

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

ESCUELA DE POSGRADO



UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS

AGRARIAS

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS

TESIS:

**CARACTERIZACIÓN DE POZOS TUBULARES Y ABASTECIMIENTO
DE AGUA EN EL SECTOR HUACARIZ VALLE DE CAJAMARCA**

Para optar el Grado Académico de

DOCTOR EN CIENCIAS

MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES

Presentado por:

M.Cs. CRISTHIAN SAÚL LÓPEZ VILLANUEVA

Asesor:

Dr. WILFREDO POMA ROJAS

Cajamarca, Perú

2026

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:
Cristhian Saúl López Villanueva
DNI: 44199968
Escuela Profesional/Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias. Programa de Doctorado en Ciencias, Mención: Gestión Ambiental y Recursos Naturales
2. Asesor: Dr. Wilfredo Poma Rojas
3. Grado académico o título profesional
☐ Bachiller ☐ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☐ Maestro **X Doctor**
4. Tipo de Investigación:
X Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional ☐ Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:
Caracterización de pozos tubulares y abastecimiento de agua en el Sector Huacariz Valle de Cajamarca
6. Fecha de evaluación: **24/03/2026**
7. Software antiplagio: **X TURNITIN** ☐ URKUND (OURIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: **8%**
9. Código Documento: **3117:570566356**
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
X APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: **24/03/2026**

<i>Firma y/o Sello Emisor Constancia</i>
 Dr. Wilfredo Poma Rojas DNI: 26719942

COPYRIGHT © 2026 by
CRISTHIAN SAÚL LÓPEZ VILLANUEVA
Todos los derechos reservados



Universidad Nacional de Cajamarca
LICENCIADA CON RESOLUCIÓN DE CONSEJO DIRECTIVO N° 080-2018-SUNEDU/CD

Escuela de Posgrado
CAJAMARCA - PERU



PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES

Siendo las 11:05 horas, del día 16 de marzo del año dos mil veintiséis, reunidos en el Auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Jurado Evaluador presidido por el Dr. JUAN EDMUNDO CHÁVEZ RABANAL, Dr. CARLOS RAFAEL SUÁREZ SÁNCHEZ, Dr. JIMY FRANK OBLITAS CRUZ y en calidad de Asesor, el Dr. WILFREDO POMA ROJAS. Actuando de conformidad con el Reglamento Interno de la Escuela de Posgrado y el Reglamento del Programa de Doctorado de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, se inició la SUSTENTACIÓN de la tesis titulada: **CARACTERIZACIÓN DE POZOS TUBULARES Y ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL SECTOR HUACARIZ VALLE DE CAJAMARCA**; presentada por el Maestro en Ciencias mención en Dirección de Proyectos **LÓPEZ VILLANUEVA, CRISTHIAN SAÚL**.

Realizada la exposición de la Tesis y absueltas las preguntas formuladas por el Jurado Evaluador, y luego de la deliberación, se acordó aprobar por unanimidad con la calificación de diecho (10) la mencionada Tesis; en tal virtud, el Maestro en Ciencias mención en Dirección de Proyectos **LÓPEZ VILLANUEVA, CRISTHIAN SAÚL**, está apto para recibir en ceremonia especial el Diploma que lo acredita como **DOCTOR EN CIENCIAS**, de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias, Mención **GESTIÓN AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES**.

Siendo las 12:15 horas del mismo día, se dio por concluido el acto.

Dr. Wilfredo Poma Rojas
Asesor

Dr. Juan Edmundo Chávez Rabanal
Presidente-Jurado Evaluador

Dr. Carlos Rafael Suárez Sánchez
Jurado Evaluador

Dr. Jimmy Frank Oblitas Cruz
Jurado Evaluador

A:

A Dios, por ser guía constante y fuente de fortaleza en cada etapa de este proceso.

A mi familia, pilar fundamental que ha sostenido mi esfuerzo y perseverancia. De manera especial, a mis padres, Nemecio López Gutiérrez y Doraliza Villanueva Moreno, por sus enseñanzas, su ejemplo de trabajo constante y los valores que han marcado mi formación personal y académica.

A mis hermanos, Daniel, Eber y Diego López Villanueva, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación permanente, que han sido un impulso decisivo para alcanzar esta meta académica.

Agradecimiento

Expreso mi sincero agradecimiento a Dios por brindarme salud, fortaleza y claridad para culminar este trabajo de investigación.

A mi familia, por su apoyo constante, comprensión y motivación a lo largo de todo este proceso académico, elementos fundamentales para no desistir ante las dificultades.

A mi asesor de tesis el Dr. Ing. Wilfredo Poma Rojas, por su orientación, sugerencias y acompañamiento académico, los cuales contribuyeron de manera significativa al desarrollo y culminación de la presente investigación.

Finalmente, agradezco a todas las personas e instituciones que, de manera directa o indirecta, colaboraron y facilitaron la realización de este trabajo de investigación.

FRASE

“Lo que es imposible para los hombres es posible para Dios”

–Jesús, Lucas 18:27

ÍNDICE

Página

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
EPÍGRAFE	vii
CONTENIDO	viii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1. Antecedentes de la investigación.....	5
2.1.1. Antecedentes internacionales	5
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	7
2.2. Bases teóricas	8
2.2.1. Hidrogeología.....	8
2.2.2. Clasificación del medio desde el punto de vista Hidrogeológico.....	8
2.2.3. Aguas subterráneas.....	9
2.2.4. Caracterización hidrogeológica de pozos tubulares.....	10
2.2.4.1. Parámetros hidrogeológicos.....	10
2.2.4.2. Propiedades índices de los suelos.....	20
2.2.5. Calidad del agua subterránea.....	22
2.2.6. Pozos tubulares y diseño técnico.....	24
2.2.7. Radio de influencia de un pozo.....	27
2.2.8. Método de Theis.....	29
2.2.9. Geología e hidrogeología de la zona de estudio.....	30

CAPÍTULO III	33
MATERIALES Y MÉTODOS	33
3.1. Localización geográfica.....	33
3.2. Características climáticas.....	34
3.3 Características geológicas.....	34
3.4. Características hidrológicas.....	34
3.5. Aspectos socioeconómicos.....	38
3.6. Materiales y equipos.....	38
3.7. Metodología.....	40
3.8. Etapa preliminar de gabinete.....	43
3.9. Etapa de visita a la zona de estudio.....	44
3.10. Etapa de análisis de laboratorio.....	45
3.11. Etapa de análisis de parámetros hidrogeológicos.....	47
3.12. Etapa de integración y diseño de pozos tubulares.....	48
3.13. Zonificación de áreas para la perforación de pozos tubulares.....	49
3.14. Diseño técnico de pozos tubulares.....	51
CAPÍTULO IV	53
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
4.1. Caracterización geotécnica de la zona de estudio.....	54
4.1.1 Resultados de las calicatas.....	56
4.1.2. Granulometría.....	59
4.2. Parámetros hidráulicos de la zona de estudio.....	61
4.2.1. Porosidad total y porosidad efectiva.....	61
4.2.2. Permeabilidad y transmisividad.....	65
4.3. Agrupamiento por zonas.....	69
4.4. Aplicación del método de Theis.....	71
4.5. Aplicaciones del análisis del Theis para el diseño.....	76
4.6. Calidad del agua.....	77
4.7. Implicancias técnicas para el diseño preliminar.....	79
4.8. Propuesta de zonas de ubicación para la perforación de pozos tubulares.....	80

4.9. Propuesta de diseño técnico y especificaciones para ejecución de pozos tubulares.....	84
4.10. Relación del radio de influencia y espaciamiento de pozos.....	94
4.11. Verificación del diseño preliminar.....	97
4.12. Relación entre los parámetros hidrogeológicos y el diseño del pozo.....	98
CAPÍTULO V	99
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
5.1. Conclusiones.....	99
5.2. Recomendaciones.....	100
CAPÍTULO VI	101
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	101
ANEXOS.....	107

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1 <i>Clasificación de transmisividad de acuíferos</i>	16
Tabla 2 <i>Resultados de ensayos de laboratorio y propiedades geotécnicas por calicata.</i>	58
Tabla 3 <i>Rangos de variación de las propiedades geotécnicas determinadas en las seis calicatas</i>	59
Tabla 4 <i>Porosidad total y porosidad efectiva</i>	61
Tabla 5 <i>Permeabilidad (K) y transmisividad (T) por calicata</i>	65
Tabla 6 <i>Parámetros medios por área (K, T, n_e promedio)</i>	69
Tabla 7 <i>Cumplimiento con ECA 0042017</i>	78
Tabla 8 <i>zonificación en áreas</i>	81
Tabla 9 <i>Jerarquización y zonificación de áreas aptas para la perforación de pozos tubulares</i>	83
Tabla 10 <i>Parámetros del diseño preliminar del pozo tubular según área de estudio</i>	88
Tabla 11 <i>Diseño preliminar y referencial del pozo tubular propuesto</i>	89
Tabla 12 <i>Resumen esquemático del perfil propuesto</i>	92
Tabla 13 <i>Radio de influencia y espaciamiento recomendado entre pozos tubulares</i>	95

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Pozo tubular: disposición general de sus componentes.....	27
Figura 2 Ubicación del área de estudio.....	33
Figura 3 Mapa edafológico.	35
Figura 4 Mapa hidrológico.....	36
Figura 5 Delimitación del área de estudio.	37
Figura 6 Mapa de las calicatas en la zona de estudio	44
Figura 7 Mapa de pozos muestreados en la zona de estudio.....	45
Figura 8 Mapa geológico del área de estudio – Sector Huacariz.	54
Figura 9 Mapa geomorfológico del área de estudio – Sector Huacariz.	55
Figura 10 Mapa de las calicatas y clasificación SUCS.....	57
Figura 11 Mapa hidrogeológico del área de estudio.	60
Figura 12 Porosidad total.	63
Figura 13 Porosidad efectiva.	64
Figura 14 Permeabilidad de la zona de estudio.....	66
Figura 15 Transmisividad de la zona de estudio.....	67
Figura 16 Mapa de zonificación por parámetros medios para el diseño.....	70
Figura 17 Representación tridimensional del radio de influencia de los pozos.	74
Figura 18 Radio de influencia de los pozos, estimado mediante la aproximación de Theis/Cooper–Jacob para un tiempo de bombeo continuo de 30 días.....	75
Figura 19 Delimitación funcional por áreas (criterio hidráulico–geotécnico).	82
Figura 20 Perfil esquemático de pozo tubular.	93

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo caracterizar los pozos tubulares y el abastecimiento de agua subterránea en el sector Huacariz, distrito de Cajamarca, mediante la evaluación de las condiciones geotécnicas, hidrogeológicas y de la calidad del agua. La metodología comprendió la ejecución de seis calicatas, ensayos de laboratorio de mecánica de suelos y la estimación de parámetros hidráulicos, tales como permeabilidad (del orden de 10^{-5} a 10^{-4} m/s), transmisividad (entre 2.4×10^{-4} y 3.9×10^{-4} m²/s) y porosidad efectiva (entre 0.19 y 0.22). Asimismo, se realizó el análisis de muestras de agua subterránea conforme a la normativa nacional vigente. Con base en estos resultados, se aplicó el método de Theis para la estimación teórica del radio de influencia, obteniéndose valores entre 2.8 y 3.2 km para un periodo de bombeo de 30 días, lo que permitió definir criterios preliminares de espaciamiento entre pozos. Los resultados evidencian la presencia de un acuífero granular de transmisividad moderada, con condiciones favorables para su aprovechamiento mediante pozos tubulares. La calidad físico-química del agua cumple con los estándares establecidos; sin embargo, se detectó contaminación microbiológica, por lo que se requiere tratamiento previo para su consumo. Adicionalmente, se identificaron tres zonas con distinto potencial hidrogeológico y se propuso un diseño técnico preliminar de pozo tubular, con caudales estimados entre 3 y 8 L/s, el cual deberá ser validado mediante ensayos de bombeo. Los resultados obtenidos constituyen una base técnica para la planificación sostenible del aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo en el área de estudio.

Palabras clave: acuífero granular, permeabilidad, transmisividad, radio de influencia, pozos tubulares.

ABSTRACT

This research aimed to characterize tubular wells and groundwater supply in the Huacariz sector, Cajamarca district, through the evaluation of geotechnical, hydrogeological, and water quality conditions. The methodology included the execution of six test pits, laboratory soil mechanics tests, and the estimation of hydraulic parameters such as permeability (on the order of 10^{-5} to 10^{-4} m s⁻¹), transmissivity (ranging from 2.4×10^{-4} to 3.9×10^{-4} m² s⁻¹), and effective porosity (between 0.19 and 0.22). In addition, groundwater samples were analyzed in accordance with national regulations.

Based on these results, the Theis method was applied to estimate the radius of influence, obtaining values between 2.8 and 3.2 km for a continuous pumping period of 30 days, which allowed the preliminary determination of well spacing criteria. The results indicate the presence of a granular aquifer with moderate transmissivity and favorable conditions for groundwater exploitation through tubular wells. The physicochemical water quality meets the established standards; however, microbiological contamination was detected, requiring treatment prior to consumption.

Furthermore, three zones with different hydrogeological potential were identified, and a preliminary technical design of a tubular well was proposed, with estimated flow rates between 3 and 8 L s⁻¹. These findings provide a technical basis for the sustainable planning of groundwater resource use in the study area.

Keywords: granular aquifer, permeability, transmissivity, radius of influence, groundwater.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El agua constituye un recurso esencial para la vida, el desarrollo social y la sostenibilidad de los ecosistemas. A escala global, aunque aproximadamente el 70 % de la superficie terrestre se encuentra cubierta por agua, solo una fracción reducida corresponde a agua dulce disponible para el uso humano. Dentro de este volumen limitado, el agua subterránea representa la principal reserva de agua dulce en estado líquido, constituyéndose en una fuente estratégica para el abastecimiento poblacional, agrícola e industrial, especialmente en regiones donde el acceso al agua superficial es limitado o presenta una marcada estacionalidad (Freeze & Cherry, 2019).

La disponibilidad del agua subterránea depende, en gran medida, de los procesos de recarga de los acuíferos, los cuales están condicionados por factores climáticos, geológicos y antrópicos. Estudios recientes señalan que las variaciones en los patrones de precipitación, asociadas tanto a la variabilidad climática natural como al cambio climático, influyen directamente en el balance hídrico subterráneo, generando escenarios de estrés hídrico en diversas regiones del mundo (Driscoll, 2020). En este contexto, la gestión adecuada de los acuíferos se ha convertido en un componente fundamental para el logro del desarrollo sostenible y la seguridad hídrica.

En América Latina, y particularmente en el Perú, el agua subterránea cumple un rol clave en el abastecimiento de poblaciones urbanas y rurales que no cuentan con una cobertura adecuada de agua potable por red pública. Sin embargo, la explotación de este recurso se ha caracterizado, en muchos casos, por la ausencia de planificación técnica y por una débil fiscalización, lo que ha derivado en problemas de sobreexplotación, descenso de

niveles piezométricos y deterioro de la calidad del agua (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2017).

En el valle de Cajamarca, el crecimiento urbano acelerado y el incremento sostenido de la demanda hídrica han impulsado la perforación de pozos tubulares como alternativa de abastecimiento. No obstante, una parte significativa de estos pozos opera sin autorización y sin estudios hidrogeológicos adecuados, lo que compromete la sostenibilidad del acuífero. Informes de la Autoridad Nacional del Agua evidencian la existencia de un elevado número de pozos no inventariados en el valle de Cajamarca, situación que pone en riesgo la disponibilidad futura del recurso hídrico subterráneo y la seguridad del abastecimiento poblacional (ANA, 2017).

Desde el punto de vista técnico, los sistemas de captación de agua subterránea presentan distintos niveles de tecnificación. Los pozos tradicionales excavados manualmente constituyen una alternativa de bajo costo para poblaciones de escasos recursos; sin embargo, presentan limitaciones en cuanto a profundidad, control constructivo y protección sanitaria. Por otro lado, los pozos tubulares modernos permiten una mayor profundidad de captación y un mejor aprovechamiento del acuífero, siempre que su diseño, construcción y operación se realicen bajo criterios hidrogeológicos y geotécnicos adecuados (Driscoll, 2020; Freeze & Cherry, 2019). La ausencia de caracterización técnica de estos sistemas limita la toma de decisiones orientadas a un uso sostenible del agua subterránea.

Diversas investigaciones recientes en Latinoamérica han resaltado la importancia de la caracterización hidrogeológica y la gestión técnica de acuíferos frente a escenarios de crecimiento poblacional y cambio climático. En Chile, estudios desarrollados en el valle central han destacado la exploración de acuíferos como una alternativa estratégica de abastecimiento hídrico en zonas semiurbanas y rurales (Aguirre et al., 2022). En Brasil, se

ha analizado el papel de la infiltración de agua de lluvia en la recarga de acuíferos superficiales, evidenciando la relevancia de comprender los procesos de almacenamiento subterráneo (Pasini, 2022). Asimismo, en Venezuela se han propuesto metodologías sistemáticas para la evaluación de pozos de agua subterránea, integrando variables cualitativas y cuantitativas del acuífero y de la infraestructura de captación.

En este contexto, la presente investigación se orienta a analizar las condiciones geotécnicas, hidrogeológicas y de calidad del agua que fundamentan técnicamente la implementación y diseño de pozos tubulares en el sector Huacariz, valle de Cajamarca, y su relación con el abastecimiento de agua subterránea. Este planteamiento surge ante la necesidad de contar con información técnica confiable que permita evaluar el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo y contribuir a una gestión más eficiente y sostenible del agua en la zona de estudio.

En concordancia con el propósito de la investigación, se estableció como objetivo general caracterizar los pozos tubulares y el abastecimiento de agua en el sector Huacariz, distrito de Cajamarca. Asimismo, se formularon los siguientes objetivos específicos: a) Caracterizar geotécnicamente la zona de estudio b) Determinar los parámetros hidráulicos del acuífero de la zona de estudio; c) Determinar la calidad del agua subterránea de la zona de estudio; d) Proponer zonas de ubicación para ejecución de la perforación de pozos tubulares en el sector Huacariz distrito de Cajamarca; y e) Proponer el diseño técnico y especificaciones técnicas para la ejecución de la perforación de pozos tubulares en el sector Huacariz distrito de Cajamarca.

La investigación se desarrolló mediante un enfoque técnico–aplicado, integrando actividades de gabinete, trabajo de campo y análisis de laboratorio. Se emplearon técnicas de caracterización geotécnica, hidrogeológica y de calidad de agua, así como métodos

indirectos y modelos teóricos para la estimación de parámetros hidráulicos, considerando las limitaciones propias del acceso a información histórica y la imposibilidad de ejecutar pruebas de bombeo a gran escala.

La tesis se estructura de la siguiente manera: el Capítulo I presenta el contexto general, la problemática, los objetivos y el alcance del estudio; el Capítulo II desarrolla el marco teórico y los antecedentes relevantes; el Capítulo III describe detalladamente la metodología empleada; el Capítulo IV expone y analiza los resultados obtenidos; el Capítulo V presenta las conclusiones y recomendaciones; y finalmente, se incluyen las referencias bibliográficas y los anexos correspondientes.

CAPÍTULO II

EL MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

López García (2015), en su investigación denominada “*Caracterización y modelización numérica del flujo subterráneo en acuíferos: aplicación de herramientas hidráulicas y simulación computacional*”, desarrollada en la Universidad Politécnica de Madrid, realizó una caracterización integral de acuíferos granulares y semiconfinados mediante la aplicación de modelos analíticos y numéricos de flujo subterráneo. El autor determinó parámetros hidráulicos como transmisividad, coeficiente de almacenamiento y radios de influencia, destacando la importancia de considerar la heterogeneidad litológica en el diseño y espaciamiento de pozos. Sus resultados evidencian que una inadecuada caracterización hidráulica incrementa el riesgo de interferencia entre pozos y sobreexplotación del acuífero, aportando criterios técnicos relevantes para el diseño preliminar de sistemas de captación subterránea.

Rogiers (2014), en su investigación denominada “*Caracterización multiescalar de acuíferos y flujo subterráneo aplicado a modelación hidráulica*”, presentada en la Universidad de Lieja, abordó el análisis del comportamiento hidráulico de acuíferos heterogéneos mediante la integración de datos geotécnicos, ensayos hidráulicos y modelación conceptual. El estudio concluyó que la variabilidad espacial de parámetros como la permeabilidad y la porosidad efectiva condiciona significativamente la productividad de los pozos, recomendando la zonificación hidrogeológica como herramienta fundamental para la planificación de perforaciones y la gestión sostenible del recurso hídrico subterráneo.

Robles (2021), en su investigación titulada “*Sostenibilidad del agua subterránea y manejo sustentable de acuíferos urbanos*”, desarrollada en la Universidad Autónoma del Estado de México, evaluó el impacto de la explotación de acuíferos en zonas urbanas y periurbanas, integrando análisis hidráulicos, calidad del agua y criterios de gestión. El autor resalta que la falta de estudios hidrogeotécnicos previos al diseño de pozos favorece procesos de colapso estructural, contaminación microbiológica y disminución de la vida útil de las captaciones, enfatizando la necesidad de incorporar sellos sanitarios, espaciamientos adecuados y monitoreo continuo.

En el ámbito de artículos científicos, Velasco y Capilla (2019) realizaron una caracterización hidrogeológica del acuífero de la subcuenca baja del río Piura, en Perú, evaluando parámetros como transmisividad, conductividad hidráulica y efectos antrópicos. Los autores demostraron que los acuíferos granulares presentan una respuesta hidráulica altamente dependiente de la granulometría y del grado de conectividad de poros, lo cual influye directamente en la productividad de los pozos y en la sostenibilidad de su explotación.

Chucuya et al. (2025) analizaron la dinámica de acuíferos en regiones semiáridas mediante técnicas avanzadas de modelación y análisis de datos, evidenciando que la explotación no planificada genera descensos progresivos del nivel freático y superposición de conos de depresión. El estudio resalta la necesidad de integrar parámetros hidráulicos confiables y criterios de zonificación para optimizar la ubicación de pozos y reducir impactos negativos en el sistema acuífero.

Rodríguez-Levy et al. (2023) desarrollaron una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos, destacando la relación entre características geotécnicas, permeabilidad del suelo y comportamiento hidráulico. Sus resultados refuerzan la

importancia de una caracterización integral del medio geológico como base para la gestión sostenible del agua subterránea y el diseño eficiente de captaciones.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Rojas Tapia (2022), en su investigación titulada “*Evaluación estructural de pozos tubulares en suelos semiáridos del norte chileno*”, integró ensayos geotécnicos, análisis de calidad del agua y modelación hidráulica para evaluar la estabilidad y funcionalidad de pozos tubulares. La autora concluyó que la ausencia de un diseño geotécnico adecuado incrementa el riesgo de colapso del pozo y de contaminación por infiltración superficial, recomendando criterios técnicos para el diseño del tramo filtrante y del sello sanitario.

Mamani Ticona (2023), en su estudio denominado “*Determinación geotécnica e hidroquímica de pozos tubulares en la ciudad de Juliaca*”, evaluó la relación entre las características geotécnicas del suelo y la calidad del agua subterránea. El autor identificó que las formaciones volcánicas y piroclásticas influyen tanto en la estabilidad estructural del pozo como en la presencia de contaminantes naturales, recomendando el uso de filtros selectivos y sellos técnicos profundos para garantizar la protección del acuífero.

Ticona Arpi (2021), en su investigación denominada “*Estabilidad estructural de pozos perforados en suelos lacustres de Azángaro*”, analizó pozos tubulares instalados sin una caracterización geotécnica detallada, evidenciando problemas recurrentes de obstrucción, colmatación por finos y fallas estructurales. El estudio resalta la necesidad de adaptar el diseño del pozo al perfil estratigráfico local, considerando parámetros hidráulicos y geotécnicos de manera integrada.

2.2. Bases teóricas

2.2.1 Hidrogeología

La hidrogeología estudia la ocurrencia, movimiento y calidad del agua subterránea, y su relación con los materiales geológicos. El diseño geotécnico de pozos tubulares se basa en una caracterización adecuada del medio hidrogeológico, que incluye el análisis de las unidades acuíferas, su extensión, espesor, litología, grado de saturación, y propiedades hidráulicas (Fitts, 2020).

Los principales factores que influyen en la respuesta del acuífero ante la explotación mediante pozos incluyen: la estructura geológica, el tipo de sedimentos o rocas, la granulometría del medio poroso, y la conectividad hidráulica. Una adecuada interpretación de estos elementos permite definir con precisión la localización, profundidad, diámetro, revestimiento, y capacidad de extracción del pozo (Alcocer et al., 2021).

2.2.2 Clasificación del medio desde el punto de vista Hidrogeológico.

Según Fitts (2020), los materiales geológicos se clasifican desde el punto de vista hidrogeológico en función de su capacidad de almacenamiento y transmisión de agua subterránea, estableciendo cuatro categorías principales:

Acuífero: formación geológica que permite almacenar y transmitir agua en cantidades significativas. Son esenciales para la captación mediante pozos tubulares y pueden estar compuestos por arenas, gravas o rocas fracturadas.

Acuitardo: unidad geológica que puede almacenar agua, pero cuya permeabilidad es baja, por lo que la transmisión del flujo es lenta. Aunque no son ideales para la captación directa, pueden alimentar acuíferos subyacentes mediante flujo retardado.

Acuicludo: material que almacena agua, pero presenta una conductividad hidráulica tan baja

que prácticamente impide su transmisión. Suelos arcillosos masivos o lutitas compactas son ejemplos comunes.

Acuífugo: formación impermeable que ni almacena ni transmite agua de forma apreciable. Su presencia actúa como barrera hidráulica en el subsuelo.

En la práctica, los límites entre estas categorías no son absolutos, ya que las condiciones hidrogeológicas pueden variar espacialmente. La clasificación final de una unidad geológica como acuífero o no acuífero depende también del contexto regional, la estructura geológica, y las necesidades de explotación.

2.2.3. Aguas subterráneas

Es el agua que se encuentra y circula en el subsuelo, conformando los acuíferos. La fuente de aporte principal es el agua de lluvia, mediante el proceso de infiltración. Otras fuentes de alimentación localizada pueden ser los ríos, arroyos, lagos y lagunas. El agua subterránea se sitúa por debajo del nivel freático y está saturando completamente los poros y/o fisuras del terreno y fluye a la superficie de forma natural a través de vertientes o manantiales o cauces fluviales. Su movimiento en los acuíferos es desde zonas de recarga a zonas de descarga, con velocidades que van desde metro/año a cientos de m/día, con tiempos de residencia largos resultando grandes volúmenes de almacenamiento (Lapworth et al., 2020).

2.2.3.1. Captación del agua subterránea.

El agua subterránea se capta principalmente a través de pozos verticales, que son los más difundidos a nivel mundial y a través de pozos horizontales como galerías filtrantes y zanjales de drenaje. Esta agua se localiza por debajo del nivel freático, en la llamada zona saturada, donde llena completamente los poros o fracturas del material geológico. Su movimiento es gobernado por diferencias de energía hidráulica, desplazándose desde zonas

de recarga (donde ingresa el agua) hacia zonas de descarga (manantiales, ríos o pozos), con velocidades que varían desde centímetros por año hasta varios metros por día, dependiendo de la permeabilidad del medio (Scanlon et al., 2021; Taylor & Scanlon, 2020).

2.2.3.2 Pozos tubulares

Un pozo tubular es una obra hidrogeológica de acceso a uno o más acuíferos para la captación de agua subterránea, ejecutada con sonda perforadora en forma vertical, en función de la necesidad de extracción, abastecimiento de agua según sea la necesidad, y de la geología local, se define si podrá ser parcial o totalmente revestido. La capacidad de los pozos tubulares varía en una gran escala, desde menos de 1 litro/seg para pozos superficiales de diámetro pequeño en acuíferos de arena fina, a más de 100 litros/seg para pozos profundos de diámetro más grande en arena gruesa o en depósitos de roca sedimentaria. Los pozos entubados son muy adecuados para abastecimientos de agua potable, porque sólo serán necesarias precauciones simples para proteger de la contaminación al agua extraída de esta manera. Algunas veces, se puede usar un grupo de pozos tubulares colocados en serie y a los cuales se bombea como una unidad. (Lossio, 2012)

2.2.4. Caracterización hidrogeológica de pozos tubulares

2.2.4.1 Parámetros hidrogeológicos

A. Porosidad efectiva

La porosidad constituye un parámetro fundamental en el estudio de acuíferos, ya que describe la fracción del volumen total del suelo o roca que corresponde a espacios vacíos. La porosidad total (n) se define como la relación entre el volumen de vacíos (V_v) y el volumen total de la muestra (V):

$$n = \frac{V_v}{V}$$

1

Sin embargo, en el análisis hidrogeológico no toda la porosidad es relevante, debido a que una fracción de los poros corresponde a espacios cerrados, capilares muy finos o microfracturas que no contribuyen al flujo del agua subterránea (Bear, 2018; Fetter, 2018). Por ello se introduce el concepto de porosidad efectiva (n_e), la cual considera únicamente el volumen de poros interconectados y capaces de transmitir agua (Ren, Zhang, & Wang, 2020).

Una forma práctica de estimar la porosidad efectiva es mediante el índice de vacíos efectivo (e_e), el cual se obtiene a partir del índice de vacíos total (e), ajustado con un factor empírico dependiente de la naturaleza del suelo. Ren et al. (2020) plantean la siguiente expresión:

$$e_e = e \left(\frac{1}{1 + e} \right)^m$$

2

donde m es un parámetro adimensional que depende de la granulometría y plasticidad del material, con valores que oscilan entre 0.05 y 0.50.

Con el índice de vacíos efectivo, la porosidad efectiva puede calcularse como:

$$n_e = \frac{e_e}{1 + e}$$

3

De esta manera, a partir de parámetros geotécnicos básicos como la densidad seca (γ_d) y la

gravedad específica de los sólidos (G_s) se puede estimar el índice de vacíos total y, posteriormente, la porosidad efectiva, sin necesidad de ensayos hidrogeológicos directos.

El uso de la porosidad efectiva en estudios hidrogeológicos es de gran relevancia porque permite evaluar la capacidad de almacenamiento dinámico de los acuíferos y mejorar la estimación de parámetros como la conductividad hidráulica y la transmisividad (Custodio & Llamas, 2019). Además, al estar directamente vinculada con la fracción de poros que realmente interviene en el flujo, constituye un insumo esencial en la modelación numérica de acuíferos y en el diseño de pozos tubulares (Bear, 2018; Domenico & Schwartz, 2020). En síntesis, la incorporación de la ecuación propuesta por Ren et al. (2020) (Ecs. 2 y 3) en la caracterización del acuífero de estudio permite obtener un valor más representativo de la porosidad efectiva, en comparación con el uso exclusivo de la porosidad total, ofreciendo así una base más sólida para la evaluación del abastecimiento hídrico.

El índice de vacíos (e) es un parámetro fundamental para cuantificar el espacio poroso de un material granular o cohesivo. Este valor se puede determinar analíticamente mediante la relación entre la gravedad específica de los sólidos (G_s) y la densidad seca ρ_d del suelo. De acuerdo con Das y Sivakugan (2021), esta relación física se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$e = \frac{G_s}{\rho_d} - 1$$

Donde:

4

- e : relación de vacíos (adimensional).
- G_s : gravedad específica de los sólidos (adimensional).
- ρ_d : densidad seca del suelo (unidades de masa/volumen).

Esta expresión permite establecer la base volumétrica necesaria para el cálculo de la porosidad total y, posteriormente, la estimación de la porosidad efectiva en el análisis de flujo subterráneo.

