




Estudio geológico-geotécnico para la construcción de pilotes perforados del puente Llocllamayo

Geological-geotechnical study for construction of drilled shafts of Llocllamayo bridge

Carlo Magno Ormachea Valdez^{1,*} 

¹Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y geográfica, Departamento Académico de Ingeniería de Minas. Lima, Perú.

Resumen

La quebrada Llocllamayo se ha catalogado como sector crítico debido a los continuos deslizamientos de material detrítico que discurre sobre el badén existente (año 2015). Este fenómeno impide el paso vehicular y pone en riesgo la integridad de los usuarios por las constantes interrupciones ocasionados por la naturaleza. En ese sentido, el objetivo ha sido evaluar la contribución del estudio Geológico-Geotécnico de las inmediaciones de dicho sector para la construcción del puente Llocllamayo. La metodología se encuentra dentro del enfoque mixto a un nivel descriptivo de diseño no experimental y transversal. La técnica de recolección de datos empleada en esta investigación incluye tanto estudios de campo (en 17 hectáreas) como ensayos en laboratorio siguiendo los protocolos, guías y normas técnicas nacionales e internacionales. Los resultados demostraron que la subestructura del puente Llocllamayo se emplaza en tres eventos de depósitos que difieren en la compacidad y el porcentaje de finos; depósito aluvial I, depósito aluvial II y depósito aluvial III. En el aspecto geodinámico, la zona de estudio evidencia dos categorías, uno de origen hídrico (rio San Gabán) y otro de origen hídrico-gravitacional (quebrada Llocllamayo). En el aspecto geotécnico, los depósitos aluviales reflejan la Clase de suelo C con Clasificación en Sistema Unificado de Suelos es GP, SP-SM y SP. La roca Pizarra representa Clase B con RMR de 49 y UCS de 505.6 kg/cm². Concluyendo que cuanto mayor sea el conocimiento de las condiciones Geológico-Geotécnicas del lugar, mayor será la contribución para la construcción de pilotes perforados del puente Llocllamayo.

Palabras clave: elemento estructural; ensayos; geología; ingeniería geológica; puente.

Abstract

The Llocllamayo stream has been considered a critical sector due to the constant landslides of detrital material that run over the existing road (year 2015). This phenomenon obstructs the transit of vehicles and puts at risk the integrity of users for constant interruptions. In that sense, the goal was to evaluate the contribution of the geological-geotechnical study of surrounding area to the construction of Llocllamayo Bridge. The methodology is based on a mixed approach at a descriptive level of non-experimental and transversal design. The data collection technique used in this research includes both field studies (in 17 hectares) and laboratory tests, following national and international protocols, guidelines, and technical standards. The results showed that the substructure of the Llocllamayo bridge is located in three alluvial deposits that differ in compactness and percentage of fines; the alluvial deposit I, alluvial deposit II and alluvial deposit III. In the geodynamic aspect, the study area shows two categories, one of hydrological origin (San Gabán River) and another of hydro-gravitational origin (Llocllamayo ravine). In geotechnical aspect, alluvial deposits reflect soil Class C with Unified Soil Classification System is GP, SP-SM and SP. The slate rock represents class B, with a RMR of 49 and a UCS of 505.6 kg/cm². Concluding that the greater the knowledge of the Geological-Geotechnical conditions of the place, the greater the contribution will be for a construction of drilled shaft of the Llocllamayo bridge.

Keywords: bridges; engineering geology; geology; structural elements; tests.

Recibido: 28/12/2024

Aceptado: 13/03/2025

Publicado: 31/03/2025

***Autor para correspondencia:** carlomagnoov@gmail.com

Cómo citar: Ormachea Valdez, C. M. (2025). Estudio geológico-geotécnico para la construcción de pilotes perforados del puente Llocllamayo. *Revista de Investigaciones*, 14(1), 31-44. <https://doi.org/10.26788/ri.v14i1.6733>

Introducción

El Perú es un país que presenta una diversidad climática, geológica y topográfica en sus tres regiones, los cuales representan una exposición de alto riesgo y peligro inminente para los usuarios de las obras viales, por la reactivación de ocurrencias recientes y antiguas de movimientos de masas, los mismos que requieren de una pronta atención debido a la vulnerabilidad que presentan y que se ven afectados los usuarios y medios de transporte terrestre.

El colapso del puente Chancay en febrero del 2025, ocasionó diversas hipótesis sobre las causas del colapso, principalmente no descartan la socavación en la subestructura. Durante el aumento del caudal del río, el agua genera vórtices y corrientes que erosionan progresivamente el material de soporte. Esto hace que las bases pierdan su apoyo y queden suspendidas, lo que ocasiona la desestabilización y el colapso de la estructura (León, 2025).

Las precipitaciones pluviales extraordinarias ocurridas a fines de enero del año 2010 ocasionaron el incremento de la escorrentía superficial de la cuenca del río Vilcanota en el distrito de Pisac que generó la socavación de la cimentación de estribos y accesos del puente Pisac, principalmente del estribo de la margen derecha, provocando el colapso de la estructura, los factores principales de la falla son atribuidos al nivel de cimentación muy superficial (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2011)

En otro sector de nuestro país denominado “Quebrada Yanango”, ubicado en selva central en el km 77 de la ruta Tarma-La Merced, en el distrito de San Ramón, provincia de Chanchamayo, fue uno de los pasos más problemáticos debido al constante aumento del caudal del río, a los numerosos huaicos y al frecuente acolmatamiento producido por las lluvias estacionales por lo que periódicamente se invertía en la reconstrucción de puentes (Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, 2021)

Almonte & De La Cruz Vega (2022) explican que para determinar la socavación del puente Unocolla de la ciudad de Juliaca-Puno, recolectaron información topográfica, hidrológica y

sedimentológica. Los resultados del modelamiento hidráulico en el programa Hec-Ras determinaron 1.20 metros de socavación en el pilar 1, 3 y 4. Mientras que en el pilar 2 hallaron 2.46 m de socavación. Como propuesta de solución plantean la construcción de enrocado.

Neyra (2019) menciona que es importante conocer el marco geológico y las características geotécnicas donde se implantará el puente Malvas-Malvitas, ubicado en distrito de Suyo provincia de Ayabaca región de Piura.

