.88 y 2.75 respectivamente. Esto trae consigo que las autoridades municipales cuenten con una herramienta de gestión al momento de priorizar proyectos de mantenimiento y reforzamiento a puentes.
- Se plantearon medidas de optimización estructural para reducir la vulnerabilidad en los puentes estudiados. Se dieron las siguientes recomendaciones generales como: en partes altas y medias, la reforestación y conservación de la campiña de la ciudad; tomar medidas para controlar la contaminación del agua del río Chili y una limpieza constante del cauce mínimo 2 veces al año. También un estudio actual de batimetría de Aguada Blanca, represa reguladora del río; resoluciones administrativas rigurosas para evitar la invasión de faja marginal y también la ubicación de viviendas en la misma; preparar a la población mediante programas de capacitación y sensibilización sobre gestión de riesgo de inundaciones. Así también, se plantearon medidas de optimización para cada puente. Para el puente Grau, un reforzamiento en sus pilares debido al daño por efecto erosivo del flujo por ser de material de sillar y tener 134 años en funcionamiento, adicionalmente complementar la evaluación con un análisis estructural. Para el puente Bajo Grau, debido a ser altamente vulnerable al choque del flujo con el tablero, un nuevo diseño geométrico, considerando una mayor altura de gálibo, que lo una adecuadamente con la Av. La Marina. Para el puente Bolognesi por tener más de 414 años en funcionamiento complementar la investigación con un análisis estructural. Para el puente San Martín, un estudio de patología del concreto del puente y un análisis estructural y aumentar en lo posible la altura de galibo, mediante un nuevo diseño geométrico, considerando que tiene 63 años de funcionamiento y estaría próximo a cumplir su vida útil. Al puente De Fierro por tener más de 151 años en funcionamiento, complementar con un estudio de análisis estructural del puente. Al puente San Isidro, más control para evitar que se dispongan desmonte y desechos cerca al puente, que puedan ahorcar el flujo de agua en una máxima avenida. Al puente Tingo, un diseño geométrico que permita un aumento en la altura de gálibo para mayor seguridad frente a eventos de máximas avenidas. Al puente Bailey, complementar con un estudio para la implementación de defensas ribereñas aguas arriba del mismo, para evitar futuras inundaciones de áreas de cultivo, viviendas y de la misma infraestructura.

8.2. Discusión

Los parámetros de cambio climático, temperatura y calidad de agua, fueron evaluados por investigaciones anteriores en el sitio de estudio, a esto también se pueden realizar investigaciones actuales y a más detalle por los evaluadores de vulnerabilidad en puentes. Además de los parámetros propuestos, existen 6 parámetros adicionales, que inicialmente se plantearon en la matriz, los cuales son motivo de discusión porque bajo otros niveles de evaluación podrían integrarse a futuro, como por ejemplo, el mantenimiento al cauce y al puente, cuántas veces se hace al año y si es que no se realiza; el tipo de río, existen montañosos, de baja pendiente y con meandros, en este parámetro consiste en evaluar qué tipo de río es más vulnerable; el tipo de cimentación del puente, si es de pilotes, con zapatas o con anclajes a macizo rocoso; tipo de suelo donde está cimentado, si es de roca, arenas, gravas o limos. También el rango de edad de los pobladores, si son niños, jóvenes o ancianos en su mayoría. Estos parámetros se pueden considerar a futuro y darles 5 niveles de evaluación de vulnerabilidad para ser añadidos a la matriz propuesta.

Respecto al modelamiento hidráulico, se puede realizar otros tipos de modelamientos 2D y 3D, y en diversos tipos de software como IBER o HEC RAS. Además, es importante validar adecuadamente el caudal de modelamiento debido a que está directamente relacionado con el periodo de retorno y la normativa exige un periodo mínimo el cual en muchos casos sub dimensiona la altura de gálibo del puente, haciéndola más vulnerable al flujo de una máxima avenida.

8.3. Recomendaciones y futuras líneas de investigación

- Se recomienda profundizar la investigación realizando un modelamiento hidráulico que considere los caudales adicionales de las torrenceras de margen izquierda y derecha del río Chili en los tramos de estudio para obtener caudales más precisos de modelación.
- Es importante tener en cuenta la relación de dependencia que tiene la infraestructura en relación con la sociedad (grado de instrucción, pobreza, etc.). Se podrá extender la investigación profundizando y enfocándose en la relación infraestructura-población.
- Considerando que no se cuenta con la profundidad de cimentación de algunos puentes, se recomienda realizar una investigación respecto a la socavación de los puentes estudiados. Se pueden aplicar métodos innovadores para hallar la profundidad de cimentación en estos puentes. Existen tecnologías que, a través de sensores, pueden medir, entre otros parámetros, socavación en tiempo real en puentes, como *digital twins*.

- Se recomienda publicar y/o entregar la presente investigación a las municipalidades para que lo consideren en su operación de mantenimiento, limpieza de cauces, prevención y reparación de los puentes vulnerables.
- Realizar un estudio económico y seguimiento a los puentes más vulnerables hallados, para hacer un análisis sobre cuánto dinero se gasta en mantener los puentes luego de un evento hidrológico considerable. Esto proporcionaría índices de si es factible diseñar y construir un nuevo puente en mejores condiciones de funcionamiento y seguridad hidrológica, que hacer un mantenimiento repetitivo del puente. Esto conlleva a también investigar metodologías novedosas para que este tipo de infraestructura puedan extender su vida útil, porque como resultado de la investigación, puentes muy antiguos aún siguen en funcionamiento.
- Se recomienda para la aplicación de la matriz por entidades públicas, elaborar una guía o manual de aplicación para que estas se familiaricen con la metodología. Los resultados deben mostrarse de forma clara y concisa mediante gráficos a la población. En caso se adapte la matriz para evaluar puentes en cauces con otras características, debe existir un análisis previo de tal forma que los criterios se adapten al área de estudio.
- Se recomienda aplicar y seguir optimizando la matriz en otros cauces de río, en el Perú y en el extranjero, a fin de reducir la vulnerabilidad de estas infraestructuras tan importantes para la población.