B. Permeabilidad

La permeabilidad es una propiedad intrínseca de los suelos y rocas que describe la facilidad con la que un fluido se desplaza a través del medio poroso. A diferencia de la conductividad hidráulica, la permeabilidad es independiente del tipo de fluido y depende únicamente de las características geométricas del medio, como el tamaño, la forma y la conectividad de los poros (Bear, 2018; Custodio & Llamas, 2019).

Este parámetro se expresa como permeabilidad intrínseca (k), cuyas dimensiones corresponden a área

a. Relación con la conductividad hidráulica

La relación entre la permeabilidad intrínseca (k) y la conductividad hidráulica (K) se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$K = \frac{k \rho g}{\mu}$$

5

donde:

K = conductividad hidráulica

k = permeabilidad intrínseca

ρ = densidad del fluido

g = aceleración de la gravedad

μ = viscosidad dinámica del fluido

b. Ecuación de Kozeny–Carman

Uno de los modelos más utilizados para estimar la permeabilidad intrínseca es la ecuación de Kozeny–Carman, que relaciona este parámetro con la porosidad efectiva y la superficie específica del material granular (Carman, 1956; Ren et al., 2020):

$$k = \frac{1}{C} \cdot \frac{n_e^3}{S^2 (1 - n_e)^2}$$

6

donde:

k = permeabilidad intrínseca

n_e = porosidad efectiva (adimensional)

S = superficie específica del medio

C = constante empírica de Kozeny (≈ 5)

Esta expresión resalta la influencia de la porosidad efectiva en la permeabilidad, aunque también evidencia la importancia de la textura y la distribución granulométrica del suelo. En materiales de grano fino, como limos y arcillas, la permeabilidad es reducida debido a la escasa conectividad de poros; mientras que en arenas y gravas, los valores son considerablemente mayores (Domenico & Schwartz, 2020).

c. Importancia en estudios hidrogeológicos

La permeabilidad es un parámetro fundamental en hidrogeología, ya que condiciona la capacidad de un acuífero para transmitir agua. A partir de este parámetro se puede determinar la transmisividad (T) del acuífero:

$$T = K \cdot b$$

7

Se define como el producto de la conductividad hidráulica (K) y el espesor saturado del acuífero (b):

En consecuencia, la caracterización de la permeabilidad resulta esencial para el modelado de flujo subterráneo, la gestión de recursos hídricos y el diseño de pozos de captación (Custodio y Llamas, 2019; Ren et al., 2020).

d. Porosidad efectiva y su relación con el flujo subterráneo

En medios porosos naturales, la porosidad efectiva no coincide necesariamente con la porosidad total, ya que solo una fracción de los poros contribuye de manera directa al flujo subterráneo. Diversos estudios recientes señalan que, en acuíferos granulares con presencia significativa de limo y arcilla, la porosidad efectiva suele representar entre el 60 % y 70 % de la porosidad total, debido a la existencia de microporos con baja conectividad hidráulica que almacenan agua pero no participan activamente en el flujo (Ren et al., 2020; Singhal & Gupta, 2021).

C. Transmisividad

la transmisividad se ha consolidado como un parámetro indispensable para la evaluación de la disponibilidad hídrica y la gestión de recursos subterráneos, al estar directamente relacionada con la capacidad de un acuífero para suministrar agua a pozos y manantiales (Pardo-Igúzquiza et al., 2023; Ren et al., 2020). Su determinación es clave en estudios de sostenibilidad hídrica, gestión de acuíferos sobreexplotados y modelación hidrogeológica.

La transmisividad puede estimarse de dos maneras principales:

1. **Métodos indirectos**, a partir de valores de conductividad hidráulica obtenidos en laboratorio o mediante correlaciones empíricas clásicas, como las ecuaciones de Kozeny–Carman y Hazen, las cuales continúan siendo empleadas y evaluadas en estudios hidrogeológicos recientes (Ren et al., 2020; Singhal & Gupta, 2021).
2. **Métodos directos**, a través de la interpretación de pruebas de bombeo, que permiten obtener valores representativos a escala de campo (Kruseman & de Ridder, 2000; Zhou et al., 2021).

la transmisividad constituye un parámetro puente entre las propiedades intrínsecas del medio poroso y el comportamiento hidráulico del acuífero en su conjunto. Mientras que su formulación se remonta a los estudios clásicos de Theis (1935), su aplicación en investigaciones contemporáneas ha sido reforzada por metodologías modernas de modelación y teledetección (Pardo-Igúzquiza et al., 2023).

Tabla 1

Clasificación de la transmisividad de acuíferos

Transmisividad ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	Clasificación de la capacidad de transmisión
$< 1 \times 10^{-5}$	Baja
$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$	Moderada
$> 1 \times 10^{-3}$	Alta

Nota. Rangos de clasificación de la transmisividad según Custodio y Llamas (2020) y Freeze y Cherry (2019).

D. Coeficiente de almacenamiento (S)

El coeficiente de almacenamiento (S) constituye un parámetro fundamental en la hidrogeología, ya que representa la respuesta volumétrica de un acuífero frente a variaciones en el nivel piezométrico, reflejando la cantidad de agua que puede ser liberada o retenida bajo condiciones de cambio hidráulico. Este parámetro es ampliamente utilizado en la interpretación de ensayos hidráulicos y en la modelación del comportamiento de acuíferos, manteniendo plena vigencia en estudios hidrogeológicos contemporáneos (Zhou et al., 2022; Ren & Jin, 2022).

Matemáticamente, se define como:

$$S = \frac{\Delta V_w}{A \cdot \Delta h}$$

8

donde:

ΔV_w = volumen de agua almacenado o liberado

A = área de la sección del acuífero

Δh = variación de carga hidráulica

a. Tipos de almacenamiento según el tipo de acuífero

Acuíferos no confinados

El almacenamiento está dominado por el rendimiento específico (S_y), correspondiente al agua que drena gravitacionalmente cuando el nivel freático desciende.

En estos casos:

$$S \approx S_y \quad (0.01 \text{ a } 0.30)$$

9

El valor es relativamente alto, debido al drenaje libre de los poros.

Acuíferos confinados

El almacenamiento proviene de la compresibilidad del agua y de la compresibilidad de la matriz porosa.

En este caso:

$$S = S_s \cdot b$$

10

donde:

- S_s = coeficiente de almacenamiento específico
- b = espesor del acuífero confinado

Valores típicos:

$$10^{-5} \leq S \leq 10^{-3}$$

11

mucho menores que en acuíferos libres (Ren et al., 2020; Houben & Treskatis, 2021).

El almacenamiento específico (S_s) se expresa como:

$$S_s = \rho g (\alpha + n\beta)$$

12

donde:

- ρ = densidad del agua

- g = aceleración de la gravedad
- α = coeficiente de compresibilidad del esqueleto poroso
- β = compresibilidad del agua
- n = porosidad total.

Esta formulación muestra que tanto la matriz sólida como el fluido intersticial contribuyen al almacenamiento en un acuífero confinado (Freeze & Cherry, 2019; Ren et al., 2020).

b. Importancia hidrogeológica

El coeficiente de almacenamiento (S) constituye un parámetro fundamental en la hidrogeología, pues controla la respuesta de un acuífero frente a la extracción o recarga. En acuíferos confinados, un valor reducido de S (generalmente entre 10^{-5} y 10^{-3}) implica que el volumen de agua disponible proviene principalmente de la compresibilidad del agua y de la matriz rocosa, lo que determina una limitada capacidad de liberación de agua bajo bombeo (Custodio & Llamas, 2020; Singhal & Gupta, 2021). En contraste, en acuíferos no confinados, donde S se aproxima a la porosidad efectiva, el agua almacenada puede liberarse en mayor proporción debido al drenaje gravitacional de los poros, otorgando un comportamiento más sensible a las variaciones del nivel freático (Zhou et al., 2022).

Desde la perspectiva hidrogeológica, la estimación adecuada de S es esencial para:

1. Modelar la evolución piezométrica frente a bombeo o recarga.
2. Diseñar sistemas de explotación sostenible de agua subterránea.
3. Predecir el abatimiento de niveles y los tiempos de recuperación del acuífero tras periodos de sequía o sobreexplotación (Ren et al., 2020).

Por tanto, el coeficiente de almacenamiento no solo tiene una definición matemática, sino que también constituye un indicador de la capacidad de regulación natural del acuífero, clave para la gestión integrada del recurso hídrico subterráneo.

El estudio de la porosidad, permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento permite caracterizar la capacidad del acuífero para almacenar y transmitir agua. Sin embargo, la disponibilidad real para el abastecimiento no depende únicamente de la cantidad de recurso, sino también de su calidad físico-química y microbiológica. En este sentido, resulta indispensable analizar la calidad del agua subterránea, como parámetro complementario en la evaluación de los pozos tubulares y su contribución al abastecimiento en el sector Huacariz.

2.2.4.2 Propiedades índices de los suelos

Las propiedades índices de los suelos permiten caracterizar su comportamiento físico y su interacción con el agua, constituyendo parámetros fundamentales en estudios geotécnicos e hidrogeológicos. Estas propiedades influyen directamente en la capacidad del suelo para almacenar y transmitir agua, así como en su respuesta frente a variaciones de humedad (Das & Sivakugan, 2021; Fetter, 2018).

A. Limite liquido (LL)

Es el contenido de humedad a partir del cual el suelo pasa del estado plástico al estado líquido. Este parámetro representa la condición en la que el suelo comienza a fluir y está asociado a su capacidad de retención de agua. Su valor es característico de suelos finos y se relaciona con su comportamiento hidráulico (Das & Sivakugan, 2021).

B. Limite plástico (LP)

Corresponde al contenido de humedad en el cual el suelo pasa del estado semisólido al estado plástico. Este límite permite identificar la consistencia del material y su capacidad de deformarse sin fracturarse, siendo relevante en la evaluación de su comportamiento frente a la infiltración y retención de agua (Das & Sivakugan, 2021).

C. Índice de plasticidad (IP)

Se define como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico ($IP = LL - LP$). Este índice indica el rango de humedad en el cual el suelo presenta comportamiento plástico. Valores elevados corresponden a suelos con mayor contenido de arcilla y menor permeabilidad, mientras que valores bajos se asocian a suelos más permeables (Das & Sivakugan, 2021; Fetter, 2018).

D. Contenido de humedad (W)

Es la relación entre el peso del agua y el peso de los sólidos del suelo, expresada en porcentaje. Este parámetro permite evaluar el estado hídrico del suelo y su influencia en propiedades como la resistencia, la compresibilidad y la conductividad hidráulica (Fetter, 2018).

E. Gravedad específica de los sólidos (G_s)

Es la relación entre la densidad de las partículas sólidas del suelo y la densidad del agua. Este parámetro es fundamental para el cálculo del índice de vacíos, la porosidad y otros parámetros utilizados en la caracterización del medio poroso (Das & Sivakugan, 2021).

F. Densidad seca (ρ_d)

Representa la relación entre el peso de los sólidos y el volumen total del suelo. Es un parámetro clave para evaluar el grado de compactación del suelo y se emplea en la estimación de propiedades hidráulicas, como la porosidad y la permeabilidad (Das & Sivakugan, 2021; Custodio & Llamas, 2019).

G. Humedad óptima

Es el contenido de humedad al cual un suelo alcanza su máxima densidad seca bajo un esfuerzo de compactación determinado. Este parámetro influye en la estructura del suelo, la distribución de vacíos y la conectividad de poros, afectando indirectamente la capacidad de infiltración y transmisión de agua (Das & Sivakugan, 2021; Bear, 2018).

2.2.5 Calidad del agua subterránea

La calidad del agua subterránea es un factor determinante para garantizar su aptitud en el abastecimiento humano, agrícola e industrial. No basta con la disponibilidad del recurso, sino que debe cumplir con criterios físico-químicos y microbiológicos que aseguren su potabilidad y sostenibilidad (Todd & Mays, 2005; WHO, 2022).

2.2.5.1 Concepto y criterios de calidad

El agua subterránea se define como aquella contenida en los poros y fisuras de los acuíferos. Su calidad depende de procesos naturales (interacción agua-roca, tiempo de residencia) y de actividades antrópicas (agricultura, descargas industriales, urbanización) (Custodio & Llamas, 2001; Zhang et al., 2021).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece valores guía de calidad que sirven como referencia internacional (WHO, 2022). En el caso peruano, la Norma de Calidad Ambiental para Agua (ECA Agua) y los Estándares de Calidad de Agua para Consumo Humano (DIGESA, 2021) determinan los límites máximos permisibles.

2.2.5.2 Parámetros físico-químicos

Los parámetros más representativos son:

- pH: refleja acidez o alcalinidad del agua.
- Conductividad eléctrica (CE): relaciona la concentración de sales disueltas.
- Sólidos disueltos totales (SDT): indicador global de salinidad.
- Cationes y aniones principales: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- .
- Dureza: asociada a carbonatos de calcio y magnesio.
- Nitratos (NO_3^-): indicador de contaminación agrícola o urbana.

Estos parámetros permiten clasificar los tipos hidroquímicos del agua mediante diagramas como Piper, Stiff o Schoeller (Appelo & Postma, 2005; Ren et al., 2020).

2.2.5.3 Parámetros microbiológicos

La contaminación microbiológica, principalmente por coliformes totales y *Escherichia coli*, es la más crítica para el consumo humano. Su presencia indica contaminación fecal y riesgo sanitario directo (WHO, 2022; DIGESA, 2021).

2.2.5.4 Relación entre calidad del agua y abastecimiento

Un sistema de abastecimiento no solo debe garantizar cantidad, sino también calidad. Aun cuando un pozo tubular proporcione caudales adecuados, si el agua no cumple con las

normas de potabilidad, su aprovechamiento es limitado o requiere tratamiento adicional (Custodio & Llamas, 2001; Xu et al., 2023).

La evaluación de la calidad, por tanto, se convierte en un indicador del abastecimiento efectivo, ya que condiciona el uso directo del recurso en la población (WHO, 2022).

2.2.6 Pozos tubulares y diseño técnico

Los pozos tubulares constituyen la infraestructura fundamental para la explotación del agua subterránea en sistemas acuíferos, al permitir el acceso, extracción y aprovechamiento sostenible del recurso. Se distinguen de los pozos excavados tradicionales por su mayor profundidad, diámetro reducido y empleo de entubado y filtros, lo cual garantiza una mejor protección sanitaria y un rendimiento hidráulico superior (Custodio & Llamas, 2017; Villanueva et al., 2021).

2.2.6.1 Tipos y clasificación de pozos tubulares

Los pozos tubulares pueden clasificarse en función de su profundidad (someros o profundos), del tipo de acuífero explotado (libre o confinado), o de su diseño constructivo (con ademe ranurado, con filtros prefabricados, o con rejillas especiales). Esta clasificación condiciona su eficiencia hidráulica y la calidad del agua extraída (Houben & Treskatis, 2021).

2.2.6.2 Criterios de diseño técnico

El diseño de un pozo tubular debe considerar la interacción entre las condiciones hidrogeológicas del acuífero y los parámetros de operación requeridos para el abastecimiento. Estos criterios buscan garantizar un funcionamiento hidráulico eficiente, estabilidad estructural y sostenibilidad del aprovechamiento del agua subterránea (FAO,

2021; Misstear et al., 2020).

- A. Profundidad y ubicación:** se determinan a partir del conocimiento de la geometría del acuífero, su espesor saturado y el régimen hidráulico, con el fin de interceptar las unidades más productivas y asegurar una captación eficiente del recurso (FAO, 2021; Alley et al., 2022).
- B. Diámetro del pozo:** relacionado con el caudal de diseño y la velocidad admisible de entrada de agua, evitando pérdidas por fricción y arrastre de finos (Singh et al., 2020).
- C. Sección filtrante:** la selección del material, tipo y longitud de los filtros depende de la granulometría del acuífero, permitiendo un flujo uniforme del agua hacia el pozo y reduciendo los riesgos de colmatación y pérdida de eficiencia hidráulica (Houben & Treskatis, 2021; Kruseman et al., 2020).
- D. Empaque granular:** consiste en el uso de grava adecuadamente graduada que actúa como medio de transición entre el acuífero y el filtro, favoreciendo la retención de partículas finas, la estabilidad del pozo y la mejora del rendimiento hidráulico (FAO, 2021; Roscoe et al., 2022).
- E. Desarrollo y aforo:** son procesos esenciales posteriores a la perforación, orientados a remover finos del entorno inmediato al pozo, mejorar la conexión hidráulica con el acuífero y cuantificar la capacidad productiva real mediante pruebas controladas de extracción (Alley et al., 2022; Singh et al., 2020).

2.2.6.3 Importancia del diseño en el rendimiento

Un diseño inadecuado puede generar problemas como colmatación prematura, intrusión de finos, disminución de la capacidad de bombeo o deterioro en la calidad del agua. Por ello, la literatura reciente enfatiza la necesidad de aplicar modelos de diseño que integren

parámetros hidrogeológicos (permeabilidad, transmisividad, almacenamiento) con criterios de eficiencia hidráulica y sostenibilidad (Ren et al., 2020; Sanz et al., 2022).

2.2.6.4 Normativas y lineamientos técnicos

En el contexto peruano, el diseño y construcción de pozos tubulares está regulado por el Reglamento de Perforación y Construcción de Pozos Subterráneos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2021), que establece los requisitos técnicos mínimos en cuanto a materiales, métodos de perforación y protección sanitaria. A nivel internacional, organismos como la FAO y la International Association of Hydrogeologists (IAH) recomiendan lineamientos similares, con énfasis en la gestión sostenible y la protección de la calidad del agua subterránea (FAO, 2020; Houben & Treskatis, 2021).

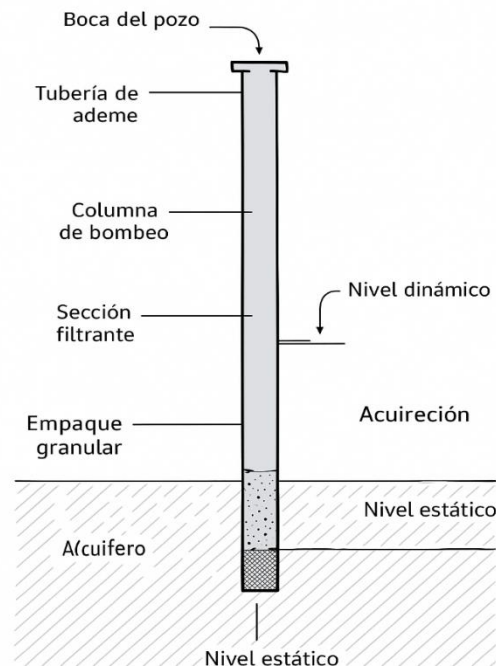
2.2.6.5 Esquema técnico de un pozo tubular típico

- A.** Tubería de ademe.
- B.** Sección filtrante.
- C.** Empaque granular.
- D.** Columna de bombeo.
- E.** Nivel estático y dinámico del agua.
- F.** Boca del pozo.

Este tipo de figura es estándar en manuales técnicos, por ejemplo en Houben & Treskatis (2021).

Figura 1

Pozo tubular: disposición general de sus componentes.



Nota: Representación gráfica de la disposición general y de los principales componentes de un pozo tubular para la captación de agua subterránea. Adaptado de la Autoridad Nacional del Agua (2021).

2.2.7 Radio de influencia de un pozo

El radio de influencia (R) de un pozo se define como la distancia máxima desde el eje del pozo hasta la cual se genera un abatimiento significativo en el nivel piezométrico como resultado de la extracción de agua subterránea. En otras palabras, corresponde al límite espacial de la depresión cónica que se forma alrededor del pozo durante el bombeo (Custodio & Llamas, 2020; Ren et al., 2021).

Este parámetro es fundamental porque delimita el área afectada por la operación del pozo y permite estimar la interacción entre pozos cercanos, la posible interferencia en manantiales y la sostenibilidad de la explotación.

2.2.7.1 Métodos de estimación

Existen distintos enfoques para calcular el radio de influencia, los cuales se aplican de acuerdo con las condiciones del acuífero y la disponibilidad de datos:

Método empírico de Sichardt

Uno de los métodos más utilizados es el propuesto por Sichardt, que relaciona el radio de influencia con el abatimiento y la conductividad hidráulica del acuífero:

$$R = 3000 \cdot s \cdot \sqrt{K}$$

13

donde:

R = radio de influencia (m),

s = abatimiento máximo en el pozo (m),

K = coeficiente de permeabilidad (ms^{-1}).

Este método es sencillo, pero presenta limitaciones, ya que fue desarrollado en contextos específicos y tiende a sobreestimar el radio en acuíferos heterogéneos (Houben & Treskatis, 2022).

Importancia hidrogeológica

La determinación del radio de influencia permite:

- Definir el área de protección de los pozos frente a fuentes de contaminación.
- Prevenir la interferencia hidráulica entre pozos cercanos.
- Estimar la capacidad de explotación sostenible del acuífero.
- Apoyar el diseño técnico de nuevos pozos en función de la densidad y espaciamiento adecuados.

De este modo, el radio de influencia se constituye en un parámetro esencial dentro del diseño, gestión y explotación de pozos tubulares, especialmente en zonas urbanas donde los acuíferos están sometidos a una creciente presión antrópica. (Zhou et al., 2022).

2.2.8 Método de Theis

El método de Theis (1935) constituye una de las soluciones analíticas más utilizadas en hidrogeología para la interpretación de pruebas de bombeo en acuíferos confinados bajo condiciones de régimen transitorio. Esta metodología se fundamenta en la analogía entre el flujo de agua subterránea y la difusión de calor, lo que permitió formular la conocida ecuación de Theis, derivada de la solución de la ecuación diferencial de flujo radial transitorio hacia un pozo de bombeo.

La expresión general es:

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

14

donde:

$s(r, t)$ = abatimiento en el pozo de observación [m],

Q = caudal de bombeo [m^3s^{-1}],

T = transmisividad del acuífero [m^2s^{-1}],

$W(u)$ = integral del pozo o función de Theis,

S = coeficiente de almacenamiento del acuífero [-],

r = distancia radial al pozo [m],

t = tiempo desde el inicio del bombeo [s].

$$u = \frac{Sr^2}{4Tt}$$

Este método permite determinar los parámetros transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S) a partir de la interpretación de la curva de abatimiento en función del tiempo. Para su aplicación práctica, los datos observados se ajustan a curvas tipo de Theis o, alternativamente, se emplean simplificaciones como el método de Cooper–Jacob (1946), el cual transforma el ajuste en un análisis semilogarítmico válido para tiempos suficientemente grandes (Ren et al., 2020).

En estudios recientes, el método de Theis sigue siendo considerado una referencia fundamental para la caracterización de acuíferos confinados y transitorios, ya que proporciona resultados confiables y constituye la base para desarrollos más avanzados en modelación hidrogeológica (Houben & Treskatis, 2021; Ren & Jin, 2022). Su aplicación es particularmente relevante en el diseño y gestión de pozos tubulares, dado que permite cuantificar la capacidad de producción del acuífero y su respuesta a la explotación.

2.2.9 Geología e hidrogeología de la zona de estudio

El sector Huacariz, ubicado en el distrito de Cajamarca, se caracteriza por una geología compleja debido a la interacción entre procesos tectónicos y sedimentarios que han modelado la cuenca a lo largo del tiempo. La zona se encuentra en la cordillera norandina,

donde predominan unidades litológicas de origen sedimentario e ígneo, intercaladas con depósitos cuaternarios recientes.

2.2.9.1 Geología

En el área afloran principalmente formaciones sedimentarias del Cretácico superior, compuestas por lutitas, areniscas y calizas, las cuales presentan fracturamiento asociado a la tectónica andina. Estos materiales son de interés hidrogeológico, ya que las fracturas y niveles de porosidad secundaria favorecen la circulación y almacenamiento de agua subterránea (INGEMMET, 2021).

Sobre estas unidades se encuentran depósitos aluviales y coluviales cuaternarios, constituidos por gravas, arenas y limos, que conforman acuíferos de carácter libre o semiconfinado en los sectores de valle. Estos sedimentos recientes tienen alta permeabilidad y permiten la recarga directa por precipitación e infiltración de escorrentías superficiales (Salazar et al., 2020).

2.2.9.2 Hidrogeología

El acuífero de Huacariz es clasificado como acuífero confinado de régimen transitorio, donde el agua se encuentra limitada por capas de baja permeabilidad (lutitas y limos), pero con capacidad de transmisión significativa debido a zonas fracturadas y a la conectividad con los depósitos aluviales. La recarga principal proviene de la infiltración de aguas pluviales y de la percolación desde los cursos superficiales, especialmente en época de lluvias intensas. El flujo subterráneo tiende a seguir la dirección general del valle, con descargas naturales en manantiales y mediante extracción por pozos tubulares.

Desde el punto de vista hidroquímico, las aguas subterráneas suelen presentar composición bicarbonatada-cálcica, asociada a la disolución de calizas y material carbonatado presente en la estratigrafía regional (Vega et al., 2019). Sin embargo, existen zonas con variaciones en la calidad del agua debido a procesos de interacción agua-roca y a la influencia de actividades antrópicas, lo que refuerza la importancia de caracterizar tanto los parámetros físicos como químicos.

2.2.9.3 Relevancia para el estudio

La comprensión de la geología e hidrogeología local resulta esencial para el diseño y operación de pozos tubulares, ya que permite identificar las capas productivas más favorables para la explotación, determinar el tipo de acuífero y seleccionar el método de análisis más adecuado para la estimación de parámetros hidráulicos —como el modelo de flujo transitorio de Theis en acuíferos confinados, evaluar la recarga potencial y la sostenibilidad del aprovechamiento, así como considerar los riesgos de contaminación asociados a la interacción entre el acuífero y los depósitos superficiales (Custodio & Llamas, 2020; Fetter, 2018). En este sentido, la caracterización geológica e hidrogeológica constituye la base técnica para la estimación de parámetros hidráulicos, el análisis de la calidad del agua y la delimitación de zonas óptimas para la perforación de nuevos pozos, asegurando un diseño coherente con las condiciones reales del medio y una explotación sostenible del recurso hídrico subterráneo (Driscoll, 2020).

CAPÍTULO III

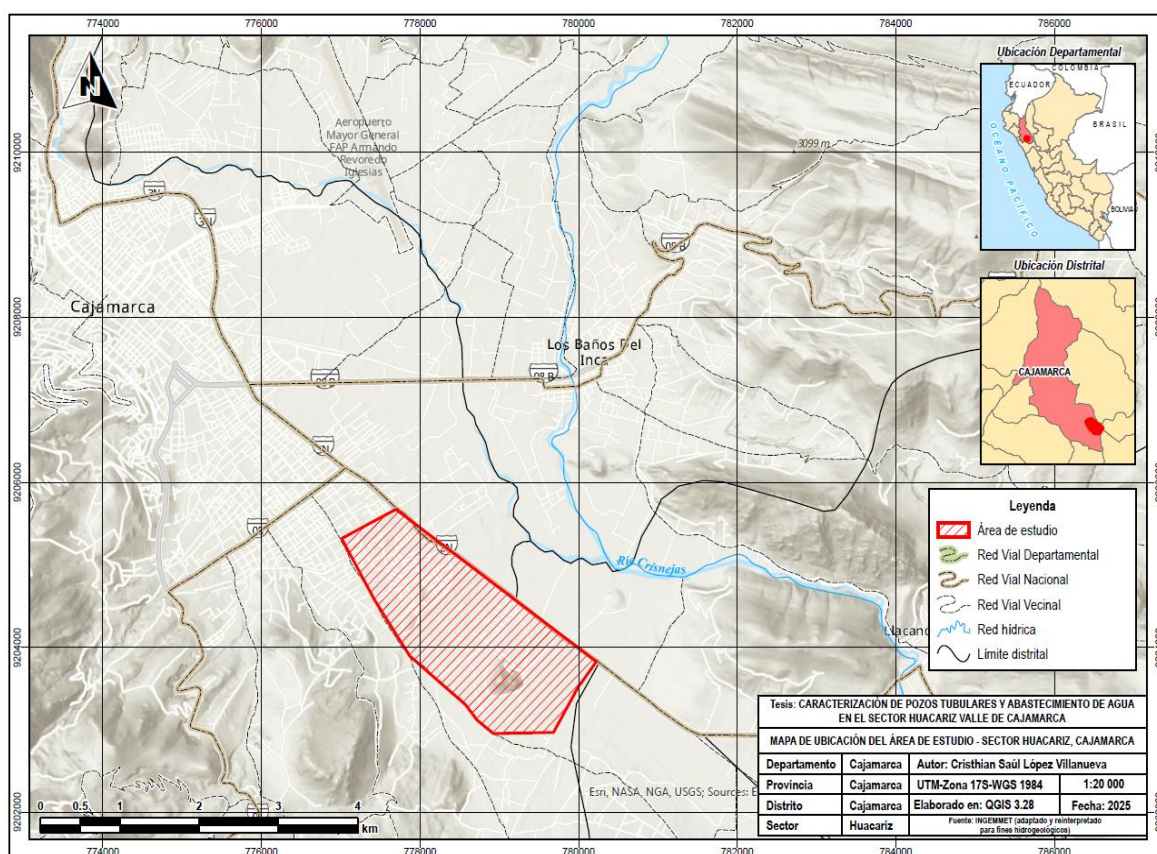
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización geográfica

El área de estudio se localiza en el sector Huacariz, distrito de Cajamarca, y se encuentra delimitada por un polígono definido mediante coordenadas UTM, zona 17S, sistema de referencia WGS 84. Las coordenadas del área presentan valores de Este entre 777 009.88 m y 780 228.45 m, y de Norte entre 9 202 954.78 m y 9 205 673.91 m, y altitud promedio de 2700 m.s.n.m., según cartografía oficial del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

Figura 2

Ubicación de la zona de estudio



Nota. Mapa de ubicación del área de estudio en el sector Huacariz, Cajamarca, delimitado mediante coordenadas UTM (zona 17S, WGS 84). Elaboración propia con base en cartografía del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2021).

3.2 Características climáticas

El clima en la zona de Cajamarca es de tipo templado subhúmedo, con marcada estacionalidad entre periodos húmedos (noviembre a abril) y secos (mayo a octubre). La precipitación media anual oscila entre 700 y 1 000 mm, con intensidades mayores en los meses de verano, lo que constituye la principal fuente de recarga para los acuíferos locales. La temperatura media anual es de 14 °C, con amplitudes moderadas entre el día y la noche (SENAMHI, 2023). Estos factores climáticos son determinantes en la infiltración y disponibilidad de agua subterránea.

3.3 Características geológicas

El subsuelo de Huacariz corresponde a depósitos cuaternarios asociados a terrazas fluviales, abanicos aluviales y rellenos coluvio-aluviales, que reposan sobre formaciones sedimentarias del Cretácico (calizas, lutitas y margas). La presencia de niveles de gravas y arenas favorece la transmisión de agua subterránea, mientras que los horizontes arcillosos actúan como capas de confinamiento. A nivel estructural, se registran fallas y fracturas locales que facilitan la circulación del agua y generan heterogeneidades en el acuífero (INGEMMET, 2022).