Para establecer las características geotécnicas en la zona de ubicación del puente, estribos, pilares y accesos. Los estudios geotécnicos deben comprender “ensayos de campo en suelos y/o rocas, ensayos de laboratorio en muestras de suelo y/o roca extraídas de la zona, descripción de las condiciones del suelo, estratigrafía e identificación de los estratos de suelo o base rocosa, definición de tipos y profundidades de cimentación adecuada, así como parámetros geotécnicos preliminares para diseño del puente, ... realizar sondajes complementadas con refracción sísmica o excavaciones de verificación, presentación de los resultados y recomendaciones sobre especificaciones constructivas y obras de protección”(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018)

Respecto a los estudios geológicos, el Manual de Puentes publicado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones Perú, recomienda realizar: “... la revisión de información existente y descripción de la geología a nivel regional y local, descripción geomorfológica, zonificación geológica de la zona, definición de las propiedades físicas y mecánicas de suelos y/o rocas, definición de zonas de deslizamientos, huaycos y aluviones sucedidos en el pasado y de potencial ocurrencia en el futuro, identificación y caracterización de fallas geológicas...” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018)

Otro factor importante por identificar es la precipitación pluvial el cual tiene influencia directa en el ascenso/descenso del nivel freático, alterando considerablemente el peso específico del suelo y con ello la capacidad admisible. Asimismo, se ha demostrado el incremento del

peso unitario a la presencia del nivel freático y por consiguiente el descenso de la capacidad portante del terreno. (Ortiz, 2017).

Visvanathan & Gödeke (2022) realizaron la exploración geológica a lo largo del alineamiento del puente Brunei Temburong (30 km), consistió en la ejecución de 164 perforaciones diamantinas. La caracterización geotécnica consistió en evaluar las pruebas de penetración estándar, designación de la calidad de la roca y el índice de fractura del macizo rocoso. Como resultado obtuvieron las secciones litológicas a lo largo del alineamiento. Finalmente, demuestran la importancia de ejecutar los programas de perforación diamantina y muestreo In Situ para lograr con éxito la construcción de dicha estructura de paso.

Los métodos para evaluar la capacidad de carga se basan en correlaciones empíricas o en estudios numéricos contrastados con ensayos de campo. La mayor ventaja de estos métodos es su simplicidad. Sin embargo, tienen la limitación de que sólo pueden ser aplicados cuando las condiciones de la obra son semejantes a las de los ensayos o pruebas in-situ a partir de las cuales han sido desarrollados. (Raydel et al., 2013)

Shuan (2011) demuestra que a medida que se incrementa la matriz en la grava, se produce una reducción en la relación de vacíos y consecuentemente el aumento del peso unitario seco. Además, establece que el efecto es una reducción paulatina del ángulo de fricción interna relacionada al porcentaje de matriz empleado y un aumento de la cohesión, infiriéndole propiedades de los suelos finos.

Según Cruz et al. (2007), los principales factores intrínsecos del sistema que afectan el valor N_{SPT} del ensayo de penetración estándar son:

Preparación y calidad del sondeo.

- Longitud de varillaje.
- Diámetro de sondeo.

- Pandeo de varillaje.

- Dispositivo de golpeo

La quebrada Llocllamayo ubicada en el km 295 + 375 de la red Vial Nacional PE-34B, Tramo: Juliaca – Macusani – San Gabán – Inambari, fue catalogado como sector crítico debido a los continuos deslizamientos de material detrítico que discurren sobre el badén existente (año 2015), consecuentemente este fenómeno impide el paso vehicular poniendo en riesgo la integridad de los usuarios (Ccama, 2018) Consecuencia de interrupciones ocasionados por la naturaleza, se propone el estudio de otras estructuras como alternativa de paso, como la construcción de puentes empleando cimentación profunda, mediante pilotes perforados. En ese sentido, se busca evaluar la contribución del estudio Geológico-Geotécnico para la adecuada construcción de pilotes perforados del puente Llocllamayo.

El objetivo de la presente investigación es evaluar la contribución del estudio Geológico-Geotécnico para la adecuada construcción de pilotes perforados del puente Llocllamayo. El aspecto geológico comprende la identificación: litoestratigráfica y geodinámica. Mientras que el aspecto geotécnico comprende la caracterización geotécnica del sitio.

Métodos

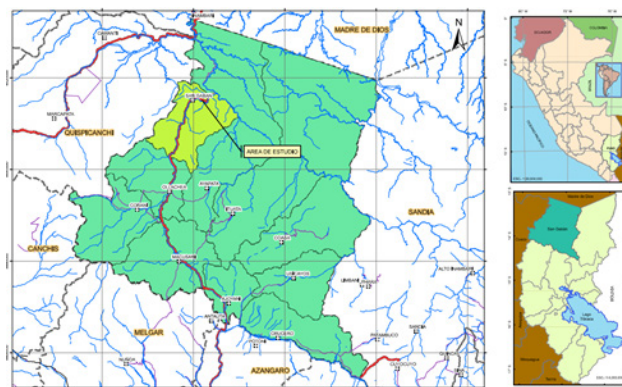
Lugar de estudio

La unidad de análisis Comprende el sector Crítico Llocllamayo e inmediaciones (17 hectáreas), ubicada en el Km 295+375 de la red vial Nacional PE-34B, Tramo: Juliaca – Macusani – San Gaban – Inambari, que pertenece a la jurisdicción del distrito de San Gabán, provincia de Carabaya, departamento de Puno, Perú.

Geográficamente se localiza en ceja de selva del departamento de Puno a una cota absoluta de 560.00 msnm y según las coordenadas UTM-WGS84: Este 351,472, Norte 8'515,273. (Figura 1).

Figura 1

Ubicación del sector evaluado



Fuente: Adaptado en software ArcGis Pro.

Procedimiento

El estudio de campo se ha llevado a cabo en dos (02) campañas; desde el 24 de julio al 05 de setiembre del año 2015 se ha realizado la campaña de exploración directa e indirecta y recolección de muestras in situ (antes de la construcción del puente Llocllamayo). Luego, se realizó la verificación del puente Llocllamayo del 8 de junio al 12 de junio del año 2021 (etapa de operación del puente).

La investigación es de orientación aplicada, con diseño de investigación descriptivo, debido a que tiene como finalidad evaluar la contribución del estudio geológico-geotécnico. La metodología se encuentra dentro del enfoque mixto a un nivel descriptivo de diseño no experimental y transversal.

La técnica de recolección de datos que se ha empleado en esta investigación son las investigaciones en campo (Observación) y análisis de laboratorio. Durante las investigaciones en campo se ha efectuado una evaluación geológica de la zona de estudio en aproximadamente de 17 hectáreas. Que comprende el levantamiento geológico a escala local con toma de muestras para la identificación petrológica y el mapeo de actitudes de las discontinuidades del macizo rocoso. Por otro lado, se aplicó la recolección de muestras no probabilísticas de: 07 perforaciones diamantinas, 03 ensayos SPT, 69 ensayos Cono Peck, 10 líneas de Tomografía de Refracción sísmica, 08 ensayos de permeabilidad Lefranc y 06 calicatas.