REFERENCIAS

- ANA. (2015). *Estudio de Delimitación de la Faja Marginal del río Chili* Autoridad Nacional del Agua
- ASF DAAC. (22 de julio de 2010). ALOS_PALSAR_Hi-Res Terrain Corrected, JAXA/METI ALPSRP239236850-RTC_HI_RES ASF
https://datapool.asf.alaska.edu/RTC_HI_RES/A3/AP_23923_FBD_F6850_RT1.zip
- AUTODEMA. (2022). *Información referente a represa Aguada Blanca* (Informe N° 1432-2022-GRA-PEMS-GGRH-SGOM Autoridad Autónoma de Majes
- Andina. (22 de febrero de 2019). Lluvias en Arequipa serán más fuertes en marzo según pronóstico de Senamhi. [Figura]. *El Búho*. <https://elbuho.pe/2019/02/lluvias-en-arequipa-aumentaran-marzo/>
- Bhatkoti, R., Moglen, G. E., Murray-Tuite, P. M. & Triantis, K. P. (2016). Changes to Bridge Flood Risk under Climate Change. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21 (12), 04016045. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001448](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001448)
- Bento, A. M., Gomes, A., Viseu, T., Couto, L. & Pêgo, J. P. (2020). Risk-based methodology for scour analysis at bridge foundations. *Engineering Structures*, 223, 111115. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111115>
- Breña, A. (2003). *Hidrología Urbana*. Universidad Autónoma Metropolitana, México, D.F.
- Caja1. (1 de octubre de 2021). *El puente Bolognesi*. Los Lonccos <https://loslonccos.com.pe/el-puente-bolognesi/>
- Canal N. (9 de febrero de 2019). Arequipa: pobladores de Vallecito en alerta por el incremento del caudal del río Chili. [Figura]. *Canal N*. <https://canaln.pe/actualidad/arequipa-alerta-incremento-caudal-rio-chili-n358645>
- Carpio, J. G. (1983). *Texao: Arequipa y Mostajo. La historia de un pueblo y un hombre. Tomo III*
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (2014). *Manual para la evaluación de Riesgos Originados por Fenómenos Naturales - 2da Versión*. https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf
- Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill.
- Concha, C. & Miranda, A. (2016). *Análisis del riesgo de inundación de la cuenca del río Chili en el tramo de Chilina a Uchumayo - Arequipa* [tesis de grado, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio de tesis - Universidad Católica de Santa María. <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/5834>

- Corrales, J. (23 de febrero de 2019). RIO CHILI AREQUIPA. [Figura]. *YouTube*.
<https://www.youtube.com/watch?v=mCiNeP08C-I>
- Cruz, O. (06 de abril de 2022). Arequipa: Habilitan puente Bailey después de 2 años. *Diario Correo*.
<https://diariocorreo.pe/edicion/arequipa/arequipa-habilitan-puente-bailey-despues-de-2-anos-noticia/?ref=dcr>
- Diario Sin Fronteras. (23 de agosto de 2021). Deberan retirar puente bailey, que une Tiabaya con Hunter. *Sin Fronteras*.
<https://diariosinfronteras.com.pe/2021/08/23/deberan-retirar-puente-bailey-que-une-tiabaya-con-hunter/>
- diegosalazarvideos. (14 de febrero de 2012). Rio Chili en la ciudad de Arequipa HD. [Figura].
YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=Hq_2_CINx5c
- Eguiluz, P. (25 de julio de 2016). *Los puentes sobre el río Chili*.
<https://percyeguiluz.blogspot.com/2016/07/los-puentes-sobre-el-rio-chili.html>
- El Búho - a. (25 de febrero de 2020). Lluvias en Arequipa: desborde de torrenteras en la La Isla, Terminal Terrestre y Paucarpata. *El Búho*.
<https://elbuho.pe/2020/02/lluvias-en-arequipa-desborde-de-torrenteras-en-la-isla-terminal-terrestre-y-paucarpata/>
- El Búho - b. (13 de febrero de 2020). Arequipa: peligrosa crecida del río Chili tras intensas lluvias (VIDEO). [Figura]. *El Búho*.
<https://elbuho.pe/2020/02/arequipa-crecida-del-rio-chili-tras-intensas-lluvias-video/>
- El Búho. (18 de julio de 2012). Puentes Grau, Fierro y San Isidro corren riesgo de desplomarse. *El Búho*.
<https://elbuho.pe/2012/07/puentes-grau-fierro-y-san-isidro-corren-riesgo-de-desplomarse/>
- Espinoza, A. J. & Booker, J. D. (2022). Hydrological Vulnerability Assessment of Riverine Bridges: a case study of the Bajo Grau Bridge in Arequipa, Peru.
- Espinoza, A. J. (2019). *Análisis de la Vulnerabilidad Hidrológica del Puente Bajo Grau en la ciudad de Arequipa* [tesis de grado, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio de tesis - Universidad Católica de Santa María.
<http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/9042>
- Ettinger, S., Mounaud, L., Magill, C., Yao-Lafourcade, A. -F., Thouret, J. -C., Manville, V., Negulescu, C., Zuccaro, G., De Gregorio, D., Nardone, S., Luque Uchuchoque, J. A., Arguedas, A., Macedo L. & Manrique Llerena, N. (2016). Building vulnerability to hydro-geomorphic hazards: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assesment using logistic regression. *Journal of Hidrology*, 541, 563-581.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.017>

