UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Estimación del Caudal de Filtraciones en Macizos Fracturados Usando
FEFLOW para las Galerías de Drenaje: Caso Derrumbe 5 – Huancavelica –
2019

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Mogrovejo Gutiérrez, Rubén Esaú (0000-0003-3254-7636)

ASESOR

Silva Dávila, Marisa Rosana (0000-0003-4910-5252)

Lima, 29 de noviembre de 2019

DEDICATORIA

Dedicado a mi familia, quien me instruyo desde muy pequeño depositando su confianza en mí, en dos ejes fundamentales que se puede brindar a un ser humano; amor y educación.

AGRADECIMIENTOS

Citar a todos aquellos que me brindaron aportes técnicos y casuísticas en la culminación de la investigación a nivel formativa, resultaría una ardua labor, debido a que esta suma de experiencia fue variada en lo académico, valioso y significativo.

En ese sentido, es imperativo agradecer en primer lugar al grupo de Aguas Superficiales de la empresa DHI PE por permitirme aplicar el código FEFLOW 7.1 herramienta utilizada para el modelado de aguas subterráneas en medios saturados, no saturados y macizos fracturados, en segundo lugar a la empresa CESEL S.A., por enriquecer mi crecimiento profesional y académico en función a la ingeniería de consulta de primer nivel con ámbito nacional; y a la empresa de generación eléctrica ELECTROPERÚ, por su apoyo y facilidad en la literatura técnica actualizada, muy provechosa para la propuesta y el desarrollo de la presente investigación.

RESUMEN

Por años, la humanidad ha intentado aproximarse a las complejidades de la naturaleza, formulando principios y herramientas numérica para la modelación del escurrimiento subterráneo, el aprovechamiento de data medida en campo (piezómetros, registros de sondeos diamantinos y aforos) y análisis estadístico, permite proyectar y/o proponer modelos de flujo (circulación) dentro de unidades geológicas, como es el caudal de filtraciones una variable dependiente, y su importancia de ser estimado y drenado adecuadamente conllevaría a establecer indicadores de monitoreo y control del caudal dentro de masas geológicas.

La información que fue recopilada e interpretada, está en función a la data obtenida de campo, los cuales permitieron proponer un modelo conceptual de flujo que considerase las características del o los macizos rocosos presentes en el Derrumbe 5, estableciéndose una primera estimación del caudal de filtraciones dentro de estas masas geológicas.

El modelo conceptual de flujo y geológico inferido, fue implementado usando el código FEFLOW 7.1, permitiendo establecer una solución de aproximación numérica bajo la técnica de elementos finitos, asignándose condiciones iniciales y valores de permeabilidad para cada masa geológica de constitución compleja, la comparación de los datos observados en campo versus los resultados del modelo numérico, permitió establecer la curva de calibración, obteniéndose resultados RMS por debajo del 5%, Anderson (1986), valor aceptable en técnicas de modelación, los valores que fueron estimados para el caudal de filtración en las galerías se estimaron en el orden 2.1 l/s a 5.0 l/s basada en la interpretación de los datos medidos en campo (aforos) versus los estimados numéricamente.

Palabras clave: Filtraciones, Macizos Fracturados, modelación de acuíferos, Aguas Subterráneas y Flujo en medios porosos.

Flow Estimation in Fractured Massifs Using FEFLOW for Drainage Galleries: Case
Collapse 5 - Huancavelica - 2019

ABSTRACT

For years, the human being has tried to approximate the complexities of nature, the principles and the numerical tools for the mode of superficial and subterranean clarification, the use of the data measured in the field (piezometers, records of diamond drilling and gauging) and its statistical treatment, allows to infer and / or predict flow models (circulation) within the geological masses, this flow of filtrations being a dependent variable, and its importance to be estimated and drained adequately, as well as to the monitoring indicators and control of the flow within geological masses.

The information that was collected and interpreted, is based on the data obtained from the field, which allowed us to propose a conceptual flow model that considered the characteristics of the rock mass (s) present in Collapse 5, and establishing a first estimate of the flow of leaks within these geological masses.

The conceptual model of inferred flow and geology was implemented using the FEFLOW 7.1 code, allowing to establish a numerical approximation solution under the finite element technique, assigning initial conditions and permeability values for each geological mass of complex constitution, comparing the data observed in the field versus the results of the numerical model, allowed to establish the calibration curve, obtaining RMS results below 5%, acceptable value in modeling techniques, the values that were estimated for the flow of filtration in the galleries were estimated in the order 2.1 l / s at 5.0 l / s based on the interpretation of the data measured in the field (aforos) versus the numerically estimated ones.

Keywords: Filtration, Fractured Massifs, aquifer modeling, Groundwater, y Flow in porous media.

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	ESTADO DEL ARTE.....	1
1.2	REALIDAD PROBLEMÁTICA	3
1.3	IDEA PRINCIPAL	4
1.4	OBJETIVOS.....	5
1.4.1	Objetivo General.....	5
1.4.2	Objetivos Específicos	5
1.5	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	5
2	MARCO TEORICO.....	6
2.1	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	6
2.2	CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	7
2.2.1	Caudal de filtración	7
2.2.2	Parámetros geo-hidráulicos	8
2.2.3	Ecuaciones dominantes en flujo subterráneo - acuíferos libres.....	15
2.3	CONSIDERACIONES EN MEDIOS FRACTURADOS	19
2.4	MÉTODOS NUMÉRICOS.....	22
2.5	MODELO CONCEPTUAL CARACTERIZACIÓN DISCRETA	24
2.6	MODELAMIENTO NUMÉRICO EN ENTORNO CUASI 3D - DERRUMBE 5	27
3	MATERIAL Y MÉTODOS.....	28
3.1	MATERIAL	28
3.1.1	Población	28
3.1.2	Muestra	29
3.2	MÉTODO.....	32
3.2.1	Nivel de Investigación	32
3.2.2	Diseño de Investigación.....	32
3.2.3	Variables de estudio y operacionalización	33
3.2.4	Técnicas e Instrumentos de recolección de datos	34
3.2.5	Técnicas de Procesamiento y Análisis de datos	35
3.3	MODELAMIENTO NUMÉRICO	36
3.3.1	Área de estudio	36

3.3.2	Data climatológica e hidrométrica.....	38
3.3.3	Periodo de retorno	44
3.3.4	Curva IDF	44
3.4	GEOLOGÍA Y SONDEOS DIAMANTINOS.....	45
3.5	BALANCE HÍDRICO LOCAL AL MODELO CONCEPTUAL	48
3.5.1	Recarga y descarga local	48
3.5.2	Modelo hidrogeológico Conceptual	50
3.5.3	Permeabilidades de las masas geológicas.....	53
3.6	MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LAS MASAS GEOLÓGICAS EN EL DERRUMBE 5	55
3.6.1	Discretización del modelo	55
3.6.2	Condiciones iniciales del modelo	55
3.6.3	Ingreso de permeabilidades y fallas al modelo.....	58
3.6.4	Calibración del modelo.....	59
3.6.5	Simulación considerando las galerías de drenaje	64
4	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	67
4.1	VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS SIN GALERÍAS DE DRENAJE	67
4.2	DISCUSIÓN.....	70
4.2.1	Primera discusión: Sin galerías de drenaje	70
4.2.2	Segunda discusión: La calibración del modelo numérico	70
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
5.1	CONCLUSIONES	71
5.2	RECOMENDACIONES	72
6	REFERENCIAS	73

ANEXOS

Anexo 1 – Planos hidrogeología

Anexo 2 – Planos de ubicación y otros

Anexo 3 – Análisis hidrológico

Anexo 4 – Ensayo compresión simple

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resumen de resultado del ensayo de compresión simple – muestra inalterada - porosidad	9
Tabla 2 Rangos de las porosidades de algunos agregados	11
Tabla 3 Resumen de permeabilidades o conductividades hidráulicas.....	14
Tabla 4 Valores de permeabilidad obtenidas de ensayos de laboratorio para las masas geológicas.....	14
Tabla 5 Variable independiente de estudio y operacionalización.	33
Tabla 6 Variable dependiente de estudio y operacionalización.	34
Tabla 7 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	35
Tabla 8 Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	36
Tabla 9 Resumen de secciones de control (aforo).....	39
Tabla 10 Variación de información de temperatura	40
Tabla 11 Rangos térmicos de medida mensual	40
Tabla 12 Estaciones pluviométricas.	41
Tabla 13 Información de data mensual de precipitación total.....	41
Tabla 14 Humedad relativa - Estación Quichuas.	43
Tabla 15 Periodo de retorno, vida útil y riesgo de falla aceptable.	44
Tabla 16.....	45
Tabla 17 Valores de los niveles de agua en piezómetros.	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama causa - efecto	4
Figura 2. Esquematzación conceptual de naturaleza compleja y tipología de agregados. ...	6
Figura 3. Ilustración conceptual de formaciones geológicas y tipos de acuíferos.	7
Figura 4. Caudal de filtración observado en medios fracturados, aforo 2.1 l/s.	8
Figura 5. Cajas porta testigo nótese el medio fracturados y porosidad alta.	9
Figura 6. Relación entre la porosidad y almacenamiento específico.	12
Figura 7. Véase el espesor del acuífero interpretado.....	13
Figura 8. Representación de un diferencial de volumen - medio poroso.	15
Figura 9. Volumen de control geometría de un acuífero libre.....	19
Figura 10. Definición ilustrativa de un macizo rocoso y su estructura.	19
Figura 11. Caja porta testigos 8/45 perforaciones diamantinas Coluvión.....	20
Figura 12. Caja porta testigos 45/45 perforaciones diamantinas Pizarra.	20
Figura 13. Variación de la velocidad y el tamaño de la apertura de la fractura.	21
Figura 14. Variación del espaciamento de la fractura con la profundidad en macizos rocosos.	22
Figura 15. Discretización en 2D de diferentes dominios.....	23
Figura 16. Representación medios porosos fracturados.	24
Figura 17. Representación teórica de estructuras con elementos discretos “Fracturas”.	25
Figura 18. Representación conceptual del modelo geológico estructural.	25
Figura 19. Vista del dominio natural del Derrumbe 5.....	26
Figura 20. Discretización 3D del dominio natural en elementos finitos - Derrumbe 5.....	26
Figura 21. Discretización 2D de corte transversal geológico en elementos finitos - Derrumbe 5.	27
Figura 22. Ubicación de la población en el entorno del embalse Tablachaca.....	29
Figura 23. Ubicación de los sondeos diamantinos – Derrumbe 5.	30
Figura 24. Aforos de caudales de filtraciones en galería.....	31
Figura 25. Aforos durante trabajos de construcción caudal 0.13 a 1.82 l/s en galería.	31

Figura 26. Ámbito del área de investigación Derrumbe 5 - Huancavelica.	38
Figura 27. Ubicación e identificación de masas geológicas en el área de investigación Derrumbe 5 - Huancavelica.	46
Figura 28. Caja porta testigos 2/45 perforación diamantina H-101.	47
Figura 29. Perfil estratigráfico inferido en base a perforaciones diamantinas, Derrumbe 5, Quichuas.	48
Figura 30. Interpretación conceptual del sistema de recarga local en el área del Derrumbe 5 - Huancavelica.	49
Figura 31. Vista cuasi 3D de agua sobre la superficie del basamento rocoso.	50
Figura 32. Vista cuasi 3D de un tramo de galería de drenaje dentro de la zona de brecha (roca fracturada).	51
Figura 33. Vista cuasi 3D del sistema de galería de drenaje dentro de roca Pizarra.	51
Figura 34. Vista cuasi 3D del nivel de agua inferido y ubicación de las galerías de drenaje dentro de las masas del Derrumbe 5.	53
Figura 35. Resumen de permeabilidades en zonas o masas geológicas en el Derrumbe 5.	53
Figura 36. Resumen de características de propiedades del suelo de las masas geológicas en el Derrumbe 5.	54
Figura 37. Resumen del tipo de material en sondeos H-101, H-102 y H-103.	54
Figura 38. Resumen de conductividades hidráulicas de cada masa geológica en el Derrumbe 5.	55
Figura 39. Condición de borde tipo I para simular el nivel freático - Derrumbe 5.	56
Figura 40. Perfil estratigráfico, nótese el nivel freático inferido.	56
Figura 41. Ingreso de planos de falla y fracturas en el dominio del modelo en el Derrumbe 5.	57
Figura 42. Refinamiento de la malla y refinamiento en las fracturas en el dominio del modelo en el Derrumbe 5.	57
Figura 43. Conductividades hidráulicas, planos de falla y discontinuidades en el dominio del Derrumbe 5.	58
Figura 44. Ingreso de planos de falla y/o discontinuidades de abertura 10 - 25 mm en el dominio del Derrumbe 5.	58
Figura 45. Detalle del espaciamiento o abertura de la falla el dominio de Derrumbe 5.	59
Figura 46. Puntos de observación dentro del dominio de Derrumbe 5.	60
Figura 47. Simulación del modelo duración 1.5 días.	60

