

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**EVALUACIÓN DE RIESGO GEOTÉCNICO DE LA PRESA DE
RELAVE N°03 EN LA UNIDAD MINERA PALLANCATA –
AYACUCHO**

TESIS
**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTADO POR:

Bach. PAULLO HUARHUA, VICTOR RODRIGO

Bach. SEGOVIA ORTEGA, MARCO ANTONIO

ASESOR: Mg. Ing. TORRES CHUNG, CESAR ROBERTO

LIMA – PERÚ

2020

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Victor Paullo y Marcia Huarhua, a quienes les debo mis logros por haberme forjado en la correcta persona que soy actualmente, a mis hermanos y familiares que me apoyaron día a día en esta etapa universitaria la cual concluye con la obtención de mi título profesional.

Victor R. Paullo Huarhua

A mis padres Cayetano Segovia y Octavia Ortega por todo el amor y apoyo durante todos estos años, a mis hermanas quienes me alentaron y me brindaron todo su apoyo incondicional, son mi mayor motivación, gracias.

Marco A. Segovia Ortega

AGRADECIMIENTO

A nuestros padres por otorgarnos la confianza y darnos las bases de la responsabilidad y el deseo de superación.

Un profundo agradecimiento a la Universidad Ricardo Palma por brindarnos una alta calidad de educación a lo largo de nuestra formación académica.

Se agradece también a nuestros docentes en especial al Ing. Eduardo Temoche Mercado por haber compartido sus conocimientos académicos y anécdotas que nos servirán para toda la vida. Que descanse en paz.

Al Ing. Cesar R. Torres Chung por brindarnos sus consejos y estar siempre a predisposición de las consultas que se tuvo durante el desarrollo de la presente tesis.

Finalmente, un principal agradecimiento a Dios, quien nos ha guiado y nos dio fortalezas para seguir adelante.

INDICE GENERAL

RESUMEN	xx
ABSTRACT.....	xxi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1 Descripción del Problema	2
1.2 Formulación del Problema	3
1.2.1 Problema General	3
1.2.2 Problemas Específicos	3
1.3 Importancia y Justificación del Estudio	3
1.4 Delimitación del Estudio.....	4
1.4.1 Temática.....	4
1.4.2 Geográfica	4
1.4.3 Temporal	4
1.5 Objetivos de la Investigación	4
1.5.1 Objetivo Principal.....	4
1.5.2 Objetivos Secundarios.....	4
1.6 Limitaciones del Estudio	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	6
2.1 Antecedentes de Investigación	6
2.1.1 Antecedentes Normativos y Buenas Prácticas en Perú y Chile.....	6
2.1.1.1 Perú.....	6
2.1.1.2 Chile.....	9
2.1.2 Antecedentes Nacionales	12
2.1.3 Antecedentes Internacionales	14
2.2 Estructura Teórica y Científica que Sustenta el Estudio.....	16

2.2.1	Ciclo de Vida de una Presa de Relaves.....	16
2.2.1.1	Construcción.....	16
2.2.1.2	Operación	16
2.2.1.3	Cierre.....	17
2.2.1.4	Post-Cierre.....	17
2.2.2	Métodos de Construcción de Presas de Relave Minero.....	18
2.2.2.1	Método Aguas Arriba	18
2.2.2.2	Método Aguas Abajo	19
2.2.2.3	Método Línea Central	20
2.2.3	Características Geográficas	21
2.2.3.1	Clima.....	21
2.2.3.2	Sismicidad	23
2.2.4	Análisis De Mecanismos De Falla.....	24
2.2.4.1	Inestabilidad de Taludes.....	24
2.2.4.2	Erosión Interna	26
2.2.4.3	Rebalse	29
2.2.4.4	Licuefacción en Presas de Relaves	30
2.2.4.5	Inestabilidad del suelo de fundación.....	32
2.2.5	Concepto de evaluación de riesgos para presas.....	33
2.2.5.1	Análisis De Riesgos	34
2.2.5.2	Estimación de riesgos	36
2.2.5.3	Evaluación de Riesgos	37
2.2.5.4	Aplicación Sistemática Del Juicio De Ingeniería.....	41
2.2.6	Consecuencia de Falla.....	43
2.2.7	Tipos y circunstancias de falla de las presas	47
2.2.7.1	Circunstancias excepcionales	49
2.2.7.2	Circunstancias normales	50

2.2.8	Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ)	52
2.2.8.1	Ponderación de los parámetros descriptores	53
2.2.8.2	Cálculo de la Relación de Consistencia (RC)	54
2.2.9	Evaluación de Riesgos según del Manual del Cenepred.....	56
2.2.9.1	Concepto de Peligro.....	56
2.2.9.2	Recopilación de datos	56
2.2.9.3	Identificación de probable área de influencia del fenómeno en estudio.	57
2.2.9.4	Peligros generados por fenómenos de origen natural	57
2.2.9.5	Parámetros De Evaluación	58
2.2.9.6	Susceptibilidad	59
2.2.9.7	Análisis de Elementos Expuestos en Zonas Susceptibles.....	61
2.2.9.8	Niveles De Peligrosidad.....	61
2.2.9.9	Vulnerabilidad	61
2.2.9.10	Análisis De Los Elementos Expuestos Sociales, Económicos Y Ambientales.....	63
2.2.9.11	Determinación de los Niveles de Vulnerabilidad.....	64
2.2.9.12	Estimación o Cálculo del Riesgo.....	65
2.3	Definición de términos básicos.....	66
2.4	Hipótesis.....	68
2.4.1	Hipótesis General.....	68
2.4.2	Hipótesis Específicas	68
2.5	Variables.....	68
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DEL ESTUDIO.....		70
3.1	Tipo, Método y Diseño de la Investigación	70
3.1.1	Tipo de Investigación.....	70
3.1.2	Método de Investigación	70
3.1.3	Diseño De Investigación	70

3.2 Población Y Muestra.....	71
3.2.1 Población.....	71
3.2.2 Muestra.....	71
3.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos (validez y confiabilidad)	71
3.3.1 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	71
3.3.2 Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos	72
3.4 Descripción de procedimientos de análisis	72
CAPITULO IV: CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y DE LA PRESA	
DE RELAVES.....	73
4.1 Ubicación Geográfica	73
4.2 Geología	74
4.2.1 Geología Regional	74
4.2.2 Geología Local	74
4.2.2.1 Geomorfología.....	75
4.2.2.2 Estratigrafía	75
4.2.2.3 Geología Estructural	75
4.2.2.4 Geodinámica Externa.....	75
4.3 Hidrogeología	76
4.3.1 Clasificación de Unidades Hidrogeológicas	77
4.3.2 Modelo Hidrogeológico Conceptual.....	77
4.4 Sismicidad	79
4.4.1 Coeficiente Sísmico	81
4.5 Hidrología.....	81
4.5.1 Precipitación	81
4.5.2 Precipitación Anual y Mensual	81
4.5.3 Análisis de Eventos Extremos	84
4.5.3.1 Precipitaciones Máximas observadas	84

4.5.3.2	Frecuencia de Precipitaciones Máximas en 24 horas	84
4.5.3.3	Precipitación Máxima Probable (PMP)	85
4.5.3.4	Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)	86
4.5.3.5	Tormenta de Diseño.....	87
4.5.4	Hidrología de Canales.....	88
4.5.4.1	Parámetro curva número (CN) de sustracción hidrológica	88
4.5.4.2	Caudales de Diseño.....	90
4.5.4.3	Borde Libre Normal.....	93
4.6	Balance de Agua	95
4.6.1	Almacenamiento en Poros.....	95
4.6.2	Información Geométrica	95
4.6.3	Modelo de Balance de Aguas	96
4.7	Investigaciones Geotécnicas.....	97
4.7.1	Trabajo de Campo.....	97
4.7.1.1	Mapeo Geológico – Geotécnico	97
4.7.1.2	Mapeo de Líneas de Detalle	98
4.7.2	Ensayos de Laboratorio.....	99
4.7.2.1	Ensayos Índice.....	99
4.7.2.2	Ensayo de Compactación Proctor.....	101
4.7.2.3	Ensayos de Compresión Triaxial.....	101
4.7.2.4	Ensayos de Carga Puntual.....	102
4.7.2.5	Ensayo de Abrasión	103
4.7.3	Caracterización Geotécnica	103
4.7.3.1	Unidades Geológicas Geotécnicas.....	104
4.7.3.2	Nivel de Agua.....	106
4.7.3.3	Nivel de Cimentación	107
4.7.4	Evaluación de Canteras	107

4.7.4.1	Canteras de Suelo de Baja Permeabilidad y Relleno Estructural ...	108
4.7.4.2	Canteras de Enrocado (Materiales Tipo 2 y Tipo 3).....	109
4.8	Diseño Geotécnico	110
4.8.1	Propiedades Físicas e Hidráulicas	110
4.8.1.1	Relleno Estructural – Material Tipo 1	110
4.8.1.2	Material de Transición – Material Tipo 2	111
4.8.1.3	Enrocado – Material Tipo 3	111
4.8.1.4	Relave	111
4.8.1.5	Basamento Rocoso.....	111
4.8.2	Análisis de Infiltración.....	112
4.8.3	Análisis de Estabilidad de Taludes Estático y Pseudo-estático.....	114
4.8.3.1	Resultados Obtenidos.....	115
CAPITULO V: RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS.....		117
5.1	Peligro según el cenepred.....	117
5.1.1	Descriptores de Peligro	117
5.1.2	Valor del Peligro.....	119
5.2	Susceptibilidad.....	120
5.2.1	Factores Condicionantes	120
5.2.1.1	Descriptores de los Factores Condicionantes.....	120
5.2.1.2	Valor del Factor Condicionante.....	122
5.2.2	Factores Desencadenantes.....	122
5.2.2.1	Descriptores del Factor desencadenante	123
5.2.2.2	Valor del Factor Desencadenante	123
5.2.2.3	Valor de la Susceptibilidad	123
5.2.3	Peligrosidad.....	124
5.3	Vulnerabilidad	124
5.3.1	Vulnerabilidad Social.....	124

5.3.1.1	Exposición Social	124
5.3.1.2	Fragilidad Social.....	125
5.3.1.3	Resiliencia Social	126
5.3.2	Vulnerabilidad Económica.....	128
5.3.2.1	Exposición Económica.....	128
5.3.2.2	Descriptor de Exposición Económica.....	129
5.3.2.3	Fragilidad Económica	129
5.3.2.4	Resiliencia Económica.....	131
5.3.3	Vulnerabilidad Ambiental	134
5.3.3.1	Exposición Ambiental.....	134
5.3.3.2	Fragilidad Ambiental	135
5.3.3.3	Resiliencia Ambiental.....	137
5.3.4	Valor de la Vulnerabilidad	138
5.4	Riesgo.....	140
5.5	Evaluación del riesgo según el árbol de eventos	140
5.5.1	Descripción de Escenarios	142
5.5.1.1	Escenario 1 – Sismo de gran magnitud.....	142
5.5.1.2	Escenario 2 – Precipitación extrema.....	145
5.5.1.3	Escenario 3 – Filtración por Rotura de Revestimiento de Geomembrana.....	148
5.5.1.4	Escenario 4 - Rebalse por falla de Sistema de Bombeo.....	150
5.5.2	Riesgo Económico	152
5.6	Análisis y discusión de resultados	152
5.6.1	Cenepred	153
5.6.2	Árbol de eventos.....	154
5.6.3	Medidas de Mitigación.....	156
5.6.4	Contrastación de Hipótesis.....	157

CONCLUSIONES	159
RECOMENDACIONES	161
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	162
ANEXOS	165
Anexo 1 Matriz de consistencia	165
Anexo 2 Estadística de fallas de Presas de Relaves	166
Anexo 3 Análisis de Infiltración.....	170
Anexo 4 Análisis Sísmico	174
Anexo 5 Análisis de talud con Precipitaciones	176
Anexo 6 Análisis de estabilidad de Talud en vaso de la Presa	177
Anexo 7 Análisis de piping	179
Anexo 8 Panel Fotográfico.....	180

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Recomendaciones de monitoreo.....	8
Tabla 2 Instrumentos utilizados para controlar los parámetros críticos.....	25
Tabla 3 Ensayos utilizados para controlar parámetros críticos.....	25
Tabla 4 Instrumentos utilizados para controlar los parámetros críticos del Rebalse	30
Tabla 5 Ejemplos de descriptores verbales de incertidumbre.....	42
Tabla 6 Clasificación de la Presa	46
Tabla 7 Matriz de Peligro	61
Tabla 8 Matriz de vulnerabilidad	65
Tabla 9 Matriz de Riesgo.....	65
Tabla 10 Niveles de Riesgo	66
Tabla 11 Matriz Operacional	69
Tabla 11 Relación de Precipitación vs. Altitud	82
Tabla 12 Precipitación Promedio Mensual en el Área del Proyecto.....	83
Tabla 13 Precipitación Máxima en 24 horas	85
Tabla 14 Relación Precipitación-Duración-Frecuencia e Intensidad-Duración- Frecuencia	86
Tabla 15 Parámetros morfológicos e hidrológicos de las cuencas de Drenaje.....	91
Tabla 16 Caudal máximo simulado en canales.....	93
Tabla 17 Borde Libre y Niveles.....	94
Tabla 18 Almacenamiento en Poros de Relave Consolidado	95
Tabla 19 Niveles y relación entre área y volumen de almacenamiento	96
Tabla 20 Resumen de Estaciones de Mapeo Superficial.....	99
Tabla 21 Resumen de Ensayos de Clasificación de Suelos.....	100
Tabla 22 Resumen de Ensayo Proctor.....	101
Tabla 23 Resumen de Resultados de los Ensayos de Compresión Triaxiales (CU).....	102

Tabla 24 Resumen de Ensayos de Carga Puntual.....	102
Tabla 25 Ensayo de Abrasión.....	103
Tabla 26 Resumen de Propiedades de Materiales - Dique Principal.....	112
Tabla 27 Escenarios de Peligro.....	117
Tabla 28 Descriptores de la Aceleraciones sísmicas.....	117
Tabla 29 Descriptores de Precipitaciones.....	118
Tabla 30 Descriptores de Infiltraciones.....	119
Tabla 31 Descriptores de las pendientes en talud del vaso.....	119
Tabla 32 Valor del Peligro.....	119
Tabla 33 Factores Condicionantes.....	120
Tabla 34 Descriptores del Tipo de Suelo.....	121
Tabla 35 Descriptores del Uso del suelo.....	121
Tabla 36 Descriptores de Pendientes del terreno.....	122
Tabla 37 Valor del Factor Condicionante.....	122
Tabla 38 Factor Desencadenante.....	122
Tabla 39 Descriptores Inducidos por el ser humano.....	123
Tabla 40 Valor del Factor Desencadenante.....	123
Tabla 41 Valor de la Susceptibilidad.....	124
Tabla 42 Valor de la Peligrosidad.....	124
Tabla 43 Exposición Social.....	125
Tabla 44 Descriptores del Grupo Etario.....	125
Tabla 45 Fragilidad Social.....	126
Tabla 46 Descriptores de los años en trabajos mineros.....	126
Tabla 47 Fragilidad Social.....	126
Tabla 48 Descriptores de Capacitación en Gestión de Riesgos.....	127
Tabla 49 Descriptores de conocimiento de fallas de presas de relaves.....	128

Tabla 50	Descriptor de actitud frente al riesgo.....	128
Tabla 51	Exposición Económica.....	129
Tabla 52	Descriptor del % que falla de la Presa de Relaves	129
Tabla 53	Fragilidad Económica	129
Tabla 54	Descriptor de los materiales de Construcción	130
Tabla 55	Descriptor de los Métodos de construcción	130
Tabla 56	Descriptor de elevación de presa	131
Tabla 57	Resiliencia Económica.....	131
Tabla 58	Descriptor de Periodo de Monitoreo.....	132
Tabla 59	Descriptor de lectura de Piezómetro.....	132
Tabla 60	Descriptor de lectura de hitos topográficos.....	132
Tabla 61	Descriptor de lectura de inclinómetros	133
Tabla 62	Descriptor de lectura y procesamiento de datos de celda de asentamiento ...	133
Tabla 63	Descriptor de cumplimiento del alcance de calidad	133
Tabla 64	Descriptor de Check List de Presas de Relaves	134
Tabla 65	Descriptor de Revisión de Seguridad de Presa de Relaves	134
Tabla 66	Exposición ambiental.....	134
Tabla 67	Descriptor de área de contaminación del suelo	135
Tabla 68	Descriptor de contaminación del agua.....	135
Tabla 69	Fragilidad Ambiental	136
Tabla 70	Descriptor de Fragilidad Ambiental	136
Tabla 71	Descriptor de localización de Centro Poblados.....	137
Tabla 72	Resiliencia Ambiental.....	137
Tabla 73	Descriptor de Equipo de contingencia.....	138
Tabla 74	Descriptor de Monitoreo químico de aguas subterráneas	138
Tabla 75	Valor de Vulnerabilidad.....	139

Tabla 76 Valor de Vulnerabilidad Económica.....	139
Tabla 77 Valor de Vulnerabilidad Ambiental.....	139
Tabla 78 Valor de la Vulnerabilidad.....	140
Tabla 79 Valor del Riesgo.....	140
Tabla 80 Clases de consecuencias.....	141
Tabla 81 Riesgo Económico.....	152
Tabla 82 Matriz de Peligro.....	153
Tabla 83 Matriz de Vulnerabilidad.....	154
Tabla 84 Matriz de Riesgo.....	154
Tabla 85 Niveles de Riesgo.....	156
Tabla 86 Matriz de Consistencia.....	165

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Secciones típicas de presas de relaves según su método de crecimiento	18
Figura 2 Método de construcción Aguas arriba.....	19
Figura 3 Método Aguas arriba	20
Figura 4 Método Línea Central.....	21
Figura 5 Esquema de Erosión Interna	26
Figura 6 Tipos de erosión interna.....	28
Figura 7 Esquema general de un Rebalse	29
Figura 8 Falla de la presa de relaves de Kolontar en Hungría.....	31
Figura 9 Armonía, Merriespruit, Sudáfrica	32
Figura 10 Esquema de Evaluación de Riesgos	34
Figura 11 Factores que contribuyen a la falla estática o hidrológica	36
Figura 12 Árbol de eventos ilustrativo	37
Figura 13 Criterios de riesgo social revisados de ANCOLD	40
Figura 14 Escala de Saaty.....	53
Figura 15 Matriz de comparación de pares.....	53
Figura 16 Matriz de Normalización	54
Figura 17 Vector Priorización.....	54
Figura 18 Vector suma ponderada	55
Figura 19 Valores de Índice Aleatorio	56
Figura 20 Identificación y caracterización de Peligros generados por Fenómenos Naturales	58
Figura 21 Factores Condicionantes de Peligro	60
Figura 22 Factores Desencadenantes de Peligro.....	60
Figura 23 Exposición Social	63
Figura 24 Exposición Económica	64

Figura 25 Exposición Ambiental	64
Figura 26 Vista satelital de la ubicación de la Presa de Relaves	73
Figura 27 Presa de Relaves N°3.....	73
Figura 28 Modelo hidrogeológico conceptual del depósito de relaves	79
Figura 29 Relación de Precipitación vs. Altitud	82
Figura 30 Curvas IDF.....	87
Figura 31 Cuencas Tributarias	90
Figura 32 Esquema General de Balance de Agua.....	96
Figura 33 Esquema de Balance de Agua del Depósito de Relaves.....	97
Figura 34 Propiedades hidráulicas del Dique Principal - Sección Geotécnica Analizada	113
Figura 35 Análisis de Infiltración Cota 4595 msnm – Materiales y discretización.....	113
Figura 36 Análisis de infiltración cota 4595 msnm – Carga total	114
Figura 37 Propiedades hidráulicas del Dique Principal - Sección Geotécnica Analizada	115
Figura 38 Análisis estático Cota 4595 msnm	115
Figura 39 Análisis pseudo-estático Cota 4595 msnm	116
Figura 40 Clasificación de la Presa según consecuencias 3 y 4	143
Figura 41 Sismo de gran magnitud	144
Figura 42 Clasificación de la Presa según consecuencias 3 y 4	146
Figura 43 Precipitación Extrema.....	147
Figura 44 Clasificación de la Presa según consecuencias 3 y 4	148
Figura 45 Rotura de Revestimiento de Geomembrana	149
Figura 46 Clasificación de la Presa según consecuencias 3 y 4	150
Figura 47 Rebalse por falla del sistema de bombeo.....	151
Figura 48 Clasificación de la Presa según los escenarios analizados	155
Figura 49 Evolución de las fallas de presas en el mundo.....	166

Figura 50 Número de fallos de acuerdo a la altura de Presas	167
Figura 51 Mecanismos de Falla de las Presas de Relaves	168
Figura 52 Distribución de Fallas de acuerdo al método constructivo	169
Figura 53 Análisis de estabilidad estático con infiltración con un nivel freático 5m sobre la base de fundación	170
Figura 54 Análisis de estabilidad Pseudo - estático con infiltración con un nivel freático 5m sobre la base de fundación	170
Figura 55 Análisis de estabilidad estático con infiltración con un nivel freático de 10 m sobre la base de fundación	171
Figura 56 Análisis de estabilidad Pseudo - estático con infiltración con un nivel freático de 10 m sobre la base de fundación.....	171
Figura 57 Análisis de estabilidad estático con infiltración con un nivel freático de 15 m sobre la base de fundación	172
Figura 58 Análisis de estabilidad Pseudo - estático con infiltración con un nivel freático de 15 m sobre la base de fundación.....	172
Figura 59 Análisis de estabilidad estático con infiltración con un nivel freático de 20 m sobre la base de fundación	173
Figura 60 Análisis de estabilidad Pseudo - estático con infiltración con un nivel freático de 20 m sobre la base de fundación.....	173
Figura 61 Análisis Pseudo – estático con una aceleración de diseño para un Tr: 475 años	174
Figura 62 Análisis Pseudo – estático con una aceleración de diseño para un Tr: 950 años	174
Figura 63 Análisis Pseudo – estático con una aceleración de 0.28g.....	175
Figura 64 Análisis Pseudo – estático con una aceleración de 0.37g.....	175
Figura 65 Análisis de estabilidad de talud considerando una tormenta de diseño de 1000 años con Precipitaciones de 255 mm/día.....	176
Figura 66 Análisis de estabilidad de talud Pseudo – estático considerando una tormenta de diseño de 1000 años con Precipitaciones de 115 mm/día.	176

Figura 67 Análisis Pseudo – estático en una pendiente de 15% del vaso	177
Figura 68 Análisis Pseudo – estático en una pendiente de 25% del vaso	177
Figura 69 Análisis Pseudo – estático en una pendiente de 37% del vaso	178
Figura 70 Análisis Pseudo – estático en una pendiente de 42% del vaso	178
Figura 71 Análisis Estático, Erosión interna a 15 m sobre la base de fundación	179
Figura 72 Análisis Pseudo-estático, Erosión interna a 20 m sobre la base de fundación	179
Figura 73 Vista panorámica aguas abajo	180
Figura 74 Vista panorámica aguas abajo	180
Figura 75 Margen Izquierdo de Dique de Presa	181
Figura 76 Margen Izquierdo de Dique de Presa	181
Figura 77 Colocación de Geomembrana	182
Figura 78 Colocación de Geomembrana	182
Figura 79 Vista frontal del dique de la presa de Relaves	183
Figura 80 Vista frontal del dique de la presa de Relaves	183
Figura 81 Vista panorámica de la margen izquierda de la Presa de Relaves Pallancata, se observa además a la Cantera Ausenco-6.	184
Figura 82 Vista panorámica de la margen derecha de la Presa de Relaves Pallancata, se observa además a la Cantera de Suelo-Golder.....	184
Figura 83 Vista panorámica de la Cantera: “Roca-1“.....	185
Figura 84 Vista panorámica de la Cantera: “Ausenco-5“.....	185

RESUMEN

Actualmente el Perú basa su crecimiento económico en la actividad minera, siendo principalmente la producción de cobre, zinc, plata y oro el motor de desarrollo de este país. A partir de la minería, se han generado los ingresos necesarios para financiar tanto obras de infraestructura, como programas de desarrollo y beneficio social.

Pero, así como se cómo se desarrolla la explotación de estos minerales, también crece los desechos que producen, tal es el caso de los relaves mineros que son envasados en grandes depósitos que representan un gran peligro si llegasen a fallar. Esto genera la necesidad de identificar las falencias que presenta Perú desde un punto de vista normativo, cuya corrección y mejoramiento permitiría el buen desempeño de los depósitos de relave en todas sus etapas.

La presente investigación tiene como objetivo principal la evaluación del riesgo geotécnico de la Presa de Relaves N°3 de la unidad Minera Pallancata, por lo tanto, para poder realizar esta evaluación se uso el manual del Cenepred y las Pautas de seguridad del CDA.