- Exitosa. (10 de febrero de 2019). Arequipa: Cierran dos puentes ante incremento de caudal del río Chili. *Exitosa Noticias*. <https://exitosanoticias.pe/v1/arequipa-cierran-dos-puentes-ante-incremento-de-caudal-del-rio-chili/>
- FCopaP. (13 de febrero de 2012). Arequipa el rio Chili con 255m3/s. [Figura]. *YouTube*. <https://www.youtube.com/watch?v=ZrKzQC08Cqk>
- Frase Corta. (11 de agosto de 2022). *Un día como hoy fue inaugurado el puente San Martín*. Facebook <https://www.facebook.com/frasecorta/photos/a.1554014347966348/5836343223066751/?type=3>
- Frase Corta. (24 de febrero de 2011). Crecida del río Chili Arequipa - 2011. [Figura]. *YouTube* <https://www.youtube.com/watch?v=-ziYBEJ1Olc>
- Google - a. (13 de setiembre de 2022). [*Proximidad a centros poblados de Puente 01*] [Figura]. https://earth.google.com/web/@-16.39255346,-71.53891603,570.32857418a,0d,35y,-0h,0t,0r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=es-419
- Google - b. (13 de setiembre de 2022). [*Proximidad a centros poblados de Puente 02*] [Figura]. https://earth.google.com/web/@-16.39364212,-71.53914983,413.88889165a,0d,35y,0.0001h,0t,0r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=es-419
- Google - c. (13 de setiembre de 2022). [*Proximidad a centros poblados de Puente 03*] [Figura]. https://earth.google.com/web/@-16.39766759,-71.54198499,338.87437919a,0d,35y,0.0001h,0t,0r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=es-419
- Google - d. (13 de setiembre de 2022). [*Proximidad a centros poblados de Puente 04*] [Figura]. https://earth.google.com/web/@-16.40381789,-71.54412281,327.04519549a,0d,35y,0.0001h,0t,0r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=es-419
- Google - e. (13 de setiembre de 2022). [*Proximidad a centros poblados de Puente 05*] [Figura]. https://earth.google.com/web/@-16.41051303,-71.54811149,239.53798536a,0d,35y,-0h,0t,0r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=es-419
- Google - f. (13 de setiembre de 2022). [*Proximidad a centros poblados de Puente 06*] [Figura]. https://earth.google.com/web/@0,0,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=es-419

- Google - g. (13 de setiembre de 2022). [*Proximidad a centros poblados de Puente 07*] [Figura].
https://earth.google.com/web/@0,0,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=es-419
- Google - h. (13 de setiembre de 2022). [*Proximidad a centros poblados de Puente 08*] [Figura].
https://earth.google.com/web/@-16.44412227,-71.57258452,558.70213543a,0d,35y,-0.0000h,0.0000t,0.0000r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=es-419
- Google - a. (2 de abril de 2021). [*Puentes de estudio en la ciudad de Arequipa*] [Figura].
https://earth.google.com/web/@-16.41733905,-71.54346551,11555.4436631a,0d,35y,359.9994h,0t,0r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=es-419
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2018). *Resumen ejecutivo histórico - Temporada de lluvias, 2016 - 2017: (Actualizado el 24 de Enero 2018)*. [Figura].
<https://portal.indeci.gob.pe/emergencias/resumen-ejecutivo-historico-temporada-de-lluvias-2016-2017-actualizado-al-24-de-enero-2018-2/>
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2006). *Manual básico para la estimación del riesgo*.
http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc319/doc319_contenido.pdf
- Kuroiwa, J. (2019). *Gestión del riesgo de desastres en el siglo XXI*. NSG SAC.
- La República. (13 de febrero de 2019). Arequipa: Pilares y cornisas del puente Bolognesi se están erosionando. *La República*. <https://larepublica.pe/sociedad/1412891-pilares-cornisas-puente-bolognesi-erosionando/>
- Libélula, C. A. y D. S. A. . (2018). *Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en Arequipa Metropolitana*. Caracas: CAF.
<https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1181>
- LR Arequipa. (28 de agosto de 2021). Arequipa: puente bailey que une distritos de Hunter y Tiabaya aún no será desmontado. *La República*.
<https://larepublica.pe/sociedad/2021/08/28/arequipa-puente-bailey-que-une-distritos-de-hunter-y-tiabaya-aun-no-sera-desmontado-lrsd/>
- Liu, W. -C., Hsieh, T. -H. & Liu, H. -M. (2021). Flood Risk Assessment in Urban Areas of Southern Taiwan. *Sustainability*, 13 (6), 3180. <https://doi.org/10.3390/su13063180>
- Martínez, F. (22 de julio de 2022). La verdadera historia del puente Fierro de Arequipa: ¿lo construyó el creador de la Torre Eiffel?. *La República*.

- <https://larepublica.pe/sociedad/2022/07/22/arequipa-conoce-la-verdadera-historia-del-puente-fierro-lo-construyo-el-creador-de-la-torre-eiffel-puente-bolivar/>
- Méndez, R. (23 de febrero de 2011). Cierran tres puentes en Arequipa como medida de prevención ante crecida del río Chili. *Andina: Agencia Peruana de Noticias*. <https://andina.pe/agencia/noticia.aspx?id=344650>
- Méndez, R. (12 de febrero de 2012). Cierran puentes en Arequipa por incremento del caudal del río Chili. *Andina: Agencia Peruana de Noticias*. <https://andina.pe/agencia/noticia-cierran-puentes-arequipa-incremento-del-caudal-del-rio-chili-399604.aspx>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008). *Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje*. http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_2950.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones - a. (2018). *Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG* - 2018. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual.de.Carreteras.DG-2018.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones - b. (2018). *Manual de Puentes*. <https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales/257462-19-2018-mtc-14>
- National Defense Research Institute. (2009). *Data Collection Methods. Semi-Structured Interviews and Focus Groups*.
- Paredes, J. C. (2019). *Gestión de riesgos bajo el enfoque del PMI en obras viales existentes - Caso: Puente Bajo Grau, Arequipa - 2018* [tesis de maestría, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio de tesis - Universidad Católica de Santa María. <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/8914>
- Pregolato, M., Winter, A. O., Mascarenas, D., Sen, A. D., Bates, P. & Motley, M. R. (2022). Assessing flooding impact to riverine bridges: an integrated analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22 (5), 1559-1576. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1559-2022>
- Ramos, C. & Saldivar, G. (2022). *Análisis de riesgo frente a máximas avenidas con el uso del producto grillado pisco PD en las quebradas Polanco, San Lázaro, Miraflores y Mariano Melgar en la provincia de Arequipa* [tesis de grado, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio de tesis - Universidad Católica de Santa María. <https://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12920/11833>
- RPP Noticias. (23 de febrero de 2011). Cierran tres puentes ante posible desborde del río Chili en Arequipa. *RPP Noticias*. <https://rpp.pe/peru/actualidad/cierran-tres-puentes-ante-posible-desborde-del-rio-chili-en-arequipa-noticia-339102>