Figura 48. Curva de calibración nivel freático duración 1.5 días, RMS = 70.15%	61
Figura 49. Simulación del modelo duración 2.0 días.	62
Figura 50. Curva de calibración nivel freático duración 1.5 días, RMS = 69.44%	62
Figura 51. Simulación del modelo duración 3.0 días.	63
Figura 52. Diferencias entre cargas hidráulica simuladas y observadas a 3.0 días.	63
Figura 53. Curva de calibración nivel freático duración 3.0 días, RMS = 2.954%	64
Figura 54. Sección típica de la galería de drenaje	64
Figura 55. Nótese la geometría de la galería y el caudal de filtraciones.	65
Figura 56. Nótese el ingreso de las galerías de drenaje en el modelo.	66
Figura 57. Simulación sin presencia de galerías de drenaje.	67
Figura 58. Curva de calibración nivel freático duración 3.0 días, RMS = 2.954%	68
Figura 59. Simulación con presencia de galerías de drenaje.	68
Figura 60. Nótese el gradiente de presiones en el contorno de las galerías.	69
Figura 61. Nótese la estimación del caudal de filtración en el entorno galerías.	69

1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación por Tesis, presenta una metodología descriptiva, tomando como base información existente en el denominado Derrumbe 5, elaborando una escala temporal del estado del arte, realidad problemática, a fin de proponer una idea central de investigación, así como los objetivos específicos, formulando la hipótesis, con ello, se preparó la metodología de la presente investigación a nivel formativa.

Seguidamente, y sobre la base de ecuaciones fundamentales que caracterizan el movimiento del fluido(agua) en medios porosos y macizos rocosos, se actualizaron las unidades hidrogeológicas sobre la base de mayores sondeos diamantinos y mediciones de los caudales in situ en el macizo fracturado, todo ello en suma, planteo la utilización de un código numérica FEFLOW 7.1 debido a su facilidad de establecer geometrías flexibles mediante la técnica de los elementos finitos, con esta información complementaria se ejecutó un análisis local sobre un dominio 2D, incorporando al nuevo modelo elementos discretos como fallas y fracturas. Por lo que, se desarrolló el capítulo de materiales y métodos, actividades que permitieron alcanzar una discusión de resultados y responder a la idea principal, así como la hipótesis del presente trabajo de investigación.

1.1 Estado del Arte

La técnica de aproximación de las ecuaciones que gobiernan el flujo de aguas subterráneas en medios porosos y fracturados, pueden ser aproximadas mediante esquemas numéricos (diferencias finitas, elementos finitos, volúmenes finitos, fractales u otros que la tecnología contemporánea permita), esta técnica numérica de elementos finitos ha permitido y seguirá aportando en aproximaciones cada vez con mayor precisión para el caudal de filtraciones en geometrías complejas (Discretizadas mediante una aproximación de modelo numérico), esta técnica muy emergente y viablemente aplicable, es posible siempre que se cuente con data de investigaciones directas, las cuales permitan inferir perfiles estratigráficos y/o lito-estratigráficos (Modelo conceptual), además de un conocimiento de la data histórica sobre el comportamiento del modelo hidrológico local, que inciden en zonas de recarga, flujo que circulan a través de canalículos y/o vacíos primarios y secundarios presentes en las masas geológicas in situ. Bear (1997).

Este movimiento del fluido(agua) a través de las masas geológicas identificadas con investigaciones directas, y dependiendo de sus características físicas(forma de los granos y dimensiones de las aberturas, como diaclasas, fracturas, fallas), concentran y cuentan con espacios (aperturas) y dependiendo de sus condiciones geométricas, y propiedades del fluido (viscosidad, densidad, temperatura), estas variaciones conllevan a un incremento y/o decremento del caudal de filtración, por ello, es fundamental, conocer el volumen de agua que converge a las galerías de drenaje.

Es así, que implícitamente cuanto más data de investigaciones directas y mediciones de parámetros hidro-meteorológicos, se pueda recopilar mayor será la aproximación del modelo conceptual geológico e hidrogeológico y el modelo numérico emergente.

Asimismo, y sobre la base de un modelo conceptual con argumentos de simplificación validados (sondeos diamantinos), se tendrá una mejor representatividad y/o aproximación de la realidad dentro de un esquema numérico, y en consecuencia una mayor precisión en la estimación determinación del caudal de filtraciones en macizos rocosos.

En la investigación, Mogrovejo (2017) en su tesis de maestría propone una modelación numérica para el estudio en la zona del Derrumbe 5, enfatizando en la caracterización hidrogeológica, y tipología de las masas geológicas presente en la superficie y en profundidad, a fin de proyectar obras civiles de estabilización, permitiendo que los parámetros de resistencia del suelo y roca de cada unidad geológica aumenten.

Luego de definir el modelo conceptual, la discretización o técnica de simplificar la geometría natural es sumamente fundamental, Garipov (2016) mediante su trabajo de investigación “Discrete fracture model for coupled flow and geomechanics”; propone un análisis de fluidos acoplados (Oil, CO₂) dentro de geometrías fracturadas, estableciendo un primer paso en delimitar geometrías fracturadas en 2D.

Seguidamente, Knabner (2014) en su investigación “Mathematical analysis of a discrete fracture model coupling Darcy in the matrix with Darcy-Forchheimer”, formula la ecuación y ecuaciones que rigen el movimiento del flujo en medio porosos y fracturado, mediante la relación de la ley de Darcy – Forchheimer, un trabajo que desarrolla el flujo dentro de una matriz porosa y dentro de fracturas.

En su investigación, Kim (2014) en su artículo “Tectonic evolution of a Paleozoic thrust fault influence the hydrogeology of a fractured rock aquifer, northeastern Appalachian

foreland”, propone un análisis sobre la influencia de fallas (aberturas) de rocas metamórficas fracturadas (en nuestro caso, tenemos rocas metamórficas Esquistos), y es aplicado a un caso real, es un trabajo de investigación basado en mediciones de datos de campo y planteamiento del modelo conceptual.

Por otro lado, Patiño (2004) en su investigación “Convección de calor intersticial en el flujo de fluidos a través de medios porosos”, propone una metodología teórica – experimental para determinar los coeficientes intersticiales en el flujo de agua a través de medios porosos.

Sudipta (2016) en su investigación “Fluid Flow Simulation in Fractured Reservoirs”, analizo las condiciones del fluido en matrices fracturadas, estableciendo un entendimiento del flujo de fluidos en medios fracturados y aplicando esquemas numéricos en diferencias finitas.

Finalmente, las técnicas aplicadas al modelado de geometrías complejas siempre estarán fuertemente vinculada a los datos de mediciones directas, como se indicó anteriormente, además de la experiencia en modelación numérica, y juicios de expertos quienes nos aportan la casuística para el desarrollo del objetivo principal de la tesis.

1.2 Realidad problemática

Las masas geológicas que integran los Derrumbes, están fuertemente vinculadas a las variaciones de las características de las propiedades físicas de suelos y rocas, geometrías que en contacto con la presencia del fluido (agua), tienden a una variación de sus parámetros geotécnicos, dependiendo de la magnitud de estos cambios (formas y textura de los suelos y/o rocas, persistencia e intensidad de lluvia, intervención humana), puede derivarse en un incremento del agua dentro de los vacíos, por esta razón es fundamental estimar el caudal de filtración que puede circular a través de las masas geológicas (macizos fracturados).

Figura 1. Diagrama causa - efecto

Fuente: Elaboración propia, (2017).

1.3 Idea principal

¿Qué caudal se drena a través del macizo rocoso hacia la galería de drenaje?

Hipótesis

El modelo conceptual y numérico permitirán calcular el caudal de filtraciones a través del macizo rocoso hacia la galería de drenaje, y validarlo con los registros de aforo.

Hipótesis alterna

El modelo numérico permitirá representar la complejidad de la naturaleza.

Variables dependientes

El caudal de filtración a través del macizo fracturado hacia las galerías de drenaje.

Variables independientes

Gradiente hidráulico, área transversal a la dirección del flujo, y permeabilidad, características del agua (densidad, viscosidad) y del macizo rocoso (forma, textura, estratigrafía).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Estimar el caudal de filtraciones en macizos fracturados, que convergen a la galería de drenaje usando el modelo FEFLOW.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Recopilar información precedente, y tratamiento digital de la información básica (topografía, hidrología, balance hídrico, sondeos diamantinos)
- Plantear el modelo conceptual geológico e hidrogeológico
- Plantear el modelo numérico para estimar el caudal de filtraciones, calibrar y ejecutar el análisis de sensibilidad
- Validar resultados del modelo propuesto.

1.5 Metodología de la Investigación

La tesis se desarrollará según la siguiente descripción:

- Introducción, se presenta los antecedentes, problemática, objetivos, y descripción de los capítulos de la tesis.
- Capítulo I Marco teórico, se presenta una revisión de la bibliografía pertinente.
- Capítulo II Materiales y métodos, se presenta las metodologías de análisis y planteamiento de los modelos conceptual in situ y numérico, que permitirá determinar el caudal de filtraciones.
- Capítulo III Modelamiento numérico.
- Capítulo IV Validar y discutir los resultados, comparación de los valores que fueron aproximados por el modelo numérico con los obtenidos en campo, los valores del caudal de filtración y nuevos ejes de conocimiento.
- Conclusiones y recomendaciones.

2 MARCO TEORICO

2.1 Unidades hidrogeológicas

Los agregados naturales son depósitos geológicos que pueden presentar en sus fases agua, y aire, con textura permeable, y con la capacidad de retener y transmitir agua. Un análisis de la combinación suelo-agua-roca y otras formaciones se caracterizan en tipología de acuíferos dominantes (véase Figura 2).

Figura 2. Esquematización conceptual de naturaleza compleja y tipología de agregados.

Fuente: Diersch, (2014).

- a. Acuífero Libre:** Unidad geológica con capacidad de retener y permitir el movimiento del agua (estratos granulares, otros), con alta permisividad y facilidad de ser drenados y aprovechados.
- b. Acuitardos:** Unidades geológicas con capacidad de retener agua en cantidades aprovechables, y con poca capacidad de circulación. Suelen denominarse estratos semipermeables (materiales finos, otros), su facilidad de drenaje es baja a media.
- c. Acuicludos:** Unidades geológicas capaces de retener agua en volúmenes importantes, con poca o escasa facilidad de transmitirla, tienen un drenaje muy pobre. El volumen

de agua, se ubica en los intersticios de la unidad (agregados naturales finos, limo-arcillosos, otros.).

- d. Acuífugos:** Unidades geológicas con una muy poca capacidad de retener y liberar o drenar agua. Los agregados naturales del tipo rocoso como granitos y gneises, y rocas sedimentarias con compactación alta sin oquedades; estas unidades en la naturaleza suelen ser impermeables a menos que presenten planos de falla y fracturas.

Figura 3. Ilustración conceptual de formaciones geológicas y tipos de acuíferos.

Fuente: Electrop Perú S.A., (2014).

2.2 Conceptos fundamentales

2.2.1 Caudal de filtración

El agua del suelo y roca está sujeta a condiciones de presión o carga hidráulica, porosidad y permeabilidad, cuando un acuífero está a condición libre sus vacíos están conectados (E. Custodio, 2001).

En la complejidad de la naturaleza, se presentan una combinación de estratos, unas infrayacen y suprayacen creando una diversidad, esto aunado a la presencia de agua, generado zonas particulares denominados espesores no saturados y saturados. En estratos intermedios se denota una franja capilar. El manto freático es el lugar geométrico de la zona vadosa de un estrato libre en el cual está presente presión atmosférica. Por otro lado, el agua que se encuentra en la zona saturada por debajo del manto freático se denomina agua subterránea; y el espesor situado por debajo de la zona de saturación, este volumen de agua tiene un límite inferior con un estrato donde el material presenta una compactación alta

conllevar a una presencia de índice de vacíos reducidos, sin conexión intergranular que disminuyen el movimiento del agua percollar a profundidades mayores.