En el desarrollo de esta investigación primero se determinó los parámetros geotécnicos de la Presa de Relaves para luego cuantificar los riesgos de distintos escenarios asociados a eventos que pudiesen ocurrir y las consecuencias que estos conllevarían con la pérdida de vidas, el daño al medio ambiente y a las estructuras que se encuentran aguas abajo de la presa.

El resultado obtenido de estas evaluaciones nos dio un riesgo medio y aceptable, lo que corroboró las hipótesis dadas.

Palabras clave: Presa de Relaves, Evaluación de Riesgo, factor de seguridad.

ABSTRACT

Currently, Peru bases its economic growth on mining activity, with the production of copper, zinc, silver and gold being the engine of development of this country. From mining, the necessary income has been generated to finance infrastructure works, development programs and social benefits.

But as well as the exploitation of these minerals develops, so does the waste they produce, as in the case of mining tailings that are packaged in large tanks that represent a great danger if they were to fail. This generates the need to identify the shortcomings that Peru presents from a regulatory point of view, whose correction and improvement would allow the good performance of the tailing's deposits in all its stages.

The main objective of this research is the evaluation of the geotechnical risk of the Tailings Dam No. 3 of the Pallancata Mine unit, therefore, in order to carry out this evaluation, the Cenepred manual and the CDA safety guidelines were used.

In the development of this research, the geotechnical parameters of the Tailings Dam were first determined to later quantify the risks of different scenarios associated with events that could occur and the consequences that these would entail with the loss of life, damage to the environment and the structures that are downstream of the dam.

The result obtained from these evaluations gave us a medium and acceptable risk, which corroborated the hypotheses given.

Keywords: Tailings dam, risk assessment, safety factor.

INTRODUCCIÓN

La presente tesis de Investigación tuvo como principal objetivo evaluar el riesgo geotécnico de la Presa de Relaves N°3 en la unidad minera de Pallancata – Ayacucho por lo que para cumplir estos objetivos se adoptó el manual del Cenepred siguiendo el enfoque de análisis jerárquico de Satty y siguiendo los lineamientos presentados por el Canadian Dam Association (CDA) se desarrolló un análisis de eventos de fallas de los principales factores que los generarían.

El capítulo I de esta investigación describe la realidad problemática, como la formulación de los problemas tanto principal como secundarios, a su vez se plantea los objetivos y la justificación e importancia de la investigación.

El capítulo II expone los antecedentes de esta tesis, así como las bases teóricas, definiciones conceptuales, estructura y científica que sustenta la investigación, a su vez muestra la formulación de las hipótesis como la definición de variables.

El capítulo III describe el diseño metodológico, la definición del tipo y nivel, así como el de la población de estudio y diseño muestral, para luego terminar con la validación de los instrumentos utilizados.

El capítulo IV da a conocer la caracterización de la zona de estudio y de la presa de relaves.

El capítulo V muestra los resultados de la evaluación realizada siguiendo la metodología del Cenepred y las Pautas del CDA originados por diferentes escenarios de falla, el análisis de estos resultados, medidas de mitigación y la contrastación de las hipótesis.

Finalmente se describen las conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del Problema

Actualmente en la industria minera existen diversos tipos de obras complementarias que dan soporte a los procesos de explotación y manejo de materiales como relaves, minerales, o simplemente dan solución a alguna problemática. Dentro de estas, se encuentran las presas de relaves.

Estas obras mineras tienen como función principal servir como contenedor de los materiales sólidos provenientes de una planta de concentración, permitiendo almacenar de forma segura los relaves. Este proceso requiere que dicho depósito sea diseñado según los requerimientos de funcionamiento de la Planta de concentración, además que considere las distintas ocurrencias sísmicas y condiciones hidrológicas a fin de que permanezca estable durante su operación y posterior cierre.

Se sabe que estas presas se construyen de forma paulatina a lo largo del período de explotación minera. Esta característica implica diferencias importantes en términos de diseño, procedimientos de construcción, controles de calidad de la construcción y procedimientos y sistemas de monitoreo y control de seguridad. La construcción de estas obras es continua desde el inicio hasta el cierre. Este paso final requiere un estricto control y protección contra la inestabilidad y las fallas.

Las presas de relave minero no pueden presentar fallas debido a que no solo involucran a esta obra minera, si no que puede perjudicar todos los procesos que involucra una faena minera, impacto ambiental y además afectar de forma directa al entorno inmediatamente cercano.

Se tiene un registro variado de fallos de relave mineros en el Perú y el mundo, el cual uno de los más recientes tuvo como fecha el 10 de julio de 2019, donde se registró un derrame de relave minero en la unidad minera Cobriza - Empresa Doe Run Perú, provocando la inundación de la central eléctrica con corte de fluido eléctrico en la zona, asimismo se contaminó una parte del río Mantaro con el derrame de 67500 metros cúbicos, en el distrito de San Pedro de Coris, provincia de Churcampá (Indeci. 2019).

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema General

¿Cómo realizar la evaluación de riesgo geotécnico de la presa de relaves N°3 en la unidad minera Pallancata – Ayacucho?

1.2.2 Problemas Específicos

¿Cómo afecta los fenómenos sísmicos y las condiciones hidrológicas de la zona a la estabilidad del talud de la presa de relaves N°3 en la unidad minera Pallancata – Ayacucho?

¿Cómo aplicar el manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales del Cenepred y pautas de seguridad de Presas del CDA?

¿De qué forma el modelamiento geotécnico de la presa de relaves N°03 cumplirá con el factor de seguridad establecido por la normativa vigente?

1.3 Importancia y Justificación del Estudio

En la actualidad el sector minero metalúrgico es una de las piezas fundamentales en la economía del país debido a sus grandes aportes al PBI nacional, pese a que en los últimos años haya decrecido por problemas sociales y ambientales que han golpeado este sector como la paralización de proyectos o postergación de estos.

Por lo que el tema de la evaluación de riesgo geotécnico en depósitos de relaves, está adquiriendo una mayor importancia debido a que estas actividades mineras generan grandes cantidades de relaves que pueden causar consecuencias irreparables al medio ambiente (flora y fauna), impactos sobre el medio social e impactos sobre el sector productivo y la economía (local y global).

La presente investigación se caracteriza por evaluar el riesgo geotécnico de la presa de relaves n°3 determinando las amenazas geológicas, geotécnicas, sísmicas e hidrológicas que afectaría la estabilidad física de la presa de relaves y en caso de detectarse algún signo de debilidad o falla, establecer los trabajos que se realizarán a fin de asegurar la estabilidad de la estructura en el corto y largo plazo evitando todas consecuencias que estas tendrían.

El aporte de la presente investigación es de plantear una alternativa para la evaluación de riesgo de Presas de Relaves usando como base la metodología que usa el Cenepred para la

evaluación de riesgo originado por fenómenos naturales, considerando escenarios de falla que suceden usualmente en Presas de Relaves.

1.4 Delimitación del Estudio

1.4.1 Temática

La presente investigación tratará sobre la evaluación de riesgo geotécnico de la presa de relaves N°3 de la unidad minera Pallancata – Ayacucho.

1.4.2 Geográfica

Debido a la situación actual que vive el país por el Virus Covid-19, el presente trabajo de investigación se desarrollará en la ciudad de Lima en base a la ingeniería de detalle y a los planos de la Presa de Relaves N°3 de la Unidad Minera Pallancata de la región de Ayacucho.

1.4.3 Temporal

La presente investigación se realizará en el año 2020 en los meses de junio a diciembre.

1.5 Objetivos de la Investigación

1.5.1 Objetivo Principal

Evaluar el riesgo geotécnico de la presa de relaves n°3 en la unidad minera Pallancata- Ayacucho

1.5.2 Objetivos Secundarios

- a) Determinar los fenómenos sísmicos y las condiciones hidrológicas de la zona que afectan a la estabilidad del talud de la presa de relaves N°3 en la unidad minera Pallancata-Ayacucho.
- b) Utilizar el manual del Cenepred y pautas de seguridad de Presas del CDA para la evaluación del riesgo de la presa de relaves n°3.
- c) Realizar el modelamiento geotécnico de la presa de relaves n°03, para verificar el factor de seguridad establecido por la normativa vigente.

1.6 Limitaciones del Estudio

La presente investigación tiene como limitación principal la toma de datos, tales como ensayos e inspección visual de campo, por lo cual solo se trabajará con la ingeniería de detalle del proyecto y estadística recabada de otras fuentes.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de Investigación

2.1.1 Antecedentes Normativos y Buenas Prácticas en Perú y Chile

2.1.1.1 Perú

El DS N°40-2014-EM prohíbe expresamente la construcción de presas de relave con el método de aguas arriba, así como la disposición submarina o subacuática de desmontes, relaves y otros desmontes sólidos de la actividad minera. Solo se pueden autorizar excepcionalmente cuando no exista otra alternativa ambientalmente viable (MINEM, 2014).

La Ley N°28.090 de 2003, “Ley que regula el cierre de minas”, regula las obligaciones y procedimientos que deben cumplir para la elaboración, presentación e implementación del Plan de Cierre de Minas.

El DS N°33-2005-EM de 2005, “Reglamento para el cierre de Minas” establece las especificaciones de la presentación del plan de cierre y sus contenidos, el procedimiento de aprobación, modificación y ejecución del plan, así como especificaciones con respecto al cálculo de las garantías ambientales. Básicamente este reglamento viene a complementar las disposiciones de la Ley N°28.090 con el objeto de prevenir y minimizar los riesgos a la salud, seguridad de las personas, el medio ambiente, que puedan derivarse de las operaciones de la actividad minera (MINEM, 2015).

La legislación peruana exige al concesionario una serie de medidas, entre ellas:

La construcción de los depósitos de relaves debe basarse en estudios geotécnicos previos a la etapa de operación.

Priorizar el uso de sólidos contenidos en los relaves para optimizar el área de disposición final.

Priorizar la circulación del agua contenida en los relaves al proceso de beneficio.

Establece la necesidad de utilizar materiales impermeables y sistemas de control.

El plan de cierre debe contener una serie de medidas, incluidas las necesarias para reparar el sitio y asegurar la estabilidad física y química, así como medidas de restauración colectivas e individuales. Finalmente, el usuario está obligado a constituir una garantía financiera, que puede incluir un depósito, garantía solidaria u otros mecanismos similares, y debe cumplir con la Ley del Sistema Financiero y la Ley de Seguros así como las disposiciones reglamentarias de la misma materia. También puede crear otros seguros, garantías o fideicomisos.

En agosto de 1997, el MINEM publica la “Guía Ambiental para la Estabilidad de Taludes de Depósitos de Desechos Sólidos de Mina”, que tiene por objeto “proporcionar una perspectiva general de los asuntos de estabilidad de taludes en el planeamiento, diseño, operación, mantenimiento, y cierre de los depósitos de desechos de mina”. El capítulo 6 de esta guía lleva por título “Monitoreo y mantenimiento de depósito de desechos” y establece los requerimientos de monitoreo, registros y actualizaciones de regulación y procedimientos. Además, describen los instrumentos y métodos para monitorear las descargas de percolación, el nivel freático, presión de poros, sismicidad, presión dinámica de poros (licuefacción), movimientos verticales y horizontales y asentamientos diferenciales. En la Tabla 1, se presentan los factores recomendados a medir (MINEM, 1998).

En esta guía se indica que “se debería conservar y archivar adecuadamente durante la vida operativa de la mina los registros completos del diseño, construcción y comportamiento de la presa y el pozo de relaves, así como de cualquier evento que afecte o pueda haber afectado la seguridad de la presa de relaves” (MINEM, 1998).

Tabla 1 Recomendaciones de monitoreo

Medición e inspección visual diaria de todos los factores que influyen directamente en la seguridad de la presa	<p>Ancho de playa</p> <p>Revancha</p> <p>Posición del nivel freático</p> <p>Presión de poros</p> <p>Movimiento horizontal y vertical de la cresta de la presa de arranque y del talud aguas abajo.</p> <p>Todos los procedimientos de disposición de relaves</p>
Medición y pruebas de todos los factores relacionados con la evaluación de estabilidad en cada etapa de construcción y especialmente cuando se aproxima a la altura máxima final	<p>Distribución y zonificación de los relaves depositados</p> <p>Presión de poros</p> <p>Sedimentación diferencial</p> <p>Sismicidad y presión dinámica de poros y características dinámicas de los relaves depositados</p> <p>Revisión de consolidación, sedimentación y estabilidad en la altura final durante los años de elevación de la presa</p>
Mediciones que sirven para mejorar las técnicas de relleno hidráulico	<p>Ancho de la playa</p> <p>Tamaño de partícula inicial de los relaves</p> <p>Densidad de pulpa</p> <p>Densidad de pulpa desde cada salida de la descarga de gruesos</p> <p>Distribución de los relaves depositados a lo largo de la playa según el tamaño de partícula, densidad y propiedades mecánicas del suelo.</p>

Fuente: (MINEM, 1998)

El año 2006, el MINEM publica la “Guía para la elaboración de Planes de Cierre de Minas”, en la que presenta el formato estándar para la preparación de planes de cierre de minas en las diferentes etapas del ciclo de vida de la mina. En ella se pide la descripción de las medidas

ejecutadas o propuestas para incrementar la estabilidad de las represas, estabilidad de las superficies de relave expuestas y para evitar el acceso del público a los relaves. Sobre el monitoreo de estabilidad física en la etapa post-cierre, se deben describir las inspecciones al depósito en caso de terremotos, inundaciones u otros eventos extremos, la instrumentación instalada para monitorear la inestabilidad del depósito y su frecuencia de lectura y presentar cronogramas de inspección de los depósitos y de las instalaciones de transporte de agua (MINEM, 2006).

2.1.1.2 Chile

El Decreto Supremo N°248 de 2007 “Reglamento para la aprobación de proyectos para el diseño, construcción, operación, y cierre de depósitos de relaves” (en adelante DS N°248) regula el diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves. En él, se indica que se requiere la aprobación del SERNAGEOMIN para construir y operar depósitos de relaves y que cualquier modificación debe ser aprobada antes de su implementación. Además, los tranques de relave necesitan de la aprobación de la DGA, cuando superan los cinco mil metros cúbicos y para terminar con la operación de los tranques de relaves, SERNAGEOMIN debe aprobar un Plan de Cierre, que incluye tanto medidas ambientales como de seguridad para asegurar la estabilidad física y química del lugar donde se encuentra la faena minera. Toda empresa minera sujeta al procedimiento de aplicación general debe constituir una garantía financiera para asegurar el cumplimiento de la operación de cierre (SERNAGEOMIN, 2018c).

La letra n) del artículo 14 del DS N°248 indica que cuando corresponda, se deben describir “los sistemas de instrumentación y control que se usarán para monitorear el comportamiento estructural, hidráulico del depósito, incluyendo las variables: presiones de poros, niveles freáticos, desplazamientos, asentamientos, filtraciones, aceleraciones sísmicas, y otras recomendadas por el proyectista”. (Ministerio de Minería, 2017)

Además, se requieren análisis de estabilidad para el depósito de relaves en las fases operativas y de cierre, haciendo análisis estáticos, pseudo-estático, dinámicos y en condición de cierre. La aplicabilidad de estos análisis depende de la altura del depósito de relaves (menor o mayor a 15 m) y el factor de seguridad siempre debe ser mayor que 1,20. Además, se debe determinar la distancia peligrosa y se debe definir un “sismo máximo”, basado en datos sismográficos históricos de la región (Ministerio de Minería, 2017).

La Ley N° 20.551 de 2011 que regula el cierre de obras e instalaciones mineras (Ley 20.551) tiene como objetivo garantizar la estabilidad física y química del lugar donde se ubican las instalaciones y la vida, salud y seguridad de las personas y el medio ambiente. Esta ley instruye a SERNAGEOMIN a revisar y aprobar los aspectos técnicos de los planes de cierre de sitios mineros y sus actualizaciones, así como también exigir a las empresas mineras que los cierren de manera efectiva para cumplir con sus obligaciones ambientales y otorgar poderes de supervisión, inspección y ejecución de sanciones.

Complementando esta ley, el Decreto Supremo N°41 de 2012 del Ministerio de Minería, que aprueba el “Reglamento de la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras” (DS-41), entre otras cosas, dicta guías metodológicas relacionadas con los Planes de Cierre.

El DS N°50 del Ministerio de Obras Públicas de 2015 (DS-50) aprueba el reglamento del artículo 295 del “Código de Aguas”, donde dispone que los embalses o tranques de relaves y, en general, cualquier obra con capacidad de almacenar o conducir agua o elementos transportados mediante ésta, se encuentran incluidos en sus disposiciones.

En 2007, SERNAGEOMIN emite la “Guía Técnica de Operación y Control de Depósitos de Relaves” que tiene por objetivo, entre otros, entregar recomendaciones sobre medidas de control operacional y de mantención en depósitos de relaves, destinadas principalmente a

pequeños productores mineros. A continuación, se detallan algunas medidas (Ramírez, 2007):

- Realización de controles periódicos mediante densidad in-situ en el muro de arenas y determinar densidades relativas ya que indican, en cierta medida, el grado de compactación con que cuenta el muro. Mantener la práctica de compactar el talud exterior a lo largo del muro de arenas.
- Control del nivel freático mediante piezómetros en el muro de arenas y compararlo con la cota del nivel del coronamiento del muro de partida impermeabilizado.
- Disminuir rápidamente el nivel freático cuando éste es alto evacuando agua clara de la laguna. Sugieren mantener una estadística gráfica de los niveles freáticos controlados
- Control periódico de granulometría de las arenas de relave.
- Mantener una revancha suficiente.
- Verificación periódica del ángulo de talud operacional.
- Control periódico de nivel y posición de la laguna de aguas claras.
- Mantener operativas torres colectoras u otro medio para evacuar aguas de la laguna.
- Reparar grietas o fisuras que se pudieren producir, ya que son potenciales puntos débiles.
- Suspensión de operación debido a fenómenos naturales extremos imprevistos, hasta que las condiciones de seguridad se restablezcan.
- Y medidas a considerar al cierre y posterior abandono, destacan:
- Secado de la laguna de aguas claras.

- Dejar operativos los canales perimetrales interceptores de aguas de laderas
- Mantenimiento del sistema de evacuación de aguas lluvias.
- Estabilización de taludes (considerando máximo sismo probable de ocurrencia en la zona de emplazamiento).
- Instalación de cierres de acceso al lugar donde se encuentran los relaves.
- Habilitación de vertederos de seguridad (diseñado considerando el evento de máxima crecida probable).
- Compactación de la berma de coronamiento.
- Recubrimiento con material adecuado para evitar la erosión eólica o también para posibilitar la forestación del tranque en aquellos lugares en donde es factible hacerlo.

En la Guía Metodológica para el Cierre de Faenas Mineras, publicada por SERNAGEOMIN en 2002, se dice que menciona la necesidad de establecer una línea de base del depósito, junto a los parámetros que serán utilizados para caracterizar el estado y evolución de dichos elementos; la identificación de los sitios de medición y control; los métodos y procedimientos empleados en la obtención de los resultados; la frecuencia de las mediciones; el tiempo de ejecución del seguimiento; las obras que se implementarán para estos efectos; y cualquier otro aspecto relevante para evaluar la efectividad del plan de cierre. Se detallan los principales riesgos a los que estará expuesto el depósito en su fase de cierre y post cierre (Inestabilidad del tranque (licuefacción), percolación de aguas contaminadas, arrastre del relave en caso de crecidas, contaminación atmosférica por material particulado, accidentes de personas) y se proponen medidas y acciones del plan de cierre para cada uno de estos riesgos.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Según Salazar (2018) en su investigación realizada “Estabilidad física de la presa de relaves para el nivel de crecimiento hasta la cota 4,320 m.s.n.m.

utilizando relave cicloneado” realizó esta investigación con la finalidad de determinar la estabilidad física de la presa de relaves utilizando en su construcción relave grueso. La muestra tomada fue el proyecto de factibilidad para el crecimiento de la presa de relaves Tacaza desde la cota 4,316 msnm hasta la cota 4,320 msnm, ubicado en el paraje de Choroma, distrito de Santa Lucía, provincia de Lampa, región Puno, con altitud promedio de 4,300 msnm.

Se tomó como antecedentes el caso de la Compañía Minera Caudalosa, ya que el 26 de junio del 2010 se produjo el colapso de presa de relaves y los desechos mineros afectaron los ríos Totorá Pampa (Huachocolpa), Escalera y Opamayo, originando una catástrofe a la zona del proyecto y área circundante. (Sánchez Camac, 2010).

La presente investigación se justificó con fines de reducir el costo para la conformación o construcción del dique de presa de relaves, prevenir riesgos de desprendimientos o derrumbes de presas de relave y reducir el impacto ambiental, es así que se plantea que la presa de relaves Tacaza sea estable físicamente para el nivel recrecimiento desde la cota 4,316 msnm hasta la cota 4,320.0 msnm utilizando relave grueso producto del cicloneo de los relaves provenientes de la planta concentradora, dado que la compañía minera requiere ampliar la vida útil del proyecto para continuar con el almacenamiento de relaves finos en la presa de relaves.

Los estudios realizados por Ticona (2019) en su tesis “Análisis de estabilidad física para el cierre definitivo del depósito de relaves Santa Catalina - mina Quiruvilca” tuvo como finalidad realizar una propuesta técnica de las obras necesarias para el cierre final del depósito de relaves Santa Catalina de modo que se garantice su estabilidad física en el largo plazo, se abordó también, de manera general, los aspectos relacionados al encapsulamiento de relaves y obras hidráulicas.

Se evaluó la estabilidad física del depósito de relaves en tres escenarios; en la condición actual, en el corto plazo luego de realizados los trabajos de cierre y para las condiciones de cierre a largo plazo. El análisis fue realizado con el software Slide versión 6.0 por el método de Spencer, la cual asumió una

aceleración sísmica de 0.32g para las condiciones actual y de cierre a corto plazo considerando el nivel freático registrado en las mediciones de campo y una aceleración de 0.40g para la condición de cierre a largo plazo considerando el nivel freático en la cimentación.

Los resultados de los factores de seguridad para las condiciones actuales indicaron inestabilidad física, sin embargo, luego de realizadas las obras propuestas para el cierre, dichos factores superan a los mínimos recomendados por la norma nacional e internacional, por lo cual se concluyó que el depósito de relaves Santa Catalina será estable en el corto y largo plazo luego de ejecutadas las obras de cierre propuestas.

En la investigación “evaluación geotécnica del depósito de relaves de la planta concentradora de Huari- la Oroya” Cairo (2013) analizó y evaluó los diferentes tipos de amenazas del Depósito de Relaves de la planta concentradora de Huari- La Oroya, siendo estas amenazas naturales tales como: sísmicas (movimientos sísmicos sea terremotos y temblores), geotécnicas (deslizamientos y derrumbes), hidrológicas (la precipitación pluvial o lluvias excesivas propio de la sierra), las amenazas antrópicas (posibles fallas humanas que se podría incurrir durante la preparación, construcción, operación y ampliación del depósito de relaves). Así mismo se evaluó los riesgos que se tiene en cada una de estas amenazas a fin de prevenir y controlar posibles desastres naturales que podría ocurrir y así proponer los Planes de contingencia que sean oportunas como respuesta a las situaciones de emergencias para lo cual se tiene establecido un Comité de Crisis. Finalmente se calculó el factor de seguridad de la estabilidad del depósito de relaves siendo mayor a 1.15 lo cual brinda confianza y seguridad.

2.1.3 Antecedentes Internacionales

En la tesis de Andrés, C & Aldo, O (2012) “inestabilidad de laderas. análisis geotécnico y evaluación de riesgos” explica la reducción del riesgo y prevención de eventos desastrosos producidos por deslizamientos de tierras, requiere de una evaluación integral que considere los factores condicionantes y desencadenantes de carácter natural y antrópico. Dicha evaluación,

constituye una valiosa herramienta de prevención – mitigación para las comunidades en riesgos y para las autoridades competentes.

En el presente artículo de investigación se estudió y aplicó una metodología general para la evaluación del riesgo por deslizamiento de una ladera urbana, considerando la interrelación entre la amenaza y vulnerabilidad física existentes en la zona de estudio. La amenaza se determinó utilizando métodos probabilísticos y determinísticos; mientras que la vulnerabilidad de los elementos expuestos, se obtuvo considerando los tipos de edificaciones y su distribución espacial, el estado de integridad estructural, la profundidad de las cimentaciones y el volumen probable de la masa de terreno inestable.

