UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica - Geotecnia

CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA - PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA

TESIS

Presentada por:
Bach. Linda Luz Pecho Vasquez

Para optar el Título Profesional de:
INGENIERO GEÓLOGO - GEOTÉCNICO

TACNA - PERÚ
2026

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia

HOJA DE JURADO

TESIS

CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA - PROVINCIA DE JORGE BASADRE – TACNA

Presentado por la bachiller Linda Luz Pecho Vasquez
Para optar el título profesional de Ingeniero Geólogo-Geotécnico

Tesis sustentada y aprobada el 20 de agosto del 2026 (RF N° 1054 y 1243-2026-FIAG/UNJBG)

Con el siguiente jurado:

Presidente : _____
Mgr. Ing. JORGE PANTALEÓN BARRIGA GAMARRA

Secretario : _____
M.Sc. Ing. GINA MACKLINA CHAMBI TAPAHUASCO

Vocal : _____
Mgr. Ing. GLORIA ~~MARINA CHOQUE~~ MACHACA

Asesor de Tesis : _____
Mgr. Ing. FREDY CLETO CABRERA OLIVERA

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Fredy Cleto Cabrera Olivera en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N°358-2025-FIAG/UNJBG del Trabajo de la Tesis, titulado: CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA - PROVINCIA DE JORGE BASADRE — TACNA, presentado por la Bachiller LINDA LUZ PECHO VASQUEZ para optar el título profesional de INGENIERO GEÓLOGO - GEOTÉCNICO.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual de la UNJBG, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 3% Por lo que, CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis enunciado líneas arriba, la cual está expedita para continuar con los trámites para optar el título profesional Ingeniero Geólogo- Geotécnico, según corresponda para su publicación en el repositorio institucional.

Tacna, 09 de setiembre del 2026



Docente Asesor de Tesis
Fredy Cleto Cabrera Olivera
DNI №29293902



Firma del autor
Linda Luz Pecho Vasquez
DNI №73826830

DEDICATORIA

A toda mi familia. A mi padre y madre, por su orientación y apoyo constante en cada etapa de mi vida

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darnos la vida e iluminar ese sendero apasionante del mundo de la Geología.

A mis padres, por su apoyo constante durante mi formación personal y profesional.

A la plana docente de la Escuela Profesional Ingeniería Geológica - Geotecnia, por su instrucción, especialmente al Ingeniero Fredy Cabrera por su compromiso formativo hasta el día de hoy.

CONTENIDO

DEDICATORIA..... ii
AGRADECIMIENTOS iii
CONTENIDO..... iv
CONTENIDO DE TABLAS..... ix
CONTENIDO DE FIGURAS x
ÍNDICE DE ANEXOS..... xii
RESUMEN..... xiv
ABSTRACT..... xv
INTRODUCCIÓN xvi
CAPÍTULO I..... 18
ASPECTOS GENERALES..... 18
1.1. UBICACIÓN Y ACCESO A LA ZONA DE ESTUDIO 18
1.1.1 Ubicación 18
1.1.2. Accesibilidad..... 20
1.2. CLIMA..... 21
1.2.1 Precipitación..... 21
1.2.2 Temperatura..... 21
1.2.3. Hidrografía..... 21
1.2.4. Humedad relativa 22
1.2.5. Velocidad del Viento 23
1.2.6. Evaporación 23
1.2.6. Evapotranspiración Potencial (ETP)..... 24
1.3 VEGETACIÓN..... 24
1.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... 25
1.4.1 Problema General..... 29
1.4.2 Problemas Específicos 29
1.5 OBJETIVOS 29
1.5.1 Objetivo General..... 29
1.5.2 Objetivos específicos 30
1.6. HIPÓTESIS..... 30
1.6.1 Hipótesis General..... 30
1.6.2 Hipótesis específicas..... 30

1.7 VARIABLES DE IDENTIFICACIÓN 31
1.7.1 Variables independientes 31
1.7.2 Variable dependiente 32
1.8 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 32
1.9 ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN 33
CAPÍTULO II 36
MARCO TEÓRICO 36
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN 36
2.2 BASES TEÓRICAS 37
2.2.1. Ciclo Hidrológico 37
2.2.2. Aguas subterráneas 40
2.2.3. Definición de Acuífero 40
2.2.4 Clasificación de acuíferos 40
2.2.5. Caracterización Hidrogeológica 43
2.2.6 Recarga y descarga natural de acuíferos 44
2.2.7 Vulnerabilidad de un acuífero 45
2.2.8 Factores que afectan la cantidad y calidad del agua subterránea . 45
2.2.9 Equilibrio Hídrico 47
2.2.10 Prospección Geofísica 47
2.2.11 Parámetros hidrogeológicos de un acuífero 59
2.2.12 Balance Hídrico 62
2.2.13 Geometría del acuífero 62
2.2.14 Logueo de pozos 64
2.2.15 Modelamiento hidrogeológico 66
CAPÍTULO III 68
METODOLOGÍA 68
3.1. TIPO DE INVESTIGACION 68
3.2. DISEÑO Y ENFOQUE DE LA INVESTIGACION 69
3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA 70
3.4. ETAPAS DE LA INVESTIGACION 70
3.4.1. Etapa preliminar 70
3.4.2. Trabajo de Campo 71
3.4.3. Etapa de gabinete 71
3.4.4. Materiales e Insumos 72

CAPÍTULO IV 73
CARÁCTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO 73
4.1. GEOMORFOLOGÍA REGIONAL 73
4.1.1. Colina en roca sedimentaria (RC- rs) 73
4.1.2. Colina y lomada en roca volcánica (RCL-rv) 73
4.1.3. Colina y lomada en roca sedimentaria (RCL- rs) 74
4.1.4. Colina y lomada disectada en roca sedimentaria (RCLD-rs) 74
4.1.5. Altiplanicie sedimentaria (AP-s) 74
4.1.6. Superficie de flujo piroclástico (Sfp) 75
4.1.7. Superficie de flujo piroclástico disectado o erosionado (Sfp-d) 75
4.1.8. Vertiente coluvial de detritos (V-d) 75
4.1.9. Vertiente con depósitos de deslizamiento (V-dd) 76
4.1.10. Vertiente o piedemonte aluvio - torrencial (P-at) 76
4.1.11. Terraza aluvial (T- al) 76
4.1.12. Terraza baja aluvial (Tb-al) 77
4.2 GEOLOGÍA REGIONAL 79
4.2.1. Formación Sotillo (Pp – so) 79
4.2.2. Formación Moquegua Inferior (Pp – mo/i) 80
4.2.3. Formación Moquegua Superior (Pp – mo/s) 80
4.2.4. Formación Huaylillas (Nm – hu) 81
4.2.5. Formación Millo (Np-mi) 81
4.2.6. Depósitos Cuaternarios 82
4.3 RELIEVE ESTRUCTURAL 85
4.3.1. Zonas de colapso 85
4.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL 87
4.5. GEOLOGÍA LOCAL 90
4.5.1. Formación Sotillo (Pp – so) 90
4.5.2. Formación Moquegua Inferior (Pp – mo/i) 90
4.5.3. Formación Moquegua Superior (Pp - mo/s) 91
4.5.4. Formación Millo (Np-mi) 91
4.5.5. Depósitos Cuaternarios 92
4.6. GEOMORFOLOGÍA LOCAL 97
CAPÍTULO V 100

PROSPECCIÓN GEOFÍSICA 100
5.1. Método geofísico 100
5.2 Equipo Utilizado 101
5.3 Adquisición de datos de campo 102
5.3.1 Sustentación Técnica de la Distribución y Densidad de la Muestra 107
5.4. Procesamiento e interpretación de datos de campo 109
5.5. Resultados obtenidos 109
5.6 Correlación Geológica - Geofísica 124
5.7. ZONIFICACIÓN DEL ACUÍFERO 126
5.7.1 ZONA BAJA DEL ACUÍFERO 126
5.7.2. ZONA MEDIA DEL ACUIFERO 128
5.7.3. ZONA ALTA DEL ACUIFERO 130
5.8. SONDAJES ELÉCTRICOS SINTÉTICOS 133
5.9. PLANOS GEOFÍSICOS 137
5.9.1 Techo basamento impermeable 137
5.9.2 Espesor total del horizonte saturado 140
5.9.3 Resultados cuantitativos del horizonte permeable saturado (Resistividad Verdadera) 143
5.9.4 Resistencia Transversal del horizonte permeable saturado 145
CAPÍTULO VI 154
MODELO HIDROGEOLÓGICO 154
6.1. Logueo de pozos 154
6.1.1. Descripción litológica del Pozo Tres Molles 162
6.1.2. Descripción litológica del pozo Conostoco 165
6.1.3. Descripción litológica del Pozo Tres Piedras 168
6.1.4. Descripción litológica del Pozo Montegrande N° 3 171
6.1.5. Descripción litológica del Pozo Los Carzos 173
6.1.6. Descripción litológica del Pozo de Reemplazo Montegrande 175
6.2. Reconocimiento de pozos y elaboración de SEV´s paramétricos 179
6.3. Elaboración del modelo hidrogeológico 2D y 3D 187
6.3.1. Cálculo del volumen del acuífero 197
6.3.2. Porosidad efectiva y estimación de reservas de agua subterránea 197
CAPÍTULO VII 203

BALANCE HÍDRICO 203
7.1 ANTECEDENTES 203
7.2. ESTADO ACTUAL DEL ACUÍFERO CINTO 204
7.3. INVENTARIO DE FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA 206
7.3.1. Tipo de Pozos 206
7.3.3. Rendimiento de los pozos 206
7.3.4. Explotación del Acuífero 207
7.4. BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA 210
7.5. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD Y AGOTAMIENTO 216
7.5.1. Cálculo de caudal de equilibrio (Rendimiento Sostenible) 216
7.5.2. Cálculo de vida útil 216
7.3.2. Uso de los Pozos 217
7.5.3. Interpretación del escenario crítico 218
CAPÍTULO VIII 219
CARACTERÍSTICAS DEL ACUÍFERO 219
8.1. Litología 219
8.2. Naturaleza y Origen de las aguas subterráneas 221
8.3. Naturaleza y origen del acuífero 222
8.4. El reservorio acuífero 223
8.4.1. Forma y Limites 223
8.4.2. Dimensiones 225
8.5 La Napa Freatica 228
8.5.1. Profundidad del techo de la Napa 228
8.5.2. Morfología del techo de la Napa Freática 230
8.6. Modelo Hidrogeológico Conceptual 236
CAPÍTULO IX 238
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 238
9.1 CONCLUSIONES 238
9.2. DISCUSIONES Y RECOMENDACIONES 240
9.2.1. DISCUSIONES 240
9.2.2. RECOMENDACIONES 242
REFERENCIAS 243
ANEXOS 248

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1 Límites de la zona de estudio 18
Tabla 2 Accesos al acuífero del Valle de Cinto Locumba..... 20
Tabla 3 Clasificación litológica según resistividades..... 58
Tabla 4 Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales – Zona Conostoco 110
Tabla 5 Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales - Zona Tres Piedras 111
Tabla 6 Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales - Zona Tres Molles..... 112
Tabla 7 Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales Terreno Asoc. Los Carzos Valle Cinto – 2024..... 113
Tabla 8 Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales Terreno Sr. Vidal Ticona 2023 114
Tabla 9 *Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales parcela Andrés Chambilla sector Chironta 2016*..... 115
Tabla 10 Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales - 2020 116
Tabla 11 Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales 2020..... 117
Tabla 12 Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales Terreno Sr. Owen Chacolla 2024..... 118
Tabla 13 Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales Terreno Sra. Milagros Vilca 2024..... 119
Tabla 14 Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales Terreno Sr. Hugo Osco 2024 120
Tabla 15 Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales Comité Cinto N°1 2024..... 121
Tabla 16 Resistividades de las unidades hidrogeológicas..... 125
Tabla 17 Cuadro resumen de los horizontes geoeléctricos..... 132
Tabla 18 Pozos complementarios de control geofísico 134
Tabla 19 Resultados SEV´S sintéticos de los pozos complementarios de control geofísico 135
Tabla 20 Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales de sondajes sintéticos..... 136
Tabla 21 Resultados generales de planos geofísicos, zona baja..... 149
Tabla 22 Resultados generales de planos geofísicos, zona media..... 150
Tabla 23 Resultados generales de planos geofísicos, zona alta..... 151
Tabla 24 Resultados generales de planos geofísicos, sondajes complementarios interpolados - inferidos..... 152
Tabla 25 Cuadro resumen de los planos geofísicos..... 153
Tabla 26 Pozos logueados en el Valle de Cinto Locumba 154
Tabla 27 Unidades hidrogeológicas modeladas en LEAPFROG 190
Tabla 28 Valores de Porosidad efectiva según el tipo de materiales..... 198
Tabla 29 Valores de porosidad efectiva según Johnson 1967 y E. Custodio M.R. Llamas 1983..... 198
Tabla 30 Caudales históricos de pozos de uso poblacional en Cinto - Locumba..... 204
Tabla 31 Inventario de fuentes de agua (2012 – 2024) 209
Tabla 32 Balance hídrico óptimo de la cuenca Cinto..... 211
Tabla 33 Balance hídrico actual de la Cuenca Cinto con 500 ha bajo riego y 105 pozos extra en funcionamiento 214
Tabla 34 Profundidad y Cota de la Napa Freática de los SEV´s ejecutados: 232
Tabla 35 Profundidad y Cota de la Napa Freática de los SEV´s inferidos e interpolados 235

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de la zona de estudio..... 19
Figura 2 Ciclo Hidrológico global simplificado y sus componentes 39
Figura 3 Esquema de los tipos de acuíferos en función de sus características geológicas e hidrodinámicas... 42
Figura 4 Esquema de los diferentes factores estudiados que afectan la cantidad y calidad del agua subterránea 46
Figura 5 Conceptualización de la ley de ohm y el flujo de corriente eléctrica en el subsuelo 50
Figura 6 Diagrama de arreglo Schlumberger 55
Figura 7 Mapa Geomorfológico de la zona de estudio..... 78
Figura 8 Columna estratigráfica de la zona de estudio..... 83
Figura 9 Mapa de geología regional de la zona de estudio. 84
Figura 10 Mapa estructural de la cuenca Locumba – Valle de Cinto 86
Figura 11 92
Figura 12 Reconocimiento de campo de la zona de estudio 93
Figura 13 Vista panorámica de las formaciones geológicas presentes en la zona de estudio 94
Figura 14 Vista del cauce superior del río Cinto..... 95
Figura 15 Vista del cauce inferior del río Cinto..... 96
Figura 16 Georesistivímetro marca WargPower, carretes y electrodos 102
Figura 17 Formato de campo de Sondajes Eléctricos Verticales 103
Figura 18 Realización de Sondaje eléctrico vertical en la zona de los Carzos..... 104
Figura 19 Realización de Sondaje eléctrico vertical en la zona de Tres Piedras..... 105
Figura 20 Realización de Sondaje eléctrico vertical alta de la Cuenca Cinto 106
Figura 21 Columna litológica original del pozo Tres Molles..... 156
Figura 22 Columna litológica original del pozo de Reemplazo Montegrande y SEV paramétrico. 157
Figura 23 Columna litológica original del pozo Montegrande 3 158
Figura 24 Columna litológica original del pozo Conostoco..... 159
Figura 25 Columna litológica original del pozo Los Carzos..... 160
Figura 26 Columna litológica original del pozo Tres Piedras..... 161
Figura 27 Columna litológica del pozo Tres Molles..... 164
Figura 28 Columna litológica del pozo Conostoco..... 167
Figura 29 Columna litológica del pozo Tres Piedras 170
Figura 30 Columna litológica del pozo Montegrande N°3 172
Figura 31 Columna litológica del pozo Los Carzos..... 174
Figura 32 Columna litológica del pozo de Reemplazo Montegrande 177
Figura 33 Medición del nivel estático del pozo Tres Molles 179
Figura 34 SEV paramétrico del pozo Tres Molles..... 180
Figura 35 Medición del nivel estático del pozo Tres Piedras..... 181
Figura 36 SEV paramétrico del pozo Tres Piedras 182
Figura 37 Medición del nivel estático del pozo Conostoco 183
Figura 38 SEV paramétrico del pozo Conostoco..... 184
Figura 39 Medición del nivel estático del pozo Los Carzos 185
Figura 40 SEV paramétrico del pozo Los Carzos 186
Figura 41 Modelo hidrogeológico 3D del acuífero Cinto Locumba 191
Figura 42 Vista Isométrica del basamento impermeable 192
Figura 43 Vista Isométrica del acuífero 193
Figura 44 Sección transversal del modelo hidrogeológico 3D zona baja..... 194
Figura 45 Sección trasversal del modelo hidrogeológico 3D zona media 195
Figura 46 Sección transversal del modelo hidrogeológico 3D zona alta 196
Figura 47 Diagrama ternario de clasificación textural y estimación del rendimiento específico (Johnson, 1967)de los materiales del acuífero Cinto..... 199

Figura 48 Gráfico de balance hídrico de la Cuenca Cinto..... 212

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 MATRIZ DE CONSISTENCIA

ANEXO 2 MAPAS

Mapa 1. MAPA DE UBICACIÓN

Mapa 2. MAPA GEOMORFOLÓGICO REGIONAL

Mapa 3. MAPA GEOLÓGICO REGIONAL

Mapa 4. MAPA GEOLÓGICO ESTRUCTURAL

Mapa 5. MAPA GEOLÓGICO LOCAL

Mapa 6. MAPA GEOMORFOLÓGICO LOCAL

Mapa 7. MAPA DE UBICACIÓN DE SEV´S ZONA BAJA DEL ACUÍFERO

Mapa 8. MAPA DE UBICACIÓN DE SEV´S ZONA MEDIA DEL ACUÍFERO

Mapa 9. MAPA DE UBICACIÓN DE SEV´S ZONA ALTA DEL ACUÍFERO

Mapa 10. TECHO DEL BASAMENTO IMPERMEABLE ZONA BAJA

Mapa 11. ESPESOR TOTAL DEL HORIZONTE PERMEABLE SATURADO ZONA BAJA

Mapa 12. RESULTADOS CUANTITATIVOS DEL HORIZONTE SATURADO (RESISTIVIDAD VERDADERA) ZONA BAJA

Mapa 13. RESISTENCIA TRANSVERSAL DE HORIZONTE SATURADO ZONA BAJA

Mapa 14. TECHO DEL BASAMENTO IMPERMEABLE ZONA MEDIA

Mapa 15. ESPESOR TOTAL DEL HORIZONTE PERMEABLE SATURADO ZONA MEDIA

Mapa 16. RESULTADOS CUANTITATIVOS DEL HORIZONTE SATURADO (RESISTIVIDAD VERDADERA) ZONA MEDIA

Mapa 17. RESISTENCIA TRANSVERSAL DE HORIZONTE SATURADO ZONA MEDIA

Mapa 18. TECHO DEL BASAMENTO IMPERMEABLE ZONA ALTA

Mapa 19. ESPESOR TOTAL DEL HORIZONTE PERMEABLE SATURADO ZONA ALTA

Mapa 20. ESULTADOS CUANTITATIVOS DEL HORIZONTE SATURADO (RESISTIVIDAD VERDADERA) ZONA ALTA

Mapa 21. RESISTENCIA TRANSVERSAL DE HORIZONTE SATURADO ZONA ALTA

Mapa 22. HIDROISOHIPSAS

Mapa 23. ISOPROFUNDIDAD DE LA NAPA

Mapa 24. INVENTARIO DE FUENTES DE AGUA

ANEXO 3 SECCIONES GEOLÓGICAS GEOFÍSICAS

S.1 Sección geológica geofísica A-A’

S.2 Sección geológica geofísica B-B’

S.3 Sección geológica geofísica C-C’

S.4 Sección geológica geofísica D-D’

S.5 Sección geológica geofísica E-E’

S.6 Sección geológica geofísica F-F’

S.7 Sección geológica geofísica G-G’

S.8 Sección geológica geofísica H-H’

S.9 Sección geológica geofísica I-I’

S.10 Sección geológica geofísica J-J’

S.11 Sección geológica geofísica K-K’

S.12 Sección geológica geofísica L-L’

S.13 Sección geológica geofísica M-M’

S.14 Sección geológica geofísica N-N’

S.15 Sección geológica geofísica O-O’

S.16 Sección geológica geofísica P-P’

S.17 Sección geológica geofísica Q-Q’

S.18 Sección geológica geofísica R-R’

S.19 Sección geológica geofísica S-S’

S.20 Sección geológica geofísica T-T’

ANEXO 4 GRÁFICOS DE LA INTERPRETACIÓN CUANTITATIVA DE LOS SONDAJES ELÉCTRICOS VERTICALES - SEVs PARAMÉTRICOS

ANEXO 5 REGISTRO DE PERFILES LITOLÓGICOS DE POZOS

ANEXO 6 COMPARACIÓN DE COLUMNA LITOLÓGICA Y SEV PARAMÉTRICO

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la geometría y el modelo hidrogeológico 2D del acuífero Cinto mediante la integración de métodos geofísicos y geológicos, en el distrito de Locumba, Tacna. Se desarrolló una metodología basada en la ejecución de 76 Sondajes Eléctricos Verticales (SEV) y el logueo de pozos, lo que permitió identificar las unidades hidroestratigráficas y el potencial de almacenamiento hídrico, considerando múltiples criterios litoestratigráficos y parámetros de resistividad eléctrica.

El modelo hidrogeológico se determinó mediante la interpretación cuantitativa de los SEV´s, utilizando curvas de resistividad aparente para asignar propiedades georesistivas a cada horizonte del subsuelo. Esta información fue procesada para la generación de perfiles geológicos – geofísicos 2D y posteriormente integrada en un modelamiento hidrogeológico 3D que permitió visualizar el volumen potencialmente explotable del acuífero. Se identificó el acuífero saturado, compuesto principalmente por depósitos aluviales y fluviales del Holoceno, y la identificación del basamento impermeable conformado por la formación Moquegua Inferior. De esta manera se visualizó la configuración del acuífero.

Las conclusiones de la investigación revelan una geometría con espesores de acuífero que oscilan entre 6 y 20 metros, evidenciando una reducción crítica de la napa freática producto de la sobreexplotación. El modelo 3D confirma que la configuración del basamento influye directamente en el flujo y almacenamiento hídrico. Como recomendación principal, se propone declarar en emergencia hídrica el agua de uso poblacional y la elaboración de un balance hídrico, con el fin de mitigar la vulnerabilidad hídrica y asegurar la sostenibilidad de la actividad agrícola en el Valle de Cinto.

Palabras clave: Acuífero Cinto, Sondajes Eléctricos Verticales, Modelo Geológico, geometría del acuífero, gestión sostenible, Locumba.

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the geometry and 2D hydrogeological model of the Cinto aquifer through the integration of geophysical and geological methods in the district of Locumba, Tacna. A methodology was developed based on the execution of 76 Vertical Electrical Soundings (VES) and well logging, which allowed for the identification of hydrostratigraphic units and water storage potential, considering multiple lithostratigraphic criteria and electrical resistivity parameters.

The hydrogeological model was determined through the quantitative interpretation of the VES, using apparent resistivity curves to assign georesistive properties to each subsurface horizon. This information was processed to generate 2D geological-geophysical profiles and subsequently integrated into a 3D hydrogeological model that allowed visualization of the potentially exploitable volume of the aquifer. The saturated aquifer was identified, composed mainly of Holocene alluvial and fluvial deposits, along with the identification of the impermeable bedrock formed by the Lower Moquegua Formation. In this manner, the aquifer's configuration was visualized.

The research findings reveal a geometry with aquifer thicknesses ranging between 6 and 20 meters, evidencing a critical reduction of the water table as a result of overexploitation. The 3D model confirms that the bedrock configuration directly influences groundwater flow and storage. As a main recommendation, it is proposed to declare a water emergency for domestic use and to develop a water balance to mitigate water vulnerability and ensure the sustainability of agricultural activities in the Cinto Valley.

Keywords: Cinto Aquifer, Vertical Electrical Soundings (VES), Geological Model, aquifer geometry, sustainable management, Locumba

INTRODUCCIÓN

La gestión y planificación de los recursos hídricos representa un desafío crítico en regiones de extrema aridez como la cuenca del río Locumba, en Tacna. En el Valle de Cinto, la creciente demanda antropogénica ha generado una presión sin precedentes sobre las reservas subterráneas, rompiendo el equilibrio dinámico del sistema. Ante este escenario, la determinación de la geometría del acuífero y la evaluación de su potencial de almacenamiento se han vuelto imperativas para asegurar un suministro sostenible y mitigar la desaturación del medio poroso. En este contexto, la presente investigación utiliza la integración de prospección geofísica y modelamiento hidrogeológico para caracterizar el acuífero Cinto.

El presente estudio de investigación se encuentra estructurado de acuerdo con los lineamientos de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia, organizada en los siguientes capítulos:

El capítulo I: Aspectos Generales, comprende el planteamiento del problema, los objetivos orientados a determinar la geometría del acuífero, la justificación técnica basada en la vulnerabilidad hídrica y las limitaciones del estudio.

El capítulo II: Marco Teórico, presenta los antecedentes nacionales e internacionales, las bases teóricas de la hidrogeología, los fundamentos del método geofísico de resistividad eléctrica (SEV) y el contexto geológico regional.

El capítulo III: Metodología, define el diseño de la investigación y la muestra, constituida por 76 SEV iniciales, complementados con 18 SEV SINTÉTICOS adicionales obtenidos mediante interpolación e integración de datos directos de pozos, optimizando la resolución del modelo.

El capítulo IV: Características Geológicas y Geomorfológicas, detalla el entorno estructural y local, identificando las unidades litoestratigráficas, incluyendo la Formación Moquegua Inferior (como

basamento impermeable) y los depósitos Cuaternarios que conforman el acuífero.

El capítulo V: Prospección Geofísica, desarrolla la interpretación técnica de los SEV, el procesamiento de curvas de resistividad y su correlación con información de pozos para la delimitación precisa de los horizontes saturados y el basamento impermeable.

El capítulo VI: Modelo Hidrogeológico, representa la síntesis espacial del acuífero mediante la integración de modelos 2D y 3D, permitiendo una cuantificación más precisa de las reservas hídricas.

El capítulo VII: Balance Hídrico, analiza el estado actual de las reservas bajo un escenario de sobreexplotación, donde la extracción actual (~608 L/s) supera ampliamente la recarga natural. Los resultados determinan un déficit hídrico crítico y una vida útil estimada del acuífero de 33 años, cifra que subraya la urgencia de implementar medidas de gestión sostenible y control de pozos para evitar el colapso del sistema.

El capítulo VII: Características del Acuífero, se analiza la litología, origen de las aguas subterráneas, geometría del reservorio acuífero y la napa freática.

Finalmente, el capítulo IX: Conclusiones y Recomendaciones, presenta las Conclusiones y Recomendaciones, donde se cuantifican las reservas calculadas y se propone la declaratoria de emergencia hídrica junto con la implementación de un sistema de monitoreo piezométrico para asegurar la sostenibilidad del valle de Cinto.

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. UBICACIÓN Y ACCESO A LA ZONA DE ESTUDIO

1.1.1 Ubicación

El área de estudio se localiza en el departamento de Tacna, provincia de Jorge Basadre y distrito de Locumba. Geográficamente, se sitúa en el valle de Cinto, perteneciente a la cuenca Hidrográfica Locumba, la cual abarca una superficie de 5742,34 km^2 (Pocco et al., 2024). La delimitación del área de estudio se encuentra en las coordenadas WGS 84 siguientes:

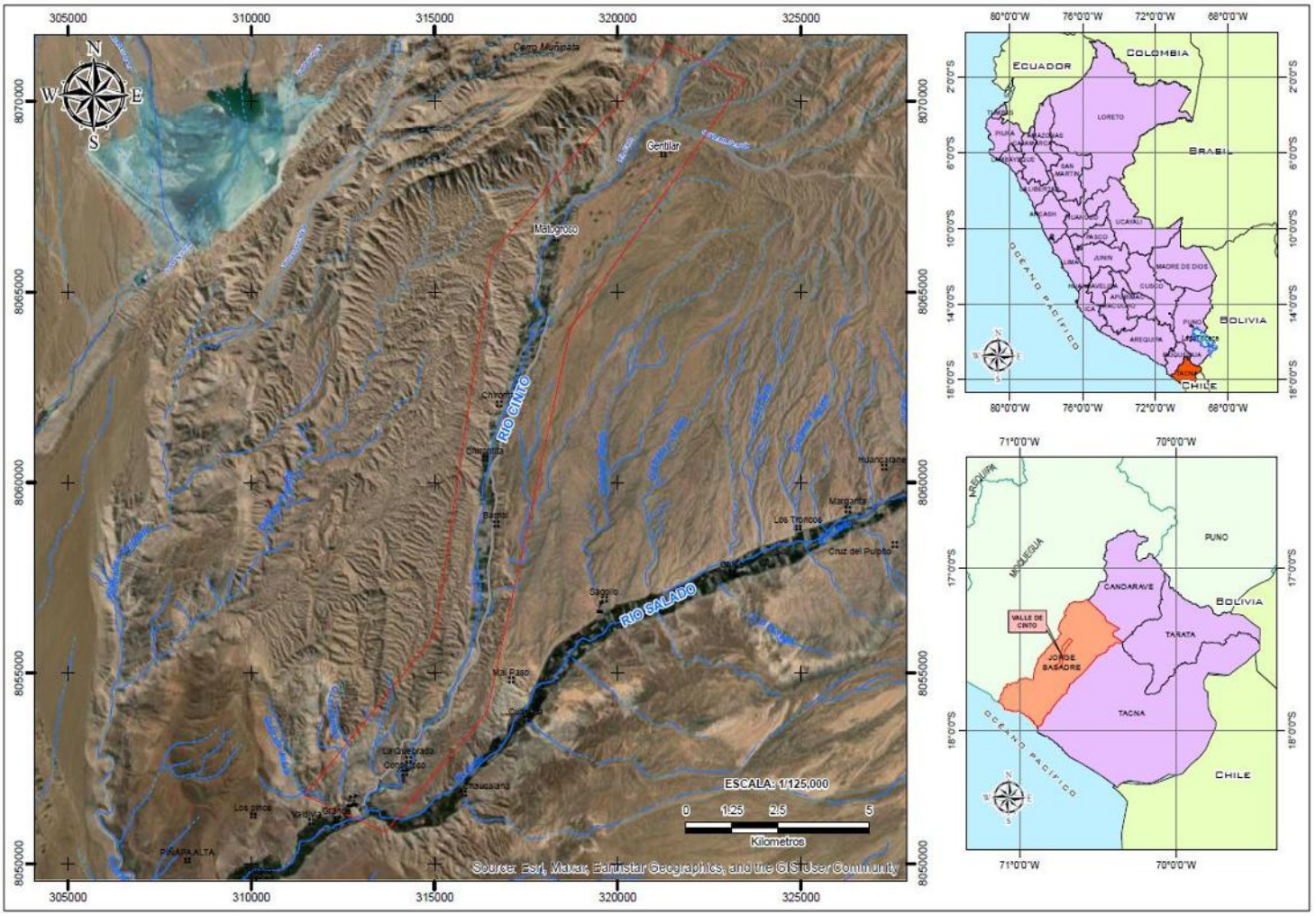
Tabla 1
Límites de la zona de estudio

COORDENADAS (DATUM WGS-84) ZONA 19 S		
Vértice	Norte	Este
1	8 071 445	321 428
2	8 07 588	323 464
3	8 064 055	318 724
4	8 053 964	316 455
5	8 050 816	313 688
6	8 051 794	311 502
7	8 055 993	315 017
8	8 065 944	316 534

Nota. Coordenadas UTM (WGS 84) de ubicación del área de estudio.

Figura 1

Ubicación de la zona de estudio



Nota. Mapa de ubicación de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

1.1.2. Accesibilidad

La principal vía de comunicación al área de estudio se efectúa por la carretera Panamericana Sur hasta el puente Camiara sobre el río Locumba por unos 78 km; partiendo del centro de la ciudad de Tacna. A partir de este punto se sigue por la carretera asfaltada (Margen derecha del Valle Locumba) de 15 km, que conduce al Pueblo de Villa Locumba; para luego continuar a la izquierda por la vía asfaltada que conduce al Valle de Cinto (vía paralela al rio seco de Cinto), por un recorrido de 18 km, llegando de esta forma a la zona de estudio.

Tabla 2

Accesos al acuífero del Valle de Cinto Locumba

VÍAS DE ACCESO AL VALLE DE CINTO - LOCUMBA			
Lugar	Tipo de vía	Longitud (km)	Tiempo de viaje
Tacna-Locumba	Carretera Panamericana Sur	78 km	60 min
Camiara - Locumba	Carretera asfaltada	15 km	30 min
Locumba - Cinto	Vía asfaltada	18 km	35 min

Nota. Accesos al acuífero del Valle de Cinto Locumba.

1.2. CLIMA

1.2.1 Precipitación

Cuenta con precipitaciones medias anuales en la Costa menores a 10 mm y en la Sierra de 400 mm cada 5 a 7 años durante los meses de enero y/o febrero no mayor a 30 días, típicas de los desiertos más secos del mundo (Machaca-Pillaca et al. 2022; Pino-Vargas and Chávarri -Velarde, 2022) lo que ha motivado la utilización del agua del subsuelo. El promedio anual es de 0,5mm y 5 mm, en muchos años la precipitación es cero. Las pocas lluvias están asociadas a fenómenos extraordinarios como El Fenómeno del Niño.

1.2.2 Temperatura

La cuenca del río Locumba posee un clima árido. La temperatura anual oscila entre unos 11 °C y 26 °C, con una temperatura media de 18 °C rara vez bajando de 9 °C o superando 27 °C (Pocco et al., 2024). Según la clasificación de Köppen, corresponde a un clima de desierto subtropical (BWh) (Peel et al., 2007).

1.2.3. Hidrografía

La cuenca del río Locumba se ubica al norte de la región Tacna, Perú, comprendiendo territorios de las provincias de Jorge Basadre y Candarave. Según Chávarri Velarde y Pino Vargas (2011), su área aproximada es de 6 493,83 km².

Su red hidrográfica está dominada por la confluencia de los ríos Curibaya e Ilabaya, presentando un perfil escarpado y alargado.

La pendiente media de la cuenca es de 30% (pendiente fuerte), lo que no favorece a la infiltración permitiendo que el escurrimiento superficial contribuya al flujo en los cauces.

Sus afluentes más importantes son:

- Río Cinto (445 km^2): La red de drenaje presenta un patrón dendrítico, con quebradas tributarias de carácter estacional que se activan principalmente durante eventos de precipitación. Posee una hiperaridez extrema con una temperatura promedio de 18°C. Con precipitaciones extremadamente bajas (menores a 10 mm/año, incluso nulas en algunos años) y altas tasas de evaporación superiores a 1800 mm/año generan un déficit hídrico permanente. Hidrogeológicamente, el sistema está conformado por depósitos aluviales detríticos que constituyen un acuífero libre, cuya recarga es principalmente indirecta a través de infiltración en cauces y flujo subterráneo desde zonas altas.
- Quebrada Honda (1580 km^2).
- Curibaya (230 km^2).
- Callazas (1015 km^2).

1.2.4. Humedad relativa

La humedad relativa en la zona de estudio presenta una marcada influencia

de la proximidad marina y la altitud. En el sector de Locumba, los valores promedio anuales oscilan entre el 45% y 65%. Se observa una estacionalidad definida, donde los valores máximos se registran durante los meses de invierno (junio-agosto) debido a la incursión de neblinas costeras (camanchacas), mientras que en verano la humedad desciende significativamente, aumentando el déficit de presión de vapor y, la demanda evaporativa de la atmósfera en la zona.

1.2.5. Velocidad del Viento

El régimen de vientos en el Valle de Cinto está gobernado por el sistema de brisas valle-montaña y la influencia de los vientos alisios del sureste.

Las velocidades promedio fluctúan entre 2,5 m/s y 4,8 m/s, con ráfagas predominantes en horas de la tarde que pueden superar los 6,0 m/s. Este parámetro es un agente dinámico crítico, ya que acelera los procesos de evaporación directa desde el suelo y aumenta las tasas de transpiración en las áreas de cultivo del valle.

1.2.6. Evaporación

Dada la ubicación del acuífero en una zona de hiperaridez, la evaporación potencial es extremadamente alta. Los registros medidos en tanque tipo "A" indican valores que superan los 1800 mm/año, excediendo ampliamente a la precipitación total anual (menor a 10 mm). Esta brecha hídrica confirma que cualquier aporte de humedad superficial se pierde casi instantáneamente hacia la atmósfera, limitando la recarga directa por infiltración pluvial y confinando la recarga del sistema únicamente al flujo subterráneo y a la infiltración por retornos de riego.

1.2.6. Evapotranspiración Potencial (ETP)

La Evapotranspiración Potencial, calculada mediante métodos como Penman-Monteith, refleja la máxima pérdida de agua que ocurriría si el suelo estuviera cubierto de vegetación y con suministro hídrico óptimo. En el área de influencia de la cuenca del río Locumba, la ETP anual se estima en un rango de 1 400 a 1 600 mm.

La relación ETP/Precipitación define al Valle de Cinto como una zona con un balance hídrico deficitario crónico, donde la supervivencia del acuífero depende críticamente del manejo de los caudales de extracción frente a la nula recarga efectiva local.

1.3 VEGETACIÓN

La cobertura vegetal está dominada por especies como el Carrizo y el Huarango, junto con una actividad agrícola intensiva de cultivos permanentes (olivo y vid), esto implica que la demanda hídrica del acuífero Cinto no se detiene durante el año. El coeficiente de cultivo (Kc) de estas especies, sumado a las altas tasas de evaporación genera un déficit hídrico que debe ser cubierto exclusivamente por el almacenamiento del acuífero. La expansión de estas áreas agrícolas sin una planificación basada en la recarga anual es la causa principal de la pérdida progresiva del agua subterránea en todo el acuífero.

1.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El agua subterránea es la fuente de agua dulce más abundante y utilizada de la Tierra, abastece casi el 50% del agua potable mundial y el 43% de toda el agua utilizada para el riego en la agricultura (Cross et al., 2020).

La Cordillera de los Andes afecta la circulación de masas de aire de la atmosfera, produciendo áreas extremadamente secas en la mayor parte de la costa de Perú, centro de Chile y sur de Argentina (Rama et al., 2022), haciendo a los acuíferos costeros altamente vulnerables.

Actualmente, el Perú es un país que ha experimentado un enorme crecimiento en la exportación de productos agrícolas.

Estas actividades de producción se ubican en las zonas desérticas a lo largo de la costa del Pacífico, área que cuenta solo con 1,8% de los recursos hídricos de agua dulce; albergando el 63% de la población del país. (Schwarz & Mathijs, 2017).

El Valle de Cinto ubicado en el distrito de Locumba, provincia de Jorge Basadre, departamento de Tacna, se caracteriza por sus condiciones climáticas, agua y suelo propicios para la agricultura. Su principal limitante es la escasez del recurso hídrico (precipitaciones menores a 10 mm anuales) clasificándolo como una zona extremadamente árida.

Ante esta escasez, en el año 1954 se inicia la explotación de aguas subterráneas con fines poblacionales, por parte de EMAPA Tacna en el Valle de Cinto.

En el año 1960 la empresa minera SPCC comenzó a explotar las aguas subterráneas en la zona de Gentilar y Cinto con fines agrícolas perforando los pozos tubulares Cinto N° 1, Cinto N° 2 y Cinto N° 3, con los cuales se abastecía a 70 ha de frutales de la hacienda de Cinto, posteriormente en el año 1970 se dejó de explotar el agua subterránea y la hacienda quedo en abandono.

En el año 1972 se aprobó el derecho de uso de agua minero para Southern Copper Corporation de 600 l/s en la proporción de 150 l/s en el canal de Tacalaya y Quebrada Honda y 400 l/s en el río Asena, para usos domésticos e industriales de su campamento minero en Toquepala.

A partir del año 2000 a la fecha se incrementó notablemente la explotación de aguas subterráneas con fines agrícolas; causando el descenso del caudal de explotación de pozos perforados; provocando la ruptura del equilibrio del acuífero alimentación-explotación; aunada a la sequía experimentada en los años, 2015, 2016 y 2017.

Esta problemática se ha agudizado ante la RESOLUCION JEFATURAL N°177-2015-ANA, que tiene como objeto dictar disposiciones para la aplicación de los procedimientos de Formalización y Regularización de licencias de uso de agua

establecidos en la Primera Disposición Complementaria Final del Decreto Supremo N°023-2014-MINAGRI y en el Decreto Supremo N°007-2015-MINAGRI.; que permitía acceder a la Formalización o Regularización quienes usan el agua, sin contar con licencia de uso de agua. De esta manera se daba luz verde la formalización de pozos ilegales y ampliación de áreas de cultivo en terrenos; propiciando la perforación irracional de pozos de explotación de aguas subterráneas.

En el 2018 el Valle de Cinto tenía 340 ha bajo riego y aproximadamente 50 ha de ampliaciones que son dedicadas a cultivos permanentes como la vid, durazno y palta (100 ha) y 240 ha a cultivos temporales de alfalfa, orégano y zapallo, que son irrigadas con las aguas subterráneas del acuífero Cinto, y aproximadamente 20 pozo ilegales en funcionamiento

Actualmente existen 500 ha y más de 105 pozos ilegales perforados funcionando en el valle de Cinto, rompiéndose el equilibrio alimentación - explotación. El manejo de las áreas agrícolas, la implementación y expansión de las tierras de cultivo y los sistemas de riego tienen un impacto directo en la recarga del acuífero.

Por las razones expuestas se concluye que se necesita tomar medidas para una gestión sostenible y uso eficiente de las aguas subterráneas para la producción agrícola y uso poblacional destinadas a mitigar y optimizar el recurso hídrico.

La ausencia de un modelo hidrogeológico que precise la extensión lateral, profundidad y capacidad de almacenamiento del sistema impide el diseño de estrategias de explotación racional. Por lo tanto, el problema central de esta investigación no se limita únicamente a la sobreexplotación observada, sino a la falta de una caracterización geológica y geofísica detallada que permita cuantificar las reservas hídricas y sustente, con rigor técnico, la toma de decisiones necesarias para mitigar el agotamiento del acuífero.

Determinar la geometría exacta del acuífero mediante un modelo hidrogeológico 2D nos permitirá la gestión sobre el acuífero que se encuentra en sobre explotación debido a que no se puede gestionar lo que no se cuantifica.

1.4.1 Problema General

Según lo planteando nace la interrogante: ¿Cómo la caracterización hidrogeológica y el modelamiento hidrogeológico bidimensional permiten determinar la geometría del acuífero Cinto en el distrito de Locumba?

1.4.2 Problemas Específicos

- ¿De qué manera la interpretación de los parámetros de **resistividad eléctrica** permite diferenciar las unidades hidroestratigráficas en el Valle de Cinto?
- ¿En qué medida la correlación entre los datos de **logueo de pozos** y los perfiles geoeléctricos contribuyen a definir con precisión el espesor del acuífero saturado?
- ¿Cómo influye la configuración estructural del **basamento impermeable** (Formación Moquegua Inferior) en la geometría y capacidad de almacenamiento del acuífero?
- ¿Cuál es la relación entre el actual régimen de **explotación** y el descenso de los niveles piezométricos identificados en el acuífero Cinto?

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

- Determinar la geometría y configuración espacial del acuífero Cinto mediante la caracterización y modelado hidrogeológico.

1.5.2 Objetivos específicos

- Interpretar los parámetros de resistividad eléctrica obtenidos mediante SEVs para identificar las unidades hidroestratigráficas.
- Integrar los datos de resistividad con la información de logueo de pozos para establecer la geometría del basamento y el espesor del acuífero saturado.
- Desarrollar un modelo hidrogeológico espacial que permita visualizar la distribución y extensión del acuífero Cinto.
- Analizar el balance hídrico del acuífero y proyectar los efectos de la sobreexplotación sobre la sostenibilidad del recurso, cuantificando el caudal de equilibrio y la vida útil del acuífero.

1.6. HIPÓTESIS

1.6.1 Hipótesis General

- La caracterización hidrogeológica y el modelamiento hidrogeológico bidimensional permiten determinar confiablemente la geometría del acuífero Cinto.

1.6.2 Hipótesis específicas

- La integración de los sondeos eléctricos verticales y el logueo de pozos permite definir la distribución litológica e hidroestratigráfica del subsuelo al establecer valores específicos para el acuífero y el basamento impermeable.

- La correlación entre los datos de logueo de pozos y los perfiles geoeléctricos permite definir el espesor de acuífero saturado al calibrar las resistividades aparentes con la litología observada en el logueo de pozos.
- La configuración estructural del basamento impermeable delimita la geometría del acuífero y concentra los mayores volúmenes en los paleocauces.
- Existe una relación directa entre el incremento en el régimen de explotación y el descenso de los niveles piezométricos, donde la tasa de extracción actual supera a la capacidad de recarga natural del acuífero Cinto. La extracción intensiva rompe el equilibrio del sistema en relación a la escasa recarga generando un déficit hídrico anual y limitando la vida útil técnica del acuífero, siendo la zona baja de uso poblacional la más afectada.

1.7 VARIABLES DE IDENTIFICACIÓN

1.7.1 Variables independientes

Las variables independientes serían:

- Propiedades litoestratigráficas
- Propiedades hidrogeológicas

1.7.2 Variable dependiente

- Caracterización hidrogeológica

1.8 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Ante la escasez del recurso hídrico por las demandas de Uso Minero Southern Copper Corporation, y agrícola Higuerani y Caoña, los agricultores del valle de Cinto se han visto obligados a utilizar aguas del subsuelo de manera indiscriminada (perforación de pozos propios), generando una sobre-explotación del acuífero.

La investigación hidrogeológica de la parte baja de la cuenca del río Cinto comprende el análisis de las características hidrogeológicas de las formaciones geológicas presentes en el área de estudio, contribuyendo a un mejor entendimiento del comportamiento del agua superficial y subterránea del sistema acuífero.

A partir de dicho análisis, se zonifican los potenciales acuíferos y se evalúan sus características hidrodinámicas y su grado de explotación actual. Los resultados obtenidos constituyen una base técnica para futuras intervenciones orientadas a la captación, recarga, explotación racional y protección del acuífero Cinto.

La información generada constituye el fundamento técnico para la gestión sostenible del acuífero Cinto.

1.9 ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

El alcance de este estudio comprende la caracterización geométrica y el modelamiento hidrogeológico 2D del acuífero Cinto, mediante la ejecución e interpretación de 76 Sondajes Eléctricos Verticales (SEV) y su integración en perfiles litológicos de los pozos existentes que definen la geometría del acuífero y su posterior integración en un modelo 3D. No obstante, la investigación reconoce limitaciones críticas en cuanto a la fiabilidad de los datos geofísicos.

La principal limitación radica en la incertidumbre de los valores de resistividad obtenidos, lo cuales no son absolutos y están sujetos a multiples fuentes de erro. En primer lugar, la precisión de las lecturas depende directamente del estado y calibración del equipo geofísico (en nuestro caso el equipo contaba con certificado de calibración del año 2024, fecha en la cual de desarrollo el trabajo de campo), así como de la calidad del contacto de los electrodos en un terreno árido y altamente resistivo como el de Locumba. En segundo lugar, existe una fuerte dependencia del criterio del ingeniero que interpreta los datos; la geofísica al ser un método indirecto, es altamente susceptible a errores de sobre interpretación o falsas correlaciones si no se cuenta con un adecuado reconocimiento y un mapeo geológico previo detallado de la zona.

Sin una base geológica sólida que guie la interpretación de los datos, los resultados de las curvas de resistividad pueden conducir a conclusiones erróneas sobre la profundidad, tipo de litología del acuífero o basamento impermeable.

La falta de estudios recientes para la zona de Cinto Locumba no permite esclarecer el panorama actual del acuífero. Los últimos estudios realizados fueron el Boletín N° 2 Serie H Hidrogeología de la cuenca del Río Locumba publicado por el INGEMMET el año 2009 que dan un panorama general de toda la cuenca Locumba y estudios ejecutados por la empresa EMAP SAC desde el año 2012 para la Municipalidad Jorge Basadre.

Otra limitación inherente al alcance espacial del estudio reside en la actual distribución geoespacial de los Sondajes Eléctricos Verticales (SEVs). Si bien se ha ejecutado una malla de 76 estaciones, la resolución del modelo hidrogeológico se ve supeditada a la densidad de estos puntos de control. Un espaciamiento mayor entre sondajes incrementa la incertidumbre en la interpolación lateral de las unidades hidroestratigráficas (máximo de 500 metros de espaciado por sondaje), lo que puede limitar la precisión del acuífero en sectores con alta heterogeneidad litológica, es por ello que se interpolaron SEV´s de apoyo los cuales deberán ser corroborados en una campaña en campo complementaria.

Esta vulnerabilidad se ve agravada por los escasos logeos de pozos en el área de estudio, lo que limita la capacidad de contrastar las interpretaciones geofísicas con la realidad litoestratigráfica del subsuelo.

En consecuencia, debe entenderse como una aproximación técnica sujeta a la subjetividad inherente al proceso de interpretación en sectores con falta de datos directos (logueo de pozos).

A pesar de estas limitaciones y restricciones, los resultados obtenidos son representativos para los objetivos de la tesis.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Los estudios previos consultados para la elaboración de la siguiente tesis fueron los siguientes:

El boletín N° 2 Serie H Hidrogeología de la cuenca del Río Locumba publicado por el INGEMMET el año 2009, el cual tuvo como objetivo elaborar un mapa hidrogeológico de la cuenca del río Locumba que sirvió de base para proponer alternativas de solución teniendo en cuenta la geología, fuentes de agua y geofísica.

El Diagnóstico sobre implementación, aplicación y control de los derechos de usos de agua en la cuenca Caplina - Locumba elaborado por la ANA el año 2014 nos da una visión del estado situacional después de la aplicación de los derechos de agua.

Informe Estado situacional del acuífero Cinto elaborado por la empresa EMAP SAC en el año 2018 para Municipalidad de Jorge Basadre, ese informe muestra el balance hídrico realizado para el acuífero de Cinto evidenciando que el acuífero ha colapsado por la sobre-explotación de la última década, concluyéndose que las aguas subterráneas deben ser exclusivamente para uso poblacional.

El articulo **Evaluación de zonas potenciales de recarga de acuíferos en la cuenca de Locumba, región árida del desierto de Atacama mediante la integración de dos métodos MCDM: Fuzzy AHP y TOPSIS** publicado el 10 de julio de 2024 elaborado por Pocco et al. El resultado muestra que los factores más influyentes para la recarga son la precipitación, la permeabilidad y las pendientes, respectivamente. El resultado de TOPSIS clasifica las zonas de recarga en cinco categorías: muy alta (13%), alta (28%), moderada (15%), baja (28%) y muy baja (16%). Esta investigación busca ser el primer paso hacia una gestión eficaz de los recursos hídricos.

La tesis **Integración de modelo FUZZY-AHP-TOPSIS para evaluar el potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba, Tacna** publicada el 23 de agosto de 2024 por la Ing. Arlet Mendoza, la cual tuvo como objetivo determinar las zonas con potencial de agua subterránea mediante la integración del modelo Fuzzy AHP-TOPSIS para identificar y determinar las zonas de recarga hídrica, considerando múltiples criterios geológicos e hidrogeológicos.

2.2 BASES TEÓRICAS

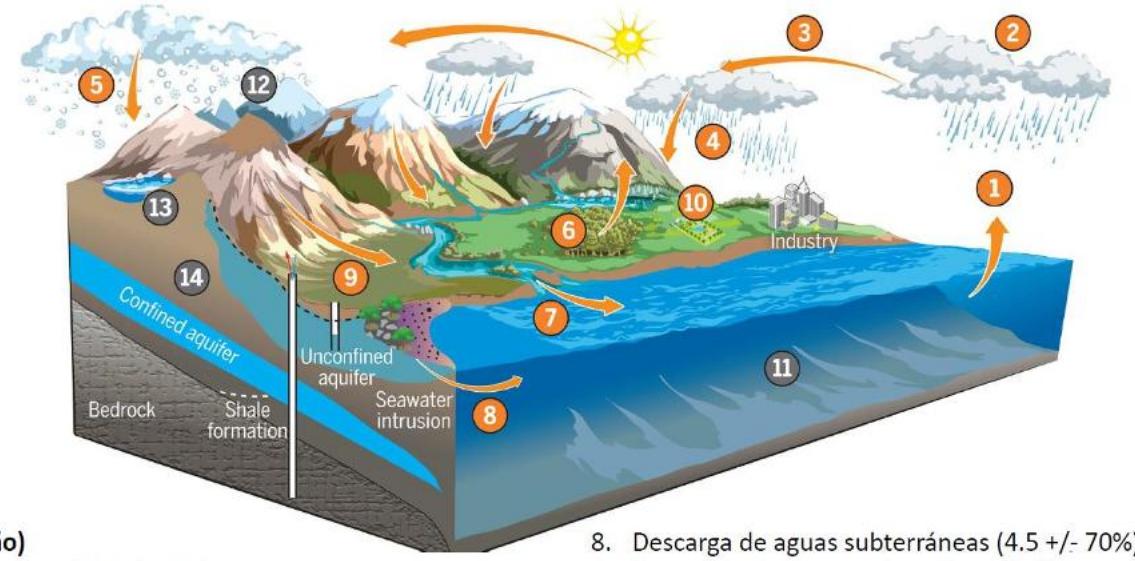
2.2.1. Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico, es un proceso continuo del agua, en sus diferentes estados en el planeta como en su forma subterránea y

superficial (Ver Figura 2), su proceso de transporte re-circulatorio es indefinido y permanente. Se debe fundamentalmente a dos causas: la energía del sol para la evaporación y la gravedad terrestre para la precipitación y el escurrimiento, tanto superficial como subterráneo. Este último proceso permite la infiltración del agua a través del medio poroso y fracturado, alimentando los horizontes saturados y permitiendo la recarga de acuíferos como el de Cinto, donde el flujo se desplaza vertical y horizontalmente en respuesta a los gradientes hidráulicos, cerrando así el ciclo mediante su eventual descarga en fuentes naturales o su extracción antrópica.

Figura 2

Ciclo Hidrológico global simplificado y sus componentes



Flujo (1000 km3/año)

1. Evaporación oceánica (420+/-20%)
2. Precipitación al océano (380+/-20%)
3. Transporte neto del flujo de vapor de agua (46+/-20%)
4. Precipitación pluvial (lluvia) (98.5 +/- 10%)
5. Precipitación nival (12.5)
6. Evapotranspiración terrestre (69 +/- 10%)
7. Escorrentía (46+/-10%)
8. Descarga de aguas subterráneas (4.5 +/- 70%)
9. Extracción de aguas subterráneas (~1)
10. Recarga gestionada de acuíferos (RGA/MAR) 0.01

ALMACENAMIENTO (x1000 km3)

11. Oceano 1,338,000
12. Glaciares y nieve 24,064
13. Permaforst 300
14. Aguas subterráneas 23,400

Nota. La figura representa el proceso del ciclo hidrológico y sus componentes esquematizados. Modificado de (Kuang et al., 2024).

2.2.2. Aguas subterráneas

Se define como el agua que ocupa los poros y fisuras de las formaciones geológicas bajo la superficie terrestre dentro de la zona saturada donde la presión hidrostática es igual o mayor a la atmosférica. No son depósitos estáticos, sino parte del ciclo hidrológico en movimiento.

2.2.3. Definición de Acuífero

Un acuífero es una unidad geológica (roca o sedimento) que tiene la capacidad de almacenar y transmitir el agua subterránea en cantidades significativas bajo gradientes hidráulicos naturales (Kay M. Stanney, 2012). Un acuífero debe poseer porosidad para almacenar el agua y permeabilidad para conducirla.

2.2.4 Clasificación de acuíferos

De acuerdo con la presión hidrostática y la naturaleza de sus capas limitantes, se clasifican en:

- **Acuíferos Libres (No Confinados)**

  Son aquellos en los que el límite superior (tabla freática) se encuentra por debajo del techo de la formación permeable y está en contacto directo con la presión atmosférica. La liberación de agua en estos sistemas ocurre principalmente por el **drenaje gravitacional** de los poros, proceso definido técnicamente como

desaturación o porosidad eficaz.(Kay M. Stanney, 2012)

- **Acuíferos Confinados (Cautivos)**

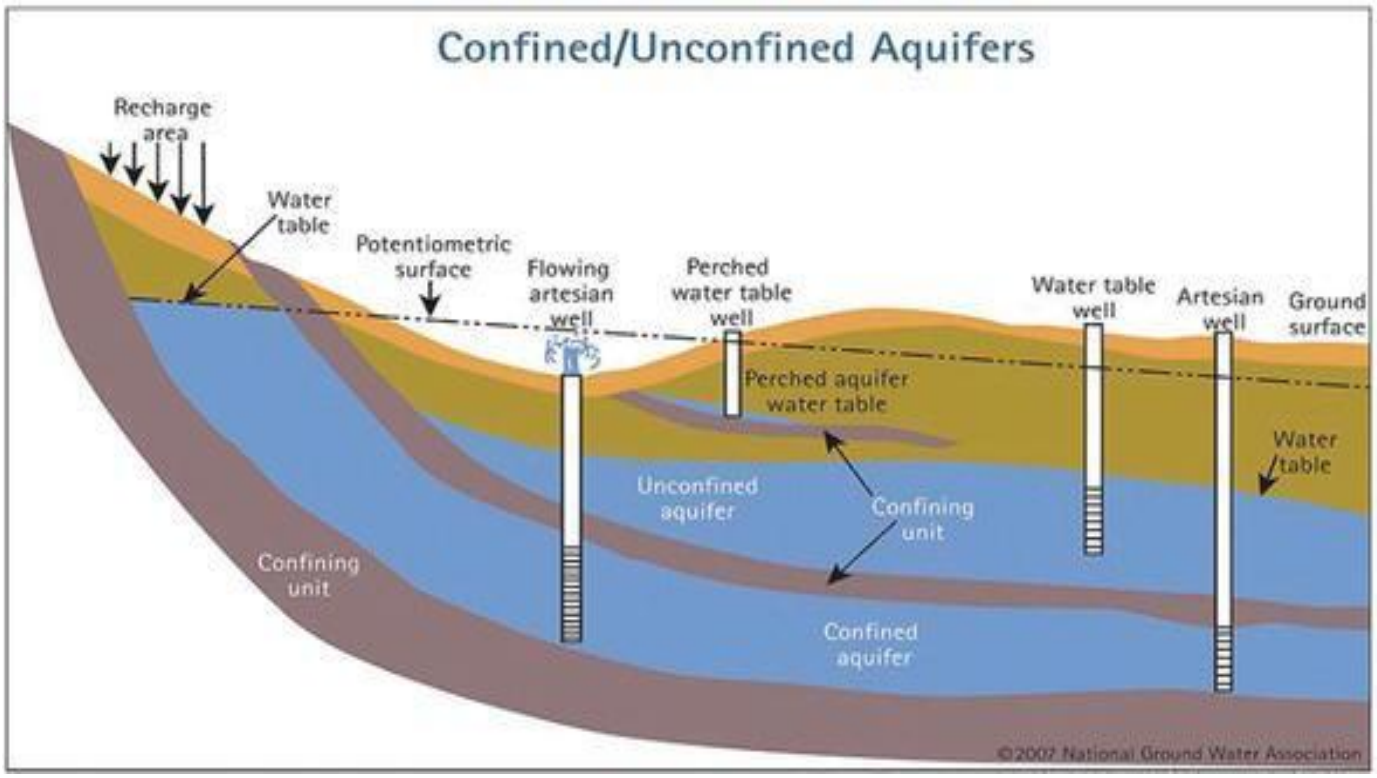
  Se encuentran limitados superior e inferiormente por capas impermeables (acuícludos), manteniendo el recurso bajo una presión superior a la atmosférica. En estos sistemas, el nivel piezométrico se sitúa por encima del techo de la formación acuífera. A diferencia de los libres, el agua que ceden proviene de la **expansión elástica del agua** y de la **compresión del esqueleto granular** de la formación al reducirse la presión de poros (Martin et al., 2005).

- **Acuíferos Semiconfinados**

  Constituyen un caso particular de los acuíferos cautivos donde al menos una de las capas confinantes es un **acuitardo** (capa de baja permeabilidad). Esto permite una transferencia vertical de flujo denominada goteo o filtración (*leakage*), conectando hidráulicamente diferentes niveles estratigráficos (Zhang et al., 2024).

Figura 3

Esquema de los tipos de acuíferos en función de sus características geológicas e hidrodinámicas



Nota. Representación esquemática de la dinámica de los acuíferos. Se ilustra la diferenciación entre acuíferos libres (no confinados) y cautivos (confinados), así como la relación entre el nivel freático, la superficie piezométrica y los diferentes tipos de captaciones (pozos freáticos y artesianos). Tomado de (O & A, 2018).

2.2.5. Caracterización Hidrogeológica

La caracterización hidrogeológica de la cuenca del río Cinto se basa en el análisis que se realiza para interpretar los resultados de estudios geológicos, geofísicos, geomorfológicos y geotécnicos de un área determinada con el objetivo de conformar las unidades hidrogeológicas lo cual permitirá comprender el mecanismo de circulación del agua subterránea.

Acuíferos fisurados sedimentarios

Se caracteriza por que transmite y almacena agua subterránea a través de las fisuras de las formaciones geológicas. Su capacidad de almacenamiento y conducción de agua subterránea depende de la porosidad secundaria generada por fracturas. Su matriz presenta baja permeabilidad primaria, de modo que el flujo subterráneo se canaliza en sistemas de fisuras.

Acuíferos volcánicos sedimentarios

Están compuestos por secuencias interestratificadas de materiales volcánicos (lavas, tobas, cenizas) y sedimentarios (conglomerados, arenas, limos), capaces de almacenar y transmitir agua subterránea gracias a su porosidad y fracturación Son poco permeables y porosidad alta, pero en zonas donde no existe precipitación se consideran acuíferos de baja productividad, siendo su mayor fuente de recarga los tributarios del río Cinto.

Acuíferos detríticos

Son acuíferos de sedimentos detríticos, su permeabilidad se debe a la porosidad intergranular (de tipo primario).

Normalmente se comportan como acuíferos libres (no confinados), con amplias zonas de recarga rápida y capacidad de regular caudales frente a variaciones climáticas, aunque responden de manera lenta a las extracciones intensivas debido a la gran capacidad de almacenamiento de sus horizontes más finos Son todos los materiales con tamaño de bloques, cantos rodados, gravas arenas y finos como los depósitos de los ríos, como es el caso del río Cinto.

2.2.6 Recarga y descarga natural de acuíferos

Recarga Natural

Es el proceso por el cual el agua externa se incorpora a la zona saturada. En regiones áridas como Locumba, la recarga directa por lluvia es casi nula, predominando la recarga indirecta a través de la infiltración en los cauces de los ríos (pérdidas por infiltración en el lecho) o flujo subterráneo desde cuencas altas.

Descarga Natural

Es la salida de agua del sistema hacia la superficie o la atmósfera. Ocurre mediante manantiales, flujo hacia ríos (ríos efluentes), descarga al mar o a través de la **evapotranspiración** (Scanlon et al., 2006).

2.2.7 Vulnerabilidad de un acuífero

Es el grado de probabilidad de que un sistema subterráneo se vea afectado de manera negativa por perturbación o tensión de la superficie. Depende de la capacidad de atenuación natural relacionada a los procesos físico-químicos (filtración, biodegradación, hidrolisis, adsorción, dilución, volatilización y dispersión) (Rama et al., 2022).

Conocer la vulnerabilidad de un acuífero nos ayuda a diseñar planes de gestión y estrategias de protección específicas que equilibren su actual desarrollo y necesidades futuras (Javadi et al., 2017).

2.2.8 Factores que afectan la cantidad y calidad del agua subterránea

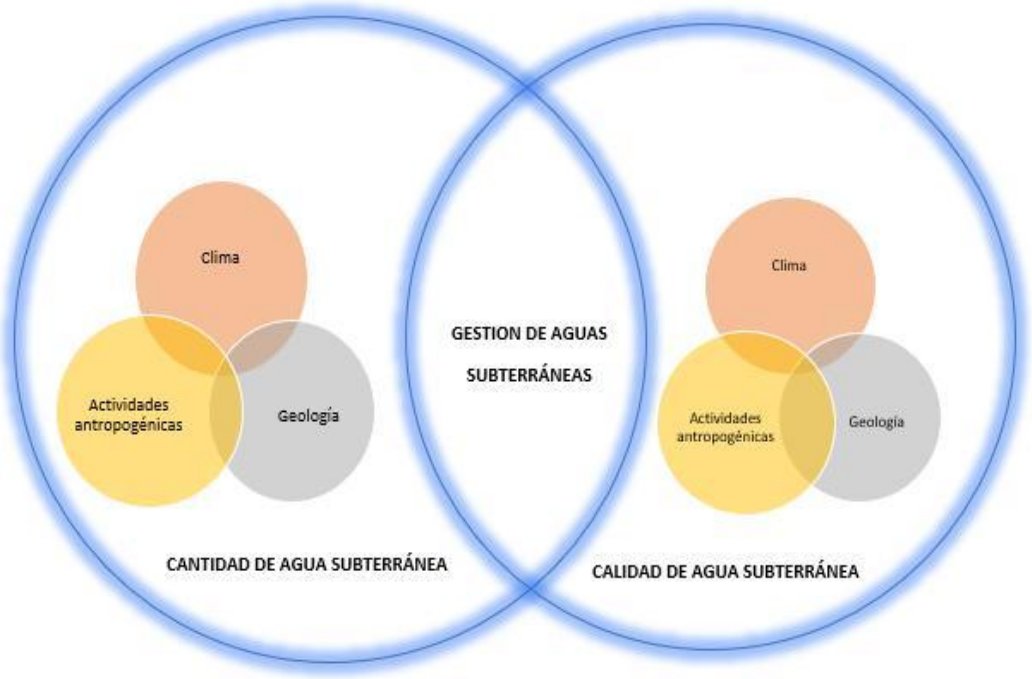
Según (Luczaj, 2016), los factores que afectan la cantidad y calidad de las aguas subterráneas son los siguientes:

- Cantidad de agua subterránea: nivel del agua subterránea, almacenamiento, recarga, flujo y descarga(Pulido-Velazquez et al., 2015).
- Calidad del agua subterránea: concentración de elementos, Ph, conductividad, total de solidos disueltos, alcalinidad, etc (Ravindra et al., 2019).
- Factores geológicos: basamento rocoso, geología estructural y estratigrafía (Kohlhepp et al., 2017) .

- Factores climáticos: parámetros climáticos (aridez) y cambio climático (Kohlhepp et al., 2017).
- Factores antropogénicos: agricultura, crecimiento urbano, actividades industriales (MINERIA) y gestión (Frommen et al., 2021).
- Gestión de aguas subterráneas: control de calidad y cantidad (Roseta-Palma, 2002).

Figura 4

Esquema de los diferentes factores estudiados que afectan la cantidad y calidad del agua subterránea



Nota. Diagrama de Venn que ilustra la interdependencia de los factores condicionantes en la gestión de recursos hídricos subterráneos. Modificado de (Aloui et al., 2023).

El desarrollo sostenible de las aguas subterráneas a escala global y local se logra con el mantenimiento y protección de los recursos hídricos en equilibrio con los beneficios económicos, ambientales y sociales.(Hiscock et al., 2002).

2.2.9 Equilibrio Hídrico

En base al conocimiento de los pozos existentes a lo largo del valle se puede deducir que el espesor del reservorio acuífero permeable saturado no es mayor a 40m y que la parte saturada fluctúa anualmente, dependiendo de la recarga del acuífero, variando 5 a 15 metros el nivel estático del agua subterránea.

Estas variaciones en la recarga y extracción de agua subterránea rompen el equilibrio hídrico en el acuífero, afectando el nivel piezométrico y la descarga del acuífero con un desfase temporal, debido a que el agua extraída del acuífero proviene inicialmente de su almacenamiento. Cuando los procesos de reducción de la recarga de los acuíferos y de sobreexplotación de los acuíferos se dan simultáneamente, resulta difícil determinar cuál de los dos procesos (o ambos) es el responsable de la evolución del acuífero. (Jódar et al., 2024)

2.2.10 Prospección Geofísica

2.2.10.1 Método de resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es una propiedad física de los materiales geológicos que cuantifica su capacidad para oponerse al flujo de corriente

eléctrica. En el contexto de la hidrogeología y prospección geofísica es el parámetro clave para diferenciar litologías y detectar la presencia de agua subterránea.

Se compone de la siguiente propiedad física:

- **Conductividad:** La capacidad de un material geológico para permitir el flujo de corriente eléctrica.
- **Conductividad electrólica:** La corriente circula a través del agua contenida en los poros o fracturas de la roca. La presencia de iones disueltos (sales) convierten al agua subterránea en un conductor. Los materiales saturados con agua dulce tienen resistividades bajas a intermedias mientras que los secos son muy resistivos.

La resistividad es la inversa de la conductividad eléctrica. La resistividad eléctrica (Pa) se define como la capacidad de un material para oponerse al flujo de corriente eléctrica. Mientras que la resistencia (R) depende de la forma y dimensiones del objeto, la resistividad es una propiedad intensiva del material, independiente de su tamaño.

La resistividad se representa por la siguiente relación matemática (Kirsch, 2009):

$$\rho = R*A/L \ldots(1)$$

R: Resistencia medida en ohmios (Ω)

A: Área de la sección transversal a través de la cual fluye la corriente (m^2)

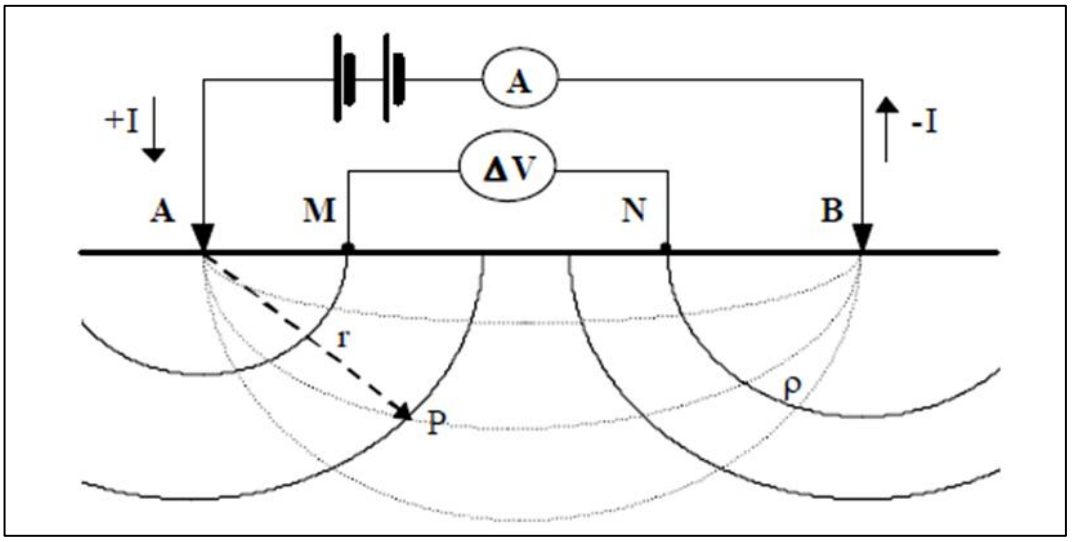
L: Longitud del material recorrido (m)

El método geofísico empleado para la presente tesis será el de Resistividad eléctrica, en su variante de Sondajes Eléctricos Verticales (SEVs), con dispositivo simétrico SCHLUMBERGER, constituye la técnica geofísica fundamental para la caracterización indirecta del subsuelo en la presente investigación.