Características geomorfológicas

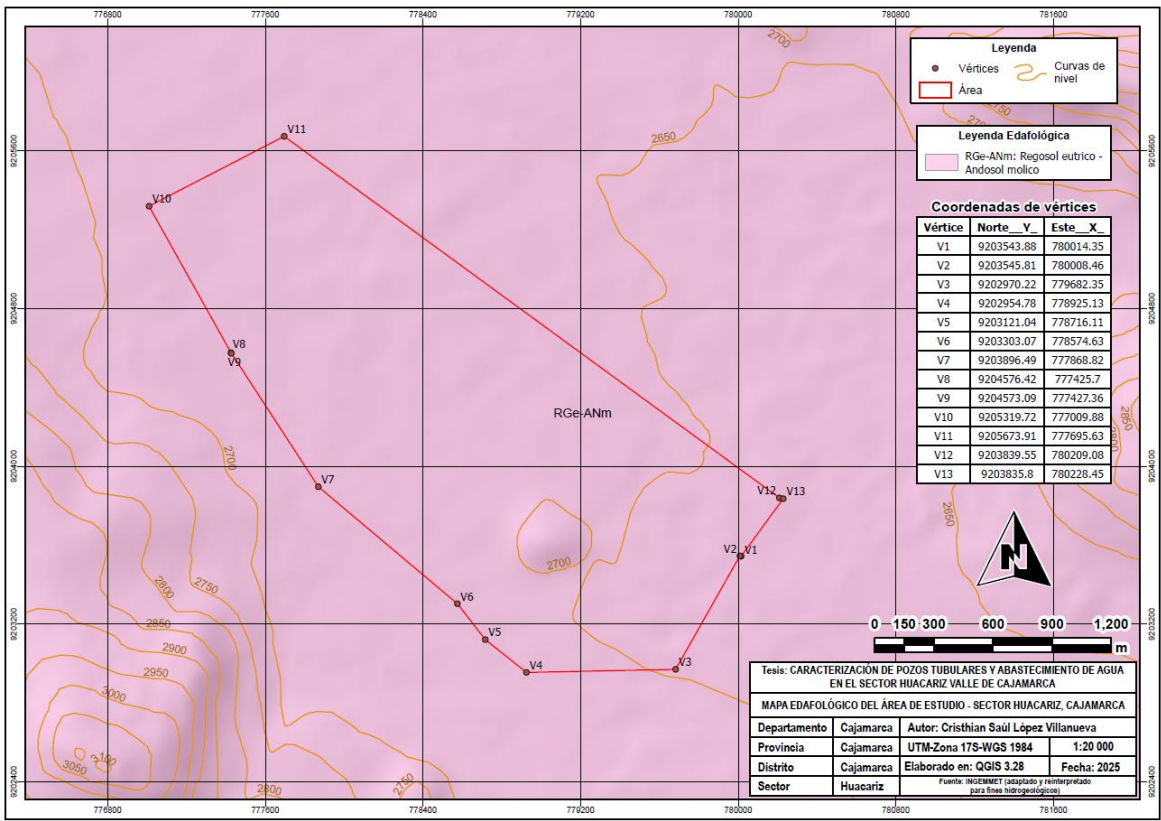
El área forma parte del valle de Cajamarca, un relieve interandino caracterizado por una topografía suavemente ondulada y terrazas fluviales. La pendiente media es menor al 5

%, lo que permite un uso intensivo para actividades agrícolas y urbanas. Los procesos geomorfológicos dominantes incluyen erosión fluvial y acumulación de sedimentos en abanicos aluviales, los cuales condicionan la recarga subterránea y la distribución de la permeabilidad en el subsuelo.

Características edafológicas

Los suelos predominantes son de textura franco-arenosa a franco-arcillosa, con buena capacidad de infiltración en los sectores de terrazas y menor permeabilidad en los depósitos finos. Presentan contenidos variables de materia orgánica, con pH ligeramente ácido a neutro, y su uso principal es agrícola. La capacidad de infiltración está directamente relacionada con la recarga del acuífero y condiciona la disponibilidad de agua para pozos tubulares (MINAGRI, 2021).

Figura 3
Mapa edafológico de la zona de estudio



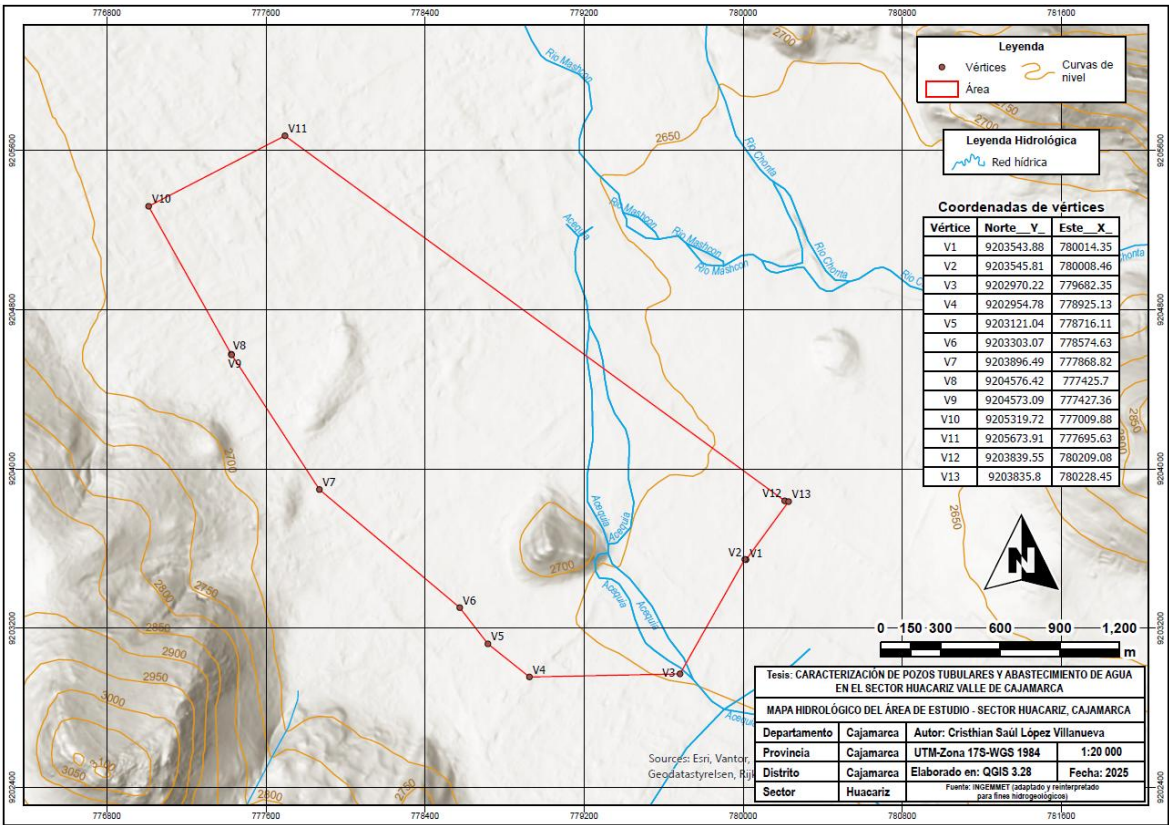
Nota. Mapa edafológico de la zona de estudio con delimitación del polígono de análisis. Elaboración propia con base en cartografía del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2021).

3.4 Características hidrológicas e hidrogeológicas

El sistema hídrico superficial está dominado por el río Mashcón y pequeñas quebradas estacionales que drenan hacia el valle de Cajamarca. El acuífero de Huacariz es del tipo confinado, con comportamiento transitorio, alimentado principalmente por infiltración de aguas meteóricas y filtraciones laterales desde formaciones permeables. Estudios previos estiman transmisividades entre 10^{-3} y 10^{-2} m²s⁻¹ y coeficientes de almacenamiento de 10^{-4} a 10^{-3} , lo cual confirma su potencial para el abastecimiento urbano y agrícola (Torres et al., 2020).

Figura 4

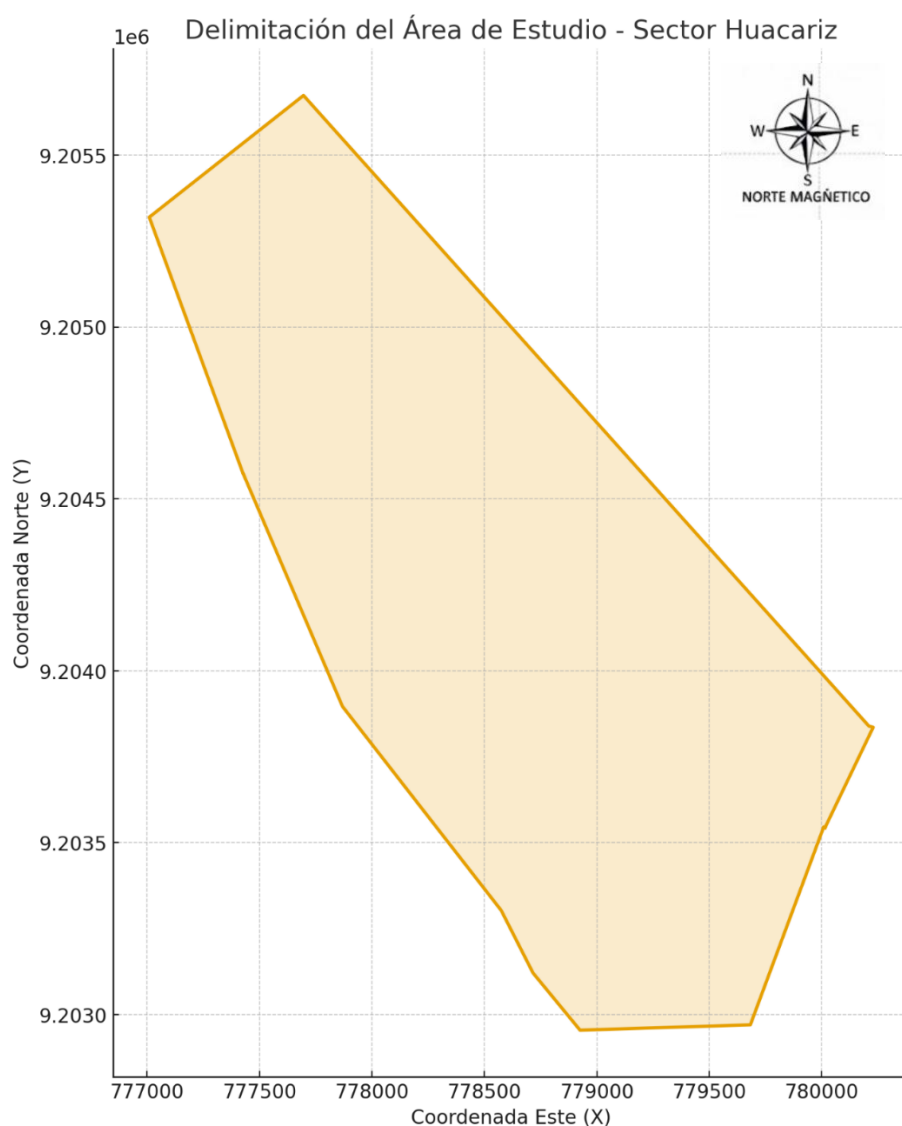
Mapa hidrológico de la zona de estudio



Nota. Mapa hidrológico de la zona de estudio que muestra la red de drenaje superficial. Elaboración propia con base en cartografía oficial del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2021).

Figura 5

Delimitación del área de estudio



Nota. Representación gráfica de la delimitación del área de estudio en el sector Huacariz, expresada en coordenadas UTM (zona 17S, WGS 84). Elaboración propia.

El área de estudio corresponde al sector Huacariz, ubicado en el distrito y provincia de Cajamarca, departamento de Cajamarca. La delimitación se realizó mediante trece (13) vértices georreferenciados, definidos a partir de coordenadas UTM en el datum WGS 84, zona 17S. El polígono delimitado presenta una superficie aproximada de 4.12 km y un perímetro de 8.87 km, valores obtenidos mediante el procesamiento cartográfico en un sistema de información geográfica (QGIS 3.28). La delimitación espacial del área de estudio permitió establecer un marco territorial preciso para el análisis hidrogeológico, la zonificación de aptitud y la propuesta de diseño de pozos tubulares.

3.5 Aspectos socioeconómicos

La zona de Huacariz combina usos residenciales con actividades agropecuarias. El crecimiento poblacional de Cajamarca ha incrementado la presión sobre los recursos hídricos subterráneos, siendo los pozos tubulares una alternativa creciente frente a la limitada cobertura de agua potable por red pública. Esta situación demanda un manejo técnico adecuado del acuífero para evitar problemas de sobreexplotación y deterioro de la calidad del agua.

3.6 Materiales y Equipos

3.6.1 Materiales

En esta investigación se consideran los siguientes materiales:

1. **Cartografía base:** mapas topográficos, geológicos, hidrológicos y edafológicos obtenidos de INGEMMET, ANA, INEI y SENAMHI.
2. **Muestras de suelo:** recolectadas a partir de calicatas representativas en la zona de estudio, preparadas y conservadas según normas ASTM D6913/D6913M.

3. **Muestras de agua subterránea:** obtenidas en los pozos tubulares en explotación y en calicatas poco profundas, almacenadas en envases estandarizados de polietileno para su posterior análisis fisicoquímico y microbiológico.
4. **Software especializado:** QGIS para procesamiento de cartografía, Excel para tratamiento de datos,

3.6.2 Equipos

A. Herramientas manuales, consistentes en pico, pala y cinta métrica, utilizadas para la excavación de calicatas y medición de profundidades en campo.

B. Sistema de posicionamiento global (GPS) de mano, marca Garmin, modelo eTrex 30x (o equivalente), con precisión aproximada de ± 3 m, empleado para la georreferenciación de calicatas, pozos y puntos de muestreo.

C. Bomba de muestreo de agua subterránea, tipo sumergible portátil, marca Grundfos, modelo MP1 (o equivalente), fabricada en acero inoxidable, con capacidad de operación en pozos de pequeño diámetro y caudales controlados. Este equipo permitió la purga previa del pozo y la recolección de muestras representativas, conforme a protocolos de muestreo de calidad de agua.

D. Equipo de granulometría, conformado por un juego de tamices normalizados conforme a la norma ASTM D6913/D6913M, incluyendo la serie: 3", 2", 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", N.º 4, N.º 10, N.º 20, N.º 40, N.º 60, N.º 100 y N.º 200, con sus respectivas aberturas estandarizadas. Se utilizó un agitador mecánico marca Gilson, modelo SS-15 (o equivalente), que garantiza una separación uniforme de partículas. El sistema incluyó tapa superior y bandeja inferior para evitar pérdidas de material durante el ensayo.

E. Equipo para la determinación de límites de Atterberg, compuesto por dispositivo de Casagrande marca Humboldt, modelo H-4140 (o equivalente), empleado para la determinación del límite líquido, así como accesorios complementarios para el límite plástico.

F. Balanzas de laboratorio, incluyendo una balanza analítica marca Ohaus, modelo Pioneer (o equivalente), con precisión de 0.01 g, y una balanza de precisión marca Ohaus, modelo Scout (o equivalente), utilizadas para la determinación de masas en los ensayos de laboratorio.

G. Estufa de secado, marca Memmert, modelo UN55 (o equivalente), con rango de operación de hasta 250 °C, utilizada para la determinación del contenido de humedad de las muestras de suelo conforme a procedimientos estandarizados.

3.7 Metodología

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, de tipo **aplicada** y nivel descriptivo–explicativo, debido a que se basa en la recolección y análisis de datos numéricos obtenidos a partir de ensayos de campo y laboratorio, así como en la estimación de parámetros hidrogeológicos del acuífero. Asimismo, tiene como finalidad proponer soluciones técnicas para el diseño y ubicación de pozos tubulares en el sector Huacariz, orientadas al abastecimiento sostenible de agua subterránea.

La investigación se desarrolló en el sector Huacariz, ubicado en el valle de Cajamarca, perteneciente a la cuenca del río Mashcón, afluente del río Cajamarquino. La zona de estudio se encuentra en la parte media de la cuenca, caracterizada por un clima templado subhúmedo, con una marcada estacionalidad en las precipitaciones. La información climática e

hidrológica fue recopilada de las estaciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2024) y de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2023).

Para el análisis geológico e hidrogeológico se recurrió a información cartográfica del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2023), así como a estudios de exploración previos en el valle de Cajamarca. Asimismo, se realizaron calicatas y muestreos de suelos en campo, procesados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional Autónoma de Chota, con el fin de determinar propiedades geotécnicas (granulometría, límites de Atterberg, gravedad específica) que sirvieron para estimar parámetros hidrogeológicos como la porosidad efectiva y la permeabilidad.

En cuanto al análisis de la calidad del agua subterránea, se efectuó un programa de muestreo en pozos existentes, seleccionados en función de su accesibilidad y representatividad espacial. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio regional del agua Cajamarca siguiendo metodologías estandarizadas de la American Public Health Association (APHA, 2022), considerando parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, dureza, nitratos y sulfatos) y microbiológicos (coliformes totales y *Escherichia coli*).

Los resultados obtenidos fueron comparados con los Estándares de Calidad Ambiental para Agua establecidos en el Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM (Categoría 1A), con el fin de evaluar la aptitud del recurso para abastecimiento poblacional previo tratamiento. No se realizó comparación con normas de potabilidad directa, dado que la presencia de contaminación microbiológica descarta el consumo sin tratamiento.

La determinación de los parámetros hidrogeológicos se realizó mediante métodos indirectos. La porosidad efectiva se estimó a partir de la relación entre el índice de vacíos y el factor de

tortuosidad, utilizando la formulación basada en la ecuación de Kozeny–Carman (Ren et al., 2020). La permeabilidad se calculó igualmente con base en este modelo y contrastada con correlaciones granulométricas (Bear, 2021). La transmisividad se determinó mediante la expresión $T=Kb$, considerando el coeficiente de permeabilidad y el espesor saturado del acuífero (Custodio & Llamas, 2020). Finalmente, el coeficiente de almacenamiento (S) se calculó en función de la compresibilidad del acuífero y del agua, aplicando criterios de hidrogeología clásica adaptados a sistemas confinados (Freeze & Cherry, 2019).

Dada la condición de acuífero confinado en el sector Huacariz, la evaluación de la respuesta del acuífero se realizó a través de la aplicación del método de Theis (1935), complementado con simulaciones numéricas que permiten analizar el comportamiento en régimen transitorio. Esta metodología resulta adecuada cuando no se cuenta con la posibilidad de ejecutar pruebas de bombeo de gran escala, pero se dispone de información geotécnica e hidrogeológica de campo.

En la etapa de diseño técnico de pozos tubulares, se propuso una metodología basada en la integración de criterios hidrogeológicos, geotécnicos y de calidad de agua. El diseño contempló la selección de zonas de mayor potencial hídrico, la estimación del radio de influencia de los pozos y la propuesta de especificaciones constructivas (diámetro, profundidad, entubado y filtros), tomando como referencia manuales internacionales (Driscoll, 2020) y experiencias regionales.

De esta manera, la metodología integra aspectos geológicos, hidrogeológicos y de calidad de agua, asegurando un análisis integral y multidisciplinario, que permitirá caracterizar adecuadamente los pozos tubulares y el abastecimiento de agua en el sector Huacariz, bajo criterios de rigor científico.

La metodología empleada en la presente investigación se estructuró en seis etapas secuenciales: (i) recopilación y análisis de información secundaria (fase de gabinete); (ii) reconocimiento y trabajo de campo en la zona de estudio; (iii) ejecución y análisis de ensayos de laboratorio de mecánica de suelos y calidad de agua; (iv) estimación de parámetros hidrogeológicos del acuífero, tales como permeabilidad, transmisividad y porosidad efectiva; (v) aplicación de modelos teóricos de flujo subterráneo para la estimación del radio de influencia y el espaciamiento preliminar de pozos; y (vi) formulación de una propuesta técnica de diseño preliminar de pozos tubulares.

Esta secuencia metodológica permitió desarrollar un análisis descriptivo, técnico y aplicado, coherente con los objetivos de la investigación y adecuado para la caracterización hidrogeológica y el planteamiento de soluciones de abastecimiento de agua subterránea en el sector Huacariz.

3.8 Etapa preliminar de gabinete

En esta fase se realizó la recopilación y análisis de información secundaria. Se revisaron investigaciones previas sobre hidrogeología, geotecnia y calidad de agua en la región de Cajamarca, así como manuales técnicos y normativa vigente. La cartografía geológica, geomorfológica, edafológica e hidrológica fue obtenida de fuentes oficiales, como el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2023), la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2023), el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI, 2024) y el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2023).

Asimismo, se emplearon imágenes satelitales y modelos digitales de elevación descargados del GeoServidor del MINAM y procesados en QGIS, para delimitar el área de estudio y

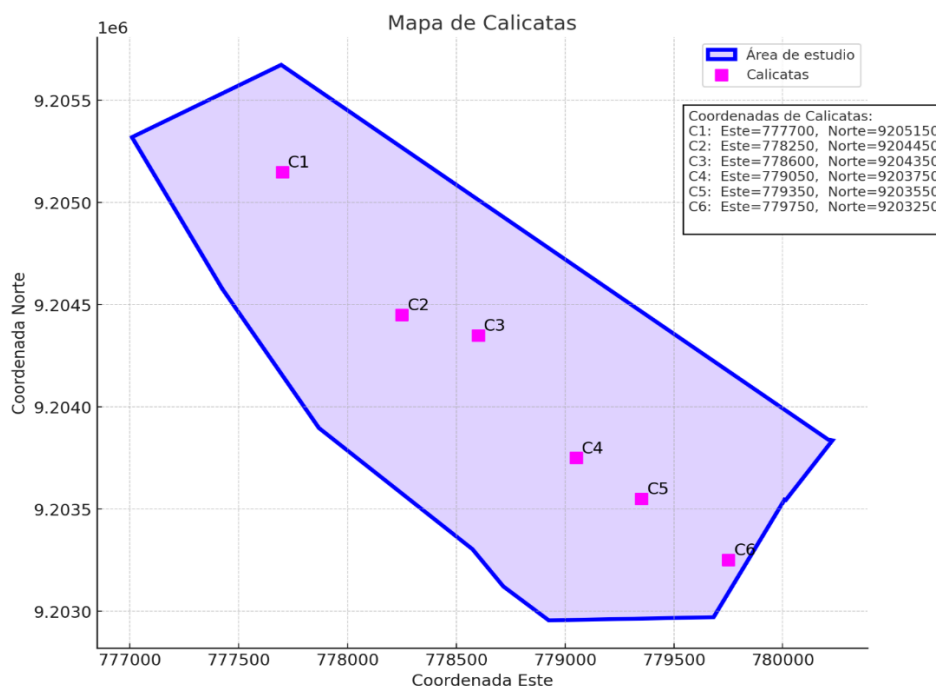
planificar las actividades de campo. Esta etapa permitió definir la ubicación de calicatas, puntos de muestreo de agua y pozos a evaluar.

3.9 Etapa de visita a la zona de estudio

La fase de campo tuvo como propósito levantar información directa del sector Huacariz. Se realizaron recorridos de reconocimiento geológico e hidrogeológico, con énfasis en la identificación de unidades litológicas y evidencias de recarga y descarga de acuíferos. Se ejecutaron calicatas de exploración en suelos representativos, con extracción de muestras alteradas e inalteradas para análisis en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional Autónoma de Chota.

Figura 6

Mapa de calicatas en la zona de estudio

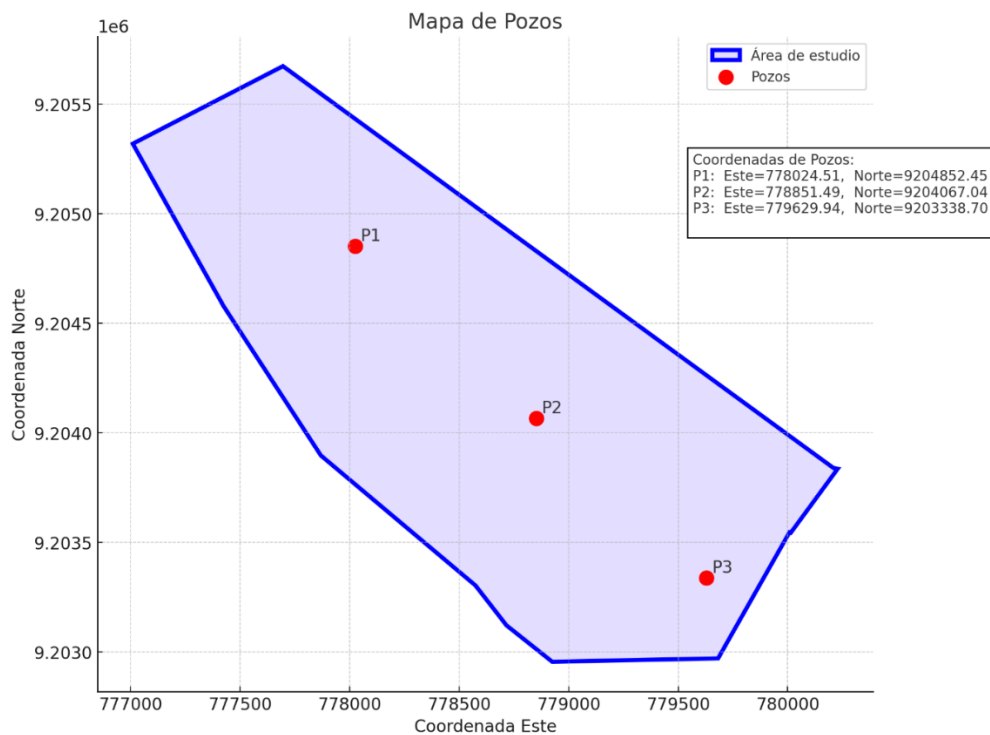


Nota. Mapa que muestra la ubicación espacial de las calicatas realizadas dentro del área de estudio, expresadas en coordenadas UTM (zona 17S, WGS 84). Elaboración propia.

Asimismo, se recolectaron muestras de agua subterránea en pozos representativos, siguiendo protocolos de muestreo de la American Public Health Association (APHA, 2022), para su posterior análisis en laboratorio.

Figura 7

Mapa de pozos muestreados en la zona de estudio



Nota. Mapa que muestra la ubicación espacial de los pozos muestreados dentro del área de estudio, expresados en coordenadas UTM (zona 17S, WGS 84). Elaboración propia.

3.10 Etapa de análisis de laboratorio

En esta fase se procesaron las muestras de suelos y agua.

3.10.1 Ensayos de mecánica de suelos: Los ensayos de laboratorio se realizaron siguiendo normas técnicas ASTM, con el fin de garantizar la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados.

El análisis granulométrico por tamizado se efectuó conforme a la norma ASTM D6913/D6913M, empleando una serie de tamices normalizados que permiten determinar la distribución de tamaños de partículas en suelos granulares.

La determinación de los límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico) se realizó según la norma ASTM D4318, con el objetivo de evaluar la plasticidad del suelo y su comportamiento frente a cambios en el contenido de humedad.

La gravedad específica de los sólidos se determinó conforme a la norma ASTM D854, mientras que el contenido de humedad natural se obtuvo mediante la norma ASTM D2216.

Estos ensayos permitieron clasificar los suelos de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y establecer parámetros fundamentales para la estimación de propiedades hidrogeológicas, tales como la porosidad y la conductividad hidráulica (Das & Sivakugan, 2021).

Los resultados granulométricos se expresaron mediante rangos porcentuales, considerando la variabilidad lateral y vertical característica de los depósitos aluviales y coluviales. Este enfoque permite una representación más adecuada del comportamiento del medio poroso, evitando la sobreinterpretación de valores puntuales.

3.10.2 Ensayos de agua subterránea: El análisis de la calidad del agua subterránea se realizó a partir de un programa de muestreo en pozos existentes del sector Huacariz, seleccionados en función de su representatividad espacial y condiciones de acceso.

Las muestras fueron recolectadas, preservadas y analizadas en el Laboratorio Regional del Agua de Cajamarca, siguiendo los procedimientos establecidos en *Standard Methods for the*

Examination of Water and Wastewater de la American Public Health Association (2022), garantizando la calidad analítica de los resultados.

Para la determinación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos se emplearon métodos estandarizados, entre los que destacan: pH mediante el método electrométrico (4500-H⁺ B), conductividad eléctrica (2510 B), sólidos disueltos totales (2540 C), dureza total (2340 C), sulfatos (4500-SO₄²⁻ E), cloruros (4500-Cl⁻ B) y nitratos (4500-NO₃⁻ B). Asimismo, el análisis microbiológico de coliformes totales y *Escherichia coli* se realizó mediante el método de fermentación en tubos múltiples (9221 B y 9221 E), indicadores de contaminación biológica.

Los resultados obtenidos fueron contrastados con los Estándares de Calidad Ambiental para Agua establecidos en el Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM, Categoría 1: poblacional y recreacional, con fines de evaluación ambiental e hidrogeológica. No se consideró la potabilidad directa, debido a la presencia de contaminación microbiológica que requiere tratamiento previo.

3.11 Etapa de análisis de parámetros hidrogeológicos

La caracterización hidrogeológica del acuífero se efectuó mediante métodos indirectos basados en la integración de datos de laboratorio y modelos teóricos:

3.11.1 Porosidad efectiva (n_e): calculada a partir del índice de vacíos, utilizando la formulación derivada de la ecuación de Kozeny–Carman (Ren et al., 2020).

3.11.2 Permeabilidad (k): estimada a través de la ecuación de Kozeny–Carman y correlaciones granulométricas, siguiendo criterios de Bear (2021).

3.11.3 Transmisividad (T): determinada con la relación $T=K b$, considerando el coeficiente de permeabilidad y el espesor saturado del acuífero (Custodio & Llamas, 2020).

3.11.4 Coeficiente de almacenamiento (S): estimado teóricamente para acuíferos confinados, considerando la compresibilidad del agua y del acuífero (Freeze & Cherry, 2019).

Dado que el acuífero del sector Huacariz presenta condición confinada y régimen transitorio, se aplicó el método de Theis (1935) como modelo teórico de análisis de pruebas de bombeo, permitiendo simular la respuesta del acuífero ante la explotación.

3.12 Etapa de integración y diseño de pozos tubulares

En esta etapa se desarrolló la propuesta técnica para el diseño de pozos tubulares en el área de estudio, a partir de la integración de información geológica, hidrogeológica y de calidad de agua. La selección de los sitios de emplazamiento se fundamentó en el análisis conjunto de estos criterios, con la finalidad de optimizar la captación del recurso subterráneo y minimizar posibles impactos negativos sobre el acuífero.

El diseño técnico de los pozos incluyó la determinación del diámetro y la profundidad adecuados, considerando las características hidráulicas del acuífero y los requerimientos de explotación. Asimismo, se definió la tipología del entubado y de los filtros, atendiendo a la granulometría del material acuífero y a la necesidad de garantizar la estabilidad estructural del pozo y la protección frente a la entrada de finos. Adicionalmente, se estimó el radio de influencia de los pozos con el propósito de evaluar la interacción hidráulica entre captaciones y prevenir interferencias durante la operación.

La metodología de diseño se sustentó en manuales técnicos especializados y en experiencias documentadas en proyectos regionales de abastecimiento de agua subterránea, tomando como referencia los lineamientos propuestos por Driscoll (2020).

3.13 Zonificación de áreas potenciales para la perforación de pozos tubulares

La identificación de zonas con mayor potencial para la perforación de pozos tubulares en el sector Huacariz se realizó mediante un enfoque integrado de información geológica, hidrogeológica y de calidad de agua, siguiendo lineamientos metodológicos recomendados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2023) y la International Association of Hydrogeologists (IAH, 2021).