En las exploraciones se efectuaron muestreos tanto en suelo como en macizo rocoso, los

cuales proceden de los testigos de perforación diamantina, calicatas y muestreo en afloramientos rocosos. Para realizar el muestreo se ha empleado la "Guía para muestreo de suelos y rocas" (MTC E 101) y el "Manual de Ensayo de Materiales para carreteras del MTC" (EM-2016).

La descripción macroscópica sirvió para clasificar el tipo de roca y describir sus características principales, este resultado se fundamenta en el Reporte de Investigación número RR 99-02 "clasificación de roca metamórfica" (Sociedad Geológica de Bretaña).

En las muestras obtenidas de perforación diamantina se ha ejecutado ensayos de laboratorio como: Análisis granulométrico por tamizado (norma ASTM D 422), Ensayo para determinar el contenido de humedad (norma ASTM D 2216), determinación de los límites de Atterberg (norma ASTM D 4318), Corte Directo de suelos bajo condiciones consolidadas drenadas (norma ASTM D 3080), Ensayo de propiedades físicas en roca (norma ASTM D C97-02), Ensayo de Compresión Uniaxial en roca (norma ASTM D 2938), Ensayo de Corte Directo en roca (norma ASTM D5607-95).

Vara (2012) establece que todos los instrumentos utilizados para recopilar datos científicos deben ser fiables y válidos. En cuanto a la recolección de datos se revisó informes del INGEMMET (Instituto Geológico Minero Metalúrgico), investigaciones de tesis, informes del MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Provias Nacional), Cartas Nacionales del IGN (Instituto Geográfico Nacional). Luego, se visitó a la zona de estudio (Figura 1). Por tanto, las investigaciones geológicas-geotécnicas comprendieron realizar investigaciones de campo directas e indirectas (Figura 2).

La correlación de valores entre el Ensayo de Penetración de Cono de Texas (TCPT) y Ensayo de Penetración Estándar (SPT), (Lawson et al., 2018) sostienen: "La relación TCP-SPT es no lineal, con una fuerza de correlación débil ($R^2=23-44\%$)". Respecto a la correlación en suelos granulares, explican: "Los valores correspondientes de N_{60}^{SPT} son 10-70% menores que los valores N_{60}^{TCP} ". Finalmente concluyen: "La naturaleza generalmente débil de las correlaciones no admite

la conversión de $N_{60, TCP}$ a $N_{60, SPT}$ para calcular la capacidad portante para el diseño final”.

La variable dependiente consiste en la adecuada construcción de pilotes perforados del puente Llocllamayo y las variables independientes consisten en la identificación de las condiciones geológicas y su respectiva caracterización geotécnica del sitio.

Investigaciones de campo indirectas

Se realizó exploraciones indirectas empleando ensayos geofísicos por el método de Tomografía de Refracción Sísmica y MASW (Análisis Multicanal de Ondas Superficiales).

El ensayo de Tomografía de Refracción Sísmica es una técnica de exploración geofísica que permite de manera indirecta, delimitar la estratigrafía del subsuelo. Este método se fundamenta en las variaciones de las propiedades dinámicas de los materiales que lo componen (Rivera et al., 2016). Por otro lado, el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) es un método no destructivo que se usa para evaluar la velocidad de onda de corte (V_s), vinculado al mismo módulo de corte (G). Este método analiza las propiedades de dispersión de los modos fundamentales de las ondas Rayleigh, las cuales se propagan a lo largo de la superficie desde el punto de impacto a los receptores (Park et al., 1999). Esto indica que los perfiles sísmicos del terreno se precisan del método de inversión por las curvas de dispersión, por medio de las ondas Rayleigh que se propagan en un medio de espacio homogéneo, consiguiendo una velocidad de fase, la cual varía entre un 90 % y

95 % del valor de la velocidad de onda de corte (V_s) (Hayashi, 2008)

En el método de tomografía de Refracción Sísmica se realizó un análisis total de 648 m lineales, ubicados en 10 líneas sísmicas; y se realizaron 10 ensayos de MASW, que fueron distribuidas adecuadamente en toda la zona de estudio para delimitar los horizontes cuaternarios y las formaciones rocosas. El método empleado para la adquisición fue la Guía estándar para usos de investigaciones mediante el método de refracción sísmica ASTM D 5777 y el procesamiento de datos se llevó a cabo con el Software SeisImager. La profundidad de exploración fue calculada utilizando la geometría de la fuente al geófono (espaciado y elevación) (American Society for Testing and Materials, 2018).

Investigaciones de campo directas

En cuanto a los ensayos directos, se realizaron un total de 07 perforaciones diamantinas: S-01, S-02, S-03, S-04, S-05A, S-05B y S-06, completando 177,65 metros lineales ubicados en las márgenes del río San Gabán (Figura 2). Las perforaciones se ejecutaron con profundidades variables (Tabla 1). Asimismo, se efectuaron 06 calicatas con profundidades de 1,80 metros hasta 2,30 metros. Cada calicata fue analizada en el sitio mediante la determinación de densidad in situ, utilizando el método del cono de arena, conforme a la Norma Técnica Peruana (NTP) 339,143 y Norma ASTM 1556 (American Society for Testing and Materials). A la vez, se realizó el registro de perforaciones y calicatas In Situ.

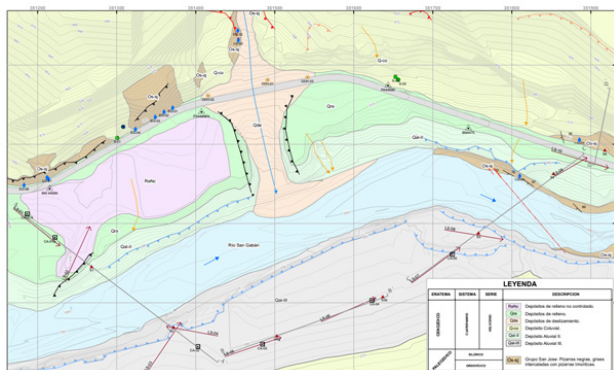
Tabla 1

Perforaciones diamantinas con recuperación de muestra.

Cod.	Margen	Coord. Este	Coord. Norte	Cota de terreno msnm	Prof. (m.)	Inclinación (°RH)	Azimet
S-01	Izquierda	351,269	8'515,048	572	30,00	90	-
S-02	Derecha	351,370	8'514,970	571	30,20	90	-
S-03	Derecha	351,756	8'515,085	567	28,70	90	-
S-04	Izquierda	351,861	8'515,169	575	18,25	90	-
S-05A	Derecha	351,501	8'514,956	570	20,05	90	-
S-05B	Derecha	351636	8'515,006	560	20,00	90	-
S-06	Izquierda	351,910	8'515,201	570	30,45	-5	40 °N

Figura 2

Plano Geológico del área de interés y exploraciones directas e indirectas



Fuente: Realizado en software ArcGis Pro.