- Smith, D. (1976). Bridge failures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 60 (3), 367-382. <https://doi.org/10.1680/iicep.1976.3389>
- USACE. (2022). *HEC-RAS Hydraulic Reference Manual*. US Army Corps of Engineers <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/latest>
- Vargas, M. C. (2021). *Determinación de índice simplificado de calidad de agua en el río Chili, Arequipa 2019* [tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio Institucional de la UNSA. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12773/12585>
- Zavala E. (13 de febrero de 2012). Río Chili alcanzó su más alto caudal. [Figura]. *Willax Televisión*. <https://www.youtube.com/watch?v=qgpQelKojws>



ANEXOS

ANEXO 1 - Transcripción de entrevistas semiestructuradas

Tabla 54.

Transcripción de entrevistas semiestructuradas

ID	Profesional 1
R1.1	“Para mí, los criterios presentados permitirán realizar una evaluación adecuada a la realidad del río Chili de Arequipa”
R1.2	“Mejorar el monitoreo de los puentes a través del tiempo, para verificar cada año cómo funciona la matriz”
R1.3	“La metodología que propones de repente no es adecuada para otros cauces de río porque tienen otra naturaleza hidrológica. Si toman tu matriz de evaluación como una metodología que ayudaría a otros ríos, se tiene que recomendar en cada lugar, que lo que tú has planteado es para Arequipa y tu matriz de evaluación debe adecuarse y mejorarse para el lugar donde se quiere aplicar la evaluación”
Profesional 2	
R2.1	“Actualmente, lo que estas presentando, permite realizar una adecuada evaluación in situ prácticamente en lo que es nuestro río Chili. Son criterios óptimos, se tiene un nivel bajo, intermedio y alto que estas considerando. Esperemos que se adecue a una realidad practica a otros puntos como lo estas enfocando porque la realidad de nuestro río Chili es peculiar”
R2.2	“No creo de hacer una optimización, sino ver el criterio puntual de como esta conceptualizado la naturaleza de una vulnerabilidad. Darle el enfoque en una parte de baja, mediana y alta como lo estas enfocando. En el caso de una matriz de vulnerabilidad, se detalla que riesgos se tiene en el lugar.”
R2.3	“En las municipalidades provinciales y distritales de acuerdo a un ámbito público, si ellos quieren implementar esta matriz, sería la fase de que tienen uno de riesgo de defensa civil, actualmente, por ejemplo, el Gobierno Regional tiene INDECI ya tiene un lugar, pero enfocarlo en cada municipalidad, algunas he visto que si tienen estudios de riesgo de vulnerabilidad, por ejemplo, en Miraflores he visto que hay un lugar donde actualmente, se ha visto que en partes altas se han hecho modelamiento en función de inundaciones de riesgo pluviales y en torrenteras. Lo que tú estás planteando, sería como una matriz de enfoque en la vulnerabilidad, sino actualizarlo en función de la naturaleza del lugar. No sería implementarlo porque algunas entidades ya tienen”
Profesional 3	
R3.1	“Yo creo que un análisis integral de los sistemas de infraestructura es importantísimo porque eso va a permitir una priorización para intervenirlos. Lo cual se traduce quizás en inversiones en estos sistemas de infraestructura que puedan ser más vulnerables que otros y mediante esas inversiones e intervenciones se puede asegurar la seguridad de las personas y de los vehículos

que hacen uso de estos sistemas de infraestructura como son los puentes y todo lo que involucra”

R3.2 “Yo creo que, desde la perspectiva hidrológica la matriz es muy consistente. Siento que investigaciones futuras podrían añadir un aspecto estructural también. Un análisis estructural de infraestructura, creo que de esa forma se puede complementar la matriz. Desde lo hidrológico me parece muy completa, y refleja un análisis holístico de los puentes”

R3.3 “Yo creo que es un reto absoluto, implementar metodologías nuevas en gobiernos locales. Por distintos factores porque se utilizan métodos tradicionales y lamentablemente la mentalidad no es de optimizar las metodologías, sino del continuismo. La recomendación sería implementarla de a pocos y elaborar una guía con notas claras y puntos concisos que sirvan de guía para los gobiernos de como implementar. Además de por si presentar esta investigación a gobiernos locales y presentar los resultados de cómo es que uno puede priorizar los puentes e intervenir en función de esta matriz tan completa, también sería una buena herramienta refiriendo a entidades públicas se aseguren que van a poder tener una certeza en lo que es la implementación, de que va a ser útil en caso lo utilicen”

Profesional 4

R4.1 “Nos permite una evaluación global de los diversos aspectos relacionados con el nivel operativo de un puente. Se evalúa incrementos de temperatura que podrían generar mayores precipitaciones. Se evalúa la profundidad de socavación del puente, lo cual nos da un índice de la vulnerabilidad de los puentes. Si hay daños en el tablero del puente producto de una roca o crecida nos daría que la altura de gálibo del puente tiene poca altura. La condición de la localidad implica que, si tiene mayor presupuesto del estado, se podría hacer mayor correcciones y mantenimiento, y si tiene poco presupuesto o ha sufrido el abandono del estado es más probable que no hayan resuelto sus problemas mínimos y mucho menos la vulnerabilidad de sus puentes”

R4.2 “Hay que definir, independientemente de que se analice uno o varios puentes, que número entre 1 y 5 me definen que el puente es vulnerable. Una matemática elemental nos diría que 2.5 está en el término medio, pero entre 2.5 y 5 debe existir un número que me diga que a partir de aquí el puente es vulnerable”

