



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y
Geográfica
Unidad de Posgrado

**Caracterización hidrogeológica y modelamiento
numérico de la extracción de la solución de jarosita en
el Depósito N° 3 de la Refinería de Zinc Cajamarquilla
-2024**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Doctora en Ciencias
Ambientales

AUTOR

Editta HERRERA CARRANZA

ASESOR

Jorge ESCALANTE CONTRERAS

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

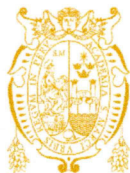
Referencia bibliográfica

Herrera, E. (2026). *Caracterización hidrogeológica y modelamiento numérico de la extracción de la solución de jarosita en el Depósito N° 3 de la Refinería de Zinc Cajamarquilla -2024*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Editta Herrera Carranza
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	44763972
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-1147-428X
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Jorge Escalante Contreras
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	28286636
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-3390-6998
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Vidal Sixto Aramburú Rojas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08608364
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	José Jorge Espinoza Eche
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06184372
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Jorge Leonardo Jave Nakayo
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	01066653
Datos de investigación	

Línea de investigación	C.0.2.7. Gestión Ambiental en Minería
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lurigancho-Chosica Centro poblado: Cajamarquilla Urbanización: Zona Industrial Cajamarquilla Avenida: Carretera Cajamarquilla Kilómetro 9.5, s/n Manzana y Lote: Mza. Única/ Lote Único Latitud: -11.967661 Longitud: -76.879367
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2024 - 2025
URL de disciplinas OCDE	Ciencias del medio ambiente: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08 Ingeniería ambiental y geológica: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01 Geociencias, Multidisciplinar: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.01



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima, al primer día del mes de junio del año dos mil veintiséis, siendo las doce horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen N° 000160-2026-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 28 de mayo del 2026, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TÍTULO

«CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 DE LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024»

Presentado por la Mg. **EDITTA HERRERA CARRANZA**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTORA** en **CIENCIAS AMBIENTALES**.

El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N° UNMSM-20240107926 de fecha 31 de octubre del 2024, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y que cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente de conformidad al Art. 72 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

BUENO (16)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTORA** en **CIENCIAS AMBIENTALES** a la Mg. **EDITTA HERRERA CARRANZA**.

Siendo las 13:00 horas, se dio por concluido al acto académico.


DR. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
Presidente


DR. JORGE LEONARDO JAVE NAKAYO
Miembro


DR. JOSÉ JORGE ESPINOZA ECHE
secretario


DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS
Asesor



Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la **UPG** N° 000466-2024-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM de la tesis, cuyo título es «**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 DE LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024**», presentado por la **magíster** EDITTA HERRERA CARRANZA, para optar el grado académico de DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES, **CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **17%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado académico de DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES.

Lima, 06 de Julio de 2026

Firma del Asesor: 

Nombres y Apellidos del asesor: Jorge Escalante Contreras

DNI: 28286636

* Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

DEDICATORIA

A nuestro Creador por darme salud y sabiduría.

A mis padres Arnulfo y Angélica, a mis hermanos Edgar y Eduin quienes siempre están presentes en cada logro mío y me brindan su apoyo incondicional.

A Romeo por su apoyo constante en el camino recorrido y a mi hija Brenda que representa mi mayor motivación y alegría.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a los docentes del Doctorado de Ciencias Ambientales de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica, Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, quienes aportaron con su conocimiento, experiencias y exigencias en el logro del desarrollo de la presente investigación.

Al Doctor Jorge Escalante Contreras por el asesoramiento durante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A la empresa minera Nexa Resources, por haberme permitido visitar sus instalaciones y brindar las facilidades para el acceso a la información.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Situación problemática	1
1.2 Formulación del problema	3
1.2.1 Problema general	3
1.2.2 Problemas específicos	3
1.3 Justificación.....	4
1.3.1 Justificación teórica	4
1.3.2 Justificación práctica	5
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.2 Objetivos específicos	6
1.5 Hipótesis de investigación.....	7
1.5.1 Hipótesis general	7
1.5.2 Hipótesis específicas.....	7
1.5.3 Matriz de consistencia.....	8
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Marco filosófico o epistemológico de la investigación	9
2.2 Antecedentes de estudio	12
2.2.1 Antecedentes internacionales	12
2.2.2 Antecedentes nacionales	15
2.3 Bases teóricas.....	17
2.3.1. Jarosita en el proceso metalúrgico de Zinc	17
2.3.2. Parámetros hidrogeológicos.....	17
2.3.3. Pruebas de bombeo	31
2.3.4. Simulaciones numéricas de flujo subterráneo	35
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	38
3.1 Tipo y diseño de investigación	38
3.2 Variables de investigación.....	41
3.2.1. Variable independiente.....	41
3.2.2. Variable dependiente	41
3.2.3. Matriz de operacionalización de variables	41
3.3 Unidad de análisis	43
3.4 Población y muestra.....	43
3.4.1. Población	43

3.4.2. Muestra	44
3.4.3. Selección de la muestra / Muestreo	44
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	47
3.5.1. Técnicas de investigación	48
3.5.2. Instrumentos de investigación	48
3.5.3. Procesamiento de datos.....	49
3.6 Análisis e interpretación de la información	51
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	54
4.1. Presentación de resultados	54
4.1.1 Propiedades físicas y conductividad hidráulica de la jarosita.....	54
4.1.2 Caudal de bombeo	56
4.1.3 Rendimiento específico	57
4.1.4 Modelamiento numérico en régimen estacionario	57
4.1.5 Modelamiento numérico en régimen transitorio	59
4.1.6 Caracterización geoquímica de los residuos de jarosita	65
4.2. Análisis, interpretación y discusión de resultados.....	67
4.2.1 Conductividad hidráulica	67
4.2.2 Caudal de bombeo	73
4.2.3 Rendimiento específico	77
4.2.4 Situación actual de la Refinería de Zinc Cajamarquilla y el depósito N° 3 ...	84
4.2.5 Discusión de resultados	845
4.3. Prueba / comprobación de hipótesis	87
4.3.1 Hipótesis general	87
4.3.2 Hipótesis específicas.....	92
4.4. Implicancias ambientales de la deshidratación de los depósitos de jarosita para el cierre de minas	101
CONCLUSIONES.....	103
RECOMENDACIONES	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
ANEXOS	111

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Valores de rendimiento específico (S_y).....	23
Tabla 2 Valores de coeficiente de almacenamiento.....	24
Tabla 3 Valores de Transmisividad	25
Tabla 4 Valores de conductividad hidráulica	27
Tabla 5 Ubicación de sondajes	46
Tabla 6 Ubicación de muestras enviadas al laboratorio	46
Tabla 7 Metodología de recolección de datos.....	49
Tabla 8 Metodología de recolección de datos.....	52
Tabla 9 Propiedades físicas de los residuos de jarosita	55
Tabla 10 Conductividad hidráulica de laboratorio de los residuos de jarosita	55
Tabla 11 Conductividad hidráulica de campo de los residuos de jarosita	56
Tabla 12 Resumen de pruebas de bombeo	56
Tabla 13 Cargas observadas y calculadas para calibración	58
Tabla 14 Análisis estadístico de calibración.....	59
Tabla 15 Resumen de resultados de modelamiento numérico	62
Tabla 16 Concentración de metales en la solución de jarosita	66
Tabla 17 Potencial de generador de acidez en los residuos de jarosita.....	67
Tabla 18 Resumen de valores de conductividad hidráulica de laboratorio por pozo.....	68
Tabla 19 Relación entre la conductividad hidráulica de pruebas de bombeo y laboratorio..	69
Tabla 20 Resultados del modelo para la comprobación de la hipótesis general.....	88
Tabla 21 Datos considerados para la comprobación de la hipótesis general.....	89
Tabla 22 Resumen del modelo de regresión lineal múltiple para el descenso a 1095 días .	90
Tabla 23 Análisis de varianza del modelo de regresión.....	90
Tabla 24 Coeficientes de regresión para los predictores del descenso a 1095 días.....	91
Tabla 25 Datos considerados para la comprobación de la hipótesis específica 1	93
Tabla 26 Resultados de sensibilidad para la comprobación de la hipótesis específica 1	93
Tabla 27 Datos considerados para la comprobación de la hipótesis específica 2	94
Tabla 28 Resultados de sensibilidad para la comprobación de la hipótesis específica 2	95

Tabla 29 <i>Datos considerados para la comprobación de la hipótesis específica 3</i>	96
Tabla 30 <i>Resultados de sensibilidad para la comprobación de la hipótesis específica 3</i>	97
Tabla 31 <i>Datos de contrastación de hipótesis específica 4</i>	99
Tabla 32 <i>Contraste de la hipótesis de valorización bajo escenario conservador</i>	99
Tabla 33 <i>Supuestos del escenario conservador para la valorización de Zn</i>	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Representación de la porosidad eficaz por drenaje (rendimiento específico).....	19
Figura 2 Relación granulometría- rendimiento específico (Sy).....	20
Figura 3 Variación de la porosidad total (n), porosidad eficaz (rendimiento específico) (Sy) y retención específica (Sr) con la granulometría de los suelos.....	22
Figura 4 Permeámetro de carga constante	28
Figura 5 Permeámetro de carga variable	30
Figura 6 Esquema del funcionamiento de un pozo de bombeo	32
Figura 7 Recta de recuperación.....	34
Figura 8 Proyección asimétrica y sección de corte de modelos numéricos en FEFLOW....	36
Figura 9 Formas y tipos de Investigación	39
Figura 10 Plataforma superior del depósito N°3.....	45
Figura 11 Flujograma metodológico de investigación.....	47
Figura 12 Diagrama para simulación en FEFLOW.....	60
Figura 13 Curvas de descenso durante 10 años en escenarios EC_1 al EC_7_ 15 pozos.	63
Figura 14 Curvas de descenso durante 10 años en escenarios EC_8 al E14_ 12 pozos ...	64
Figura 15 Curvas de descenso durante 10 años en escenarios E15 al E21_ 10 pozos	64
Figura 16 Curvas de descenso durante 10 años en escenarios E1 al E7_ 15 pozos	65
Figura 17 Descensos con sensibilidad de conductividad hidráulica_ 15 pozos	70
Figura 18 Descensos con sensibilidad de conductividad hidráulica _ 12 pozos	71
Figura 19 Descensos con sensibilidad de conductividad hidráulica _ 10 pozos	72
Figura 20 Descensos con sensibilidad de conductividad hidráulica _ 15 pozos (K_laboratorio)	73
Figura 21 Descensos con sensibilidad de caudal de bombeo_ 15 pozos	74
Figura 22 Descensos con sensibilidad de caudal de bombeo_ 12 pozos	75
Figura 23 Descensos con sensibilidad de caudal de bombeo_ 10 pozos	76
Figura 24 Descensos con sensibilidad de caudal de bombeo_ 15 pozos (K_laboratorio) ...	77
Figura 25 Descensos con sensibilidad de rendimiento específico_ 15 pozos	78
Figura 26 Descensos con sensibilidad de rendimiento específico_ 12 pozos	79
Figura 27 Descensos con sensibilidad de rendimiento específico_ 10 pozos	80

Figura 28 <i>Descensos con sensibilidad de rendimiento específico_ 15 pozos_ K_laboratorio</i>	81
Figura 29 <i>Descenso de los 28 escenarios del modelo numérico</i>	82
Figura 30 <i>Vista en planta del escenario EC_5 del modelo numérico</i>	83
Figura 31 <i>Vista en sección del nivel de solución de jarosita del escenario EC_5 del modelo numérico</i>	83
Figura 32 <i>% de variación de descenso a 1095 días con variación de Q, Sy y K</i>	88

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1:	Matriz de consistencia	112
Anexo 2:	Operacionalización de variables	115
Anexo 3:	Matriz de instrumentos	117
Anexo 4:	Panel fotográfico	121
Anexo 5:	Plano de ubicación	124
Anexo 6:	Pruebas de bombeo	126
Anexo 7:	Ensayos de laboratorio	144
Anexo 8:	Salidas de FEFLOW	168

RESUMEN

El cierre adecuado de los depósitos de relaves es una importante preocupación ambiental, para reconformar un depósito es necesario desaguar el medio. Esta investigación se originó debido a la necesidad de determinar la estrategia óptima de extracción de solución de jarosita para garantizar el cierre ambiental seguro considerando los parámetros hidrogeológicos, y la calidad geoquímica de la solución extraída del depósito N° 3 en la refinería de zinc Cajamarquilla. Mediante el modelamiento numérico realizado con el software FEFLOW 8.0 se evaluaron 28 escenarios de bombeo con diferentes valores de conductividad hidráulica, caudal de bombeo y rendimiento específico en el depósito N° 3. De la caracterización hidrogeológica se encontró que la conductividad hidráulica de campo varía desde $4.67\text{E-}03$ m/d a $1.63\text{E-}02$ m/d y el estadístico de prueba H de Kruskal-Wallis indica que no muestran diferencias significativas entre grupos. Del análisis de sensibilidad realizado mediante el índice de sensibilidad (IS) se determinó que en la estrategia óptima del desaguado el caudal de bombeo (Q) es el factor dominante con un IS de 1.28, el rendimiento específico (Sy) es el segundo factor (poco sensible) con IS de -0.10, y la conductividad hidráulica (K) es el parámetro de referencia con IS menor a 0.05.

El mejor escenario, en un período de 3 años con 15 pozos de bombeo en total y un caudal de bombeo de $1.5\text{ m}^3/\text{d}$ por pozo se logra un descenso de 12.46 m que representa el 89% de la profundidad del depósito N° 3. El escenario conservador permite obtener un valor recuperable de \$ 997,537.30 al reintroducir la solución al proceso metalúrgico, de esta manera se cierra el ciclo de la economía circular y asimismo genera un beneficio ambiental de cero efluentes al medio ambiente asociado al cierre del depósito N° 3.

Palabras clave: desaguado de relaves, elementos finitos, FEFLOW, modelamiento numérico, pozos de bombeo, solución de jarosita.

ABSTRACT

The proper closure of tailings deposits is an important environmental concern, as remediation requires dewatering the surrounding environment. This research arose from the need to understand the relationship between hydrogeological characterization and numerical modeling of jarosite solution extraction in deposit N° 3 at the Cajamarquilla zinc refinery. Using numerical modeling with FEFLOW 8.0 software, 28 pumping scenarios with varying hydraulic conductivity, pumping flow rates, and specific performance were evaluated in tailings deposit N° 3. Hydrogeological characterization revealed that field hydraulic conductivity ranged from $4.67\text{E-}03$ m/d to $1.63\text{E-}02$ m/d, and the Kruskal-Wallis H test statistic indicated no significant differences between groups. The sensitivity analysis performed using the sensitivity index (SI) determined that in the optimal dewatering strategy, the pumping rate (Q) is the dominant factor with an SI of 1.28, the specific efficiency (Sy) is the second most important factor (less sensitive) with an SI of -0.10, and the hydraulic conductivity (K) is the reference parameter with an SI less than 0.05. The best-case scenario, over a 3-year period with a total of 15 pumping wells and a pumping rate of $1.5\text{ m}^3/\text{d}$ per well, achieves a depth reduction of 12.46 m, representing 89% of the depth of deposit N° 3. This conservative scenario yields a recoverable value of \$997,537.30 by reintroducing the solution into the metallurgical process, thus closing the circular economy cycle and generating an environmental benefit of zero effluent discharge associated with the closure of deposit N° 3.

Keywords: tailings dewatering, finite elements, FEFLOW, numerical modeling, pumping wells, jarosite solution.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Situación problemática

La eliminación de relaves es una importante preocupación ambiental y de seguridad, ya que los relaves no consolidados o inestables pueden provocar fallas catastróficas y daños ambientales (Dimitrov y Grigorova, 2023). La recuperación de los depósitos de relaves a sus formas de relieve antes de ser perturbados se ve obstaculizado por el tamaño fino de los relaves (Demos, 2023). Los depósitos de relaves no pueden ser rehabilitados sin un tratamiento previo, se requiere desaguar los relaves para el cierre adecuado de dichos depósitos (Costine, Fawell, Chryss, Dalh y Bellwood, 2020), ya que permitirá hacer los trabajos de compactación en el mismo lugar o incluso trasladar los relaves a zonas definitivas. Los depósitos de relaves pueden generar filtraciones (Nguyen, et al., 2019), sobre todo en depósitos que no tienen buena impermeabilización en la base y los taludes internos, con el almacenamiento de relaves deshidratados se reduce la contaminación ecológica y ambiental (Li, et al., 2022).

La concesión de beneficio “Refinería de Zinc Cajamarquilla” es propiedad de la empresa minera Nexa Resources Cajamarquilla S.A. (en adelante, NEXA), el cual se encuentra ubicado en el distrito de Lurigancho, provincia de Lima, a la altura del km 9.5 de la carretera central, en el desvío de Huachipa.

NEXA en la concesión de beneficio “Refinería de Zinc Cajamarquilla” es una empresa dedicada a la actividad de refinado de minerales con contenido de zinc y como residuos del proceso metalúrgico obtuvo jarosita y goethita.

El impacto ambiental de las refinerías de zinc es una preocupación significativa debido a diversos factores como la generación de residuos, y consumo de energía y las emisiones.

El depósito N° 3 contiene residuos de jarosita y se encuentra en proceso de cierre y debido a que cuenta con altas concentraciones de aluminio, fierro, manganeso, magnesio, zinc y sulfato, además de pH bajo es necesario realizar la evaluación para el cierre mediante la extracción de solución de jarosita, de esta manera se estará recuperando la solución de jarosita existente y a la vez el cierre del depósito, evitando que la solución genere degradación de la cobertura geoquímica del depósito de relaves e impactos al medio ambiente y generando un beneficio económico para la empresa.

La investigación consiste en la caracterización hidrogeológica de la jarosita, mediante los ensayos de campo y laboratorio, y mediante el uso del software FEFLOW se estimó el número óptimo de pozos de bombeo para la extracción de la solución de jarosita. Se realizaron ensayos de sensibilidad con lo cual se determinó el índice de sensibilidad de cada parámetro analizado entre las características de los residuos de jarosita y el descenso en metros producto de la extracción de la solución del depósito N° 3.

Por lo antes expuesto, la presente investigación representa importancia técnica al proponer una estrategia de drenaje para el cierre ambiental del depósito N° 3 de la refinería de Zinc Cajamarquilla, única en el Perú. El aporte del estudio es metodológico, al integrar modelamiento numérico en FEFLOW con diseño factorial para la evaluación de escenarios de bombeo. Dicho esquema de trabajo es replicable en otros depósitos de relaves que requieran abatimiento del nivel freático, tanto

para procesos de cierre como para proyectos de reaprovechamiento de relaves con valor económico. Lo novedoso es la integración de FEFLOW con diseño experimental para transformar un modelo de simulación en una herramienta de optimización y toma de decisiones, aplicado por primera vez en un depósito de residuos de jarosita en el Perú.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 *Problema general*

¿Cuál es la estrategia óptima de extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3 de la Refinería de Zinc Cajamarquilla para garantizar el cierre ambiental, considerando la caracterización hidrogeológica de los residuos de jarosita y el modelamiento numérico tridimensional?

1.2.2 *Problemas específicos*

- 1:** ¿Cuál es el grado de homogeneidad horizontal de la conductividad hidráulica de los residuos de jarosita del depósito N° 3, y qué implica su distribución homogénea para el diseño de la red de extracción de la solución de jarosita?
- 2:** ¿Cuál es el caudal de bombeo por pozo que maximiza la extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3, en términos de número de pozos y tiempo de operación?
- 3:** ¿Cómo afecta la incertidumbre del rendimiento específico S_y de los residuos de jarosita (clasificación ML/CL) a las predicciones del modelo numérico, y cuál es el valor conservador de S_y para el diseño de la extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3 para el cierre ambiental?

- 4: ¿Cuáles son las características geoquímicas de la solución de jarosita extraída del depósito N° 3 (pH, Zn y generador de acidez) y qué alternativas de tratamiento o valorización son técnicamente viables en el circuito de lixiviación de la Refinería de Zinc Cajamarquilla, estimando el beneficio ambiental y valor recuperable de Zinc asociado al cierre?

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación teórica

La caracterización de los residuos de jarosita depositados en el depósito N° 3 se realizó con la finalidad de determinar los parámetros hidrogeológicos como la caracterización de suelos (residuos de jarosita). Mediante las pruebas de bombeo se logró estimar el caudal de bombeo en las zonas norte, centro y sur del depósito, asimismo mediante las pruebas de recuperación se obtuvo la transmisividad en cada pozo de bombeo a partir se calculó conductividad hidráulica de campo, también se determinó la conductividad hidráulica en nueve ensayos de laboratorio, tres de cada pozo, finalmente el rendimiento específico es un parámetro que ha demostrado ser bastante sensible por lo cual se tomaron tres valores de rendimiento específico para realizar los análisis de sensibilidad. Los valores de campo, laboratorio y revisión de literatura fueron de utilidad para el modelamiento numérico tridimensional en régimen estacionario y régimen transitorio y se evaluó la tasa de bombeo, el número de pozos y la duración del bombeo requeridos para deprimir el nivel freático (solución de jarosita) que se encuentra en el depósito N° 3.

1.3.2 Justificación práctica

NEXA cuenta con depósitos de residuos provenientes de la planta de beneficio de la refinería de zinc Cajamarquilla, dichos residuos tienen alto contenido metálico, y para realizar el cierre de dicho componente se requiere el desaguado de los depósitos, el depósito N° 3 es objeto de la presente investigación.

Los parámetros hidrogeológicos como caudal y conductividad hidráulica de campo fueron obtenidos de las pruebas de bombeo y pruebas de recuperación. También se realizaron ensayos permeabilidad de carga variable para determinar la conductividad hidráulica, a la cual denominaremos conductividad hidráulica de laboratorio. Teniendo los valores promedio, máximos y mínimos de los parámetros hidrogeológicos se establecieron los datos para introducirlos en el modelo numérico en el software FEFLOW. Se consideraron diferentes escenarios con 15 pozos, 12 pozos y 10 pozos, se utilizaron valores promedio de conductividad hidráulica, caudal y el rendimiento específico de 0.02 para el escenario base, y luego se realizaron las corridas de sensibilidad con valores máximos y mínimos de caudal y conductividad hidráulica y para el rendimiento específico la sensibilidad fue con valores de 0.05 y 0.1.

El estudio es conveniente para la empresa, ya que tendrá una alternativa para extraer la solución de jarosita que podrá darle tratamiento en la refinería y a su vez realizará el cierre del depósito de manera adecuada evitando que la solución implique daños a la cobertura de cierre de los depósitos, así como deformaciones a lo largo del tiempo.

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo general*

Determinar la estrategia óptima de extracción de solución de jarosita en el depósito N° 3 de la Refinería de Zinc Cajamarquilla para garantizar el cierre ambiental, considerando la caracterización hidrogeológica de los residuos de jarosita y el modelamiento numérico tridimensional.

1.4.2 *Objetivos específicos*

- 1:** Determinar el grado de homogeneidad horizontal de la conductividad hidráulica mediante pruebas de campo y laboratorio de los residuos de jarosita del depósito N° 3, e interpretar sus implicancias para el diseño de la red de extracción de la solución de jarosita.
- 2:** Determinar el caudal de bombeo por pozo que maximiza la extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3, en términos de número de pozos y tiempo de operación.
- 3:** Evaluar cómo afecta la incertidumbre del rendimiento específico S_y de los residuos de jarosita (clasificación ML/CL) a las predicciones del modelo numérico, y proponer el valor conservador de S_y para el diseño de la extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3 para el cierre ambiental.
- 4:** Caracterizar la composición geoquímica de la solución de jarosita recuperada del depósito N° 3 y determinar el valor recuperable de zinc y el impacto en la economía circular mediante la reintroducción de la solución extraída en la etapa de lixiviación, para alcanzar un valor recuperable proyectado superior a \$15,000.00 y la eliminación total de efluentes relacionados al cierre del depósito N° 3.

1.5 Hipótesis de investigación

1.5.1 *Hipótesis general*

La estrategia óptima de la extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3 de la Refinería de Zinc Cajamarquilla para garantizar el cierre ambiental está determinada primariamente por el caudal de bombeo (muy sensible), seguido del rendimiento específico (poco sensible), siendo la conductividad hidráulica un parámetro de referencia (insensible) dado su homogeneidad horizontal en el depósito.

1.5.2 *Hipótesis específicas*

- 1: Los residuos de jarosita del depósito N° 3 presentan homogeneidad horizontal en su conductividad hidráulica (K_{campo} del orden de 10^{-2} m/d), como resultado del proceso estandarizado de depositación metalúrgica, lo que permite diseñar una red de pozos de distribución regular.
- 2: Un incremento del caudal de bombeo de 0.5 a 1.5 m³/d por pozo produce un aumento significativo y positivo del descenso del nivel de solución de jarosita, siendo el escenario con 15 pozos a $Q_{\text{inicial}} = 1.5$ m³/d, el que obtiene la mayor extracción en un tiempo de 3 años de operación continua en el depósito N° 3.
- 3: A mayor rendimiento específico S_y de los residuos de jarosita, menor es el descenso del nivel de solución por unidad de tiempo; el valor $S_y = 0.02$ característico de limos de baja plasticidad (ML) representa el escenario conservador de diseño del sistema de extracción y define el volumen mínimo extraíble en el período de cierre del depósito N° 3.

- 4:** La solución de jarosita tiene pH ácido, contiene metales pesados con mayor concentración de Al, Fe, Mg, Mn y Zn y tiene alto potencial de generar de acidez. La reintroducción de la solución de jarosita con Zn recuperable en la etapa de lixiviación del proceso metalúrgico genera un valor económico estimado superior a \$15,000.0 en un escenario conservador, permitiendo el cierre del ciclo de economía circular y la eliminación total del vertimiento de efluentes asociados al cierre del depósito N° 3.

1.5.3 Matriz de consistencia

La matriz de consistencia muestra la coherencia o asociación existente entre los problemas de investigación, los objetivos y las hipótesis, tanto en los aspectos generales como específicos. Para la formulación del problema general, objetivo general e hipótesis general se contemplan la variable independiente y dependiente. Los problemas específicos, objetivos específicos e hipótesis específicas parten de los indicadores de la variable independiente (Puente, Escalante, López y Del Valle, 2024). Ver Anexo 1.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Marco filosófico o epistemológico de la investigación

Según lo manifestado por Seinfeld, Cuzquén, Farge y Zaldívar (1998), “Existe una falsa dicotomía según la cual el crecimiento económico continuo lleva al desastre ecológico o contrariamente, que el sostenimiento del equilibrio ecológico debe eclipsar al crecimiento” (p.28).

Asimismo, Seinfeld et al. (1998) manifiestan que se debe hacer un análisis costo beneficio, ya que por un lado sin crecimiento económico no es posible un sostenimiento ecológico, ya que la pobreza genera un círculo vicioso, el mal uso de los recursos y el deterioro ambiental y por otra parte el crecimiento económico para ser sostenible a largo plazo implica una explotación racional y eficiente de los recursos naturales (p.29).

La economía mundial adoptaba netamente un modelo lineal que consiste en “tomar, fabricar y desechar”, no obstante, en la última década, el concepto y modelo de economía circular está en la mira de todos los actores de la economía mundial (Julca, 2022), lo importante no necesariamente es producir menos, sino producir de manera diferente (Seinfeld, et al., 1998, p.30)

Conforme a lo manifestado por Henríquez-Aravena, Martínez-Cerna y Venegas-Cifuentes (2021), “La región [América Latina] está dando sus primeros pasos en el tránsito de un modelo lineal a circular... en cuyo proceso han sido fundamentales los Organismos Internacionales, la

Academia y las ONGs... esperando que a futuro las Empresas y los Gobiernos asuman un mayor compromiso con dicha transición`` (p.66).

La actividad minera en el Perú se remonta a la época preincaica, donde según algunos autores se practicaba la minería sustentable. Sin embargo, desde el establecimiento de la Colonia y la República, ha habido daños ambientales importantes.

Durante muchos años las empresas extractivas en el Perú, adoptando un modelo de economía lineal, tuvieron como objetivo central la extracción de recursos mineros, producto de la extracción y tratamiento de los minerales iban generando desechos mineros, para los cuales muchas veces no se había diseñado un depósito adecuado que evitara la contaminación ambiental, no se tenía consideración de las consecuencias a futuro.

A fines del siglo XX, el Estado peruano estructuró el texto único ordenado de la Ley General de la Minería, cuya reglamentación se dio con el Decreto Supremo 016-93-EM, que es considerado como el primer reglamento ambiental para la actividad minera, luego se reglamentaron Programas de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA), con lo cual se estaba incursionando en la conciencia ambiental.

En el 2003 se publicó la Ley que regula el Cierre de Minas y entró en vigencia el año 2005, dicha ley cuenta con una Modificación a los Planes de Cierre de Mina (Ley 31547) del 16 de agosto de 2021.

El Ministerio del Ambiente se creó el 13 de mayo de 2008, mediante Decreto Legislativo 1013, cuyo objetivo es la conservación del ambiente, de modo tal que se propicie y asegure el uso sostenible, responsable, racional y ético de los recursos naturales y del medio que los sustenta.

Es necesario conocer los impactos ambientales y enfocarse en la prevención de daños ambientales potenciales de las actividades extractivas y de refinería, si bien las necesidades de zinc han aumentado, tenemos la obligación de proteger al medio ambiente. La concesión de beneficio tiene responsabilidad social con las comunidades o poblaciones cercanas, y no limitarse a cumplir con las

obligaciones normativas. El estado a través de sus diferentes organismos fiscaliza a la refinería de zinc Cajamarquilla para que cumpla con lo dispuesto en la normativa vigente.

La refinería de zinc Cajamarquilla al ser la única refinería en su tipo a nivel nacional y la más grande de Latinoamérica, representa el progreso tecnológico en el Perú y debe cumplir con no sobrepasar los umbrales de contaminantes establecidos con la finalidad de garantizar un ambiente adecuado para la vida humana asentada en su alrededor.

Julca (2022), analiza la economía circular en la minería peruana desde una perspectiva general el contexto y entorno político, económico, social, tecnológico, ambiental y legal.

En los últimos años Perú ha sido escenario de conflictos por el uso de territorio, agua, medios de transporte y contaminación de la minería. Por ello, la importancia de todos los actores involucrados para reconocer que el sistema ambiental es proveedor de servicios ecosistémicos y por ende del bienestar general de la población (Julca, 2002).

En una economía globalizada en constante cambio, el rol de la minería es trascendental, debido a que es un proveedor de materias primas e insumos para búsqueda de nuevas tecnologías para pasar de flujos lineales a circulares que lleven a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) planteados por las agendas (Julca, 2022).

Por ello, urge repensar la planificación estratégica de las actividades mineras para que sean sostenibles, mediante la constante exploración de nuevas tecnologías que permitan la economía circular y el gobierno esté al día con el conocimiento para establecer normas adecuadas.

Un enfoque filosófico integral y sostenible es fundamental para abordar el problema de los residuos, para convertir la minería en una actividad más sostenible, se debe pasar de flujos operativos lineales a circulares, cambiando los procesos operativos extractivos por procesos regenerativos y restaurativos.

2.2 Antecedentes de estudio

La refinería de zinc Cajamarquilla está dedicada al procesamiento metalúrgico de concentrados de zinc y a la comercialización de zinc refinado de alta pureza, aleaciones en diferentes formas y otros subproductos. La refinería fue construida en 1981 por Minero Perú, posteriormente en 1995 fue privatizada y adquirida por el consorcio japonés COMINCO-Marubeni y finalmente en el 2004 fue comprada por la empresa brasilera Votorantim Metais, la cual en el 2017 cambió de nombre a Nexa Resources.

2.2.1 Antecedentes internacionales

En el extranjero se han realizado algunas investigaciones referentes a la jarosita, pero no directamente relacionados a la extracción de solución, sino a remediación de depósitos de jarosita.

El modelamiento para la extracción de la solución de jarosita se realizará haciendo uso del software de modelamiento numérico, al respecto hay mayor investigación en Europa, Asia y América, se citan a continuación.

Figuroa –Núñez y Campos –Gaytán (2018). “Simulación numérica del agua subterránea en el acuífero Guadalupe, Ensenada, Baja California, México: Caso de estudio, condiciones estacionarias y transitorias”. La problemática que origina este estudio se da en la ciudad de Ensenada en Baja California, México, donde el suministro de fuentes subterráneas de agua potable principalmente proviene de aguas subterráneas, siendo el acuífero Guadalupe el principal abastecedor, por lo cual presentan un modelo de simulación de agua subterránea en condiciones estacionarias y transitorias utilizando el software MODFLOW-2005, tomando como base un modelo previo de flujo subterráneo, información geológica, topografía. La conclusión general es que el modelo presentado es aceptable y el comportamiento del flujo hidráulico se reproduce satisfactoriamente; con un RMSE de 3.25 m para el estado estacionario

y de 8.36 m para el transitorio (Figueroa-Núñez y Campos-Gaytán, 2018).

Ghasemi Nejad y Shourian (2016). Publicaron el artículo "Optimal Design of Groundwater Wells' Placement and Pumping Rates by Use of a Simulation-Optimization Approach", cuyo objetivo principal del estudio fue desarrollar un modelo de simulación-optimización para determinar la ubicación adecuada de pozos y el ratio adecuado de bombeo del acuífero Sarankhs ubicado en el noreste de Irán, así minimizar el costo total de perforación, trasvase y tratamiento de agua para suplir la demanda de agua potable de la ciudad de Sarankhs. El modelo propuesto integró el modelo de simulación de flujo MODFLOW y el algoritmo Particle Swarm Optimization (PSO). Los resultados de la investigación indican que el enfoque propuesto no solo satisface las limitaciones, sino que también reduce el costo total de extracción de agua en un 5%, asimismo, los análisis de sensibilidad indican que los resultados no son significativamente sensibles a los cambios de conductividad hidráulica en el acuífero, mientras que el ratio máximo de bombeo afecta directamente el número de pozos requerido y pueden significar un cambio considerable en el costo final (Ghasemi Nejad y Shourian, 2016).

Griedl (2016). "Evaluation of Excavation Methods for Jarosite Disposal Areas within Europe". Tesis de maestría, Universidad de Leoben. El objetivo de este estudio es proporcionar una visión general de los posibles métodos de extracción para la excavación de residuos de producción hidrometalúrgica de zinc (jarosita) fuera de los diques de contención de lodos. Los métodos usados para la recolección de datos fueron a través de la revisión de literatura sobre depósitos de jarosita, métodos de minado para dichos depósitos verificación insitu de dos (2) depósitos de jarosita en Europa. Finalmente, concluyeron que la minería hidráulica se encuentra entre las mejores prácticas disponibles, especialmente en lo que respecta a la seguridad y la eficiencia (Griedl, 2016).

Huang et al. (2024), en su artículo "Elements characteristics and potential environmental risk assessment of jarosite residue and arsenic sulfide residue based on geochemical and mineralogical analysis" indica que el residuo de jarosita se produce tras la refinación de zinc mediante procedimientos hidrometalúrgicos, y debido a la creciente extracción anual de zinc existe una mayor presión para eliminar los residuos de jarosita resultantes de la fundición de zinc, por lo cual evaluaron su impacto ambiental y viabilidad de utilización. Para evaluar los principales componentes, características de distribución de elementos y riesgos ambientales, realizaron pruebas de lixiviación de toxicidad, procedimientos de extracción secuencial y diversas tecnologías de caracterización como XRF, XRD y SEM-EDS. Los resultados indican que la composición mineralógica de la jarosita son natrojarosita, franklinita y gunningita y el zinc se adhiere principalmente a las grietas de mineral de natrojarosita. Los autores concluyeron que las concentraciones de lixiviado de zinc en jarosita excedieron el valor estándar y son un tipo de residuo peligroso y suponía un riesgo ambiental (Huang, y otros, 2024).

Hughes-Lomelin, Sánchez Quispe y Hernández Bedolla (2023), en su artículo "Simulación matemática mediante MODFLOW para el acuífero del Valle de Aguascalientes, México", tuvieron como objetivo el modelamiento del acuífero Valle de Aguas Calientes utilizando MODFLOW e información histórica, los datos hidrogeológicos fueron recolectados y caracterizados a través de herramientas de sistemas de información geográfica, concluyeron que la calidad de la información introducida en el modelo juega un papel importante en la robustez y fiabilidad, además determinaron que existe abatimiento del acuífero, lo cual indica que está siendo sobreexplotado. (Hughes-Lomelín, Sánchez Quispe, Hernández Hernández y Hernández Bedolla, 2023).

Kontos (2024), en el artículo "A Simulation–Optimization Model for Optimal Aquifer Remediation, Using Genetic Algorithms and MODFLOW" identifica el problema de un acuífero teóricamente confinado que ha estado contaminado durante un largo periodo de tiempo por una fuga inadvertida en una tubería que transporta lixiviados,

por lo cual investiga el proceso de remediación óptimo mediante dos (2) pozos de bombeo en el acuífero utilizando el software MODFLOW 6 y algoritmos genéticos. Mediante MODFLOW el autor determina la localización y ratio de bombeo óptima de los pozos de bombeo, los cuales bombearán el agua contaminada protegiendo el pozo de agua potable existente. El estudio concluye que, el modelo acoplado de MODFLOW y algoritmos genéticos complementado con un sofisticado post procesamiento de resultados provee estrategias adecuadas de remediación para los tomadores de decisiones (Kontos, 2024).

López (2015) realizó la investigación “Desarrollo de métodos numéricos-interpretativos para la realización de ensayos de bombeo”. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. El autor en su investigación, indica que los ensayos de bombeo son una de las pruebas más fiables que se hacen en el medio físico, así mismo manifiesta que en la tesis, el autor ha buscado una vía de interpretar ensayos de bombeo haciendo uso de modelos de simulación de flujo, utilizando el modelo universal MODFLOW del United States Geological Survey, teniendo como producto un modelo específico y la aplicación de uso general para la interpretación numérica de ensayos de bombeo tanto en configuraciones normales como configuraciones complejas del medio físico (López, 2015).

2.2.2 Antecedentes nacionales

En el Perú la única refinería de zinc existente es la refinería de zinc Cajamarquilla, por lo cual no se encontraron investigaciones nacionales relacionadas a la extracción de solución de jarosita, no obstante, es un buen referente el estudio “Planning the Dewatering of Tailings Storage Facility” artículo presentado en la revista Mine Water and Environment, realizado por Ruiz et al. (2021), quienes realizaron la investigación para determinar la posibilidad de desaguar los relaves en la Mina San Rafael ubicada en el departamento de Puno. Donde indican que se requiere reprocesar los relaves debido a su alto contenido de estaño, uno de los

problemas es que los relaves están parcialmente saturados por lo cual se requiere el drenaje para que sea posible el minado de los relaves antiguos, por lo cual describen las actividades necesarias para lograr drenar el agua de los relaves, los cuales incluyen ingeniería básica enfocada en la caracterización hidrogeológica de los relaves donde estimaron que la conductividad hidráulica va desde 0.05 a 1.0 m/d para relaves gruesos y de 0.05 a 0.0005 m/d para relaves finos, recomiendan ensayos y modelamiento para definir la ingeniería de detalle y así poder desarrollar una estrategia adecuada para realizar el minado. El modelamiento numérico del sitio de estudio durante las etapas de ingeniería les permitió simular y analizar diferentes escenarios de deshidratación, variando el número de pozos, tiempos y tasas de bombeo, así como sectores y niveles con propiedades físicas e hidráulica, de acuerdo al plan de mina. De los numerosos programas existentes para modelos de flujo no saturado utilizaron el código FEFLOW para llevar a cabo escenarios numéricos en la definición de un modelo de desaguado. De acuerdo al modelo hidrogeológico, el tiempo requerido para el desaguado de toda el área dependía de la conductividad hidráulica de los sectores del depósito de relaves. Los resultados del modelado establecieron la necesidad de implementar 25 pozos de bombeo, de diferentes diámetros (6 a 8 pulgadas equivalente a 15–20 cm) y profundidades (30–60 m) distribuidos convenientemente en el depósito de relaves. Concluyen que, las actividades de deshidratación son muy desafiantes y se requieren tiempos prolongados para desaturar adecuadamente los materiales de baja permeabilidad (Ruiz et al., 2021).

2.3 Bases teóricas

2.3.1. Jarosita en el proceso metalúrgico de Zinc

Zhu et al. (2024) indican que los residuos o desechos de jarosita son un subproducto generado del proceso de remoción de hierro no deseado en el proceso de jarosita. El proceso de precipitación de jarosita es el más utilizado para la remoción del hierro en el proceso de extracción hidrometalúrgica de zinc (Asimi, Gharibi, Abkhoshk y Chelgani, 2020). Los residuos de jarosita generados durante la extracción hidrometalúrgica del zinc, representan problemas ambientales debido a la toxicidad de los metales pesados (Kerolli Mustafa, Djokic y Ćurković, 2022), ya que son depositados en vertederos. A continuación, se detallan aspectos clave sobre la jarosita en este contexto:

Generación y Composición: La jarosita se forma cuando el hierro se precipita en forma de sulfato de hierro (jarosita) durante la purificación del zinc (Kumar Singh, Manna, Kumar Biswas y Pugazhendhi, 2023). Contiene varios metales pesados como hierro, zinc, plomo, cadmio y otros elementos tóxicos (Zhu et al., 2024).

Problemas Ambientales: La jarosita es considerada un residuo peligroso debido a su contenido de metales pesados y su potencial para contaminar el agua subterránea y el suelo si no se maneja adecuadamente (Kumar Singh et al., 2023). Su disposición se realiza en vertederos (Zhu et al., 2024), requiere tratamientos de estabilización para minimizar los riesgos ambientales (Mombelli et al., 2018).

2.3.2. Parámetros hidrogeológicos

Los parámetros hidrogeológicos en un acuífero son la porosidad (n), rendimiento específico (S_y), retención específica (S_r), coeficiente de almacenamiento (S), almacenamiento específico (S_s), transmisividad (T), conductividad hidráulica (K).

Porosidad (n). La porosidad es el volumen de espacio vacío de un suelo, se representa por la fracción de vacíos respecto al volumen total y toma valores entre 0 y 1 o 0 al 100%. Generalmente en suelos la porosidad es inversamente proporcional al tamaño de grano. A medida que el tamaño de grano es mayor la porosidad disminuye. En la ecuación (1) se observa la porosidad representada en porcentaje, donde:

n : porosidad (%)

V_v : Volumen de vacíos

V_t : Volumen total de la muestra

$$n = \frac{V_v}{V_t} 100 \text{ (\%)} \quad (1)$$

Rendimiento específico (S_y). El rendimiento específico se utiliza principalmente en acuíferos libres y se refiere al volumen de agua que puede ser drenado por gravedad. Es la fracción obtenida del volumen de agua drenada respecto al volumen total de la muestra de suelo (Woessner & Poeter, 2020). El rendimiento específico (S_y) es un parámetro crucial en hidrogeología, que representa el volumen de agua que un acuífero libera del almacenamiento por unidad de superficie por unidad de disminución del nivel freático. Los valores de rendimiento específico pueden variar significativamente dependiendo de varios factores, incluida la textura y composición del suelo, la profundidad del nivel freático y la heterogeneidad del acuífero. Factores como la evapotranspiración y la infiltración pueden influir en el rendimiento específico, especialmente en entornos de nivel freático poco profundo. Teniendo una muestra saturada, la ecuación (2) representa como obtener el rendimiento específico (S_y) dividiendo el volumen de agua drenada (V_d) entre el volumen total (V_t) de la muestra saturada.

$$S_y \text{ (\%)} = \frac{V_d}{V_t} 100 \quad (2)$$

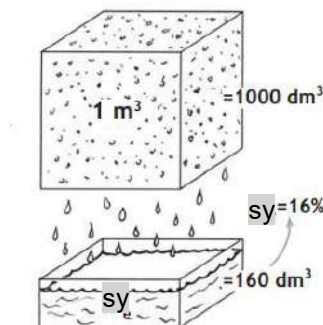
La representación del rendimiento específico se muestra en la Figura 1 y la relación de granulometría y rendimiento específico se muestra en la Figura 2.

En la Figura 1 el rendimiento específico (S_y) está representado por el porcentaje obtenido de la división entre los 160 dm^3 de agua drenados entre los 1000 dm^3 que representa el volumen total de la muestra saturada antes de ser drenada.

La estimación del rendimiento específico (S_y) está sujeta a incertidumbre, por lo tanto, determinar un valor adecuado de rendimiento específico en la práctica sigue siendo un gran desafío, ya que no existe un método ampliamente aceptado para su estimación. Específicamente, los diversos métodos a menudo producen valores inconsistentes para materiales de suelo similares incluso para un sitio de prueba determinado.

Figura 1

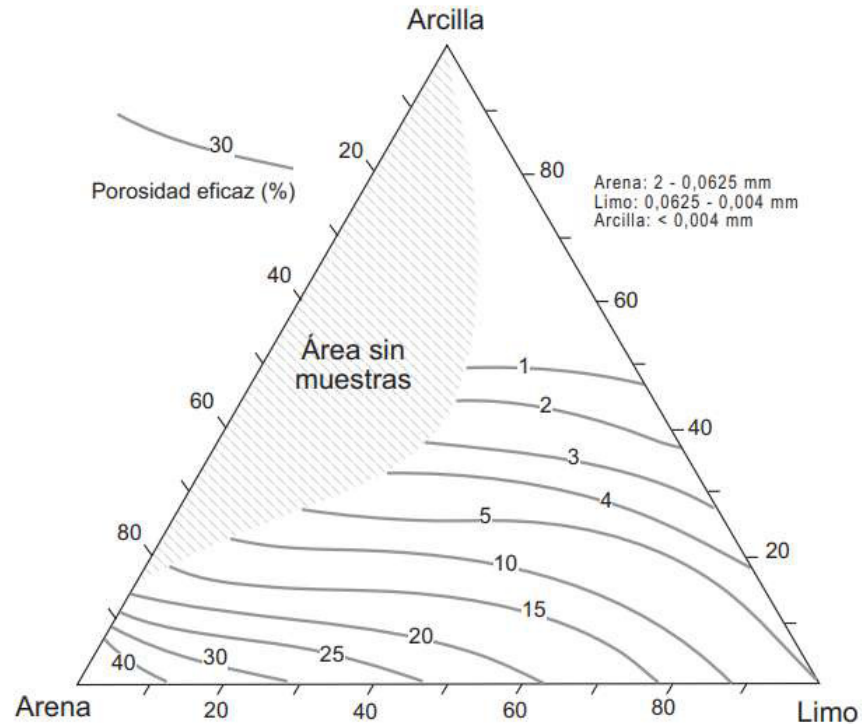
Representación de la porosidad eficaz por drenaje (rendimiento específico).



Nota. Adaptado de *Conceptos Fundamentales de Hidrogeología*, de F. Sánchez (s.f). (https://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf). Obra de dominio público.

Figura 2

Relación granulometría- rendimiento específico (Sy)



Nota. Adaptado de *Conceptos Fundamentales de Hidrogeología*, de F. Sánchez (s.f). (https://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf). Obra de dominio público.

Retención específica (Sr). Es la cantidad de agua que no puede ser drenada libremente por gravedad y queda retenida por la muestra de suelo debido a la atracción molecular y la tensión superficial. Teniendo una muestra saturada, la retención específica es la fracción obtenida del volumen de agua retenida (V_r) en el suelo respecto al volumen total de la muestra de suelo (V_t) cuando el material saturado es drenado, lo cual se representa en la ecuación (3). El valor puede ser representado en fracción o en %.

$$Sr (\%) = \frac{V_r}{V_t} 100 \quad (3)$$

Teniendo en cuenta la Figura 1, si se tiene una muestra seca de 1000 dm^3 (1 m^3), y para saturarla necesitamos introducir 280 dm^3 (280 l) al momento de drenarla se obtuvo 160 dm^3 (160 l) de agua. La

porosidad está representada por los 280 dm³ (28%), el rendimiento específico es el agua drenada de 160 dm³ (16%), en consecuencia, la diferencia entre la porosidad (n) y el rendimiento específico (S_y) es la retención específica (S_r) de 120 dm³ (12%).

De lo antes mencionado se afirma que la porosidad (n) es la suma del rendimiento específico (S_y) y de la retención específica (S_r) tal como se expresa en la ecuación (4).

$$n = S_y + S_r \quad (4)$$

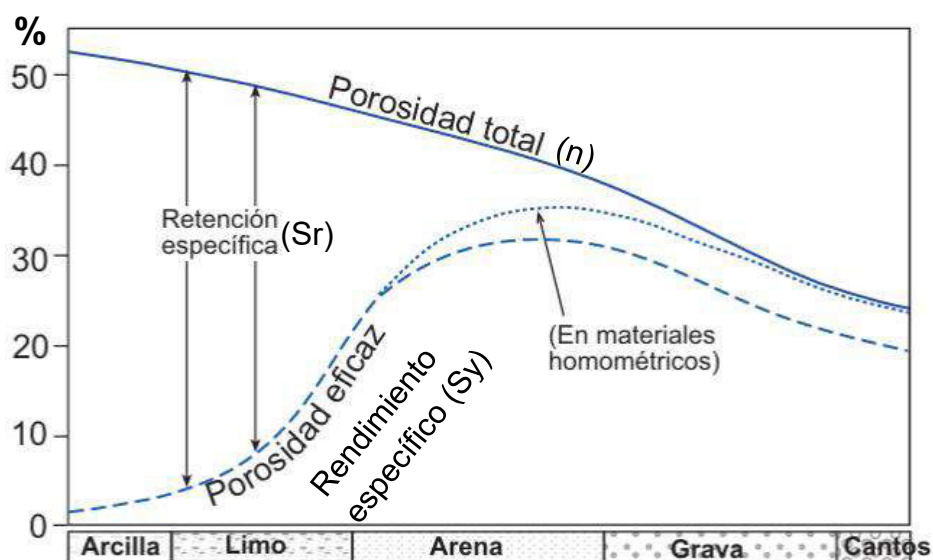
En la Figura 3 se muestra un diagrama representativo de la porosidad total, rendimiento específico y retención específica según el tipo de suelo.

La Figura 3 evidencia claramente que la retención específica (S_r) es la diferencia entre la porosidad total (n) y el rendimiento específico (S_y). Los acuíferos arenosos tienen un mayor rendimiento específico (S_y), seguido de las gravas y cantos. El rendimiento específico (S_y) en el contacto de limo y arena es inferior al 20%. Si bien la porosidad total (n) es mayor en las arcillas, el rendimiento específico (S_y) es menor, su distribución granulométrica les proporciona gran cantidad de espacios vacíos (poros) no obstante en un suelo saturado al drenarlo la cantidad de agua obtenida es mínima y la cantidad de agua retenida es en mayor proporción.

En la Tabla 1, se observa los valores de rendimiento específico (S_y) para arcillas y limos tomado de diferentes estudios. Los valores para arcillas varían de 0.5 a 5% y en limos de 3 a 19 %.

Figura 3

Variación de la porosidad total (n), porosidad eficaz (rendimiento específico) (S_y) y retención específica (S_r) con la granulometría de los suelos



Nota. Adaptado de *Conceptos Fundamentales de Hidrogeología*, de F. Sánchez (s.f). (https://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf). Obra de dominio público.

De la información obtenida de las figuras y tabla mostrados anteriormente, en la presente investigación se usaron valores de rendimiento específico (S_y) de 0.02 (2%), 0.05 (5%) y 0.1 (10%), debido a que, en todos los ensayos de granulometría realizados, la arena representa el 1% y los finos el 99% por lo cual se tiene suelos CL (arcillas) y ML (limos) según la clasificación SUCS.

Tabla 1*Valores de rendimiento específico (Sy)*

Material	Porosidad (n) %	Rendimiento específico (Sy) %	Retención específica (Sr) %	Fuente
Arcilla (clay)	50	2	48	(Selim, 2017)
Arcilla (clay)	55	3	-	(Auer, 2019)
Arcilla (clay)	-	0.5-4.5	-	(Richey, y otros, 2015)
Arcilla (clay)	-	3	-	(Todd & Mays, 2004)
Arcilla (clay)	-	0-5 (2)	-	(Johnson, 1963)
Limo (silt)	-	3-19 (8)	-	(Johnson, 1963)
Limo (silt)	-	8	-	(Todd & Mays, 2004)

Coefficiente de almacenamiento o almacenamiento (S). El coeficiente de almacenamiento (S) se usa en acuíferos confinados y es el análogo al rendimiento específico (Sy) de los acuíferos libres. Mientras en el acuífero libre se aporta agua por vaciado, en el acuífero confinado se aporta agua por descompresión.

El coeficiente de almacenamiento es el volumen de agua que cede un prisma de acuífero de base cuadrada unitaria cuando se le deprime un metro. Es adimensional. Se puede representar en %. En la Tabla 2, se ilustran los valores más adecuados para introducir por tanteo en los ensayos de bombeo cuando las características particulares de la prueba no permitan realizar el cálculo directo.

Tabla 2*Valores de coeficiente de almacenamiento*

Tipo de material permeable	Forma de funcionamiento del acuífero	de Valor de S (medio)
Kárstico: Caliza y dolomías jurásicas	Libre	2×10^{-2}
	Semiconfinado	5×10^{-4}
	Confinado	5×10^{-5}
Kárstico: Caliza y dolomías cretácicas y terciarias	Libre	$2 \times 10^{-2} - 6 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} - 5 \times 10^{-5}$
Poroso intergranular: Gravas y arenas	Libre	$5 \times 10^{-2} - 15 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	10^{-3}
	Confinado	10^{-4}
Kárstico y porosos: Calcarenitas marinas terciarias	Libre	$15 \times 10^{-2} - 18 \times 10^{-2}$

Nota. Datos tomados de *Pozos y acuíferos: Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*, por M. Villanueva y A. Iglesias, 1984, Instituto Geológico y Minero de España.

Almacenamiento específico (Ss). El almacenamiento específico representa la capacidad del acuífero para liberar o absorber agua cuando cambia el nivel del agua, es una propiedad importante del acuífero necesaria para el modelado transitorio de aguas subterráneas y la gestión de los recursos hídricos. En un estudio de recopilación de valores de almacenamiento específico que cubren una amplia gama de materiales acuíferos, incluyendo depósitos no consolidados y rocas se obtuvo que la media geométrica del almacenamiento específico para depósitos no consolidados oscila principalmente entre 10^{-5} y 10^{-4} m^{-1} ,

mientras que la media geométrica del almacenamiento específico para diferentes tipos de rocas oscila principalmente entre 10^{-7} y 10^{-6} m^{-1} (Kuang, Jiao, Zheng, Cherry, y Li, 2020).

Transmisividad (T). Volumen de agua que atraviesa una banda de acuífero de ancho unitario en la unidad de tiempo y bajo la carga de un metro. Representa la capacidad que tiene el acuífero para ceder agua. $T = L^2/T$. Lo más común es que T se mida en $m^2/día$, $m^2/hora$ o m^2/s . Sin embargo, se aconseja trabajar con $m^2/día$ para todos los ensayos. A continuación, ilustra los valores de transmisividad según varios autores (ver Tabla 3).