El principio físico del método se fundamenta en la **Ley de Ohm** y la teoría del campo potencial aplicado a un medio seminfinito, homogéneo e isótropo. Al inyectar una corriente eléctrica continua (I) en el terreno a través de dos electrodos emisores (A y B) y medir la diferencia de potencial (ΔV) resultante mediante dos electrodos receptores (M y N) (Alam et al., 2024), es posible determinar la capacidad del medio para oponerse al flujo de carga eléctrica.

Figura 5

Conceptualización de la ley de ohm y el flujo de corriente eléctrica en el subsuelo



Nota. Variaciones en la densidad de corriente eléctrica subsuperficial. Se requieren al menos cuatro electrodos para la medición de la resistividad eléctrica. A y B son los electrodos de corriente (por donde pasa la electricidad), mientras que M y N son los electrodos de potencial (por donde se miden las diferencias de potencial) y V es el voltaje. Fuente (Molina, 2004).

2.2.10.2 Interpretación de Curvas SEV´s

Es un proceso que permite determinar los estratos con distinta resistividad y espesor a partir de las resistividades aparentes medidas en superficie. La curva puede tener varias soluciones (diferentes estratos puedes generar similares curvas de resistividad) por lo que su interpretación requiere un criterio riguroso de la geología y perforaciones previas para reducir errores.

Metodología de interpretación

Anteriormente la metodología se basa en el uso de ábacos teóricos (curvas

patrón) (Zondirovanii & Kalenov, 1987) para diferentes estratos donde se superponía manualmente la curva de campo sobre curvas calculadas para aproximar los parámetros iniciales.

El proceso de interpretación es el siguiente:

1. Modelo inicial y ajuste automático: se introduce la curva de campo de Excel al software IP2WIN en cual permite estimar un modelo inicial basado en la inspección visual (similar a la técnica de ábacos). Posteriormente el software utiliza algoritmos de inversión matemática (optimización de mínimos cuadrados) para ajustar automáticamente el modelo teórico a la curva observada minimizando el error residual (RMS).

2. Integración de datos de control (Constraint Inversion): para ajustar las curvas de campo se realizó un proceso de ´´inversión con restricciones´´. Se integraron los datos estratigráficos de 6 logueos de pozos de la zona de Cinto, los cuales sirvieron como puntos de control para fijar los espesores reales de cada estrato obligando a las curvas a converger hacia la realidad geológica encontrada en el área.

3. Reconocimiento geológico y validación: el resultado final no solo es el ajuste matemático de la curva, se necesita su correlación con el reconocimiento geológico local. Se asignan interpretaciones litológicas

a las resistividades calculadas (resistividades altas para el horizonte superficial compuesto de cantos rodados, bolonería y grava, resistividades bajas para el acuífero saturado y resistividades muy bajas para el basamento impermeable compuesto de arcillitas y limos en estado seco), verificando que el modelo sea coherente con la estratigrafía regional.

En el caso del acuífero Cinto, esta metodología al contrastar las curvas de campo con los registros de perforación dentro del software IPI2WIN permitió obtener una geometría del acuífero con mayor objetividad, superando las limitaciones de subjetividad inherentes a la interpretación manual tradicional.

2.2.10.3 Arreglo de electrodos

Los sondajes eléctricos verticales (SEV´s) disponen de lo siguiente:

- Un circuito energizante que permite enviar al terreno en correspondencia con dos electrodos (A-B) una corriente de intensidad conocida.
- Un circuito de medición que permita determinar la diferencia de potencial provocada por la corriente enviada al terreno, que es medida entre dos electrodos de recepción (M-N).

Según las dimensiones del cuadripolo, se puede abarcar un volumen más o menos grande de terreno, en toda su heterogeneidad, sea en sentido horizontal o vertical.

La ejecución de SEV´s con un dispositivo Schlumberger simétrico exige que por cada dispositivo AM-NB se mida una resistividad aparente (Pa) debido a que el subsuelo es naturalmente heterogéneo y presenta estatificación, la cual se representa con una ponderación de las resistividades verdaderas de las distintas capas litológicas presentes, que se calcula con la siguiente ecuación propuesta por (Kirsch, 2009):

$$Pa= K*\Delta V/I \ldots (1)$$

Pa: resistividad del medio en Ohm-m

I= intensidad de corriente circulante en el terreno en miliamperios (mA)

ΔV=diferencia de potencial en milivoltios (mV) en los electrodos M-N.

K= constante geométrica que depende de la separación de los electrodos.

Para el arreglo Schlumberger, esta constante se define como (Sheriff & Geldart, 1995):

$$K=\pi * \frac{(\frac{AB}{2})^2-(\frac{MN}{2})^2}{MN} \ldots(2)$$

Donde:

AB/2: Distancia de los electrodos de corriente

Representa la mitad de la distancia total entre los dos electrodos emisores de corriente (A y B).

MN: Distancia entre los electrodos de recepción de potencial

En el arreglo Schlumberger, se mantiene pequeña en relación con AB para obtener una medida más precisa del gradiente de potencial en el centro. Actúa como el divisor que normaliza la diferencia de potencial medida.

Matemáticamente, al aparecer en el denominador de la constante K, indica que la resistividad aparente es inversamente proporcional a la apertura del dipolo de recepción.

En el método de SEV, es la variable que "controla" la profundidad de la investigación. A medida que aumentamos la separación entre A y B, la corriente eléctrica penetra más profundamente en el subsuelo.

Al elevar esta distancia al cuadrado en la fórmula, la constante K aumenta proporcionalmente, compensando el hecho de que, a mayor distancia, el campo eléctrico se vuelve más débil y la diferencia de potencial registrada es menor.

MN/2: Distancia de los electrodos de potencial:

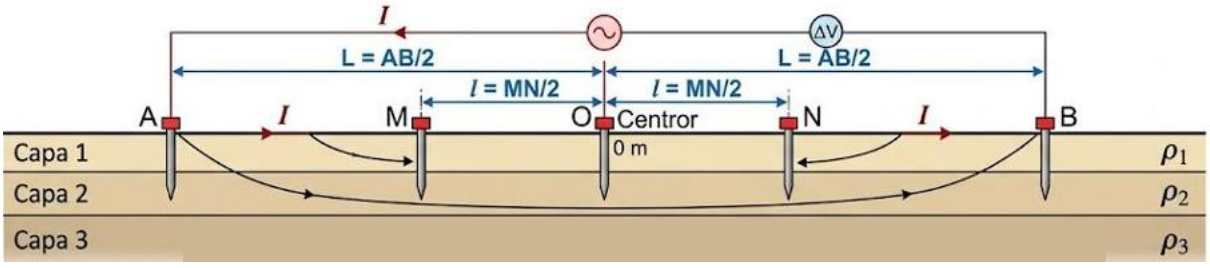
Es la mitad de la distancia entre los dos electrodos de potencial (M y N), los cuales se sitúan siempre en la parte central del arreglo, entre A y B.

Los electrodos miden la caída del voltaje (ΔV) resultante del paso de la corriente. La norma en el arreglo Schlumberger es que MN debe ser siempre mucho menor que AB (AB/2 ≥5*MN/2). Mantener esta distancia pequeña permite que la medición sea una muestra puntual de potencial eléctrico en el centro del dispositivo, garantizando que el gradiente de potencial sea detectable con precisión.

Por lo tanto, por medio de desplazamientos sucesivos de los electrodos A-B y M-N, se abarca estratos de terreno cada vez más profundos, de esta manera, se obtiene un diagrama de la ubicación en función de la profundidad de los terrenos estudiados.

Figura 6

Diagrama de arreglo Schlumberger



Nota. Ecuación de resistividad aparente y constante geometría K para el arreglo Schlumberger. Modificado de (Sheriff & Geldart, 1995).

$$\text{Resistividad Aparente } (\rho_a): \quad \rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

$$\text{Constante Geométrica } (K): \quad K = \pi \cdot \frac{(AB/2)^2 - (MN/2)^2}{MN}$$

$$K = \pi \cdot \frac{L^2 - l^2}{2l}$$

Se realizarán los SEV´s con una profundidad de estudio estimada de 75 m por ser la profundidad inferida para el basamento impermeable del acuífero. Y valores de AB/2 desde 10 m con MN de arreglos de 5 a 15 m.

Con los resultados de los SEV´s se elaborarán secciones hidrogeológicas a lo largo del rio Cinto (transversales y longitudinales) las cuales se unirán en el Software Leapfrog para realizar un modelo hidrogeológico en 2D, el cual nos mostrara la geometría del acuífero.

2.2.10.4 Resistividad de un medio geológico

Las rocas presentan resistividades eléctricas que varían en un amplio rango, dependiendo de diversos factores, como la litología, el grado de conservación, humedad y principalmente el grado de mineralización del agua contenida en los poros y fracturas (Park et al., 2016). Las rocas de una misma génesis presentan valores de resistividad que varían dentro de ciertos rangos típicos, o que permite caracterizarlas.

En depósitos no consolidados, la resistividad aumenta al incrementarse la granulometría predominante (Abd Malik et al., 2023). En todos los casos, las rocas que contienen agua mineralizada disminuyen su resistividad (Llera et al., 1990).

Como se observa en la **Tabla 3**, existe una relación inversa entre la conductividad y la resistividad: los materiales arcillosos, debido a su capacidad de retención de agua y carga eléctrica superficial, presentan valores bajos (1 – 20Ω·m), comportándose generalmente como acuítardos o acuícludos.

Por el contrario, materiales granulares como gravas y arenas saturadas con agua dulce muestran rangos intermedios (20 Ω·m), lo que permite identificarlos como acuíferos productivos. Las rocas ígneas compactas o formaciones secas presentan las resistividades más altas, superando a menudo los 100 Ω·m, indicando la ausencia de agua subterránea.

Tabla 3

Clasificación litológica según resistividades

Material / Formación	Rango de resistividad (Ω·m)	Características hidrogeológicas
Arcillas húmedas	1 – 20	Alta conductividad, generalmente acuitardos o acuícludos.
Limos	10 – 40	Permeabilidad baja a media, acuífero pobre.
Arenas secas	100 – 1000	Alta resistividad, baja conductividad; si están saturadas bajan sus valores.
Arenas saturadas (agua dulce)	20 – 100	Buen acuífero con porosidad intergranular.
Gravas y conglomerados saturados	50 – 300	Alta permeabilidad, acuíferos productivos.
Rocas ígneas compactas (granito, basalto fresco)	1000 – 10000+	Muy resistentes, impermeables si no presentan fracturas.
Rocas volcánicas fracturadas	100 – 500	Permeabilidad secundaria, acuíferos fisurados.
Depósitos aluviales (mixtos)	30 – 300	Varía según granulometría y saturación; pueden ser buenos acuíferos.
Agua subterránea dulce	10 – 100	Conductividad depende de su mineralización.
Agua subterránea salobre/salada	0.2 – 10	Muy conductiva, disminuye resistividad del medio.

Nota. Resistividades y tipos de materiales según Keller & Frischknecht (1966), Telford et al. (1990), Ward (1990) y Kirsch (2006).

2.2.10.5 Sondajes Eléctricos Verticales

El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) es un método que permite medir la resistividad eléctrica del subsuelo en función de la profundidad. Se inyecta una corriente eléctrica continua o de muy baja frecuencia en el subsuelo mediante un par de electrodos emisores (A y B), mientras se registra la diferencia de potencial resultante a través de un par de electrodos receptores (M y N) para determinar la resistividad aparente del medio. El principio físico se rige por la Ley de Ohm, adaptada a un medio seminfinito, homogéneo e isótropo. Sin embargo, dado que el subsuelo es heterogéneo, el valor obtenido se denomina Resistividad Aparente (Pa), la cual es una ponderación de las resistividades de las diversas capas por las que circula la corriente.

2.2.11 Parámetros hidrogeológicos de un acuífero

2.2.11.1 Porosidad

En hidrogeología, la porosidad se define como el cociente entre el volumen de vacíos y el volumen total del material, siendo un valor adimensional entre 0 y 1(Nimmo et al., 2023).

Se distinguen dos tipos principales:

- Porosidad total: incluye todos los espacios vacíos, independientemente de su conectividad.
- Porosidad efectiva: corresponde únicamente a los vacíos interconectados que permiten el flujo de agua.

2.2.11.2 Permeabilidad (Conductividad Hidráulica)

También denominada conductividad hidráulica (K), se define a través de la ley de Darcy (Uliana, 2024)como:

$$Q=-KA\ \Delta h/\Delta l \ldots(3)$$

Donde Q es el caudal, A es el área de la sección y $\Delta h/\Delta l$ es el gradiente hidráulico

Los principales factores que afectan la conductividad hidráulica son la granulometría (tamaño y forma de los granos), la viscosidad del fluido, la porosidad efectiva, la anisotropía del medio (estratificación o fracturación) y la presencia de fisuras(Lloyd, 1991).

2.2.11.3 Transmisividad

La transmisividad hidráulica (T) de un acuífero es el volumen de agua que atraviesa una franja de un metro de ancho del acuífero saturado por unidad de tiempo y bajo un gradiente hidráulico unitario (Chang et al., 2021).

$$T=K \times b \ldots. (4)$$

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

Se expresa en unidades de $[L^2/T]$ y mide la tasa de transmisión de agua a través de todo el espesor saturado de un acuífero bajo un gradiente hidráulico unitario. El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) es un método de prospección geofísica

de tipo resistivo que permite investigar la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo en función de la profundidad. Se basa en la introducción de una corriente eléctrica continua (o de muy baja frecuencia) en el terreno a través de un par de electrodos y la medición de la diferencia de potencial resultante mediante un segundo par de electrodos. El principio físico se rige por la Ley de Ohm, adaptada a un medio seminfinito, homogéneo e isótropo. Sin embargo, dado que el subsuelo es heterogéneo, el valor obtenido se denomina Resistividad Aparente (Pa), la cual es una ponderación de las resistividades de las diversas capas por las que circula la corriente.

2.2.11.4 Coeficiente de almacenamiento

El Coeficiente de Almacenamiento (S) es el parámetro que define la capacidad de una formación geológica para liberar o admitir agua. Sin embargo, su interpretación física varía según el tipo de acuífero, vinculándose directamente con la capacidad de reserva del sistema.

En Acuíferos Libres no confinados, como los identificados en la zona de estudio, el coeficiente de almacenamiento es prácticamente igual a la porosidad efectiva (ne), también denominada Rendimiento Específico (Sy).

Este parámetro representa la fracción de poros que participa activamente en el flujo y el almacenamiento, permitiendo que el agua sea drenada por la acción de la gravedad.

2.2.12 Balance Hídrico

Se basa en la conservación de la masa de agua mediante el cálculo de entradas, salidas y variaciones de almacenamiento en un sistema hidrológico definido (Weinmann, 2007) .

Se aplica la ecuación general:

$$I-O=\Delta S\ldots (5)$$

Donde:

I: Ingreso (Recarga)

O: Egreso (Descarga/Bombeo)

ΔS: Variación de las reservas

2.2.13 Geometría del acuífero

La definición de la geometría del acuífero constituye la base fundamental del modelo hidrogeológico conceptual, el cual permite representar el comportamiento del flujo subterráneo y la capacidad de almacenamiento del sistema. La geometría no solo consiste en una delimitación física, vincula las características litológicas con la respuesta hidráulica del subsuelo ante las variables externas (Daniel et al., 2020).

La caracterización geométrica de este sistema se basa en un enfoque mixto, integrando los siguientes elementos clave:

1. Modelo geoeléctrico: se utilizan los sondajes eléctricos verticales como una herramienta cuantitativa primaria diferenciando los horizontes de resistividad diferenciados, los cuales actúan como indicadores de las unidades geológicas y su estado de saturación. Posteriormente se realiza su correlación en secciones geológicas geofísicas.

2. Integración con perforaciones de control: la validación de los valores de resistividad mediante la correlación directa con la información del logueo de pozos (Fry et al., 1996a). Esta calibración fue fundamental para asignar un significado hidrogeológico preciso a los estratos identificados permitiendo delimitar confiablemente:

   a) La profundidad del techo del acuífero (m).

   b) El espesor de horizonte saturado (m).

   c) La extensión lateral del acuifero (km2) y su volumen total estimado (m3).

   Las secciones geológicas geofísicas realizadas permiten una visualización integral del acuífero y el basamento impermeable y la continuidad de las unidades saturadas consolidando el modelo conceptual del acuífero.

   Este enfoque integral permite superar las limitaciones de los métodos tradicionales al proporcionar una herramienta robusta para la gestión del

recurso hídrico en Locumba, fundamentada en datos de terreno validados y un modelamiento digital coherente con la realidad geológica local.

2.2.14 Logueo de pozos

El logueo de pozos o registro estratigráfico consiste en la descripción sistemática y detallada de los sedimentos, rocas, etc. encontrados durante el proceso de perforación. En el caso de estudios hidrogeológicos, este procedimiento permite validar las interpretaciones geofísicas a modelos cuantitativos (Mohammed et al., 2024). Ver ANEXO 5 registro de perfiles litológicos de pozos.

El logueo se fundamenta en la observación directa de los detritos o testigos donde se registran parámetros esenciales para caracterizar el acuífero:

1. Descripción litológica: identificación de las unidades sedimentarias (gravas, arenas, limos, arcillitas) y su estado de consolidación.
2. Identificación de horizontes hidroestratigráficos: permite diferenciar entre acuíferos (sedimentos permeables), acuitardos (hosrizontes de baja permeabilidad) y basamento impermeable.
3. Determinación de profundidades: establece con precisión las cotas de contacto entre las unidades ajustando los resultados obtenidos mediante SEV’s.

El logueo de pozos cumple una función relevante en el proceso de calibración:

- Reduce la incertidumbre: Un SEV puede sugerir un estrato permeable pero el logueo confirma si esa conductividad se debe a una arcillita impermeable o a arena saturada con agua salobre.
- Ajuste de parámetros: los espesores medidos directamente en la perforación sirven como restricciones para el software IP2WIN evitando que el modelo matemático diverja de la realidad geológica del valle.
- Validación del modelo: en el software Leapfrog el logueo de los 7 pozos de control actúa como una malla de puntos de datos solidos haciendo que se interpole este volumen entre las perforaciones dando mayor certeza al modelo geométrico del acuifero y a los cálculos volumétricos resultantes.

El logueo de los 7 pozos estratégicos permitió definir las interfaces verticales, estableciendo el basamento de arcillitas como el límite inferior del sistema acuífero.

Este registro estratigráfico, al integrarse con la resistividad, constituye la base sobre la cual se han construido las secciones hidrogeológicas que sustentan este estudio, asegurando que la arquitectura modelada sea coherente con la estratigrafía de Locumba. Ver ANEXO 5 registro de perfiles litológicos de pozos.

2.2.15 Modelamiento hidrogeológico

El modelamiento hidrogeológico constituye una herramienta esencial para la representación simplificada de un sistema acuífero complejo, permitiendo integrar datos geológicos, geofísicos e hidráulicos que faciliten la comprensión del acuífero.

El modelamiento permite cuantificar la incertidumbre en la geometría y parámetros del acuífero, integrando diversas fuentes de datos para reducirla (Fry et al., 1996b).

En el modelo se define la geometría, condiciones de borde y funcionamiento hidrogeológico del acuífero. Este proceso implica la síntesis de la litología e hidroestratigrafía para definir las unidades que conforman el sistema además de identificar las recargas y descargas del acuífero. La precisión de este modelo depende de la integración de las secciones geológicas geofísicas con la información de logueo de pozos de campañas previas.

Para la determinación precisa de la geometría del acuífero, el uso de herramientas de modelamiento implícito, como Leapfrog, permite transformar datos puntuales y secciones geofísicas en volúmenes 3D continuos. La ventaja de este enfoque es la capacidad de actualizar dinámicamente el modelo a medida que se incorporan nuevos datos, asegurando que la representación de la extensión lateral y profundidad del acuífero sea coherente con la configuración geológica local.

Integración de Datos

La robustez del modelo hidrogeológico en esta investigación se sustenta en la integración de datos heterogéneos:

- Datos Geofísicos: Interpretación de SEVs para obtener la resistividad del subsuelo, permitiendo diferenciar unidades litológicas saturadas de las no saturadas.
- Datos de Perforación: Información litológica de pozos de control que actúan para validar los modelos obtenidos mediante la inversión geofísica.
- Análisis Espacial: Construcción de secciones transversales y longitudinales que, al ser interpoladas mediante modelamiento implícito, definen la geometría 3D del acuífero.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. TIPO DE INVESTIGACION

El presente trabajo de investigación presenta un diseño **NO EXPERIMENTAL** por que analiza las condiciones naturales del subsuelo recolectando datos existentes mediante sondajes y perforaciones sin intervenir para provocar cambios ni modificar las condiciones del acuífero para observar sus efectos.

La investigación es **CUANTITATIVA** porque se basa en la medición de valores de resistividad, porosidad, permeabilidad y transmisividad a través de los SEV´s y perforaciones de pozos. Además de tener objetividad en la interpretación al no depender de opiniones ni percepciones sino de parámetros hidrogeológicos y geofísicos precisos.

Según su finalidad **APLICADA**, porque no busca generar teoría nueva, sino aplicar métodos geofísicos e hidrogeológicos existentes (SEV y modelamiento 2D) para resolver un problema concreto: determinar la geometría de un acuífero real con fines de gestión hídrica.

Según su alcance o nivel es **DESCRIPTIVA – EXPLICATIVA:** Es **DESCRIPTIVA** porque caracteriza las propiedades hidrogeológicas de las formaciones geológicas del acuífero Cinto (litología, resistividad, hidrodinámica) y **EXPLICATIVA** porque no solo describe, sino que interpreta el comportamiento

del sistema acuífero y construye un modelo que explica su geometría y estructura interna.

3.2. DISEÑO Y ENFOQUE DE LA INVESTIGACION

La presente investigación posee un **ENFOQUE CUANTITATIVO**, fundamentado en la recolección y análisis de datos numéricos obtenidos mediante prospección geofísica indirecta y registros litoestratigráficos directos. Este enfoque permite la cuantificación de parámetros físicos del subsuelo, tales como la resistividad eléctrica y los espesores saturados, para la caracterización técnica del acuífero Cinto mediante herramientas estadísticas y modelos de inversión geofísica.

El diseño de la investigación es **NO EXPERIMENTAL DE CORTE TRANSVERSAL**, de tipo descriptivo-correlacional. Es no experimental debido a que se observan los fenómenos hidrogeológicos en su contexto natural (el sistema acuífero Locumba) sin la manipulación deliberada de las variables. Es de corte transversal, ya que la toma de datos de los 76 Sondajes Eléctricos Verticales (SEV) y la medición de niveles piezométricos representan un diagnóstico estático del estado del acuífero en un periodo de tiempo determinado.

La investigación se desarrolla a un **NIVEL APLICADO Y EXPLORATORIO-DESCRIPTIVO**. Integra principios de estratigrafía, litología, geofísica e hidráulica subterránea para delimitar las unidades hidroestratigráficas y definir la geometría del sistema acuífero.

En el caso específico de la zona de Cinto - Locumba, esta aproximación

permite interpretar las propiedades hidráulicas a partir del análisis de los SEV, el logeo de perforaciones existentes y la evaluación de pruebas de bombeo, consolidando un modelo conceptual que sirva de base para la gestión sostenible del recurso hídrico.

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población de estudio está constituida por el conjunto de formaciones geológicas e hidrogeológicas que conforman el sistema acuífero de la parte baja de la cuenca del río Cinto, comprendida en el distrito de Locumba, provincia de Jorge Basadre, departamento Tacna.

La muestra comprende los puntos de medición de los 76 Sondajes Eléctricos Verticales (SEV) ejecutados, así como los pozos seleccionados para el logueo litoestratigráfico con la medición de niveles piezométricos y las unidades geológicas reconocidas y mapeadas en campo durante el reconocimiento geológico previo, que sirven de base para la interpretación de los datos geofísicos. Esta delimitación permite obtener datos de resistividad y geometría del subsuelo con la precisión necesaria para la elaboración del modelo hidrogeológico 2D y 3D, enfocándose en la zona de mayor relevancia para la gestión del agua subterránea en el distrito de Locumba.

3.4. ETAPAS DE LA INVESTIGACION

3.4.1. Etapa preliminar

Durante esta fase se realizó la recopilación bibliográfica y revisión de

información secundaria proveniente de fuentes oficiales como el INGEMMET, la Autoridad Nacional del Agua (ANA), tesis previas, mapas geológicos, estudios hidrogeológicos de la cuenca del río Cinto, así como reportes de perforaciones y antecedentes de pozos. Además, se evaluó la información hidrológica, climática y geofísica relevante para la zona de estudio.

3.4.2. Trabajo de Campo

Se desarrollaron campañas de campo enfocadas en:

- Reconocimiento geológico detallado de la zona.
- Ejecución de 76 sondajes eléctricos verticales (SEV) con una profundidad de estudio de hasta 100 m.
- Levantamiento de información de pozos existentes (ubicación, profundidad, niveles de agua).
- Registro fotográfico y de coordenadas GPS de puntos clave.

Esta información permitió la elaboración de cortes geológicos y perfiles geofísicos transversales y longitudinales a lo largo del valle de Cinto.

3.4.3. Etapa de gabinete

En esta etapa se procesó e interpretó la información recopilada en campo y gabinete:

- Elaboración del mapa y cortes geológicos y geomorfológico de la zona de estudio

- Interpretación de curvas de resistividad obtenidas en los SEV mediante software IPI2WIN.
- Elaboración de secciones hidrogeológicas 2D en AutoCAD.
- Integración de las secciones y datos de pozos en Leapfrog para generar un modelo hidrogeológico 2D y 3D.
- Análisis de la geometría del acuífero, ubicación del basamento impermeable y estimación de volúmenes de agua almacenada.

3.4.4. Materiales e Insumos

Para el desarrollo de la tesis se utilizaron los siguientes insumos:

- Computadora con acceso a internet para la fase de gabinete.
- GPS y 01Cámara fotográfica.
- Móvil de campo (camioneta 4x4), combustible y viáticos.
- Georesistivímetro marca WargPower de fabricación USA, con un alcance de investigación de 500m de profundidad.
- 02 carretes de cables de 500 m. cada uno para A - B.
- 01 carrete con cable de diferentes tamaños para M y N.
- 08 electrodos de acero inoxidable.
- Sistema posicional geográfica por satélite (GPS).
- Maletín de herramientas.
- Sonda eléctrica para la medida de niveles freáticos.

CAPÍTULO IV

CARÁCTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

El desarrollo geomorfológico del área de estudio está dominado por procesos tectónicos, volcánicos, fluviales y gravitacionales que actúan sobre materiales sedimentarios y volcánicos, moldeadas por una historia tectónica activa y una dinámica erosiva importante. Esto tiene implicancias en la recarga hídrica.

Según la información geomorfológica del área de estudio obtenida por INGEMMET, el acuífero de Cinto presenta las siguientes unidades geomorfológicas (Ver ANEXOS mapa M-2 de geología regional):

4.1.1. Colina en roca sedimentaria (RC- rs)

Esta geoforma se encuentra emplazada al suroeste de la zona de estudio en el cerro Munipata y en el sector de Barrial, Chironta y Chirontita.

Geomorfológicamente presenta relieves redondeados formados por resistencia diferencial a la erosión de los estratos sedimentarios con una pendiente moderada a alta.

4.1.2. Colina y lomada en roca volcánica (RCL-rv)

Esta geoforma se encuentra emplazada al sur de la zona de estudio. Se desarrolla sobre depósitos volcánicos con una pendiente suave.

4.1.3. Colina y lomada en roca sedimentaria (RCL- rs)

Esta geoforma se encuentra emplazada al norte de la zona de estudio en el sector de Gentilar y al sureste en el sector de Cuaylata.

Presenta relieves suaves con pendientes bajas a medias. Geodinámicamente se formaron por la erosión diferenciada de estratos sedimentarios.

4.1.4. Colina y lomada disectada en roca sedimentaria (RCLD-rs)

Esta geoforma se encuentra emplazada a ambos flancos del rio Cinto en el Cerro Barrial, Escaleras y Sagollo y a ambos flancos del río Salado en el cerro La Capilla y Chulla.

Geodinámicamente se encuentra dominado por la diseccion fluvial presentando colinas y lomadas intensamente erosionadas por las quebradas y ríos. Se relacionan con zonas de fracturas o pendientes pronunciadas.

4.1.5. Altiplanicie sedimentaria (AP-s)

Esta geoforma se encuentra emplazada al norte en la quebrada Palomo, y al noroeste de la zona de estudio cercana a la quebrada Honda.

Geodinámicamente estuvo dominado por antiguas erosiones, formando paleosuperficies con una superficie amplia, plana o ligeramente inclinada sobre materiales sedimentarios.

4.1.6. Superficie de flujo piroclástico (Sfp)

Esta geoforma se encuentra emplazada al este de la zona de estudio. Geodinámicamente se encuentra asociadas a eventos volcánicos explosivos del Cuaternario. Son planicies compuestas por material piroclástico de ceniza, pómez y lapilli fácilmente erosionables.

4.1.7. Superficie de flujo piroclástico disectado o erosionado (Sfp-d)

Esta geoforma se encuentra emplazada al este de la zona de estudio.

Geodinámicamente se encuentran modeladas por la erosión de ríos o quebradas en superficies volcánicas. Son indicadores de la evolución de las superficies de flujo piroclásticos hacia formas más maduras del paisaje geomorfológico.

4.1.8. Vertiente coluvial de detritos (V-d)

Esta geoforma se encuentra emplazada al norte de la zona de estudio en el sector de Caoña al inicio del cauce del río Cinto.

Geodinámicamente está geoforma está dominada por procesos de meteorización físico - química en las unidades rocosas, presentando pendientes fuertes a moderadas susceptibles a procesos de meteorización que general zonas inestables.

4.1.9. Vertiente con depósitos de deslizamiento (V-dd)

Esta geoforma se encuentra emplazada al norte de la zona de estudio. Geodinámicamente se encuentra dominada por movimientos en masa o deslizamientos antiguos que forman superficies irregulares y desplazamientos de bloques.

4.1.10. Vertiente o piedemonte aluvio - torrencial (P-at)

Esta geoforma se encuentra emplazada al norte en el sector de Matogroso, al noroeste y sureste de la zona de estudio en las pampas Cabeza de Vaca y Toro Muerto.

Geodinámicamente se encuentra dominado por flujo de detritos y ríos estacionales formando abanicos o conos aluviales con pendientes medias a altas con alto potencial erosivo.

4.1.11. Terraza aluvial (T- al)

Esta geoforma se encuentra emplazada en el cauce del rio salado, al sureste de la zona de estudio.

Geodinámicamente se encuentra dominado por el cauce actual del rio salado y procesos de erosión/incisión fluvial.

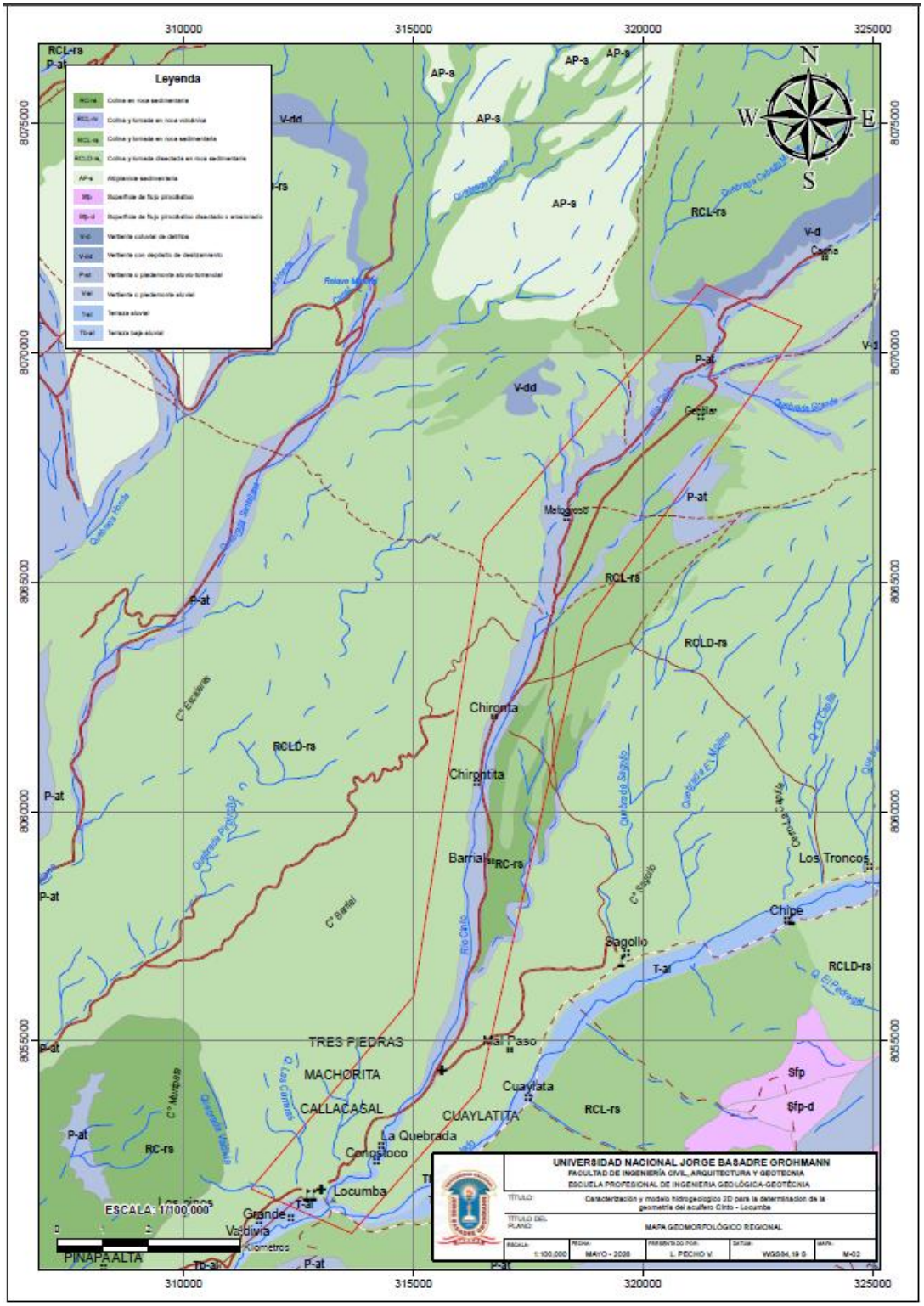
4.1.12. Terraza baja aluvial (Tb-al)

Esta geoforma se encuentra emplazada en el cauce inferior del rio Cinto, al sur de la zona de estudio.

Geodinámicamente se encuentra dominado por el cauce activo del rio Cinto. Se encuentran propensas a inundaciones en épocas de máximas crecidas.

Figura 7

Mapa Geomorfológico de la zona de estudio



Nota: En el mapa, se presenta las geoformas del área de estudio a nivel regional. Para una visualización más detallada, este mapa se incluye en el Anexo 1.

4.2 GEOLOGÍA REGIONAL

Las unidades estratigráficas reconocidas en el área de estudio relacionada con el Boletín Nº 25 ‘’Geología del cuadrángulo de Locumba’’ del INGEMMET actualizado en el año 2021. Las unidades sedimentarias de la Formación Sotillo, Formación Moquegua Inferior y Superior, Formación Huaylillas, Formación Millo, depósitos aluviales y fluviales; se describen a continuación, del más antiguo al más reciente (Ver Mapa M-03)***:***

4.2.1. Formación Sotillo (Pp – so)

Esta formación aflora al noroeste en el cerro Apacheta Cinto, al sureste en Pampa Cinto y cerro Sagollo, al oeste en el cerro las escaleras, al suroeste en el cerro Barrial y hacia el noreste de la zona de estudio.

Anteriormente la formación Sotillo fue considerada como la parte inferior de la formación Moquegua, sin embargo, fue renombrada debido a sus atributos litológicos

Litológicamente está constituida limolitas y areniscas rojas, intercalados con tobas lapilli pobremente seleccionadas.

Se encuentra subyaciendo a la formación Moquegua Inferior bajo una ligera discordancia angular.

Posee propiedades hidrogeológicas favorables para constituir un acuífero sedimentario volcánico potencialmente explotable con propiedades buenas de permeabilidad y mediana porosidad.

4.2.2. Formación Moquegua Inferior (Pp – mo/i)

Esta formación aflora al suroeste de la zona de estudio, en discordancia con la formación Sotillo. Su diferenciación litológica es difícil debido a su semejanza. Comúnmente las areniscas y conglomerados de la formación Moquegua son grisáceas, con tonalidades verdosas y rosáceas, las cuales difieren de la subyaciente Formación Sotillo y sobreyacente Formación Huaylillas, a parte de los contactos erosivos.

Litológicamente está constituida por conglomerados en matriz areno limosa con niveles de lodolitas intercaladas con arcillitas.

Hidrogeológicamente se caracteriza por poseer conglomerados policíclicos muy compactos pero fisurados en la parte media alta por su cercanía a la falla Purgatorio (segmento central)(Aguirre et al., 2022) , esto hace que su permeabilidad sea buena, lo que indica que es un acuífero fisurado de escasa producción, conformando los flancos y el basamento impermeable del acuífero a relativa profundidad (± 50m.).

4.2.3. Formación Moquegua Superior (Pp – mo/s)

Esta formación aflora al suroeste de la zona de estudio; litológicamente está constituida por conglomerados polimícticos con clastos de andesitas y riolitas, las cuales contienen formas lenticulares de areniscas tobáceas.

Hidrogeológicamente se caracteriza por poseer conglomerados con buena permeabilidad y transmisividad, pero bajos caudales (menores a 1 l/s), lo que indica que es un acuífero poroso de escasa producción por no tener recarga efectiva por encontrarse en la parte baja de la cuenca.

4.2.4. Formación Huaylillas (Nm – hu)

Esta formación aflora al sureste de la zona de estudio; litológicamente está constituida por tobas de ceniza y lapilli con fragmentos líticos de riolita, andesita y diorita, ignimbritas de color gris rosácea y areniscas tobáceas.

Esta formación sobreyace en discordancia erosiva a la formación Moquegua y subyace en contacto erosivo discordante a los conglomerados de la formación Millo.

Hidrogeológicamente, si el macizo rocoso no está fracturado no poseen permeabilidad y baja transmisividad clasificándolo como un acuitardo volcánico, pero si esta fracturado puede presentar permeabilidad secundaria.

4.2.5. Formación Millo (Np-mi)

Esta formación aflora al noreste en la parte media de la zona de estudio en Pampa Cinto y al noroeste en el Cerro Pirpincho.

La formación Millo no fue reportada en el cuadrángulo de Locumba (36 u) (Punta De Bombón et al., n.d.) sino sus componentes fueron considerados como la parte superior de la formación Huaylillas.

Los conglomerados de la formación Millo son distinguibles por la composición litológica de sus clastos (andesitas y riolitas violáceas), los cuales le dan una tonalidad oscura y contrasta con la formación Huaylillas.

Litológicamente está constituida por conglomerados polimícticos con predominancia de andesitas y riolitas en matriz de arenisca con matriz tobácea.

La formación Millo se encuentra subyaciendo a la Formación Huaylillas. E hidrogeológicamente los conglomerados polimícticos y areniscas en una matriz tobácea lo hacen un acuífero fisurado sedimentario con buena a mediana porosidad, pero baja permeabilidad.

4.2.6. Depósitos Cuaternarios

a. Depósitos aluviales (Q-al)

Son depósitos que se encuentran cubriendo las terrazas del rio Cinto y quebrada Santallana al noreste de la zona de estudio.

Litológicamente están constituidos por bloques, cantos rodados subredondeados y gravas semi-consolidadas con intercalaciones de arenas gruesas, tobas redepositados y arcillitas en posición horizontal a sub-horizontal.

b. Depósitos fluviales (Q-fl)

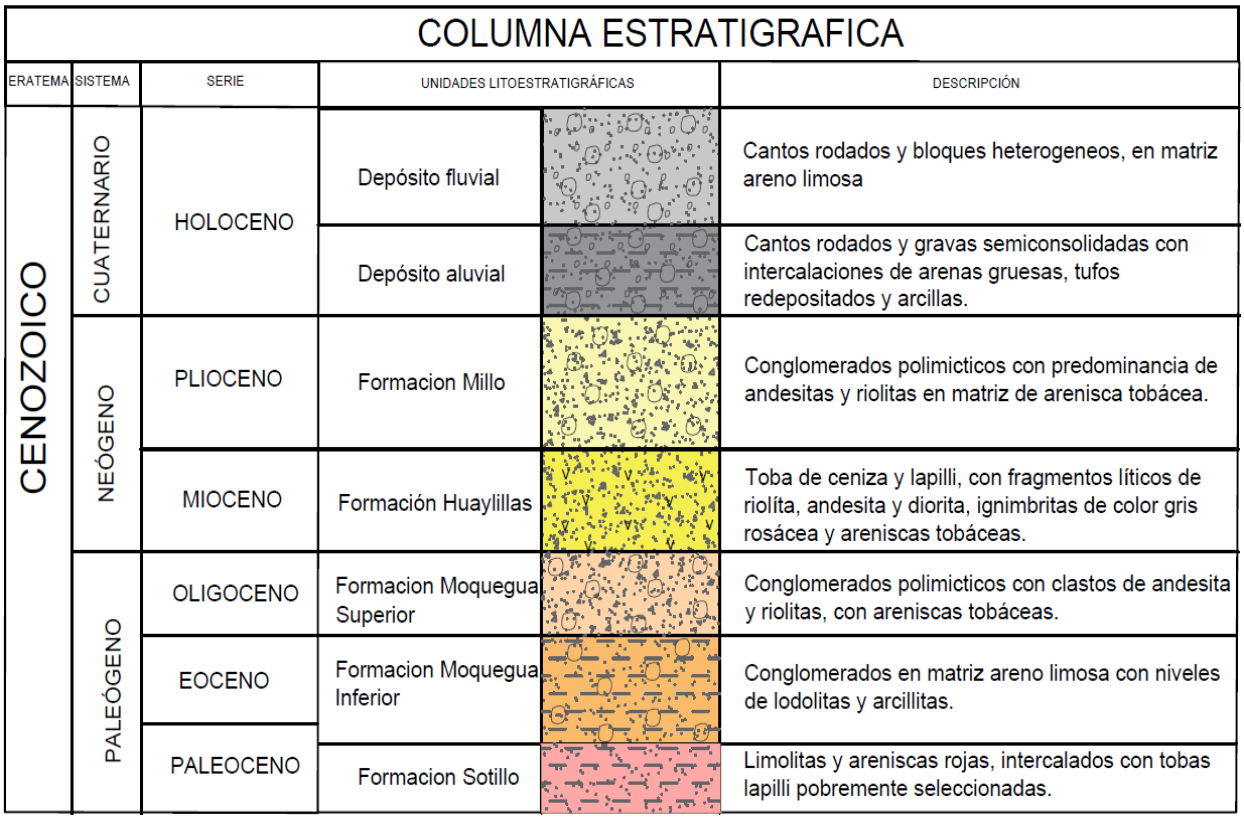
Son los depósitos ubicados en el cauce activo del río Cinto, y conforman el fondo de este; en forma de pequeñas terrazas, cortadas por las divagaciones del agua de avenida.

Consisten en bloques, cantos rodados subredondeados, gravas de naturaleza polimíctica en matriz areno limosa.

Hidrogeológicamente tanto los depósitos aluviales y fluviales son los depósitos más importantes pues conforman el medio físico favorable para la acumulación y flujo del agua subterránea, constituyendo el acuífero potencialmente explotable de la zona de estudio.

Figura 8

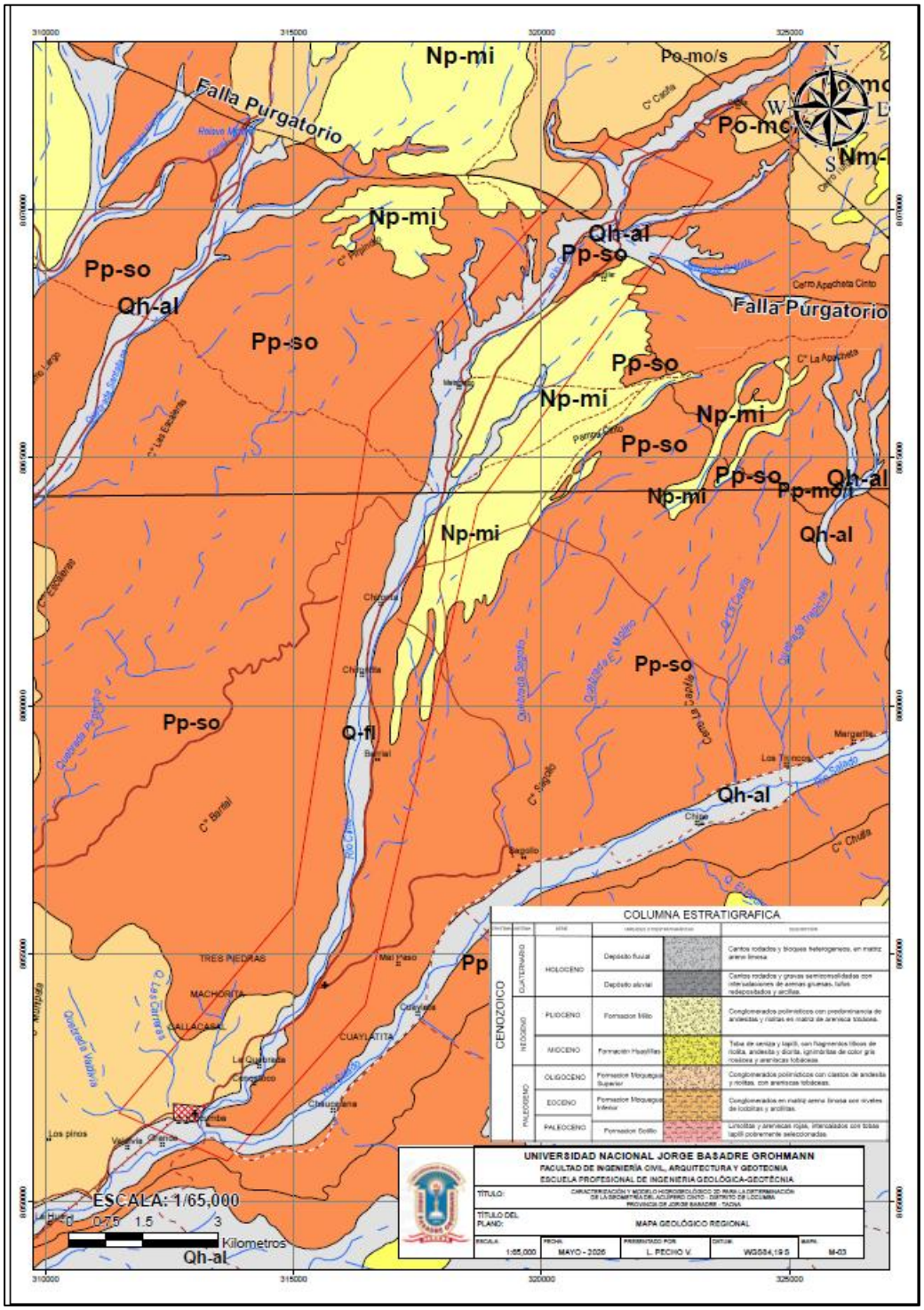
Columna estratigráfica de la zona de estudio



Nota. La figura muestra las formaciones geológicas de la cuenca Locumba. Modificado de INGEMMET (2021).

Figura 9

Mapa de geología regional de la zona de estudio.



Nota. Se visualiza las formaciones geológicas presentes en la zona de estudio. Para una visualización más detallada, este mapa se incluye en el anexo 1. Modificado de INGEMMET (2022)

4.3 RELIEVE ESTRUCTURAL

4.3.1. Zonas de colapso

En la zona de estudio se identifican zonas de colapso estructural asociadas principalmente a la actividad tectónica vinculada a la Falla Purgatorio (Aguirre et al., n.d.) y a procesos de erosión diferencial en depósitos poco consolidados.

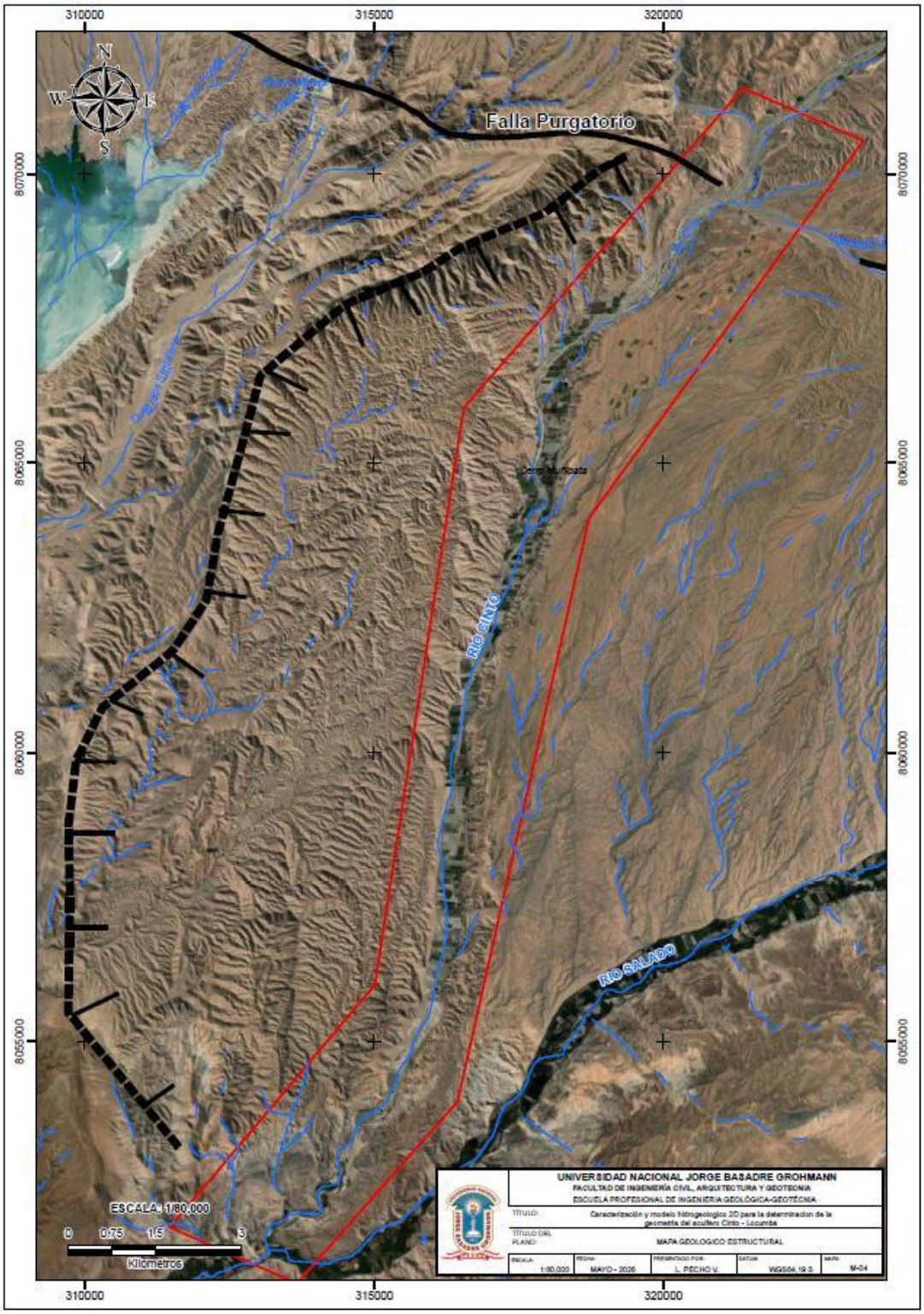
Una de las principales áreas de colapso se ubica en el sector occidental del valle de Cinto (Ver Figura 8) donde se observa un alineamiento de depresiones y hundimientos diferenciales que generan zonas de inestabilidad.

Esta zona presenta geomorfología irregular con desniveles abruptos, microdepresiones y bloques desplazados desarrollados sobre conglomerados de la Formación Moquegua y depósitos cuaternarios aluviales. La subsidencia esta favorecida por la sobreexplotación del acuífero, que ha generado un descenso piezométrico y perdida de soporte mecánico en los horizontes detríticos saturados (Tzampoglou et al., 2023).

Desde el punto de vista hidrogeológico, esta zona constituye un área de alta vulnerabilidad debido a que la fracturación secundaria favorece la infiltración rápida hacia el acuífero incrementando la perdida de almacenamiento subterráneo y contaminación por aguas superficiales o relaves mineros cercanos (Różkowski & Różkowski, 2016).

Figura 10

Mapa estructural de la cuenca Locumba – Valle de Cinto



Nota. La figura muestra la zona de colapso estructural asociada a la Falla Incapuquio y lineamientos secundarios de Mirave y Huancane. Modificado de INGEMMET (2025)

4.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL

El área de estudio se encuentra influenciada por una compleja dinámica tectónica controlada principalmente por la Faja de Fallas Incapuquio es una megafalla de rumbo NW-SE con una extensión de más de 600 km que atraviesa las regiones de Moquegua, Tacna y parte de Arequipa(Mejía et al., 2021a). Su origen este asociado a procesos de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana durante el Neógeno, lo que genero un sistema de fallas transcurrentes y compresivas en la cordillera occidental y antearco costero y que ha condicionado la evolución geológica de la cuenca Locumba (Mejía et al., 2021b).

Dentro de esta faja estructural destacan la Falla Purgatorio y otros lineamientos secundarios que ejercen un papel fundamental en la configuración geomorfológica del Valle de Cinto.

Falla Purgatorio: es una falla inversa con componente de rumbo dextral de unos 50 km de longitud desde la Pampa Purgatorio hasta el poblado de Mirave afectando a rocas de la Formación Moquegua y depósitos aluviales en el fondo de los valles (Aguirre et al., n.d.). Asociadas a esta falla principal se desarrollan fallas secundarias y lineamientos transversales (como los de Mirave y Huacanane), que fragmentan el basamento y controlan la disposición de los depósitos aluviales y fluviales recientes.

En la zona de estudio esta falla tiene características de una falla inversa con componentes de desgarre, lo que ha provocado un levantamiento diferencial de bloques, formación de escarpes y segmentación de unidades litológicas como la Formacion Moquegua, Huaylillas y depósitos cuaternarios. La actividad tectónica a lo largo de esta falla ha condicionado el relieve estructural del valle, así como la disposición de los cauces principales del río Locumba y sus tributarios(Sánchez et al., n.d.).

En relación con estas estructuras se han identificado zonas de colapso estructural, particularmente en el sector occidental del valle de Cinto, donde se observan hundimientos diferenciales, escarpes menores y depresiones topográficas. Estos colapsos se originan por la interacción entre la tectónica activa, la litología poco consolidada (conglomerados de la Formación Moquegua y depósitos cuaternarios) y la sobreexplotación del acuífero, que debilita la estabilidad mecánica del subsuelo.

Desde el punto de vista hidrogeológico, estas estructuras no solo delimitan la geometría del acuífero Cinto, sino que también actúan como zonas de recarga preferencial y vulnerabilidad, favoreciendo la infiltración rápida, pero aumentando el riesgo de subsidencia y contaminación subterránea.

La interacción entre estas estructuras y las unidades hidroestratigráficas no es pasiva, sino que condicionan el comportamiento hidráulico del sistema:

- **Control Estructural sobre la Dinámica de Flujo Subterráneo**: La actividad tectónica de la Falla Purgatorio ha generado un levantamiento diferencial de bloques y la segmentación de la Formación Moquegua, actuando como una barrera; las zonas de falla pueden comportarse como conductos preferenciales de flujo subterráneo mientras que los sectores donde existe desplazamiento de bloques impermeables actúan como barreras de flujo hidráulico.

- **Anisotropía en la transmisividad:** El fracturamiento asociado a los lineamientos Mirave induce a una anisotropía en la permeabilidad. El flujo subterráneo, en lugar de seguir una tendencia regional uniforme, es desviado y canalizado a través de estas zonas de mayor densidad de fracturamiento, lo que explica las variaciones locales en la productividad de los pozos y los gradientes hidráulicos observados en el valle.

- **Tectónica y recarga/descarga del acuífero:** Las zonas de colapso y las depresiones topográficas identificadas en el sector occidental funcionan como áreas de infiltración acelerada. La tectónica activa ha fracturado la cobertura sedimentaria, permitiendo que la escorrentía del río Locumba se infiltre rápidamente hacia los niveles saturados. Sin embargo, esta misma estructura permite que la explotación intensiva genere una respuesta de descenso de niveles más rápida, al estar el acuífero altamente interconectado a través de estas zonas de falla.

- **Tectónica y la estabilidad mecánica del subsuelo:** La sobreexplotación del acuífero, al reducir la presión de poros en depósitos poco consolidados (conglomerados de la Fm. Moquegua), activa procesos de subsidencia diferencial inducida por la falla. Este fenómeno altera la porosidad efectiva y disminuye irreversiblemente la capacidad de almacenamiento y conductividad del acuífero.

4.5. GEOLOGÍA LOCAL

Se realizó el reconocimiento litológico en campo en la zona de Cinto Locumba, en los afloramientos expuestos a ambos flacos del rio Cinto (Ver Mapa M-05).

4.5.1. Formación Sotillo (Pp – so)

Anteriormente la formación Sotillo fue considerada como la parte inferior de la formación Moquegua, sin embargo, fue renombrada debido a sus atributos litológicos

Litológicamente está constituida limolitas y areniscas, intercaladas con tobas pobremente seleccionadas.

Se encuentra subyaciendo a la formación Moquegua Inferior bajo una ligera discordancia angular.

4.5.2. Formación Moquegua Inferior (Pp – mo/i)

Esta formación se encuentra en discordancia con la formación Sotillo. Su diferenciación litológica es difícil debido a su semejanza. Las areniscas y conglomerados

de la formación Moquegua son grisáceas, con tonalidades verdosas y rosáceas, y sobreyacen en contacto erosivo a la Formacion Huaylillas.

Litológicamente, en la zona de estudio está constituida por conglomerados en matriz areno limosa y niveles de arcillitas.

4.5.3. Formación Moquegua Superior (Pp - mo/s)

Litológicamente, en la zona de estudio está constituida por conglomerados polimícticos con clastos de andesitas y riolitas, en una matriz de areniscas tobáceas, en la zona de Conostoco

Esta formación se encuentra en la parte baja de la cuenca.

4.5.4. Formación Millo (Np-mi)

Esta formación aflora en la parte alta de la cuenca, en el sector de Matogroso y el Gentilar.

Los conglomerados de la formación Millo son distinguibles por la composición litológica de sus clastos (andesitas y riolitas violáceas), los cuales le dan una tonalidad oscura.

Litológicamente está constituida por conglomerados polimícticos con predominancia de andesitas y riolitas en matriz de arenisca con matriz tobácea.

4.5.5. Depósitos Cuaternarios

a. Depósitos aluviales (Q-al)

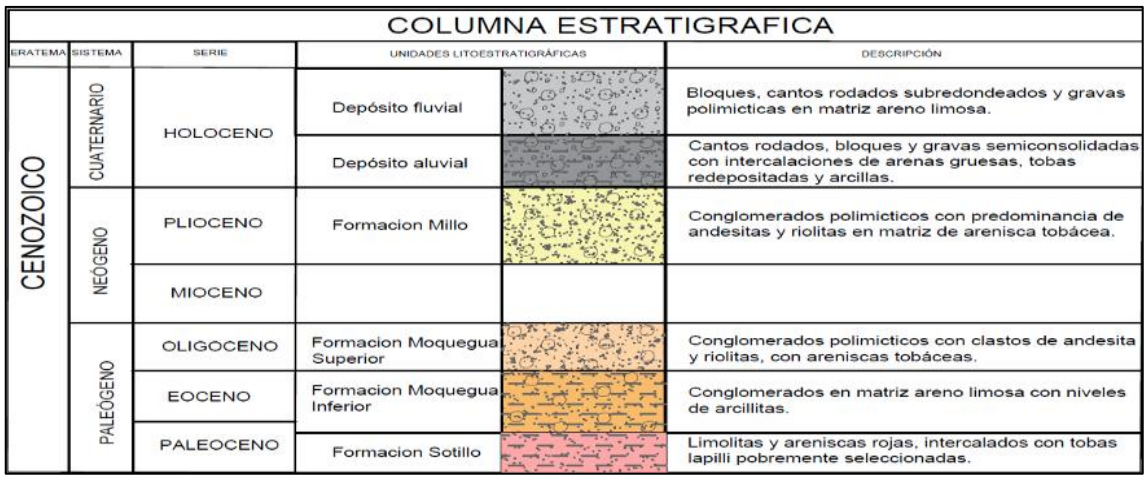
Son depósitos que se encuentran cubriendo los cauces del rio Cinto. Litológicamente consisten en cantos rodados, bloques y gravas semi-consolidadas con intercalaciones de arenas gruesas, tobas redepositados y arcillitas.

b. Depósitos fluviales (Q-fl)

Son los depósitos ubicados en el río Cinto, y conforman el fondo de este; en forma de pequeñas terrazas, cortadas por las divagaciones del agua de avenida. Consisten en bloques, cantos rodados subredondeados, gravas de naturaleza polimíctica en matriz areno limosa.

Figura 11

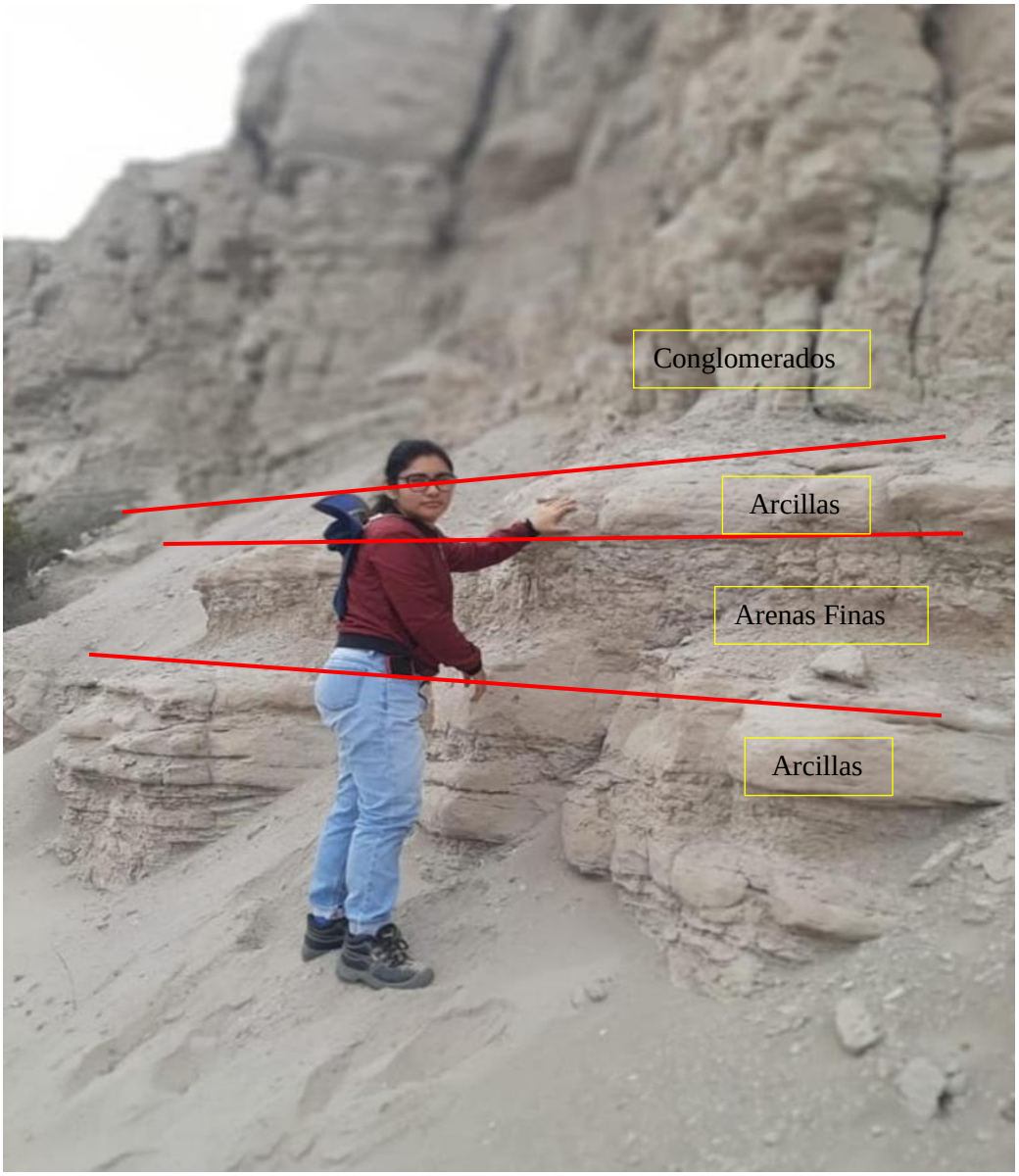
Columna Estratigráfica de la zona de estudio



Nota. La figura muestra las formaciones geológicas locales de Cinto Locumba.
Fuente. Elaboración propia.

Figura 12

Reconocimiento de campo de la zona de estudio



Nota. La figura muestra las arcillitas y conglomerados del Acuífero Cinto perteneciente a las formaciones Sotillo y Moquegua.

Figura 13

Vista panorámica de las formaciones geológicas presentes en la zona de estudio



Nota. La figura muestra el contacto concordante de la formación Moquegua Inferior sobreyaciendo a la Formación Sotillo

Figura 14

Vista del cauce superior del río Cinto



Nota. La figura muestra el reconocimiento de los materiales aluviales y fluviales del cauce superior del rio Cinto previo a la toma de datos georesistivos

Figura 15

Vista del cauce inferior del río Cinto



Nota. La figura muestra el reconocimiento de los materiales aluviales y fluviales del cauce inferior del rio Cinto a la altura del pozo Los Carzos.

4.6. GEOMORFOLOGÍA LOCAL

El área de estudio, correspondiente al valle de Cinto, presenta una geomorfología dominada por la acción combinada de procesos tectónicos, fluviales y gravitacionales (Ver mapa M-06). El valle se desarrolla en dirección noreste - suroeste siguiendo la traza de lineamientos estructurales asociados a la Falla Purgatorio, lo que ha condicionado su forma alargada y estrecha. Los flancos del valle están conformados por laderas de moderada a fuerte pendiente, esculpidas sobre conglomerados de la Formación Moquegua y depósitos volcánicos, que muestran signos de erosión diferencial y de colapso local en sectores debilitados por fracturación.

El río Cinto presente un curso sinuoso debido a que la falla Purgatorio y la alta pendiente del terreno (30%) imponen un control rígido que impide la formación de meandros libres. El río se ve obligado a adaptarse a los bloques desplazados por la falla generando sinuosidades en lugar de meandros de llanura aluvial. La zona de colapso se localiza en los sectores de mayor espesor saturado donde el movimiento de la falla ha creado depresiones tectónicas locales (grabens) permitiendo que el paleocauce se ensanche. En cambio, en zonas donde la falla se pone en contacto con bloques competentes de la Formación Moquegua se angosta el valle.

Geomorfológicamente, la zona se caracteriza por la coexistencia de planicies aluviales activas, terrazas fluviales y laderas inestables, lo que la convierte en un espacio de alta dinámica geomorfológica y con importantes implicancias hidrogeológicas, al controlar tanto la infiltración como la vulnerabilidad del sistema acuífero.

a) **Planicie aluvial activa:** es el fondo actual del río Cinto, compuesto por gravas, arenas y bloques en disposición subhorizontal. Es la Principal zona de recarga directa; acuífero libre con alta permeabilidad.
b) **Terrazas fluviales bajas y medias:** son superficies escalonadas a ambos márgenes del río, formadas por antiguos depósitos aluviales. Funcionan como reservorios naturales; buena capacidad de almacenamiento de agua subterránea.
c) **Abanicos aluviales:** son geoformas en abanico formadas por la deposición de materiales transportados por quebradas (Santallana, Honda, Huacanane). Corresponden a sectores de recarga preferencial; materiales gruesos con alta permeabilidad.
d) **Laderas en roca sedimentaria y volcánica:** son los flancos del valle con pendientes medias a altas, modelados por erosión diferencial y procesos gravitacionales. Su baja permeabilidad; aportan escorrentía superficial y son áreas propensas a deslizamientos y colapsos.

e) **Zonas de colapso estructural:** Son sectores deprimidos asociados a la Falla Purgatorio y fallas secundarias, con hundimientos diferenciales. Corresponden a áreas de alta vulnerabilidad; favorecen la infiltración rápida, pero también la pérdida de almacenamiento y riesgo de contaminación. Las estructuras de colapso se ubican al oeste de la zona de estudio.

CAPÍTULO V

PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

5.1. Método geofísico

El método Schlumberger fue seleccionado por debido a que este arreglo de electrodos permite alcanzar mayores profundidades de investigación con menor desplazamiento de electrodos de potencial lo que optimiza el trabajo de campo (Ciampi et al., 2024). Proporciona una alta resolución vertical de los estratos, fundamental para diferenciar litologías por contraste de resistividades como conglomerados, arenas, limos y depósitos aluviales característicos del Valle de Cinto.

Este método es ampliamente usado en hidrogeología para la determinación de la geometría de los acuíferos detríticos porque permite identificar el contacto con el basamento impermeable y estimar el espesor del acuífero saturado.

Finalmente, su confiabilidad y costo lo convierte en la alternativa más eficiente para estudios de exploración hidrogeológica en regiones áridas como Locumba, donde la sobreexplotación del recurso hídrico exige una caracterización precisa del subsuelo.

5.2 Equipo Utilizado

Para el presente trabajo de prospección geofísica se utilizó un georesistivímetro marca WargPower de fabricación USA, con un alcance de investigación de 500m de profundidad, con las siguientes especificaciones técnicas:

- Transmisor y receptor. Pantalla digital.
- Circuito de medición que anula los potenciales espontáneos naturales (corrientes parásitas).
- Fuente de alimentación, mediante baterías en serie con un máximo de salida de 500 voltios.
- Efectúa medidas del potencial (V) de diferentes rangos de 0.2 a 1,000 Voltios y medidas diferentes de intensidad (I) desde 2 a 10 amperios, ambos en corriente continua.
- Switch de salida de 6 rangos diferentes hasta un máximo de 500 voltios.