El proceso metodológico incluyó las siguientes etapas:

1. **Integración cartográfica:** se elaboraron mapas temáticos de geología, geomorfología, edafología e hidrología en un entorno SIG (QGIS 3.28). Esta información permitió identificar unidades litológicas permeables (areniscas, gravas) y zonas favorables para la recarga.
2. **Análisis de pozos existentes:** se incorporaron los datos de ubicación, profundidad, niveles piezométricos y caudales explotados de los pozos previamente registrados en el área, lo que permitió definir áreas de alta productividad.
3. **Evaluación de parámetros hidrogeológicos:** a partir de los cálculos de porosidad, permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento, se determinaron las zonas con mejores condiciones para el desarrollo de pozos de abastecimiento.
4. **Análisis de calidad de agua:** se superpusieron los resultados de laboratorio con los mapas hidrogeológicos para descartar zonas con presencia de contaminantes químicos o microbiológicos que pudieran comprometer la potabilidad.
5. **Zonificación y priorización:** mediante análisis multicriterio (ponderación de parámetros hidrogeológicos, geológicos y de calidad de agua), se generó un mapa de aptitud que clasificó el sector Huacariz en categorías: alta, media y baja potencialidad para la perforación de pozos tubulares.

3.13.1 Definición del esquema de ponderación

Para la jerarquización de áreas se aplicó un análisis multicriterio con ponderación relativa de los principales factores hidrogeológicos y geotécnicos, con fines comparativos y de planificación preliminar. La asignación de pesos se fundamentó en criterios técnicos empleados en estudios de selección de emplazamientos para captaciones subterráneas, donde la transmisividad es reconocida como el parámetro de mayor incidencia en la productividad hidráulica del acuífero, seguida por la calidad del agua y las propiedades del medio poroso (Driscoll, 2020; ANA, 2023).

Los pesos relativos considerados fueron los siguientes:

Transmisividad (T): 40 %

Calidad del agua (microbiología y metales): 25 %

Porosidad efectiva (n_e): 20 %

Condiciones geotécnicas (textura y contenido de finos): 15 %

La mayor ponderación asignada a la transmisividad responde a su influencia directa en la capacidad de producción del pozo y en la sostenibilidad de la explotación a mediano plazo. La calidad del agua fue considerada como segundo factor en importancia debido a su incidencia en la viabilidad sanitaria del recurso. La porosidad efectiva y las condiciones geotécnicas fueron incorporadas como variables complementarias que influyen tanto en la circulación del flujo subterráneo como en la estabilidad constructiva del pozo.

El esquema adoptado no corresponde a una validación estadística poblacional, sino a un procedimiento técnico estructurado para análisis comparativo dentro del área de estudio. Su finalidad es establecer una jerarquización preliminar de aptitud hidrogeológica, coherente

con enfoques de planificación hidrogeológica utilizados en la evaluación preliminar de captaciones subterráneas.

El procedimiento se apoyó en criterios técnicos descritos por Driscoll (2020) y en enfoques de planificación hidrogeológica aplicados en contextos latinoamericanos (Vega et al., 2022; Morales & Ortega, 2023).

3.14 Diseño técnico de pozos tubulares

El diseño de los pozos tubulares propuestos para el sector Huacariz se fundamentó en criterios geotécnicos, hidrogeológicos y de calidad de agua, con el fin de garantizar una explotación sostenible y segura del acuífero. Para ello se siguieron las recomendaciones de la American Water Works Association (AWWA, 2019), el manual de Driscoll (2020) y la normativa nacional vigente (ANA, 2023).

El proceso metodológico comprendió las siguientes fases:

1. **Determinación de profundidad y diámetro:** se definió la profundidad de perforación en función del espesor saturado, información hidrogeológica y de la capacidad de producción esperada. El diámetro del pozo se calculó considerando el caudal de diseño y las especificaciones de las bombas a instalar.
2. **Selección de entubado y filtros:** se proyectaron columnas de entubado de acero y PVC de alta resistencia, con ranuras calibradas para cada tipo de material de la formación. Los filtros fueron seleccionados con base en la granulometría obtenida en los ensayos de laboratorio, aplicando el criterio de la curva de retención del 40 % (Driscoll, 2020).
3. **Definición del radio de influencia:** se calculó el radio de influencia teórico de los pozos a partir de la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento del acuífero,

considerando condiciones de régimen transitorio (Theis, 1935; Ren et al., 2020). Este parámetro permitió estimar el espaciamiento mínimo recomendado entre pozos para evitar interferencias hidráulicas.

4. **Diseño de ademe y grava de empaque:** se seleccionó grava silícea lavada, con granulometría compatible con los filtros y el suelo circundante, a fin de optimizar la eficiencia hidráulica del pozo y reducir el arrastre de finos.
5. **Especificaciones de desarrollo y aforo:** se incluyó la etapa de desarrollo del pozo mediante bombeo escalonado y lavado con aire comprimido, así como la realización de aforos para determinar el caudal específico y la eficiencia hidráulica.
6. **Estimación de vida útil y mantenimiento:** se incorporaron recomendaciones de mantenimiento preventivo basadas en la normativa de operación de pozos de abastecimiento (AWWA, 2019), incluyendo inspecciones periódicas, control de niveles piezométricos y análisis de calidad del agua.

El diseño resultante constituye una propuesta técnica adaptada a las condiciones hidrogeológicas del sector Huacariz, orientada a optimizar la explotación sostenible del recurso hídrico subterráneo.

CAPÍTULO IV

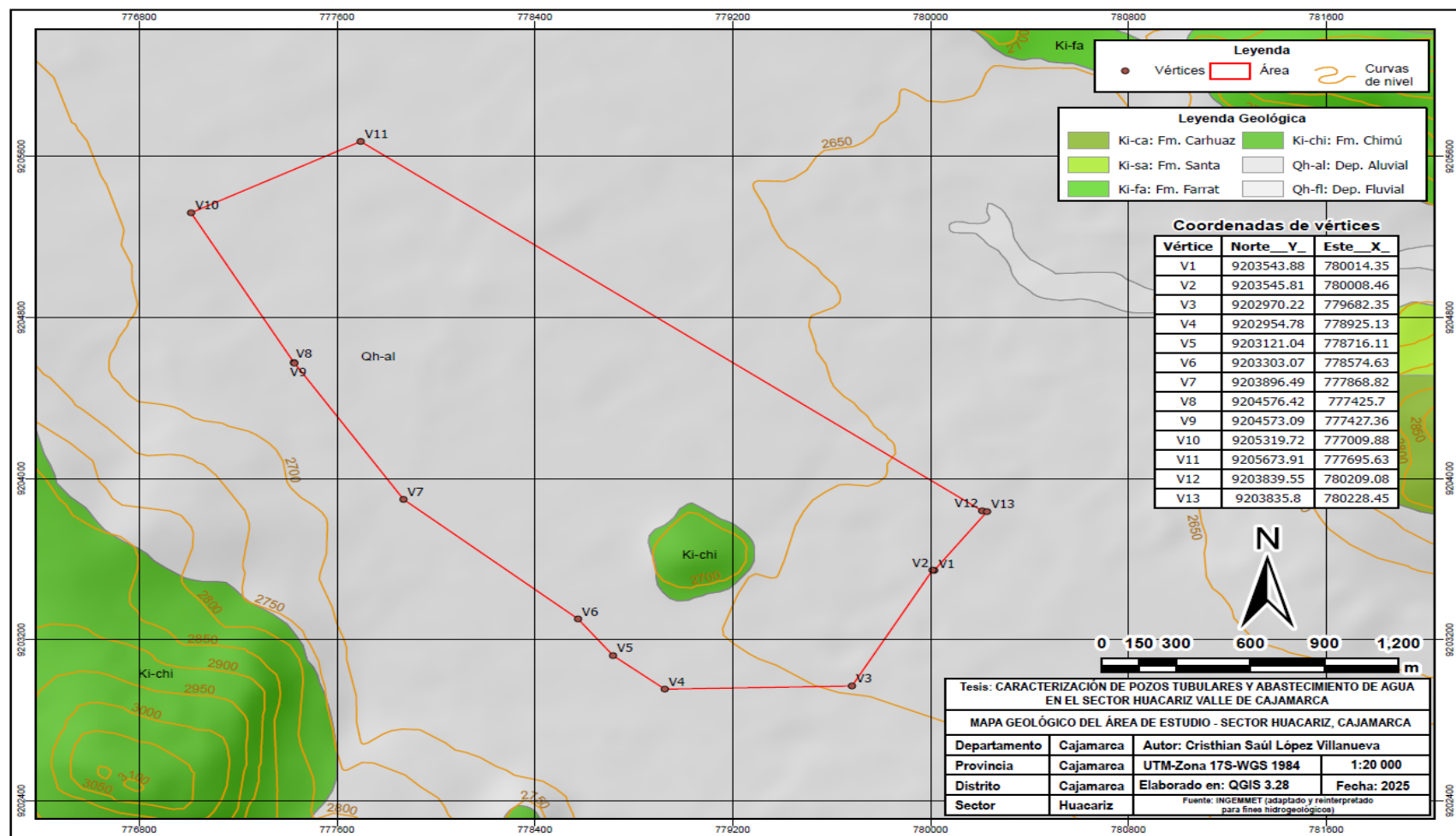
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan y discuten los resultados de campo y laboratorio: (i) caracterización geotécnica a partir de seis calicatas; (ii) parámetros hidráulicos estimados (porosidad, permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento); (iii) evaluación de la calidad del agua subterránea; y (iv) aplicación teórica del método de Theis para estimar radios de influencia y apoyar el diseño de pozos tubulares en tres zonas del sector Huacariz.

4.1 Caracterización geotécnica de la zona de estudio

El mapa geológico muestra el predominio de depósitos aluviales y fluviales cuaternarios (Qh-al y Qh-fl) dentro del área de estudio, los cuales corresponden a materiales no consolidados de naturaleza granular, favorables para el desarrollo de acuíferos porosos. En los bordes del área se identifican afloramientos de formaciones sedimentarias como Chimú, Farrat y Santa, que actúan como unidades de menor permeabilidad relativa. Esta configuración geológica sustenta la presencia de un acuífero granular poco profundo y explica la variabilidad lateral observada en las propiedades hidráulicas estimadas.

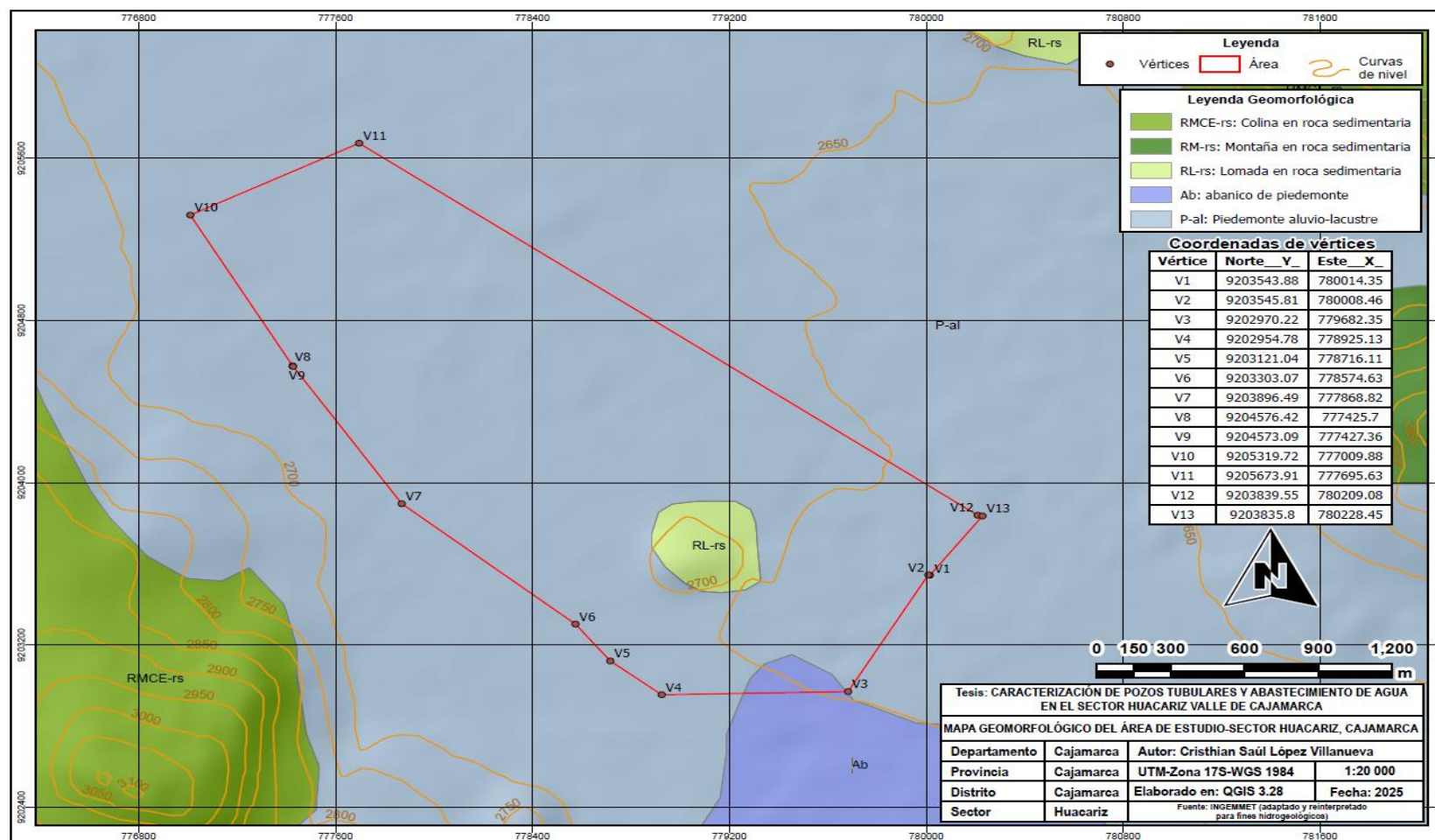
Figura 8
 Mapa geológico del área de estudio – Sector Huacariz



Nota. Mapa geológico del área de estudio. Elaboración propia a partir de cartografía de INGEMMET (2021).

Figura 9

Mapa geomorfológico del área de estudio – Sector Huacariz



Nota. Mapa geomorfológico del área de estudio. Elaboración propia a partir de cartografía de INGEMMET (2021).

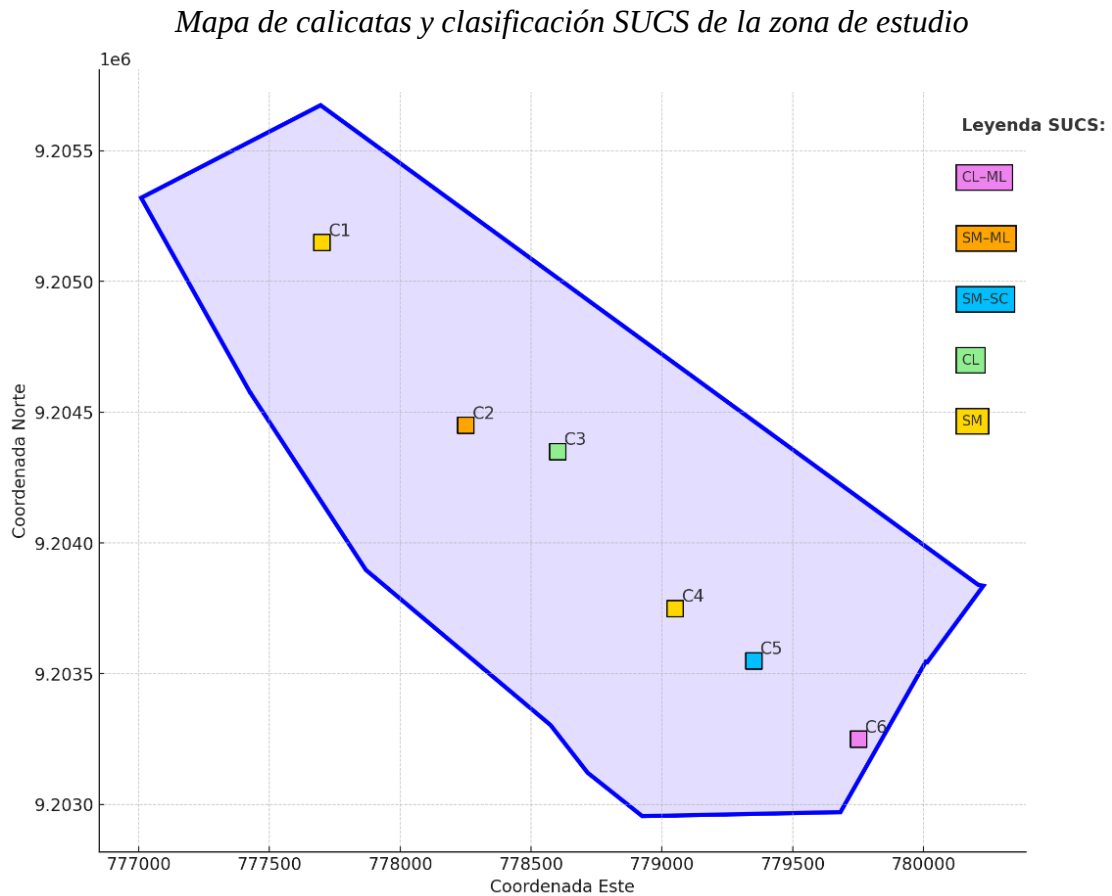
El análisis geomorfológico evidencia que el área de estudio se localiza principalmente sobre unidades de piedemonte aluvio-lacustre y colinas bajas en roca sedimentaria, asociadas a procesos de acumulación de sedimentos finos y medios. Estas formas del relieve favorecen la infiltración y el almacenamiento de agua subterránea, aunque con variaciones locales vinculadas a pendientes y presencia de finos. La geomorfología identificada es coherente con la heterogeneidad hidráulica observada entre las distintas áreas zonificadas.

4.1.1 Resultados de las calicatas (seis puntos representativos)

La figura 10 muestra la distribución espacial de las calicatas ejecutadas en el área de estudio y su clasificación geotécnica según el sistema SUCS. Sobre esta base, la Tabla 1 presenta un resumen de los resultados de laboratorio y las principales propiedades geotécnicas determinadas para cada punto de muestreo.

Figura 10

Mapa de calicatas y clasificación SUCS de la zona de estudio



Nota. Ubicación de las seis calicatas del área de estudio y su clasificación geotécnica según el sistema SUCS (UTM, zona 17S). Elaboración propia con base en cartografía de INGEMMET (2021).

Tabla 2

Resultados de ensayos de laboratorio y propiedades geotécnicas por calicata.

Calicata	Profundidad (m)	Clasificación SUCS	LL (%)	LP (%)	IP (%)	w _n (%)	G _s	ρ _d (Mg m ⁻³)	w _{opt} (%)	k (m s ⁻¹) aprox.
C-1	3.0	SM	28	16	12	14	2.67	1.86	13.2	1.2×10 ⁻⁴
C-2	3.0	SM-ML	31	18	13	16	2.65	1.84	13.8	1.1×10 ⁻⁴
C-3	3.0	CL	36	22	14	18	2.69	1.82	14.0	8.5×10 ⁻⁵
C-4	3.0	SM	25	15	10	13	2.66	1.87	12.9	1.3×10 ⁻⁴
C-5	3.0	SM-SC	27	17	10	15	2.68	1.85	13.0	1.0×10 ⁻⁴
C-6	3.0	CL-ML	38	25	13	17	2.70	1.80	14.5	7.9×10 ⁻⁵

Nota. LL = límite líquido; LP = límite plástico; IP = índice de plasticidad; w_n = contenido natural de humedad; G_s = gravedad específica de sólidos; ρ_d = densidad seca; w_{opt} = humedad óptima; k = permeabilidad estimada. La clasificación geotécnica se realizó según el sistema SUCS. Los valores de permeabilidad corresponden a estimaciones aproximadas basadas en correlaciones y ensayos disponibles.

Los resultados presentados en la Tabla 2 muestran que las seis calicatas corresponden predominantemente a materiales limo–arenosos (SM, SM–ML), con la presencia local de suelos con mayor proporción de finos (CL y CL–ML). Estos materiales presentan valores moderados de límites de consistencia y permeabilidades del orden de 10^{-4} a 10^{-5} m s⁻¹, lo que sugiere un medio poroso con buena porosidad relativa y conductividad hidráulica moderada, coherente con el comportamiento esperado de los depósitos aluviales del sector Huacariz.

4.1.2 Granulometría (síntesis)

Tabla 3

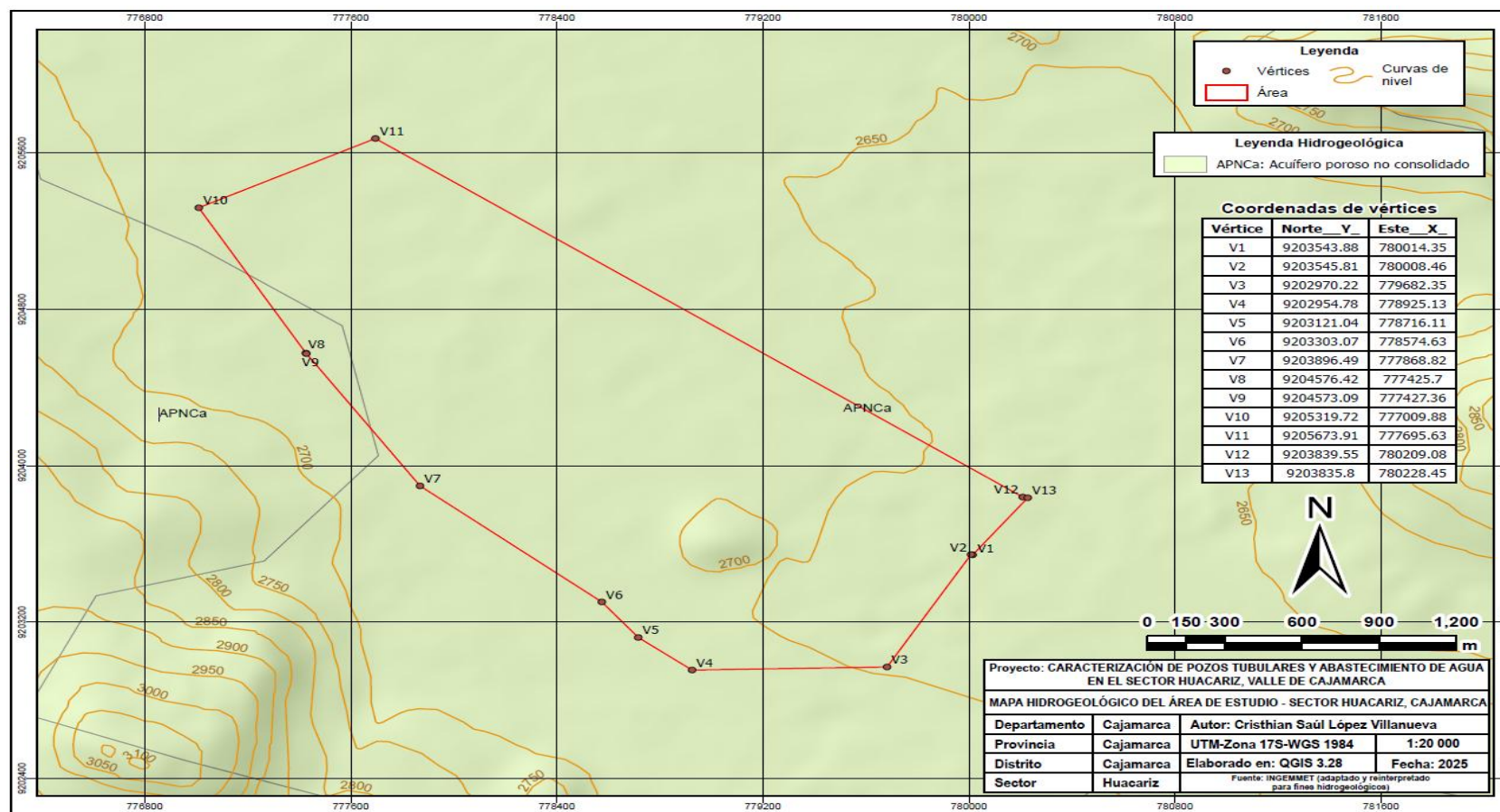
Rangos de variación de las propiedades geotécnicas determinadas en las seis calicatas.

Fracción	Rango observado (%)
Arena	20 – 40
Limo	35 – 55
Arcilla	10 – 20
Grava	< 5

Los resultados evidencian un predominio de materiales limo–arenosos, lo que confirma un medio granular heterogéneo con presencia significativa de fracciones finas. Esta condición explica la variabilidad observada en la permeabilidad entre calicatas, particularmente en aquellas con mayor contenido de limo y arcilla. Este comportamiento es consistente con lo reportado en acuíferos granulares heterogéneos, donde pequeñas variaciones granulométricas generan respuestas hidráulicas diferenciadas (López García, 2015; Rogiers, 2014).

Figura 11.

Mapa hidrogeológico del área de estudio – sector Huacariz



Nota. Mapa hidrogeológico del área de estudio. Elaboración propia a partir de cartografía de INGEMMET (2021).

El mapa hidrogeológico clasifica el área de estudio como un acuífero poroso no consolidado, desarrollado principalmente en depósitos aluviales recientes. Esta unidad presenta condiciones favorables para la explotación de agua subterránea mediante pozos tubulares, con transmisividades moderadas y porosidad efectiva significativa. La información hidrogeológica integrada constituye la base para la zonificación de aptitud y la definición de áreas prioritarias para la perforación de pozos.

4.2 Parámetros hidráulicos del acuífero de la zona de estudio

4.2.1 Porosidad total y porosidad efectiva

Se calculó la porosidad total (n) usando la relación derivada de pesos específicos (densidad seca) y gravedad específica:

$$e = \frac{G_s}{\rho_d} - 1 \quad ; \quad n = \frac{e}{1 + e}$$

(donde ρ_d es la densidad seca expresada en Mg m^{-3} ; se usa $\rho_w = 1.000 \text{ Mg m}^{-3}$, por lo que la expresión queda simplificada). Para convertir porosidad total a porosidad efectiva (n_e) se usó la fracción efectiva = $0.65 \times n$ (valor razonable para medios limo-arenosos; la fracción real puede calibrarse con ensayo de saturación o trazadores).

Tabla 4

Porosidad total y porosidad efectiva por calicata.

Calicata	G_s	$\rho_d (\text{Mg m}^{-3})$	$e = G_s/\rho_d - 1$	$n (\text{total})$	$n_e (\text{efectiva} = 0.65 \cdot n)$
C-1	2.67	1.86	0.4355	0.3035	0.197
C-2	2.65	1.84	0.4402	0.3059	0.199
C-3	2.69	1.82	0.4775	0.3230	0.210

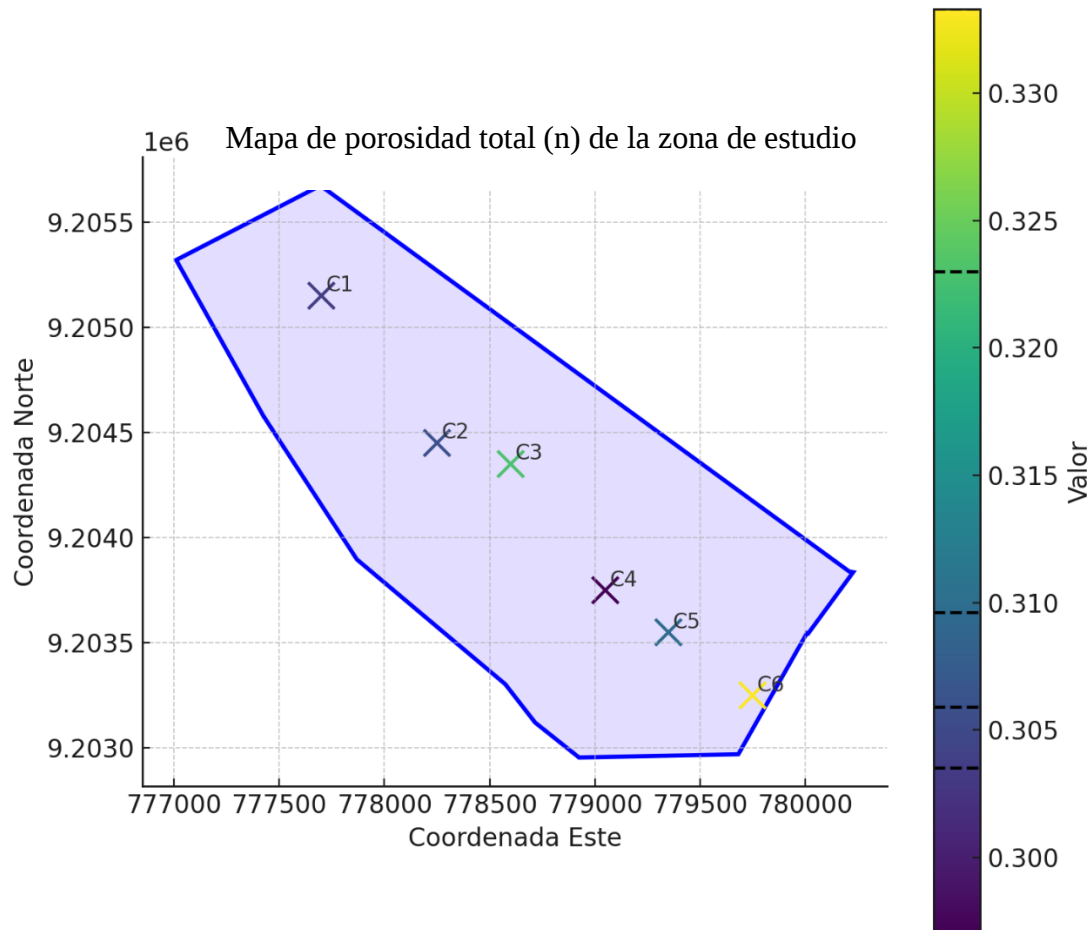
Calicata	Gs	ρ_d (Mg m⁻³)	$e = Gs/\rho_d - 1$	n (total)	n_e (efectiva = $0.65 \cdot n$)
C-4	2.66	1.87	0.4220	0.2970	0.193
C-5	2.68	1.85	0.4486	0.3096	0.201
C-6	2.70	1.80	0.5000	0.3333	0.217

Nota: Gs = gravedad específica de los sólidos; ρ_d = densidad seca; e = índice de vacíos; n = porosidad total; n_e = porosidad efectiva estimada como $0.65 \cdot n$. La densidad del agua se asumió como $\rho_w = 1.000 \text{ Mg m}^{-3}$.

Las porosidades efectivas estimadas (0.19–0.22) corresponden a valores típicos de acuíferos granulares con conectividad moderada. Sin embargo, la presencia de fracciones finas sugiere que la porosidad total no necesariamente se traduce en una mayor productividad hidráulica, ya que la conectividad de poros resulta determinante en el flujo subterráneo, tal como lo señalan Velasco y Capilla (2019) en estudios de acuíferos granulares.