Tabla 3

Valores de Transmisividad

T($m^2/día$)	Calificación estimada	Posibilidades del acuífero ⁽¹⁾
$T < 10$	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s.
$10 < T < 100$	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s.
$100 < T < 500$	Media a alta	Pozos entre 10 y 50 l/s.
$500 < T < 1000$	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s.
$T > 1000$	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s

Nota. Datos tomados de *Pozos y acuíferos: Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*, por M. Villanueva y A. Iglesias, 1984, Instituto Geológico y Minero de España.

(1) Valores de transmisividad, las posibilidades del acuífero representada para 10 m de depresión teórica.

Conductividad hidráulica (K). La permeabilidad es una propiedad exclusiva del suelo, mientras que la conductividad hidráulica depende de las características del fluido y del suelo. La conductividad hidráulica mide la facilidad con que el fluido se puede mover a través de los poros o fracturas en suelos o rocas.

Los factores que influyen en la conductividad hidráulica son la distribución granulométrica, composición del suelo, temperatura e interacciones químicas.

Distribución granulométrica. La conductividad hidráulica de los suelos está significativamente influenciada por el tamaño de grano y su distribución. Los suelos gruesos tienen mayor conductividad hidráulica que los suelos finos (Chandel y Shankar, 2022).

Composición del suelo. La presencia de diferentes tipos de suelo y su proporción puede afectar la conductividad hidráulica. Por ejemplo, al aumentar la proporción de suelo grueso en una matriz de suelo fino inicialmente disminuye la conductividad hidráulica hasta que se alcanza una proporción de mezcla crítica, después de la cual la conductividad hidráulica aumenta (Qi et al., 2014).

Temperatura. La conductividad hidráulica de suelos tanto de grano fino y grueso aumenta con la temperatura. Esto se debe a cambios de las propiedades de los fluidos, como la viscosidad y la densidad, que afectan la permeabilidad intrínseca del suelo (Joshaghani y Ghasemi-Fare, 2021).

Presión de confinamiento: la conductividad hidráulica de los suelos y rocas disminuye al aumentar la presión de confinamiento (Dafalla et al., 2015).

Interacciones químicas. La presencia de ciertas sustancias químicas, como cationes de metales pesados puede alterar la conductividad hidráulica de los suelos arcillosos. Los efectos de productos químicos sobre la conductividad hidráulica del suelo pueden variar dependiendo de varios factores como el tipo y concentración de sustancia química, el ambiente circundante del tipo de suelo (Gupta, Kumar y Srivastava, 2024).

La conductividad hidráulica es el flujo de agua que atraviesa una sección unitaria de acuífero bajo la influencia de un gradiente unitario a temperatura de campo. Se obtiene como cociente entre la transmisividad T y el espesor del acuífero b . $K=T/b$ y sus dimensiones

serán L/T, es decir, m/día. La conductividad hidráulica (K) es una medida de las características texturales del acuífero, pero no representa las posibilidades de ceder agua. Un acuífero muy permeable, pero de poco espesor puede ser poco transmisivo y como consecuencia, los pozos que se construyan no serán muy caudalosos. Se presentan valores de conductividad hidráulica para suelos según varios autores (ver Tabla 4).

Tabla 4

Valores de conductividad hidráulica

K(m/día)	Valores estimados de conductividad hidráulica	Calificación estimada
K<10 ⁻²	10 ⁻⁸ K<10 ⁻⁴ Arcilla 10 ⁻⁶ K<1 Limo	Muy baja
10 ⁻² <K<1	10 ⁻⁶ K<1 Limo 10 ⁻² K<1 Arena arcillosa 10 ⁻¹ K<1 Arena limosa	Baja
1<K<10	1 K<10 Arena fina	Media
10<K<100	1 K<100 Arena gruesa limpia 1 K<1000 Arena gruesa limpia	Alta
K>100	Grava limpia K>100	Muy alta

Nota. Adaptado de *Pozos y acuíferos: Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*, por M. Villanueva y A. Iglesias, 1984, Instituto Geológico y Minero de España.

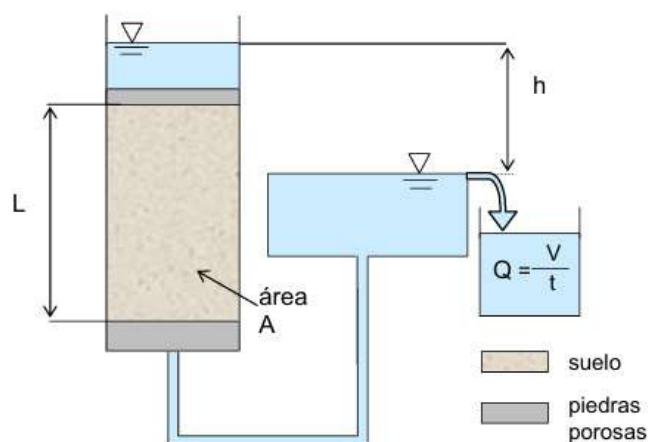
La conductividad hidráulica se mide mediante ensayos de laboratorio, métodos de campo y los métodos empíricos, donde el coeficiente de permeabilidad es obtenido indirectamente a través de relaciones empíricas con otras propiedades del suelo (Angelone, Garibay y Cauhapé Casaus, 2006). En entornos complejos de roca dura la conductividad hidráulica también puede ser medida de forma indirecta por técnicas geofísicas como tomografía de resistividad eléctrica (Gao, Hasan, Shang y Qi, 2024).

Métodos de laboratorio. Dentro de los métodos de laboratorio, para medir la conductividad hidráulica se utilizan la prueba de permeabilidad de carga constante y la prueba de permeabilidad de carga variable.

Prueba de permeabilidad de carga constante. Esta prueba es adecuada para suelos con relativamente permeables, como limos, arenas y gravas. Este método mantiene una diferencia de altura hidráulica constante en toda muestra, permitiendo que el agua fluya a través de ella. El largo L y el diámetro D de la muestra pueden ser medidos. El caudal Q se mide para determinar la conductividad hidráulica (ver Figura 4).

Figura 4

Permeámetro de carga constante



Nota. Tomado de *Geología y Geotecnia: Permeabilidad de Suelos*, por S. Angelone, M.T. Garibay y M. Cauhapé Casaus, 2006, Universidad Nacional de Rosario.

Para el cálculo del coeficiente de permeabilidad se determina primero el caudal Q , midiendo el tiempo t en el cual se llena un recipiente de volumen V conocido.

$$Q = \frac{V}{t} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (1)$$

Una vez que se obtiene el caudal Q y en función de las características del permeámetro, aplicando la Ley de Darcy se obtiene:

$$Q = k \cdot i \cdot A = \frac{V}{t} \quad (2)$$

$$i = \frac{h}{L} \quad (3)$$

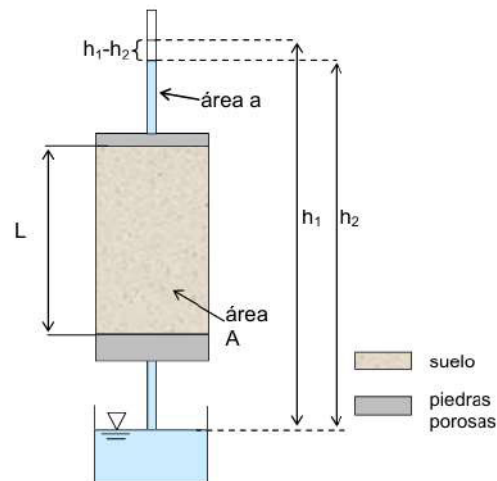
$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (4)$$

Reemplazando (3) y (4) en (2) se obtiene el valor del coeficiente de permeabilidad k.

$$k = \frac{V}{t \cdot i \cdot A} = \frac{V \cdot L}{t \cdot h \cdot A} \quad (\text{m/s}) \quad (5)$$

El Permeámetro de carga variable, es más confiable en suelos menos permeables como arcilla y limo. La cantidad de agua escurrida se mide en forma indirecta mediante la observación de la relación entre la caída del nivel de agua en un tubo recto colocado sobre la muestra y el tiempo transcurrido. La longitud L, el área A de la muestra y el área a del tubo recto son conocidos tal como se muestra en la Figura 5.

El coeficiente de permeabilidad k, se consideran h_1 y h_2 como la altura de agua medida en un tiempo t_1 y t_2 respectivamente; h es la altura de agua intermedia en un tiempo t. La relación de flujo puede ser expresada como el área del tubo recto multiplicado por la velocidad de caída, el signo negativo significa que la carga h disminuye al aumentar el tiempo.

Figura 5*Permeámetro de carga variable*

Nota. Tomado de *Geología y Geotecnia: Permeabilidad de Suelos*, por S. Angelone, M.T. Garibay y M. Cauhapé Casaus, 2006, Universidad Nacional de Rosario.

La ecuación en este caso de acuerdo con la relación de flujo dada por la Ley de Darcy se tiene:

$$\partial Q = a \partial v = -a \frac{\partial h}{\partial t} = k \cdot i \cdot A = k \frac{h}{L} \cdot A \quad (6)$$

Reordenando e integrando la ecuación (6) se obtiene la ecuación (7)

$$-a \cdot \int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{h} \partial h = \frac{k}{L} \cdot A \cdot \int_{t_1}^{t_2} \partial t \quad (7)$$

El coeficiente de permeabilidad k , se expresa en la ecuación (8)

$$k = \frac{a \cdot L}{A \cdot \Delta t} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \cdot A \quad \text{o bien} \quad k = 2.3 \frac{a \cdot L}{A \cdot \Delta t} \cdot \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (8)$$

Las normas para la realización de estos ensayos son AASHTO T 215 y ASTM D 2435 (para suelos granulares) y ASTM D 5084 (para todos los suelos)

Ensayos in situ. Para determinar la conductividad hidráulica in situ, existen los ensayos de carga variable, ensayos de carga constante, Slug Test, Pozos de bombeo, ensayos de campo varios y disipación de cono.

Métodos empíricos. Para determinar la conductividad hidráulica mediante métodos numéricos los autores han tomado como base la Ley de Poiseuille.

$$k = C.D^2 \quad (9)$$

La Ley de Poiseuille indica que si la sección transversal de un tubo es circular la velocidad aumenta con el cuadrado del diámetro del tubo. El diámetro medio de los vacíos de un suelo con una porosidad dada aumenta en relación directa con el tamaño D de las partículas. Los valores que tomar C en la ecuación (9) han sido estudiados por diversos autores tales como Allen Hazen, Schlichter, Terzagui, y Luodon.

2.3.3. Pruebas de bombeo

Una prueba de bombeo es una prueba hidráulica que consiste en bombear tipo pozo bajo un régimen de caudal y así seguir el descenso del nivel de agua en el tiempo (Aburrá, 2021).

En los pozos de bombeo se puede determinar el caudal óptimo se aprovechamiento, sus condiciones de operación y los parámetros hidráulicos del acuífero.

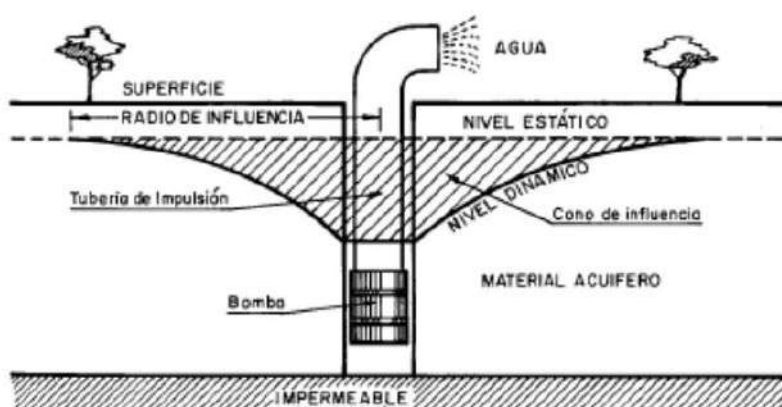
El método de bombeo de pozos consiste en bombear los pozos a caudal constante o variable, se hace seguimiento de la evolución del nivel de agua en el mismo pozo así como en otros pozos cercanos en caso los haya, las variaciones de los niveles permiten obtener información sobre las características del pozo y de los acuíferos.

En una prueba de bombeo, a la superficie de agua inicial se denomina nivel estático, al bombear el pozo el nivel de agua disminuye en el mismo y en una porción del acuífero circundante a él. Se denomina

radio de influencia a la distancia entre el pozo de bombeo y la zona del acuífero en la que la influencia pueda considerarse nula. Por lo tanto, alrededor del pozo se forma un cono de bombeo, cuya superficie es la superficie dinámica y el valor de agua en el punto de dicha superficie es el nivel dinámico como se observa en la Figura 6.

Figura 6

Esquema del funcionamiento de un pozo de bombeo



Nota. Datos tomados de *Pozos y acuíferos: Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*, por M. Villanueva y A. Iglesias, 1984, Instituto Geológico y Minero de España.

Las pruebas de bombeo pueden clasificarse en: Pruebas de bombeo a caudal constante, en régimen permanente, variable o transitorio; o a caudal variable o de tipo escalonado. Las pruebas de bombeo a caudal constante y en régimen permanente permiten obtener información relacionada al parámetro hidráulico de la transmisividad (T); mientras que las pruebas efectuadas a caudal variable permiten obtener, además, propiedades como la conductividad hidráulica (K) y coeficiente de almacenamiento (S) del acuífero; los radios de influencia y definir la ecuación del pozo para conocer su eficiencia y capacidad específica.

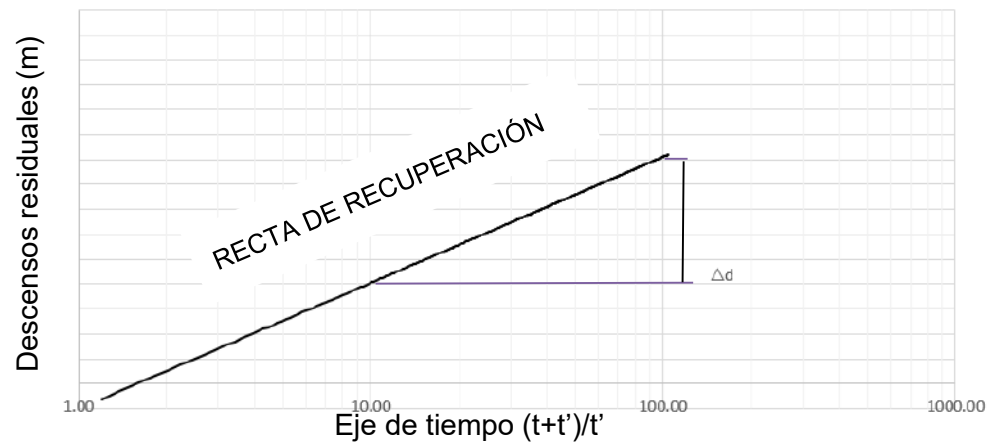
Prueba de bombeo en pozo único. Una prueba de pozo único implica bombear, desplazar o añadir agua y medir los cambios en los niveles de agua en el pozo. Este tipo de prueba permite un cálculo rápido y económico de K y T de la zona de interés en una sola

ubicación. Las pruebas de pozo único también pueden determinar los criterios de respuesta para pozos de observación en pruebas de bombeo de pozos múltiples.

Las pruebas de pozo único deben realizarse en pozos o piezómetros adecuadamente diseñados y desarrollados.

Método de recuperación. Consisten en hacer las interpretaciones del ensayo con base a los datos que se obtienen una vez que el pozo detiene su extracción de agua. A partir de la parada, los niveles empiezan a subir hasta recuperar total o parcialmente el nivel inicial. Este método se basa en el análisis de la recuperación o evolución del ascenso de niveles posterior a la parada. El descenso que se observa en el pozo (descenso residual) diferencia entre los niveles estático y dinámico será como consecuencia la diferencia entre el descenso producido por el bombeo desde que se inició y el ascenso producido por la inyección desde el momento de la parada. La transmisividad “T” es el parámetro que puede obtenerse en el análisis de la recuperación ya que se saca directamente de la pendiente de la recta m. Una prueba de recuperación consiste en la etapa de la prueba de bombeo en la que se miden y registran la evolución de los niveles del agua en ascenso, tanto en el pozo principal como en los pozos de observación (si existen), hasta llegar a una profundidad muy cercana al nivel estático.

Los descensos residuales expresado en metros se grafican en el eje Y, y el tiempo $(t+t')/t$ expresado en minuto se grafica en el eje X, de allí se obtiene la recta de recuperación (ver Figura 7).

Figura 7*Recta de recuperación*

Nota. Figura modificada de *Pozos y acuíferos: Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*, por M. Villanueva y A. Iglesias, 1984, Instituto Geológico y Minero de España.

$$T = 0.183 \frac{Q}{m}$$

Donde $m = \Delta d$, siendo Δd la caída por ciclo logarítmico, entonces:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta d}$$

El cálculo de la conductividad hidráulica (K) para una zona completamente filtrada se realiza dividiendo la transmisividad (T) entre el espesor total de la zona. Una prueba de un pozo con penetración parcial arroja un valor de T que solo indica la porción de la zona que está penetrada por la zona filtrada del pozo (EPA, 2006).

2.3.4. Simulaciones numéricas de flujo subterráneo

Un modelo numérico es una herramienta que representa la versión simplificada de la realidad. Los modelos de aguas subterráneas contruidos de forma apropiada, mediante varios esquemas pueden predecir herramientas para el manejo de recursos subterráneos (Wang y Anderson, 1982). Existen diferentes tipos de modelos que pueden ser usados para sistemas de flujo subterráneo tales como modelos de tanque de arena, modelos analógicos y modelos matemáticos.

Los modelos matemáticos consisten en un conjunto de ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo del agua subterráneo. Los modelos matemáticos pueden ser analíticos y numéricos

Los modelos numéricos pueden ser modelos de elementos finitos y modelos de diferencias finitas, y pueden ser aplicados tanto por su carácter predictivo y también interpretativo. Los modelos numéricos son usados para predecir los efectos de bombeo en el nivel del agua subterránea.

El uso de los modelos numéricos para el estudio de las aguas subterráneas fue generalizado en los años 70, siendo los 80 donde se produjo un gran desarrollo de los códigos de simulación. De los códigos de modelamiento destacan dos MODFLOW y FEFLOW que son una referencia histórica a nivel mundial.

El programa MODFLOW es utilizado ampliamente desde 1984, para simular de manera precisa, confiable y eficiente el flujo de agua subterránea. Con el tiempo, el creciente interés en las interacciones de las aguas superficiales y subterráneas, el refinamiento local con cuadrículas anidadas y no estructuradas, el flujo de agua subterránea kárstica, el transporte de solutos y la intrusión de agua salada han llevado al desarrollo de numerosas versiones de MODFLOW.

El programa FEFLOW, que celebra más de 40 años de estar en el mercado, es un software de simulación y modelado de aguas

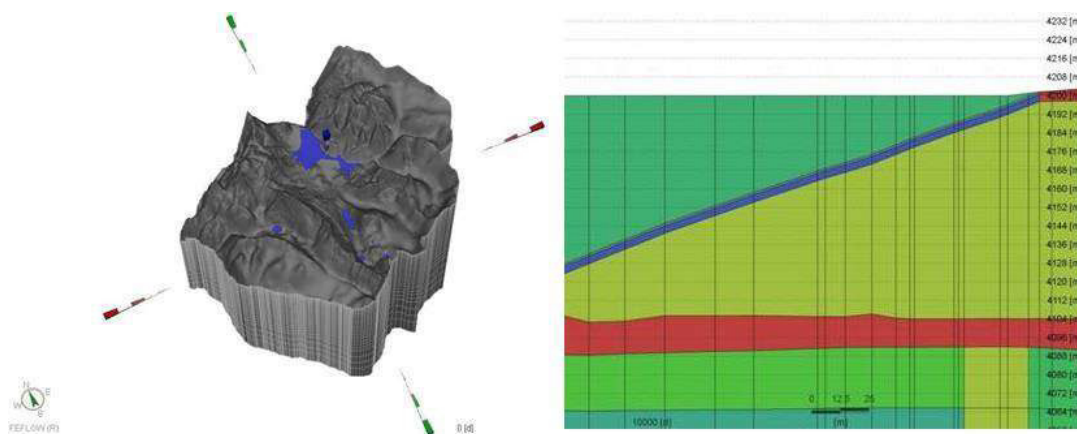
subterráneas de vanguardia, entre ellos el desaguado de aguas subterráneas (DHI, 2024). El software está diseñado específicamente para minería y metales, ingeniería civil, geotecnia, energía geotérmica y servicios medioambientales.

FEFLOW admite modelos simples y complejos con una interfaz gráfica de usuario unificada y fácil de usar que integra herramientas integrales de simulación de flujo, transporte y calor de aguas subterráneas en una sola plataforma, mejorando la eficiencia y la precisión en la ingeniería ambiental.

FEFLOW es un paquete de programas especializados para modelar el flujo de agua subterránea. El código numérico se fundamenta en elementos finitos y proporciona una discretización más precisa en áreas de interés (ver Figura 8).

Figura 8

Proyección asimétrica y sección de corte de modelos numéricos en FEFLOW



Nota. Tomado de *Modelamiento de agua subterránea*, por Gidahatari, s.f. Gidahatari (<https://gidahatari.com/ih-es/modelamiento-aguas-subterraneas>)

Según Díaz et al. (2012), indican las bondades de usar MODFLOW o FLEFLOW.

“Su uso está extendido a nivel mundial y su validez contrastada. Presentan una interfaz de usuario accesible y manejable. Son herramientas comerciales que mejoran constantemente y están en continuo desarrollo a un bajo coste. Son muy versátiles, pues poseen la capacidad de simular una variedad muy amplia de problemas distintos. Ofrecen documentación rigurosa sobre su funcionamiento” (Díaz, Fernandez y Alvares, 2012).

FEFLOW es un software completo y de gran renombre para la simulación de transporte y flujo subterráneo. Sus singulares capacidades de malla (estructuradas y no estructuradas) le proporcionan el máximo nivel de flexibilidad para considerar minuciosamente desde las formas geométricas más sencillas hasta las más complejas, asimismo se aplica bien a pequeña escala o a gran escala. Por lo tanto, para la presente tesis se usó el software de modelamiento numérico FEFLOW.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

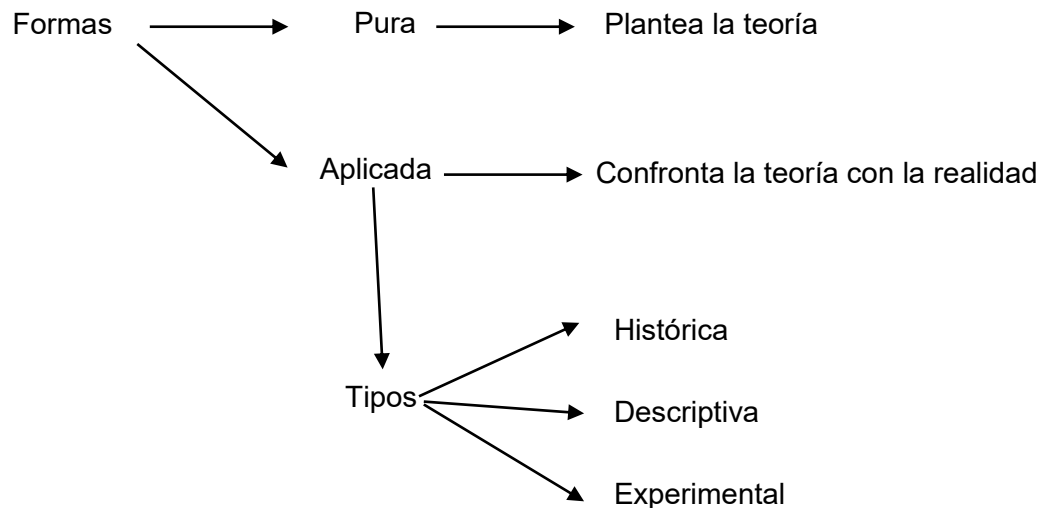
3.1 Tipo y diseño de investigación

El enfoque de investigación es cuantitativo, tipo aplicada de alcance explicativo y diseño cuasi-experimental.

El enfoque es cuantitativo, debido a que es secuencial, probatorio y tiene un orden riguroso (Hernández, Fernández y Baptista, 2014). El proceso del enfoque cuantitativo parte de una idea, se plantea el problema, revisión de literatura y marco teórico, luego se visualiza el alcance del estudio, se procede a la elaboración de hipótesis, se diseña la investigación, selección de muestra, recolección de datos, análisis de datos y finalmente la elaboración del reporte de resultados (Gómez, 2018).

Tamayo (2013) da a conocer dos formas de investigación y tres tipos, de los cuales se desprenden o pueden incluirse los diferentes tipos de investigación (ver Figura 9).

La investigación se aplica a un problema concreto que es la extracción de la solución de la jarosita en el depósito N° 3 de la refinería de zinc Cajamarquilla, por lo cual la forma de investigación es aplicada, denominada también investigación activa o dinámica (Gómez, 2018).

Figura 9*Formas y tipos de Investigación*

Nota. Adaptado de *El proceso de la investigación científica*, por M. Tamayo, 2003, Editorial Limusa S.A.

El alcance de investigación explicativo, se enfoca en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta, o por qué se relacionan dos o más variables (Hernández, Fernández y Baptista, 2014). Debido que se realizaron ensayos de sensibilidad a los parámetros hidrogeológicos que caracterizan la jarosita se puede explicar la causa de variación en la cantidad de solución de jarosita que se puede extraer en el depósito de N° 3 de la concesión de beneficio "Refinería de Zinc Cajamarquilla".

El diseño de investigación es cuasi-experimental debido a que existe manipulación intencional de variables independientes mediante modelamiento numérico, pero sin asignación aleatoria de los tratamientos.

- **No hay aleatorización:** El número de pozos se definió en escenarios de 10, 12 y 15 pozos para procesarlo en el software

FEFLOW. Estos valores no fueron asignados al azar, sino establecidos por el investigador para evaluar su efecto. Los valores de conductividad hidráulica fueron obtenidos a partir de pruebas de campo y ensayos de laboratorio, el rendimiento específico se definió de acuerdo a la literatura y los caudales obtenidos de las pruebas de bombeo variaron de acuerdo a las condiciones del depósito y fueron utilizados como datos de entrada para los diferentes escenarios de simulación.

- **Si hay manipulación:** Se varió los parámetros en cada simulación para medir su impacto en el tiempo de drenaje del depósito.
- **No hay grupo control:** Todos los escenarios se aplican al mismo depósito. Se compara escenarios entre sí.

La presente investigación adopta un diseño cuasi-experimental numérico de tipo factorial múltiple. Se aplicaron 28 tratamientos al grupo único conformado por el depósito N° 3 de jarosita de la Refinería Cajamarquilla. Los factores manipulados fueron: (1) conductividad hidráulica K con valores de campo y laboratorio, (2) caudal de bombeo Q con tres niveles (0.5, 1.0 y 1.5 m³/día), y (3) rendimiento específico S_y con tres niveles (0.02, 0.05 y 0.1), en escenarios con 10, 12 y 15 pozos de extracción. La variable dependiente medida fue el descenso del nivel freático en metros en 1095 días. El diseño se representa como $G: O X_1 O_1 X_2 O_2 X_3 O_3 \dots X_{28} O_{28}$, donde G es el depósito N° 3, X son los 28 escenarios de modelamiento y O son las mediciones de descenso obtenidas. Es cuasi experimental debido a la ausencia de asignación aleatoria y grupo control, propio de estudios en condiciones reales de campo.

Según Montgomery (2017), es apropiado cuando el interés del investigador reside en estudiar el efecto de dos o más factores y las interacciones entre ellos, siendo la estrategia más eficiente cuando todos los factores son de interés. En este caso, el objetivo fue determinar la estrategia óptima de desagüe, lo cual exige evaluar no solo el efecto

individual de Q, Sy, sino también su interacción, descartando diseños unifactoriales.

En consecuencia, el diseño factorial múltiple permite realizar el análisis de efectos principales y sensibilidad para contrastar las hipótesis específicas, determinando qué factores son determinantes (Q, Sy) y cuáles actúan como parámetros de referencia (K).

3.2 Variables de investigación

3.2.1. *Variable independiente*

Caracterización hidrogeológica de los residuos de jarosita.

3.2.2. *Variable dependiente*

Estrategia óptima de extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3 de la Refinería de Zinc Cajamarquilla para el cierre ambiental.

3.2.3. *Matriz de operacionalización de variables*

El proceso metodológico consistió en descomponer de manera deductiva las variables de estudio, comenzando desde lo general hasta lo específico.

Variable Independiente: Caracterización hidrogeológica de los residuos de jarosita

Definición real: enumeración de sus dimensiones

De acuerdo a lo mencionado por Custodio y Llamas (2001), la caracterización hidrogeológica de un acuífero comprende la determinación de sus parámetros físicos e hidráulicos (p.156), lo cual es concordante con lo expresado por Freeze y Cherry (1979), que indica que la caracterización hidrogeológica de medios porosos requiere cuantificación de propiedades hidráulicas y físicas.

Caracterizamos hidrogeológicamente el depósito N° 3, mediante las dimensiones de parámetros hidráulicos, datos de campo y condiciones iniciales.

Definición operacional: selección de indicadores

Los indicadores fueron conductividad hidráulica, caudal de bombeo y rendimiento específico y el nivel freático inicial.

Variable Dependiente: Estrategia óptima de extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3 de la Refinería de Zinc Cajamarquilla para el cierre ambiental.

Definición real: enumeración de sus dimensiones

Sánchez (2019) indica que la estrategia de cierre incluye sistemas de extracción de soluciones contaminantes para estabilizar el depósito. Las estrategias de extracción usando pozos son aplicadas para controlar la superficie del nivel freático para reducir el riesgo ambiental en depósitos de residuos mineros (Wels y MacGowan, 2017).

Las dimensiones fueron el diseño de la red de pozos y el abatimiento del nivel freático (descenso).

Definición operacional: selección de indicadores

Los indicadores fueron el número de pozos, descenso del nivel freático (m) y volumen extraído (m³).

El cuadro de operacionalización de variables se muestra en el Anexo 2.

Otros

Adicionalmente se realizó la caracterización geoquímica de la solución de la jarosita, mediante el contenido de metales pesados en solución, enfocado en la concentración del Zinc (mg/L), siendo el indicador el valor recuperable de zinc expresado en dólares por el total de toneladas de Zn presente en la solución.

3.3 Unidad de análisis

La unidad de análisis de la presente investigación es el depósito N° 3 de la refinería de Zinc Cajamarquilla por ser el sistema hidrogeológico para el cual se busca determinar la estrategia óptima de drenaje.

Unidad de análisis: Sobre qué se obtiene las conclusiones → Depósito N° 3 analizado con 28 escenarios.

Se definieron 28 escenarios, de cada escenario se obtuvo como variable respuesta el descenso del nivel proyectado a 3650 días de bombeo y se hizo un corte a 1095 días para propósito de la presente investigación.

Unidad de observación: De dónde se obtiene el dato → testigos de 0.1016 m y pozos de bombeo

La unidad de observación para determinar la conductividad hidráulica utilizada en el modelamiento numérico, fueron los testigos de perforación de 0.1016 m de diámetro por 0.1016 m de longitud, extraídos del depósito N° 3 y las pruebas de bombeo en tres pozos de bombeo, de donde se pudo estimar el caudal de bombeo.

3.4 Población y muestra

3.4.1. Población

La población de estudio está constituida por el depósito N° 3 de la refinería de zinc Cajamarquilla, ubicado en el distrito de Lurigancho-Chosica, Lima. Se trata de una población finita y única, conformada por el volumen total de residuos de jarosita almacenados, sobre el cual se requiere definir la estrategia óptima de extracción de solución para su cierre ambiental. Las fotografías del depósito N° 3 se encuentran en el Anexo 4 y la ubicación del depósito N° 3 se presenta en el Anexo 5.

3.4.2. *Muestra*

En la presente investigación, se aplicó muestreo no probabilístico debido a que se trabajó con el 100% de la población mediante modelamiento numérico. La evaluación se realizó sobre la totalidad del depósito N° 3 aplicando 28 tratamientos, representados por los escenarios EC_1 a EC_21 y E1 a E7 de la Tabla 15. Cada escenario simuló condiciones operativas distintas sobre el mismo depósito. Por lo tanto, el tamaño de la muestra para el análisis comparativo es $n=28$ escenarios.

3.4.3. *Selección de la muestra / Muestreo*

La población está representada por el depósito N° 3, en cuanto a la muestra no aplica muestreo porque se modeló toda la población y la unidad de análisis son los 28 escenarios, $n= 28$.

La definición de 28 escenarios de modelamiento numérico responde a un diseño factorial parcial balanceado, sustentado en criterios técnicos, operativos y estadísticos:

- a. **Criterio técnico-hidrogeológico:** Se evaluaron los parámetros que controlan el flujo en medios porosos según la Ley de Darcy y la ecuación de flujo subterráneo. El rango de valores para K utilizado cubre la incertidumbre entre datos de campo y laboratorio reportados para materiales finos ML. Los caudales 0.5, 1.0, 1.5 m³/d representan rangos operativos factibles de acuerdo a los caudales de bombeo obtenidos en las pruebas de campo (pozos de bombeo).
- b. **Criterio operativo-realista:** El número de pozos se definió en función del área del depósito y la interferencia hidráulica entre pozos. Más de 15 pozos genera interferencia negativa y sobre costo; menos de 10 pozos no logra el radio de influencia requerido para deprimir el nivel de solución en todo el depósito en tiempos razonables de cierre. Los valores S_y (0.02, 0.05, 0.1) corresponden a los rangos típicos para suelos finos ML.
- c. **Criterio estadístico y de saturación:** Se aplicó un diseño factorial fraccionado seleccionando 28 combinaciones que representan

valores extremos, condiciones de campo vs laboratorio y puntos medios. Este número de escenarios son suficientes para identificar la estrategia óptima sin redundancia de datos.

Muestreo para caracterización. Para la obtención de los parámetros hidrogeológicos se realizaron pruebas de campo y laboratorio. Para las pruebas de bombeo y el muestreo de laboratorio se adopta un tipo de muestreo probabilístico estratificado, debido a que se divide al depósito N° 3 en tres estratos, uno al norte, otro al centro y otro al sur. En cada estrato se perforó un pozo y se realizó la prueba de bombeo en los tres pozos perforados, a su vez para laboratorio se extrajeron tres muestras de suelo de cada pozo y los resultados fueron valorados en concordancia con la porción del estrato de la población total (ver Figura 11).

Figura 10

Plataforma superior del depósito N°3



Nota. En el estrato norte se ubicó el pozo N° PJ3-HG1, en el estrato centro se ubicó el pozo PJ3-HG2 y en el estrato sur se ubicó el pozo PJ3-HG3.

La ubicación de los sondajes de muestra en la Tabla 5 y la ubicación de las muestras y los ensayos realizados en cada muestra se presenta en la Tabla 6.

Tabla 5

Ubicación de sondajes

Sondaje Nº	Coordenadas UTM Datum WGS 84		Profundidad (m)
	Este	Norte	
PJ3-HG1	295023	8675754	9.00
PJ3-HG2	295036	8675700	12.00
PJ3-HG3	295025	8675652	6.00

Tabla 6

Ubicación de muestras enviadas al laboratorio

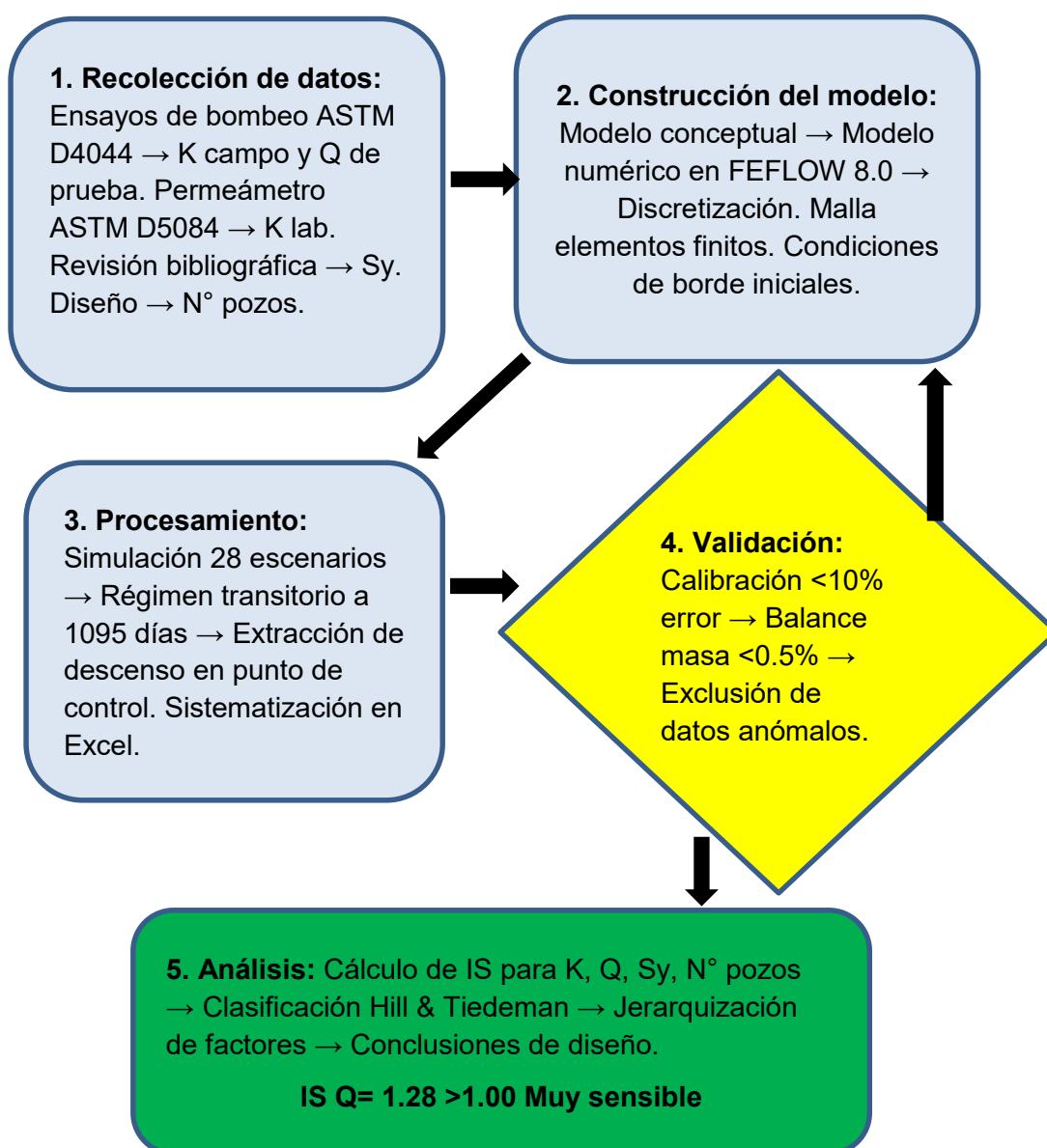
Sondaje Nº	Muestra Nº	Profundidad (m)	Peso Volumétrico	Contenido de humedad	SUCS y permeabilidad de carga variable
PJ3-HG1	1	1.50 a 2.00	Sí	Sí	No
PJ3-HG1	2	2.02 a 3.00	No	Sí	Sí
PJ3-HG1	3	6.50 a 7.50	No	Sí	Sí
PJ3-HG1	4	7.50 a 8.00	Sí	Sí	No
PJ3-HG1	5	8.00 a 9.00	No	Sí	Sí
PJ3-HG2	1	3.30 a 4.80	No	Sí	Sí
PJ3-HG2	2	6.00 a 8.50	No	Sí	Sí
PJ3-HG2	3	8.00 a 8.50	Sí	Sí	No
PJ3-HG2	4	10.0 a 12.0	No	Sí	Sí
PJ3-HG3	1	1.50 a 3.00	No	Sí	Sí
PJ3-HG3	2	3.00 a 4.50	No	Sí	Sí
PJ3-HG3	3	4.50 a 6.00	No	Sí	Sí

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

El procedimiento metodológico seguido en la presente investigación se resume en la Figura 11. El proceso inicia con la recolección de parámetros de campo y laboratorio, continúa con el procesamiento mediante modelamiento numérico en FEFLOW, y finaliza con el análisis de sensibilidad para jerarquizar factores. A continuación, se detalla cada etapa.

Figura 11

Flujograma metodológico de investigación



3.5.1. Técnicas de investigación

- a. Observación directa: Se realizó el reconocimiento del depósito N° 3 para identificar condiciones geométricas, puntos de acceso y estado actual del nivel de solución de la jarosita.
- b. Análisis documental: Se revisaron estudios previos, normativa ambiental, entre otros.
- c. Perforación diamantina y ensayos de campo: Se ejecutaron perforaciones para extraer testigos y se realizaron pruebas de bombeo y recuperación para obtener el caudal de bombeo y la conductividad hidráulica de campo.
- d. Ensayos de laboratorio: Mediante ensayos de laboratorio se obtuvo la conductividad hidráulica de laboratorio.
- e. Modelamiento numérico: Se utilizó software especializado en flujo de aguas subterráneas para simular 28 escenarios de extracción, variando N° de pozos, K, Q y Sy según diseño factorial.
- f. Observación mediante análisis instrumental/espectrometría: Es una técnica usada para detectar las trazas de metales en muestras líquidas, este ensayo tiene la capacidad de identificar y cuantificar todos los elementos, se realizará este ensayo sobre la solución líquida extraída de la jarosita para determinar la cantidad de Zn en la solución
- g. Observación mediante ensayo geoquímico estático: Su finalidad es determinar el potencial de generación de drenaje ácido de los residuos de jarosita.
- h. Procesamiento de datos/ Análisis cuantitativo: Para determinar el valor recuperable del Zn en solución de jarosita.

3.5.2. Instrumentos de investigación

Los instrumentos vienen a ser los formatos estándar de recolección de datos de bombeo, así como los formatos para los ensayos de laboratorio. La metodología de recolección de datos de puede observar en la Tabla 7.

Tabla 7*Metodología de recolección de datos*

Qué datos son necesarios	Con qué instrumentos recogemos la información	Dónde, cuándo y cómo se obtiene la información
Caracterización hidrogeológica del depósito N° 3.	Mediante pruebas de bombeo en campo y ensayos de laboratorio.	La toma de datos se realiza en el depósito N° 3 en la refinería de Zinc Cajamarquilla, mediante la observación, medición y recolección de muestras.
Modelos numéricos en régimen permanente y transitorio.	Mediante software FEFLOW.	El modelamiento de datos se realizó durante el año 2024 con la data obtenida en campo y laboratorio.
Procesamiento	Los datos fueron exportados a hojas de cálculo. Se aplicaron criterios de evaluación como menor descenso (asociado a un menor S_y) y menor tiempo.	El procesamiento de datos se realizó durante el desarrollo de la investigación con la data obtenida en campo y laboratorio.

La matriz de instrumentos se encuentra en el Anexo 3.

3.5.3. Procesamiento de datos

El procesamiento de la información se realizó mediante modelamiento numérico y herramientas de análisis de datos, siguiendo tres etapas: (a) simulación de flujo de agua subterránea, (b) extracción y sistematización de resultados, y (c) tratamiento de datos para análisis de sensibilidad.

a. Simulación de flujo de agua subterránea

Se utilizó el software FEFLOW 8.0 basado en el método de elementos finitos para simular el flujo de agua subterránea en régimen transitorio. Se construyó un modelo de acuífero libre, discretizado mediante una

mallla triangular no estructurada con refinamiento en la zona de pozos de bombeo, según criterios de Anderson et al. (2015). El período de simulación fue de 1095 días, y 3650 días con pasos de tiempo automáticos controlados por el esquema adaptativo de FEFLOW para garantizar estabilidad numérica. Los parámetros de entrada K, Q, Sy y N° de pozos fueron definidos según el diseño factorial múltiple.

b. Extracción y sistematización de resultados

La variable de salida, descenso (m) a 1095 días, fue extraída de la celda de observación ubicada en el punto de control del modelo mediante el paquete de observación de carga hidráulica de FEFLOW. Los 28 valores de descenso obtenidos fueron exportados y sistematizados en Microsoft Excel 365. En Excel se construyó la matriz de escenarios, donde cada fila corresponde a una simulación y las columnas contienen los factores K, Q, Sy, N° de pozos y el descenso resultante. Esta matriz constituyó la base de datos para el análisis posterior.

c. Tratamiento de datos para análisis de sensibilidad

Con la matriz de escenarios se aplicaron filtros en Excel para conformar grupos comparables bajo el principio *_ceteris paribus_*, aislando el efecto de cada factor. Los cálculos de variación porcentual e Índice de Sensibilidad (IS) se realizaron mediante fórmulas automatizadas en hojas de cálculo. La identificación de datos anómalos se realizó por verificación del principio de balance de masa y superposición lineal; los valores inconsistentes fueron excluidos del cálculo de efectos principales conforme a las recomendaciones de Montgomery (2017) para tratamiento de outliers en diseños factoriales. Los resultados fueron organizados en tablas resumen y gráficos de efectos principales para su interpretación.

3.6 Análisis e interpretación de la información

El procesamiento y análisis de los datos obtenidos del modelo numérico se realizó en tres etapas secuenciales: (a) organización de escenarios, (b) análisis de sensibilidad paramétrica, y (c) interpretación hidrogeológica de resultados.

a. Organización y sistematización de escenarios

Los 28 escenarios simulados en FEFLOW fueron organizados en una matriz de diseño factorial múltiple considerando 4 factores: conductividad hidráulica (K), caudal de bombeo (Q), rendimiento específico (Sy) y número de pozos. Para aislar el efecto individual de cada factor, se conformaron grupos comparables donde solo varía el parámetro de interés, manteniendo constantes los demás factores según el principio *_ceteris paribus_* (Montgomery, 2017). Los datos anómalos que violaron el principio de balance de masa fueron identificados mediante análisis de coherencia física y excluidos del cálculo de efectos principales para evitar sesgo en la estimación.

b. Análisis de sensibilidad paramétrica

La influencia de cada factor sobre el descenso a 1095 días se cuantificó mediante el Índice de Sensibilidad (IS), definido como la razón entre el cambio porcentual en la variable de salida y el cambio porcentual en el parámetro de entrada (Anderson et al., 2015):

$$IS = \frac{\% \text{Cambio en la variable de salida}}{\% \text{Cambio en el parámetro de entrada}}$$

Los valores de IS fueron clasificados según los rangos propuestos por Hill & Tiedeman (2007): $|IS| < 0.05$ insensible, 0.05-0.25 poco sensible, 0.25-1.00 moderadamente sensible, > 1.00 muy sensible. El signo del IS indica la dirección de la relación: positivo para relación directa y negativo para relación inversa. Este análisis permitió jerarquizar los 4 factores evaluados y determinar su rol en la estrategia de desagüe.

c. Interpretación hidrogeológica y validación

Los resultados del análisis de sensibilidad fueron interpretados bajo criterios hidrogeológicos para validar su coherencia física. Los factores clasificados como muy sensibles ($IS > 1.00$) fueron considerados variables de control operativo del sistema de desagüe, mientras que los factores poco sensibles o insensibles ($IS < 0.25$) fueron considerados parámetros de caracterización con baja influencia en el diseño. La interpretación se contrastó con literatura especializada para validar que el modelo reproduce el comportamiento esperado de un sistema acuífero conformado por suelos finos ML de baja conductividad hidráulica.

En la Tabla 8 se muestran los criterios del índice de Sensibilidad.

Tabla 8

Rangos de clasificación del índice de sensibilidad

IS	Clasificación	Interpretación para el diseño
< 0.05	Insensible	Parámetro de caracterización. No influye en decisiones de diseño
0.05 - 0.25	Poco sensible	Parámetro de optimización. Ajuste fino del sistema
0.25 - 1.00	Moderadamente sensible	Parámetro de control secundario
> 1.00	Muy sensible	Parámetro de control principal. Define la estrategia

Nota. Adaptado de *Hill & Tiedeman (2007)* y *Anderson et al. (2015)*.

Para determinar el grado de variabilidad de la conductividad hidráulica en las muestras ensayadas en los tres pozos de bombeo, se consideró la prueba estadística de Kruskal-Wallis la cual es conocida también como prueba H. Este test permite contrastar si las diferentes muestras están distribuidas equitativamente, es decir que las muestras provienen de una misma población (H_0) o al menos una muestra proviene de una población con una distribución distinta (H_1). Se utilizó el programa estadístico conocido como SPSS (Statistical Package for the Social

Sciences), el programa mencionado es uno de los que tiene mayor uso en Estados Unidos, así como en América Latina.

Asimismo, para organizar la información y procesarla, además del programa estadístico conocido como SPSS se utilizaron los siguientes programas, Excel (para organizar los resultados en tablas), Autocad civil (topografía inicial), QGIS (procesamiento de topografía), FEFLOW (modelamiento numérico).

En el presente estudio se determinó que el factor predominante para la selección del mejor escenario de desaguado es el caudal de bombeo con un índice de sensibilidad de 1.28 con relación directa al descenso, el rendimiento específico es un factor secundario con un índice de sensibilidad de 0.10 con relación inversa al descenso y la conductividad hidráulica es un factor de referencia con un índice de sensibilidad menor a 0.05, considerando al depósito N° 3 como un medio uniforme y así poder diseñar una distribución de pozos regular.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Presentación de resultados

4.1.1 *Propiedades físicas y conductividad hidráulica de la jarosita*

Para obtener las propiedades físicas y la conductividad hidráulica de los residuos de jarosita se tomaron muestras y enviaron a laboratorio. El muestreo se realizó en cada una de las 3 perforaciones, las cuales caracterizaron los residuos de jarosita de acuerdo a su análisis granulométrico. Todas las muestras enviadas al laboratorio indican que la granulometría de los residuos de jarosita corresponden a la malla 200, equivalente a una abertura de 0.075 mm, con un contenido de 99% de finos y 1% de arena. Las muestras según la clasificación SUCS corresponden a limos de baja plasticidad (ML) y arcillas de baja plasticidad (CL) (ver Tabla 9).

Asimismo, se obtuvo la conductividad hidráulica mediante nueve ensayos de permeabilidad de carga variable, tres en cada pozo. La conductividad hidráulica de laboratorio varía de $7.42\text{E-}04$ a $8.92\text{E-}03$ cm/s (ver Tabla 10).

Con la información obtenida de las pruebas de bombeo y de recuperación en cada uno de los pozos instalados en el depósito de jarosita N° 3 se calculó la conductividad hidráulica de campo, donde se observa que los valores varían desde $4.67\text{E-}03$ a $1.63\text{E-}02$ m/d (ver Tabla 11). La metodología aplicada para el análisis de los datos obtenidos durante el bombeo fue la de Cooper Jacob (ver Anexo 6).

Tabla 9*Propiedades físicas de los residuos de jarosita*

Sondaje	Muestra	Profundidad	Clasificación	Contenido de humedad	Peso volumétrico
Nº	Nº	(m)	SUCS	%	(g/cm ³)
PJ3-HG1	1	1.50 a 2.00	--	65.09	1.01
PJ3-HG1	2	2.02 a 3.00	ML	22.92	--
PJ3-HG1	3	6.50 a 7.50	CL	43.86	--
PJ3-HG1	4	7.50 a 8.00	--	51.49	1.05
PJ3-HG1	5	8.00 a 9.00	CL	71.00	--
PJ3-HG2	1	3.30 a 4.80	ML	27.39	--
PJ3-HG2	2	6.00 a 8.50	ML	86.35	--
PJ3-HG2	3	8.00 a 8.50	--	40.85	1.27
PJ3-HG2	4	10.0 a 12.0	ML	42.74	--
PJ3-HG3	1	1.50 a 3.00	ML	68.79	--
PJ3-HG3	2	3.00 a 4.50	ML	33.51	--
PJ3-HG3	3	4.50 a 6.00	ML	80.34	--

Tabla 10*Conductividad hidráulica de laboratorio de los residuos de jarosita*

Sondaje	Muestra	Profundidad	Conductividad hidráulica	Conductividad hidráulica
Nº	Nº	(m)	(cm/s)	(m/d)
PJ3-HG1	2	2.02 a 3.00	1.1980E-06	1.04E-03
PJ3-HG1	3	6.50 a 7.50	2.2323E-06	1.93E-03
PJ3-HG1	5	8.00 a 9.00	3.5383E-06	3.06E-03
PJ3-HG2	1	3.30 a 4.80	3.0242E-06	2.61E-03
PJ3-HG2	2	6.00 a 8.50	3.0242E-06	2.61E-03
PJ3-HG2	4	10.00 a 12.00	1.0329E-05	8.92E-03
PJ3-HG3	1	1.50 a 3.00	8.5905E-07	7.42E-04
PJ3-HG3	2	3.00 a 4.50	9.6581E-06	8.34E-03
PJ3-HG3	3	4.50 a 6.00	9.1162E-06	7.88E-03

Los ensayos de laboratorio de permeabilidad de carga variable se muestran en el Anexo 7.

Tabla 11*Conductividad hidráulica de campo de los residuos de jarosita*

Sondaje Nº	Coordenadas UTM Datum WGS 84-Zona Sur		Conductividad hidráulica (m/d)
	Este	Norte	
PJ3-HG1	295,023	8'675,754	4.67E-03
PJ3-HG2	295,036	8'675,700	1.22E-02
PJ3-HG3	295,025	8'675,652	1.63E-02

4.1.2 Caudal de bombeo

Se realizaron 3 pruebas de bombeo, una en cada pozo perforado, durante la prueba de bombeo se realizaron las mediciones del tiempo que tomaba extraer un litro de agua, con lo cual se obtuvo el caudal de bombeo Q y el abatimiento del nivel "freático" en un tiempo dado (ver Tabla 12).

Tabla 12*Resumen de pruebas de bombeo*

Sondaje Nº	Profundidad (m)	Tramo de prueba (m)	Nivel estático (m)	Bombeo		Abatimiento del nivel freático (m)
				Caudal (l/min)	Duración (min)	
PJ3-HG1	9	3-9 m	0	0.51	185	4.56
PJ3-HG2	12	3-12 m	-0.5	1.33	158	4.96
PJ3-HG3	6	3-6 m	-0.25	1.1	38	4.60

Las pruebas de bombeo se realizaron mediante el sistema Air Lift y bomba Waterra. La duración de bombeo fue de 38 minutos a 185 minutos, el abatimiento máximo fue de 4.96 m en 158 minutos con un caudal de 1.33 l/min. Los resultados de las pruebas de bombeo se muestran en el Anexo 6.

4.1.3 Rendimiento específico

Teniendo en consideración que la caracterización de los residuos de jarosita fueron limos de baja plasticidad (ML) y arcillas de baja plasticidad (CL), los valores de rendimiento específico (S_y) considerados para los análisis de sensibilidad fueron de 0.02 (2%), 0.05 (5%) y 0.1 (10%).