ACCESORIOS

- 02 carretes de cables de 500 m. cada uno para A - B.
- 01 carrete con cable de diferentes tamaños para M y N.
- 08 electrodos de acero inoxidable.
- 01 winche 50m. Maletín de herramientas.

Figura 16

Georesistivímetro marca WargPower, carretes y electrodos



Nota. La figura muestra el equipo utilizado para la toma de datos georesistivos en campo.

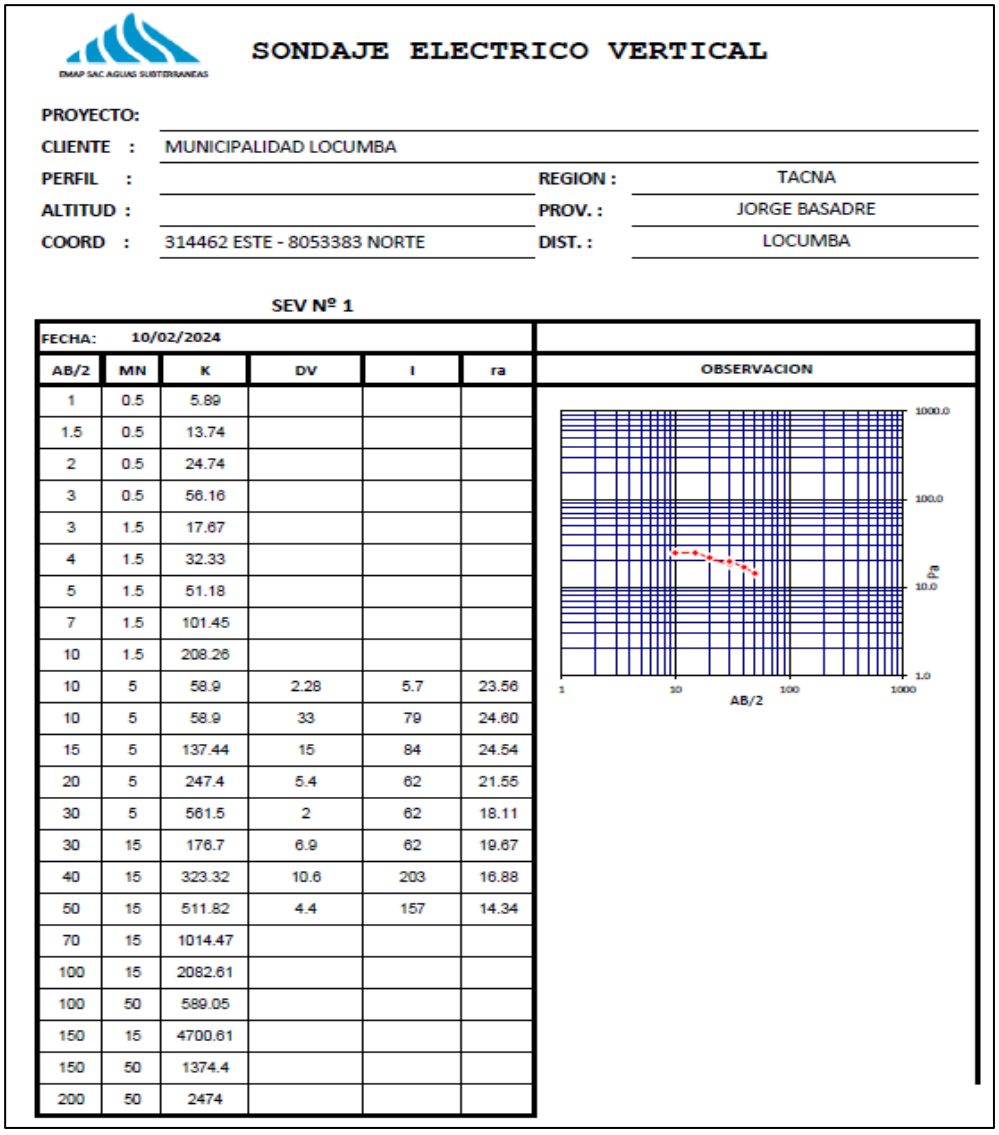
5.3 Adquisición de datos de campo

Se realizó la campaña de campo durante el año 2024 y se recopiló información anterior de la empresa EMAP SAC, contabilizando un total de 76 Sondajes eléctricos Verticales que serán utilizados para la realización del modelo hidrogeológico.

El AB/2 empleado fue de 10 m hasta 70 m, con un MN de 5 m a 15 m; condiciones suficientes para poder investigar hasta los 70 m de profundidad, definir la configuración del subsuelo, inferir el nivel de agua e interceptar el basamento Impermeable del acuífero de la zona de estudio.

Figura 17

Formato de campo de Sondajes Eléctricos Verticales



SONDAJE ELECTRICO VERTICAL

EMAP SAC AGUAS SUBTERRANEAS

PROYECTO:			
CLIENTE :	MUNICIPALIDAD LOCUMBA		
PERFIL :		REGION :	TACNA
ALTITUD :		PROV. :	JORGE BASADRE
COORD :	314462 ESTE - 8053383 NORTE	DIST. :	LOCUMBA

SEV Nº 1

FECHA: 10/02/2024

AB/2	MN	K	DV	I	ra
1	0.5	5.89			
1.5	0.5	13.74			
2	0.5	24.74			
3	0.5	56.16			
3	1.5	17.67			
4	1.5	32.33			
5	1.5	51.18			
7	1.5	101.45			
10	1.5	208.26			
10	5	58.9	2.28	5.7	23.56
10	5	58.9	33	79	24.60
15	5	137.44	15	84	24.54
20	5	247.4	5.4	62	21.55
30	5	561.5	2	62	18.11
30	15	176.7	6.9	62	19.67
40	15	323.32	10.6	203	16.88
50	15	511.82	4.4	157	14.34
70	15	1014.47			
100	15	2082.61			
100	50	589.05			
150	15	4700.61			
150	50	1374.4			
200	50	2474			

OBSERVACION

Nota. La figura muestra el formato utilizado para la recolección de datos georesistivos en campo.

Figura 18

Realización de Sondaje eléctrico vertical en la zona de los Carzos



Nota. La figura muestra la realización del sondaje eléctrico vertical orientado en dirección S–N; al personal de trabajo integrado por la tesista, ingeniero asistente y ayudante junto al dueño del pozo y terreno los Carzos.

Figura 19

Realización de Sondaje eléctrico vertical en la zona de Tres Piedras



Nota. La figura muestra la realización del sondaje eléctrico vertical orientado en dirección NE-SW. Se observa al bachiller tesista operando el equipo para la toma de datos.

Figura 20

Realización de Sondaje eléctrico vertical alta de la Cuenca Cinto



Nota. La figura muestra la realización del sondaje eléctrico vertical orientado en dirección SW-NE; ubicado en la parte alta de la Cuenca Cinto. Se observa al ingeniero geofísico y el bachiller tesista en la zona con bolonería previo a la toma de datos.

5.3.1 Sustentación Técnica de la Distribución y Densidad de la Muestra

La distribución espacial de los 76 SEV´s que conforman la muestra no responde a un muestreo estadístico aleatorio, sino a un diseño muestral estratégico y dirigido, fundamentados en las condiciones físicas de la cuenca y objetivos hidrogeológicos:

a) Explotación y control: se consideró la infraestructura de pozos inventariados y en funcionamiento. Al integrar el conocimiento previo de los pozos activos se garantizó que los SEV´s se concentren en las zonas de mayor interés hidrogeológico y de explotación hídrica. Esto permitió una correlación directa entre los valores de resistividad obtenidos y los datos logueados transformando la geofísica indirecta en un modelo calibrado.

b) Priorización de zonas de relevancia hidrogeológica: se proyectó una mayor densidad de sondajes en la parte alta de la cuenca justificado técnicamente al ser identificada como la zona con mayores propiedades hidrogeológicas favorables (corroborado con los resultados de los planos geofísicos). La caracterización detallada de este sector es fundamental para una gestión eficiente del recurso hídrico por permitir optimizar el diseño de futuras captaciones en la parte superior de la cuenca, donde la dinámica del acuífero es crítica.

c) Correlación e interpolación: ante las limitaciones técnicas detectadas por el espaciamiento entre sondajes se aplicó un proceso de validación cruzada que consistió en:

- Integración de datos directos: se incorporó la información de niveles estáticos y profundidades de perforación de 11 pozos para realizar interpolaciones y correlaciones geologicamente restringidas, lo que permitió afinar las secciones geológicas- geofísicas.

- Interpolación de SEV´s: se realizó interpolaciones entre SEV´s cercanos para disminuir la incertidumbre entre sondajes, obteniendo 7 sondajes por interpolación a lo largo de las secciones longitudinales A-A', B-B', C-C' y D-D'.

  Se obtuvo en total 18 SEV´s por interpolación e integración de datos directos de pozos adicionales complementando a los 76 SEV´s de la muestra.

La distribución espacial de los 76 SEV's no es arbitraria; es el resultado de un modelo de caracterización híbrido que equilibra la cobertura espacial con la densidad necesaria para capturar la heterogeneidad del acuífero. Al combinar la prospección geofísica con la validación de información directa de pozos, se garantiza que el modelo resultante sea una representación técnica, coherente y robusta del acuífero Cinto, cumpliendo con los estándares necesarios para la gestión hídrica y la modelación en 3D.

5.4. Procesamiento e interpretación de datos de campo

La información obtenida de campo ha sido interpretada en base a los perfiles litológicos obtenidos de los pozos y reconocimiento geológico previo realizado en la zona de estudio, para luego ser procesada en el software de resistividad eléctrica IPI2WIN de origen ruso. En el ANEXO 2 del presente estudio, se muestran las 76 Curvas Interpretadas de los SEVs ejecutados en las diferentes zonas de estudio.

Con los resultados obtenidos se han elaborado en total veinte (20) Secciones Geológicas - Geofísicas transversales y longitudinales al cauce del rio Cinto, las que se dividieron en 3 zonas por sus características geológicas y están graficadas en los mapas M-07, M-08 y M-09 del ANEXO 1.

La información geofísica se correlacionó con los logueos de pozos encontrados en el Valle de Cinto para construir las secciones hidrogeológicas y posterior modelo 3D realizado.

5.5. Resultados obtenidos

Los resultados de la interpretación cuantitativa de los SEVs ejecutados en la zona de estudio, en términos de resistividad verdadera y espesor de los diferentes estratos geoeléctricos identificados, se muestran los cuadros siguientes:

Tabla 4

Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales – Zona Conostoco

SEVs	ESTRATO H1		ESTRATO H2		ESTRATO H3		ESTRATO H4		ESTRATO H5	
	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε
SEV-1	**107**	2.5	**68** **39** **37**	5.5 6 17	**40**	9	**31**	15	**10**	?
SEV-2	**156**	3	**59** **50** **35**	7 4 17	**40**	9	**31**	15	**10**	?
SEV-3	**505**	5	**207** **137** **58**	7 7 12	**41**	9	**31**	20	**10**	?
SEV-4 (*)	**58**	7	**50** **21**	10 16					**4** **1**	45 ?
SEV-5 (**)	**59**	9	**43**	6					**11** **6** **2**	5 14 ?

(*) SEV ejecutado en diciembre del 2012
(**) SEV ejecutado en febrero del 2024

Nota: **SEV:** Sondaje Eléctrico Vertical.
ρ : Resistividad del horizonte geoeléctrico en Ohm-m.
ε : Espesor en metros

Tabla 5

Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales - Zona Tres Piedras

SEVs	ESTRATO H1		ESTRATO H2		ESTRATO H3		ESTRATO H4		ESTRATO H5	
	ρ	ε	**ρ**	ε	**ρ**	ε	**ρ**	ε	**ρ**	ε
SEV-1 A	**349** **297**	9 6	**104**	11	**60**	18	**48**	12	**10**	?
SEV-2 A	**260** **346** **276**	5 8 7	**85**	6	**55**	18	**48**	16	**10**	?
SEV-3 A	**412** **435**		**104**	11	**38**	18	**33**	6	**9**	?
SEV-4 A	**1330** **172** **142**	5 9 8	**120**	7	**50**	15			**7**	?

Nota: **SEV:** Sondaje Eléctrico Vertical.

ρ : Resistividad del horizonte geoeléctrico en Ohm-m.

ε : Espesor en metros

Tabla 6

Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales - Zona Tres Molles

SEVs	ESTRATO H1		ESTRATO H2		ESTRATO H3		ESTRATO H4		ESTRATO H5	
	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε
SEV-1B	**408** **126**	4 11	**112**	16	**79**	14	**70**	15	**10**	?
SEV-2B	**358** **319**	9 4	**92** **31**	7 11	**22**	14	**15**	5	**1**	?
SEV-3B	**416** **206**	5 11	**102**	15	**24**	9			**9**	?
SEV-4B	**425** **152**	6 13	**86**	12	22	14			**2**	?

Nota: **SEV:** Sondaje Eléctrico Vertical.

ρ **:** Resistividad del horizonte geoeléctrico en Ohm-m.

ε **:** Espesor en metros

Tabla 7

Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales Terreno Asoc. Los Carzos Valle Cinto – 2024

SEVs	ESTRATO H1		ESTRATO H2		ESTRATO H4		ESTRATO H5	
	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε
SEV-1C	**245**	3	**110** **77**	11 16	**50**	10	**4**	?
SEV-2C	**333**	5	**109** **81** **73**	6 7 12	**50**	10	**10**	?
SEV-3C	**160**	7	**80** **70**	13 10	**55** **26**	9 11	**1**	?

Nota: **SEV:** Sondaje Eléctrico Vertical.
ρ **:** Resistividad del horizonte geoeléctrico en Ohm-m.
ε **:** Espesor en metros

Tabla 8

Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales Terreno Sr. Vidal Ticona 2023

SEVs	ESTRATO H1		ESTRATO H2		ESTRATO H4				ESTRATO H5	
	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε
SEV-1D	**205**	8	**108**	13	**62**	10	**18**	16	**2**	?
SEV-2D	**213**	7.7	**60** **24**	6.3 7			**16**	9	**6**	?
SEV-3D	**248**	6	**102**	63	**41**	15	**27**	15	**3**	?
SEV-4D	**211**	5	**169**	144	**88** **76**	10 15	**35**	10	**5**	?
SEV-5D	**302**	8	**168**	116			**28**	14	**1**	?

Nota: **SEV:** Sondaje Eléctrico Vertical.
ρ **:** Resistividad del horizonte geoeléctrico en Ohm-m.
ε **:** Espesor en metros

Tabla 9

Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales parcela Andrés Chambilla sector Chironta 2016

SEVs	ESTRATO H1		ESTRATO H2		ESTRATO H4		ESTRATO H5	
	ρ	ε	**ρ**	ε	**ρ**	ε	**ρ**	ε
SEV-1E	**200** **502**	1 9	**250**	7	**50**	32	**7**	?
SEV-2E	**277** **595**	1 5	**141**	9	**51**	22	**13**	?
SEV-3E	**265** **527**	1 4	**100**	9	**30**	9	**12**	?

Nota: **SEV:** Sondaje Eléctrico Vertical.

ρ : Resistividad del horizonte geoeléctrico en Ohm-m.

ε : Espesor en metros

Tabla 10

Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales - 2020

SEVs	ESTRATO H1		ESTRATO H2		ESTRATO H4		ESTRATO H5	
	ρ	ε	**ρ**	ε	**ρ**	ε	**ρ**	ε
SEV-1F	**477** **136**	3 3	**35**	8	**58** **87**	13 28	**16**	?
SEV-2F	**6591** **196**	1 6	**45**	7	**60** **88**	16 22	**16**	?
SEV-3F	**39** **288**	1 5	**227**	11	**77**	33	**17**	?
SEV-4F	**172**	5	**82**	12	**48**	14	**18**	?
SEV-5F	**342** **41**	3 2	**34**	9	**66**	36	**20**	?

Nota: **SEV:** Sondaje Eléctrico Vertical.
**ρ : ** Resistividad del horizonte geoeléctrico en Ohm-m.
**ε : ** Espesor en metros

Tabla 11

Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales 2020

SEVs	ESTRATO H1		ESTRATO H2		ESTRATO H4		ESTRATO H5	
	ρ	ε	**ρ**	ε	**ρ**	ε	**ρ**	ε
SEV-03	**99** **43**	6.5 3.5	**19**	11	**14**	12	**2**	?
SEV-04	**55** **35**	4.5 1.5	**15.5**	17	**13**	14	**7**	?

Nota: **SEV:** Sondaje Eléctrico Vertical.
ρ : Resistividad del horizonte geoeléctrico en Ohm-m.
ε : Espesor en metros

Tabla 12

Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales Terreno Sr. Owen Chacolla 2024

SEVs	ESTRATO H1		ESTRATO H2		ESTRATO H4		ESTRATO H5	
	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε
SEV-1G	**309**	3.6	**134** **93**	6.4 10	**58**	13	**9**	?
SEV-2G	**82**	7	**138** **98**	6 8	**70** **20**	17 12	**2**	?
SEV-3G	**78**	5	**63** **60**	5 12	**58** **65** **56**	7 10 15	**10**	?
SEV-4G	**155**	4	**59** **68**	6 14	**66** **64**	16 10	**10**	?
SEV-5G	**56**	5	**95**	20	**77** **80** **50**	5 10 10	**10**	?

Nota: **SEV:** Sondaje Eléctrico Vertical.
ρ **:** Resistividad del horizonte geoeléctrico en Ohm-m.
ε **:** Espesor en metros

Tabla 13

Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales Terreno Sra. Milagros Vilca 2024

SEVs	ESTRATO H1		ESTRATO H2		ESTRATO H4		ESTRATO H5	
	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε
SEV-1G	**1218** **226**	4.4 4.6	**144**	13	**50**	10	**9**	?
SEV-2G	**207**	7	**111** **47**	7 7	**26**	17	**5**	?
SEV-3G	**892** **250**	3.8 9.2	**177**	10	**78** **40**	17 12	**2**	?
SEV-4G	**66** **75**	5 6	**44**	10	**32** **18**	9 20	**5**	?
SEV-5G	**69**	7	**71** **66**	6 11	**64** **59**	16 12	**9.5**	?
SEV – 6H	**201**	4	**65** **73**	6 16	**68** **60**	12 7	**9**	?

Nota: **SEV:** Sondaje Eléctrico Vertical.
ρ : Resistividad del horizonte geoeléctrico en Ohm-m.
ε : Espesor en metros

Tabla 14

Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales Terreno Sr. Hugo Osco 2024

SEVs	ESTRATO H1		ESTRATO H2		ESTRATO H4		ESTRATO H5	
	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε
SEV-1i	**88** **138**	1.3 3.7	**63** **28**	3 12			**10**	?
SEV-2i	**148** **255** **226**	1.6 2.4 3	**48**	15	**41**	28	**12**	?
SEV-3i	**167** **91**	2.2 7.8	**62**	12	**70** **54**	8 25	**13**	?
SEV-4i	**157** **268**	5.2 9.8	**154**	9	**82** **60**	7 19	**9**	?

Nota: **SEV:** Sondaje Eléctrico Vertical.

ρ **:** Resistividad del horizonte geoeléctrico en Ohm-m.

ε **:** Espesor en metros

Tabla 15

Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales Comité Cinto N°1 2024

SEVs	ESTRATO H1		ESTRATO H2		ESTRATO H4		ESTRATO H5	
	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε
SEV-1J	**158** **196**	3.1 4.9	**39**	15			**2** **0.5**	? ?
SEV-2J	**195** **292**	3 12	**182**	7	**40** **18**	18 11	**9.5**	?
SEV-3J	**237** **304**	2.4 6.6	**181**	13	**100** **34**	20 15	**1.3**	?
SEV-4J	**295** **268**	6 10	**215**	7	**120** **95**	15 18	**15**	?
SEV-5J	**245** **339**	4 7	**205**	14	**74** **47**	15 16	**10**	?
SEV-6J	**179** **233**	2.8 5.2	**79** **54**	6 10	**31**	16	**9**	?
SEV-7J	**352** **404** **319**	2.7 3.3 4	**150**	12	**78**	29	**10**	?
SEV-8J	**238** **251**	6.3 7.7	**170**	9	**108** **87**	12 21	**10**	?
SEV-9J	**182** **106**	3.6 4.4	**69**	15	**39** **26**	17 10	**10**	?
SEV-10J	**287** **346**	4.5 4.5	**159**	14	**40**	20	**9.8**	?

SEVs	ESTRATO H1		ESTRATO H2		ESTRATO H4		ESTRATO H5	
	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε
SEV-11J	**246** **281**	5 5	**19**	15	**4.6**	15	**3.3**	?
SEV-12J	**226** **207**	5 5	**116**	13	**72** **54**	16 16	**5**	?
SEV-13J	**486** **397**	4 4	**172**	15	**63**	32	**12**	?
SEV-14J	**332** **359**	2.8 5.2	**113**	14	**51** **25**	18 10	**9**	?
SEV-15J	**231** **292** **205**	4 4 2	**65**	15	**32**	15	**10**	?
SEV-16J	**236** **311**	4.3 5.7	**77**	14	**47** **24**	16 10	**9**	?
SEV-17J	**220** **233**	5 9	**158**	8	**100** **85**	18 15	**12**	?
SEV-18J	**277**	5.5	**91** **46**	8.5 9	**26**	14	**6.5**	?
SEV-19J	**220**	8	**81** **33**	2 13	**18**	17	**5**	?
SEV-20J	**203**	8	**98** **51**	4 11	**30**	17	**9.9**	?

SEVs	ESTRATO H1		ESTRATO H2		ESTRATO H4		ESTRATO H5	
	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε
SEV-21J	**299**	5	**108**	19	**79** **20**	14 7	**9**	?
SEV-22J	**320** **390**	4.5 10.5	**190**	7	**67** **22**	18 11	**1.3**	?
SEV-23J	**287**	10	**139**	12	**70** **40**	8 25	**10**	?
SEV-24J	**154** **110**	8 7	**46**	7	**20** **12**	8 12	**4**	?
SEV-25J	**207**	6.7	**46** **28**	8.3 10			**7**	?
SEV-26J	**364**	6.6	**59** **20**	3.4 13			**3.6** **2.5**	24 ?
SEV-27J	**6096** **205**	2.5 6.5	**71**	13	**31**	18	**9**	?
SEV-28J	**259** **284**	1.5 55	**197**	15	**98** **30**	18 15	**5**	?
SEV-29J	**210** **361**	1.7 4.3	**169** **63**	4 12	**26**	13	**9**	?
SEV-30J	**269** **186**	3.8 1.7	**84** **27**	6.5 13			**6.2**	?

Nota: **SEV** : Sondaje Eléctrico Vertical.

ρ : Resistividad del horizonte geoeléctrico en Ohm-m.

ε : Espesor en metros

5.6 Correlación Geológica - Geofísica

Para determinar y visualizar la secuencia y continuidad de los diferentes estratos geológicos del subsuelo, que pueden constituir el reservorio acuífero de la zona de estudio, se ha construido 20 Secciones Geológica-Geofísicas.

Se realizaron 4 secciones longitudinales y 16 secciones transversales al río Cinto en donde se identificaron los diferentes estratos hidrogeológicos que componen el acuífero.

Como resultado de la interpretación sondajes presentados en las tablas 4 - 15 se estandarizaron los perfiles geológicos - geofísicos a unidades hidrogeológicas en función a la geofísica encontrada en los SEV´s y se identificaron 5 unidades como se muestra en la tabla 16.

Tabla 16

Resistividades de las unidades hidrogeológicas

UNIDAD HIDROGEOLÓGICA	LITOLOGÍA	RESISTIVIDADES	FORMACIÓN GEOLÓGICA
Horizonte No Saturado - Superficial	Bolonería, grava y arena, en estado seco. Muy buena permeabilidad	152 a 505 Ohm -m	Depósitos Aluviales Cuaternarios (Q-al)
Horizonte No Saturado – Sub Superficial	Canto rodado, grava y arena, en estado seco. Buena permeabilidad	86 a 207 Ohm -m	Depósitos Aluviales Cuaternarios (Q-al)
Horizonte No Saturado y/o húmedo (Antigua Zona Saturada)	Grava, arena y limo en estado seco y/o húmedo. Regular permeabilidad	38 a 58 Ohm - m	Depósitos Aluviales Cuaternarios (Q-al)
Acuífero	Grava, arena y limo, en estado saturado. Regular permeabilidad.	18 a 120 Ohm-m	Depósitos Aluviales Cuaternarios (Q-al)
Basamento Impermeable	Limolitas y arcillitas compactos en estado seco. Impermeable	1 a 11 Ohm-m	Formación Moquegua Inferior (Pp-mo/i)

Nota. Descripción de las unidades hidrogeológicas correlacionadas con su litología y resistividades.
Fuente Propia.

5.7. ZONIFICACIÓN DEL ACUÍFERO

La descripción de las secciones geológicas - geofísicas se realizó por tres sectores principales que comparten características geológicas y geomorfológicas.

5.7.1 ZONA BAJA DEL ACUÍFERO

Esta zona se encuentra ubicada entre las coordenadas 312888 E – 8051447 N y 312863 E – 8051411 N, corresponde a la zona del pozo de EPS en la ciudad de Locumba, pasando por el pozo de Conostoco, La Machorrita, Tres Piedras, Tres Molles hasta el pozo los Carzos.

La litología encontrada en el logueo de los pozos de Conostoco (314555 E – 8052983 N), Los Carzos (316 242 E – 8056583 N), Tres Piedras (316 040 E – 8055654N), Tres molles (316040 E – 8055654 N) Montegrande N°3 (316262 E – 8057993 N) con el SEV y Reemplazo Montegrande (316264 E – 8057776 N) fue correlacionada con los valores de resistividad encontrados en los SEVs 1, SEV-3A, SEV-4B y SEV-1C.

En las secciones Longitudinales A-A, B-B’ y las secciones transversales, E-E´, F-F´, G-G´, H-H´ e I-I´ se han diferenciado cinco horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No Saturado Superficial

Presenta resistividades altas de hasta 500 Ohm-m que identifican a materiales de muy buena permeabilidad de bolonería, grava y arena, de origen fluvio - aluvial del Cuaternario Reciente, en estado seco. Este estrato tendría espesor de 3m a 19m.

Horizonte II - No Saturado Sub Superficial

Presenta resistividades medias de 24 Ohm-m y altas de 204 Ohm-m, que identifican a materiales de buena permeabilidad de canto rodado, grava, y arena del Cuaternario Reciente, en estado seco. Este estrato tendría espesor de 7m a 27m.

Horizonte III - No Saturado y/o húmedo (Antigua Zona Saturada)

Presenta resistividades medias de 137 Ohm-m a 38 Ohm-m, que identifican a materiales de regular permeabilidad de grava, arena y limo del Cuaternario Reciente, en estado seco y/o húmedo. Este estrato tendría espesor de 28m a 18m, siendo tu base el nivel freático actual del acuífero.

Este horizonte en años anteriores se habría encontrado saturado, constituyendo parte del acuífero explotable, debido a que el nivel estático original del Pozo Tres Molles (2006) se encontraba en 31m de profundidad, el pozo Tres piedras con un nivel freático inicial de 26m de profundidad (2011), el pozo de La Machorrita contaba con un nivel freático de 20m de profundidad (2011) y el pozo Conostoco con 12m de profundidad (2013).

Horizonte IV - Acuífero

Presenta resistividades medias de 31 Ohm-m a 70 Ohm-m respectivamente, que identifican a materiales de regular permeabilidad, de grava, arena y limo, en estado saturado; constituyendo el acuífero potencialmente explotable de la zona de estudio. Este estrato tendría un espesor de 6m a 20m.

Actualmente los niveles freáticos de todos los pozos han disminuido dejando este estrato como el único acuífero potencialmente explotable, el pozo Conostoco presenta un nivel freático de 40m de profundidad (2024), el pozo de la Machorrita presenta un nivel freático de 42 m (2025), el pozo Tres Piedras presenta un nivel freático actual de 44m de profundidad y el pozo Tres Molles se encuentra a 45 m de profundidad de nivel freático.

Horizonte V - Basamento Impermeable

Presenta resistividades muy bajas de 1 Ohm-m a 10 Ohm-m, que identifican a limos y arcillitas compactos de la Formación Moquegua Inferior, en estado seco; constituyendo el basamento impermeable de la zona de estudio. Este estrato tiene un espesor indeterminado, mayor a los 70 m de profundidad (profundidad de estudio de los SEV´s).

5.7.2. ZONA MEDIA DEL ACUIFERO

Ubicada entre las coordenadas 312863 E – 8051411 N y 317798 E – 8066465N. Este segundo tramo del acuífero corresponde a la zona desde el Pozo Cinto N°4, el pozo Chironta, Pozo Cinto N°3 y Pozo Cinto N°2

La litología fue correlacionada con los valores de resistividad encontrados en los SEVs 1E, 2E, 3E, 1F, 2F, 3F, 4F, F, 03, 04, 1G, 2G, 3G, 4G, 5G, 1H, 2H, 3H, 4H, 5H y 6H de la zona de Chironta hasta el sector de Matogroso

En la sección longitudinal C-C' y las secciones transversales, J-J´, K-K´, L-L´y M-M' se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No Saturado Superficial

Presenta resistividades altas de hasta 595 Ohm-m y medias de 87 Ohm-m que identifican a materiales de muy buena permeabilidad de bolonería, grava y arena, de origen fluvio - aluvial del Cuaternario Reciente, en estado seco. Este estrato tendría espesor de 7m a 6m.

Horizonte II - No Saturado Sub Superficial

Presenta resistividades medias de 35 Ohm-m y altas de 111 Ohm-m a 138 Ohm, que identifican a materiales de buena permeabilidad de canto rodado, grava, y arena del Cuaternario Reciente, en estado seco. Este estrato tendría espesor de 8m a 14m.

Horizonte III - Acuífero

Presenta resistividades medias de 20 Ohm-m a 87 Ohm-m respectivamente, que identifican a materiales de regular permeabilidad, de grava, arena y limo, en estado saturado; constituyendo el acuífero potencialmente explotable de la zona de estudio. Este estrato tendría un espesor de 17m a 41m.

Horizonte V - Basamento Impermeable

Presenta resistividades muy bajas de 2 Ohm-m a 16 Ohm-m, que identifican a limos y arcillitas compactos de la Formación Moquegua Inferior, en estado seco; constituyendo el basamento impermeable de la zona de estudio. Este estrato tiene un espesor indeterminado, mayor a los 70 m de profundidad (profundidad de estudio de los SEV´s).

5.7.3. ZONA ALTA DEL ACUIFERO

Ubicada entre las coordenadas 317798 E – 8066465N y 321669 E – 8069900N. Este tercer tramo del acuífero corresponde a la zona desde Matogroso, pasando por el pozo Cinto N°1 hasta la entrada del sector de Caoña.

La litología fue correlacionada con los valores de resistividad encontrados en los SEVs 1i, 2i, 3i, 4i, 1J, 2J, 3J, 4J, 5J, 6J, 7J, 8J, 9J, 10J, 11J, 12J, 13J, 14J, 15J, 16J, 17J, 18J, 19J, 20J, 21J, 22J, 23J, 24J, 25J, 26J, 27J, 28J, 29J y 30J.

En la sección longitudinal D-D’ y las secciones transversales, N-N’, O-O’, P-P’, Q-Q’, R-R’, S-S’ y T-T’ se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No Saturado Superficial

Presenta resistividades altas de hasta 295 Ohm-m y medias de 148 Ohm-m que identifican a materiales de muy buena permeabilidad de bolonería, grava y arena, de

origen fluvio - aluvial del Cuaternario Reciente, en estado seco. Este estrato tendría espesor de 5.5m a 16m.

Horizonte II - No Saturado Sub Superficial

Presenta resistividades medias de 35 Ohm-m y altas de 111 Ohm-m a 138 Ohm-m, que identifican a materiales de buena permeabilidad de canto rodado, grava, y arena del Cuaternario Reciente, en estado seco. Este estrato tendría espesor de 8m a 14m.

Horizonte III - Acuífero

Presenta resistividades medias de 46 Ohm-m y altas de 215 Ohm-m respectivamente, que identifican a materiales de regular permeabilidad, de grava, arena y limo, en estado saturado; constituyendo el acuífero potencialmente explotable de la zona de estudio. Este estrato tendría un espesor de 7m a 17.5m.

Horizonte IV - Basamento Impermeable

Presenta resistividades muy bajas de 5 Ohm-m y bajas de 15 Ohm-m, que identifican a limos y arcillitas compactos de la Formación Moquegua Inferior, en estado seco; constituyendo el basamento impermeable de la zona de estudio. Este estrato tiene un espesor indeterminado, mayor a los 70 m de profundidad (profundidad de estudio de los SEV´s). Posterior al análisis de las tres zonas del acuífero se realizó un cuadro resumen (Ver Tabla 17) con las zonas, sus horizontes, la litología, resistividades y espesores, de esta manera se logró un mejor entendimiento y correlación de las propiedades geofísicas del acuífero.

Tabla 17

Cuadro resumen de los horizontes geoeléctricos

Zona	Horizonte	Litología	Resistividad (Ω·m)	Espesor (m)
Baja	I - No Saturado Sup.	Bolonería, grava y arena	Hasta 500	3 - 19
	II - No Saturado Sub.	Canto rodado, grava, arena	24 - 204	7 - 27
	III - No Saturado/Húmedo	Grava, arena y limo	38 - 137	18 - 28
	IV - Acuífero	Grava, arena y limo (saturado)	31 - 70	6 - 20
	V - Basamento Imp.	Limos y arcillitas	1 - 10	> 70
Media	I - No Saturado Sup.	Bolonería, grava y arena	87 - 595	6 - 7
	II - No Saturado Sub.	Canto rodado, grava, arena	35 - 138	8 - 14
	III - Acuífero	Grava, arena y limo (saturado)	20 - 87	17 - 41
	V - Basamento Imp.	Limos y arcillitas	2 - 16	> 70
Alta	I - No Saturado Sup.	Bolonería, grava y arena	148 - 295	5.5 - 16
	II - No Saturado Sub.	Canto rodado, grava, arena	35 - 138	8 - 14
	III - Acuífero	Grava, arena y limo (saturado)	46 - 215	7 - 17.5
	V - Basamento Imp.	Limos y arcillitas	5 - 15	> 70

Nota. Resumen de los horizontes geoeléctricos según su litología, valores de resistividad y espesores.

5.8. SONDAJES ELÉCTRICOS SINTÉTICOS

Durante la elaboración de las secciones geológicas - geofísicas longitudinales a lo largo del río Cinto se tuvo la limitación de la falta de información en más de 1 km de distancia entre sondajes. Para disminuir la incertidumbre y afinar las secciones se usó información de los niveles freáticos y profundidad de perforación de los siguientes 11 pozos para crear sondajes eléctricos verticales sintéticos.

La creación de estos modelos sintéticos se fundamentó en un enfoque integrador, mediante el cual se consolidaron las siguientes fuentes de información:

- **Datos Hidrogeológicos:** Se incorporaron los registros de niveles estáticos (niveles freáticos) y las profundidades totales de perforación de 11 pozos de explotación ubicados en el área de influencia del acuífero. Estos parámetros permitieron establecer los niveles freáticos y los contactos litológicos base para el modelado directo.

- **Reconocimiento Geológico de Campo:** Se integraron las observaciones directas obtenidas durante el reconocimiento geológico detallado del área, permitiendo validar la continuidad lateral de las formaciones y determinar las características geológicas.

- **Cortes Geológicos**: Se utilizaron cortes geológicos de referencia que permitieron restringir la geometría de las unidades en profundidad, facilitando la interpolación entre los SEV reales y los puntos sintéticos.

La integración de estas variables permitió realizar un modelado directo en el cual se ajustaron las curvas de resistividad sintética para obtener una respuesta geofísica que fuese consistente con la estratigrafía observada. Este proceso disminuyó el margen de error en la correlación entre sondajes distantes y permitió la coherencia estructural, permitiendo una caracterización más precisa del acuífero Cinto en los sectores donde la información geofísica era limitada.

Tabla 18

Pozos complementarios de control geofísico

POZOS	ESTE	NORTE	N.E. (m)	Rendimiento (m^3/año)	Profundidad de perforación (m)
POZO_JARRO	319282	8067816	22	155,520	22
POZO_IRHS-SCI-1	321539	8069775	20		20
POZO_CINTO4	316399	8059810	10	640	20
POZO_CHIRONTA	316968	8062028	10	93,312	20
POZO_CINTO3	317697	8064066	15	466,560	55
POZO_EPS	313107	8051571	11	116,640	12
POZO_EMAPA	313536	8052146	23		46.8
POZO_MACHORRITA	315282	8053984	40	233,238	40
POZO_REEMPLAZO_MONTEGRANDE	316264	8057776	35		52
POZO_MONTEGRANDE3	316262	8057993	26	93,312	30
POZO_MONTEGRANDE1	316322	8058654	17.5	93,312	21.32

Nota. Ubicación en coordenadas UTM, niveles estáticos, rendimiento y profundidad de perforación de los pozos complementarios.

Tabla 19

Resultados SEV´S sintéticos de los pozos complementarios de control geofísico

POZO	ESTRATO H1		ESTRATO H2		ESTRATO H3		ESTRATO H4		ESTRATO H5	
	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε	ρ	ε
POZO JARRO	**213**	9	**79**	13			**62**	29	**8**	?
POZO IRHS-SCI-1	**281**	7	**215**	13			**107**	17	**15**	?
POZO CINTO 4	**213**	4	**41**	6			**16**	10	**6**	?
POZO CHIRONTA	**213**	4	**41**	6			**33**	21	**9**	?
POZO CINTO 3	**406**	7	**230**	8			**65**	32	**11**	?
POZO EPS	505	3	**207**	3	**72**	5	**31**	9	**10**	?
POZO EMAPA	505	8	**207**	8	**72**	7	**31**	17	**10**	?
POZO LA MACHORRITA	463	12	**144**	8	**59**	20	**31**	13	**9**	?
POZO DE REEMPLAZO MONTEGRANDE	245	13	**90**	22			**50**	10	**4**	?
POZO MONTEGRANDE 3	213	4	**41**	22			**16**	12	**6**	?
POZO MONTEGRANDE 1	**213**	7.5	**41**	10			**16**	10	**6**	?

Nota: **SEV :** Sondaje Eléctrico Vertical.

ρ **:** Resistividad del horizonte geoeléctrico en Ohm-m.

ε **:** Espesor en metros

Complementando los registros de pozos, se realizó interpolaciones entre SEV´s cercanos para disminuir la incertidumbre entre sondajes, obteniendo 7 sondajes sintéticos extra a lo largo de las secciones longitudinales A-A', B-B', C-C' y D-D' con los siguientes resultados:

Tabla 20

Resultados de los Sondajes Eléctricos Verticales de sondajes sintéticos

SEVs	ESTRATO H1		ESTRATO H2		ESTRATO H3		ESTRATO H4		ESTRATO H5	
	ρ	ε	**ρ**	ε	**ρ**	ε	**ρ**	ε	**ρ**	ε
SEV-1Z	**70**	2	**28**	9			**73** **27**	19 20	**5**	?
SEV-2Z	**535**	8	**320**	12			**80**	12	**10**	?
SEV-3Z	**505**	2	**207**	7	**72**	21	**31**	23	**10**	?
SEV-4Z	**276**	1.5	**322** **145**	3.5 3			**101**	56	**27**	?
SEV-5Z	**276**	4	**41**	6			**24**	14	**7**	?
SEV-6Z	**426**	6	**185**	8			**58**	24	**12**	?
SEV-7V	**207** **227**	5.7 4.3	**89** **68**	4 10			**58**	28	**11**	?

Nota: **SEV** : Sondaje Eléctrico Vertical.
ρ : Resistividad del horizonte geoeléctrico en Ohm-m.
ε : Espesor en metros

5.9. PLANOS GEOFÍSICOS

Con los resultados obtenidos de la interpretación de los 76 Sondajes Eléctricos Verticales ejecutados en el Valle Cinto, se han confeccionado planos geofísicos según el siguiente detalle:

- Carta de Isóbatas, relacionada con el Techo del Basamento Impermeable.
- Carta de Isópacos, relacionada con el espesor total del Horizonte Permeable Saturado.
- Carta de Isoresistividades, relacionada con los resultados cuantitativos del Horizonte Saturado (Resistividad Verdadera).
- Carta de Resistencia Transversal del Horizonte Saturado

Se realizó uno por cada zona identificada del acuífero, totalizando 12 mapas geofísicos según las características geofísicas de la zona de estudio.

5.9.1 Techo basamento impermeable

5.9.1.1. Zona Baja (Ver tabla 17, Mapa M-10)

Esta carta muestra las variaciones de la morfología de la profundidad del Techo del substrato impermeable en relación con la potencia del relleno de materiales permeables del Cuaternario Reciente en el sector bajo del valle.

La cartografía indica que la mayor profundidad del Techo Basamento del acuífero está representada por las isocurvas de 42 m a 60 m (áreas de color naranja

a rojo), destacando el SEV-3B con 51 m y puntos de control en el sector de Tres Piedras y Tres Molles con profundidades que alcanzan los 51 m.

Relacionados con el eje central del cauce actual y paleocauces del río Cinto.

Hacia los márgenes Este y Oeste del área evaluada (proximidades a La Machorrita y Mal Paso), disminuye la profundidad del Techo del Basamento, representada por las isocurvas de 15 m a 33 m (áreas de color azul a verde), comprendida por el SEV-3 con 24 m y el sector cercano al Pozo Conostoco y Pozo-Eps, donde el contacto con la Formación Moquegua es más superficial.

5.9.1.2. Zona Media (Ver tabla 18, Mapa M-14)

Esta carta ilustra la configuración del substrato impermeable en el sector medio, donde se observa una profundización sostenida del basamento hacia el centro del valle. La mayor profundidad del Techo Basamento se identifica mediante las isocurvas de 41 m a 55 m (áreas de color naranja a rojo), comprendida principalmente por los SEV-5H, 6H y 2G con valores de 47 m a 55 m, y los SEV-4F y 5F con profundidades de 41 m. Estos valores máximos definen una fosa de sedimentación importante en el eje del valle aluvial.

Hacia los flancos del área evaluada, la profundidad del basamento disminuye gradualmente, a un rango de 20 m a 41 m (áreas azules a amarillo/naranja), donde se encuentran los SEV-04 (23 m), SEV-03 (29 m) y el grupo SEV-1E, 2E y 3E (35 m), reflejando una geometría de valle de fondo amplio incidido sobre las arcillitas de la Formación Moquegua.

5.9.1.3. Zona Alta (Ver tabla 19, Mapa M-18)

Esta carta muestra las variaciones de profundidad en la cabecera del área de estudio. La mayor profundidad del Techo Basamento en este sector está representada por las isocurvas de 42 m a 57 m (áreas de color naranja a rojo), comprendida por el grupo de sondajes J, destacando el SEV-5J con 55 m y el SEV-4J con 53 m, localizados en la zona central de la llanura aluvial.

Hacia las zonas laterales y de cierre del valle, la profundidad del basamento impermeable disminuye, representada por las isocurvas de 20 m a 42 m (áreas de color azul a amarillo), comprendida por los SEV-1J y 2J con 26 m y 27 m respectivamente, y el SEV-1I con 28 m. El menor espesor se registra en los márgenes de contacto geológico, donde el relleno cuaternario se adelgaza significativamente.

Se concluye lo siguiente del espesor del techo basamento impermeable:

Zona Baja: Se caracteriza por presentar las mayores profundidades del techo del basamento (hasta 60 m), asociadas al eje central y paleocauces del río Cinto, con un ascenso del basamento hacia los márgenes de La Machorrita y Mal Paso donde la profundidad disminuye hasta los 15 m.

Zona Media: Presenta una profundización sostenida hacia el centro del valle, definiendo una cuenca sedimentaria con valores de hasta 55 m; mientras tanto, los flancos muestran un ascenso gradual del basamento (hasta los 20 m) que refleja una geometría de valle de fondo amplio.

Zona Alta: En la cabecera del área de estudio, la llanura aluvial alcanza profundidades de hasta 57 m en su zona central, registrándose un adelgazamiento significativo del relleno cuaternario (hasta los 20 m) hacia los márgenes de contacto geológico lateral.

5.9.2 Espesor total del horizonte saturado

5.9.2.1. Zona Baja (Ver tabla 17, Mapa M-11)

Esta zona se encuentra ubicada entre las coordenadas 312888 E – 8051447 N y 312863 E – 8051411 N. Esta carta muestra curvas de igual espesor del horizonte permeable saturado, permitiendo conocer la distribución del acuífero potencialmente explotable en el sector bajo del valle. La cartografía indica que el mayor espesor del acuífero está representado por las isocurvas de 42 m a 60 m (áreas de color naranja a rojo), comprendida por el SEV-3B (29 m) y sectores adyacentes a Tres Molles y Tres Piedras, donde el espesor saturado alcanza sus valores máximos, coincidiendo con el eje central del cauce del río Cinto.

Hacia los flancos Este y Oeste, el espesor del acuífero disminuye, representado por las isocurvas de 15 m a 33 m (áreas de color azul a verde), identificadas en el SEV-1B (11 m) y el sector de La Machorrita y proximidades del pozo Conostoco; registrándose los valores mínimos en las proximidades del contacto con el basamento aflorante, donde la potencia del relleno saturado se reduce significativamente.

5.9.2.2. Zona Media (Ver tabla 18, Mapa M-15)

Esta carta ilustra la potencia del relleno saturado en el sector medio del área evaluada. El mayor espesor del acuífero en esta zona se identifica mediante las isocurvas de 41 m a 55 m (áreas de color naranja a rojo), destacando el SEV-5H, 6H y 2G con espesores de 33 m, así como el SEV-1F con 39 m.

Estos espesores definen un cuerpo de agua subterránea bien desarrollado en la parte central del valle aluvial.

Hacia los márgenes del área, el espesor disminuye gradualmente, representado por las isocurvas de 9 m a 21 m (áreas de color azul a verde), comprendida por el SEV-1H (15 m) y el SEV-3E (21 m). La variación del espesor en este sector medio está condicionada por la profundidad del techo del basamento y el nivel freático actual, que limitan la capacidad de almacenamiento en los bordes del valle. El espesor saturado es mayor debido a la acumulación de material de colapso depositado en la parte media del acuífero.

5.9.2.3. Zona Alta (Ver tabla 19, Mapa M-19)

Esta carta muestra las variaciones de espesor en la cabecera del valle de Cinto. El mayor espesor del acuífero en este sector alto está representado por las isocurvas de 26 m a 35 m (áreas de color naranja a rojo), comprendida principalmente por el grupo de sondajes del sector J, destacando los SEV-10J y 5J con 31 m.

Estas áreas representan el núcleo de almacenamiento con mayor potencial hídrico en la zona alta.

Hacia las zonas laterales, el espesor saturado decrece, representado por las isocurvas de 13 m a 22 m (áreas de color azul a verde). La disminución de la potencia saturada hacia los flancos se relaciona con la elevación del basamento impermeable conformado por la Formación Moquegua Inferior.

Se concluye lo siguiente del espesor del espesor del acuífero:

- **Zona Baja:** El acuífero potencialmente explotable alcanza espesores máximos de 23 m a 35 m en el eje central del cauce del río Cinto, específicamente en el sector de Montegrande 3. Por el contrario, hacia los flancos este y oeste, el espesor se reduce significativamente a rangos de 5 m a 17 m al aproximarse al contacto con el basamento impermeable.
- **Zona Media:** el espesor de acuífero en la parte central presenta espesores que oscilan entre 29 m y 42 m, favorecido por la acumulación de material de colapso. Hacia los márgenes del área y en la zona del pozo CINTO_4, la capacidad de almacenamiento disminuye gradualmente a valores de 9 m a 15 m, condicionado por la elevación del techo del basamento y el nivel freático actual.
- **Zona Alta:** posee el mayor potencial hídrico, con espesores saturados de 26 m a 35 m en la zona central de la cabecera del valle. En las zonas laterales, la potencia del acuífero decrece hasta valores de 13 m a 22 m,

debido a la elevación del basamento impermeable de la Formación Moquegua Inferior.

5.9.3 Resultados cuantitativos del horizonte permeable saturado (Resistividad Verdadera)

5.9.3.1. Zona Baja (Ver tabla 17, Mapa M-12)

Esta carta muestra que los valores de resistividad obtenidos en el sector bajo están en el orden de 16 Ohm-m a 68 Ohm-m. Los valores más altos están representados por las isocurvas de 47 Ohm-m a 68 Ohm-m (áreas de color azul), relacionadas con el SEV-1C área del pozo LOS CARZOS (48 Ohm-m) y sectores deL Pozo Tres Molles, indicativos de materiales de buena permeabilidad de canto rodado y grava.

Las isocurvas de 26 Ohm-m a 47 Ohm-m (áreas de color celeste), relacionadas con la ubicación de los SEV-2, SEV-1 y SEV-3B, identifican sedimentos de buena a regular permeabilidad de grava, arena y limo. Finalmente, los valores de 16 Ohm-m a 26 Ohm-m (celeste claro), presentes en sectores marginales del pozo Cinto_4, identifican materiales de regular a baja permeabilidad por presencia de arenas finas y limos saturados.

5.9.3.2. Zona Media (Ver tabla 18, Mapa M-16)

El mapa M-16 muestra que en el sector medio los valores de resistividad fluctúan entre 13 Ohm-m y 80 Ohm-m. Los valores más importantes están representados por las isocurvas de 52 Ohm-m a 80 Ohm-m (áreas de color azul oscuro), relacionadas con el SEV-2G (65 Ohm-m) y el SEV-5F, identifican

materiales con la mayor transmisividad, compuestos por gravas y arenas limpias.

Las isocurvas de 26 Ohm-m a 52 Ohm-m (áreas de color celeste), vinculadas a los SEV-03 (26 Ohm-m), SEV-4H (39 Ohm-m), identifican sedimentos de permeabilidad regular. Los valores mínimos de 13 Ohm-m a 26 Ohm-m se observan hacia el sur en la zona del pozo Cinto_4 y el SEV-5Z, indicando un aumento del contenido de arcillitas.

5.9.3.2. Zona Alta (Ver tabla 19, Mapa M-20)

Esta carta muestra los valores de resistividad más elevados de toda el área de estudio, situándose en el orden de 15 Ohm-m a 106 Ohm-m. Los valores máximos están representados por las isocurvas de 70 Ohm-m a 106 Ohm-m (áreas de color azul oscuro), relacionadas directamente con el sector de los SEVs del grupo J, destacando el SEV-4J y SEV-5J con valores que superan los 87 Ohm-m, lo que identifica materiales de excelente permeabilidad y alta transmisividad.

Las isocurvas de 33 Ohm-m a 69 Ohm-m (áreas de color celeste), identifican materiales de buena a regular permeabilidad.

Los valores menores, entre 15 Ohm-m y 33 Ohm-m, se registran en los extremos del perfil, indicando zonas de menor potencial hidráulico debido a la transición hacia materiales más finos o menos potentes sobre el basamento.

Se concluye lo siguiente del horizonte permeable saturados:

- **Zona Baja**: Presenta una resistividad de 15 Ohm-m a 68 Ohm-m. Los valores más altos se ubican en sectores como Tres Molles, indicando la presencia de materiales de buena permeabilidad como cantos rodados y gravas. En contraste, los valores mínimos (16-26 Ohm-m) señalan materiales de regular a baja permeabilidad por el predominio de arenas finas y limos.
- **Zona Media**: Los valores fluctúan entre 13 Ohm-m y Ohm-m. Destacan los sectores vinculados a los SEV-2G y SEV-5F con resistividades de 52-77 Ohm-m, que identifican gravas y arenas limpias con la mayor transmisividad de este sector. Hacia el sur en la zona del pozo Cinto_4, la resistividad cae a 13-26 Ohm-m, sugiriendo una mayor compactación o contenido de arcillitas por el contacto con la Formación Moquegua.
- Zona **Alta:** Registra el potencial hídrico más elevado de todo el estudio, con valores de hasta 106 Ohm-m. Los sondajes SEV-4J y SEV-5J muestran resistividades superiores a los 87 Ohm-m, lo que evidencia materiales de excelente permeabilidad. Los valores más bajos (15-33 Ohm-m) se limitan al flanco izquierdo del río, indicando una transición hacia materiales más finos cerca del basamento.

5.9.4 Resistencia Transversal del horizonte permeable saturado

Este parámetro de Dark-Zarrouk (T), puede asociarse con la transmisividad T del acuífero ($T = k \cdot e$), donde k es la conductividad hidráulica y e, el espesor del

acuífero. De esta manera, como parte del análisis que se hace de la información geoeléctrica, los mapas de resistencia transversal unitaria (T) de las capas que por su resistividad se correlacionan con un acuífero, resultan una herramienta muy útil para la selección del área más favorable para explotación del agua subterránea, ya que representan las zonas donde hay presencia de estratos con las mayores resistividades relacionadas a materiales gruesos y permeables, que poseen buenos espesores.

5.9.4.1. Zona Baja (Ver tabla 17, Mapa M-13)

Esta carta muestra que los valores de resistencia transversal en el sector bajo fluctúan entre 77 y 2370 Ohm-m2. Los valores más importantes están representados por las isocurvas de 991 Ohm-m2 a 2370 Ohm-m2 (área de color azul oscuro), identificando los sectores de mayor espesor y permeabilidad, óptimos para la explotación.

Los valores menos favorables corresponden a las isocurvas de 534 Ohm-m2 (color verde), donde el acuífero presenta bajas condiciones hidrogeológicas por su reducido espesor o mayor contenido de finos.

5.9.4.2. Zona Media (Ver tabla 18, Mapa M-17)

Esta carta muestra valores de resistencia transversal entre 160 Ohm-m2 y 2892 Ohm-m2. Los sectores más favorables están representados por las isocurvas de 1798 Ohm-m2 (color azul), destacando la zona del Pozo Cinto_3. Estos puntos identifican sedimentos de alta transmisividad situados en el eje central del valle. Los valores intermedios, entre 1252 Ohm-m2 y 1798 Ohm-m2 (color turquesa), se

relacionan con los SEV-5H (1716 Ohm-m2) y SEV-4F (1482 Ohm-m2), constituyendo un acuífero de regulares condiciones.

Por último, los valores menores a 706 Ohm-m2 (verde oscuro), observados en la zona del pozo Cinto_4, identifican zonas de baja transmisividad y poco espesor saturado.

5.9.4.3. Zona Alta (Ver mapa 19, Mapa M-21)

Esta carta muestra los valores de resistencia transversal más elevados de la investigación, en el orden de 315 Ohm-m2a 3341 Ohm-m2. Los valores más importantes están representados por la isocurva de 2735 Ohm-m2 (área de color azul), relacionada directamente con el sector de los SEVs del grupo J, destacando el SEV-4J, identificando sedimentos de excelente transmisividad y máximo espesor.

Los valores intermedios se sitúan entre 1525 Ohm-m2 y 2130 Ohm-m2 (color turquesa), con condiciones hidrogeológicas regulares. Los valores menos favorables, de 304 Ohm-m2a 810 Ohm-m2 (verde oscuro), se localizan en el flanco del río, donde la potencia del acuífero disminuye hacia los límites geológicos del sector alto.

Se concluye lo siguiente de la resistencia transversal:

- **Zona Baja**: Los valores de resistencia fluctúan entre 77 y 2370 Ohm-m^2. Las zonas menos favorables presentan valores menores a 991 Ohm-m^2 debido al reducido espesor del acuífero o presencia de finos.
- **Zona Media:** En este sector los valores oscilan entre 160 y 2892 Ohm-$m^{2.}$

La alta transmisividad se localiza en el eje central del valle, destacando la zona del pozo Cinto_3. Hacia los bordes de la cuenca, la resistencia disminuye por debajo de los 706 Ohm-m^2 en la zona del pozo Cinto _4 indicando zonas de bajo espesor saturado.

- **Zona Alta:** Registra los índices de resistencia transversal más elevados de toda la investigación, alcanzando hasta 3341 Ohm-m^2. El sector del grupo J (especialmente SEV-4J) identifica sedimentos de excelente transmisividad y máximo espesor. Los valores descienden hacia los límites geológicos del sector, donde la potencia del acuífero disminuye.

Tabla 21

Resultados generales de planos geofísicos, zona baja

SEVs	ESTE	NORTE	TECHO BASAMENTO (m)	ESPESOR ACUÍFERO (m)	RESISTIVIDAD PROMEDIO (Ohm-m)	RESISTENCIA TRANSVERSAL (Ohm-m^2)
SEV-1	314,563	8’052,976	55	15	31	465
SEV-2	314,497	8’053,049	55	15	31	465
SEV-3	314,521	8’052,999	60	20	31	620
SEV-4	314,673	8’052,914	33	0	0	0
SEV-5	314,523	8’053,152	15	0	0	0
SEV-1A	315,489	8’054,639	56	12	48	576
SEV-2A	315,451	8’054,647	60	16	48	768
SEV-3A	315,519	8’054,633	50	6	33	198
SEV-4A	315,427	8’054,652	44	0	0	0
SEV-1B	316,000	8’055,671	60	15	70	1050
SEV-2B	315,963	8’055,671	50	5	15	75
SEV-3B	316,061	8’055,650	40	0	0	0
SEV-4B	316,039	8’055,649	45	0	0	0
SEV - 1C	316,193	8’056,438	40	10	50	500
SEV - 2C	316,159	8’056,437	40	10	50	500
SEV - 3C	316,220	8’056,399	50	20	39	780
SEV - 1D	316,358	8’058,393	47	26	34.92	908
SEV - 2D	316,302	8’058,395	30	9	16	144
SEV - 3D	316,386	8’058,393	50	30	34	1020
SEV - 4D	316,413	8’058,392	55	35	67.71	2370
SEV - 5D	316,474	8’058,386	37	14	28	392

Nota. Valores del techo basamento impermeable, espesor del acuífero, resistividad promedio y resistencia transversal.

Tabla 22

Resultados generales de planos geofísicos, zona media

SEVs	ESTE	NORTE	TECHO BASAMENTO (m)	ESPESOR ACUÍFERO (m)	RESISTIVIDAD PROMEDIO (Ohm-m)	RESISTENCIA TRANSVERSAL (Ohm-m^2)
SEV-1E	317,133	8’062,331	49	32	50	1600
SEV-2E	317,074	8’062,332	37	22	51	1122
SEV-3E	317,018	8’062,334	23	9	30	270
SEV-1F	317,897	8’064,621	55	41	46.93	1924
SEV-2F	317,840	8’064,600	52	38	76.21	2896
SEV-3F	317,787	8’064,579	40	23	77	1771
SEV-4F	317,696	8’064,570	31	14	48	672
SEV-5F	317,984	8’064,582	50	36	66	2376
SEV-03	317,631	8’064,658	33	12	14	168
SEV-04	317,549	8’064,733	37	14	13	182
SEV - 1G	317,856	8’065,220	33	13	58	754
SEV - 2G	317,938	8’065,261	50	29	49.31	1430
SEV - 3G	317,993	8’065,264	54	32	59.25	1896
SEV - 4G	318,039	8’065,265	50	26	65.23	1696
SEV - 5G	318,089	8’065,268	50	25	67.4	1685
SEV - 1H	317,872	8’065,638	32	10	50	500
SEV - 2H	317,918	8’065,649	38	17	26	442
SEV - 3H	317,965	8’065,644	52	29	62.28	1806
SEV - 4H	317,955	8’065,638	50	29	22.34	648
SEV - 5H	318,035	8’065,645	52	28	61.86	1732
SEV - 6H	318,073	8’065,635	45	19	65.05	1236

Nota. Valores del techo basamento impermeable, espesor del acuífero, resistividad promedio y resistencia transversal.

Tabla 23

Resultados generales de planos geofísicos, zona alta

SEVs	ESTE	NORTE	TECHO BASAMENTO (m)	ESPESOR ACUÍFERO (m)	RESISTIVIDAD PROMEDIO (Ohm-m)	RESISTENCIA TRANSVERSAL (Ohm-m^2)
SEV-1i	317,805	8’066,554	20	0	0	0
SEV-2i	317,884	8’066,540	50	28	41	1148
SEV-3i	317,931	8’066,519	55	33	57.88	1910.04
SEV-4i	318,041	8’066,481	50	26	65.92	1713.92
SEV-1	320,392	8’069,293	23	0	0	0
SEV-2	320,453	8’069,250	51	29	31.7	918
SEV-3	320,507	8’069,222	57	35	71.7	2510
SEV-4	320,554	8’069,191	56	33	106.4	3510
SEV-5	320,596	8’069,169	56	31	60.1	1862
SEV-6	320,272	8’069,006	40	16	31	496
SEV-7	320,337	8’068,981	51	29	78	2262
SEV-8	320,410	8’068,948	56	33	94.6	3123
SEV-9	320,460	8’068,921	50	27	34.2	923
SEV-10	320,535	8’068,852	43	20	40	800
SEV-11	320,119	8’068,749	25	0	0	0
SEV-12	320,179	8’068,698	55	32	63	2016
SEV-13	320,288	8’068,651	55	32	63	2016
SEV-14	320,319	8’068,609	50	28	41.7	1168
SEV-15	320,394	8’068,586	40	15	32	480
SEV-16	319,936	8’068,479	50	26	38.2	992
SEV-17	319,968	8’068,434	55	33	93.2	3075
SEV-18	320,055	8’068,381	37	14	26	364
SEV-19	320,111	8’068,334	40	17	18	306
SEV-20	320,161	8’068,299	40	17	30	510
SEV-21	319,671	8’068,261	45	21	59.3	1246
SEV-22	319,762	8’068,234	51	29	49.9	1448
SEV-23	319,830	8’068,159	55	33	47.3	1560
SEV-24	319,895	8’068,096	42	20	15.2	304
SEV-25	319,959	8’068,049	25	0	0	0
SEV-26	319,502	8’068,085	23	0	0	0
SEV-27	319,558	8’068,027	40	18	31	558
SEV-28	319,600	8’067,953	55	33	67.1	2214
SEV-29	319,659	8’067,897	35	13	26	338
SEV-30	319,726	8’067,853	25	0	0	0

Nota. Valores del techo basamento impermeable, espesor del acuífero, resistividad promedio y resistencia transversal.

Tabla 24

Resultados generales de planos geofísicos, sondajes complementarios interpolados - inferidos

SEVs	ESTE	NORTE	TECHO BASAMENTO (m)	ESPESOR ACUÍFERO (m)	RESISTIVIDAD PROMEDIO (ohm-m)	RESISTENCIA TRANSVERSAL (ohm-m^2)
POZO_CHIRONTA	316968	8062028	31	21	33	693
POZO_CINTO3	317697	8064066	47	32	65	2080
POZO_CINTO4	316399	8059810	20	10	16	160
POZO_EMAPA	313536	8052146	40	17	31	527
POZO_EPS	313107	8051571	20	9	31	279
POZO_IRHS-SCI-1	321539	8069775	37	17	107	1819
POZO_JARRO	319282	8067816	51	29	62	1798
POZO_MACHORRITA	315282	8053984	53	13	31	403
POZO_MONTEGRANDE1	316322	8058654	27.5	10	16	160
POZO_MONTEGRANDE3	316262	8057993	38	12	16	192
RE_MONTEGRANDE	316264	8057776	45	10	50	500
SEV-1Z	317972	8064236	50	39	50	1950
SEV-2Z	318064	8064095	32	12	80	960
SEV-3Z	314078	8052606	53	23	31	713
SEV-4Z	317918	8065105	50	42	66	2772
SEV-5Z	316766	8061274	24	14	24	336
SEV-6Z	317396	8063165	38	24	58	1392
SEV-7Z	318681	8067302	52	28	58	1624

Nota. Valores del techo basamento impermeable, espesor del acuífero, resistividad promedio y resistencia transversal.

Tabla 25

Cuadro resumen de los planos geofísicos

Sector	Profundidad Basamento (m)	Espesor Saturado (m)	Resistividad Verdadera (Ω·m)	Resistencia Transversal (Ω·m2)
Zona Baja	15 - 60	5 - 35	16 - 68	77 - 2370
Zona Media	20 - 55	9 - 42	13 - 80	160 - 2892
Zona Alta	20 - 57	13 - 35	15 - 106	315 - 3341

Nota. Resumen de los valores de profundidad del basamento, espesor saturado, resistividad y resistencia transversal de la zona baja, media y alta del acuífero Cinto.

CAPÍTULO VI

MODELO HIDROGEOLÓGICO

6.1. Logueo de pozos

El objetivo principal del logueo en los pozos perforados fue la correlación litológica de este método directo con el método indirecto de los SEV´s. Se realizó el logueo de 7 pozos perforados en la zona de Cinto con las características siguientes:

Tabla 26

Pozos logueados en el Valle de Cinto Locumba

POZOS LOGEADOS	COORDENADAS UTM WGS-84		AÑO DE PERFORACION	NE INICIAL (m)	NE ACTUAL (2024)	VOLUMEN (m3/año)	PROF. (m)
	ESTE	NORTE					
CONOSTOCO	314,555	8'052,983	2013	13.8	40	77,760	44.5
TRES MOLLES	316,040	8'055,654	2006	31.11	45	-	52
TRES PIEDRAS	316,040	8'055,654	2005	25.75	44	279,936	50
MONTEGRANDE N°3	316,262	8'057,993	2012	25.85	30	93,312	28.5
REEMPLAZO MONTEGRANDE	316,264	8'057,776	2024	35	35	-	35
LOS CARZOS	316,242	8’056,583	2010	18	30	46,656	52
CINTO N°3	317,697	8’064,066	2008	15	-	466,560	55

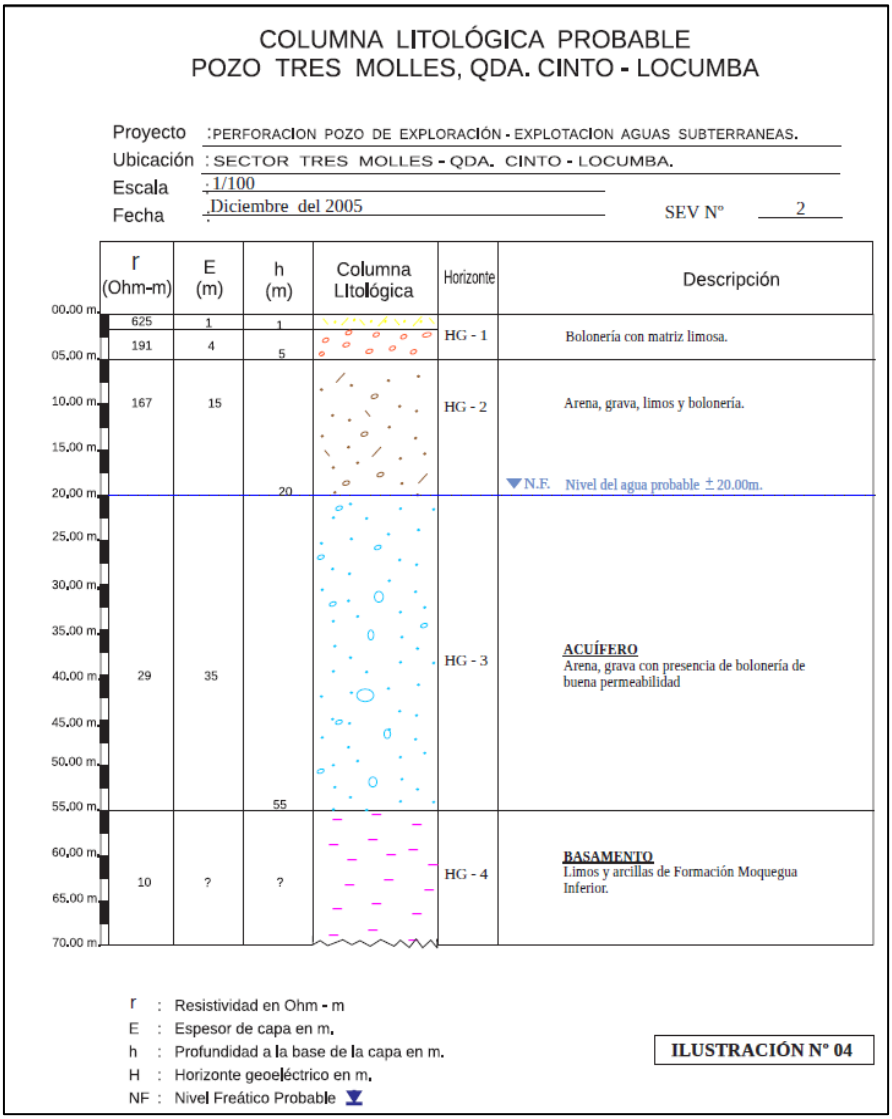
Nota. Características de los pozos logueados en la zona de Cinto. Fuente Propia.

Las fuentes de los logueos de los pozos fueron proporcionadas por la empresa EMAP SAC y la municipalidad de Jorge Basadre desde el año 2006 al 2024.

A continuación, se presentan las fuentes originales de las columnas estratigráficas modificadas posteriormente para su análisis.