R4.3 “Lo primero, es familiarizarse con la metodología, que las personas de la municipalidad la puedan entender. Es indudable que es un análisis cualitativo en su mayoría, una vez que un puente salga en situación vulnerable, se debe hacer los estudios que correspondan, por ejemplo. Una prospección para ver a que altura está el nivel de socavación del rio, que cosas se pueden hacer para proteger parte de la socavación del puente para evitar su colapso y que consideraciones se debe tener para evitar el desborde de las aguas. Esto tiene que ver con el periodo de retorno, hay condiciones en las que nunca no va a ver desborde, y otras que

probablemente por encima de 250 años de periodo de retorno en que puedan que existan desbordes. Hay acciones que son inmediatas cuando se toma un periodo de retorno bajo y otras que con un periodo de retorno alto que pueden ser planificadas a posterior. Creo que el gran problema del estado es que planifica para el año, cuando en realidad, hay cosas que probablemente se tiene que pedir los recursos de aquí a dos años, con anticipación, para que llegue oportunamente. Si sigo viviendo, pensando en el año, como periodo de gestión no hay posibilidades de encontrar posibilidades.”

Profesional 5

- R5.1** “Precisamente para hacer todos estos estudios de vulnerabilidad, peligro y riesgo siempre con lleva una matriz de análisis cualitativo y cuantitativo, tal y como me has indicado. Mi recomendación sería que para publicar en paper, enfócate más en lo cuantitativo. “
- R5.2** “He visto lo más importante para cada puente del cauce del río Chili me parece que están los puntos más básicos. En el desarrollo de tu investigación puedes ir ampliando tu bibliografía para conseguir más parámetros. Buscar siempre la mejora continua a través de la lectura, mientras más artículos estén en tu bibliografía mucho mejor”
- R5.3** “Las recomendaciones para estas entidades es que debes tener todos tus mapas cartográficos desarrollados. El uso de QGIS donde podrás mostrar todos tus resultados de la tesis y esa cartografía digital en A3 va a quedar para la universidad y para la sociedad. Vas a brindar los puntos críticos y susceptibles de evaluación para tu matriz. Eso va a ser un aporte para las poblaciones lo que debe saber es a través de figuras o presentación de mapas.”
-

Profesional 6

- R6.1** “Yo pienso que todos los criterios están bien desarrollados, me parece que está muy bien”
- R6.2** “La única recomendación que te podría indicar, es que, al momento de hacer el modelo hidráulico, determines con precisión los valores de rugosidad que eso tiene bastante que ver al momento de modelo, porque la rugosidad cuando tu modelas hace que cambie los tirantes, varios valores”
- R6.3** “Tendrías que trabajar con el área de estudios para que, al momento de hacer la formulación, sobre todo los estudios de pre-inversión, donde se tiene que evaluar los estudios de impacto ambiental, los estudios de riesgos, ser considerados dentro de todos los estudios y para eso habría que de repente elaborar directivas con estas matrices como parte de la aplicación de la directiva para que lo consideren al momento de evaluar la parte de impacto ambiental y gestión de riesgos. En una directiva en la municipalidad provincial, distrital o regional. Y lo pongan como parte de sus procedimientos o manuales que tengan para que los que se encarguen de hacer los estudios apliquen estas matrices”
-

Nota: Elaboración propia.

ANEXO 2 - Caudales Máximos Mensuales del río Chili

Tabla 55.

Caudales máximos mensuales de río Chili

SISTEMA REGULADO CHILI													
DESCARGA TOTAL AGUADA BLANCA - CAUDAL MEDIO DIARIO (m ³ /s)													
2005-2022													
Estación	: AGUADA BLANCA					Latitud	: 16° 14' S		Dpto.	: AREQUIPA			
Código	: ---					Longitud	: 71° 20' W		Prov.	: AREQUIPA			
Cuenca	: QUILCA-VITOR- CHILI					Altitud	: 3,671 m.s.n.m.		Dist.	: S. J. DE TARUCANI			
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
2005	12.5	62.8	23.9	11.3	12.6	8.5	8.1	7.6	9.1	9.1	9.1	9.1	
2006	47.2	78.7	96.0	81.1	12.3	12.1	12.1	13.2	13.2	13.3	14.6	19.8	
2007	24.3	20.1	24.3	14.7	13.1	12.3	12.1	12.3	12.5	13.0	13.1	13.1	
2008	23.8	14.4	14.5	12.5	10.5	9.6	9.8	9.8	10.5	10.5	10.6	11.0	
2009	10.5	8.1	97.7	9.1	9.0	9.0	8.1	8.0	9.3	9.6	9.3	9.2	
2010	9.3	13.1	13.0	11.5	11.5	10.5	10.0	11.0	11.2	12.0	12.0	12.1	
2011	13.0	137.3	64.5	68.5	15.1	14.2	13.0	13.3	13.0	14.7	15.5	19.9	
2012	97.4	236.6	88.0	52.3	15.2	14.3	14.6	12.5	15.1	15.5	15.2	50.9	
2013	107.3	52.4	94.8	18.1	15.0	14.1	14.1	14.5	14.4	14.0	15.1	14.5	
2014	23.1	18.0	12.0	11.0	9.0	9.0	9.1	9.1	10.2	11.0	10.0	10.0	
2015	10.1	9.0	28.8	12.8	10.5	10.0	10.3	10.1	10.5	10.0	10.1	11.0	
2016	10.3	82.0	14.8	10.1	10.0	10.0	10.0	10.0	11.5	11.4	11.0	10.6	
2017	12.0	12.5	33.6	46.5	12.0	11.0	12.6	12.0	13.0	13.0	13.0	13.0	
2018	32.8	23.7	64.7	23.6	13.0	12.6	14.0	14.0	12.0	15.0	13.4	13.0	
2019	12.4	145.6	27.5	38.4	12.0	12.0	12.5	12.5	12.1	14.0	14.5	13.1	
2020	23.7	126.0	77.1	53.7	14.0	12.0	12.0	12.0	12.7	15.0	14.7	23.4	
2021	63.6	16.0	33.7	55.4	12.0	12.0	12.0	14.3	14.0	14.1	14.0	16.0	
2022	21.9	15.9	16.0	13.2	12.0	12.0	15.0	14.1	14.0	14.0			

Nota: Adaptado de AUTODEMA (2022).