La investigación de Belandria (2020). “análisis del riesgo geotécnico en la carretera Tovar - Zea, sector la roca, estado Mérida” se basa en el análisis de riesgos geotécnicos para la propuesta de posibles soluciones en esta zona. En primer lugar, se recopila la información geológica y cartográfica y se realiza la caracterización geotécnica de la secuencia estratigráfica de las pendientes. Para este propósito, el análisis cinemático se elabora a través de proyecciones estereográficas, determinando la existencia de falla plana, en cuña y circular. Posteriormente, se calcula el factor de seguridad de la pendiente, obteniendo valores para falla de plano, cuña y circular, en rangos de 3,728 a 0,480 (estable a inestable). Próximo, El mapa de riesgos se elabora siguiendo la metodología propuesta por (Suárez, 2009), logrando que la zona presenta niveles moderados de riesgo geotécnico, con solo 15% de riesgo alto y muy alto, lo cual está condicionado a factores externos de Saturación o sísmica en el pendiente estudiado Se recomienda para las masas rocosas la implementación de mallas de guía con canales, anclajes, hormigón proyectado y desagües horizontales.

En el artículo de investigación “análisis de estabilidad de taludes para la generación de un mapa de riesgo geotécnico empleando interpolaciones geoestadísticas” Rivas, D., Meza, H., Belandria, N., Bongiorno, F. (2016) se realizó la modelación de taludes y análisis de estabilidad con el software SLIDE, permiten calcular el factor de seguridad y la probabilidad de rotura. Posteriormente, utilizando el Software ARCGIS e interpolación geoestadística, se elaboran mapas con las metodologías de zonificación de

susceptibilidad, amenaza, vulnerabilidad y riesgo propuestas por Suárez (2009). Como resultado se presenta un mapa probabilístico del riesgo al que se encuentra expuesta la población. Mayormente, la zona presenta susceptibilidad moderada, amenaza moderada, vulnerabilidad de moderada a muy alta y riesgo geotécnico moderado. 21,2 % del área, posee riesgo muy alto de fatalidad por la existencia de un dominio geológico-estructural y factores climáticos que afectan la estabilidad de los taludes, por tanto, se recomienda estudiar los rasgos estructurales que afectan dicha área.

2.2 Estructura Teórica y Científica que Sustenta el Estudio

2.2.1 Ciclo de Vida de una Presa de Relaves

2.2.1.1 Construcción

Según el MINEM (2015) el desarrollo de depósitos de relaves suele implicar una importante fase de construcción. Aunque estas actividades pueden continuar durante todo el ciclo de vida del dispositivo, la fase de "construcción" aquí se refiere a las actividades iniciales antes de que comience el concentrador. Durante este tiempo, los impactos ambientales pueden incluir la calidad del aire (polvo) y la calidad del agua (derrame de limo), pero estas propiedades son comunes a todos los demás aspectos del desarrollo inicial de la mina. Ellos pueden ser tratados mediante medidas de rutina y no serán consideradas en este documento.

2.2.1.2 Operación

El período de operación comienza y termina con la descarga de los relaves en las instalaciones de acuerdo al MINEM (2015) por lo que esta duración es usualmente determinada por la vida de la mina, que a su vez es gobernada por factores económicos, precios de los metales, y reservas geológicas. Los períodos típicos de operación de un depósito van de 10 a 20 años, aunque algunos están aún operando después de 90 años. El planeamiento operacional para relaves debe considerar como volumen mínimo, la cantidad total de relaves obtenibles con las reservas económicamente minables al momento de la iniciación del proyecto. Es deseable, en lo posible, incorporar una

provisión para contingencias causadas por extensión de las reservas de mineral.

2.2.1.3 Cierre

Para el período de cierre el MINEM (2015) indica que comienza al término de las operaciones de la concentradora y de la descarga de relaves. Durante este tiempo se construyen las instalaciones adicionales que puedan ser requeridas para alcanzar la estabilidad física o química a largo plazo (por ejemplo, zanjas y conductos permanentes de derivación del agua); y se inicia la rehabilitación (por ejemplo, colocando tierra de cultivo y sembrando). El período de cierre requiere el monitoreo de estos parámetros adicionales por el período de tiempo necesario para asegurar su adecuado funcionamiento y para realizar cualquier modificación necesaria. En el caso que se proporcionen fianzas, garantías, bonos u otros documentos financieros para garantizar el cumplimiento exitoso de las medidas de cierre; entonces el fin del periodo de cierre coincidirá con la devolución de los bonos fianzas, etc. de la compañía minera. En general, el tiempo de cierre puede tomar de 2 a 30 años, aunque es típico el lapso de 5 a 10 años y depende de la complejidad y requerimientos técnicos de las medidas de cierre y el monitoreo pertinente. Las medidas de cierre deberán ser tales que su implementación sea también factible en la eventualidad del cese prematuro de las operaciones, debiendo incluirse también, en el planeamiento de cierre, las condiciones de contingencia para la suspensión temporal de las operaciones.

2.2.1.4 Post-Cierre

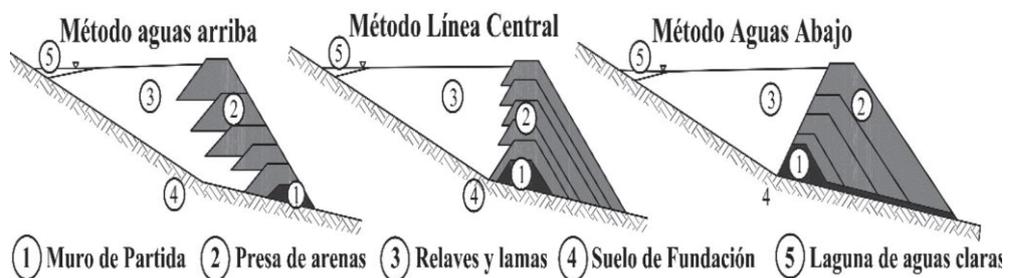
El post-cierre o abandono comienza a continuación de la exitosa terminación de las medidas de cierre y se extiende tanto como se requiera para que la estabilidad física y química del depósito de relaves quede asegurada. Para propósitos prácticos, esto generalmente significa indefinidamente y para circunstancias que involucran ARD ello puede alcanzar períodos de hasta 1000 años. Una implicancia

importante es que las consideraciones de diseño para casos extremos tales como inundaciones y terremotos, deben ser capaces de acomodar los eventos más grandes que puedan ocurrir, potencialmente mucho más grandes que aquellos requeridos para el diseño durante el período de operación (Minem, 2015)

2.2.2 Métodos de Construcción de Presas de Relave Minero

Existen tres métodos comunes de construcción de presas de relave. Estos son, el método de aguas arriba, el de aguas abajo y el de las líneas del centro como se observan en la figura 1. En los tres esquemas es común agregar o combinar otros materiales con los desechos a fin de lograr una estructura más estable, pero ambos deben ser compatibles para evitar diferencias de asentamiento, de compactación y de permeabilidad, lo cual puede tender a hacer variar las condiciones de estabilidad.

Figura 1 Secciones típicas de presas de relaves según su método de crecimiento



Fuente: Abraham Figueroa, Chile (2017)

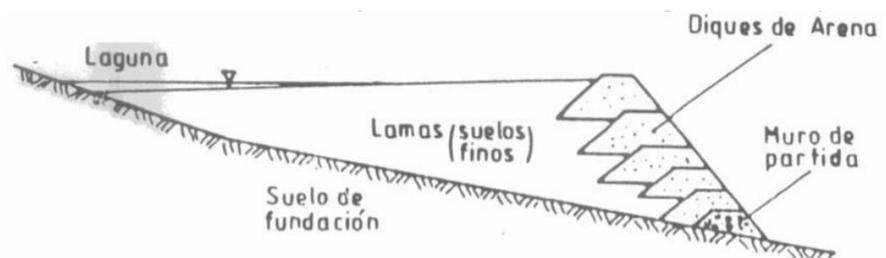
2.2.2.1 Método Aguas Arriba

Según Ramírez (2007) el Método Aguas Arriba consiste en un muro inicial (starter dam) construido con material de empréstito compactado sobre el cual se inicia la depositación de los relaves, utilizando clasificadores denominados “Hidrociclones”; la fracción más gruesa o arena, se descarga por el flujo inferior del hidrociclón (Underflow) y se deposita junto al muro inicial, mientras la fracción más fina o lamas, que sale por el flujo superior del hidrociclón (Overflow) se deposita hacia el centro del tranque en un punto más alejado del muro, de modo tal que se va formando una especie de playa

al sedimentar las partículas más pesadas de lamas y gran parte del agua escurre, formando el pozo de sedimentación o laguna de sedimentación, la que una vez libre de partículas en suspensión es evacuada mediante un sistema de estructura de descarga, que pueden ser las denominadas torres de evacuación, o bien, se utilizan bombas montadas sobre una balsa flotante. Una vez que el depósito se encuentra próximo a llenarse, se procede al levante del muro, desplazando los hidrociclones a una mayor elevación en la dirección hacia aguas arriba y comenzando una nueva etapa de descarga de arenas, y peralte del muro; se continúa sucesivamente la construcción en la forma indicada. Con este método, en la práctica, se pueden alcanzar alturas de hasta 25 metros.

Las presas de relaves del tipo aguas arriba tal como se observa en la figura 2 no son definitivamente apropiadas para las condiciones sísmicas en virtualmente todos los lugares del Perú, excepto posiblemente en condiciones excepcionales donde cualquier falla de flujo puede ser confinada por una barrera artificial o natural, tal como una depresión topográficamente cerrada.

Figura 2 Método de construcción Aguas arriba



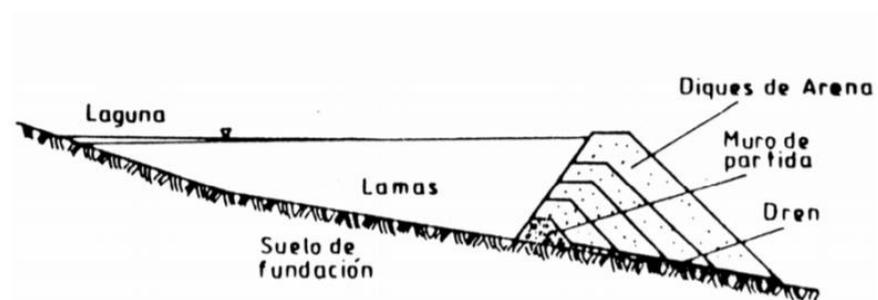
Fuente: (Sernageomin 2007)

2.2.2.2 Método Aguas Abajo

La construcción de Presas de Relave se inicia también con un muro de partida de material de empréstito compactado desde el cual se vacía la arena cicloneada hacia el lado del talud aguas abajo de este muro y las lamas se depositan hacia el talud aguas arriba (Ramírez, 2007). Cuando el muro se ha peraltado lo suficiente, usualmente 2 a 4 m., se efectúa el levante del muro, desplazando los hidrociclones a una

mayor elevación en la dirección hacia aguas abajo y comenzando una nueva etapa de descarga de arenas y peralte del muro. A veces se dispone también de un segundo muro pre-existente aguas abajo (ver figura 3). Las arenas se pueden disponer en capas inclinadas, según el manto del talud del muro de partida, o bien, disponerlas en capas horizontales hacia aguas abajo del muro de partida. Este método de aguas abajo requiere disponer de un gran volumen de arenas y permite lograr muros resistentes más estables del punto de vista de la resistencia sísmica.

Figura 3 Método Aguas arriba



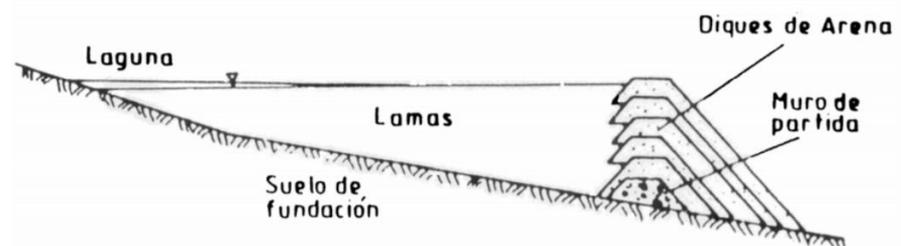
Fuente: (Sernageomin, 2007)

2.2.2.3 Método Línea Central

Ramírez (2007) indica que el Método de línea central se inicia con un muro de partida de material de empréstito compactado, sobre el cual se depositan las arenas cicloneadas hacia el lado de aguas abajo y las lamas hacia el lado de aguas arriba. Una vez completado el vaciado de arenas y lamas correspondiente al muro inicial, se eleva la línea de alimentación de arenas y lamas, siguiendo el mismo plano vertical inicial de la berma de coronamiento del muro de partida. Lo que permite lograr un muro de arenas cuyo eje se mantiene en el mismo plano vertical, cuyo talud de aguas arriba es más o menos vertical, y cuyo talud de aguas abajo puede tener la inclinación que el diseño considera adecuada. Este método requiere disponer de un volumen de arenas intermedio entre los 2 métodos anteriores, y permite lograr muros suficientemente estables. La inseguridad que muchas veces despiertan los tranques de arenas de relave no deben atribuirse al material con que se construyen, sino al sistema de construcción por

relleno hidráulico que puede inducir elevadas presiones de poros e incluso la licuefacción total en caso de un sismo. Sin embargo, las técnicas modernas de diseño, construcción y control permiten obtener estructuras seguras a base de buenos sistemas de drenaje, de un eficiente sistema de ciclonaje y disposición de las arenas, y también de una buena compactación de la arena que permita alcanzar una elevada densidad, utilizando un equipo adecuado para ello. Lo anterior, complementado con un control piezométrico en el cuerpo del prisma resistente, deja al tranque de arenas de relave en condiciones de estabilidad semejante al de otras obras de Ingeniería de Importancia.

Figura 4 Método Línea Central



Fuente: Sernageomin, 2007

2.2.3 Características Geográficas

2.2.3.1 Clima

Los factores climáticos afectan el manejo de relaves en varias formas importantes. La lluvia y los deshielos controlan el manejo del agua y los requerimientos extremos de inundación para los depósitos de superficie y, junto con la evaporación, influyen en la movilidad del contaminante y aún las propiedades físicas de los relaves depositados.

Las características climáticas del Perú varían en una escala aún más amplia que las características fisiográficas. De acuerdo a una clasificación esquemática del clima, 8 de los 11 tipos de clima del mundo se encuentran en el Perú.

El clima a lo largo de la costa está dominado por los efectos de las corrientes oceánicas. Directamente en la orilla se encuentra una franja

de agua anormalmente fría para esta latitud y aunque está asociada con la corriente de Humboldt que corre hacia el norte, la franja de agua fría consiste realmente de agua insurgente de las profundidades del océano. Esta agua fría de la orilla da mucha estabilidad a las condiciones atmosféricas, de tal forma que la lluvia es muy pequeña o no existe. Al mismo tiempo, sin embargo, de junio a octubre en el invierno hay un fuerte desarrollo de nubes bajas o finas capas de niebla (garúa) que impide la acción de la luz solar y retarda la evaporación. Por ejemplo, Lima tiene un promedio de precipitación anual de sólo 5 cm. con cobertura de nubes del 70% del año; cifras similares de 3 cms y 60% se registran en Tacna, al Sur (Meigs, 1966). La desértica costa peruana, junto con la zona árida que se extiende tierra adentro por una distancia de 30 a 50 km., con excepción de una expansión hacia el Este (dentro del Altiplano) en el Sur. Esta zona es contigua al Desierto de Atacama, el desierto costero más seco del mundo donde la lluvia puede caer con intervalos de muchas décadas y es insuficiente para soportar toda vegetación hasta elevaciones tan altas como los 2,500 mts en las laderas de los Andes.

Los efectos del Océano también controlan la precipitación extrema en esta región. La contracorriente tibia El Niño aparece anualmente desde el Norte, pero ocasionalmente con intervalos de 7 o más años alcanza distancias mucho mayores hacia el Sur. Esta masa de agua tibia produce inestabilidades atmosféricas que han resultado en lluvias torrenciales e inundaciones aún en áreas que no han tenido lluvias por un año. Por ejemplo, durante uno de los peores años de El Niño en 1925, Lima experimentó lluvias de 152 cm., más de 30 veces el promedio anual, y la costa norte tuvo más lluvia que en todos los 10 años anteriores (Meigs, 1966). Esto muestra claramente que los largos intervalos entre lluvias no garantizan la ausencia de intensa precipitación para los depósitos de relaves y las consiguientes posibilidades de inundación.

En el resto del país, el mismo efecto El Niño que produce intensas lluvias periódicamente en la región costera, produce similares efectos

en la Selva y sequía en la Sierra. Normalmente, sin embargo, los climas tropicales y subtropicales en el norte y centro de la Selva se mantienen en una zona de convergencia de baja presión, con lluvias anuales de 3,000 a 4,000 mm. En la Sierra, las condiciones son normalmente semiáridas, aunque las lluvias y nevadas son controladas mayormente por la elevación y efectos orográficos. La precipitación promedio anual en la Sierra va desde la vecindad de 300 mm en el Sur a 900 mm en el Norte con nieve sobre los 3,500 m. de elevación.

2.2.3.2 Sismicidad

El Perú está ubicado en una de las áreas sísmicamente más activas del mundo y los terremotos han afectado las minas desde su comienzo en el país. Cuando un tsunami acompañó el primer gran terremoto experimentado por Lima en 1586, se esparció el temor de que los depósitos de mercurio, necesarios para mantener la producción de oro, se hubieran perdido. Estos temores fueron percibidos más tarde cuando el gran terremoto de 1687 afectó la mayor parte de Lima y el subsiguiente tsunami destruyó las reservas de mercurio a todo lo largo de la costa, desde Lima a Puerto Caballas (Dorbath, 1990).

Como lo muestran estas anécdotas, el récord de terremotos en el Perú es remarcable no sólo por la dimensión de los eventos que han ocurrido sino también por su rango de casi 400 años. Desde 1582 a 1974 ha habido 18 terremotos entre grandes y mayores causados por subducción con magnitudes entre 7.5 y 8.8.

Sin embargo, el mayor peligro para las presas de relaves de los terremotos en Perú, se deriva de la licuefacción sísmica que puede afectar tanto los relaves saturados como los suelos naturales saturados debajo de un reservorio, a menos que tengan una alta densidad. Además de todo tipo de relaves, los tipos de suelos naturales, incluidos el limo, la arena y la grava, también son susceptibles a la licuefacción, que ocurre cuando las cargas cíclicas hacen que la presión de los poros en los vacíos saturados del material aumente durante o inmediatamente después del temblor producido por el terremoto. Esto,

a su vez, hace que el material pierda resistencia, sufra grandes deformaciones y se comporte esencialmente como un fluido. NRC (1985) ha proporcionado una revisión completa de los procesos de licuefacción y una revisión panorámica integrada de investigaciones recientes.

2.2.4 Análisis De Mecanismos De Falla

En función de los documentos revisados, se propone que los principales mecanismos que generan la falla de los depósitos de relaves se pueden agrupar en cinco:

- Inestabilidad de Taludes.
- Erosión Interna.
- Rebalse
- Licuefacción en presas de relaves
- Inestabilidad del suelo de fundación

Cada mecanismo de falla tiene, por un lado, sus propios parámetros cuyo monitoreo y control, así como un cambio en sus valores, genera una situación de inestabilidad. A estas propiedades cuantificables se les denomina Parámetros Críticos, y pueden afectar la estabilidad física de un depósito de forma individual o acoplado con otros parámetros. Por otro lado, se definen los Eventos Gatilladores, que corresponden a situaciones o intervenciones de tipo natural o antrópica que interviene en la estabilidad física de un depósito (Advanced Mining Technology Center, 2017). Además, se tienen distintos métodos y modelos para estudiar y/o predecir la ocurrencia de una falla controlada por cada mecanismo.

2.2.4.1 Inestabilidad de Taludes

De acuerdo con Knight (2015), considerar la estabilidad de taludes de un depósito de relaves es vital tanto en su fase de diseño como en la construcción y operación. En general, la estabilidad de taludes queda determinada por la geometría del muro, ya sea por su altura como por la inclinación de estos, las propiedades del material del suelo, la

naturaleza del suelo de fundación y el nivel de compactación, principalmente.

El diseño del talud debe ser tal que asegure que la estructura sea capaz de soportar las potenciales condiciones de carga esperadas durante la vida del depósito (Knight, 2015). Esta estabilidad se refleja a través del cálculo de un factor de seguridad que asegure que riesgo de que ocurra una falla sea aceptablemente bajo.

La Tabla 2 muestra los parámetros críticos e instrumentos que se utilizan en terreno para monitorear los parámetros críticos asociados a inestabilidad de taludes, mientras que la Tabla 3 presenta los ensayos usados con el mismo propósito.

Tabla 2 Instrumentos utilizados para controlar los parámetros críticos

Parámetros Críticos	Instrumentos
Nivel freático en depósito y muro	Piezómetros
Presiones de poros en depósito y muro	Piezómetros
Geometría del muro	Topografía, fotogrametría
Aceleraciones sísmicas del muro	Acelerómetros
Desplazamientos del muro	Celdas de asentamiento
Fenómenos de subsidencia	Celdas de asentamiento

Fuente: Carbajal, 2018

Tabla 3 Ensayos utilizados para controlar parámetros críticos

Parámetros Críticos	Ensayos
Granulometría del material del muro	Análisis granulométrico
Rigidez y resistencia del material	CPT dinámico
Sistema de drenaje y recirculación	Inspección visual, caudalímetro, turbidímetro
Nivel de compactación	SPT, CPT, Proctor

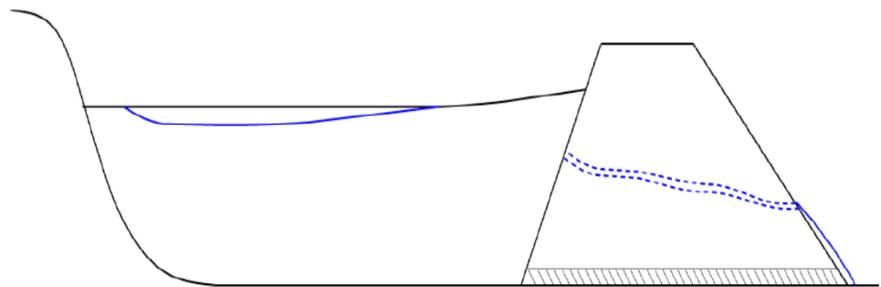
Fuente: Carbajal, 2018

2.2.4.2 Erosión Interna

Corresponde a la migración de material a través del muro de contención, dando lugar a la formación de un conducto que permite la circulación de agua y/o relave. La cavidad resultante favorece el progreso de la erosión, la cual puede generar una falla local o global del depósito o de su suelo de fundación.

La Figura 5 presenta un esquema general de una falla por erosión interna.

Figura 5 Esquema de Erosión Interna



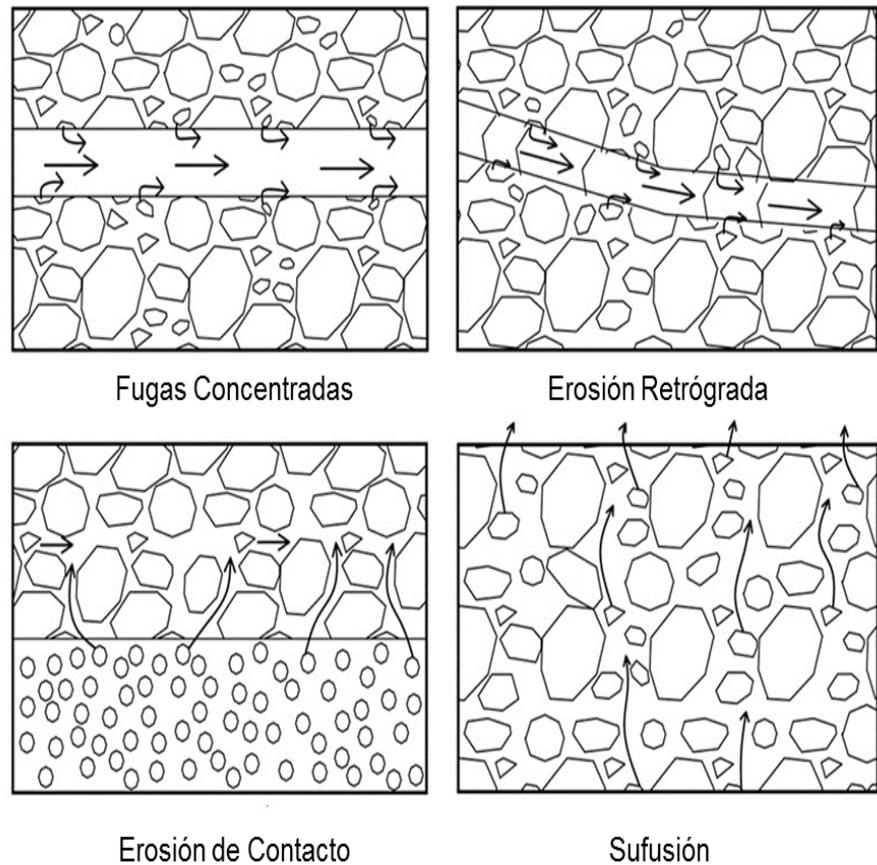
Fuente: Carbajal, 2018

De acuerdo con Fell (2003), el proceso de erosión interna puede ser dividido en cuatro fases:

- 1) **Iniciación:** Se forman fugas. Se inicia la erosión a lo largo de las paredes de la grieta.
- 2) **Continuación:** La erosión continúa su expansión. Esta fase está controlada por los filtros y las zonas de transición: Si éstos están diseñados y construidos para satisfacer los criterios exigidos, la erosión debería detenerse. En caso contrario, la erosión interna continúa.
- 3) **Progresión:** Se amplía la filtración. Esta progresión se ve afectado por tres situaciones: La capacidad del suelo para soportar el techo de “la tubería” formada por la erosión; ampliación del agujero; y si los flujos estarán limitados por el relleno de las grietas debido a filtros de zonas aguas arriba.