Figura 12

porosidad total (n) de la zona de estudio

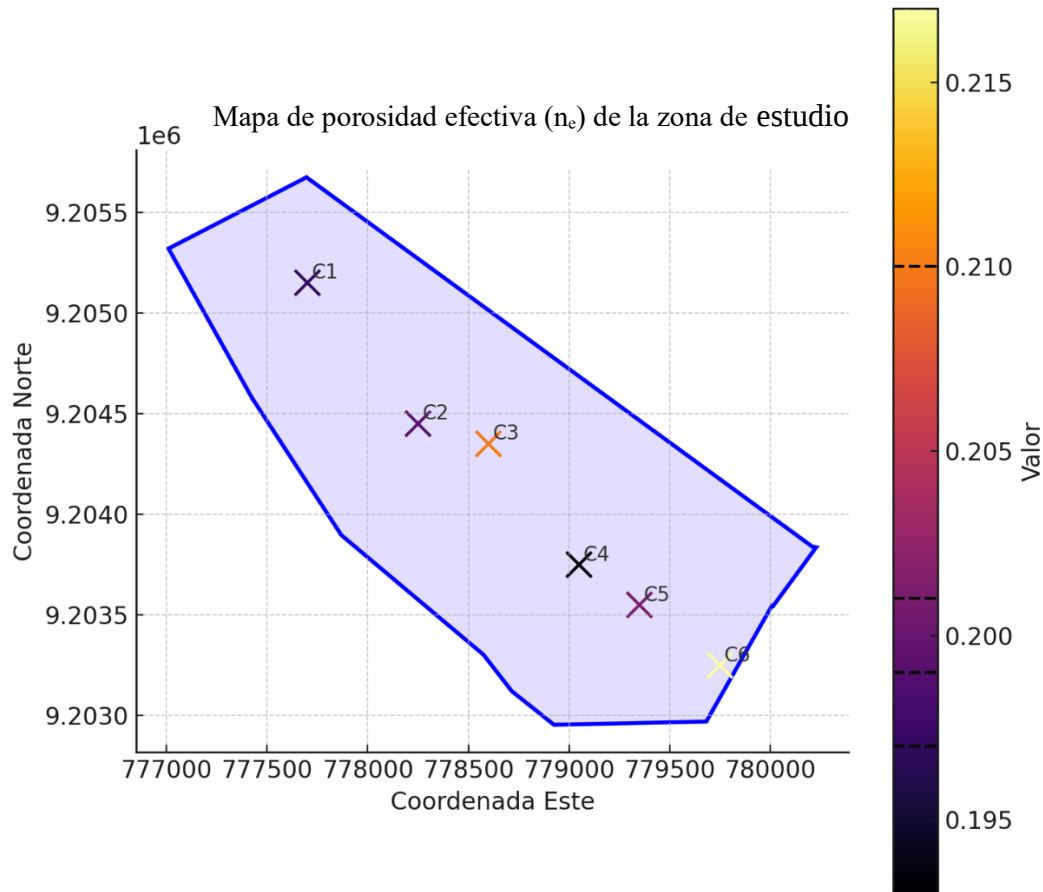


Nota. Distribución espacial de la porosidad total (n). Elaboración propia.

Este mapa presenta la distribución de la porosidad total del suelo en cada una de las calicatas evaluadas. Los valores se encuentran en el rango de 0.297 a 0.333, evidenciando un comportamiento relativamente uniforme dentro del área de estudio. No obstante, se aprecia un ligero incremento de porosidad hacia el sector sur (C6). La escala de color permite distinguir las variaciones y las líneas punteadas en la barra representan los valores medidos. Estos resultados sugieren una predominancia de materiales de granulometría fina a media con una estructura relativamente compacta.

Figura 13

Porosidad efectiva (n_e) de la zona de estudio.



Nota. Distribución espacial de la porosidad efectiva (n_e). Elaboración propia.

La figura muestra la porosidad efectiva, estimada como el 65 % de la porosidad total. Esta propiedad representa la fracción de vacíos interconectados y, por tanto, disponibles para el flujo de agua subterránea. Los valores varían entre 0.193 y 0.217, siendo mayores en C6 y menores en C4. Las líneas punteadas en la barra de colores indican los valores puntuales registrados. Este parámetro es clave desde el punto de vista hidrogeológico, ya que determina la capacidad del suelo para conducir agua en condiciones saturadas.

4.2.2 Permeabilidad y transmisividad

Se usan las permeabilidades aproximadas listadas en la Tabla 1 y se define el espesor saturado de diseño $b = 3.0$ m. La transmisividad se calcula como:

$$T = K \cdot b$$

(Custodio & Llamas, 2019).

Tabla 5

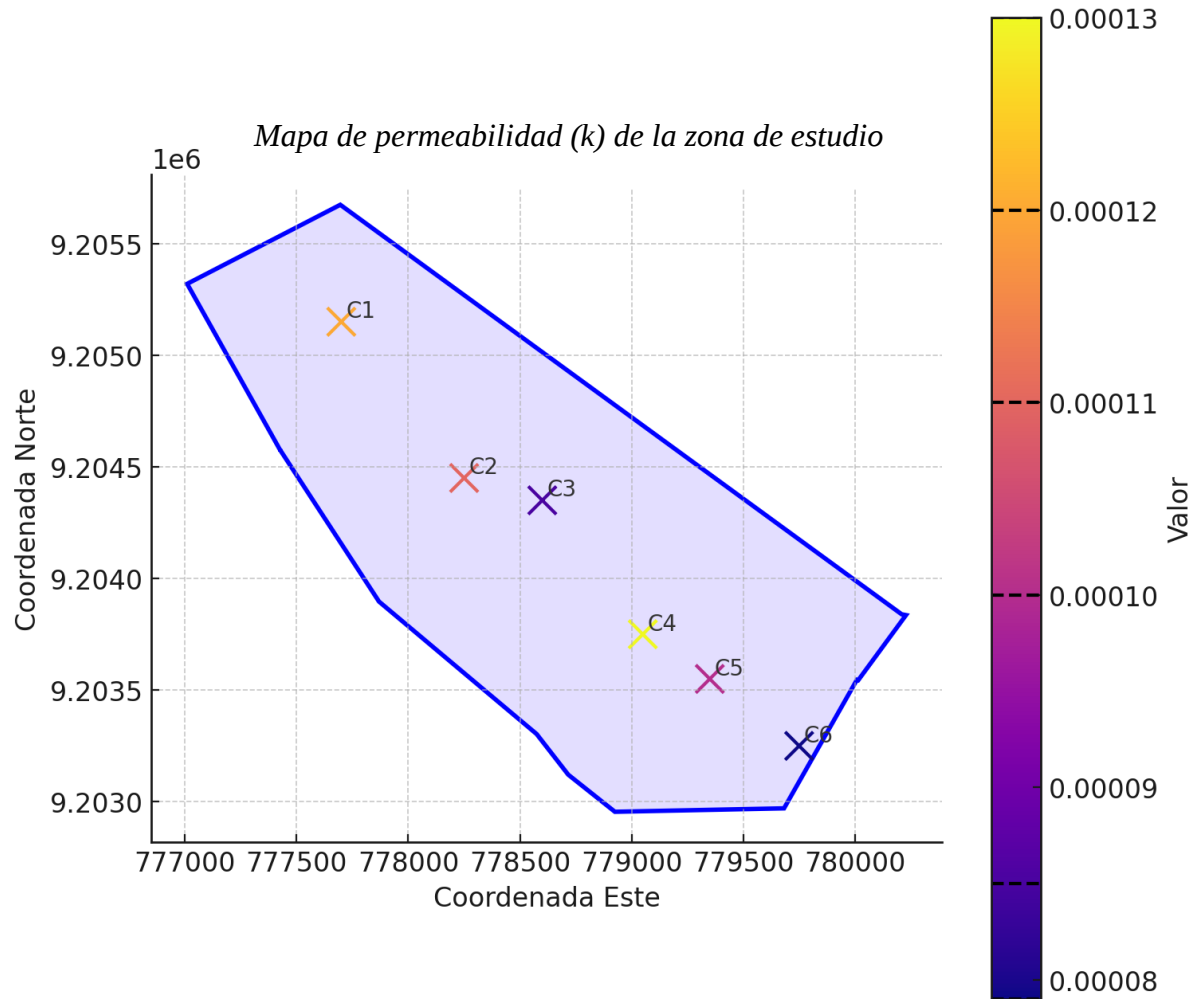
Permeabilidad (K) y transmisividad (T) por calicata (b = 3.0 m).

Calicata	K (m s ⁻¹)	T = K·b (m ² s ⁻¹)
C-1	1.20×10 ⁻⁴	3.60×10 ⁻⁴
C-2	1.10×10 ⁻⁴	3.30×10 ⁻⁴
C-3	8.5×10 ⁻⁵	2.55×10 ⁻⁴
C-4	1.30×10 ⁻⁴	3.90×10 ⁻⁴
C-5	1.00×10 ⁻⁴	3.00×10 ⁻⁴
C-6	7.9×10 ⁻⁵	2.37×10 ⁻⁴

Las transmisividades calculadas varían entre 2.37×10⁻⁴ y 3.90×10⁻⁴ m² s⁻¹, lo que corresponde a un acuífero con capacidad de transmisión moderada. Esta condición es coherente con la litología granular del sector Huacariz; sin embargo, la variabilidad espacial de estos valores evidencia una marcada heterogeneidad hidráulica, asociada a diferencias granulométricas y contenido de finos, comportamiento similar al reportado en acuíferos granulares heterogéneos (Rogiers, 2014; López García, 2015).

Figura 14

Mapa de permeabilidad (k) de la zona de estudio



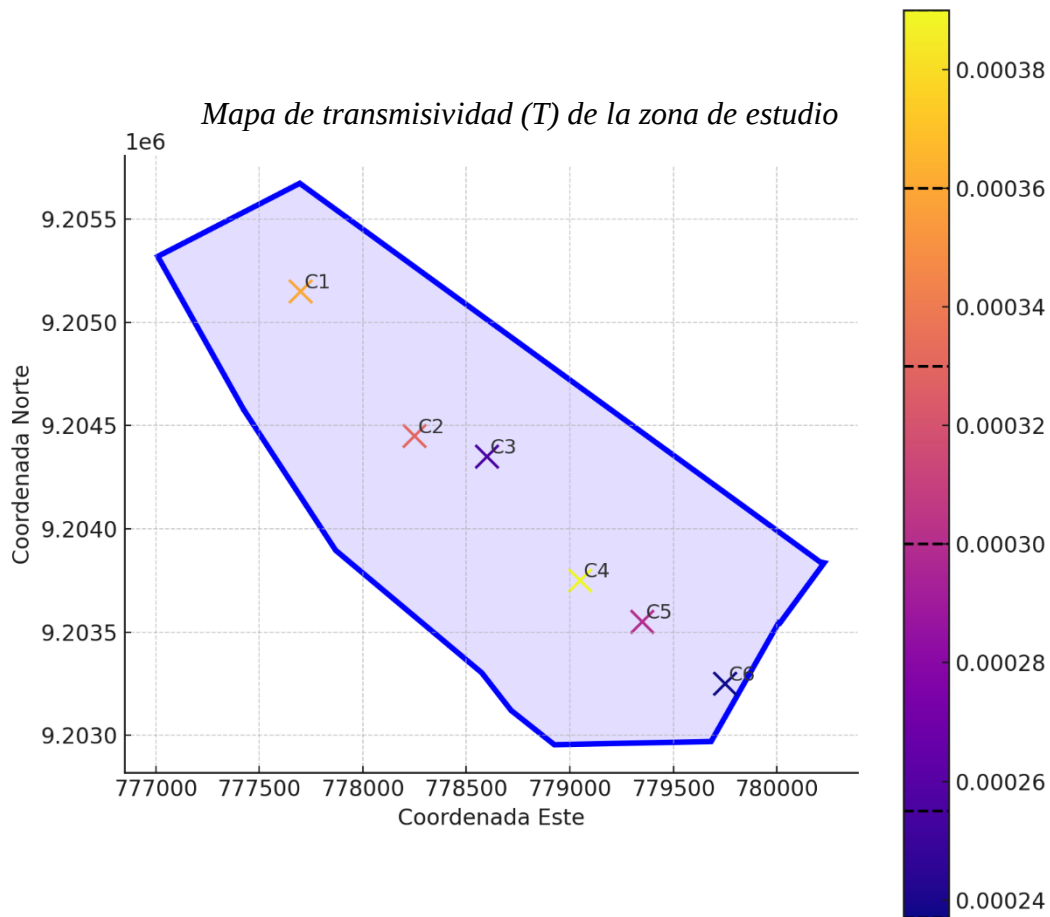
Nota. Distribución espacial de la permeabilidad (k). Elaboración propia.

La figura 14 muestra la distribución espacial de la permeabilidad hidráulica estimada en las seis calicatas del área de estudio. Los valores representan la capacidad del suelo para transmitir agua a través de sus poros, variando entre 7.9×10^{-5} y 1.3×10^{-4} m s⁻¹. La escala de colores refleja el gradiente de permeabilidad, mientras que las líneas punteadas sobre la barra indican los valores específicos medidos en cada calicata. Se observa que las mayores permeabilidades corresponden a las calicatas C1 y C4, asociadas

a materiales granulares más limpios, mientras que las menores permeabilidades se presentan en C3 y C6, coincidiendo con suelos de mayor contenido fino.

Figura 15

Mapa de transmisividad (T) de la zona de estudio



Nota. Distribución espacial de la transmisividad (T). Elaboración propia.

El mapa muestra la distribución espacial de la transmisividad del subsuelo, calculada como el producto de la conductividad hidráulica por la profundidad explorada ($b = 3 \text{ m}$). Los valores de T varían entre 2.37×10^{-4} y $3.90 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, registrándose los valores más elevados en las calicatas C1 y C4. De acuerdo con los rangos de clasificación de la transmisividad propuestos por Custodio y Llamas (2020) y Freeze y Cherry (2019),

estos valores corresponden a un subsuelo con capacidad de transmisión moderada. La barra de colores incluye líneas punteadas que identifican los valores específicos estimados en cada calicata.

4.3 Agrupamiento por zonas y parámetros medios para diseño

Para realizar la planificación de perforaciones se definieron tres áreas en Huacariz (A, B y C), agrupando las calicatas con cercanía y características similares:

- Área A: C-1, C-2

- Área B: C-3, C-4

- Área C: C-5, C-6

Se calculan los valores medios de K y T por área (promedio aritmético simple). Además, por su naturaleza, se adopta un coeficiente de almacenamiento $S = 2.0 \times 10^{-4}$ para los cálculos de Theis (valor conservador dentro del rango típico para acuíferos confinados).

Tabla 6

Parámetros medios por área (K, T, n_e promedio).

Área	Calicatas consideradas	$\bar{k}$ (m s ⁻¹)	$\bar{T}$ (m ² s ⁻¹)	$\bar{e}$	$\bar{n}$	$\bar{n}_e$
A	C1 – C2	1.15×10^{-4}	3.45×10^{-4}	0.438	0.305	0.198
B	C3 – C4	1.08×10^{-4}	3.23×10^{-4}	0.450	0.310	0.202
C	C5 – C6	8.95×10^{-5}	2.68×10^{-4}	0.474	0.321	0.209

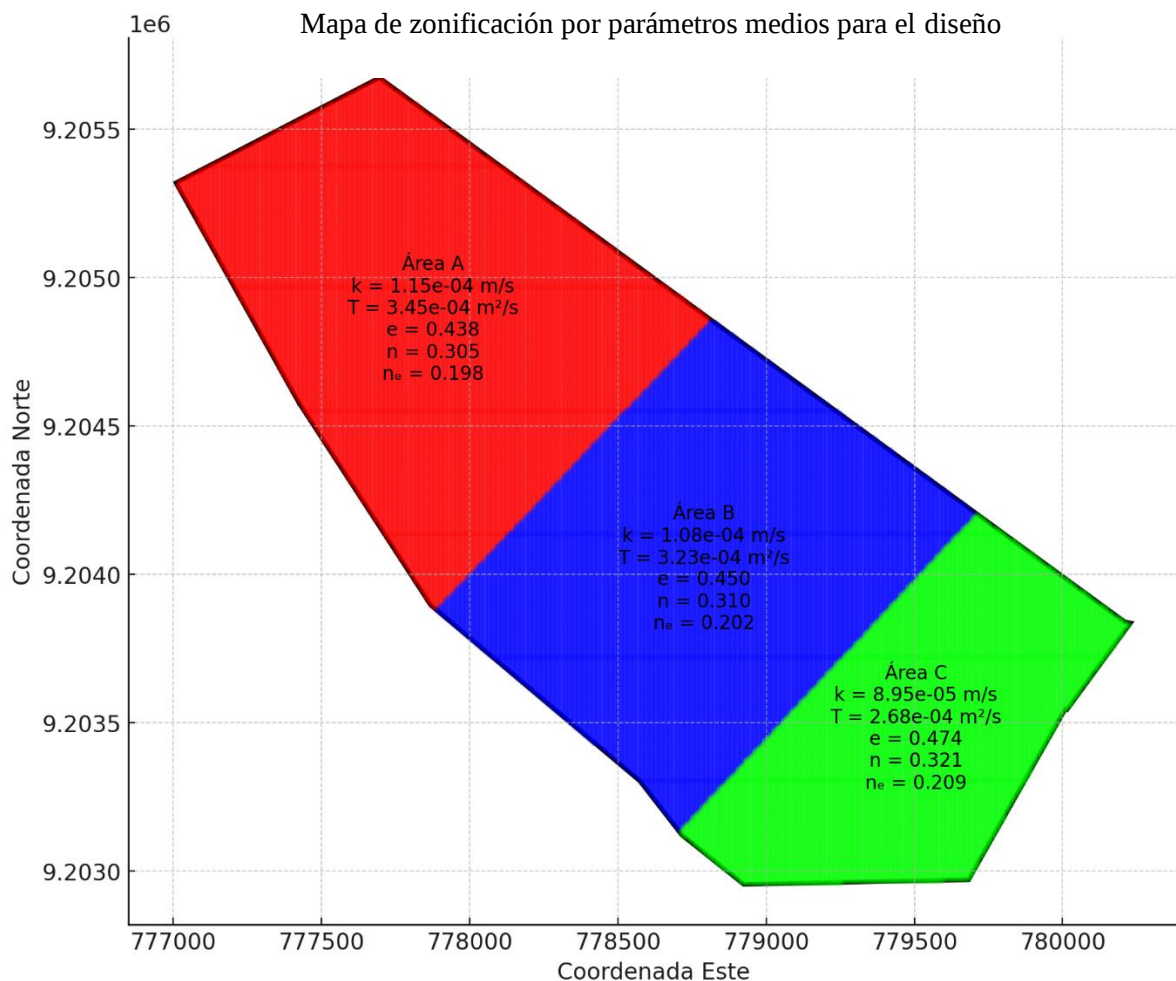
La Tabla 6 presenta los valores promedio de permeabilidad (k), transmisividad (T), índice de poros (e), porosidad total (n) y porosidad efectiva (n_e) calculados para cada una de las tres áreas definidas en el estudio.

El Área A muestra las mayores permeabilidades y transmisividades, indicando una mayor capacidad hidráulica del suelo. El Área C, aunque presenta la mayor porosidad, registra los menores valores de k y T, lo cual sugiere una mayor proporción de finos o una menor conectividad entre poros. El Área B se comporta como una zona intermedia, con características que transicionan entre las observadas en las Áreas A y C.

El Área A presenta las mayores transmisividades, lo que la posiciona como la zona más favorable para la perforación de pozos. En contraste, el Área C, pese a registrar mayor porosidad, presenta menor permeabilidad, lo que indica una menor conectividad de poros. Este comportamiento confirma que una mayor porosidad no implica necesariamente mayor productividad hidráulica (Robles, 2021; Velasco y Capilla, 2019). Asimismo, la zonificación hidrogeológica aplicada resulta consistente con enfoques que priorizan la integración de parámetros hidráulicos para la planificación de captaciones (Chucuya et al., 2025).

Figura 16

Mapa de zonificación por parámetros medios para el diseño



Nota. Zonificación del área de estudio en tres sectores (A, B y C) a partir de valores medios de parámetros hidrogeológicos para diseño. Elaboración propia.

El mapa muestra la zonificación del área de estudio en tres sectores (Áreas A, B y C), definidos en función de la proximidad a los pozos P1, P2 y P3, respectivamente. Cada área se presenta con un color semitransparente (rojo, azul y verde), lo que permite distinguir claramente los límites internos sin ocultar la geometría del polígono de estudio. En el centro de cada zona se indican los valores promedio de permeabilidad (k), transmisividad (T), índice de poros (e), porosidad total (n) y porosidad efectiva (n_e), calculados a partir de las calicatas asociadas a cada área. Esta representación integra en una sola figura la información geotécnica e hidrogeológica, facilitando la comparación entre las áreas y la identificación de aquella con mayor capacidad de transmisión del flujo subterráneo (Área A) frente a las zonas de comportamiento intermedio (Área B) y menor transmisividad, pero mayor porosidad (Área C).

4.4 Aplicación teórica del método de Theis y cálculo del radio de influencia

4.4.1 Fundamento y asunciones

La estimación del radio de influencia se fundamenta en la teoría clásica del flujo transitorio hacia pozos en acuíferos confinados. Conceptualmente, el radio de influencia representa la distancia máxima a la cual se manifiestan descensos piezométricos significativos como resultado de la extracción continua, noción ampliamente desarrollada en estudios empíricos y analíticos, como los propuestos por Sichardt y posteriormente formalizados por Theis.

En el presente estudio, el cálculo del radio de influencia se desarrolla mediante una expresión analítica derivada de las aproximaciones de Theis–Jacob y Cooper, las cuales permiten obtener estimaciones prácticas del alcance hidráulico del bombeo en

función de la transmisividad, el coeficiente de almacenamiento y el tiempo de extracción. Dado el carácter preliminar del análisis, los valores obtenidos deben interpretarse como estimaciones teóricas de planificación, útiles para la evaluación de interferencias hidráulicas y el espaciamiento inicial entre pozos.

Si bien la formulación empírica de Sichardt ha sido ampliamente utilizada para estimaciones rápidas del radio de influencia, en el presente estudio se optó por una expresión analítica derivada de Theis–Jacob/Cooper, debido a su mayor consistencia hidráulica y a su capacidad para incorporar explícitamente el efecto del tiempo de bombeo y del coeficiente de almacenamiento en la propagación del abatimiento piezométrico.

Se hacen notar las siguientes asunciones:

1. El acuífero se considera homogéneo e isótropo a escala de zona, con espesor saturado uniforme.
2. La transmisividad utilizada corresponde a valores promedio por área.
3. El coeficiente de almacenamiento se adopta como $S = 2.0 \times 10^{-4}$, valor conservador y coherente con acuíferos de comportamiento semiconfinado a confinado en medios limo–arenosos.

Estos supuestos permiten obtener resultados comparables entre áreas y constituyen una base técnica adecuada para análisis exploratorios y de ordenamiento espacial.

4.4.2 Fórmula práctica para radio de influencia

Una expresión de uso práctico, derivada de aproximaciones de Theis-Jacob/Cooper, para estimar el radio de influencia R a un tiempo t es:

$$R \approx 1.5 \sqrt{\frac{T \cdot t}{S}}$$

14

Donde:

T es transmisividad en $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$,

t es tiempo en segundos y

S coeficiente de almacenamiento, adimensional

4.4.3 Ejemplo numérico (tiempo de interés: 30 días continuos)

Se adopta un tiempo representativo $t = 30 \text{ días} = 30 \times 24 \times 3600 = 2\,592\,000 \text{ s}$.

Calculo del radio por áreas:

- Área A ($T = 3.45 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$):

$$R_A = 1.5 \sqrt{\frac{3.45 \times 10^{-4} \cdot 2,592,000}{2.0 \times 10^{-4}}} = 1.5 \sqrt{1.725 \times 2,592,000} \approx 1.5 \times 2,114 \approx 3,171 \text{ m}$$

- Área B ($T = 3.225 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$):

$$R_B \approx 1.5 \sqrt{\frac{3.225 \times 10^{-4} \cdot 2,592,000}{2.0 \times 10^{-4}}} \approx 1.5 \times 2,044 \approx 3,066 \text{ m}$$

- Área C ($T = 2.685 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$):

$$R_C \approx 1.5 \sqrt{\frac{2.685 \times 10^{-4} \cdot 2,592,000}{2.0 \times 10^{-4}}} \approx 1.5 \times 1,865 \approx 2,798 \text{ m}$$

Interpretación: para un bombeo continuo durante 30 días, los radios de influencia teóricos se ubican entre $\sim 2.8 \text{ km}$ y $\sim 3.2 \text{ km}$ según el área. Estos radios son estimaciones preliminares y sirven para:

- A. dimensionar distancias mínimas entre pozos para evitar interferencias,
- B. identificar el área potencial de afectación piezométrica,
- C. orientar la planificación de muestreos y monitoreo.

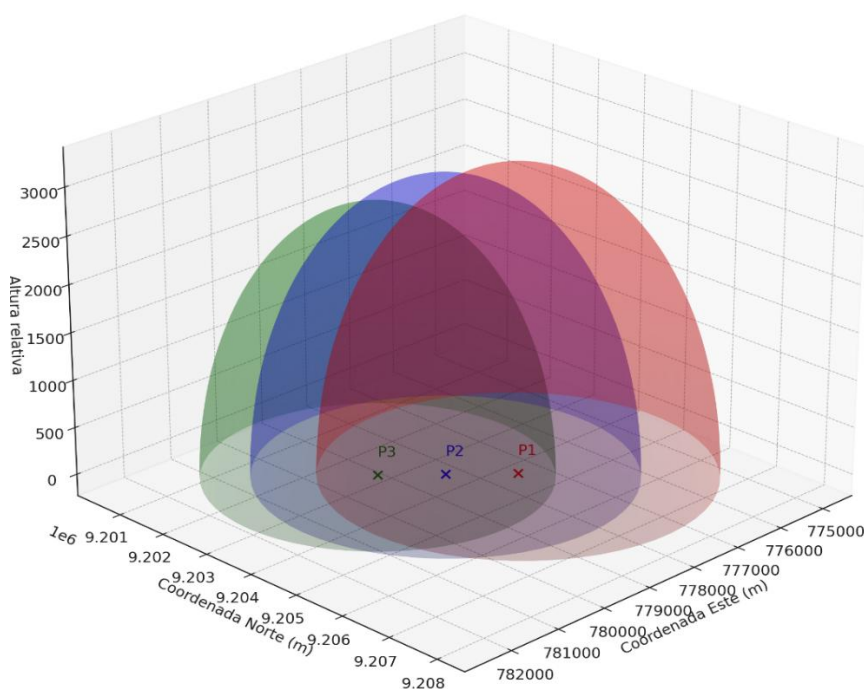
Los radios de influencia estimados (2.8–3.2 km) constituyen valores teóricos coherentes con acuíferos granulares de transmisividad moderada. No obstante, deben interpretarse como estimaciones preliminares, ya que no se realizaron ensayos de bombeo in situ, siendo necesario validar estos parámetros mediante pruebas de campo, tal como se recomienda en estudios de caracterización hidrogeológica (López García, 2015).

4.4.4 Representación espacial del radio de influencia por zonas

Figura 17

Representación tridimensional del radio de influencia por zonas

Representación tridimensional del radio de influencia por zonas



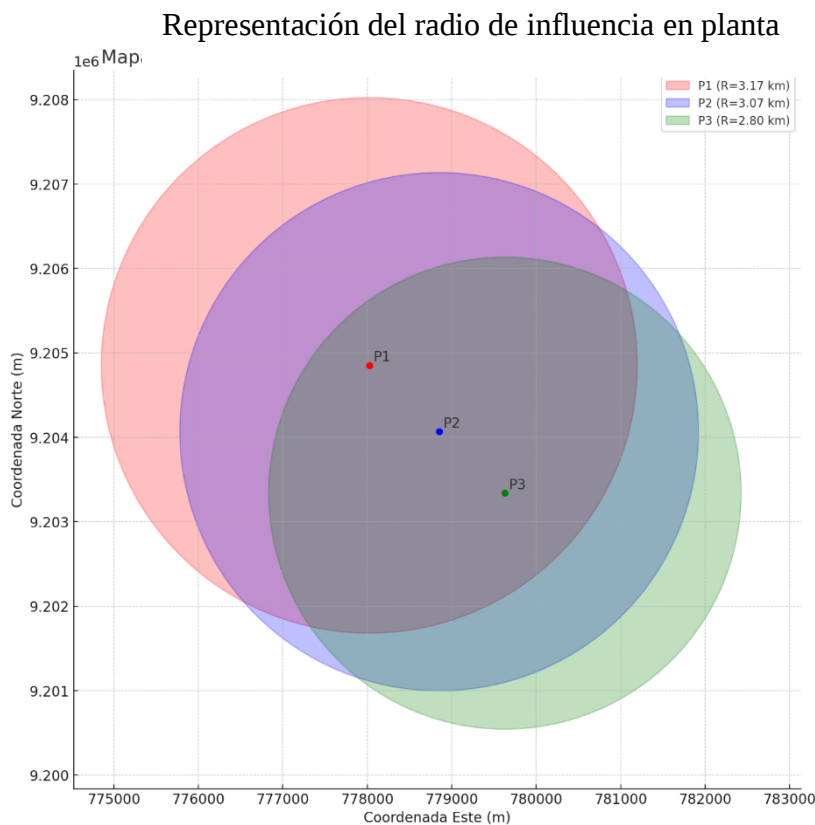
Nota. Representación tridimensional del radio de influencia de los pozos P1, P2 y P3, diferenciados por zonas hidrogeológicas. Elaboración propia.

El modelo 3D muestra la extensión espacial del cono de depresión teórico asociado a cada pozo, representado como una semiesfera cuyo radio corresponde al radio de influencia calculado mediante la aproximación de Theis/Cooper–Jacob para 30 días de bombeo continuo. Las semiesferas permiten visualizar de manera intuitiva el área potencialmente afectada alrededor de cada pozo, así como la superposición entre zonas de influencia, especialmente entre los pozos P1 y P2.

4.4.5 Representación en planta del radio de influencia

Figura 18

Representación del radio de influencia en planta.



Nota. Representación en planta del radio de influencia de los pozos P1, P2 y P3 (método de Theis–Cooper–Jacob, 30 días). Elaboración propia.

La figura presenta la extensión espacial del cono de depresión teórico generado alrededor de cada pozo, utilizando las coordenadas UTM reales y los parámetros hidrogeológicos promedio obtenidos para las áreas A, B y C. Los radios de influencia calculados fueron: 3.17 km para el pozo P1 (Área A), 3.07 km para el pozo P2 (Área B) y 2.80 km para el pozo P3 (Área C). Cada círculo representa el alcance máximo esperado de la perturbación piezométrica en un acuífero confinado bajo condiciones idealizadas de homogeneidad, isotropía y espesor uniforme. La superposición parcial entre los radios muestra el potencial de interferencia hidráulica entre pozos si se operaran de manera simultánea o sostenida. Este análisis sirve como insumo para definir distancias mínimas de espaciamiento, evaluar áreas de captación y orientar la planificación del desarrollo de pozos en el sector Huacariz.

4.5 Implicaciones del análisis de Theis para el diseño y el espaciamiento de pozos

Los radios de influencia estimados mediante la aplicación del método de Theis proporcionan un marco preliminar para la planificación del diseño y la disposición espacial de pozos tubulares en el sector Huacariz. A partir de estos resultados, se desprenden las siguientes implicancias técnicas:

1. Considerando los radios de influencia calculados, el espaciamiento mínimo entre pozos debería definirse como una fracción del radio de influencia con el fin de reducir interferencias hidráulicas significativas. Un criterio conservador ampliamente utilizado en estudios preliminares consiste en adoptar distancias entre pozos iguales o mayores a $R/2$, lo que para el Área A se traduce en un espaciamiento del orden de 1.4 a 1.6 km, dependiendo del valor de transmisividad adoptado.