ANEXO 3 - Datos para modelamiento HEC HMS

Para el modelamiento en HEC HMS, se utilizaron las siguientes tablas de la investigación de Ramos & Saldivar (2022).

Tabla 56.

Parámetros Morfométricos de las cuencas aledañas

Microcuencas	Parámetros Morfométricos			
	Área (A) <i>km²</i>	Perímetro (P) <i>km</i>	Coficiente de compacidad (Kc)	Factor de forma (Kf)
Del Pato	13.71	22.27	1.70	0.16
San Lázaro	17.12	28.02	1.91	0.12
Venezuela A	6.51	22.85	2.53	0.07
Venezuela B	3.59	17.4	2.59	0.08
Los Incas A	9.86	20.56	1.85	0.13
Los Incas B	4.03	17.07	2.4	0.07
Los Incas C	17.78	34.00	2.27	0.09

Nota: Ramos & Saldivar (2022).

Tabla 57.

Parámetros Geomorfológicos de las cuencas aledañas

Microcuencas	Parámetros Geomorfológicos				
	Pendiente media de la cuenca (Sc)	Altitud media (Hm)	Altitud de frecuencia media (Hfm)	Altitud más frecuente (Hf)	Pendiente del cauce principal (Sp)
Del Pato	24.58%	3213	3257.24	7.4%	9.64%
San Lázaro	41.74%	3575	3651.17	3150-3200 3.75%	12.38%
Venezuela A	18.81%	2865	2889.43	2850-2900 8.1%	5.82%
Venezuela B	17.64%	2780	2771.99	3000-3050 13.2%	
Los Incas A	18.58%	2940	2981.11	2700-2750 12.2%	
Los Incas B	16.63%	2950	2961.7	2850-2900 11.4%	8.10%
Los Incas C	29.79%	3280	3498.55	2900-2950 7.4%	
				2900-2950	

Nota: Ramos & Saldivar (2022).

Tabla 58.

Parámetros de la red de drenaje de las cuencas aledañas

Microcuencas	Parámetros de la red de drenaje			
	Orden de corrientes	Régimen de corrientes	Longitud de tributarios (km)	Longitud de cauce principal (km)
Del Pato	2	Efímera	15.55	8.75
San Lázaro	2	Efímera	17.45	10.40
Venezuela A	2	Efímera	7.95	6.67
Venezuela B	1	Efímera	4.27	4.27
Los Incas A	2	Efímera	10.67	6.98
Los Incas B	1	Efímera	5.09	5.08
Los Incas C	3	Efímera	20.40	14.03

Nota: Ramos & Saldívar (2022).

Tabla 59.

Precipitación media (mm) por microcuenca

Microcuencas	Periodos de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	200
Del Pato	18.99	29.54	36.57	45.49	52.14	58.78	65.42
San Lázaro	20.03	30.89	38.10	47.24	54.04	60.80	67.55
Venezuela A	17.37	27.44	34.17	42.76	49.2	55.63	62.1
Venezuela B	16.00	25.65	32.14	40.45	46.69	52.96	59.27
Los Incas A	20.21	31.12	38.37	47.54	54.36	61.15	67.92
Los Incas B	21.06	32.23	39.63	48.98	55.92	62.81	69.68
Los Incas C	21.17	32.38	39.80	49.17	56.12	63.03	69.91

Nota: Ramos & Saldívar (2022).

Tabla 60.

Numero de curva, Tiempo de concentración y Abstracción inicial para cada microcuenca

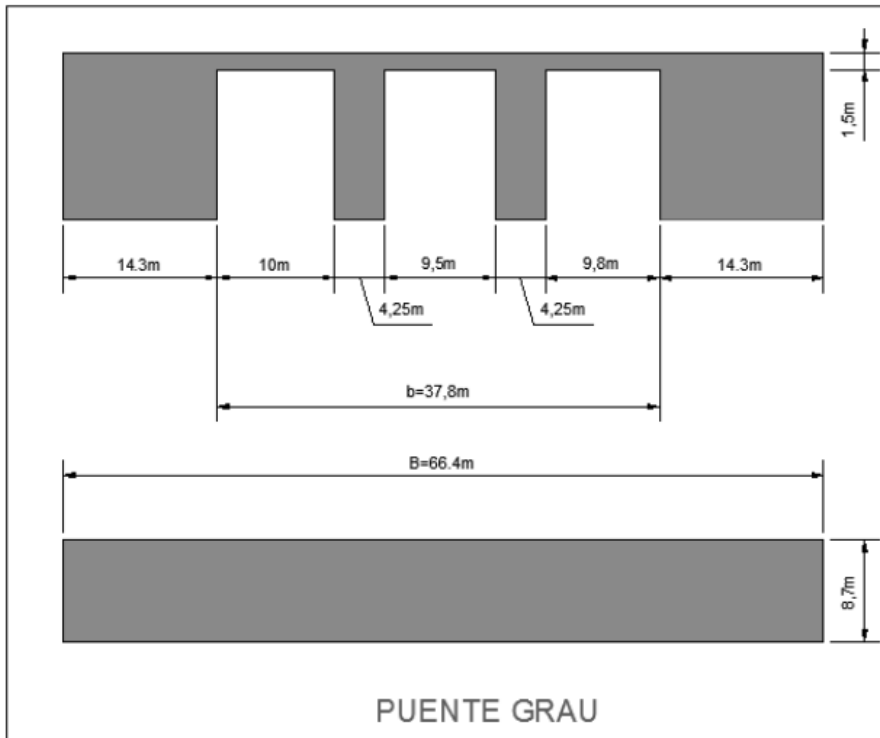
Microcuenca	Numero de Curva	Tc (hrs)	Tc (min)	Po	Lag time	Impermeabilidad
Del Pato	81.77	0.818	49.10	11.33	29.46	0.06%
San Lázaro	84.35	0.824	49.45	9.42	29.67	0.36%
Venezuela A	82.28	1.003	60.20	10.94	36.12	22.99%
Venezuela B	81.70	0.772	46.33	11.38	27.80	13.08%
Los Incas A	81.70	0.793	47.58	11.38	28.55	3.35%
Los Incas B	81.70	0.798	47.85	11.38	28.71	5.03%
Los Incas C	83.49	0.982	58.95	10.05	35.37	1.48%

Nota: Ramos & Saldívar (2022).