- 4) Falla: Existen distintos mecanismos de falla: gran ampliación del agujero, asentamiento de la cresta, socavación en la cresta, generando un rebalse del depósito, desintegración del talud aguas abajo e inestabilidad del talud aguas abajo.
- 5) Además, de acuerdo con Fell & Fry (2007), existen cuatro tipos de fallas por erosión interna, los cuales se muestran en la Figura 6:
- 6) Flujo Concentrado: Proceso de erosión interna que puede comenzar en una grieta en el muro de contención, o en la fundación, que a su vez pudo ser generada por asentamientos diferenciales, ciclos de congelamiento y deshielo, o por fractura hidráulica. La concentración de flujo genera erosión sobre las paredes de la fractura, aumentando su tamaño.
- 7) Erosión Retrógrada: Implica el desprendimiento de partículas bajo la acción de un flujo en dirección hacia una superficie sin filtro. Como la cara de aguas debajo del muro de contención, o la superficie libre del suelo de fundación. Las partículas sueltas son arrastradas por el flujo de infiltración que se dirige gradualmente hacia la cara de aguas arriba del muro o de la fundación.
- 8) Erosión por Contacto: Erosión que ocurre en zonas de contacto entre materiales de diferentes granulometrías. Por lo general, corresponde al movimiento de las partículas finas del contacto, debido a la presencia de flujo.
- 9) Sufusión: Tipo de erosión interna que involucra la migración selectiva de las partículas finas de la matriz de partículas gruesas. Las partículas finas se mueven debido al flujo, a través de los vacíos entre las partículas más grandes.

Figura 6 Tipos de erosión interna



Fuente: Zhang, 2016

Por otra parte, se ha visto (Foster, 2000) que las fallas por erosión interna ocurren de manera rápida (entre 6 y 12 horas entre la primera observación de fuga y la falla).

Existen diferentes estudios relacionados con la ocurrencia de erosión interna, en particular, con el tiempo que le toma a este fenómeno desarrollarse y llegar a la falla. Uno de estos estudios fue desarrollado por Fell (2003), en el cual se presenta un método para la estimación aproximada del tiempo en el que progresa la erosión interna.

Fell. (2003) estima el tiempo de desarrollo de la erosión interna, considerando:

1. Cada fase del proceso.
2. La evaluación de los tiempos probables para la falla, y los factores que afectan la probabilidad de que se produzca el proceso. Para esto,

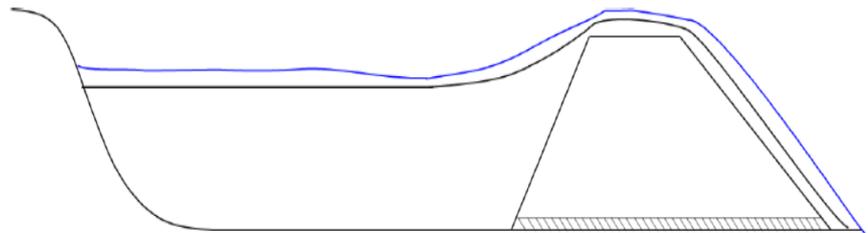
se asume que la velocidad de ocurrencia de cada fase está correlacionada con la probabilidad de que el proceso ocurra. Así, si la ocurrencia de una fase del proceso es muy probable, es probable también que ésta ocurra rápidamente.

3. El análisis de los casos de estudio de fallas y accidentes, para evaluar si el método del punto anterior es razonable, y para ajustar los tiempos en los casos que sea necesario.

2.2.4.3 Rebalse

Este mecanismo de falla se produce cuando el volumen de entrada al depósito ya sea de relaves o de agua, excede la capacidad del embalse. La Figura 7 muestra un esquema general de este mecanismo de falla.

Figura 7 Esquema general de un Rebalse



Fuente: Carbajal, 2018

El rebalse puede generar una erosión considerable en el muro de contención, produciendo una falla progresiva, la cual puede terminar en la formación de una brecha y el posterior colapso.

Las características del depósito juegan un rol fundamental en el desarrollo de este mecanismo de falla. En el diseño, la definición de la altura del muro, la revancha, la distancia entre el muro y la laguna de aguas claras (dimensiones de la playa del depósito), el área y volumen de agua en el depósito, son parámetros que deben ser controlados para evitar una falla por rebalse.

Respecto a los instrumentos, la Tabla 4, muestra aquellos que se utilizan con mayor frecuencia para monitorear los parámetros críticos asociados a este mecanismo de falla.

Tabla 4 Instrumentos utilizados para controlar los parámetros críticos del Rebalse

Parámetros Críticos	Instrumento
Altura	Topografía
Revancha	Topografía
Distancia muro – laguna	Topografía
Deformación del coronamiento	Celdas de asentamiento
Caudales de ingreso y salida	Cudalímetro, Flujómetro
Aceleraciones sísmicas en el muro	Acelerógrafos
Pendiente de la playa	Fotografía
Bloqueo de sección de paso del vertedero	Inspección visual
Presencia de grietas en el coronamiento	Fotografía

Fuente: Carbajal, 2018

2.2.4.4 Licuefacción en Presas de Relaves

Un aspecto de gran importancia a ser considerado en la ingeniería de presas de relaves está relacionado con los estudios para evaluar la vulnerabilidad de la licuefacción. En la práctica, generalmente se supone que los relaves se licúan durante un terremoto; Tanto la fracción fina de los relaves (limos) como las arenas de los relaves (diques) son susceptibles a la licuefacción.

Troncoso (1995) y Ishihara (1984) indican que los factores de predominancia en el comportamiento de la licuefacción en los relaves mineros están influenciados por el tipo de material de origen, la distribución del tamaño de grano (fino o grueso) y las propiedades de los materiales (densidad relativa y plasticidad).

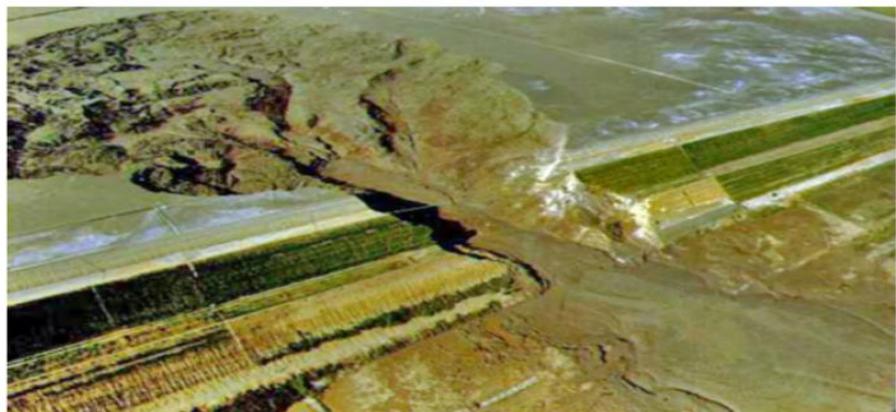
Para el estudio de la licuefacción, se ha definido un estándar en la práctica profesional, que incluye las siguientes etapas: 1) Susceptibilidad y potencial de licuefacción, 2) Análisis de estabilidad o diapositiva de flujo y 3) Análisis de desplazamiento.

La evaluación de la susceptibilidad en los relaves mineros generalmente se realiza de acuerdo con los criterios definidos por Andrews y Martin (2000) y Bray (2004), desarrollados para suelos con una cantidad significativa de finos no plásticos. Estos criterios evalúan si el suelo cumple con las características físicas para ser licuable independientemente del mecanismo desencadenante, para ese propósito, se utilizan las propiedades de índice de los suelos.

Una vez que se determina la susceptibilidad del suelo a licuar, se evalúa el potencial de licuefacción y el comportamiento del suelo (respuesta de contracción o dilatación). La evaluación del potencial de licuefacción se puede llevar a cabo utilizando métodos semiempíricos basados en el método de Seed and Idriss (1971), pruebas de laboratorio, análisis de respuesta de sitio (dominio de tiempo o frecuencia) o utilizando análisis numérico con modelos constitutivos avanzados.

Las historias de casos de licuefacción estática en presas de relaves han significado fallas catastróficas como los casos de la falla de la presa de relaves Kolontar en Hungría (Figura 8) y Harmony, Merriespruit, Sudáfrica (Figura 9), así como casos recientes de fallas en Brasil de Presa Samarco en 2015 y presa Brumadinho en 2019.

Figura 8 Falla de la presa de relaves de Kolontar en Hungría



Fuente: Turi, Pusztai y Nyari, 2013

Figura 9 Armonía, Merriespruit, Sudáfrica



Fuente: (M. Davis y T. Martin, 2002)

La falla del flujo puede ocurrir repentinamente durante el terremoto o inmediatamente después de que el terremoto haya cesado, incluso mucho tiempo después (pocas horas o hasta 1 día), lo que a menudo se llama deformaciones posteriores al terremoto, para lo cual la estimación de la resistencia residual es esencial en para evaluar la licuefacción de flujo.

Según Robertson (2010), la secuencia para evaluar la licuefacción del flujo es:

- 1) Evaluar la susceptibilidad a la pérdida de fuerza.
- 2) Evaluar la estabilidad utilizando resistencias al corte después del terremoto
- 3) Evaluar el gatillo para la pérdida de fuerza.

2.2.4.5 Inestabilidad del suelo de fundación

Este mecanismo se debe a la falta de información o la incompreensión de los antecedentes del departamento del sitio de depósito de relaves (geología, hidrogeología, ingeniería geotécnica, etc.). Si en una capa de suelo débil o roca blanda a cierta profundidad debajo de la estructura, si la fuerza generada por el peso del sedimento excede la resistencia al corte del suelo constituyente, puede ocurrir movimiento a lo largo del plano de la falla. Clase débil. El último ejemplo de este

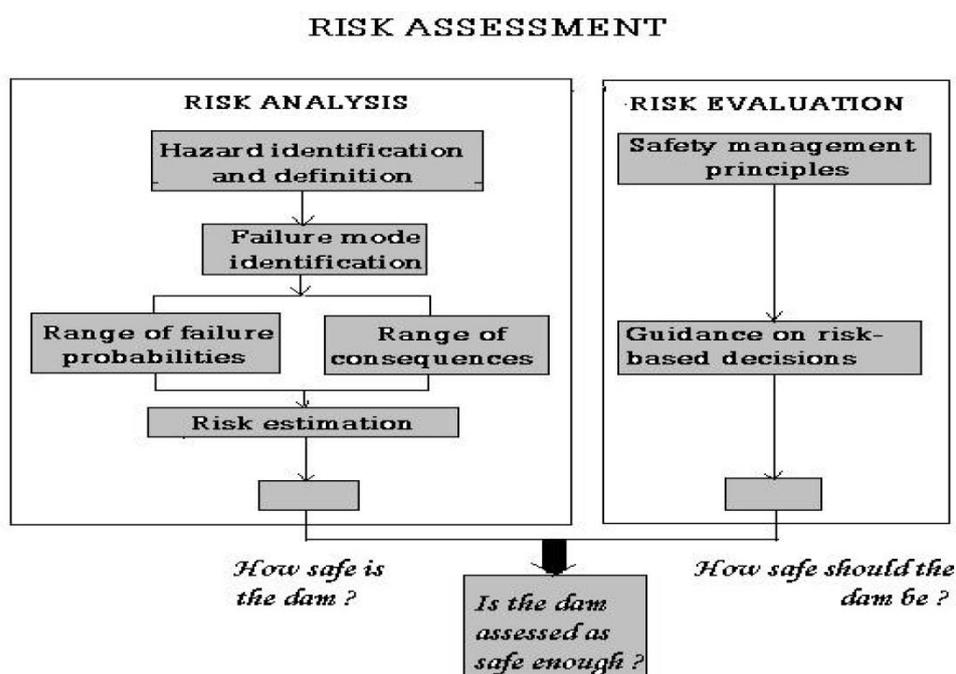
tipo de mecanismo de falla corresponde al depósito de relaves de Mount Polley (Canadá, 2014).

Es importante señalar que, si bien en Chile no se ha informado ni documentado fallas por licuación estática ni fallas del suelo de fundación, se deben tener en cuenta debido a que las condiciones requeridas para la generación de ambos mecanismos pueden producirse en depósitos de relave en operación y cerrados (p.44 SERNAGEOMIN, 2018).

2.2.5 Concepto de evaluación de riesgos para presas

La evaluación de riesgos es el proceso de decidir si los riesgos existentes son tolerables y las medidas de control de riesgos actuales son adecuadas y, en caso contrario, si se requieren medidas alternativas de control de riesgos. La evaluación de riesgos incorpora, como entradas, los resultados de las fases de análisis de riesgos y evaluación de riesgos. La evaluación de riesgos implica emitir juicios sobre la asunción de riesgos y todas las partes deben reconocer que las consecuencias adversas podrían materializarse y los propietarios deberán lidiar de manera efectiva con las consecuencias del evento de falla.

Figura 10 Esquema de Evaluación de Riesgos



Fuente: Borrador No.9 del Boletín ICOLD (1999)

2.2.5.1 Análisis De Riesgos

El análisis de riesgo de una presa es el uso de la información disponible para estimar el riesgo de peligros para las personas o las poblaciones, la propiedad o el medio ambiente. Un análisis de riesgo generalmente contiene los siguientes pasos: definición del alcance, identificación de peligros y estimación de riesgos. Un análisis de riesgo implica la desagregación o descomposición del sistema de presas y las fuentes de riesgo en sus partes fundamentales.

El análisis de riesgos para los sistemas de presas se puede clasificar por la naturaleza de los peligros que conducen a las consecuencias de preocupación. Los peligros en cuestión pueden agruparse en cuatro categorías generales:

- a) Peligros debidos a condiciones naturales (cargas normales, terremotos, inundaciones, escombros, vientos, etc.).
- b) Peligros operativos (confiabilidad del aliviadero, error del operador, etc.).

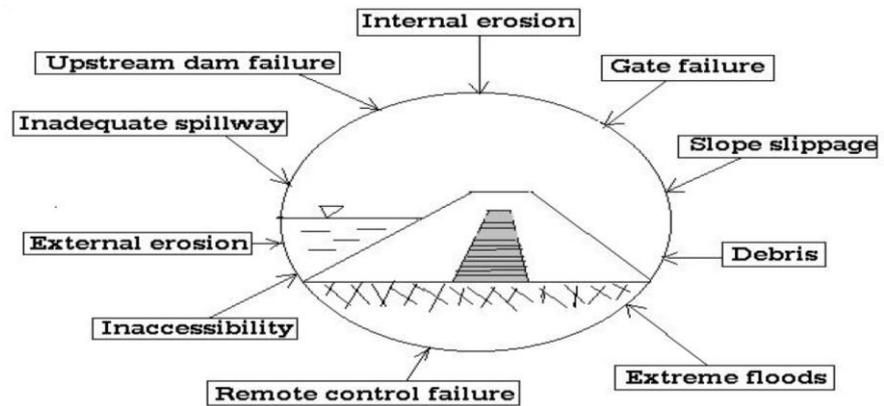
- c) Peligros internos (envejecimiento, reacción álcali-agregado, erosión interna, fatiga del metal, etc.)
- d) Riesgos sociales (guerra, sabotaje, etc.).

La identificación de riesgos es el proceso de determinar qué puede salir mal. La identificación de riesgos para una presa se puede dividir en la siguiente serie de pasos según Graham & Bartsch (1995) :

- 1) Identificar eventos iniciadores: internos o externos.
- 2) Evaluar la respuesta del sistema: rebasamiento, incumplimiento, sin falla.
- 3) Determinar los resultados: liberación abrupta de agua de la presa en diferentes magnitudes.
- 4) Estimar las consecuencias: pérdida de vidas, consideraciones económicas y sociales.

Las fallas a menudo se clasifican en estáticas, hidrológicas o sísmicas. En Suecia Graham & Bartsch (1995) y también en Finlandia, las dos primeras categorías son las más importantes. En última instancia, conducirán a derrames, erosión interna, erosión externa o tipos de fallas por deslizamiento. Algunos de los diversos factores, que son relevantes para las condiciones de Finlandia o Suecia se presentan en la Figura 11. La actividad sísmica en Finlandia está en niveles tan bajos que se consideran en un grado restringido.

Figura 11 Factores que contribuyen a la falla estática o hidrológica



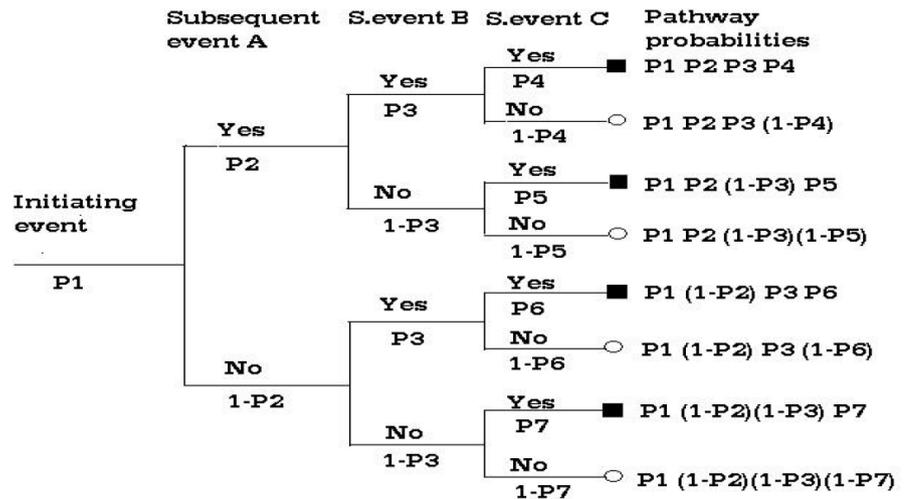
Fuente: Graham & Bartsch (1995)

2.2.5.2 Estimación de riesgos

La estimación del riesgo implica la asignación de probabilidades a los eventos y respuestas identificado bajo identificación de riesgo. La evaluación de estimaciones de probabilidad adecuadas es una de las tareas más difíciles de todo el proceso. El resultado de este paso es un cálculo del riesgo de falla. Dos herramientas que se utilizan a menudo para ayudar en la estimación del riesgo son árboles de falla y árboles de eventos (Figura 12).

La estimación de probabilidad se puede agrupar en tres enfoques generales según el tipo y la calidad de los datos disponibles. Estos incluyen la aproximación analítica, el enfoque empírico, y el enfoque crítico. El enfoque analítico es el más sofisticado de los tres y, a menudo, está respaldado por el uso de modelos lógicos para calcular probabilidades. El enfoque empírico utiliza bases de datos existentes para generar estimaciones de probabilidad basadas en frecuencias históricas. El enfoque de juicio reconoce que muchos sistemas no pueden describirse adecuadamente por medio de métodos analíticos o empíricos, e intenta incluir la experiencia y el juicio de los ingenieros en ejercicio para guiar la estimación de probabilidades.

Figura 12 Árbol de eventos ilustrativo



Fuente: Boletín ICOLD (1999)

2.2.5.3 Evaluación de Riesgos

Para poder realizar una evaluación primero se requiere de realizar una mitigación de riesgos que es una aplicación selectiva de técnicas apropiadas y principios de gestión para reducir la probabilidad de que ocurra o sus consecuencias, o ambas.

La mitigación del riesgo es un paso lógico que sigue a la estimación del riesgo. La estructura de análisis de riesgos se utiliza para identificar y priorizar aquellos componentes del sistema que probablemente se beneficiarían de las mejoras. Si el riesgo calculado del sistema existente se considera demasiado alto, se proponen alternativas para reducir el riesgo de falla. Estas alternativas se incorporan al modelo de riesgo y se realiza una reevaluación para estimar sus impactos. Después de un estudio repetido utilizando diferentes alternativas, los tomadores de decisiones pueden recibir re con alternativas adecuadas y sus costos estimados para su consideración en la mejora de la seguridad general de la presa. En última instancia, este paso en el proceso de evaluación de riesgos es el más importante. Es el objetivo principal al que conducen todos los demás procedimientos.

Después de mitigar los riesgos se precede a la aceptación del riesgo que es una decisión informada para aceptar la probabilidad y las

consecuencias de un riesgo particular. La aceptación del riesgo está acoplada a la evaluación de reducción del riesgo y es la base para decidir qué riesgo residual se aceptará para la comunidad y las estructuras afectadas. En algunos países, existe un cierto nivel de riesgo que se define como el límite de riesgo inaceptable. En las condiciones finlandesas, cada situación se evalúa individualmente. Los factores de seguridad recomendados por las guías generales de diseño para trabajos de ingeniería y la información de apoyo y las recomendaciones de los analistas de riesgos e ingenieros proporcionan información importante, pero son los tomadores de decisiones los que finalmente toman la decisión. A veces existen diferencias entre lo que se considera tolerable para las estructuras existentes y lo que se requiere para las nuevas estructuras.

El riesgo individual es el total incremento del riesgo impuesto por una presa. Por lo tanto, los riesgos aportados por todos los modos y escenarios de falla deben combinarse para obtener el riesgo general. Las Directrices australianas (ANCOLD, 1994) propusieron que el Riesgo individual se calcularía como el Riesgo individual promedio sobre la población en riesgo, o como el Riesgo individual para la persona en mayor riesgo. La probabilidad condicional promedio de muerte, dada la falla de la presa, es la pérdida de vidas esperada dividida por la población en riesgo. Sin embargo, se afirma que el riesgo individual para la persona en mayor riesgo es el valor que realmente importa. Los criterios de riesgo individual según ANCOLD son:

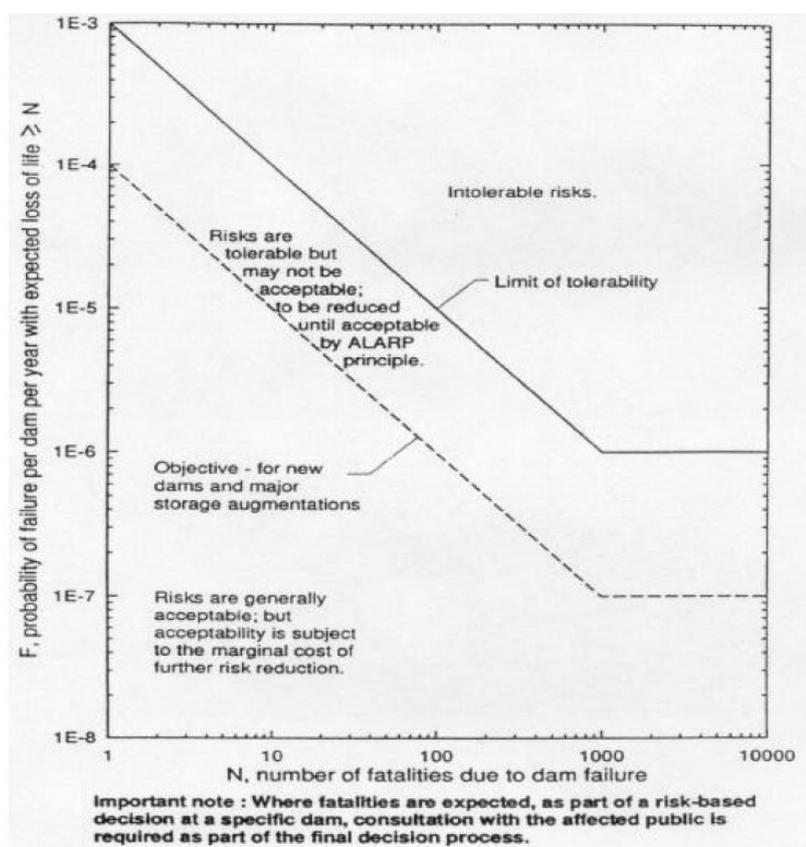
- Valor límite del riesgo individual promedio: $1E-05$ por año (ver Figura 13).
- Valor límite de riesgo individual para la persona con mayor riesgo: $1E-04$ por año
- Valor objetivo del Riesgo Individual medio: $1E-06$ por año.
- Valor objetivo del riesgo individual para la persona con mayor riesgo: $1E-05$ por año.

El riesgo social (el riesgo anual de un evento que resulte en un número de muertes igual o superior a un número determinado) tienen como objetivo tener en cuenta la aversión de la sociedad a los desastres que implican múltiples muertes. De acuerdo con las Directrices ANCOLD de 1994, dos características de los criterios de riesgo social son:

- Se preocupan solo por el número de vidas perdidas, y no por las identidades de las personas involucradas y
- Son basados en eventos. Por lo tanto, cada escenario individual de falla de presa se considera por separado al juzgar si una presa cumple.