Figura 21

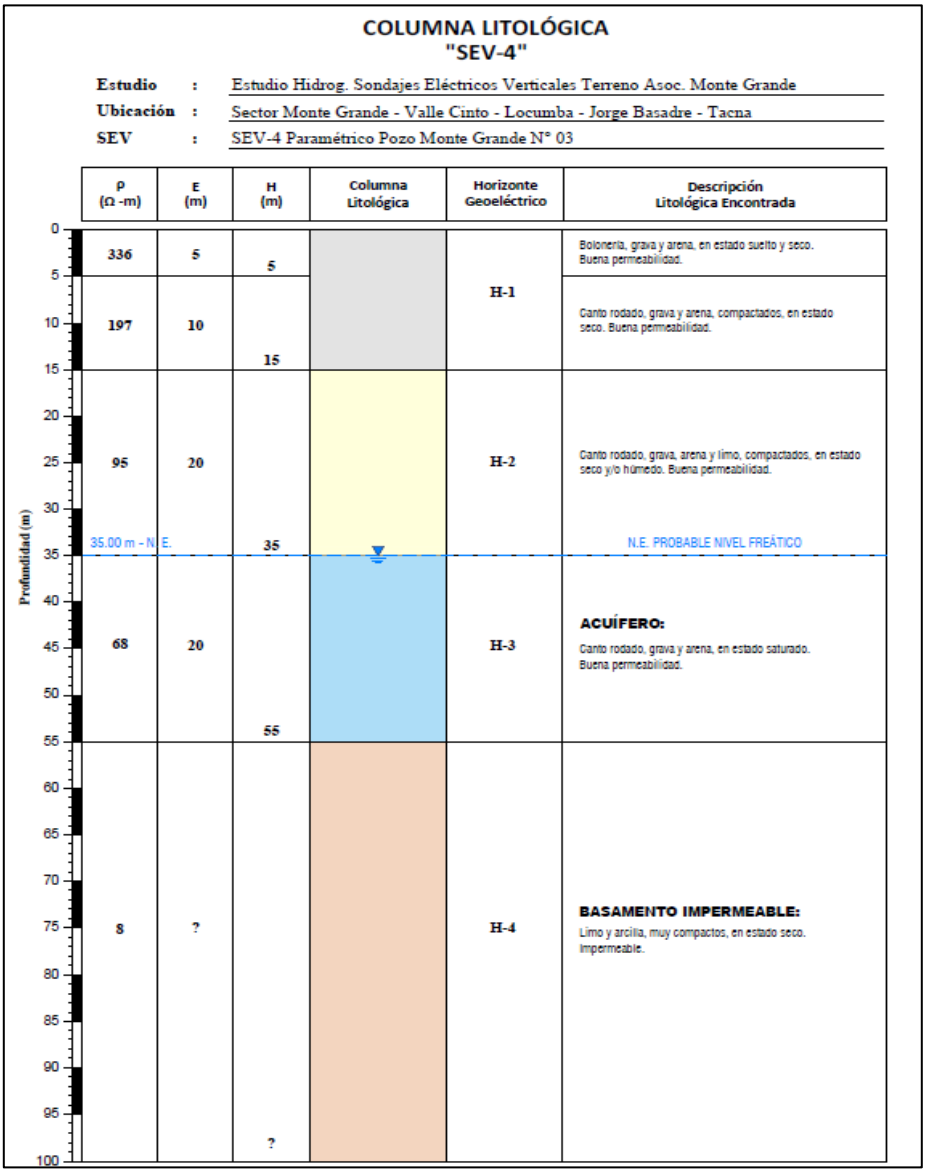
Columna litológica original del pozo Tres Molles



Nota. Logueo de pozo a detalle durante la perforación del pozo Tres Molles. Fuente EMAP SAC 2005

Figura 22

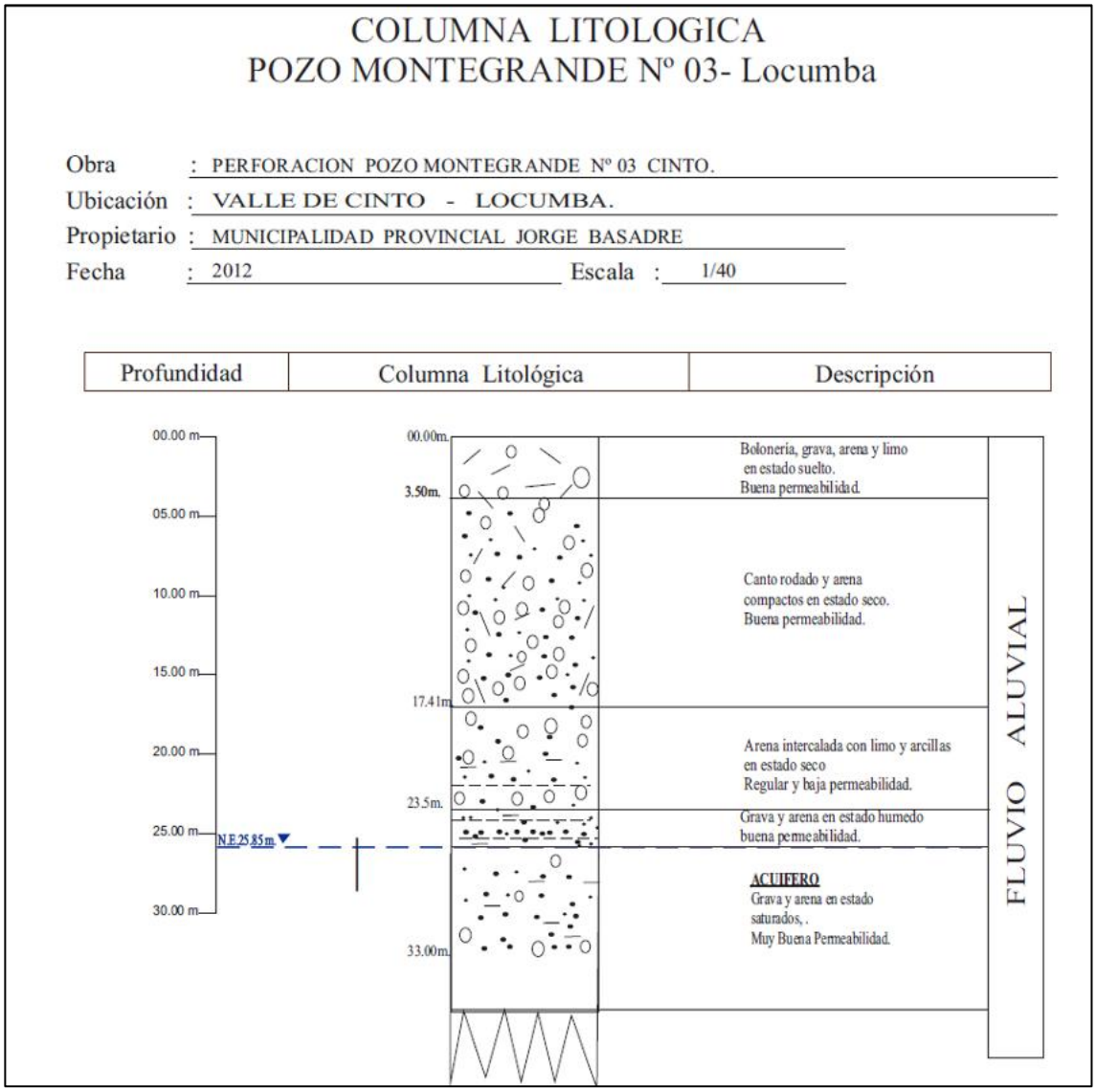
Columna litológica original del pozo de Reemplazo Montegrande y SEV paramétrico.



Nota. Logueo de pozo a detalle durante la perforación del pozo de Reemplazo Montegrande y SEV paramétrico. Fuente EMAP SAC 2024

Figura 23

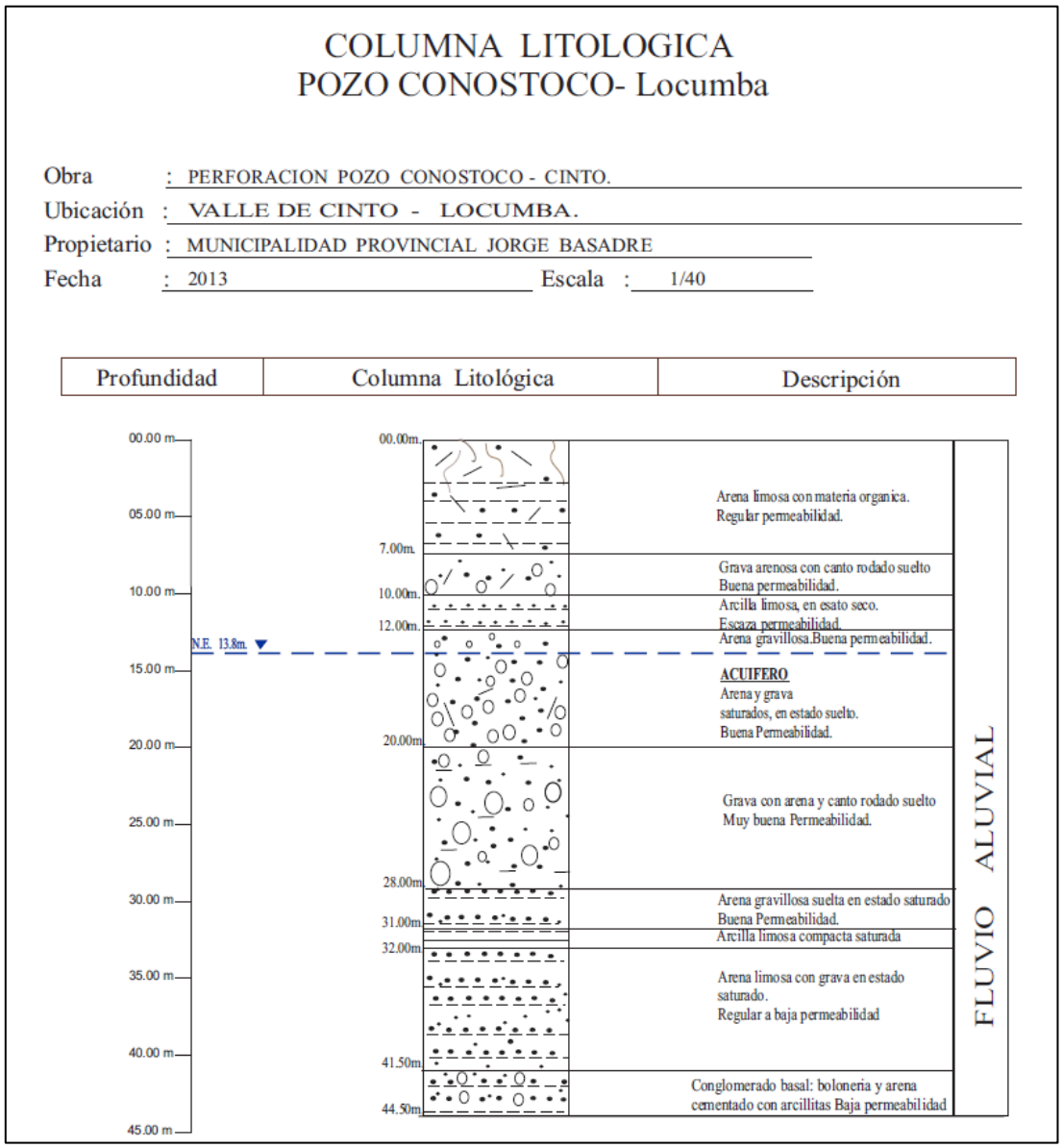
Columna litológica original del pozo Montegrande 3



Nota. Logueo de pozo a detalle durante la perforación del pozo Montegrande 3. Fuente EMAP SAC 2012.

Figura 24

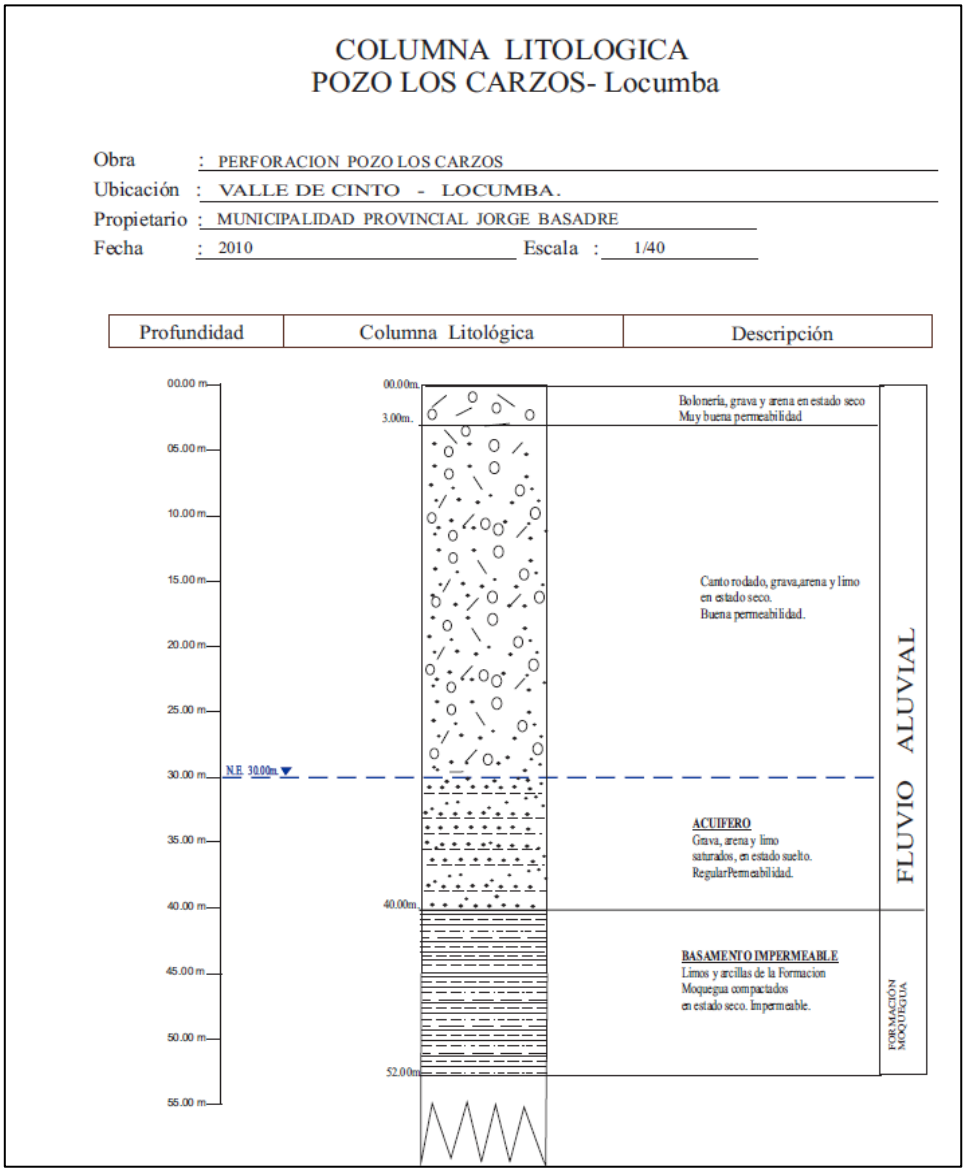
Columna litológica original del pozo Conostoco



Nota. Logueo de pozo a detalle durante la perforación del pozo Conostoco. Fuente EMAP SAC 2013.

Figura 25

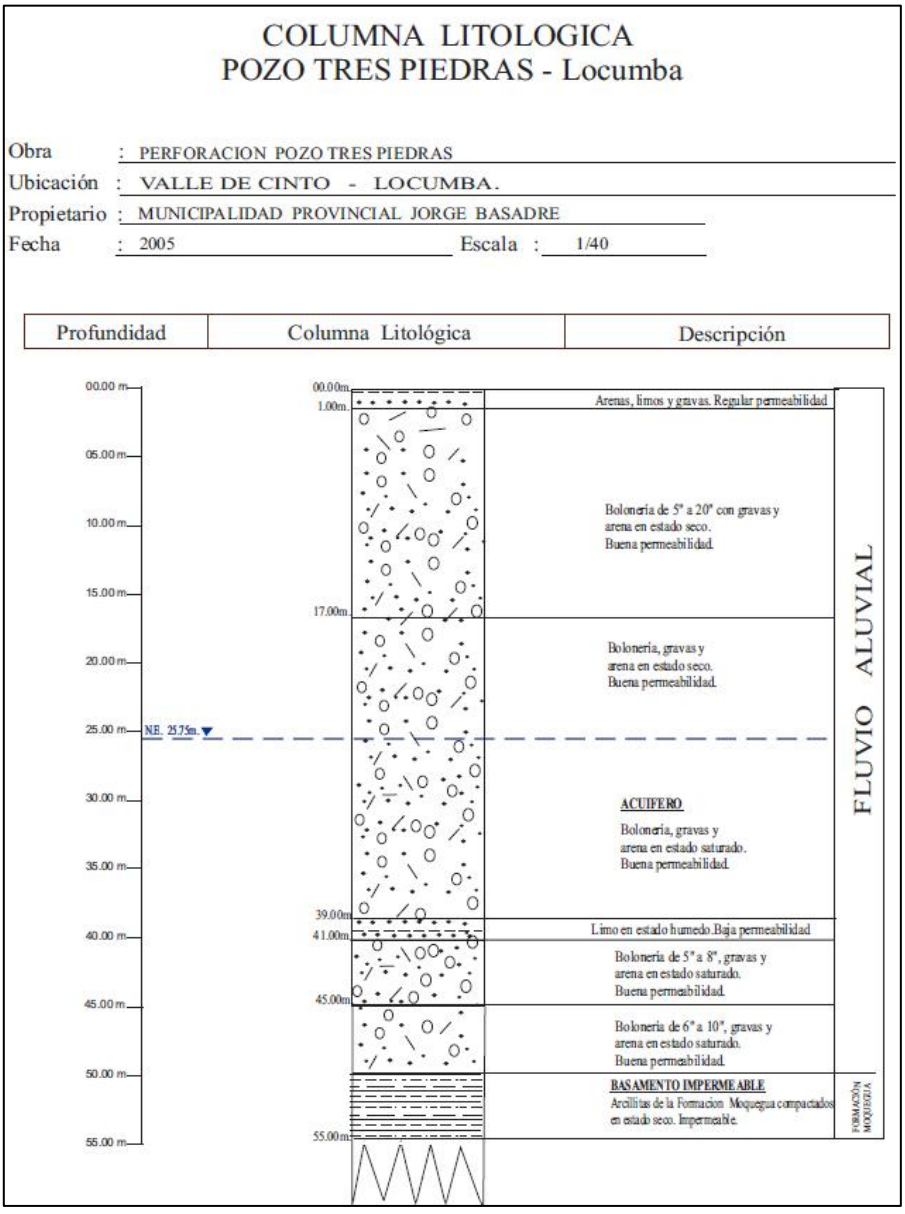
Columna litológica original del pozo Los Carzos



Nota. Logueo de pozo a detalle durante la perforación del pozo Los Carzos. Fuente EMAP SAC 2010.

Figura 26

Columna litológica original del pozo Tres Piedras



Nota. Logueo de pozo a detalle durante la perforación del pozo Tres Piedras. Fuente EMAP SAC 2005.

6.1.1. Descripción litológica del Pozo Tres Molles

Ubicado en las coordenadas 314 555 E 8 052 983 N (Ver figura 27). La perforación alcanza una profundidad total de 52 metros, atravesando una alternancia de bolonería, arenas, limos y arcillitas que definen el comportamiento hidrodinámico del sector

Zona No Saturada

- **De 0m a 5m:** Bolonería en una matriz limosa de buena permeabilidad, asociada a depósitos de colapso.
- **De 5m a 31.11 m:** Arena, grava, limos y bolonería de buena permeabilidad asociada a depósitos de colapso.

Antigua Zona Saturada

Nivel estático original (2006) 31.11m de profundidad

- **De 31.11m a 45m - No Saturado y/o Húmedo**

  Arena y grava con presencia de bolonería con lentes de limos de buena permeabilidad.

Acuífero explotable actual

Nivel estático actual (Oct.2024) 45m de profundidad

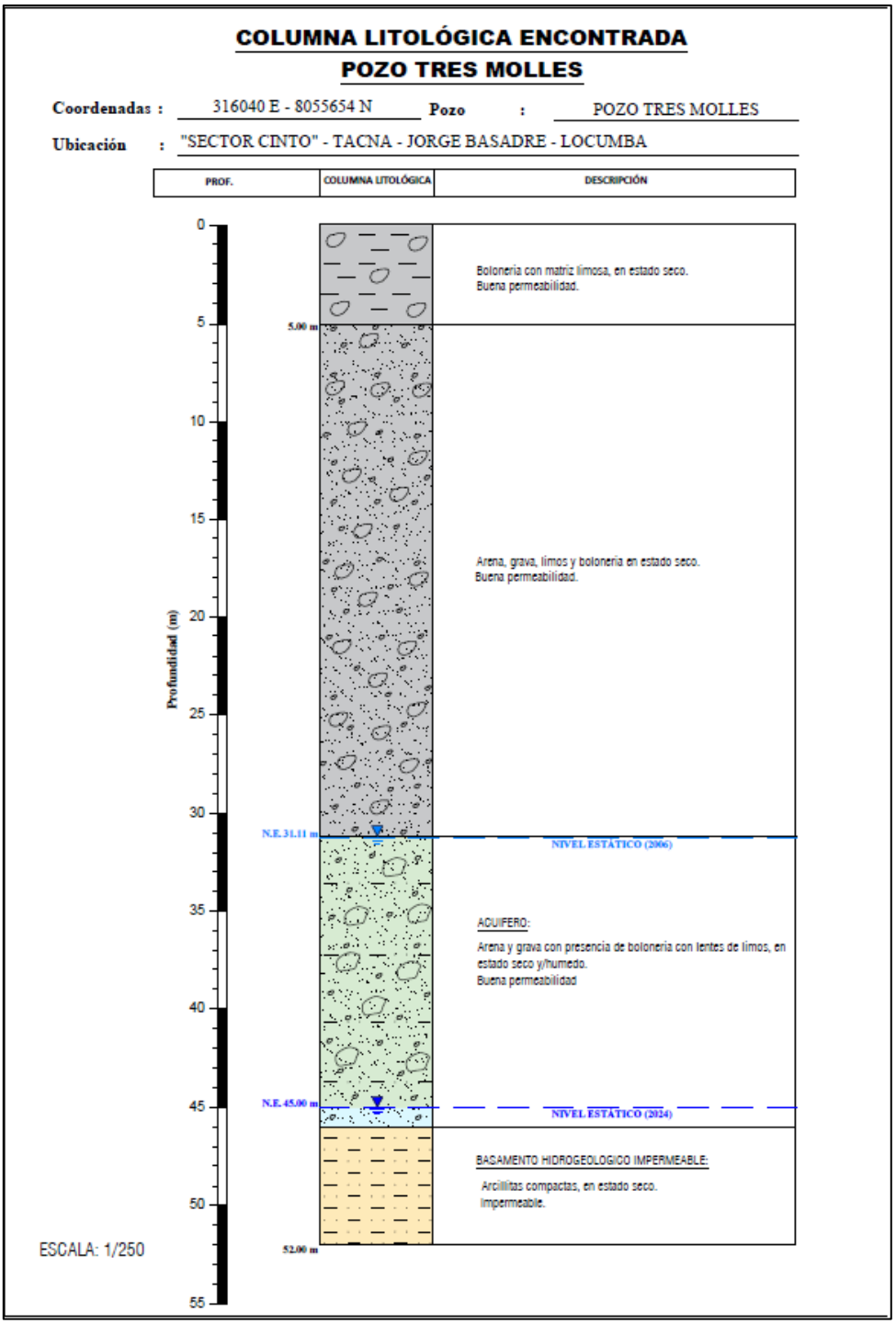
- **De 45m a 46m:** Arena y grava con presencia de bolonería con lentes de limos de buena permeabilidad en estado saturado

Basamento hidrogeológico impermeable

- **De 46m a 52m:** Arcillitas compactas de naturaleza impermeable en estado seco.

Figura 27

Columna litológica del pozo Tres Molles



Nota. La figura muestra la descripción litológica detallada del pozo Tres Molles con las variaciones de niveles estáticos correspondientes (EMAP SAC 2024).

6.1.2. Descripción litológica del pozo Conostoco

Ubicado en las coordenadas 316 040 E 8 055 654 N (Ver figura 28). La perforación alcanza una profundidad total de 44,5 metros, atravesando una alternancia de arena, grava, cantos rodados, bolonería y arcillitas que definen el comportamiento hidrodinámico del sector

Zona No Saturada

- **De 0m a 7m:** Depósito de arena limosa con presencia de materia orgánica. Presenta regular permeabilidad, asociada a depósitos de colapso
- **De 7m a 10 m:** Grava arenosa con cantos rodados sueltos de buena permeabilidad.
- **De 10m a 12m:** Arcilla limosa de escasa permeabilidad a impermeable.
- **De 12m a 13m:** Arena gravillosa suelta de buena permeabilidad

Antigua Zona Saturada

Nivel estático original (2013) 13m de profundidad

- **De 13m a 20m - No Saturado y/o Húmedo**

Arena gravillosa suelta de buena permeabilidad.

- **De 20m a 28m:** Grava arenosa con presencia de cantos rodados sueltos de muy buena permeabilidad.
- **De 28m a 31m:** Arena gravillosa suelta de buena permeabilidad

- De 31m a 32: Arcillita limosa compacta impermeable.
- De 32m a 40m: Arena limosa con grava compacta de regular a baja permeabilidad.

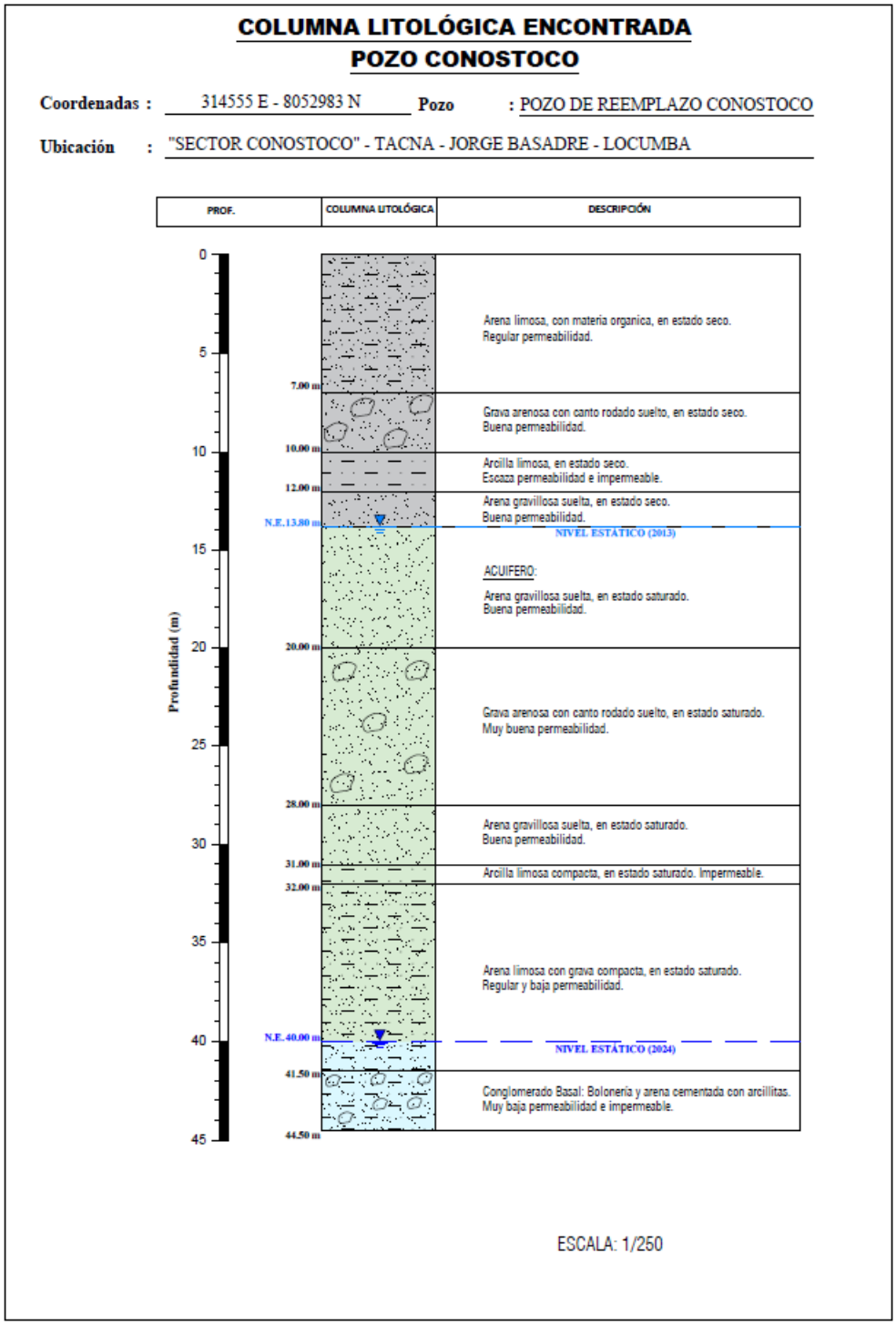
Acuífero explotable actual

Nivel estático actual (Oct.2024) 40m de profundidad

- **De 40m a 41,5m:** Arena limosa con grava compacta de regular a baja permeabilidad.
- De **41.5m a 44,5m:** Conglomerado basal de bolonería y arena cementada con arcillitas de muy baja permeabilidad a impermeable.

Figura 28

Columna litológica del pozo Conostoco



Nota. La figura muestra la descripción litológica detallada del pozo Conostoco con las variaciones de niveles estáticos correspondientes

6.1.3. Descripción litológica del Pozo Tres Piedras

Ubicado en las coordenadas 316,040 E – 8’055,654 N (Ver figura 29). La perforación alcanza una profundidad total de 55 metros, atravesando una alternancia de Arena, grava, bolonería, limo y arcillitas que definen el comportamiento hidrodinámico del sector

Zona No Saturada

- **De 0m a 1m:** Arenas, limos y gravas en estado seco de regular permeabilidad.
- **De 1m a 17 m:** Bolonería gravas y arenas de buena permeabilidad asociadas a una zona de colapso.
- **De 17m a 25,75 m**: Bolonería, grava y arena de buena permeabilidad

Antigua Zona Saturada

Nivel estático original (2005) 25.75m de profundidad

- **De 25.75m a 39 m**: Bolonería, grava y arena en estado húmedo de buena permeabilidad.
- **De 39m a 41m:** Limo en estado húmedo de baja permeabilidad.
- **De 41m a 44 m:** Bolonería, gravas y arenas de buena permeabilidad.

Acuífero explotable actual

Nivel estático actual (Oct.2024) 44m de profundidad

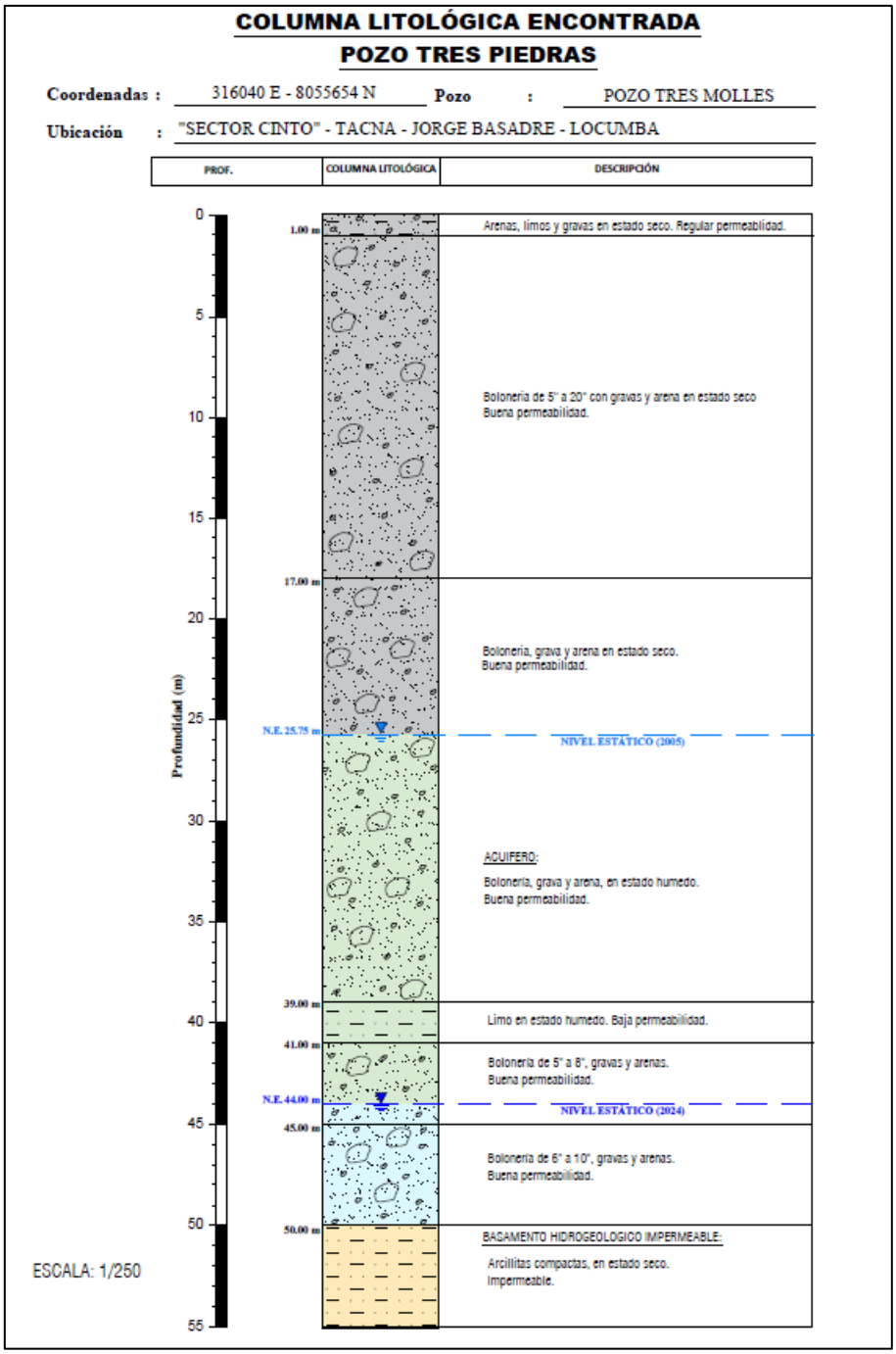
- **De 44m a 45m:** Bolonería, gravas y arenas de buena permeabilidad.
- **De 45m a 50m:** Bolonería**,** gravas y arenas de buena permeabilidad.

Basamento hidrogeológico impermeable

- **De 50m a 55m:** Arcillitas compactas de naturaleza impermeable en estado seco.

Figura 29

Columna litológica del pozo Tres Piedras



Nota. La figura muestra la descripción litológica detallada del pozo Tres Piedras con las variaciones de niveles estáticos correspondientes.

6.1.4. Descripción litológica del Pozo Montegrande N° 3

Ubicado en las coordenadas 316,262 E – 8’057,993 N (Ver figura 30). La perforación alcanza una profundidad total de 30 metros, atravesando una alternancia de bolonería, cantos rodados, arena y grava que definen el comportamiento hidrodinámico del sector

Zona No Saturada

- **De 0m a 3.5m:** Bolonería, grava, arena y limo de buena permeabilidad.
- **De 3.5m a 17.4 m:** Canto rodado y arena compactos de buena permeabilidad.
- **De 17.4m a 23.5 m**: Arena intercalada con limo y arcillitas de regular a baja permeabilidad.
- **De 23.5m a 25.85m:** Grava y arena de buena permeabilidad.

Nivel estático original (2012) 25.85m de profundidad

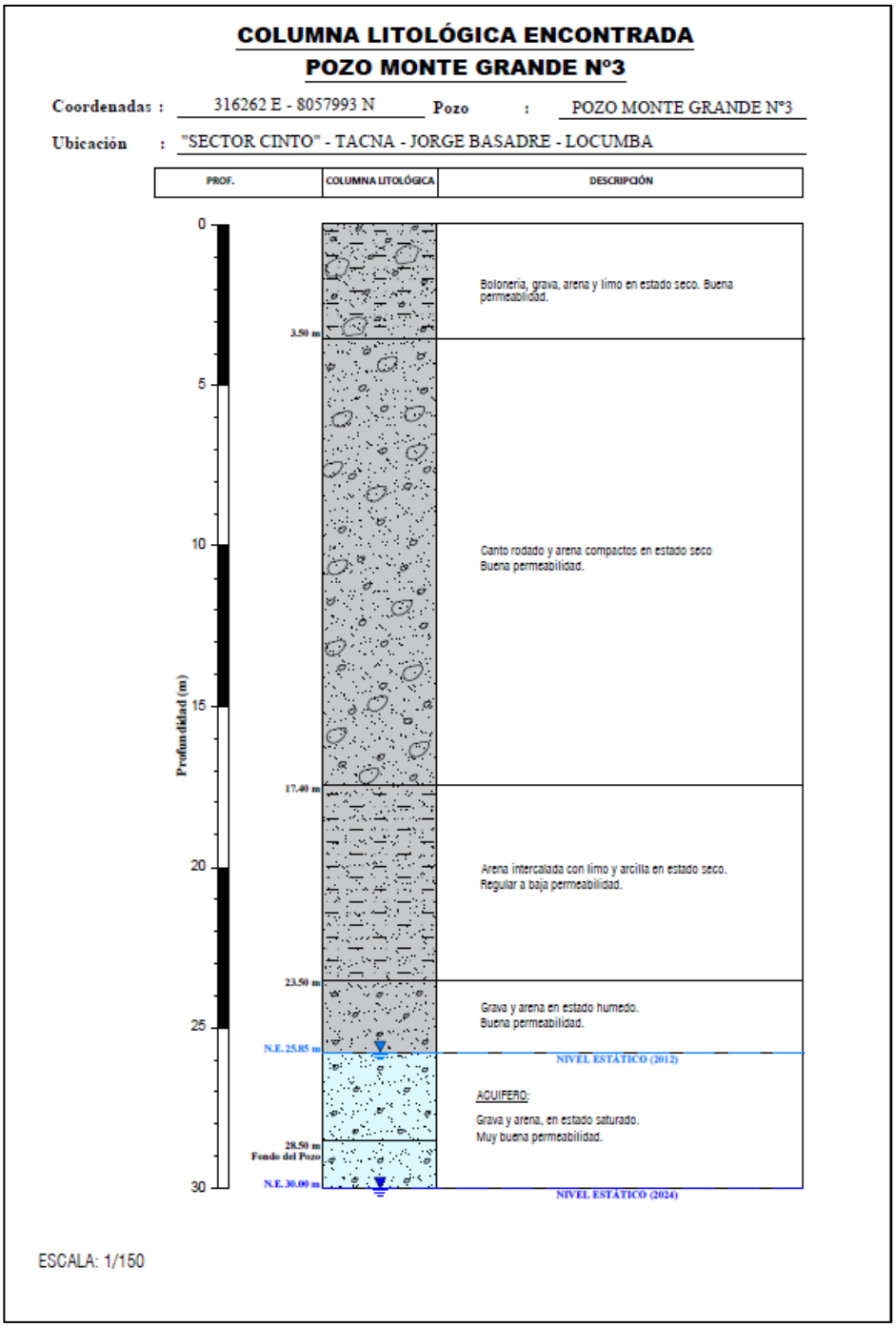
- **De 25.85m a 30 m**: Bolonería, grava y arena en estado húmedo de buena permeabilidad.

Acuífero explotable actual

Nivel estático actual (Oct.2024) 30m de profundidad

Figura 30

Columna litológica del pozo Montegrande N°3



Nota. La figura muestra la descripción litológica detallada del pozo Montegrande N°3 con las variaciones de niveles estáticos correspondientes.

6.1.5. Descripción litológica del Pozo Los Carzos

Ubicado en las coordenadas 316,193 E - 8’057,776 N (Ver figura 31). La perforación alcanza una profundidad total de 52 metros, atravesando una alternancia de bolonería, cantos rodados, gravas, arenas, limo y arcillitas que definen el comportamiento hidrodinámico del sector

Zona No Saturada

- **De 0m a 3m:** Bolonería, grava y arena de muy buena permeabilidad.
- **De 3m a 30 m:** Canto rodado, grava, arena y limo de buena permeabilidad asociadas a una zona de colapso.

Acuífero explotable actual

Nivel estático actual (Oct.2024) 30m de profundidad

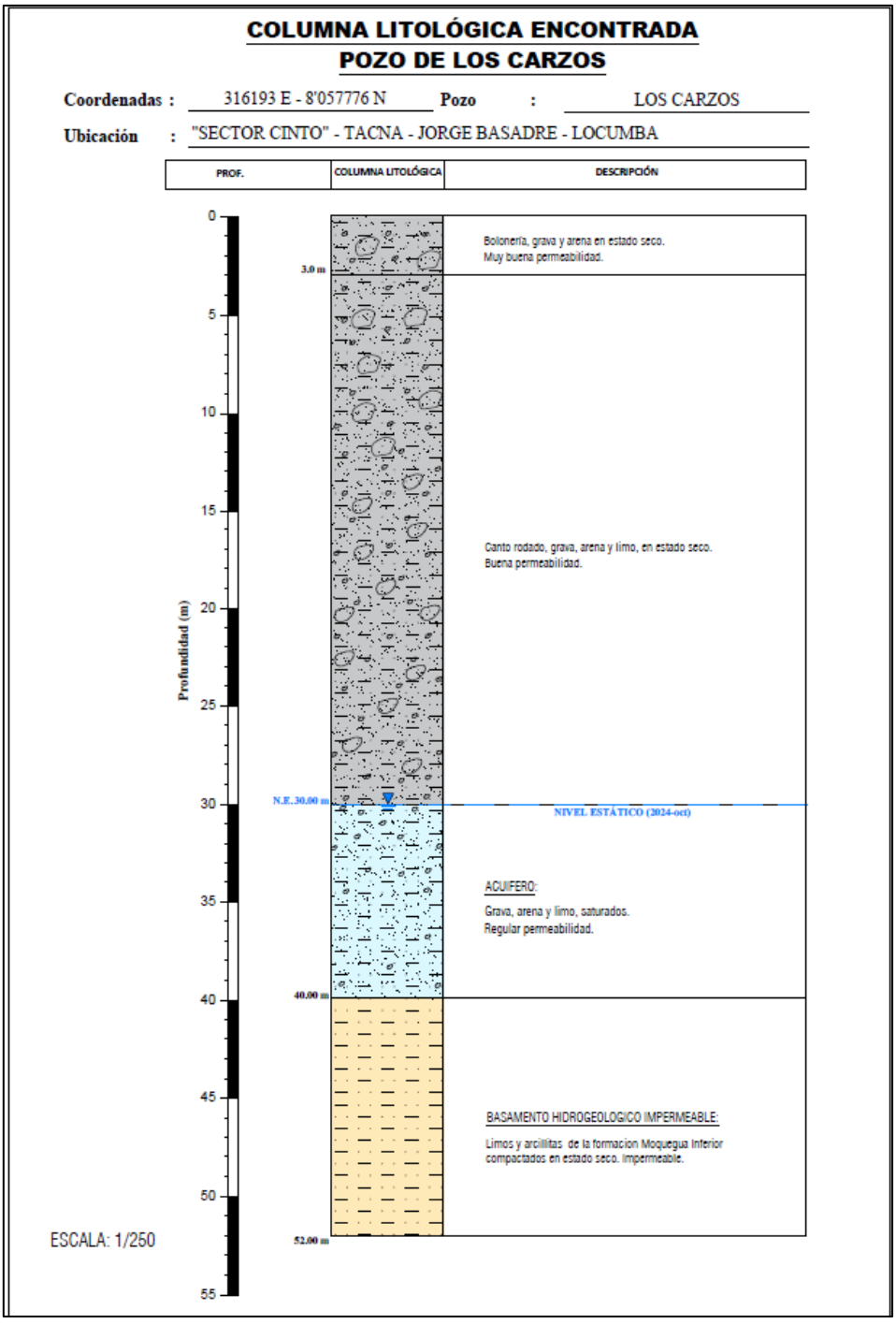
- **De 30m a 40m:** Grava, arena y limo en estado saturado de regular permeabilidad.

Basamento hidrogeológico impermeable

- **De 40m a 52m:** Limos y arcillitas de la Formación Moquegua compactas de naturaleza impermeable en estado seco.

Figura 31

Columna litológica del pozo Los Carzos



Nota. La figura muestra la descripción litológica detallada del pozo Los Carzos con las variaciones de niveles estáticos correspondientes.

6.1.6. Descripción litológica del Pozo de Reemplazo Montegrande

Ubicado en las coordenadas 316,264 E – 8’057,776 N (Ver figura 32). La perforación alcanza una profundidad total de 52 metros, atravesando una alternancia de bolonería, cantos rodados, gravas, arenas, limo y arcillitas que definen el comportamiento hidrodinámico del sector

Zona No Saturada

- **De 0m a 13m:** Bolonería, grava, arena y limo de buena permeabilidad asociadas a una zona de colapso.
- **De 13m a 21 m:** Canto rodado, grava, arena y limo de buena permeabilidad asociadas a una zona de colapso.
- **De 21m a 35m:** Grava, arena y limo de regular permeabilidad asociadas a una zona de colapso.

Acuífero explotable actual

Nivel estático actual (Oct.2024) 35m de profundidad

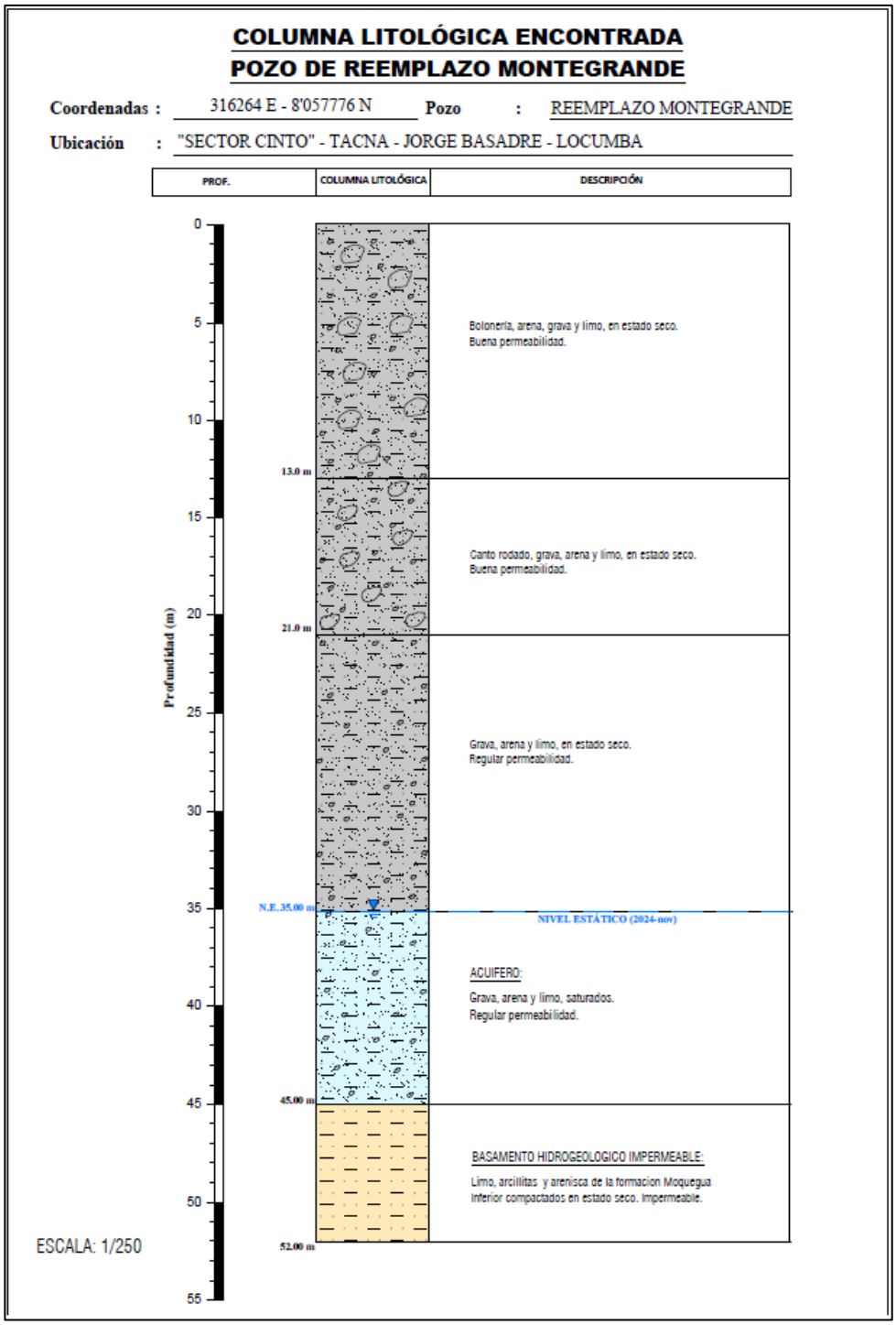
- **De 35m a 45m:** Grava, arena y limo en estado saturado de regular permeabilidad.

Basamento hidrogeológico impermeable

- **De 45m a 52m:** Limos, arcillitas y areniscas de la Formación Moquegua Inferior compactas de naturaleza impermeable en estado seco.

Figura 32

Columna litológica del pozo de Reemplazo Montegrande



Nota. La figura muestra la descripción litológica detallada del pozo de Reemplazo Montegrande con las variaciones de niveles estáticos correspondientes.

Otro de los parámetros que se pudo observar de manera directa en el logueo fue la variación de los niveles de agua desde el año de la perforación a la actualidad.

Los resultados de la variación en los niveles estáticos muestran un descenso de estos, probablemente causado por la sobreexplotación de pozos ilegales agua arriba del acuífero debido a la expansión de las zonas agrícolas. Una de las alternativas tomadas por los propietarios de estos pozos (Municipalidad de Jorge Basadre y las asociaciones de agricultores de Cinto) fue la profundización de estos para aumentar el caudal, con la perspectiva de que existiendo materiales más permeables a profundidad el flujo de agua subterránea aumentaría, lo cual no sucedió en la mayoría de los casos al encontrarse con el basamento impermeable de limolitas y arcillitas de la formación Moquegua Inferior.

Como conclusión de la evaluación realizada en los pozos en explotación para uso poblacional se observa que existe una sobre- explotación de todos los pozos, que solo se recargan de manera temporal en épocas de lluvia, por lo que se recomienda una buena gestión aguas arriba del recurso hídrico para su distribución aguas abajo en las zonas de cultivo.

6.2. Reconocimiento de pozos y elaboración de SEV´s paramétricos

Posteriormente al logueo de los pozos perforados se realizó un reconocimiento de campo para comprobar los niveles freáticos, caudales de explotación y el estado de conservación para una actualización de los parámetros obtenidos.

Conjuntamente al reconocimiento de los pozos se realizaron sondajes eléctricos verticales paramétricos para correlacionar la litología obtenida en el logueo de pozos con los valores de resistividad para una mejor interpretación del modelo hidrogeológico.

Figura 33

Medición del nivel estático del pozo Tres Molles



Nota. La figura muestra la medición del nivel estático del pozo con sonda eléctrica graduada al milímetro. Se observa la medida de nivel estático de 45m.

Figura 34

SEV paramétrico del pozo Tres Molles



Nota. La figura muestra la ejecución del SEV´paramétrico 4m al Sur del pozo Tres Molles de propiedad de la Municipalidad Jorge Basadre. Orientado en dirección NE-SW. Se observa al ayudante en la disposición de electrodos previo al clavado.

Figura 35

Medición del nivel estático del pozo Tres Piedras



Nota. La figura muestra la medición del nivel estático con sonda eléctrica graduada al milímetro. Se observa la medida de 45m al punto de referencia de la tubería piezométrica, siendo el Nivel estático real de 44m con respecto al nivel del suelo**.**

Figura 36

SEV paramétrico del pozo Tres Piedras



Nota. La figura muestra la ejecución del SEV´paramétrico ejecutado 9m al NW del pozo Tres Piedras, de propiedad de la Municipalidad Jorge Basadre. Orientado en dirección NE-SW. Se observa a los representantes de la municipalidad en la supervisión de los trabajos de campo.

Figura 37

Medición del nivel estático del pozo Conostoco



Nota. La figura muestra la medición del nivel estático con sonda eléctrica graduada al milímetro. Se observó la medida de 40 m de nivel estático.

Figura 38

SEV paramétrico del pozo Conostoco



Nota. La figura muestra la ejecución del SEV´paramétrico ejecutado 11m al Este del Pozo de Reemplazo Conostoco, de propiedad del Ministerio de Defensa. Orientado en dirección NE-SW.

Figura 39

Medición del nivel estático del pozo Los Carzos



Nota. La figura muestra la medición del nivel estático con sonda eléctrica graduada al milímetro. Se observó la medida de 29 m de nivel estático.

Figura 40

SEV paramétrico del pozo Los Carzos



Nota. La figura muestra la ejecución del SEV´paramétrico, ejecutado en el pozo Artesanal Los Carzos, propiedad de la asociación. Orientado en dirección NE-SW

Se realizó una correlación cualitativa de los SEV´s paramétricos comparando los espesores del logueo y de los SEV´s con la litología encontrada en las perforaciones y valores de resistividad de cada estrato geofísico.

Esta validación se encuentra en el ANEXO 6 COMPARACIÓN DE COLUMNA LITOLÓGICA Y SEV PARAMÉTRICO.

6.3. Elaboración del modelo hidrogeológico 2D y 3D

El modelo hidrogeológico bidimensional presentado en las secciones geológicas – geofísicas (Ver Mapas S-01 a S-20) longitudinales A-A', B-B' C-C', D-D' y en las transversales E-E’ a T-T’, si bien permitió una aproximación inicial del comportamiento del flujo subterráneo, presentó limitaciones para representar la heterogeneidad vertical y lateral del acuífero, lo que restringe la estimación precisa de volúmenes almacenados, la definición de su geometría y la evaluación del balance hídrico. En este contexto, se incorporó un modelo hidrogeológico tridimensional, el cual permite una representación más realista del sistema acuífero y mejora la confiabilidad de los resultados obtenidos.

La elaboración de un modelo hidrogeológico 3D constituye una etapa fundamental para analizar y cuantificar los recursos de agua subterránea de Cinto-Locumba. Ese proceso permitió representar geoespacialmente las unidades

hidroestratigráficas y estimar volúmenes de reservorio necesarios para la comprensión del acuífero y su posterior gestión. Este enfoque constituye una herramienta moderna de análisis del subsuelo, ampliamente utilizada en la evaluación de recursos hídricos subterráneos y establecer pautas de gestión de recursos hídricos en cuencas complejas, como se demuestra en la evaluación de la contaminación y el flujo de agua subterránea (Ghiglieri et al., 2020).

La base de datos utilizada para la construcción del modelo incluyó:

- Superficie topográfica digital utilizada como límite superior del dominio geológico.
- Base de datos de sondajes y perforaciones de pozos subterráneos (Drillholes) incluyendo coordenadas del collar, trayectorias y registros litológicos por intervalos de profundidad.
- Identificación de unidades hidrogeológicas diferenciadas según su comportamiento hidráulico.

Primeramente, se realizó en Excel la elaboración de:

- Collar: contiene el ID del pozo y SEV, coordenadas (Este, Norte, Elevación) y la profundidad total final que permiten que sea modelado en el espacio 3D correctamente.

- Lithology: que es el resultado del logueo y descripción de los SEV´s. Contiene intervalos de profundidad (Desde - Hasta) y tipo de sedimento.
- Survey: registro de la orientación del pozo bajo tierra. Contiene Profundidad de la medición, el Azimut (dirección respecto al norte) y el Dip o inclinación (ángulo respecto a la horizontal).

Exportamos estos datos al software Leapfrog con la herramienta Drillhole Data después de crear la topografía con la herramienta Topography usando un DEM previamente descargado.

Finalmente utilizamos la herramienta Geological Models para crear el volumen de los estratos hidrogeológicos y obtener sus valores en metros cúbicos (Ver Figura 25).

La modelación implícita permitió interpolar contactos entre unidades geológicas generando volúmenes que representan la estratigrafía del subsuelo. Este tipo de modelamiento es reconocido por su eficiencia en la integración de grandes volúmenes de datos georreferenciados y por su aplicación en estudios hidrogeológicos regionales (Åberg et al., 2021).

En el modelo se distinguieron las siguientes unidades hidrogeológicas que se muestran en tres secciones transversales al acuífero en la zona baja, media y alta. (Ver Tabla 21, Figura 42, Figura 43 y Figura 44).

Tabla 27

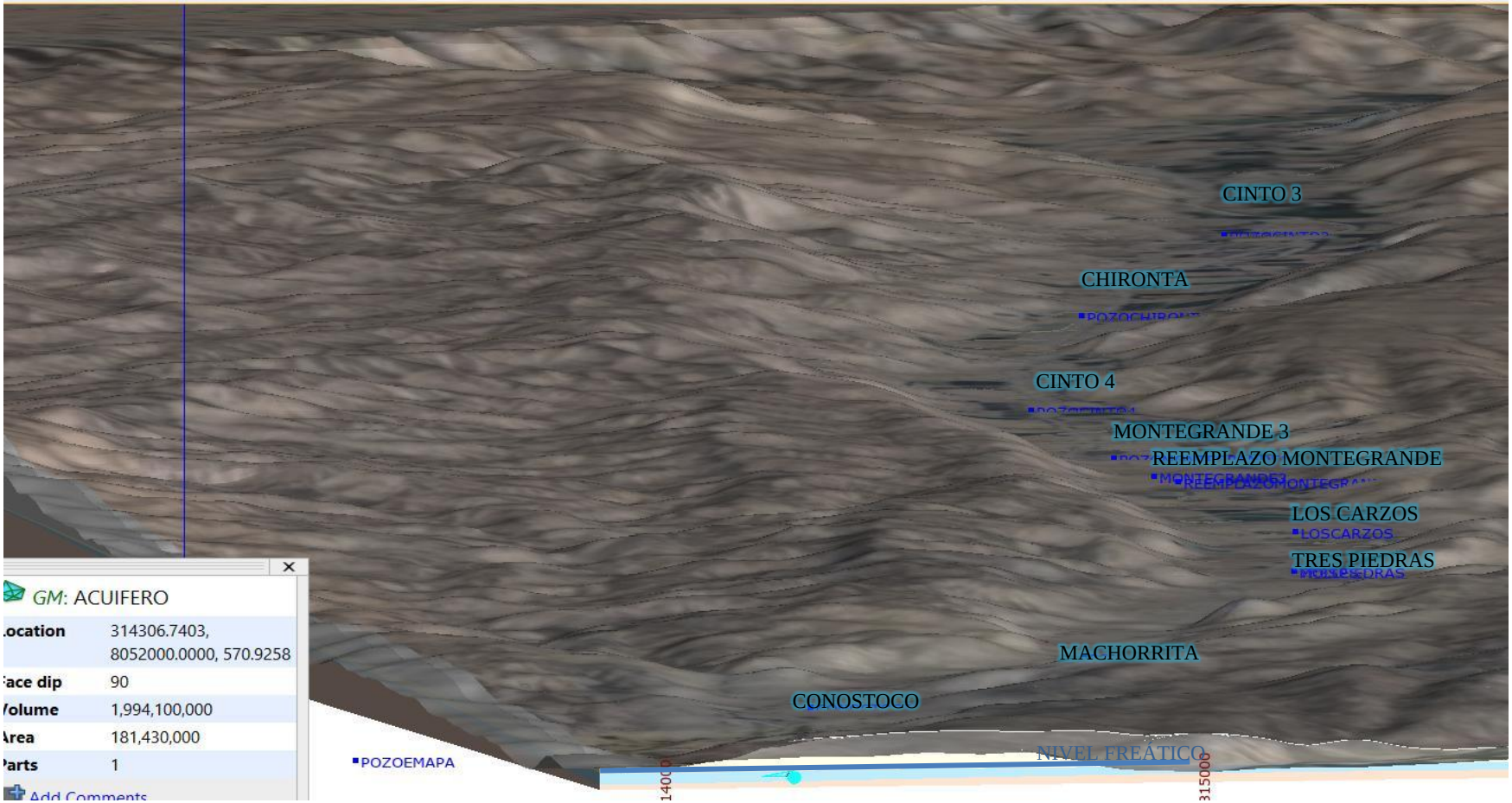
Unidades hidrogeológicas modeladas en LEAPFROG

UNIDAD HIDROGEOLÓGICA	LITOLOGÍA	VOLUMEN (m^3)	UNIDAD ESTRATIGRÁFICA	INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA
Horizonte No Saturado - Superficial	Bolonería, grava y arena, en estado seco. Muy buena permeabilidad	8 008 700 000	Q – al depósitos aluviales	Zona de recarga potencial, almacenamiento temporal de humedad del suelo
Horizonte No Saturado – Sub Superficial	Canto rodado, grava y arena, en estado seco. Buena permeabilidad	1 816 600 000	Q – al depósitos aluviales	Zona vadosa, transmisión vertical hacia el acuífero
Acuífero	Grava, arena y limo, en estado saturado. Regular permeabilidad.	1 994 100 000	Q – al depósitos aluviales	Acuífero principal saturado,
Basamento Impermeable	Limos y arcillitas compactos, en estado seco. Impermeable	39 762 000 000	Pp – mo/i Formación Moquegua inferior	Acuitardo

Nota. *Descripción de las unidades hidrogeológicas modeladas con su litología y volúmenes. Fuente Propia.*

Figura 41

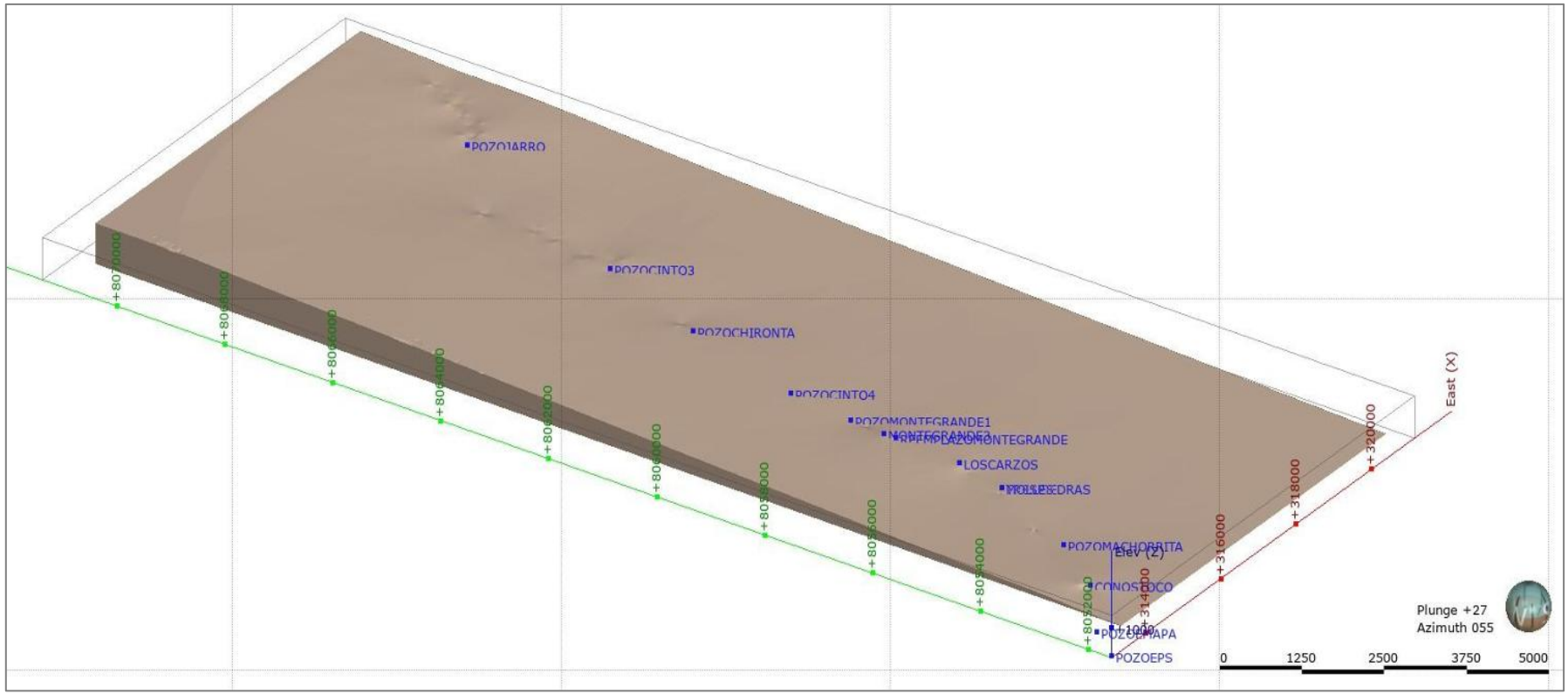
Modelo hidrogeológico 3D del acuífero Cinto Locumba



Nota. La figura muestra el modelamiento los estratos hidrogeológicos, volumen del acuífero y los drillholes utilizados para el modelo. Fuente Propia.

Figura 42

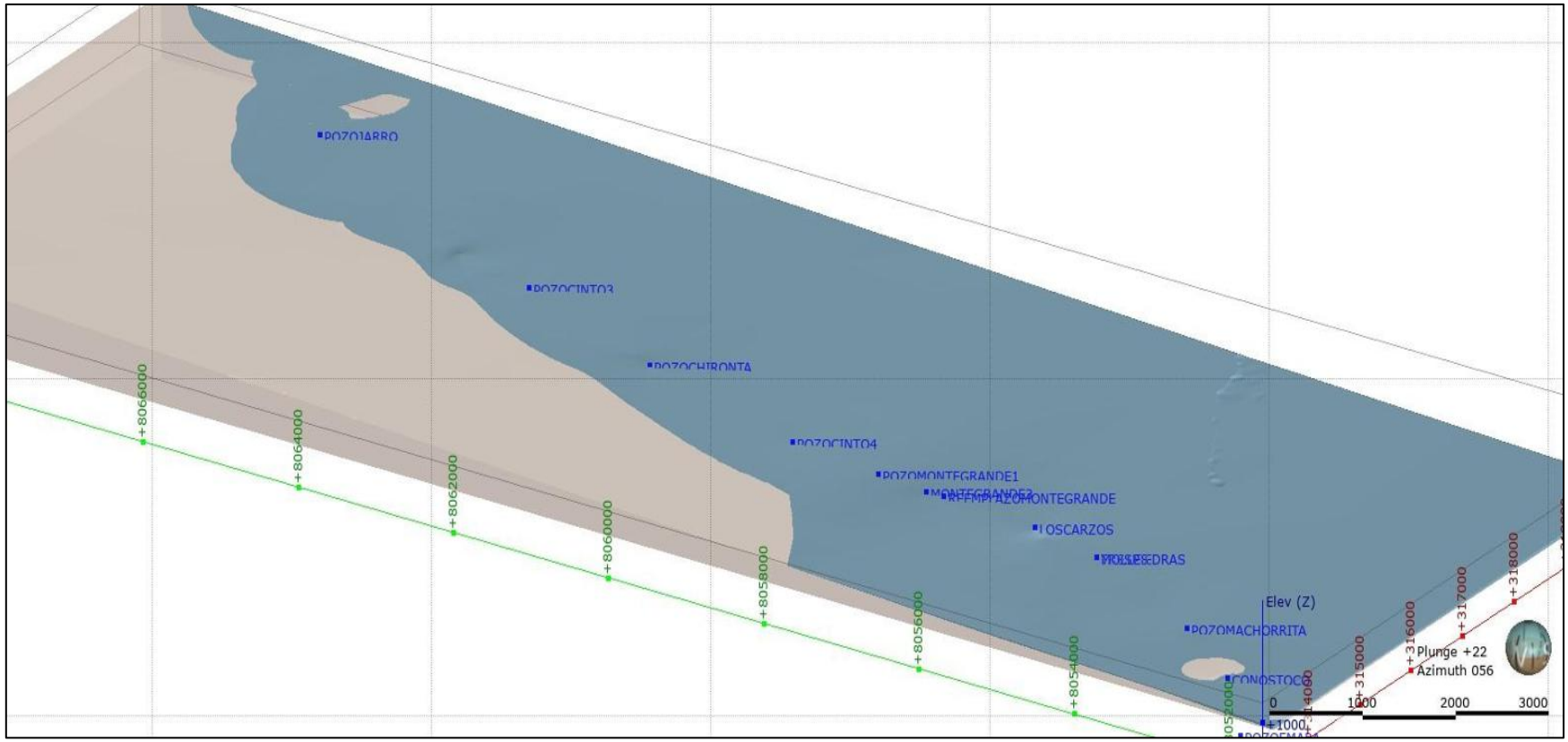
Vista Isométrica del basamento impermeable



Nota. La figura muestra el modelamiento del basamento impermeable. Fuente Propia.

Figura 43

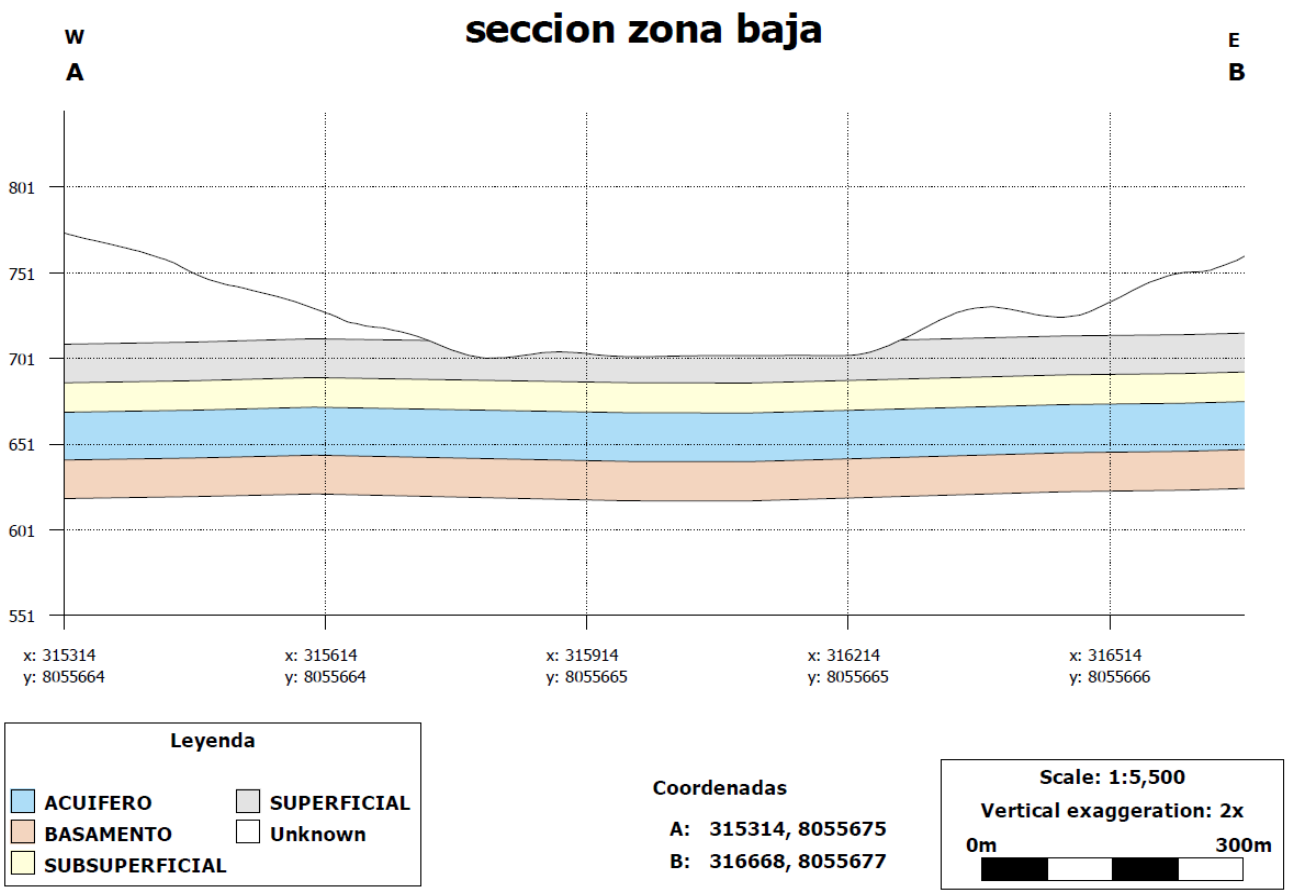
Vista Isométrica del acuífero



Nota. La figura muestra el modelamiento del acuífero saturado. Fuente Propia.