ANEXO 4 - Datos para modelamiento hidráulico

Figura 86.

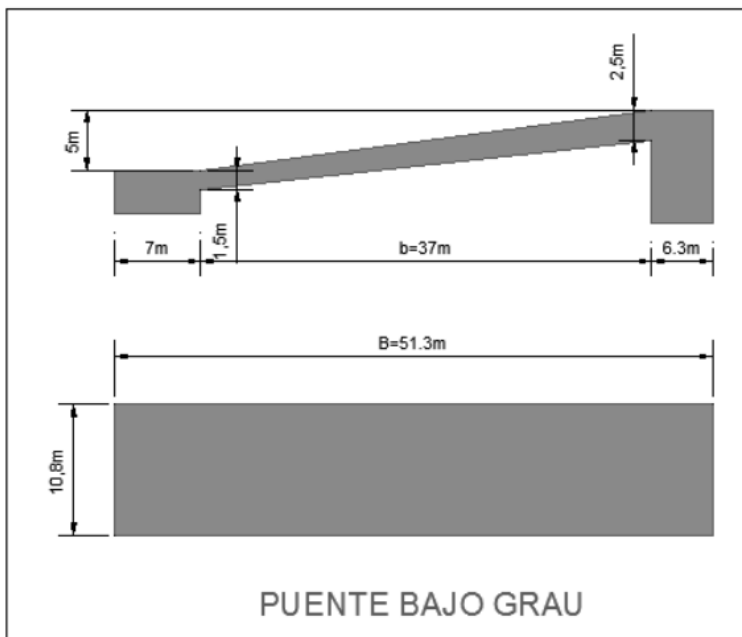
Medidas de Puente Grau



Nota: Extraído de Concha & Miranda (2016).

Figura 87.

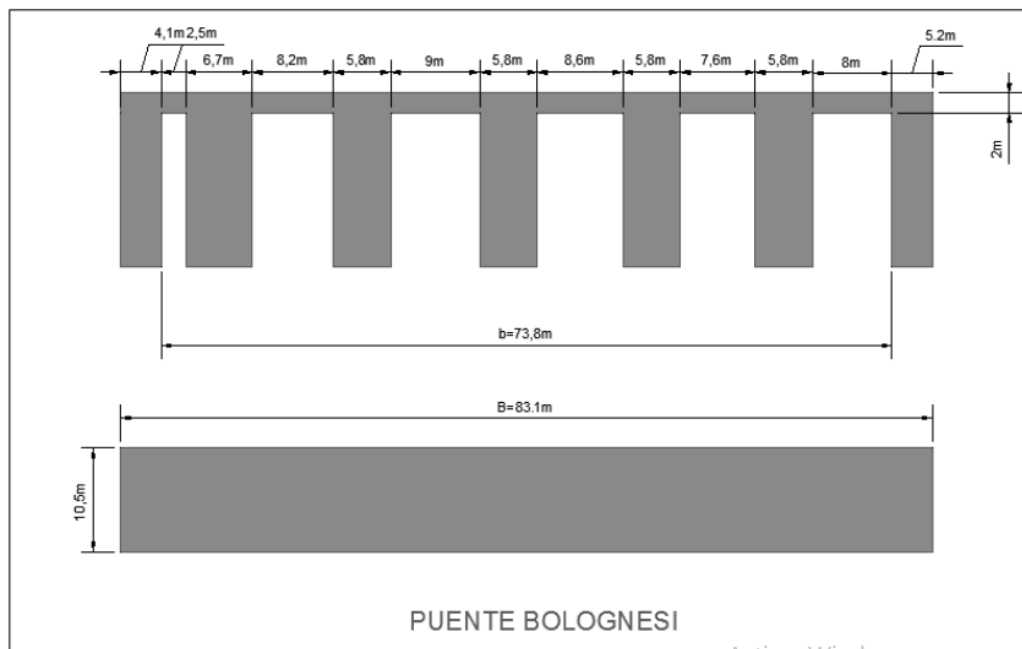
Medidas de Puente Bajo Grau



Nota: Extraído de Concha & Miranda (2016).

Figura 88.

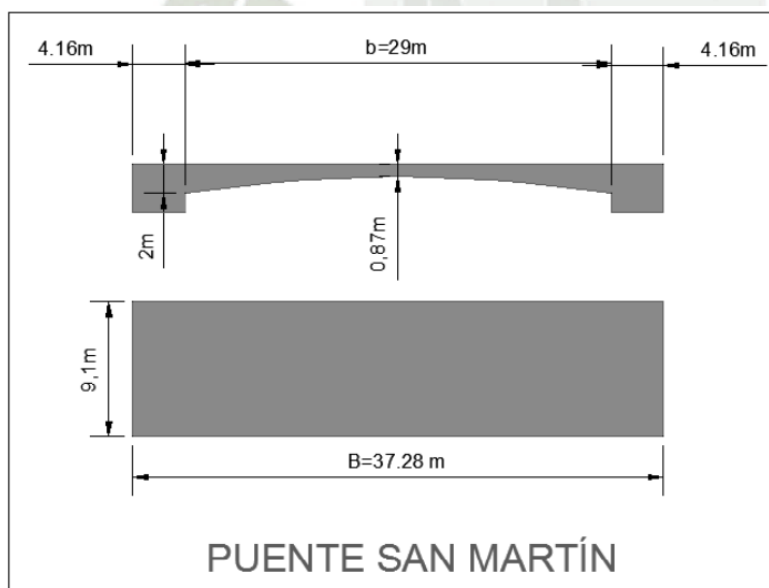
Medidas de Puente Bolognesi



Nota: Extraído de Concha & Miranda (2016).