La Figura 13 muestra la recomendación revisada del Comité Nacional Australiano de Grandes Represas (ANCOLD, 1998) para la relación entre la probabilidad de falla y el número de muertes debido a la falla de una presa. La curva superior (límite) se refiere a presas existentes. Tal como se concibió originalmente, la curva inferior (Objetivo) se refiere principalmente a nuevas presas (McDonald, 1998).

Figura 13 Criterios de riesgo social revisados de ANCOLD



Fuente: Grupo de trabajo de ANCOLD sobre evaluación de riesgos, 1998

Para una presa existente con niveles de riesgo inferiores al Límite, pero superiores al Objetivo, la prueba ALARP determina si una mayor reducción del riesgo es económica y prácticamente viable. Si es así, el riesgo tolerable se determinará teniendo en cuenta el principio ALARP.

Para una presa existente con un nivel de riesgo inferior al valor objetivo, puede existir la obligación legal de reducir aún más el riesgo si la dificultad y el costo de hacerlo son leves o insignificantes. Esto puede verse como una extensión del principio ALARP (Bowles, 2001).

Para eventos de fallas sin potenciales fatalidades o daños irreparables al medio ambiente, la probabilidad de falla anual objetivo puede decidirse exclusivamente en base a consideraciones económicas y análisis de riesgo correspondientes. Un nivel objetivo de $10E-3$ a $10E-$

2 en lugar de $10E-6$ a $10E-5$ puede ser un criterio razonable (Hoeg 1996).

2.2.5.4 Aplicación Sistemática Del Juicio De Ingeniería

En algunos países se está aplicando un análisis de riesgo probabilístico simplificado en la reevaluación y recertificación de presas de relleno de roca existentes y para dar prioridad a las medidas correctivas. En la forma utilizada, el análisis se denomina aplicación sistemática del juicio de ingeniería. Los pasos del procedimiento son los siguientes (Hoeg, 1996).

- 1) Inspección de la presa y el sitio de la presa para volver a familiarizar al equipo de revisión con la estructura y las condiciones del sitio.
 - La revisión de documentos en la oficina por sí sola suele ser insuficiente.
- 2) Detección del modo de falla.
 - Revise las estadísticas de incidentes y fallas disponibles para presas similares.
 - Visualizar y definir todos los posibles modos de falla. No se asignan probabilidades en esta etapa.
- 3) Construcción de árbol de eventos.
 - Se desarrollan y detallan las consecuencias del fracaso, mostrando las interrelaciones entre eventos.
 - En esta etapa, sólo se desarrollan los conjuntos de ramas de árboles que se propagan a la liberación incontrolada del reservorio.
 - La descomposición de las secuencias de fallas en los eventos que los componen es esencial para el siguiente paso del procedimiento.
- 4) Estimación de probabilidad
 - Aunque es útil, este paso no requiere información estadística.

- Las probabilidades de los eventos pueden evaluarse utilizando un enfoque subjetivo de grado de creencia (evaluación de probabilidad de juicio). Para lograr coherencia entre los miembros del equipo y de una presa a otra, consulte la Tabla 5.

Tabla 5 Ejemplos de descriptores verbales de incertidumbre

Virtualmente imposible	0,01	0,001
Muy improbable	0.10	
Completamente incierto	0.50	
Muy probable	0.90	
Virtualmente cierto	0.99	0.999

Fuente: Hoeg, 1996

5) Evaluación de resultados.

- La probabilidad de falla general se calcula a partir de las probabilidades de eventos de los componentes.
- El árbol de eventos se examina para determinar por qué ciertos modos de falla brindan mayores contribuciones que otros, y las posibles razones se examinan y revisan cuidadosamente.

6) Iteración.

- La ejecución inicial del procedimiento casi siempre identifica algunos modos de falla que es poco probable que contribuyan mucho a la probabilidad general de falla. Identifica la vulnerabilidad de las presas y sus puntos fuertes.
- Es posible que se hayan pasado por alto otros modos durante la selección inicial, y algunos pueden requerir más datos o análisis.
- Después de este primer análisis, se refinan las estimaciones de probabilidad en el Paso 4 en iteraciones posteriores.
- El término riesgo implica una combinación de la probabilidad de que ocurra un evento y las consecuencias del evento en caso de que ocurra. Un caso especial es el riesgo anualizado, que se obtiene como producto de la probabilidad y las consecuencias. En la sección anterior, el riesgo

solo se analiza en términos de probabilidad de falla. Diferentes eventos de falla y momentos de ocurrencia pueden tener un impacto en las consecuencias resultantes aguas abajo. Por lo tanto, en las aplicaciones también se debe considerar la dimensión de las consecuencias del riesgo.

2.2.6 Consecuencia de Falla

Las consecuencias de la falla de un dique de minería que contiene sólidos licuables y sólidos que pueden ser transportados con agua pueden ser mayores que las consecuencias para la misma presa que solo contiene agua. Aunque los relaves y los sólidos licuables pueden viajar una distancia más corta que el agua, el material puede actuar como un fluido viscoso con un peso muy específico que puede causar más daño que el agua sola. El daño puede ser tanto físico como ambiental. La remoción de sólidos liberados y la limpieza podrían ser poco prácticas en muchos casos, por ejemplo, en áreas densamente boscosas o cuerpos de agua

Los estudios de rotura de presas e inundaciones son necesarios para respaldar la evaluación de las consecuencias de posibles fallas de presas mineras, como en las presas convencionales. Sin embargo, existen varios desafíos asociados con las roturas de presas para las presas de relaves porque la ciencia de predecir las rupturas y los flujos de las presas de relaves es relativamente nueva. Las técnicas actuales para predecir la inundación de un deslizamiento de relaves están limitadas y la letalidad de las fallas de las presas de tailings puede ser bastante diferente a la de las inundaciones convencionales por ruptura de presas. Las limitaciones para modelar con precisión los efectos de un deslizamiento de flujo de relaves deben considerarse al evaluar las consecuencias de una falla.

La sección 2.5.2 de Dam Safety Guidelines (CDA, 2013) exige la realización de estudios de rotura de presas para un día soleado y una falla por inundación inducida. La falla del día soleado es aquella que ocurre durante las operaciones normales. Debido a los fluidos y sólidos contaminados que son contenidas por las presas mineras, las consecuencias ambientales incrementales son a menudo peores para una falla en un día soleado que una cola inducida por una inundación. Dado que muchas presas mineras están

alejadas de los centros de población, el potencial de pérdida de vidas a menudo no es tan frecuente como lo es para presas convencionales. Puede haber ocasiones en las que haya personas en el área aguas abajo de la presa de manera temporal debido a cabañas estacionales, carreteras y carreteras, corredores ferroviarios y actividades recreativas.

Las presas de Minería también pueden tener el caso especial en que la falla podría amenazar a los empleados de la mina trabajando aguas abajo de la presa minera, como en una mina a cielo abierto. En este caso, se puede considerar la capacitación del personal de la mina con respecto al procedimiento de evacuación para reducir el potencial de pérdidas de vida.

Las pérdidas ambientales son a menudo el aspecto más significativo de la falla de una presa minera. Es posible que se requieran estudios específicos para predecir el grado de pérdida ambiental. Esto podría incluir daños al medio ambiente río abajo, pero en algunos casos, las represas mineras han sostenido estanques y humedales que se han convertido en hábitats terrestres y pesqueros adecuados y este hábitat puede perderse por una falla.

Las pérdidas económicas para una empresa minera pueden ser sustanciales y pueden ser mucho mayores que la carga financiera directa asociada con una quiebra. Las fallas de las presas mineras pueden resultar en pérdidas de producción, tener un impacto negativo en la capitalización de mercado de una empresa y limitar la capacidad de la empresa para participar en otros proyectos mineros.

Las fallas de las presas mineras pueden provocar la pérdida de la infraestructura del sitio, como carreteras, estaciones de bombeo, líneas eléctricas y tuberías. Se deben considerar todas las posibles consecuencias de la falla y se debe prever la gravedad de estas consecuencias para ayudar a desarrollar un perfil de riesgo para la presa. La Tabla 6 de las Pautas de seguridad para represas (CDA, 2013) presenta un esquema de clasificación que puede usarse para brindar orientación sobre el estándar de atención que se espera de los propietarios y diseñadores de represas. Considera un segmento de las consecuencias discutidas anteriormente: población en riesgo,

pérdida de vidas, valores ambientales y culturales e infraestructura y economía.

La población en riesgo y la posible pérdida de vidas se determinan mediante métodos estándar. Sin embargo, en CDA (2013) se proporciona poca orientación para la evaluación de "Valores ambientales y culturales". Dado que las condiciones ambientales y culturales asociadas con cada presa minera pueden variar, el conocimiento especializado debe aplicarse en los campos de los ecosistemas, la tierra, la calidad del agua, la pesca y los valores culturales. Los criterios y terminología de clasificación, como "pérdida significativa" y "hábitat crítico", deben definirse y acordarse al principio del diseño o del proceso de revisión de la seguridad, con el aporte de especialistas y autoridades reguladoras. Debido a la dificultad de predecir los efectos ambientales y en el ecosistema de las descargas accidentales, a menudo es necesario ser conservador al aplicar clasificaciones de presas.

Las Directrices de seguridad de presas (CDA, 2013) consideran solo las pérdidas económicas a terceros más allá de los límites del arrendamiento minero en el que se encuentra la presa minera. En muchos casos, la falla de una presa minera no puede tener ningún efecto sobre un tercero, si la falla y la desviación están totalmente contenidas en la propiedad de la mina. Como se señaló anteriormente, las consecuencias financieras para el propietario de una mina pueden ser mucho mayores que los efectos financieros sobre terceros.

Por lo tanto, es importante notar que el esquema de clasificación en la Tabla 6 es una consideración para el propietario en términos de establecer el perfil de riesgo para la presa minera. El propietario también debe considerar las demás consecuencias, como se describió anteriormente, que presenta la presa para su operación al momento de establecer el perfil de riesgo y aunque esto puede no cambiar la clasificación, el perfil de riesgo podría incidir en las actividades de vigilancia y los criterios de diseño.

Tabla 6 Clasificación de la Presa

Clasificación de la Presa	Población en Riesgo	Pérdidas de vida	Valores ambientales y culturales	Infraestructura
Baja	Ninguna	Ninguna	Mínimas pérdidas a corto plazo. Ninguna pérdida a largo plazo	Bajas pérdidas económicas. El área contiene limitada infraestructura o servicios.
Significativa (Media)	Solo temporal	No específico o	Pérdida no significativa o deterioro del hábitat silvestre o acuático. Solo pérdida marginal del hábitat. Altamente posible la restauración o compensación de especies	Pérdidas en instalaciones recreacionales, lugares de trabajos estacionales y vías de transporte usadas con muy poca frecuencia.
Alta	Permanente	Menor a 10	Pérdida significativa o deterioro importante del hábitat silvestre o acuático. Altamente posible la	Pérdidas económicas altas de la infraestructura, transporte público e infraestructura comercial.

			restauración o compensación de especies	
Muy alta	Permanente	Menor a 100	Pérdida significativa o deterioro crítico del hábitat silvestre o acuático	Pérdidas económicas muy altas que afectan importantes infraestructuras y servicios
Extrema	Permanente	Mayor a 100	Gran pérdida y deterioro crítico del hábitat silvestre o acuático. Restauración o compensación imposible	Extremas pérdidas económicas que afectan infraestructuras y/o servicios críticos

Fuente: CDA (2013)

2.2.7 Tipos y circunstancias de falla de las presas

Los datos, que han estado disponibles en los últimos 10 a 20 años, proporcionan una base para las ideas recomendadas para ser utilizadas en el análisis de riesgos. Este estudio aborda los riesgos asociados con la construcción, operación y falla de presas, excluyendo problemas ambientales indirectos o de reasentamiento. El propósito del estudio es identificar los principales riesgos reales asociados a cada tipo y altura de presa, para todas las circunstancias. Puede ser de ayuda en varios aspectos:

- En un análisis de riesgo extenso de presas muy grandes, para corroborar de manera confiable las probabilidades elegidas en los árboles de eventos;

- En el análisis de riesgo simplificado de represas más pequeñas, para centrar el análisis e riesgo de bajo costo en algunos riesgos principales; y
- En la identificación de posibilidades para reducir estos riesgos mediante medidas estructurales o no estructurales de bajo costo.

El informe de Lemperiere (1999) se basa en datos existentes para 17.200 presas de más de 15 m de alto fuera de China. Se han informado 204 fallas relacionadas con estas presas. La cantidad de víctimas de fallas es aproximadamente la misma que la cantidad de presas construidas; es menor que el número de vidas perdidas por accidentes laborales durante la construcción. Las consecuencias de la falla varían considerablemente según el tipo de presa y la causa de la falla, porque la extensión de la ruptura y el tiempo que tarda en ocurrir la ruptura pueden ser muy diferentes.

El ochenta por ciento de las fallas en presas de mampostería y concreto fueron causadas por tensiones excesivas en la presa (mampostería) o cimientos (deslizamiento). Las roturas fueron repentinas y, a menudo, hasta cinco veces más anchas que profundas. El 15 por ciento de estas fallas de presas fueron causadas por tuberías en los cimientos (los orificios de las tuberías pueden crecer rápidamente).

Solo el 10 por ciento de las fallas de la presa de relleno han sido repentinas, como resultado de deslizamientos dentro de la presa o sus cimientos, o licuefacción. Más del 80 por ciento fue causado por erosión interna (tuberías en la presa o cimientos) o erosión externa por desbordamiento por inundación o una ola de ruptura de presa de una presa río arriba. En la mayoría de los casos, estos fallos tardaron horas en producirse. Las brechas pueden ser estrechas para el relleno cohesivo, pero se vuelven más de diez veces más anchas que profundas para materiales no cohesivos (incluido el relleno de roca) y grandes depósitos.

La mitad de las 204 fallas mencionadas anteriormente para 17200 represas ocurrieron antes de 1950, cuando sólo se habían construido 5000 presas. El progreso en la planificación de emergencias y los sistemas de alerta temprana es esencial para mejorar la seguridad de las poblaciones en riesgo. Esto se ve

facilitado por las telecomunicaciones modernas, pero la eficacia varía según el tipo de presa y las circunstancias. Los fallos nocturnos y el agua fría aumentan considerablemente el riesgo de muerte. Al estudiar las posibilidades de evaluación de riesgos, las circunstancias de falla notificadas se pueden clasificar de la siguiente manera:

Circunstancias excepcionales: inundaciones, olas que rompen presas aguas arriba, terremotos y guerra.

Circunstancias normales: primer llenado, envejecimiento (después de dos años de funcionamiento) y construcción. (Lemperiere, 1999).

2.2.7.1 Circunstancias excepcionales

La evaluación de riesgos para circunstancias excepcionales se basa lógicamente en la probabilidad y el impacto de tales circunstancias.

a) Inundaciones

La mayoría de las fallas por inundaciones han sido causadas por aliviaderos de tamaño insuficiente. La evaluación de riesgos para este aspecto es bastante fácil y efectiva, si se enfoca en el problema real: qué presas están en mayor riesgo y cuál es la probabilidad de falla real, correspondiente a un flujo de falla inminente, y no de exceder un nivel de agua alto regulatorio. (inundación de diseño). La comparación del flujo de falla inminente con la descarga de 10 000 años puede ayudar a identificar las presas con mayor riesgo y a estimar un rango de probabilidades de falla.

En el caso de las presas cerradas, se sobrepasa un riesgo adicional como resultado de una falla operativa de la compuerta. La probabilidad anual de que esto ocurra ha sido de $0,5 \text{ o } 1 \times 10^{-4}$. Lluvias excepcionales que causan grandes las inundaciones pueden interrumpir el suministro de energía eléctrica, la transmisión, las computadoras y pueden causar pánico. Hay dos puntos clave para evaluar este riesgo: la probabilidad de que la inundación rebase la presa cuando todas las compuertas están cerradas, y la calidad del mantenimiento, capacitación de los operadores, medidas de emergencia, comunicaciones, acceso al sitio, etc.

(tableros de luz, tapones de fusibles, compuertas). El riesgo causado por los escombros flotantes (árboles, vehículos, edificios, etc.) a menudo se pasa por alto y puede ser grave si el espacio entre los pilares es inferior a 10 m.

Los sistemas de planificación de emergencia y alerta temprana pueden resultar muy eficaces en caso de inundaciones. Su eficacia se ve reforzada por el pronóstico del tiempo que advierte por adelantado de la posibilidad de lluvias intensas.

b) Terremotos

El riesgo causado por los terremotos no debe pasarse por alto en las áreas con actividad sísmica. Solo unas pocas presas de más de 15 m se han dañado debido a los terremotos, pero cientos de presas más pequeñas han sido destruidas en minutos. Aunque la probabilidad de falla anual promedio de todas las represas es menor a 10^{-6} en la mayoría de los casos, puede estar en el rango de 10^{-3} para algunas presas en zonas sísmicas.

Las consecuencias de los terremotos pueden ser:

- Falla repentina, por ejemplo, por licuefacción de materiales finos no cohesivos, falla estructural de contrafuertes o
- Fallas retardadas por grietas, que pueden continuar extendiéndose horas o días después, particularmente en los casos de presas de mampostería o presas de relleno sin filtros ni drenaje.

La evaluación del riesgo sísmico es menos precisa que para las inundaciones y la planificación de emergencia es menos eficaz en el caso de fallas repentinas. Pueden ser necesarias medidas estructurales más caras. (Lemperiere 1999)

2.2.7.2 Circunstancias normales

a) Primer llenado

Las primeras fallas de llenado generalmente ocurren durante la primera temporada de inundaciones después de la finalización, pero

algunas fallas ocurrieron durante la construcción o algunos años después. Para las grandes presas de control de inundaciones, el nivel más alto del embalse se puede alcanzar durante una inundación después de 50 o 100 años de operación sin incidentes. Esto puede tener un impacto sustancial en la estabilidad de la presa de gravedad o en el riesgo de tuberías en la parte superior de algunas presas de relleno.

Las estadísticas muestran que las presas con mayor riesgo han sido presas de mampostería antiguas y las más seguras han sido las presas de hormigón por gravedad. Las principales causas de las fallas de las presas de concreto o mampostería han sido deslizamientos o tuberías a través de los cimientos.

Desde 1950, el 0,15 por ciento de las presas han fallado en el primer llenado. La altura de una presa no parece mejorar la seguridad. Solo unas pocas presas de relleno construidas después de 1965 han fallado en el primer llenado, y sus fallas parecen haber sido causadas por cimientos o tuberías empotradas. El progreso en los filtros y el drenaje parece haber sido efectivo.

Como resultado del progreso técnico general y la mejora del monitoreo, la tasa futura de fallas en el primer llenado puede estar en el rango de uno por mil, pero reducirla aún más puede ser más difícil. La evaluación de riesgos tradicional se basa generalmente en datos físicos o estadísticos. Podría ser más eficaz estudiar las causas humanas, que pueden ser, por ejemplo, la falta de experiencia de los diseñadores o contratistas, la falta de comunicaciones, responsabilidades, control y especificaciones mal definidos, falta de entrenamiento de los operadores, etc.

b) Envejecimiento y erosión interna

Las tasas anuales de rotura de presas causadas por el envejecimiento han sido de aproximadamente 2×10^{-4} antes de 1950, y 2×10^{-5} .

La erosión interna (tuberías) en los cimientos ha provocado la falla de varias presas de relleno y algunas presas de mampostería o concreto. La falla de los cimientos de las presas de concreto generalmente ha

ocurrido en los primeros 3 a 5 años, pero hay excepciones. No son infrecuentes las fallas causadas por la erosión interna en el cuerpo de las presas de relleno o en las tuberías empotradas. Pocas mampostería o estructuras de hormigón delgadas y ninguna estructura de hormigón gruesa han fallado.

El progreso en seguridad ha sido gracias al progreso en las prácticas de diseño y construcción, pero posiblemente aún más a las mejoras en el mantenimiento y monitoreo, y en particular a una inspección visual adecuada y un seguimiento cuidadoso de los aumentos en las fugas. El monitoreo ha evitado muchos fracasos y reducido las consecuencias de otros: el número promedio de víctimas de fracasos envejecidos es cinco veces menor que por otras causas.

La probabilidad de falla puede estar más relacionada con la calidad del monitoreo que con los datos físicos sobre las propiedades de la estructura de la presa. Las presas de relleno largo necesitan soluciones de monitoreo adecuadamente adaptadas, porque una presa larga incluye la posibilidad de un mayor número de debilidades que una presa corta. La mitad de las presas de relleno que han fallado en los últimos 40 años tenían más de 1000 m de largo (Lemperiere, 1999).

2.2.8 Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ)

Este método fue desarrollado por el matemático Thomas L. Saaty (1980) diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples, mediante la construcción de un modelo jerárquico, que les permite a los actores estructurar el problema de forma visual.

Permite combinar lo objetivo, tangible y racional de la ciencia clásica con lo subjetivo, intangible y emocional del comportamiento humano. En este sentido, se puede conseguir un tratamiento objetivo de lo subjetivo (Keeney, 1992). El punto central del PAJ es el proceso de asignar ponderación a los parámetros y descriptores relacionados con una decisión y la calificación final de las diferentes alternativas respecto de los criterios seleccionados.

Para la estimación del valor de la importancia relativa de cada uno de los indicadores se recurre a una metodología de comparación de pares, en este

caso se empleó el PAJ (Saaty, 1990) por sus ventajas, flexibilidad y por la facilidad de involucrar a todos los actores en el proceso de decisión (Garfi et al., 2011), la escala es la que se muestra a continuación:

Figura 14 Escala de Saaty

ESCALA DE SAATY

ESCALA NUMERICA	ESCALA VERBAL	EXPLICACIÓN
9	Absolutamente o muchísimo más importante que ...	Al comparar un elemento con otro el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante que el segundo.
7	Mucho más importante o preferido que ...	Al comparar un elemento con otro el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante o preferido que el segundo.
5	Más importante o preferido que...	Al comparar un elemento con otro el primero se considera más importante o preferido que el segundo.
3	Ligeramente más importante o preferido que ...	Al comparar un elemento con otro, el primero es ligeramente más importante o preferido que el segundo.
1	Igual o diferente a ...	Al comparar un elemento con otro, hay indiferencia entre ellos.
1/3	Ligeramente menos importante o preferido que ...	Al comparar un elemento con otro, el primero se considera ligeramente menos importante o preferido que el segundo.
1/5	Menos importante o preferido que ...	Al comparar un elemento con otro, el primero se considera menos importante o preferido que el segundo.
1/7	Mucho menos importante o preferido que ...	Al comparar un elemento con otro, el primero se considera mucho menos importante o preferido que el segundo.
1/9	Absolutamente o muchísimo	Al comparar un elemento con otro el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante que el segundo.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes, que se emplean cuando es necesario un término medio entre dos de las intensidades anteriores.	

Fuente: Cenepred (2015)

2.2.8.1 Ponderación de los parámetros descriptores

Se realiza la comparación de pares para la determinación de la importancia relativa usando la escala de Saaty.

Figura 15 Matriz de comparación de pares

PARAMETRO	Magnitud de sismo	Intensidad de sismo	Aceleración natural del suelo
Magnitud de sismo	1.00	1/3	5.00
Intensidad de sismo	3.00	1.00	7.00
Aceleración natural del suelo	1/5	1/7	1.00

La aceleración natural del suelo es 7 veces menos importante que la intensidad (mucho menos importante)

La intensidad es 7 veces más importante que la aceleración natural del suelo (mucho más importante)

Fuente: Cenepred (2015)

Se elabora la matriz multiplicando la inversa de las sumas totales por cada elemento de su columna correspondiente.

Figura 16 Matriz de Normalización

PARAMETRO	Magnitud de sismo	Intensidad de sismo	Aceleración natural del suelo
Magnitud de sismo	1.00	0.33	5.00
Intensidad de sismo	3.00	1.00	7.00
Aceleración natural del suelo	0.20	0.14	1.00
suma	4.200	1.476	13.000
1/suma	0.238	0.677	0.077

$$0.238 \times 1.00 = 0.238$$

MATRIZ DE NORMALIZACIÓN

PARAMETRO	Magnitud de sismo	Intensidad de sismo	Aceleración natural del suelo
Magnitud de sismo	0.238	0.226	0.385
Intensidad de sismo	0.714	0.677	0.538
Aceleración natural del suelo	0.048	0.097	0.077

Fuente: Cenepred (2015)

Se determina el vector priorización (ponderación), mediante la suma promedio de cada fila. Debe cumplir que la suma de cada columna debe ser igual a la unidad.