4.1.4 Modelamiento numérico en régimen estacionario

Con la finalidad de realizar la simulación de la extracción de la solución de jarosita se construyó un modelo tridimensional a escala local del depósito N° 3, con base en la topografía, conductividad hidráulicas y pruebas de bombeo realizadas.

El área del modelo numérico se ha discretizado con una malla de elementos finitos de 350 filas y 350 columnas, se consideraron como celdas activas a todos los residuos contenidos en el depósito N° 3, la geomembrana de revestimiento y el macizo rocoso subyacente se consideraron como celdas de no flujo, así como las celdas que se encuentran fuera del dominio del modelo numérico. El dominio del modelo numérico abarca un área de 0.12km².

Se establecieron las condiciones de borde de no flujo y condiciones de borde de flujo. Los límites laterales del modelo por lo general son límites sin flujo, para el modelo en estudio se ha establecido borde de no flujo en todo el perímetro del depósito N° 3 (Ver Figura F_01, Anexo 8).

La condición de borde de flujo ha sido utilizada para saturar el depósito de relaves con una pendiente mínima de Norte a Sur. Las cargas constantes tienen un valor en el Norte de 457 m y al Sur 457.50 m. Esta condición de borde sólo se utiliza en régimen estacionario. En la Figura F_03 del Anexo 8 se muestra la distribución espacial de las zonas de carga constante. Las condiciones de recarga por precipitación y evapotranspiración no son consideradas en el modelo numérico por la ubicación del depósito N° 3, la cual se encuentra en una zona de baja

a escasa precipitación y no hay flujos de agua que atraviesen el depósito.

El proceso de calibración del modelo numérico en estado estacionario es obtener mediante el cálculo de la simulación valores similares a los niveles piezométricos observados en campo. La calibración del modelo numérico consistió en la variación de las cargas hidráulicas para obtener un mejor ajuste entre las cargas observadas y calculadas por el modelo numérico.

En la Tabla 13 se observa los valores de las cargas observadas y calculadas y en la Figura F_02 del Anexo 8 se muestra las zonas de conductividad hidráulica del modelo transitorio.

Tabla 13

Cargas observadas y calculadas para calibración

Sondaje Nº	Coordenadas UTM Datum WGS 84-Zona Sur		Carga observada (msnm)	Carga calculada (msnm)
	Este	Norte		
PJ3-HG1	295,023	8'675,754	457.00	457.12
PJ3-HG2	295,036	8'675,700	457.50	457.21
PJ3-HG3	295,025	8'675,652	457.25	457.30

Para obtener un modelo calibrado el error cuadrático medio (RMS) con un estudio detalle se puede tener una tolerancia de 0.2 m a 0.3 m. En la Tabla 14 se observa que para el presente caso el modelo numérico el RMS es de 0.18 m el cual es menor a la condición establecida. En la Figura F_04 del Anexo 8 se observa las hidroisohipsas generadas por el modelo numérico.

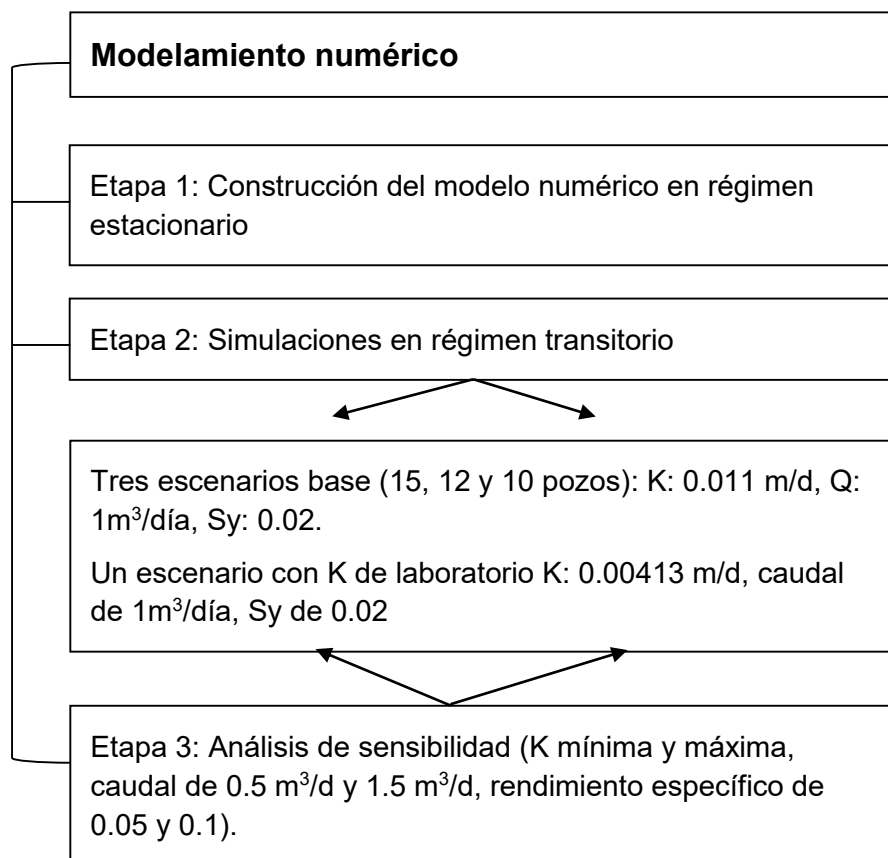
Tabla 14*Análisis estadístico de calibración*

Estadístico	Unidad	Valor
Residual Medio (m)	m	-0.04
Promedio del Valor Absoluto de Residuales (m)	m	0.15
Desviación Estándar de los Residuales (m)	m	0.22
Suma de Residuales al Cuadrado, RSS	m ²	0.10
Error medio Cuadrático, RMS (m)	m	0.18
Residual Mínimo (m)	m	-0.29
Residual Máximo (m)	m	0.12
Número de Observaciones	-	3
Rango de Observaciones (m)	m	0.5

4.1.5 Modelamiento numérico en régimen transitorio

El modelo numérico estacionario calibrado se utilizó para desarrollar el modelo numérico en régimen transitorio para predecir el desaguado del depósito N° 3. A fin de evaluar el caudal de bombeo requerido, el número de pozos requerido y la duración del bombeo, hasta obtener el nivel mínimo de solución en el depósito N° 3 se consideraron tres escenarios base, el primero con 15 pozos, el segundo con 12 pozos y el tercero con 10 pozos. El esquema para la obtención de resultados en el modelo presenta 3 etapas. La primera que nos permite calibrar el modelo, la segunda permite conocer la factibilidad de deprimir el nivel freático con datos de obtenidos de pruebas de bombeo y ensayos de laboratorio y en la tercera etapa se realizó un análisis de sensibilidad variando algunos parámetros, con lo cual obtendremos un mejor análisis e interpretación.

En la Figura 12 se muestra un esquema de la secuencia que se siguió para el modelamiento numérico del desaguado del depósito N° 3.

Figura 12*Diagrama para simulación en FEFLOW*

Para predecir la extracción de la solución de jarosita se han planteado escenarios con las características generales que a continuación se describe.

- Los pozos fueron diseñados para ser completamente penetrantes, alcanzando una profundidad de 14.0 m en los cálculos del modelo numérico.
- Para asegurar descensos uniformes del nivel de líquido en el depósito de residuos, es esencial que los pozos se ubiquen de manera equidistante. Se ha establecido la ubicación de 15 pozos de 4 pulgadas de diámetro, fabricados en PVC, con una separación de 45 m entre cada uno.

- La bomba de extracción en el modelo numérico está ubicada a una profundidad de 13.5 m desde la superficie (443.5 msnm), con el objetivo de lograr la mayor extracción posible de la solución en el depósito N° 3.
- El bombeo es permanente en todas las simulaciones, lo que implica que, con el tiempo se anticipa una disminución en la eficiencia de los pozos hasta alcanzar el desaguado final.
- El volumen total del depósito N° 3 es de 394,663.0 m³, y el volumen de líquido a extraer se ve influenciado por el rendimiento específico (Sy). En las simulaciones se consideran valores de Sy de 0.02, 0.05 y 0.1, que son característicos de los materiales finos (arcillosos). Los análisis granulométricos revelan que el 99% de los materiales pasa a través de la malla 200 (ver Anexo 7).
- Es importante destacar que si el rendimiento específico es de 0.02 el volumen extraer es de 7,893.26 m³, en cambio, si el rendimiento específico es de 0.05 el volumen a extraer es de 19,733.15 y si el rendimiento específico es de 0.1 el volumen a extraer es de 39,466.3 m³. Por esta razón se llevará a cabo un análisis de sensibilidad a este parámetro hidráulico.
- El tiempo de simulación para todos los escenarios y correspondientes análisis de sensibilidad es de 10 años equivalente a 3,650 días.
- Se analizaron en total 28 escenarios, de los cuales 21 escenarios (EC_1 al EC_21) fueron simulados con datos de conductividad hidráulica de campo y 7 escenarios (E1 al E7) fueron analizados con datos de conductividad hidráulica de laboratorio. Los escenarios EC_1 al EC_7 corresponden a la simulación numérica con 15 pozos. Los escenarios EC_8 al EC_14 corresponden a la simulación numérica con 12 pozos. Los escenarios EC_15 al EC_21 corresponden a la simulación numérica con 10 pozos. Los escenarios E1 al E7 son escenarios

simulados con 15 pozos con conductividades hidráulicas de laboratorio.

El resumen de los resultados del modelamiento numérico se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15

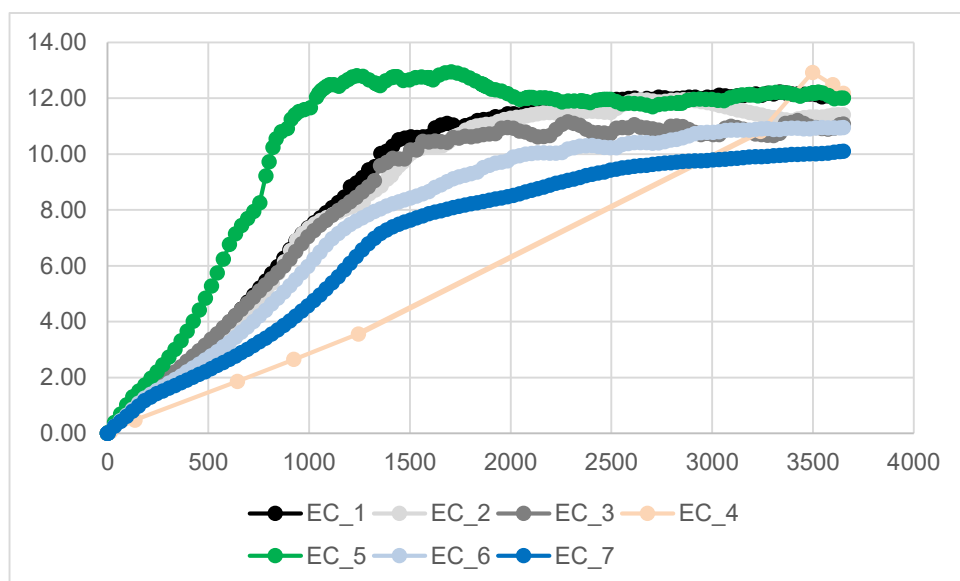
Resumen de resultados de modelamiento numérico

Escenario	Conductividad hidráulica K (m/d)	Caudal Q (m ³ /d)	Rendimiento específico Sy	Descenso (m) 1095 días	Descenso (m) 3650 días
EC_1	1.11E-02	1.00	0.02	7.96	12.07
EC_2	4.67E-03	1.00	0.02	7.75	11.41
EC_3	1.63E-02	1.00	0.02	7.7	11.07
EC_4	1.11E-02	0.50	0.02	3.42	12.17
EC_5	1.11E-02	1.50	0.02	12.46	12
EC_6	1.11E-02	1.00	0.05	6.82	10.95
EC_7	1.11E-02	1.00	0.1	5.25	10.1
EC_8	1.11E-02	1.00	0.02	7.57	11.04
EC_9	4.67E-03	1.00	0.02	7.59	10.24
EC_10	1.63E-02	1.00	0.02	7.21	10.7
EC_11	1.11E-02	0.50	0.02	3.35	9.77
EC_12	1.11E-02	1.50	0.02	11.38	10.68
EC_13	1.11E-02	1.00	0.05	6.26	10.62
EC_14	1.11E-02	1.00	0.1	4.37	10.45
EC_15	1.11E-02	1.00	0.02	7.42	10.65
EC_16	4.67E-03	1.00	0.02	7.65	11.33
EC_17	1.63E-02	1.00	0.02	6.78	10.32
EC_18	1.11E-02	0.50	0.02	3.28	8.96
EC_19	1.11E-02	1.50	0.02	11.97	11.84
EC_20	1.11E-02	1.00	0.05	6	10.63
EC_21	1.11E-02	1.00	0.1	4.3	10.27
E1	4.13E-03	1.00	0.02	7.66	11.92
E2	2.01E-03	1.00	0.02	6.19	12.04
E3	5.65E-03	1.00	0.02	7.87	11.51
E4	4.13E-03	0.50	0.02	3.39	10.63
E5	4.13E-03	1.50	0.02	10.65	12.19
E6	4.13E-03	1.00	0.05	4.88	11.13
E7	4.13E-03	1.00	0.1	3.18	9.47

En la Figura 13 se muestra el progreso de los descensos de nivel de solución de jarosita durante los 3650 días analizados para los escenarios con 15 pozos EC_1, EC_2, EC_3, EC_4, EC_5, EC_6 y EC_7.

Figura 13

Curvas de descenso durante 10 años en escenarios EC_1 al EC_7_ 15 pozos



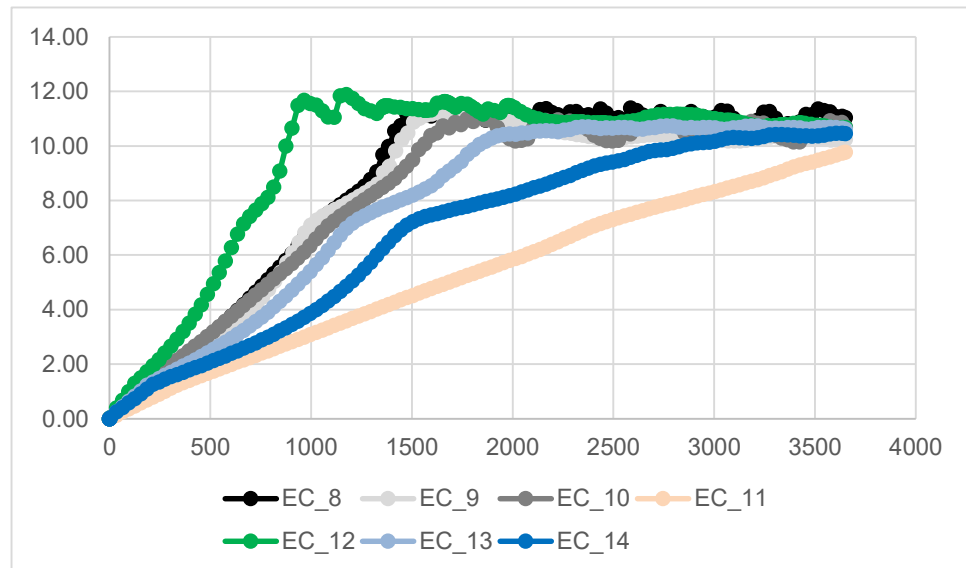
En la Figura 14 se muestra el progreso de los descensos de nivel de solución de jarosita durante los 3650 días analizados para los escenarios con 12 pozos EC_8, EC_9, EC_10 EC_11, EC_12, EC_13 y EC_14.

En la Figura 15 se muestra el progreso de los descensos de nivel de solución de jarosita durante los 3650 días analizados para los escenarios con 10 pozos EC_15, EC_16, EC_17 EC_18, EC_19, EC_20 y EC_21.

En la Figura 16 se muestra el progreso de los descensos de nivel de solución de jarosita durante los 3650 días analizados para los escenarios con 15 pozos E1, E2, E3, E4, E5, E6 y E7, con conductividades hidráulicas de laboratorio.

Figura 14

Curvas de descenso durante 10 años en escenarios EC_8 al E14_ 12 pozos

**Figura 15**

Curvas de descenso durante 10 años en escenarios E15 al E21_ 10 pozos

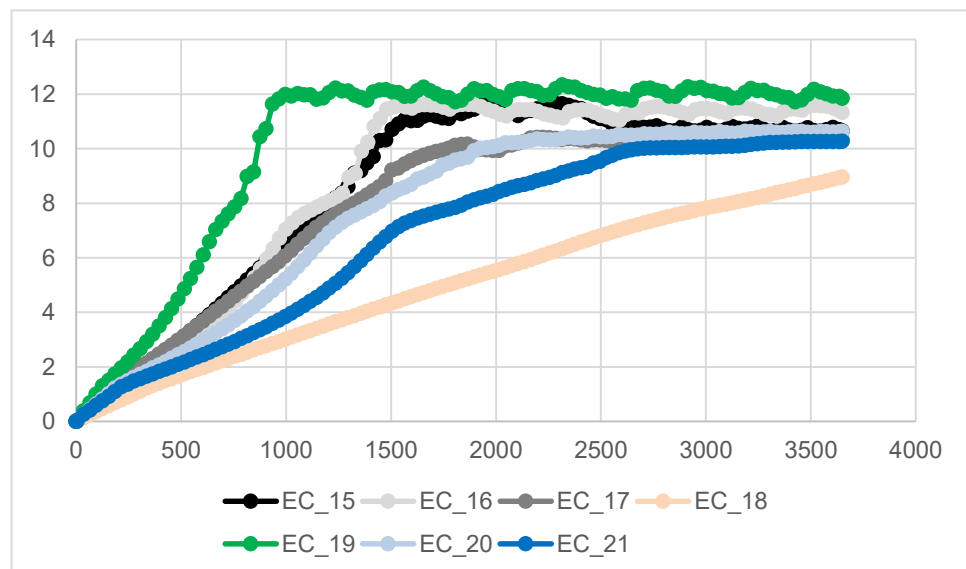
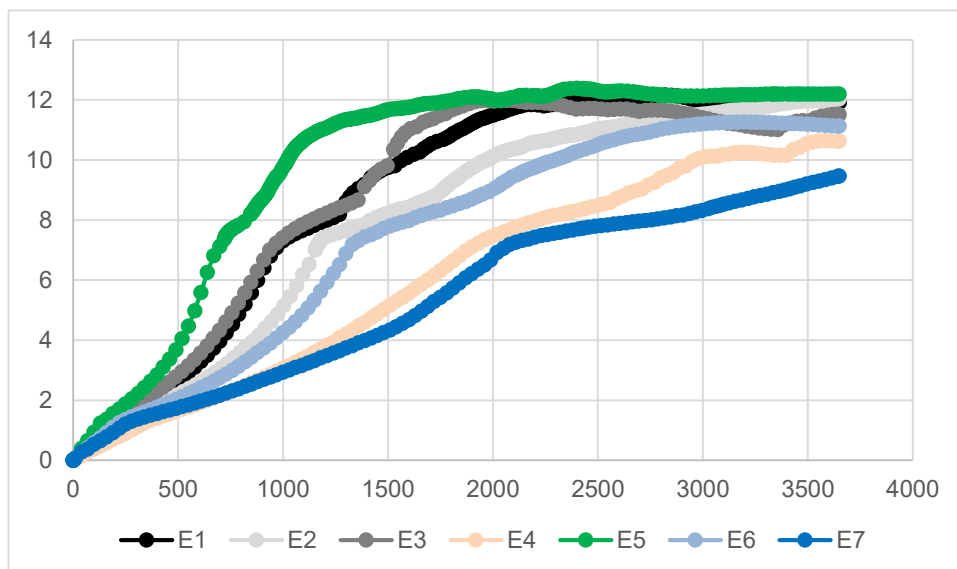


Figura 16

Curvas de descenso durante 10 años en escenarios E1 al E7_ 15 pozos



En las Figuras 13 a la 16 se observa que los escenarios con menor descenso son los que tienen menor caudal de bombeo y los escenarios con mayor descenso son los que tienen mayor caudal de bombeo.

4.1.6 Caracterización geoquímica de los residuos de jarosita

En la Tabla 16 se observa la concentración de metales en la solución de jarosita. Para obtener la concentración de metales pesados en la solución de jarosita se realizó el ensayo ICP con la norma EPA 3050B DECEMBER 1996 ACID DIGESTION OF SOLIDS, SOILS, SLUDGES –ICP. Las pruebas de laboratorio estuvieron basadas en el estudio de 33 elementos.

Tabla 16*Concentración de metales en la solución de jarosita*

Elemento o parámetro	Unidad	Límite de Detección	Muestra ID		
			PCW-1	PC-08	PC-09
Al	mg/L	0.001	1653	2637	157.4
Sb	mg/L	0.0001	0.0095	0.0211	0.0153
As	mg/L	0.0003	25	3.783	57.98
Ba	mg/L	0.0001	<0.0001	0.0028	<0.0001
Be	mg/L	0.00004	17	1.334	<0.00004
Bi	mg/L	0.00001	0.0901	0.1347	0.7623
B	mg/L	0.0007	186.3	13.89	<0.0007
Cd	mg/L	0.00003	6.167	6.938	1.337
Ca	mg/L	0.02	44.13	116	9.37
Co	mg/L	0.00004	0.3196	1.175	0.2865
Cu	mg/L	0.0003	354	282.8	192.5
Cr	mg/L	0.0001	0.3904	0.2453	0.8549
Sn	mg/L	0.0001	0.0032	0.009	0.0045
Sr	mg/L	0.0001	0.6581	1.895	0.1567
P	mg/L	0.004	1.825	0.192	5.617
Fe	mg/L	0.001	3986	5354	5185
Li	mg/L	0.001	275.2	23.76	<0.001
Mg	mg/L	0.004	255.1	926.7	207.6
Mn	mg/L	0.0002	1454	1930	1095
Hg	mg/L	0.0001	0.0056	0.0192	0.1234
Mo	mg/L	0.0001	0.0094	0.0123	0.008
Ni	mg/L	0.0002	0.0985	0.6605	0.1489
Ag	mg/L	0.00001	<0.00001	0.0047	<0.00001
Pb	mg/L	0.0001	0.0328	0.4682	2.116
K	mg/L	0.008	<0.008	<0.008	<0.008
Se	mg/L	0.00005	0.1013	0.03587	0.02606
Si	mg/L	0.02	1.23	9.71	0.56
Na	mg/L	0.09	2.08	6.41	0.65
Tl	mg/L	0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Ti	mg/L	0.001	0.218	0.233	2.319
U	mg/L	0.00001	0.7606	0.4088	0.7056
V	mg/L	0.0001	0.1076	0.3014	0.7191
Zn	mg/L	0.003	64000	61300	5790

Nota. Las mayores concentraciones de los metales son Al, Fe, Mg, Mn y Zn

La Tabla 17 muestra los valores de pH en pulpa, Azufre total y potencial generador de ácido.

Tabla 17

Potencial de generador de acidez en los residuos de jarosita.

Unidad	pulpa pH	Azufre Total (%)	Potencial generador de ácido
PCW-1	2.10	12.50	Alto
PC-08	2.25	11.65	Alto
PC-09	1.09	13.40	Alto

4.2. Análisis, interpretación y discusión de resultados

4.2.1 Conductividad hidráulica

El pozo PJ3-HG1 se ubica al norte del depósito, el pozo PJ3-HG2 se ubica al centro y el PJ3-HG3 se ubica al sur del depósito. Los resultados de la conductividad hidráulica obtenida de los ensayos de laboratorio indican que el área norte del depósito presenta la menor conductividad hidráulica con un valor promedio de $2.01\text{E-}03$ m/d en el pozo PJ3-HG1, aumenta ligeramente al centro del depósito con un valor promedio de $4.71\text{E-}03$ en el pozo PJ3-HG2 y finalmente en el sur del depósito presenta el valor promedio mayor de $5.65\text{E-}03$ m/d en el pozo PJ3-HG3. La variación de estos valores puede ser atribuido al orden en que fueron depositados los residuos de jarosita, por lo cual los residuos más antiguos presentan una mayor consolidación respecto a los residuos más recientes. La simulación se realizó considerando los diferentes valores de conductividad hidráulica (ver Tabla 18).

Tabla 18*Resumen de valores de conductividad hidráulica de laboratorio por pozo*

Sondaje	Muestra	Conductividad hidráulica	Conductividad hidráulica promedio por pozo	Conductividad hidráulica promedio del depósito
Nº	Nº	(m/d)	(m/d)	(m/d)
PJ3-HG1	2	1.04E-03	2.01E-03	4.13E-03
PJ3-HG1	4	1.93E-03		
PJ3-HG1	6	3.06E-03		
PJ3-HG2	1	2.61E-03	4.71E-03	
PJ3-HG2	2	2.61E-03		
PJ3-HG2	4	8.92E-03		
PJ3-HG3	1	7.42E-04	5.65E-03	
PJ3-HG3	2	8.34E-03		
PJ3-HG3	3	7.88E-03		

En la Tabla 19 se muestra la conductividad hidráulica de campo y de laboratorio, donde se observa que la conductividad hidráulica de campo es mayor a la conductividad hidráulica de laboratorio. Para este caso de los residuos de jarosita se encuentra que los valores de conductividad hidráulica de laboratorio varían entre 2.01E-03 m/d y 5.65E-03 m/d que representan el 35% al 43% de los valores de conductividad hidráulica de campo. Los valores de la conductividad hidráulica de laboratorio pueden ser menores a la de campo debido a la compactación de las muestras para los ensayos de laboratorio. Asimismo, las diferencias de conductividad hidráulica de campo y de laboratorio se debe al efecto de la macroporosidad en campo (Musso et al., 2019).

Si bien la conductividad hidráulica promedio de laboratorio es menor que la conductividad hidráulica promedio de campo el rango en general es de E-03 a E-02 m/d, siendo relaves con muy baja conductividad hidráulica de acuerdo a la clasificación de Villanueva e Iglesias (1984), lo cual implica una mínima variación entre el descenso de solución en los diferentes escenarios de sensibilidad a la conductividad hidráulica, como se ve en los siguientes gráficos de este apartado.

Tabla 19

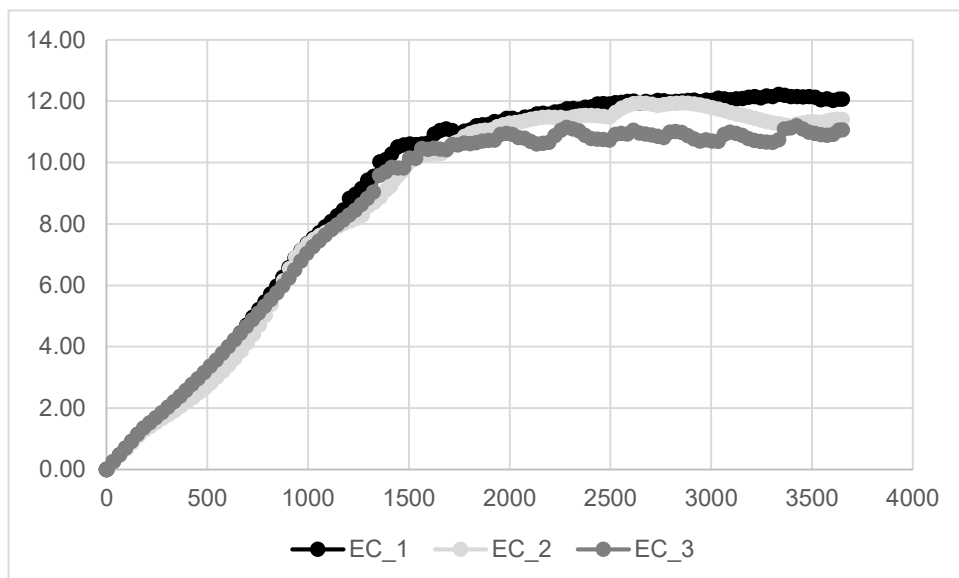
Relación entre la conductividad hidráulica de pruebas de bombeo y laboratorio

Sondaje	Conductividad hidráulica de campo (Kc)	Conductividad hidráulica de laboratorio (Kl)	Kl/Kc
Nº	(m/d)	(m/d)	%
PJ3-HG1	4.67E-03	2.01E-03	43%
PJ3-HG2	1.22E-02	4.71E-03	39%
PJ3-HG3	1.63E-02	5.65E-03	35%

Para el modelamiento considerando 15 pozos de bombeo, en el escenario base (EC_1), se usó conductividad hidráulica de $1.11\text{E-}02$ m/d, rendimiento específico de 0.02, caudal de $1.0\text{ m}^3/\text{día}$ y para los análisis de sensibilidad se usó conductividad hidráulica de $0.47\text{E-}02$ m/d (E2) y $1.63\text{E-}02$ m/d (E3). En la Figura 17 se observa que en los tres escenarios existe una tendencia al aumento del descenso del nivel de solución durante los primeros 4 años con un descenso alrededor de 10 m. Siendo que a los 1095 días (3 años) se tiene un descenso de 7.96 m (EC_1), 7.75 m (EC_2) y 7.70 m (EC_3). Cabe precisar que la linealidad se mantiene hasta cuando el caudal de bombeo es eficiente es decir se mantiene los $15\text{m}^3/\text{d}$, luego los descensos son más lentos. Las curvas de descenso se ven muy pegadas debido a que la variación de conductividad hidráulica es muy baja en los tres escenarios.

Figura 17

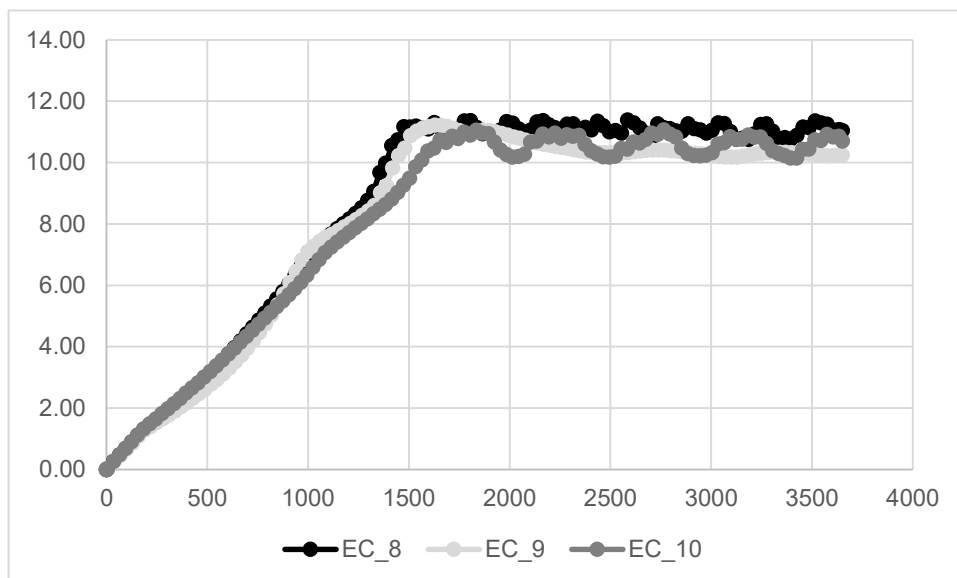
Descensos con sensibilidad de conductividad hidráulica_ 15 pozos



Para el modelamiento con 12 pozos, en el escenario base (EC_8), se usó conductividad hidráulica de $1.11\text{E-}02$ m/d, rendimiento específico de 0.02, caudal de $1.0\text{ m}^3/\text{día}$ y para los análisis de sensibilidad se usó una conductividad hidráulica de $0.47\text{E-}02$ m/d (EC_9) y $1.63\text{E-}02$ m/d (EC_10). En la Figura 18 se observa que en los tres escenarios existe una tendencia al aumento del descenso del nivel de solución durante los primeros 4 años. Es así que a los 1095 días (3 años) se tiene un descenso de 7.59 m (EC_9), 7.57 m (EC_8) y 7.21 m (EC_10). Cabe precisar que la linealidad se mantiene hasta cuando el caudal de bombeo es eficiente es decir se mantiene los $12\text{ m}^3/\text{d}$, luego los descensos son más lentos y el modelo se vuelve inestable. Las curvas de descenso se ven muy pegadas debido a que la variación de conductividad hidráulica es muy baja en los tres escenarios.

Figura 18

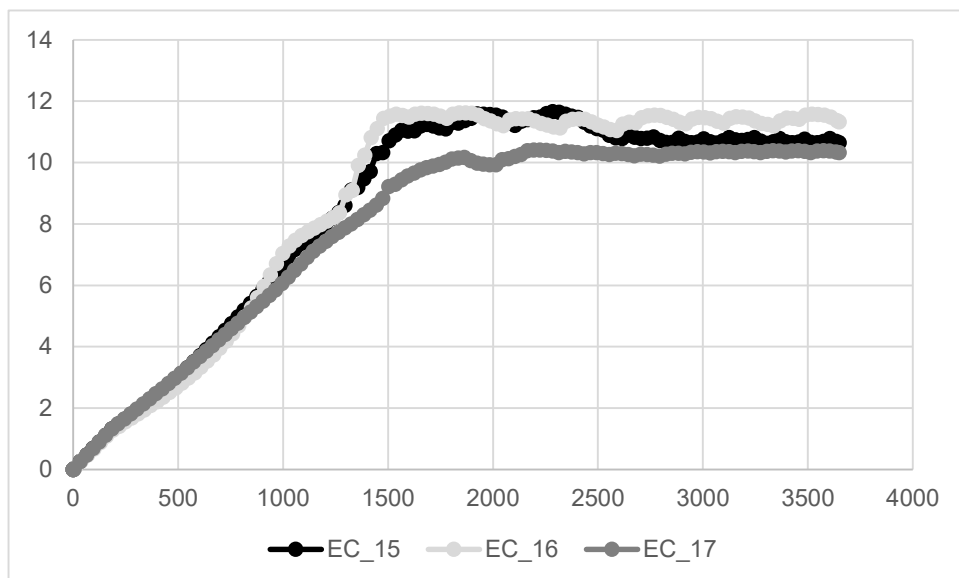
Descensos con sensibilidad de conductividad hidráulica _ 12 pozos



Para el modelamiento con 10 pozos, en el escenario base (EC_15), se usó conductividad hidráulica de $1.11\text{E-}02$ m/d, rendimiento específico de 0.02, caudal de $1.0\text{ m}^3/\text{día}$ y para los análisis de sensibilidad se usó conductividad hidráulica de $0.47\text{E-}02$ m/d (EC_16) y $1.63\text{E-}02$ m/d (EC_17). En la Figura 19 se observa que en los tres escenarios existe una tendencia al aumento del descenso del nivel de solución durante los primeros años, a los 1095 días (3 años) se tiene un descenso de 7.65 m (EC_16), 7.42 m (EC_15) y 6.78 m (EC_17). Cabe precisar que la linealidad se mantiene hasta cuando el caudal de bombeo es eficiente es decir se mantiene los $10\text{ m}^3/\text{d}$, luego los descensos son más lentos y de allí el modelo se vuelve inestable, lo cual indica que no habría más solución por recuperar. Mientras existe descenso de la solución las curvas se encuentran muy pegadas debido a la mínima diferencia de valores de conductividad hidráulica en los 3 escenarios.

Figura 19

Descensos con sensibilidad de conductividad hidráulica _ 10 pozos



En las Figuras 17, 18 y 19 se observa que la conductividad hidráulica utilizada en el modelo presenta una variación de tan sólo 0.01163 m/d (0.0000013461cm/s), es por ello que, al realizar el análisis de sensibilidad de conductividad hidráulica para cada escenario los resultados son similares.

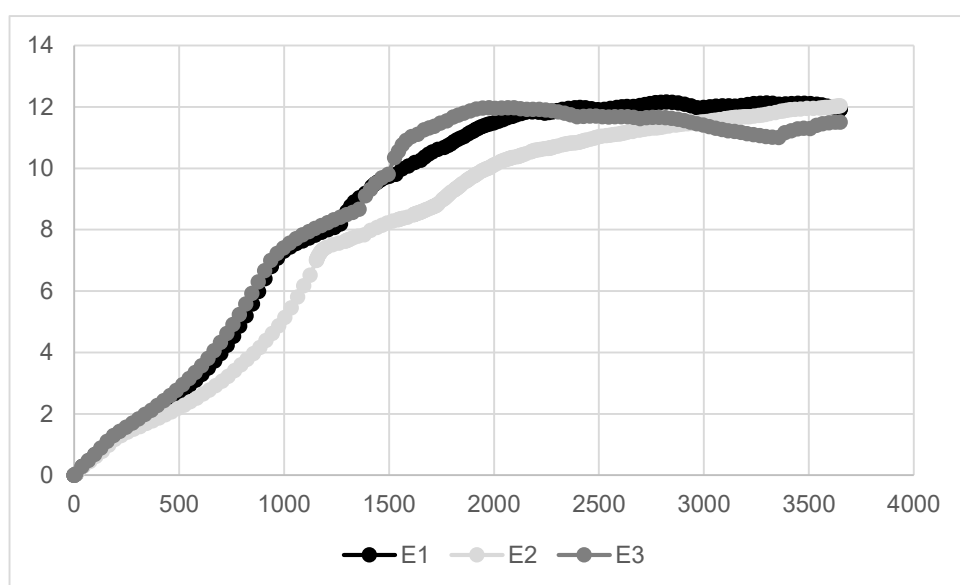
Para el modelamiento con 15 pozos con conductividades hidráulicas de laboratorio en el escenario base (E1) se usó conductividad hidráulica de $4.13\text{E-}03$ m/d, rendimiento específico de 0.02, caudal de $1.0\text{ m}^3/\text{día}$ y para los análisis de sensibilidad se usó valores de conductividad hidráulica de $2\text{E-}03$ m/d (E2) y $5.7\text{E-}03$ m/d (E3). En la Figura 20 se observa que en los tres escenarios existe una tendencia al aumento del descenso de solución de jarosita durante los primeros años de bombeo. A los 1095 días (3 años) se tiene un descenso de 7.66 m (E1), 6.19 m (E2) y 7.87 m (E3). Cabe precisar que la linealidad se mantiene hasta cuando el caudal de bombeo es eficiente es decir se mantiene los $15\text{ m}^3/\text{d}$, luego los descensos son más lentos y de allí el modelo se vuelve inestable, lo cual indica que no habría más solución por recuperar.

En la Figura 20 se observan resultados similares en los tres escenarios analizados, esto se debe a que la conductividad hidráulica utilizada en el modelo presenta una variación de tan sólo 0.00364 m/d (0.0000042130 cm/s), por lo cual, los análisis de sensibilidad presentan resultados similares.

Figura 20

Descensos con sensibilidad de conductividad hidráulica _ 15 pozos

(K_laboratorio)



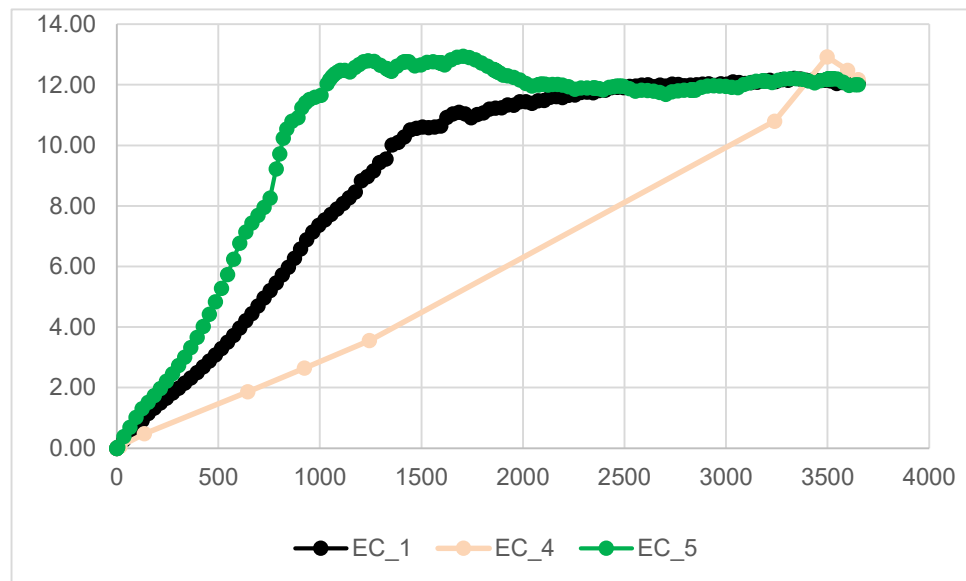
4.2.2 Caudal de bombeo

Para el modelamiento considerando 15 pozos de bombeo, en el escenario base (EC_1), se usó conductividad hidráulica de 1.11E-02 m/d, rendimiento específico de 0.02, caudal de 1.0 m³/día y para los análisis de sensibilidad se usó 0.5 m³/día (E4) y 1.5 m³/día (E5). En la Figura 21 se observa que en los tres escenarios existe una tendencia de aumento del descenso del nivel de solución durante los primeros años, a los 1095 días (3 años) se tiene un descenso de 3.42 m (EC_4), 7.96 m (EC_1) y 12.46 m (EC_5). Cabe precisar que la linealidad se mantiene hasta cuando el caudal de bombeo es eficiente es decir se

mantiene los 15m³/d, luego los descensos son más lentos. El escenario con mayor caudal de bombeo (EC_5) presenta menor tiempo de bombeo eficiente y un abatimiento del nivel de solución de 12.46 m en tan solo 3 años y de allí el modelo se vuelve inestable, lo cual indica que no habría más solución por recuperar.

Figura 21

Descensos con sensibilidad de caudal de bombeo_ 15 pozos

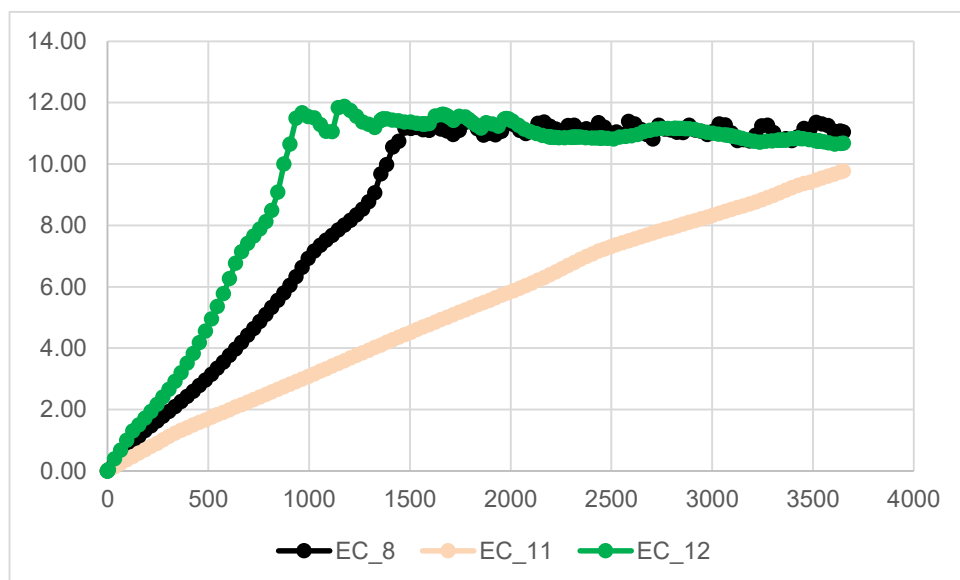


Para el modelamiento con 12 pozos, en el escenario base (EC_8), se usó conductividad hidráulica de 1.11E-02 m/d, rendimiento específico de 0.02, caudal de 1.0 m³/día y para los análisis de sensibilidad se usó 0.5 m³/día (EC_11) y 1.5 m³/día (EC_12). En la Figura 22 se observa que en los tres escenarios existe una tendencia de aumento del descenso del nivel de solución durante los primeros años, a los 1095 días (3 años) se tiene un descenso de 3.35 m (EC_11), 7.96 m (EC_8) y 11.38m (EC_12). Cabe precisar que la linealidad se mantiene hasta cuando el caudal de bombeo es eficiente es decir se mantiene los 12 m³/d, luego los descensos son más lentos. El escenario con mayor caudal de bombeo (EC_12) presenta menor tiempo de bombeo eficiente y un abatimiento del nivel de solución de 11.38 m en tan solo

3 años y de allí el modelo se vuelve inestable, lo cual indica que no habría más solución por recuperar.

Figura 22

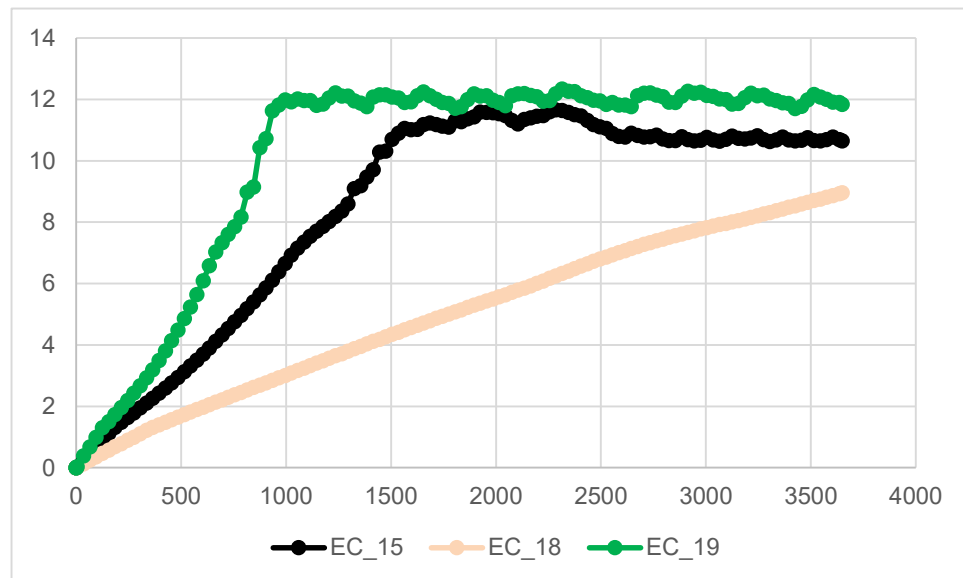
Descensos con sensibilidad de caudal de bombeo_ 12 pozos



Para el modelamiento con 10 pozos, en el escenario base (EC_15), se usó conductividad hidráulica de 1.11×10^{-2} m/d, rendimiento específico de 0.02, caudal de $1.0 \text{ m}^3/\text{día}$ y para los análisis de sensibilidad se usó $0.5 \text{ m}^3/\text{día}$ (EC_18) y $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$ (EC_19). En la Figura 23 se observa que en los tres escenarios existe una tendencia de aumento del descenso del nivel de solución durante los primeros años, a los 1095 días (3 años) se tiene un descenso de 6.0 m (EC_18), 7.96 m (EC_15) y 4.3 m (EC_19). Cabe precisar que la linealidad se mantiene hasta cuando el caudal de bombeo es eficiente es decir se mantiene los $10 \text{ m}^3/\text{d}$, luego los descensos son más lentos. También se observa que el escenario con menor caudal (EC_18) mantiene un aumento en el descenso hasta los 10 años con un descenso total 8.96 m de solución, no obstante, el escenario con mayor caudal de bombeo (EC_19) presenta menor tiempo de bombeo eficiente y un abatimiento del nivel de solución de 11.97 m en tan solo 3 años y de allí el modelo se vuelve inestable, lo cual indica que no habría más solución por recuperar.

Figura 23

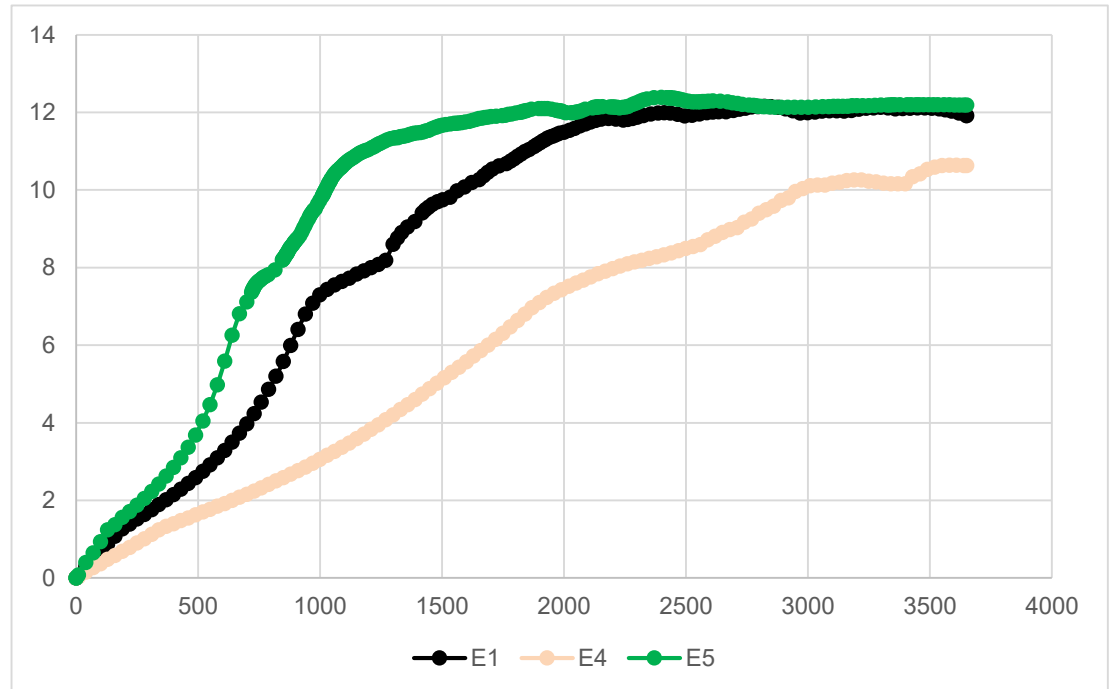
Descensos con sensibilidad de caudal de bombeo_ 10 pozos



Para el modelamiento con 15 pozos con conductividades hidráulicas de laboratorio en el escenario base (E1) se usó conductividad hidráulica de $4.13\text{E-}03$ m/d, rendimiento específico de 0.02, caudal de $1.0\text{ m}^3/\text{día}$ y para los análisis de sensibilidad se usó $0.5\text{ m}^3/\text{día}$ (E4) y $1.5\text{ m}^3/\text{día}$ (E5). En la Figura 24 se observa que en los tres escenarios existe una tendencia al aumento del descenso de solución de jarosita, durante los primeros años de bombeo. También se observa que en el escenario con menor caudal (E4) el descenso total en 10 años es de 10.63 m de solución, no obstante, el escenario con mayor caudal de bombeo (E5) presenta menor tiempo de bombeo eficiente y un abatimiento del nivel de solución de 10.65 m en tan solo 3 años, pudiendo lograr un abatimiento de 12.19 m en 10 años.

Figura 24

Descensos con sensibilidad de caudal de bombeo_ 15 pozos (K_laboratorio)

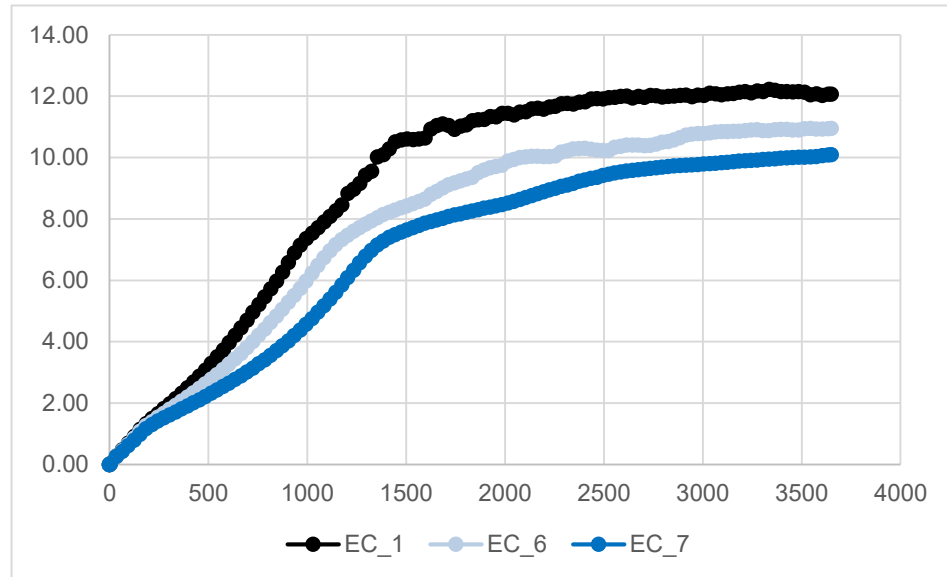


4.2.3 Rendimiento específico

Para el modelamiento con 15 pozos en el escenario base (EC_1) se usó conductividad hidráulica de $1.11\text{E-}02$ m/d, caudal de $1.0 \text{ m}^3/\text{día}$, rendimiento específico de 0.02 y para los análisis de sensibilidad se usó rendimiento específico de 0.05 (EC_6) y 0.1 (EC_7). En la Figura 25 se observa que en los tres escenarios mantienen una relación inversa respecto a los rendimientos específicos. El escenario con mayor rendimiento específico (EC_7) presenta menor descenso a lo largo del tiempo respecto al escenario con mayor rendimiento específico (EC_1) que presenta el mayor descenso de solución de jarosita a lo largo de los años.

Figura 25

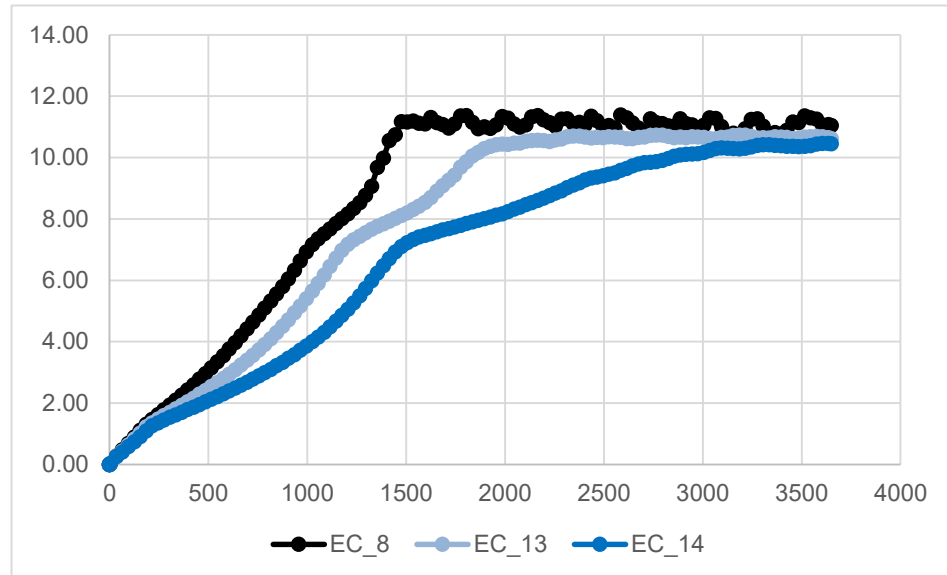
Descensos con sensibilidad de rendimiento específico_ 15 pozos



Para el modelamiento con 12 pozos en el escenario base (EC_1) se usó conductividad hidráulica de $1.11\text{E-}03$ m/d, caudal de 1.0 m³/día, rendimiento específico de 0.02 y para los análisis de sensibilidad se usó rendimiento específico de 0.05 (EC_13) y 0.1 (EC_14). En la Figura 26 se observa que en los tres escenarios mantienen una relación inversa respecto a los rendimientos específicos. El escenario con mayor rendimiento específico (EC_17) presenta menor descenso a lo largo del tiempo respecto al escenario con mayor rendimiento específico (EC_1) que presenta el mayor descenso de solución de jarosita a lo largo de los años.