Figura 89.

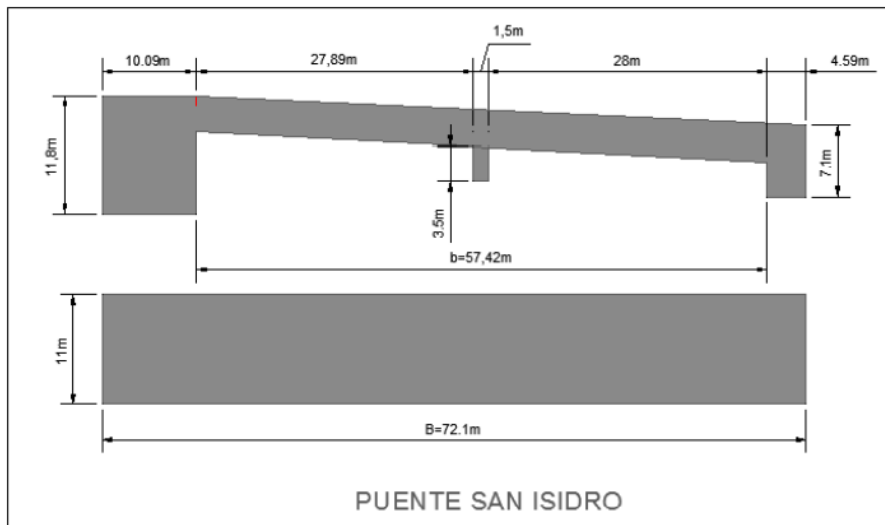
Medidas de Puente San Martín



Nota: Extraído de Concha & Miranda (2016).

Figura 90.

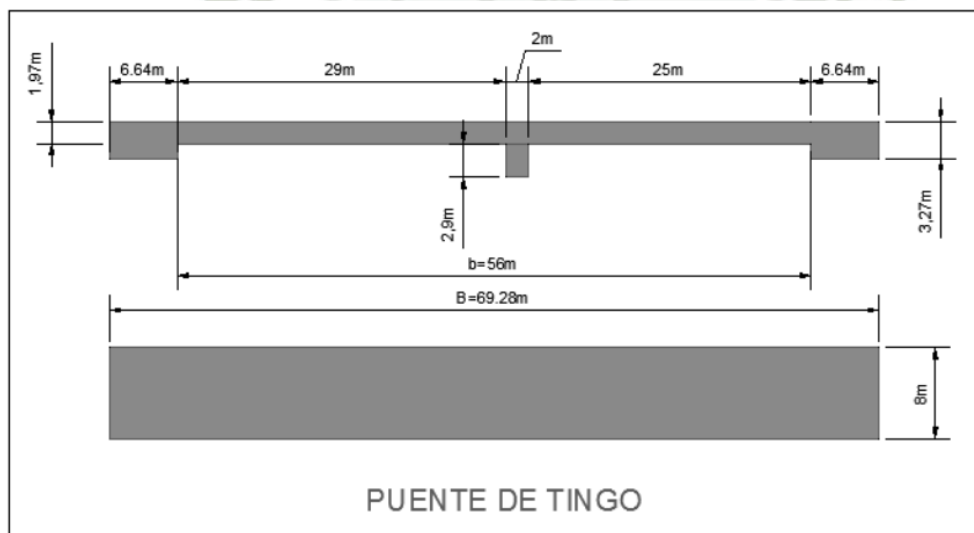
Medidas de Puente San Isidro



Nota: Extraído de Concha & Miranda (2016).

Figura 91.

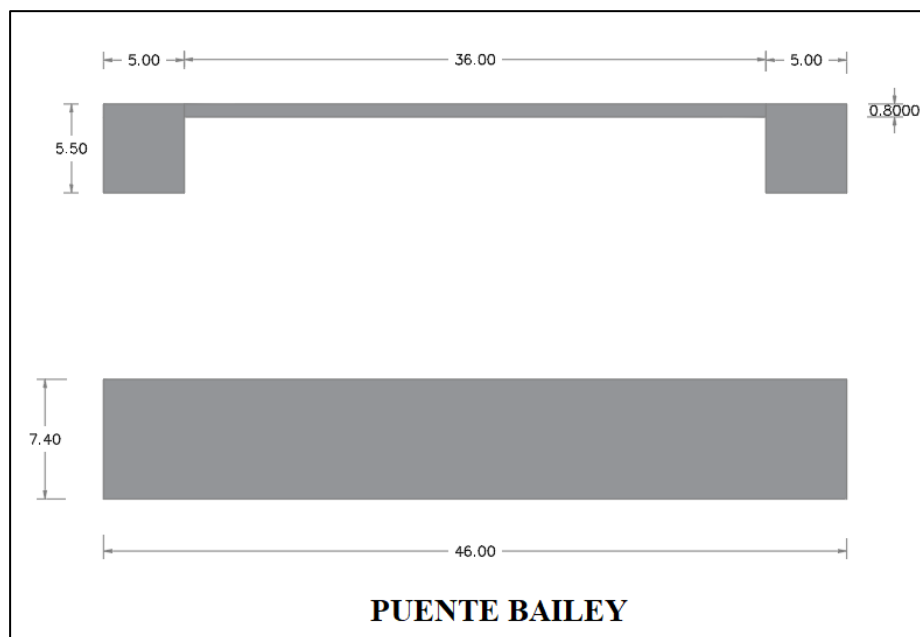
Medidas de Puente Tingo



Nota: Extraído de Concha & Miranda (2016).

Figura 92.

Medidas de Puente Bailey



Nota: Elaboración propia.