Figura 17 Vector Priorización

PARAMETRO	Magnitud de sismo	Intensidad de sismo	Aceleración natural del suelo	VECTOR PRIORIZACIÓN (PONDERACIÓN)
Magnitud de sismo	0.238	0.226	0.385	0.283
Intensidad de sismo	0.714	0.677	0.538	0.643
Aceleración natural del suelo	0.048	0.097	0.077	0.074
	1.000	1.000	1.000	1.000

$$(0.238 + 0.226 + 0.385) / 3 = 0.283$$

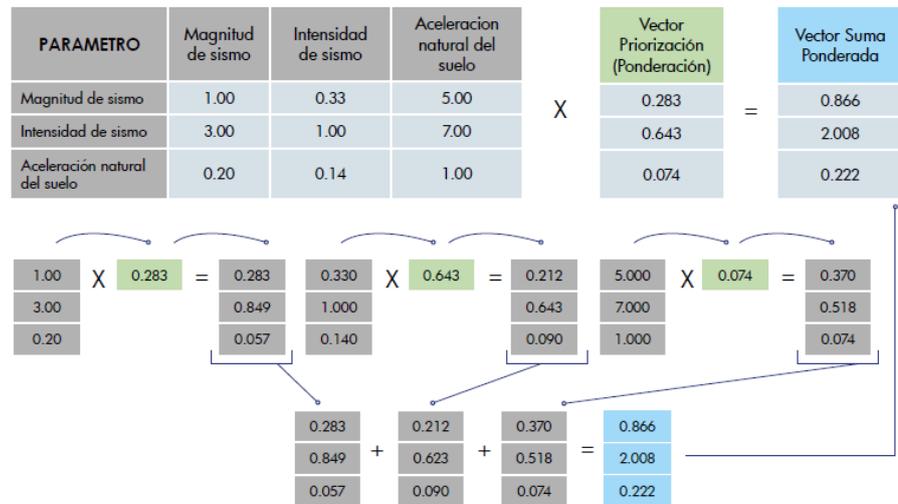
Fuente: Cenepred (2015)

2.2.8.2 Cálculo de la Relación de Consistencia (RC)

Este coeficiente debe ser menor al 10% ($RC < 0.1$), lo que nos indica que los criterios utilizados para la comparación de pares es la más adecuada.

Para hallar el Vector Suma Ponderada, se tiene que multiplicar matrices.

Figura 18 Vector suma ponderada



Fuente: Cenepred (2015)

Para hallar λ_{max} , Se divide los valores del Vector Suma ponderada y el Vector de Priorización.

Vector Suma Ponderada	÷	Vector Priorización (Ponderación)	=	λ_{max}
0.866		0.283		3.060
2.008		0.643		3.123
0.222		0.074		3.000

$$\lambda_{max} = \frac{3.060 + 3.123 + 3.000}{3} = 3.061$$

Fuente: Cenepred (2015)

Luego se halla el Índice de Consistencia (IC), esto nos permite hallar la relación de consistencia de la matriz para verificar si las decisiones fueron adecuadas.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - N}{N - 1} = \frac{3.061 - 3}{3 - 1} = 0.0305$$

Finalmente se determina la relación de Consistencia (RC);

$$RC = \frac{IC}{IA} = \frac{0.0305}{.525} = 0.058$$

Donde IA es el Índice Aleatorio de una Matriz de Comparaciones Pareadas, generada, como su nombre sugiere, de forma aleatoria.

Los valores del Índice Aleatorio para los diferentes “n”, obtenidos mediante la simulación de 100,000 matrices (Aguarón y Moreno-Jiménez, 2001), son:

Figura 19 Valores de Índice Aleatorio

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
IA	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.570	1.583	1.595

Fuente: Cenepred (2015)

NOTA: Para matrices de 3 parámetros la RC debe ser menor a 0.04, para matrices de cuatro parámetros la RC debe ser menor a 0.08 y para matrices mayores a cuatro deben ser menores a 0.10

2.2.9 Evaluación de Riesgos según del Manual del Cenepred

2.2.9.1 Concepto de Peligro

El peligro es la posibilidad de que ocurran peligros naturales potenciales en un lugar específico con una intensidad específica y dentro de un rango de tiempo y frecuencia específico.

En otros países, los documentos técnicos relacionados con la investigación de fenómenos naturales utilizan el término amenaza para referirse al peligro.

2.2.9.2 Recopilación de datos

a) De naturaleza geográfica

Consta de todos los materiales bibliográficos disponibles, datos de campo y registros digitales (información vectorial, raster y / o satelital) proporcionados por los gobiernos regionales y locales y las instituciones técnicas y científicas. La información está destinada a mostrar las características hidrológicas, meteorológicas, costeras, geográficas y geofísicas del área evaluada.

b) De carácter urbanístico

Se refiere a toda la información de carácter urbano que puede ser proporcionada por los gobiernos locales mediante sus gerencias de desarrollo urbano y catastro, y en colaboración con el Organismo de Formalización de la Propiedad Informal (COFOPRI) y la Superintendencia Nacional de los Registros Públicos (SUNARP).

c) Infraestructuras básicas y servicios esenciales

Es muy importante obtener información sobre infraestructura básica y servicios básicos en áreas expuestas a peligros de origen natural. Por ello, es indispensable y necesario recabar información actualizada y veraz de las agencias estatales y privadas encargadas de brindar los servicios de agua potable y tratamiento de aguas residuales, así como de las empresas distribuidoras de energía. También se considera que brindan infraestructura básica y servicios básicos para hospitales, centros de salud, puertos, aeropuertos, etc.

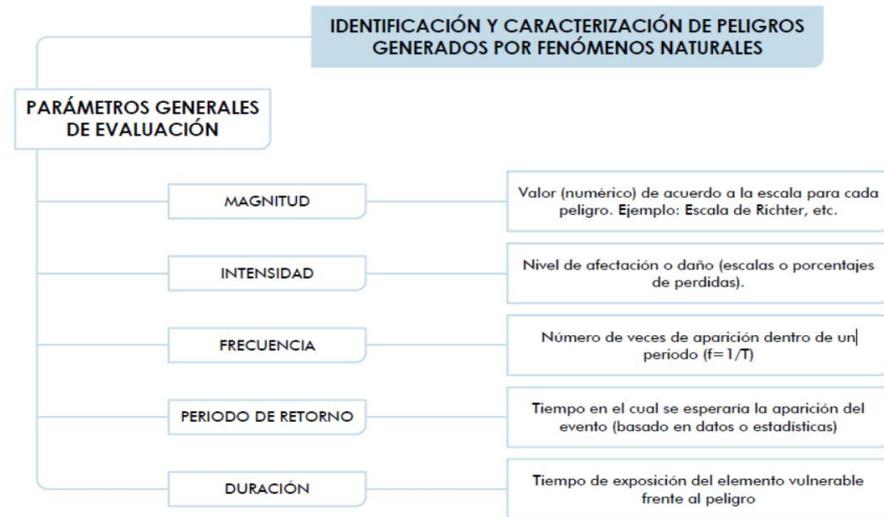
2.2.9.3 Identificación de probable área de influencia del fenómeno en estudio.

Primero, con base en el conocimiento histórico del impacto de los fenómenos naturales en áreas geográficas expuestas, se determina las posibles áreas afectadas por fenómenos naturales. Básicamente, esto se hace recopilando sistemáticamente toda la información detallada (geografía, infraestructura, y servicios básicos).

2.2.9.4 Peligros generados por fenómenos de origen natural

Una vez que se determina el área de impacto de la amenaza producida por el fenómeno natural, es necesario evaluar los parámetros del fenómeno de intervención (mecanismo de generación), lo que ayuda a evaluarlo. En la definición de los parámetros de evaluación se sigue la estructura de la clasificación de peligros indicada en la fig. 20.

Figura 20 Identificación y caracterización de Peligros generados por Fenómenos Naturales



Fuente: Cenepred

2.2.9.5 Parámetros De Evaluación

a) Información histórica de episodios

La caracterización de los fenómenos naturales nos muestra un panorama general de las formas específicas en que se manifiestan a nivel nacional, regional o nacional. local. Sin embargo, es fundamental conocer su recurrencia para poder desarrollar estrategias para prevenir y / o reducir sus posibles efectos negativos. Si bien las entidades técnicas y científicas son las encargadas de monitorear y registrar la información histórica sobre los hechos ocurridos dentro del territorio nacional, es necesario recabar información a nivel local y regional en los organismos ambientales, subdirecciones y departamentos administrativos.

b) Estudios previos de peligrosidad y riesgo

De acuerdo con el artículo 4 de la Ley N ° 29664, los integrantes del SINAGERD deberán tomar el principio de acción permanente y permanecer en guardia ante los peligros naturales. Es por esto que los miembros del SINAGERD realizan investigaciones de peligros y

riesgos y son verificados por la entidad técnica y científica competente.

Estos estudios pueden servir como punto de partida para determinar el grado de peligro porque contienen información a priori sobre el lugar o zona donde se realiza la investigación, un análisis del daño o impacto causado y la periodicidad del retorno de los fenómenos naturales.

c) Identificación de parámetros y descriptores que son susceptibles al fenómeno de estudio.

➤ Factores condicionantes

1. Relieve
2. Tipo de Suelo
3. Cobertura Vegetal
4. Uso actual del suelo
5. Etc.

➤ Factores desencadenantes

1. Hidrometeorológicos
2. Inducido por la acción humana
3. Geológico
4. Etc.

2.2.9.6 Susceptibilidad

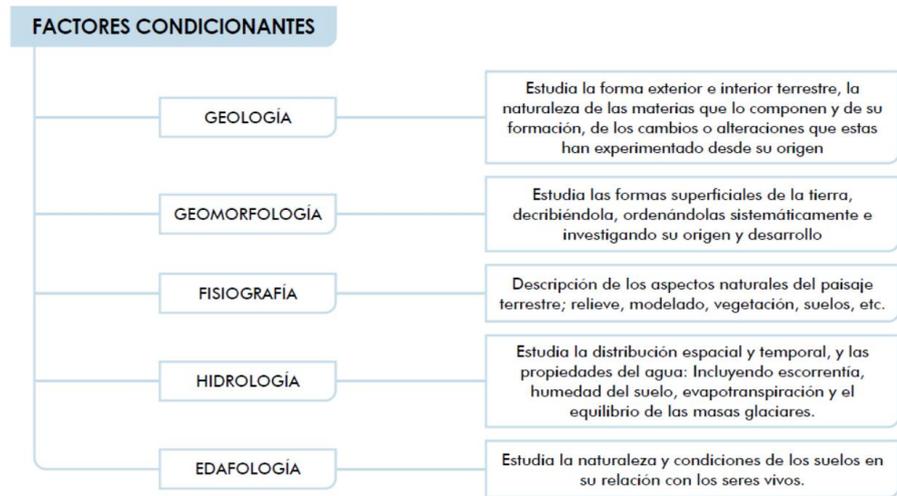
La susceptibilidad se refiere a la mayor o menor predisposición a que suceda u ocurra un evento en una determinada área geográfica (depende de los condicionantes y desencadenantes del fenómeno y su respectiva área geográfica).

De acuerdo con este esquema, aquellas franjas de tierra que rápidamente caen bajo las inundaciones corresponderían a áreas de mayor susceptibilidad hídrica, mientras que aquellas que no son invadidas representarían áreas de menor susceptibilidad hídrica.

a) Factores condicionantes

Son parámetros propios del ámbito geográfico de estudio (ver figura 21), el cual contribuye de manera favorable o no al desarrollo del fenómeno de origen natural (magnitud e intensidad), así como su distribución espacial.

Figura 21 Factores Condicionantes de Peligro



Fuente: Cenepred

b) Factores desencadenantes.

Son parámetros que desencadenan eventos y/o sucesos asociados que pueden generar peligros en un ámbito geográfico específico (Ver figura 22). Por ejemplo: las lluvias generan deslizamiento de material suelto o meteorizado, los sismos de gran magnitud ocurridos en el mar (locales) ocasionan tsunamis, etc.

Figura 22 Factores Desencadenantes de Peligro



Fuente: Cenepred

2.2.9.7 Análisis de Elementos Expuestos en Zonas Susceptibles

Al respecto, es importante indicar que se cuantifica el impacto probable de los elementos expuestos (área geográfica en riesgo) que se encuentran dentro del área de influencia del fenómeno de origen natural, calculando las pérdidas o daños probables (vidas humanas, infraestructura, bienes y medio ambiente), que podrían generarse como resultado de la manifestación de fenómenos naturales.

Es importante analizar la posible pérdida en lo correspondiente a la:

- Dimensión Social: población, salud, educación.
- Dimensión Económica: agricultura, industria, comercio y turismo, transporte y comunicaciones, energía, agua y saneamiento.
- Dimensión Ambiental: recursos naturales renovables y no renovables.

2.2.9.8 Niveles De Peligrosidad

Para fines de la Evaluación de Riesgos, las zonas de peligro pueden estratificarse en cuatro niveles: bajo, medio, alto y muy alto, cuyas características y su valor correspondiente se detallan a continuación. Según tabla 7.

Tabla 7 Matriz de Peligro

NIVEL	RANGO
PELIGRO MUY ALTO	$0.260 \leq R < 0.503$
PELIGRO ALTO	$0.134 \leq R < 0.260$
PELIGRO MEDIO	$0.068 \leq R < 0.134$
PELIGRO BAJO	$0.035 \leq R < 0.068$

Fuente: Cenepred

2.2.9.9 Vulnerabilidad

De acuerdo con la Ley N ° 29664 del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y su reglamento (Decreto Supremo N ° 048-2011-PCM), la vulnerabilidad se define como la vulnerabilidad de la

población, estructura física o actividades socioeconómicas. ser perjudicado por el acto de un peligro o amenaza.

La exposición se refiere a las elecciones y prácticas que ponen a las personas y sus medios de vida en la zona de peligro de peligro. La exposición es producida por una relación inadecuada con el medio ambiente, que puede deberse a procesos no planificados de crecimiento demográfico, un proceso de migración desordenada, el proceso de Urbanización sin una adecuada ordenación territorial y / o políticas de desarrollo económico insostenibles. Cuanto mayor sea la exposición, mayor será la vulnerabilidad.

a) Exposición

La exposición se refiere a las elecciones y prácticas que ponen a las personas y sus medios de vida en la zona de peligro de peligro. La exposición es producida por una relación inadecuada con el medio ambiente, que puede deberse a procesos no planificados de crecimiento demográfico, un proceso de migración desordenada, el proceso de Urbanización sin una adecuada ordenación territorial y / o políticas de desarrollo económico insostenibles. Cuanto mayor sea la exposición, mayor será la vulnerabilidad.

b) Fragilidad

La fragilidad se refiere a las condiciones de desventaja o debilidad relativa de una persona y un medio de vida frente al peligro. En general, se centra en las condiciones físicas de una comunidad o sociedad y es de origen interno, por ejemplo: Formas de construcción que, entre otras cosas, no cumplan con las regulaciones de construcción y / o materiales aplicables. Cuanto mayor es la fragilidad, mayor es la vulnerabilidad.

c) Resiliencia

La resiliencia se refiere al grado de asimilación o capacidad de las personas para recuperarse y ganarse la vida en caso de peligro. Está asociado sobre las condiciones sociales y organizativas de la

población. Cuanto mayor sea la fiabilidad, menor será la susceptibilidad.

2.2.9.10 Análisis De Los Elementos Expuestos Sociales, Económicos Y Ambientales

a) Análisis de la dimensión social

Se determina la población expuesta dentro del área de influencia del fenómeno de origen natural, identificando la población vulnerable y no vulnerable, para posteriormente incorporar el análisis de la fragilidad social y resiliencia social en la población vulnerable. Esto ayuda a identificar los niveles de vulnerabilidad social.

Figura 23 Exposición Social

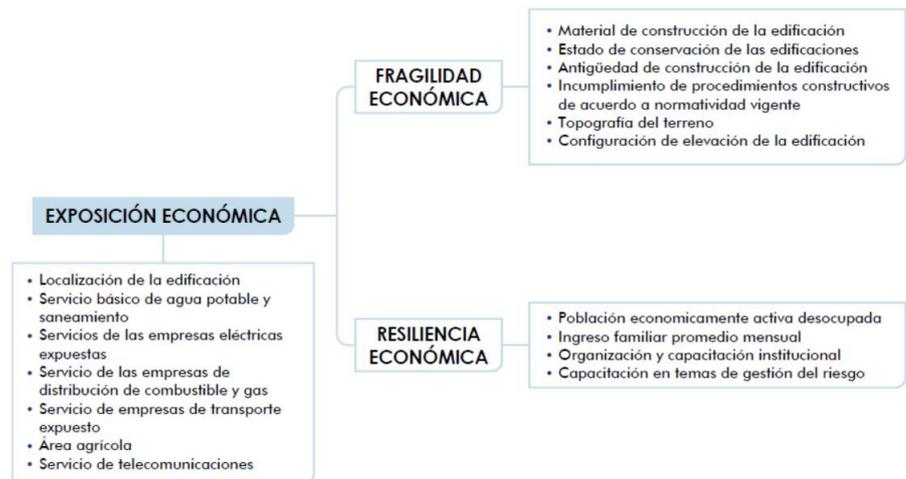


Fuente: Cenepred

b) Análisis de la dimensión económica

Se determina las actividades económicas e infraestructura expuesta dentro del área de influencia del fenómeno de origen natural, identificando los elementos expuestos vulnerables y no vulnerables, para posteriormente incorporar el análisis de la fragilidad económica y resiliencia económica. Esto ayuda a identificar los niveles de vulnerabilidad económica.

Figura 24 Exposición Económica

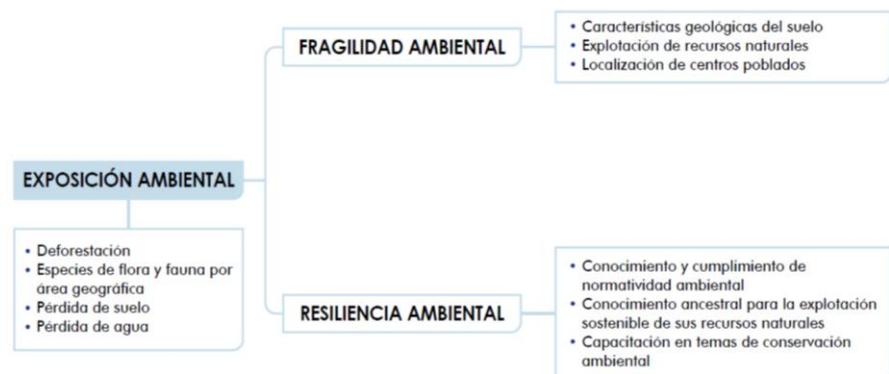


Fuente: Cenepred

c) Análisis de la dimensión ambiental

Se determina los recursos naturales renovables y no renovables expuestos dentro del área de influencia del fenómeno de origen natural, identificando los recursos naturales vulnerables y no vulnerables, para posteriormente incorporar el análisis de la fragilidad ambiental y resiliencia ambiental. Esto ayuda a identificar los niveles de vulnerabilidad ambiental.

Figura 25 Exposición Ambiental



Fuente: Cenepred

2.2.9.11 Determinación de los Niveles de Vulnerabilidad

Para fines de la Evaluación de Riesgos, las zonas de vulnerabilidad pueden estratificarse en cuatro niveles: bajo, media, alta y muy alta,

cuyas características y su valor correspondiente se detallan a continuación. Ver tabla 8.

Tabla 8 Matriz de vulnerabilidad

NIVEL	RANGO
Vulnerabilidad Muy Alta	$0.260 \leq R < 0.503$
Vulnerabilidad Alta	$0.134 \leq R < 0.260$
Vulnerabilidad Media	$0.068 \leq R < 0.134$
Vulnerabilidad Baja	$0.035 \leq R < 0.068$

Fuente: Cenepred

2.2.9.12 Estimación o Cálculo del Riesgo

El riesgo se relaciona con la vulnerabilidad de los elementos expuestos a fin de determinar el posible impacto y consecuencias sociales, económicas y ambientales de uno o más fenómenos peligrosos. Los cambios en uno o más de estos parámetros modifican el riesgo en sí, es decir, las pérdidas totales esperadas y las consecuencias en un área determinada. (Carreño, 2005).

El expresar los conceptos de peligro (amenaza), vulnerabilidad y riesgo, ampliamente aceptada en el campo técnico científico Cardona (1985), Fournier d'Albe (1985), Milutinovic y Petrovsky (1985b) y Coburn y Spence (1992), está fundamentada en la ecuación adaptada a la Ley N°29664 Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, mediante la cual se expresa que el riesgo es una función $f()$ del peligro y la vulnerabilidad.

Tabla 9 Matriz de Riesgo

Nivel	Rango
Riesgo Muy Alto	$0.068 \leq R < 0.253$
Riesgo Alto	$0.018 \leq R < 0.068$
Riesgo Medio	$0.005 \leq R < 0.18$
Riesgo Bajo	$0.001 \leq R < 0.005$

Fuente: Cenepred

A continuación, se muestra los niveles de Riesgos y sus consecuencias en Presas de Relaves, este cuadro es de elaboración propia en la cual

se da a conocer las consecuencias que puede ocasionar la falla de una Presa.

Tabla 10 Niveles de Riesgo

Nivel	Consecuencias
Riesgo Muy Alto	La población y personal de obra se encuentra en peligro constante, contaminación crítica de suelos y aguas subterráneas, pérdidas económicas que conlleven al cierre definitivo de la mina.
Riesgo Alto	La población y personal de obra se encuentra en peligro constante, Daños materiales importantes y contaminación aguas abajo. Millones de dólares en costos de reparación por lo cual las operaciones mineras deben detenerse por meses.
Riesgo Medio	La población y personal de obra se encuentra en peligro regular, contaminación aguas abajo reparables en corto tiempo.
Riesgo Bajo	El peligro para la población y personal de obra y sus intereses económicos son de baja magnitud, con probabilidades de ocurrencia mínimas.

Fuente: Propia

2.3 Definición de términos básicos

- Análisis de Estabilidad de Taludes: proceso en el que se evalúan cuantitativamente la interacción entre las fuerzas estabilizantes o resistentes.
- Análisis estático: Evaluar el efecto del peso propio (carga estática) de la presa de relaves y de la acción del agua en su estabilidad. Por lo general se evalúa la configuración final de la presa, con los escenarios de la acción del agua en el depósito.
- Cohesión: La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la

cementación, mientras que en la física este término se utiliza para representar la tensión.

- Nivel Freático: Puede definirse como el nivel superior del agua en un acuífero o más correctamente como el lugar donde la presión del agua es igual a la de la presión atmosférica.
- Muro de Cola: Se suele construir para limitar el depósito por el extremo de aguas arriba. Puede construirse de tierra o por alguno de los sistemas de construcción empleados para el muro resistente.
- Sistema de Drenaje: Es el sistema utilizado para deprimir al máximo el nivel freático en el interior del cuerpo del muro, usualmente protegido por filtros para evitar que el flujo de aguas arrastre las partículas finas y produzca la colmatación del sistema.
- Licuefacción: Pérdida total de la resistencia al corte de un suelo saturado por incremento de la presión de poros. El caso más frecuente de licuefacción ocurre por acción sísmica sobre materiales areno-limosos saturados. Los relaves saturados son altamente susceptibles a licuefacción sísmica, en especial, si la permeabilidad y densidad son bajas. Es el fenómeno más preocupante que ocurre en un tranque de relaves.
- Arenas de relaves, o relaves arenosos: son materiales predominantemente más grandes que 0.074 mm lo que significa que menos del 50% son más finos que ese tamaño.
- Lamas: son predominantemente materiales del tamaño del limo, más del 50% menor de 0.074 mm.
- Presa de relave: Es una construcción que contiene de forma segura los relaves provenientes de las plantas minerales constituido principalmente por un dique de arranque y depósito para almacenamiento.
- Relaves: Se definen como el desecho mineral sólido de tamaño entre arena y limo provenientes del proceso de concentración que son producidos, transportados o depositados en forma de lodo.
- Cubeta: Corresponde al volumen físico disponible donde se depositan los finos y gran parte del agua de los relaves de tal modo que se forma en ella la laguna de aguas claras debido a la sedimentación de las partículas finas.

La cubeta es el componente más importante en relación con la vida útil del depósito.

- Vertederos de emergencia: Son vertederos de umbral variable destinados a evacuar el exceso de aguas acumuladas en la cubeta del depósito al crecer la laguna de decantación por lluvias intensas.
- Recrecimiento de presa: Acción o resultado de acrecentar, incrementar, aumentar o ampliar una presa.

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis General

El riesgo de falla geotécnica de la presa de relaves N°3 en la Unidad Minera Pallancata-Ayacucho frente a un evento sísmico e hidrológico es bajo.