Figura 26

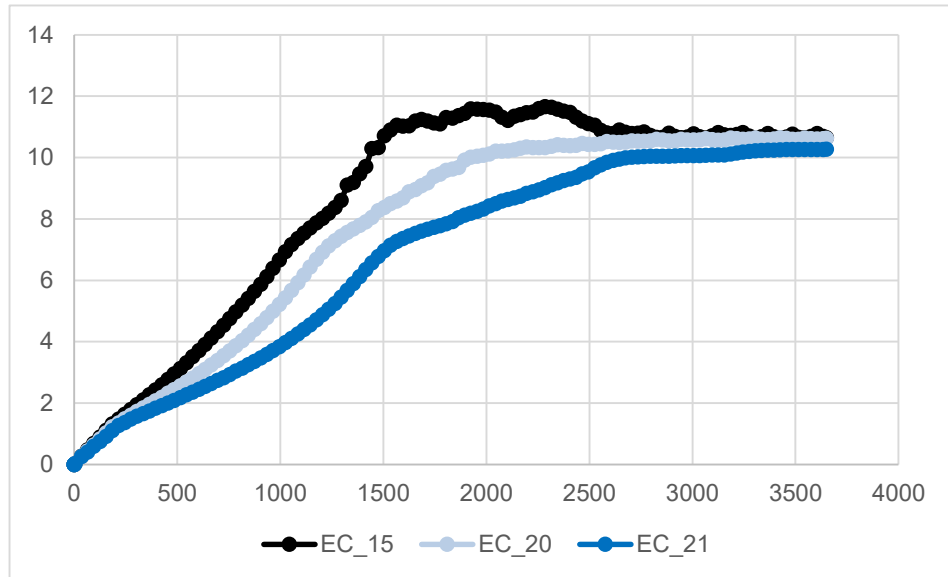
Descensos con sensibilidad de rendimiento específico_ 12 pozos



Para el modelamiento con 10 pozos en el escenario base (EC_1) se usó conductividad hidráulica de $1.11\text{E-}03$ m/d, caudal de 1.0 m³/día, rendimiento específico de 0.02 y para los análisis de sensibilidad se usó rendimiento específico de 0.05 (EC_20) y 0.1 (EC_21). En la Figura 27 se observa que en los tres escenarios mantienen una relación inversa respecto a los rendimientos específicos. El escenario con mayor rendimiento específico (EC_21) presenta menor descenso a lo largo del tiempo respecto al escenario con mayor rendimiento específico (EC_1) que presenta el mayor descenso de solución de jarosita a lo largo de los años.

Figura 27

Descensos con sensibilidad de rendimiento específico_ 10 pozos

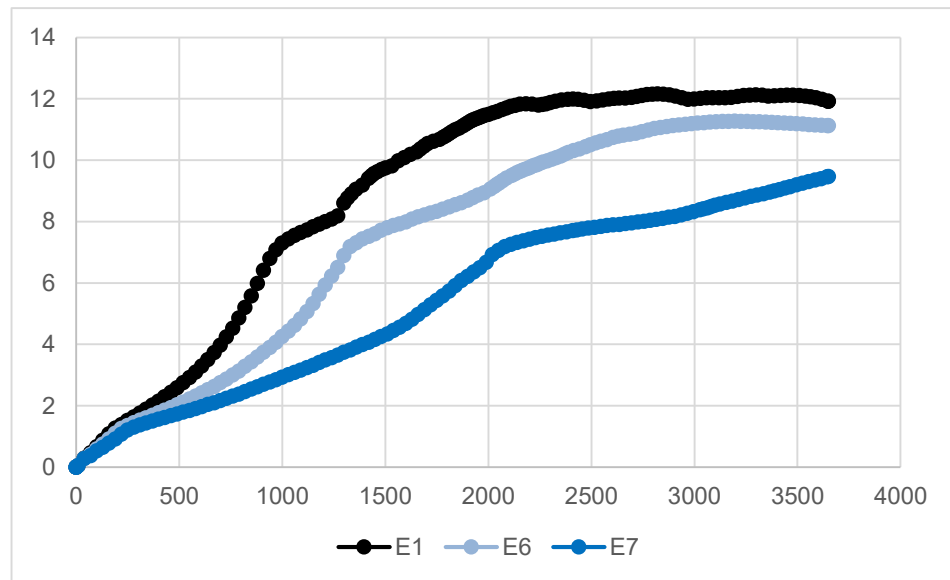


Para el modelamiento con 15 pozos en el escenario base (E1) se usó conductividad hidráulica de $4.13\text{E-}03$ m/d, caudal de 1.0 m³/día, rendimiento específico de 0.02 y para los análisis de sensibilidad se usó rendimiento específico de 0.05 (E6) y 0.1 (E7). En la Figura 28 se observa que en los tres escenarios mantienen una relación inversa respecto a los rendimientos específicos. El escenario con mayor rendimiento específico (E7) presenta menor descenso a lo largo del tiempo respecto al escenario con mayor rendimiento específico (E1) que presenta el mayor descenso de solución de jarosita a lo largo de los años.

Figura 28

*Descensos con sensibilidad de rendimiento específico_ 15 pozos_*

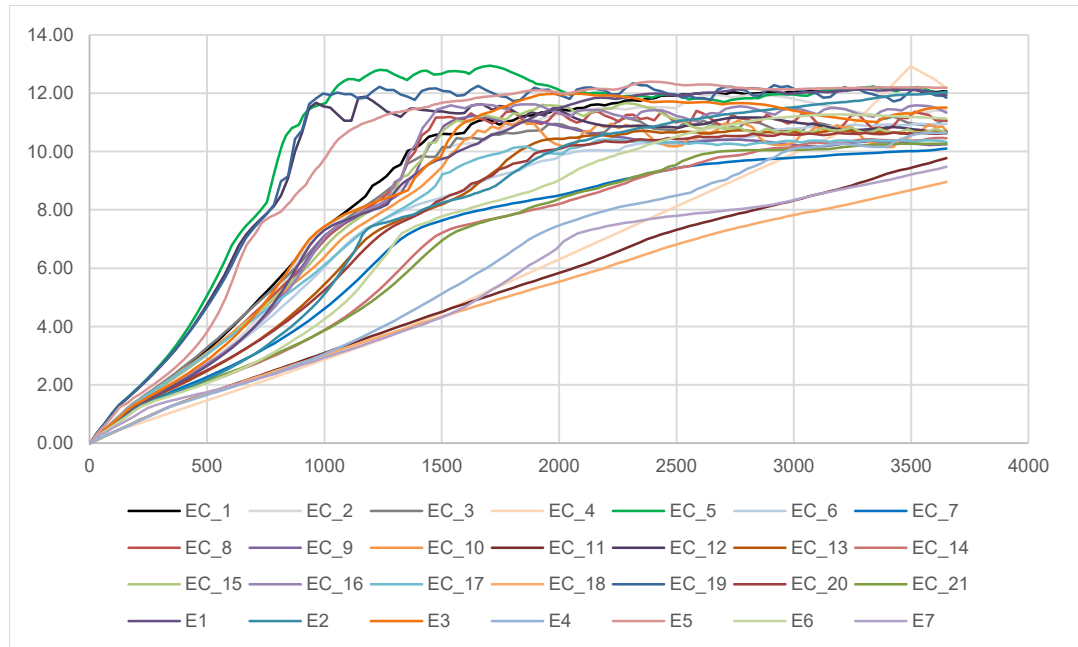
K_laboratorio



En la Figura 29, se observa que los mejores escenarios son los que tienen mayor caudal de bombeo (EC_5, EC_12, EC_19 y E5). A pesar de que la tasa de bombeo eficiente dura menor tiempo, se puede abatir la mayor cantidad de solución en los 3 primeros años.

Figura 29

Descenso de los 28 escenarios del modelo numérico

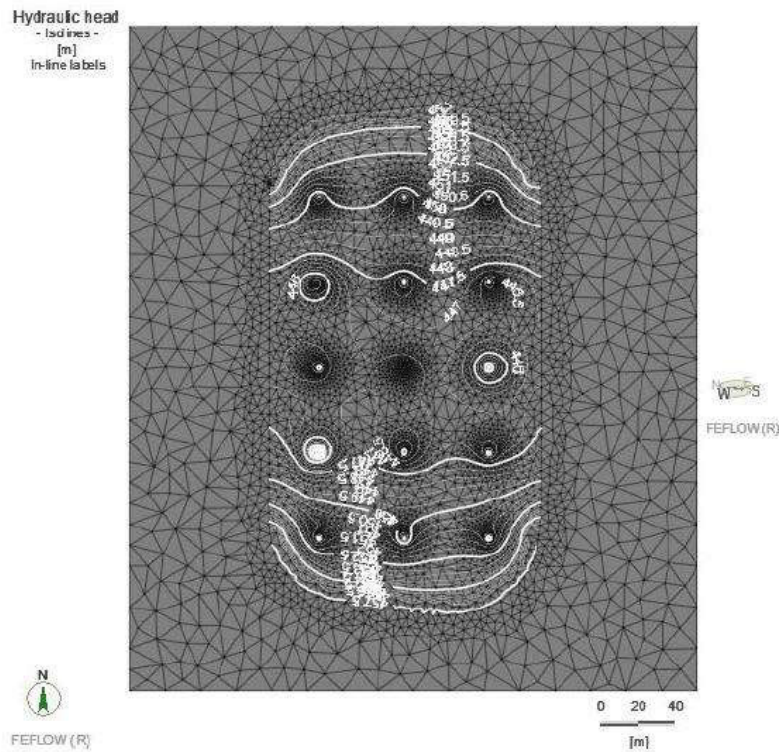


En la Figura 30 se muestra la vista en planta de los niveles de solución de jarosita a los 1095 días, del escenario EC_5 del modelamiento numérico en FEFLOW 8.0.

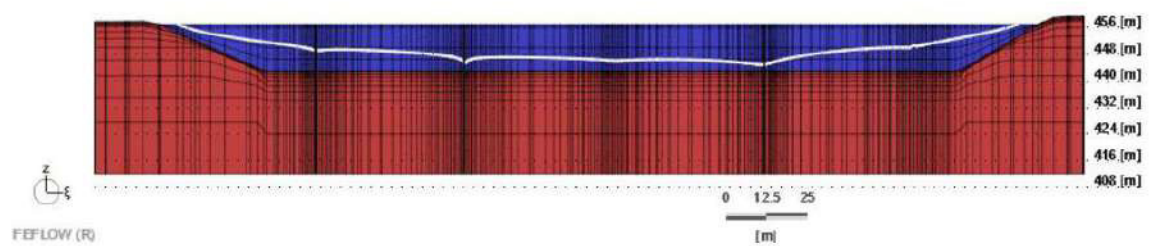
En la Figura 31 se muestra la vista en sección de los niveles de solución de jarosita a los 1095 días, del escenario EC_5 del modelamiento numérico en FEFLOW 8.0.

Figura 30

Vista en planta del escenario EC_5 del modelo numérico

**Figura 31**

Vista en sección del nivel de solución de jarosita del escenario EC_5 del modelo numérico



4.2.4 Situación actual de la Refinería de Zinc Cajamarquilla y el depósito N° 3

Los principales residuos sólidos generados por la Refinería de Zinc Cajamarquilla son jarosita, goethita y relaves de flotación, los cuales son transportados en la forma de pulpa, hasta las pozas de jarosita y depósitos de residuos.

Los principales depósitos de residuos sólidos dentro de las instalaciones de la Refinería de Zinc Cajamarquilla son: La Poza de Lodos Neutros, las pozas de jarosita N° 1, 2, 3, 4, la poza de goethita N° 5, el depósito de residuos poza N° 6 y la poza de Lodos Neutros. Todos los residuos sólidos generados por la Refinería de Cajamarquilla han sido almacenados en estas seis pozas especialmente construidas para ese fin.

Se precisa que no existe un sistema de manejo de aguas pluviales en la refinería, debido a que el área de la refinería y en general toda la cuenca de la quebrada La Parra, se encuentra dentro de la llamada zona árida de la cuenca del Río Rímac, caracterizada por tener lluvias anuales menores que 250 mm, cuyas intensidades no son suficientes para producir escorrentía.

De acuerdo al Informe N° 320-2018-MEM-DGAAM/DNAM/DGAM/PC que sustenta la Resolución N° 134-2018-MEM-DGAAM, que aprueba la Tercera modificatoria del Plan de Cierre de la Refinería Cajamarquilla, las actividades de cierre del depósito de residuos de jarosita N° 3, se realizar como parte del cierre progresivo, es decir durante el funcionamiento de la Refinería, por lo cual la solución de jarosita será enviada al depósito de residuos N° 6, para luego ser llevada a la planta de procesos.

Para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas se tiene vigente el DS N° 010-2010-MINAM, donde se aprobaron los Límites Máximos Permisibles - LMP. Esta norma aplica a todas las actividades minero-metalúrgicas que se desarrollen dentro del territorio nacional (MINAM, 2010), sin embargo, en la Refinería de

Zinc Cajamarquilla, no hay vertimiento de efluentes del proceso metalúrgico, ni de los depósitos de residuos.

Por lo tanto, no es necesaria una evaluación de cumplimiento de Límites Máximos Permisibles- LMP, ni estudio de afectación a Estándares de Calidad Ambiental ECA. Todos los residuos líquidos procedentes del proceso son llevados a la poza N° 6 y luego son recirculados a la planta.

El tratamiento de efluentes ácidos de mina tiene un costo aproximado de 2 \$/m³, por lo cual, el valor total de tratamiento para 7,025.0 m³ se consideró 15,000.00 dólares como dato de entrada para comparar con el valor recuperable de zinc al reintroducirlo al proceso metalúrgico.

4.2.5 *Discusión de resultados*

Los residuos de jarosita presentan valores de conductividad hidráulica de laboratorio desde 0.000742 m/d a 0.00892 m/d y conductividad hidráulica de campo que varía de 0.00467 m/d a 0.0163 m/d; cuyos valores se encuentran dentro del rango de 0.0005 m/d y 0.05 m/d que viene a ser equivalente a relaves finos estudiados en la mina San Rafael por Ruiz et al., (2021). Woessner y Poeter, (2020) indican que cuando los entornos hidrogeológicos tienen distribuciones homogéneas de conductividad hidráulica, a menudo es el resultado de un proceso deposicional que produce un conjunto bastante uniforme de condiciones. Es así que se puede concluir que el depósito N° 3 tiene una distribución homogénea de conductividad hidráulica concordante con lo encontrado por Ghasemi Nejad y Shourian (2016) que indican que los resultados no son significativamente sensibles a los cambios de conductividad hidráulica.

Del análisis de sensibilidad realizado al caudal de bombeo, se observa que, a mayor caudal de bombeo mayor depresión de solución de jarosita en tres años (1095 días), concordante con lo expresado por Kunkel (1960) que indica que a mayor caudal de bombeo menor es el tiempo requerido para alcanzar un determinado abatimiento.

Woessner y Poeter (2020) indican que el rendimiento específico es el volumen de agua drenada del total de la muestra. En los escenarios analizados con sensibilidad de rendimiento específico se observa que a mayor rendimiento específico menor descenso del nivel freático, lo cual quiere decir que un acuífero con mayor rendimiento específico ($S_y=0.1$) puede liberar más agua antes que el nivel freático descienda significativamente. En cambio, si el rendimiento específico es bajo ($S_y=0.02$), el nivel freático bajará más rápido al extraer la misma cantidad de agua.

Limitaciones

Sy de literatura. El valor de rendimiento específico S_y utilizado en el modelo fue de obtenido de literatura especializada para relaves finos, dado que no se ejecutaron ensayos de bombeo a escala de campo que permitan determinar S_y in situ. Esto genera incertidumbre en la estimación del volumen drenable, ya que S_y es el parámetro que más controla el almacenamiento de agua en el modelo FEFLOW. Para mitigar esta limitación se adoptó $S_y=0.02$ como valor conservador y se realizó análisis de sensibilidad con valores S_y de 0.05 a 0.1, determinando que el volumen mínimo extraíble es de 7,025.0 m³. Se recomienda como trabajo futuro ejecutar pruebas de bombeo de al menos 72 horas en pozos piloto para calibrar S_y real y reducir la incertidumbre del modelo.

Valorización económica. La valorización del Zn a \$887,808.00 se calculó con el precio promedio de los últimos 5 años por lo que no considera la volatilidad del mercado de metales ni los costos CAPEX/OPEX del sistema de bombeo. Esta limitación es propia de estudios a nivel de prefactibilidad y en este caso específico sólo se calculó como un valor recuperable del proceso de cierre, más no como un beneficio económico. El análisis demuestra el potencial técnico, pero se recomienda un estudio económico-financiero detallado antes de la implementación a escala industrial.

4.3. Prueba / comprobación de hipótesis

4.3.1 Hipótesis general

Para comprobar la hipótesis general se realizó el análisis de sensibilidad de cada parámetro sobre el descenso a 1095 días mediante el índice de sensibilidad (IS), el análisis de regresión múltiple y coeficientes de regresión, formulando las hipótesis estadísticas H_0 (hipótesis nula) y H_1 (hipótesis de investigación), tal como se presenta a continuación:

H_0 : La estrategia óptima de la extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3 de la Refinería de Zinc Cajamarquilla para garantizar el cierre ambiental está determinada primariamente por la conductividad hidráulica de los residuos de jarosita, siendo el caudal de bombeo y el rendimiento específico parámetros de referencia ya que no influyen en el desaguado del depósito.

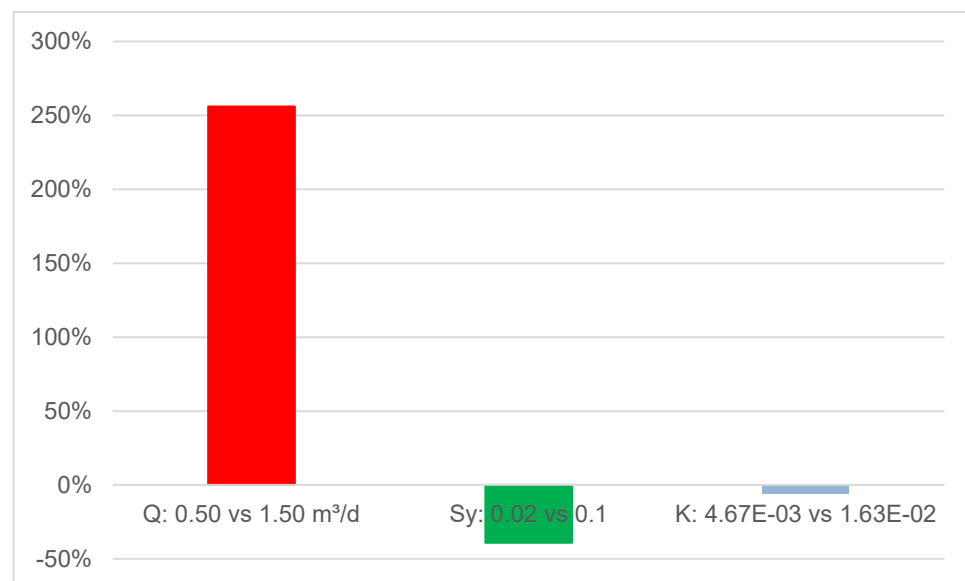
H_1 : La estrategia óptima de la extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3 de la Refinería de Zinc Cajamarquilla para garantizar el cierre ambiental está determinada primariamente por el caudal de bombeo (muy sensible), seguido del rendimiento específico (poco sensible), siendo la conductividad hidráulica un parámetro de referencia (insensible) dado su homogeneidad horizontal en el depósito.

El análisis de sensibilidad cuantificó la influencia de cada parámetro sobre el descenso a 1095 días mediante el índice de sensibilidad (IS). Los resultados indican que el caudal de bombeo (Q) es el factor dominante con $IS=1.28$, lo que significa que un incremento de 10% en el caudal genera un aumento de 12.8% en el descenso. El rendimiento específico (S_y) presentó $IS = -0.10$, indicando que un incremento de 10% en S_y reduce el descenso en sólo 1.0%. La conductividad hidráulica (K) resultó insensible con IS menor a 0.05 (ver Tabla 20).

Tabla 20*Resultados del modelo para la comprobación de la hipótesis general*

Factor analizado	% Cambio del factor	% de variación de descenso a 1095 días	Índice Sensibilidad	Conclusión
Q: 0.50 vs 1.50 m ³ /d	+200%	+256%	1.28	Muy sensible
Sy: 0.02 vs 0.1	+400%	-39%	-0.10	Poco sensible
K: 4.67E-03 vs 1.63E-02	+249%	-6%	-0.02	Insensible

La Figura 32 muestra el % de variación de descenso a 1095 días, cuando el caudal varía de 0.05 a 1.50 m³/d, en rendimiento específico Sy varía de Sy: 0.02 vs 0.1 y la conductividad hidráulica varía de K: 4.67E-03 vs 1.63E-02. Si Q varía 200% el descenso varía 256%, si Sy varía 400%, el descenso varía -39% y si K varía 249% la variación del descenso de la solución es mínima.

Figura 32*% de variación de descenso a 1095 días con variación de Q, Sy y K*

La Tabla 21 muestra los escenarios con 15, 12 y 10 pozos, con datos de conductividad hidráulica de campo y laboratorio, caudal y rendimiento específico y resultados de modelamiento numérico considerados para la comprobación de la hipótesis general en los 28 escenarios.

Tabla 21

Datos considerados para la comprobación de la hipótesis general

Nº Pozos de bombeo	Escenario	K (m/d)	Caudal Q (m³/d)	Sy	Descenso (m) 1095 días
15	EC_1	0.0111	1.00	0.02	7.96
	EC_2	0.0047	1.00	0.02	7.75
	EC_3	0.0163	1.00	0.02	7.7
	EC_4	0.0111	0.50	0.02	3.42
	EC_5	0.0111	1.50	0.02	12.46
	EC_6	0.0111	1.00	0.05	6.82
	EC_7	0.0111	1.00	0.1	5.25
12	EC_8	0.0111	1.00	0.02	7.57
	EC_9	0.0047	1.00	0.02	7.59
	EC_10	0.0163	1.00	0.02	7.21
	EC_11	0.0111	0.50	0.02	3.35
	EC_12	0.0111	1.50	0.02	11.38
	EC_13	0.0111	1.00	0.05	6.26
	EC_14	0.0111	1.00	0.1	4.37
10	EC_15	0.0111	1.00	0.02	7.42
	EC_16	0.0047	1.00	0.02	7.65
	EC_17	0.0163	1.00	0.02	6.78
	EC_18	0.0111	0.50	0.02	3.28
	EC_19	0.0111	1.50	0.02	11.97
	EC_20	0.0111	1.00	0.05	6
	EC_21	0.0111	1.00	0.1	4.3
15	E1	0.0041	1.00	0.02	7.66
	E2	0.002	1.00	0.02	6.19
	E3	0.0057	1.00	0.02	7.87
	E4	0.0041	0.50	0.02	3.39
	E5	0.0041	1.50	0.02	10.65
	E6	0.0041	1.00	0.05	4.88
	E7	0.0041	1.00	0.1	3.18

Nota. K: Conductividad hidráulica, Sy: Rendimiento específico

Para evaluar la influencia estadística de los parámetros sobre el descenso, se realizó una regresión lineal múltiple en SPSS. El modelo resultante fue estadísticamente significativo $F = 129.159$ y $p < 0.001$ y explicó el 95.7% de la varianza del descenso a 1095 días ($R^2 = 0.957$). Se concluye que el modelo es bueno para explicar la variable dependiente (ver Tablas 22 y 23).

Tabla 22

Resumen del modelo de regresión lineal múltiple para el descenso a 1095 días

Resumen del modelo				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	0.978	0.957	0.950	0.58074

Nota. Predictores: (Constante), N° Pozos, Sy, Q, K. Variable dependiente: Descenso a 1095 días.

Tabla 23

Análisis de varianza del modelo de regresión

		ANOVA				
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	174.239	4	43.560	129.159	0.000
	Residuo	7.757	23	0.337		
	Total	181.996	27			

Nota. Variable dependiente: Descenso a 1095 días. El modelo fue estadísticamente significativo, $p < .001$.

En la Tabla 24, el análisis de coeficientes reveló que el caudal de bombeo (Q) fue el predictor más influyente ($\beta = 0.865$, $p < 0.001$), seguido por el rendimiento específico (Sy) ($\beta = -0.451$, $p < 0.001$). La

conductividad hidráulica (K) no presentó una influencia estadísticamente significativa ($\beta = 0.092$, $p = 0.062$). Estos resultados confirman que el descenso del nivel freático a 3 años está gobernado principalmente por el caudal de bombeo, validando la hipótesis general de la investigación.

Tabla 24

Coefficientes de regresión para los predictores del descenso a 1095 días

		Coeficientes				
		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
Modelo		B	Desv. Error	Beta	t	Sig.
1	(Constante)	-1.158	0.985		-1.176	0.252
	K	57.916	29.558	0.092	1.959	0.062
	Q	8.255	0.411	0.865	20.103	0.000
	Sy	-40.722	3.891	-0.451	-10.465	0.000
	Pozo	0.048	0.056	0.040	0.847	0.406

Nota. $R^2 = .957$. Solo Q y Sy resultaron estadísticamente significativos al nivel $\alpha = .05$.

Al registrarse un $R^2 = 0.957$ indica que el modelo explica el 95.7% de las varianzas de la variable dependiente. El 95.7% del descenso del nivel de solución en los 1095 días es explicado por el conjunto de indicadores de la variable independiente. No obstante, el análisis de coeficientes reveló que sólo el caudal de bombeo (Q) y el rendimiento específico (Sy) son significativos.

Por lo tanto, se tiene $IS = 1.28 + ANOVA$ con $F = 129.159 +$ Coeficientes con Beta Q = 0.865. Tres pruebas distintas, misma conclusión: Se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis de investigación, en la estrategia óptima del desaguado el caudal de bombeo (Q) es el factor dominante, el rendimiento específico (Sy) es el segundo factor (poco sensible), y la conductividad hidráulica (K) es el parámetro de referencia.

4.3.2 Hipótesis específicas

4.3.2.1 Hipótesis específica 1

Para comprobar la hipótesis específica 1, se aplicó el estadístico de prueba H de Kruskal-Wallis y el análisis de sensibilidad del parámetro sobre el descenso a 1095 días mediante el índice de sensibilidad (IS), formulando las hipótesis estadísticas H0 (hipótesis nula) y H1 (hipótesis de investigación), tal como se presenta a continuación:

H0: Los residuos de jarosita del depósito N° 3 no presentan homogeneidad horizontal en su conductividad hidráulica, como resultado del proceso estandarizado de depositación metalúrgica, lo que no permite diseñar una red de pozos de distribución regular.

H1: Los residuos de jarosita del depósito N° 3 presentan homogeneidad horizontal en su conductividad hidráulica (K_{campo} del orden de 10^{-2} m/d), como resultado del proceso estandarizado de depositación metalúrgica, lo que permite diseñar una red de pozos de distribución regular.

Para determinar si los valores de conductividad hidráulica presentan diferencias significativas se aplicó el estadístico de prueba H de Kruskal-Wallis a los datos de conductividad hidráulica de la Tabla 10. Se obtuvo un valor H de 1.165 y un p-valor de 0.558. Siendo el p-valor mayor a 0.05 no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de que las medianas de conductividad hidráulica son iguales entre los sondeos PJ3-HG1, PJ3-HG2 y PJ3-HG3. En otras palabras, los datos no muestran diferencias estadísticas significativas entre los tres grupos.

La Tabla 25 muestra los datos de conductividad hidráulica y resultados de modelamiento numérico considerados para la comprobación de la hipótesis específica 1.

Tabla 25

Datos considerados para la comprobación de la hipótesis específica 1

Grupo	N° Pozos	Sy	K (m/d)= 0.00467	K (m/d)= 0.0111	K (m/d)= 0.0163
1	15	0.02	EC_2 = 7.75	EC_1 = 7.96	EC_3 = 7.7
2	12	0.02	EC_9 = 7.59	EC_8 = 7.57	EC_10 = 7.21
3	10	0.02	EC_16 = 7.65	EC_15 = 7.42	EC_17 = 6.78

Nota. K: Conductividad hidráulica, Sy: Rendimiento específico

Según la Tabla 26 se registra un índice de sensibilidad $|IS| < 0.05$, lo cual indica que la conductividad hidráulica solo es un parámetro de caracterización.

Tabla 26

Resultados de sensibilidad para la comprobación de la hipótesis específica 1

Grupo	Pozos	Caudal Q (m ³ /d)	Rendimiento específico Sy	Variación del descenso (m) 1095 días
1 (EC_3, EC_2)	15	1.00	0.02	-0.65%
2 (EC_10, EC_9)	12	1.00	0.02	-5.01%
3 (EC_17, EC_16)	10	1.00	0.02	-11.4%
Variación promedio del descenso				-6%
Variación de K de 4.67E-03 a 1.63E-02 (3.5 veces)				249%
índice de sensibilidad de K				-0.02

Se determinó que los residuos de jarosita del depósito N° 3 presentan homogeneidad horizontal en su conductividad hidráulica, sin evidenciar zonificaciones laterales significativas entre los sondeos PJ3-HG1, PJ3-HG2 y PH3-HG3. Esta homogeneidad implica que el diseño de la red de extracción puede realizarse con una distribución regular de pozos, sin requerir espaciamientos o caudales diferenciados por sectores, simplificando el modelo numérico de extracción de la solución. Tanto con la prueba H de Kruskal-Wallis con p-valor de 0.558 y el índice de sensibilidad $|IS| < 0.05$, se rechaza la hipótesis nula (H0) y se acepta la hipótesis de investigación (H1).

4.3.2.2 Hipótesis específica 2

Para comprobar la hipótesis específica 2, se aplicó el análisis de sensibilidad del parámetro sobre el descenso a 1095 días mediante el índice de sensibilidad (IS), formulando las hipótesis estadísticas H0 (hipótesis nula) y H1 (hipótesis de investigación), tal como se presenta a continuación:

H0: Un incremento del caudal de bombeo de 0.5 a 1.5 m³/d por pozo no produce un aumento significativo y positivo en el descenso del nivel de solución de jarosita en el depósito N° 3.

H1: Un incremento del caudal de bombeo de 0.5 a 1.5 m³/d por pozo produce un aumento significativo y positivo del descenso del nivel de solución de jarosita, siendo el escenario con 15 pozos a $Q_{inicial} = 1.5 \text{ m}^3/\text{d}$, el que obtiene la mayor extracción en un tiempo de 3 años de operación continua en el depósito N° 3.

La Tabla 27 muestra los datos de caudal de bombeo y resultados de modelamiento numérico considerados para la comprobación de la hipótesis específica 2.

Tabla 27

Datos considerados para la comprobación de la hipótesis específica 2

Grupo	N° Pozos	Sy	Q=0.50	Q=1.00	Q=1.50
1	15	0.02	EC_4 = 3.42	EC_1 = 7.96	EC_5 = 12.46
2	12	0.02	EC_11 = 3.35	EC_8 = 7.57	EC_12 = 11.38
3	10	0.02	EC_18 = 3.28	EC_15 = 7.42	EC_19 = 11.97

Nota. Q: caudal (m³/d), Sy: Rendimiento específico

La Tabla 28 muestra los resultados de la evaluación de la influencia del caudal Q comparando 3 grupos de escenarios con idénticas condiciones de N° de pozos y Sy, variando únicamente Q de 0.50 a 1.50 m³/d. El incremento de 200% en Q generó un aumento promedio de 256% en el descenso a 1095 días, con índice de sensibilidad de 1.28.

Tabla 28*Resultados de sensibilidad para la comprobación de la hipótesis específica 2*

Grupo	Pozos	Conductividad hidráulica K (m/d)	Rendimiento específico Sy	Variación del descenso (m) 1095 días
1 (EC_5,EC_4)	15	0.0111	0.02	264%
2 (EC_12,EC_11)	12	0.0111	0.02	240%
3 (EC_19, EC_18)	10	0.0111	0.02	265%
Variación promedio del descenso				256%
Variación de Q de 0.5 a 1.50 m ³ /día (3 veces)				200%
índice de sensibilidad de Q				1.28

El $IS > 1.00$ clasifica a Q como factor muy sensible y determinante del descenso, por lo cual se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis de investigación (H_1), confirmando que Q es la principal variable de control operativo en la estrategia de extracción de la solución de jarosita. Siendo el escenario EC_5 (15 pozos, $Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{d}$) el que alcanza un descenso de 12.46 m, que representa el 89% del desaguado en un tiempo de 3 años de operación continua en el depósito N° 3.

4.3.2.3 Hipótesis específica 3

Para comprobar la hipótesis específica 3, se aplicó el análisis de sensibilidad del parámetro sobre el descenso a 1095 días mediante el índice de sensibilidad (IS), formulando las hipótesis estadísticas H_0 (hipótesis nula) y H_1 (hipótesis de investigación), tal como se presenta a continuación:

H_0 : El rendimiento específico Sy de los residuos de jarosita no tiene un efecto significativo sobre el descenso del nivel de solución por unidad de tiempo; o bien, no existe una relación inversa entre ambas variables.

H1: A mayor rendimiento específico S_y de los residuos de jarosita, menor es el descenso del nivel de solución por unidad de tiempo; el valor $S_y=0.02$ característico de limos de baja plasticidad (ML/CL) representa el escenario conservador de diseño del sistema de extracción y define el volumen mínimo extraíble en el período de cierre del depósito N° 3.

El depósito N° 3 tiene 394,663.0 m³ de residuos de jarosita. El volumen máximo de solución a extraer depende del rendimiento específico, si $S_y=0.02$, volumen de 7,893.26 m³, $S_y=0.05$ el volumen es de 19,733.15 m³ y si $S_y=0.1$ el volumen es de 39,466.3 m³.

Konikow y Bredehoeft (1992) indican que, los parámetros más sensibles suelen ser los menos conocidos, el análisis de sensibilidad es esencial para demostrar la robustez de las conclusiones del modelo, el científico tiene la responsabilidad de estimar la incertidumbre (pp. 79-81).

En este estudio, al ser S_y el único parámetro estimado de bibliografía, se realizó el análisis de sensibilidad presentado en la Tabla 29, el cual muestra los datos de rendimiento específico y resultados de modelamiento numérico considerados para la comprobación de la hipótesis específica 3.

Tabla 29

Datos considerados para la comprobación de la hipótesis específica 3

Grupo	N° Pozos	Q (m ³ /d)	$S_y=0.02$	$S_y=0.05$	$S_y=0.1$
1	15	1	EC_1 = 7.96	EC_6 = 6.82	EC_7 = 5.25
2	12	1	EC_8 = 7.57	EC_13 = 6.26	EC_14 = 4.37
3	10	1	EC_15 = 7.42	EC_20 = 6.0	EC_21 = 4.30

Nota. Q: caudal (m³/d), S_y : Rendimiento específico

La Tabla 30 muestra los resultados de la evaluación de la influencia del rendimiento específico S_y comparando 3 grupos de escenarios con idénticas condiciones de N° de pozos y Q, variando únicamente S_y de 0.02 a 0.1. El

incremento de 400% en S_y generó una disminución promedio de 39% en el descenso a 1095 días, con índice de sensibilidad de -0.10.

Se propone $S_y=0.02$ como valor conservador de diseño, por representar el límite inferior de rango reportado en bibliografía para materiales similares. Este valor define un volumen mínimo extraíble de 7,025.0 m³ (89% de 7,893.26 m³) durante el período de cierre del depósito N° 3.

Tabla 30

Resultados de sensibilidad para la comprobación de la hipótesis específica 3

Grupo	Pozos	Conductividad hidráulica K (m/d)	Caudal Q (m ³ /d)	Variación del descenso (m) 1095 días
1 (EC_7, EC_1)	15	0.0111	1.00	-34%
2 (EC_14, EC_8)	12	0.0111	1.00	-42%
3 (EC_21, EC_15)	10	0.0111	1.00	-42%
Variación promedio del descenso				-39%
Variación de S_y de 0.02 a 0.10 (5 veces)				400%
índice de sensibilidad de S_y				-0.10

El $|IS|$ ubicado entre 0.05 a 0.25 clasifica a S_y como factor poco sensible para el descenso, el signo negativo indica la relación inversa entre S_y y descenso, a mayor S_y menor descenso en la estrategia de desaguado, por lo tanto, se acepta la hipótesis de investigación (H1) y se rechaza la hipótesis nula (H0).

4.3.2.4 Hipótesis específica 4

Para comprobar la hipótesis específica 4, se realizó un análisis cuantitativo de valorización de recursos, formulando las hipótesis estadísticas H0 (hipótesis nula) y H1 (hipótesis de investigación), tal como se presenta a continuación:

H0: La solución de jarosita no tiene contenido de Zn recuperable y la reintroducción de la solución de jarosita en la etapa de lixiviación del proceso metalúrgico no genera un valor recuperable ni permite alcanzar el objetivo de "cero efluentes" en el cierre del depósito N° 3.

H1: La solución de jarosita tiene pH ácido, contiene metales pesados con mayor concentración de Al, Fe, Mg, Mn y Zn y tiene alto potencial de generar de acidez. La reintroducción de la solución de jarosita con Zn recuperable en la etapa de lixiviación del proceso metalúrgico genera un valor económico superior a \$15,000.00 en un escenario conservador, permitiendo el cierre del ciclo de economía circular y la eliminación total de efluentes asociados al cierre del depósito N° 3.

a. Caracterización geoquímica de la solución y residuos de jarosita

Los valores de pulpa pH entre 1.09 y 2.25, son reportados de la jarosita almacenada, la cual en después de la extracción de la solución de jarosita será encapsulada con un material de cobertura proveniente de la quebrada Quimarca.

De acuerdo con las Tablas 16 y 17, la solución de jarosita contiene metales pesados con mayor concentración de Aluminio, Hierro, Magnesio, Manganeseo y Zinc, los residuos de jarosita presentan pH ácido y tienen alto potencial de generar de acidez.

b. reintroducción de la solución de jarosita con Zn recuperable en la etapa de lixiviación

La hipótesis es de valor umbral, se contrasta por comparación directa. En la Tabla 31 se observan los datos de contrastación de hipótesis. Para contrastar la hipótesis específica, se evaluó el modelo de valorización bajo un escenario conservador. Como se observa en la Tabla 32, el Valor Total Recuperable alcanzó \$ 887,808.00, superando el umbral de \$15,000.00 planteado. Adicionalmente, el modelo proyecta efluentes vertidos al medio ambiente de 0.00%, cumpliendo la condición de eliminación total de descargas del depósito N° 3. Por tanto, se acepta la hipótesis: la reintroducción de la solución de jarosita genera valor económico cercano al millón de dólares y permite el cierre del ciclo de economía circular.

Tabla 31*Datos de contrastación de hipótesis específica 4*

Parámetro Crítico	Valor / Especificación	Impacto en el Modelo
Volumen Extraíble	7,025.00 m ³	Escenario Conservador
Concentración de Zn	43.697 g/L (promedio)	Alta densidad de carga metálica
Eficiencia de Recuperación	97.00%	Optimización de lixiviación
Precio de Mercado (Zn)	2,981.6 \$/t	Valorización comercial
Valor Total Recuperable	\$ 887,808.00	Viabilidad Económica
Efluentes finales	0.00%	Cierre de Ciclo (Ambiental)

Tabla 32*Contraste de la hipótesis de valorización bajo escenario conservador*

Parámetro Crítico	Valor Obtenido	Umbral Hipótesis	Cumplimiento	Impacto
Valor Total Recuperable	\$ 887,808.00	> \$15,000.0	Sí	Viabilidad Económica
Efluentes finales	0.00%	= 0%	Sí	Cierre de Ciclo Ambiental + Efluentes 0%
Escenario aplicado	Conservador	Conservador	Sí	Economía circular

Nota. Los parámetros del escenario conservador se detallan en la Tabla 33.

Tabla 33*Supuestos del escenario conservador para la valorización de Zn*

Parámetro	Valor Usado	Criterio Conservador Aplicado
Precio Zn	2,981.6 \$/t	Promedio de los últimos 5 años, no precio spot actual de 3,500 \$/t
Eficiencia Recuperación	97.00%	Valor mínimo de eficiencia, no el 99% óptimo
Volumen Extraíble	7,025.00 m ³	Volumen extraíble considerando $S_y=0.02$ y 89% de extracción.
Concentración Zn	43.697 g/L	Promedio de 3 muestras, incluyendo mínimo de 5.7 g/L

La Refinería de Zinc Cajamarquilla no realiza vertimiento de la planta de procesos ni de sus depósitos de residuos de jarosita, goethita o lodos neutros. De acuerdo a la cantidad de Zn en la solución la Refinería de Cajamarquilla se determinó que la solución extraída contiene de 5,790.0 a 64,000.0 mg/L de Zn en solución, de acuerdo al circuito de manejo de residuos, antes de enviarse a la planta de procesos será bombeada hacia la poza N° 06 para la sedimentación y mezcla con otras soluciones vertidas en dicha poza y luego ser enviada a la planta de proceso.

Asimismo, debido a que en un escenario de 15 pozos a 1.5 m³/día, se estaría recolectando 22.5 m³ de solución al día, siendo un volumen pequeño para ser enviado directamente a la planta de procesos. En el escenario conservador con un volumen mínimo extraíble de 7,025.0 m³, asumiendo una concentración de Zn de 43.697 g/L promedio en la solución extraída, una eficiencia del 97% en la recuperación del proceso y un precio de 2,981.6 \$/t de zinc, se obtiene un valor recuperable de \$ 887,808.00 y cierra el ciclo de la economía circular y asimismo genera un beneficio ambiental de cero efluentes al medio ambiente asociado al cierre del depósito N° 3.

La implementación de este proceso transforma la percepción tradicional de la jarosita, pasando de ser un pasivo ambiental crítico a un recurso secundario

que genera valor. La recuperación proyectada de casi un millón de dólares no solo valida la viabilidad financiera del proyecto, sino que fundamenta el modelo de economía circular mediante dos pilares técnicos:

Recuperación de Recursos: La alta concentración de Zinc (43.697 g/L) permite reinsertar materia prima crítica en la etapa de lixiviación.

Vertido Cero (Zero Liquid Discharge): Al reintroducir la totalidad de la solución ácida al proceso operativo, se elimina el riesgo hídrico y la necesidad de tratamiento de efluentes externos, mitigando el impacto ambiental en el entorno del depósito N° 3.

4.4. Implicancias ambientales de la deshidratación de los depósitos de jarosita para el cierre de minas

El agua que se encuentra en distintas formas dentro del depósito de residuos, tiene un impacto crucial en su comportamiento de los suelos ante la deformación, así como el comportamiento geotécnico y geoquímico.

Los depósitos de jarosita no pueden ser rehabilitados sin un tratamiento previo, para el cierre adecuado es necesario su deshidratación (Costine, Fawell, Chryss, Dalh y Bellwood, 2020). La deshidratación permite compactar los residuos en su mismo lugar o también trasladar los residuos a zonas más estratégicas.

Las implicancias ambientales de la deshidratación de los depósitos de jarosita para el cierre de minas se puede resumir en la recuperación de agua para la planta, estabilidad física muy alta a excelente, mejora de la estabilidad geoquímica, potencial de licuefacción prácticamente nulo y huella del depósito mínima.

Durante el proceso de deshidratación de depósitos de jarosita se aprovecha la recirculación del agua a la planta metalúrgica, este proceso es de suma importancia en zonas con escaso recurso hídrico.

Los residuos de jarosita deshidratados pueden tener un mejor manejo durante el cierre, pueden ser compactados en bancos o capas, similares a los depósitos de desmonte mejorando su estabilidad física debido a que la compactación las convierte en estructuras auto portantes, sin necesidad de apoyo de un dique, por lo cual se eliminan los riesgos asociados a la falla de los diques de contención, minimizando riesgos ambientales y geotécnicos y garantizando la seguridad ambiental a largo plazo.

Asimismo, al tener los depósitos compactados se minimizar significativamente la infiltración de agua y oxígeno, reduciendo el potencial drenaje ácido y lixiviación de metales.

Otra de las implicancias ambientales de la deshidratación de depósitos de jarosita es que al no existir agua retenida evita que en el futuro exista riesgo de licuefacción del depósito y contaminación al medio ambiente.

También los residuos de jarosita deshidratados, apilados y compactados permite formar taludes con ángulos pronunciados, reduciendo la huella del depósito. Y finalmente un depósito de jarosita deshidratado facilita la instalación de coberturas eficientes para el cierre de los depósitos y su rehabilitación.

CONCLUSIONES

- Se determinó la estrategia óptima de extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3, mediante la caracterización hidrogeológica y el modelamiento numérico tridimensional en FEFLOW. La estrategia consiste en una red de 15 pozos de distribución regular con caudal inicial de $1.5 \text{ m}^3/\text{d}$ por pozo, logrando 12.46 m de descenso que representa el 89% del volumen total en 3 años de operación.
- Se determinó que los residuos de jarosita del depósito N° 3 presentan homogeneidad horizontal de la conductividad hidráulica del orden de 10^{-2} m/d , permitiendo un diseño de red de pozos con distribución regular sin espaciamientos diferenciados.
- Se determinó que el caudal de bombeo es el único predictor significativo del descenso con índice de sensibilidad de 1.28 al variar el caudal de $0.05 \text{ m}^3/\text{d}$ a $1.5 \text{ m}^3/\text{d}$. Por lo tanto, el control operacional debe realizarse mediante regulación del caudal.
- Se evaluó la incertidumbre del rendimiento específico S_y mediante el análisis de sensibilidad, adoptando $S_y=0.02$ como valor conservador de diseño que garantiza un volumen mínimo extraíble de $7,025.0 \text{ m}^3$ durante el cierre del depósito.
- Se caracterizaron los residuos de jarosita, obteniendo un potencial de 297.76 toneladas de Zn recuperable en solución, equivalentes a \$887,808.00. El reaprovechamiento del 100% del efluente en el proceso metalúrgico garantiza vertimiento cero al medio ambiente.