Figura 44

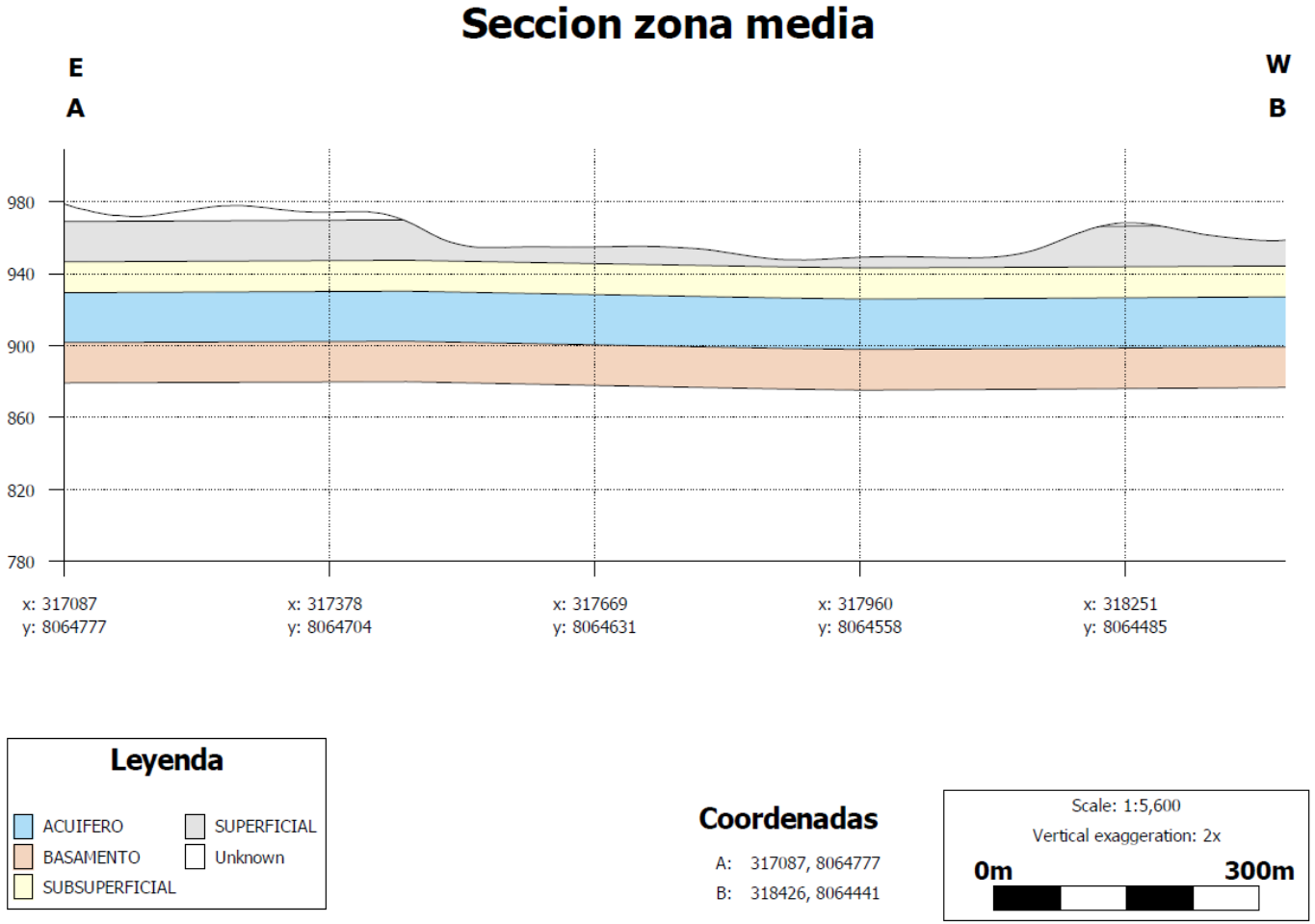
Sección transversal del modelo hidrogeológico 3D zona baja



Nota. *La figura muestra los estratos hidrogeológicos de la sección de la zona baja del modelo 3D realizado. Fuente Propia.*

Figura 45

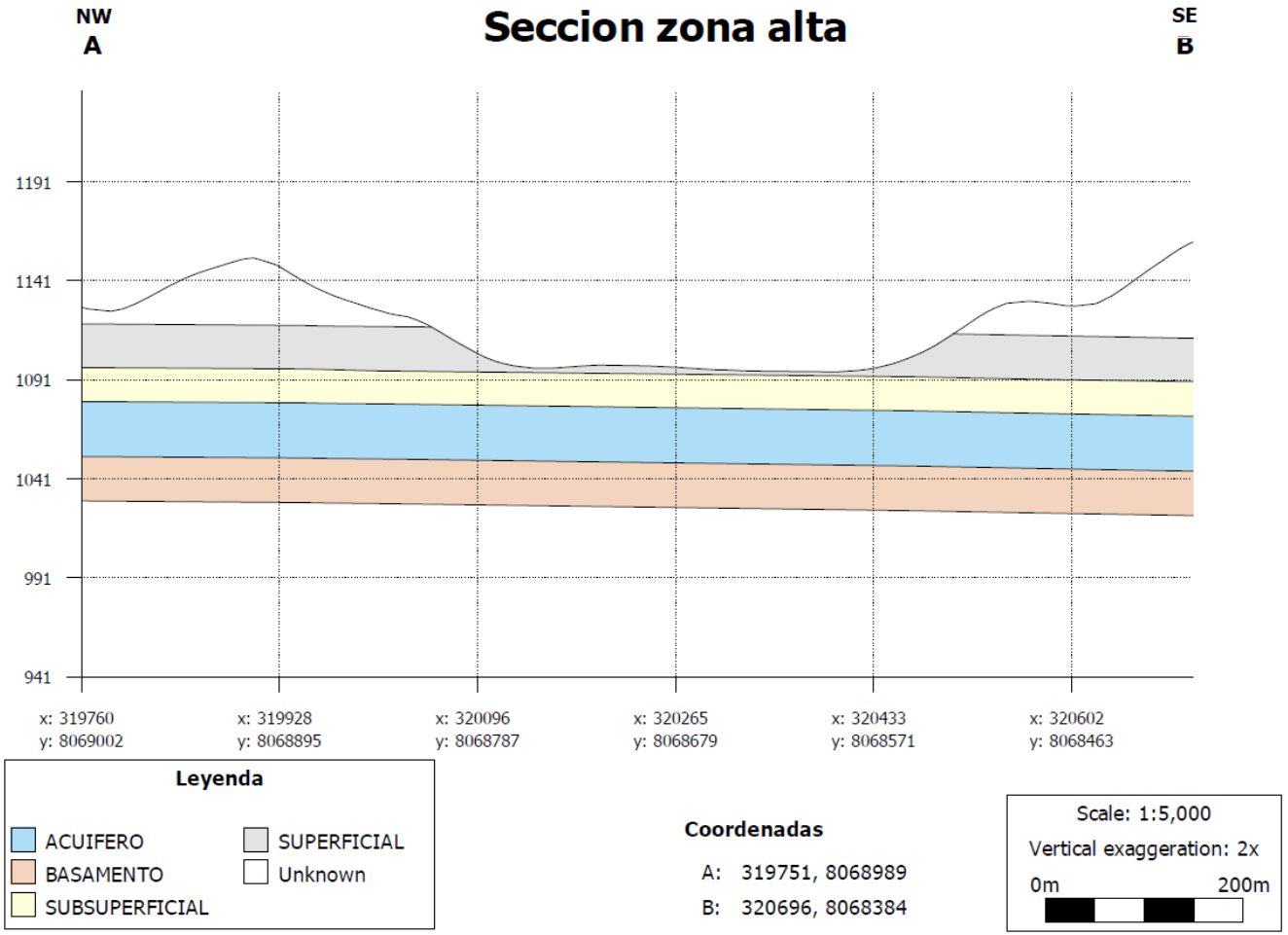
Sección trasversal del modelo hidrogeológico 3D zona media



Nota. *La figura muestra los estratos hidrogeológicos de la sección de la zona media del modelo 3D realizado. Fuente Propia.*

Figura 46

Sección transversal del modelo hidrogeológico 3D zona alta



Nota. *La figura muestra los estratos hidrogeológicos de la sección de la zona alta del modelo 3D realizado. Fuente Propia.*

6.3.1. Cálculo del volumen del acuífero

El volumen del acuífero calculado mediante el modelamiento en Leapfrog Geo resultó de:

V acuífero= 1 994 100 000 m^3

Equivalente a 1 994,1 hm^3, lo que representa el volumen total de material que compone el acuífero.

6.3.2. Porosidad efectiva y estimación de reservas de agua subterránea

Para determinar las reservas de agua almacenadas en el acuífero es necesario aplicar un parámetro que represente la fracción de poros que participa activamente en flujo y almacenamiento del agua. Este parámetro es la porosidad efectiva definida por la siguiente ecuación (Ma et al., 2020):

$$ne = \frac{V\ poros\ interconectados}{Vtotal} \ldots (6)$$

Para el uso de la porosidad efectiva se utilizó el registro de las perforaciones, ha identificado que el acuífero está compuesto fundamentalmente por depósitos aluviales y fluviales del holoceno caracterizados por gravas, arenas y limos.

De acuerdo con Custodio y Llamas (1996) y Johnson, A. I. (1967) se obtuvieron los siguientes valores de porosidad efectiva según los diferentes tipos de sedimentos:

Tabla 28

Valores de Porosidad efectiva según el tipo de materiales

Material	Porosidad efectiva %		
	máx.	Min.	media
Arcilla arenosa	12	3	7
Arena fina	28	10	21
Arena media	32	15	26
Arena gruesa	35	20	27
Arena con grava	35	20	25
Gravas finas	35	21	25
Gravas medias	26	13	23
Gravas gruesas	26	12	22

Nota. *Descripción de las porosidades efectivas. Modificado de (Johnson, 1967)*

Tabla 29

Valores de porosidad efectiva según Johnson 1967 y E. Custodio M.R. Llamas 1983

Material	Porosidad efectiva %	
	Johnson, A. I. (1967)	E. Custodio M.Llamas (1983)
Gravas	25	25
Arenas	20	25
Limos	13	10
Arcillas	2	2

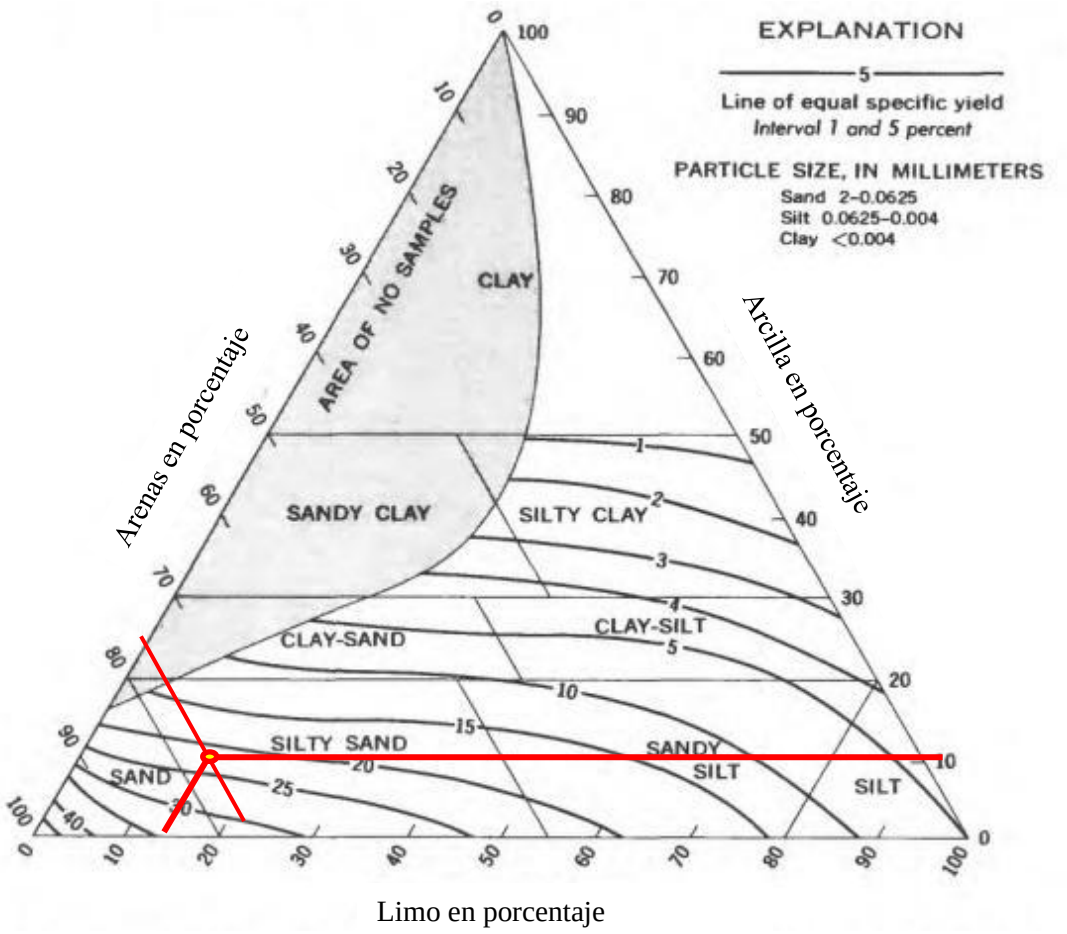
Nota. *Comparación de los valores de porosidades efectivas según (Johnson, 1967) y (E. Custodio M.R. Llamas, 1996)*

Los registros litoestratigráficos (pozo de reemplazo Montegrande) indican la presencia recurrente de "limo" y "arcilla" intercalada con gravas y arenas.

El acuífero no es una grava limpia "bien seleccionada" sino un depósito aluvial heterogéneo con matriz de finos.

Figura 47

Diagrama ternario de clasificación textural y estimación del rendimiento específico (Johnson, 1967)de los materiales del acuífero Cinto



Nota. *Diagrama para la estimación del rendimiento específico en función de la granulometría. Modificado de Johnson, 1967.*

Según el grafico de Johnson, 1967, utilizando los porcentajes de arena, limo y arcilla de los 7 logueos de los pozos de Cinto, presenta valores representativos que oscilan entre %20 y %25, dependiendo de la conectividad de sus poros y el tipo de materiales observados en el logueo de pozos.

Para este estudio se adoptó un valor representativo y conservador de:

$$ne=0{,}20 \ (20\%)$$

Un valor de 20% es un parámetro técnico equilibrado: es lo suficientemente alto para reconocer su capacidad de almacenamiento, pero lo suficientemente conservador para no sobredimensionar la reserva ante la presencia de limos.

El volumen de agua almacenada (reserva probable) se estimó como:

$$V\ agua = V\ acuifero \times ne = 1\ 994\ 100\ 000 \times 0{,}2$$

$$\mathbf{V\ agua = 398\ 820\ 000\ m3}$$

Las reservas probables de agua subterránea del acuífero Cinto, estimadas a partir del modelo hidrogeológico 3D, ascienden a 398,82 hm^3 bajo las condiciones hidrogeológicas identificadas en el área de estudio.

Todo modelo hidrogeológico 3D está sujeto a incertidumbres relacionadas con la calidad, cantidad y densidad de los datos, la distribución espacial de los sondajes y las propiedades heterogéneas del medio geológico.

Las incertidumbres en las condiciones de frontera, parámetros hidráulicos y datos de recarga pueden influir significativamente en la geometría interpolada de las unidades y en los valores volumétricos calculados, lo que justifica considerar los resultados como estimaciones probables más que como determinaciones absolutas de volumen.

Estudios de modelación han evidenciado que la proyección de recarga presenta una marcada variabilidad regional y, además, que los cambios en variables climáticas como la precipitación y la temperatura afectan de forma no lineal la cantidad de recarga estimada, introduciendo incertidumbre adicional en las evaluaciones de disponibilidad de aguas subterráneas a escala global y regional (Reinecke et al., 2021)

Estas incertidumbres se ven además potenciadas por factores locales que afectan el balance hídrico. La recarga natural del acuífero depende en gran medida de la precipitación efectiva que logra infiltrarse en el subsuelo, y en regiones semiáridas o con distribución estacional de lluvia, la variabilidad de las precipitaciones produce fluctuaciones en la recarga que son difíciles de cuantificar con precisión.

Esta situación se complica aún más por la explotación intensiva de pozos de agua subterránea en la cuenca del río Cinto, donde la extracción supera de manera sostenida las tasas de recarga natural, alterando los gradientes hidráulicos y contribuyendo a descensos piezométricos que se traducen en un balance neto negativo.

La combinación de estos factores (precipitaciones escasas y muy variables, y sobreexplotación por extracción) introduce un nivel adicional de incertidumbre en las proyecciones del comportamiento futuro del acuífero, tanto para estimaciones de volumen como para escenarios de gestión sostenible.

En consecuencia, los resultados presentados en términos de volúmenes y reservas deben ser considerados como estimaciones probables, con un rango de incertidumbre derivado no solo de las limitaciones del modelo y de la interpolación de datos, sino también de las condiciones ambientales y antropogénicas que condicionan la recarga y la descarga de este sistema hidrogeológico.

CAPÍTULO VII

BALANCE HÍDRICO

7.1 ANTECEDENTES

Las fuentes de agua poblacional en la zona de Cinto - Locumba rendían caudales óptimos de explotación de 5 l/s pozo EPS Tacna S.A., 8 l/s pozo Tres Molles y 15 l/s pozo Tres Piedras, estos dos últimos pozos de propiedad de la Municipalidad Provincial Jorge Basadre. Adicionalmente, en el año 1975, ante la implementación del Cuartel "Fuerte Arica", se perforó un pozo tubular de 44,5m de profundidad para la explotación de aguas subterráneas en el sector de Conostoco; con fines de incrementar el agua potable de esta Institución Militar. Dicho pozo originalmente, rendía un caudal de 35 l/s y abastecía plenamente a la población militar.

Debido a la sobreexplotación de la que es objeto el acuífero del Valle de Cinto en los últimos 14 años (2010-2024) por los agricultores asentados en dicho lugar que han perforado pozos ilegales y vienen utilizando este recurso de forma irracional; ha traído como consecuencia que los pozos legales perforados con fines poblacionales (Pozos Tres Molles, Tres Piedras, Conostoco-Fuerte Arica, EPS Tacna SA) se vean afectados seriamente, disminuyendo drásticamente sus caudales de explotación.

Esta situación pone en riesgo la salud y la vida de la población creciente del distrito Locumba, Fuerte Arica y en general a toda la provincia Jorge Basadre que se abastece de este recurso, tal como se puede observar en la Tabla:

Tabla 30

Caudales históricos de pozos de uso poblacional en Cinto - Locumba

POZOS	CAUDAL ORIGINAL	CAUDAL 2018	CAUDAL ACTUAL OCT 2024
TRES MOLLES	6	1	0
TRES PIEDRAS	16	2	2
CONOSTOCO	35	2	2
EPS TACNA SA	5	1	0.8

Nota. *Descripción de la variación de caudales desde el año de su perforación hasta octubre del 2024.*

7.2. ESTADO ACTUAL DEL ACUÍFERO CINTO

El acuífero Cinto, debido a la falta de un programa de aprovechamiento, ha sido explotado sin criterio técnico, originando un gradual y permanente descenso del nivel freático, comprometiendo sus reservas no renovables, lo que ha causado el descenso progresivo de caudales y niveles de agua.

A raíz de la electrificación con luz trifásica a lo largo de todo el valle de Cinto desde Locumba hasta el pozo Cinto 01 en Matogroso; los pozos que se venían

explotando mediante motores diésel y/o gasolina, que solo funcionaban 12 horas al día; han sido equipados con motores eléctricos y el bombeo se realiza 18 horas al día incrementando el caudal de explotación y consecuentemente incrementando la problemática del acuífero Cinto.

En la actualidad en el Valle de Cinto existen 500 ha. bajo riego que son dedicadas a cultivos permanentes como la vid, durazno y palta (100 ha) y 240 ha a cultivos temporales de alfalfa, orégano y pan llevar, que son irrigadas con las aguas subterráneas del acuífero Cinto, con pozos ilegales que se encuentran ubicados en la parte media y alta del acuífero, afectando seriamente los pozos legales perforados con fines poblacionales (Pozos Tres Molles, Tres Piedras, Conostoco-Fuerte Arica, EPS Tacna SA) pozos que a la fecha han disminuido drásticamente sus caudales de explotación; poniendo en riesgo la salud y la vida de la población creciente del distrito Locumba y principalmente la población militar del cuartel Fuerte Arica con 1,500 efectivos que en la actualidad carecen de este recurso, motivados por la sobreexplotación de agua para uso agrícola, donde resulta preocupante que existan proyectos de ampliación de la frontera agrícola mediante parcelas de uva, financiadas por SPCC, sin tener la sostenibilidad hídrica correspondiente.

7.3. INVENTARIO DE FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA

La actualización del Inventario de Fuentes de Agua Subterránea a Enero del 2012 (Cuadro 01), abarcó todo el cauce del Valle de Cinto, desde el pueblo de Locumba hasta el sector de Caoña, entre las cotas 575 y 1150 m.s.n.m., obteniéndose, datos de la perforación (año, tipo, profundidad, diámetro, cota, coordenadas de ubicación y otros de utilidad); del equipo de bombeo (motor y bomba); de los niveles de agua (estático y dinámico); de la explotación del agua subterránea (caudal, régimen de explotación y volumen); así como el estado y uso. Mayores detalles del inventario efectuado, se pueden observar en la Tabla 23, donde se han inventariado un total de 24 Pozos (Ver Mapa M-24).

7.3.1. Tipo de Pozos

En el Inventario de Fuentes de Agua (Cuadro 01). Se han censado un total de 24 pozos, 12 Tubulares y 12 Artesanales, con las características técnicas, niveles de agua, caudales, régimen de explotación y equipamiento que se muestran en la Tabla 23.

7.3.3. Rendimiento de los pozos

Se determinó que el máximo rendimiento de los Pozos Inventariados es de 23l/s, caudal de explotación en el pozo IRHS – 01 de Cinto en el año 2012 propiedad de la Asociación de Agricultores Valle de Cinto (Comité de Usuarios Pozo N°01 Gentilar

Valle Cinto), y el de menor rendimiento, sería el Pozo Tres molles (IRHS-13) de 0 l/s (2024).

7.3.4. Explotación del Acuífero

Se analizó la información existente, de los pozos inventariados en la zona de estudio; de esta manera para el año 2011, se operaron 17 pozos, dando como resultado una masa explotada de 2 634 120m^3 que equivale al caudal constante de explotación de 83,5 l/s, que en m^3/s sería igual a 0,083 m^3/s.

Adicionalmente al inventario efectuado, se han identificado 105 pozos clandestinos adicionales ilegales vienen extrayendo en promedio 5 l/s por pozo totalizando 525 l/s o 0,525 m^3/s que significa un volumen de explotación de 16 556 400 m^3 (multiplicado por 31 536 000 segundos que tiene un año) que equivale al caudal constante de explotación de 608l/s, que en m^3/s sería igual a 0,608 m^3/s; cuyo volumen de explotación anual asciende a 19 190 520 m^3/año.

En conclusión, puede observarse que se ha roto el equilibrio alimentación-explotación, siendo los principales afectados los pozos de agua potable, pozo Conostoco, Tres Piedras, Tres Molles y EPS Tacna por encontrarse en la zona final del acuífero y esta situación se volverá cada vez más crítica; como consecuencia que la recarga al acuífero Cinto sea mínima o nula, poniendo en riesgo el colapso definitivo de los pozos aguas arriba (pozo Conostoco, Tres Piedras, Tres Molles y EPS Tacna).

Estos son pozos legales con licencia de explotación que sirven para abastecer de agua para uso poblacional de Locumba, Fuerte Arica, pueblo de Ite, la expansión urbana de Pampas Sitana, Camiara, Santayana, etc.

Tabla 31

Inventario de fuentes de agua (2012 – 2024)

Nº IRHS	Nombre del Pozo	EXPLOTACIÓN																
		Estado Pozo	Uso	PERFORACIÓN AÑO	PERFORACIÓN TIPO	PERFORACIÓN PROF (m)	CAUDAL L/S Año 2012	CAUDAL L/S Feb2018	CAUDAL L/S Actual Octubre 2024	EQUIPO	RÉGIMEN hr / día	RÉGIMEN día / mes	RÉGIMEN mes / año	PERIODO	Volumen (m^3/año)	C.E (25ºC) mmhos/cm	N. ESTÁTICO PROF. (m)	N. DINÁMICO PROF (m)
23/04/04- 1	Cinto N° 1	Utilizado	R	1960	T	37.00	23			E	18	30	12	2012	536,544	4.7	18	20.05
23/04/04- 2	Cinto N° 2	Utilizado	R	1960	T	33.50	5			E	18	30	12	2012	116,640	4.74	16.7	20
23/04/04- 3	Cinto N° 3	Utilizado	R	1960	T	55.00	20			E	18	30	12	2012	466,560	4.75	15	18
23/04/04- 4	Machorrita	Utilizado	R	1972	T	40.00	15	3		E	12	30	12	2012	233,280	500		27.1
23/04/04- 5	F. Arica-Conostoco	Utilizado	D	1978	T	44.50	10	2	2	E	12	30	12	2012	77,760	593	31.18	40
23/04/04- 5B	F. Arica Reemplazo	Utilizable	D	2013	T	44.50	17	2		E	-	-	-	-	-	598	31	-
23/04/04- 6	M. Agricultura	Abandonado	R	1982	A	25.40	-			-	-	-	-	-		-	-	-
23/04/04- 7	Becerra	Utilizable	R	1981	T	48.00	-			-	-	-	-	-		-	-	-
23/04/04- 8	Emapa/Militares	Utilizable	D	1975	T	46.80	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-
23/04/04- 9	Mazuelos	Utilizable	R	1969	A	6.20	-			-	-	-	-	-		-	-	-
23/04/04- 10	EPS - Tacna	Utilizado	D	1954	T	12.00	5	1	0.8	E	18	30	12	2012	116,640	950	6.2	9.5
23/04/04- 11	Sr. de Locumba	Utilizable	R	1980	T	28.00	-			-	-	-	-	-		-	-	-
23/04/04- 12	Tres Piedras	Utilizado	R/D	2005	T	55.00	12	3	2	E	18	30	12	2012	279,936	495	25.74	44
23/04/04- 13	Tres Molles	Utilizable	R/D	2006	T	52.00	5	1	0	-	-	-	-	-		493	-	45
23/04/04- 14	Cinto N° 4	Utilizado	R	1998	A	20.00	0.5			E	1	30	12	2012	648	490	9.64	
23/04/04- 15	René Palacios	Utilizado	R	2006	A	17.73	2			E	8	30	12	2012	20,736	495	14	20
23/04/04- 16	Montegrande N° 1	Utilizado	R	2007	T	21.32	4			E	18	30	12	2012	93,312	500	17	20
23/04/04- 17	Montegrande N° 2	Utilizado	R	2008	A	33.00	4			E	18	30	12	2012	93,312	505	26.67	28.5
23/04/04- 18	Montegrande N° 3	Utilizado	R	2009	A	28.50	4			E	18	30	12	2012	93,312	510	27	28.5
23/04/04- 19	Montegrande N° 4	Utilizado	R	2010	A	24.00	4			E	18	30	12	-	93,312		-	-
23/04/04- 20	Los Carzos	Utilizado	R	2010	A	22.00	2			E	18	30	12	2012	46,656	520	18	30
23/04/04- 21	La India Ahorcada	Utilizable	R	2011	A	21.00	5			E	18	30	12	-	116,640	-	-	-
23/04/04- 22	Pozo Chironta	Utilizable	R	2010	A	15.00	4			E	18	30	12	-	93,312	-	-	-
23/04/04- 23	Pozo Jarro	Utilizable	R	2012	A	22.00	10			E	12	30	12	-	155,520	-	22	-
TOTAL VOLUMEN DE EXPLOTACIÓN:															**2,634,120**			

Nota: Con fecha 2024 se han detectado 105 pozos clandestinos adicionales ilegales con un régimen de bombeo promedio de 5 l/s por unidad, se obtiene un caudal instantáneo total de 0.525 m3/s. Al proyectar esta extracción de forma continua durante un año calendario 31536000 s, el volumen total de explotación asciende a 16 556 400 m3/año. adicionales que sumado al volumen en explotación existente al inventario realizado en el 2013 significa un volumen de explotación de 19'190,520 m3/año T: Tubular A: Artesanal E: Eléctrico R: Riego D: Doméstico

7.4. BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA

El acuífero del valle de Cinto es muy pequeño en cuanto a su profundidad y ancho; es alimentado por el escurrimiento superficial del río Cinto durante los meses de lluvias, en la cuenca húmeda que genera escorrentía. El rio Cinto en su discurrir con destino a la parte baja, para entregar sus aguas al río Locumba, va perdiendo caudal que se va infiltrando para recargar al acuífero a lo largo del valle.

Se ha podido estimar que la recarga al acuífero es de 110 l/s según el estudio realizado por la empresa EMAP SAC el año 2018, procedente del volumen promedio anual de infiltración al acuífero del valle de Cinto es de 3,46 MMC/año, que se calculó el año 2018 por dicha empresa con el software HEC-HMS, las características hidráulicas del cauce y generando la escorrentía a partir de la precipitación total mensual de la zona húmeda de la cuenca río Cinto se obtuvieron los siguientes resultados (Ver Tabla 24):

Tabla 32

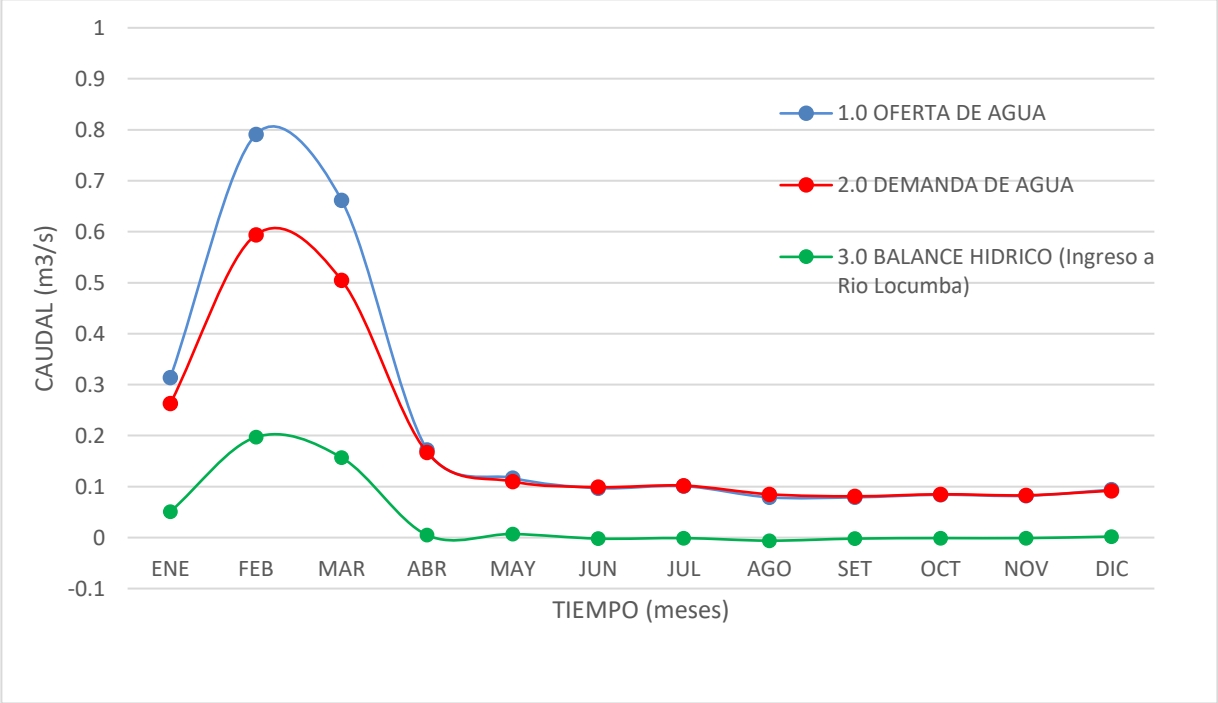
Balance hídrico óptimo de la cuenca Cinto

DESCRIPCIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROMEDIO
1.0 OFERTA DE AGUA	0.314	0.791	0.662	0.172	0.117	0.097	0.101	0.079	0.079	0.084	0.082	0.094	0.223
1.1 Aporte de Aguas Superficiales de Quebrada Honda (1952-2010)	0.161	0.405	0.339	0.148	0.1	0.083	0.087	0.067	0.068	0.072	0.071	0.08	**0.140**
1.2 Aporte de Aguas Superficiales Zona húmeda de Cinto (1952-2010)	0.153	0.386	0.323	0.024	0.016	0.014	0.014	0.011	0.011	0.012	0.012	0.013	**0.082**
2.0 DEMANDA DE AGUA	0.263	0.594	0.505	0.167	0.11	0.099	0.102	0.085	0.081	0.085	0.083	0.092	0.189
2.1 Demanda Uso Minero Southern Copper Corporation	0.095	0.095	0.095	0.095	0.05	0.05	0.05	0.05	0.035	0.035	0.035	0.035	**0.060**
2.2 Demanda Uso Agrícola Higuerani	0.018	0.021	0.023	0.018	0.009	0.008	0.009	0.01	0.011	0.014	0.017	0.019	**0.015**
2.3 Demanda Uso Agrícola Caoña	0.006	0.007	0.006	0.005	0.003	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005	**0.004**
2.4 Infiltración Para Valle Cinto	0.144	0.471	0.381	0.049	0.048	0.038	0.041	0.022	0.031	0.033	0.027	0.033	**0.110**
3.0 BALANCE HÍDRICO (Ingreso a Río Locumba)	0.051	0.197	0.157	0.005	0.007	-0.002	-0.001	-0.006	-0.002	-0.001	-0.001	0.002	**0.034**

Nota: Valores de oferta y demanda de agua mensuales de la cuenca Cinto. Fuente Estudio Hidrogeológico Del Valle De Cinto (mayo 2011)

Figura 48

Gráfico de balance hídrico de la Cuenca Cinto



Nota. *La figura muestra gráficamente los valores de la oferta, demanda y balance hídrico del año 2011. Fuente EMAP 2018.*

Según análisis de la Tabla 24 Balance Hídrico de la cuenca Cinto se observa que la oferta de agua es de 0,223 m^3/s y si se resta el agua comprometida para SPCC que es de 0,060 m^3/s, el agua comprometida para Higuerani de 0,15 m^3/s y el agua comprometida para Caoña de 0,004 m^3/s, existiría solo 0,144 m^3/s de agua de escorrentía promedio multianual circulando por el río Cinto en los periodos de avenidas extraordinarias.

Se estaría infiltrando de manera muy optimista el 76% del agua de escorrentía al acuífero; motivo por el cual este balance debe ser revisado y actualizado a situaciones reales.

La infiltración promedio multianual para un periodo de control de 48 años entre 1952-2010, (referencia SPCC) considera años húmedos y años secos y la recarga al acuífero solo se realizaría en los años húmedos, porque en los años secos prácticamente el caudal que rinde la cuenca de Quebrada Honda es derivada en el 100% a la mina de Toquepala.

Si se considera los últimos años un periodo hidrológico extremadamente seco; entonces no ha existido una recarga significativa en los meses de lluvia (enero-marzo) y se pronostica otro año extremadamente seco, factores que motivarían aún más la reducción del volumen y el caudal explotable del acuífero Cinto, siendo mayor su repercusión en los pozos legales que se explotan con fines poblacionales la Machorrita IRHS-04, Conostoco-Fuerte Arica IRHS-05, pozo EPS Tacna SA IRHS-10, Tres Piedras IRHS-12 y Tres Molles IRHS-13, por encontrarse en la zona baja final del acuífero.

Utilizando los mismos valores del balance realizado por Municipalidad Distrital de Locumba se ha efectuado un balance actualizado al 2025 (Tabla 25).

Considerando el incremento de 105 pozos clandestinos adicionales

ilegales que vienen extrayendo en promedio 5 l/s por pozo, totalizando 525 l/s que significa 16 556 400 m^3/años adicionales; que sumado al volumen en explotación existente al inventario realizado en el 2013 significaría un volumen de explotación total de 19 190 520 m^3/año y un caudal promedio de a 0,608m^3/s.

Tabla 33

Balance hídrico actual de la Cuenca Cinto con 500 ha bajo riego y 105 pozos extra en funcionamiento

DESCRIPCIÓN	Caudal (m^3/s)	Volumen (m^3/año)
1.0 OFERTA DE AGUA	0,222	7 000 992
1.1 Aporte de Aguas Superficiales de Quebrada Honda (1952-2010)	0,140	4 415 040
1.2 Aporte de Aguas Superficiales Zona húmeda de Cinto (1952-2010)	0,82	2 585 952
2.0 DEMANDA DE AGUA	0,604	19 047 744
2.1 Demanda Uso Minero Southern Copper Corporation	0,060	1 892 160
2.2 Demanda Uso Agrícola Higuerani	0,015	473 040
2.3 Demanda Uso Agrícola Caoña	0,004	126 144
Explotación mediante pozos	0,525	16 556 400
3.0 DISPONIBILIDAD HÍDRICA	-0,382	-12 046 752

Nota: Cuadro de balance actualizado de la oferta, demanda y disponibilidad hídrica. Fuente Propia.

En la Tabla 25 se observa la misma oferta de agua de 0,222 m^3/s del balance original realizado por la Municipalidad Provincial de Ite, la demanda de agua se está actualizando con el caudal total de explotación mediante pozos de 0,525m^3/s. De esta manera se obtendría una diferencia de reservas negativa de -0,382 m^3/s.

- Oferta total: 7 000 992 m^3/año
- Demanda total: 19 047 744 m^3/año
- DÉFICIT ANUAL: 7 000 992 - 19 047 744 = **-12 046 752 m^3/año**

Observándose claramente que se habría roto el equilibrio alimentación – explotación y consecuentemente el colapso definitivo del acuífero Cinto, si es que no se aplican medidas correctivas de emergencia a la brevedad.

7.5. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD Y AGOTAMIENTO

7.5.1. Cálculo de caudal de equilibrio (Rendimiento Sostenible)

Para que el acuífero Cinto mantenga un estado de equilibrio dinámico (donde la extracción sea igual a la recarga), la explotación total por pozos no debería exceder los 4 509 648 m³/año, equivalente a un caudal constante de 143 l/s. La extracción actual de 608 l/s representa un exceso del 425% sobre el límite de sostenibilidad establecido según el balance hídrico realizado.

7.5.2. Cálculo de vida útil

Tomando como base las Reservas Probables de 398,82 hm³ calculadas mediante el modelo hidrogeológico 3D en el Capítulo VI, se determina el tiempo de vida útil del acuífero bajo el ritmo de explotación actual es (Huang et al., 2024):

Cálculo de vida útil (t):

$$t = \frac{Reservas\ Probables}{Déficit\ Anual} \ldots (7)$$

$$t = \frac{398\ 820\ 000\ m3}{12\ 046\ 752\ m3/año} = 33.1\ años$$

Bajo un régimen de explotación total de 0,604 m³/s, el acuífero presenta un déficit anual de -12,05 hm³.

Considerando las reservas probables de 398,82 hm^3, el tiempo de agotamiento técnico estimado es de 33.1 años.

7.3.2. Uso de los Pozos

La excavación de los pozos existentes, en la zona de estudio se realizaron inicialmente con fines poblacionales (05 pozos) Pozo de EMAPA IRHS-10 uso poblacional Locumba, Pozo Conostoco IRHS-5B, población Militar Fuerte Arica, pozo reemplazo Conostoco IRHS-24 población militar Fuerte Arica y población del distrito de Ite, pozo Tres Piedras IRHS12 población de Locumba y Escuela Sub oficiales Policía Nacional, Pozo Tres Molles IRHS-13 población Pampa Sitana y con fines agrícolas 19 pozos.

La calidad del agua de los 24 pozos inventariados; 23 de ellos son de muy buena calidad y aptos para el consumo humano; sólo el Pozo IRHS-11, Señor de Locumba (cercano al río Salado), cuenta con una alta concentración salina, no apta para consumo humano, pero sí aceptable para uso agrícola, con una conductividad de 1,521 mmhos/cm.

Del 2012 a la fecha 2024 donde se realizó el inventario, los pozos para uso poblacional han experimentado una reducción de caudales.

7.5.3. Interpretación del escenario crítico

Si bien el agotamiento total se proyecta en aproximadamente 33.1 años, el impacto técnico es inmediato. El déficit anual de 12,05 hm^3 implica que la descarga actual no es renovable.

El acuífero Cinto no cuenta con reservas solo se recarga por exceso de precipitación (escorrentías) que suceden cada 5 años, esto provocará:

- **Abatimiento Regional: Descenso** irreversible de los niveles freáticos, dejando fuera de operación los pozos someros (poblacionales) en un plazo menor a 10 años.
- **Pérdida de Almacenamiento:** Riesgo de consolidación de los materiales aluviales por pérdida de presión de poros, reduciendo la porosidad efectiva de forma permanente.

La escasez hídrica comenzará en la parte baja de la zona acuífera donde se ubican los pozos de uso poblacional, siguiendo por la zona media hasta agotarse el recurso hídrico en la zona alta de la cuenca debido a que por la pendiente y precipitaciones no se cuenta con más reservas.

CAPÍTULO VIII

CARACTERÍSTICAS DEL ACUÍFERO

8.1. Litología

Regionalmente, el acuífero Cinto está conformado litológicamente por una secuencia heterogénea de gravas, cantos rodados de formas redondeadas a subredondeadas, y arenas de grano fino a grueso, intercaladas con lentes de limos y arcillitas, todos de carácter típicamente fluvio - aluvial. Hacia los flancos del valle, los sedimentos entran en contacto con las formaciones Moquegua Superior (Po-mo/s) e Inferior (Np-mi), la Formación Huaylillas (Nm-huay) y la Formación Sotillo (Pp-so). Estas unidades definen los límites de la cubeta sedimentaria y aportan materiales detríticos por procesos de escorrentía y meteorización desde las vertientes.

De acuerdo con la interpretación de los Sondajes Eléctricos Verticales (SEV) ejecutados en el año 2024 y la correlación con la geología de superficie, el reservorio presenta la siguiente secuencia lito-hidrogeológica local:

- **Zona No Saturada Superficial:** Conformada por materiales de buena a muy buena permeabilidad, compuestos por bolonería, grava y arena de origen fluvio aluvial en estado seco que pertenecen al Cuaternario Holoceno

(Qh-al). El espesor de este horizonte es variable a lo largo del valle, en la Zona Alta oscila entre 5,5 m a 16 m, mientras que en las Zona Media 6 a 7 m y Zona Baja de 3m a 19 m identificándose niveles someros que sirven de cobertura al nivel freático.

- **Zona No saturada Sub-superficial:** Conformada por materiales de buena a muy buena permeabilidad, compuestos por cantos rodados, grava y arena. El espesor de este horizonte es variable a lo largo del valle en la Zona Alta oscila entre 8 m a 14 m, mientras que en las Zona Media 8 a 14 m y Zona Baja de 7 m a 27 m.

- **Zona no saturada/húmeda:** Conformada por materiales de buena permeabilidad, compuestos por grava, arena y limo. El espesor de este horizonte solo está presente en la parte baja del acuífero con un espesor de 18 m a 28m. Este estrato muestra el descenso de los niveles freáticos comparados con los niveles encontrados en los pozos en el año de su perforación al año 2024.

- **Zona Saturada (Acuífero):** Representa el horizonte de mayor interés hidrogeológico, conformado por una alternancia de materiales de permeabilidad media a alta. Litológicamente, se compone de niveles de canto rodado, grava y arena saturados. El espesor total de este horizonte es

variable: en la Zona Alta oscila entre 7 m y 17,5 m, mientras que en las Zonas Media de 17 m a 41 m y en la Zona Baja alcanza potencias de 6 m a 20 m.

- **Basamento Impermeable**: Localizado en la base de la secuencia aluvial, está conformado por materiales de muy baja permeabilidad pertenecientes a la Formación Moquegua Inferior (Np-mi). Litológicamente, este sustrato consiste en limolitas y arcillitas compactas que actúan como un acuícludo. De acuerdo con los SEVs, este basamento se identifica a profundidades que varían desde los 20 m en los bordes del valle hasta los 60 m en el eje central del paleocauce, con espesores indeterminados al encontrarse a mayor profundidad de los 70 m de investigación geofísica.

8.2. Naturaleza y Origen de las aguas subterráneas

La napa freática alojada en el acuífero Cinto es de tipo libre, con un nivel superior a presión atmosférica y una geometría condicionada por la permeabilidad de los depósitos aluviales y la configuración del basamento.

Regionalmente, la recarga está supeditada al régimen hidrológico de la zona de cabecera. Sin embargo, el aporte por infiltración de las aguas provenientes de las precipitaciones estacionales y del lecho del río Cinto resulta

insuficiente para compensar los volúmenes de extracción actuales. Aunque existe una transferencia de flujo desde el cauce superficial hacia el horizonte de gravas, esta no logra estabilizar el sistema frente a la demanda intensiva.

Localmente, si bien se identifican fuentes de alimentación secundaria como el retorno de riego en áreas de cultivo y filtraciones de canales sin revestir en los sectores de la zona media y baja (Tres Molles y Tres Piedras), estas no representan un volumen significativo para la recuperación del reservorio.

Esta situación de desequilibrio hídrico es técnicamente confirmada por el descenso continuo de los niveles freáticos observado en las fuentes de explotación desde su perforación original.

El monitoreo en puntos críticos, como el Pozo Conostoco, junto con la caracterización geoeléctrica de los SEVs ejecutados en 2024, evidencia una reducción en el espesor del horizonte saturado. Este comportamiento indica que el acuífero se encuentra en un estado de sobreexplotación o agotamiento progresivo, donde el ritmo de descarga (natural y por bombeo) supera ampliamente la capacidad de recarga natural del sistema.

8.3. Naturaleza y origen del acuífero

El acuífero Cinto se define técnica y funcionalmente como un acuífero de tipo poroso no consolidado, caracterizado por presentar una porosidad

intergranular primaria que permite el almacenamiento y flujo del recurso hídrico subterráneo.

Su génesis es estrictamente fluvio-aluvial, siendo el río Cinto el principal agente geodinámico responsable de su formación mediante procesos de erosión y posterior colmatación de la depresión labrada sobre el basamento pre-cuaternario.

Este reservorio es el resultado de la acumulación progresiva de sedimentos durante el Holoceno, cuya distribución y espesores que alcanzan hasta los 41 m en la zona media y 60 m de profundidad al basamento en la zona baja que han sido regulados por el encajonamiento del valle y la dinámica de las quebradas tributarias que flanquean la cuenca.

8.4. El reservorio acuífero

8.4.1. Forma y Limites

El valle de Cinto presenta una configuración geomorfológica de valle encajonado de forma irregular y elongada. Se observa que desde el sector de la Parte Alta (Sector J), el valle experimenta un ensanchamiento progresivo conforme desciende hacia la Zona Media, alcanzando su mayor amplitud en la Zona Baja, específicamente en las inmediaciones de los sectores de Tres

Molles, Tres Piedras y Mal Paso. En estos puntos, la cubeta sedimentaria se expande lateralmente antes de su transición hacia la zona de confluencia o llanura aluvial.

Se presentan quebradas tributarias irregulares, estrechas y de menor extensión, con direcciones preferenciales NE-SO y NO-SE, las cuales están influenciadas por el control estructural de la falla Purgatorio que condicionan el encajonamiento del cauce principal.

El acuífero se encuentra limitado lateralmente por afloramientos de naturaleza ígnea y sedimentaria que constituyen las vertientes del valle:

- **Límites sedimentarios:** Predominan las secuencias de la Formación Moquegua (Eoceno-Oligoceno).

La Formación Moquegua Superior (Po-mo/s), compuesta por conglomerados polimícticos y areniscas tobáceas, junto con la Formación Moquegua Inferior (Np-mi), conformada por limolitas y areniscas rojas, constituyen las barreras de baja permeabilidad que confinan el flujo subterráneo.

- **Límites ígneos/volcánicos:** En los sectores de mayor relieve, afloran las tobas y flujos piroclásticos de la Formación Huaylillas (Nm-huay) y unidades del Grupo Toquepala (Pp-to), que actúan como límites

impermeables de alta resistencia.

En la zona de estudio, el acuífero en su base está limitado por materiales de muy baja permeabilidad e impermeables.

Este límite inferior está definido por la configuración paleotopográfica del basamento, constituido predominantemente por las facies finas y compactas de la Formación Moquegua Inferior. Según los Sondajes Eléctricos Verticales (SEVs) ejecutados en 2024, este contacto geoeléctrico se localiza a profundidades variables: entre los 41 m y 57 m en la zona alta y media, y alcanzando hasta los 60 m de profundidad en el eje del paleocauce de la zona baja. Estos materiales marcan el límite del almacenamiento hídrico, sobre el cual se asienta el relleno de gravas y cantos rodados que conforma el horizonte saturado.

8.4.2. Dimensiones

El reservorio subterráneo del valle de Cinto es pequeño en cuanto a sus dimensiones de ancho y profundidad; tiene forma alargada y se extiende desde Caoña hasta su entrega al río Locumba en 27 km de longitud. Tiene un ancho de 300m en las partes más amplias y 150m en las partes más angostas; que indica que el ancho y espesor del acuífero va variando en función de varios factores

como son: el ancho del valle, la profundidad del nivel estático del agua subterránea y la litología del acuífero.

En base al conocimiento de los pozos existentes a lo largo del valle, se puede deducir que el espesor del reservorio acuífero permeable saturado, no es mayor a 40m y que la parte saturada fluctúa de año a año, dependiendo de la recarga del acuífero, variando 5 a 15 metros, el nivel estático del agua subterránea.

Sus dimensiones son variables y una geometría condicionada por el encajonamiento del valle y la configuración del basamento impermeable:

- **En la Zona Alta**: El acuífero presenta un desarrollo estrecho y controlado estructuralmente. El ancho del relleno aluvial fluctúa entre 350 m y 600 m. En este sector, el depósito es más limitado debido a la proximidad de las vertientes de la Formación Huaylillas y el Grupo Toquepala.
- **En la Zona Media**: Se observa una transición morfológica donde el valle comienza a expandirse. El ancho del acuífero fluctúa entre 800 m y 1 200 m, con un incremento notable en la potencia de los sedimentos conforme se aleja de las zonas de mayor pendiente.
- **En la Zona Baja**: El acuífero alcanza su mayor amplitud y desarrollo

lateral, especialmente en los sectores de Tres Molles, Tres Piedras y Mal Paso. En esta zona, el ancho se incrementa significativamente, oscilando entre 1 800 m y 2 500 m, conformando una llanura aluvial más extensa antes de su estrechamiento final o transición hacia la cuenca baja del río Locumba.

En la zona de estudio, se estima que el reservorio subterráneo consiste en una cubeta sedimentaria de aproximadamente 52,8 km², con espesores variables que, de acuerdo con los Sondajes Eléctricos Verticales (SEVs) ejecutados en 2024, presentan los siguientes rangos lito-hidrogeológicos:

- **En la Zona Alta,** el espesor del horizonte saturado varía entre 13 m y 35 m, caracterizado por una predominancia de clastos gruesos.
- **En la Zona Media**, la potencia del acuífero se registra en espesores que van desde los 9 m hasta los 41 m.
- **En la Zona Baja**, el acuífero muestra su mayor capacidad de almacenamiento con espesores que fluctúan entre 5 m y 35 m, alcanzando profundidades de contacto con el basamento (Techo del Basamento) de hasta 60 m en el eje central del paleocauce

8.5 La Napa Freatica

8.5.1. Profundidad del techo de la Napa

El acuífero del valle de Cinto es pequeño en cuanto a sus dimensiones de ancho y profundidad; asimismo también en cuanto a su capacidad de almacenamiento, lo que determina que, en los años de abundante precipitación en la cuenca húmeda, con escurrimiento continuo del rio Cinto durante 1 a 2 meses, el nivel del agua en el acuífero sube; lo contrario sucede cuando el río Cinto no tiene escurrimiento durante 3 o más años continuos, el nivel del agua en el acuífero descendía hasta 15 metros de profundidad, aproximadamente. Como se puede apreciar en estos dos extremos, el nivel del agua en el acuífero lentamente va descendiendo y ascendiendo.

En los últimos años el escurrimiento del rio Cinto ha sido casi nulo, lo que ha provocado el fuerte descenso de los niveles de agua y como consecuencia la reducción del caudal de producción de los pozos.

Aunado a la sobre explotación del acuífero del valle de Cinto, en la ampliación de la frontera agrícola; el cual debió ser utilizado exclusivamente para uso poblacional (Locumba, Fuerte Arica, Ite, Camiara, Sitana, entre otros centros poblados que requieren de agua para la creciente población).

A partir de la interpretación cuantitativa de los 76 Sondajes Eléctricos

Verticales (SEV) ejecutados en 2024, se ha elaborado la Carta de Isoprofundidad de la napa acuífera (Ver mapa M-23), la cual representa la variación espacial de la profundidad de la napa freática respecto a la superficie del terreno.

En el área evaluada, el nivel del agua presenta una profundidad que oscila entre los 13 m y 45 m, mostrando un comportamiento diferenciado según la ubicación dentro del valle:

Niveles más superficiales (13 m a 26 m)

Estas profundidades (representadas por las isocurvas de color azul claro a verde en el mapa M-23) se localizan principalmente en el sector sur y suroeste del área de estudio, en dirección hacia el curso inferior del río Cinto. Estas zonas indican una mayor proximidad de la napa a la superficie en las áreas de menor cota topográfica.

Niveles intermedios (26 m a 38 m)

Se distribuyen a lo largo del eje central del valle, siguiendo la morfología del relleno aluvial, donde la napa profundiza gradualmente conforme aumenta la elevación del terreno hacia los flancos.

Niveles más profundos (38 m a 45 m)

Los niveles de agua más profundos (isocurvas de color naranja a rojo) se presentan hacia el Noreste del área evaluada y en las zonas de mayor relieve

cercanas al Cerro Muñipata. Esta profundización del nivel freático es consistente con la configuración paleotopográfica del basamento y el incremento de la pendiente en las vertientes de la Formación Huaylillas.

Esta distribución de isoprofundidades confirma la tendencia de flujo hacia las zonas de descarga naturales y evidencia el impacto de la morfología superficial sobre la posición del nivel saturado dentro del acuífero.

8.5.2. Morfología del techo de la Napa Freática

Con la interpretación cuantitativa de los 76 Sondajes Eléctricos Verticales (SEV) ejecutados en 2024, se ha determinado la elevación del nivel saturado (nivel piezométrico) referida al nivel medio del mar para elaborar la Carta de Hidroisohipsas (Ver mapa M-22).

Este mapa permite definir la morfología de la superficie freática y la dinámica de las aguas subterráneas mediante un método geofísico indirecto.

Las curvas de hidroisohipsas, que se distribuyen entre las cotas 1036 m.s.n.m. y 660 m.s.n.m., revelan las siguientes características del flujo:

- **Dirección de Flujo:** El movimiento del agua subterránea presenta una dirección preferencial de Noreste a Suroeste (NE-SO), la cual guarda un paralelismo estrecho con el cauce del río Cinto. Esta configuración

confirma que el flujo sigue la pendiente hidráulica impuesta por el valle aluvial.

- **Control Geofísico**: La ubicación de las curvas de igual nivel ha sido validada por el contraste de resistividades obtenido en los SEV, donde se identificó el horizonte saturado sobre el basamento de la Formación Moquegua Inferior.
- **Gradiente Hidráulico:** La morfología de las hidroisohipsas muestra una caída constante de potencial desde la zona alta hacia la zona baja, las direcciones de flujo señalan el drenaje natural hacia la cuenca del río Locumba.
- **Zonas de Recarga y Tránsito:** Se observa una mayor densidad de curvas en los sectores donde el valle se estrecha (Zona Alta y Media), lo que sugiere un mayor control de la sección del acuífero sobre la velocidad del flujo antes de su expansión en la zona de Tres Molles y Tres Piedras.

Esta dinámica certifica que el acuífero Cinto funciona como un sistema de flujo libre cuya recarga y tránsito están condicionados por la geometría del acuífero.

Tabla 34

Profundidad y Cota de la Napa Freática de los SEV´s ejecutados:

SEVs	COTA DEL TERRENO (m.s.n.m.)	PROF. N.E. (m)	COTA DEL AGUA (m.s.n.m.)
SEV-1	648	40	608
SEV-2	643	40	603
SEV-3	638	40	598
SEV-1A	674	44	630
SEV-2A	675	44	631
SEV-3A	674	44	630
SEV-1B	702	45	657
SEV-2B	702	45	657
SEV - 1C	719	30	689
SEV - 2C	719	30	689
SEV - 3C	719	30	689
SEV - 1D	766	21	745
SEV - 2D	766	21	745
SEV - 3D	765	20	745
SEV - 4D	765	20	745
SEV - 5D	768	23	745
SEV-1E	879	17	862
SEV-2E	878	15	863
SEV-3E	882	14	868
SEV-1F	952	14	938
SEV-2F	952	14	938
SEV-3F	952	17	935
SEV-4F	954	17	937
SEV-5F	952	14	938
SEV-03	958	21	937
SEV-04	959	23	936
SEV - 1G	970	20	950
SEV - 2G	971	21	950
SEV - 3G	972	22	950
SEV - 4G	974	24	950

SEVs	COTA DEL TERRENO (m.s.n.m.)	PROF. N.E. (m)	COTA DEL AGUA (m.s.n.m.)
SEV - 5G	975	25	950
SEV - 1H	983	22	961
SEV - 2H	982	21	961
SEV - 3H	984	23	961
SEV - 4H	982	21	961
SEV - 5H	985	24	961
SEV - 6H	987	26	961
SEV-1i	1007	0	0
SEV-2i	1005	22	983
SEV-3i	1005	22	983
SEV-4i	1007	24	983
SEV-1J	1121	23	1098
SEV-2J	1120	22	1098
SEV-3J	1120	22	1098
SEV-4J	1122	23	1099
SEV-5J	1122	25	1097
SEV-6J	1111	24	1087
SEV-7J	1111	22	1089
SEV-8J	1111	23	1088
SEV-9J	1111	23	1088
SEV-10J	1111	23	1088
SEV-11J	1101	25	1076
SEV-12J	1099	23	1076
SEV-13J	1099	23	1076
SEV-14J	1098	22	1076
SEV-15J	1100	25	1075
SEV-16J	1089	24	1065
SEV-17J	1087	22	1065
SEV-18J	1088	23	1065

SEVs	COTA DEL TERRENO (m.s.n.m.)	PROF. N.E. (m)	COTA DEL AGUA (m.s.n.m.)
SEV-18J	1088	23	1065
SEV-19J	1087	23	1064
SEV-20J	1089	23	1066
SEV-21J	1080	24	1056
SEV-22J	1079	22	1057
SEV-23J	1079	22	1057
SEV-24J	1079	22	1057
SEV-25J	1081	25	1056
SEV-26J	1072	23	1049
SEV-27J	1069	22	1047
SEV-28J	1069	22	1047
SEV-29J	1069	22	1047
SEV-30J	1072	25	1047

Nota. Cota del terreno (msnm),Prof. N.E.(m) y cota del agua en msnm.

Tabla 35

Profundidad y Cota de la Napa Freática de los SEV´s inferidos e interpolados

SEVs	COTA DEL TERRENO (m.s.n.m.)	PROF. N.E. (m)	COTA DEL AGUA (m.s.n.m.)
POZO_CHIRONTA	877	10	867
POZO_CINTO3	932	15	917
POZO_CINTO4	808	10	798
POZO_CINTO4	808	10	798
POZO_EMAPA	600	23	577
POZO_EPS	578	11	567
POZO_IRHS-SCI-1	1160	20	1140
POZO_JARRO	1060	22	1038
POZO_MACHORRITA	664	40	624
POZO_MONTEGRANDE1	774	17.5	756.5
POZO_MONTEGRANDE3	757	26	731
POZO_REEMPLAZO_MONTEGRANDE	751	35	716
SEV-1Z	941	11	930
SEV-2Z	941	20	921
SEV-3Z	625	30	595
SEV-4Z	969	5	964
SEV-5Z	850	10	840
SEV-6Z	902	14	888
SEV_7Z	1038	24	1014

Nota. Cota del terreno (msnm),Prof. N.E.(m) y cota del agua en msnm.

8.6. Modelo Hidrogeológico Conceptual

El flujo del agua subterránea en el acuífero Cinto presenta una dirección preferencial de Noreste - Suroeste (NE-SO), la cual guarda un estrecho paralelismo con el cauce del río Cinto.

Esta dinámica está gobernada por un gradiente hidráulico condicionado por la pendiente del valle aluvial, facilitando el tránsito del recurso desde las zonas de recarga en la cuenca alta hacia las zonas de descarga en la cuenca baja.

Esta circulación subterránea está vinculada a los procesos de infiltración provenientes de las áreas agrícolas situadas al Norte y Noreste del área evaluada, así como a los aportes de las quebradas tributarias y el lecho del río. El esquema en planta del modelo conceptualizado del flujo subterráneo se detalla en el Mapa M-22 (Hidroisohipsas), mientras que el comportamiento idealizado de la hidrodinámica subterránea y la geometría del reservorio se visualizan en el Modelo en 3 Dimensiones generado a partir de la integración de los 76 SEV.

Figura 16

Modelo Conceptualizado del flujo subterráneo



Nota. Flujo del agua subterránea (detallado en 3D). Modificado de GoogleEarth

CAPÍTULO IX

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 CONCLUSIONES

La presente tesis permitió identificar la geometría y las propiedades del acuífero Cinto mediante la integración de datos geofísicos y registro estratigráfico de pozos obteniendo los siguientes resultados:

- **Determinación de la geometría y configuración espacial (Objetivo General)**

  Se determinó la geometría completa del acuífero Cinto, el cual se extiende por 27 km de longitud y abarca un área de aproximadamente 52,8 km² de extensión.

- **Identificación de unidades hidroestratigráficas**

  Mediante la interpretación de los parámetros de resistividad eléctrica de los 76 Sondajes Eléctricos Verticales (SEV), se identificaron cinco unidades hidrogeológicas principales en el subsuelo del Valle de Cinto. Se diferenciaron tres horizontes no saturados con resistividades que varían desde los 152 a 505 Ohm-m en superficie hasta los 38 a 58 Ohm-m en zonas con mayor humedad. El acuífero potencialmente explotable se identificó por valores de resistividad entre 18 y 120 Ohm-m, mientras que el basamento impermeable, correspondiente a las arcillitas compactas de la Formación Moquegua Inferior, registró valores críticos de 1 a 11 Ohm-m.

- **Geometría del basamento y espesor saturado**

  La integración de los datos de resistividad con el logueo de los 7 pozos de control permitió establecer que la geometría del reservorio está definida por un paleocauce

incidido sobre el basamento. El espesor saturado varía entre 5 m y 42 m según la zonificación del acuífero (Zona Baja: 5-35 m; Zona Media: 9-42 m; Zona Alta: 13-35 m). La base del acuífero se localiza entre los 15 y 60 metros de profundidad, coincidiendo con el techo del basamento impermeable, mientras que el nivel freático está ubicado entre los 13 y 45m de profundidad respecto a la superficie del terreno.

- **Visualización y extensión mediante modelamiento espacial**

  Durante la elaboración del modelo hidrogeológico 2D se evidencio la falta de información (para ellos se interpoló y correlaciono SEV´s y ´pozos cercanos) y la necesidad de estimar volúmenes para cuantificar los recursos probables del acuífero. El desarrollo del modelo hidrogeológico 3D en Leapfrog permitió representar la arquitectura interna de la cuenca sedimentaria de aproximadamente 52,8 km² de extensión. El modelo hidrogeológico 3D evidenció una mayor potencia en el sector de la Zona Media (sector Chironta), donde el espesor saturado alcanza sus valores máximos de 41 a 42 m debido a la acumulación de materiales en zonas de colapso estructural. Por el contrario, se observó un adelgazamiento hacia el sector de los flancos y las zonas marginales de contacto con la Formación Moquegua, donde el espesor se reduce significativamente a rangos de 5 a 9 m.

- **Aporte del modelo hidrogeológico 3D y balance hídrico**

  El volumen total del material del acuífero se calculó en 1 994,1 hm³.Considerando una porosidad efectiva del 20%, las reservas probables se estiman en 398,82 hm³. La investigación revela un desequilibrio hídrico crítico, con un déficit anual de -12,05 hm³/año provocado por la sobreexplotación de más de 105 pozos ilegales.

Bajo este régimen el cálculo de vida útil se estimó 33 años para el agotamiento de las reservas del acuífero, evidenciándose por el descenso del nivel freático en los pozos de la zona baja (pozos de uso poblacional). Debido al abatimiento regionalizado los pozos de la zona baja estarán agotados a este ritmo de explotación en menos de 10 años.

9.2. DISCUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.2.1. DISCUSIONES

- **Análisis del Balance Hídrico y Crisis de Sostenibilidad (vs. EMAP SAC, 2018)** Los resultados obtenidos validan y cuantifican la advertencia de **EMAP SAC (2018)**, que ya señalaba un estado de colapso por sobreexplotación. Sin embargo, esta investigación aporta una base técnica superior al calcular un **déficit hídrico anual de -12,05 hm³/año**. Al contrastar esto con la realidad de otras cuencas áridas, se observa un patrón de agotamiento similar al de los acuíferos costeros del **desierto de Atacama**, donde la recarga es prácticamente nula debido a precipitaciones menores a **10 mm anuales**. El descenso del nivel freático de hasta **15 metros** en periodos sin escurrimiento reportado en este estudio coincide con la vulnerabilidad extrema descrita para sistemas de acuíferos libres en regiones hiperáridas del sur del Perú.

- **Comparación del Modelo Hidrogeológico y Unidades (vs. INGEMMET, 2009)** Mientras que el Boletín N° 2 Serie H del INGEMMET (2009) ofreció un panorama regional y general de la hidrogeología de la cuenca del río Locumba, esta investigación profundiza en la geometría local del acuífero Cinto mediante la ejecución de 76 SEV y un modelamiento 3D detallado. El estudio actual redefine el techo del basamento impermeable, localizándolo con precisión hasta los 60 metros de profundidad en el eje del paleocauce de la zona baja.

A diferencia de los mapas generales previos, este trabajo identifica una zonificación específica (Baja, Media y Alta) que permite entender que la mayor capacidad de almacenamiento no es uniforme, sino que está supeditada a las depresiones tectónicas y zonas de colapso estructural.

- **Potencial de Recarga y Control Estructural (vs. Pocco et al., 2024 y Mendoza, 2024)** Investigaciones recientes como las de **Pocco et al. (2024)** y **Mendoza (2024)** utilizaron modelos matemáticos (Fuzzy AHP y TOPSIS) para clasificar zonas de recarga en Locumba, identificando que la pendiente y la permeabilidad son factores críticos. Los hallazgos de esta tesis corroboran espacialmente estas teorías: el modelo 3D muestra que el flujo preferencial **NE-SO** y la infiltración están condicionados por la **Falla Purgatorio** y los lineamientos de Mirave y Huacanane. Estas estructuras actúan como conductos de infiltración rápida, pero también como zonas de inestabilidad mecánica ante el descenso de la presión de poros por el bombeo intensivo, un fenómeno observado en otros acuíferos explotados bajo regímenes climáticos similares.

9.2.2. RECOMENDACIONES

- **Gestión Hídrica y declaratoria de Emergencia:** Declarara el acuífero como agotado y sobreexplotado para tomar las medidas preventivas correspondientes para un acuífero de esa vulnerabilidad.

- **Establecimiento de límites de explotación sostenible:** Fijar un límite de explotación sostenible de 4 509 648 m³/año (≈143 L/s), dado que la extracción actual (~608 L/s) supera drásticamente la capacidad de recarga natural, poniendo en riesgo la disponibilidad futura del recurso.

- **Validación de Resultados Geofísicos:** Realizar una verificación en campo de los valores obtenidos en los SEV´s, particularmente aquellos derivados por métodos de interpolación e integración con datos directos de pozos, para reducir la incertidumbre en el modelo hidrogeológico y consolidar la precisión del modelo 3D.

- **Infraestructura de recarga artificial:** Evaluar la construcción de represas o qochas escalonadas en los sectores de Caoña e Higuerani para almacenar caudales episódicos, favoreciendo la recarga inducida del acuífero. Asimismo, se recomienda implementar técnicas de recarga artificial, tales como zanjas de infiltración y diques permeables, en las zonas de alta permeabilidad identificadas por el modelo geofísico, con el fin de incrementar la infiltración y reducir la pérdida por escorrentía superficial hacia el río Locumba.

- **Optimización de Perforaciones:** Evitar la profundización indiscriminada de pozos, debido a que el modelo hidrogeológico demuestra que, en la mayoría de los casos, se alcanza el basamento impermeable (Formación Moquegua Inferior) sin interceptar nuevos horizontes acuíferos productivos, lo cual resulta en una inversión técnica ineficiente.

REFERENCIAS

Abd Malik, A. K., Madun, A., Abu Talib, M. K., Wahab, N., & Md Dan, M. F. (2023). Interpretation of soil grain size effect on electrical resistivity method. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, *129*, 103324. https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103324

Åberg, S. C., Åberg, A. K., & Korkka-Niemi, K. (2021). Three-dimensional hydrostratigraphy and groundwater flow models in complex Quaternary deposits and weathered/fractured bedrock: evaluating increasing model complexity. *Hydrogeology Journal*, *29*(3), 1043–1074. https://doi.org/10.1007/s10040-020-02299-4

Aguirre, E., Benavente, C., Zerathe, S., Audin, L., Delgado, G., & Garcia, B. (n.d.). *XVIII Congreso Peruano de Geología Análisis morfo-estructural cuantitativo en la falla activa Purgatorio-Mirave: antearco de los andes centrales-sur de Perú*.

Aguirre, E., Carlos, A., Escobar, B., Fernández Baca, B., Rosell, L., Anderson, G., & Tacuri, P. (2022). *Morfotectónica y datación morfométrica de la falla Purgatorio Mirave: evidencia de tectónica activa y transpresiva en el Antearco del Sur del Perú*.