Resultados

Litoestratigrafía

La zona de interés se caracteriza mayormente por presentar pizarras gris oscuras de la formación San José, el cual se encuentra cubierto por material cuaternario originado en conjunto por la acción de la naturaleza (fluvial, clima) y del hombre, este último debido a la construcción de la carretera transoceánica, en la que se realizó movimientos de tierra en cantidades importantes.

En las exploraciones se ha evidenciado tres eventos de depósitos aluviales cuya diferencia se encuentra en el contenido de limos (Figura 3), el depósito aluvial I consta Clastos subangulosos de origen ígneo y sedimentario, policromáticos, tamaño máximo 25cm, compacto, con presencia de arena pobremente gradada con escaso limo y grava, se extienden por debajo de los 20 metros del nivel de superficie actual. El depósito aluvial II consta de material depositado por acción del río, conforman Clastos subangulosos a angulosos, policromáticos, poligénico de T_{máx} de 25 cm., con gravas subangulosas a subredondeadas poligénicos, policromáticos (no presentan limos) y afloran en lecho del río y en parte en la margen izquierda. Finalmente, el depósito aluvial III está conformado por gravas subangulosas, poligénicas, policromáticas, con algunos clastos tamaño máximo 20 centímetros en matriz areno-limoso color gris, se extienden en la terraza (margen derecha del río san Gaban) (Figura 4).

En el mapeo geológico (Figura 2) a nivel de superficie se ha evidenciado depósitos de Relleno No Controlado que consta de masas de suelo combinado con material sanitario transportadas desde poblaciones aledañas (pueblo San Gabán), empleados como vertederos temporales. El depósito se aprecia en la margen izquierda del río San Gabán, próximo de la carretera interoceánica, que se extiende sobre las terrazas aluviales. El relleno no es confinado y los líquidos de lixiviación se observan en la base.

Asimismo, se ha registrado depósitos de deslizamientos, Fragmentos líticos sueltos, policromáticas, poligénicas, heterométricos (tamaño máximo 1m, promedio 10-20cm) meteorizados, angulosos, acompañados de ramas y troncos. Estos detritos son originados por derrumbes y debris flows de la quebrada Llocllamayo transportado y acumulados dando lugar a geoforma deltaico en la rivera.

En cuanto al macizo rocoso se ha evidenciado afloramientos de formación San José en la margen izquierda del río San Gabán, constituido por roca metamórfica, pizarra negra de trama exfoliada, con presencia de óxidos en las discontinuidades, condición de macizo fracturada.

Geodinámica

Los procesos geodinámicos se evidencian en dos categorías principales: uno de origen hídrico (como inundaciones y erosión), dominado por el curso de río San Gabán y sus tributarios. Otro de origen hídrico-gravitacional (quebrada Llocllamayo), que caracterizan las quebradas altas favorecidas por la topografía y el clima. Finalmente, se ha identificado un proceso geodinámico interno no menos importante como zona de falla geológica.

Los efectos de la actividad geodinámica externa en el sector de la quebrada denominada Sector Crítico Llocllamayo causan movimientos de masa complejos, se ha incrementado sustancialmente, debido a los desequilibrios originados por las obras en el área en relación.

Figura 3*Secuencias de depósitos aluviales III y depósitos aluviales II*

Estos procesos están vinculados a los principales agentes que modelan el terreno, tales como el agua, proveniente principalmente de los sistemas fluviales y de las precipitaciones pluviales, y el intemperismo en sus formas física, química, biológico y antrópico que interviene en la erosión del terreno y, como resultado, ha dado forma al paisaje actual, originando quebradas disectadas.

Las acciones erosivas de socavamiento y erosión lateral son realizadas por las corrientes de agua en los bordes de los terrenos ribereños, especialmente, cuando se hallan sobrecargadas de materiales y su acción se basa en el desgaste de la base y posterior desplome de las porciones más altas; sus efectos son mayores durante las crecientes los cuales afectarían las futuras obras de arte o estructuras de paso.

Los flujos de detritos se componen tanto de bloques de pizarras angulosos hasta 1 m de tamaño, como gravas y arenas gruesas. Según el reporte de la contratista IIRSA tramo 4, informa un promedio de 150,000.00 m³/año de remoción de flujo de detritos por año desde el año 2012 al 2015. En la Quebrada Llocllamayo los materiales transportados son heterométricos (granulometrías desde lodo hasta bloques de 1 m) y son originados

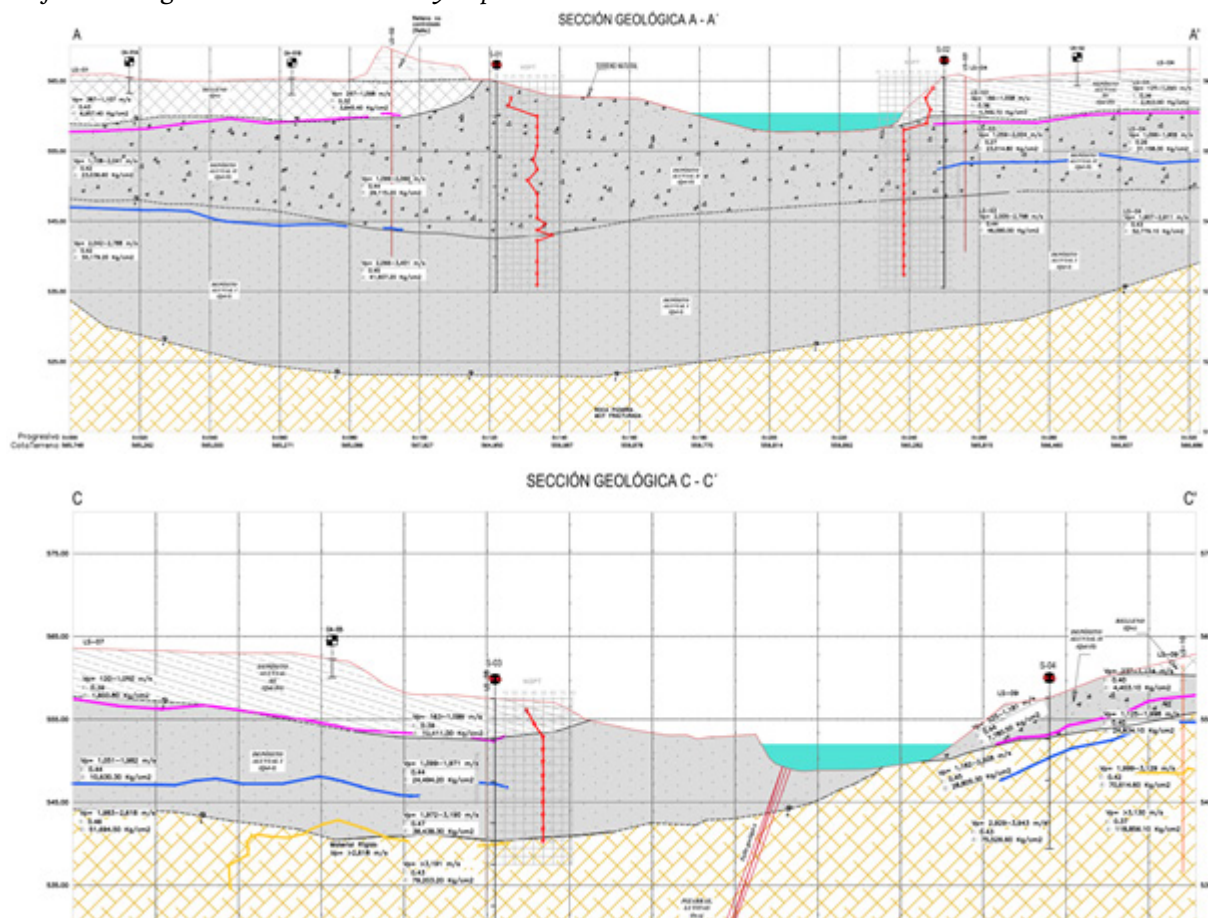
por el deslizamiento de los depósitos de material suelto que se encuentran en las pendientes y en menor medida de los macizos rocosos fracturados.