2. Este criterio permite minimizar la superposición de conos de depresión bajo condiciones de bombeo continuo, favoreciendo una explotación más estable del acuífero y reduciendo el riesgo de descensos piezométricos acumulativos en escenarios de operación simultánea.
3. No obstante, los resultados evidencian que, si las condiciones de demanda hídrica requiriesen una mayor densidad de pozos, sería necesario replantear el esquema de explotación, ya sea mediante la reducción de los caudales unitarios por pozo, la implementación de regímenes de bombeo alternado, o la ejecución de ensayos de bombeo prolongados que permitan estimar de forma directa el coeficiente de almacenamiento y recalibrar los parámetros hidráulicos utilizados.

En este sentido, el análisis de Theis desarrollado en la presente investigación debe interpretarse como una herramienta para la toma de decisiones en la fase de planificación.

4.6 Calidad del agua

Se compararon los resultados analíticos con la R.M. 004-2017-MINAM (ECA, Categoría 1A). La Tabla 7 muestra la comparación (se muestra aquí de forma sintética; la tabla completa con todos los parámetros se incluye en el cuerpo de resultados y el informe del laboratorio en anexos).

Tabla 7*Cumplimiento con ECA 004-2017 (Muestras M-01 ... M-03)*

Parámetro	M-01	M-02	M-03	Límite ECA 1A	Cumple
pH	7.21	7.11	7.30	6.5–8.5	Sí
Conductividad (µS/cm)	831.8	851.9	853.6	≤ 1 500	Sí
Dureza (mg/L CaCO ₃)	411.0	411.8	413.0	≤ 500 (guía)	Sí
Cloruros (mg/L)	22.57	24.11	23.30	≤ 250	Sí
Sulfatos (mg/L)	63.58	65.58	63.50	≤ 250	Sí
Nitratos (mg/L)	1.41	2.44	2.30	≤ 50	Sí
Arsénico (mg/L)	<0.003	<0.003	<0.003	≤ 0.01	Sí
Coliformes totales (NMP/100 mL)	220	1 200	130	0	No
E. coli (NMP/100 mL)	33	170	17	0	No

Los resultados muestran que los parámetros físicos y químicos analizados cumplen con los valores establecidos en la R.M. 004-2017-MINAM (ECA, Categoría 1A). No obstante, se registró presencia de coliformes totales y *Escherichia coli* en todas las muestras evaluadas, superando el criterio normativo para este tipo de agua. En consecuencia, las aguas subterráneas analizadas no califican como aptas para consumo directo sin tratamiento, siendo necesaria la aplicación de medidas de desinfección y protección sanitaria.

La presencia de coliformes totales y *Escherichia coli* sugiere que la contaminación es de origen superficial y no intrínseca al acuífero, lo cual indica deficiencias en la protección sanitaria de las captaciones. Este comportamiento ha sido reportado en acuíferos urbanos y periurbanos, donde la vulnerabilidad microbiológica está asociada a la interacción con la superficie y a un diseño inadecuado de los pozos (Robles, 2021).

4.7 Implicancias técnicas para el diseño preliminar

1. **Protección sanitaria del cabezal del pozo:** los hallazgos microbiológicos indican deficiencias en la protección superficial; diseñar solera de hormigón, sello sanitario y sumidero homogéneo lejos del cabezal.
2. **Screen y grava de empaque:** seleccionar ranurado y grava de empaque en función de la granulometría (filtro con tamaño tal que evite arrastre de finos; rango típico: malla que retenga 40 % según. Grava de empaque libre de finos, espesor 0.3–0.5 m.
3. **Profundidad y longitud de pantalla:** considerar zanjas de pantalla que atraviesen el espesor productivo (en este diseño preliminar $b = 3$ m; pantalla preferible de 2.0–2.5 m en el tramo saturado con ranurado adecuado).
4. **Diámetro del pozo:** mínimo 6–8 pulgadas (150–200 mm) para facilitar mantenimiento y bombeo.
5. **Pruebas de bombeo y recuperación:** ejecutar ensayos de bombeo (bombeo constante y recuperación) en al menos un pozo por área para calibrar T y S in situ (obligatorio antes de diseño final).
6. **Desinfección y monitoreo:** implementar cloración inicial tras desarrollo del pozo y muestreos microbiológicos periódicos (mensuales por 6 meses, luego cada 3 meses) hasta demostrar ausencia de bacterias fecales.

7. **Plan de manejo de densidad de pozos:** usar radios de influencia estimados para planificar espaciamiento; en caso de requerir mayor densidad, reducir caudal por pozo.

4.8 Propuesta de zonas de ubicación para la perforación de pozos tubulares

criterio de selección.

La propuesta se fundamenta en la integración de: (i) parámetros geotécnicos medidos en seis calicatas; (ii) parámetros hidráulicos estimados (K , T , n_e) agrupados por áreas; (iii) la calidad del agua (análisis M-01...M-03) y (iv) la representación espacial de los radios de influencia (mapa en planta y 3D). Se priorizaron lugares que combinan transmisividad moderada-alta, porosidad efectiva favorable y ausencia de contaminación microbiológica documentada.

4.8.1 Zonificación propuesta:

La delimitación de las Áreas A, B y C no responde a límites hidrogeológicos estrictos, sino a una zonificación funcional orientada al diseño preliminar de pozos tubulares. Las áreas fueron definidas considerando la proximidad espacial de las calicatas, la similitud de los parámetros hidráulicos medios ($\bar{K}$, $\bar{T}$, n_e) y el comportamiento esperado de los radios de influencia teóricos estimados mediante la solución de Theis. De este modo, las líneas de delimitación representan fronteras operativas que permiten diferenciar zonas con distinto potencial hidráulico y grado de interferencia entre captaciones, facilitando la planificación y priorización de perforaciones.

Tabla 8*Zonificación en áreas*

Área	Calicatas incluidas	Valor-promedio T (m ² s ⁻¹)	n _e promedio	Calidad agua (resumen)	Aptitud propuesta
A	C-1, C-2	3.45×10 ⁻⁴	0.198	Buen perfil fisicoquímico; contaminación microbiológica requiere tratamiento	Alta (prioridad 1)
B	C-3, C-4	3.225×10 ⁻⁴	0.2015	Buen perfil químico; proximidad a sectores con finos => riesgo de turbidez	Media (prioridad 2)
C	C-5, C-6	2.685×10 ⁻⁴	0.209	Buen perfil químico; presencia de finos variable	Media-Baja (prioridad 3)

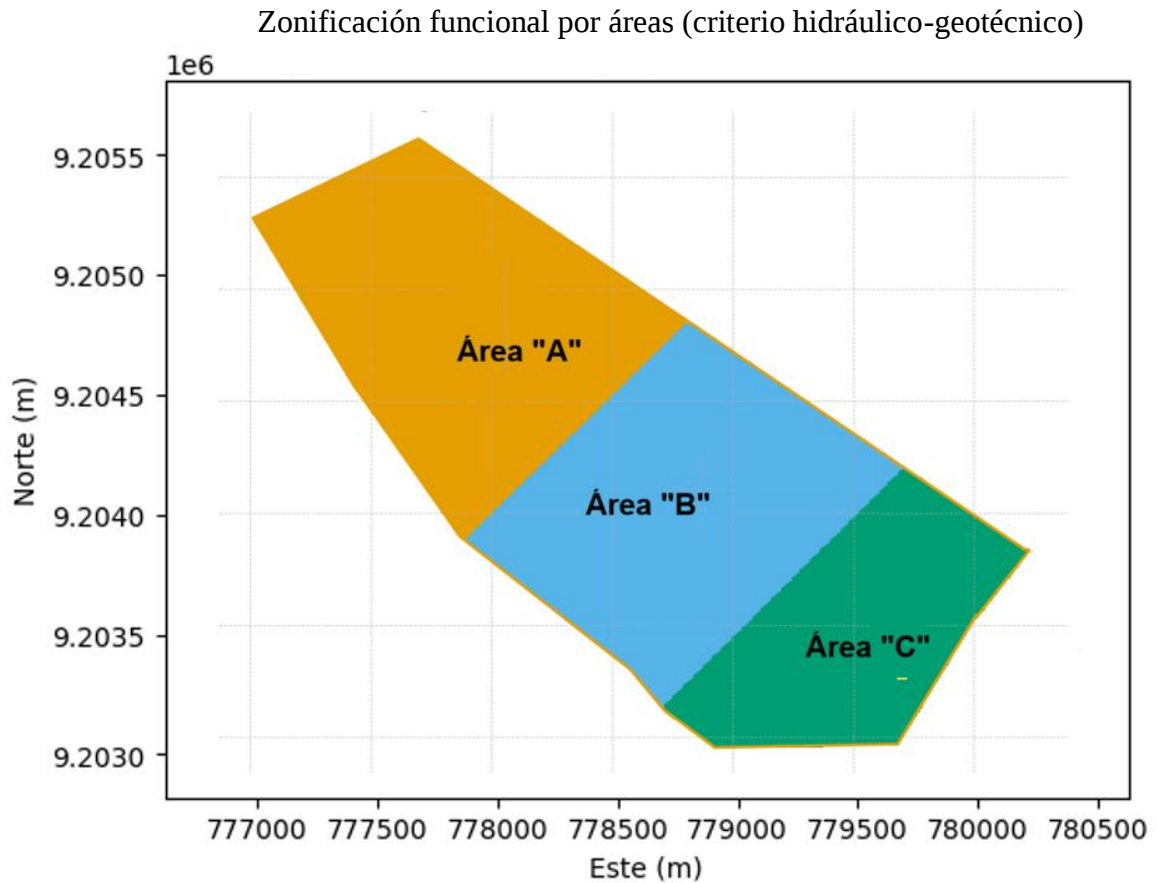
Área A reúne la mayor transmisividad promedio y una porosidad efectiva favorable, lo que permite una extracción sostenida con menor riesgo de abatimientos rápidos. Aunque los análisis evidencian contaminación microbiológica, esta se interpreta como de origen superficial, por lo que puede ser mitigada mediante un adecuado diseño sanitario del pozo y tratamiento previo al consumo.

Área B presenta transmisividades comparables, pero mayor heterogeneidad litológica, con presencia de finos que puede incrementar la turbidez y exigir un desarrollo del pozo más intensivo y un control cuidadoso del diseño del filtro.

Área C muestra los menores valores de transmisividad, lo que la hace viable principalmente para pozos de menor caudal o como apoyo mediante esquemas de bombeo alternado, manteniendo un enfoque conservador de explotación.

Figura 19

Zonificación funcional por áreas (criterio hidráulico-geotécnico)



Nota. Zonificación funcional de las áreas A, B y C basada en parámetros hidráulicos y geotécnicos. Elaboración propia.

Las áreas A, B y C fueron delimitadas mediante líneas poligonales suaves, considerando la superposición y proximidad de los radios de influencia teóricos calculados, así como la distribución espacial de las calicatas y la coherencia de los parámetros hidráulicos promedio por zona. Esta delimitación no representa límites hidrogeológicos estrictos, sino unidades funcionales de análisis orientadas a la planificación preliminar del diseño y ubicación de pozos tubulares.

Tabla 9

Jerarquización y zonificación de áreas aptas para la perforación de pozos tubulares

Zona	Calicatas asociadas	Porosidad efectiva promedio (n_e)	Permeabilidad promedio K ($m s^{-1}$)	Transmisividad promedio T ($m^2 s^{-1}$)	Calidad de agua	Aptitud hidrogeológica	Justificación técnica
Área A	C-1, C-2	0.198	1.15×10^{-4}	3.45×10^{-4}	Cumple físico-químico; requiere desinfección	Alta	Presenta los mayores valores de transmisividad y permeabilidad media, con porosidad efectiva favorable y condiciones adecuadas para explotación sostenible.
Área B	C-3, C-4	0.202	1.08×10^{-4}	3.23×10^{-4}	Cumple físico-químico; requiere desinfección	Media	Condiciones hidrogeológicas aceptables, aunque con mayor presencia de finos que pueden afectar la eficiencia hidráulica del pozo.
Área C	C-5, C-6	0.209	8.95×10^{-5}	2.69×10^{-4}	Cumple físico-químico; requiere desinfección	Media-Baja	Menor permeabilidad y transmisividad relativa; viable solo con diseño cuidadoso y control de caudales.

La jerarquización se realizó mediante un análisis multicriterio de carácter técnico. La ponderación de los criterios se efectuó conforme al esquema metodológico, en el cual se asignó mayor peso a la transmisividad debido a su influencia directa en la productividad y sostenibilidad hidráulica del acuífero, seguida de la calidad del agua, la porosidad efectiva y las condiciones geotécnicas.

En consecuencia, la jerarquización obtenida no responde a una valoración subjetiva, sino a un procedimiento estructurado y coherente con los fundamentos hidrogeológicos establecidos en el marco teórico, constituyendo una herramienta comparativa para la priorización preliminar de áreas aptas para la perforación de pozos tubulares. La priorización presentada es consistente con el esquema de ponderación definido en el Capítulo 3, garantizando coherencia metodológica entre los criterios adoptados y los resultados obtenidos.

4.9 Propuesta de diseño técnico y especificaciones para ejecución de pozos tubulares

4.9.1 Datos de partida adoptados

1. Espesor saturado de referencia (b): 3.0 m (usado en cálculos previos).
2. Transmisividad promedio por área: ver Tabla 6.
3. Porosidad efectiva usada para cálculo de almacenamiento y estimaciones de recuperación: ver Tabla 6.
4. Caudal de proyecto: Caudal de proyecto: rango preliminar entre 3 y 8 L s⁻¹ por pozo, definido con fines de dimensionamiento inicial; el valor definitivo dependerá de la estrategia de abastecimiento, la interferencia entre pozos y la confirmación mediante pruebas de bombeo.

4.9.2 Dimensiones y materiales recomendados

1. **Diámetro del pozo (columnado):** mínimo **150 mm (6")** para pozos individuales de bajo-medio caudal; **200 mm (8")** recomendado si se prevé bomba y mantenimiento comunitario.
2. **Profundidad de perforación (diseño preliminar):** definida con el objetivo de interceptar de manera efectiva el nivel acuífero productivo identificado a partir de calicatas y análisis hidrogeológicos. Si bien el espesor saturado de referencia utilizado en los cálculos conceptuales es $b = 3.0$ m, la profundidad total del pozo deberá extenderse más allá de la zona productiva para garantizar estabilidad hidráulica y reserva operativa. En consecuencia, se propone una profundidad preliminar del orden de 90–120 m, coherente con pozos tubulares de abastecimiento en acuíferos granulares.
3. **Longitud de pantalla (pantalla filtrante):** 2.0–2.5 m dentro del tramo saturado (preferible 2.5 m en Área A por mayor productividad).
4. **Material de entubado:** PVC hidráulico certificado para uso en agua (PVC-SCH 40 o equivalente). En tramos superficiales o en sectores con mayores exigencias mecánicas, podrá considerarse acero galvanizado como refuerzo estructural.
5. **Ranurado de pantalla:** la abertura del filtro se definió a partir de los resultados granulométricos obtenidos en las calicatas, aplicando el criterio de retención del 40 % de la fracción efectiva (D_{40}). Con base en la matriz limo–arenosa predominante, se propone de manera preliminar una abertura de ranura del orden de 0.5–1.0 mm, valor coherente con los rangos recomendados para este tipo de sedimentos. El ajuste final de la ranura deberá realizarse durante el diseño definitivo del pozo, considerando ensayos de bombeo y comportamiento hidráulico observado en campo.

4.9.3 Filtro de grava (gravel pack) y desarrollo

1. **Grava de empaque:** grava silícea lavada, diámetro nominal seleccionada para evitar arrastre de finos (por ejemplo 2–8 mm según granulometría). Espesor de la columna de grava: 0.30–0.50 m alrededor de la zona ranurada.
2. **Desarrollo del pozo:** bombeo escalonado y lavado hasta que el caudal se estabilice y el agua presente baja turbidez

4.9.4 Cabezal y protección sanitaria

1. **Sello sanitario:** solera de hormigón con pendiente, sumidero separado y cuneta de disipación.
2. **Revestimiento superficial:** entubado hasta al menos 0.5 m por encima del terreno y cámara de acceso protegida.
3. **Distancia a fuentes de contaminación:** respetar reglamentación local para distancia a fosas sépticas, corrales y pozos filtrantes; usar radio de influencia estimado para ubicar pozos alejados de posibles focos.

4.9.5 Bombeo y equipo mecánico

1. **Tipo de bomba:** bomba sumergible con motor acorde al caudal y columna de impulsión. Para mantenimiento y eficiencia: selección con curva Q-H opererando entre el 70–85 % de su eficiencia nominal.
2. **Tubería de impulsión:** PVC o HDPE según presión y profundidad; válvula de pie, válvula de retención y manómetro en cabezal.
3. **Instrumentación mínima:** pozo-tubo piezométrico cercano para monitoreo de nivel (registro manual o datalogger), medidor de caudal para aforos, y registro de temperatura.

4.9.6 Ensayos y verificación in situ (obligatorios antes de la toma de decisión final)

Dado el carácter preliminar del diseño propuesto, se establece como condición indispensable la ejecución de los siguientes ensayos antes de la decisión final de explotación:

1. Bombeo constante (24–72 h) con medición de abatimiento cada 5–10 min inicialmente y luego a intervalos mayores; posterior prueba de recuperación.
2. Ensayo de trazador o ensayo de bombeo múltiple si se planea densidad alta de pozos.
3. Análisis de caudal específico y granulometría del material filtrado durante desarrollo.
4. Ensayos microbiológicos post-desarrollo y tras cloración para verificar eliminación de contaminación.

4.9.7 Recomendaciones de operación y mantenimiento

1. **Desinfección inicial** con hipoclorito de sodio tras el desarrollo; monitoreo microbiológico mensual durante 6 meses.
2. **Registro piezométrico** semanal el primer mes y luego mensual.
3. **Mantenimiento preventivo anual** (desinfección, control de bomba, revisión del cabezal).

Tabla 10

Parámetros del diseño preliminar del pozo tubular según área de estudio.

Área	Q diseño (orientativo) L/s	Diámetro recomendado (mm)	Longitud pantalla (m)	Entubado	Grava empaque (mm)	Observaciones
A	6 – 8	200	2.5	PVC SCH40	2–8	Área prioritaria; realizar 1er ensayo aquí
B	4 – 6	150–200	2.0–2.5	PVC	2–8	Heterogeneidad, desarrollo más intensivo
C	3 – 5	150	2.0	PVC	2–6	Para caudales menores o pozos suplementarios

Nota: Q diseño es orientativo. Valores definitivos se fijan tras ensayos de bombeo que permitan estimar T y S locales y definir rendimiento sostenible.

Tabla 11*Diseño preliminar y referencial del pozo tubular propuesto*

Parámetro	Valor propuesto	Justificación técnica
Tipo de pozo	Pozo tubular profundo	Adecuado para acuíferos granulares con transmisividad moderada
Profundidad total	60 – 120 m (referencial)	Rango típico regional para pozos tubulares en Cajamarca; la profundidad final dependerá de la estratigrafía y de la continuidad vertical de los niveles productivos, más allá de los espesores saturados identificados en calicatas superficiales.
Diámetro de perforación	12 ¼"	Permite instalación segura de entubado de 8"
Diámetro del entubado	8" (PVC ranurado / acero)	Balance entre caudal, eficiencia hidráulica y costos
Intervalo filtrante	Definido según tramo saturado productivo	Se ubicará en las capas de mayor permeabilidad
Tipo de filtro	Ranurado continuo (1.5–2.0 mm)	Adecuado para sedimentos finos a medios
Empaque de grava	Grava silícea 2–4 mm	Control de finos y mejora de conductividad
Sello sanitario	≥ 3 m (arcilla + cemento)	Protección sanitaria del acuífero
Caudal de diseño	3 – 8 L s ⁻¹ (preliminar)	Compatible con T promedio estimada
Tipo de bombeo	Bomba sumergible eléctrica	Uso continuo y controlado
Uso previsto	Abastecimiento poblacional	Calidad físico-química compatible (previo tratamiento microbiológico)

La Tabla 11 presenta el diseño preliminar y referencial del pozo tubular propuesto para el sector Huacariz, elaborado a partir de la integración de los resultados geotécnicos, los parámetros hidráulicos estimados (K y T), la porosidad efectiva calculada y los criterios de calidad de agua subterránea evaluados en el presente estudio.

Los rangos de profundidad, diámetro y caudal han sido definidos con carácter orientativo, considerando tanto la variabilidad litológica identificada en las calicatas como las condiciones hidrogeológicas regionales. El intervalo filtrante, el tipo de ranura y el empaque de grava se proponen de manera preliminar, con base en la matriz limo–arenosa predominante, quedando su ajuste final sujeto a los resultados de ensayos de bombeo y al comportamiento hidráulico observado durante la perforación exploratoria.

En este sentido, el diseño presentado no constituye un diseño definitivo de obra, sino una propuesta técnica que sirve como soporte para la toma de decisiones en fases de ejecución, validación y optimización del pozo tubular.

4.9.8 Perfil esquemático hidráulico–constructivo del pozo tubular propuesto

El pozo tubular propuesto para el sector Huacariz ha sido concebido como una estructura hidráulica vertical destinada a interceptar de manera eficiente el acuífero granular identificado como prioritario dentro del Área A. Su diseño se fundamenta en los parámetros hidráulicos obtenidos durante la investigación, particularmente en los valores de transmisividad y permeabilidad promedio, con el objetivo de asegurar una explotación sostenible y técnicamente adecuada.

Cabe precisar que las calicatas ejecutadas permitieron caracterizar los materiales superficiales y definir parámetros geotécnicos e hidráulicos preliminares; sin embargo, la

profundidad propuesta del pozo responde a criterios hidrogeológicos regionales y a la necesidad de interceptar el acuífero granular continuo identificado en la zona de estudio.

El perfil constructivo considera un sello sanitario superficial desde el nivel del terreno hasta una profundidad aproximada de 3 m, conformado por una combinación de bentonita y lechada de cemento. Este elemento cumple la función de proteger el acuífero frente a posibles infiltraciones de origen superficial y garantizar condiciones sanitarias adecuadas durante la operación del pozo.

Por debajo del sello sanitario, se dispone un entubado ciego que se extiende hasta una profundidad estimada de 35 a 40 m, cuya finalidad es aislar los estratos de baja permeabilidad y concentrar la captación exclusivamente en los niveles con mayor potencial hidráulico. El material del entubado puede ser PVC hidráulico o acero, dependiendo de las condiciones constructivas y de disponibilidad local.

El tramo filtrante del pozo se proyecta entre aproximadamente 40 y 90 m de profundidad, utilizando tubería ranurada de abertura continua. Este tramo se complementa con un empaque de grava silíceo seleccionada, con granulometría del orden de 2 a 4 mm, lo que permite controlar la migración de finos hacia el interior del pozo y mejorar la eficiencia hidráulica del sistema de captación.

Finalmente, se considera una cámara inferior de reserva hidráulica, ubicada por debajo del tramo filtrante, alcanzando una profundidad total del pozo comprendida entre 90 y 120 m. Esta cámara cumple la función de estabilizar el régimen de bombeo, reducir las variaciones bruscas del nivel dinámico y proporcionar una reserva operativa que favorezca la continuidad del abastecimiento.

Tabla 12*Resumen esquemático del perfil propuesto*

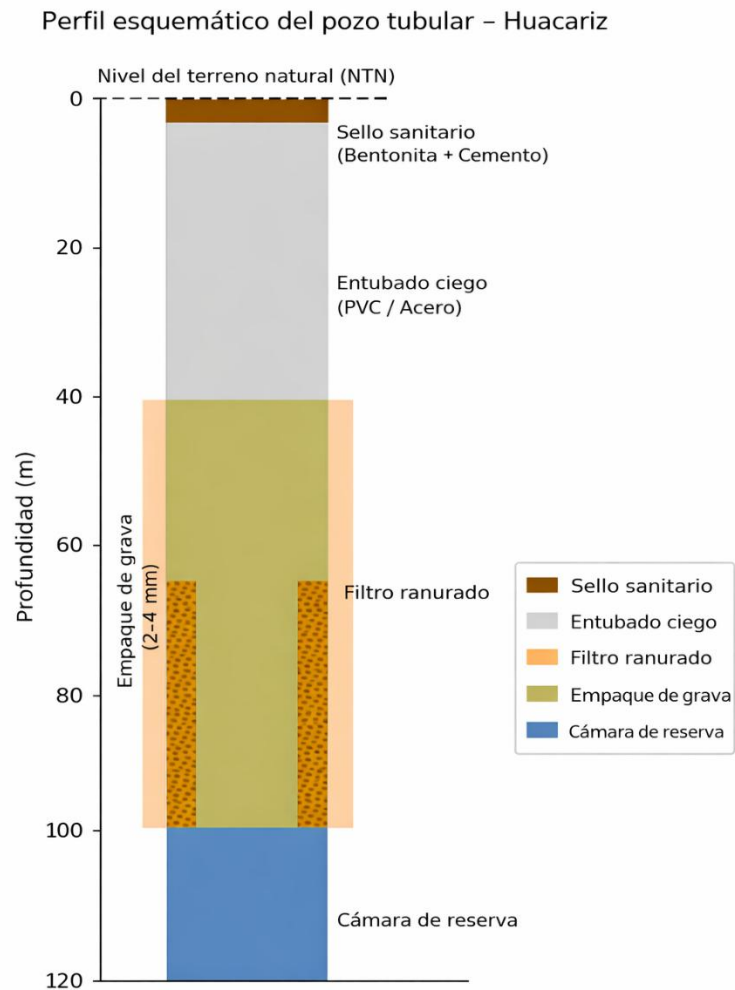
Tramo	Profundidad aproximada	Elemento
I	0 – 3 m	Sello sanitario (bentonita + cemento)
II	3 – 35/40 m	Entubado ciego
III	40 – 90 m	Tramo filtrante ranurado
IV	40 – 90 m	Empaque de grava
V	90 – 120 m	Cámara de reserva hidráulica

La configuración mostrada responde a criterios hidrogeológicos y geotécnicos derivados de la caracterización realizada, particularmente a la necesidad de proteger el acuífero frente a contaminaciones superficiales, aislar estratos de baja permeabilidad y optimizar la captación en los niveles con mayor potencial hidráulico.

4.9.9 Perfil esquemático de pozo tubular

Figura 20

Perfil esquemático de pozo tubular



Nota. Perfil esquemático del pozo tubular propuesto en el sector Huacariz, mostrando el sello sanitario, entubado ciego, filtro ranurado, empaque de grava y cámara de reserva.

Elaboración propia.

4.10 Relación con el radio de influencia (Theis) y espaciamiento de pozos

- Los radios teóricos calculados para $t = 30$ días (ver 4.7.3) muestran $R \approx 2.8 - 3.2$ km según área.
- Aplicando criterio conservador de espaciamiento $\geq R/2$ para evitar interferencias significativas, se sugiere distancias mínimas entre pozos del orden de $1.4 - 1.6$ km.
- No obstante, en escenarios donde se requiera una mayor densidad de pozos, será necesario reducir los caudales unitarios por pozo, implementar esquemas de bombeo alternado, y desarrollar ensayos de bombeo in situ que permitan recalibrar los valores reales de transmisividad y coeficiente de almacenamiento. Estas medidas permitirán optimizar el diseño hidráulico y garantizar una explotación sostenible del acuífero.

Estos criterios de espaciamiento son consistentes con enfoques de planificación hidrogeológica que buscan reducir la interferencia hidráulica y garantizar la sostenibilidad del acuífero (Chucuya et al., 2025).

Tabla 13

Radio de influencia y espaciamiento recomendado entre pozos tubulares

Pozo / Zona	Radio de influencia estimado R (km)	Radio de influencia (m)	Criterio de diseño aplicado	Espaciamiento mínimo recomendado entre pozos (m)	Observación técnica
P1 – Área A	3.17	3 170	$0.6 \times R$	1 900	Amplia área de captura; baja interferencia potencial. Zona prioritaria para nuevos pozos.
P2 – Área B	3.07	3 070	$0.6 \times R$	1 840	Interferencia moderada; requiere control de caudales y espaciamiento estricto.
P3 – Área C	2.80	2 800	$0.6 \times R$	1 680	Menor radio de influencia; apto para pozos de menor caudal o bombeo alternado.

La Tabla 13 presenta el radio de influencia teórico estimado para cada zona priorizada del sector Huacariz, calculado a partir de los parámetros hidráulicos promedio y la aplicación del método de Theis en régimen transitorio. Estos radios representan el alcance espacial aproximado de la perturbación piezométrica generada por el bombeo continuo de un pozo en condiciones ideales de acuífero confinado.

Con el fin de reducir la interferencia hidráulica entre pozos adyacentes y garantizar una explotación sostenible del acuífero, se adoptó como criterio de diseño un espaciamiento mínimo equivalente al 60 % del radio de influencia ($0.6 R$). Este valor corresponde a un enfoque conservador, ampliamente utilizado en la planificación preliminar de campos de pozos cuando no se dispone aún de ensayos de bombeo a escala real.

Los resultados indican que el Área A presenta el mayor radio de influencia y, por tanto, el mayor espaciamiento recomendado entre pozos, lo que confirma su condición de zona prioritaria para el desarrollo inicial de nuevos pozos, con menor riesgo de interferencia. En el Área B, el espaciamiento requerido es ligeramente menor, aunque se recomienda un control más estricto de los caudales de extracción debido a la mayor heterogeneidad del medio. Finalmente, el Área C muestra el menor radio de influencia, lo que la hace adecuada para pozos de menor caudal o para esquemas de bombeo alternado, orientados a complementar el abastecimiento sin comprometer el equilibrio hidráulico del acuífero.

Estos valores deben considerarse referenciales y preliminares, ya que el espaciamiento definitivo entre pozos deberá ajustarse a partir de ensayos de bombeo y recuperación que permitan estimar con mayor precisión la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento reales del acuífero.

4.11 Verificación del diseño preliminar y lineamientos para el diseño definitivo

Los resultados obtenidos en el presente capítulo permiten establecer un diseño preliminar técnicamente coherente; sin embargo, requiere la ejecución de actividades complementarias en campo que permitan ajustar los parámetros hidráulicos a condiciones reales de operación. En este sentido, se identifican como acciones imprescindibles:

1. La ejecución de ensayos de bombeo a caudal constante, con duraciones entre 24 y 72 horas, en al menos un pozo representativo por cada área priorizada.
2. La calibración de los valores de transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S) a partir de los datos reales de abatimiento y recuperación, con la posterior recalculación de radios de influencia y rendimientos sostenibles.
3. El ajuste del caudal objetivo por pozo en función de la demanda proyectada y de los límites establecidos por la normativa vigente.
4. La implementación de medidas de protección sanitaria (sello sanitario, solera y cloración inicial) antes de la puesta en servicio de los pozos.

Con base en la integración de los resultados provenientes de seis calicatas, análisis de laboratorio y estimaciones hidráulicas, se propone priorizar la perforación en el Área A, debido a su mayor transmisividad media y porosidad efectiva favorable. Las Áreas B y C se consideran técnicamente viables, aunque requieren un mayor control constructivo, desarrollo del pozo e instrumentación adicional.

El diseño preliminar sugiere pozos con diámetros entre 150 y 200 mm, longitudes de pantalla de 2.0 a 2.5 m en el tramo saturado, grava de empaque seleccionada según la curva granulométrica y un programa obligatorio de ensayos de bombeo para la calibración final de los parámetros hidráulicos. Los radios de influencia estimados teóricamente

indican espaciamientos mínimos conservadores del orden de $R/2$ ($\approx 1.4\text{--}1.6$ km) para evitar interferencias hidráulicas significativas, siempre que se mantengan los caudales propuestos.