Figura 4. Caudal de filtración observado en medios fracturados, aforo 2.1 l/s.

Fuente: Elaboración Propia, (2014).

2.2.2 Parámetros geo-hidráulicos

Investigar un dominio intergranular conlleva a un análisis microscópico de los vacíos e intersticios por donde el agua ejerce su movimiento, su estudio es complejo y numéricamente imposible. Por lo que, la teoría nos presenta leyes constitutivas en una escala macroscópica que encierra el análisis de este fenómeno sobre la base de un medio continuo con parámetros geo-hidráulicos definidos siendo estos: permeabilidad, porosidad, rendimiento específico y el coeficiente de almacenamiento. Cuando una masa geológica se encuentra saturado de agua, sus vacíos se encuentran conectados entre sí, con una tipología de acuífero libre.

Figura 5. Cajas porta testigo nótese el medio fracturados y porosidad alta.

Fuente: Elaboración Propia, (2014).

a. Porosidad:

La definición de mecánica de suelo, cita que es un parámetro intrínseco en los agregados naturales, y conlleva a relacionar el volumen de vacíos o huecos entre el volumen total del medio intergranular (suelos y/o rocas). La relación de la porosidad y sus resultados en ensayos de suelos y/o rocas, pueden leerse en la Tabla 1 y Anexo 4.

Tabla 1

Resumen de resultado del ensayo de compresión simple – muestra inalterada - porosidad

Características del espécimen	Tipo Muestra inalterada
Porosidad	15,8%
Densidad seca	2,31 gr/cm ³
Saturación inicial	69,3%
Relación de vacíos	0,19
Densidad inicial	2,42 gr/cm ³
Densidad final	2,41 gr/cm ³

Fuente: Elaboración Propia, (2014).

La representación matemática de la porosidad es:

$$h (\%) = \left(\frac{V_v}{V} \right) * 100 \quad (1.2)$$

donde:

η : Porosidad,

V_v : Volumen de vacíos (L^3),

V : Volumen total del medio intergranular.

En la Tabla 2 se muestran rangos de la porosidad, y dependen del tipo de agregado natural o depósito geológico y su exposición a la meteorización.

El ciclo de las rocas los agregados de grano grueso poco consolidados y baja cementación presentan rangos máximos; lo que no sucede con rocas ígneas o metamórficas con bajo grado de fracturación que suelen tener valores de porosidad con rangos mínimos.

Finalmente, la génesis de la porosidad en los agregados naturales, están fuertemente ligados a los cambios de geodinámica interna y externa, que tallan y modelan los depósitos geológicos generando porosidad intrínseca y doble porosidad (fracturas).

Tabla 2
Rangos de las porosidades de algunos agregados

Tipo de agregado	Porosidad (%)
Agregados sueltos	
Gravel coarse (gruesa)	12 – 28
Gravel media (media)	13 – 32
Gravel fine (fina)	21 – 34
Sand - gravel	20 – 39
Sand coarse (gruesa)	20 – 35
Sand media (media)	15 – 39
Sand fine (fina)	10 – 43
Clay – sand	3 – 12
Agregados macizos	
Roca sedimentaria (arenisca)	30 – 5
Roca sedimentaria (caliza)	40 – 0
Roca sedimentaria caliza (cárstica)	40 – 0
Roca metamórfica (pizarras)	10 – 0
Roca (Basalto fracturado)	50 – 5
Roca fracturada	10 – 0
Roca densa	5 – 0
Roca Granito alterado	57 – 34

Fuente: Adaptado de Custodio (2001).

Figura 6. Relación entre la porosidad y almacenamiento específico.

Fuente: Jacob Bear, (1987).

b. Coeficiente de almacenamiento:

Es definido como la variación del volumen de agua que libera o almacena un acuífero por unidad de superficie y por cambio de potencial. El volumen de agua liberado del acuífero debido cuando el potencial piezométrico decrece 1 m, cuya ecuación es:

$$\mathcal{S} = g \cdot d \cdot (m_{ef} \cdot \beta_{liq} + \beta_{roca}) \quad (1.3)$$

donde:

g : gravedad (9.81 m/s²),

d : espesor del estrato saturado,

m_{ef} : porosidad eficaz,

$\beta_{liq}, \beta_{roca}$: índice de compresibilidad del agua y roca.

Figura 7. Véase el espesor del acuífero interpretado.

Fuente: Electrop Perú S.A., (2014).

c. Permeabilidad:

Es la variable independiente que ofrece la permisividad a la circulación o movimiento del agua, su magnitud depende de la forma de los intersticios o granos, y su factor de forma. Su expresión numérica se relaciona con el diámetro promedio de los tamaños de los sólidos en el agregado natural y una constante de proporción intrínseca del medio -González de Vallejo, (2002)-, es decir:

$$K = Cd^2 \quad (1.1)$$

donde:

C = forma de los granos,

d = tamaño medio de los sólidos.

En la Tabla 3 y 4 siguientes se pueden observar rangos típicos de la permeabilidad en diferentes agregados naturales. Este parámetro tiene una utilización de manera cualitativa a fin de describir una de las propiedades de los suelos en un depósito geológico y su facilidad al paso del fluido.

Tabla 3

Resumen de permeabilidades o conductividades hidráulicas.

Tipo de agregado	Conductividad hidráulica (Darcy)
Agregados sueltos	
Gravel	$10^2 - 10^5$
Sand	$10^2 - 10^3$
Sand very fine	$10^{-2} - 10^2$
Loess	$10^{-4} - 10$
Clay	$10^{-7} - 10^{-4}$
Agregado macizos	
Roca sedimentaria (arenisca)	$10^{-5} - 10^{-1}$
Roca sedimentaria (caliza)	$10^{-4} - 10^{-1}$
Roca sedimentaria caliza (cárstica)	$10^3 - 10^{-1}$
Roca metamórfica (pizarras)	$10^{-8} - 10^{-4}$
Roca (Basalto fracturado)	$10^3 - 10^{-2}$
Roca fracturada	$10^{-3} - 10$
Roca densa	$10^{-8} - 10^{-5}$

Fuente: Adaptado de Custodio (2001).

Tabla 4

Valores de permeabilidad obtenidas de ensayos de laboratorio para las masas geológicas.

Tipo de Material	Permeabilidad (cm/s)
Relleno contrafuerte	1.00E-00
Sedimentos arenosos	1.00E-01
Depósitos aluviales	1.34E-02
Material de derrumbe	2.00E-02
Zona de brecha de falla	4.07E-03
Pizarra fracturada	1.00E-02

Fuente: Electroperú S.A., (2014).

2.2.3 Ecuaciones dominantes en flujo subterráneo - acuíferos libres

El movimiento del flujo subterráneo se rige por la ecuación constitutiva de Darcy, así como el principio de la conservación de masa. Este análisis se puede plantear desde un volumen determinado y representativo dentro de un dominio poroso (ver Figura 8), entonces se puede proponer dentro de ese volumen la conservación de la masa, sería:

$$(\text{Flujo de masa ingresa}) - (\text{flujo de masa saliente}) + (\text{Fuente/sumidero}) = (\text{Almacenamiento})$$

Fetter (1989), y Bear (1997), citan que este enunciado del principio de conservación de masa puede relacionarse mediante una formulación matemática, a fin de derivarse en una expresión fundamental y diferencial que logre describir el flujo, y su transporte.

Asumiendo:

- Acuífero homogéneo e isotrópico y libre.
- Fluido tiene un grado de libertad en las direcciones principales del volumen.

Figura 8. Representación de un diferencial de volumen - medio poroso.

Fuente: Fetter, (1989).

- Densidad del agua ($\rho = cte$).
- Ingreso de flujo en elemento diferencial de control; $\rho q_x (d_y d_z)$ en las direcciones

principales.

Por lo que, la masa que ingresa al volumen de control en el eje X sería:

$$\rho q_x(d_y d_z) \quad (1.4)$$

Entonces, el flujo saliente del diferencia de control para la dirección X:

$$\rho q_x(d_y d_z) + \frac{\partial(\rho q_x)}{\partial x} d_x d_y d_z \quad (1.5)$$

De modo similar, para el eje Y:

$$\rho q_y(d_x d_z) \quad (1.6)$$

$$\rho q_y(d_x d_z) + \frac{\partial(\rho q_y)}{\partial y} d_y d_x d_z \quad (1.7)$$

Por último, en el eje Z:

$$\rho q_z(d_x d_y) \quad (1.8)$$

$$\rho q_z(d_x d_y) + \frac{\partial(\rho q_z)}{\partial z} d_z d_x d_y \quad (1.9)$$

Combinando las ecuaciones (1.4) a (1.9), se tiene:

$$- \left(\frac{\partial(\rho q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho q_z)}{\partial z} \right) (d_x d_y d_z) \quad (1.10)$$

Entonces el agua dentro del volumen de control:

$$h (d_x d_y d_z) \quad (1.11)$$

Masa inicial de agua:

$$\rho h (d_x d_y d_z) \quad (1.12)$$

Respecto al volumen del material sólido:

$$(1 - h)(d_x d_y d_z) \quad (1.13)$$

Se deduce una ecuación de variación de masa M con el tiempo:

$$\frac{\partial}{\partial t} (M) = \frac{\partial}{\partial t} (\rho h d_x d_y d_z) \quad (1.14)$$

Luego, tenemos la variación de la presión en el volumen de control, y están sujetos a variaciones, siendo esta ecuación:

$$\beta_{liq} dP = \frac{d\rho}{\rho} \quad (1.15)$$

El elemento es susceptible a variaciones de presión, asumimos cambios en el eje Z. Entonces, la compresibilidad del elemento (α) es;

$$\alpha dP = \frac{d(d_z)}{d_z} \quad (1.16)$$

Asimismo, el elemento puede comprimirse y/o expandir, y considerando que el diferencial de control (V_s) constante, y que existe deformación en Z, se define:

$$dV_s = 0 = d[(1-h)(d_x d_y d_z)] \quad (1.17)$$

$$d_n = \frac{(1-h)d(d_z)}{d_z} \quad (1.18)$$

Por otro lado, la variación de la presión en el elemento:

$$dP = P_0 + \rho gh \quad (1.19)$$

donde:

P_0 : Presión atmosférica,

g : gravedad (9.81m/s²).

Combinando las expresiones (1.15) y (1.16) obtenemos:

$$d_n = (1-h)\alpha\rho g dh \quad (1.20)$$

Y asumiendo que dx y dy constantes, la expresión (1.14) quedaría:

$$\frac{\partial}{\partial t}(M) = \left[\rho h \frac{\partial(d_z)}{\partial t} + \rho d_z \frac{\partial h}{\partial t} + h d_z \frac{\partial \rho}{\partial t} \right] d_x d_y \quad (1.21)$$

Finalmente, se obtiene una expresión para el flujo subterráneo:

$$-\left[\frac{\partial(q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(q_z)}{\partial z} \right] \rho d_x d_y d_z = (\alpha\rho g + h\beta\rho g) \rho d_x d_y d_z \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1.22)$$

A la expresión (1.22) aplicando la ley constitutiva de Darcy, se obtiene:

$$q = -k \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (1.23)$$

donde:

q : Flujo (m/s),

k : Permeabilidad (m/s),

h : Altura piezométrica (m).

Sobre la base de la ecuación de Darcy y con la expresión general de flujo subterráneo (Ec. 1.22), se obtiene una expresión que describe el movimiento de un fluido compresible en estado transitorio para un medio heterogéneo y anisótropo.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) = Ss \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + W \quad (1.24)$$

donde:

Ss : almacenamiento específico (1/m),

t : tiempo (s)

W : flujo volumétrico por unidad de volumen (1/m),

x : coordenadas cartesianas (m).

Una relación similar a la ecuación citada puede derivarse en el caso de dos dimensiones, como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) = S \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + W \quad (1.25)$$

donde:

T : transmisividad (m²/s),

b : espesor saturado (m),

S : coeficiente de almacenamiento (adimensional),

W = flujo volumétrico por unidad de área (m/s).

Debe resaltarse esta expresión puede aplicarse a un acuífero libre, suponiéndose que el flujo tiene un movimiento paralelo y las líneas equipotenciales son verticales, y el coeficiente de almacenamiento y específico (S_y) son iguales.

Por otro lado, en un medio libre, el espesor saturado cambia si la profundidad del nivel freático lo hace. Por lo que, su capacidad de transmitir varía en la escala de espacio y tiempo.