Las importantes zonas de falla identificadas en los macizos rocosos de la Formación San José son: Primero, la falla que afecta todo el ancho de la Quebrada Llocllamayo, el cual se desarrolla con dirección 110/65. Los planos de falla presentan forma planar y lisa con espesores de relleno o salbanda de falla de algunas decenas de metros, constituido por limo arcilloso con fragmentos pizarrosos de color negro y bandas estriadas. Las condiciones de baja resistencia y elevada fracturación de las rocas en la zona de falla son la causa de la elevada inestabilidad geomorfológica del área.

La segunda zona de falla aflora a lo largo de la orilla izquierda del Río San Gabán. Se compone por una zona de cizalla de 7 metros de ancho y orientación 235/70, constituida por pizarra muy deformada y laminada. La meteorización es elevada y genera oxidaciones de coloración amarilla/naranja/marrón. Por su dimensión se cree que la falla pueda cruzar el cauce del río y extender también hacia la margen derecha.

Figura 4

Perfiles Geológicos del área de interés y exploraciones directas e indirectas



Geotecnia

Los resultados del ensayo MASW indican valores de Vs30 comprendidos entre 466 y 854 m/seg, pertenecientes a clases sísmicas de suelo tipo B (Pizarras) y C (aluvial) (Tabla 2). Las velocidades mayores se localizan en sectores con presencia de afloramientos rocosos y en la margen izquierda.

Tabla 2

Vs30 y clase de suelo según la prueba MASW1D

Código	Este	Norte	Vs30 (m/s)	Clase de suelo
MASW-01	351199	8515096	490	C
MASW-02	351250	8515062	466	C
MASW-03	351360	8514944	523	C
MASW-04	351396	8514952	504	C
MASW-05	351471	8514946	504	C
MASW-06	351593	8514991	686	C
MASW-07	351704	8515048	481	C
MASW-08	351752	8515086	800	B
MASW-09	351875	8515172	822	B
MASW-10	351886	8515181	854	B

Por otro lado, se realizó levantamientos geoestructurales en 4 estaciones sobre afloramientos representativos de la Formación San José de acuerdo al estándar ISRM 1978. La estructura principal está representada por los planos de estratificación (S) que interceptan los macizos con ángulos comprendidos entre 25 y 40°, con persistencia que alcanza una longitud de más de 10 m, y con espaciamiento desde centímetros hasta unidades de metro (máximo 1.5-2m). sus superficies son frecuentemente planares y lisas con meteorización media, a veces ausente, cerrada o con aberturas hasta 1 mm, generalmente vacías o con relleno de limos en los primeros metros. Se clasifico el afloramiento rocoso según el sistema de RMR de Bieniawski, en general los macizos rocosos presentan calidad de roca Regular-Clase III (Tabla 3).

Los resultados de conductividad hidráulica muestran que los depósitos aluviales tienen valores de 9,94 e-4cm/s hasta una permeabilidad alta debido a la presencia del nivel freático,

mientras que el macizo rocoso muestra valores desde 6,88 e-4 cm/s y 1,41 e-3cm/s cuyo principal flujo ocurre entre las discontinuidades y planos de estratificación.

Tabla 3

Clasificación de roca RMR y GSI del macizo rocoso San José

Código	RMR	GSI
LG_01	52	40
LG_02	46	37
LG_03	48	50
LG_04	50	47
Min	46	37
Promedio	49	44
Max	52	50
Dev.st	2,6	6,0

Los ensayos de penetración realizados muestran que; los depósitos aluviales I presentan valores de rechazo, indicativo de que los materiales son friccionantes. Los depósitos aluviales II muestran valores de rechazo con algunos niveles de resistencia media. Mientras que los depósitos aluviales III muestran niveles con N_{spt} de 24 a 33 intercalados con niveles de rechazo. Por otro lado, los depósitos de relleno muestran valores de rechazo por el grado de compactación que posee. En conclusión, los depósitos aluviales I y depósitos aluviales II con los materiales que poseen mejor comportamiento por ser suelos friccionantes.

Figura 5

Izquierda, Estribo derecho del puente Llocllamayo, julio 2023. Derecha, depósito de deslizamiento en Quebrada Llocllamayo junio 2021



El puente Llocllamayo 01 es una estructura de paso de tipo arco atirantado de 130 metros de luz (Figura 6). Se ha construido estribos sumergidos

Efectuados los ensayos de clasificación a muestras de los testigos de perforación diamantina resultan GP, SP-SM y SP. Asimismo, La densidad natural de los depósitos cuaternarios fue determinado utilizando el método del cono de arena al fondo de las calicatas CA-02 y CA-03, los resultados representativos de la proporción más superficial del depósito aluvial muestran densidad seca de 1,6 gr/cm³ y 1,4 gr/cm³. Con estos valores fue remoldeado la muestra para efectuar los ensayos de corte directo cuyos resultados muestran: fricción 30,5° y cohesión de 0 kg/cm².