4.12 Relación entre los parámetros hidrogeológicos y el diseño del pozo

El diseño preliminar del pozo tubular se encuentra directamente condicionado por los parámetros hidrogeológicos estimados en el presente estudio. La transmisividad del acuífero determina el rango de caudal de diseño propuesto, así como el diámetro del pozo y la longitud del tramo filtrante, de manera que se garantice una captación eficiente sin inducir descensos excesivos del nivel piezométrico.

La permeabilidad y la granulometría del medio influyen en la selección del tipo de filtro y de la grava de empaque, permitiendo controlar el arrastre de finos y mejorar la eficiencia hidráulica del sistema. Asimismo, la porosidad efectiva y el coeficiente de almacenamiento condicionan la respuesta del acuífero frente al bombeo y son fundamentales para la estimación del radio de influencia y del espaciamiento recomendado entre pozos.

En conjunto, estos parámetros permiten establecer un diseño técnicamente coherente con las condiciones reales del acuífero, garantizando criterios de sostenibilidad, seguridad sanitaria y viabilidad operativa.

En conjunto, los resultados permiten establecer un diseño preliminar de pozos tubulares técnicamente coherente con las condiciones del acuífero del sector Huacariz. La integración de parámetros geotécnicos, hidráulicos y de calidad del agua responde a enfoques de diseño sostenible que buscan optimizar la explotación del recurso y reducir riesgos de deterioro estructural y sanitario (Robles, 2021; Chucuya et al., 2025).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- a) La caracterización geotécnica evidenció un medio limo–arenoso heterogéneo, donde la presencia de fracciones finas influye en la permeabilidad y transmisividad del acuífero, condicionando el diseño del filtro y del empaque de grava en los pozos tubulares.
- b) Se determinaron valores de permeabilidad hidráulica (K) entre 7.9×10^{-5} y 1.3×10^{-4} m s⁻¹, y de transmisividad (T) entre 2.37×10^{-4} y 3.90×10^{-4} m² s⁻¹; asimismo, la porosidad efectiva (n_e) se estimó entre 0.19 y 0.22, caracterizando al acuífero como un medio granular de capacidad de transmisión moderada.
- c) Los parámetros físico-químicos del agua subterránea cumplen con los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (D.S. N.º 004-2017-MINAM, Categoría 1A); sin embargo, la presencia de coliformes totales y *Escherichia coli* evidencia vulnerabilidad a contaminación microbiológica, por lo que el agua no es apta para consumo directo sin tratamiento.
- d) La integración de los parámetros geotécnicos, hidráulicos y de calidad del agua permitió clasificar el área de estudio en tres categorías de aptitud hidrogeológica: alta (Área A), media (Área B) y media-baja (Área C), identificándose el Área A como la zona más favorable para la perforación de pozos tubulares debido a sus mayores valores de transmisividad.
- e) Se formuló una propuesta técnica preliminar para el diseño de pozos tubulares, que incluye profundidad de perforación, diámetro, intervalos filtrantes, empaque de grava y

medidas de protección sanitaria. Asimismo, la aplicación del método de Theis permitió estimar radios de influencia entre 2.8 y 3.2 km, proporcionando criterios técnicos para el espaciamiento entre captaciones.

5.2 Recomendaciones

Durante la fase constructiva de nuevos pozos en el sector Huacariz, se realicen pruebas de bombeo de verificación en el pozo terminado, con el fin de ajustar el caudal definitivo de explotación y validar el espaciamiento entre captaciones, considerando la variabilidad hidráulica identificada entre las áreas A, B y C.

Debido a la presencia de contaminación microbiológica en las muestras analizadas, se recomienda incorporar sellos sanitarios, losas impermeables y sistemas de drenaje superficial adecuados en el diseño constructivo del pozo, con el fin de minimizar el riesgo de infiltración superficial y preservar la calidad del agua subterránea.

Establecer un programa de monitoreo periódico de niveles piezométricos y calidad del agua, con el propósito de garantizar la sostenibilidad de la explotación y detectar oportunamente posibles variaciones hidráulicas o sanitarias.

En futuras intervenciones que impliquen mayor densidad de captaciones, se recomienda que el espaciamiento entre pozos se determine considerando los radios de influencia estimados en el presente estudio, adoptando criterios conservadores para prevenir interferencias hidráulicas y garantizar la estabilidad del sistema acuífero

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alcocer, J., Ortega-Guerrero, M. A., & Mendoza, A. (2021). *Groundwater in Mexico: Hydrogeology, quality, and management*. Springer.

Ali, S., & Khan, A. (2020). Comparative performance of water wells in alluvial and fractured terrains in Punjab. *Journal of Groundwater Engineering*, 12(3), 145–158.

Alley, W. M., Reilly, T. E., & Franke, O. L. (2022). *Sustainability of groundwater resources*. U.S. Geological Survey.

American Public Health Association. (2022). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (24th ed.). APHA.

ASTM International. (2020). *Annual book of ASTM standards: Soil and rock (Section 4)*. ASTM International.

Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution* (2nd ed.). CRC Press.

Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2021). *Reglamento de perforación y construcción de pozos subterráneos*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego del Perú.

Bear, J. (2018). *Hydraulics of groundwater*. Dover Publications.

Carman, P. C. (1956). *Flow of gases through porous media*. Butterworths.

Chucuya, J., Salas, H., & Quispe, D. (2025). Groundwater dynamics and sustainable exploitation in heterogeneous granular aquifers. *Hydrogeology Journal*, 33(1), 115–131. <https://doi.org/10.1007/s10040-024-02815-6>

Cooper, H. H., & Jacob, C. E. (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Transactions of the American Geophysical Union*, 27(4), 526–534. <https://doi.org/10.1029/TR027i004p00526>

Custodio, E., & Llamas, M. R. (2017). *Hidrología subterránea* (2.ª ed.). Editorial Omega.

Custodio, E., & Llamas, M. R. (2020). *Hidrogeología subterránea*. Fundación Marcelino Botín.

Das, B. M., & Sivakugan, N. (2021). *Principles of geotechnical engineering* (9th ed.). Cengage Learning.

Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA). (2021). *Estándares de calidad de agua para consumo humano*. Ministerio de Salud del Perú.

Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA). (2023). *Norma sanitaria de la calidad del agua para consumo humano*. Ministerio de Salud del Perú.

Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (2020). *Physical and chemical hydrogeology* (3rd ed.). Wiley.

Driscoll, F. G. (2020). *Groundwater and wells* (3rd ed.). Johnson Screens.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2020). *Groundwater management in a changing climate: A guide for practitioners*. FAO.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2021). *Groundwater development and management*. FAO.

Fetter, C. W. (2018). *Applied hydrogeology* (4th ed.). Waveland Press.

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (2019). *Groundwater*. Prentice Hall.

González Ramírez, J. (2021). *Caracterización hidrogeotécnica de suelos para perforación de pozos profundos en zonas áridas del norte de México* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León].

- Houben, G., & Treskatis, C. (2021). *Groundwater wells: Design, construction, testing and maintenance* (2nd ed.). Springer.
- Houben, G., & Treskatis, C. (2022). *Water well rehabilitation and reconstruction*. CRC Press.
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). (2021). *Mapa geológico del cuadrángulo de Cajamarca*.
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). (2023). *Mapa geológico de la región Cajamarca*.
- Kruseman, G. P., & de Ridder, N. A. (2000). *Analysis and evaluation of pumping test data* (2nd ed.). ILRI.
- Kruseman, G. P., de Ridder, N. A., & Verweij, J. M. (2020). *Analysis and evaluation of pumping test data*. International Institute for Land Reclamation and Improvement.
- López García, J. (2015). *Caracterización y modelización numérica del flujo subterráneo en acuíferos: Aplicación de herramientas hidráulicas y simulación computacional* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid.
- Mamani Ticona, A. (2023). *Determinación geotécnica e hidroquímica de pozos tubulares en la ciudad de Juliaca* [Tesis de posgrado, Universidad Nacional del Altiplano].
- Ministerio del Ambiente. (2017). *Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM: Estándares de calidad ambiental para agua*. MINAM.
- Missteart, B., Banks, D., & Clark, L. (2020). *Water wells and boreholes* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Morales, A., & Ortega, R. (2023). Herramientas y criterios técnicos para la planificación y diseño hidrogeológico en contextos urbanos y rurales de América Latina. *Journal of Hydrogeology and Water Resources*, 8(1), 27–44.

Pardo-Igúzquiza, E., Durán-Valsero, J. J., & Pulido-Bosch, A. (2023). Advances in groundwater hydrology: Methods and applications. *Hydrogeology Journal*, 31(2), 215–233. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02513-5>

Ren, F., Chen, J., & Zhang, D. (2020). Analytical approaches for pumping test interpretation in confined aquifers. *Journal of Hydrology*, 588, 125041. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125041>

Ren, J., Liu, Y., & Zhang, H. (2020). Advances in well design for sustainable groundwater development. *Journal of Hydrology*, 586, 124892. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124892>

Ren, X., Zhang, L., & Wang, J. (2020). A review of effective porosity and its application in hydrogeology. *Water*, 12(24), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w12010024>

Ren, X., & Jin, M. (2022). Advances in pumping test analysis for aquifer parameter estimation: A review. *Journal of Hydrology*, 607, 127504. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127504>

Robles, M. A. (2021). *Sostenibilidad del agua subterránea y manejo integrado de acuíferos en zonas urbanas* (Tesis doctoral). Universidad Autónoma del Estado de México.

Rodríguez-Levy, R., Pérez, L., & Muñoz, J. (2023). Hydrogeological zoning and groundwater potential assessment in semi-arid basins. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 48, 101204. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101204>

Rogiers, B. (2014). *Caracterización multiescalar de acuíferos y modelación del flujo subterráneo aplicada a la gestión del recurso hídrico* (Tesis doctoral). Universidad de Lieja.

Rojas Tapia, M. (2022). *Evaluación estructural de pozos tubulares en suelos semiáridos del norte chileno* [Tesis de pregrado].

Roscoe, K. H., Fell, R., & Read, J. (2022). Granular filter and gravel pack design for groundwater wells. *Journal of Hydrology*, 610, 127863. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127863>

Salazar, F., Rodríguez, J., & Castro, R. (2020). Evaluación hidrogeológica de acuíferos en zonas altoandinas. *Revista Peruana de Geología y Minería*, 21(2), 55–70.

Sanz, D., Martínez, L., & Ramos, A. (2022). Hydraulic performance and sustainability of groundwater wells. *Hydrogeology Journal*, 30(3), 651–664.

Singhal, B. B. S., & Gupta, R. P. (2021). *Applied hydrogeology* (3rd ed.). Springer.

Singh, A., Kumar, R., & Mishra, S. (2020). Design considerations for efficient water wells. *Hydrogeology Journal*, 28(6), 1921–1935. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02174-1>

Theis, C. V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well. *Transactions of the American Geophysical Union*, 16, 519–524.

Ticona Arpi, L. (2021). *Estabilidad estructural de pozos perforados en suelos lacustres de Azángaro* [Tesis de maestría].

Vega, L., Martínez, J., & Ramírez, P. (2022). Metodologías modernas de planificación hidrogeológica en Latinoamérica: Un enfoque integral para la gestión sostenible del agua subterránea. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología*, 12(3), 145–162.

Vega, J., Chávez, C., & Morales, L. (2019). Caracterización hidroquímica de acuíferos en la región Cajamarca. *Journal of Environmental Hydrology*, 27(4), 1–12.

Velasco, A., & Capilla, J. E. (2019). Caracterización hidrogeológica del acuífero de la subcuenca baja del río Piura, Perú. *Revista Peruana de Geología e Ingeniería*, 32(2), 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.rpgi.2019.02.004>

World Health Organization (WHO). (2022). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed.). WHO.

Xu, J., & Wang, J. (2023). Spatial distribution and controlling factors of groundwater quality parameters in Yancheng area. *Sustainability*, 15(8), 6882. <https://doi.org/10.3390/su15086882>

Zhang, Y., Liu, Y., & Wang, H. (2021). Anthropogenic impacts on groundwater quality: A review. *Environmental Research*, 201, 111–118.

Zhou, Y., Zhang, D., & Li, W. (2022). Advances in aquifer parameter estimation for groundwater management. *Journal of Hydrology*, 612, 128283.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128283>

ANEXOS

ANEXO 1

Instrumentos de investigación y validación por juicio de expertos

INSTRUMENTO 1

FICHA DE REGISTRO DE CALICATAS

Tesis:

CARACTERIZACIÓN DE POZOS TUBULARES Y ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL SECTOR HUACARIZ, VALLE DE CAJAMARCA

Autor: CRISTHIAN SAUL LÓPEZ VILLANUEVA

Objetivo del instrumento

Definir parámetros técnicos preliminares para el diseño de un pozo tubular, sustentados en la caracterización hidrogeológica del área de estudio y en la diferenciación espacial de sus condiciones hidráulicas.

1. IDENTIFICACIÓN GENERAL

ÍTEM	INFORMACIÓN
Código de calicata	
Fecha de ejecución	
Zona hidrogeológica	Área A ☐ Área B ☐ Área C ☐
Coordenadas UTM (E)	
Coordenadas UTM (N)	
Altitud (m s.n.m.)	
Profundidad total de la calicata (m)	
Responsable del registro	

2. DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA

PROFUNDIDAD (M)	TIPO DE MATERIAL	TAMAÑO DOMINANTE (GRAVA / ARENA / LIMO / ARCILLA)	COLOR	OBSERVACIONES
0.00	–			
–				
–				

3. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS PRELIMINARES

PARÁMETRO	REGISTRO
Grado de compactación	☐ Suelto ☐ Medio ☐ Compacto
Presencia de finos	☐ Baja ☐ Media ☐ Alta
Evidencia de humedad / saturación	☐ Sí ☐ No

PARÁMETRO	REGISTRO		
Permeabilidad estimada	☐ Alta	☐ Media	☐ Baja
Porosidad efectiva estimada (n_e)			
Continuidad lateral del material	☐ Alta	☐ Media	☐ Baja

4. OBSERVACIONES TÉCNICAS

Observaciones relevantes

.....

.....

.....

5. FIRMA DEL RESPONSABLE DEL REGISTRO

NOMBRE	FIRMA	FECHA
--------	-------	-------

.....

FICHA DE EVALUACIÓN POR JUICIO DE EXPERTOS

Instrumento : FICHA DE REGISTRO DE CALICATAS

Tesis : CARACTERIZACIÓN DE POZOS TUBULARES Y ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL SECTOR HUACARIZ, VALLE DE CAJAMARCA

Autor : CRISTHIAN SAÚL LÓPEZ VILLANUEVA

1. OBJETIVO DEL INSTRUMENTO:

Registro de calicatas sobre las áreas con potencial para la perforación de pozos tubulares.

2. DATOS DEL EXPERTO

ÍTEM	INFORMACIÓN
Nombre completo	
Grado académico	Doctor ☐ Maestro ☐
Especialidad	
Institución de procedencia	
Años de experiencia profesional	
Correo electrónico	

3. CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Escala de valoración

VALOR	INTERPRETACIÓN
5	Muy adecuado
4	Adecuado
3	Medianamente adecuado
2	Poco adecuado
1	Inadecuado

4. EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO

Marque con una (X) la opción que considere más adecuada, según su criterio profesional, para cada uno de los aspectos evaluados del instrumento.

N°	CRITERIO	5	4	3	2	1
1	Claridad de los campos de registro	☐	☐	☐	☐	☐
2	Pertinencia de las variables incluidas	☐	☐	☐	☐	☐
3	Coherencia técnica del instrumento	☐	☐	☐	☐	☐
4	Adecuación para la caracterización hidrogeológica	☐	☐	☐	☐	☐
5	Facilidad de aplicación en campo	☐	☐	☐	☐	☐

5. OBSERVACIONES Y SUGERENCIAS DEL EXPERTO

.....

.....

.....

6. CONCLUSIÓN DEL EXPERTO

Marque una opción:

- ☐ Instrumento válido
- ☐ Instrumento válido con observaciones
- ☐ Instrumento no válido

7. VALIDACIÓN

Declaro haber revisado el instrumento *Ficha de registro de calicatas* y emitir mi evaluación conforme a criterios técnicos y académicos establecidos.

NOMBRE DEL EXPERTO	FIRMA	FECHA
--------------------	-------	-------

INSTRUMENTO 2

FICHA DE CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE ZONAS

Tesis:

CARACTERIZACIÓN DE POZOS TUBULARES Y ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL SECTOR HUACARIZ, VALLE DE CAJAMARCA

Autor: CRISTHIAN SAUL LOPEZ VILLANUEVA

Objetivo del instrumento:

Caracterizar las zonas del área de estudio a partir de sus condiciones hidrogeológicas y de calidad de agua, como base técnica para la identificación de áreas con potencial para la perforación de pozos tubulares.

6. IDENTIFICACIÓN DE LA ZONA

ÍTEM	INFORMACIÓN
Código de zona	Área A ☐ Área B ☐ Área C ☐
Calicatas asociadas	
Ubicación dentro del área de estudio	
Coordenadas representativas (UTM)	
Observaciones generales	

7. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Transmisividad promedio (T)	
Permeabilidad estimada (K)	
Porosidad efectiva promedio (n_e)	
Tipo de material dominante	
Presencia de finos	Baja ☐ Media ☐ Alta ☐
Grado de heterogeneidad del material	Baja ☐ Media ☐ Alta ☐
Continuidad lateral del material	Baja ☐ Media ☐ Alta ☐

8. CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD DE AGUA (RESUMEN)

ASPECTO	DESCRIPCIÓN
Resultados físico-químicos generales	
Observaciones microbiológicas	
Necesidad de tratamiento	Sí ☐ No ☐
Comentarios relevantes	

9. CONDICIONES PARA LA EXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO

ASPECTO	DESCRIPCIÓN
Comportamiento esperado frente a la extracción	
Riesgo de abatimiento	☐ Bajo ☐ Moderado ☐ Alto
Posible interferencia entre pozos	☐ Baja ☐ Media ☐ Alto
Restricciones técnicas identificadas	

10. INTERPRETACIÓN TÉCNICA INTEGRADA

Describir de manera sintética el comportamiento hidrogeológico de la zona, considerando almacenamiento, transmisión del agua subterránea y condiciones para el aprovechamiento del recurso.

.....

.....

.....

11. OBSERVACIONES ADICIONALES

Observaciones relevantes

.....

.....

.....

12. RESPONSABLE DEL REGISTRO

NOMBRE	FIRMA	FECHA
--------	-------	-------

.....

FICHA DE EVALUACIÓN POR JUICIO DE EXPERTOS

Instrumento : FICHA DE CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE ZONAS

Tesis : CARACTERIZACIÓN DE POZOS TUBULARES Y ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL SECTOR HUACARIZ, VALLE DE CAJAMARCA

Autor : CRISTHIAN SAUL LÓPEZ VILLANUEVA

8. OBJETIVO DE LA EVALUACIÓN

Valorar la claridad, coherencia, pertinencia y aplicabilidad del instrumento Ficha de caracterización hidrogeológica de zonas, mediante juicio de expertos.

9. DATOS DEL EXPERTO

ÍTEM	INFORMACIÓN
Nombre completo	
Grado académico	Doctor ☐ Maestro ☐
Especialidad	
Institución de procedencia	
Años de experiencia profesional	
Correo electrónico	

10. CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Escala de valoración

VALOR	INTERPRETACIÓN
5	Muy adecuado
4	Adecuado
3	Medianamente adecuado
2	Poco adecuado
1	Inadecuado

11. EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO

N°	CRITERIO	5	4	3	2	1
1	Claridad en la redacción de los ítems	☐	☐	☐	☐	☐
2	Coherencia interna del instrumento	☐	☐	☐	☐	☐
3	Pertinencia de los parámetros hidrogeológicos considerados	☐	☐	☐	☐	☐
4	Correspondencia con los objetivos de la tesis	☐	☐	☐	☐	☐
5	Adecuación del nivel técnico – científico	☐	☐	☐	☐	☐
6	Aplicabilidad al área de estudio	☐	☐	☐	☐	☐
7	Suficiencia de la información solicitada para la caracterización	☐	☐	☐	☐	☐

12. OBSERVACIONES Y SUGERENCIAS DEL EXPERTO

.....

.....

.....

13. CONCLUSIÓN DEL EXPERTO

Marque una opción:

- ☐ Instrumento válido
- ☐ Instrumento válido con observaciones
- ☐ Instrumento no válido

14. VALIDACIÓN

Declaro haber revisado el instrumento *Ficha de caracterización hidrogeológica de zonas* y emitir mi evaluación conforme a criterios técnicos y académicos.

NOMBRE DEL EXPERTO	FIRMA	FECHA
--------------------	-------	-------

INSTRUMENTO 3

FICHA DE DISEÑO PRELIMINAR DEL POZO TUBULAR

Tesis:

CARACTERIZACIÓN DE POZOS TUBULARES Y ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL SECTOR HUACARIZ, VALLE DE CAJAMARCA

Autor: CRISTHIAN SAUL LÓPEZ VILLANUEVA

Objetivo del instrumento:

Establecer los parámetros técnicos preliminares para el diseño de un pozo tubular, a partir de la caracterización hidrogeológica y la zonificación del área de estudio.

13. IDENTIFICACIÓN DEL POZO PROPUESTO

ÍTEM	INFORMACIÓN
Código del pozo	
Zona del área de estudio	Área A ☐ Área B ☐ Área C ☐
Coordenadas UTM (E)	
Coordenadas UTM (N)	
Altitud (m s.n.m.)	
Fecha de formulación	
Responsable	

14. CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS DE REFERENCIA

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Tipo de acuífero	
Litología predominante	
Transmisividad estimada (T)	
Permeabilidad estimada (K)	
Porosidad efectiva estimada (n_e)	
Nivel freático referencial	
Espesor saturado estimado	

15. PARÁMETROS PRELIMINARES DE PERFORACIÓN

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Profundidad total proyectada	m	
Diámetro de perforación	pulgadas	
Método de perforación sugerido	—	
Diámetro del entubado	pulgadas	
Material del entubado	—	

16. CONFIGURACIÓN PRELIMINAR DEL POZO

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Tramo ciego	
Tramo filtrante	
Tipo de filtro	
Abertura del filtro	
Empaque de grava	
Sello sanitario	
Cabezal del pozo	

17. PARÁMETROS OPERATIVOS REFERENCIALES

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Caudal de diseño referencial	L/s	
Régimen de bombeo sugerido	—	
Nivel dinámico estimado	m	

18. CONSIDERACIONES TÉCNICAS

Consideraciones relevantes

.....

.....

.....

19. RESPONSABLE DEL REGISTRO

NOMBRE	FIRMA	FECHA

FICHA DE EVALUACIÓN POR JUICIO DE EXPERTOS

Instrumento : FICHA DE DISEÑO PRELIMINAR DEL POZO TUBULAR

Tesis : CARACTERIZACIÓN DE POZOS TUBULARES Y ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL SECTOR HUACARIZ, VALLE DE CAJAMARCA

Autor : CRISTHIAN SAUL LOPEZ VILLANUEVA

OBJETIVO DE LA EVALUACIÓN:

Evaluar la claridad, coherencia técnica y aplicabilidad del instrumento *Ficha de diseño preliminar del pozo tubular*, en el marco de un diseño de carácter preliminar.

15. DATOS DEL EXPERTO

ÍTEM	INFORMACIÓN
Nombre completo	
Grado académico	Doctor ☐ Maestro ☐
Especialidad	
Institución de procedencia	
Años de experiencia profesional	
Correo electrónico	

16. CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Escala de valoración

VALOR	INTERPRETACIÓN
5	Muy adecuado
4	Adecuado
3	Medianamente adecuado
2	Poco adecuado
1	Inadecuado

17. EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO

N°	CRITERIO	5	4	3	2	1
1	Claridad en la definición de los parámetros	☐	☐	☐	☐	☐
2	Coherencia con la caracterización hidrogeológica	☐	☐	☐	☐	☐
3	Consistencia con la zonificación del área de estudio	☐	☐	☐	☐	☐
4	Adecuación del enfoque preliminar del diseño	☐	☐	☐	☐	☐
5	Viabilidad técnica del diseño propuesto	☐	☐	☐	☐	☐
6	Aplicabilidad práctica del instrumento	☐	☐	☐	☐	☐

18. OBSERVACIONES Y SUGERENCIAS DEL EXPERTO

.....

.....

.....

19. CONCLUSIÓN DEL EXPERTO

Marque una opción:

- ☐ Instrumento válido
- ☐ Instrumento válido con observaciones
- ☐ Instrumento no válido

20. VALIDACIÓN

Declaro haber revisado el instrumento Ficha de diseño preliminar del pozo tubular y emitir mi evaluación conforme a criterios técnicos y académicos.

NOMBRE DEL EXPERTO	FIRMA	FECHA
--------------------	-------	-------

Anexo2

Validación de instrumentos por expertos

FICHA DE EVALUACIÓN POR JUICIO DE EXPERTOS

Instrumento : FICHA DE REGISTRO DE CALICATAS

Tesis : CARACTERIZACIÓN DE POZOS TUBULARES Y ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL SECTOR HUACARIZ, VALLE DE CAJAMARCA

Autor : CRISTHIAN SAÚL LÓPEZ VILLANUEVA

1. OBJETIVO DEL INSTRUMENTO:

Registro de calicatas sobre las áreas con potencial para la perforación de pozos tubulares.

2. DATOS DEL EXPERTO

ÍTEM	INFORMACIÓN
Nombre completo	Jairo Isai Alvarez Villanueva
Grado académico	Doctor ☒ Maestro ☐
Especialidad	Ingeniería Hidráulica
Institución de procedencia	Universidad Nacional de Cajamarca
Años de experiencia profesional	14 años
Correo electrónico	jaisor33@gmail.com

3. CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Escala de valoración

VALOR	INTERPRETACIÓN
5	Muy adecuado
4	Adecuado
3	Medianamente adecuado
2	Poco adecuado
1	Inadecuado

4. EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO

Marque con una (X) la opción que considere más adecuada, según su criterio profesional, para cada uno de los aspectos evaluados del instrumento.

N°	CRITERIO	5	4	3	2	1
1	Claridad de los campos de registro	☒	☐	☐	☐	☐
2	Pertinencia de las variables incluidas	☒	☐	☐	☐	☐
3	Coherencia técnica del instrumento	☒	☐	☐	☐	☐
4	Adecuación para la caracterización hidrogeológica	☒	☐	☐	☐	☐
5	Facilidad de aplicación en campo	☒	☐	☐	☐	☐

5. OBSERVACIONES Y SUGERENCIAS DEL EXPERTO

Ninguna

6. CONCLUSIÓN DEL EXPERTO

Marque una opción:

- ☒ Instrumento válido
☐ Instrumento válido con observaciones
☐ Instrumento no válido

7. VALIDACIÓN

Declaro haber revisado el instrumento *Ficha de registro de calicatas* y emitir mi evaluación conforme a criterios técnicos y académicos establecidos.

NOMBRE DEL EXPERTO

FIRMA

FECHA

Jairo Isai Alvarez Villanueva

Agosto 2025


JAIRO ISAI ALVAREZ VILLANUEVA
Ingeniero Hidráulico
Reg. CIP. N° 218784

FICHA DE EVALUACIÓN POR JUICIO DE EXPERTOS

Instrumento : FICHA DE CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE ZONAS

Tesis : CARACTERIZACIÓN DE POZOS TUBULARES Y ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL SECTOR HUACARIZ, VALLE DE CAJAMARCA

Autor : CRISTHIAN SAUL LÓPEZ VILLANUEVA

1. OBJETIVO DE LA EVALUACIÓN

Valorar la claridad, coherencia, pertinencia y aplicabilidad del instrumento Ficha de caracterización hidrogeológica de zonas, mediante juicio de expertos.

2. DATOS DEL EXPERTO

ÍTEM	INFORMACIÓN
Nombre completo	Jairo Isai Alvaréz Villanueva
Grado académico	Doctor ☒ Maestro ☐
Especialidad	Ingeniero Hidráulico
Institución de procedencia	Universidad Nacional de Cajamarca
Años de experiencia profesional	11 años
Correo electrónico	jaisor88@gmail.com

3. CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Escala de valoración

VALOR	INTERPRETACIÓN
5	Muy adecuado
4	Adecuado
3	Medianamente adecuado
2	Poco adecuado
1	Inadecuado

4. EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO

N°	CRITERIO	5	4	3	2	1
1	Claridad en la redacción de los ítems	☒	☐	☐	☐	☐
2	Coherencia interna del instrumento	☒	☐	☐	☐	☐
3	Pertinencia de los parámetros hidrogeológicos considerados	☒	☐	☐	☐	☐
4	Correspondencia con los objetivos de la tesis	☒	☐	☐	☐	☐
5	Adecuación del nivel técnico – científico	☒	☐	☐	☐	☐
6	Aplicabilidad al área de estudio	☒	☐	☐	☐	☐
7	Suficiencia de la información solicitada para la caracterización	☒	☐	☐	☐	☐

4. OBSERVACIONES Y SUGERENCIAS DEL EXPERTO

Ninguna

5. CONCLUSIÓN DEL EXPERTO

Marque una opción:

- ☒ Instrumento válido
☐ Instrumento válido con observaciones
☐ Instrumento no válido

6. VALIDACIÓN

Declaro haber revisado el instrumento Ficha de diseño preliminar del pozo tubular y emitir mi evaluación conforme a criterios técnicos y académicos.

NOMBRE DEL EXPERTO

FIRMA

FECHA

Jairo Isai Alvarez Villanueva

Agosto 2025


JAIRO ISAI ALVAREZ VILLANUEVA
Ingeniero Hidráulico
Reg. CIP. N° 218784

FICHA DE EVALUACIÓN POR JUICIO DE EXPERTOS

Instrumento : FICHA DE DISEÑO PRELIMINAR DEL POZO TUBULAR

Tesis : CARACTERIZACIÓN DE POZOS TUBULARES Y ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL SECTOR HUACARIZ, VALLE DE CAJAMARCA

Autor : CRISTHIAN SAUL LOPEZ VILLANUEVA

OBJETIVO DE LA EVALUACIÓN:

Evaluar la claridad, coherencia técnica y aplicabilidad del instrumento *Ficha de diseño preliminar del pozo tubular*, en el marco de un diseño de carácter preliminar.

1. DATOS DEL EXPERTO

ÍTEM	INFORMACIÓN
Nombre completo	Jairo Isai Placer Villanueva
Grado académico	Doctor ☒ Maestro ☐
Especialidad	Ingeniería Hidráulica
Institución de procedencia	Universidad Nacional de Cajamarca
Años de experiencia profesional	11 años
Correo electrónico	jaisorfer@gmail.com

2. CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Escala de valoración

VALOR	INTERPRETACIÓN
5	Muy adecuado
4	Adecuado
3	Medianamente adecuado
2	Poco adecuado
1	Inadecuado

3. EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO

N°	CRITERIO	5	4	3	2	1
1	Claridad en la definición de los parámetros	☒	☐	☐	☐	☐
2	Coherencia con la caracterización hidrogeológica	☒	☐	☐	☐	☐
3	Consistencia con la zonificación del área de estudio	☒	☐	☐	☐	☐
4	Adecuación del enfoque preliminar del diseño	☒	☐	☐	☐	☐
5	Viabilidad técnica del diseño propuesto	☒	☐	☐	☐	☐
6	Aplicabilidad práctica del instrumento	☒	☐	☐	☐	☐

5. OBSERVACIONES Y SUGERENCIAS DEL EXPERTO

Ninguna -

6. CONCLUSIÓN DEL EXPERTO

Marque una opción:

- ☒ Instrumento válido
☐ Instrumento válido con observaciones
☐ Instrumento no válido

7. VALIDACIÓN

Declaro haber revisado el instrumento *Ficha de caracterización hidrogeológica de zonas* y emitir mi evaluación conforme a criterios técnicos y académicos.