Figura 9. Volumen de control geometría de un acuífero libre.

Fuente: Diersch, (2014).

2.3 Consideraciones en Medios Fracturados

La presión de agua en un macizo rocoso, produce un empuje que tiende a separar la discontinuidad y reduciendo la tensión normal véase Figura 10.

Figura 10. Definición ilustrativa de un macizo rocoso y su estructura.

Fuente: Ramírez Oyanguren (2004).

Generalmente, la circulación de agua en los macizos rocosos se realiza a lo largo de las discontinuidades (permeabilidades secundarias), excepto en las rocas sedimentarias que cuentan con un alto grado de índice de poros, en los cuales el agua circula por la propia roca (permeabilidad primaria). Esta permeabilidad necesita que los estratos permeables se conecten unos con otros, frecuentemente a través de discontinuidades. La permeabilidad secundaria es más propia de los macizos de rocas ígneas y metamórficas, por lo que la permeabilidad en los macizos suele ser muy anisotrópica. Véase siguientes figuras de sondeos diamantinos.

Figura 11. Caja porta testigos 8/45 perforaciones diamantinas Coluvión.

ESTUDIO INTEGRAL DEL EMBALSE TABLACHACA			
Contrato No. 116041-ELECTROPERU			
PERFORACIÓN: H-101	PROFUNDIDAD: DE	21,70 m.	A
LOCALIZACIÓN: DERRUMBE 5		25,65 m.	
CAJA: 8 DE: 45	FECHA: MARZO, 2011

Fuente: CESEL, (2011).

Figura 12. Caja porta testigos 45/45 perforaciones diamantinas Pizarra.

ESTUDIO INTEGRAL DEL EMBALSE TABLACHACA			
Contrato No. 116041-ELECTROPERU			
PERFORACIÓN: H-101	PROFUNDIDAD: DE	157,50 m.	A
LOCALIZACIÓN: DERRUMBE 5		160,15 m.	
CAJA: 45 DE: 45	FECHA: MARZO, 2011

Fuente: CESEL, (2011).

Véase la ecuación 1.26 propuesta para la conductividad hidráulica, por Doménico and Schwartz.

$$K = \left[\frac{\rho_w g a^2}{12\mu(1+C(x)^n)} \right] \quad (1.26)$$

donde:

a : apertura de la fractura,

ρ_w : densidad,

g : gravedad (9.81m/s^2),

μ : viscosidad dinámica,

$C(x)$: constante depende de las discontinuidades en la dirección del eje “x”.

Figura 13. Variación de la velocidad y el tamaño de la apertura de la fractura.

Fuente: Singhal, (2010).

Figura 14. Variación del espaciamiento de la fractura con la profundidad en macizos rocosos.

Fuente: Singhal, (2010).

2.4 Métodos numéricos

Existen una amplia casuística de problemas prácticos y aplicados a la ingeniería que cuentan con una solución aproximada, y esta aproximación se atribuye a la complejidad del medio natural, el manejo de las ecuaciones diferenciales parciales y/o dificultades generadas por las condiciones de contorno iniciales. A fin de establecer algunas soluciones a estos problemas de geometría compleja en unidades geológicas se utilizan herramientas numéricas computacionales.

Como un primer análisis antes del procedimiento numérico es la discretización (el arte de dividir el dominio o área de investigación). Es una rutina que recomienda la división del dominio en una cantidad finita (pequeños elementos y nodos), véase Figura 15.

Figura 15. Discretización en 2D de diferentes dominios.

Fuente: Diersch, (2014).

La tecnología actual, permite tener algunos métodos numéricos: como es el caso de diferencias finitas, elementos finitos y otros. Las diferencias finitas, permite que la ecuación diferencial sea descrita por nodo, así como las derivadas que son reemplazadas por ecuaciones diferenciales; logrando un sistema de ecuaciones lineales. Respecto a la técnica de los elementos finitos utiliza integrales, creando un sistema de ecuaciones algebraicas, véase Figuras 15, 17 y 18.

Un primer modelo, seleccionado y aplicado en el presente trabajo de investigación, sería el FEFLOW, código numérico muy utilizado para el modelado de agua subterránea, y uno con gran aceptación mundial. El código proporciona un avanzado entorno de modelado utilizando representaciones 2D y 3D (véanse siguientes figuras), este código será aplicado al trabajo de investigación, en la estimación del caudal de filtración en sistemas geológicos complejos para una obra de ingeniería civil (galerías) de gran impacto a la sociedad.

El entorno de trabajo de este código para la modelación del flujo subterráneo permite tener características, y herramientas sofisticadas en el análisis de algoritmos, ofreciendo módulos para la evaluación del flujo, como:

- Medios fracturados.
- Densidad variable.
- Permanente y no permanente.

- No vadosa, y vadosa.
- Transporte de masa y calor.

Los entonos de la presentación de figuras del código generan el desarrollo de mesh (mallas) en esquemas de los elementos finitos, y permiten ingresar propiedades, características y condiciones de frontera. Tiene un módulo de apoyo con soporte en ArcInfo –para la importación de geometría– y algoritmos de generación de mallas, que permiten la interpretación de la data en entornos cuasi 3D y generación de secciones transversales y transporte de masa y calor, véase Figura 16 y 17.

Figura 16. Representación medios porosos fracturados.

Fuente: Diersch, (2014).

2.5 Modelo Conceptual Caracterización Discreta

En el ciclo de las rocas aparecen muy comúnmente atravesadas por distintos caracteres geológicos estructurales y discontinuidades de variado origen geológico, como, por ejemplo; estratificación, esquistosidad, pliegues, fallas y juntas o diaclasas. Al conjunto, de estas discontinuidades (elementos discretos) que atraviesan la roca se le suele denominar estructura del macizo rocoso. Véanse las siguientes figuras.

Figura 17. Representación teórica de estructuras con elementos discretos “Fracturas”.

Fuente: Diersch, (2014).

Figura 18. Representación conceptual del modelo geológico estructural.

Fuente: Electroperú, (2014).

Figura 19. Vista del dominio natural del Derrumbe 5.

Fuente: Google Earth, Elaboración propia, (2019).

Figura 20. Discretización 3D del dominio natural en elementos finitos - Derrumbe 5.

Fuente: Elaboración propia, (2019).

Figura 21. Discretización 2D de corte transversal geológico en elementos finitos - Derrumbe 5.

Fuente: Elaboración propia, (2019).

2.6 Modelamiento numérico en entorno cuasi 3D - Derrumbe 5

Un modelamiento numérico fue ejecutado con las condiciones observadas en campo hasta el año 2010, en la cual se presentaron principales incoherencias en geometría, conductividad hidráulica, entre otros (Mogrovejo, 2017). En dicha malla (mesh) estuvo compuesta por 350,000 elementos y 29 548 nodos, y el modelo tridimensional estaba formado por cinco capas o estratos y una cantidad nueve (09) sondeos diamantinos, se utilizaron para generar las comparaciones entre los datos observados y los estimados por el modelo numérico.

Apoyado en la cita Knabner (2014) en su investigación “Mathematical analysis of a discrete fracture model coupling Darcy in the matrix with Darcy-Forchheimer”, formula la ecuación y ecuaciones que rigen el movimiento del flujo en medio porosos y fracturado, mediante la relación de la ley de Darcy – Fochheimer, en su pág. 3 y siguientes, indica la importancia de zonificar el entorno del dominio de las fracturas.

Por lo que, en esta investigación 2019, se discretizo un nuevo dominio en 2D incorporando los planos de fallas y las fracturas en un dominio zonificado y reducido (refinado), y se obtuvieron los caudales que fueron estimados In Situ en el basamento rocoso fracturado (objetivo de la presente Tesis) datos que fueron registrados durante la fase de construcción en el año 2014 (agradecimiento a Electroperú S.A.), para ello véase Figuras 21, 24, 41 y 42, lo cual, conllevó a un perfil estratigráfico de tres estratos dominantes “coluvial, brecha, basamento rocoso”, con un nuevo mesh en 2D integrado por 149 086 elementos y cantidad de nodos de 74 986, véase Figura 38, y para el proceso de calibración se utilizó 25 sondeos diamantinos, a fin, de establecer la comparación entre los datos observados y estimados por el modelo numérico.

3 MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 Material

3.1.1 Población

“La población, o en términos más precisos población objetivo, es un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación”. (Arias, 2012, Pg.81).

Población: Todos los acuíferos en macizos rocosos fracturados identificados en base al mapeo geológico local y las investigaciones directas en el derrumbe 5, como; sondeos diamantinos en la zona del embalse Tablachaca, véase Grafica siguiente.

Figura 22. Ubicación de la población en el entorno del embalse Tablachaca.

Fuente: Elaboración propia, (2019).

3.1.2 Muestra

La muestra para los cálculos y análisis es seleccionada en base a la importancia medida In Situ e información existente; en pocas palabras se eligió de acuerdo con criterio de obtener una sección conceptual geológica e hidrogeológica, de esta manera Borja (2016), indica lo siguiente:

Es obvio que, si cada uno de los sujetos de estudio de una investigación tuviera exactamente las mismas características, el tamaño requerido de la muestra sería solamente de uno; pero al no presentarse el caso, necesitamos establecer un tamaño de muestra mayor de uno, pero menor que la población total o universo. (Pg.31).

La muestra son las mediciones de los caudales de filtraciones en los acuíferos fracturados, que han sido identificado en base a los resultados In Situ de los sondeos diamantino, como: H-101, H-102, H-103, H-104 y H-100 y otras en la zona del deslizamiento denominado Derrumbe 5, siendo estos con diferentes características hidrogeológicas.

Figura 23. Ubicación de los sondeos diamantinos – Derrumbe 5.

Fuente: Electoperú, (2011).

Figura 24. Aforos de caudales de filtraciones en galería.

Item	Tramo (m)	Diámetro (mm)	Progresiva (km)	Tiempo Avance (Min.)	Presión de perf. (Bar)	Descripción litológica	Roca Tipo	Sostenimiento	Característica Terreno	Color de agua	Caudal de agua l/s eg.	Nº muestra
	0.00		0 + 333.03									
1	0.85	76	0 + 332.18	0'50"	5	Pizarra Carbonosa, areniscas	III	Sh, PP			Húmedo	
2	1.50	76	0 + 330.68	4'27"	5	Pizarra Carbonosa, areniscas	III	Sh, PP			Húmedo	
3	1.50	76	0 + 329.18	4'51"	5	Pizarra Carbonosa, areniscas	III - IV	Sh, PP, PS.			Húmedo	
4	1.50	76	0 + 327.68	3'02"	6	Pizarra Carbonosa, areniscas, falla	IV	Sh, PS.		Gris negrusca	Filtración	
5	1.50	76	0 + 326.18	1'54"	7	Pizarra Carbonosa, cuarzoza.	IV	Sh, PS.		Gris negrusca	0.13	
6	1.50	76	0 + 324.68	3'16"	7	Pizarra Carbonosa, cuarzoza, falla	IV	Sh, PS, M	Cuarzo granular	Gris negrusca	0.13	
7	1.50	76	0 + 323.18	3'19"	7	Pizarra Carbonosa, cuarzoza, falla	IV	Sh, PS, M	Cuarzo granular	Gris negrusca	0.13	
8	1.50	76	0 + 321.68	3'47"	7	Pizarra Carbonosa, cuarzoza, falla	IV	Sh, PS, M	Cuarzo granular	Gris negrusca	0.19	1
9	1.50	76	0 + 320.18	2'59"	7	Pizarra Carbonosa, areniscas	IV-III	Sh, PS, M		Gris negrusca	0.19	
10	1.50	76	0 + 318.68	3'35"	7	Pizarra Carbonosa, cuarzoza, falla	V	Sh, PS, M, C	Cuarzo granular	Gris negrusca	0.19	
11	1.50	76	0 + 317.18	2'49"	7	Pizarra Carbonosa, areniscas	IV-III	Sh, PS, M		Gris negrusca	0.19	
12	1.50	76	0 + 315.68	3'58"	7	Pizarra Carbonosa, areniscas, falla	IV	Sh, PS, M		Gris negrusca	0.21	2
13	1.50	76	0 + 314.18	3'11"	7	Pizarra Carbonosa, areniscas, falla	IV	Sh, PS, M		Gris negrusca	0.21	
14	1.50	76	0 + 312.68	3'44"	7	Pizarra Carbonosa, areniscas, falla	IV	Sh, PS, M		Gris negrusca	0.21	
15	1.50	76	0 + 311.18	3'10"	7	Pizarra Carbonosa, areniscas, falla	IV	Sh, PS, M		Gris negrusca	0.21	
16	1.50	76	0 + 309.68	3'52"	7	Pizarra Carbonosa, areniscas, falla	IV	Sh, PS, M		Gris negrusca	0.38	3
17	1.50	76	0 + 308.18	3'54"	7	Pizarra Carbonosa, cuarzoza, falla	IV	Sh, PS, M, C	Cuarzo granular	Gris negrusca	1.82	
18	1.50	76	0 + 306.68	5'22"	7	Pizarra Carbonosa, cuarzoza, falla	V	Sh, PS, M, C	Cuarzo granular	Gris negrusca	1.82	
19	1.50	76	0 + 305.18	4'09"	7	Pizarra Carbonosa, cuarzoza, falla	V	Sh, PS, M, C	Cuarzo granular	Gris negrusca	1.82	
20	1.50	76	0 + 303.68	3'05"	7	Pizarra Carbonosa, areniscas, falla	IV	Sh, PS, M		Gris negrusca	1.11	
21	1.50	76	0 + 302.18	3'17"	7	Pizarra Carbonosa, areniscas, falla	IV	Sh, PS, M		Gris negrusca	1.11	
22	1.50	76	0 + 300.68	3'27"	7	Pizarra Carbonosa, areniscas, falla	IV	Sh, PS, M		Gris negrusca	1.11	
23	1.50	76	0 + 299.18	5'33"	7	Pizarra Carbonosa, falla	V	Sh, PS, M, C		Gris negrusca	0.61	
	33.85											

Nota Sosten: Sh = Shotcrete
P.P. = Pernos puntuales
P.S. = Pernos sistemáticos
C = Cimbras
M. = Malla electrosoldada
MN = Marco noruego

Fuente: Electrop Perú, (2014).