RECOMENDACIONES

- Evaluar el uso de sistemas robóticos para monitoreo y muestreo, especialmente zonas con inestabilidad física y geoquímica del depósito de acuerdo al mapa de riesgos y el IPERC.
- Crear una base de datos para registrar variaciones diarias y ajustar el caudal de bombeo, permitiendo a la empresa anticipar desviaciones del plan original.
- La investigación puede aplicarse a otros depósitos de relaves en pulpa de diferentes metales en etapas previas al cierre y en el caso de depósitos de relaves antiguos donde se requiera desaguar los relaves para reprocesarlos debido a su contenido metálico o también en el caso donde se vayan a usar relaves para reciclaje en agregados de construcción, material de relleno subterráneo, co-disposición con desmonte entre otros.
- Caracterizar adecuadamente los depósitos mediante sondajes y ensayos que determinen las variaciones de profundidad y conductividad hidráulica. Dependiendo de la envergadura del depósito de relaves podría tener diferentes valores de conductividad hidráulica en la extensión del depósito y según su naturaleza puede variar sus propiedades físicas y químicas, con los cuales se determinará el caudal adecuado para el bombeo y el rendimiento específico. Con los datos propios del depósito de relaves a desaguar se puede replicar el modelo numérico y seleccionar el más adecuado para el propósito de deshidratación de los relaves.
- Desarrollar un estudio económico-financiero detallado que incluya CAPEX/OPEX del sistema de bombeo y análisis de sensibilidad al precio del Zn, antes de la implementación a escala industrial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aburrá, S. A. (2021). Términos de Referencia para la realización de pruebas hidráulicas en las captaciones de agua subterránea en la jurisdicción del área metropolitana del Valle de Aburrá. Medellín, Antioquía, Colombia. Obtenido de Futuro Sostenible:
https://www.metropol.gov.co/ambiental/recurso-hidrico/Documents/TR_Pruebas%20Bombeo%20AMVA_VERSI%C3%93N%20FINAL%20V2.pdf
- Anderson, M. P. (2015). *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport* (2nd ed. ed.). Academic Press.
- Angelone, S., Garibay, M. T., & Cauhapé Casaus, M. (2006). *Geología y Geotecnia: Permeabilidad de Suelos*. Rosario: Universidad Nacional de Rosario.
- Asimi, A., Gharibi, K., Abkhoshk, E., & Chelgani, S. (2 de 10 de 2020). Effects of operational parameters on the low contaminant Jarosite precipitation process-an industrial scale study. (M. AG, Ed.) *Materials*, 13(4662), 1-13. doi:<https://doi.org/10.3390/ma13204662>
- Auer, M. (2019). *Department of Civil & Environmental Engineering*. (R. Watts, Ed.) Recuperado el 04 de junio de 2025, de Environmental Engineering Groundwater Supply:
<https://slideplayer.com/slide/15906532/>
- Chandel, A., & Shankar, V. (2022). Evaluation of empirical relationships to estimate the hydraulic conductivity of borehole soil sample. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(4), 368-377.
doi:<https://doi.org/10.1080/09715010.2021.1902872>
- Costine, A., Fawell, P., Chryss, A., Dalh, S., & Bellwood, J. (2020). Development of Test Procedures Based on Chaotic Advection for Assessing Polymer Performance in High-Solids Tailings Applications. *Processes*, 8(731), 20. doi:<https://doi.org/10.3390/pr8060731>
- Custodio, E., & Llamas, M. (2001). *Hidrología subterránea* (2da ed., Vol. 1). Omega.
- Dafalla, M., Shaker, A., Elkady, T., Al-Shamrani, Moshel, Dhowian, & Abdulmusin. (2015). Effects of confining pressure and effective stress on hydraulic conductivity of sand-clay mixtures. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(11), 9993–10001 . doi:<https://doi.org/10.1007/s12517-015-1925-1>

- Demoz. (2023). Compressive Stress Dewaterability Limit in Fluid Fine Tailings. *Minerals*.
- DHI, M. P. (08 de 11 de 2024). *Subsurface flow & transport modelling*. Obtenido de Feflow:
<https://www.dhigroup.com/technologies/mikepoweredbydhi/feflow>
- Díaz, R., Fernandez, P., & Alvarez, L. (2012). Comparative study of groundwater simulation tools Visual MODFLOW and FEFLOW 6.0. 7ª ASAMBLEA HISPANO-PORTUGUESA DE GEODESIA Y GEOFÍSICA, (págs. 1-7). Donostia-San Sebastián. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/281646565_Estudio_comparativo_de_los_simuladores_de_flujo_subterraneo_Visual_MODFLOW_y_FEFLOW_60_Comparative_study_of_groundwater_simulation_tools_Visual_MODFLOW_and_FEFLOW_60
- Dimitrov, L., & Grigorova, I. (2023). Improved Tailings Consolidation Using Dewatering Agents: A Step towards Safer and Sustainable Mining Waste Management. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM)*. 23, págs. 225-231. Budapest/Hungary: ISRES Publishing.
doi:10.55549/epstem.1365798
- EPA, E. P. (2006). *Technical Guidance Manual for Ground Water Investigation -Chapter 4 Pumping and Slug Tests*. Ohio: Ohio Environmental Protection Agency. Recuperado el 6 de junio de 2025, de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://dam.assets.ohio.gov/image/upload/epa.ohio.gov/Portals/30/remedial/docs/groundwater/TGM%20Chap4%20Rev1%20Final,%2012-2006Arch.pdf>
- Figueroa-Núñez, A., & Campos-Gaytán, J. (setiembre-diciembre de 2018). Simulación numérica del agua subterránea en el acuífero Guadalupe, Ensenada, Baja California, México: Caso de estudio, condiciones estacionarias y transitorias. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 26(75), 46-54.
- Freeze, R., & Cherry, J. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall.
- Gao, Q., Hasan, M., Shang, Y., & Qi, S. (11 de 03 de 2024). Geophysical estimation of 2D hydraulic conductivity for groundwater assessment in hard rock. *Acta Geophysica*, 1-12.
- Ghasemi Nejad, A., & Shourian, M. (2016). Optimal Design of Groundwater Wells' Placement and Pumping Rates by Use of Simulation-Optimization Approach. *Iran-Water Resources Research*, 12(2), 24-37. Recuperado el 25 de 09 de 2024, de https://www.iwrr.ir/article_15299.html?lang=en

- Gidahatari. (s.f.). *Modelamiento de agua subterránea*. Recuperado el 8 de 12 de 2024, de <https://gidahatari.com/ih-es/modelamiento-aguas-subterraneas>
- Gómez, M. d. (2018). *Introducción a la metodología de la investigación*. Toluca, Estado de México, México: Universidad Autónoma del Estado de México. Obtenido de http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/104230/secme-2549_2.pdf?sequence=2
- Griedl, P. E. (2016). *Evaluation of excavation methods for jarosita disposal areas within Europe*. Leoben: Mountainuniversitaet Leoben.
- Gupta, S., Kumar, M., & Srivastava, A. (2024). Hydraulic Conductivity of Soils: A Comprehensive Review of the Impacts of Chemicals, Soil Salinity, Organic Matter, and Land Use. 1327. India: Ltd, IOP Publishing. doi:<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1327/1/012032>
- Henríquez-Aravena, A., Martínez-Cerna, L., & Venegas-Cifuentes, A. (2021). *Transitando hacia la economía circular: Oportunidades y pasos para América Latina*. Lima: Konrad-Adenauer-Stiftung e.V. (KAS).
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación Sexta Edición*. México D.F.: Mc Graw Hill Education.
- Hill, M. C., & Tiedeman, C. R. (2007). *Effective Groundwater Model Calibration: With Analysis of Data, Sensitivities, Predictions, and Uncertainty*. John Wiley & Sons.
- Huang, Y., Zhou, C., Quan, Y., Xu, S., Li, Q., & Liu, G. (21 de 09 de 2024). Elements characteristics and potential environmental risk assessment of jarosite residue and arsenic sulfide residue based on geochemical and mineralogical analysis. *Science of The Total Environment*, 944. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173600>
- Hughes-Lomelín, R. N., Sánchez Quispe, S. T., Hernández Hernández, M. A., & Hernández Bedolla, J. M. (2023). Simulación matemática mediante MODFLOW para el cuífero del valle de Aguascalientes, México`. *XVII Congreso Iberoamericano de sistemas de abastecimiento, saneamiento y riego*. Córdoba. Recuperado el 25 de 09 de 2024, de <https://www.serea23.com/wp-content/uploads/2023/06/6228.pdf>
- Johnson, A. (1963). *Compilation of Specific Yields for Various Materials - Supply paper 1662-D*. California: Geological Survey Water. Recuperado el 05 de junio de 2025, de <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://pubs.usgs.gov/wsp/1662d/report.pdf>

- Joshaghani, M., & Ghasemi-Fare, O. (2021). Exploring the effects of temperature on intrinsic permeability and void ratio alteration through temperature-controlled experiments. *Engineering Geology*, 293. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106299>
- Julca, D. (2022). *La economía circular en la minería peruana*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Santiago: Publicación de las Naciones Unidas.
- Kerolli Mustafa, M., Djokic, J., & Ćurković, L. (10 de 2022). Modeling of Atmospheric Dispersion of Jarosite Particles from Tailing Waste in Mitrovica, Kosovo. (MDPI, Ed.) *Atmosphere*, 13(1690). doi:<https://doi.org/10.3390/atmos13101690>
- Konikow, L., & Bredehoeft, J. (1992). Ground-water models cannot be validated. *Advances in Water Resources*, 15(1), 75-83. doi:[https://doi.org/10.1016/0309-1708\(92\)90033-X](https://doi.org/10.1016/0309-1708(92)90033-X)
- Kontos, Y. N. (24 de marzo de 2024). A Simulation-Optimization Model for Optimal Aquifer Remediation, Using Genetic Algorithms and MODFLOW. *Hydrology* 2024, 11(5), 60. doi:<https://doi.org/10.3390/hydrology11050060>
- Kuang, X., Jiao, J. J., Zheng, C., Cherry, J. A., & Li, H. (febrero de 2020). A review of specific storage in aquifers. *Journal of Hydrology*, 581(124383). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124383>
- Kumar Singh, V., Manna, S., Kumar Biswas, J., & Pugazhendhi, A. (1 de 10 de 2023). Recovery of residual metals from jarosite waste using chemical and biochemical processes to achieve sustainability: A state-of-the-art review. (A. Press, Ed.) *Journal of Environmental Management*, 343(118221). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118221>
- Kunkel, F. (1960). *Time, Distance and Drawdown Relationships in a Pumped Ground-Water Basin*. Geological Survey, Washington. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://pubs.usgs.gov/circ/1960/0433/report.pdf>
- Li, S., Yu, L., Jiang, W., Yu, H., & Wang, X. (2022). The Recent Progress China Has Made in Green Mine Construction, Part I: Mining Groundwater Pollution and Sustainable Mining. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, pág. 19. doi:<https://doi.org/10.3390/ijerph19095673>
- López, J. M. (2015). *Desarrollo de métodos numéricos-interpretativos para la realización de ensayos de bombeo*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado el 25 de 09 de 2024, de https://oa.upm.es/39736/1/JOSE_MARIA_LOPEZ_GARCIA.pdf

- Mombelli, D., Mapelli, C., Di Cecca, C., Barella, S., Gruttadauria, A., Ragona, M., . . . A. (02 de 2018). Characterization of cast iron and slag produced by jarosite sludges reduction via Arc Transferred Plasma (ATP) reactor. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 773-783. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.006>
- Montgomery, D. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (Ninth Edition ed.). Arizona, United States: John Wiley & Sons, Inc. Recuperado el 14 de 04 de 2026, de https://www.academia.edu/65675640/The_Design_and_Analysis_of_Experiments
- Musso, M., & et al. (2019). Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges. En N. L.-A. al. (Ed.), *Conductividad Hidráulica en Campo y Laboratorio: Desempeño de Suelos Finos en Aplicación Ambiental*. Montevideo: The authors and IOS Press. doi:<https://doi.org/10.3233/STAL190048>
- Nguyen, Q., Kitchener, R., & Bradshaw, C. (2019). Investigation, monitoring and management of downstream groundwater in the tailings storage facilities of Nui Phao Mine, Vietnam. *Waste Management and the Environment IX*. 231, págs. 35-45. Vietnam: WIT Transactions on Ecology and the Environment. doi:<https://doi.org/10.2495/WM180041>
- Puente, R., Escalante, C., López, J., & Del Valle, J. (marzo de 2024). Manual de Investigación. Lima, Lima, Perú: Facultad de Ingeniería Geológica, Minera Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Qi, S., Wen, Z., Lu, C., Shu, L. S., Huang, Y., & Zhang, S. H. (2014). A new empirical model for estimating the hydraulic conductivity of low permeability media. *IAHS-AISH Proceedings and Reports*. 368, págs. 478-483. Guangzhou: Copernicus GmbH. doi:<https://doi.org/10.5194/piahs-368-478-2015>
- Richey, S., Thomas, B., Lo, M.-H., Famiglietti, J., Swenson, S., & Rodell, M. (2015). Uncertainty in Global Groundwater Storage Estimates in a Total Groundwater Stress Framework. *Water Resources Research*, 51. doi:<https://doi.org/10.1002/2015WR017351>
- Ruiz, E., Huamaní, L., Paucar, J., Larota, J., Jimenez, C., & Gallo, Y. (2021). Planning the Dewatering of Tailings Storage Facility. *Mine Water and the Environment*, 40, 270-284. Recuperado el 29 de 09 de 2024, de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10230-020-00745-z>
- Sánchez, F. (s.f.). *Conceptos Fundamentales de Hidrogeología*. Obtenido de Clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico: https://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf

- Sánchez, L.E. (2019). *Evaluación de impacto ambiental: conceptos y métodos (3ra ed.)* (3ra ed.). Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe, UNESCO.
- Seinfeld, J., Cuzquén, G., Farge, G., & Zaldívar, S. (1998). *Introducción a la economía de los recursos naturales y del medio ambiente*. Lima: Centro de Investigación de la Universidad del Pacífico.
- Selim, A. (2017). *Groundwater Aquifer Types and Their Hydraulic Properties*. El Cairo: Al Azhar University.
doi:<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19299.76328>
- Tamayo, M. (2003). *El proceso de la investigación científica* (Vol. Cuarta edición). (C. G. Editores, Ed.) Balderas 95, México, D.F., México: Editorial Limusa, S.A . Obtenido de <https://drive.google.com/file/d/0B4R1ssRAL--ZNzExZDVIYWEtNDc5Yi00NWYyLTg4ZjMtMGIOYWlZyYjFIMmUx/view?hl=es&pli=1&resourcekey=0-myplvhXFcpPJZUUQojSYSQ>
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2004). *Groundwater Hydrology: Third Edition*. USA: John Wiley & Sons, Inc. Recuperado el 05 de junio de 2025, de <https://es.scribd.com/document/530473687/todd-Mays?v=0.502>
- Villanueva, M., & Iglesias, A. (12 de 08 de 1984). *Pozos y acuíferos: Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. Obtenido de Geólogos del Mundo Asturias: https://www.xeologosdelmundo.org/wp-content/uploads/2020/08/pozos_acuiferos.pdf
- Wang, H. F., & Anderson, M. P. (1982). *Introduction to groundwater modeling*. California: Academic Press, Inc.
- Wels, C., & MacGowan, S. (2017). *Best practice for mine water management and closure*. International Council on Mining & Metals ICM.
- Woessner, W. W., & Poeter, E. P. (2020). *Hydrogeologic properties of earth materials and principles of groundwater flow*. Ontario. Obtenido de Hydrogeologic properties of earth materials and principles of groundwater flow: <https://books.gw-project.org/hydrogeologic-properties-of-earth-materials-and-principles-of-groundwater-flow/chapter/specific-yield-and-specific-retention/>
- Zhu, M., Wang, Y., Zheng, C., Luo, Y., Li, Y., Tan, S., . . . Min, X. (2024). Near-zero-waste processing of jarosite waste to achieve sustainability: A state-of-the-art review. *Journal of Environmental Management*, 370(122396). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122396>

ANEXOS

ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

Matriz de consistencia

	Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Metodología
General	¿Cuál es la estrategia óptima de extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3 de la Refinería de Zinc Cajamarquilla para garantizar el cierre ambiental, considerando la caracterización hidrogeológica de los residuos de jarosita y el modelamiento numérico tridimensional?	Determinar la estrategia óptima de extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3 de la Refinería de Zinc Cajamarquilla para garantizar el cierre ambiental, considerando la caracterización hidrogeológica de los residuos de jarosita y el modelamiento numérico tridimensional.	La estrategia óptima de la extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3 de la Refinería de Zinc Cajamarquilla para garantizar el cierre ambiental está determinada primariamente por el caudal de bombeo (muy sensible), seguido del rendimiento específico (poco sensible), siendo la conductividad hidráulica un parámetro de referencia (insensible) dado su homogeneidad horizontal en el depósito.	Variable independiente: Caracterización hidrogeológica de los residuos de jarosita. Variable dependiente: Estrategia óptima de extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3 de la Refinería de Zinc Cajamarquilla para el cierre ambiental.	Enfoque: Cuantitativo. Tipo de investigación: Investigación aplicada. Alcance de investigación:
Específico 1	¿Cuál es el grado de homogeneidad horizontal de la conductividad hidráulica de los residuos de jarosita del depósito N° 3, y qué implica su distribución homogénea para el diseño de la red de extracción de la solución de jarosita?	Determinar el grado de homogeneidad horizontal de la conductividad hidráulica mediante pruebas de campo y laboratorio de los residuos de jarosita del depósito N° 3, e interpretar sus implicancias para el diseño de la red de extracción de la solución de jarosita.	Los residuos de jarosita del depósito N° 3 presentan homogeneidad horizontal en su conductividad hidráulica (K_{campo} del orden de 10^{-2} m/d), como resultado del proceso estandarizado de deposición metalúrgica, lo que permite diseñar una red de pozos de distribución regular.		Explicativo. Diseño de investigación: Experimental de clase Cuasi-experimental.
Específico 2	¿Cuál es el caudal de bombeo por pozo que maximiza la extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3, en términos de número de pozos y tiempo de operación?	Determinar el caudal de bombeo por pozo que maximiza la extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3, en términos de número de pozos y tiempo de operación.	Un incremento del caudal de bombeo de 0.5 a 1.5 m ³ /d por pozo produce un aumento significativo y positivo del descenso del nivel de solución de jarosita, siendo el escenario con 15 pozos a $Q_{inicial}=1.5$ m ³ /d, el que obtiene el mayor extracción en un tiempo de 3 años de operación continua en el depósito N° 3.		
Específico 3	¿Cómo afecta la incertidumbre del rendimiento específico S_y de los residuos de jarosita (clasificación ML/CL) a las predicciones del modelo numérico, y cuál es el valor conservador de S_y para el diseño de la extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3 para el cierre ambiental?	Evaluar cómo afecta la incertidumbre del rendimiento específico S_y de los residuos de jarosita (clasificación ML/CL) a las predicciones del modelo numérico, y proponer el valor conservador de S_y para el diseño de la extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3 para el cierre ambiental.	A mayor rendimiento específico S_y de los residuos de jarosita, menor es el descenso del nivel de solución por unidad de tiempo; el valor $S_y=0.02$ característico de limos de baja plasticidad (ML/CL) representa el escenario conservador de diseño del sistema de extracción y define el volumen mínimo extraíble en el período de cierre del depósito N° 3.		

Específico 4	¿Cuáles son las características geoquímicas de la solución de jarosita extraída del depósito N° 3 (pH, Zn y generador de acidez) y qué alternativas de tratamiento o valorización son técnicamente viables en el circuito de lixiviación de la Refinería de Zinc Cajamarquilla, estimando el beneficio ambiental y valor recuperable de Zinc asociado al cierre?	Caracterizar la composición geoquímica de la solución de jarosita recuperada del depósito N° 3 y determinar el valor recuperable de zinc y el impacto en la economía circular mediante la reintroducción de la solución extraída en la etapa de lixiviación, para alcanzar un valor recuperable proyectado superior a \$15,000.00 y la eliminación total de efluentes relacionados al cierre del depósito N° 3.	La solución de jarosita tiene pH ácido, contiene metales pesados con mayor concentración de Al, Fe, Mg, Mn y Zn y tiene alto potencial de generar de acidez. La reintroducción de la solución de jarosita con Zn recuperable en la etapa de lixiviación del proceso metalúrgico genera un valor económico estimado superior a \$15,000.0 en un escenario conservador, permitiendo el cierre del ciclo de economía circular y la eliminación total del vertimiento de efluentes asociados al cierre del depósito N° 3.		
---------------------	--	---	---	--	--

ANEXO 2: OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Matriz de Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala/Unidad
Variable independiente: Caracterización hidrogeológica de los residuos de jarosita.	Conjunto de parámetros físicos e hidráulicos que describen el comportamiento del agua subterránea en medios porosos (Custodio y Llamas, 2001; Freeze y Cherry, 1979).	Parámetros hidráulicos de conductividad hidráulica K obtenido mediante pruebas de bombeo y ensayos de laboratorio. Caudal obtenido de prueba de bombeo a caudal constante Q_p . Rendimiento específico S_y obtenido de revisión de literatura especializada.	Parámetros hidráulicos	Conductividad hidráulica K	m/d
				Rendimiento específico S_y	adimensional
			Datos de campo	Caudal de prueba de bombeo Q_p	m ³ /d
			Condiciones iniciales	Nivel freático inicial h_0	m
Variable dependiente: Estrategia óptima de extracción de la solución de jarosita para el cierre ambiental.	Conjunto de pozos y caudales diseñados para extraer soluciones intersticiales contaminantes y controlar la superficie freática garantizando la estabilidad física del depósito (Sánchez, 2019; Wels y MacGowan, 2017).	Red de 15, 12 y 10 pozos de distribución regular, simulada mediante modelamiento numérico tridimensional en FEFLOW para un período de 10 años. Para el análisis de eficiencia de abatimiento se consideró el descenso del nivel freático logrado al tercer año de simulación.	Diseño de la red	Número de pozos	unidades
			Eficiencia de abatimiento	Descenso del nivel freático a 3 años	m
				Volumen extraído	m ³

ANEXO 3: MATRIZ DE INSTRUMENTOS

Matriz de instrumentos

Caracterización hidrogeológica y modelamiento numérico de la extracción de la solución de jarosita en el depósito N° 3 de la Refinería de Zinc Cajamarquilla 2024			
Variable:	Caracterización hidrogeológica de los residuos de jarosita.		
Técnica	Instrumento	Finalidad	Tabulación
Observación mediante pruebas de bombeo y ensayos de laboratorio	Formato de registro de prueba de bombeo.	Determinar la conductividad hidráulica de campo y los caudales en cada prueba de bombeo.	Tablas de tiempo vs caudal vs abatimiento. Curvas de abatimiento –recuperación. Gráfico semilogarítmico.
Observación mediante ensayos de laboratorio	Formato de ensayo de laboratorio de permeabilidad de carga variable. Norma de ensayo ASTM D5084.	Registrar los datos de conductividad hidráulica de laboratorio obtenidos para cada muestra.	Tablas de doble entrada: Muestra vs parámetro. Los datos de conductividad hidráulica se procesan en Excel para determinar los valores máximos, mínimos y promedio de dichos ensayos.
Revisión documental/análisis de contenido	Bibliografía especializada	Sustentar los valores de referencia del rendimiento específico Sy para materiales finos como son los limos de baja plasticidad (ML).	Fichas bibliográficas.

Técnica	Instrumento	Finalidad	Tabulación
Observación mediante análisis instrumental/espectrometría	Análisis de metales totales por “Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry” (ICP-MS) Environmental Protection Agency-(EPA 6020A)	Es una técnica usada para detectar las trazas de metales en muestras líquidas, este ensayo tiene la capacidad de identificar y cuantificar todos los elementos, se realizará este ensayo sobre la solución líquida extraída de la jarosita para determinar la cantidad de Zn en la solución.	Tabla: Muestra vs concentración (mg/L) por metal. Comparación con ECA y LMP.
Observación mediante ensayo geoquímico estático	Análisis “Acid Base Accounting-ABA”	Determinar el potencial de generación de drenaje ácido de los residuos de jarosita.	Tabla con NP, AP, NNP, Ratio NP/AP. Clasificación: Potencial generador o no generador.
Variable:	Estrategia óptima de extracción de la solución de jarosita para el cierre ambiental.		
Técnica	Instrumento	Finalidad	Tabulación
Modelación hidrogeológica/ Simulación	Salidas del modelamiento numérico con FEFLOW 8.0	Determinar el mejor escenario para la extracción de solución del depósito N°3.	Gráficos de evolución temporal del descenso de la solución de jarosita. Tablas: Escenarios vs Descenso.

Procesamiento de datos/ Análisis cuantitativo	Hojas de cálculo	Calcular volúmenes de extracción en diferentes escenarios de rendimiento específico, eficiencia de recuperación y evaluación económica de la solución recuperada del depósito de jarosita.	Tablas dinámicas: Escenarios de bombeo. Gráficos de sensibilidad.
--	------------------	--	---

ANEXO 4: PANEL FOTOGRÁFICO



Foto N° 1: Vista del depósito N° 3 en la refinería de zinc Cajamarquilla.



Foto N° 2: Vista de la visita realizada al depósito N° 3 en la refinería de zinc Cajamarquilla.

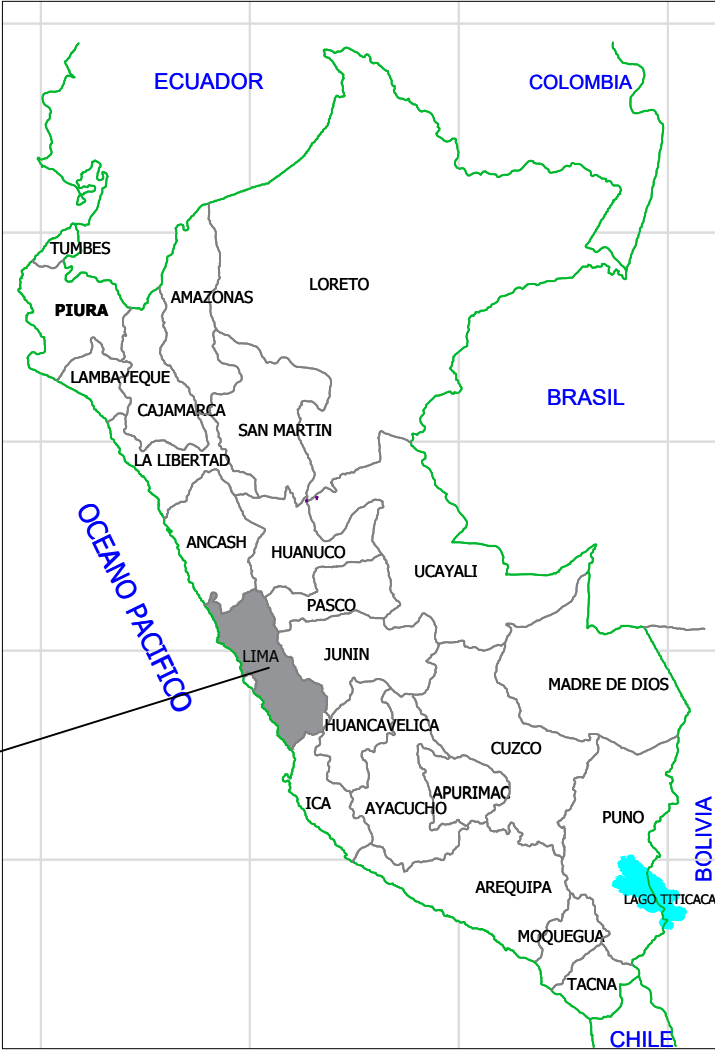
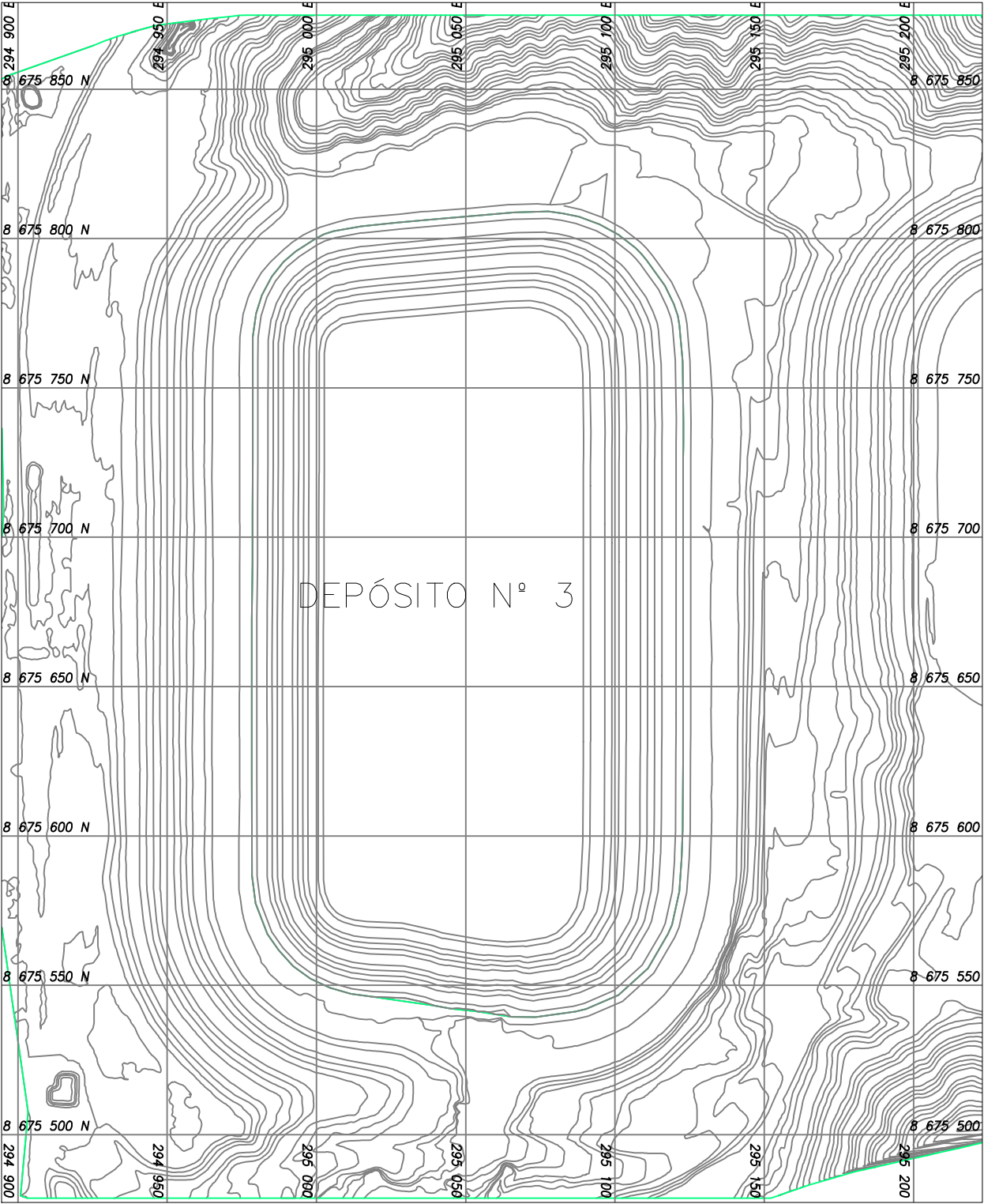


Foto N° 3: Vista de solución de jarosita color verdoso en el depósito N° 3 en la refinería de zinc Cajamarquilla.

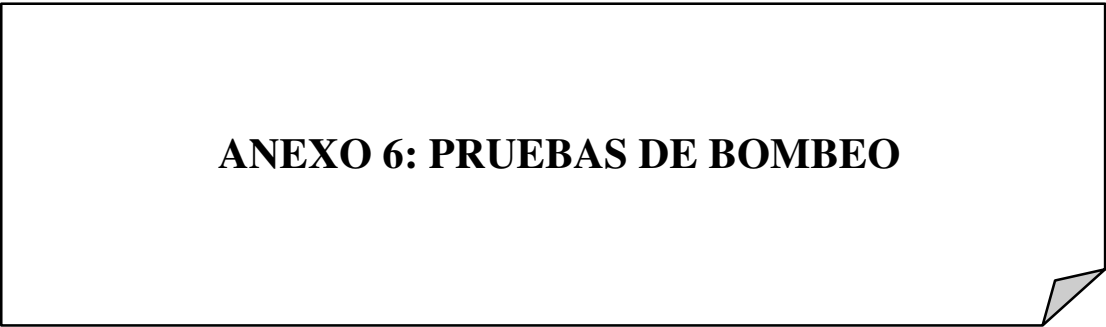


Foto N° 4: Vista de las grietas formadas en la superficie de cobertura por presencia de solución de jarosita en el depósito N° 3 en la refinería de zinc Cajamarquilla. Por lo cual la extracción de la solución de jarosita es primordial para realizar el cierre del depósito, para evitar asentamientos y licuefacciones en el futuro.

ANEXO 5: PLANO DE UBICACIÓN



 UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA UNIDAD DE POSGRADO			
TESIS: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
PLANO DE UBICACIÓN			
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS	ESCALA: 1:2000	Nov. 2024	PLANO N°:
TESISTA: MG. EDITTA HERRERA CARRANZA	DATUM: WGS 84, 18S		1



ANEXO 6: PRUEBAS DE BOMBEO

MEDICIÓN DEL CAUDAL- PIEZÓMETRO PJ3-HG1

Tramo de Prueba (m):	6.00	Tiempo de bombeo (min):	185
Bombeo con aire comprimido		Caudal promedio (l/min):	0.507
Nivel Estático (m):	0.00	Caudal promedio (m3/d):	0.730
Sobrante (m):	1.90		

Litros	Hora	Tiempo (min:seg)	Tiempo de llenado (s)	Tiempo de llenado (min)	Caudal (l/min)
0	09:26:00	0	0	0	0
1	09:26:00	00:11	11	0.18	5.45
1	09:26:00	00:25	25	0.42	2.40
1	09:26:00	00:30	30	0.50	2.00
1	09:27:00	00:36	36	0.60	1.67
1	09:27:00	00:50	50	0.83	1.20
1	09:28:00	00:54	54	0.90	1.11
1	09:31:00	01:12	72	1.20	0.83
1	09:36:00	01:35	95	1.58	0.63
1	09:41:00	02:15	135	2.25	0.44
1	09:46:00	02:45	165	2.75	0.36
1	09:51:00	03:21	201	3.35	0.30
1	09:56:00	03:55	235	3.92	0.26
1	10:01:00	04:01	241	4.02	0.25
1	10:06:00	04:20	260	4.33	0.23
1	10:07:00	04:49	289	4.82	0.21
1	10:12:00	04:45	285	4.75	0.21
1	10:17:00	04:36	276	4.60	0.22
1	10:23:00	04:38	278	4.63	0.22
1	10:28:00	04:49	289	4.82	0.21
1	10:31:00	05:02	302	5.03	0.20
1	10:36:00	05:01	301	5.02	0.20
1	10:42:00	05:12	312	5.20	0.19
1	10:49:00	05:14	314	5.23	0.19
1	10:54:00	05:01	301	5.02	0.20
1	10:59:00	05:12	312	5.20	0.19
1	11:05:00	05:11	311	5.18	0.19
1	11:10:00	05:15	315	5.25	0.19
1	11:15:00	05:23	323	5.38	0.19
1	11:21:00	05:21	321	5.35	0.19
1	11:25:00	05:36	336	5.60	0.18
1	11:30:00	05:28	328	5.47	0.18
1	11:35:00	05:41	341	5.68	0.18
1	11:39:00	05:25	325	5.42	0.18
1	11:44:00	05:39	339	5.65	0.18
1	11:48:00	05:28	328	5.47	0.18
1	11:53:00	05:23	323	5.38	0.19
1	11:58:00	05:48	348	5.80	0.17
1	12:02:00	05:29	329	5.48	0.18
1	12:07:00	05:36	336	5.60	0.18
1	12:12:00	05:29	329	5.48	0.18

1	12:17:00	05:29	329	5.48	0.18
1	12:22:00	05:22	322	5.37	0.19
1	12:26:00	05:44	344	5.73	0.17
1	12:31:00	05:47	347	5.78	0.17

PRUEBA DE BOMBEO PJ3-HG1 FASE DE RECUPERACIÓN (Levellogger)

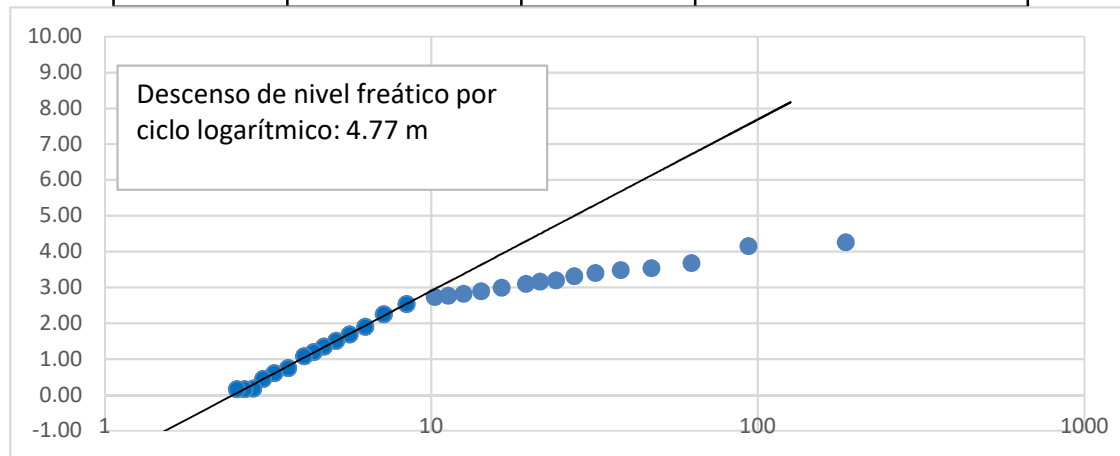
Nombre del pozo/piezómetro: PJ3-HG1 (surgente)
Tramo de filtro (m): 3.00 a 9.00
Hora inicio: 12:37
Hora final: 14:37

Litología del tramo: Relaves
Inclinación (°): vertical
Nivel estático (m): 0
Tiempo de bombeo (min): 185
Tiempo total de prueba (min): 311

Coordenadas UTM WGS-84:
N: 8675754 **E:** 295023
Cota (msnm): 457
Nivel dinámico (m): 4.56
Caudal promedio (m3/d): 0.73

Hora	Tiempo (min)	(T+T')/T' (min)	Recuperación del nivel de agua en el piezómetro (m)
12:37:00	0		4.56
12:38:00	1	186.00	4.26
12:39:00	2	93.50	4.15
12:40:00	3	62.67	3.68
12:41:00	4	47.25	3.54
12:42:00	5	38.00	3.48
12:43:00	6	31.83	3.40
12:44:00	7	27.43	3.31
12:45:00	8	24.13	3.20
12:46:00	9	21.56	3.16
12:47:00	10	19.50	3.10
12:49:00	12	16.42	2.99
12:51:00	14	14.21	2.89
12:53:00	16	12.56	2.82
12:55:00	18	11.28	2.77
12:57:00	20	10.25	2.73
13:02:00	25	8.40	2.54
13:07:00	30	7.17	2.25
13:12:00	35	6.29	1.90
13:17:00	40	5.63	1.69
13:22:00	45	5.11	1.51

Hora	Tiempo (min)	(T+T')/T' (min)	Recuperación del nivel de agua en el piezómetro (m)
13:27:00	50	4.70	1.35
13:32:00	55	4.36	1.20
13:37:00	60	4.08	1.08
13:47:00	70	3.64	0.75
13:57:00	80	3.31	0.61
14:07:00	90	3.06	0.45
14:17:00	100	2.85	0.18
14:27:00	110	2.68	0.16
14:37:00	120	2.54	0.16



MEDICIÓN DEL CAUDAL- PIEZÓMETRO PJ3-HG2

Tramo de Prueba (m):	9.00	Tiempo de bombeo (min):	158
Bombeo con Waterra		Caudal promedio (l/min):	1.328
Nivel Estático (m):	-0.50	Caudal promedio (m3/d):	1.912
Sobrante (m):	1.12		

Litros	Hora	Tiempo (min:seg)	Tiempo (s)	Tiempo (min)	Caudal (l/min)
0	16:08:00	0	0	0	0
1	16:08:00	00:02	2	0.03	30.00
1	16:08:00	00:08	8	0.13	7.50
1	16:09:00	00:13	13	0.22	4.62
1	16:09:00	00:23	23	0.38	2.61
1	16:10:00	00:29	29	0.48	2.07
1	16:11:00	00:36	36	0.60	1.67
1	16:12:00	00:40	40	0.67	1.50
1	16:13:00	00:42	42	0.70	1.43
1	16:14:00	00:48	48	0.80	1.25
1	16:14:00	00:48	48	0.80	1.25
1	16:15:00	00:46	46	0.77	1.30
1	16:16:00	00:46	46	0.77	1.30
1	16:17:00	00:52	52	0.87	1.15
1	16:18:00	00:45	45	0.75	1.33
1	16:19:00	00:40	40	0.67	1.50
1	16:20:00	00:53	53	0.88	1.13
1	16:21:00	00:49	49	0.82	1.22
1	16:22:00	00:49	49	0.82	1.22
1	16:24:00	00:50	50	0.83	1.20
1	16:25:00	00:49	49	0.82	1.22
1	16:26:00	00:50	50	0.83	1.20
1	16:27:00	00:58	58	0.97	1.03
1	16:28:00	01:05	65	1.08	0.92
1	16:29:00	00:53	53	0.88	1.13
1	16:30:00	01:00	60	1.00	1.00
1	16:31:00	01:01	61	1.02	0.98
1	16:32:00	01:01	61	1.02	0.98
1	16:33:00	00:55	55	0.92	1.09
1	16:34:00	01:04	64	1.07	0.94
1	16:34:00	00:31	31	0.52	1.94
1	16:35:00	00:40	40	0.67	1.50
1	16:36:00	00:54	54	0.90	1.11
1	16:37:00	01:02	62	1.03	0.97
1	16:39:00	-	0	0.00	0.00
1	16:42:00	-	0	0.00	0.00
1	16:43:00	01:03	63	1.05	0.95
1	16:45:00	01:01	61	1.02	0.98
1	16:46:00	01:11	71	1.18	0.85
1	16:47:00	01:05	65	1.08	0.92
1	16:48:00	00:59	59	0.98	1.02
1	16:49:00	00:55	55	0.92	1.09
1	16:50:00	01:04	64	1.07	0.94

1	16:52:00	01:08	68	1.13	0.88
1	16:53:00	01:00	60	1.00	1.00
1	16:54:00	01:03	63	1.05	0.95
1	16:55:00	-	0	0.00	0.00
1	16:56:00	00:23	23	0.38	2.61
1	16:57:00	01:02	62	1.03	0.97
1	16:58:00	00:34	34	0.57	1.76
1	16:59:00	00:55	55	0.92	1.09
1	17:00:00	00:49	49	0.82	1.22
1	17:01:00	00:52	52	0.87	1.15
1	17:02:00	00:54	54	0.90	1.11
1	17:03:00	01:05	65	1.08	0.92
1	17:04:00	01:06	66	1.10	0.91
1	17:05:00	01:02	62	1.03	0.97
1	17:07:00	01:01	61	1.02	0.98
1	17:08:00	01:01	61	1.02	0.98
1	17:09:00	01:17	77	1.28	0.78
1	17:10:00	00:48	48	0.80	1.25
1	17:11:00	00:50	50	0.83	1.20
1	17:12:00	01:01	61	1.02	0.98
1	17:13:00	01:07	67	1.12	0.90
1	17:14:00	01:13	73	1.22	0.82
1	17:15:00	01:06	66	1.10	0.91
1	17:16:00	01:01	61	1.02	0.98
1	17:17:00	00:42	42	0.70	1.43
1	17:18:00	01:02	62	1.03	0.97
1	17:20:00	01:21	81	1.35	0.74
1	17:21:00	01:00	60	1.00	1.00
1	17:22:00	01:21	81	1.35	0.74
1	17:23:00	00:58	58	0.97	1.03
1	17:24:00	00:53	53	0.88	1.13
1	17:25:00	01:01	61	1.02	0.98
1	17:26:00	00:37	37	0.62	1.62
1	17:28:00	01:31	91	1.52	0.66
1	17:30:00	01:09	69	1.15	0.87
1	17:31:00	01:21	81	1.35	0.74
1	17:32:00	01:05	65	1.08	0.92
1	17:33:00	01:07	67	1.12	0.90
1	17:35:00	-	0	0.00	0.00
1	17:36:00	-	0	0.00	0.00
1	17:38:00	00:45	45	0.75	1.33
1	17:39:00	00:42	42	0.70	1.43
1	17:41:00	00:44	44	0.73	1.36
1	17:43:00	01:05	65	1.08	0.92
1	17:44:00	01:08	68	1.13	0.88
1	17:45:00	00:55	55	0.92	1.09
1	17:46:00	01:04	64	1.07	0.94
1	17:47:00	01:01	61	1.02	0.98
1	17:48:00	00:47	47	0.78	1.28
1	17:49:00	01:00	78	1.30	0.77
1	17:50:00	01:00	60	1.00	1.00
1	17:51:00	01:05	65	1.08	0.92

1	17:52:00	01:04	64	1.07	0.94
1	17:53:00	00:57	57	0.95	1.05
1	17:55:00	00:51	51	0.85	1.18
1	17:56:00	00:57	57	0.95	1.05
1	17:57:00	01:01	61	1.02	0.98
1	17:58:00	01:11	71	1.18	0.85
1	18:00:00	00:42	42	0.70	1.43
1	18:02:00	01:28	88	1.47	0.68
1	18:03:00	01:08	68	1.13	0.88
1	18:04:00	01:07	67	1.12	0.90
1	18:06:00	01:08	68	1.13	0.88
1	18:08:00	01:03	63	1.05	0.95
1	18:10:00	01:06	66	1.10	0.91
1	18:11:00	01:02	62	1.03	0.97
1	18:12:00	00:58	58	0.97	1.03
1	18:12:00	01:02	62	1.03	0.97
1	18:14:00	01:29	89	1.48	0.67
1	18:16:00	01:06	66	1.10	0.91
1	18:18:00	01:01	61	1.02	0.98
1	18:20:00	01:05	65	1.08	0.92
1	18:22:00	01:04	64	1.07	0.94
1	18:24:00	01:11	71	1.18	0.85
1	18:25:00	01:03	63	1.05	0.95
1	18:26:00	01:08	68	1.13	0.88
1	18:27:00	01:12	72	1.20	0.83
1	18:29:00	01:15	75	1.25	0.80
1	18:30:00	01:08	68	1.13	0.88
1	18:31:00	01:06	66	1.10	0.91
1	18:32:00	01:06	66	1.10	0.91
1	18:34:00	01:08	68	1.13	0.88
1	18:35:00	00:53	53	0.88	1.13
1	18:36:00	01:13	73	1.22	0.82
1	18:37:00	00:44	44	0.73	1.36
1	18:39:00	01:13	73	1.22	0.82
1	18:40:00	00:44	44	0.73	1.36
1	18:42:00	00:49	49	0.82	1.22
1	18:44:00	00:51	51	0.85	1.18
1	18:45:00	00:56	56	0.93	1.07
1	18:46:00	00:58	58	0.97	1.03

PRUEBA DE BOMBEO PJ3-HG2
FASE DE RECUPERACIÓN (Sonda eléctrica)

Nombre del pozo/piezómetro:	PJ3-HG2 (artesiano)	Coordenadas UTM WGS-84:	
Tramo de filtro (m):	3.00 a 12.00	N: 8675700	E: 295036
Hora inicio:	18:47:10	Cota (msnm):	457
Hora final:	22:47:10	Nivel dinámico (m):	4.96
Litología del tramo:	Limo arcillas	Caudal promedio (m3/d):	1.912
Inclinación (°):	vertical		
Nivel estático (m):	-0.5		
Tiempo de bombeo (min):	158		
Tiempo total de prueba (min):	399		

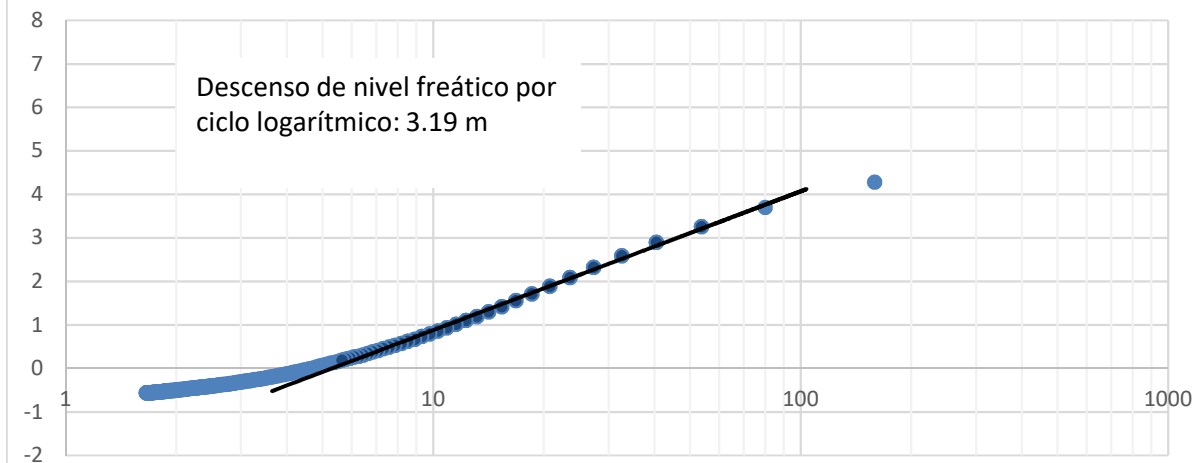
Hora	Tiempo (min)	$(T+T')/T'$ (min)	Recuperación del nivel de agua en el piezómetro (m)	Temperatura C°
	0		4.96	25
18:47:10	1	159.0	4.28	25
18:48:10	2	80.0	3.7	25
18:49:10	3	53.7	3.26	25
18:50:10	4	40.5	2.9	25
18:51:10	5	32.6	2.59	25
18:52:10	6	27.3	2.32	25
18:53:10	7	23.6	2.09	25
18:54:10	8	20.8	1.89	25
18:55:10	9	18.6	1.71	25
18:56:10	10	16.8	1.56	25
18:57:10	11	15.4	1.42	25
18:58:10	12	14.2	1.3	25
18:59:10	13	13.2	1.19	25
19:00:10	14	12.3	1.1	25
19:01:10	15	11.5	1.01	25
19:02:10	16	10.9	0.93	25
19:03:10	17	10.3	0.86	25
19:04:10	18	9.8	0.79	25
19:05:10	19	9.3	0.73	25
19:06:10	20	8.9	0.67	25
19:07:10	21	8.5	0.62	25
19:08:10	22	8.2	0.57	25
19:09:10	23	7.9	0.53	25
19:10:10	24	7.6	0.49	25
19:11:10	25	7.3	0.45	25
19:12:10	26	7.1	0.41	25
19:13:10	27	6.9	0.38	25
19:14:10	28	6.6	0.34	25
19:15:10	29	6.4	0.31	25
19:16:10	30	6.3	0.28	25
19:17:10	31	6.1	0.26	25
19:18:10	32	5.9	0.23	25
19:19:10	33	5.8	0.21	25
19:20:10	34	5.6	0.19	25
19:21:10	35	5.5	0.16	25
19:22:10	36	5.4	0.14	25

19:23:10	37	5.3	0.12	25
19:24:10	38	5.2	0.1	25
19:25:10	39	5.1	0.08	25
19:26:10	40	5.0	0.06	25
19:27:10	41	4.9	0.04	25
19:28:10	42	4.8	0.02	25
19:29:10	43	4.7	0	25
19:30:10	44	4.6	-0.01	25
19:31:10	45	4.5	-0.03	25
19:32:10	46	4.4	-0.04	25
19:33:10	47	4.4	-0.06	25
19:34:10	48	4.3	-0.07	25
19:35:10	49	4.2	-0.08	25
19:36:10	50	4.2	-0.09	25
19:37:10	51	4.1	-0.11	25
19:38:10	52	4.0	-0.12	25
19:39:10	53	4.0	-0.13	25
19:40:10	54	3.9	-0.14	25
19:41:10	55	3.9	-0.15	25
19:42:10	56	3.8	-0.16	25
19:43:10	57	3.8	-0.17	25
19:44:10	58	3.7	-0.18	25
19:45:10	59	3.7	-0.19	25
19:46:10	60	3.6	-0.2	25
19:47:10	61	3.6	-0.2	25
19:48:10	62	3.5	-0.21	25
19:49:10	63	3.5	-0.22	25
19:50:10	64	3.5	-0.23	25
19:51:10	65	3.4	-0.24	25
19:52:10	66	3.4	-0.24	25
19:53:10	67	3.4	-0.25	25
19:54:10	68	3.3	-0.25	25
19:55:10	69	3.3	-0.26	25
19:56:10	70	3.3	-0.26	25
19:57:10	71	3.2	-0.27	25
19:58:10	72	3.2	-0.28	25
19:59:10	73	3.2	-0.28	25
20:00:10	74	3.1	-0.29	25
20:01:10	75	3.1	-0.29	25
20:02:10	76	3.1	-0.3	25
20:03:10	77	3.1	-0.3	25
20:04:10	78	3.0	-0.31	25
20:05:10	79	3.0	-0.31	25
20:06:10	80	3.0	-0.32	25
20:07:10	81	3.0	-0.32	25
20:08:10	82	2.9	-0.33	25
20:09:10	83	2.9	-0.33	25
20:10:10	84	2.9	-0.34	25
20:11:10	85	2.9	-0.34	25
20:12:10	86	2.8	-0.35	25
20:13:10	87	2.8	-0.35	25
20:14:10	88	2.8	-0.35	25
20:15:10	89	2.8	-0.36	25
20:16:10	90	2.8	-0.36	25
20:17:10	91	2.7	-0.36	25

20:18:10	92	2.7	-0.37	25
20:19:10	93	2.7	-0.37	25
20:20:10	94	2.7	-0.37	25
20:21:10	95	2.7	-0.37	25
20:22:10	96	2.6	-0.38	25
20:23:10	97	2.6	-0.38	25
20:24:10	98	2.6	-0.38	25
20:25:10	99	2.6	-0.39	25
20:26:10	100	2.6	-0.39	25
20:27:10	101	2.6	-0.39	25
20:28:10	102	2.5	-0.4	25
20:29:10	103	2.5	-0.4	25
20:30:10	104	2.5	-0.4	25
20:31:10	105	2.5	-0.41	25
20:32:10	106	2.5	-0.41	25
20:33:10	107	2.5	-0.41	25
20:34:10	108	2.5	-0.41	25
20:35:10	109	2.4	-0.41	25
20:36:10	110	2.4	-0.42	25
20:37:10	111	2.4	-0.42	25
20:38:10	112	2.4	-0.42	25
20:39:10	113	2.4	-0.42	25
20:40:10	114	2.4	-0.43	25
20:41:10	115	2.4	-0.43	25
20:42:10	116	2.4	-0.43	25
20:43:10	117	2.4	-0.43	25
20:44:10	118	2.3	-0.43	25
20:45:10	119	2.3	-0.44	25
20:46:10	120	2.3	-0.44	25
20:47:10	121	2.3	-0.44	25
20:48:10	122	2.3	-0.44	25
20:49:10	123	2.3	-0.45	25
20:50:10	124	2.3	-0.45	25
20:51:10	125	2.3	-0.45	25
20:52:10	126	2.3	-0.45	25
20:53:10	127	2.2	-0.45	25
20:54:10	128	2.2	-0.45	25
20:55:10	129	2.2	-0.46	25
20:56:10	130	2.2	-0.46	25
20:57:10	131	2.2	-0.46	25
20:58:10	132	2.2	-0.46	25
20:59:10	133	2.2	-0.46	25
21:00:10	134	2.2	-0.46	25
21:01:10	135	2.2	-0.47	25
21:02:10	136	2.2	-0.47	25
21:03:10	137	2.2	-0.47	25
21:04:10	138	2.1	-0.47	25
21:05:10	139	2.1	-0.47	25
21:06:10	140	2.1	-0.48	25
21:07:10	141	2.1	-0.48	25
21:08:10	142	2.1	-0.48	25
21:09:10	143	2.1	-0.48	25
21:10:10	144	2.1	-0.48	25
21:11:10	145	2.1	-0.48	25
21:12:10	146	2.1	-0.48	25

21:13:10	147	2.1	-0.49	25
21:14:10	148	2.1	-0.49	25
21:15:10	149	2.1	-0.49	25
21:16:10	150	2.1	-0.49	25
21:17:10	151	2.0	-0.49	25
21:18:10	152	2.0	-0.49	25
21:19:10	153	2.0	-0.49	25
21:20:10	154	2.0	-0.49	25
21:21:10	155	2.0	-0.5	25
21:22:10	156	2.0	-0.5	25
21:23:10	157	2.0	-0.5	25
21:24:10	158	2.0	-0.5	25
21:25:10	159	2.0	-0.5	25
21:26:10	160	2.0	-0.5	25
21:27:10	161	2.0	-0.5	25
21:28:10	162	2.0	-0.5	25
21:29:10	163	2.0	-0.51	25
21:30:10	164	2.0	-0.51	25
21:31:10	165	2.0	-0.51	25
21:32:10	166	2.0	-0.51	25
21:33:10	167	1.9	-0.51	25
21:34:10	168	1.9	-0.51	25
21:35:10	169	1.9	-0.51	25
21:36:10	170	1.9	-0.51	25
21:37:10	171	1.9	-0.51	25
21:38:10	172	1.9	-0.51	25
21:39:10	173	1.9	-0.52	25
21:40:10	174	1.9	-0.52	25
21:41:10	175	1.9	-0.52	25
21:42:10	176	1.9	-0.52	25
21:43:10	177	1.9	-0.52	25
21:44:10	178	1.9	-0.52	25
21:45:10	179	1.9	-0.52	25
21:46:10	180	1.9	-0.52	25
21:47:10	181	1.9	-0.52	25
21:48:10	182	1.9	-0.52	25
21:49:10	183	1.9	-0.53	25
21:50:10	184	1.9	-0.53	25
21:51:10	185	1.9	-0.53	25
21:52:10	186	1.8	-0.53	25
21:53:10	187	1.8	-0.53	25
21:54:10	188	1.8	-0.53	25
21:55:10	189	1.8	-0.53	25
21:56:10	190	1.8	-0.53	25
21:57:10	191	1.8	-0.53	25
21:58:10	192	1.8	-0.54	25
21:59:10	193	1.8	-0.54	25
22:00:10	194	1.8	-0.5367	25
22:01:10	195	1.8	-0.5388	25
22:02:10	196	1.8	-0.5403	25
22:03:10	197	1.8	-0.5406	25
22:04:10	198	1.8	-0.5421	25
22:05:10	199	1.8	-0.5431	25
22:06:10	200	1.8	-0.544	25
22:07:10	201	1.8	-0.5446	25

22:08:10	202	1.8	-0.5451	25
22:09:10	203	1.8	-0.5465	25
22:10:10	204	1.8	-0.5465	25
22:11:10	205	1.8	-0.5473	25
22:12:10	206	1.8	-0.5488	25
22:13:10	207	1.8	-0.549	25
22:14:10	208	1.8	-0.5485	25
22:15:10	209	1.8	-0.55	25
22:16:10	210	1.8	-0.5506	25
22:17:10	211	1.7	-0.5515	25
22:18:10	212	1.7	-0.5513	25
22:19:10	213	1.7	-0.5536	25
22:20:10	214	1.7	-0.5536	25
22:21:10	215	1.7	-0.5535	25
22:22:10	216	1.7	-0.5539	25
22:23:10	217	1.7	-0.5547	25
22:24:10	218	1.7	-0.5551	25
22:25:10	219	1.7	-0.5563	25
22:26:10	220	1.7	-0.5566	25
22:27:10	221	1.7	-0.5582	25
22:28:10	222	1.7	-0.5585	25
22:29:10	223	1.7	-0.5589	25
22:30:10	224	1.7	-0.559	25
22:31:10	225	1.7	-0.5592	25
22:32:10	226	1.7	-0.5597	25
22:33:10	227	1.7	-0.5592	25
22:34:10	228	1.7	-0.5604	25
22:35:10	229	1.7	-0.5608	25
22:36:10	230	1.7	-0.5616	25
22:37:10	231	1.7	-0.5634	25
22:38:10	232	1.7	-0.5624	25
22:39:10	233	1.7	-0.5624	25
22:40:10	234	1.7	-0.5637	25
22:41:10	235	1.7	-0.5643	25
22:42:10	236	1.7	-0.5634	25
22:43:10	237	1.7	-0.565	25
22:44:10	238	1.7	-0.5639	25
22:45:10	239	1.7	-0.5649	25
22:46:10	240	1.7	-0.5646	25
22:47:10	241	1.7	-0.5653	25



MEDICIÓN DEL CAUDAL- PIEZÓMETRO PJ3-HG3

Tramo de Prueba (m): 3.00
 Bombeo con Waterra
 Nivel Estático (m): -0.25
 Sobrante (m): 1.06

Tiempo de bombeo (min): 38
 Caudal promedio (l/min): 1.096
 Caudal promedio (m3/d): 1.578

Litros	Hora	Tiempo (min:seg)	Tiempo (s)	Tiempo (min)	Caudal (l/min)
0	11:10:00				
1	11:11:00	00:39	39	0.65	1.54
1	11:11:00	00:40	40	0.67	1.50
1	11:12:00	00:45	45	0.75	1.33
1	11:13:00	00:48	48	0.80	1.25
1	11:14:00	00:50	50	0.83	1.20
1	11:15:00	01:01	61	1.02	0.98
1	11:16:00	00:58	58	0.97	1.03
1	11:17:00	00:40	40	0.67	1.50
1	11:17:00	00:52	52	0.87	1.15
1	11:18:00	00:40	40	0.67	1.50
1	11:19:00	00:48	48	0.80	1.25
1	11:21:00	00:55	55	0.92	1.09
1	11:22:00	00:48	48	0.80	1.25
1	11:23:00	01:02	62	1.03	0.97
1	11:24:00	00:56	56	0.93	1.07
1	11:25:00	01:08	68	1.13	0.88
1	11:27:00	01:12	72	1.20	0.83
1	11:28:00	01:02	62	1.03	0.97
1	11:29:00	01:09	69	1.15	0.87
1	11:31:00	01:02	62	1.03	0.97
1	11:33:00	00:58	58	0.97	1.03
1	11:34:00	01:03	63	1.05	0.95
1	11:35:00	00:58	58	0.97	1.03
1	11:37:00	01:10	70	1.17	0.86
1	11:38:00	01:02	62	1.03	0.97
1	11:39:00	00:58	58	0.97	1.03
1	11:41:00	00:48	48	0.80	1.25
1	11:43:00	01:02	62	1.03	0.97
1	11:45:00	01:12	72	1.20	0.83
1	11:47:00	01:05	65	1.08	0.92
1	11:48:00	01:02	62	1.03	0.97