2.4.2 Hipótesis Específicas

- 1) Con la información obtenida sobre los fenómenos sísmicos y las condiciones Hidrológicas de la zona de Ayacucho se podrá realizar un correcto análisis de la estabilidad del talud de la Presa de relaves N°3.
- 2) El uso del manual para la evaluación de riesgo originados por fenómenos naturales del Cenepred y pautas de seguridad de Presas del CDA (Canadian Dam Association) nos garantiza la seguridad de la presa.
- 3) El análisis de la modelación de estabilidad del talud de la presa de relaves identifica la superficie de falla y verifica que los factores de seguridad del talud frente a un sismo, posibles infiltraciones y precipitaciones de la zona cumplan la normativa vigente.

2.5 Variables

- Variable Independiente:

La Variable Independiente es la Presa de Relaves debido a que cada Presa de Relave en el mundo es distinta a otras ya que sus características varían de acuerdo a su ubicación, método, material de construcción, etc.

- Variable Dependiente:

La variable dependiente es el Riesgo Geotécnico ya que esta dependerá de las características geotécnicas de la presa de relaves en estudio.

La matriz operacional de variables se detalla a continuación:

Tabla 11 Matriz Operacional

Variable	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos	Item
Variable Independiente: Presa de Relaves	Es una construcción que contiene de forma segura los relaves provenientes de las plantas minerales constituido principalmente por un dique de arranque y depósito para almacenamiento	Propiedades Geotécnicas	Ensayos de suelo	NTP 339.166 ASTM 4767	Ensayo Triaxial
				NTP 339.128:1998	Análisis granulométrico
				ASTM D5084	Ensayo de Permeabilidad
		Infiltración	Análisis de infiltración	Software Slide	Velocidad de filtración
					Coefficiente de Permeabilidad (Datos Obtenidos de la Ingeniería de detalle realizados según norma técnica)
		Sismicidad	Aceleración Sísmica	Ingeniería de detalle	--
Topografía	Geometría de la presa	Ingeniería de detalle	Estudio topográfico		
Variable Dependiente: Riesgo Geotécnico	Es el producto de la probabilidad de la ocurrencia de una amenaza y sus posibles consecuencias inducidos por los distintos factores geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos.	Zona de Riesgo	Peligro Vulnerabilidad	Manual de Evaluación	--
		Estabilidad Física	Análisis Estático y Pseudo - estático	Slide 6.0	Modelo de Bishop y/o spencer

Fuente: Propia

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

3.1 Tipo, Método y Diseño de la Investigación

3.1.1 Tipo de Investigación

La investigación de tipo aplicada busca conocer, actuar, construir y modificar una realidad problemática además de estar más interesada en la aplicación inmediata sobre una problemática antes que el desarrollo de un conocimiento de valor universal. (Borja, 2012)

La presente investigación es de tipo Aplicada no experimental ya que se realizará la evaluación geotécnica para luego proceder a hallar el riesgo geotécnico y con los resultados obtenidos se elaborará el mapa del riesgo de la presa de relaves en la unidad minera Pallancata – Ayacucho.

3.1.2 Método de Investigación

De acuerdo a Borja (2012) las investigaciones descriptivas Investigan y determinan las propiedades y características más representativas de los objetos de estudio como personas, viviendas, concreto armado, probetas o cualquier otro fenómeno que se quiera estudiar.

Es una investigación con enfoque Mixto (Cuantitativo y Cualitativo) y alcance descriptivo ya que para realizar la evaluación de riesgo geotécnico se tendrá que recoger información de la ingeniería de detalle de manera conjunta y con ello desarrollar los análisis de peligro y calcular la evaluación de riesgo geotécnico según manuales e investigaciones.

3.1.3 Diseño De Investigación

Describe el fenómeno de estudio en un momento determinado del tiempo. No le interesa la evolución del fenómeno (Borja, 2012)

La presente tesis tiene un diseño transversal, ya que los datos serán recolectados en un solo momento. Bastará con realizar la extracción de datos de la ingeniería de detalle para realizar los análisis correspondientes al peligro y con ello se podrá contrastar la hipótesis.

3.2 Población Y Muestra

3.2.1 Población

Balestrini (1997) indica lo siguiente: Una población está determinada por sus características definitorias. Por lo tanto, el conjunto de elementos que posea esta característica se denomina población o universo. Población es la totalidad del fenómeno a estudiar, donde las unidades poseen una característica común, que se estudia y da origen a los datos de la investigación, es decir, una población es un conjunto de todas las cosas que concuerdan con una serie determinada de especificaciones (p.137).

La población son todos los depósitos de relaves de Ayacucho con similares características a la presa de Relaves N°3 en cuanto a parámetros de diseño y construcción, para efectos de la presente investigación, todos los depósitos de relaves conformados con material de relave grueso cicloneado y con recrecimiento por el método aguas abajo.

3.2.2 Muestra

La muestra es un "subconjunto representativo de un universo o población." (Morles, 1994, p. 54).

La muestra de la presente investigación es la presa de relaves N°03 – Ayacucho, debido a que como se explicó anteriormente se tuvo acceso a la ingeniería de detalle de este proyecto y es por eso de su elección.

La muestra tiene un diseño no probabilístico de elección espontánea o intencional, ya que según Manuel Borja (2012) se utiliza esta muestra cuando no se tienen referencias precisas acerca de la población total. Consiste en seleccionar en forma informal los objetos de estudio de más fácil acceso.

3.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos (validez y confiabilidad)

3.3.1 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

- Los parámetros geotécnicos, filtración de los fluidos y la topografía de la zona fueron obtenidos de la Ingeniería de detalles los cuales usaron los siguientes

ensayos: ensayo Triaxial, ensayo de corte directo, análisis granulométrico, ensayo de permeabilidad, coeficiente de permeabilidad; siguiendo los protocolos de las siguientes normas técnicas: NTP 339.166, ASTM 4767, NTP 339.171 ASTM D3080, NTP 339.128:1998, ASTM D5084.

- Modelamiento Geotécnico mediante el uso del software Slide v 6.0.
- Manual de Evaluación de Riesgo para eventos sísmicos e hidrológicos.
- Guía de evaluación de riesgos del CDA / ICOLD / ANCOLD.

3.3.2 Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos

La validez y confiabilidad de los instrumentos requeridas para la presente investigación fueron procesados por el laboratorio especializado en ensayos geotécnicos de Ausenco que cumplen tanto las normas técnicas peruanas como las internacionales.

3.4 Descripción de procedimientos de análisis

Para la presente evaluación de riesgo geotécnico del crecimiento de la presa de relaves N°3 se tomó en cuenta los siguientes aspectos:

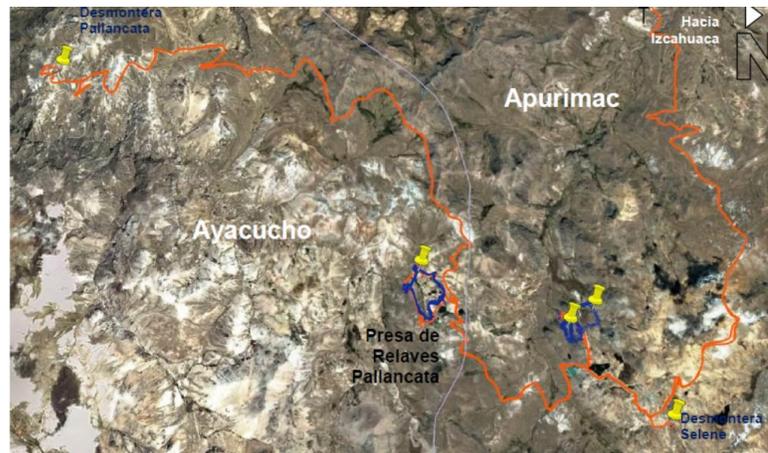
- a) Sección geométrica más crítica, es decir donde el ángulo del talud sea mayor, parámetros geológicos-geotécnicos, carga por acción del sismo, condiciones de nivel freático, entre otros.
- b) Emplear el método de equilibrio límite que se basa en evaluar la resistencia al deslizamiento de un talud, tomando en cuenta ciertas hipótesis en relación al mecanismo de falla, condiciones de equilibrio, nivel freático, resistencia cortante, etc.
- c) Para realizar el análisis de estabilidad de taludes ha sido utilizado el software SLIDE versión 6.0 de la firma Rocscience, programa que calcula por varias metodologías de equilibrio límite empleando los factores de seguridad menores de un número de potenciales superficies de deslizamiento.
- d) Con los datos obtenidos del modelamiento geotécnico, se realiza la evaluación del riesgo geotécnico mediante manual y guías.

CAPITULO IV: CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y DE LA PRESA DE RELAVES

4.1 Ubicación Geográfica

La Unidad Minera Pallancata se encuentra ubicada en la comunidad del mismo nombre, distrito de Coronel Castañeda, provincia de Parinacochas, departamento de Ayacucho, a una altura promedio de 4400 msnm. La presa y el vaso del depósito de relaves, producto del presente alcance se encuentra dentro del área de concesión Explorador para la mina Pallancata. En la Figura 26 y 27 se muestra la ubicación de la Unidad Minera Pallancata.

Figura 26 Vista satelital de la ubicación de la Presa de Relaves



Fuente: Ingeniería de Detalle

Figura 27 Presa de Relaves N°3



Fuente: Google Earth

4.2 Geología

4.2.1 Geología Regional

Geográficamente el área de estudio se ubica en la cabecera de la cuenca del río Suyamarca comunidad de Pallancata, provincia de Parinacochas del departamento de Ayacucho, en el flanco oriental de la Cordillera Occidental de los Andes del sur del Perú, siendo las coordenadas geográficas de un punto representativo 14°41'03" latitud Sur y 73°08'42" longitud Oeste; con una altitud promedio de 4 590 msnm. Este sector se caracteriza por su relieve suave a moderado, con evidencias de una intensa actividad glaciar que han formado valles en “U”, cordones morrénicos, y circos glaciares.

La secuencia estratigrafía regional está conformada por unidades que van del Terciario al Cuaternario, inicia con rocas volcánicas del Grupo Tacaza, sobrepuesto con marcada discordancia angular se tiene las Formaciones Alpbamba, y Aniso, las que son cubiertas en discordancia por la formación Sayacta. Estas dos unidades litológicas han sido afectadas por intrusión de cuerpos subvolcánicos de naturaleza riolítica, el cuaternario está presentado por los aparatos volcánicos andesíticos del Grupo Barroso, cubriendo a estas unidades se tiene depósitos Cuaternarios de naturaleza morrénica de gran espesor, y finalmente depósitos recientes de origen coluvial, bofedal y antrópicos. (David Dávila M., 1991, INGEMMET).

4.2.2 Geología Local

El área del proyecto se ubica en la cabecera de la cuenca del río Suyamarca, en la superficie puna, sobre los 4500 msnm, donde afloran rocas volcánicas del Mioceno Medio y Superior. Corresponden a la Formaciones Saycata y Aniso, conformados por rocas andesitas y rocas piroclásticas, respectivamente, y cuerpos subvolcánicos que han instruido a la secuencia de rocas piroclásticas. Está comprendida entre las coordenadas UTM 8 377 000 N – 699 500 E y 8 375 500 N – 700 500 E, con altitudes entre los 4 550 msnm y 4 630 msnm.

4.2.2.1 Geomorfología

Localmente, la presa de relaves Pallancata se emplaza en una naciente de una pequeña quebrada de fondo amplio, pendiente de cauce bajo a moderada, y flancos asimétricos que conforman laderas de baja a moderada pendiente conformados mayormente por depósitos morrénicos y afloramientos rocosos aislados. En su cabecera se distingue restos de un circo glaciar fuertemente erosionado, a cuyo pie se encuentra una pequeña laguna denominada Patococha. La morfología ha sido modificada por la actividad antrópica por el emplazamiento de la presa de relaves, plataformas y accesos.

4.2.2.2 Estratigrafía

Litológicamente, el área de estudio está conformado de la más antigua a las más reciente, por afloramientos de rocas volcánicas conformadas por tobas líticas con matriz de arenas y cenizas pertenecientes a la Formación Aniso, las que han sido afectadas por intrusión de cuerpos subvolcánicos de naturaleza riolítica. Cubriendo a estas unidades se tiene depósitos cuaternarios de naturaleza morrénica de gran espesor, y finalmente depósitos recientes de origen coluvial, bofedal y antrópicos.

4.2.2.3 Geología Estructural

De acuerdo a los registros de campo, las Riolitas presentan sistemas de fracturamiento principal de rumbos NE-SO y NNO-SSE, con inclinaciones de alto ángulo; y en las tobas se tiene sistemas de fracturamiento principal de rumbo NE-SO y E-O con inclinaciones de alto ángulo, y NE-SO con inclinaciones suaves. No se tiene evidencias de fallas activas en el área de estudio.

4.2.2.4 Geodinámica Externa

En el área de la presa de relaves Pallancata en general no se ha registrado mayores evidencias de fenómenos de geodinámica externa, restringiéndose a eventuales caídas de roca en los taludes rocosos

adyacentes a la laguna Patococha. La ausencia de estos eventos es favorecida por su ubicación en la cabecera de la cuenca, así como a su relieve suave.

4.3 Hidrogeología

Regionalmente la zona de investigaciones se encuentra formado por cadenas de cerros y nevados, entre los 4 000 y 5 000 msnm. Localmente, la presa de relaves Pallancata se emplaza en una naciente de una quebrada caracterizada por un relieve suave a moderado, con evidencias de una intensa actividad glaciaria que han formado valles en forma de “U”, cordones morrénicos y circos glaciares.

La geología del área de evaluación es una secuencia de afloramientos de rocas volcánicas conformadas por tobas líticas con matriz de arenas y cenizas pertenecientes a la Formación Aniso, impactados por una intrusión de cuerpos subvolcánicos de naturaleza riolítica las cuales están cubiertas por depósitos cuaternarios morrénicos, depósitos de origen coluvial, bofedal y antrópicos.

No se tiene evidencias de fallas activas y/o actividad tectónica constante en el área de estudio. La ausencia de fenómenos de geodinámica externa es favorecida por su relieve suave y la ubicación de la presa en la cabecera de la cuenca, restringiéndose a eventuales caídas de roca en los taludes rocosos adyacentes a la laguna Patococha.

Las principales expresiones históricas de aguas superficiales en los alrededores del área de evaluación fueron:

- Efluentes y/o riachuelos que discurrían hacia y fuera de la laguna de Patococha;
- Las dos lagunas denominadas Patococha, ubicadas en la parte norte del área del depósito de relaves, cuyos cambios y/o fluctuaciones en el nivel de agua son controladas por la evaporación y la escorrentía superficial del área; y
- Las escorrentías generadas por las precipitaciones alimentan en su mayoría a la laguna Patococha, el resto de escorrentía es canalizado a través de los diques de contención y canales de derivación, que bordean las infraestructuras como el depósito de relaves y subdrenes en áreas con potencial de producir infiltraciones y/o filtraciones.

4.3.1 Clasificación de Unidades Hidrogeológicas

- Los acuitardos cuaternarios se refieren a los depósitos morrénicos y fluvioglaciales de gran exposición en la mayor parte de la cuenca. El grado de saturación de estos materiales es influenciado mayormente por flujos subsuperficiales, con niveles freáticos entre 0,4 a 3,0 m de profundidad. La permeabilidad promedio es de $2,24 \text{ E-}5 \text{ m/s}$.
- Los acuíferos riolíticos de baja conductividad forma macizos rocosos de alta resistencia mecánica. Entre sus quebradas se pueden observar pequeñas descargas de agua subterránea en forma de bofedales y flujos diseminados individuales en el orden de 0.25 L/s . Las características hidrogeológicas son típicas de los acuitardos y acuífero local. No se han realizado pruebas hidráulicas en estas unidades, por lo que se desconocen sus parámetros hidráulicos.
- Los acuitardos de tobas volcánicas son rocas volcánicas pertenecientes a la formación Aniso, la unidad corresponde a facies de tobas y brechas volcánicas, compuesta de piroclastos. La conductividad hidráulica se clasifica como de baja permeabilidad y es en promedio de $4,5 \text{ E-}7 \text{ m/s}$.

4.3.2 Modelo Hidrogeológico Conceptual

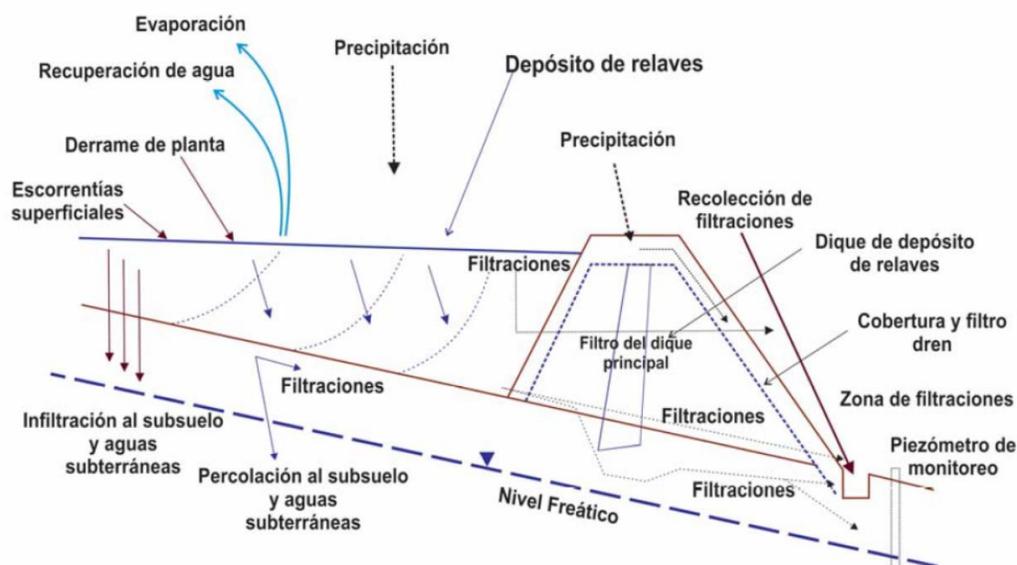
El modelo hidrogeológico conceptual del depósito de relaves, expresado de manera esquemática en la Figura 28, indica todos los parámetros hídricos que componen el balance de aguas.

A continuación, se muestran las consideraciones principales del modelo hidrogeológico conceptual:

- La propuesta del recrecimiento del depósito de relaves no afectará con las características hídricas e/o hidrogeológicas del medio, incluyendo la laguna Patococha y el incremento del tamaño del dique de la laguna Patococha ayudará a prevenir un impacto negativo del recrecimiento del depósito de relaves y a un mejor manejo de los recursos hídricos que son almacenados y distribuidos desde esta infraestructura. Es decir, no se generará ningún impacto negativo que afecte la laguna Patococha.

- El nivel freático dentro del sistema investigado fluctúa entre 0,4 a 3,0 m de profundidad y el cauce preferencial del flujo responde a la topografía natural.
- El caudal de las aguas superficiales en los alrededores del sitio de investigación varía de 0,25 L/s hasta 2,08 L/s y la calidad de las aguas monitoreadas están caracterizadas con un Ph ligeramente alcalino, con un promedio de 8,58. La conductividad eléctrica tiene un promedio de 207,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un mínimo de 19,7 en las aguas subterráneas hasta 926 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en las aguas superficiales.
- Debido al recrecimiento de las dos infraestructuras, la variabilidad de gradientes hidráulicas en el área de aguas arriba de la Laguna de Patococha implicará la generación de mayor presión en las aguas sub-superficiales lo cual incrementará el potencial de interconexión entre los diferentes sistemas hídricos y el impacto con la estabilidad de los niveles piezómetros alrededor de la laguna y el depósito de relaves.
- Dentro del sistema de evaluación existen diferentes tipos de materiales, incluyendo los acuitardos cuaternarios con una conductividad hidráulica de promedio de $2,24 \text{ E-}5 \text{ m/s}$, acuíferos reolíticos de baja conductividad y acuitardos de tobas volcánicas con conductividad hidráulica de promedio de $4,5 \text{ E-}7 \text{ m/s}$.
- El recrecimiento de las dos infraestructuras podría principalmente generar filtraciones a través de sitios preferenciales con conductividades hidráulicas altas, incrementar los factores de inestabilidad y compactación de zonas saturadas alrededor de la Laguna Patococha e incrementar la interacción entre las aguas subterráneas y filtraciones que pueden originar en los dos, la Laguna Patococha y los depósitos de relaves. Esta condición no se presentará en la Fase A. En la Fase B el agua de infiltración será captada por el subdrenaje, así también el dique fue evaluado considerando las condiciones más críticas y conservadores, incluyendo análisis de infiltración.

Figura 28 Modelo hidrogeológico conceptual del depósito de relaves



Fuente: Ingeniería de detalle

4.4 Sismicidad

El área del proyecto se ubica en la Sierra Sur del Perú, a 175 km de la línea de costa, que es una de las regiones sísmicas más activas de la Tierra. El marco tectónico regional se rige por la interacción de la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana, que es la causa principal de la alta actividad sísmica y de los procesos orogénicos como la Fosa Marina, la Cordillera de los Andes, los sistemas de fallas en la zona sub-andina, y la Dorsal de Nazca. A nivel continental, existen pocas fallas activas reconocidas con posible influencia en la zona del proyecto, las más cercanas son la falla de la Laguna Pacucha, 125 km al norte del proyecto, y la falla Pampacolca, 110 km al sureste del proyecto.

La sismicidad histórica y las isosistas de los sismos más importantes muestran que en la zona en estudio se han producido movimientos sísmicos con intensidades de hasta VIII grados en la escala Mercalli Modificada (MMI) producto principalmente de la actividad sísmica de la zona de subducción; los sismos más notables y recientes en la región son: 12 de noviembre de 1996 (M 7.7), 23 de junio del 2001 (M 8.4), 15 de agosto del 2007 (M 8.0) y 23 de setiembre del 2013 (M 7.0).

El análisis de peligro sísmico determinístico fue realizado considerando la menor distancia desde el sitio de análisis a las fuentes sismogénicas consideradas para el estudio (áreas o fallas) y la máxima magnitud en dichas fuentes. El uso de las leyes de atenuación correspondientes a cada mecanismo tectónico indica una aceleración máxima horizontal esperada a nivel de la roca base de 0,55 g para el Sismo Máximo Creíble (MCE), correspondiente a un sismo de subducción intermedia (intraplaca). La actividad sísmica de subducción superficial (interfase) produce aceleraciones menores, así como la actividad superficial continental.

El análisis de peligro sísmico probabilístico ha considerado las fuentes sismogénicas definidas como áreas, actualizándose sus parámetros de recurrencia. Se ha utilizado las leyes de atenuación de Youngs (1997) para las fuentes de subducción, que permite diferenciar la contribución de los sismos interfase e intraplaca, y de Sadigh. (1997) para las fuentes continentales. El peligro sísmico se ha calculado para un sitio clase B (roca) según la definición del IBC (2015), con V_{s30} entre 760 y 1500 m/s, mediante el software EZ-FRISK 7.65.

Los valores de aceleración horizontal máxima (PGA), obtenidos mediante la combinación indicada de leyes de atenuación, son: 0.37g para un periodo de retorno de 475 años, 0.45g para un periodo de retorno de 975 años y 0.58g para un periodo de retorno de 2475 años. También se reportan valores de PGA para otros periodos de retorno.

La mayor contribución en la aceleración sísmica del terreno proviene de las fuentes de subducción intraplaca, seguido de las fuentes de subducción de interfase y de las fuentes continentales.

Para el sismo de diseño de las estructuras convencionales en el área del proyecto se recomienda utilizar el valor de aceleración máxima para un evento de 475 años de periodo de retorno, que corresponde a una exposición sísmica de 50 años con una probabilidad de excedencia de 10%. Para la presa de relaves emplearíamos una aceleración de diseño igual a 0,37g.

4.4.1 Coeficiente Sísmico

De acuerdo a la literatura técnica existente ampliamente aceptada internacionalmente, se recomienda que el coeficiente sísmico a ser considerado en el análisis en la condición pseudo-estática de diseño de taludes, sea obtenido como una fracción que varía entre $1/3$ a $1/2$ de la máxima aceleración esperada. Esta recomendación es consistente con las recomendaciones del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers, Hynes y Franklin, 1984), quienes sugieren el uso de un coeficiente sísmico pseudo-estático igual al 50% de la aceleración pico de diseño.

Para el análisis pseudo-estático en taludes se recomienda emplear un valor de coeficiente sísmico adimensional de 0,185.

4.5 Hidrología

4.5.1 Precipitación

La caracterización pluviométrica tiene por objetivo describir el patrón de las lluvias anuales y mensuales en el área del proyecto, sus tendencias promedio y sus curvas de frecuencia. El análisis se antecedió con una revisión de la calidad de la información a través de detección de valores atípicos y de un análisis de consistencia.

Para describir el patrón de precipitaciones anuales y mensuales en la zona de estudio, se analizaron los registros de 10 estaciones meteorológicas operadas por SENAMHI. Estas estaciones están localizadas en altitudes que varían entre los 2 902 msnm y los 4 170 msnm, mientras el área de estudio se encuentra a una altitud aproximada de 4 620 msnm.