Figura 25. Aforos durante trabajos de construcción caudal 0.13 a 1.82 l/s en galería.

Fuente: Electrop Perú, (2014).

3.2 Método

3.2.1 Nivel de Investigación

“El nivel de investigación se refiere al grado de profundidad con que se aborda un fenómeno u objeto de estudio”. (Arias, 2012, Pg.23).

Según Arias (2012), se presentan tres niveles de investigación:

- Nivel Exploratorio.
- Nivel Descriptivo.
- Nivel Explicativo.

El trabajo de investigación formativa es a nivel descriptivo, porque se evidencia argumentos técnicos en base a estudios precedentes, y resultados de ensayos de campo, citado por Hernández et al. (2014), el análisis descriptivo tiene por fin “especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis”. (Pg.92).

3.2.2 Diseño de Investigación

Según Hernández et al. (2014), “[...] el investigador debe seleccionar o desarrollar un diseño de investigación específico. Cuando se establecen y formulan hipótesis, los diseños sirven también para someterlas a prueba. Los diseños cuantitativos pueden ser experimentales o no experimentales”. (Pg.126). Este proyecto de investigación se basa en un diseño no experimental porque no habrá manipulación en los valores de las variables; así que se usará el estudio descriptivo y por ello el esquema a usar será el siguiente:

M: Lugar donde se ejecutará los estudios para el proyecto y la cantidad de población beneficiada.

O: Datos obtenidos de la mencionada zona.

Además, para los diseños no-experimentales se tiene una división del tipo transversal y longitudinal. En consecuencia, es un diseño transversal, debido a que tenemos 1 o más recopilaciones de datos del presente para indagar una solución en el futuro.

3.2.3 Variables de estudio y operacionalización

Variable 1 (independiente): Permeabilidad

Definición operacional

Se analiza la permeabilidad en la masa del deslizamiento derrumbe 5, en base metodologías de cálculo, y estudios de hidrogeología.

Variable 2 (dependiente): Caudal de filtración a través del macizo fracturado hacia las galerías de drenaje.

Definición operacional

Se opta por el sistema de drenaje por medio de galerías filtrantes y cumpla todas las solicitudes calculadas, mediante el uso de datos como resultado de los ensayos in situ y laboratorio, además del modelamiento numérico.

Tabla 5

Variable independiente de estudio y operacionalización.

Variable	Dimensión	Indicador	Unidad de medida	Instrumento de investigación
Independiente: parámetros del acuífero	Permeabilidad	Se analiza la permeabilidad en la masa del deslizamiento derrumbe 5.	Metodologías de cálculo Para estudios hidrogeológicos	Ensayos de laboratorio
				Ensayo Le-Franc
	Porosidad			Ensayo Lugeon
	Recarga y descarga			
	Rendimiento específico			Balance y tipo de acuíferos

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6
Variable dependiente de estudio y operacionalización.

Variable	Dimensión	Indicador	Unidad de medida	Instrumento de investigación
Dependiente: Caudal de filtración	Medio poroso	Se analiza el caudal de filtración que converge a las galerías de drenaje.	Metodologías de cálculo de caudales de filtración en estudios hidrogeológicos	Modelo numérico
	Galería filtrante			Modelo conceptual hidrogeológico
				Curva de calibración

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

Para Borja (2016), “Existen diferentes técnicas para la recolección de información, las mismas que no son excluyentes y muy por el contrario son complementarias. Las principales técnicas son las siguientes: La observación, la entrevista, la encuesta y las pruebas estandarizadas”. (Pg.33).

Bajo esta definición se entiende que el trabajo de investigación formativa utilizará una técnica de observación (resultados de las perforaciones diamantinas) a los hechos más relevantes.

Para Arias (2012), “Un instrumento de recolección de datos es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información”. (Pg.68). Por lo definido anteriormente este trabajo de investigación utilizará como instrumento fichas de recolección de datos propuesto por el investigador.

Tabla 7
Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Etapas de la investigación	Técnicas	Instrumentos	Validación
Geotecnia	Análisis en Campo (recolección de muestras)	- Ensayo granulométrico. - Límites de Atterberg. - Ensayo de corte directo.	- Norma ASTM D - 422 - Norma ASTM D - 4318 - Norma ASTM D - 3080
Estudios hidrológicos	Análisis documental y tecnológico (recolección de datos y programas computacionales)	- Registro de precipitaciones, temperatura, evaporación, caudales (m ³ /s)	- Senamhi (Servicio Nacional de Meteorología e hidrología del Perú)
Metodologías de cálculo	Análisis tecnológico (programas computacionales)	- Ficha de recolección de datos	- Ficha de validación del Cuestionario de Encuesta

Fuente: Elaboración propia.

3.2.5 Técnicas de Procesamiento y Análisis de datos

Para interpretar los resultados obtenidos por los diferentes instrumentos que se desarrollan gracias a los ensayos, metodologías teóricas, fichas de recolección de datos y programas computacionales de modelamiento, se opta un análisis de datos riguroso, para ver de forma real la problemática teniendo en cuenta el grado de confiabilidad y validez antes expuestas.

Se obtendrán figuras, hojas de cálculo en excel, cuadros de resúmenes de resultados siendo cada uno de ellos debidamente explicados, interpretados y sustentados. Se sigue el siguiente esquema de trabajo:

- Recolección de datos.
- Trabajos de campo.
- Trabajo de gabinete.

Tabla 8
Técnicas de procesamiento y análisis de datos.

Etapas de la investigación	Técnicas	Instrumentos	Validación
Modelamiento	Análisis tecnológico (programas computacionales)	- FEFLOW 7.1 - Hojas de cálculo Excel - AutoCAD 2018 - Hidroesta 2 - Otros	- Ficha de validación del Cuestionario de Encuesta

Fuente: Elaboración propia.

3.3 MODELAMIENTO NUMÉRICO

Se ha recopilado información en el entorno del deslizamiento denominado Derrumbe 5, esta información existente, es referida a los aspectos geológicos, data de estaciones hidrometeorológicas, sondeos diamantinos, a continuación, se citan información existente

- Estudio de geología Deslizamiento 5.
- Estudio geotécnico del Deslizamiento 5.
- Estudio de obras complementarias para la estabilización del Deslizamiento 5.
- Informe de factibilidad de obras civiles complementarias de estabilización seleccionadas Deslizamiento 5.
- Datos de caudales medidos durante la etapa de construcción 2014.

La información existente, no se ha identificado un modelo conceptual de flujo, que este fuertemente vinculado a la tipología de los acuíferos existentes en las masas geológicas del deslizamiento, y más aún una metodología para la estimación de filtraciones con énfasis en los macizos fracturados.

3.3.1 Área de estudio

En el Perú, se presentan fenómenos de geodinámica interna y externa como resultado del ciclo de las rocas y el ciclo del agua, con respecto a la geodinámica externa, tales como; huaicos, aludes, avalanchas, derrumbes, y otros, muchos de ellos, sobre todo los derrumbes, se activan por la presencia, persistencia y circulación del flujo de filtraciones dentro de su matriz porosa y fracturada.

El río Mantaro, se encuentra emplazado en la parte central de la sierra peruana y drena sus aguas de una de las cuencas hidrográficas más importante del Perú, tiene un área de 36 600 km². En su tramo medio se emplaza la represa Tablachaca, que representa el elemento de cabecera el cual regula a nivel diario y semanal la disponibilidad de recurso hídrico superficial a fin de generar potencia y energía de las centrales Santiago Antúnez de Mayolo y Restitución pertenecientes al Complejo Hidro-energético del Mantaro.

El embalse inició su operación en el año 1973, juntamente con la puesta en servicio de la primera etapa de la central Santiago Antúnez de Mayolo. La segunda etapa de la central se puso en servicio en 1978 y a fines de 1984 inició su operación la central Restitución, que constituye la segunda central del Complejo Mantaro, el cual dispone en la actualidad de un total de 1,008 MW instalados (CESEL, 2009).

Cuando finalizó la construcción de la presa, en setiembre del 1972 y comenzó el llenado del embalse, se observaron movimientos y grietas en la antigua masa de deslizamiento denominado Derrumbe 5, lo cual exigió controlar el nivel del embalse y monitorear los desplazamientos. Los intensos períodos de lluvia registrados entre 1979 y 1982 incrementaron los movimientos en el derrumbe hasta el punto de declarar el proyecto en emergencia en abril de 1982. En ese sentido, fue necesario construir obras de estabilización e instalar instrumentación geotécnica en la zona del Derrumbe 5.

Referencias pasadas, datan de 1930 que ocurrió un deslizamiento de tierras en la orilla derecha del río Mantaro en el área del deslizamiento de Quichicane, frente a Quichuas,

En agosto de 1945, ocurrió un importante desprendimiento de rocas en la ladera noroeste del Cerro Condor-Sencca, en la margen derecha del río Mantaro,

En diciembre de 1960 se produjo un deslizamiento en Chihuanhuay, entre la Mejorada y Anco,

En 1972 se notificó un deslizamiento (Huayco) en Anco, y en 1973 un deslizamiento de Toccorayoc a 50 Km agua debajo de la Represa Tablachaca,

En 1974 se produjo otro deslizamiento rocoso en la quebrada Ccochacay del río Mantaro, y en diciembre de 1990 ocurrió un aluvión por efecto de un alud del nevado Huaytapallana que atravesó la cuenca del río Shullcas precipitando una gran avenida a través del río Mantaro.

Y una referencia estadística reciente, otro Derrumbe acaecido, el 20 de enero del 2014 a las 04:00 am, a una distancia de 20 Km aguas arriba de la represa Tablachaca que pertenece al complejo Hidroenergético del Mantaro, cuya producción de electricidad representa un poco más del 30% de la energía eléctrica del Perú, ocurrió un evento de geodinámica externa ubicado en el cerro Cuenca, perteneciente al distrito de Mariscal Castilla – Huancavelica, manifestado por un derrumbe, evento geodinámica externa que bloqueo accesos y represó el río Mantaro, desencadenó pérdidas de áreas de cultivos, inundaciones y daños en infraestructura civil.

El área de investigación pertenece al deslizamiento denominado Derrumbe 5, identificado en la margen derecha de la represa Tablachaca, en la provincia de Tayacaja, Huancavelica (véanse figuras siguientes).

Figura 26. Ámbito del área de investigación Derrumbe 5 - Huancavelica.

Fuente: CESEL, (2011).

3.3.2 Data climatológica e hidrométrica

La data de registro de caudales es escasa, más aún en áreas lejanas en nuestro país. Por lo que, un gran parte de los análisis hidrológicos se construyen a base de la información de precipitación, para el desarrollo de la presente tesis, también se ha recopilado información de estaciones hidrométricas (véase Tabla 9).