PRUEBA DE BOMBEO PJ3-HG3
FASE DE RECUPERACIÓN (Levellogger)

Nombre del pozo/piezómetro:	PJ3-HG3 (surgente)	Coordenadas UTM WGS-84:	
Tramo de filtro (m):	3.00 a 6.00	N: 8675652	E: 295024
Hora inicio:	11:49:04		
Hora final:	15:02:04	Cota (msnm):	457
Litología del tramo:	Limo arcillas	Nivel dinámico (m):	2.94
Inclinación (°):	vertical	Caudal promedio (m3/d):	1.578
Nivel estático (m):	-0.25		
Tiempo de bombeo (min):	38		
Tiempo total de prueba (min):	233		

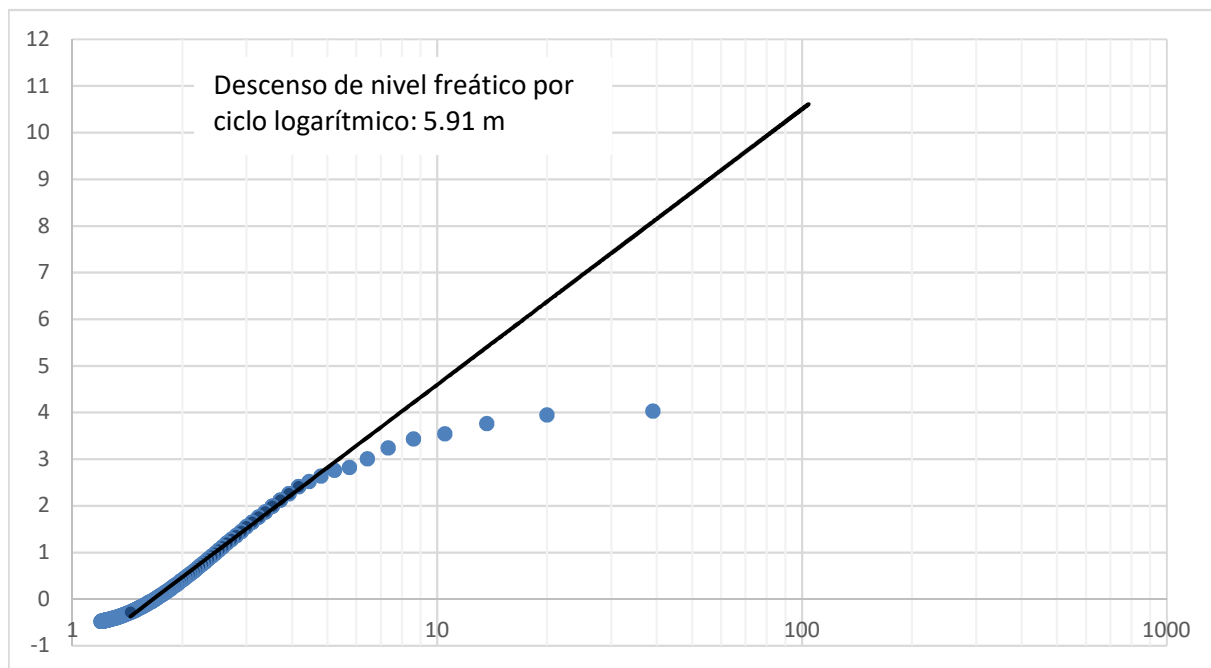
Hora	Tiempo (min)	(T+T')/T' (min)	Recuperación del nivel de agua en el piezómetro (m)	Temperatura C°
11:49:04	0		4.6	24.5
11:50:04	1	39.00	4.03	24.4
11:51:04	2	20.00	3.95	24.4
11:52:04	3	13.67	3.76	24.4
11:53:04	4	10.50	3.54	24.4
11:54:04	5	8.60	3.43	24.4
11:55:04	6	7.33	3.24	24.4
11:56:04	7	6.43	3.01	24.4
11:57:04	8	5.75	2.82	24.4
11:58:04	9	5.22	2.76	24.4
11:59:04	10	4.80	2.64	24.4
12:00:04	11	4.45	2.52	24.4
12:01:04	12	4.17	2.41	24.4
12:02:04	13	3.92	2.26	24.4
12:03:04	14	3.71	2.12	24.4
12:04:04	15	3.53	1.99	24.4
12:05:04	16	3.38	1.87	24.4
12:06:04	17	3.24	1.76	24.4
12:07:04	18	3.11	1.65	24.4
12:08:04	19	3.00	1.55	24.4
12:09:04	20	2.90	1.45	24.4
12:10:04	21	2.81	1.36	24.4
12:11:04	22	2.73	1.28	24.4
12:12:04	23	2.65	1.2	24.4
12:13:04	24	2.58	1.12	24.4
12:14:04	25	2.52	1.05	24.4
12:15:04	26	2.46	0.98	24.4
12:16:04	27	2.41	0.92	24.4
12:17:04	28	2.36	0.86	24.4
12:18:04	29	2.31	0.8	24.4
12:19:04	30	2.27	0.75	24.4
12:20:04	31	2.23	0.7	24.4
12:21:04	32	2.19	0.65	24.4
12:22:04	33	2.15	0.6	24.4

12:23:04	34	2.12	0.56	24.4
12:24:04	35	2.09	0.52	24.4
12:25:04	36	2.06	0.48	24.4
12:26:04	37	2.03	0.44	24.4
12:27:04	38	2.00	0.41	24.4
12:28:04	39	1.97	0.38	24.4
12:29:04	40	1.95	0.34	24.4
12:30:04	41	1.93	0.31	24.4
12:31:04	42	1.90	0.29	24.4
12:32:04	43	1.88	0.26	24.4
12:33:04	44	1.86	0.23	24.4
12:34:04	45	1.84	0.21	24.4
12:35:04	46	1.83	0.18	24.4
12:36:04	47	1.81	0.16	24.4
12:37:04	48	1.79	0.14	24.4
12:38:04	49	1.78	0.12	24.4
12:39:04	50	1.76	0.1	24.4
12:40:04	51	1.75	0.08	24.4
12:41:04	52	1.73	0.06	24.4
12:42:04	53	1.72	0.04	24.4
12:43:04	54	1.70	0.02	24.4
12:44:04	55	1.69	0.01	24.4
12:45:04	56	1.68	-0.01	24.4
12:46:04	57	1.67	-0.02	24.4
12:47:04	58	1.66	-0.04	24.4
12:48:04	59	1.64	-0.05	24.4
12:49:04	60	1.63	-0.06	24.4
12:50:04	61	1.62	-0.07	24.4
12:51:04	62	1.61	-0.09	24.4
12:52:04	63	1.60	-0.1	24.4
12:53:04	64	1.59	-0.11	24.4
12:54:04	65	1.58	-0.12	24.4
12:55:04	66	1.58	-0.13	24.4
12:56:04	67	1.57	-0.14	24.4
12:57:04	68	1.56	-0.15	24.4
12:58:04	69	1.55	-0.16	24.4
12:59:04	70	1.54	-0.17	24.4
13:00:04	71	1.54	-0.18	24.4
13:01:04	72	1.53	-0.19	24.4
13:02:04	73	1.52	-0.19	24.4
13:03:04	74	1.51	-0.2	24.4
13:04:04	75	1.51	-0.21	24.4
13:05:04	76	1.50	-0.22	24.4
13:06:04	77	1.49	-0.23	24.4
13:07:04	78	1.49	-0.23	24.4
13:08:04	79	1.48	-0.24	24.4
13:09:04	80	1.48	-0.25	24.4
13:10:04	81	1.47	-0.25	24.4
13:11:04	82	1.46	-0.26	24.4
13:12:04	83	1.46	-0.26	24.4

13:13:04	84	1.45	-0.27	24.4
13:14:04	85	1.45	-0.27	24.4
13:15:04	86	1.44	-0.28	24.4
13:16:04	87	1.44	-0.29	24.4
13:17:04	88	1.43	-0.29	24.4
13:18:04	89	1.43	-0.3	24.4
13:19:04	90	1.42	-0.3	24.4
13:20:04	91	1.42	-0.3	24.4
13:21:04	92	1.41	-0.31	24.4
13:22:04	93	1.41	-0.31	24.4
13:23:04	94	1.40	-0.32	24.4
13:24:04	95	1.40	-0.32	24.4
13:25:04	96	1.40	-0.33	24.4
13:26:04	97	1.39	-0.33	24.4
13:27:04	98	1.39	-0.33	24.4
13:28:04	99	1.38	-0.34	24.4
13:29:04	100	1.38	-0.34	24.4
13:30:04	101	1.38	-0.34	24.4
13:31:04	102	1.37	-0.35	24.4
13:32:04	103	1.37	-0.35	24.4
13:33:04	104	1.37	-0.35	24.4
13:34:04	105	1.36	-0.36	24.4
13:35:04	106	1.36	-0.36	24.4
13:36:04	107	1.36	-0.36	24.4
13:37:04	108	1.35	-0.37	24.4
13:38:04	109	1.35	-0.37	24.4
13:39:04	110	1.35	-0.37	24.4
13:40:04	111	1.34	-0.37	24.4
13:41:04	112	1.34	-0.38	24.4
13:42:04	113	1.34	-0.38	24.4
13:43:04	114	1.33	-0.38	24.4
13:44:04	115	1.33	-0.38	24.4
13:45:04	116	1.33	-0.39	24.4
13:46:04	117	1.32	-0.39	24.4
13:47:04	118	1.32	-0.39	24.4
13:48:04	119	1.32	-0.39	24.4
13:49:04	120	1.32	-0.39	24.4
13:50:04	121	1.31	-0.4	24.4
13:51:04	122	1.31	-0.4	24.4
13:52:04	123	1.31	-0.4	24.4
13:53:04	124	1.31	-0.4	24.4
13:54:04	125	1.30	-0.4	24.4
13:55:04	126	1.30	-0.41	24.4
13:56:04	127	1.30	-0.41	24.4
13:57:04	128	1.30	-0.41	24.4
13:58:04	129	1.29	-0.41	24.4
13:59:04	130	1.29	-0.41	24.4
14:00:04	131	1.29	-0.42	24.4
14:01:04	132	1.29	-0.42	24.4
14:02:04	133	1.29	-0.42	24.4

14:03:04	134	1.28	-0.42	24.4
14:04:04	135	1.28	-0.42	24.4
14:05:04	136	1.28	-0.42	24.4
14:06:04	137	1.28	-0.43	24.4
14:07:04	138	1.28	-0.43	24.4
14:08:04	139	1.27	-0.43	24.4
14:09:04	140	1.27	-0.43	24.4
14:10:04	141	1.27	-0.43	24.4
14:11:04	142	1.27	-0.43	24.4
14:12:04	143	1.27	-0.43	24.4
14:13:04	144	1.26	-0.44	24.4
14:14:04	145	1.26	-0.44	24.4
14:15:04	146	1.26	-0.44	24.4
14:16:04	147	1.26	-0.44	24.4
14:17:04	148	1.26	-0.44	24.4
14:18:04	149	1.26	-0.44	24.4
14:19:04	150	1.25	-0.44	24.4
14:20:04	151	1.25	-0.44	24.4
14:21:04	152	1.25	-0.45	24.4
14:22:04	153	1.25	-0.45	24.4
14:23:04	154	1.25	-0.45	24.4
14:24:04	155	1.25	-0.45	24.4
14:25:04	156	1.24	-0.45	24.4
14:26:04	157	1.24	-0.45	24.4
14:27:04	158	1.24	-0.45	24.4
14:28:04	159	1.24	-0.45	24.4
14:29:04	160	1.24	-0.45	24.4
14:30:04	161	1.24	-0.45	24.4
14:31:04	162	1.23	-0.45	24.4
14:32:04	163	1.23	-0.45	24.4
14:33:04	164	1.23	-0.46	24.4
14:34:04	165	1.23	-0.46	24.4
14:35:04	166	1.23	-0.46	24.4
14:36:04	167	1.23	-0.46	24.4
14:37:04	168	1.23	-0.46	24.4
14:38:04	169	1.22	-0.46	24.4
14:39:04	170	1.22	-0.46	24.4
14:40:04	171	1.22	-0.46	24.4
14:41:04	172	1.22	-0.46	24.4
14:42:04	173	1.22	-0.46	24.4
14:43:04	174	1.22	-0.46	24.4
14:44:04	175	1.22	-0.47	24.4
14:45:04	176	1.22	-0.47	24.4
14:46:04	177	1.21	-0.47	24.4
14:47:04	178	1.21	-0.47	24.4
14:48:04	179	1.21	-0.47	24.4
14:49:04	180	1.21	-0.47	24.4
14:50:04	181	1.21	-0.47	24.4
14:51:04	182	1.21	-0.47	24.4
14:52:04	183	1.21	-0.47	24.4

14:53:04	184	1.21	-0.47	24.4
14:54:04	185	1.21	-0.47	24.4
14:55:04	186	1.20	-0.47	24.4
14:56:04	187	1.20	-0.47	24.4
14:57:04	188	1.20	-0.48	24.4
14:58:04	189	1.20	-0.48	24.4
14:59:04	190	1.20	-0.48	24.4
15:00:04	191	1.20	-0.48	24.4
15:01:04	192	1.20	-0.48	24.4
15:02:04	193	1.20	-0.48	24.4



ANEXO 7: ENSAYOS DE LABORATORIO


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Email: mecanicadesuelos_unalm@lamolina.edu.pe Apdo. 456 - La Molina, Lima - Perú
 Telefax: 349-5679

LABORATORIO MECANICA DE SUELOS
 DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES
INFORME DCR-LMS 370/2014
NTP 339.139

SOLICITANTE : HYDRO-GEO CONSULTORES SAC

PROYECTO : Diseño del Sistema de Extracción de Jarosita para el Cierre del Depósito No 3 en la Refinería de Cajamarquilla

UBICACIÓN : Cajamarquilla

FECHA : 29 de diciembre de 2014



MUESTRA	PROF. (m)	PESO VOLUMETRICO DE SUELO COHESIVO (gr/cm³)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
PJ3-HG1	1.50-2.00m	1.010	65.09

Tec: FMQ



Ing. Hermes Valdivia Aspilcueta
 Jefe Lab. Mec. de Suelos


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Email: mecanicadesuelos_unalm@lamolina.edu.pe Apdo. 456 - La Molina, Lima - Perú
 Telefax: 349-5679

LABORATORIO MECANICA DE SUELOS
 DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES
INFORME DCR-LMS 370/2014
NTP 339.139

SOLICITANTE : HYDRO-GEO CONSULTORES SAC

PROYECTO : Diseño del Sistema de Extracción de Jarosita para el Cierre del Depósito Número No 3 en la Refinería de Cajamarquilla

UBICACIÓN : Cajamarquilla

FECHA : 29 de diciembre de 2014

MUESTRA	PROF. (m)	PESO VOLUMETRICO DE SUELO COHESIVO (gr/cm ³)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
PJ3-HG1	7.50-8.00	1.050	51.49

Tec: FMQ



Ing. Hermes Valdivia Aspilcueta
 Jefe Lab. Mec. de Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

DCR - 370/2014

Solicitante : HYDRO-GEO CONSULTORES SAC

Calicata : PJ3 - HG 1

Proyecto : Diseño del sistema de Extracción de Jarosita para el Cierre del Deposito No 3 de la Refeneria de Cajamarquilla

Muestra : MAB

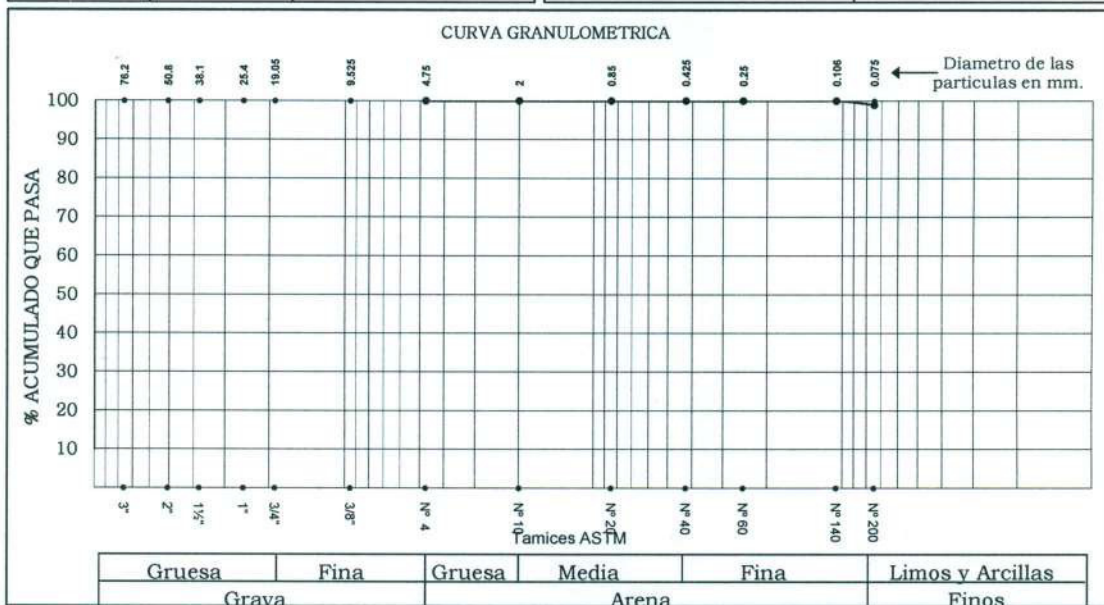
Ubicación : Cajamarquilla

Profundidad : 2.02-3.00m

Fecha : La Molina, 29 de diciembre de 2014

TEC. : FMQ

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	Limite liquido (%)	24.21
3"	76.20		Limite plastico (%)	22.94
2"	50.80		Indice plastico (%)	1.27
1 1/2"	38.10		Limite de contraccion (%)	-
1"	25.40		Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282	
3/4"	19.05		<u>Coefficiente de:</u>	
3/8"	9.525		-Uniformidad	
Nº 4	4.750	100	-Curvatura	
Nº 10	2.000	100	<u>Material:</u>	
Nº 20	0.850	100	-Grava %	0
Nº 40	0.425	100	-Arena %	1
Nº 60	0.250	100	-Finos %	99
Nº 140	0.106	100	<u>Clasificación:</u>	
Nº 200	0.075	99	-AASHTO	
			-SUCS ML	
			Nombre de grupo:	
			CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216	
			Humedad natural (%)	22.92



NOTA: La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.





UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

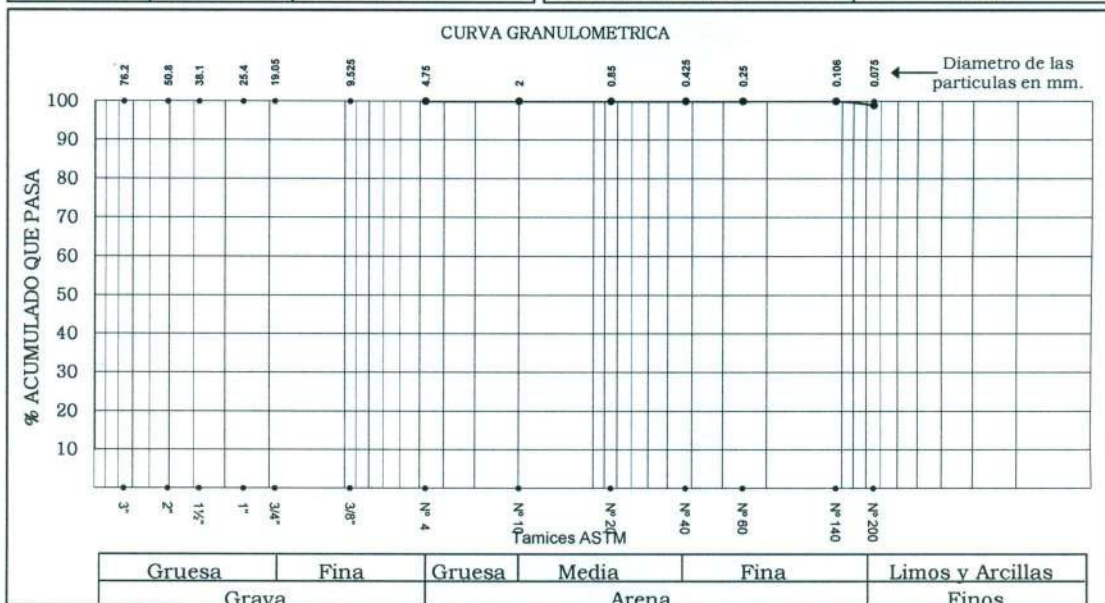
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

DCR - 370/2014

Solicitante : HYDRO-GEO CONSULTORES SAC Calicata : PJ3 - HG 1
 Proyecto : Diseño del sistema de Extracción de Jarosita para el Cierre del Deposito No 3 de la Refinería de Cajamarquilla Muestra : MAB
 Ubicación : Cajamarquilla Profundidad : 4.00-5.00m
 Fecha : La Molina, 29 de diciembre de 2014 TEC. : FMQ

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	Limite liquido (%)	24.83
3"	76.20		Limite plastico (%)	22.34
2"	50.80		Indice plastico (%)	2.49
1 1/2"	38.10		Limite de contraccion (%)	-
1"	25.40		Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282	
3/4"	19.05		<u>Coefficiente de:</u>	
3/8"	9.525		-Uniformidad	
Nº 4	4.750	100	-Curvatura	
Nº 10	2.000	100	<u>Material:</u>	
Nº 20	0.850	100	-Grava %	0
Nº 40	0.425	100	-Arena %	1
Nº 60	0.250	100	-Finos %	99
Nº 140	0.106	100	<u>Clasificación:</u>	
Nº 200	0.075	99	-AASHTO	
			-SUCS	ML
			Nombre de grupo:	
			CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216	
			Humedad natural (%)	71.30



NOTA: La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

Ing. Hermes Valdivia Aspigueta
 Jefe del Lab. De Mec. De Suelos
 DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

DCR - 370/2014

Solicitante : HYDRO-GEO CONSULTORES SAC

Calicata : PJ3 - HG 1

Proyecto : Diseño del sistema de Extracción de Jarosita para el Cierre del Depósito No 3 de la Refinería de Cajamarquilla

Muestra : MAB

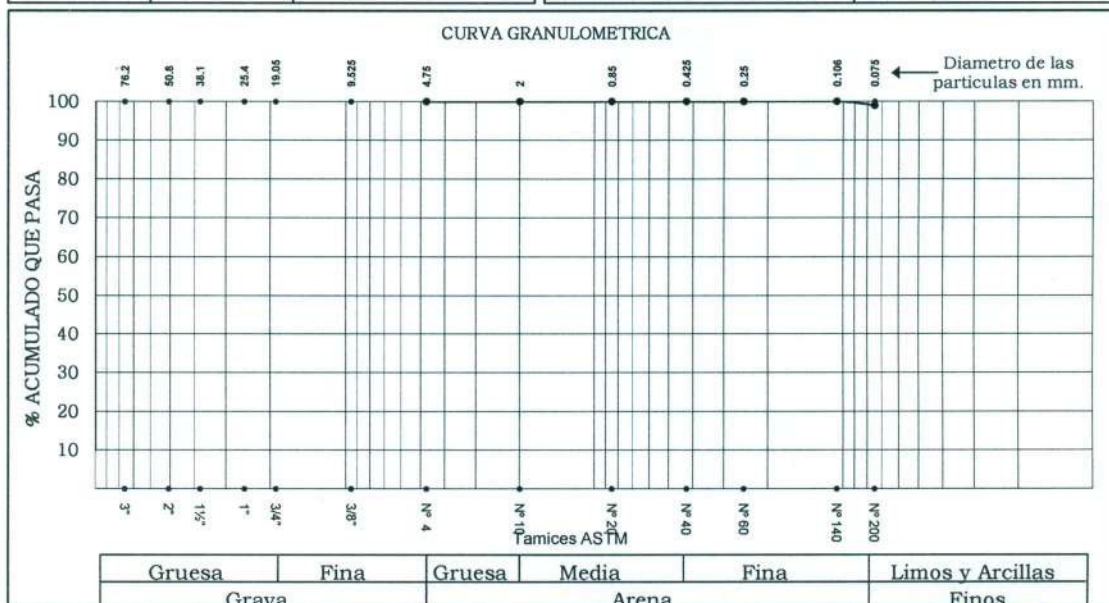
Ubicación : Cajamarquilla

Profundidad : 6.50-7.50m

Fecha : La Molina, 29 de diciembre de 2014

TEC. : FMQ

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	Limite liquido (%)	30.89
3"	76.20		Limite plastico (%)	20.61
2"	50.80		Indice plastico (%)	10.28
1 1/2"	38.10		Limite de contraccion (%)	-
1"	25.40		Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282	
3/4"	19.05		<u>Coefficiente de:</u>	
3/8"	9.525		-Uniformidad	
Nº 4	4.750	100	-Curvatura	
Nº 10	2.000	100	<u>Material:</u>	
Nº 20	0.850	100	-Grava %	0
Nº 40	0.425	100	-Arena %	1
Nº 60	0.250	100	-Finos %	99
Nº 140	0.106	100	<u>Clasificación:</u>	
Nº 200	0.075	99	-AASHTO	
			-SUCS	CL
			Nombre de grupo:	
			CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216	
			Humedad natural (%)	43.86



NOTA: La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

Ing. Hermes Valdivia Aspilcueta
Jefe del Lab. De Mec. De Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

DCR - 370/2014

Solicitante : HYDRO-GEO CONSULTORES SAC

Calicata : PJ3 - HG 1

Proyecto : Diseño del sistema de Extracción de Jarosita para el Cierre del Deposito No 3 de la Refeneria de Cajamarquilla

Muestra : MAB

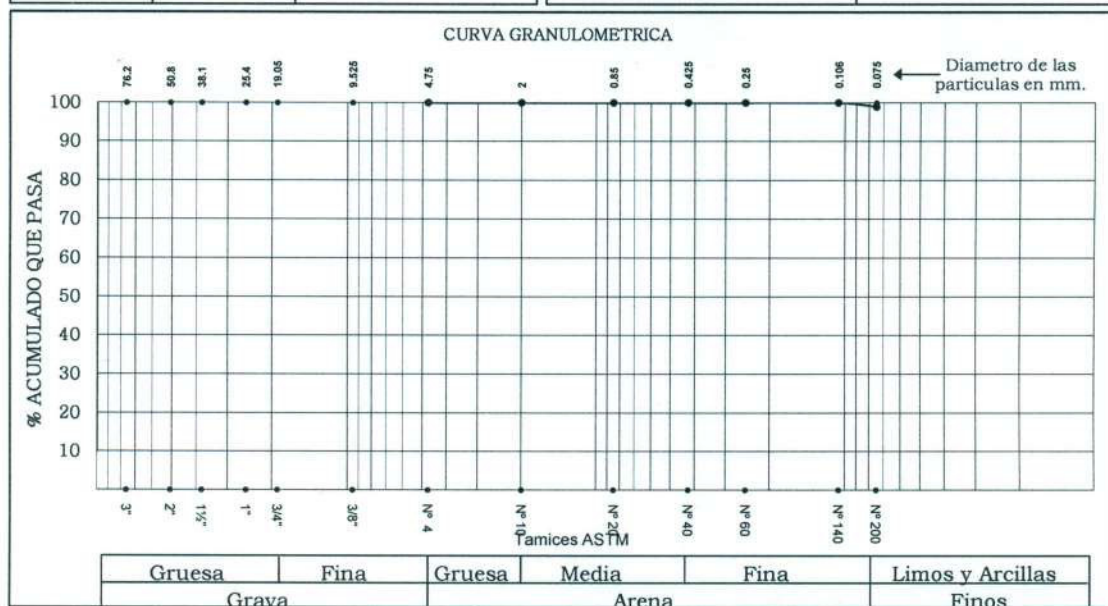
Ubicación : Cajamarquilla

Profundidad : 8.00-9.00m

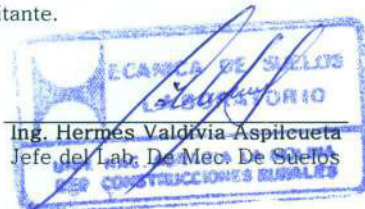
Fecha : La Molina, 29 de diciembre de 2014

TEC. : FMQ

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	Limite liquido (%)	34.2
3"	76.20		Limite plastico (%)	20.4
2"	50.80		Indice plastico (%)	13.8
1 1/2"	38.10		Limite de contraccion (%)	-
1"	25.40		Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282	
3/4"	19.05		<u>Coefficiente de:</u>	
3/8"	9.525		-Uniformidad	
Nº 4	4.750	100	-Curvatura	
Nº 10	2.000	100	<u>Material:</u>	
Nº 20	0.850	100	-Grava %	0
Nº 40	0.425	100	-Arena %	1
Nº 60	0.250	100	-Finos %	99
Nº 140	0.106	100	<u>Clasificacion:</u>	
Nº 200	0.075	99	-AASHTO	
			-SUCS	CL
			Nombre de grupo:	
			CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216	
			Humedad natural (%)	71.00



NOTA: La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.





UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO MECANICA DE SUELOS

INFORME DCR-LMS

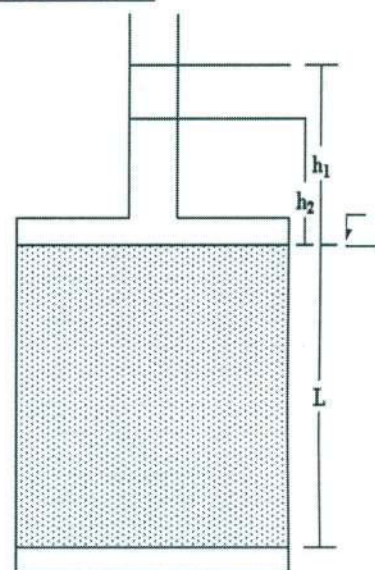
370/2014

SOLICITANTE	:	HYDRO-GEO CONSULTORES SAC
PROYECTO	:	Diseño del Sistema de Extracción de Jarosita para el Cierre del Depósito No 3 en la Refinería de Cajamarquilla
UBICACIÓN	:	Cajamarquilla
MUESTRA	:	PJ3 - HG 1
PROFUNDIDAD	:	2.02-3.00m
FECHA	:	La Molina, 29 de diciembre de 2014



ENSAYO DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE

Fecha de Ensayo	:	29-12-14
Lect. Inicial	:	1.800 cm
Lect. Final	:	1.604 cm
Tiempo	:	2640 seg
Diametro de muestra:	:	10.16 cm
Altura de muestra:	:	6.50 cm
Densidad Seca	:	1.29 gr/cm ³
Humedad Natural	:	45.79%



$$K_{20} = 2.303 \times \frac{a}{A} \times \frac{L}{t} \times \log \left[\frac{h_1}{h_2} \right] \times R_t$$

$$k_{20} = 1.1980 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$$

Observación : Especimen remoldeado a densidad proporcionado por Solicitante

FMQ
Tec. Mec. De Suelos

Ing. Hermes A. Valdivia A.
 Jefe Lab. Mecánica de Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO MECANICA DE SUELOS

INFORME DCR-LMS

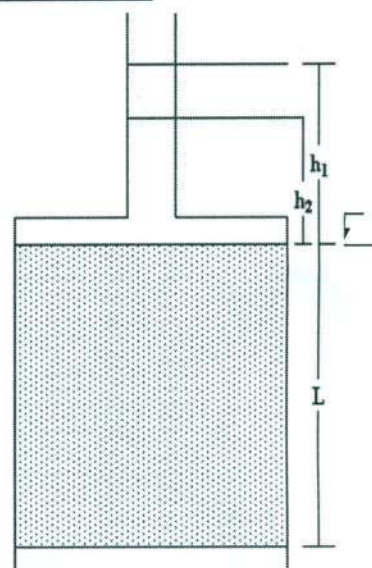
370/2014

SOLICITANTE	:	HYDRO-GEO CONSULTORES SAC
PROYECTO	:	Diseño del Sistema de Extracción de Jarosita para el Cierre del Depósito No 3 en la Refinería de Cajamarquilla
UBICACIÓN	:	Cajamarquilla
MUESTRA	:	PJ3 - HG 1
PROFUNDIDAD	:	4.00-5.00m
FECHA	:	La Molina, 29 de diciembre de 2014



ENSAYO DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE

Fecha de Ensayo	:	29-12-14
Lect. Inicial	:	1.800 cm
Lect. Final	:	1.725 cm
Tiempo	:	1680 seg
Diametro de muestra:	:	10.16 cm
Altura de muestra:	:	10.16 cm
Densidad Seca :	:	1.14 gr/cm ³
Humedad Natural :	:	56.64%



$$K_{20} = 2.303 \times \frac{a}{A} \times \frac{L}{t} \times \log \left[\frac{h_1}{h_2} \right] \times Rt$$

$$k_{20} = 1.0863 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$$

Observación : Especimen remoldeado a densidad proporcionado por Solicitante

FMQ
Tec. Mec. De Suelos

Ing. Hermes A. Valdivia A.
 Jefe Lab. Mecánica de Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO MECANICA DE SUELOS

INFORME DCR-LMS

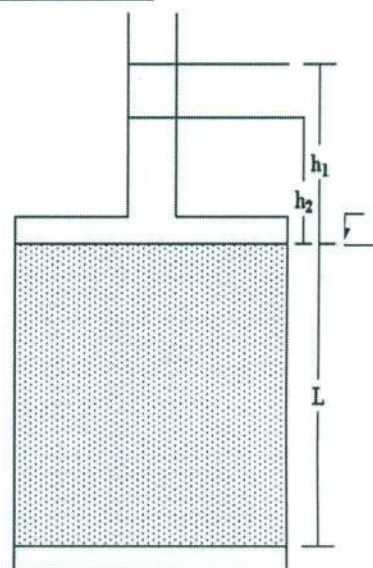
370/2014

SOLICITANTE	:	HYDRO-GEO CONSULTORES SAC
PROYECTO	:	Diseño del Sistema de Extracción de Jarosita para el Cierre del Depósito No 3 en la Refinería de Cajamarquilla
UBICACIÓN	:	Cajamarquilla
MUESTRA	:	PJ3 - HG 1
PROFUNDIDAD	:	6.50-7.50m
FECHA	:	La Molina, 29 de diciembre de 2014



ENSAYO DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE

Fecha de Ensayo	:	29-12-14
Lect. Inicial	:	1.800 cm
Lect. Final	:	1.670 cm
Tiempo	:	1440 seg
Diametro de muestra:	:	10.16 cm
Altura de muestra:	:	10.16 cm
Densidad Seca :	:	1.03 gr/cm ³
Humedad Natural	:	69.54%



$$K_{20} = 2.303 \times \frac{a}{A} \times \frac{L}{t} \times \log \left[\frac{h_1}{h_2} \right] \times Rt$$

$$k_{20} = 2.2323 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$$

Observación : Especimen remoldeado a densidad proporcionado por Solicitante

FMQ
Tec. Mec. De Suelos

Ing. Hermes A. Valdivia A.
 Jefe Lab. Mecánica de Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO MECANICA DE SUELOS

INFORME DCR-LMS

370/2014

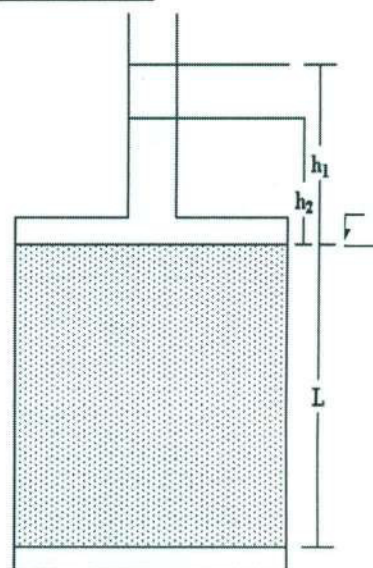
SOLICITANTE	:	HYDRO-GEO CONSULTORES SAC
PROYECTO	:	Diseño del Sistema de Extracción de Jarosita para el Cierre del Depósito No 3 en la Refinería de Cajamarquilla
UBICACIÓN	:	Cajamarquilla
MUESTRA	:	PJ3 - HG 1
PROFUNDIDAD	:	8.00-9.00m
FECHA	:	La Molina, 29 de diciembre de 2014



ENSAYO DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE

Fecha de Ensayo	:	29-12-14
Lect. Inicial	:	1.800 cm
Lect. Final	:	1.567 cm
Tiempo	:	1680 seg
Diametro de muestra:		10.16 cm
Altura de muestra:		10.16 cm
Densidad Seca :		1.04 gr/cm ³
Humedad Natural	:	71.08%

$$K_{20} = 2.303 \times \frac{a}{A} \times \frac{L}{t} \times \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \times R_t$$



$$k_{20} = 3.5383 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$$

Observación : Especimen remoldeado a densidad proporcionado por Solicitante

FMQ
Tec. Mec. De Suelos

MECANICA DE SUELOS
LABORATORIO
Ing. Hermes A. Valdivia A.
Jefe Lab. Mecánica de Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO MECANICA DE SUELOS

INFORME DCR-LMS

373/2014

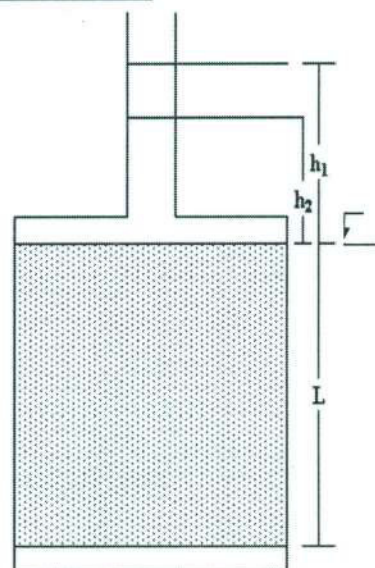
SOLICITANTE	:	HYDRO-GEO CONSULTORES SAC
PROYECTO	:	Diseño del Sistema de Extracción de Jarosita para el Cierre del Depósito No 3 en La Refinería de Cajamarquilla
UBICACIÓN	:	Cajamarquilla
MUESTRA	:	PJ3 - HG 2
PROFUNDIDAD	:	4.80-10.00m
FECHA	:	La Molina, 29 de diciembre de 2014

ENSAYO DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE

Fecha de Ensayo	:	29-12-14
Lect. Inicial	:	1.800 cm
Lect. Final	:	1.640 cm
Tiempo	:	1320 seg
Diametro de muestra:	:	10.16 cm
Altura de muestra:	:	10.16 cm
Densidad Seca	:	1.39 gr/cm ³
Humedad	:	27.39%

$$K_{20} = 2.303 \times \frac{a}{A} \times \frac{L}{t} \times \log \left[\frac{h_1}{h_2} \right] \times Rt$$

$$k_{20} = 3.0242 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$$



Observación : Especimen remoldeado a densidad proporcionado por Solicitante

FMQ
Tec. Mec. De Suelos

Ing. Hermes A. Valdivia A.
 Jefe Lab. Mecánica de Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO MECANICA DE SUELOS

INFORME DCR-LMS

373/2014

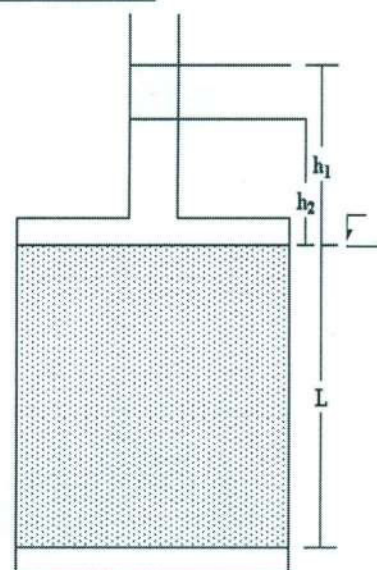
SOLICITANTE	:	HYDRO-GEO CONSULTORES SAC
PROYECTO	:	Diseño del Sistema de Extracción de Jarosita para el Cierre del Depósito No 3 en La Refinería de Cajamarquilla
UBICACIÓN	:	Cajamarquilla
MUESTRA	:	PJ3 - HG 2
PROFUNDIDAD	:	6.00-8.50m
FECHA	:	La Molina, 29 de diciembre de 2014

ENSAYO DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE

Fecha de Ensayo	:	29-12-14
Lect. Inicial	:	1.800 cm
Lect. Final	:	1.640 cm
Tiempo	:	1320 seg
Diametro de muestra:	:	10.16 cm
Altura de muestra:	:	10.16 cm
Densidad Seca :	:	1.01 gr/cm ³
Humedad :	:	84.35%

$$K_{20} = 2.303 \times \frac{a}{A} \times \frac{L}{t} \times \log \left[\frac{h_1}{h_2} \right] \times Rt$$

$$k_{20} = 3.0242 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$$



Observación : Especimen remoldeado a densidad proporcionado por Solicitante

FMQ
Tec. Mec. De Suelos

Ing. Hermes A. Valdivia A.
 Jefe Lab. Mecánica de Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO MECANICA DE SUELOS

INFORME DCR-LMS

373/2014

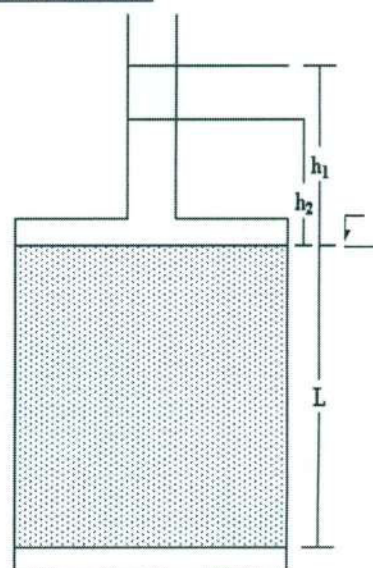
SOLICITANTE	:	HYDRO-GEO CONSULTORES SAC
PROYECTO	:	Diseño del sistema de Extracción de Jarosita para el cierre del Depósito N° 3 en La Refinería de Cajamarquilla
UBICACIÓN	:	Cajamarquilla
MUESTRA	:	PJ3 - HG 2
PROFUNDIDAD	:	10.00-12.00m
FECHA	:	La Molina, 29 de diciembre de 2014

ENSAYO DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE

Fecha de Ensayo	:	29-12-14
Lect. Inicial	:	1.800 cm
Lect. Final	:	1.600 cm
Tiempo	:	489 seg
Diametro de muestra:		10.16 cm
Altura de muestra:		10.16 cm
Densidad Seca :		1.39 gr/cm ³
Humedad :		42.74%

$$K_{20} = 2.303 \times \frac{a}{A} \times \frac{L}{t} \times \log \left[\frac{h_1}{h_2} \right] \times Rt$$

$$k_{20} = 1.0329 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$



Observación : Especimen remoldeado a densidad proporcionado por Solicitante

FMQ
Tec. Mec. De Suelos

MECANICA DE SUELOS
LABORATORIO
Ing. Hermes A. Valdivia A.
Jefe Lab. Mecánica de Suelos


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Email: mecanicadesuelos_unalm@lamolina.edu.pe Apdo. 456 - La Molina, Lima - Perú
 Telefax: 349-5679

LABORATORIO MECANICA DE SUELOS
 DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES
INFORME DCR-LMS 373/2014
NTP 339.139

SOLICITANTE : HYDRO-GEO CONSULTORES SAC

PROYECTO : Extraccion de Jarosita para el Cierre del Deposito No 3 en la Refineria de Cajamarquilla

UBICACIÓN : Cajamarquilla

FECHA : 29 de diciembre de 2014



MUESTRA	PROF. (m)	PESO VOLUMETRICO DE SUELO COHESIVO (gr/cm ³)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
PJ3-HG2	8.00-8.50	1.270	40.85

Tec: FMQ

Ing. Hermes Valdivia Asplicueta
 Jefe Lab. Mec. de Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

DCR - 373/2014

Solicitante : HYDRO-GEO CONSULTORES SAC

Calicata : PJ3 - HG 2

Proyecto : Diseño del sistema de Extracción de Jarosita para el Cierre del Deposito No 3 de la Refeneria de Cajamarquilla

Muestra : MAB

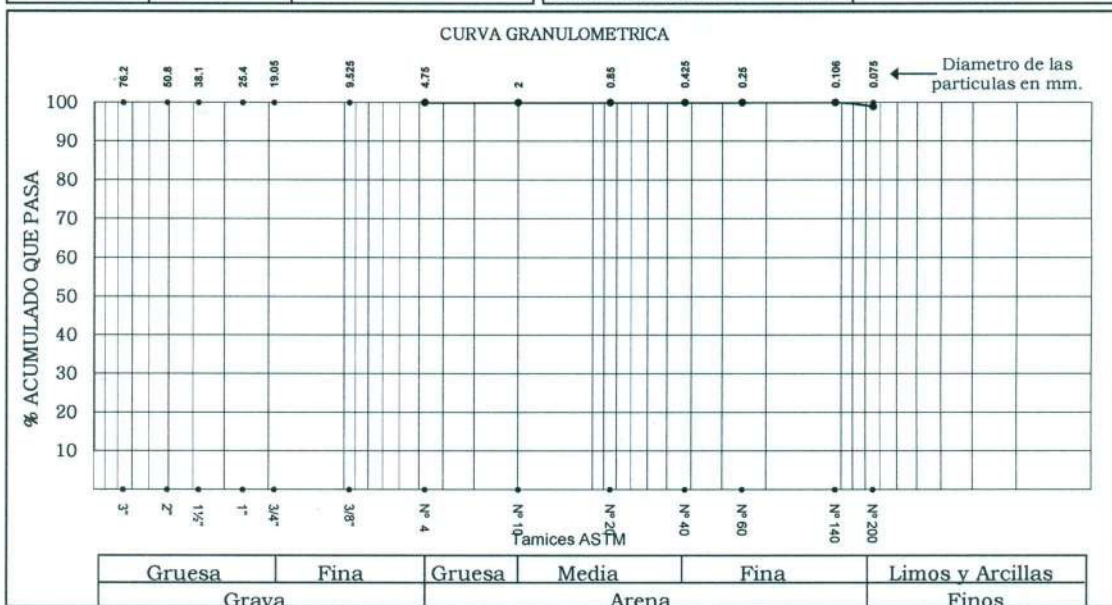
Ubicación : Cajamarquilla

Profundidad : 10.00-12.00m

Fecha : La Molina, 29 de diciembre de 2014

TEC. : FMQ

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	Limite liquido (%)	29.36
			Limite plastico (%)	25.31
			Indice plastico (%)	4.05
			Limite de contraccion (%)	-
3"	76.20		Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282	
2"	50.80		<u>Coefficiente de:</u>	
1 1/2"	38.10		-Uniformidad	
1"	25.40		-Curvatura	
3/4"	19.05		<u>Material:</u>	
3/8"	9.525		-Grava % 0	
Nº 4	4.750	100	-Arena % 1	
Nº 10	2.000	100	-Finos % 99	
Nº 20	0.850	100	<u>Clasificación:</u>	
Nº 40	0.425	100	-AASHTO	
Nº 60	0.250	100	-SUCS ML	
Nº 140	0.106	100	Nombre de grupo:	
Nº 200	0.075	99	CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216	
			Humedad natural (%) 42.74	



NOTA: La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

ECANCA S. R. L.
LABORATORIO
Ing. Hermes Valdivia Aspiguera
Jefe del Lab. De Mec. De Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

DCR - 373/2014

Solicitante : HYDRO-GEO CONSULTORES SAC

Calicata : PJ3 - HG 2

Proyecto : Diseño del sistema de Extracción de Jarosita para el Cierre del Depósito No 3 de la Refinería de Cajamarquilla

Muestra : MAB

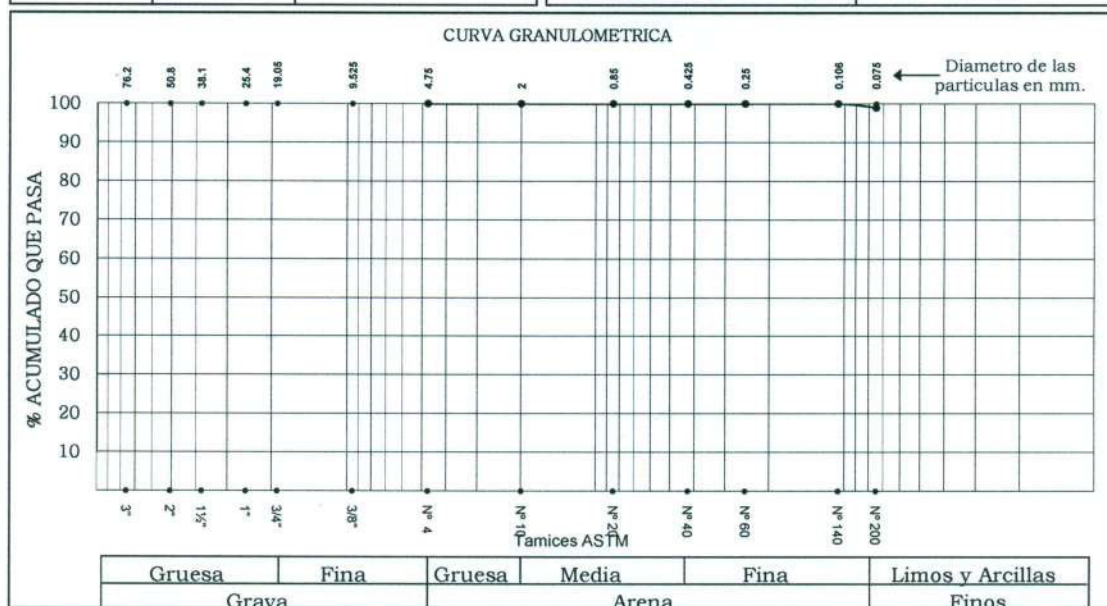
Ubicación : Cajamarquilla

Profundidad : 6.00-8.50m

Fecha : La Molina, 29 de diciembre de 2014

TEC. : FMQ

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	Limite liquido (%)	32.98
3"	76.20		Limite plastico (%)	26.46
2"	50.80		Indice plastico (%)	6.52
1 1/2"	38.10		Limite de contraccion (%)	-
1"	25.40		Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282	
3/4"	19.05		<u>Coefficiente de:</u>	
3/8"	9.525		-Uniformidad	
Nº 4	4.750	100	-Curvatura	
Nº 10	2.000	100	<u>Material:</u>	
Nº 20	0.850	100	-Grava %	0
Nº 40	0.425	100	-Arena %	1
Nº 60	0.250	100	-Finos %	99
Nº 140	0.106	100	<u>Clasificación:</u>	
Nº 200	0.075	99	-AASHTO	
			-SUCS	ML
			Nombre de grupo:	
			CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216	
			Humedad natural (%)	86.35



NOTA: La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

Ing. Hermes Valdivia Aspilcueta
 Jefe del Lab. De Mec. De Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

DCR - 373/2014

Solicitante : HYDRO-GEO COSNULTORES SAC

Calicata : PJ3 - HG 2

Proyecto : Diseño del sistema de Extraccion de Jarosita para el Cierre del Deposito No 3 de la Refeneria de Cajamarquilla

Muestra : MAB

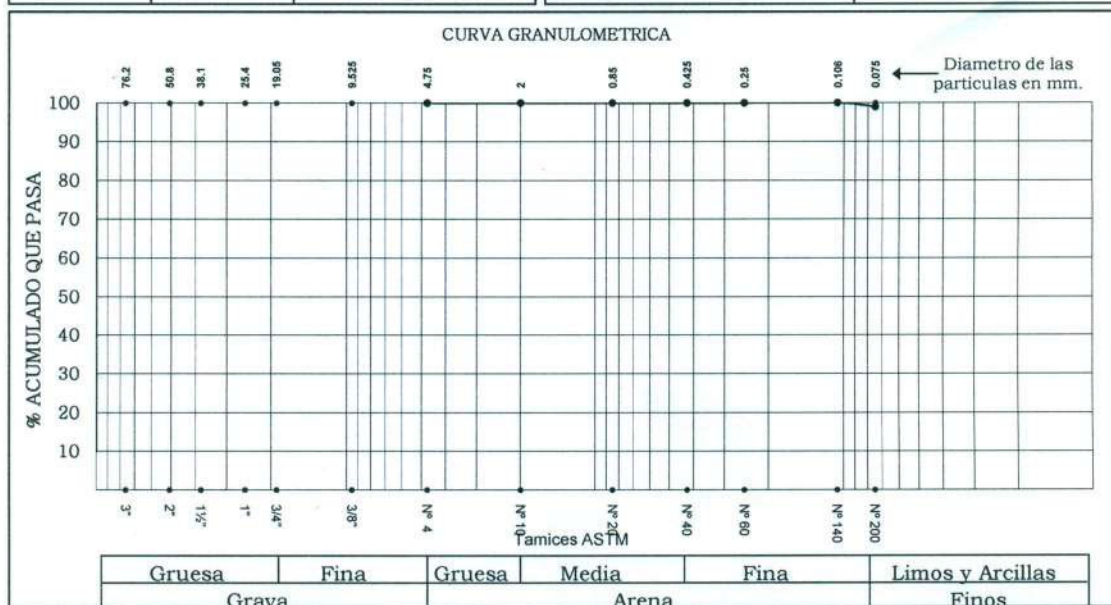
Ubicación : Cajamarquilla

Profundidad : 4.80-10.00m

Fecha : La Molina, 29 de diciembre de 2014

TEC. : FMQ

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	Limite liquido (%)	22.48
3"	76.20		Limite plastico (%)	18.68
2"	50.80		Indice plastico (%)	3.8
1 1/2"	38.10		Limite de contraccion (%)	-
1"	25.40		Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282	
3/4"	19.05		<u>Coefficiente de:</u>	
3/8"	9.525		-Uniformidad	
Nº 4	4.750	100	-Curvatura	
Nº 10	2.000	100	<u>Material:</u>	
Nº 20	0.850	100	-Grava %	0
Nº 40	0.425	100	-Arena %	1
Nº 60	0.250	100	-Finos %	99
Nº 140	0.106	100	<u>Clasificacion:</u>	
Nº 200	0.075	99	-AASHTO	
			-SUCS ML	
			Nombre de grupo:	
			CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216	
			Humedad natural (%)	27.39



NOTA: La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

ECANCA DE SUELOS
LABORATORIO
Ing. Hermes Valdivia Aspícueta
Jefe del Lab. De Mec. De Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO MECANICA DE SUELOS

INFORME DCR-LMS

377/2014

SOLICITANTE	:	HYDRO-GEO CONSULTORES SAC
PROYECTO	:	CAJAMARQUILLA - V. METALS
UBICACIÓN	:	CAJAMARQUILLA
MUESTRA	:	PJ3 - HG 3
PROFUNDIDAD	:	4.50-6.00m
FECHA	:	La Molina, 29 de diciembre de 2014