Los parámetros geotécnicos en la roca pizarra muestran; densidad seca 2,8 g/cm³, peso específico 27,6 kN/m³, absorción 0,28 %, resistencia a la compresión uniaxial (UCS) 505,6 kg/cm², cohesión 0,08 MPa y ángulo de fricción 29,5 °.

Post Construcción de puente Llocllamayo

En octubre 2023, la quebrada Llocllamayo continúa siendo interrumpido por flujo de detritos acompañado de troncos y raíces que desembocan al río San Gaban (Figura 5). Mientras que el tránsito vehicular fluye ininterrumpidamente por el puente Llocllamayo construidos desde el año 2019.

en el terreno, a excepción de la viga corrida (con el propósito de tener una estructura relativamente ligera, con los empujes de terreno sustancialmente

balanceados aguas arriba y aguas abajo del estribo). La altura de los estribos (de la base de zapata de cimentación hasta la cumbre de viga corrida es: estribo izquierdo 10,55 metros, estribo derecho: 9,71 metros. Los estribos son basados en 18 pilotes

de diámetro \varnothing 1,20 metros y longitud de fuste 20 metros, dispuestos tres filas de seis pilotes cada una. Los pilotes son conectados en cabeza por una zapata de cimentación con dimensiones 9,60 m x 20,40 m x 1,80 m (ancho x largo x altura).

Figura 6

Izquierda, Construcción del puente Llocllamayo 2019. Derecha, Estribo izquierdo del puente Llocllamayo julio 2023



Para evitar la erosión y socavación de la estructura se ha construido obras de protección ribereña constituidos por: Enrocado a la base del talud, formados por bloques cementados de tamaño $D_{50} \geq 1,50$ metros. Gaviones de altura 4 metros fundados sobre el enrocado e inclinados de 5° en sentido opuesto al río. Desde la cabeza de gaviones hasta la viga corrida del estribo, se ha construido un emboquillado de concreto formado por bloques cementados de tamaño $D_{50} = 20$ a 40cm con espesor total de 1m.

La subestructura del puente Llocllamayo se ha emplazado en depósitos aluviales I (Qal_I) y en depósitos aluviales II cuyos parámetros elásticos medidos con el ensayo geofísico varía desde 0,38 hasta 0,44 (relación de Poisson) y el módulo de Young incrementa progresivamente hacia la profundidad desde 5,608 Kg/cm² (en el nivel de cimentación, cota 558,50 msnm) hasta 41,607 kg/cm² (cota 534,50 msnm). En las exploraciones mediante perforaciones diamantinas se ha evidenciado materiales granulares con poco o nada de limo cuya clasificación SUCS corresponde a grava pobremente gradada (GP) con intercalaciones de arena pobremente gradada y en algunos casos con limo (SP, SM). Los parámetros de resistencia al corte utilizados para el diseño de la cimentación fueron de peso específico de 20 kN/m³, $c' = 0$ (ha sido prudentemente asumida a cero por las condiciones geológicas de sitio), $\phi = 36^\circ$.

La elección de cimentación sobre pilotes depende de dos objetivos principales; Cimentación rígida y con asentamientos diferenciales limitados por el funcionamiento óptimo de la superestructura del puente y evitar tener una cimentación directa en el talud del río, las acciones transmitidas por la fundación al terreno pueden resultar en una carga desestabilizante sobre eventuales superficies de deslizamiento llevando a fenómenos de inestabilidad global.

La profundidad de la zapata de cimentación (y por lo tanto la altura del estribo) ha sido definida de acuerdo a los criterios siguientes:

- Evitar interferencia de la zapata con el talud del río.
- Profundizar lo suficiente el nivel de cimentación, para garantizar que el terreno en contacto con los pilotes sea completamente reactivo desde la cabeza de los mismos.
- Reducir las excavaciones y las dimensiones del estribo en cuanto posible.
- Evitar llegar a una cota inferior a la del río.

Para evitar la erosión y socavación de las estructuras se ha construido obras de protección ribereña constituidos por: Enrocado a la base

del talud, formados por bloques cementados de tamaño $D_{50} \geq 1,50$ metros. Gaviones de altura 4 metros fundados sobre el enrocado e inclinados de 5° en sentido opuesto al río. Desde la cabeza de gaviones hasta la viga corrida del estribo, un emboquillado de concreto formado por bloques cementados de tamaño $D_{50} = 20$ a 40 cm con espesor total de 1m.

Con la finalidad de cumplir el objetivo de investigación se ha elaborado flujogramas mostradas en la Figura 07 y Figura 08, mediante los cuales se pudo concretar la contribución del estudio Geológico-Geotécnico y metodología de diseño para la construcción del puente Llocllamayo.

Discusión

Los resultados de esta investigación son obtenidos a través de los ensayos geofísicos (Tomografía de Refracción Sísmica y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales) y ensayos de laboratorio de mecánica de suelos y rocas, quedando registros de este estudio por medio de fotografías. Los resultados obtenidos del área de estudio otorgan la información para poder facilitar un diseño de cimentación apropiado para el puente Llocllamayo.

Dentro de los resultados obtenidos, es importante resaltar que la mayoría de ellos son similares a investigaciones anteriores, desarrollados en la quebrada Llocllamayo. Comparando los resultados con el estudio publicado por Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMMET, 1996), la similitud está basada en la clasificación de la roca de la Formación San José lo cual se caracterizó como roca pizarra. Sin embargo, en los depósitos aluviales se ha observado diferencias, ya que el INGENMET realiza investigaciones a nivel regional y ha generalizado bajo una misma denominación “deposito Aluvial”. Mientras que los resultados de la presente investigación se han diferenciado tres tipos de depósitos aluviales: Depósito Aluvial I, Depósito Aluvial II y Depósito Aluvial III.

Respecto a la geodinámica externa (Neyra, 2019), explica que los fenómenos geológicos del Puente Malvas en Piura obedecen a procesos de geodinámica externa como la erosión,

precipitación pluvial e inundaciones. La presente investigación evidenció la presencia de fenómenos como: socavación y erosión. Adicionalmente, se observan procesos gravitacionales (flujo de detritos) y zonas de falla.

Respecto a la estimación de los parámetros de resistencia del macizo rocoso Sutta & Sutta (2023) emplea al igual que la presente investigación el Sistema de valoración de macizos rocosos RMR, Bieniawski. Litológicamente evidencian pizarra e squistosa en los estribos del puente Coquimbo en Cusco y cuya clasificación representa a clase III y de calidad media. Similar clasificación de macizo rocoso se observado en los sectores adyacentes a la quebrada Llocllamayo.