Tabla 9
Resumen de secciones de control (aforo).

Código	Tipo de Información	Estación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Años
C201	Hidrográfica	Upamayo	10° 00'	76° 16'	4080	1 965 -
C213	Hidrográfica	Mejorada	12° 31'	74° 55'	2799	1 965 – 2 004
C257	Hidrográfica	Puente	11° 30'	75° 55'	3710	1 965 – 2 004
C261	Hidrográfica	Quillón	12° 23'	75° 09'	3190	1 965 – 2 004
C262	Hidrográfica	Moya	12° 24'	75° 08'	3180	1 965 – 2 004
C268	Hidrométrica	Cochas Túnel	11° 51'	75° 44'	3750	1 965 – 2 004
C269	Hidrométrica	Piñascocha	11° 51'	75° 45'	3750	1 965 – 2 004

Fuente: COES – Electroperú (2010).

Una de las instituciones principales que nos suministran data hidrometeorológica es el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), organismo público adscrito al Ministerio del Ambiente, e integrante de la Organización Mundial de Meteorología (OMM), razón por la cual cumple con los estándares de monitoreo, adquisición, medición y tratamiento de datos meteorológicos, siendo además el ente supervisor de las actividades hidrometeorológicas en el Perú, a continuación en la Tabla siguiente nótese datos de interés de clima, aforo, temperatura y otros de relevancia (Mogrovejo,2017).

A. Temperatura

Este parámetro meteorológico está fuertemente familiarizado con la altitud. La temperatura experimenta variaciones desde semicálido en cotas más bajas, en zonas de clima templado, en la cual las temperaturas bajan gradualmente, llegando alcanzar valores promedios que varían de 16°C a 18°C, según los registros de las estaciones Mejorada y Quichuas, respectivamente.

Tabla 10
Variación de información de temperatura

Tipo de Información	Estación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Cant. años
Temperatura	Mejorada	12° 53'	74° 86'	2820	42
Temperatura	Quichuas	12° 47'	74° 77'	2650	41

Fuente: Electroperú (2010).

Tabla 11
Rangos térmicos de medida mensual

Altitud (msnm)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
<1 000	23.7	24.0	23.9	23.4	22.2	21.0	20.6	21.3	22.0	22.2	23.3	23.6
1 000 – 2 000	20.8	21.1	20.9	20.7	19.7	18.6	18.4	19.2	19.9	19.9	21.2	21.0
2 000 – 3 000	16.3	16.6	16.3	16.3	15.7	14.7	14.6	15.5	16.4	16.3	17.4	16.9
3 000 – 4 000	9.84	9.93	9.81	9.68	9.20	8.38	8.13	8.79	9.52	9.81	10.4	10.1
>4 000	4.91	4.90	4.93	4.66	4.22	3.51	3.05	3.51	4.16	4.79	4.96	4.98

Fuente: ANA (2010); Electroperú (2010).

B. Precipitación

La variación de la precipitación local en Quichuas, tienen dos periodos bien marcados, uno de etapa lluviosa de octubre a abril, en el cual se alcanzan valores promedios totales mensuales más altos en los meses comprendidos entre enero y marzo; y el otro periodo de menor precipitación que inicia de mayo hasta septiembre, en este periodo las lluvias son muy simplificadas y escasas.

Tabla 12
Estaciones pluviométricas.

Código	Estación	Cota (msnm)	Periodo de Registro	Coordenadas Planas	
				Norte	Este
Sin Código	Quichuas	2 550,00	1964/01/01- 2003/12/31	ND	ND
PRD5BAJO	D5BAJO	2 758,63	1979/03/16- 2005/03/15	8 621 875	523 091
PRD5ALTO	D5ALTO	2 948,04	1981/11/05- 2005/03/15	8 621 746	523 387

Fuente: CESEL (2011).

En la Tabla 13, se resumen la data de precipitación obtenidos de la estación Quichuas.

Tabla 13
Información de data mensual de precipitación total.

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
1 964	25	43	71	54	42	0	0	3	43	48	71	101	501
1 965	78	86	65	34	10	1	8	9	32	17	35	75	450
1 966	69	79	60	36	21	1	0	11	16	73	97	86	549
1 967	79	100	179	23	18	8	10	32	19	71	45	88	672
1 968	95	84	52	25	4	2	9	14	16	40	52	102	495
1 969	59	67	62	36	4	5	5	14	20	48	52	96	468
1 970	171	66	73	47	11	5	11	1	33	54	32	98	602
1 971	69	40	45	41	5	2	0	14	6	37	51	86	396
1 972	83	48	89	61	5	0	0	0	10	27	50	62	435
1 973	113	142	123	17	0	2	17	21	27	57	28	100	647
1 974	144	164	81	39	2	20	0	20	6	46	23	24	569
1 975	148	72	103	43	20	0	0	0	0	0	43	102	531
1 976	99	72	88	26	10	12	4	0	42	17	22	52	444
1 977	39	112	82	8	17	1	2	0	22	26	107	113	529
1 978	151	103	69	30	9	7	1	1	60	34	46	82	593
1 979	106	66	228	82	14	0	22	14	40	51	83	166	872

1 980	112	151	228	28	22	1	18	18	65	154	56	83	936
1 981	230	376	133	39	11	0	0	51	11	95	110	147	1203
1 982	203	133	95	38	3	6	1	19	38	63	102	33	734
1 983	62	58	72	35	6	19	2	16	47	43	51	77	488
1 984	150	233	119	77	18	20	4	20	7	44	83	94	869
1 985	121	83	87	63	18	7	0	9	46	46	60	126	666
1 986	110	228	164	45	13	0	5	44	0	43	53	93	798
1 987	92	70	44	32	34	4	10	1	38	41	86	67	519
1 988	146	150	109	39	5	0	0	0	3	64	43	97	656
1 989	77	99	182	64	14	27	0	8	17	98	33	52	671
1 990	84	38	82	29	13	104	23	71	35	184	202	59	924
1 991	110	0	59	30	9	30	5	12	13	35	183	35	521
1 992	38	48	26	13	0	11	7	4	7	22	193	18	387
1 993	101	64	41	29	12	8	5	4	16	156	289	50	775
1 994	105	116	99	58	29	0	0	1	8	30	181	91	718
1 995	73	128	112	16	5	13	1	8	33	26	47	58	520
1 996	97	125	76	51	3	0	0	0	36	30	56	0	474
1 997	112	111	74	69	12	1	0	22	36	30	79	50	596
1 998	107	79	93	12	2	6	0	6	4	65	39	120	533
1 999	92	101	72	43	6	3	12	2	56	29	79	66	561
2 000	141	108	68	33	24	5	5	5	11	35	46	58	539
2 001	111	87	84	26	28	1	14	10	21	0	0	0	382
2 002	96	77	115	54	12	0	0	13	35	10	42	50	504
2 003	52	135	106	27	18	13	8	8	25	52	49	163	656
2 004	63	75	78	21	15	11	6	3	22	48	35	120	497
2 005	64	72	70	19	11	9	5	2	19	45	36	110	462
Prom.	102	102	94	38	13	9	5	12	25	51	73	80	603
Max.	230	376	228	82	42	104	23	71	65	184	289	166	1203
Mín.	25	0	26	8	0	0	0	0	0	0	0	0	382

Fuente: CESEL (2011).

C. Humedad relativa

Es un parámetro muy variable durante el ciclo del agua, presentando periodos de valores altos en los meses de enero a marzo y un periodo de valores bajos en los meses de junio a agosto. Los datos de promedios anuales de este parámetro registrados en las estaciones de Mejorada y Quichuas para el periodo de los años 2002 y 2005, varían entre 54% y 60%, respectivamente.

Tabla 14
Humedad relativa - Estación Quichuas.

Altitud (msnm)	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.
553 – 1 000	71.5	73.4	73.6	71.8	69.6	69.9	68.7	67.8	67.7	69.2	67.8	69.9
1 000 – 1 500	71.3	73.4	73.8	71.4	68.6	69.3	67.3	66.5	66.8	68.5	66.9	69.3
1 500 – 2 000	67.4	70.1	71.2	67.2	63.0	61.4	60.4	60.3	61.1	62.5	60.6	64.2
2 000 – 2 500	65.3	68.1	69.7	64.4	59.5	56.8	55.7	56.4	57.6	58.5	56.6	61.0
2 500 – 3 000	67.5	69.9	71.7	66.1	60.5	57.0	55.8	56.9	58.9	60.7	58.8	63.2
3 000 – 3 500	68.8	69.6	72.5	65.7	60.3	55.3	53.6	56.5	59.1	60.0	58.7	63.6
3 500 – 4 000	73.1	72.3	75.1	68.3	62.9	57.0	54.4	58.3	62.2	63.5	63.2	67.7
4 000 – 4 500	76.4	73.5	77.3	69.7	64.9	58.1	55.1	60.8	64.9	66.0	66.4	70.9
4 500 – 4 985	80.1	74.0	79.7	70.7	67.3	59.1	55.6	64.2	68.1	67.5	69.2	74.0

Fuente: Electoperú (2010).

D. Análisis de Tormentas

En el periodo de los años 1964 al 1978, la precipitación media diaria se determinó sobre la base de la data de la estación Quichuas; y las precipitaciones de los años 1979 al 2005 se obtuvo de las estaciones PRD5_BAJO y PRD5_ALTO ubicadas en el Derrumbe 5.

A partir de la precipitación media diaria, se rescataron las precipitaciones máximas diarias anuales, años 1964 al 2001 – 2003 y 2005, obteniéndose una muestra de 41 años de registros.

Cuyos resultados son:

- Cantidad de data: 41 años
- PPmax 24 = 31.5 mm.
- Máxima de PPmax 24 = 98 mm.
- Mínima de Ppmax 24 = 15 mm.
- Desviación estándar = 15.21.

3.3.3 Periodo de retorno

Este parámetro es importante para definir la vida de las estructuras (galerías), así como su probabilidad de riesgo de falla. Obteniéndose los valores en la Tabla 15.

Tabla 15

Periodo de retorno, vida útil y riesgo de falla aceptable.

Vida de Diseño (años)	Riesgo Aceptable de Falla (%)	Tr (años)
10	5	200
	10	100
	20	50
20	5	390
	10	190
	18.2	100
30	5	585
	10	285
	26	100
50	5	975
	10	475
	40	100
70	5	1 365
	10	665
	30	197
100	1	9 950
	5	1 950
	10	950

Fuente: Elaboración Propia (2017).

3.3.4 Curva IDF

Sobre la base de la metodología intensidad-duración-frecuencia se utilizó el modelo de Dick y Peschke (ecuación 1.27) para estimar la intensidad de diseño y la precipitación máxima, en función de la precipitación máxima en 24 horas.

Tabla 16

PPmx24 horas para el Tr

Tr (Años)	PPmx24 (mm)
5	39.7
10	46.7
20	53.4
25	55.5
50	62.0
100	68.6
190	74.6
390	81.5
500	84.0

Fuente: Elaboración Propia (2017).

Se obtuvo la curva IDF, véase anexo 3 análisis hidrológico.

$$I = \frac{10^{2,505} \cdot T^{0,154}}{t^{0,75}} \quad (1.27)$$

donde:

I (mm/h) = Intensidad de la lluvia.

T (años) = Periodo de retorno.

t (min) = Duración de precipitación.

3.4 Geología y sondeos diamantinos

Las zonas o masas geológicas se describen a continuación,

Figura 27. Ubicación e identificación de masas geológicas en el área de investigación Derrumbe 5 - Huancavelica.

Fuente: CESEL, (2011).

Zona 1 - Cuaternario Coluvial (Q-c):

En este depósito geológico, se ejecutaron ensayos directos mediante perforaciones diamantinas y ensayos de permeabilidad in situ, logueos indican que su espesor es variable entre 10 m a 77 m (véase anexos), cuya permeabilidad promedio está en el orden de E-01 cm/s a E-03 cm/s.

Zona 2 - Cuaternario Paleoderrumbe (Qp-pd):

Constituido en base a los registros de perforaciones diamantinas, se ejecutó ensayos de permeabilidad in situ, logueos indican que su espesor es variable entre 8 m a 107 m de potencia, y cuya conductividad hidráulica promedio está en el orden de E-02 cm/s a E-03 cm/s.