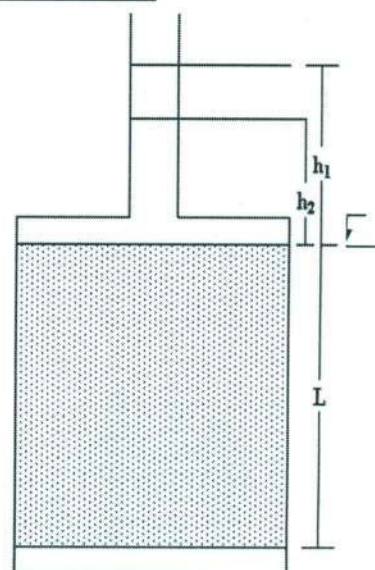


ENSAYO DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE

Fecha de Ensayo	:	29-12-14
Lect. Inicial	:	1.850 cm
Lect. Final	:	1.230 cm
Tiempo	:	1920 seg
Diametro de muestra:	:	10.16 cm
Altura de muestra:	:	10.16 cm
Densidad Seca :	:	- gr/cm ³
Humedad :	:	-

$$K_{20} = 2.303 \times \frac{a}{A} \times \frac{L}{t} \times \log \left[\frac{h_1}{h_2} \right] \times Rt$$

$$k_{20} = 9.1162 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$$



Observación : Especimen remoldeado a densidad proporcionado por Solicitante

FMQ
Tec. Mec. De Suelos

Ing. Hermes A. Valdivia A.
 Jefe Lab. Mecánica de Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO MECANICA DE SUELOS

INFORME DCR-LMS

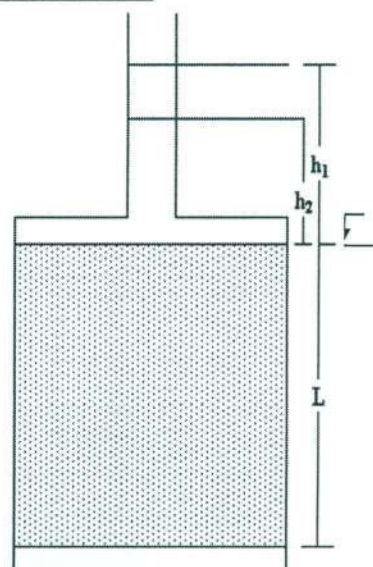
377/2014

SOLICITANTE	:	HYDRO-GEO CONSULTORES SAC
PROYECTO	:	CAJAMARQUILLA - V. METALS
UBICACIÓN	:	CAJAMARQUILLA
MUESTRA	:	PJ3 - HG 3
PROFUNDIDAD	:	3.00-4.50m
FECHA	:	La Molina, 29 de diciembre de 2014



ENSAYO DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE

Fecha de Ensayo	:	29-12-14
Lect. Inicial	:	1.800 cm
Lect. Final	:	1.510 cm
Tiempo	:	780 seg
Diametro de muestra:		10.16 cm
Altura de muestra:		10.16 cm
Densidad Seca :		1.29 gr/cm ³
Humedad :		33.51%



$$K_{20} = 2.303 \times \frac{a}{A} \times \frac{L}{t} \times \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \times Rt$$

$$k_{20} = 9.6581 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$$

Observación : Especimen remoldeado a densidad proporcionado por Solicitante

FMQ
Tec. Mec. De Suelos

Ing. Hermes A. Valdivia A.
 Jefe Lab. Mecánica de Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO MECANICA DE SUELOS

INFORME DCR-LMS

377/2014

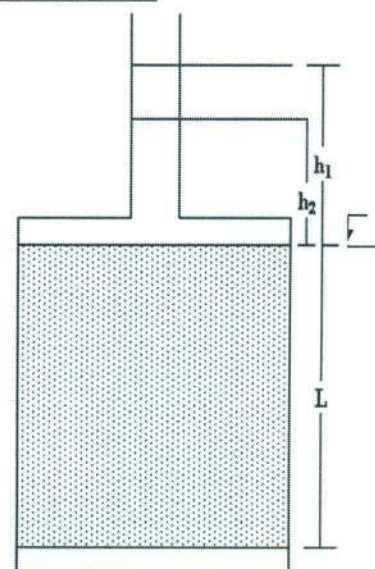
SOLICITANTE	:	HYDRO-GEO CONSULTORES SAC
PROYECTO	:	CAJAMARQUILLA - V. METALS
UBICACIÓN	:	CAJAMARQUILLA
MUESTRA	:	PJ3 - HG 3
PROFUNDIDAD	:	1.50-3.00m
FECHA	:	La Molina, 29 de diciembre de 2014



ENSAYO DE PERMEABILIDAD CARGA VARIABLE

Fecha de Ensayo	:	29-12-14
Lect. Inicial	:	1.800 cm
Lect. Final	:	1.730 cm
Tiempo	:	1980 seg
Diametro de muestra:	:	10.16 cm
Altura de muestra:	:	10.16 cm
Densidad Seca :	:	1.08 gr/cm ³
Humedad :	:	68.79%

$$K_{20} = 2.303 \times \frac{a}{A} \times \frac{L}{t} \times \log \left[\frac{h_1}{h_2} \right] \times R_t$$



$$k_{20} = 8.5905 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$$

Observación : Especimen remoldeado a densidad proporcionado por Solicitante

FMQ
Tec. Mec. De Suelos

Ing. Hermes A. Valdivia A.
 Jefe Lab. Mecánica de Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

DCR - 377/2014

Solicitante : HYDRO-GEO CONSULTORES SAC

Calicata : PJ3 - HG 3

Proyecto : CAJAMARQUILLA - V. METAIS

Muestra : MAB

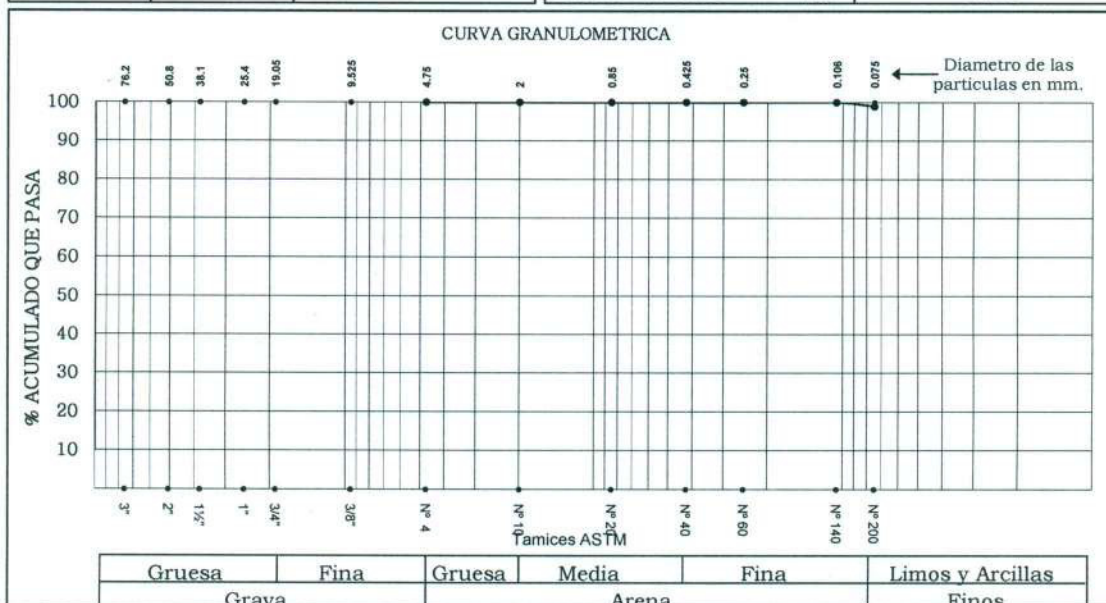
Ubicación : CAJAMARQUILLA

Profundidad : 4.50-6.00m

Fecha : La Molina, 29 de diciembre de 2014

TEC. : FMQ

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	Limite liquido (%)	41.27
			Limite plastico (%)	30.68
			Indice plastico (%)	10.59
			Limite de contraccion (%)	-
3"	76.20		Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282	
2"	50.80		<u>Coefficiente de:</u>	
1 1/2"	38.10		-Uniformidad	
1"	25.40		-Curvatura	
3/4"	19.05		<u>Material:</u>	
3/8"	9.525		-Grava %	0
Nº 4	4.750	100	-Arena %	1
Nº 10	2.000	100	-Finos %	99
Nº 20	0.850	100	<u>Clasificacion:</u>	
Nº 40	0.425	100	-AASHTO	
Nº 60	0.250	100	-SUCS ML	
Nº 140	0.106	100	Nombre de grupo:	
Nº 200	0.075	99	CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216	
			Humedad natural (%)	80.34



NOTA: La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

Ing. Hermes Valdivia Aspilcueta
Jefe del Lab. De Mec. De Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

DCR - 377/2014

Solicitante : HYDRO-GEO CONSULTORES SAC

Calicata : PJ3 - HG 3

Proyecto : CAJAMARQUILLA - V. METAIS

Muestra : MAB

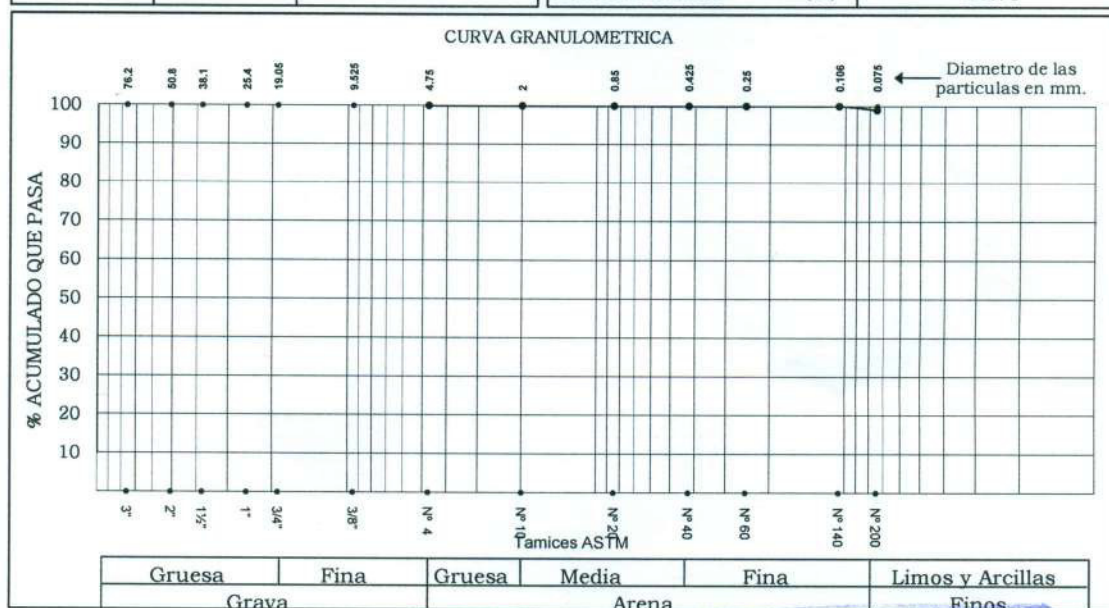
Ubicación : CAJAMARQUILLA

Profundidad : 1.50-3.00m

Fecha : La Molina, 29 de diciembre de 2014

TEC. : FMQ

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LIMITES DE CONSISTENCIA	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	ASTM - D 427 / D 4318	
3"	76.20		Limite liquido (%)	31.43
2"	50.80		Limite plastico (%)	27.48
1 1/2"	38.10		Indice plastico (%)	3.95
1"	25.40		Limite de contraccion (%)	-
3/4"	19.05		Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282	
3/8"	9.525		<u>Coefficiente de:</u>	
Nº 4	4.750	100	-Uniformidad	
Nº 10	2.000	100	-Curvatura	
Nº 20	0.850	100	<u>Material:</u>	
Nº 40	0.425	100	-Grava %	0
Nº 60	0.250	100	-Arena %	1
Nº 140	0.106	100	-Finos %	99
Nº 200	0.075	99	<u>Clasificacion:</u>	
			-AASHTO	
			-SUCS	ML
			Nombre de grupo:	
			CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216	
			Humedad natural (%)	68.79



NOTA: La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

RECARGA DE SUELOS
LABORATORIO
Ing. Hermes Valdivia Aspigueta
Jefe del Lab. De Mec. De Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

DCR - 377/2014

Solicitante : HYDRO-GEO CONSULTORES SAC

Calicata : PJ3 - HG 3

Proyecto : CAJAMARQUILLA - V. METAIS

Muestra : MAB

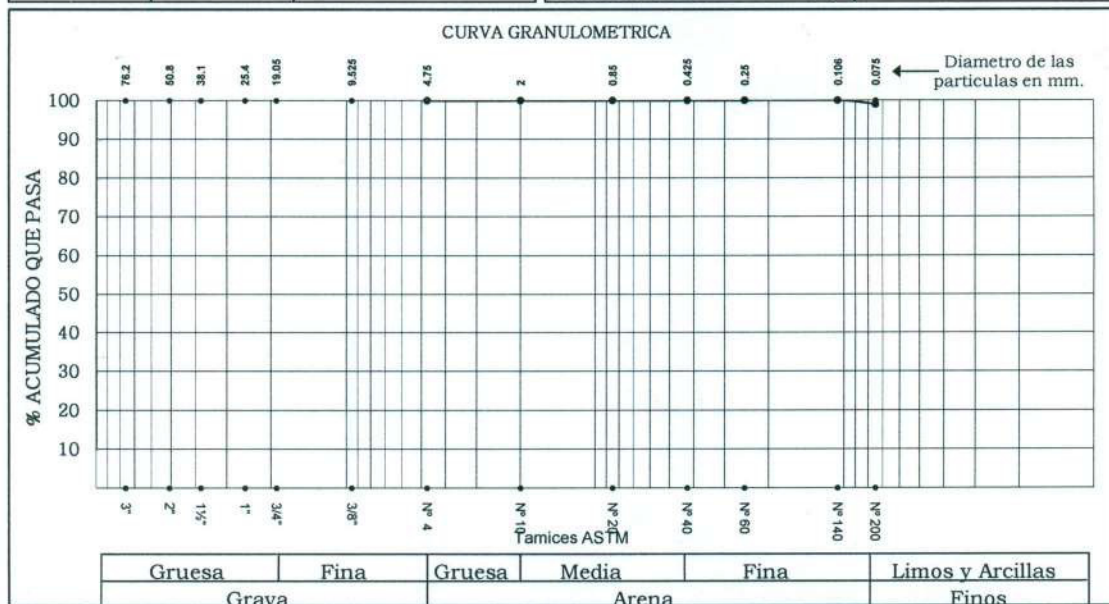
Ubicación : CAJAMARQUILLA

Profundidad : 3.00-4.50m

Fecha : La Molina, 29 de diciembre de 2014

TEC. : FMQ

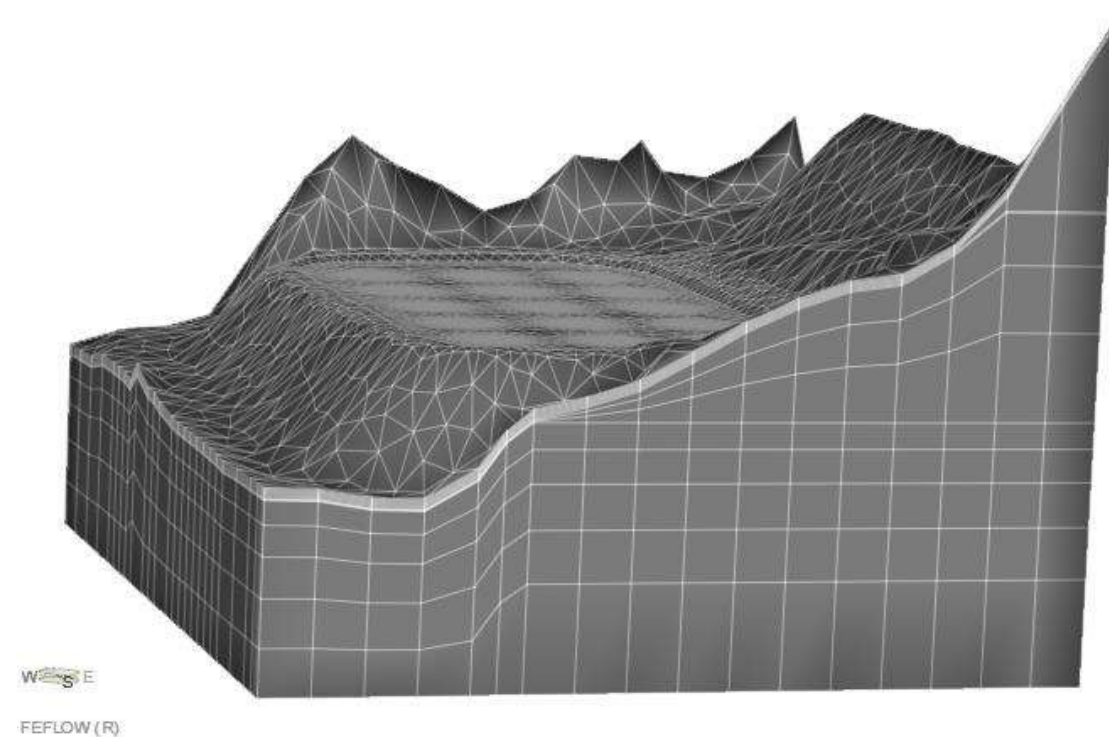
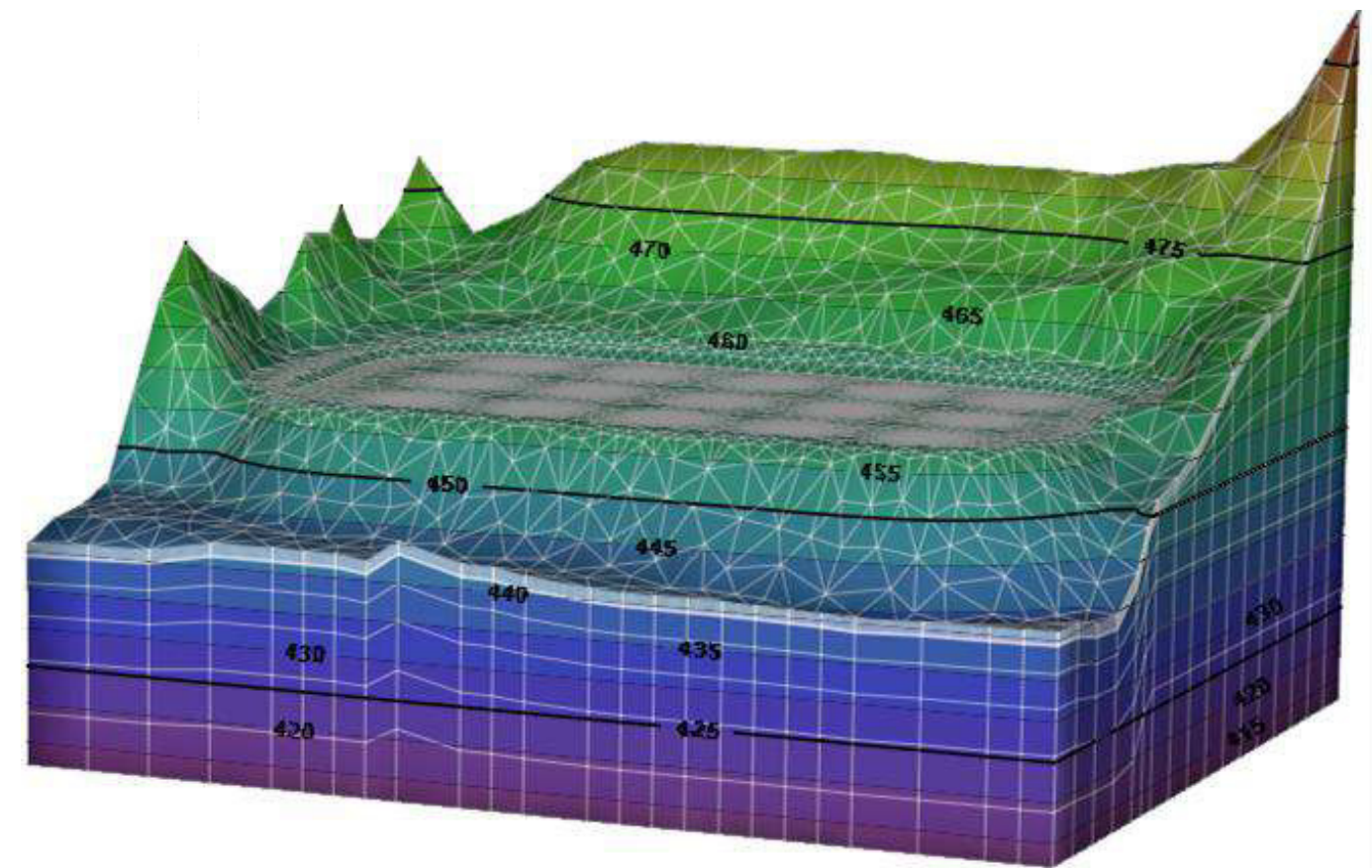
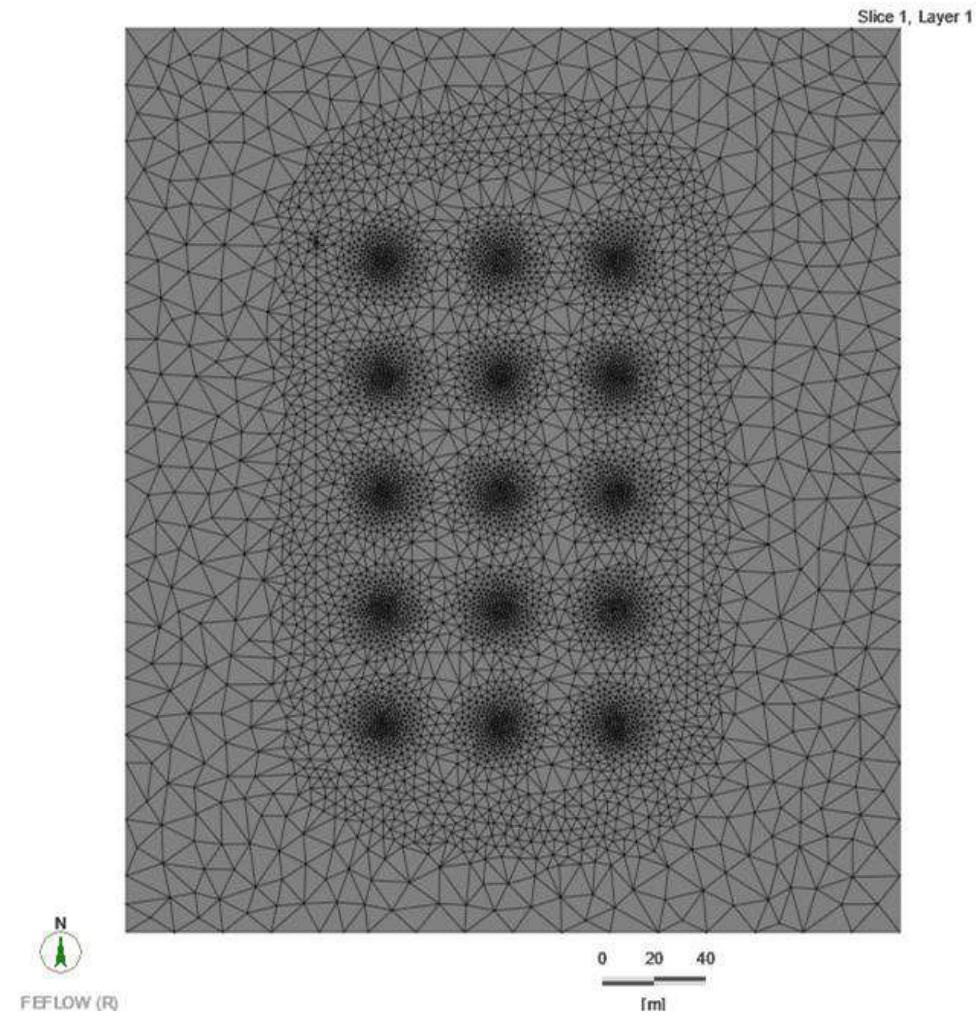
ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	Limite liquido (%)	21.18
3"	76.20		Limite plastico (%)	18.25
2"	50.80		Indice plastico (%)	2.93
1 1/2"	38.10		Limite de contraccion (%)	-
1"	25.40		Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282	
3/4"	19.05		<u>Coefficiente de:</u>	
3/8"	9.525		-Uniformidad	
Nº 4	4.750	100	-Curvatura	
Nº 10	2.000	100	<u>Material:</u>	
Nº 20	0.850	100	-Grava %	0
Nº 40	0.425	100	-Arena %	1
Nº 60	0.250	100	-Finos %	99
Nº 140	0.106	100	<u>Clasificacion:</u>	
Nº 200	0.075	99	-AASHTO	
			-SUCS ML	
			Nombre de grupo:	
			CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216	
			Humedad natural (%)	33.51



NOTA: La Muestra ha Sido Proporcionada e Identificada por el Solicitante.

Ing. Hermes Valdivia Aspilcueta
Jefe del Lab. De Mec. De Suelos

ANEXO 8: SALIDAS DE FEFLOW



**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
UNIDAD DE POSGRADO**

TESIS: **CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA
EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA
REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024**

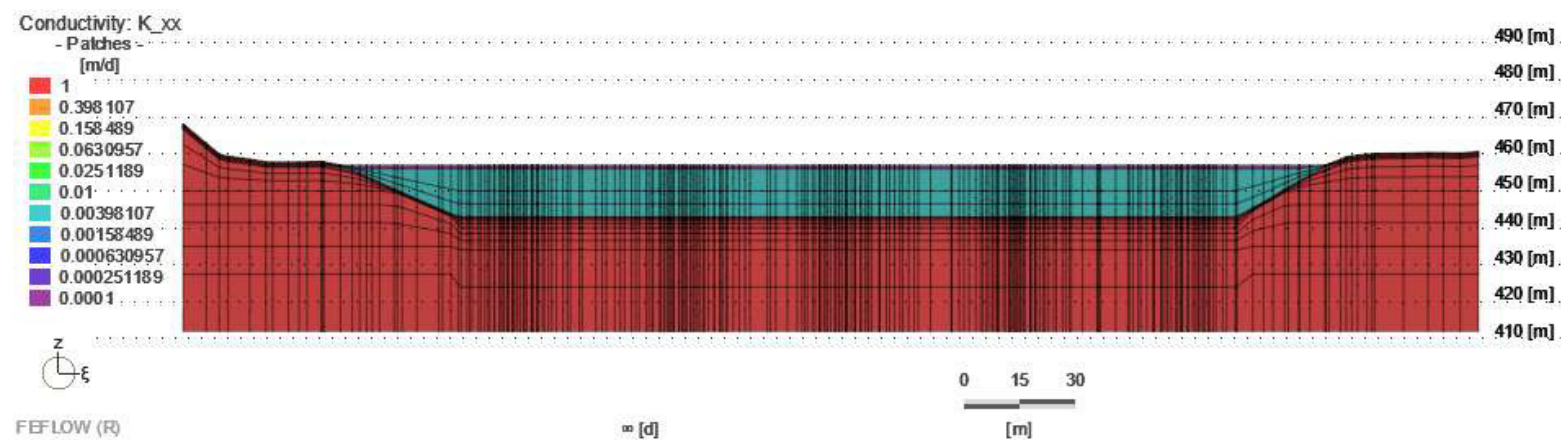
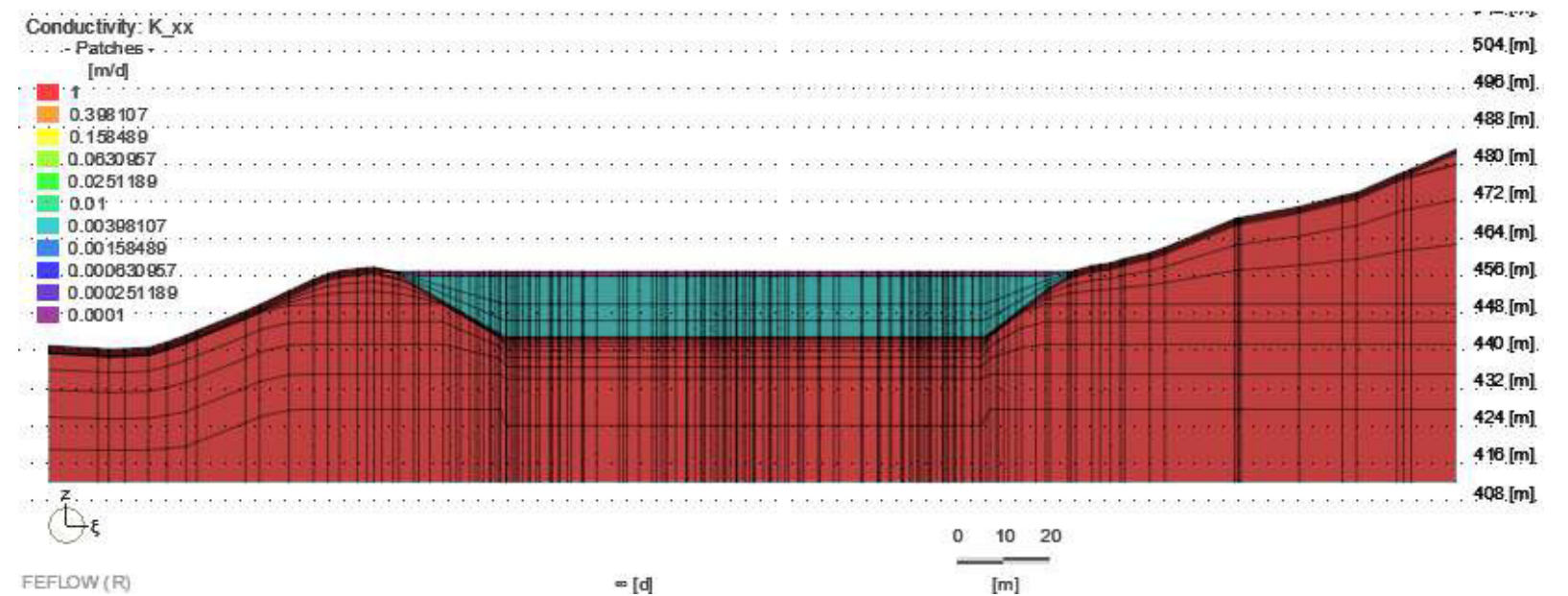
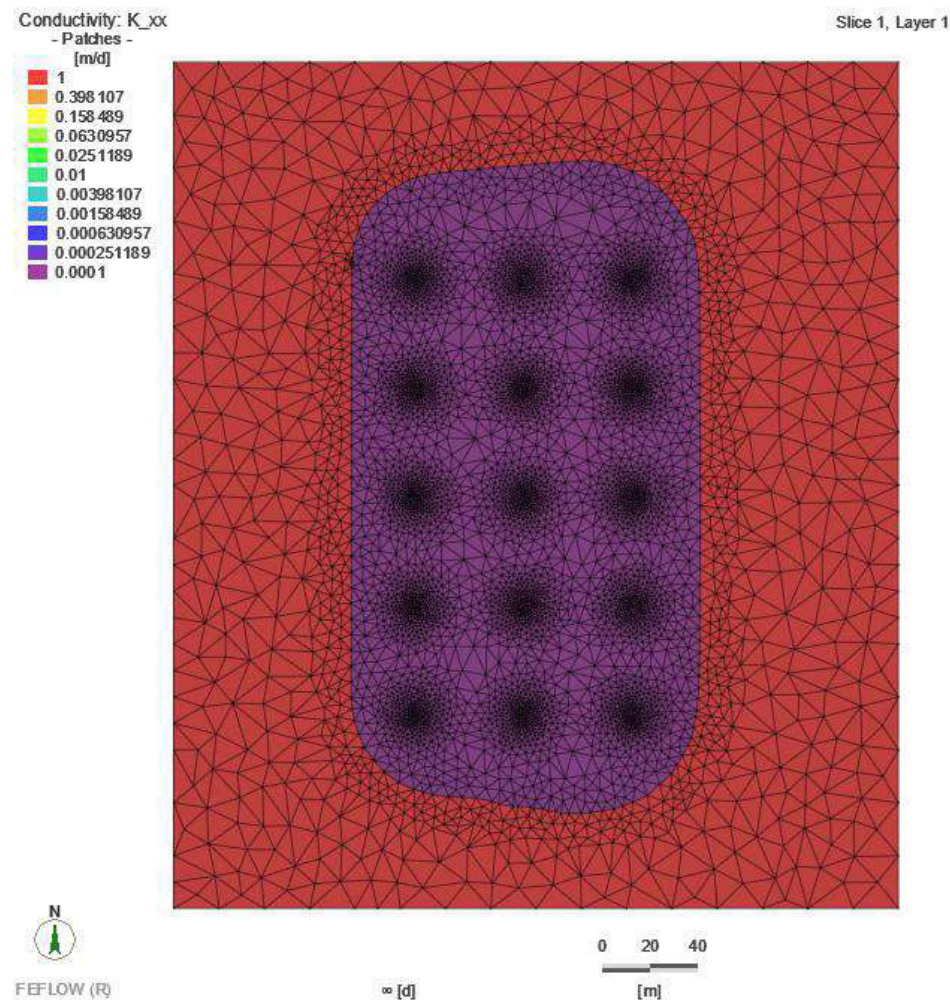
DISCRETIZACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS
TESISTA: MG. EDITA HERRERA CARRANZA

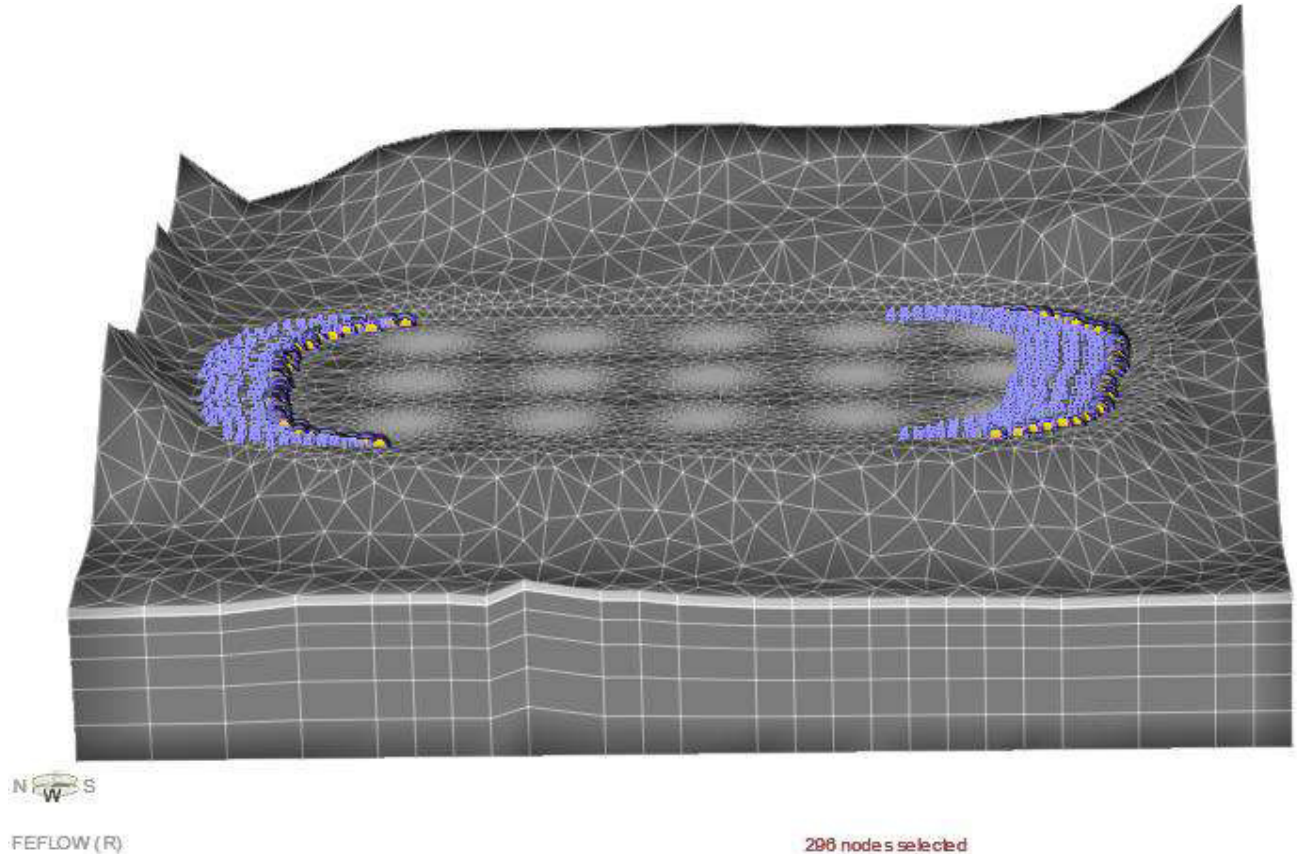
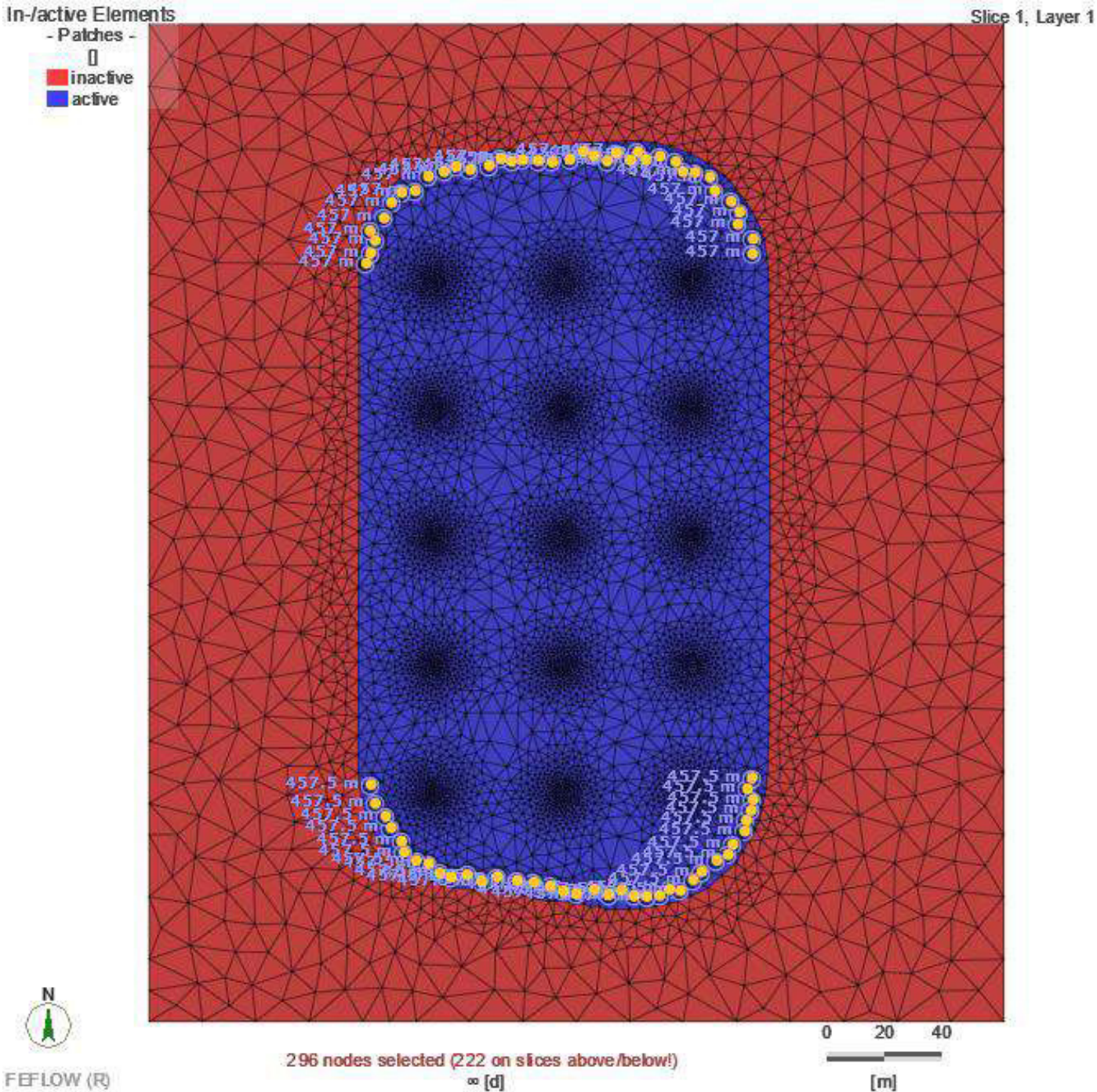
ESCALA: 1:2000
DATUM: WGS 84, 18S

Nov. 2024

PLANO N°:
F_01



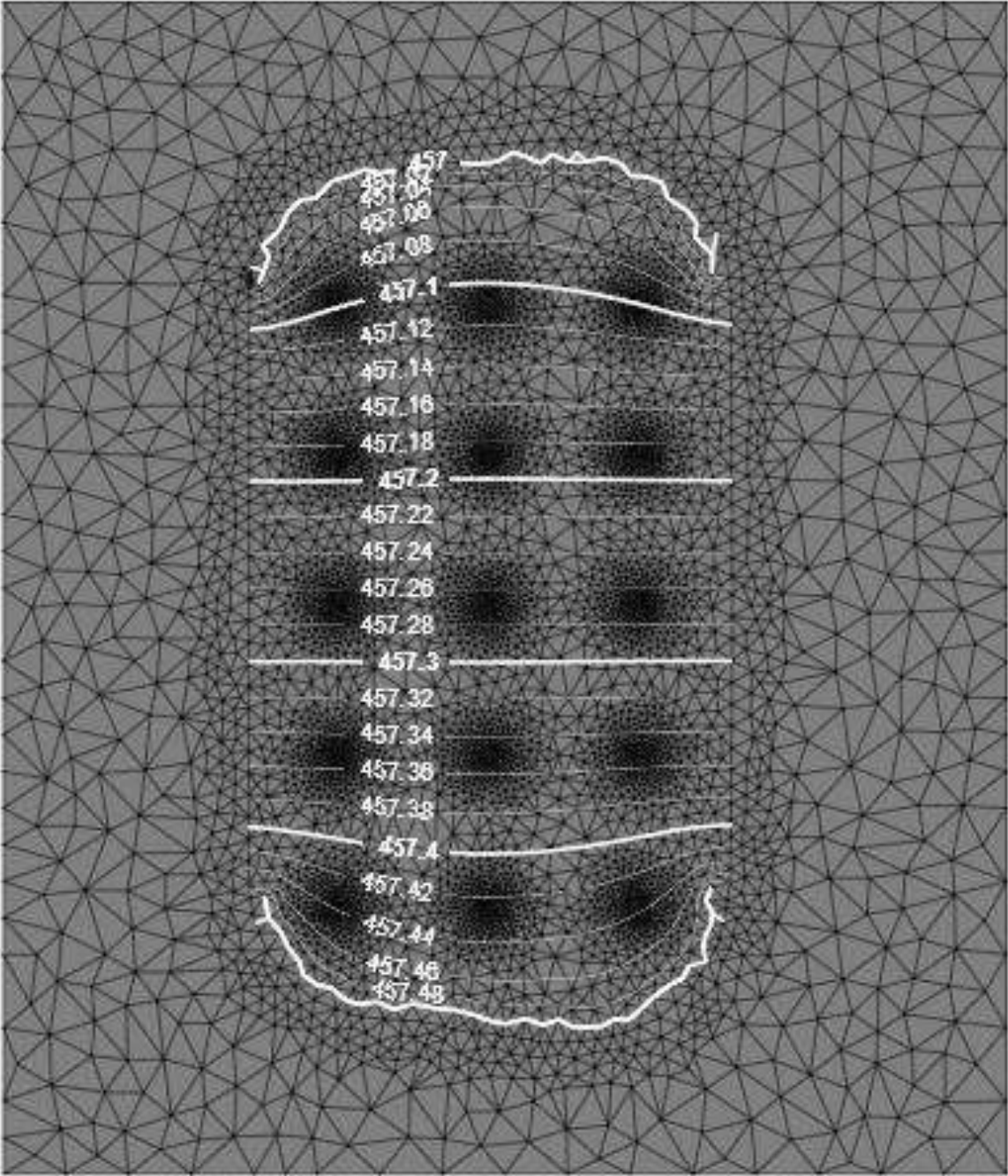
 UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA UNIDAD DE POSGRADO			
TESIS: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
ZONAS DE CONDUCTIVIDAD DEL MODELO NUMÉRICO			
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS	ESCALA: 1:2000	Nov. 2024	PLANO N°:
TESISTA: MG. EDITTA HERRERA CARRANZA	DATUM: WGS 84, 18S		F_02



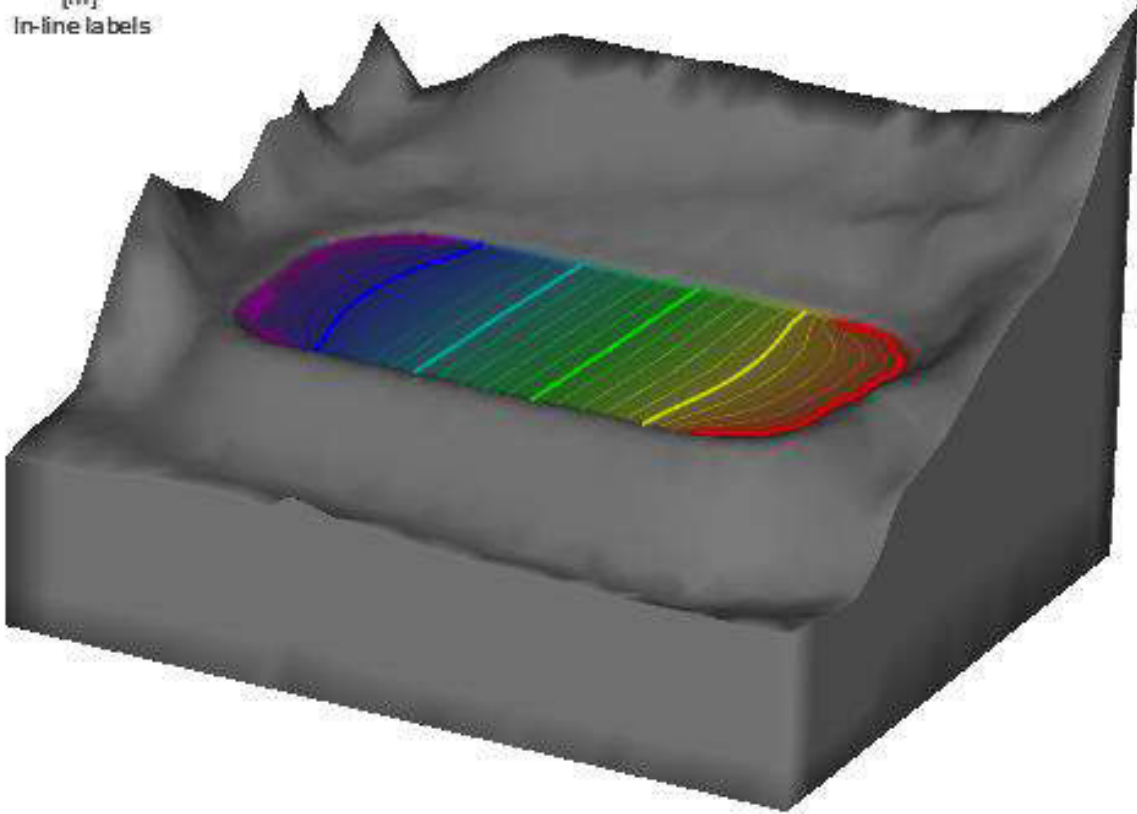
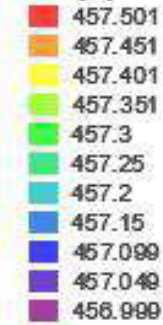
	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS			
	UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA			
	UNIDAD DE POSGRADO			
TESIS:	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
ZONAS DE CARGA CONSTANTE DEL MODELO NUMÉRICO				
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS		ESCALA: 1:2000	Nov. 2024	PLANO N°: F_03
TESISTA: MG. EDITTA HERRERA CARRANZA		DATUM: WGS 84, 18S		

Hydraulic head
- Isolines -
[m]
In-line labels

Size 1, Layer 1



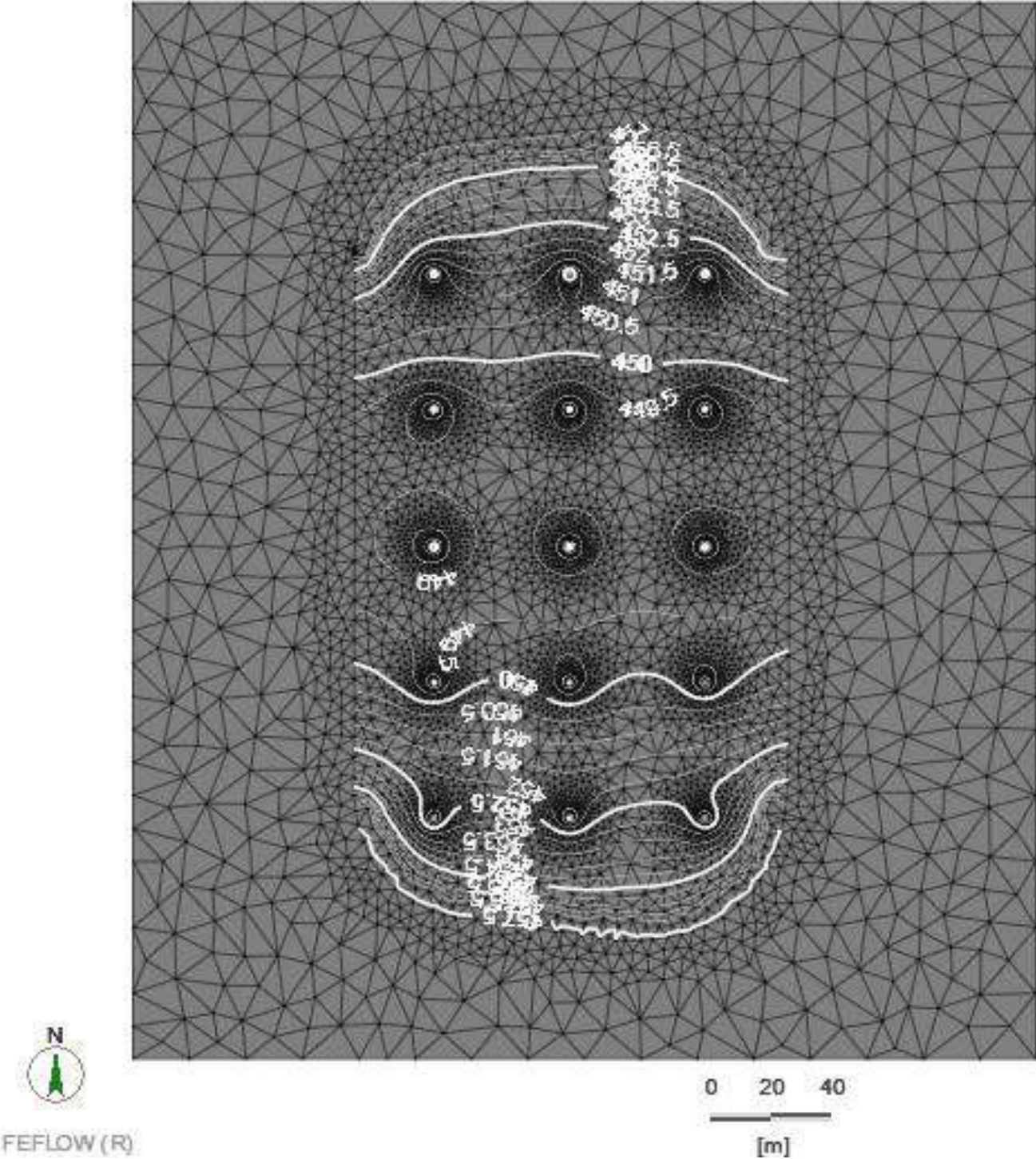
Hydraulic head Hydraulic head
- Continuous - Isolines -
[m] [m]
In-line labels



m [d]

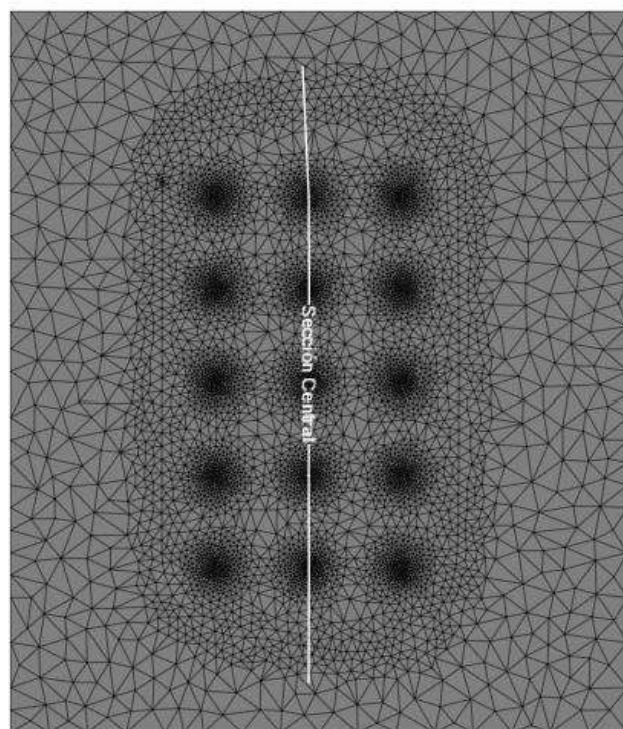
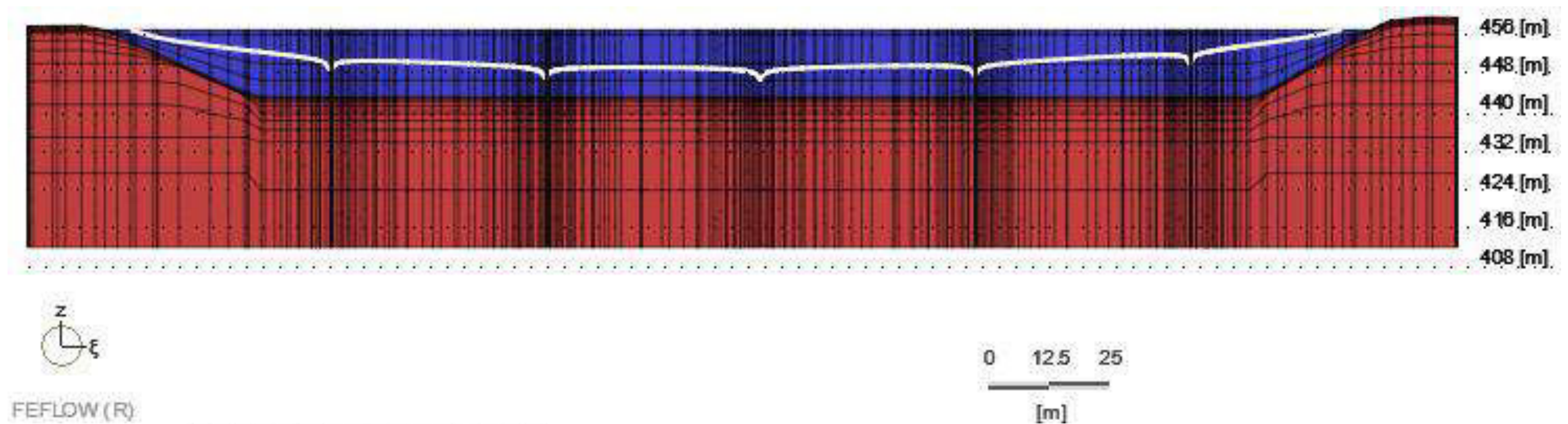
	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA UNIDAD DE POSGRADO			
	TESIS: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
CONTORNOS DE NIVEL DE AGUA EN RÉGIMEN ESTACIONARIO EC_1				
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS		ESCALA: 1:2000	Nov. 2024	PLANO N°: F_04
TESISTA: MG. EDITTA HERRERA CARRANZA		DATUM: WGS 84, 18S		