Alam, M. J. Bin, Ahmed, A., & Alam, M. Z. (2024). Application of Electrical Resistivity Tomography in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Aspect. *Geotechnics*, *4*(2), 399–414. https://doi.org/10.3390/geotechnics4020022

Aloui, S., Zghibi, A., Mazzoni, A., Elomri, A., & Triki, C. (2023). Groundwater resources in Qatar: A comprehensive review and informative recommendations for research, governance, and management in support of sustainability. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *50*, 101564. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101564

Chang, C.-M., Ni, C.-F., Li, W.-C., Lin, C.-P., & Lee, I.-H. (2021). Technical note: Discharge response of a confined aquifer with variable thickness to temporal, nonstationary, random recharge processes. *Hydrology and Earth System Sciences*, *25*(5), 2387–2397. https://doi.org/10.5194/hess-25-2387-2021

Ciampi, P., Giannini, L. M., Cassiani, G., Esposito, C., & Papini, M. P. (2024). Geo-constrained clustering of resistivity data revealing the heterogeneous lithological architectures and the distinctive geoelectrical signature of shallow deposits. *Engineering Geology*, *337*, 107589. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107589

Cross K, Laban P, Paden M, & Smith M. (2020). *Acuíferos: gestión sostenible de las aguas subterráneas* (K. Cross, P. Laban, M. Paden, & M. Smith, Eds.). IUCN, International Union for Conservation of Nature. https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.WANI.8.es

Daniel, A., Aguirre, B., Guía, P., De, M., Comisión, L. A., Yañez, J., Juan, L., Zuñiga, M., & De Chile, S. (2020). *FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO Y GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR NORTE Y CENTRO DE SANTIAGO MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO Este estudio fue financiado por WSP Consulting Chile*.

E. Custodio M.R. Llamas. (1996). *Hidrología Subterránea* (2 da, Vol. 1).

Frommen, T., Groeschke, M., Nölscher, M., Koeniger, P., & Schneider, M. (2021). Anthropogenic and geogenic influences on peri-urban aquifers in semi-arid regions: insights from a case study in northeast Jaipur, Rajasthan, India. *Hydrogeology Journal*, *29*(3), 1261–1278. https://doi.org/10.1007/s10040-021-02301-7

Fry, V. A., Istok, J. D., & O'Reilly, K. T. (1996a). Effect of Trapped Gas on Dissolved Oxygen Transport — Implications for In Situ Bioremediation. *Groundwater*, *34*(2), 200–210. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1996.tb01880.x

Fry, V. A., Istok, J. D., & O'Reilly, K. T. (1996b). Effect of Trapped Gas on Dissolved Oxygen Transport — Implications for In Situ Bioremediation. *Groundwater*, *34*(2), 200–210. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1996.tb01880.x

Ghiglieri, G., Pistis, M., Abebe, B., Azagegn, T., Asresahagne Engidasew, T., Pittalis, D., Soler, A., Barbieri, M., Navarro-Ciurana, D., Carrey, R., Puig, R., Carletti, A., Balia, R., & Haile, T. (2020). Three-dimensional hydrostratigraphical modelling supporting the evaluation of fluoride enrichment in groundwater: Lakes basin (Central Ethiopia). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *32*, 100756. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100756

Hiscock, K. M., Rivett, M. O., & Davison, R. M. (2002). Sustainable groundwater development. *Geological Society, London, Special Publications*, *193*(1), 1–14. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.193.01.01

Huang, J., Wu, W., Maier, H. R., Wang, Q. J., & Hughes, J. (2024). A multi-objective optimization-based framework for extending reservoir service life in a changing world. *Journal of Hydrology*, *637*, 131409. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131409

Javadi, S., Hashemy, S. M., Mohammadi, K., Howard, K. W. F., & Neshat, A. (2017). Classification of aquifer vulnerability using K-means cluster analysis. *Journal of Hydrology*, *549*, 27–37. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.060

Jódar, J., Urrutia, J., Herrera, C., Custodio, E., Martos-Rosillo, S., & Lambán, L. J. (2024). The catastrophic effects of groundwater intensive exploitation and Megadrought on aquifers in Central Chile: Global change impact projections in water resources based on groundwater balance modeling. *Science of The Total Environment*, *914*, 169651. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169651

Johnson, A. I. (1967). Specific yield: compilation of specific yields for various materials. *GEOLOGICAL SURVEY WATER SUPPLY PAPER*, *3*, 14–15. https://doi.org/10.3133/wsp1662D

Kay M. Stanney, K. S. H. (2012). *Advances in Cognitive Engineering and Neuroergonomics* (K. M. Stanney & K. S. Hale, Eds.; 1st Edition). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b12313

Kirsch, R. (2009). *Groundwater Geophysics* (R. Kirsch, Ed.). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88405-7

Kohlhepp, B., Lehmann, R., Seeber, P., Küsel, K., Trumbore, S. E., & Totsche, K. U. (2017). Aquifer configuration and geostructural links control the groundwater quality in thin-bedded carbonate–siliciclastic alternations of the Hainich CZE, central Germany. *Hydrology and Earth System Sciences*, *21*(12), 6091–6116. https://doi.org/10.5194/hess-21-6091-2017

Kuang, X., Liu, J., Scanlon, B. R., Jiao, J. J., Jasechko, S., Lancia, M., Biskaborn, B. K., Wada, Y., Li, H., Zeng, Z., Guo, Z., Yao, Y., Gleeson, T., Nicot, J.-P., Luo, X., Zou, Y., & Zheng, C. (2024). The changing nature of groundwater in the global water cycle. *Science*, *383*(6686). https://doi.org/10.1126/science.adf0630

Llera, F. J., Sato, M., Nakatsuka, K., & Yokoyama, H. (1990). Temperature dependence of the electrical resistivity of water-saturated rocks. *GEOPHYSICS*, *55*(5), 576–585. https://doi.org/10.1190/1.1442869

Lloyd, J. W. (1991). P. A. Domenico & F. W. Schwartz 1990. Physical and Chemical Hydrogeology. xxii + 824 pp. New York, Chichester, Brisbane, Toronto,

Singapore: John Wiley & Sons. Price £53.80 (hard covers), £18.95 (paperback). ISBN 0 471 50744 X; 0 471 52987 7 (pb). *Geological Magazine*, *128*(6), 681–682. https://doi.org/10.1017/S0016756800019890

Luczaj, J. (2016). Groundwater Quantity and Quality. *Resources*, *5*(1), 10. https://doi.org/10.3390/resources5010010

Ma, B., Hu, Q., Yang, S., Yin, N., Qiao, H., Zhang, T., & Meng, M. (2020). Multiple Approaches to Quantifying the Effective Porosity of Lacustrine Shale Oil Reservoirs in Bohai Bay Basin, East China. *Geofluids*, *2020*, 1–13. https://doi.org/10.1155/2020/8856620

Machaca-Pillaca, R., Pino-Vargas, E., Ramos-Fernández, L., Quille-Mamani, J., & Torres-Rua, A. (2022). Estimación de la evapotranspiración con fines de riego en tiempo real de un olivar a partir de imágenes de un drone en zonas áridas, caso La Yarada, Tacna, Perú. *Idesia (Arica)*, *40*(2), 55–65. https://doi.org/10.4067/S0718-34292022000200055

Martin, P. H., LeBoeuf, E. J., Dobbins, J. P., Daniel, E. B., & Abkowitz, M. D. (2005). INTERFACING GIS WITH WATER RESOURCE MODELS: A STATE-OF-THE-ART REVIEW. *Journal of the American Water Resources Association*, *41*(6), 1471–1487. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03813.x

Mejía, R., Vásquez, B., & Hagler, I. (2021a). *Arquitectura y evolución del Sistema de Fallas Incapuquio en el sector de Palca – Tacna. Implicancia en la exploración de depósitos minerales*. www.sgp.org.pe

Mejía, R., Vásquez, B., & Hagler, I. (2021b). *Arquitectura y evolución del Sistema de Fallas Incapuquio en el sector de Palca – Tacna. Implicancia en la exploración de depósitos minerales*. www.sgp.org.pe

Mohammed, M. A. A., Flores, Y. G., Szabó, N. P., & Szűcs, P. (2024). Assessing heterogeneous groundwater systems: Geostatistical interpretation of well logging data for estimating essential hydrogeological parameters. *Scientific Reports*, *14*(1), 7314. https://doi.org/10.1038/s41598-024-57435-x

Nimmo, J. R., Katuwal, S., & Lucas, M. (2023). Porosity and pore-size distribution. In *Encyclopedia of Soils in the Environment* (pp. 16–24). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00139-7

O, S. A., & A, A. A. (2018). Aquifer, Classification and Characterization. In *Aquifers - Matrix and Fluids*. InTech. https://doi.org/10.5772/intechopen.72692

Park, S. G., Shin, S. W., Lee, D. K., Kim, C. R., & Son, J. S. (2016, September 4). *Relationship between Electrical Resistivity and Physical Properties of Rocks*. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201602101

Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, *11*(5), 1633–1644. https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007

Pino-Vargas, E., & Chávarri-Velarde, E. (2022). Evidencias de cambio climático en la región hiperárida de la costa sur de Perú, cabecera del desierto de Atacama. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, *13*(1), 333–376. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-01-08

Pocco, V., Mendoza, A., Chucuya, S., Franco-León, P., Huayna, G., Ingol-Blanco, E., & Pino-Vargas, E. (2024). Assessment of Potential Aquifer Recharge Zones in the Locumba Basin, Arid Region of the Atacama Desert Using Integration of Two MCDM Methods: Fuzzy AHP and TOPSIS. *Water*, *16*(18), 2643. https://doi.org/10.3390/w16182643

Pulido-Velazquez, M., Peña-Haro, S., García-Prats, A., Mocholi-Almudever, A. F.,

Henriquez-Dole, L., Macian-Sorribes, H., & Lopez-Nicolas, A. (2015). Integrated assessment of the impact of climate and land use changes on groundwater quantity and quality in the Mancha Oriental system (Spain). *Hydrology and Earth System Sciences*, *19*(4), 1677–1693. https://doi.org/10.5194/hess-19-1677-2015

Punta De Bombón, C. DE, Sánchez F, A. W., Rosell, W. S., & Raymundo, T. S. (n.d.). *MEMORIA EXPLICATIVA DE LA REVISIÓN GEOLÓGICA EN LOSy) E ISLA ANÁPIA (33-z) FRANJA I RESPONSABLES*.

Rama, F., Busico, G., Arumi, J. L., Kazakis, N., Colombani, N., Marfella, L., Hirata, R., Kruse, E. E., Sweeney, P., & Mastrocicco, M. (2022). Assessment of intrinsic aquifer vulnerability at continental scale through a critical application of the drastic framework: The case of South America. *Science of The Total Environment*, *823*, 153748. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153748

Ravindra, K., Thind, P. S., Mor, S., Singh, T., & Mor, S. (2019). Evaluation of groundwater contamination in Chandigarh: Source identification and health risk assessment. *Environmental Pollution*, *255*, 113062. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113062

Reinecke, R., Müller Schmied, H., Trautmann, T., Andersen, L. S., Burek, P., Flörke, M., Gosling, S. N., Grillakis, M., Hanasaki, N., Koutroulis, A., Pokhrel, Y., Thiery, W., Wada, Y., Yusuke, S., & Döll, P. (2021). Uncertainty of simulated groundwater recharge at different global warming levels: a global-scale multi-model ensemble study. *Hydrology and Earth System Sciences*, *25*(2), 787–810. https://doi.org/10.5194/hess-25-787-2021

Roseta-Palma, C. (2002). Groundwater Management When Water Quality Is Endogenous. *Journal of Environmental Economics and Management*, *44*(1), 93–105. https://doi.org/10.1006/jeem.2001.1197

Różkowski, J., & Różkowski, K. (2016). Influence of fissuring and karstification of the carbonate aquifer unsaturated zone on its vulnerability to contamination (Cracow Upper Jurassic Region, Poland). *Environmental Earth Sciences*, *75*(12), 1023. https://doi.org/10.1007/s12665-016-5790-3

Sánchez, E., Alexandra, C., Cañote, B., Trinidad, I., Aldo, A., De, A., & Lima, L. C. (n.d.). *Dirección de Geología Regional Equipo de Investigación*.

Scanlon, B. R., Keese, K. E., Flint, A. L., Flint, L. E., Gaye, C. B., Edmunds, W. M., & Simmers, I. (2006). Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*, *20*(15), 3335–3370. https://doi.org/10.1002/hyp.6335

Schwarz, J., & Mathijs, E. (2017). Globalization and the sustainable exploitation of scarce groundwater in coastal Peru. *Journal of Cleaner Production*, *147*, 231–241. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.067

Sheriff, R. E., & Geldart, L. P. (1995). *Exploration Seismology*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781139168359

Tzampoglou, P., Ilia, I., Karalis, K., Tsangaratos, P., Zhao, X., & Chen, W. (2023). Selected Worldwide Cases of Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal. *Water*, *15*(6), 1094. https://doi.org/10.3390/w15061094

Uliana, M. (2024). *Basic Hydrogeology An Introduction to the Fundamentals of Groundwater Science*. The Groundwater Project. https://doi.org/10.62592/CBIQ7579

Weinmann, E. (2007). Hydrology and water resources: the challenge of finding the water balance. *Australasian Journal of Water Resources*, *11*(2), 121–132. https://doi.org/10.1080/13241583.2007.11465317

Zhang, J., Lu, C., Shen, C., Liu, Y., Werner, A. D., & Zhang, C. (2024). Flow and Transport in Coastal Aquifer-Aquitard Systems: Experimental and Numerical Analysis. *Water Resources Research*, *60*(4). https://doi.org/10.1029/2023WR035200

Zondirovanii, E., & Kalenov, E. N. (1987). *INTERPRETACION DE CURVAS DE SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES Versión española de la publicación «I NTERPRETATSI IA KRI W J VERTI KAL'NOGO Diciembre 1987*.

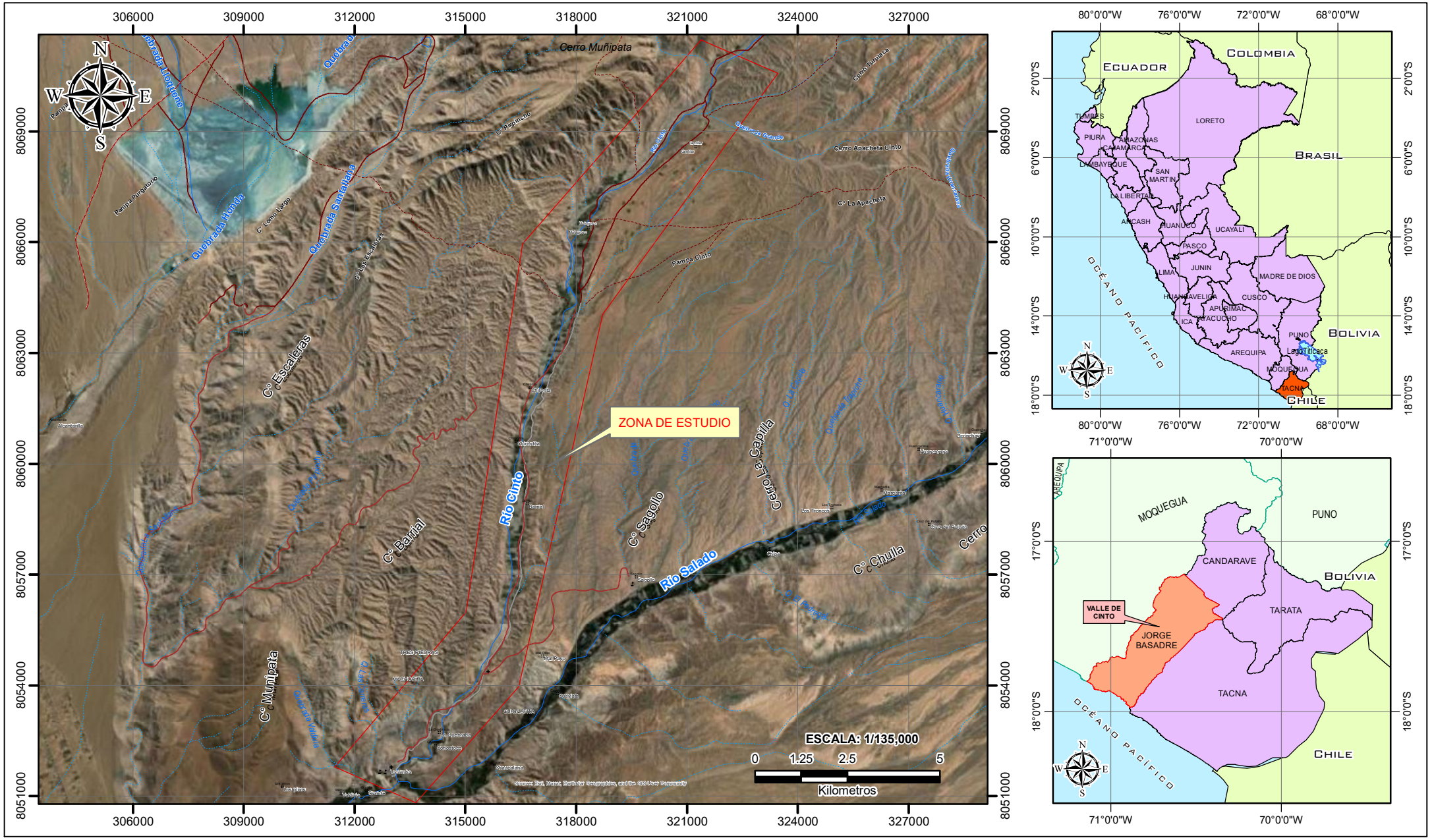
ANEXOS

ANEXO I. *Matriz de consistencia*

TÍTULO DE LA TESIS: CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA - PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TAC

Problemática	Objetivos	Hipótesis	Variables	Método
Problema general ¿Cómo la caracterización hidrogeológica y el modelamiento hidrogeológico bidimensional permiten determinar la geometría del acuífero Cinto en el distrito de Locumba? **Problemas específicos** • ¿De qué manera la interpretación de los parámetros de resistividad eléctrica permite diferenciar las unidades hidroestratigráficas en el Valle de Cinto? • ¿En qué medida la correlación entre los datos de logueo de pozos y los perfiles geoeléctricos contribuyen a definir con precisión el espesor del acuífero saturado? • ¿Cómo influye la configuración estructural del basamento impermeable (Formación Moquegua Inferior) en la geometría y capacidad de almacenamiento del acuífero? • ¿Cuál es la relación entre el actual régimen de explotación y el descenso de los niveles piezométricos identificados en el acuífero Cinto?	**Objetivo General:** Determinar la geometría y configuración espacial del acuífero Cinto mediante la caracterización y modelado hidrogeológico. **Objetivos específicos** • Interpretar los parámetros de resistividad eléctrica obtenidos mediante SEVs para identificar las unidades hidroestratigráficas. • Integrar los datos de resistividad con la información de logueo de pozos para establecer la geometría. • Desarrollar un modelo hidrogeológico espacial que permita visualizar la distribución y extensión del acuífero Cinto. • Analizar el balance hídrico del acuífero y proyectar los efectos de la sobreexplotación sobre la sostenibilidad del recurso, cuantificando el caudal de equilibrio y la vida útil técnica del reservorio.	La caracterización hidrogeológica y el modelamiento hidrogeológico bidimensional permiten determinar confiablemente la geometría del acuífero Cinto. **Hipótesis específicas** • La integración de los sondeos eléctricos verticales y el logueo de pozos permite definir la distribución litológica e hidroestratigráfica del subsuelo al establecer valores específicos para el acuífero y el basamento impermeable. • La correlación entre los datos de logueo de pozos y los perfiles geoeléctricos permite definir el espesor de acuífero saturado al calibrar las resistividades aparentes con la litología observada en el logueo de pozos. • La configuración estructural del basamento impermeable delimita la geometría del acuífero y concentra los mayorees volúmenes en los paleocauces. • Existe una relación directa entre el incremento en el régimen de explotación y el descenso de los niveles piezométricos, donde la tasa de extracción actual supera a la capacidad de recarga natural del acuífero Cinto. La extracción intensiva rompe el equilibrio del sistema en relación a la escasa recarga generando un déficit hídrico anual y limitando la vida útil técnica del acuífero, siendo la zona baja de uso poblacional la más afectada.	**Independientes** • Propiedades litoestratigráficas • Propiedades hidrogeológicas **Dimensiones:** • Litología • Hidroestratigrafía • Parámetros hidráulicos • Nivel freático **Dependiente** • Caracterización hidrogeológica **Indicadores** • Espesor del horizonte saturado (m) • Profundidad del techo del acuífero (m) • Extensión lateral (km²). • Volumen del acuífero (m3)	**Tipo: mixto** La investigación se basa en métodos cuantitativos (Resistividad eléctrica, en su variante de Sondajes Eléctricos Verticales (SEVs), con dispositivo simétrico SCHLUMBERGER). Con los resultados de los SEV´s se elaborarán secciones hidrogeológicas a lo largo del rio Cinto (transversales y longitudinales) las cuales se unirán en el Software Leapfrog para realizar un modelo hidrogeológico en 3D, el cual nos mostrara la geometría del acuífero. **Nivel: Descriptivo y Explicativo** La investigación tiene un enfoque descriptivo para identificar las unidades hidrogeológicas y caracterizarlas. **Muestra: Sondajes eléctricos verticales y perforaciones** Sondajes eléctricos verticales realizados en el acuífero y perforaciones de pozos.

ANEXOS 2
MAPAS



LEYENDA

- Zona de Estudio

SIMBOLOGIA

- Carretera Asfaltada
- Trocha Carrozable
- Ríos
- Quebradas
- Centro poblado

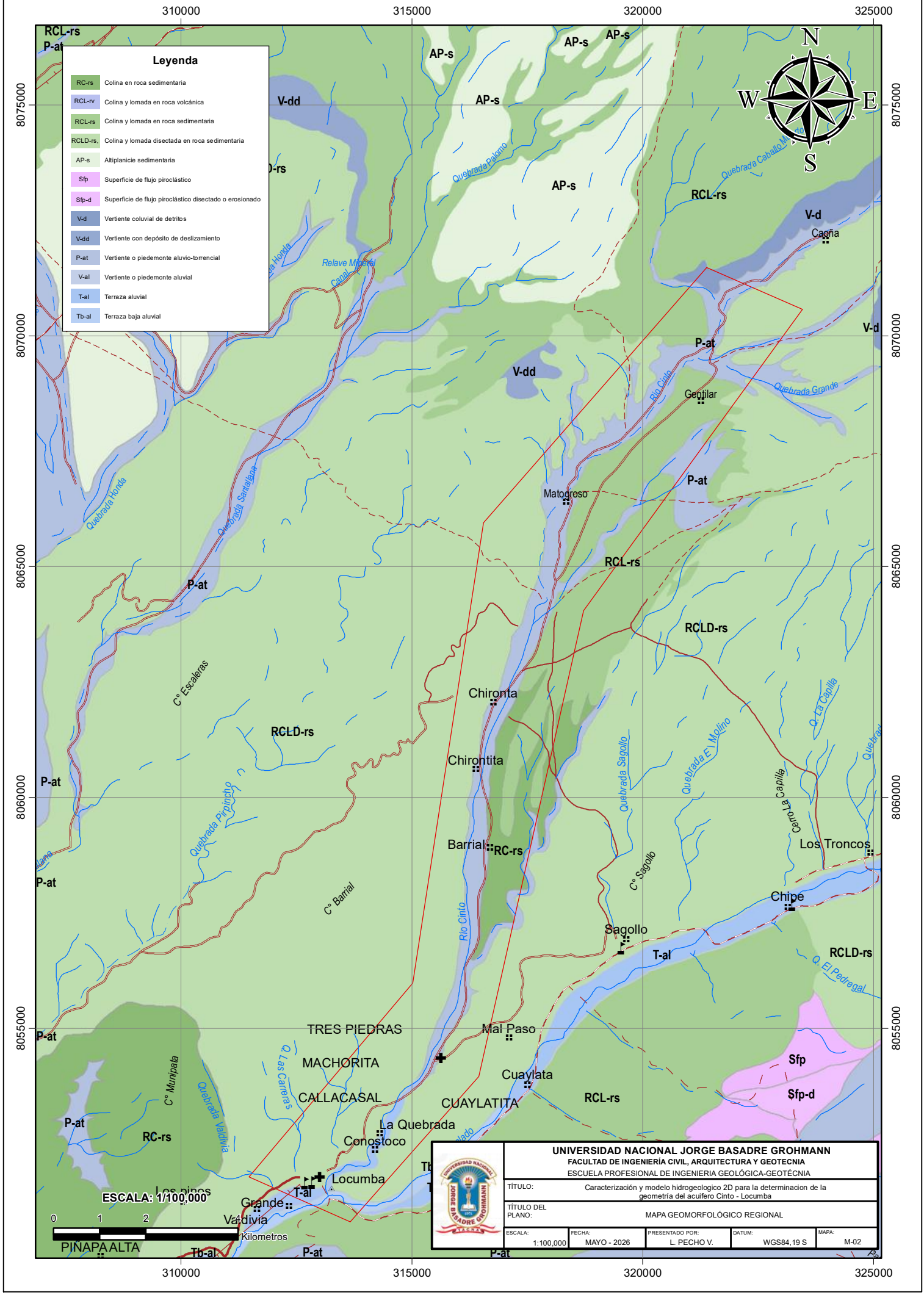
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

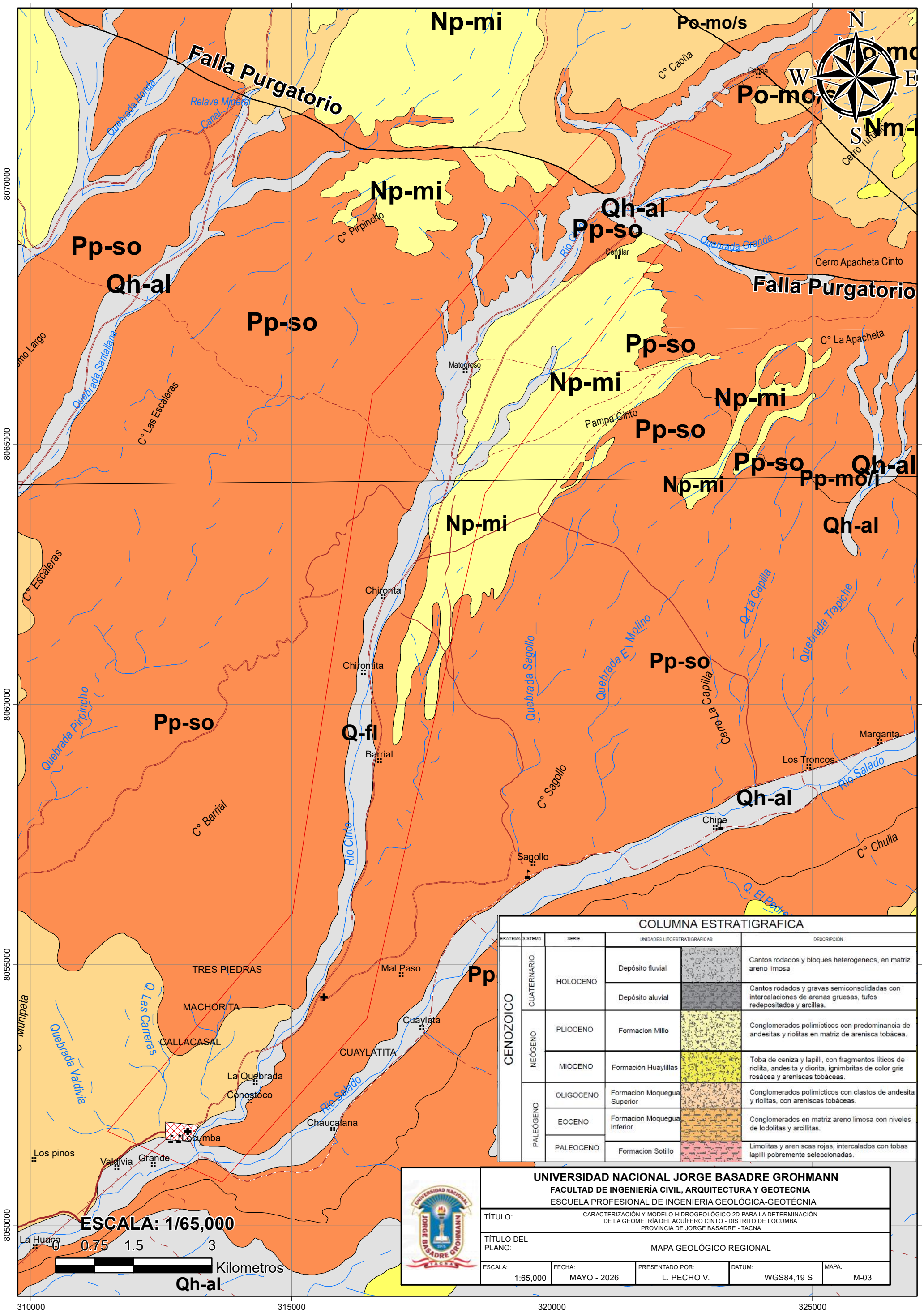
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL PLANO:	MAPA DE UBICACION

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	DATUM:	MAPA:
1:135 000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	WGS84,19 S	M-01


Leyenda
RC-rs Colina en roca sedimentaria
RCL-rv Colina y lomada en roca volcánica
RCL-rs Colina y lomada en roca sedimentaria
RCLD-rs, Colina y lomada disectada en roca sedimentaria
AP-s Altiplanicie sedimentaria
Sfp Superficie de flujo piroclástico
Sfp-d Superficie de flujo piroclástico disectado o erosionado
V-d Vertiente coluvial de detritos
V-dd Vertiente con depósito de deslizamiento
P-at Vertiente o piedemonte aluvio-torrencial
V-al Vertiente o piedemonte aluvial
T-al Terraza aluvial
Tb-al Terraza baja aluvial
N
S
E
W
310000
315000
320000
325000
8075000
8070000
8065000
8060000
8055000
AP-s
RCL-rs
V-dd
V-d
P-at
RCLD-rs
RC-rs
T-al
Tb-al
Sfp
Sfp-d
Caoña
Gentilar
Matogroso
Chironta
Chirontita
Barrial
Los Troncos
Chipe
Sagollo
Mal Paso
Cuaylata
TRES PIEDRAS
MACHORITA
CALLACASAL
CUAYLATITA
La Quebrada
Conostoco
Locumba
Los pinos
Grande
Vadivia
PIÑAPA ALTA
Quebrada Palomo
Quebrada Caballo Muerto
Relave Minera
Canal
Quebrada Honda
Quebrada Santaliana
Quebrada Grande
Río Cinto
Quebrada Sagollo
Quebrada El Molino
Q. La Capilla
Cerro La Capilla
Quebrada Pirpincho
C° Escaleras
C° Barrial
C° Sagollo
C° Munipata
Quebrada Valdivia
Q. Las Carreras
Q. El Pedregal
ESCALA: 1/100,000
0 1 2 Kilometros
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA
TÍTULO: Caracterización y modelo hidrogeologico 2D para la determinacion de la geometría del acuífero Cinto - Locumba
TÍTULO DEL PLANO: MAPA GEOMORFOLÓGICO REGIONAL
ESCALA: 1:100,000
FECHA: MAYO - 2026
PRESENTADO POR: L. PECHO V.
DATUM: WGS84,19 S
MAPA: M-02



COLUMNA ESTRATIGRAFICA

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	DESCRIPCIÓN
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Depósito fluvial	Cantos rodados y bloques heterogeneos, en matriz areno limosa
			Depósito aluvial	Cantos rodados y gravas semiconsolidadas con intercalaciones de arenas gruesas, tufos redepositados y arcillas.
	NEÓGENO	PLIOCENO	Formacion Millo	Conglomerados polimicticos con predominancia de andesitas y riolitas en matriz de arenisca tobácea.
		MIOCENO	Formación Huaylillas	Toba de ceniza y lapilli, con fragmentos líticos de riolita, andesita y diorita, ignimbritas de color gris rosácea y areniscas tobáceas.
	PALEÓGENO	OLIGOCENO	Formacion Moquegua Superior	Conglomerados polimicticos con clastos de andesita y riolitas, con areniscas tobáceas.
		EOCENO	Formacion Moquegua Inferior	Conglomerados en matriz areno limosa con niveles de lodolitas y arcillitas.
		PALEOCENO	Formacion Sotillo	Limolitas y areniscas rojas, intercalados con tobas lapilli pobremente seleccionadas.

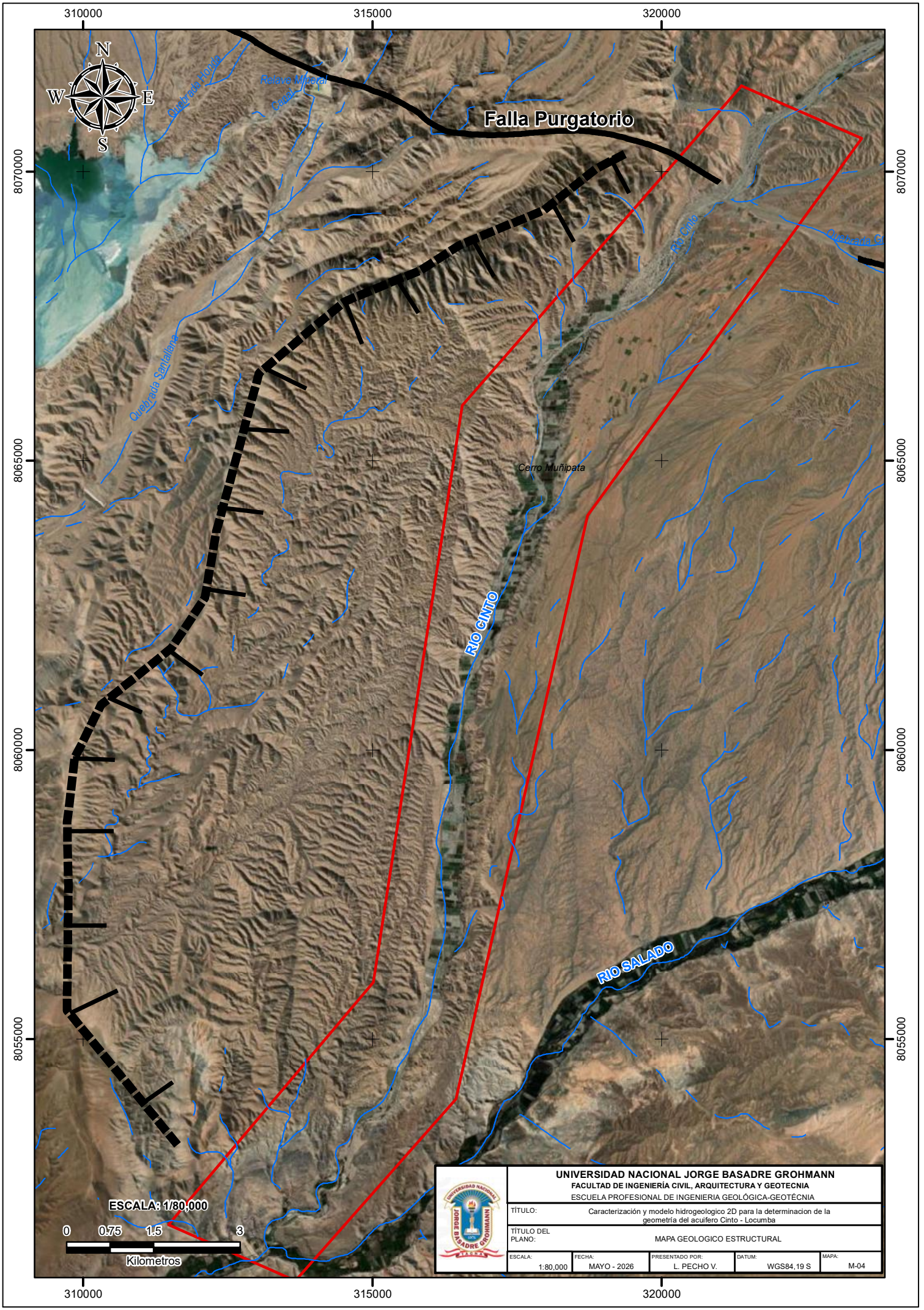
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL PLANO:	MAPA GEOLÓGICO REGIONAL

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	DATUM:	MAPA:
1:65,000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	WGS84,19 S	M-03



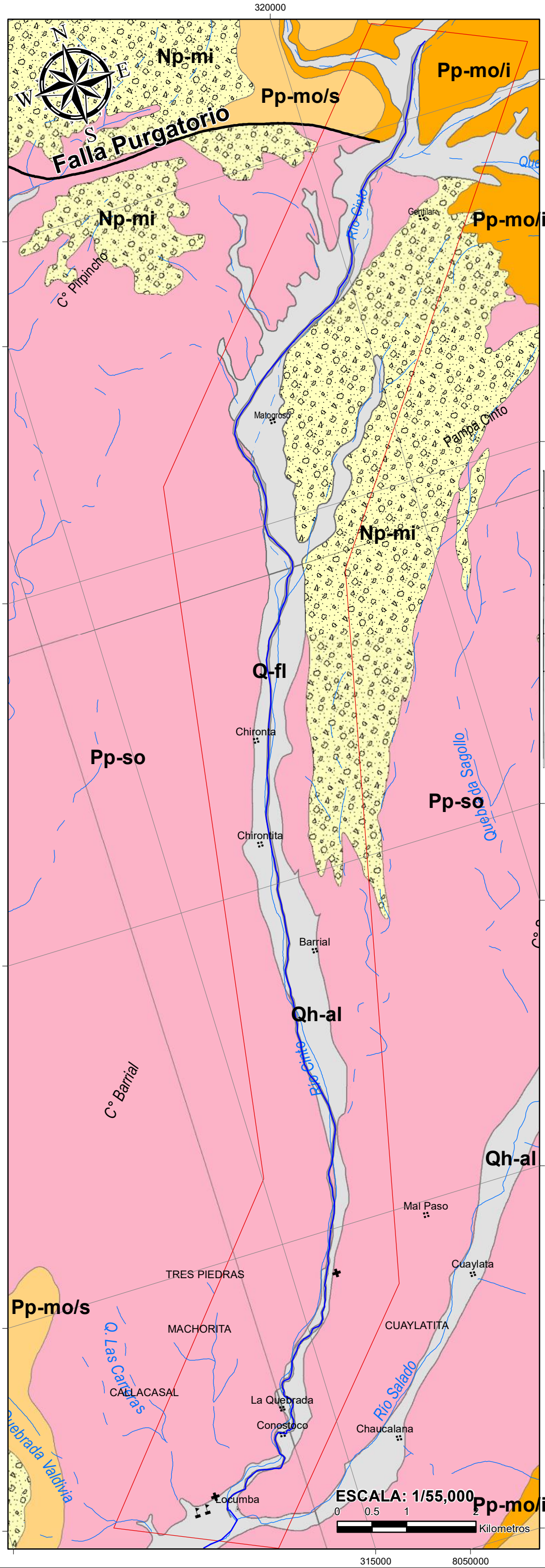
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA

TÍTULO:	Caracterización y modelo hidrogeologico 2D para la determinacion de la geometría del acuífero Cinto - Locumba
TÍTULO DEL PLANO:	MAPA GEOLOGICO ESTRUCTURAL

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	DATUM:	MAPA:
1:80,000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	WGS84,19 S	M-04



COLUMNA ESTRATIGRAFICA

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS		DESCRIPCIÓN
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Depósito fluvial		Bloques, cantos rodados subredondeados y gravas polimicticas en matriz areno limosa.
			Depósito aluvial		Cantos rodados, bloques y gravas semiconsolidadas con intercalaciones de arenas gruesas, tobas redepositadas y arcillas.
	NEÓGENO	PLIOCENO	Formacion Millo		Conglomerados polimicticos con predominancia de andesitas y riolitas en matriz de arenisca tobácea.
		MIOCENO			
	PALEÓGENO	OLIGOCENO	Formacion Moquegua Superior		Conglomerados polimicticos con clastos de andesita y riolitas, con areniscas tobáceas.
		EOCENO	Formacion Moquegua Inferior		Conglomerados en matriz areno limosa con niveles de arcillitas.
		PALEOCENO	Formacion Sotillo		Limolitas y areniscas rojas, intercalados con tobas lapilli pobremente seleccionadas.

Leyenda

- Q-fl — Depositos fluviales
- Qh-al — Depositos Aluviales
- Np-mi — Formacion Millo
- Pp-mo/s — Formacion Moquegua Superior
- Pp-mo/i — Formacion Moquegua Inferior
- Pp-so — Formacion Sotillo

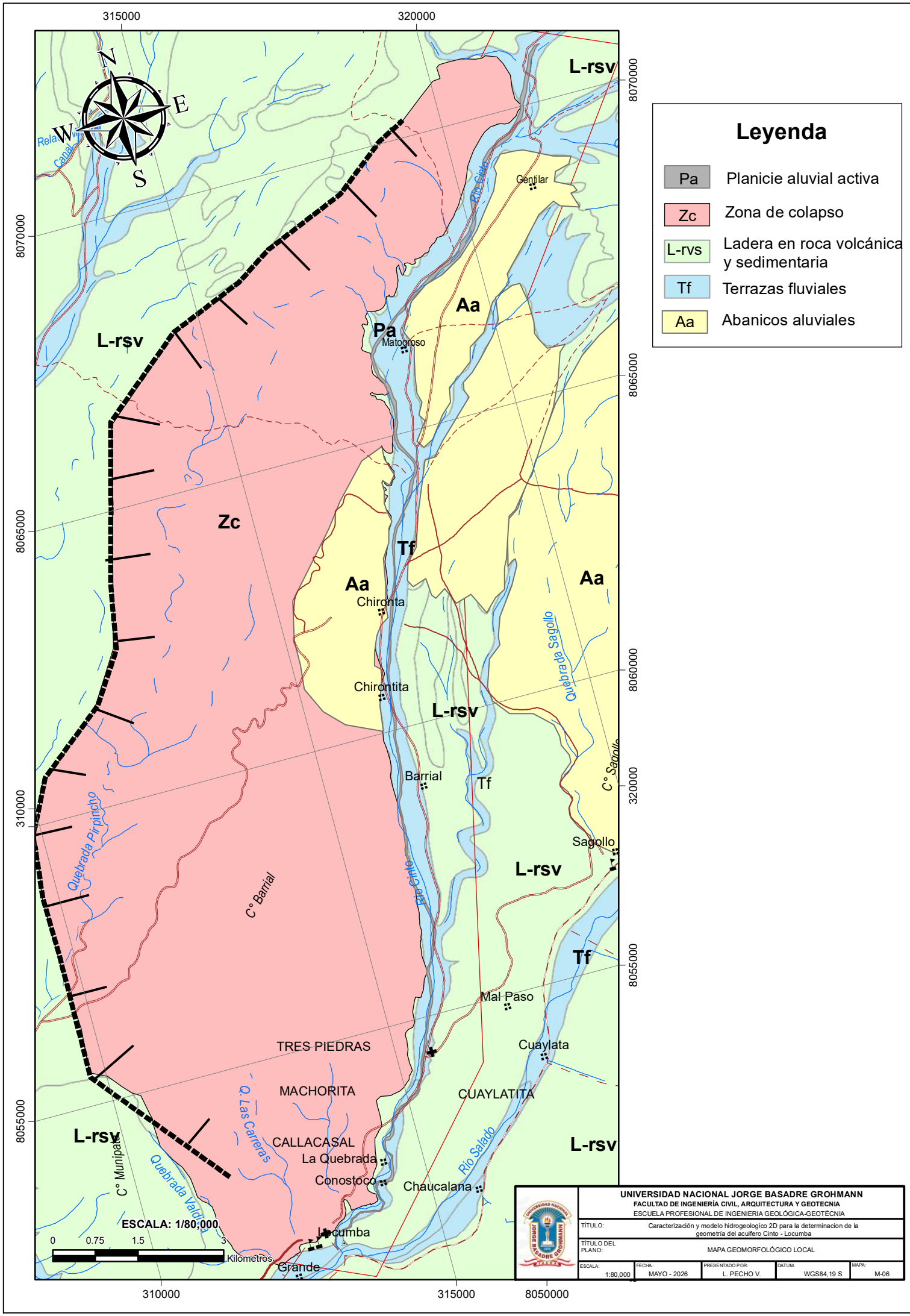
Simbología

- Falla Purgatorio
- Río Cinto
- Quebradas

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL PLANO:	MAPA GEOLÓGICO LOCAL

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	DATUM:	MAPA:
1:55,000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	WGS84,19 S	M-05


315000
320000
8070000
8065000
8060000
8055000
310000
8050000
N
S
E
W
Leyenda
Pa
Planicie aluvial activa
Zc
Zona de colapso
L-rsv
Ladera en roca volcánica y sedimentaria
Tf
Terrazas fluviales
Aa
Abanicos aluviales
L-rsv
Aa
Pa
Matogroso
Gentilar
Río Cinto
Zc
Tf
Aa
Chironta
Chirontita
Aa
Quebrada Sagollo
L-rsv
Barrial
Tf
C° Sagollo
Sagollo
Quebrada Pirpincho
C° Barrial
Río Cinto
L-rsv
Tf
Mal Paso
TRES PIEDRAS
Cuaylata
MACHORITA
CUAYLATITA
Q. Las Carreras
L-rsv
CALLACASAL
La Quebrada
Río Salado
L-rsv
C° Munipaca
Quebrada Valdiva
Conostoco
Chaucalana
Locumba
Grande
ESCALA: 1/80,000
0
0.75
1.5
3
Kilometros
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA
TÍTULO:
Caracterización y modelo hidrogeologico 2D para la determinacion de la geometría del acuífero Cinto - Locumba
TÍTULO DEL PLANO:
MAPA GEOMORFOLÓGICO LOCAL
ESCALA: 1:80,000
FECHA: MAYO - 2026
PRESENTADO POR: L. PECHO V.
DATUM: WGS84,19 S
MAPA: M-06

312000

315000

8060000

8057000

8054000

8051000

LEYENDA

- Sondajes Eléctricos Verticales
- Sección Geológica-Geofísica
- Zona de Estudio
- Rio Cinto

N

W

E

S

POZO_CINTO4

B

B'

Barrial

POZO_MONTEGRANDE1

SEV-3D SEV-4D SEV-5D

SEV-2D

SEV-1D

I

I'

POZO_MONTEGRANDE3

POZO_REEMPLAZO_MONTEGRANDE

C° Barrial

Río Cinto

LOS CARZOS

H

SEV-2C

SEV-3C

SEV-1C

H'

A

A'

TRES MOLLES

G

SEV-2B

SEV-4B

SEV-3B

SEV-1B

G'

Cerro Muñipata

Mal Paso

C° Las Canteras

SEV-2A SEV-4A

TRES PIEDRAS

F

SEV-3A

F'

POZO_MACHORRITA LA MACHORRITA

Chaviata

E

E'

SEV-5

SEV-2

SEV-3

POZO CONOSTOCO

SEV-4

SEV-1

SEV-3Z

La Quebrada

Conostoco

POZO_EMAPA

Chaucalana

POZO_EPS

POZO EPS LOCUMBA

Valdivia

Grande

ESCALA: 1/25,000

0 0.25 0.5 1

Kilometros

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL PLANO:	MAPA DE UBICACION DE SEV´S ZONA BAJA DEL ACUIFERO

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	DATUM:	MAPA:
1:25 000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	WGS84,19 S	M-07

316000 317000 318000 319000

8066000 8065000 8064000 8063000 8062000 8061000 8060000

LEYENDA

- Sondajes Eléctricos Verticales
- Sección Geológica-Geofísica
- Zona de Estudio
- Rio Cinto

N W E S

SEV-1H SEV-4H SEV-5H SEV-6H
M M'
SEV-3H
SEV-2H

SEV-3G SEV-4G SEV-5G
SEV-1G
L L'
SEV-4Z
SEV-2G

K
SEV04
SEV03
SEV-2F
SEV-4F
SEV-5F
SEV-3F
K'
SEV-1F

SEV-1Z
POZO_CINTO3
SEV-2Z

Río Cinto

SEV-6Z

Cerro Muñipata

SEV-3E SEV-1E
J
SEV-2E
J'

Chironta
POZO_CHIRONTA

SEV-5Z

Chirontita

POZO_CINTO4

Quebrada Sagollo

ESCALA: 1/17,000
0 0.175 0.35 0.7
Kilometros

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL PLANO:	MAPA DE UBICACION DE SEV´S ZONA MEDIA DEL ACUIFERO

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	DATUM:	MAPA:
1:17 000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	WGS84,19 S	M-08

317400 318100 318800 319500 320200 320900 321600 322300

8069600 8068900 8068200 8067500 8066800

N W E S

D' POZO_IRHS-SCI-1

T 1J 2J 3J 4J 5J T'

S 6J 7J 8J 9J 10J S'

R 11J 12J 13J 14J 15J R'

Q 16J 17J 18J 19J 20J Q'

P 21J 22J 23J 24J 25J P'

O 26J 27J 28J 29J 30J O'

POZO_JARRO

Río Cinto

SEV_7Z

N SEV-1i SEV-3i SEV-2i SEV-4i N'

D

ESCALA: 1/15,000

0 180 360 720

Metros

LEYENDA

- Sondajes Eléctricos Verticales
- A A' Sección Geológica-Geofísica
- Zona de Estudio
- Rio Cinto

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL PLANO:	MAPA DE UBICACION DE SEV´S ZONA ALTA DEL ACUIFERO

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	DATUM:	MAPA:
1:15 000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	WGS84,19 S	M-09

LEYENDA

- Sondajes Electricos Verticales
- Isóbatas (m)
- Rio Cinto
- Zona de estudio

TECHO BASAMENTO IMPERMEABLE (m)

- 15 - 24
- 24 - 33
- 33 - 42
- 42 - 51
- 51 - 60

POZO_CINTO4
POZO_MONTEGRANDE1
SEV-4D
SEV-5D
POZO_MONTEGRANDE3
POZO_REEMPLAZO_MONTEGRANDE
LOS CARZOS
SEV-2C
SEV-3C
SEV-1C
TRES MOLLES
SEV-4B
SEV-3B
SEV-2B
TRES PIEDRAS
SEV-4A
SEV-3A
SEV-2A
LA MACHORRITA
POZO_MACHORRITA
SEV-5
POZO CONOSTOCO
SEV-2
SEV-3Z
POZO_EMAPA
POZO_EPS
POZO EPS LOCUMBA
Barrial
Mal Paso
Cuaylaca
La Quebrada
Conostoco
Chaucalana
Valdivia
Grande
Cerro Muñipata
C° Barrial
Q. Las Carreteras

ESCALA: 1/25,000
0 0.25 0.5 1
Kilometros

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL PLANO:	TECHO DEL BASAMENTO IMPERMEABLE ZONA BAJA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	DATUM:	MAPA:
1:25 000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	WGS84,19 S	M-10

313000 314000 315000 316000 317000 318000

8060000 8059000 8058000 8057000 8056000 8055000 8054000 8053000 8052000 8051000

LEYENDA

- Sondajes Electricos Verticales
- Isopacos (m)
- Rio Cinto
- Zona de estudio

ESPESOR ACUÍFERO (m)

- 5 - 11
- 11 - 17
- 17 - 23
- 23 - 29
- 29 - 35

N W E S

POZO_CINTO4 11

17 17 17

Barrial

POZO_MONTEGRANDE1

11

SEV-2D SEV-5D

SEV-4D 23

POZO_MONTEGRANDE3

POZO_REEMPLAZO_MONTEGRANDE 17 11

Barrial

LOS CARZOS

SEV-2C SEV-3C

11

SEV-1C

SEV-2B SEV-4B TRES MOLLES

SEV-1B SEV-3B

11

11

Cerro Muñipata

Mal Paso

SEV-2A SEV-4A TRES PIEDRAS

SEV-3A

11

SEV-1A

LA MACHORRITA POZO_MACHORRITA

Cuaylata

Q. Las Carreras

SEV-5

SEV-2 SEV-3 POZO CONOSTOCO

SEV-4

SEV-1

SEV-3Z 17

La Quebrada

POZO_EMAPA

17

Chaucalana

POZO_EPS 11

11

Grande

ESCALA: 1/25,000

0 0.25 0.5 1

Kilometros

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL PLANO:	ESPESOR TOTAL DEL HORIZONTE PERMEABLE SATURADO ZONA BAJA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	DATUM:	MAPA:
1:25, 000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	WGS84,19 S	M-11

LEYENDA

- Sondajes Electricos Verticales
- Isoresistividad (Ohm-m)
- Rio Cinto
- Zona de estudio

RESISTIVIDAD ACUÍFERO (Ohm-m)

- 16 - 26
- 26 - 37
- 37 - 47
- 47 - 57
- 57 - 68

N
W E
S

314000 316000 318000

8060000 8058000 8056000 8054000 8052000

POZO_CINTO4
26
Barrial
POZO_MONTEGRANDE1
26
SEV-2D
SEV-5D
SEV-3D
37
SEV-4D
POZO_MONTEGRANDE3
26
POZO_REEMPLAZO_MONTEGRANDE
37
Barrial
LOS CARZOS
SEV-2C
SEV-3C
48
SEV-1C
SEV-2B
TRES MOLLES
48
SEV-4B
SEV-3B
SEV-1B
Cerro Muñipata
Mal Paso
SEV-2A SEV-4A
TRES PIEDRAS
SEV-3A
SEV-1A
Q. Las Carreras
POZO_MACHORRITA
37
LA MACHORRITA
Cuayla
SEV-5
SEV-2
SEV-3
POZO CONOSTOCO
SEV-4
SEV-1
SEV-3Z
La Quebrada
POZO_EMAPA
Chaucalana
POZO_EPS
POZO EPS LOCUMBA
Grande

ESCALA: 1/25,000
0 0.25 0.5 1
Kilometros

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL PLANO:	ESPESOR TOTAL DEL HORIZONTE PERMEABLE SATURADO ZONA BAJA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	DATUM:	MAPA:
1:25, 000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	WGS84,19 S	M-12

313000 314000 315000 316000 317000 318000

8060000 8059000 8058000 8057000 8056000 8055000 8054000 8053000 8052000 8051000

LEYENDA

- Sondajes Electricos Verticales
- Isoresistencia Transversal (Ohm-m2)
- Rio Cinto
- Zona de estudio

RESISTENCIA TRANSVERSAL ACUIFERO (Ohm-m2)

- 77 - 534
- 534 - 991
- 991 - 1,448
- 1,448 - 1,906
- 1,906 - 2,370

N W E S

POZO_CINTO4

534

534

Barrial

POZO_MONTEGRANDE1

SEV-3D SEV-5D SEV-4D SEV-2D SEV-1D

991

POZO_MONTEGRANDE3 534

POZO_REEMPLAZO_MONTEGRANDE

534

LOS CARZOS

SEV-3C SEV-2C SEV-1C

534

SEV-2B SEV-4B TRES MOLLES SEV-3B SEV-1B

534

Cerro Munipata

Mal Paso

SEV-4A SEV-3A SEV-1A SEV-2A

534

TRES PIEDRAS

POZO_MACHORRITA LA MACHORRITA

Cuaylarani

SEV-5 SEV-2 SEV-3 POZO CONOSTOCO SEV-4 SEV-1

SEV-3Z

534

La Quebrada

POZO_EMAPA

534

Chaucalana

POZO EPS LOCUMBA

POZO_EPS

Grande

ESCALA: 1/25,000

0 0.25 0.5 1

Kilometros

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA				
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA				
TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA			
TÍTULO DEL PLANO:	RESISTENCIA TRANSVERSAL DE HORIZONTE SATURADO ZONA BAJA			
ESCALA: 1:25, 000	FECHA: MAYO - 2026	PRESENTADO POR: L. PECHO V.	DATUM: WGS84,19 S	MAPA: M-13

315000 316000 317000 318000 319000

8065000 8064000 8063000 8062000 8061000 8060000

LEYENDA

- Sondajes Electricos Verticales
- Isóbatas (m)
- Rio Cinto
- Zona de estudio

TECHO BASAMENTO IMPERMEABLE (m)

- 20 - 27
- 27 - 34
- 34 - 41
- 41 - 48
- 48 - 55

N W E S

SEV-1H SEV-6H SEV-5H SEV-4H SEV-2H SEV-5G SEV-1G SEV-4Z SEV-4G SEV04 SEV03 SEV-3F SEV-4F SEV-5F SEV-2F SEV-1F SEV-1Z POZO_CINTO3 SEV-2Z SEV-6Z SEV-3E SEV-1E SEV-2E POZO_CHIRONTA SEV-5Z POZO_CINTO4

41 48 34 27

Chironta

Chirontita

ESCALA: 1/17,000

0 0.175 0.35 0.7

Kilometros

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL PLANO:	TECHO DEL BASAMENTO IMPERMEABLE ZONA MEDIA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	DATUM:	MAPA:
1:17 000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	WGS84,19 S	M-14

316000 317000 318000 319000

8066000 8065000 8064000 8063000 8062000 8061000 8060000

LEYENDA

- Sondajes Electricos Verticales
- Isopacos (m)
- Rio Cinto
- Zona de estudio

ESPESOR ACUIFERO (m)

- 9 - 15
- 15 - 22
- 22- 29
- 29 - 35
- 35 - 42

N W E S

SEV-2H 22 SEV-6H
SEV-1H 15 22 SEV-5H
SEV-4H
SEV-2G SEV-5G
SEV-3G SEV-4Z
29 SEV-4G
SEV-1G
SEV04
15 SEV-5F
35
22 SEV-4F
SEV-3F
29 SEV-2Z
29 22 SEV-1Z
POZO_CINTO3
SEV-6Z
SEV-3E 22 SEV-1E
SEV-2E
15
POZO_CHIRONTA
Chironta
SEV-5Z
15
Chirontita
15
POZO_CINTO4

ESCALA: 1/17,000
0 0.175 0.35 0.7
Kilometros

Quebrada Sagollo

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL PLANO:	ESPESOR TOTAL DEL HORIZONTE PERMEABLE SATURADO ZONA MEDIA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	DATUM:	ANEXO:
1:17 000	DICIEMBRE - 2025	L. PECHO V.	WGS84,19 S	M-15

315000 316000 317000 318000 319000

8066000 8065000 8064000 8063000 8062000 8061000 8060000

LEYENDA

- Sondajes Electricos Verticales
- Isoresistividad (Ohm-m)
- Rio Cinto
- Zona de estudio

RESISTIVIDAD ACUÍFERO (Ohm-m)

- 13 - 26
- 26 - 39
- 39 - 52
- 52 - 66
- 66 - 80

N W E S

SEV-4H SEV-6H 52 SEV-2H SEV-5H SEV-3H SEV-2G SEV-1H SEV-5G SEV-4Z 66 SEV-3G SEV-4G

SEV04 26 SEV-2F SEV-5F SEV03 66 SEV-3F SEV-1F SEV-4F SEV-1Z SEV-2Z POZO_CINTO3 52 66

SEV-6Z 52

SEV-3E SEV-1E SEV-2E Chironta 39 POZO_CHIRONTA

SEV-5Z 26

Chirontita 26 POZO_CINTO4

ESCALA: 1/17,000

0 0.175 0.35 0.7

Kilometros

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL PLANO:	RESULTADOS CUANTITATIVOS DEL HORIZONTE SATURADO (RESISTIVIDAD VERDADERA) ZONA MEDIA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	DATUM:	MAPA:
1:17 000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	WGS84,19 S	M-16

316000 317000 318000 319000

8066000 8065000 8064000 8063000 8062000 8061000 8060000

LEYENDA

- Sondajes Electricos Verticales
- Isoresistencia Transversa (Ohm-m2)
- Rio Cinto
- Zona de estudio

RESISTENCIA TRANSVERSAL ACUÍFERO (Ohm-m2)

- 160 - 706
- 706 - 1,252
- 1,252 - 1,798
- 1,798 - 2,344
- 2,344 - 2,892

N W E S

SEV-5H 1252 SEV-6H SEV-3H SEV-4H SEV-2G SEV-2H SEV-5G SEV-4Z SEV-3G 1798 SEV04 SEV03 SEV-3F SEV-4F SEV-5F SEV-2F 1798 SEV-1F SEV-1Z SEV-2Z POZO_CINTO3 1798 SEV-6Z 1252 SEV-1E SEV-2E 1252 POZO_CHIRONTA Chironta SEV-3E 706 SEV-5Z Chirontita POZO_CINTO4

Sagollo

ESCALA: 1/17,000

0 0.175 0.35 0.7

Kilometros

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL PLANO:	RESISTENCIA TRANSVERSAL DE HORIZONTE SATURADO ZONA MEDIA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	DATUM:	MAPA:
1:17 000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	WGS84,19 S	M-17

316700 317400 318100 318800 319500 320200 320900 321600

8069600 8068900 8068200 8067500 8066800

LEYENDA

- Sondajes Electricos Verticales
- Isóbatas (m)
- Rio Cinto
- Zona de estudio

TECHO BASAMENTO IMPERMEABLE (m)

- 20 - 27
- 27 - 35
- 35 - 42
- 42 - 50
- 50 - 57

N W E S

POZO_IRHS-SCI-1

POZO_JARRO

1J 2J 3J 4J 5J 6J 7J 8J 9J 10J 11J 12J 13J 14J 15J 16J 17J 18J 19J 20J 21J 22J 23J 24J 25J 26J 27J 28J 29J 30J

SEV_7Z

SEV-1i SEV-2i SEV-3i SEV-4i

27 35 42 50

ESCALA: 1/15,000

0 180 360 720

Metros

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL PLANO:	TECHO DEL BASAMENTO IMPERMEABLE

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	DATUM:	MAPA:
1:15 000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	WGS84,19 S	M-18

LEYENDA

- Sondajes Electricos Verticales
- Isopacos (m)
- Rio Cinto
- Zona de estudio

ESPESOR ACUIFERO (m)

- 13 - 17
- 17 - 22
- 22 - 26
- 26 - 30
- 30 - 35

N
W E
S

POZO_IRHS-SCI-1

POZO_JARRO

SEV_7Z

SEV-1i
SEV-3i
SEV-2i
SEV-4i

ESCALA: 1/15,000

0 180 360 720
Metros

317400 318100 318800 319500 320200 320900 321600 322300

8070300 8069600 8068900 8068200 8067500 8066800

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL PLANO:	ESPESOR TOTAL DEL HORIZONTE PERMEABLE SATURADO

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	DATUM:	MAPA:
1:15 000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	WGS84,19 S	M-19

316700 317400 318100 318800 319500 320200 320900 321600 322300

8070300 8069600 8068900 8068200 8067500 8066800

LEYENDA

- Sondajes Electricos Verticales
- Isoresistividad (Ohm-m)
- Rio Cinto
- Zona de estudio

RESISTIVIDAD ACUÍFERO (Ohm-m)

- 15 - 34
- 34 - 52
- 52 - 70
- 70 - 88
- 88 - 106

N W E S

POZO_IRHS-SCI-1

88 70 52 34

1J 2J 3J 4J 5J 6J 7J 8J 9J 10J 11J 12J 13J 14J 15J 16J 17J 19J 18J 20J 21J 22J 23J 26J 27J 28J 24J 25J 29J 30J

POZO_JARRO

SEV_7Z

SEV-1i SEV-3i SEV-2i SEV-4i

ESCALA: 1/15,000

0 180 360 720

Metros

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL PLANO:	RESULTADOS CUANTITATIVOS DEL HORIZONTE SATURADO (RESISTIVIDAD VERDADERA)

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	DATUM:	MAPA:
1:15 000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	WGS84,19 S	M-20

316700 317400 318100 318800 319500 320200 320900 321600 322300

8069600 8068900 8068200 8067500 8066800

LEYENDA

- Sondajes Electricos Verticales
- Isoresistencia Transversal (Ohm-m2)
- Rio Cinto
- Zona de estudio

RESISTENCIA TRANSVERSAL ACUÍFERO (Ohm-m2)

- 315 - 920
- 920 - 1,525
- 1,525 - 2,130
- 2,130 - 2,735
- 2,735 - 3,341

N W E S

POZO_IRHS-SCI-1

POZO_JARRO

SEV_7Z

SEV-1i SEV-2i SEV-3i SEV-4i

1J 2J 3J 4J 5J 6J 7J 8J 9J 10J 11J 12J 13J 14J 15J 16J 17J 18J 19J 20J 21J 22J 23J 24J 25J 26J 27J 28J 29J 30J

1525 920 2130

ESCALA: 1/15,000

0 180 360 720

Metros

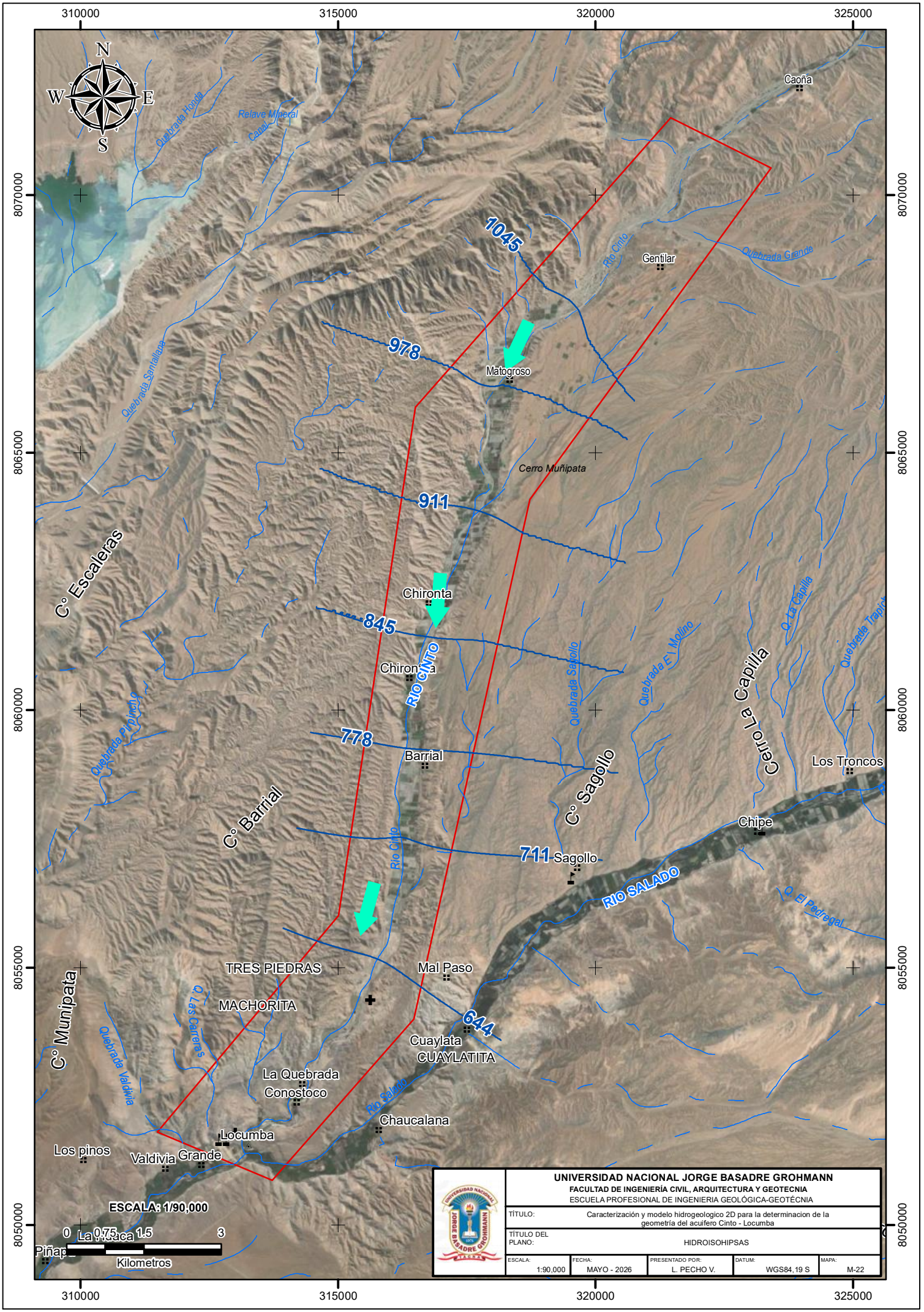
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

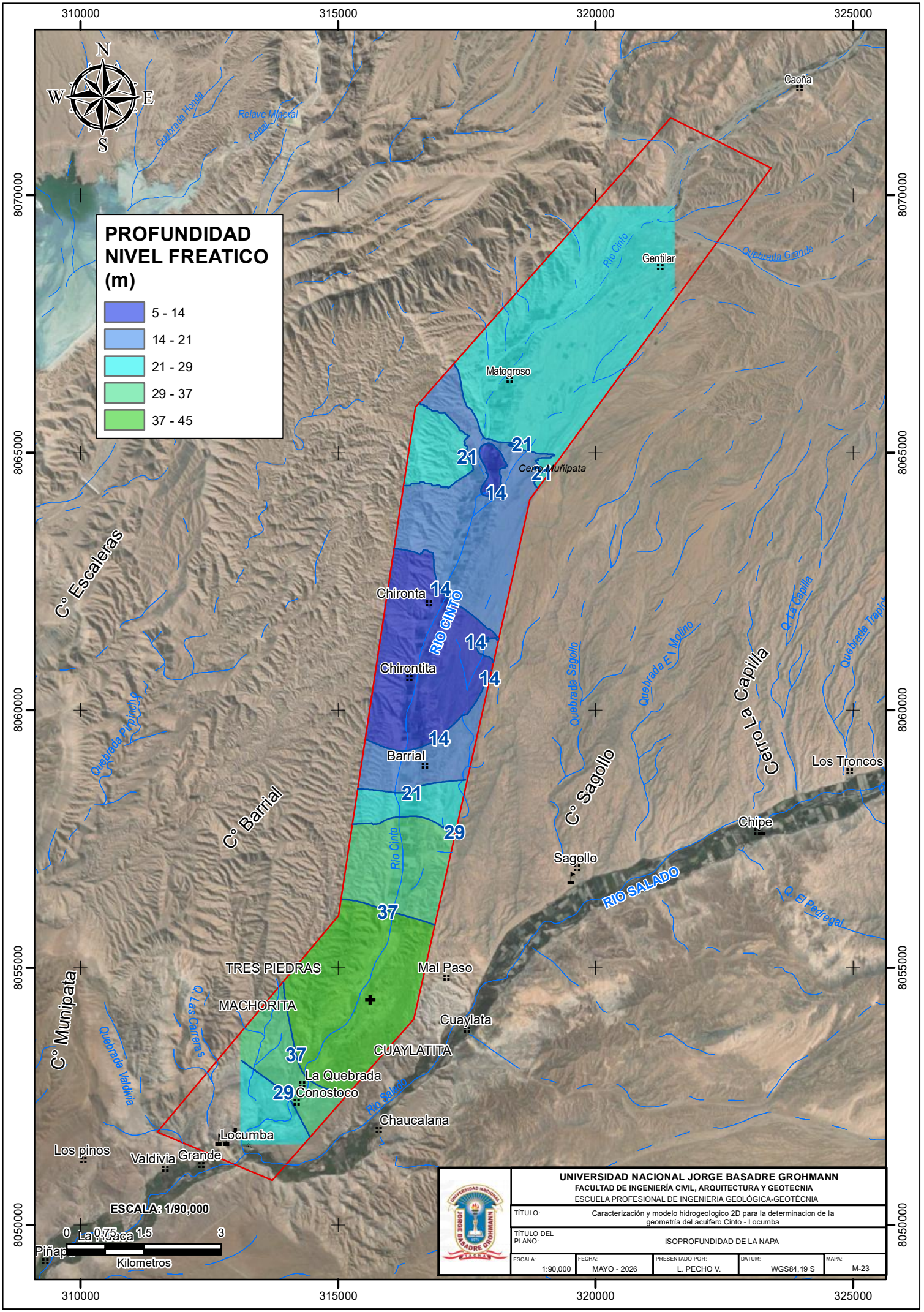
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL PLANO:	RESISTENCIA TRANSVERSAL DE HORIZONTE SATURADO