Zona 3 - Brecha de Pizarra (Qp-pd-b):

Constituido principalmente por roca pizarra fracturada, cuyo parámetro geo-hidráulico más relevantes fueron estimados in situ mediante los ensayos diamantinos y de permeabilidad, logueos indican que su espesor es variable entre 12 m y 80 m, y la conductividad hidráulica promedio está en el orden de E-03 cm/s a E-07 cm/s.

Zona 4 - Basamento Rocoso (D-e):

Tiene un dominio de roca pizarra muy foliada, es el límite inferior del acuífero, potencia variable de 100 m a 120 m y con permeabilidades en el orden de E-05 cm/s a E-09 cm/s.

Los sondeos diamantinos son: H-101, H-102, H-103, H-104 y H-100 y otros.

Los registros de los logeos pueden revisarse en el anexo respectivo de la presente tesis.

Figura 28. Caja porta testigos 2/45 perforación diamantina H-101.

Fuente: CESEL, (2011).

Figura 29. Perfil estratigráfico inferido en base a perforaciones diamantinas, Derrumbe 5, Quichuas.

Fuente: CESEL, (2011).

3.5 Balance hídrico Local al modelo conceptual

3.5.1 Recarga y descarga local

Recarga: Sobre la información existente, recopilada y revisada, y con la data de estaciones hidrometeorológicas, el área de investigación tiene ciclo del agua anual muy variable, teniéndose rangos de recarga en enero a marzo; y descarga en junio a agosto.

Este fenómeno de infiltración tiene un inicio desde el terreno (coluvial) y en los estratos inferiores (brecha y basamento rocoso), el agua filtra a estos estratos más profundos por medio de sus discontinuidades (véanse las Figuras siguientes).

Figura 30. Interpretación conceptual del sistema de recarga local en el área del Derrumbe 5 - Huancavelica.

Fuente: Elaboración Propia, (2019).

Descarga: La fracción del volumen que no forma parte de la precipitación efectiva, y después del fenómeno de evaporación, el volumen de agua restante se infiltra a través del material de la masa coluvial (con alta permisividad), y filtrando hacia el dominio rocoso brecha, ingresando al basamento rocoso (véase la Figura siguiente), nótese la forma o geometría del basamento rocoso, las descargas de este flujo converge el punto (2) y circula a través de las gargantas punto (3) hasta alcanzar la zona (1) embalse Tablachaca.

Figura 31. Vista cuasi 3D de agua sobre la superficie del basamento rocoso.

Fuente: Elaboración Propia, (2019).

Debe resaltarse, que esta descarga está controlada por control litológico, de acuerdo a los estratos más permisibles a través de la masa de suelo (coluvial); en el caso del agregado natural (rocas), tiene una ocurrencia similar, con un control estructural, producido por cambios presión y temperatura en los depósitos geológicos (generando fracturas).

Se evidencia que estas descargas del flujo subterráneo tienen afloramiento cerca a la parte baja de la ladera, y de manera diseminada en el entorno del derrumbe 5.

3.5.2 Modelo hidrogeológico Conceptual

Con fines de cuantificar el caudal en depósitos geológicos (macizo fracturado), se realizó un tratamiento de los datos de la red de piezómetros (véase la Tabla 15), cuyas profundidades de los piezómetros variaron entre los 5 m y 120 m aproximadamente.

Figura 32. Vista cuasi 3D de un tramo de galería de drenaje dentro de la zona de brecha (roca fracturada).

Fuente: Elaboración Propia, (2014).

Figura 33. Vista cuasi 3D del sistema de galería de drenaje dentro de roca Pizarra.

Fuente: Elaboración Propia, (2014).

Tabla 17

Valores de los niveles de agua en piezómetros.

Instrumentación Piezómetros			
Piezómetro	Cota de Forro (msnm)	Lectura (H)	Cota del Agua (msnm)
H - 21R	2776.20	74.83	2701.37
H - 22	2788.52	72.46	2716.06
H - 24R	2953.53	79.80	2873.73
H - 30A	2890.94	5.29	2885.65
H - 30R	2890.77	119.05	2771.72
H - 32R	2953.68	116.95	2836.73
H - 33R	2866.39	90.90	2775.49
H - 35	2739.51	41.93	2697.58
H - 37	2733.05	36.53	2696.52
H - 51	2702.99	5.29	2697.70
H - 52	2702.00	5.79	2696.21
H - 53	2702.95	5.45	2697.50
H - 62	2840.74	92.57	2748.17
H - 63	2866.64	90.48	2776.16
H - 64R	2950.10	91.22	2858.88
H - 66	3034.15	125.38	2908.77
H - 67A	3105.67	5.82	3099.85
H - 69	2707.12	9.69	2697.43
H - 71	2797.38	79.55	2717.83
H - 72	2901.47	93.55	2807.92
H - 73	2736.50	33.68	2702.82
H - 101	2933.42	97.15	2836.27
H - 102	2945,97	110,11	2835,86
H - 103	2990,02	132,15	2857,87
H - 104	2845,36	69,84	2775,52

Fuente: Electrop Perú, (2014).

Figura 34. Vista cuasi 3D del nivel de agua inferido y ubicación de las galerías de drenaje dentro de las masas del Derrumbe 5.

Fuente: Elaboración Propia, (2014).

3.5.3 Permeabilidades de las masas geológicas

La conductividad hidráulica de las masas que integran el deslizamiento denominado Derrumbe 5 fueron registradas in situ con los sondeos diamantinos, y en estos sondeos se ejecutaron ensayos de permeabilidad (Lefranc y Lugeon).

Estos valores registrados de la permeabilidad durante los sondeos se recopilaron, analizaron y se utilizaron para la calibración, y se muestran de forma resumida en las siguientes Figuras.

Figura 35. Resumen de permeabilidades en zonas o masas geológicas en el Derrumbe 5.

Zona	Permeabilidad saturada k_{sat} (cm/s)			Funciones de distribución utilizadas para los análisis	
	Promedio	Mínimo	Máximo	Permeabilidad	Contenido de agua volumétrico
Material de derrumbe (coluvión y paleoderrumbe)	$7,81 \times 10^{-3}$	$6,00 \times 10^{-6}$	$5,89 \times 10^{-2}$	Estimada de gravas arenosas	Estimado de gravas arenosas
Zona de brecha	$8,66 \times 10^{-4}$	$2,80 \times 10^{-7}$	$4,07 \times 10^{-3}$	Fredlund & Xing (1994)	Fredlund & Xing (1994)
Pizarra fracturada	$3,60 \times 10^{-4}$	$2,42 \times 10^{-7}$	$1,73 \times 10^{-3}$	Estimada de arcilla areno-limosa	Estimado de arcilla areno-limosa
Depósitos aluviales	$1,34 \times 10^{-2}$	$1,32 \times 10^{-2}$	$1,35 \times 10^{-2}$	Estimada de gravas arenosas	Estimado de gravas arenosas

Fuente: Ingetec, (2006) y Electroperú (2011).

Figura 36. Resumen de características de propiedades del suelo de las masas geológicas en el Derrumbe 5.

Zona geotécnica		DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA			Límites de consistencia			Humedad, w (%)	
		Gravas (%)	Arenas (%)	Finos (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	w _n	w _{sat}
Matriz del material de derrumbe (6 muestras)	Mínimo	0.6	45.7	23.4	18.0	12.5	3.1	--	--
	Máximo	30.6	72.8	37.6	22.2	15.0	9.7	--	--
	Promedio	12.0	60.1	27.9	19.8	13.8	6.0	---	--
Zona de brecha (32 muestras)	Mínimo	0.0	20.5	5.2	17.2	3.0	3.9	4.9	18.7
	Máximo	68.5	72.1	70.0	33.0	17.0	16.0	17	25.4
	Promedio	20.5	41.0	38.5	21.5	13.0	8.6	8.8	23.4

Fuente: Ingetec, (2006) y Electroperú (2011).

Figura 37. Resumen del tipo de material en sondeos H-101, H-102 y H-103.

PERFORACIÓN	PROFUNDIDAD	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
H-100 (L = 140,50m)	0,0 m a 16,00 m	Q-c	Coluvión
	16,00 m a 46,25 m	Ci-a	Grupo Ambo. Metarenisca marrón, grano fino en bancos gruesos y masiva, moderadamente meteorizada e intensamente fracturada en algunos sectores con intercalaciones de meta limolitas.
	46,25 m a 140,50 m	D-e	Grupo Excelsior. Pizarra, gris verdosa, moderadamente meteorizada,
H-101 (L = 160,15 m)	0,0 m a 22,30 m	Q-c	Coluvión. Grava areno limosa, marrón grisáceo y arena.
	22,30 m a 129,30 m	Q-pd	Paleoderrumbe. Bloque de cuarcita y esquisto, con clastos angulosos de pizarra gris, intensamente fracturada.
	129,30 m a 160,15 m	D-e	Grupo Excelsior. Pizarra, negra, foliada, sana a intensamente fracturada.
H-102 (L = 130,75 m)	0,0 m a 36,15 m	Q-c	Coluvión. Grava con matriz arenolimosa, fragmentos cuarcita gris, esquistos.
	36,15 m a 99,10 m	Qp-d	Paleoderrumbe. Bloques de cuarcita y esquistos, moderada a intensamente fracturados, moderada a altamente meteorizados.
	99,10 m a 130,75 m	D-e	Grupo Excelsior. Pizarra gris oscura, moderadamente fracturada.
H-103 (L = 140,05 m)	0,0 a 77,80 m	Q-c	Coluvión. Grava arenosa con cantos de arenisca y algo de finos, moderada a altamente meteorizados.
	77,80 m a 108,70	Qp-d	Paleoderrumbe. Pizarra moderadamente meteorizada e intensamente fracturada, interstratificada con capas de cuarcita, presencia de vetillas de cuarzo.
	108,70 m a 140,05	D-e	Grupo Excelsior. Pizarra, moderadamente fracturada.

Fuente: Ingetec, (2006) y Electroperú (2011).

3.6 Modelamiento numérico de las masas geológicas en el Derrumbe 5

3.6.1 Discretización del modelo

En base a la interpretación del modelo geológico conceptual, se ha aproximado la geometría de la sección en 2D cuyo perfil estratigráfico hace referencias a las masas geológicas como, coluvial, brecha, basamento rocoso, la discretización en una malla en elementos finitos consta de 149 086 elementos y cantidad de nodos de 74 986, y cuatro (04) estratos, véase Figura 38.

Figura 38. Resumen de conductividades hidráulicas de cada masa geológica en el Derrumbe 5.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

3.6.2 Condiciones iniciales del modelo

Se ingresa al modelo numérico las carga hidráulica o nivel de agua registrado y/o interpretado durante la ejecución de los trabajos de campo mediante los sondeos diamantinos.

Figura 39. Condición de borde tipo I para simular el nivel freático - Derrumbe 5.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

Figura 40. Perfil estratigráfico, nótese el nivel freático inferido.

Fuente: CESEL (2011).

Figura 41. Ingreso de planos de falla y fracturas en el dominio del modelo en el Derrumbe 5.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

Figura 42. Refinamiento de la malla y refinamiento en las fracturas en el dominio del modelo en el Derrumbe 5.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

3.6.3 Ingreso de permeabilidades y fallas al modelo

De acuerdo con los ensayos ejecutados en campo, se han ingresado las conductividades hidráulicas para cada zona o masa geológica, como son; coluvial, brecha, paleo-derrumbe y basamento rocoso Pizarra.

Figura 43. Conductividades hidráulicas, planos de falla y discontinuidades en el dominio del Derrumbe 5.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

Figura 44. Ingreso de planos de falla y/o discontinuidades de abertura 10 - 25 mm en el dominio del Derrumbe 5.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

Figura 45. Detalle del espaciamiento o abertura de la falla el dominio de Derrumbe 5.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

3.6.4 Calibración del modelo

Para la validación del modelo, se ejecuta agregando puntos de observación numérica dentro del dominio del derrumbe 5, en lugares estratégicos como se puede apreciar en la siguiente Figura 48, el modelo al realizar un análisis iterativo compara el valor observado en campo versus el numérico de la superficie del nivel freático.

Para el proceso de calibración el código FEFLOW en base a los valores o condiciones iniciales compara los datos observados versus los simulados, se calibrará con duraciones de 1.5 días, 2 días y 3 días.

Figura 46. Puntos de observación dentro del dominio de Derrumbe 5.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

A. Calibración a 1.5 días

Figura 47. Simulación del modelo duración 1.5 días.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

Figura 48. Curva de calibración nivel freático duración 1.5 días, $RMS = 70.15\%$.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

Los valores obtenidos en el modelo numérico véase Figura 50, indican una primera aproximación con un error alto de 70.15% en comparación con los datos observados en campo.