Hydraulic head
- Isolines -
[m]
In-line labels



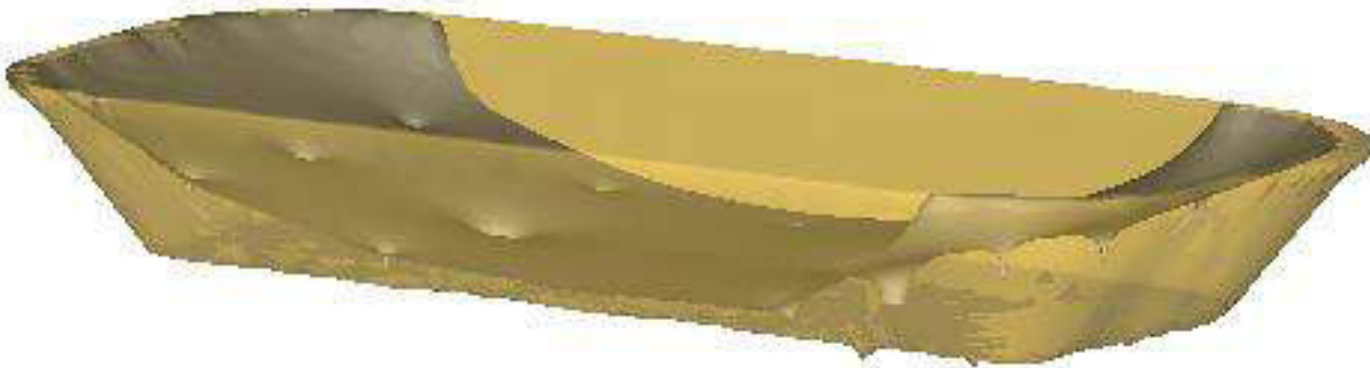
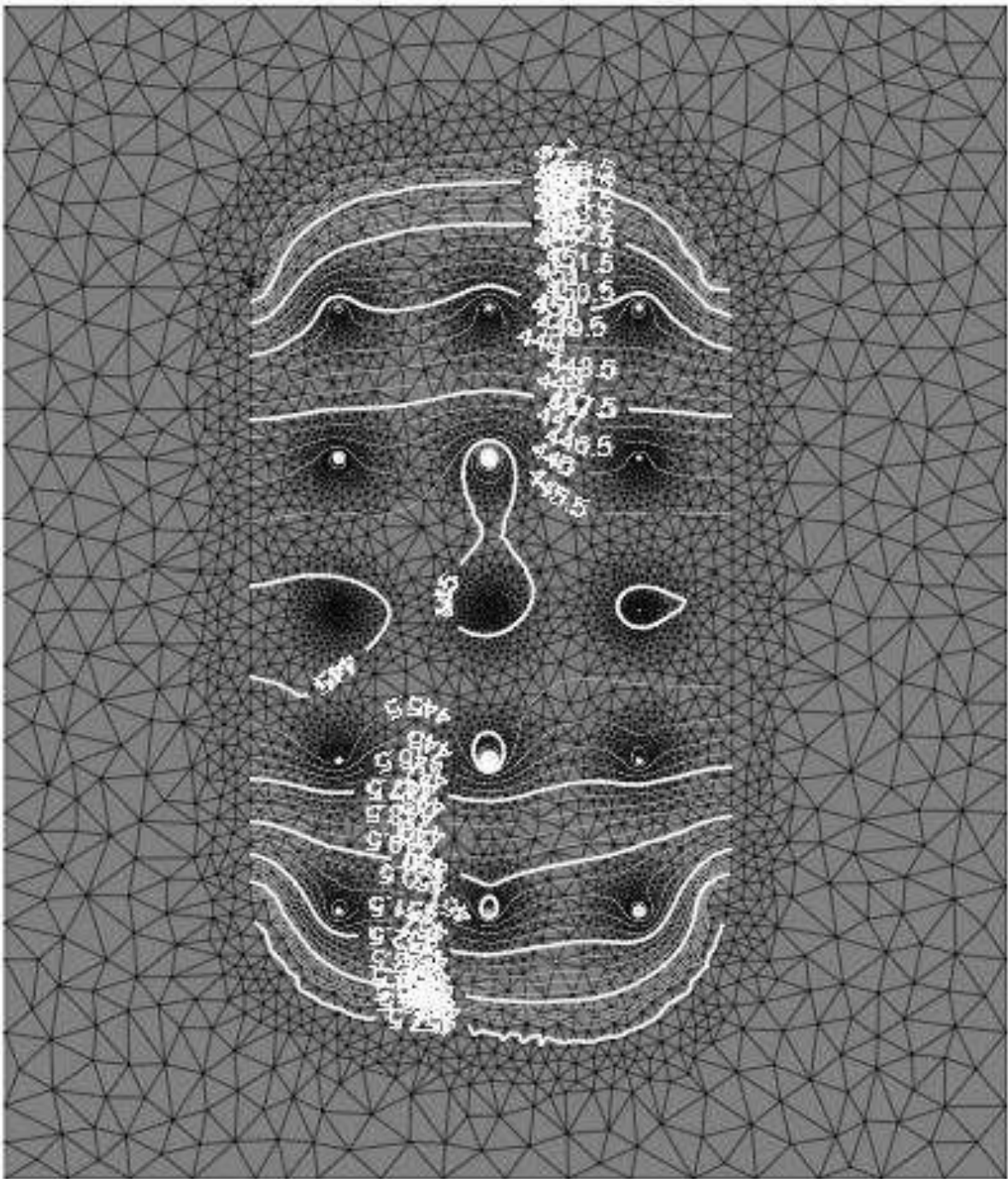
FEFLOW (R)

 UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA UNIDAD DE POSGRADO			
TESIS: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
CONTORNOS DEL NIVEL DE AGUA CON BOMBEO PERMANENTE-DÍA 1095 (EC_1)			
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS	ESCALA: 1:2000	Nov. 2024	PLANO N°:
TESISTA: MG. EDITTA HERRERA CARRANZA	DATUM: WGS 84, 18S		F_05



	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA UNIDAD DE POSGRADO			
	TESIS: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
SECCIÓN NUMÉRICA CENTRAL -RÉGIMEN TRANSITORIO DÍA 1095 (EC_1)				
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS		ESCALA: 1:2000	Nov. 2024	PLANO N°: F_06
TESISTA: MG. EDITTA HERRERA CARRANZA		DATUM: WGS 84, 18S		

Hydraulic head
- Isolines -
[m]
In-line labels

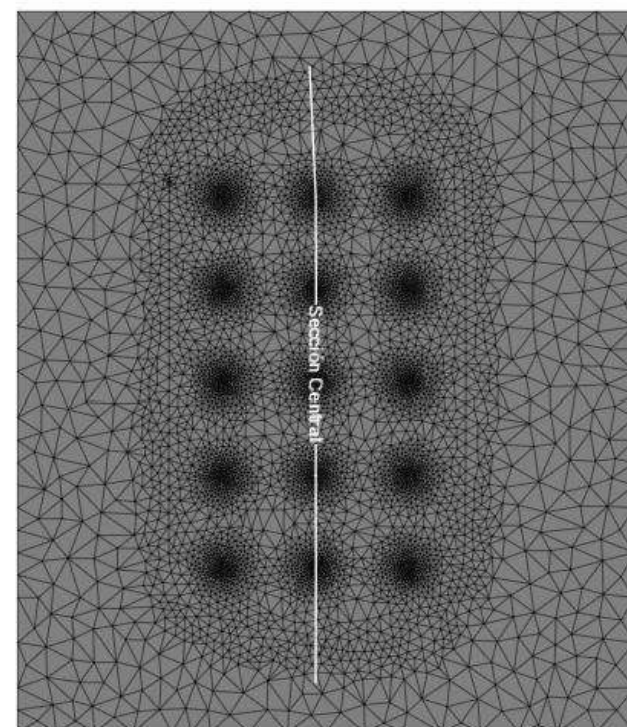
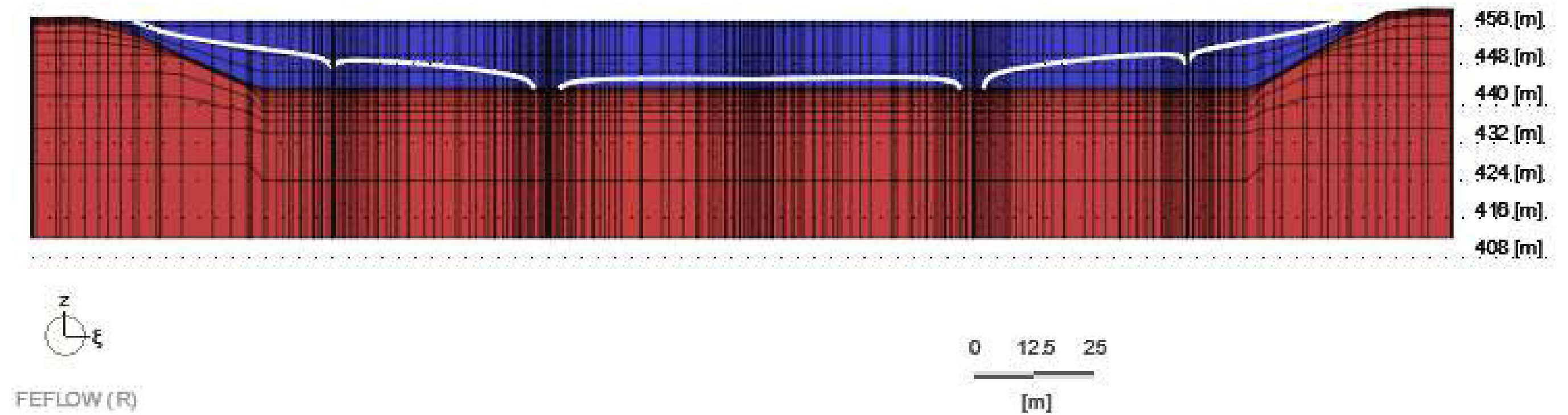


W-S
FEFLOW (R)

N
FEFLOW (R)

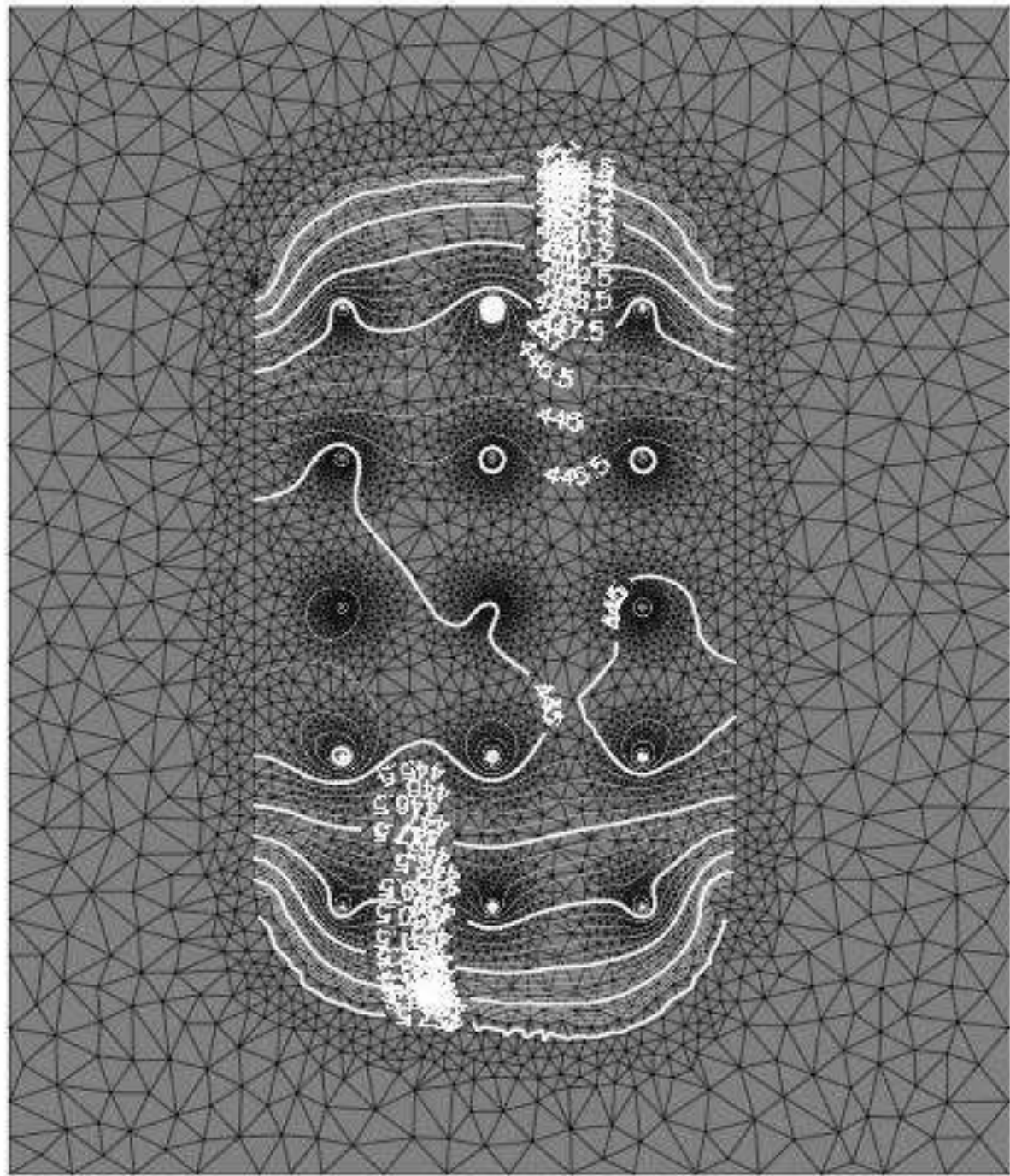
0 20 40
[m]

	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA UNIDAD DE POSGRADO			
	TESIS: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
CONTORNOS DEL NIVEL DE AGUA CON BOMBEO PERMANENTE –DÍA 3650 (EC_1)				
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS		ESCALA: 1:2000	Nov. 2024	PLANO N°: F_07
TESISTA: MG. EDITTA HERRERA CARRANZA		DATUM: WGS 84, 18S		



	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA UNIDAD DE POSGRADO			
	TESIS: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
SECCIÓN NUMÉRICA CENTRAL -RÉGIMEN TRANSITORIO DÍA 3650 (EC_1)				
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS		ESCALA: 1:2000	Nov. 2024	PLANO N°: F_08
TESISTA: MG EDITTA HERRERA CARRANZA		DATUM: WGS 84, 18S		

Hydraulic head
- Isd lines -
[m]
In-line labels



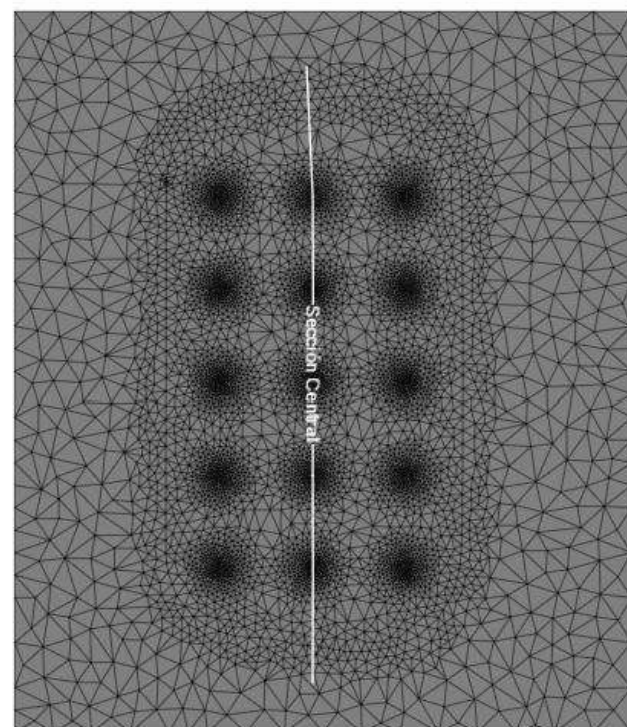
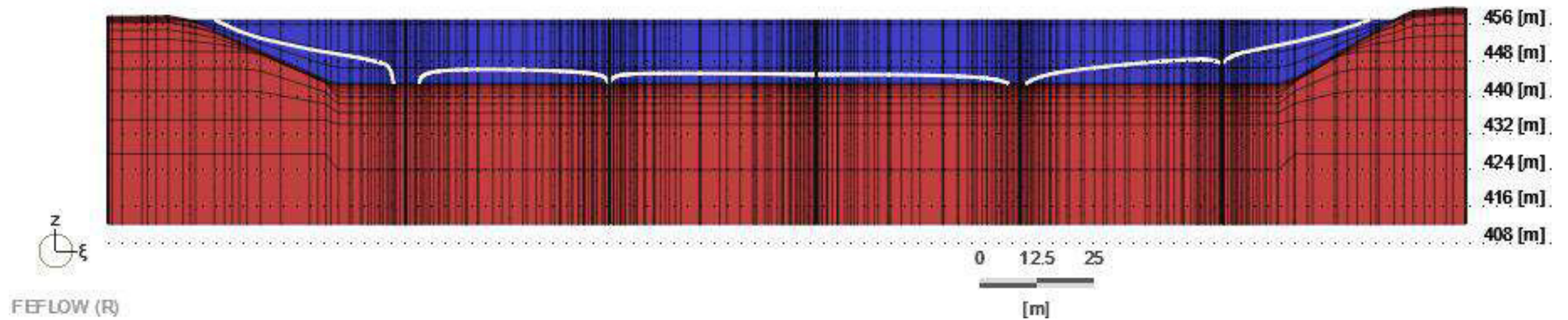
N
FEFLOW (R)

0 20 40
[m]



N
W S
FEFLOW (R)

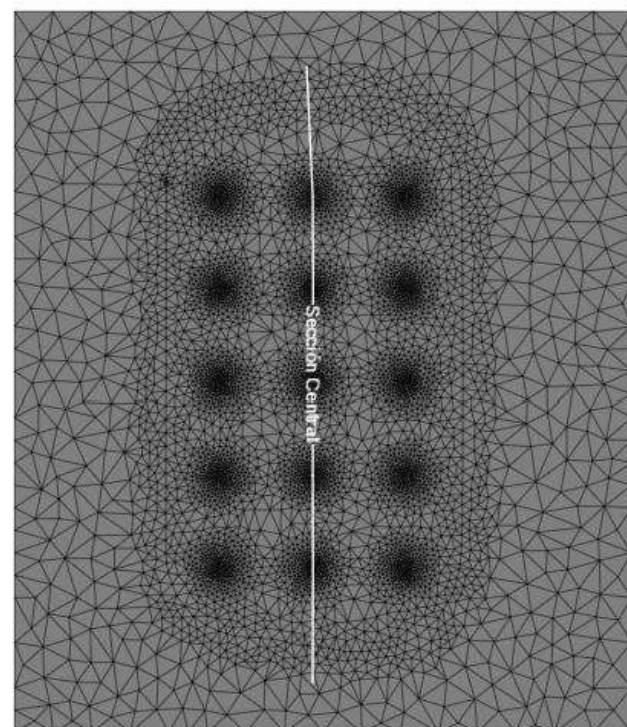
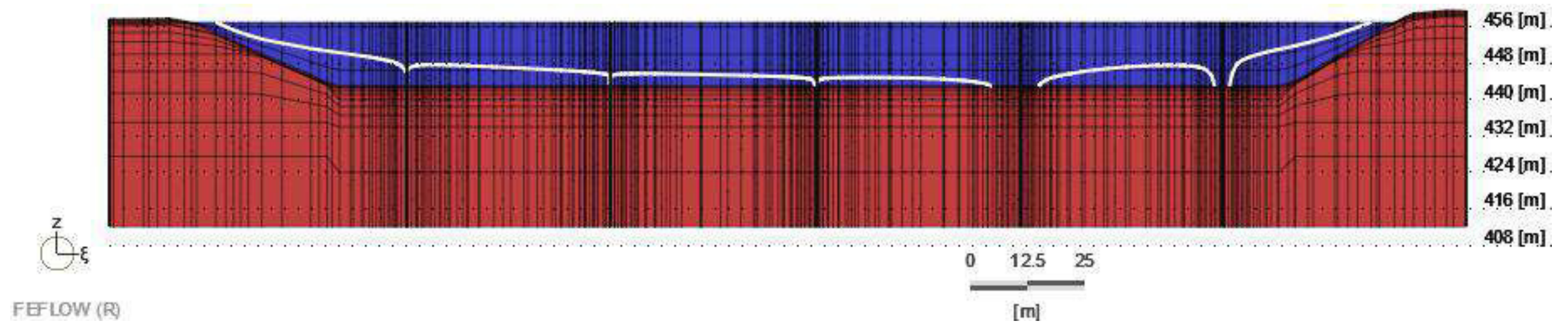
 UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA UNIDAD DE POSGRADO			
TESIS: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
CONTORNOS DEL NIVEL DE AGUA CON BOMBEO PERMANENTE –DÍA 1095 (EC_5)			
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS	ESCALA: 1:2000	Nov. 2024	PLANO N°:
TESISTA: MG. EDITTA HERRERA CARRANZA	DATUM: WGS 84, 18S		F_09



	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA UNIDAD DE POSGRADO			
	TESIS: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
SECCIÓN NUMÉRICA CENTRAL-RÉGIMEN TRANSITORIO DÍA 1095 (EC_5)				
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS		ESCALA: 1:2000	Nov. 2024	PLANO N°: F_10
TESISTA: MG EDITTA HERRERA CARRANZA		DATUM: WGS 84 18S		



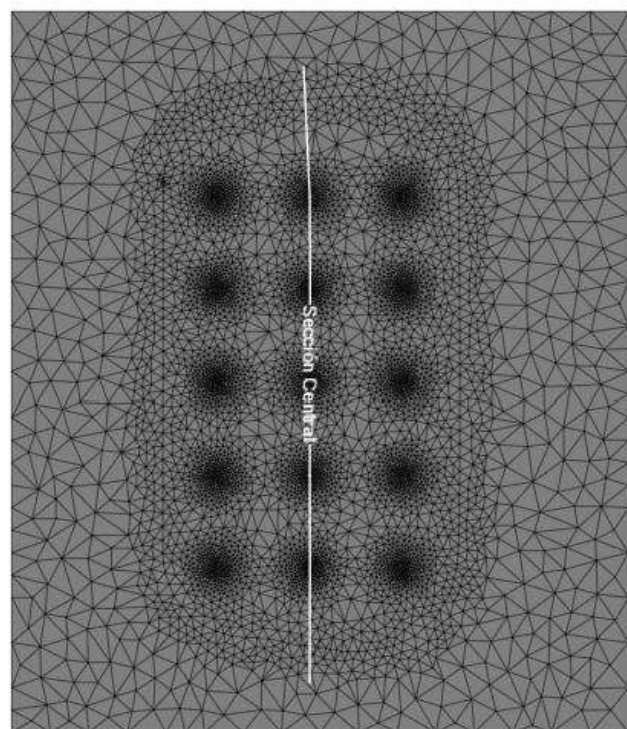
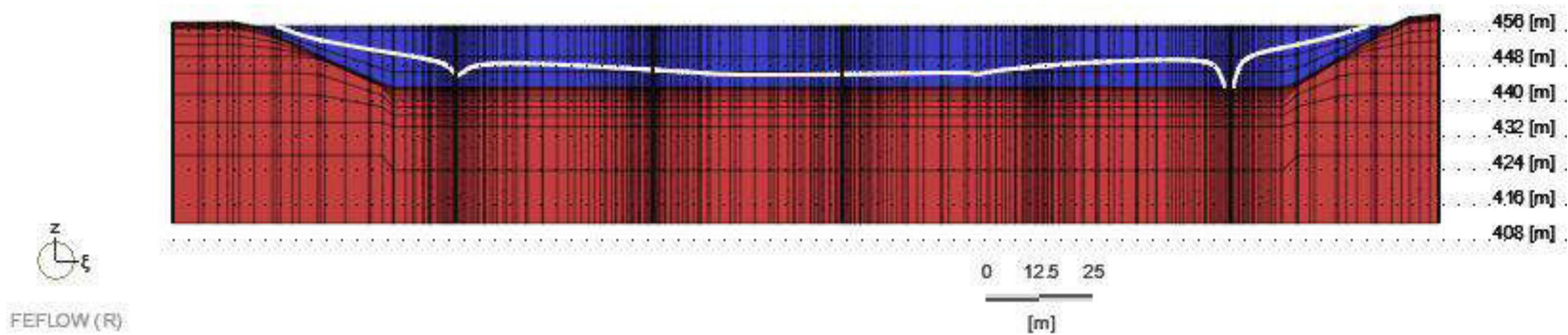
 UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA UNIDAD DE POSGRADO			
TESIS: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
CONTORNOS DEL NIVEL DE AGUA CON BOMBEO PERMANENTE –DÍA 3650 (EC_5)			
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS TESISISTA: MG. EDITTA HERRERA CARRANZA	ESCALA: 1:2000 DATUM: WGS 84. 18S	Nov. 2024	PLANO N°: F_11



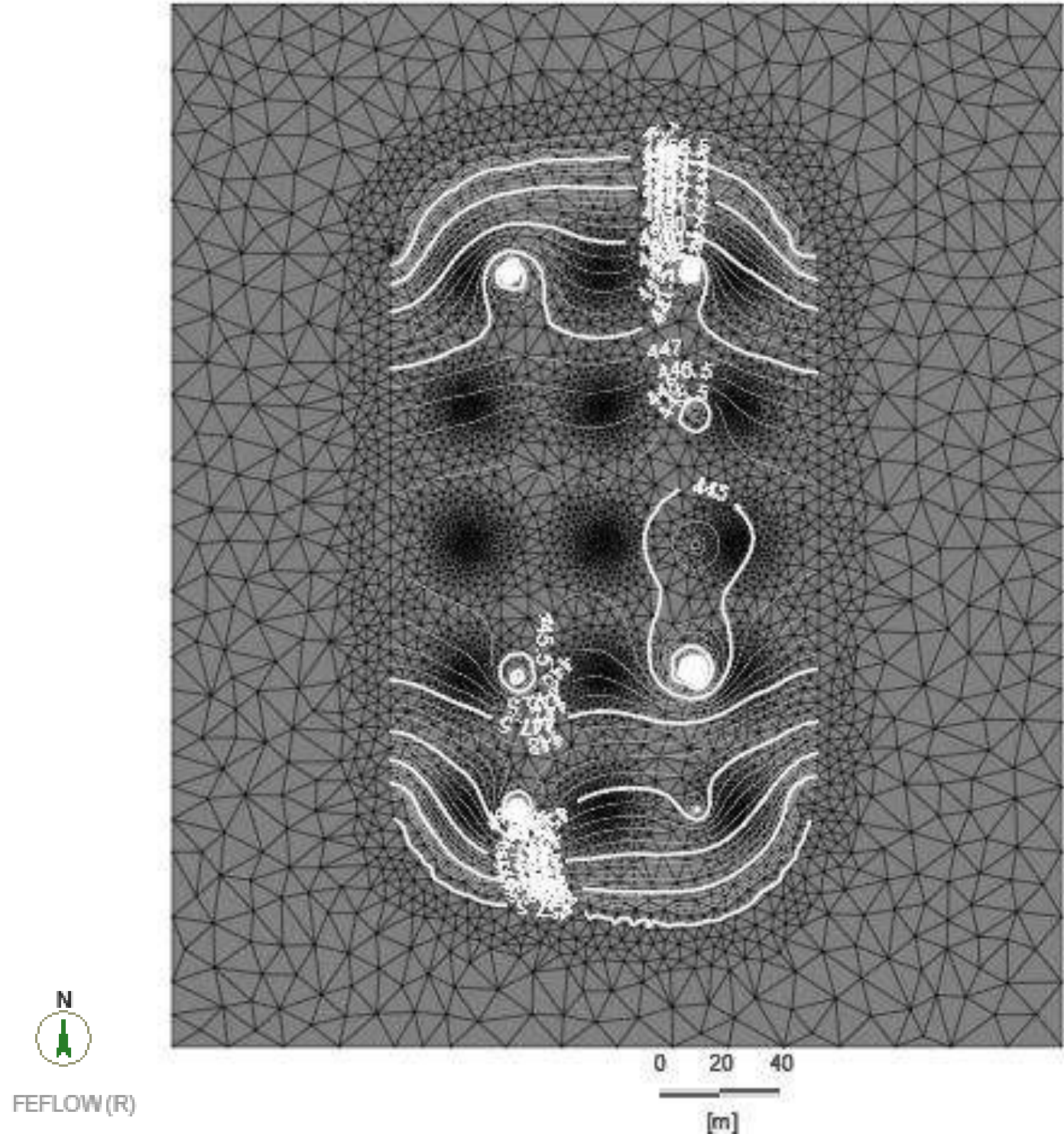
	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS			
	UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA			
	UNIDAD DE POSGRADO			
TESIS:	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
SECCIÓN NUMÉRICA CENTRAL-RÉGIMEN TRANSITORIO DÍA 3650 (EC_5)				
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS		ESCALA: 1:2000	Nov. 2024	PLANO N°: F_12
TESISTA: MG EDITTA HERRERA CARRANZA		DATUM: WGS 84, 18S		



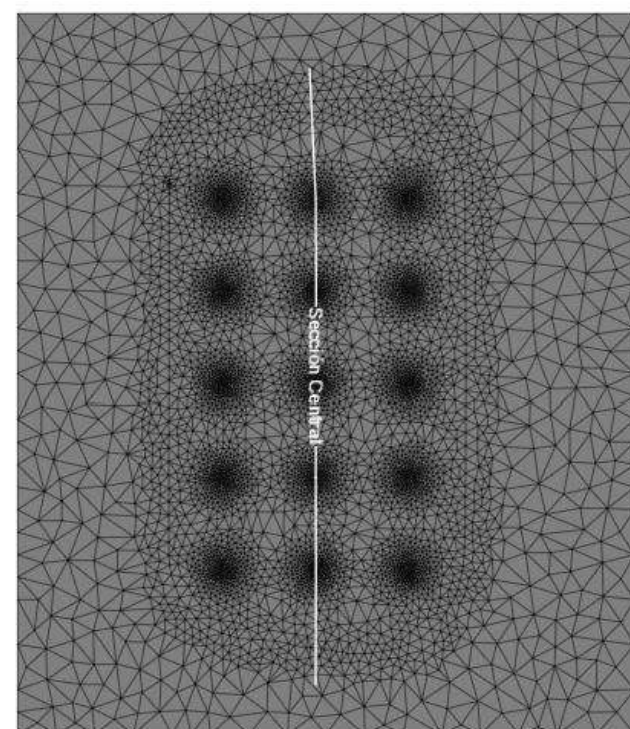
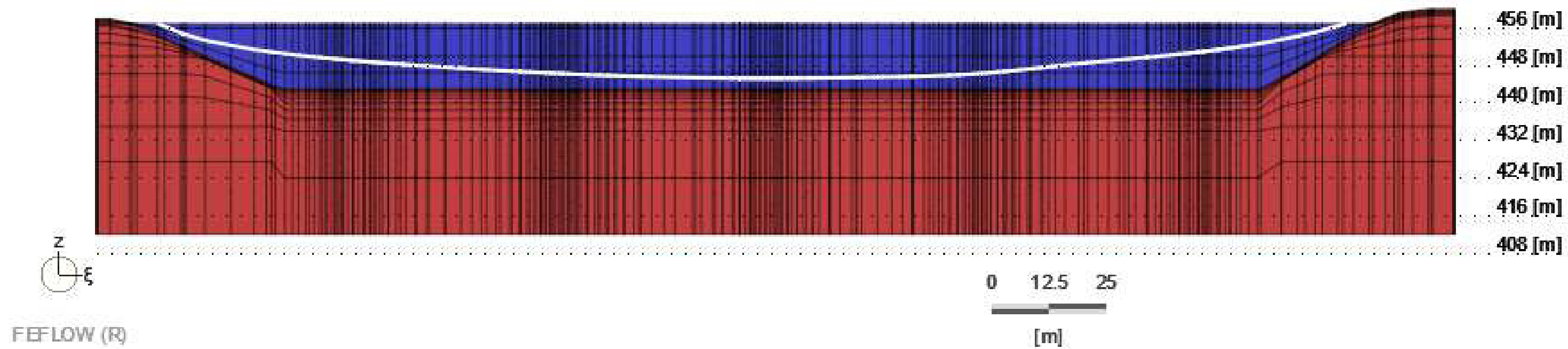
 UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA UNIDAD DE POSGRADO			
TESIS: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
CONTORNOS DEL NIVEL DE AGUA CON BOMBEO PERMANENTE –DÍA 1095 (EC_12)			
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS TESISISTA: MG. EDITTA HERRERA CARRANZA	ESCALA: 1:2000 DATUM: WGS 84. 18S	Nov. 2024	PLANO N°: F_13



	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA UNIDAD DE POSGRADO			
	TESIS: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
SECCIÓN NUMÉRICA CENTRAL-RÉGIMEN TRANSITORIO DÍA 1095 (EC_12)				
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS		ESCALA: 1:2000	Nov. 2024	PLANO N°: F_14
TESISTA: MG. EDITTA HERRERA CARRANZA		DATUM: WGS 84, 18S		

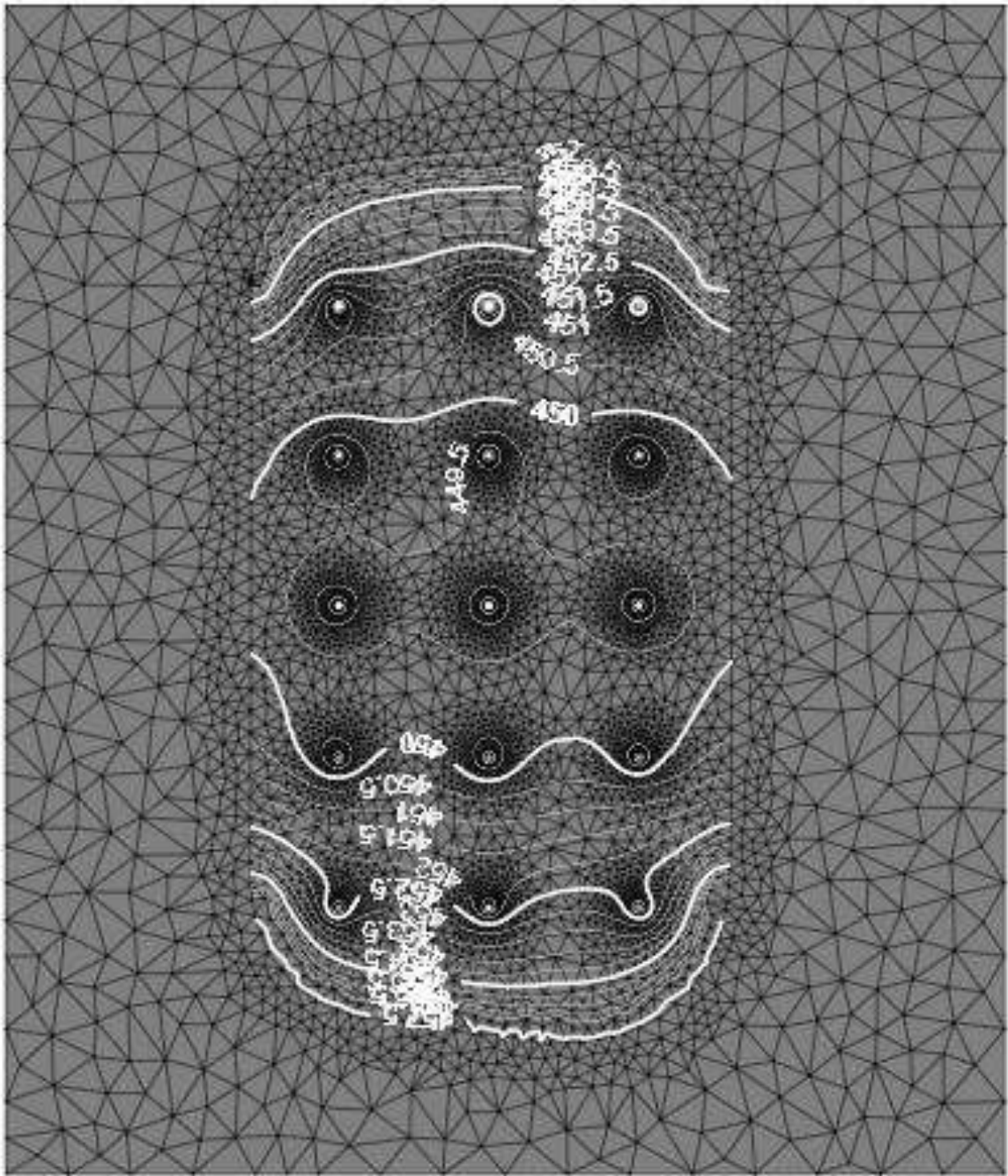


	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS			
	UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA			
	UNIDAD DE POSGRADO			
TESIS:	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
CONTORNOS DEL NIVEL DE AGUA CON BOMBEO PERMANENTE –DÍA 1095 (EC_19)				
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS		ESCALA: 1:2000	Nov. 2024	PLANO N°: F_15
TESISTA: MG. EDITTA HERRERA CARRANZA		DATUM: WGS 84, 18S		



	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA UNIDAD DE POSGRADO			
	TESIS: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
SECCIÓN NUMÉRICA CENTRAL-RÉGIMEN TRANSITORIO DÍA 1095 (EC_19)				
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS		ESCALA: 1:2000	Nov. 2024	PLANO N°: F_16
TESISTA: MG. EDITA HERRERA CARRANZA		DATUM: WGS 84, 18S		

Hydraulic head
- Isolines -
[m]
In-line labels

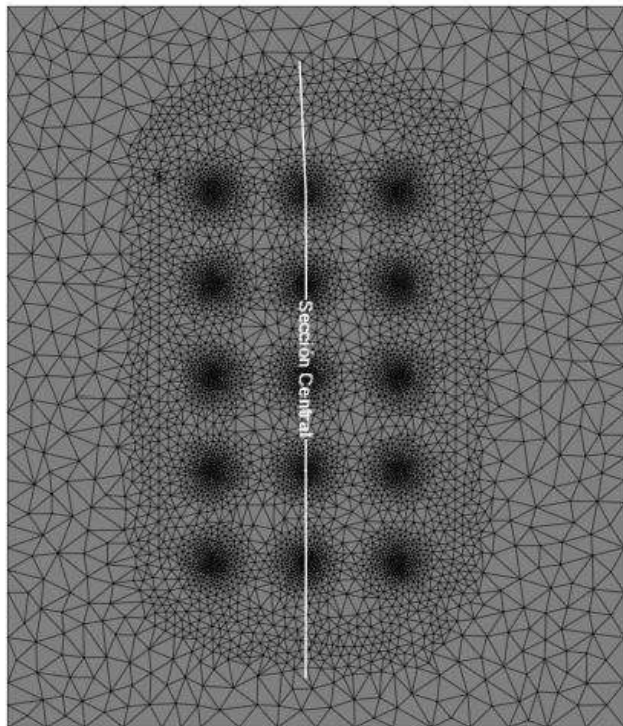
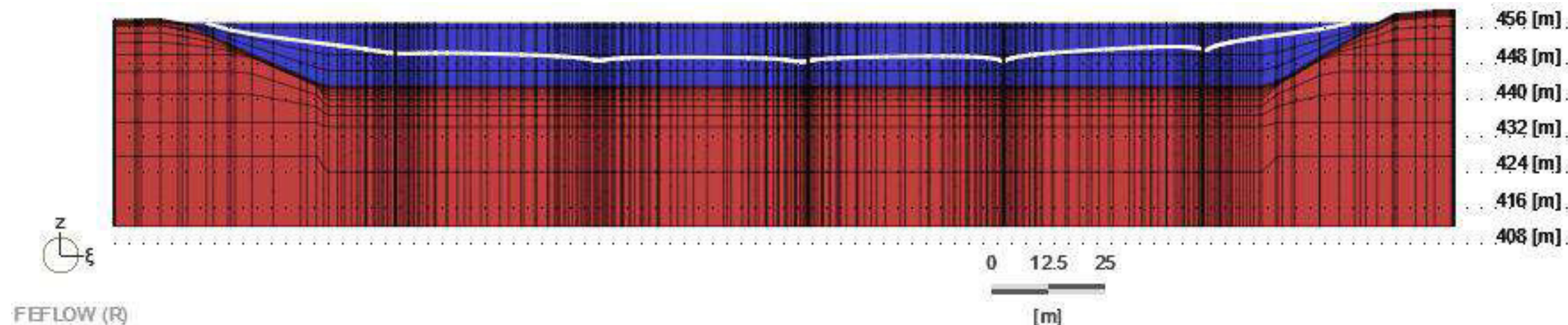


N
W S
FEFLOW (R)



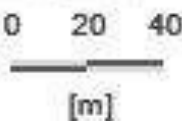
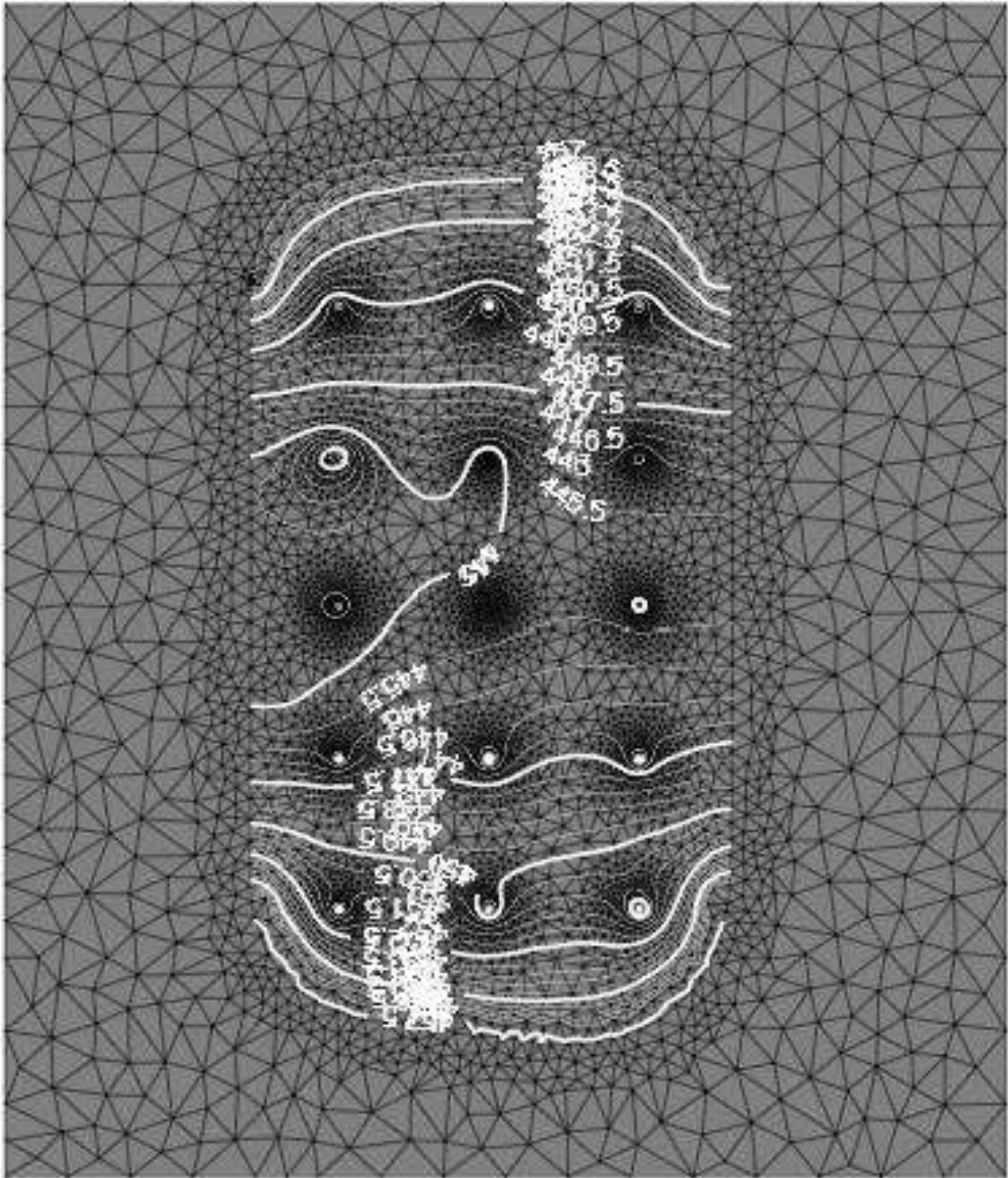
N
FEFLOW (R)

 UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA UNIDAD DE POSGRADO			
TESIS: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
CONTORNOS DEL NIVEL DE AGUA CON BOMBEO PERMANENTE –DÍA 1095 (E1)			
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS	ESCALA: 1:2000	Nov. 2024	PLANO N°:
TESISTA: MG. EDITTA HERRERA CARRANZA	DATUM: WGS 84, 18S		F_17



	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA UNIDAD DE POSGRADO			
	TESIS: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
SECCIÓN NUMÉRICA CENTRAL-RÉGIMEN TRANSITORIO DÍA 1095 (E1)				
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS		ESCALA: 1:2000	Nov. 2024	PLANO N°: F_18
TESISTA: MG. EDITTA HERRERA CARRANZA		DATUM: WGS 84, 18S		

Hydraulic head
- Isd lines -
[m]
In-line labels

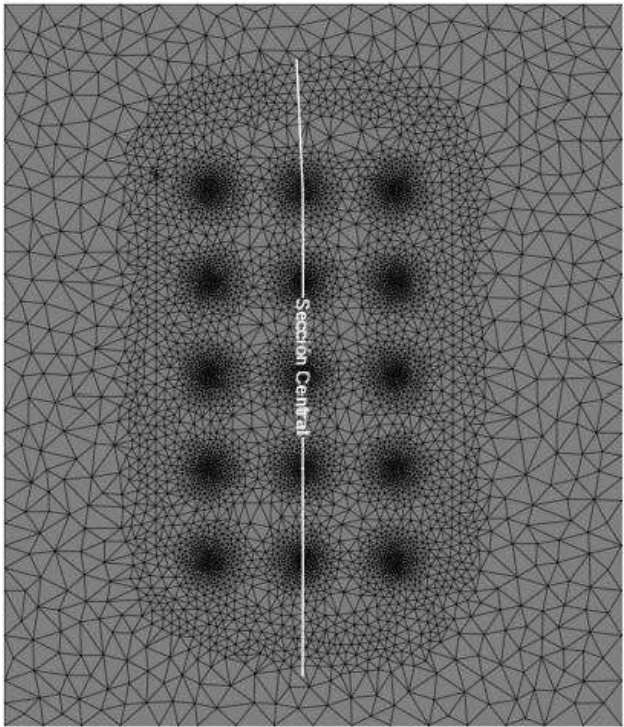
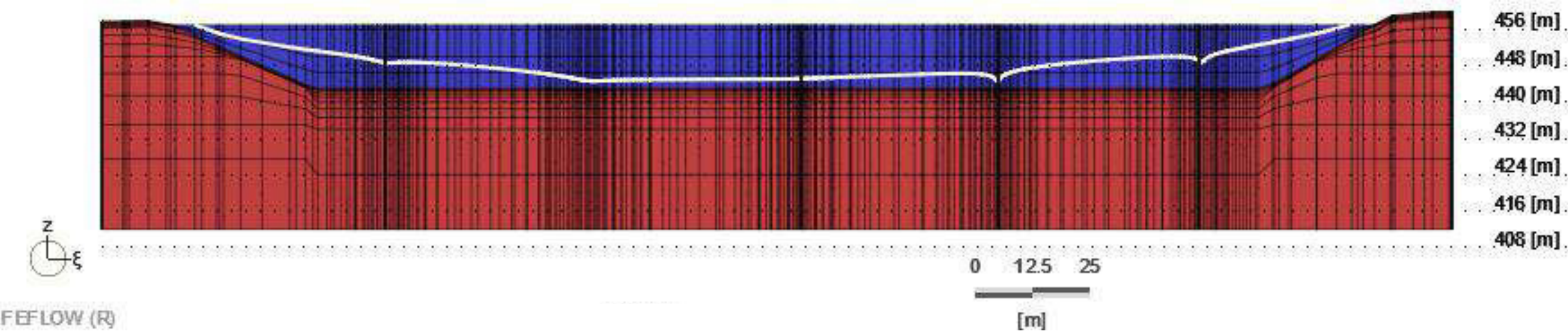


N
FEFLOW (R)

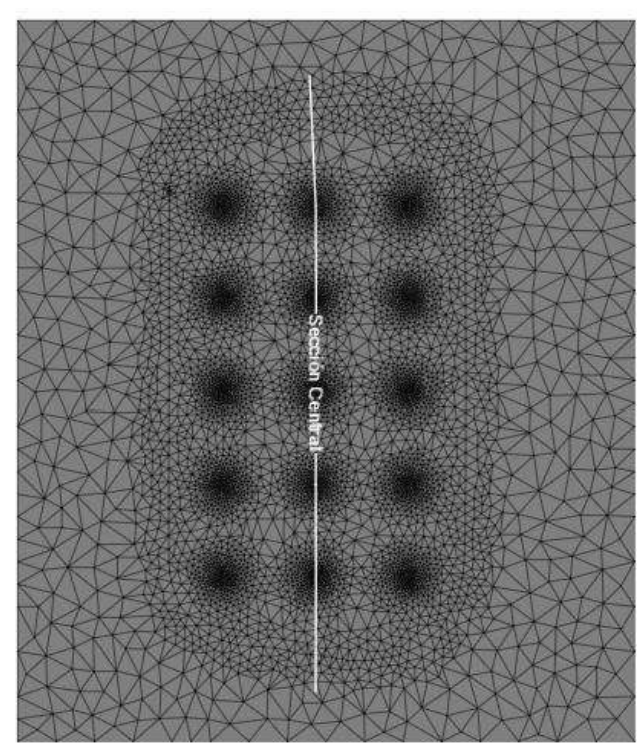
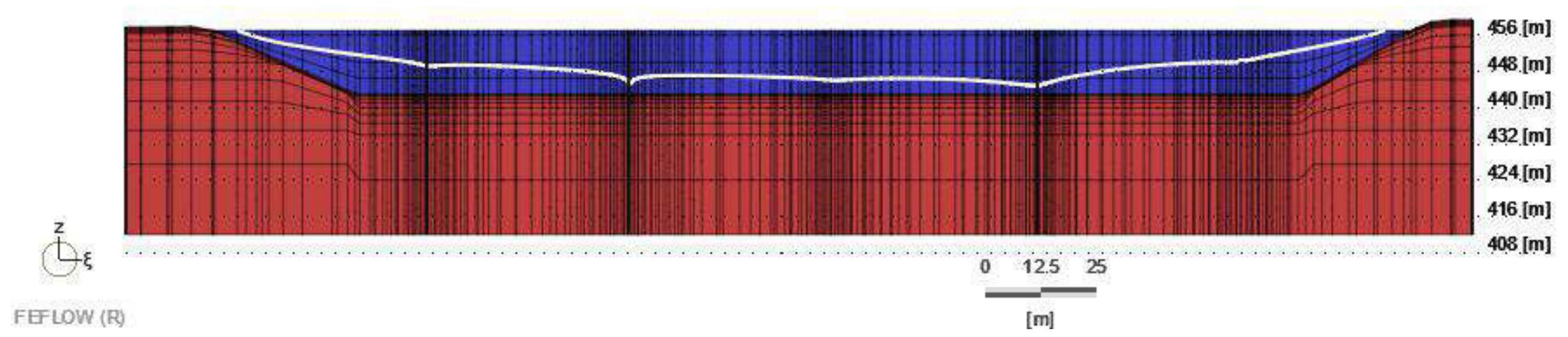


N
W S
FEFLOW (R)

	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA UNIDAD DE POSGRADO			
	TESIS: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
CONTORNOS DEL NIVEL DE AGUA CON BOMBEO PERMANENTE –DÍA 3650 (E1)				
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS		ESCALA: 1:2000	Nov. 2024	PLANO N°: F_19
TESISTA: MG. EDITTA HERRERA CARRANZA		DATUM: WGS 84, 18S		



	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS			
	UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA			
	UNIDAD DE POSGRADO			
TESIS:	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
SECCIÓN NUMÉRICA CENTRAL-RÉGIMEN TRANSITORIO DÍA 3650 (E1)				
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS		ESCALA: 1:2000	Nov. 2024	PLANO N°: F_20
TESISTA: MG. EDITTA HERRERA CARRANZA		DATUM: WGS 84, 18S		



	UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS UNIVERSIDAD DEL PERÚ, DECANA DE AMÉRICA			
	FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA UNIDAD DE POSGRADO			
	TESIS: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA EXTRACCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE JAROSITA EN EL DEPÓSITO N° 3 EN LA REFINERÍA DE ZINC CAJAMARQUILLA 2024			
SECCIÓN NUMÉRICA CENTRAL-RÉGIMEN TRANSITORIO DÍA 1095 (E5)				
ASESOR: DR. JORGE ESCALANTE CONTRERAS		ESCALA: 1:2000	Nov. 2024	PLANO N°: F_22
TESISTA: MG. EDITTA HERRERA CARRANZA		DATUM: WGS 84, 18S		