Respecto a la contribución Geológica-Geotécnica existe la similitud con la conclusión de Visvanathan & Gödeke (2022), en la que demuestran la importancia de ejecutar los programas de perforación

Existe cierta similitud litoestratigráfica de la construcción de Pilotes Perforados del Puente Llocllamayo respecto a la estratigrafía descrita por Brown et al. (2023) en la construcción de pilotes perforados para el puente Huey Long del Río Misisipi en New Orleans. Brown et al. (2023) cita que la profundidad ejecutada es de 60 metros, emplazado en depósitos Aluviales con capas ocasionales de Arcilla blanda. La cimentación profunda de pilote perforado en ambos puentes (Llocllamayo y Huey Long) fue diseñado para resistir la socavación.

La contribución de la presente investigación para la construcción del puente Llocllamayo en el aspecto geológico fue la identificación de contactos litológicos, identificación de tipos de macizo rocoso y depósitos cuaternarios, identificación de procesos geomorfológicos e identificación de procesos geodinámicos. La contribución en el aspecto geotécnico fue estimar los parámetros dinámicos de los depósitos cuaternarios, caracterizar el macizo rocoso, determinar la permeabilidad de los depósitos y macizo rocoso, estimar la resistencia a penetración, clasificación de granulométrica de los suelos y se determinó las propiedades físicas del macizo rocoso. (Figura 7 y Figura 8).

Figura 7

Diagrama del Estudio geológico-geotécnico del puente Llocllamayo

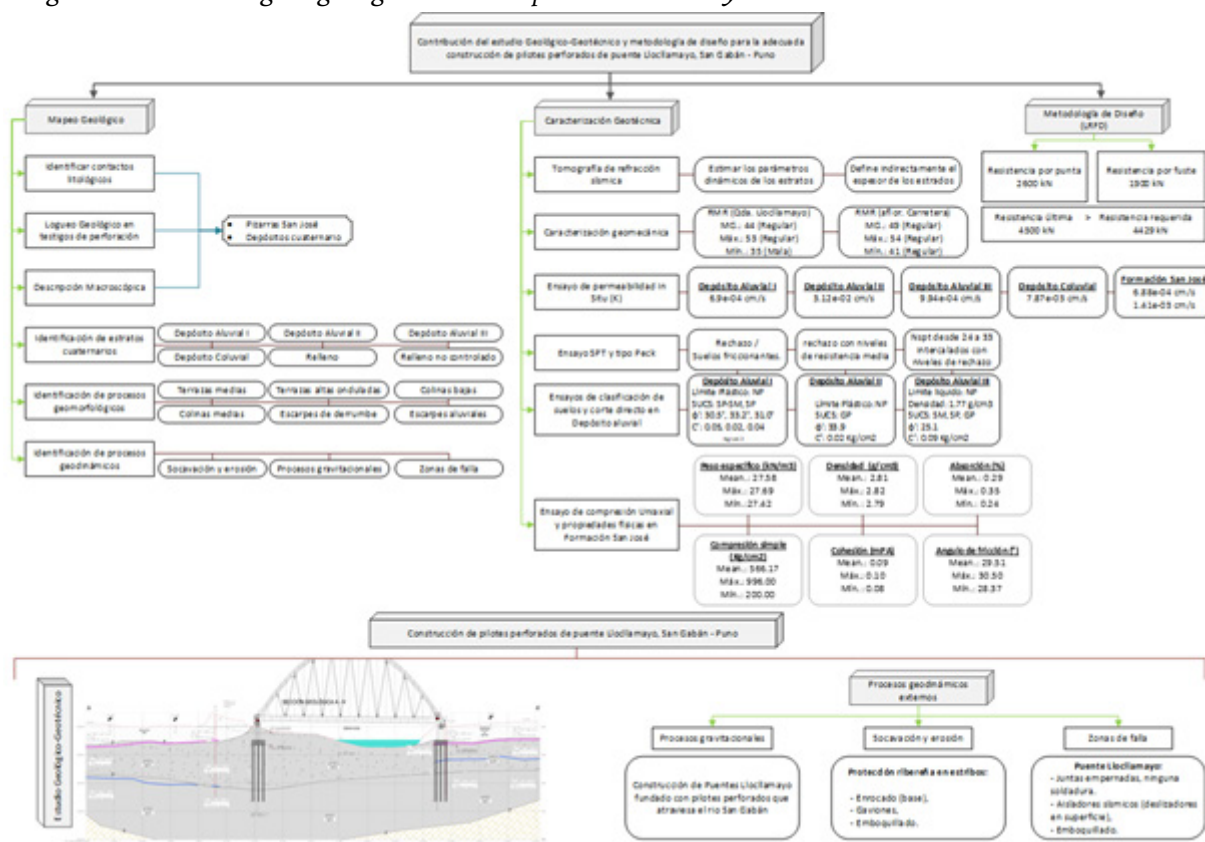
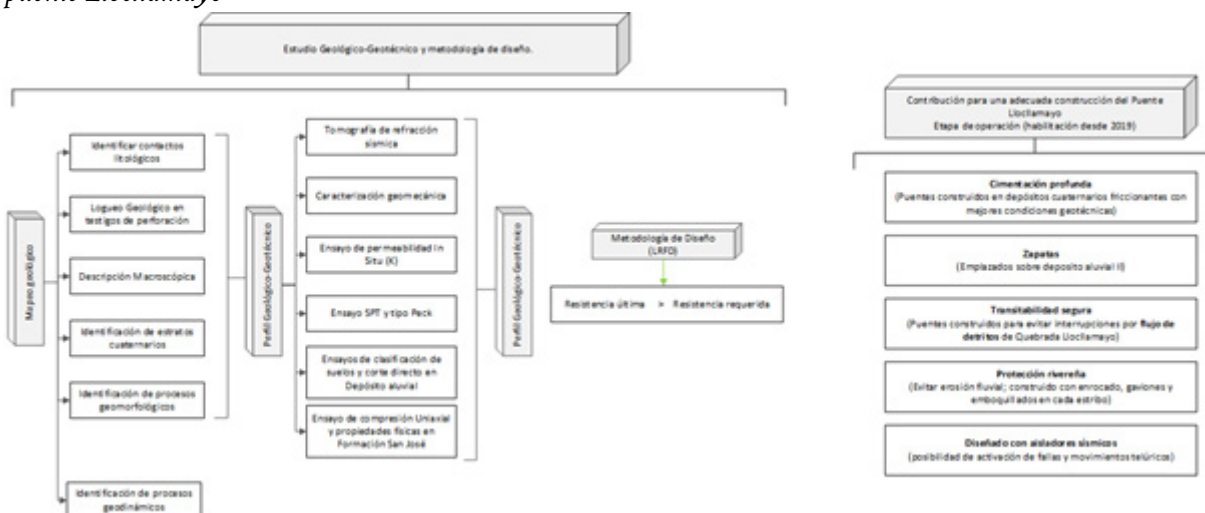