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	DATUM:	MAPA:
1:15 000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	WGS84,19 S	M-21



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA					
TÍTULO:	Caracterización y modelo hidrogeologico 2D para la determinacion de la geometría del acuifero Cinto - Locumba				
TÍTULO DEL PLANO:	HIDROISOHIPSAS				
ESCALA: 1:90,000	FECHA: MAYO - 2026	PRESENTADO POR: L. PECHO V.	DATUM: WGS84,19 S	MAPA: M-22	


310000
315000
320000
325000
8070000
8065000
8060000
8055000
8050000
N
S
E
W
PROFUNDIDAD NIVEL FREATICO (m)
5 - 14
14 - 21
21 - 29
29 - 37
37 - 45
Caoña
Gentilar
Matogroso
Cerro Muñipata
Chironta
Chirontita
Barrial
TRES PIEDRAS
MACHORITA
CUAYLATITA
La Quebrada
Conostoco
Mal Paso
Cuaylata
Chaucalana
Locumba
Los pinos
Valdivia Grande
Piñapi
La Yuraca
Chipe
Sagollo
Los Troncos
RIO CINTO
RIO SALADO
Río Cinto
Río Salado
Quebrada Honda
Relave Minera
Canal
Quebrada Grande
Quebrada Sagollo
Quebrada El Molino
Q. La Capilla
Quebrada Trapiche
Q. El Pedregal
Quebrada Pipinchu
Quebrada Valdivia
Q. Las Carreras
C° Escaleras
C° Barrial
C° Munipata
C° Sagollo
Cerro La Capilla
21
14
29
37
ESCALA: 1/90,000
0 0.75 1.5 3
Kilometros
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA
TÍTULO: Caracterización y modelo hidrogeologico 2D para la determinacion de la geometría del acuifero Cinto - Locumba
TÍTULO DEL PLANO: ISOPROFUNDIDAD DE LA NAPA
ESCALA: 1:90,000
FECHA: MAYO - 2026
PRESENTADO POR: L. PECHO V.
DATUM: WGS84, 19 S
MAPA: M-23

312000 315000 318000 321000

8069000 8066000 8063000 8060000 8057000 8054000 8051000

LEYENDA

- Pozo tubular utilizable
- Pozo tubular utilizado
- Pozo tajo abierto utilizado
- Pozo tajo abierto utilizable

N W E S

Río Cinto

Gentilar

Cinto N° 1 Pozo Jarro

Matogroso

Pampa Cinto

Cinto N° 2

Cinto N° 3

Chironta

Pozo Chironta

Chirontita

Cinto N° 4

Montegrande N° 1

Montegrande N° 2

Montegrande N° 3

Montegrande N° 4

René Palacios

Los Carzos

La India Ahorcada

Pozo Tres Molles

Tres Piedras

Machorrita

Mal Paso

Cuaylata

Sagollo

Chaucalana

Conostoco

Ministerio Agricultura

Becerra

La Quebrada

Emapa/Militares

Mazuelos

EPS - Tacna

Sr. de Locumba

Los pinos

Valdivia

Grande

ESCALA: 1/50,000

0 0.5 1 2

Kilometros

C° Pirpincho

C° Las Escaleras

C° Escaleras

C° Barrial

C° Munipata

C° Sagollo

Cerro Muñipata

Quebrada Santallana

Quebrada Pirpincho

Quebrada Valdivia

Q. Las Carreras

Quebrada Sagollo

Quebrada El Molino

La Capilla

Lomo Largo

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN	
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA	
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNIA	
TÍTULO:	CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL PLANO:	INVENTARIO DE FUENTES DE AGUA

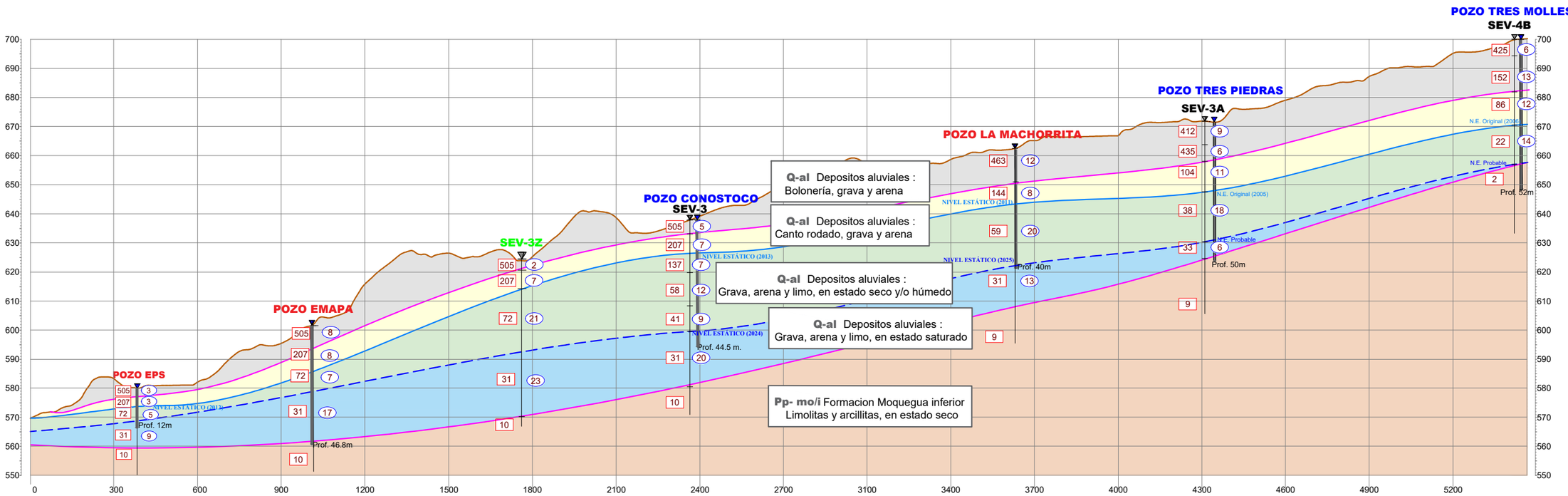
ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	DATUM:	MAPA:
1:50 000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	WGS84,19 S	M-24

ANEXOS 3
Secciones geológicas geofísicas

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA A-A'
VALLE DE CINTO

SW
A

NE
A'



LEYENDA

- Bolonería, grava y arena, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Canto rodado, grava y arena, en estado seco. Buena permeabilidad.
- Grava, arena y limo, en estado seco y/o húmedo. Regular permeabilidad.
- **ACUIFERO.** Grava, arena y limo, en estado saturado. Regular permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

- **SEV-1** ▽ Sondaje Eléctrico Vertical Zona baja (2024)
- (2) Espesor (m)
- [40] Resistividad (Ohm-m)
- N.E. nivel freático probable
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- Contacto geoeléctrico inferido

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

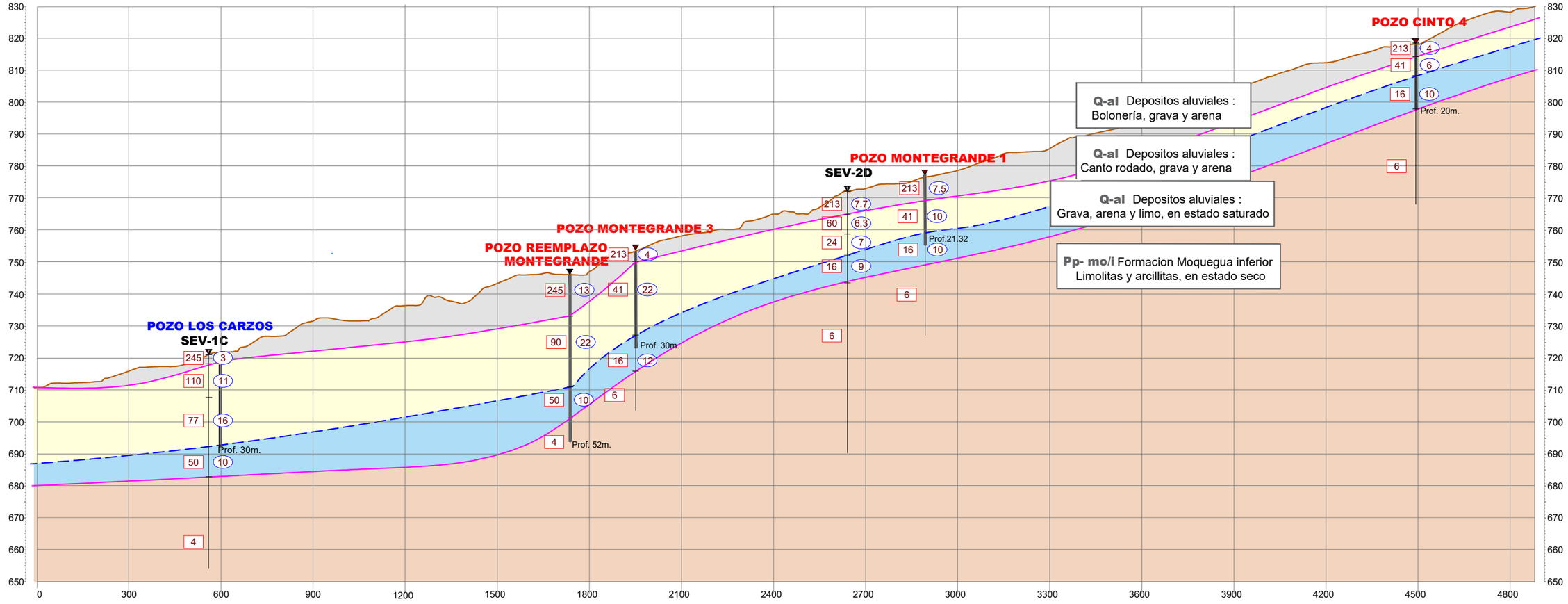
TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN A-A' ZONA BAJA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/1000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-01

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA B-B'
VALLE DE CINTO

SW
B

NE
B'



LEYENDA

- Bolonería, grava y arena, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Canto rodado, grava y arena, en estado seco. Buena permeabilidad.
- **ACUIFERO.** Grava, arena y limo, en estado saturado. Regular permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

- SEV-1 — Sondaje Eléctrico Vertical Zona Tres Molles (2024)
- (2) — Espesor (m)
- 40 — Resistividad (Ohm-m)
- N.E. nivel freático probable
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- Contacto geoeléctrico inferido

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

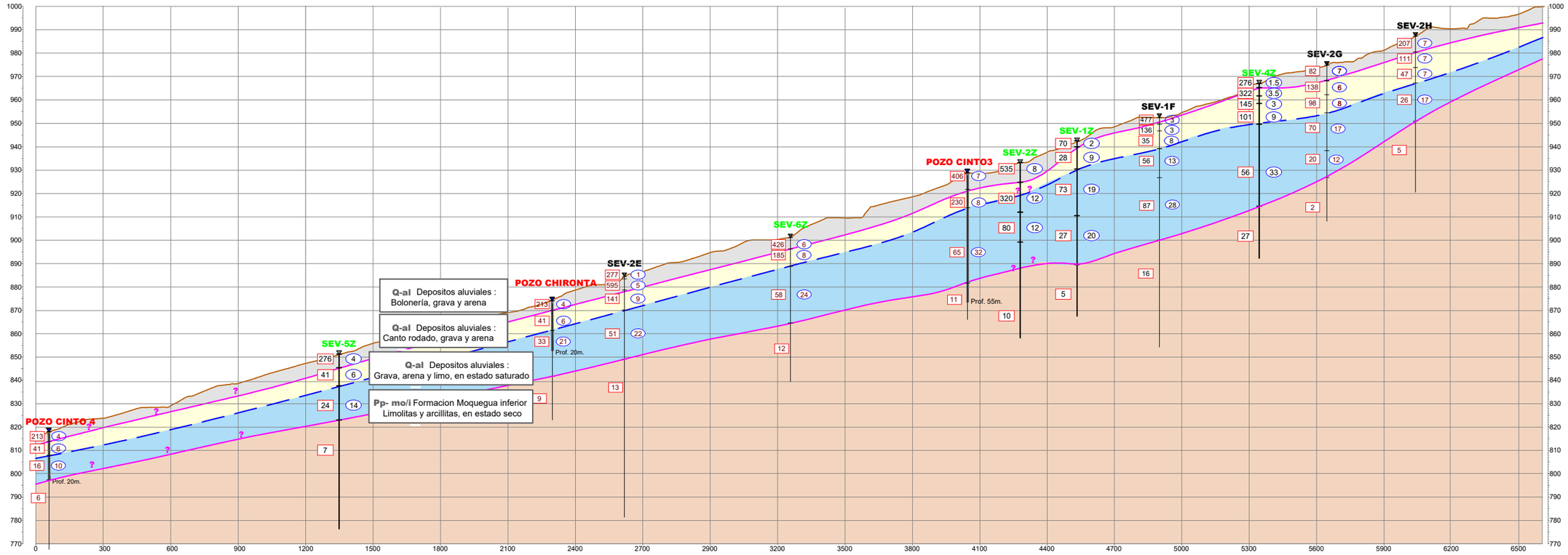
TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN B-B' ZONA BAJA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/1000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-02

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA C-C'
VALLE DE CINTO

SW
C

NE
C'



LEYENDA

- Bolonería, grava y arena, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Canto rodado, grava y arena, en estado seco. Buena permeabilidad.
- **ACUIFERO.** Grava, arena y limo, en estado saturado. Regular permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical
- (2) Espesor (m)
- [40] Resistividad (Ohm-m)
- N.E. nivel freático probable
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- Contacto geoeléctrico inferido

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

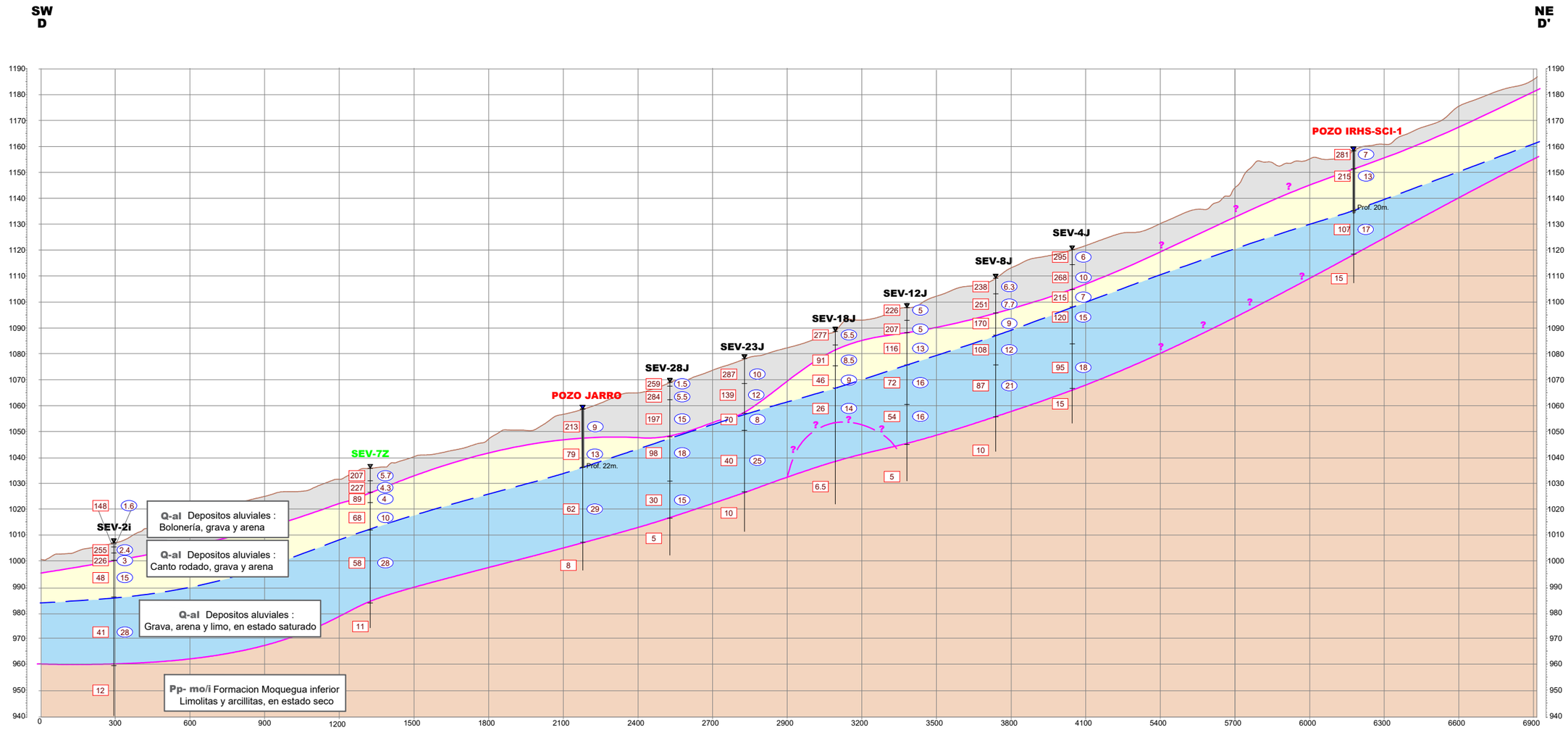
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN C-C' ZONA MEDIA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/1000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-03

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA D-D'
VALLE DE CINTO



LEYENDA

- Bolonería, grava y arena, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Canto rodado, grava y arena, en estado seco. Buena permeabilidad.
- **ACUIFERO.** Grava, arena y limo, en estado saturado. Regular permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

- SEV-1 ▽ Sondaje Eléctrico Vertical Enero 2024
- (2) Espesor (m)
- [40] Resistividad (Ohm-m)
- N.E. nivel freático probable
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- Contacto geoeléctrico inferido

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

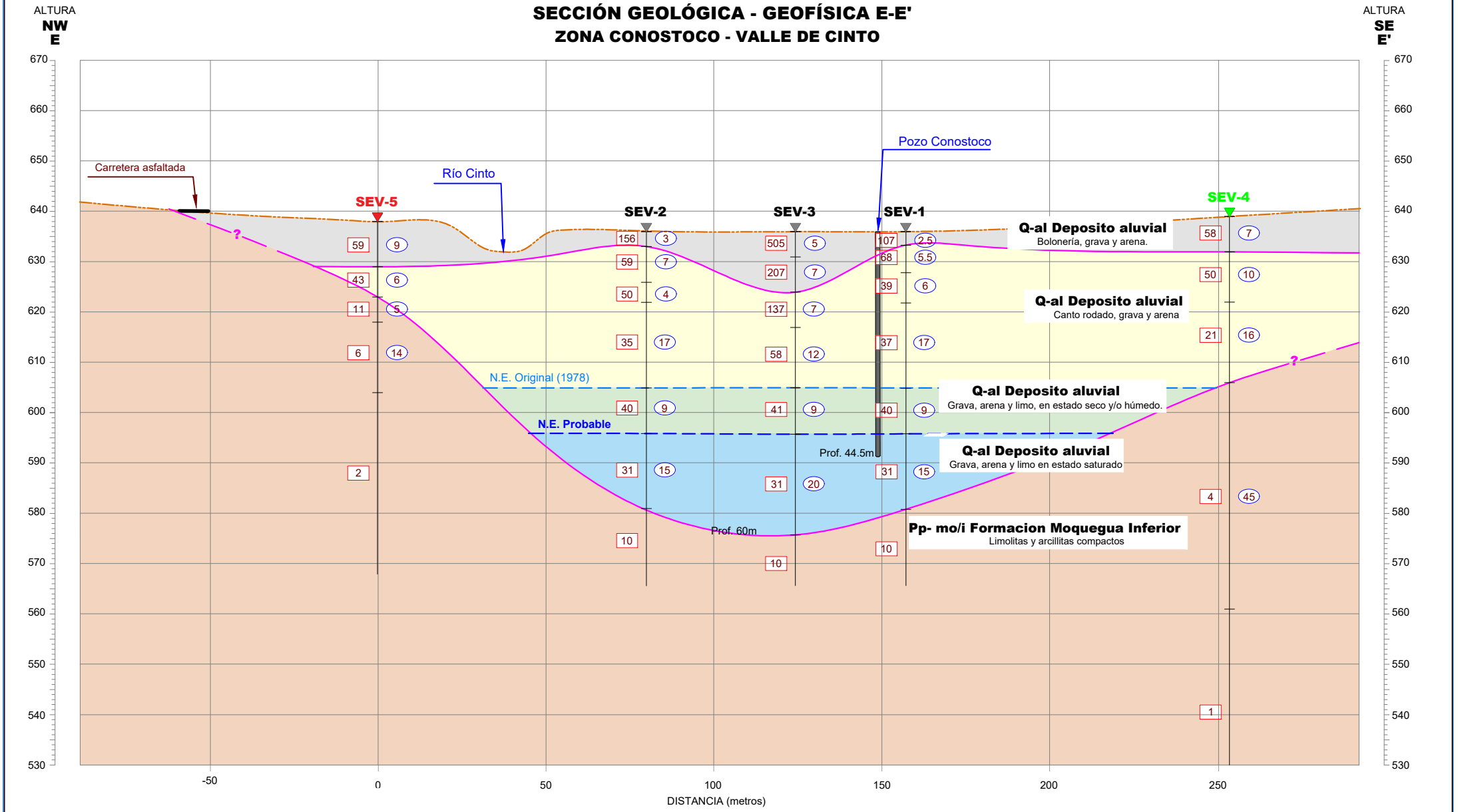
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN D-D' ZONA ALTA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/1000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-04

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA E-E'
ZONA CONOSTOCO - VALLE DE CINTO



LEYENDA

- Bolonería, grava y arena, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Canto rodado, grava y arena, en estado seco. Buena permeabilidad.
- Grava, arena y limo, en estado seco y/o húmedo. Regular permeabilidad.
- **ACUIFERO.** Grava, arena y limo, en estado saturado. Regular permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

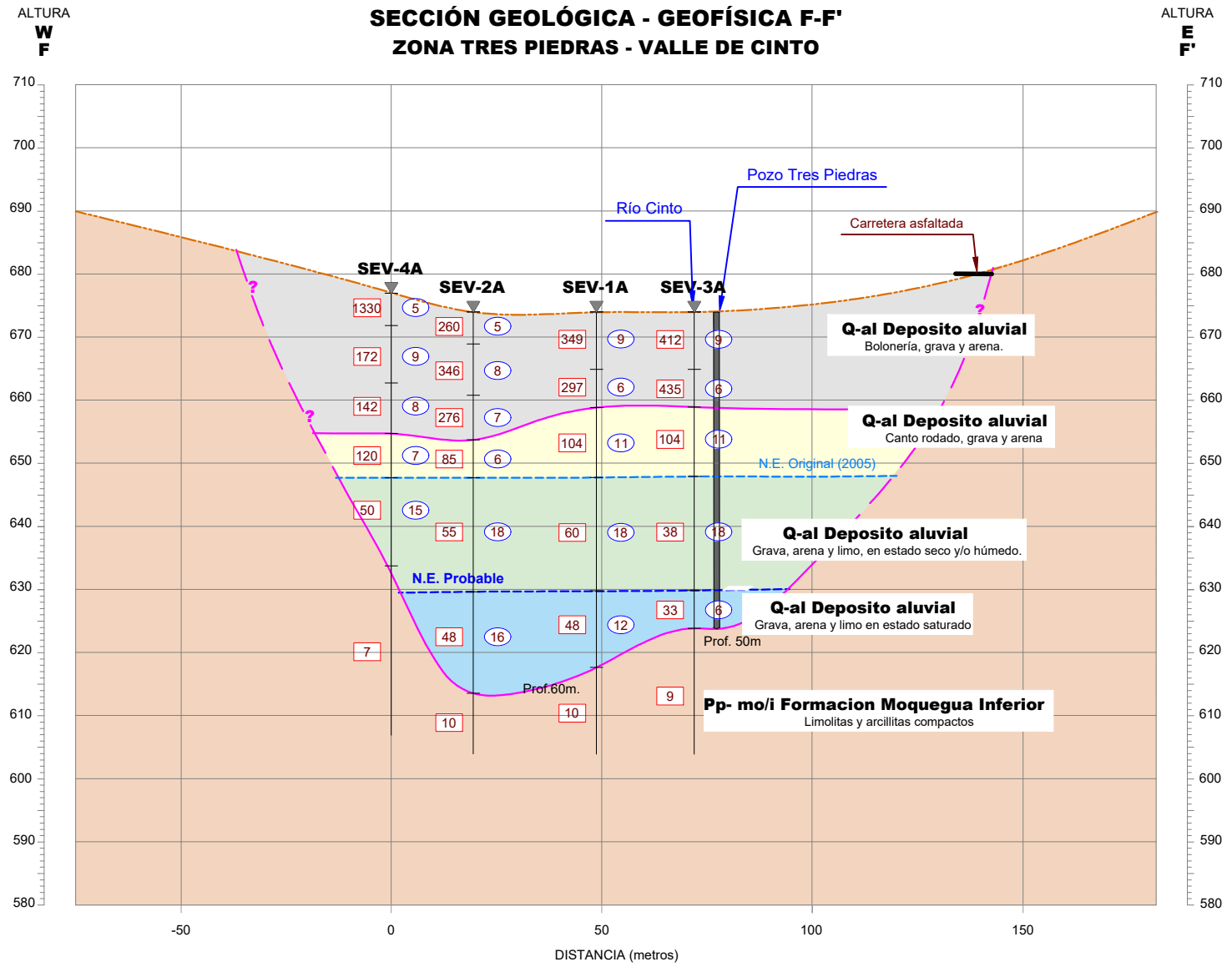
- SEV-1 — Sondaje Eléctrico Vertical, Pozo Conostoco (Oct. 2024)
- SEV-5 — Sondaje Eléctrico Vertical, Qda. La Machorrita (Feb. 2024)
- SEV-4 — Sondaje Eléctrico Vertical, Pozo reemplazo Conostoco (2012)
- (2) — Espesor (m)
- 40 — Resistividad (Ohm-m)
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- ? Contacto geoeléctrico inferido
- N.E. nivel freático probable

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN E-E' ZONA BAJA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/2,000 V 1/1,000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-05

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA F-F'
ZONA TRES PIEDRAS - VALLE DE CINTO



LEYENDA

- Bolonería, grava y arena, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Canto rodado, grava y arena, en estado seco. Buena permeabilidad.
- Grava, arena y limo, en estado seco y/o húmedo. Regular permeabilidad.
- **ACUIFERO.** Grava, arena y limo, en estado saturado. Regular permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

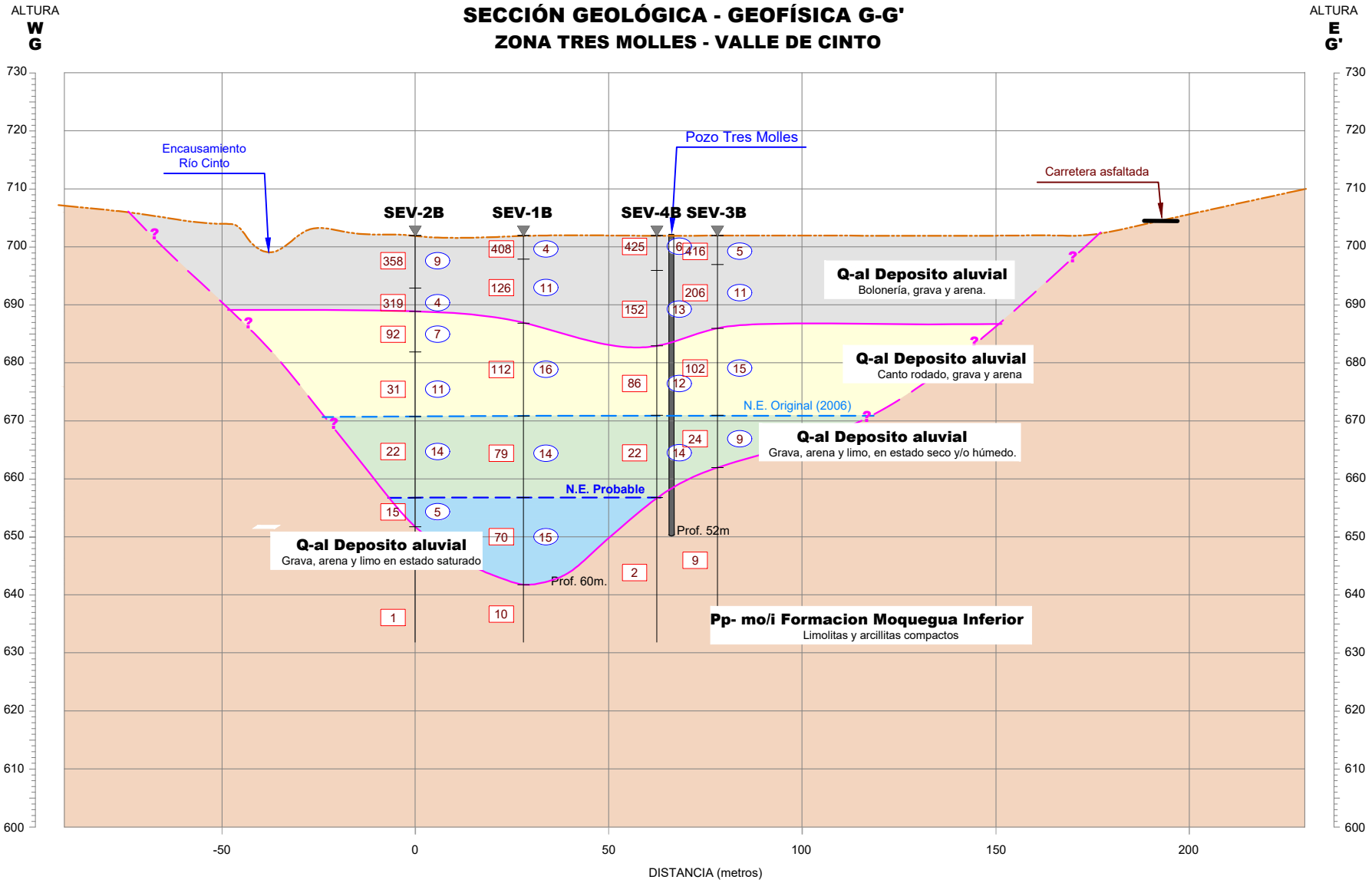
- SEV-1 — Sondaje Eléctrico Vertical Zona Tres Molles (OCT 2024)
- (2) — Espesor (m)
- 40 — Resistividad (Ohm-m)
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- ? Contacto geoeléctrico inferido
- N.E. nivel freático probable

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN F-F' ZONA BAJA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/2,000 V 1/1,000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-06

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA G-G'
ZONA TRES MOLLES - VALLE DE CINTO



LEYENDA

- Bolonería, grava y arena, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Canto rodado, grava y arena, en estado seco. Buena permeabilidad.
- Grava, arena y limo, en estado seco y/o húmedo. Regular permeabilidad.
- **ACUIFERO.** Grava, arena y limo, en estado saturado. Regular permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

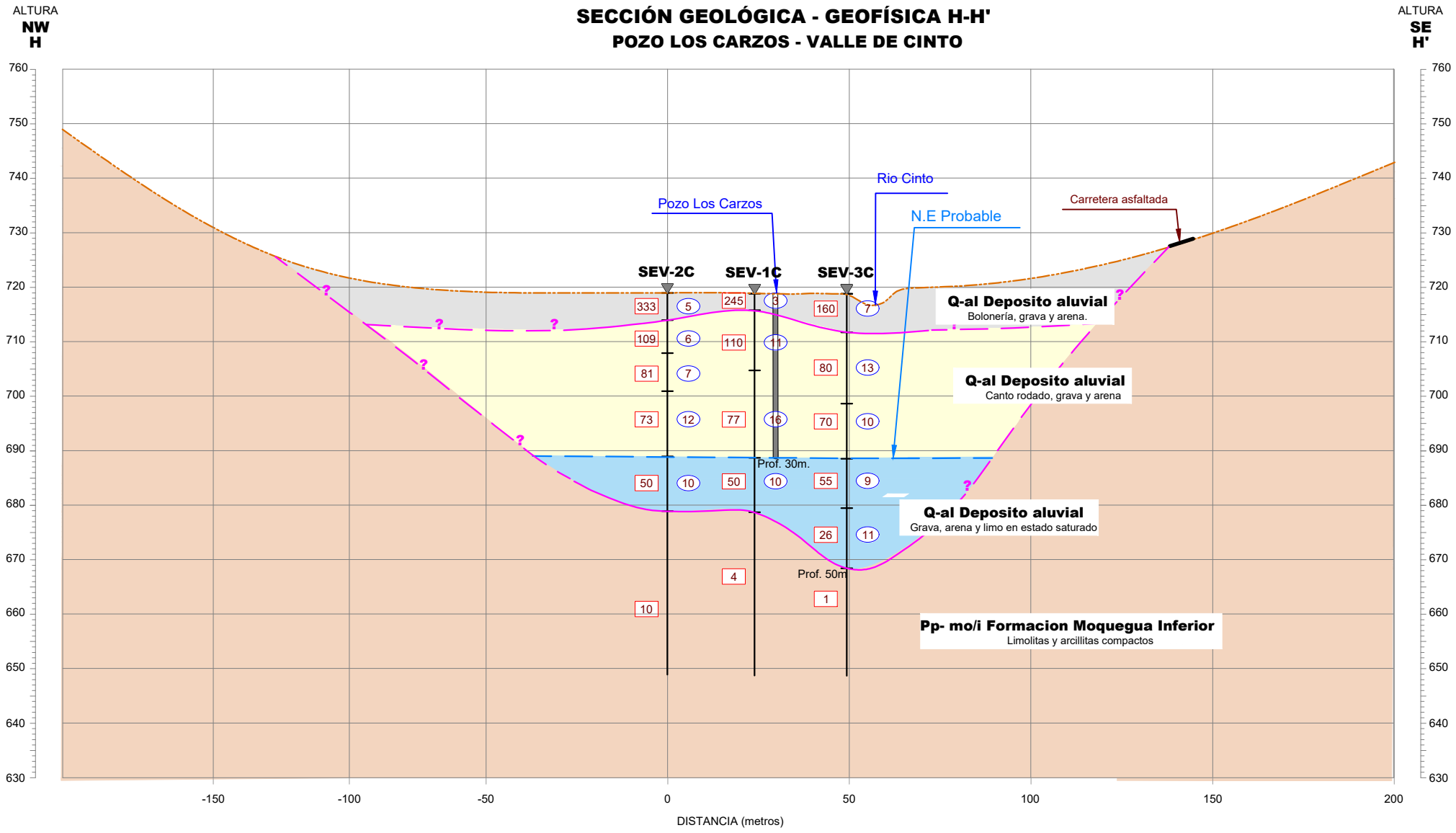
- SEV-1 — Sondaje Eléctrico Vertical Zona Tres Molles (OCT 2024)
- (2) — Espesor (m)
- 40 — Resistividad (Ohm-m)
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- ? Contacto geoeléctrico inferido
- N.E. nivel freático probable

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN G-G' ZONA BAJA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/2,000 V 1/1,000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-07

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA H-H'
POZO LOS CARZOS - VALLE DE CINTO



LEYENDA

- Bolonería, grava y arena, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Canto rodado, grava y arena, en estado seco. Buena permeabilidad.
- **ACUIFERO.** Grava, arena y limo, en estado saturado. Regular permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

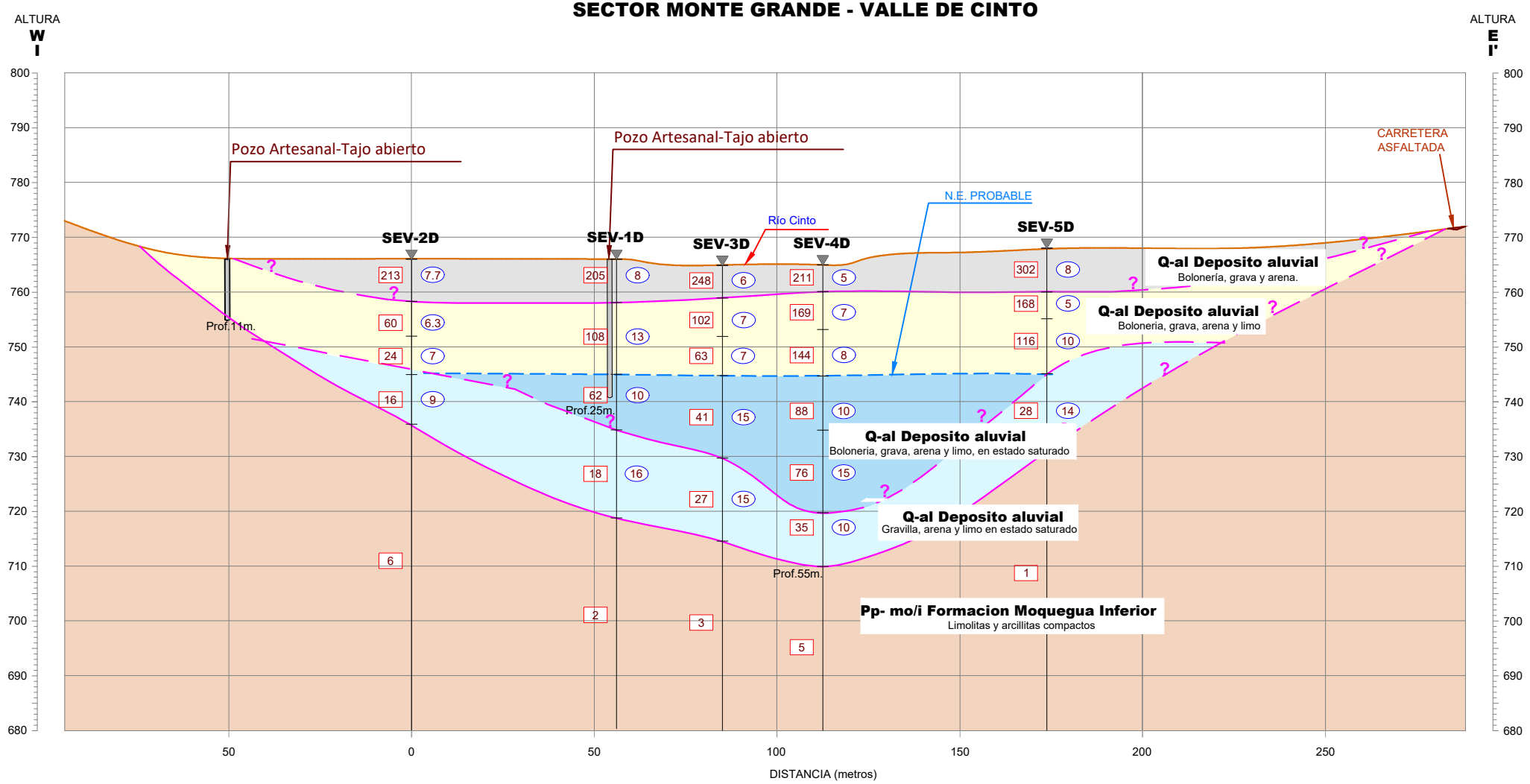
- SEV-1 — Sondaje Eléctrico Vertical Los Carzos (2024)
- (2) — Espesor (m)
- 40 — Resistividad (Ohm-m)
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- Contacto geoeléctrico inferido
- N.E. nivel freático probable

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN H-H' ZONA BAJA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/2,000 V 1/1,000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-08

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA I-I'
SECTOR MONTE GRANDE - VALLE DE CINTO



LEYENDA

- Boloneria, arena y grava, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Boloneria, grava, arena y limo, en estado seco. Buena permeabilidad.
- **ACUIFERO:** Boloneria, grava, arena y limo, saturado.Buena permeabilidad.
- **ACUIFERO:** Gravilla, arena y limo, saturado. Regular a baja permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

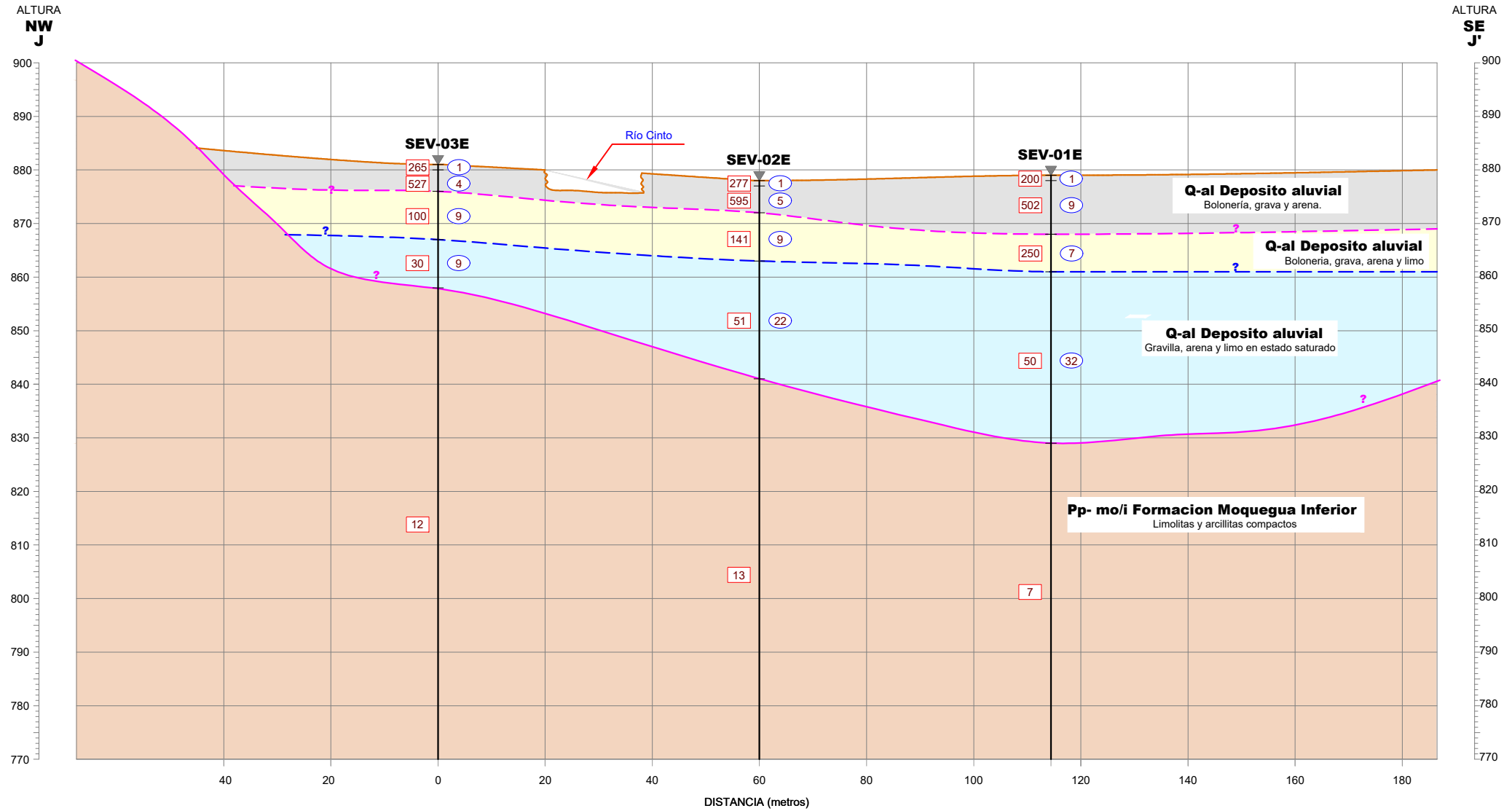
- SEV-1 — Sondaje Eléctrico Vertical (2023)
- (2) — Espesor (m)
- 40 — Resistividad (Ohm-m)
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- Contacto geoeléctrico inferido
- N.E. nivel freático probable

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN I-I' ZONA BAJA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/2,000 V 1/1,000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-09

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA J-J'
PARCELA ANDRES CHAMBILLA - SECTOR CHIRONTA - CINTO



LEYENDA

- Bolonería, arena y grava, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Bolonería, grava, arena y limo, en estado seco. Buena permeabilidad.
- **ACUIFERO:** Gravilla, arena y limo, saturado. Regular a baja permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

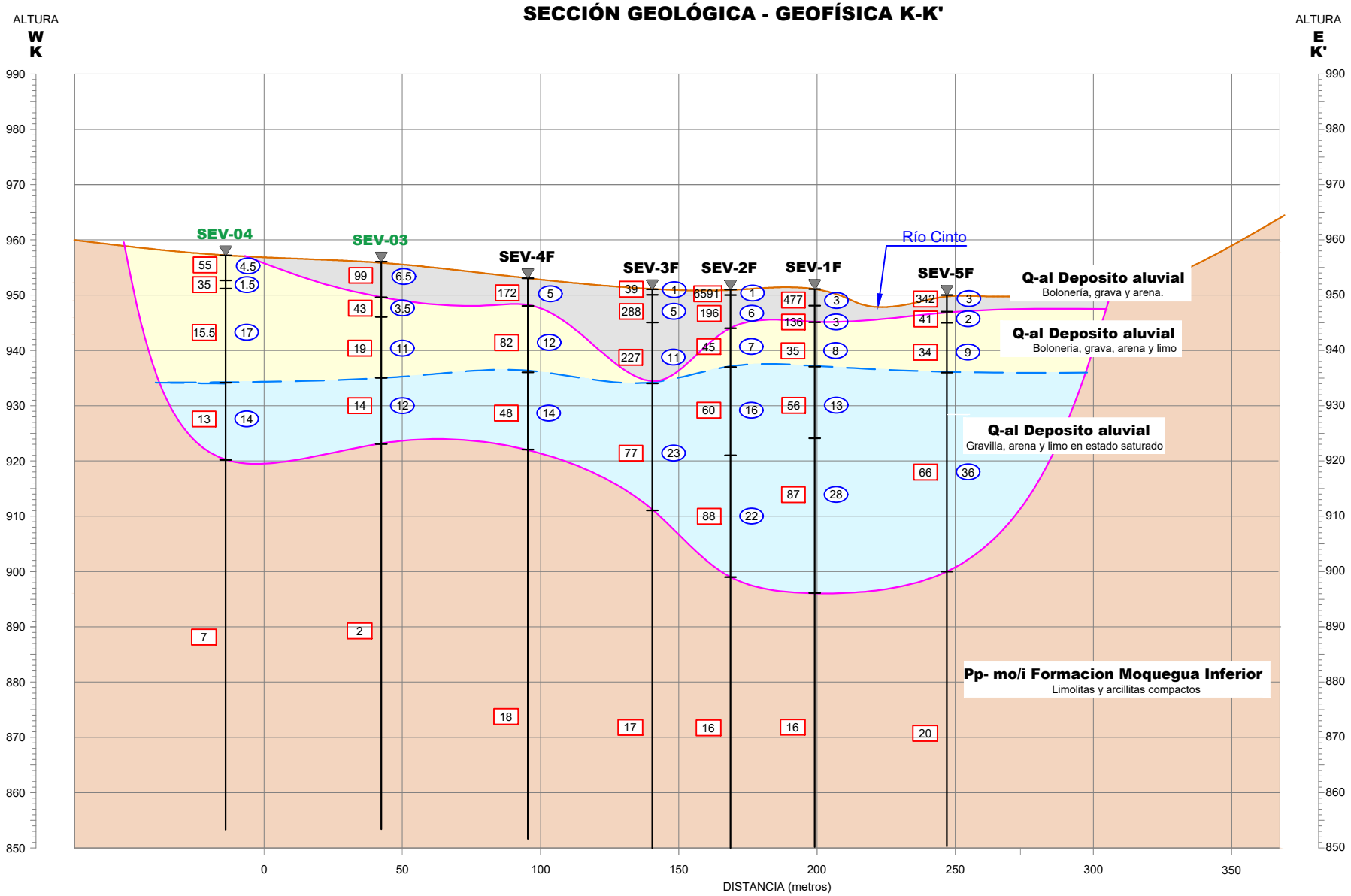
- SEV-1 ▽ Sondaje Eléctrico Vertical (2016)
- (2) Espesor (m)
- 40 Resistividad (Ohm-m)
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- ? Contacto geoeléctrico inferido
- N.E. nivel freático probable

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN J-J' ZONA MEDIA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/22,500 V 1/2,000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-10

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA K-K'



LEYENDA

- Boloneria, arena y grava, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Boloneria, grava, arena y limo, en estado seco. Buena permeabilidad.
- **ACUIFERO:** Gravilla, arena y limo, saturado. Regular a baja permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

- SEV-1 ▽ Sondaje Eléctrico Vertical (2016)
- SEV-1 ▽ Sondaje Eléctrico Vertical (2020)
- (2) Espesor (m)
- 40 Resistividad (Ohm-m)
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- ? Contacto geoeléctrico inferido
- N.E. nivel freático probable

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN K-K' ZONA MEDIA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/22,500 V 1/2,000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-11

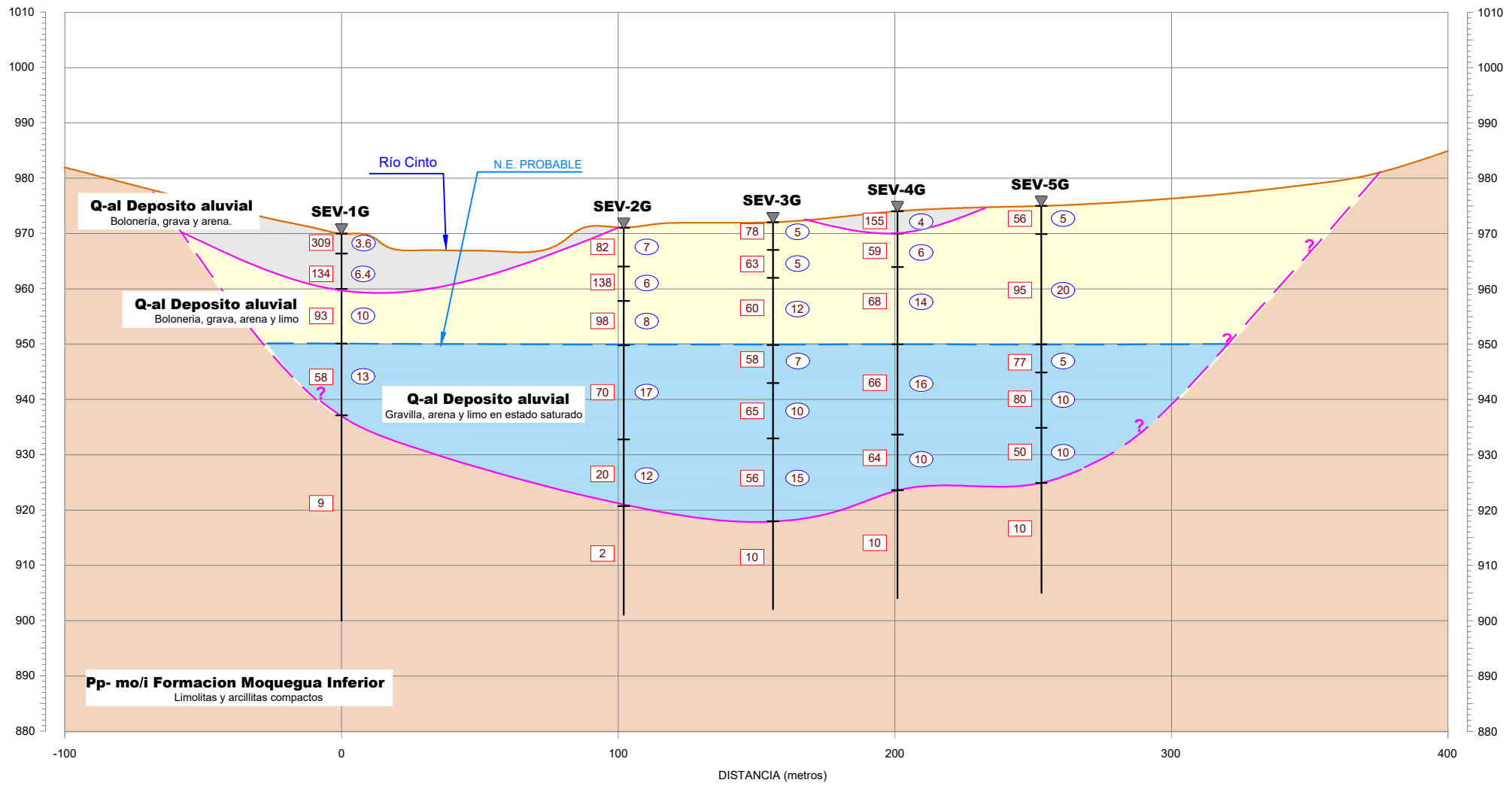
ALTURA

W
L

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA L-L'
TERRENO SR. OWEN CHACOLLA - VALLE CINTO - LOCUMBA

ALTURA

E
L'



LEYENDA

- Boloneria, arena y grava, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Boloneria, grava, arena y limo, en estado seco. Buena permeabilidad.
- **ACUIFERO:** Gravilla, arena y limo, saturado. Regular a baja permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

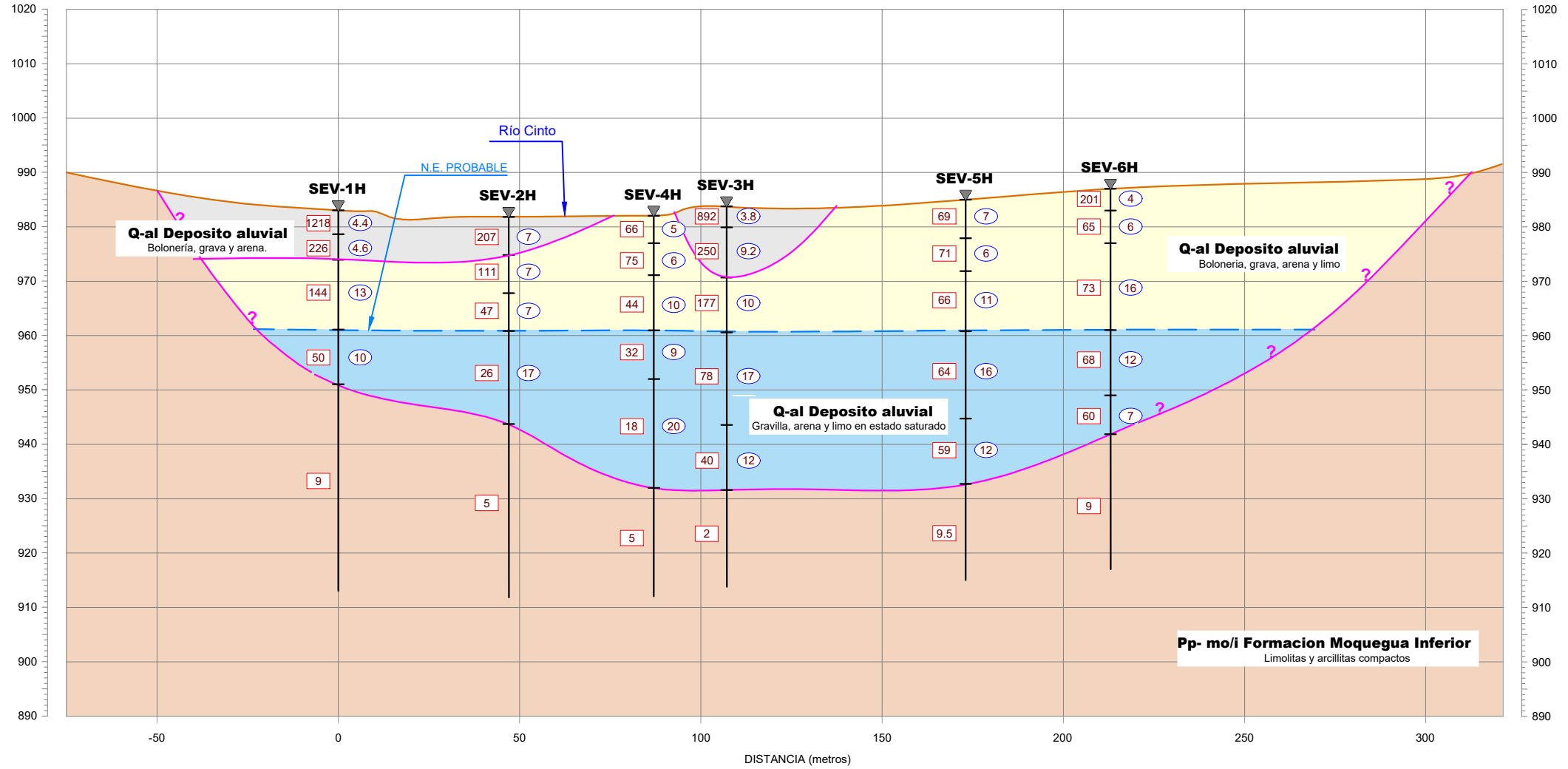
- SEV-1 — Sondaje Eléctrico Vertical (2024)
- (2) — Espesor (m)
- 40 — Resistividad (Ohm-m)
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- Contacto geoeléctrico inferido
- N.E. nivel freático probable

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN L-L' ZONA MEDIA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/1,500 V 1/1,000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-12

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA M-M'
TERRENO SRA. MILAGROS - VALLE CINTO - LOCUMBA



LEYENDA

- Boloneria, arena y grava, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Boloneria, grava, arena y limo, en estado seco. Buena permeabilidad.
- **ACUIFERO:** Gravilla, arena y limo, saturado. Regular a baja permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

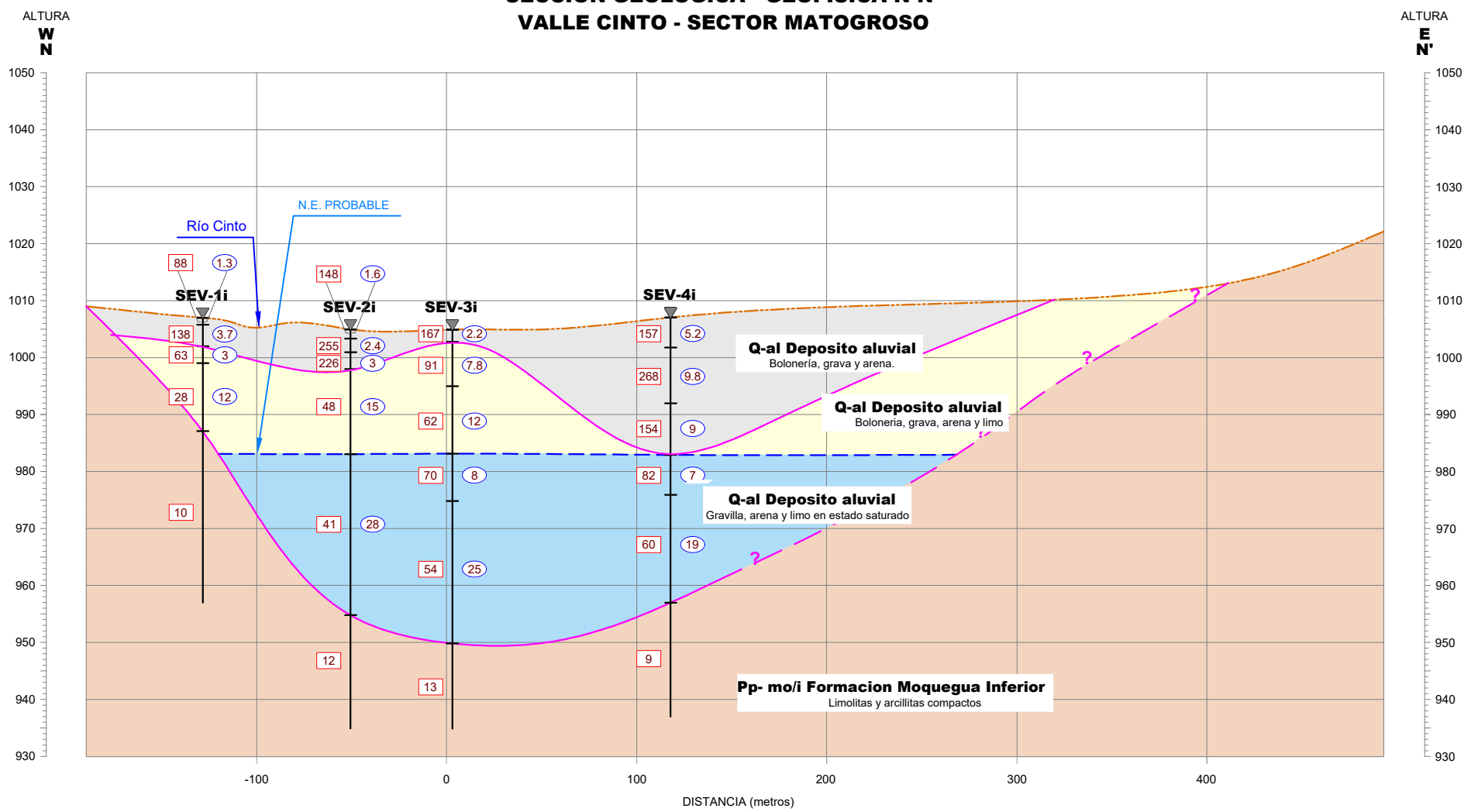
- SEV-1 — Sondaje Eléctrico Vertical (2024)
- (2) — Espesor (m)
- 40 — Resistividad (Ohm-m)
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- Contacto geoeléctrico inferido
- N.E. nivel freático probable

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN M-M' ZONA MEDIA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/1,500 V 1/1,000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-13

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA N-N'
VALLE CINTO - SECTOR MATOGROSO



LEYENDA

- Boloneria, arena y grava, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Boloneria, grava, arena y limo, en estado seco. Buena permeabilidad.
- **ACUIFERO:** Gravilla, arena y limo, saturado. Regular a baja permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

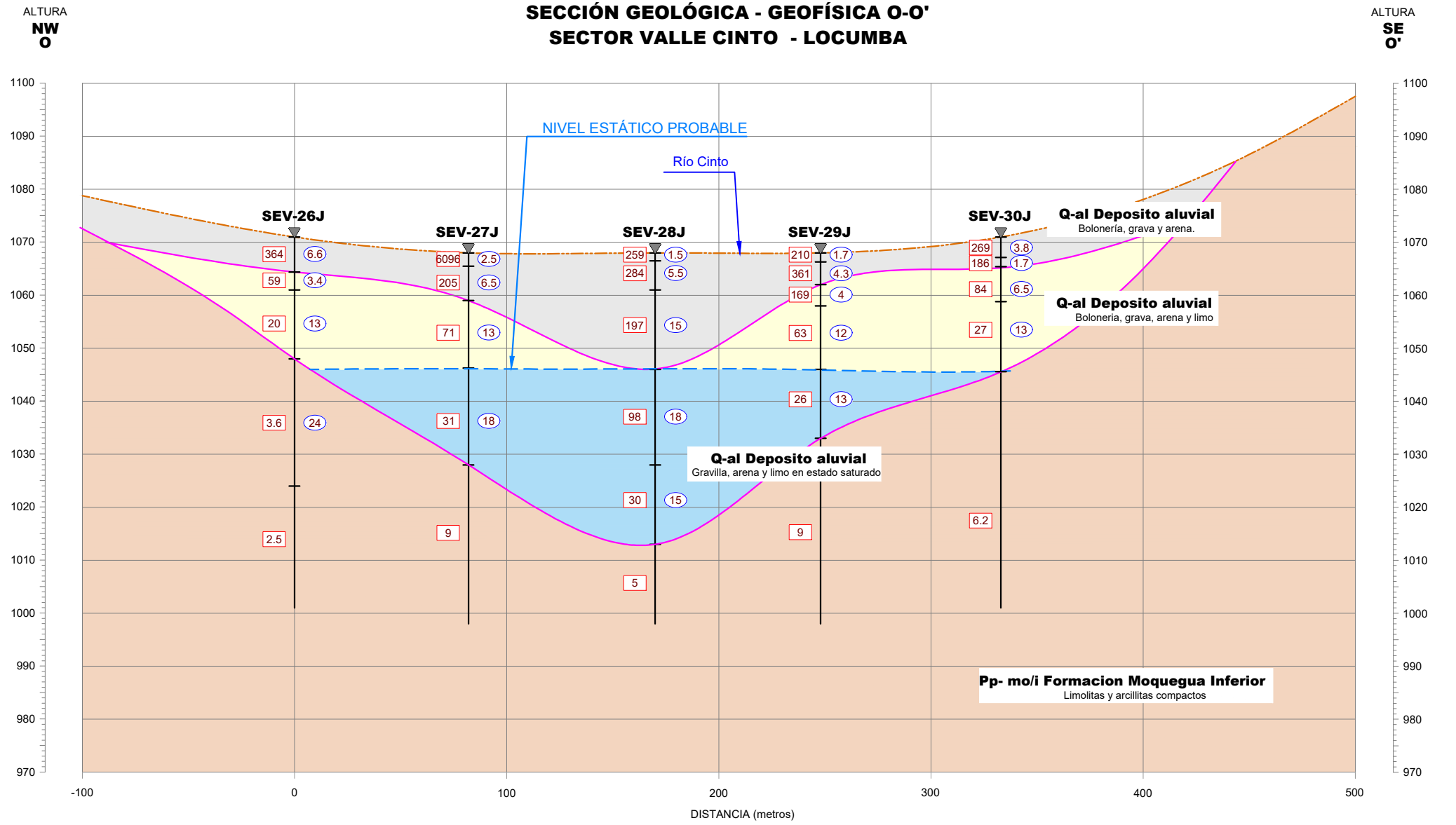
- SEV-1 — Sondaje Eléctrico Vertical (Enero 2024)
- (2) — Espesor (m)
- 40 — Resistividad (Ohm-m)
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- ? Contacto geoeléctrico inferido
- N.E. nivel freático probable

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN N-N' ZONA ALTA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/3,000 V 1/1,000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-14

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA O-O'
SECTOR VALLE CINTO - LOCUMBA



LEYENDA

- Boloneria, arena y grava, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Boloneria, grava, arena y limo, en estado seco. Buena permeabilidad.
- **ACUIFERO:** Gravilla, arena y limo, saturado. Regular a baja permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

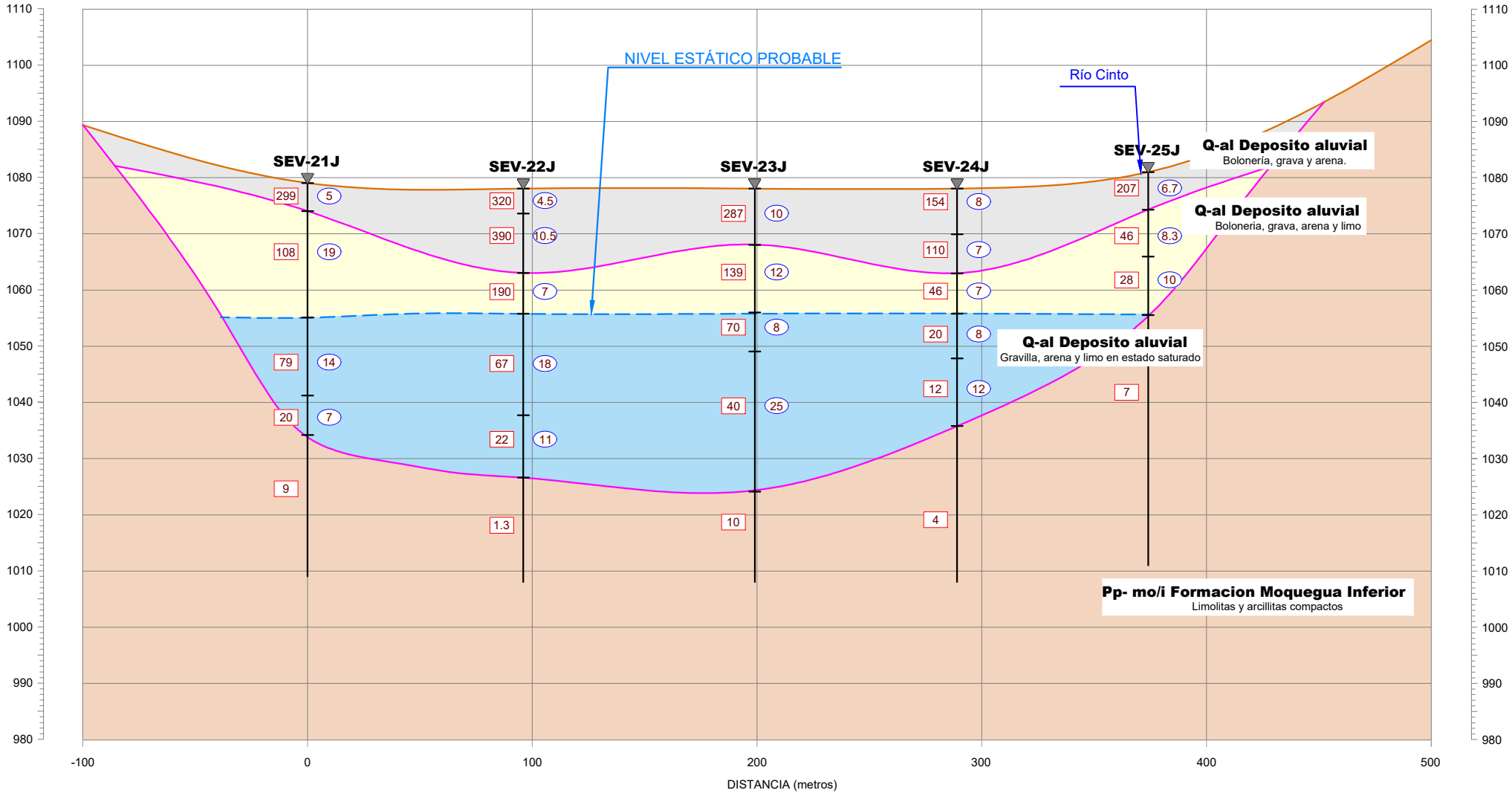
- SEV-1 — Sondaje Eléctrico Vertical (Febrero 2024)
- (2) — Espesor (m)
- 40 — Resistividad (Ohm-m)
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- ? Contacto geoeléctrico inferido
- N.E. nivel freático probable

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN O-O' ZONA ALTA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/2,500 V 1/1,000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-15

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA P-P'
SECTOR VALLE CINTO - LOCUMBA



LEYENDA

- Boloneria, arena y grava, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Boloneria, grava, arena y limo, en estado seco. Buena permeabilidad.
- **ACUIFERO:** Gravilla, arena y limo, saturado. Regular a baja permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