NOMBRE DEL EXPERTO	FIRMA	FECHA
Jairo Isai Alvarez Villanueva	 JAIRO ISAI ALVAREZ VILLANUEVA Ingeniero Hidráulico Reg. CIP. N° 218784	Agosto 2025

FICHA DE EVALUACIÓN POR JUICIO DE EXPERTOS

Instrumento : FICHA DE REGISTRO DE CALICATAS

Tesis : CARACTERIZACIÓN DE POZOS TUBULARES Y ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL SECTOR HUACARIZ, VALLE DE CAJAMARCA

Autor : CRISTHIAN SAÚL LÓPEZ VILLANUEVA

1. OBJETIVO DEL INSTRUMENTO:

Registro de calicatas sobre las áreas con potencial para la perforación de pozos tubulares.

2. DATOS DEL EXPERTO

ÍTEM	INFORMACIÓN
Nombre completo	Azucena Chavez Collantes
Grado académico	Doctor ☒ Maestro ☐
Especialidad	Ingeniería Ambiental
Institución de procedencia	Universidad Nacional de Tregillo
Años de experiencia profesional	8 años
Correo electrónico	achavezc22@gmail.com

3. CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Escala de valoración

VALOR	INTERPRETACIÓN
5	Muy adecuado
4	Adecuado
3	Medianamente adecuado
2	Poco adecuado
1	Inadecuado

4. EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO

Marque con una (X) la opción que considere más adecuada, según su criterio profesional, para cada uno de los aspectos evaluados del instrumento.

N°	CRITERIO	5	4	3	2	1
1	Claridad de los campos de registro	☒	☐	☐	☐	☐
2	Pertinencia de las variables incluidas	☒	☐	☐	☐	☐
3	Coherencia técnica del instrumento	☒	☐	☐	☐	☐
4	Adecuación para la caracterización hidrogeológica	☒	☐	☐	☐	☐
5	Facilidad de aplicación en campo	☒	☐	☐	☐	☐

5. OBSERVACIONES Y SUGERENCIAS DEL EXPERTO

Ninguna

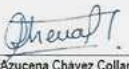
6. CONCLUSIÓN DEL EXPERTO

Marque una opción:

- ☒ Instrumento válido
☐ Instrumento válido con observaciones
☐ Instrumento no válido

7. VALIDACIÓN

Declaro haber revisado el instrumento *Ficha de caracterización hidrogeológica de zonas* y emitir mi evaluación conforme a criterios técnicos y académicos.

NOMBRE DEL EXPERTO	FIRMA	FECHA
Azucena Chavez Collantes	 Dra. Azucena Chavez Collantes CIP N°203685	Agosto 2025

FICHA DE EVALUACIÓN POR JUICIO DE EXPERTOS

Instrumento : FICHA DE CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE ZONAS

Tesis : CARACTERIZACIÓN DE POZOS TUBULARES Y ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL SECTOR HUACARIZ, VALLE DE CAJAMARCA

Autor : CRISTHIAN SAUL LÓPEZ VILLANUEVA

1. OBJETIVO DE LA EVALUACIÓN

Valorar la claridad, coherencia, pertinencia y aplicabilidad del instrumento Ficha de caracterización hidrogeológica de zonas, mediante juicio de expertos.

2. DATOS DEL EXPERTO

ÍTEM	INFORMACIÓN
Nombre completo	Azuena Chavez Collantes
Grado académico	Doctor ☒ Maestro ☐
Especialidad	Ingeniería Ambiental
Institución de procedencia	Universidad Nacional de Tarma
Años de experiencia profesional	8 años
Correo electrónico	a-chavez22@gmail.com

3. CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Escala de valoración

VALOR	INTERPRETACIÓN
5	Muy adecuado
4	Adecuado
3	Medianamente adecuado
2	Poco adecuado
1	Inadecuado

4. EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO

N°	CRITERIO	5	4	3	2	1
1	Claridad en la redacción de los ítems	☒	☐	☐	☐	☐
2	Coherencia interna del instrumento	☒	☐	☐	☐	☐
3	Pertinencia de los parámetros hidrogeológicos considerados	☒	☐	☐	☐	☐
4	Correspondencia con los objetivos de la tesis	☒	☐	☐	☐	☐
5	Adecuación del nivel técnico – científico	☒	☐	☐	☐	☐
6	Aplicabilidad al área de estudio	☒	☐	☐	☐	☐
7	Suficiencia de la información solicitada para la caracterización	☒	☐	☐	☐	☐

5. OBSERVACIONES Y SUGERENCIAS DEL EXPERTO

Ninguna

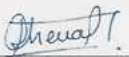
6. CONCLUSIÓN DEL EXPERTO

Marque una opción:

- ☒ Instrumento válido
☐ Instrumento válido con observaciones
☐ Instrumento no válido

7. VALIDACIÓN

Declaro haber revisado el instrumento *Ficha de caracterización hidrogeológica de zonas* y emitir mi evaluación conforme a criterios técnicos y académicos.

NOMBRE DEL EXPERTO	FIRMA	FECHA
Azucena Chavez Collantes	 Dra. Azucena Chávez Collantes CIP N°203685	Agosto 2025

FICHA DE EVALUACIÓN POR JUICIO DE EXPERTOS

Instrumento : FICHA DE DISEÑO PRELIMINAR DEL POZO TUBULAR

Tesis : CARACTERIZACIÓN DE POZOS TUBULARES Y ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL SECTOR HUACARIZ, VALLE DE CAJAMARCA

Autor : CRISTHIAN SAUL LOPEZ VILLANUEVA

OBJETIVO DE LA EVALUACIÓN:

Evaluar la claridad, coherencia técnica y aplicabilidad del instrumento *Ficha de diseño preliminar del pozo tubular*, en el marco de un diseño de carácter preliminar.

1. DATOS DEL EXPERTO

ÍTEM	INFORMACIÓN
Nombre completo	Azucena Chávez Collantes
Grado académico	Doctor ☒ Maestro ☐
Especialidad	Ingeniería Ambiental
Institución de procedencia	Universidad Nacional de Trujillo
Años de experiencia profesional	8 años
Correo electrónico	achavezc22@gmail.com

2. CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Escala de valoración

VALOR	INTERPRETACIÓN
5	Muy adecuado
4	Adecuado
3	Medianamente adecuado
2	Poco adecuado
1	Inadecuado

3. EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO

N°	CRITERIO	5	4	3	2	1
1	Claridad en la definición de los parámetros	☒	☐	☐	☐	☐
2	Coherencia con la caracterización hidrogeológica	☒	☐	☐	☐	☐
3	Consistencia con la zonificación del área de estudio	☒	☐	☐	☐	☐
4	Adecuación del enfoque preliminar del diseño	☒	☐	☐	☐	☐
5	Viabilidad técnica del diseño propuesto	☒	☐	☐	☐	☐
6	Aplicabilidad práctica del instrumento	☒	☐	☐	☐	☐

5. OBSERVACIONES Y SUGERENCIAS DEL EXPERTO

Ninguna

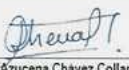
6. CONCLUSIÓN DEL EXPERTO

Marque una opción:

- ☒ Instrumento válido
☐ Instrumento válido con observaciones
☐ Instrumento no válido

7. VALIDACIÓN

Declaro haber revisado el instrumento *Ficha de caracterización hidrogeológica de zonas* y emitir mi evaluación conforme a criterios técnicos y académicos.

NOMBRE DEL EXPERTO	FIRMA	FECHA
<i>Azucena Chavez Collantes</i>	 Dra. Azucena Chávez Collantes CIP N°203685	<i>Agosto 2025</i>

FICHA DE EVALUACIÓN POR JUICIO DE EXPERTOS

Instrumento : FICHA DE REGISTRO DE CALICATAS

Tesis : CARACTERIZACIÓN DE POZOS TUBULARES Y ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL SECTOR HUACARIZ, VALLE DE CAJAMARCA

Autor :

1. OBJETIVO DEL INSTRUMENTO:

Registro de calicatas sobre las áreas con potencial para la perforación de pozos tubulares.

2. DATOS DEL EXPERTO

ÍTEM	INFORMACIÓN
Nombre completo	Carlos Tapia Cabrera .
Grado académico	Doctor ☐ Maestro ☒
Especialidad	Geotecnia
Institución de procedencia	Universidad Nacional Autónoma de Chile.
Años de experiencia profesional	5 a
Correo electrónico	ctapia.C@unuch. edu .pe .

3. CRITERIOS DE EVALUACIÓN

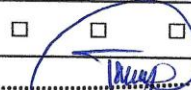
Escala de valoración

VALOR	INTERPRETACIÓN
5	Muy adecuado
4	Adecuado
3	Medianamente adecuado
2	Poco adecuado
1	Inadecuado

4. EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO

Marque con una (X) la opción que considere más adecuada, según su criterio profesional, para cada uno de los aspectos evaluados del instrumento.

N°	CRITERIO	5	4	3	2	1
1	Claridad de los campos de registro	☒	☐	☐	☐	☐
2	Pertinencia de las variables incluidas	☒	☐	☐	☐	☐
3	Coherencia técnica del instrumento	☒	☐	☐	☐	☐
4	Adecuación para la caracterización hidrogeológica	☒	☐	☐	☐	☐
5	Facilidad de aplicación en campo	☒	☐	☐	☐	☐


 CARLOS TAPIA CABRERA
 INGENIERO CIVIL
 REGISTRO COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERU N° 188756

5. OBSERVACIONES Y SUGERENCIAS DEL EXPERTO

Ninguna.

6. CONCLUSIÓN DEL EXPERTO

Marque una opción:

- ☒ Instrumento válido
☐ Instrumento válido con observaciones
☐ Instrumento no válido

7. VALIDACIÓN

Declaro haber revisado el instrumento *Ficha de registro de calicatas* y emitir mi evaluación conforme a criterios técnicos y académicos establecidos.

NOMBRE DEL EXPERTO

FIRMA

FECHA

Msc. Ing. Carlos
Tapiá Cabrera.


CARLOS TAPIA CABRERA
INGENIERO CIVIL
ASOCIADO COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERU N° 180758

29.06.25.

FICHA DE EVALUACIÓN POR JUICIO DE EXPERTOS

Instrumento : FICHA DE CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE ZONAS

Tesis : CARACTERIZACIÓN DE POZOS TUBULARES Y ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL SECTOR HUACARIZ, VALLE DE CAJAMARCA

Autor :

1. OBJETIVO DE LA EVALUACIÓN

Valorar la claridad, coherencia, pertinencia y aplicabilidad del instrumento Ficha de caracterización hidrogeológica de zonas, mediante juicio de expertos.

2. DATOS DEL EXPERTO

ÍTEM	INFORMACIÓN
Nombre completo	Carlos Tapia Cabrera.
Grado académico	Doctor ☐ Maestro ☒
Especialidad	Geotécnica
Institución de procedencia	Universidad Nacional de Huancayo de Chota.
Años de experiencia profesional	5 a
Correo electrónico	ctapia@unach.edu.pe.

3. CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Escala de valoración

VALOR	INTERPRETACIÓN
5	Muy adecuado
4	Adecuado
3	Medianamente adecuado
2	Poco adecuado
1	Inadecuado

4. EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO

N°	CRITERIO	5	4	3	2	1
1	Claridad en la redacción de los ítems	☒	☐	☐	☐	☐
2	Coherencia interna del instrumento	☒	☐	☐	☐	☐
3	Pertinencia de los parámetros hidrogeológicos considerados	☒	☐	☐	☐	☐
4	Correspondencia con los objetivos de la tesis	☒	☐	☐	☐	☐
5	Adecuación del nivel técnico – científico	☒	☐	☐	☐	☐
6	Aplicabilidad al área de estudio	☒	☐	☐	☐	☐
7	Suficiencia de la información solicitada para la caracterización	☒	☐	☐	☐	☐

.....
CARLOS TAPIA CABRERA
INGENIERO CIVIL
REGISTRO COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERU N° 18000

4. OBSERVACIONES Y SUGERENCIAS DEL EXPERTO

Ninguna.

5. CONCLUSIÓN DEL EXPERTO

Marque una opción:

- ☒ Instrumento válido
☐ Instrumento válido con observaciones
☐ Instrumento no válido

6. VALIDACIÓN

Declaro haber revisado el instrumento Ficha de diseño preliminar del pozo tubular y emitir mi evaluación conforme a criterios técnicos y académicos.

NOMBRE DEL EXPERTO	FIRMA	FECHA
<i>Abel Jay Carlos Tapiz Cabrera</i>	 CARLOS TAPIZ CABRERA INGENIERO CIVIL REGISTRO NACIONAL DE INGENIEROS DEL PERÚ N° 12879	29.06.25.

FICHA DE EVALUACIÓN POR JUICIO DE EXPERTOS

Instrumento : FICHA DE DISEÑO PRELIMINAR DEL POZO TUBULAR

Tesis : CARACTERIZACIÓN DE POZOS TUBULARES Y ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL SECTOR HUACARIZ, VALLE DE CAJAMARCA

Autor :

OBJETIVO DE LA EVALUACIÓN:

Evaluar la claridad, coherencia técnica y aplicabilidad del instrumento *Ficha de diseño preliminar del pozo tubular*, en el marco de un diseño de carácter preliminar.

1. DATOS DEL EXPERTO

ÍTEM	INFORMACIÓN
Nombre completo	Carlos Tapiz Cabrera
Grado académico	Doctor ☐ Maestro ☒
Especialidad	Geotecnia
Institución de procedencia	Universidad Nacional de Huancayo
Años de experiencia profesional	5 años
Correo electrónico	ctapizc@unahc.edu.pe

2. CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Escala de valoración

VALOR	INTERPRETACIÓN
5	Muy adecuado
4	Adecuado
3	Medianamente adecuado
2	Poco adecuado
1	Inadecuado

3. EVALUACIÓN DEL INSTRUMENTO

N°	CRITERIO	5	4	3	2	1
1	Claridad en la definición de los parámetros	☒	☐	☐	☐	☐
2	Coherencia con la caracterización hidrogeológica	☒	☐	☐	☐	☐
3	Consistencia con la zonificación del área de estudio	☒	☐	☐	☐	☐
4	Adecuación del enfoque preliminar del diseño	☒	☐	☐	☐	☐
5	Viabilidad técnica del diseño propuesto	☒	☐	☐	☐	☐
6	Aplicabilidad práctica del instrumento	☒	☐	☐	☒	☐

CARLOS TAPIZ CABRERA
INGENIERO CIVIL
REGISTRO NACIONAL DE INGENIEROS DEL PERÚ

5. OBSERVACIONES Y SUGERENCIAS DEL EXPERTO

Ninguna

6. CONCLUSIÓN DEL EXPERTO

Marque una opción:

- ☒ Instrumento válido
☐ Instrumento válido con observaciones
☐ Instrumento no válido

7. VALIDACIÓN

Declaro haber revisado el instrumento *Ficha de caracterización hidrogeológica de zonas* y emitir mi evaluación conforme a criterios técnicos y académicos.

NOMBRE DEL EXPERTO	FIRMA	FECHA
Msc. Ing. Carlos Tapia Cabrera	 CARLOS TAPIA CABRERA INGENIERO CIVIL REGISTRO COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERU Nº 10879	29.06.25.

Anexo 3

Resultados del laboratorio del agua.



LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA
GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL- DA CON REGISTRO N° LE-084



Registro N° LE - 084

IE 10251485

INFORME DE DATOS DEL CLIENTE N°

Razon Social/Nombre	CRISTHIAN SAÚL LÓPEZ VILLANUEVA		
Dirección	Jr. Misión Japonesa N° 304, Cajamarca.		
Persona de contacto	CRISTHIAN SAÚL LÓPEZ VILLANUEVA	Correo electrónico	cristhianlv7@gmail.com

DATOS DE LA MUESTRA

Responsable de la toma de muestra	Cliente	Plan de muestreo N°	Matriz	Agua
Procedimiento de Muestreo				Categorías
Tipo de Muestreo	Puntual		Natural	☒ Salina
Número de puntos de muestreo	03		Residual	☐ Uso y Consumo Humano
Ensayos solicitados	Químicos Instrumentales- Fisicoquímicos- Microbiológicos			
Breve descripción del estado de la muestra	Las muestras cumplen con los requisitos de volumen, preservación y conservación			
Referencia de la Muestra:	Huacariz - Cajamarca			
Observaciones:				

DATOS DE CONTROL DEL LABORATORIO

N° Contrato	SC-1404-2025	Cadena de Custodia	CC - 1485 - 25
Fecha y Hora de Recepción	27.10.25	15:22	Inicio de Ensayo
Reporte Resultado	05.11.25	15:35	Lugar de ejecución de ensayos
			Laboratorio Regional del Agua (LRA)- Cajamarca



Edder Neyra Jaico
Responsable de Laboratorio
CIP: 147028

LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA

Cajamarca, 05 de Noviembre de 2025

*"LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA - GOBIERNO REGIONAL DE CAJAMARCA ASEGURA LA CONFIABILIDAD DE LOS RESULTADOS PRESENTADOS EN ESTE INFORME DE ENSAYO"

JR. LUIS ALBERTO SÁNCHEZ S.N. URB. EL BOSQUE, CAJAMARCA - PERÚ

e-mail: laboratoriodelagua@regioncajamarca.gob.pe / laboratoriodelagua@hotmail.com / Telef.: 076 - 600040 - anexo 1140



LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA

GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE-084



Registro N° LE - 084

IE 10251485

ENSAYOS

INFORME DE ENSAYO N°

Químicos Instrumentales

Código de la Muestra	M-01	M-02	M-03			
Código Laboratorio	10251485-01	10251485-02	10251485-03			
Matriz	Agua Natural-Subterránea (Pozo)	Agua Natural-Subterránea (Pozo)	Agua Natural-Subterránea (Pozo)			
Fecha- Hora Muestreo	27.10.25 09:18	27.10.25 10:10	27.10.25 11:43			
Localización de la Muestra	Huacari	Huacari	Huacari			
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados de Metales Totales			
Plata (Ag)	mg/L	0.019	<LCM	<LCM	<LCM	-
Aluminio (Al)	mg/L	0.023	<LCM	<LCM	<LCM	-
Arsénico (As)	mg/L	0.005	<LCM	<LCM	<LCM	-
Boro (B)	mg/L	0.026	<LCM	<LCM	<LCM	-
Bario (Ba)	mg/L	0.004	0.183	0.068	0.124	-
Berilio (Be)	mg/L	0.003	<LCM	<LCM	<LCM	-
Bismuto (Bi)	mg/L	0.016	<LCM	<LCM	<LCM	-
Calcio (Ca)	mg/L	0.124	113.0	145.5	188.1	-
Cadmio (Cd)	mg/L	0.002	<LCM	<LCM	<LCM	-
Cerio (Ce)	mg/L	0.004	<LCM	<LCM	<LCM	-
Cobalto (Co)	mg/L	0.002	<LCM	<LCM	<LCM	-
Cromo (Cr)	mg/L	0.003	<LCM	<LCM	<LCM	-
Cobre (Cu)	mg/L	0.018	<LCM	<LCM	<LCM	-
Hierro (Fe)	mg/L	0.023	<LCM	<LCM	<LCM	-
Potasio (K)	mg/L	0.051	9.434	1.389	6.715	-
Litio (Li)	mg/L	0.005	<LCM	<LCM	<LCM	-
Magnesio (Mg)	mg/L	0.019	9.394	12.05	16.22	-
Manganeso (Mn)	mg/L	0.003	<LCM	<LCM	<LCM	-
Molibdeno (Mo)	mg/L	0.002	<LCM	<LCM	<LCM	-
Sodio (Na)	mg/L	0.026	15.25	28.43	44.23	-
Níquel (Ni)	mg/L	0.006	<LCM	<LCM	<LCM	-
Fósforo (P)	mg/L	0.024	<LCM	<LCM	<LCM	-
Plomo (Pb)	mg/L	0.004	<LCM	<LCM	<LCM	-
Azufre (S)	mg/L	0.091	20.69	44.57	96.26	-
Antimonio (Sb)	mg/L	0.005	<LCM	<LCM	<LCM	-
Selenio (Se)	mg/L	0.007	<LCM	<LCM	<LCM	-
Silicio (Si)	mg/L	0.104	7.586	6.290	5.995	-
Estaño (Sn)	mg/L	0.007	<LCM	<LCM	<LCM	-
Estroncio (Sr)	mg/L	0.003	0.67	0.66	0.94	-
Titanio (Ti)	mg/L	0.004	<LCM	<LCM	<LCM	-
Talio (Tl)	mg/L	0.003	<LCM	<LCM	<LCM	-
Uranio (U)	mg/L	0.004	<LCM	<LCM	<LCM	-
Vanadio (V)	mg/L	0.004	<LCM	<LCM	<LCM	-
Zinc (Zn)	mg/L	0.018	<LCM	<LCM	<LCM	-
Silice (SiO2)	mg/L	0.223	16.26	13.48	12.85	-
Mercurio (Hg)	mg/L	0.0002	<LCM	<LCM	<LCM	-

Legenda: LCM: Límite de Cuantificación del Método, valor <LCM significa que la concentración del analito es mínima (trazas)

Cajamarca, 05 de Noviembre de 2025

*LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA - GOBIERNO REGIONAL DE CAJAMARCA ASEGURA LA CONFIABILIDAD DE LOS RESULTADOS PRESENTADOS EN ESTE INFORME DE ENSAYO
JR. LUIS ALBERTO SÁNCHEZ S/N. URB. EL BOSQUE, CAJAMARCA - PERÚ
e-mail: laboratorio@regioncajamarca.gob.pe / laboratorio@regioncajamarca.gob.pe / Teléf.: 076 - 806040 - anexo 1140



LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA

GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LE-084



INACAL
DA - Perú
Laboratorio de Agua
Acreditado

Registro N° LE - 084

IE 10251485

INFORME DE ENSAYO

Químicos Instrumentales- Físicoquímicos

ENSAYOS	M-01	M-02	M-03	LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA	LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA	LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA
Código de la Muestra	M-01	M-02	M-03	-	-	-
Código Laboratorio	10251485-01	10251485-02	10251485-03	-	-	-
Matriz	Agua Natural-Subterránea (Pozo)	Agua Natural-Subterránea (Pozo)	Agua Natural-Subterránea (Pozo)	-	-	-
Fecha- Hora Muestreo	27.10.25 09.18	27.10.25 10.10	27.10.25 11.43	-	-	-
Localización de la Muestra	Huacarz	Huacarz	Huacarz	-	-	-
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados de Químicos Instrumentales y Físicoquímicos			
Fluoruro (F ⁻)	mg/L	0.038	<LCM	<LCM	<LCM	-
Cloruro (Cl ⁻)	mg/L	0.065	25.27	47.11	73.30	-
Nitrato (NO ₃ ⁻)	mg/L	0.050	<LCM	<LCM	<LCM	-
Bromuro (Br ⁻)	mg/L	0.035	<LCM	<LCM	<LCM	-
Nitrato (NO ₃ ⁻)	mg/L	0.064	1.588	2.471	5.361	-
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	mg/L	0.070	63.36	136.5	294.8	-
Fosfato (PO ₄ ³⁻)	mg/L	0.032	<LCM	<LCM	<LCM	-
pH a 25°C	pH	NA	7.18	7.52	7.05	-
Conductividad a 25°C	µS/cm	NA	894.0	1121	1458	-
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	2.50	530.4	671.6	851.9	-
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	1.04	321.6	414.0	537.8	-

Legenda: LCM: Límite de Cuantificación del Método, valor <LCM significa que la concentración del analito es mínima (trazas)

Cajamarca, 05 de Noviembre de 2025

LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA

GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA

RESPONSABLE LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA

JR. LUIS ALBERTO SÁNCHEZ S/N. URB. EL BOSQUE, CAJAMARCA - PERÚ

e-mail: laboratorio@delagua.gob.pe | laboratorio@delagua@hotmail.com | Telf: 076 - 600440 - anexo 1140



LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA
GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL- DA
CON REGISTRO N° LE-084



INACAL
DA - Perú
Laboratorio de Ensayo
Acreditado

Registro N° LE - 084

IE 10251485

ENSAYOS

INFORME DE ENSAYO N° Microbiológicos

Código de la Muestra	M-01	M-02	M-03			
Código Laboratorio	10251485-01	10251485-02	10251485-03	-	-	-
Matriz	Agua Natural-Subterránea (Pozo)	Agua Natural-Subterránea (Pozo)	Agua Natural-Subterránea (Pozo)	-	-	-
Fecha- Hora Muestreo	27.10.25 09:18	27.10.25 10:10	27.10.25 11:43	-	-	-
Localización de la Muestra	Huacariz	Huacariz	Huacariz	-	-	-
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados Microbiológicos			
Coliformes Totales	NMP/ 100mL	1.8	220	12x10 ²	130	-
Escherichia coli	NMP/ 100mL	1.8	33	170	17	-

Nota: Los Resultados <1.0, <1.8, <1.1 y <1: significa que el resultado es equivalente a cero, no se aprecian estructuras biológicas en la muestra. VE, valor estimado



LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA
Cajamarca, 05 de Noviembre de 2025

LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA - GOBIERNO REGIONAL DE CAJAMARCA ASEGURA LA CONFIABILIDAD DE LOS RESULTADOS PRESENTADOS EN ESTE INFORME DE ENSAYO*
JR. LUIS ALBERTO SÁNCHEZ S/N. URB. EL BOSQUE, CAJAMARCA - PERÚ
e-mail: laboratorio@regionalcajamarca.gob.pe / laboratorio@delegas@hotmail.com / Telf: 076 - 600640 - anexo 1140

Página: 4 de 5

141



LABORATORIO REGIONAL
DEL AGUA

GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL- DA
CON REGISTRO N° LE-084



INACAL
DA - Perú
Acreditado
Registro N° LE - 084

IE 10251485

INFORME DE ENSAYO N°

Ensayo	Unidad	Método de Ensayo Utilizado
Metales Disueltos y Totales por ICP-OES (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Ce, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Hg, K, Li, Na, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Si, SiO2, Sn, Sr, Ti, Tl, U, V, Zn)	mg/L	EPA Method 200.7 Rev. 4.4, 1994. (Validado-Modificado) 2020 Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry
Mercurio por AAS-CV	mg/L	EPA Method 245.1 Rev. 3.0, 1994. (VALIDADO - Modificado) 2014. Determination of mercury in water by cold vapor atomic absorption spectrometry
Aniones (Fluoruro, Cloruro, Nitrato, Bromuro, Sulfato, Nitrito, Fosfato, N-NO2, N-NO3, P-P04, N-NO2+N-NO3)	mg/L	EPA Method 300.1 Rev. 1.0 1997 (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance). 2017. Determination of Inorganic Anions in Drinking Water by Ion Chromatography.
Potencial de Hidrógeno (pH) a 25°C	pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 24 th Ed. 2023. pH Value. Electrometric Method
Conductividad a 25°C	uS/cm	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B, 24 th Ed. 2023. Conductivity. Laboratory Method
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 A, C, 24 th Ed. 2023. Solids. Total Dissolved Solids Dried at 180 oC
Sólidos Suspensos Totales	mg/L	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 A, D, 24 th Ed. 2023. Solids. Total Suspended Solids Dried at 103 - 105 °C
Dureza Total	mg CaCO3 /L	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2340 C, 24 th Ed. 2023. Hardness EDTA Titrimetric Method
Coliformes Totales	NMP/100mL	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 A,B,C, 24 th Ed. 2023. Multiple - Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Standard Total Coliform Fermentation Technique
Escherichia coli	NMP/100mL	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 A,B,C,E,G 24 th Ed. 2023. Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Other Escherichia coli Procedures

NOTAS FINALES

✓ "Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida NTP-ISO/IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio".

✓ "Este informe de ensayo/certificado de calibración/informe de resultados, al estar en el marco de la acreditación del INACAL – DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC".

✓ LRA-GRC ASEGURA LA CONFIABILIDAD Y CONFIDENCIALIDAD DE LOS RESULTADOS PRESENTADOS EN ESTE INFORME DE ENSAYO.

✓ Los resultados indicados en este informe corresponden única y exclusivamente a las muestras recibidas y sometidas a ensayo o realizadas en campo por el Laboratorio Regional del Agua, según cotización y cadena de custodia.

✓ Cuando la muestra es tomada por el cliente: El Laboratorio Regional del Agua no se responsabiliza por la exactitud o la verificación de la información sobre la muestra. Los resultados del ensayo están basados en la muestra tal como fue recibida y en los datos proporcionados por el cliente.

✓ La reproducción parcial de este informe no está permitida sin la autorización del Laboratorio Regional del Agua. Este informe no será válido si presenta tachaduras o enmiendas.

✓ Las muestras sobre las que se realicen los ensayos se conservarán en Laboratorio Regional del Agua de acuerdo al método de ensayo y por un tiempo máximo de 10 días después de la emisión de la informe de ensayo; luego serán eliminadas salvo pedido expreso del cliente.

✓ Este documento al ser emitido sin el símbolo de acreditación, no se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por INACAL-DA.

✓ Se prohíbe el uso del símbolo de acreditación o la declaración de condición de acreditado emitida en este informe, por parte del cliente.

✓ El código QR permitirá la visualización y descarga del documento (según oficio múltiple N° 020-2024-INACAL/DA), por lo que, una vez emitido el informe de ensayo, queda bajo responsabilidad del cliente a quien le da acceso dicho código; además, el link vinculado al código QR también se proporcionará al repositorio del INACAL (según oficio múltiple N° 020-2024-INACAL/DA) para consultas sobre autenticaciones, falsificaciones o adulteraciones del presente documento.

✓ Le recordamos que dispone de 30 días calendario desde la fecha de emisión de este informe para presentar cualquier queja, reclamo o solicitar correcciones. Pasado este plazo, no se aceptarán modificaciones ni reclamaciones asociadas al presente informe.

--- Fin del documento ---

Código del Formato: P-23-F01 Ver: 04 Fecha: 06/05/2025

Cajamarca, 05 de Noviembre de 2025

LABORATORIO REGIONAL
DEL AGUA



GOBIERNO REGIONAL
CAJAMARCA
LABORATORIO REGIONAL
DEL AGUA

LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA - GOBIERNO REGIONAL DE CAJAMARCA ASEGURA LA CONFIABILIDAD DE LOS RESULTADOS PRESENTADOS EN ESTE INFORME DE ENSAYO

DR. LUIS ALBERTO SANCHEZ SN. URB. EL BOSQUE, CAJAMARCA - PERU

e-mail: laboratorio@delagua@regioncajamarca.gob.pe / laboratorio@delagua@hotmail.com / Telef: 076 - 600040 - anexo 1140

Página: 5 de 5

142

Anexo 4

Trabajo de campo para la obtención de muestras de agua:



Etiquetado de muestras
de agua subterránea



Obtención de muestras de agua
subterránea, imagen con poblador local



Zona típica de Huacariz



Pozo típico de la zona de Huacariz

Anexo 5

Trabajo de laboratorio de mecánica de suelos:



Trabajo de límites de consistencia



Muestra al horno



Compactación de la muestra



Calicata típica utilizada