Figura 8

Contribución del estudio Geológico-Geotécnico para la adecuada construcción de pilotes perforados de puente Llocllamayo



Conclusiones

La subestructura del puente Llocllamayo se emplaza litoestratigráficamente en depósitos aluviales cuya clasificación de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) corresponde a grava pobremente gradada con intercalaciones

de arena pobremente gradada y en algunos casos con limo. En el aspecto geodinámico se ha identificado erosión fluvial en lecho del río San Gabán y los flujos de detritos ocurridos en la quebrada Llocllamayo a causa de la presencia de falla geológica. La caracterización geotécnica del subsuelo muestra que los parámetros elásticos

varia desde 0.38 hasta 0.44 (relación de Poisson) y el módulo de Young incrementa progresivamente hacia la profundidad desde 5,608 Kg/cm² (en el nivel de cimentación, cota 558.50 msnm) hasta 41,607 kg/cm² (cota 534.50 msnm) cuyo peso específico es de 20 kN/m³. Los parámetros de resistencia al corte de este depósito son: $c' = 0$ y $\phi = 36^\circ$. Respecto a sectores adyacentes a la quebrada Llocllamayo reflejan la presencia de depósitos coluviales de 14m hasta 25.90m de espesor suprayaciendo al basamento rocoso constituido por pizarras. En la caracterización del macizo rocoso refleja RMRb desde 41 hasta 54 (calidad de roca Regular) mientras que, en la quebrada Llocllamayo (sector crítico) posee RMRb desde 35 hasta 53 (calidad de roca Mala a Regular). La conductividad hidráulica del basamento rocoso se encuentra entre 1.88e-02 hasta 1.71e-03 cm/s. Con lo descrito se llega a la conclusión de cuanto mayor sea el conocimiento de las condiciones Geológico-Geotécnicas del lugar, mayor será la contribución para una adecuada construcción de pilotes perforados del puente Llocllamayo.

Conflicto de interés

El autor (CMOV) declaro que no existe conflicto de interés posible.

Referencias

- Almonte, N., & De La Cruz Vega, S. (2022). Evaluación y diseño de protección frente a la socavación hidráulica del puente Unocolla, Juliaca – Puno. *Llamkasun*, 3(1), 74–78. <https://doi.org/10.47797/llamkasun.v3i1.85>
- American Society for Testing and Materials. (2018). Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation. En *ASTM standards*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D5777-18>
- Brown, D. A., Brown, D., Peter Faust, T., & Santos, J. (2023). *Construction of the drilled shaft foundations for the Huey Long Mississippi river bridge, New Orleans*. https://www.malcolmdrilling.com/wp-content/uploads/2023/08/Brown_Construction-of-the-Drilled-Shaft-Foundation-for-the-Huey-P-Long-Bridge-DFI2010-1.pdf
- Ccama, J. E. (2018). *Factores condicionantes y desencadenantes en la determinación del peligro de flujo de detritos aplicando el modelo FLO-2D, Quebrada Llocllamayo KM-295+350, IIRSA Sur Tramo IV* [Título Profesional, Universidad Nacional del Altiplano]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/1012>
- Cruz, N., Devincenzi, M., Powell, J., & Arroyo, M. (2007). Actualidad en el uso de los ensayos geotécnicos in situ. *ResearchGate*, 145.
- Hayashi, K. (2008). *Development of the Surface-wave Methods and Its Application to Site Investigations*. https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/57255/1/D_Hayashi_Koichi.pdf
- INGEMMET. (1996). *Geología de los cuadrángulos de Puerto Luz, Colorado, Laberinto, Puerto Maldonado, Quincemil, Masuco, Astillero y Reserva Tambopata 26-u, 26-v, 26-x, 26-y, 27-u, 27-v, 27-x, 27-y* (Serie A). Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- Lawson, W. D., Terrell, E. O., Surles, J. G., Moghaddam, R. B., Seo, H., & Jayawickrama, P. W. (2018). Side-by-Side Correlation of Texas Cone Penetration and Standard Penetration Test Blowcount Values. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(5), 2769–2787. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0499-6>
- León, J. (2025, febrero 16). Caída de puente Chancay, una tragedia que se pudo evitar. *Diario La República*. <https://larepublica.pe/sociedad/2025/02/15/caida-de-puente-chancay-una-tragedia-que-se-pudo-evitar-hnews-508564>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2011). *Estudio Definitivo para la construcción del Nuevo Puente Pisac y accesos*.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2018). Manual de Puentes. En *Diario Oficial El Peruano* (R.D. N° 019-2018-MTC/14). Manual. <https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales/257462-19-2018-mtc-14>

- Neyra, A. (2019). *Estudio Geológico Geotécnico y Mecánica de Suelos para la construcción del Puente Malvas-Malvitas distrito de Suyo – Provincia de Ayabaca – Departamento de Piura* [Título Profesional, Universidad Nacional de Piura]. <https://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/1807>
- Ortiz, R. (2017). *Influencia del nivel freático en la determinación de capacidad portante de suelos, en cimentaciones superficiales, distrito de Pilcomayo* [Título profesional]. Repositorio Institucional-Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *GEOPHYSICS*, 64(3), 800–808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Raydel, L., Pinto, R., Hernández, E., & Cobelo, W. (2013). Aplicación de la teoría de seguridad al diseño geotécnico de losas sobre pilotes. *Revista ingeniería de construcción*, 28(3), 251–265.
- Rivera, M. A., Rubio, R. P., & García, Y. P. (2016). *Ensayos Geofísicos de Refracción Sísmica y de Medición de Ondas de Corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de edificaciones*. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/civilizate/article/download/18630/18868/>
- Shuan, L. (2011). *Investigación de la matriz en las gravas del Perú, modelo grava de Ventanilla* [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Sutta, A., & Sutta, W. (2023). *Estudio geológico, geotécnico e hidrológico para la construcción de los estribos del puente Coquimbo del distrito de Ocobamba, provincia de La Convención, Cusco* [Título Profesional]. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. (2021). *Informe N°001-2021 EFP-IC/UNDAC*.
- Vara, A. A. (2012). *Desde la idea hasta la sustentación: 7 pasos para una tesis exitosa: Vol. I* (Instituto de Investigación de la Facultad de Ciencias Administrativas y Recursos Humanos, Ed.; Tercera edición). Universidad de San Martín de Porres.
- Visvanathan, Y., & Gödeke, S. H. (2022). Study of ground investigation data along the Brunei Temburong Bridge alignment. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 55(1). <https://doi.org/10.1144/qjegh2021-002>