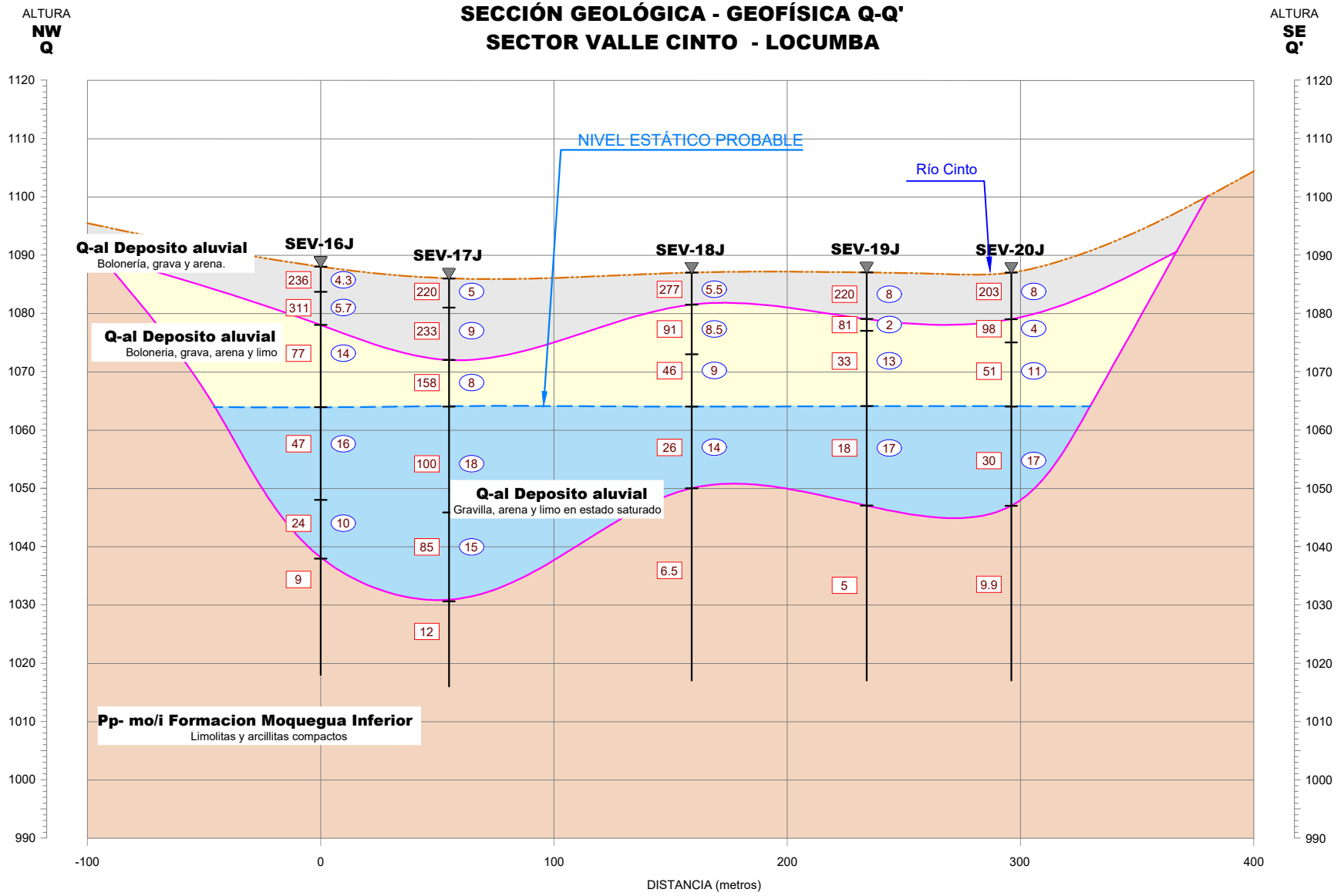
- SEV-1 ▽ Sondaje Eléctrico Vertical (Febrero 2024)
- (2) Espesor (m)
- 40 Resistividad (Ohm-m)
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- ? Contacto geoeléctrico inferido
- N.E. nivel freático probable

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN P-P' ZONA ALTA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/2,500 V 1/1,000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-16

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA Q-Q'
SECTOR VALLE CINTO - LOCUMBA



LEYENDA

- Boloneria, arena y grava, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Boloneria, grava, arena y limo, en estado seco. Buena permeabilidad.
- **ACUIFERO:** Gravilla, arena y limo, saturado. Regular a baja permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

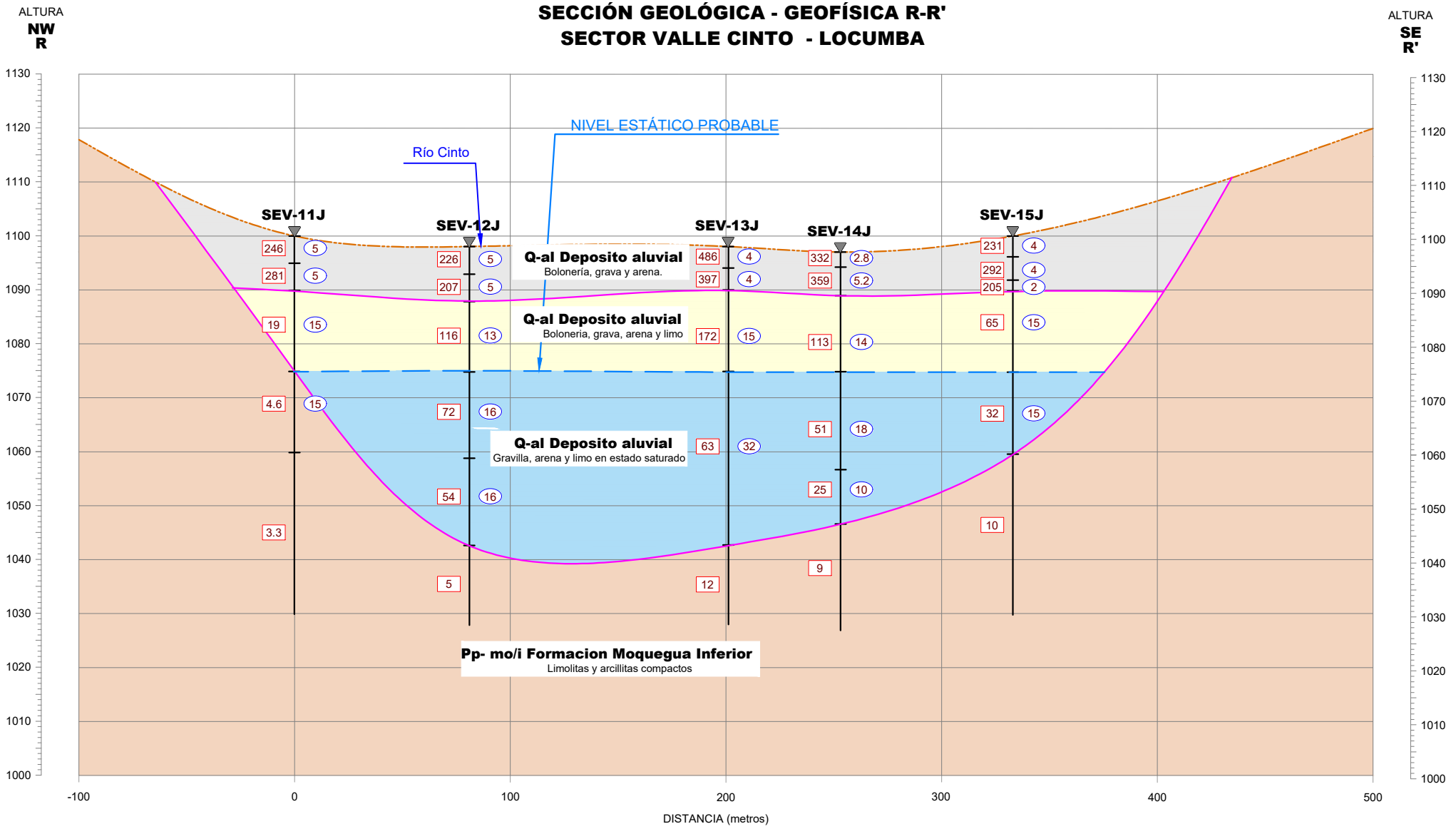
- SEV-1 ▽ Sondaje Eléctrico Vertical (Febrero 2024)
- (2) Espesor (m)
- 40 Resistividad (Ohm-m)
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- ? Contacto geoeléctrico inferido
- N.E. nivel freático probable

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN Q-Q' ZONA ALTA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/2,500 V 1/1,000	MAYO- 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-17

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA R-R'
SECTOR VALLE CINTO - LOCUMBA



LEYENDA

- Boloneria, arena y grava, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Boloneria, grava, arena y limo, en estado seco. Buena permeabilidad.
- **ACUIFERO:** Gravilla, arena y limo, saturado. Regular a baja permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

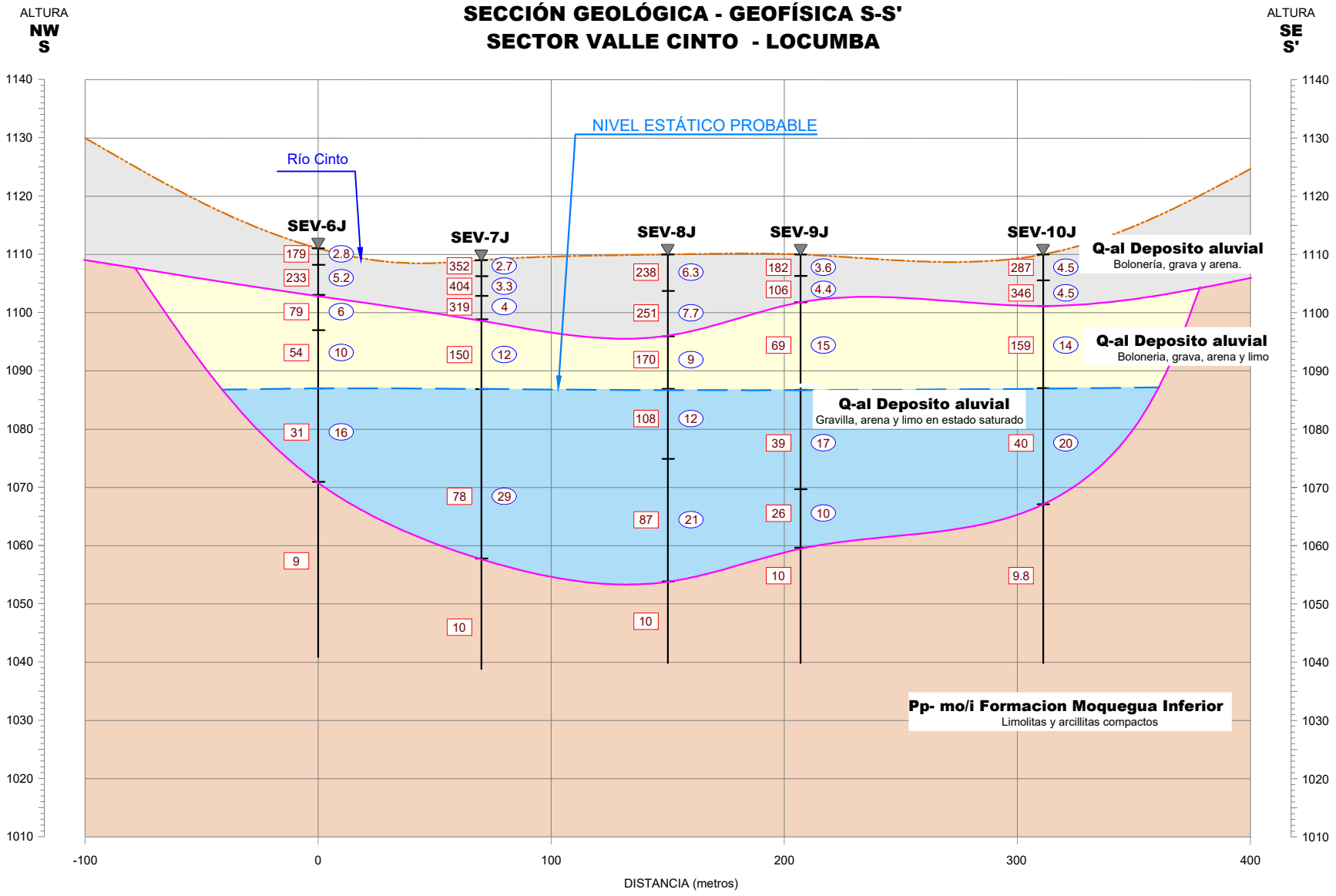
- SEV-1 ▽ Sondaje Eléctrico Vertical (Febrero 2024)
- (2) Espesor (m)
- 40 Resistividad (Ohm-m)
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- ? Contacto geoeléctrico inferido
- N.E. nivel freático probable

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN R-R' ZONA ALTA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/2,500 V 1/1,000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-18

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA S-S'
SECTOR VALLE CINTO - LOCUMBA



LEYENDA

- Boloneria, arena y grava, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Boloneria, grava, arena y limo, en estado seco. Buena permeabilidad.
- **ACUIFERO:** Gravilla, arena y limo, saturado. Regular a baja permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

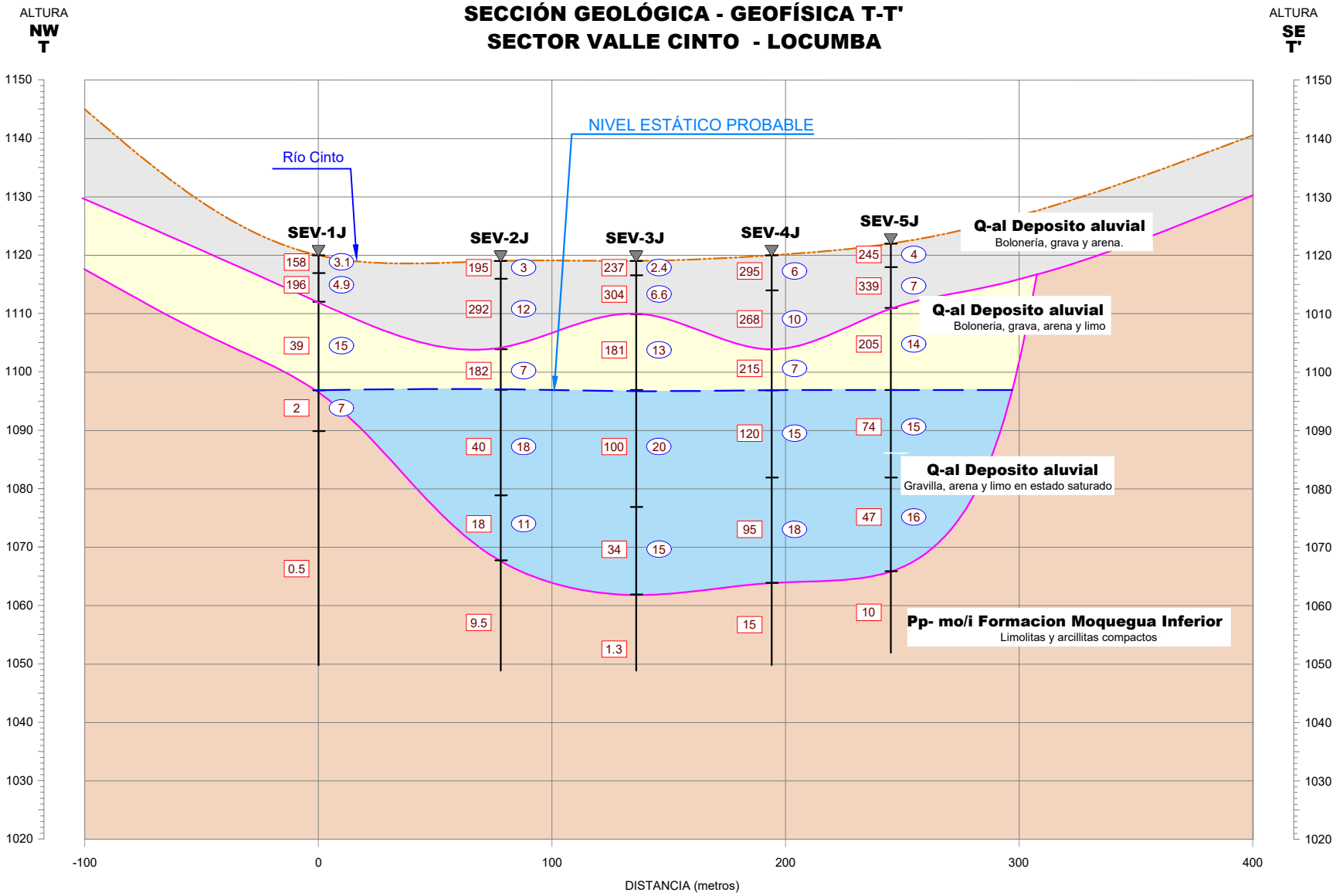
- SEV-1 ▽ Sondaje Eléctrico Vertical (Febrero 2024)
- (2) Espesor (m)
- 40 Resistividad (Ohm-m)
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- ? Contacto geoeléctrico inferido
- N.E. nivel freático probable

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN S-S' ZONA ALTA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/2,500 V 1/1,000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-19

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA T-T'
SECTOR VALLE CINTO - LOCUMBA



LEYENDA

- Boloneria, arena y grava, en estado seco. Muy buena permeabilidad.
- Boloneria, grava, arena y limo, en estado seco. Buena permeabilidad.
- **ACUIFERO:** Gravilla, arena y limo, saturado. Regular a baja permeabilidad.
- **BASAMENTO IMPERMEABLE.** Limolitas y arcillitas compactos de la formacion Moquegua, en estado seco. Impermeable.

SIMBOLOGÍA

- SEV-1 — Sondaje Eléctrico Vertical (Febrero 2024)
- (2) — Espesor (m)
- 40 — Resistividad (Ohm-m)
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- ? Contacto geoeléctrico inferido
- N.E. nivel freático probable

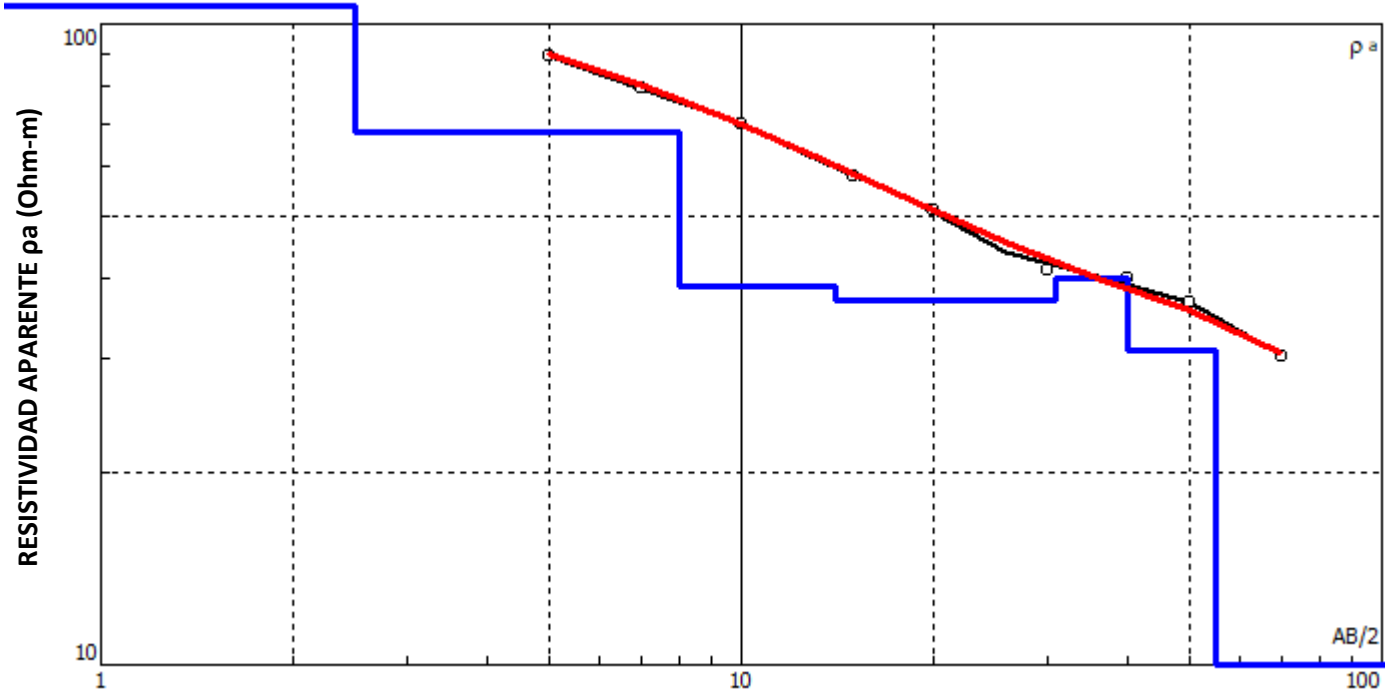
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

TÍTULO:	CARACTERIZACION Y MODELO HIDROGEOLOGICO 2D PARA LA DETERMINACION DE LA GEOMETRIA DEL ACUIFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA
TÍTULO DEL GRAFICO	SECCIÓN T-T' ZONA ALTA

ESCALA:	FECHA:	PRESENTADO POR:	ESCALAS	MAPA:
H 1/2,500 V 1/1,000	MAYO - 2026	L. PECHO V.	GRAFICAS	S-20

ANEXOS 4
Gráficos de interpretación cuantitativa de los sondajes eléctricos verticales – SEV´S PARAMÉTRICOS

SEV-1 PARAMETRICO CONOSTOCO



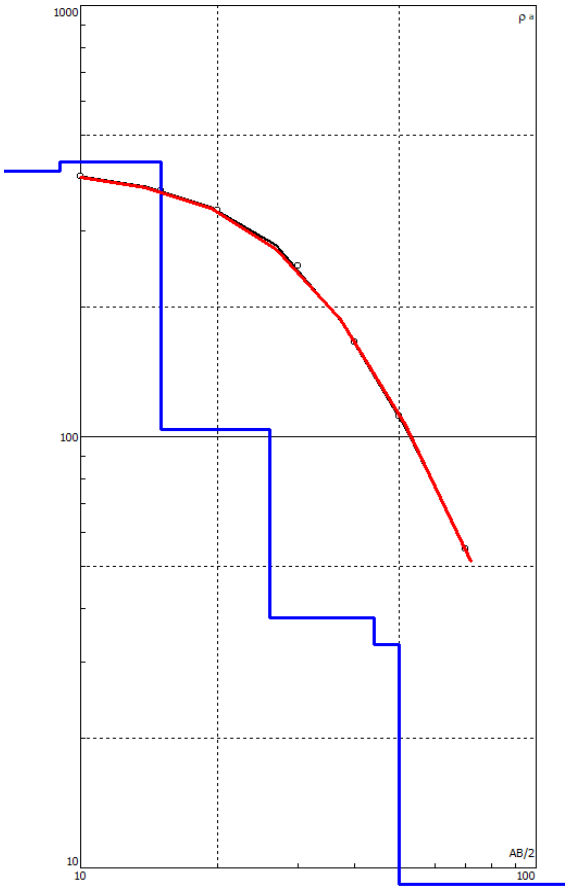
N	ρ	h	d	Alt
1	107	2.5	2.5	-2.5
2	68	5.5	8	-8
3	39	6	14	-14
4	37	17	31	-31
5	40	9	40	-40
6	31	15	55	-55
7	10			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA - PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA	**SEV-1**
GRÁFICOS DE LA INTERPRETACIÓN CUANTITATIVA DE SONDAJES ELÉCTRICOS VERTICALES	**UBICACIÓN** Reg.: Tacna Prov.: J. Basadre Dist.: Locumba
ELABORADO: Bach Linda Luz Pecho Vasquez	
FECHA: MAYO - 2026	

SEV-3A PARAMETRICO TRES PIEDRAS



RESISTIVIDAD APARENTE ρa (Ohm-m)

DISTANCIA AB/2 (m)

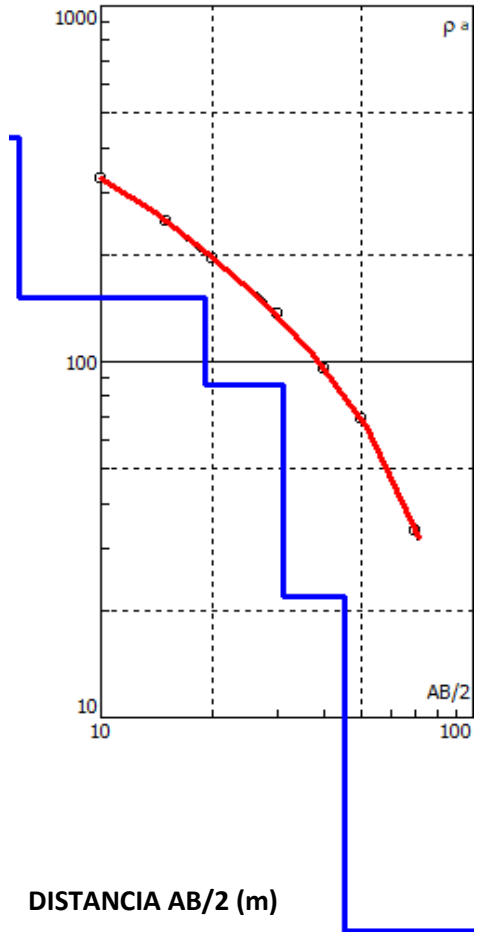
N	ρ	h	d	Alt
1	412	9	9	-9
2	435	6	15	-15
3	104	11	26	-26
4	38	18	44	-44
5	33	6	50	-50
6	9			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA - PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA	**SEV-3A**
GRÁFICOS DE LA INTERPRETACIÓN CUANTITATIVA DE SONDAJES ELÉCTRICOS VERTICALES	**UBICACIÓN** Reg.: Tacna Prov.: J. Basadre Dist.: Locumba
ELABORADO: Bach Linda Luz Pecho Vasquez	
FECHA: MAYO - 2026	

SEV-4B PARAMETRICO TRES MOLLES



RESISTIVIDAD APARENTE ρa (Ohm-m)

DISTANCIA AB/2 (m)

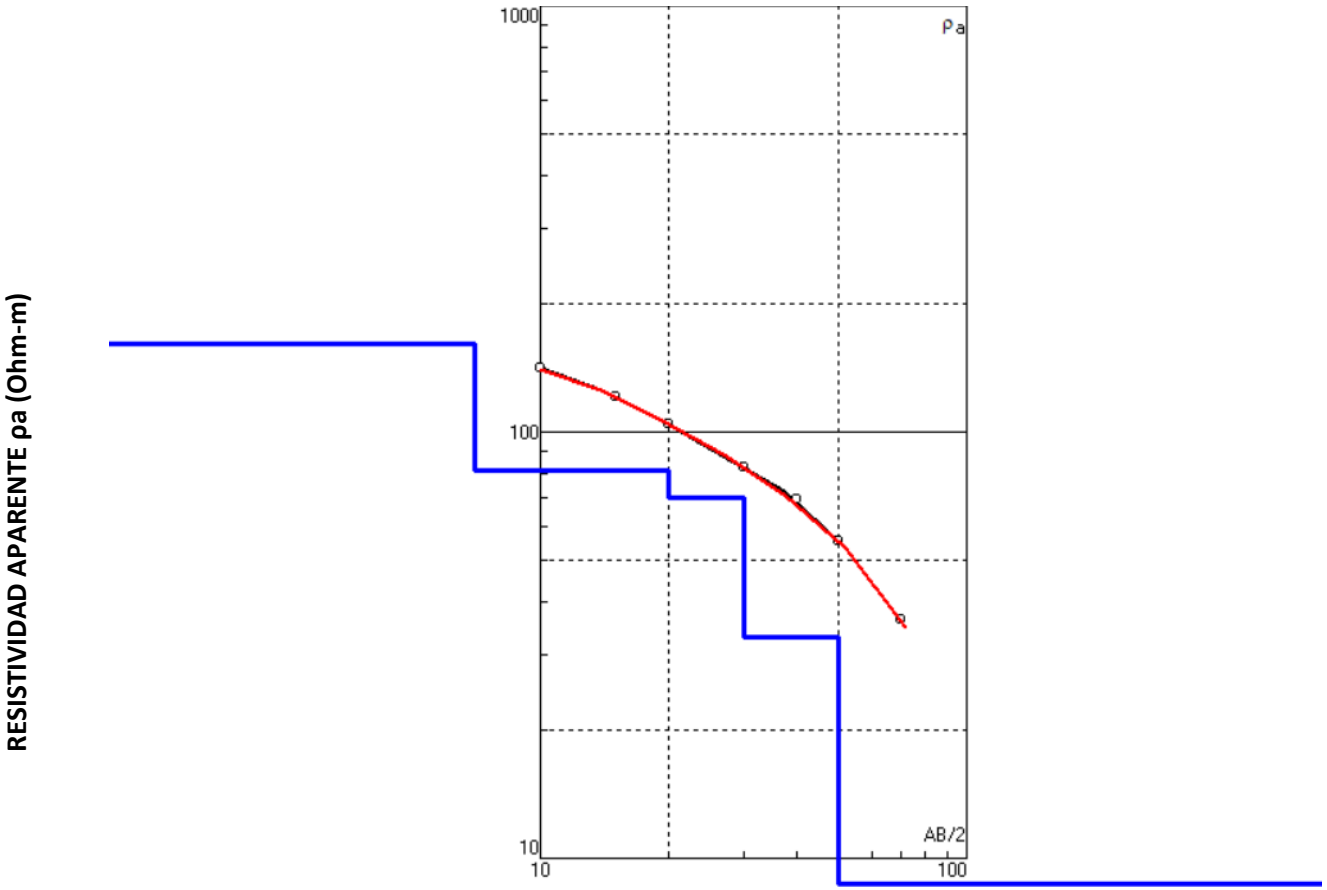
N	ρ	h	d	Alt
1	425	6	6	-6
2	152	13	19	-19
3	86	12	31	-31
4	22	14	45	-45
5	2			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA - PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA	**SEV-4B**
GRÁFICOS DE LA INTERPRETACIÓN CUANTITATIVA DE SONDAJES ELÉCTRICOS VERTICALES	**UBICACIÓN** Reg.: Tacna Prov.: J. Basadre Dist.: Locumba
ELABORADO: Bach Linda Luz Pecho Vasquez	
FECHA: MAYO - 2026	

SEV-3C PARAMETRICO LOS CARZOS



N	ρ	h	d	Alt
1	161	7	7	-7
2	81	13	20	-20
3	70	10	30	-30
4	33	20	50	-50
5	3			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

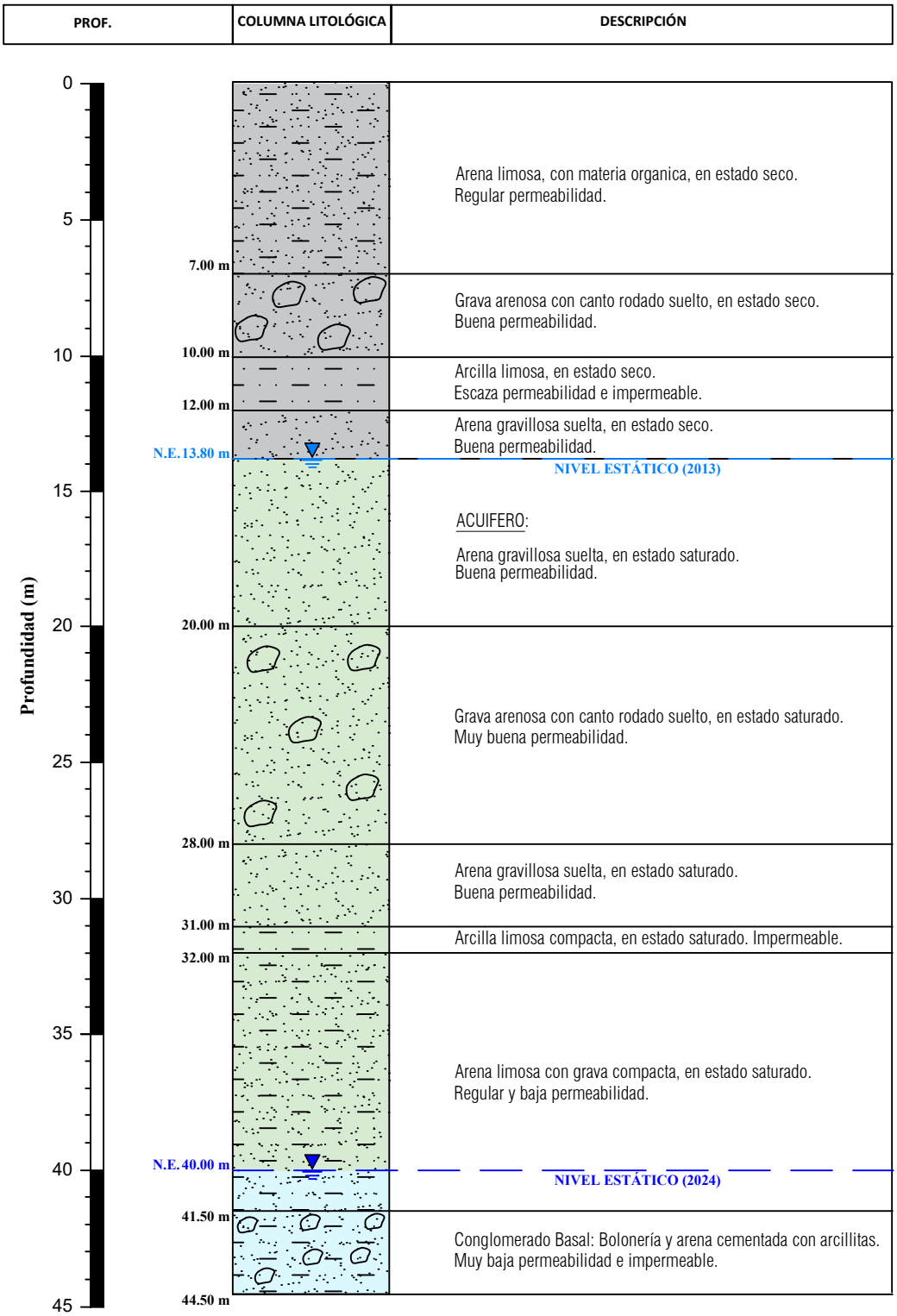
CARACTERIZACIÓN Y MODELO HIDROGEOLÓGICO 2D PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL ACUÍFERO CINTO - DISTRITO DE LOCUMBA - PROVINCIA DE JORGE BASADRE - TACNA	**SEV-3C**	
GRÁFICOS DE LA INTERPRETACIÓN CUANTITATIVA DE SONDAJES ELÉCTRICOS VERTICALES	**UBICACIÓN**	
ELABORADO: Bach Linda Luz Pecho Vasquez	Reg.: Tacna Prov.: J. Basadre Dist.: Locumba	
FECHA: MAYO - 2026		

ANEXOS 5
Registro de perfiles litológicos de pozos

COLUMNA LITOLÓGICA ENCONTRADA
POZO CONOSTOCO

Coordenadas : 314555 E - 8052983 N **Pozo** : POZO DE REEMPLAZO CONOSTOCO

Ubicación : "SECTOR CONOSTOCO" - TACNA - JORGE BASADRE - LOCUMBA

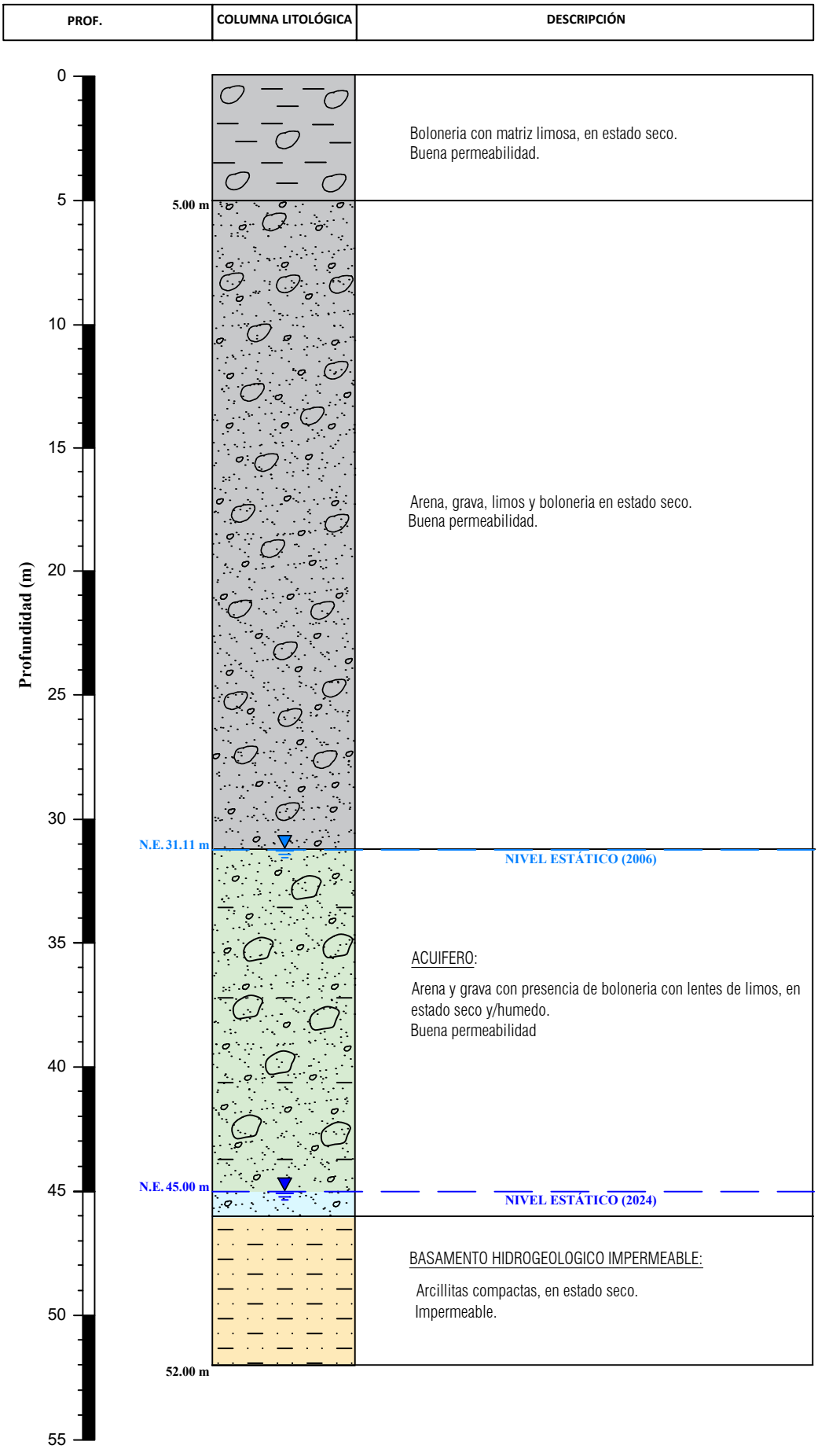


ESCALA: 1/250

COLUMNA LITOLÓGICA ENCONTRADA
POZO TRES MOLLES

Coordenadas : 316040 E - 8055654 N **Pozo :** POZO TRES MOLLES

Ubicación : "SECTOR CINTO" - TACNA - JORGE BASADRE - LOCUMBA

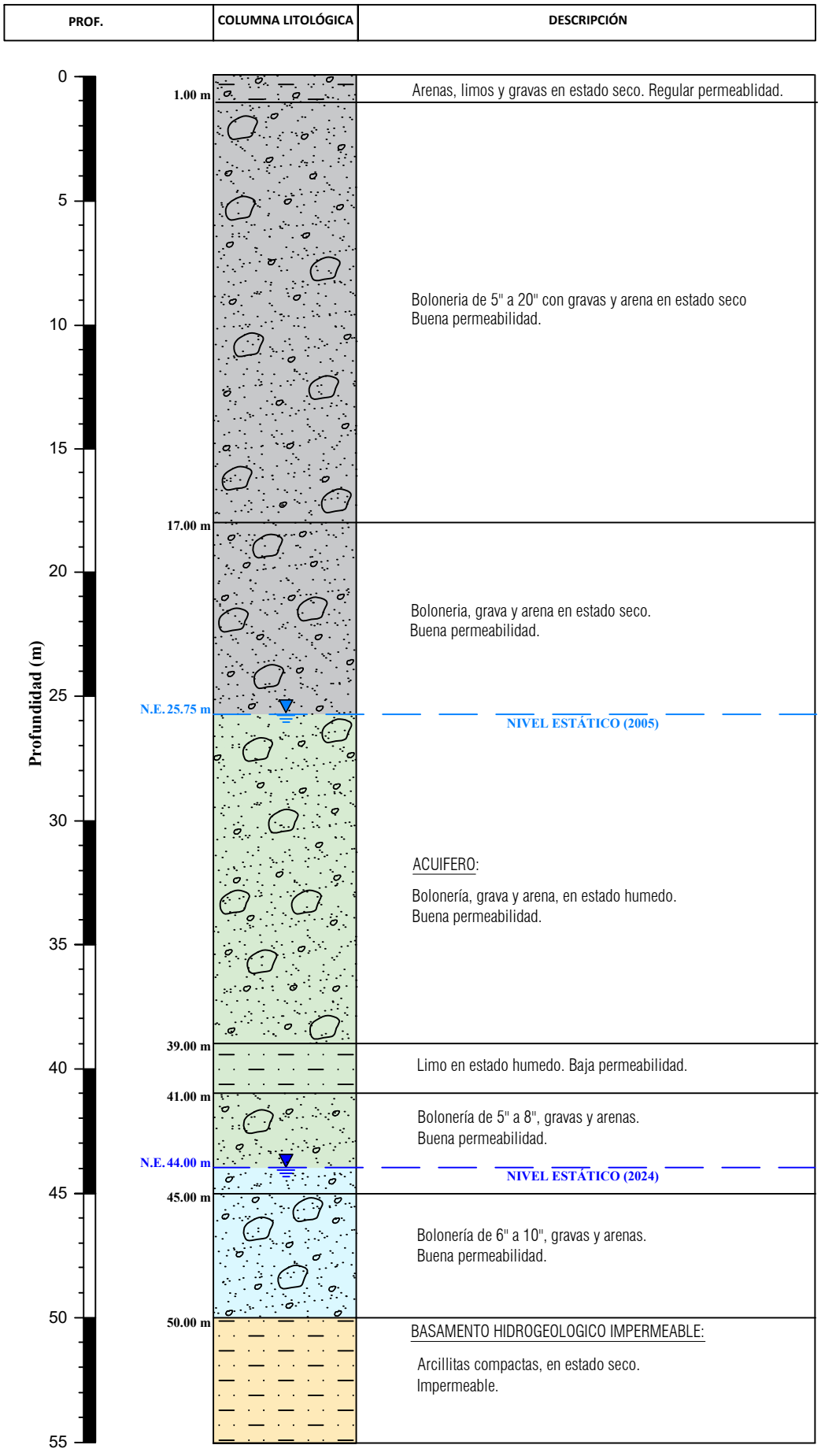


ESCALA: 1/250

COLUMNA LITOLÓGICA ENCONTRADA
POZO TRES PIEDRAS

Coordenadas : 316040 E - 8055654 N **Pozo :** POZO TRES MOLLES

Ubicación : "SECTOR CINTO" - TACNA - JORGE BASADRE - LOCUMBA

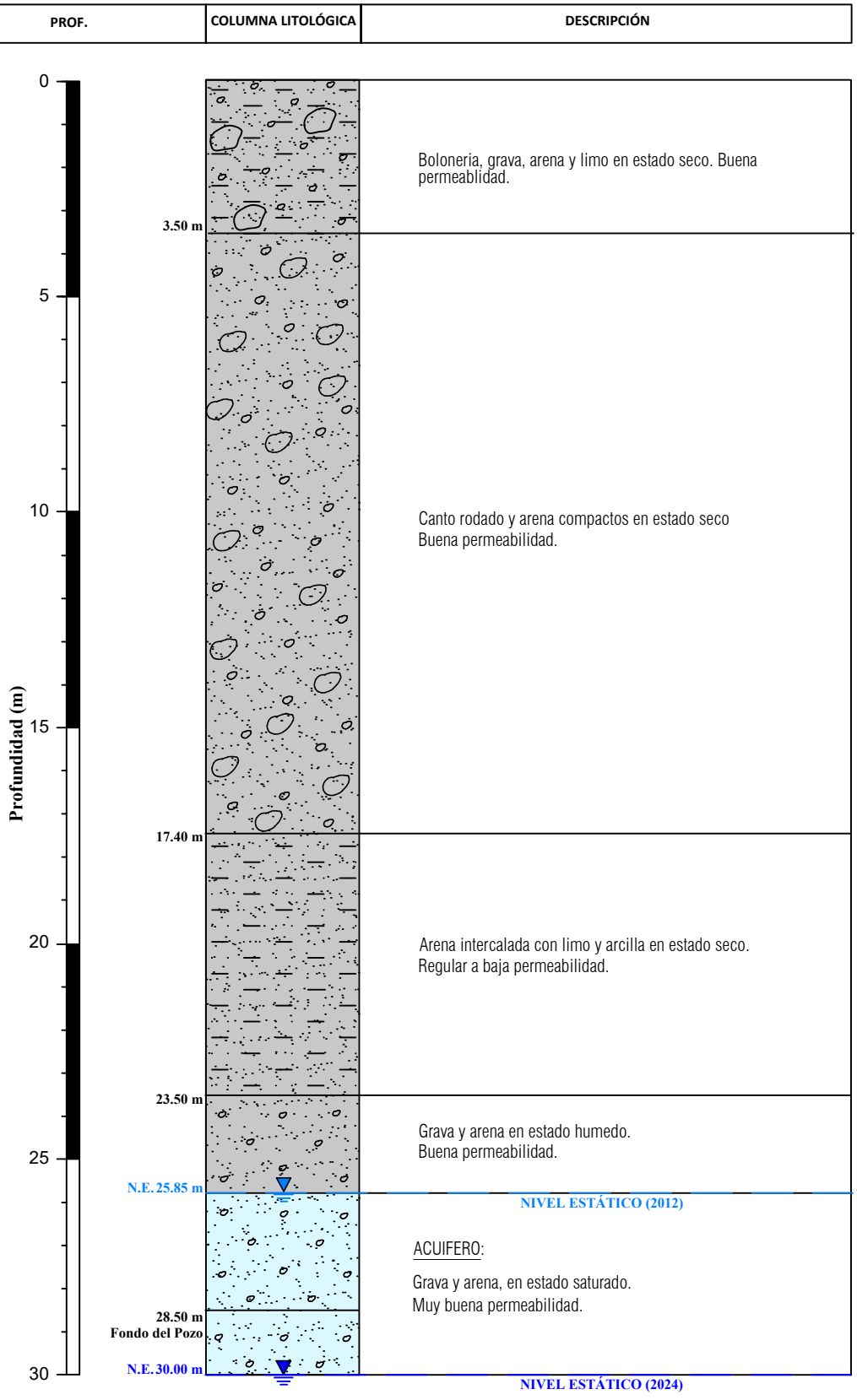


ESCALA: 1/250

COLUMNA LITOLÓGICA ENCONTRADA
POZO MONTE GRANDE Nº3

Coordenadas : 316262 E - 8057993 N **Pozo :** POZO MONTE GRANDE Nº3

Ubicación : "SECTOR CINTO" - TACNA - JORGE BASADRE - LOCUMBA

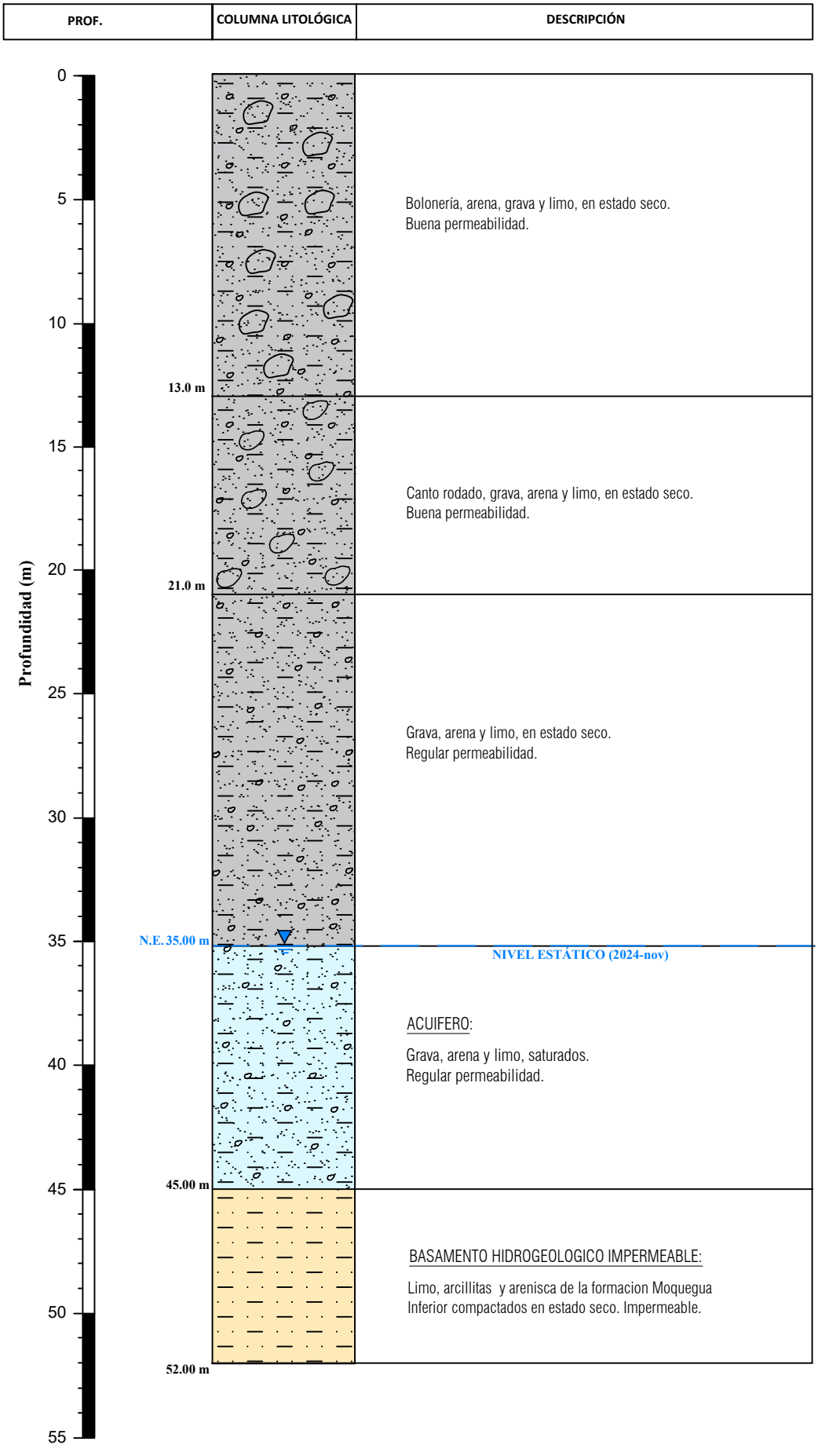


ESCALA: 1/150

COLUMNA LITOLÓGICA ENCONTRADA
POZO DE REEMPLAZO MONTEGRANDE

Coordenadas : 316264 E - 8'057776 N **Pozo :** REEMPLAZO MONTEGRANDE

Ubicación : "SECTOR CINTO" - TACNA - JORGE BASADRE - LOCUMBA

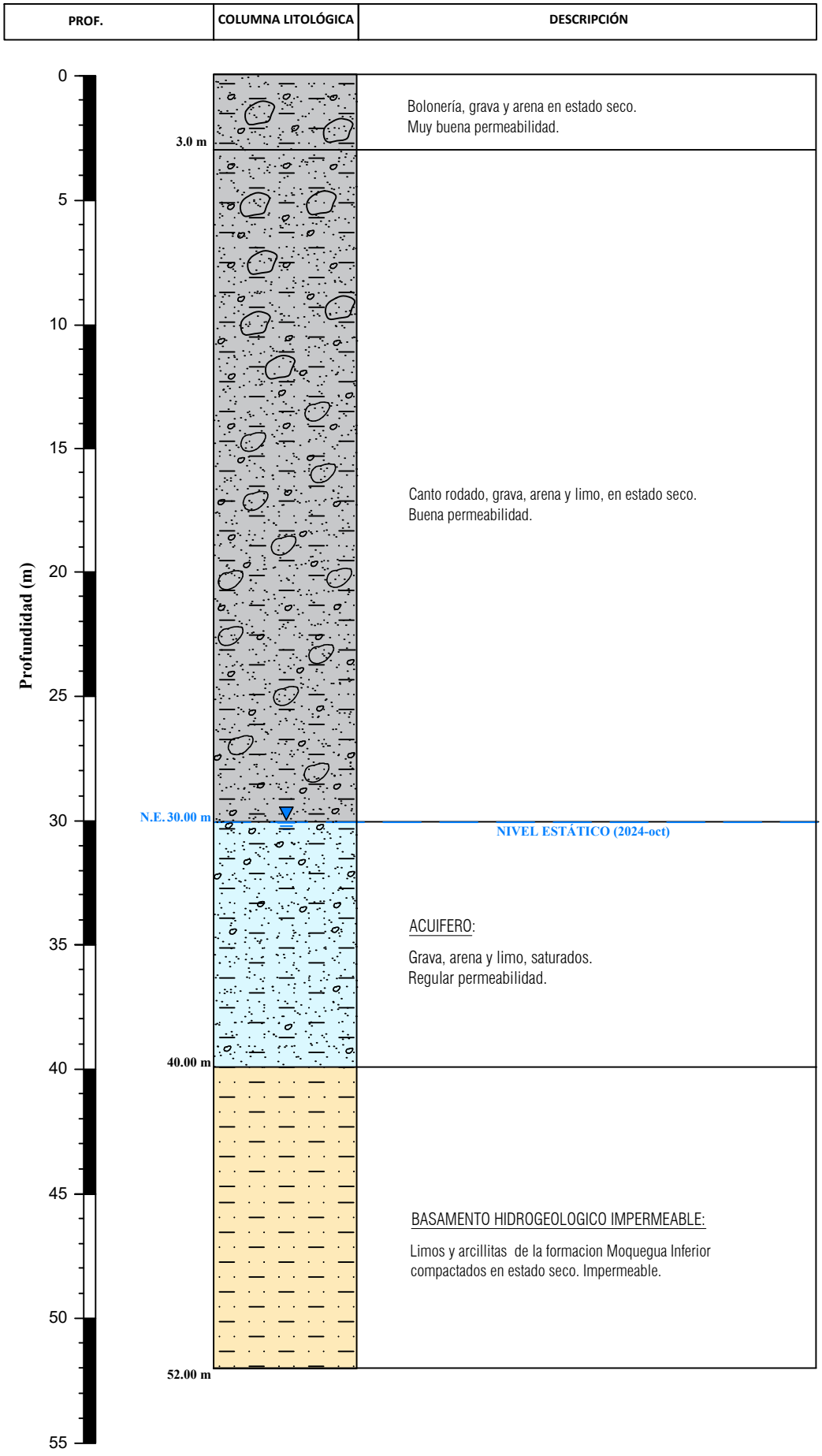


ESCALA: 1/250

COLUMNA LITOLÓGICA ENCONTRADA
POZO DE LOS CARZOS

Coordenadas : 316193 E - 8'057776 N **Pozo :** LOS CARZOS

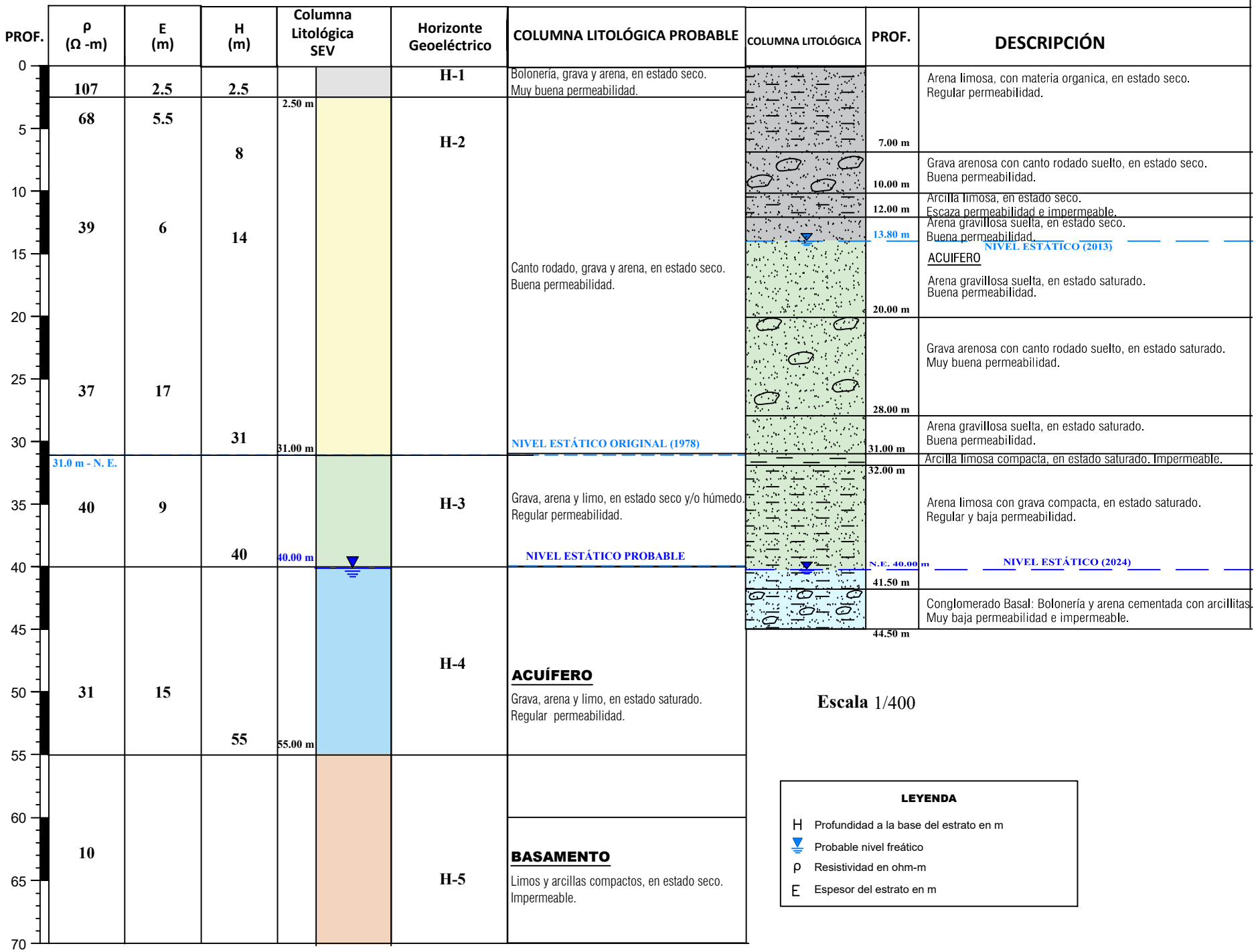
Ubicación : "SECTOR CINTO" - TACNA - JORGE BASADRE - LOCUMBA



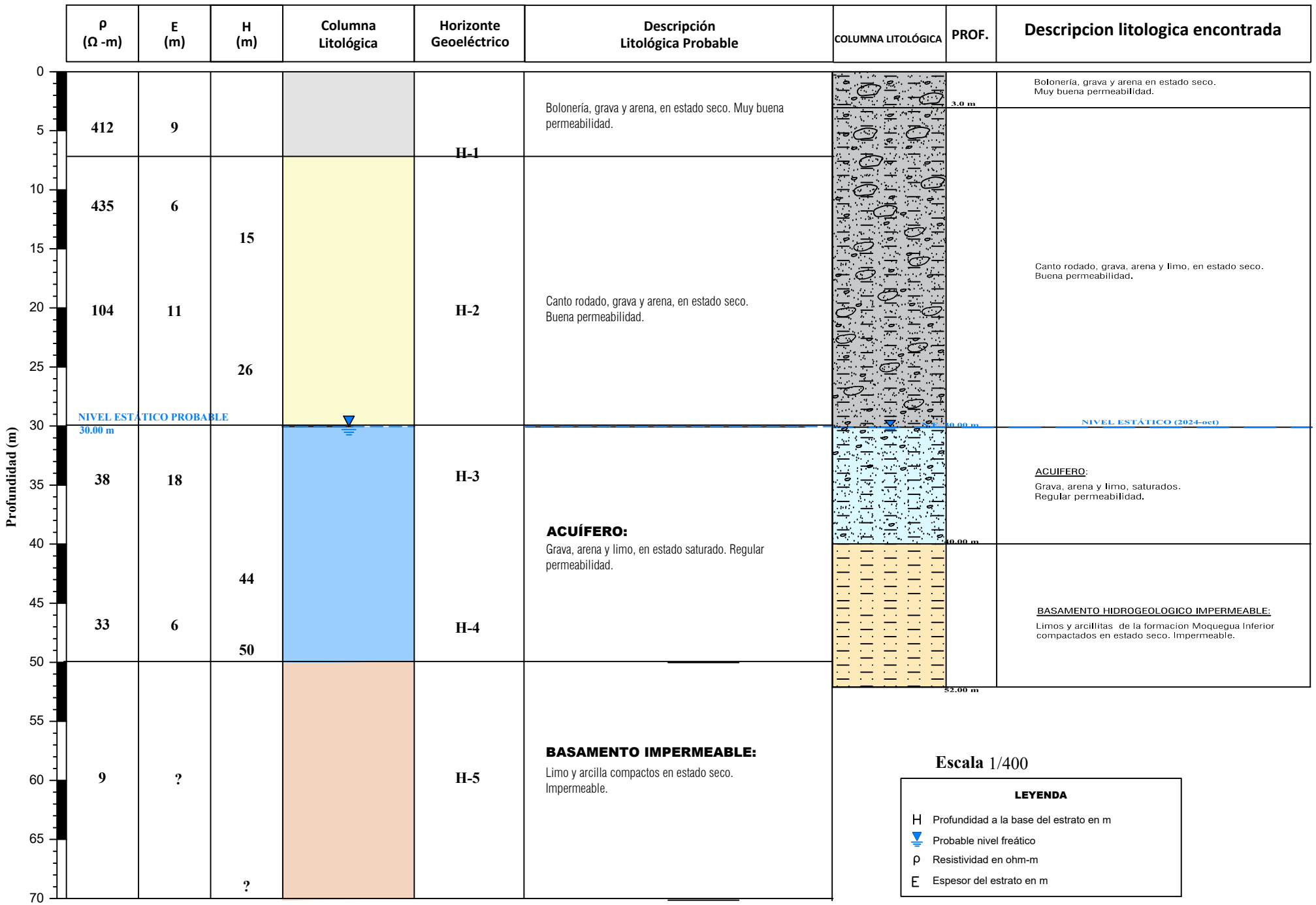
ESCALA: 1/250

ANEXOS 6
COMPARACIÓN DE COLUMNA LITOLOGICA Y SEV PARAMÉTRICO

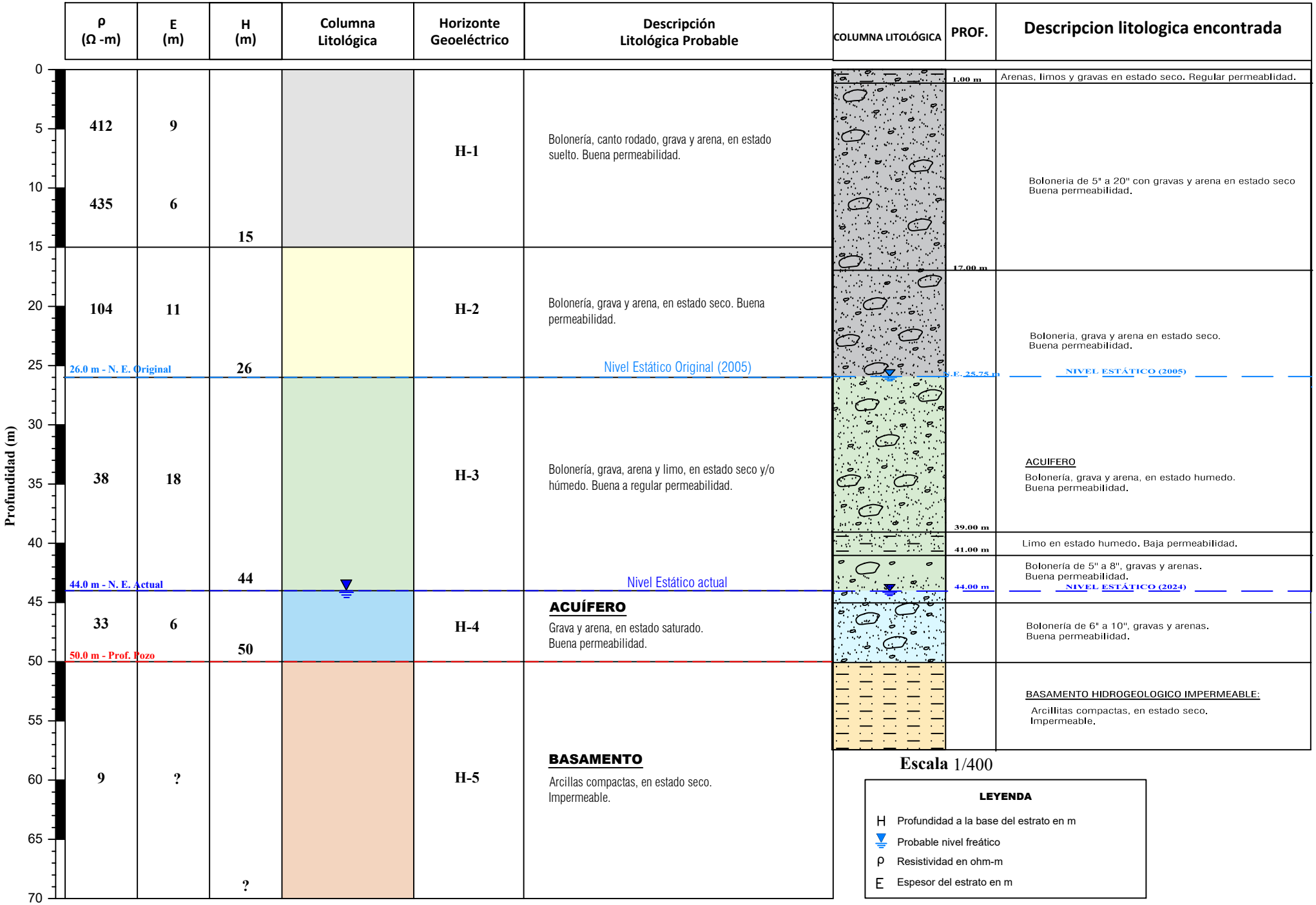
CORRELACION DEL POZO CONOSTOCO Y EL SEV - 1



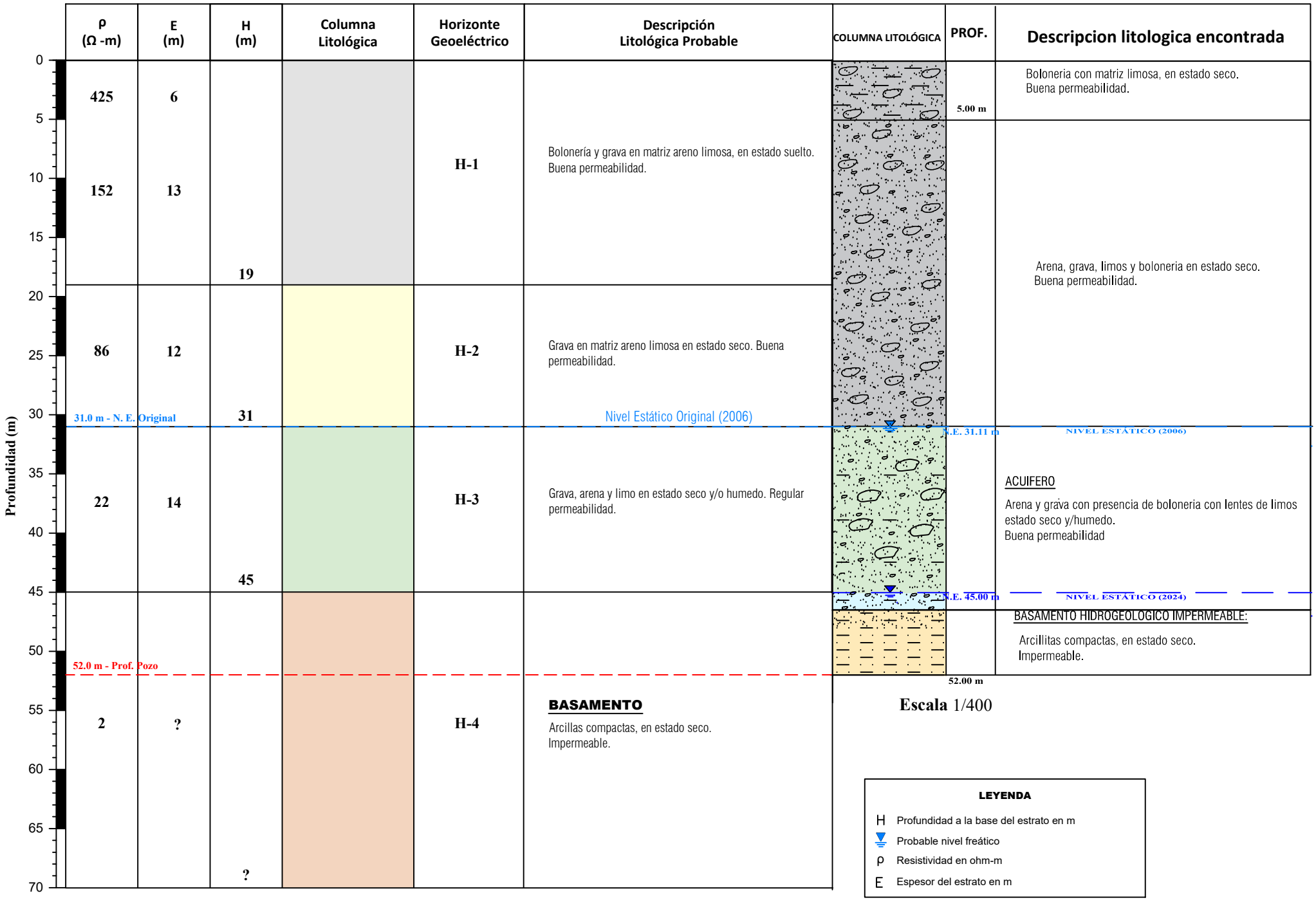
CORRELACION DEL POZO LOS CARZOS Y EL SEV - 3C



CORRELACION DEL POZO TRES PIEDRAS Y EL SEV - 3A



CORRELACION DEL POZO TRES MOLLES Y EL SEV - 4B



Escala 1/400