B. Calibración a 2.0 días

Figura 49. Simulación del modelo duración 2.0 días.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

Figura 50. Curva de calibración nivel freático duración 1.5 días, $RMS = 69.44\%$.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

C. Calibración a 3.0 días

Figura 51. Simulación del modelo duración 3.0 días.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

Figura 52. Diferencias entre cargas hidráulica simuladas y observadas a 3.0 días.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

Figura 53. Curva de calibración nivel freático duración 3.0 días, $RMS = 2.954\%$.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

3.6.5 Simulación considerando las galerías de drenaje

Figura 54. Sección típica de la galería de drenaje

Fuente: Electoperú, (2014).

Figura 55. Nótese la geometría de la galería y el caudal de filtraciones.

Fuente: Electoperú, (2014).

Figura 56. Nótese el ingreso de las galerías de drenaje en el modelo.

Fuente: Electroperú, (2014).

4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Verificación de los resultados sin galerías de drenaje

Figura 57. Simulación sin presencia de galerías de drenaje.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

En base a la evaluación de los resultados y la curva de calibración se ha obtenido un RMSD (Root mean square deviation) en el rango de 2.954% lo cual es menor de 5%, y NRMSD (Normalized root-mean-square deviation) de 1.292%, siendo valores aceptables en términos de calibración, véase a Fetter (2014).

Figura 58. Curva de calibración nivel freático duración 3.0 días, RMS = 2.954%.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

Figura 59. Simulación con presencia de galerías de drenaje.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

Figura 60. Nótese el gradiente de presiones en el contorno de las galerías.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

Figura 61. Nótese la estimación del caudal de filtración en el entorno galerías.

Fuente: Elaboración Propia (2019).

4.2 Discusión

4.2.1 Primera discusión: Sin galerías de drenaje

Para un escenario conceptual y numérico, sin contemplar las galerías de drenaje, podemos indicar que se ha obtenido resultados deseables, para una calibración de 3.0 días se obtuvo un valor de RMSD en el rango de 2.954%, véase Figura 57, esta primera comparación nos permite responder nuestra hipótesis alterna; ¿El modelo numérico permitirá representar la complejidad de la naturaleza?, con el valor de RMSD, podemos indicar que tenemos una buena aproximación, pero debo advertir que a mayor discretización de fallas, fracturas en el dominio modelado (macizo fracturado), conllevaría a un mayor tiempo computacional, debido a que la cantidad de elementos finitos aumentaría. Para este trabajo de investigación se construyó una malla (mesh) con 149 086 elementos finitos y 74 986 nodos.

Los modelos en elementos finitos son mallas con una ventaja superior frente a diferencias finitas, debido a su malla flexible y su rápido acoplamiento a las geometrías complejas, adaptado de Fetter (2014), pág. 525.

4.2.2 Segunda discusión: La calibración del modelo numérico

Con el modelo calibrado y luego de obtener una respuesta aceptable de la calibración, se procedió a estimar con el FEFLOW el caudal de filtraciones que converge a las galerías, con estos resultados numéricos (véanse Figuras 59, 60 y 61), podemos responder la hipótesis central; ¿el modelo conceptual y numérico permitirá estimar el caudal de filtraciones a través del macizo rocoso hacia las galerías de drenaje?, los valores del caudal de filtración están en el orden de 1.5 a 5.0 l/s. Véase Figura 61, $11.1 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$ es aproximadamente 5.32 l/s. Para la galería de longitud de hastial derecho de 1.4 m más altura hasta la bóveda de 1.1 m, se tiene una longitud total de 2.5 m cuyo caudal es 0.321 l/s, véanse figuras 55 y 54.

La verificación del modelo puede ser estimada con la comparación de los datos observados en los piezómetros, Anderson (1986).

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- 1) La recopilación de la data ha sido fundamental, para establecer el modelo geológico e hidrogeológico se utilizaron los datos de campo, como sondeos diamantinos para constituir perfiles estratigráficos representativos dentro de las masas del Derrumbe 5.
- 2) En el dominio del derrumbe 5 (véase Figura 19), se han ingresado veinticinco (25) sondeos diamantinos de profundidades variables (véase tabla 17), data fundamental para la interpretación y construcción de perfiles estratigráficos que conforman las masas geológicas del deslizamiento, información que permitió proponer un modelo hidrogeológico actualizado con el código FEFLOW versión 7.1.
- 3) En base a los trabajos de campo (véase sondeos H-100, H-101, H-103, H-104 y otros - Tabla 15), por lo que, presenta una conformación de un estrato en la parte superior de origen coluvial (gravas 12%, arenas 60.1%, finos 27.9%), en la parte media brecha fracturada, y en profundidad del macizo fracturado, espesores variables, y de diferentes propiedades geo-hidráulicas. Esto explica la variación de la permeabilidad en la masa coluvial en el orden de $7.81\text{E-}03$ cm/s promedio y máximo $5.39\text{E-}02$ cm/s, mayor detalle de las conductividades véase ítem 3.3.3.
- 4) El planteamiento del modelo conceptual hidrogeológico inferido y aplicado al presente trabajo de investigación, ha permitido identificar la presencia de un acuífero libre, cuya geometría ha sido interpretada sobre una densidad de investigaciones directas de 0.33 sondeos/ha, véase ítem 3.4 y Tabla 17 del presente trabajo de investigación, por lo que, respondiendo la hipótesis de representar la complejidad de la naturaleza, queda citar que aún debe agregarse mayores sondeos para obtener a razón de 1.0 sondeo/ha.
- 5) El modelo numérico FEFLOW 7.1, de origen alemán y con más de 30 años de constante actualización contemporánea y de aporte a obras civiles subterráneas de gran impacto para la sociedad, y reconocido a nivel mundial, fue seleccionado debido a su capacidad de adaptarse a geometrías complejas (fracturas, fallas), como es el caso de las masas geológicas que constituyen el Derrumbe 5, la comparación y análisis de calibración con los 25 sondeos, ha permitido obtener un error normalizado en los datos observados versus los estimados numéricamente de RMSD menor de 5%; evidenciando un ajuste de datos aceptable. Véase ítem 4.2.

- 6) Los valores de las conductividades hidráulicas nos permiten obtener los caudales de filtración que convergen a la galería de drenaje están en el orden de $11.1 \text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$ es aproximadamente 5.32 l/s . Véase Figura 61, en el caso de la galería de geometría de hastial de 1.4 m más altura de la bóveda de 1.1 m , se tiene una longitud total de 2.5 m cuyo caudal es 0.321 l/s , véase Figura 26 y 27. Valores que se encuentran en el rango de las mediciones tomadas o registradas en campo.
- 7) El trabajo de investigación formativo, aplicado en base al modelo numérico FEFLOW, es una primera aproximación en la versión actualizada 7.1; su validación se confirma en la comparación de las observaciones de campo y los estimados en el código. Sin embargo, se resalta que el modelo debe seguir siendo mejorado a medida que el modelo geológico sea actualizado mediante mayores sondeos, más aún en geometrías complejas como son los macizos fracturados.

5.2 Recomendaciones

- 1) De acuerdo con los resultados del modelo numérico, se recomienda ampliar el diseño y construcción de nuevas galerías de drenaje (excavadas en el macizo Devoniano de origen Pizarra), a una profundidad mayor de 25 m en un sector geomecánico de mayor resistencia y menor grado de fracturación, condición que permitirá el menor ingreso del flujo de filtraciones en las galerías.
- 2) Respecto al RMSD normalizado es menor al 5%; pero se sugiere que la data ingresada al código FEFLOW 7.1, deben ser actualizado conforme se obtengan mayores lecturas de campo de los equipos de monitoreo (piezómetros).
- 3) Se recomienda como futura línea de investigación, implementar un nuevo modelo geológico-geotécnico-hidrogeológico bajo un escenario cuasi 3D y un modelo de predicción suelo-agua-estructura de excavación de nuevas galerías, contemplando sobre él, la totalidad de las obras civiles hidráulicas, a fin de elaborar modelos con simulaciones conos de depresión en escenarios 3D y el comportamiento de las estructuras.
- 4) Se recomienda, y a fin de disminuir el ingreso de agua a través del material coluvial, se considere un sistema de re-vegetalización, para disminuir la recarga del agua hacia aquellos estratos permeable (macizos fracturados).

6 REFERENCIAS

Anderson, M. P. (1992), Applied groundwater modeling – simulation of Flow and advective transport. San Diego Academic Pres, Inc.

Arias, Fidas G. El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica. 6a ed. Caracas: Editorial Episteme, 2012. 144 pp.

ISBN: 980-07-8529-9

Bear, J., (1997). Dynamics of Fluids in Porous Media, New York Dover Publications.

Borja S., Manuel. Metodología de la investigación científica para ingenieros [En línea]. Perú, 2016.

Disponible en: <https://unprg.academia.edu/ManuelBorjaSu%C3%A1rez>

Brown, A. G., (1996). Geomorphology & groundwater, UK, John Wiley & Sons.

Castany, G., (1975). Prospección y explotación de las aguas subterráneas, España, Omega.

CESEL S.A., (2009), Estudio Geológico del Derrumbe 5, pp., 1-70. Perú.

Chow, V. T., (1964), Handbook of Applied Hydrology, New York, McGraw-Hill.

Committee on Fracture Characterization and fluid Flow, Rock Fractures and Fluid Flow (2014), Estados Unidos, Research Council.

Custodio, E. y Llamas M. R., (2001), Hidrología Subterránea, (2 tomos), España, Omega.

De Lemos, M., (2006), Turbulence in Porous Media & Modeling and Applications, Brazil, Elsevier.

Diersch, H. J., (2014), Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Heidelberg, Germany, Springer-Verlag.

Faruk, C., (2011), Porous Media Transport Phenomena, Canada, Wiley & Sons, Inc.

Fetter, C. W., (2014), Applied Hydrogeology, England, Prentice Hall College.

Forrester, K., (2001), Slope Stability Analysis & Subsurface Drainage for Slope Stabilization, UK, Prentice Hall.

Freeze, R. A. y Cherry J. A., (1979), Groundwater, France, Prentice Hall College.

Garipov, T.T., Karimi-Fard, M., y Tchelepi, H.A., (2016), Discrete fracture model for coupled flow and geomechanics, *Comput Geosci* (20), Switzerland, pp., 1-13.

González de Vallejo, J., (2002), *Ingeniería Geológica*, Madrid, España, Prentice Hall.

Hernández S., Roberto; Fernández C., Carlos y Baptista L., María del Pilar. *Metodología de la investigación*. 6a ed. México D.F: McGraw-Hill, 2014. 630 pp.

ISBN: 978-1-4562-2396-0

Hiscock, K., (2014), *Hydrogeology: Principles and practice*, Oxford, UK, Blackwell Science.

Kim, J., y Filoon., J., (2014), Tectonic evolution of a Paleozoic thrust fault influence the hydrogeology of a fractured rock aquifer, northeastern Appalachian foreland, *Geofluids*, Canada, pp., 1-27.

Knabner, P., y Roberts, J., (2014), Mathematical analysis of a discrete fracture model coupling Darcy in the matrix with Darcy-Forchheimer, *ESAIM* (48), Germany, pp., 1-23.

Mogrovejo, G. R. (2017), *Modelación numérica con FEFLOW+FMH3 para el estudio definitivo de las galerías de drenaje: caso Derrumbe 5 - Complejo Hidroeléctrico del Mantaro* (tesis de maestría). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Patiño, L., y Espinoza, H., (2004), Convección de calor intersticial en el flujo de fluidos a través de medios porosos, *Ingeniería Hidráulica en México* (19), México, pp., 1-15.

Schwartz, F. W. y Zhang, H., (2003), *Fundamentals of Groundwater*, France, John Wiley & Sons Inc.

Singhal B., (2010), *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*, Springer, pp., 1-429.

Sudipta, S., y Burns, D., (2016), *Fluid Flow Simulation in Fractured Reservoirs*, MIT, Cambridge, pp., 1-32.

Voss, C., (1984), *A Finite Element Simulation Model For Saturated – Unsaturated Fluid-density-dependent Groundwater*, U.S. Geological Survey: Water Resources Investigations, pp., 1-40.

Wang, H., (1982), *Introduction to Groundwater Modeling. Finite Difference and Finite Element Methods*, San Diego, Academic Press.