4.5.2 Precipitación Anual y Mensual

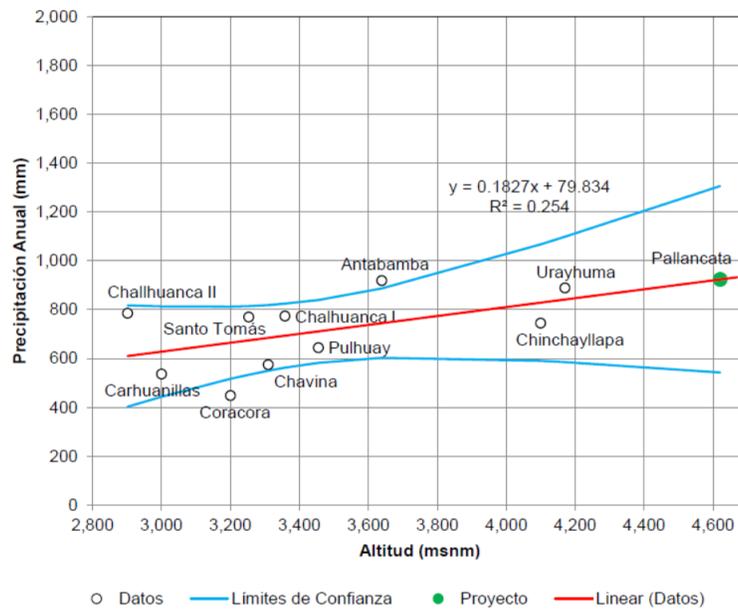
Se desarrolló una relación precipitación media anual versus altitud a nivel regional, basada en los registros consistentes de las 10 estaciones cercanas al área de estudio (ver tabla 12).

Tabla 12 Relación de Precipitación vs. Altitud

Estación	Altitud (m.s.n.m.)	Precipitación (mm)	Banda de confianza al 75%	
			Inferior	Superior
Chalhuanca II	2,902	785	402	818
Carhuanillas	3,000	536	443	813
Coracora	3,200	448	517	812
Santo Tomás	3,253	770	534	814
Chaviña	3,310	574	550	819
Chalhuanca I	3,358	773	562	824
Pulhuay (Ayahuasi)	3,455	644	582	840
Antabamba	3,639	918	602	887
Chinchayllapa	4,100	744	590	1067
Urayhuma	4,170	888	585	1098
Pallancata	4,620	924	542	1305

Fuente: Ingeniería de Detalle

Figura 29 Relación de Precipitación vs. Altitud



Fuente: Ingeniería de Detalle

Tal como se observa en la Tabla 12, que muestra la correlación lineal de precipitación con la altitud, la variación de las precipitaciones anuales en la región está influenciadas por el factor orográfico en un 25% (el coeficiente de determinación $R^2=0.25$ significa que el 25% de la varianza se explica por la correlación), mientras que el otro 75% está asociado a características propias de la ubicación de cada estación. De acuerdo a la curva precipitación altitud, se estima la precipitación media anual para la altitud del proyecto en 924 mm.

Finalmente, con la finalidad de tener un registro de precipitaciones mensuales para el proyecto, se emplearon las precipitaciones anuales reconstituidas para al proyecto y la distribución mensual de las estaciones Challhuanca y Chinchayllapa.

La precipitación anual para el sitio del proyecto varía de 498 mm a 1,297 mm. La distribución mensual de la precipitación en el año promedio, presenta que el 76% del total anual cae en el periodo de lluvias de diciembre a marzo, con el máximo de precipitación promedio mensual de 216 mm en el mes de febrero. En todos los meses del año se presentan precipitaciones, con valores mínimos entre los meses de mayo a agosto. La Tabla 13 muestra los promedios, desviaciones estándares y proporciones con respecto de la precipitación anual de las precipitaciones mensuales estimadas para el área del proyecto.

Tabla 13 Precipitación Promedio Mensual en el Área del Proyecto

Mes	Promedio (mm)	Máxima (mm)	Mínima (mm)	Desv. Est. (mm)	% Anual
Enero	204	485	7	114	22
Febrero	216	386	54	87	23
Marzo	194	437	75	93	21
Abril	58	222	2	46	6
Mayo	14	65	0	16	2
Junio	7	30	0	9	1
Julio	6	42	0	9	1

Agosto	20	184	0	32	2
Setiembre	29	162	0	30	3
Octubre	37	116	0	31	4
Noviembre	45	124	0	33	5
Diciembre	92	279	0	55	10
Anual	924	1397	498	242	100

Fuente: Ingeniería de detalle

4.5.3 Análisis de Eventos Extremos

4.5.3.1 Precipitaciones Máximas observadas

El análisis de precipitaciones máximas fue realizado en base a los registros de las estaciones

meteorológicas Antabamba, Chalhuanca I, Chalhuanca II, Chinchayllapa, Coracora, Puica, Pulhuay (Ayahuasi), Santo Tomás y Urayhuma. La mayor extensión de las series históricas (13 a 48 años de registro) de las estaciones meteorológicas respecto a estudios precedentes, más su empleo combinado en un análisis de frecuencia regional proporciona mejores condiciones para la evaluación de la frecuencia de precipitaciones máximas.

La precipitación máxima diaria media multianual observada en las estaciones analizadas varía entre 23,5 y 35,2 mm.

4.5.3.2 Frecuencia de Precipitaciones Máximas en 24 horas

La estación Santo Tomás fue considerada de manera conservadora, debido a que reporta el mayor valor de precipitación máxima diaria de las estaciones analizadas.

Para poder obtener la precipitación máxima de 24 horas, se ajustó la precipitación máxima diaria con un factor de 1,13, para corregir el efecto de subvaloración de las mediciones tomadas a intervalos fijos, de acuerdo

a las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, 1994).

La Tabla 14, presenta los cuantiles estimados por la distribución logística generalizada de las precipitaciones máximas en 24 horas, para diferentes periodos de retorno.

Tabla 14 Precipitación Máxima en 24 horas

Periodo de Retorno (años)	P(t)/P promedio	Precipitación máxima diaria (mm)	Precipitación máxima en 24 horas (mm)
5	1.210	43	48
10	1.381	49	55
20	1.558	55	62
25	1.617	57	64
50	1.810	64	72
100	2.021	71	80
200	2.253	79	90
500	2.596	91	103
1000	2.887	102	115
Parámetros estadísticos para el área de estudio			
Precipitación máxima diaria promedio - Santo Tomás (mm)			35.2

Fuente: Ingeniería de Detalle

4.5.3.3 Precipitación Máxima Probable (PMP)

La PMP fue estimada utilizando el método Hershfield. Según este método la PMP de determinada duración es igual a la media de la precipitación máxima de la duración considerada más la desviación estándar respectiva multiplicada por un factor de crecimiento.

Para el cálculo de la PMP, la media de la máxima en 24 horas fue tomada de las estadísticas de la estación Santo Tomás (35,2 mm). La desviación estándar no fue tomada de las estadísticas de la estación, sino que fue despejada del coeficiente de variación de la distribución logística

generalizada determinada para la región, la cual es igual a 0,163, resultando la desviación estándar de 12,69 mm.

El factor de crecimiento es una función de la media de la precipitación máxima y de la duración de 24 horas. El factor de crecimiento resultó 16,2, y en consecuencia la PMP ha sido estimada en 245 mm.

4.5.3.4 Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

La relación de precipitación-duración-frecuencia e intensidad-duración-frecuencia fue obtenida por desagregación de las precipitaciones máximas de 24 horas a duraciones menores aplicando la relación de Bell (1969). Dicha relación es válida para duraciones entre los 5 y 120 minutos en base a precipitaciones máximas con una duración de 1 hora y ha sido comprobada idónea para una gran variedad de climas de húmedos a semiáridos (Mauriño, 2004). Se consideró una proporción equivalente a 0,36 entre la precipitación máxima de 1 hora respecto a la correspondiente en 24 horas, valor que fue encontrado de los resultados de la inspección estadística de los hietogramas de tormentas máximas observada en estaciones con registros horarios ubicadas en zonas del Perú de similar altitud y ocurrencia climática

Los respectivos cálculos de la relación Precipitación-Duración-Frecuencia e Intensidad-Duración-Frecuencia para duraciones comprendidas entre 5 y 120 minutos se muestran en la Tabla 15.

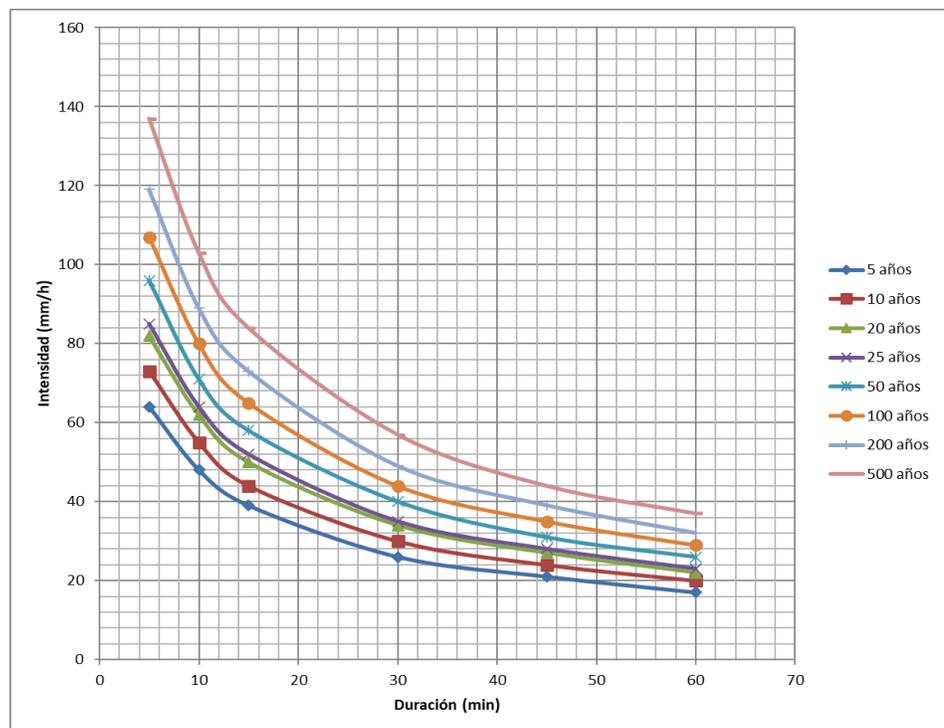
Tabla 15 Relación Precipitación-Duración-Frecuencia e Intensidad-Duración-Frecuencia

Periodo de Retorno (años)	Precipitación (mm)						Intensidad (mm/h)					
	Duración (min)						Duración (min)					
	5	10	15	30	45	60	5	10	15	30	45	60
5	5	8	10	13	16	17	64	48	39	26	21	17
10	6	9	11	15	18	20	73	55	44	30	24	20

20	7	10	13	17	20	22	82	62	50	34	27	22
25	7	11	13	18	21	23	85	64	52	35	28	23
50	8	12	15	20	23	26	96	71	58	40	31	26
100	9	13	16	22	26	29	107	80	65	44	35	29
500	11	17	21	28	33	37	137	103	84	57	44	37
1000	13	19	23	32	37	41	152	114	93	63	49	41
PMP	27	41	50	67	79	89	326	244	199	135	106	89

Fuente: Ingeniería de Detalle

Figura 30 Curvas IDF



Fuente: Ingeniería de Detalle

4.5.3.5 Tormenta de Diseño

En estudios previos desarrollados por Ausenco en los andes peruanos, se han inspeccionado los hietogramas de las tormentas máximas observada en estaciones con registros horarios ubicadas en zonas del Perú de similar altitud y ocurrencia climática. Definiéndose la forma de la ocurrencia de las precipitaciones y la duración de la tormenta de diseño en 6 horas.

Cálculos estadísticos fijaron el cociente de la precipitación máxima de 6h a la precipitación máxima de 24 horas igual a 0,81, y el cociente de precipitación máxima de 1h a la precipitación máxima de 24 horas igual a 0,36, lo cual resulta en un punto intermedio entre los cocientes correspondientes a las distribuciones de las tormentas estándar de diseño Tipo I (0,28) y Tipo II (0,45) desarrolladas por el Soil Conservation Service (organismo del departamento de agricultura de Estados Unidos ahora denominado NRCS).

4.5.4 Hidrología de Canales

Para la determinación de los caudales de diseño de los canales se consideró lo siguiente:

- Los canales ubicados en el perímetro de la presa de relaves para la Etapa 4595, han sido diseñados para una precipitación máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 100 años, correspondiente a la etapa de operación por tanto estos canales son temporales; cuya función principal es de captar, derivar y minimizar la escorrentía superficial proveniente de las cuencas circundantes a la presa de relaves.

4.5.4.1 Parámetro curva número (CN) de sustracción hidrológica

El parámetro curva número (CN) de sustracción hidrológica fue estimado en base a la condición de suelo de las cuencas adyacentes al depósito de relaves. La Figura 24, muestra los alineamientos de los canales y sus respectivas cuencas de aporte.

El factor de curva número de las cuencas “A, B, C, D, R, P1 y S2 al S4” adyacentes al depósito de relaves se estimó en función de:

- Característica del suelo: se tiene entre 40-50% de finos entre limos y arcilla, y 50- 60% entre arenas y gravas; considerándose como una textura del suelo: franco - arcillosa;
- Grupo de suelo hidrológico: Suelo con infiltración lenta cuando están muy húmedos, estos suelos pueden ser pobremente drenados o bien a

moderadamente bien drenados; moderadamente drenado a bien drenado, por lo que podemos asumir que se encuentra dentro del grupo de clasificación de suelos C;

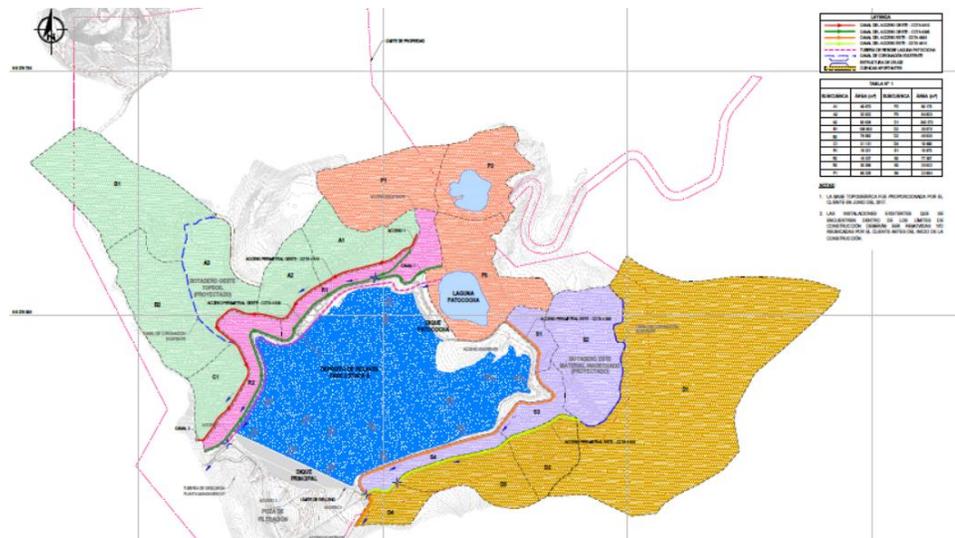
- Tipo de cobertura, uso y tratamiento del suelo: En el área de estudio se observó que no se realizan tratamientos del suelo pues no se hace uso agrícola del mismo, tiene predominancia de ichu, similar a las estepas de montaña.
- Humedad antecedente: Se asume una humedad antecedente tipo II, condición de humedad antecedente estándar, debido a que el propósito de la simulación es el estimar la escorrentía máxima diaria.
- En base al tipo de suelo y la condición de humedad antecedente descrito líneas arriba, el valor de Curva Número empleada en esta simulación es de 86.
- El factor de curva número para las cuencas “P2, P3 y S1” se estimó en función de:
- Estas cuencas presentan similares características de suelo que las cuencas A y B, sin embargo hay presencia de zonas rocosas y de dos lagunas como Patocochoa;
- Grupo de suelo hidrológico: El suelo tiene alto potencial de generar escorrentía, tiene características de bien drenado a excesivamente drenado, por lo que podemos asumir que se encuentra dentro del grupo de clasificación de suelos C-D;
- Tipo de cobertura, uso y tratamiento del suelo: sin presencia de vegetación (zonas rocosas y lagunas).
- Humedad antecedente: Se asume una humedad antecedente tipo II, condición de humedad antecedente estándar para la etapa de operación.

- En base al tipo de suelo, la condición de humedad antecedente descrito líneas arriba y las observaciones realizadas en la visita de campo, el valor de Curva Número empleada en estas cuencas es de 87 para “S1” y 89 para “P2-P3” considerado como un ponderado de cada área.

4.5.4.2 Caudales de Diseño

El esquema de manejo de aguas propone canales de coronación de la presa de relaves en cada una de sus etapas de crecimiento, cuyo alineamiento y sus respectivas cuencas de drenaje se muestran en la Figura 31.

Figura 31 Cuencas Tributarias



Fuente: Ingeniería de Detalle

El modelo de simulación de avenidas fue implementado con el programa HEC-HMS v4.1, en el cual se incluyó la tormenta de diseño previamente desarrollada para 100 años de periodo de retorno. El parámetro curva número (CN) de sustracción hidrológica fue asignado para la condición normal (Tipo II) de humedad antecedente del suelo, los cuales fueron estimados en base a la cobertura vegetal y la condición hidrológica del suelo como 86 y 93, respectivamente.

En el cálculo de la onda de avenida fue aplicando el método de transformación del hidrograma unitario de Clark, previo cálculo del tiempo de concentración y coeficiente de almacenamiento de Clark,

establecido como 1,5 veces el tiempo de concentración (criterio apropiado para cuencas rurales; USACE, 1994); y el tránsito de flujos a lo largo de los canales usando el método hidrológico-hidráulico de Muskingum-Cunge.

Adicionalmente, debido a la capacidad de atenuación de las lagunas existentes ubicados en las cuencas P2 y P3, fueron utilizados factores de ajuste para empozamientos provenientes del método gráfico para calcular descargas máximas del SCS (Mc Cuen, 2004), del orden de 19% a 20%. Obteniéndose como resultado un coeficiente de almacenamiento para dichas cuencas es de aproximadamente 3 veces el tiempo de concentración.

Debido a que las cuencas “S” y “R” son pequeñas y el tiempo de concentración inferior al tiempo de concentración mínimo de 10 minutos, se empleó los tiempos de concentración de 10 minutos en estas las cuencas.

En la Tabla 16 se muestran los parámetros morfológicos e hidrológicos empleados en el modelo descrito para cada una de las cuencas o áreas de drenaje establecidas para el manejo de aguas superficiales.

Tabla 16 Parámetros morfológicos e hidrológicos de las cuencas de Drenaje

Estructura	Cuenca	Área (m ²)	Longitud de cauce (m)	Pendiente Cauce (%)	Número de Curva II	Tiempo de Concentración (hr)	Coficiente Almac. Clark (hr)
Canal del Acceso Oeste	A1	49,670	212	23%	86	0.26	0.39
	A2	32,922	196	25%	86	0.24	0.36
	A3	50,526	330	4%	86	0.40	0.60
Cota 4610	B1	108,900	500	7%	86	0.54	0.80
	B2	76,982	217	13%	86	0.33	0.50

	C1	31,131	155	25%	86	0.23	0.34
Canal del	R1	18,221	185	16%	86	0.17	0.25
Acceso	R2	18,237	35	89%	86	0.17	0.25
Oeste							
Cota	R3	30,309	100	13%	86	0.31	0.46
4595							
Tubería	P1	69,225	288	11%	86	0.32	0.48
de	P2	59,175	380	6%	89	0.46	1.33
Rebose							
Laguna							
Patococh	P3	84,823	218	19%	89	0.34	1
a							
Canal del	D1	342,272	620	20%	86	0.34	0.50
Acceso	D2	35,570	187	26%	86	0.22	0.33
Este	D3	45,530	205	24%	86	0.25	0.37
Cota	D4	19,460	201	22%	86	0.29	0.44
4610							
Canal del	S1	15,670	100	40%	87	0.17	0.25
Acceso	S2	77,357	295	7%	86	0.53	0.79
Este	S3	20,522	81	19%	86	0.21	0.31
Cota	S4	22,694	44	43%	86	0.17	0.25
4595							

Fuente: Ingeniería de Detalle

La Tabla 17 muestra los valores de los flujos máximos simulados en los canales de los accesos perimetrales de la presa de relaves, considerando la condición de humedad del suelo y onda de avenida según el hidrograma unitario de Clark, para los canales para un periodo de retorno de 100 años.

Tabla 17 Caudal máximo simulado en canales

Estructura	Cuenca	Área de drenaje (m ²)	Caudal Pico (m ³ /s) TR = 100 años
	A1	49,670	0.260
Canal del Acceso Oeste Cota 4610	A2	32,922	0.177
	A3	50,526	0.217
	B1	108,900	0.419
	B2	76,982	0.354
	C1	31,131	0.174
Canal del Acceso Oeste Cota 4595	R1	18,221	0.118
	R2	18,237	0.118
	R3	30,309	0.145
Tubería de Rebose Laguna Patococha	P1	69,225	0.324
	P2	59,175	0.281
	P3	84,823	0.462
Canal del Acceso Este Cota 4610	D1	342,272	0.157
	D2	35,570	0.203
	D3	45,530	0.242
	D4	19,460	0.095
Canal del Acceso Este Cota 4595	S1	15,670	0.108
	S2	77,357	0.299
	S3	20,522	0.119
	S4	22,694	0.147

Fuente: Ingeniería de Detalle

4.5.4.3 Borde Libre Normal

La Dam Safety Guidelines (Canadian Dam Association, 2007) indican que para la clasificación de seguridad “significante”, el flujo de diseño de

ingreso de depósito debe ser entre 100 a 1 000 años de periodo de retorno, dependiendo del análisis de flujo incremental, exposición y consecuencias de falla. Debido a que este análisis ha sido realizado sin un análisis de rotura de presa, se considerará de manera conservadora 1 000 años de periodo de retorno.

Para el área del depósito de relaves se consideró que el 100% de la precipitación que cae en ella queda almacenada. Se realizó un balance de agua simplificado sin considerar evaporación ni infiltración para contener la esorrentía generada por la precipitación máxima en 24 horas de 1 000 años de periodo de retorno.

El volumen de almacenamiento requerido para almacenar la esorrentía debido a la precipitación máxima en 24 horas de 1 000 años de periodo de retorno resulto en 159 330 m³. La distancia requerida entre el NAME y el NAMO se calculó en base a las curvas de llenado del lago de decantación, para el recrecimiento al nivel 4 589,0 msnm, 4 591,5 msnm y 4 595 msnm, respectivamente. La Tabla 18 muestra los niveles de la cresta, el NAMO y El NAME estimados. En función al nivel de cresta del dique y al NAMO se concluye que el borde libre es de 2,0 m.

Tabla 18 Borde Libre y Niveles

Nivel de la Cresta del Dique	Nivel de aguas Máximo Extraordinario (NAME)	Nivel Máximo de Operación Normal (NAMO)
4 589,0	4 587,7	4 587,0
4 591,5	4 590,2	4 589,5
4 595,0	4 593,7	4 593,0

Fuente: Ingeniería de detalle

4.6 Balance de Agua

4.6.1 Almacenamiento en Poros

La densidad seca consolidada de los relaves depositados fue estimada en 1,33 t/m³ en base a considerar la proporción de vacíos igual a 1,00 para el estado consolidado (Golder, 2010). Para propósitos del balance de aguas se consideró que los relaves permanecen totalmente saturados a una densidad saturada consolidada constante de 1,82 t/m³, valor que resulta de aplicar la gravedad específica de 2,62 a la densidad seca consolidada (ver Tabla 18). La densidad seca consolidada es un factor influyente en el espacio vacío para saturación y por ello en el balance de aguas, se le ha puesto como variante en el análisis de sensibilidad hasta +/- 10%.

Tabla 19 Almacenamiento en Poros de Relave Consolidado

Descripción	Und.	Relaves depositados
Gravedad Específica Gs	%	2,62
Densidad seca de relaves depositados	t/m ³	1,33
Densidad saturada de relaves (depositados) - ρ_t	t/m ³	1,82
Porosidad	%	49,2

Fuente: Ingeniería de detalle

4.6.2 Información Geométrica

La información geométrica del depósito de relaves ha sido estimada a partir de la relación elevación – área - volumen, para la geometría prevista de los recrecimientos del dique a los niveles 4 589,0 msnm (actual), 4 591,5 msnm y 4 595,0 msnm.

Tabla 20 Niveles y relación entre área y volumen de almacenamiento

Nivel de Agua (msnm)	Área Superficial del Lago (ha)	Volumen de Agua Almacenado (10E3 m3)
4 587,0	7.4	64
4 589,0	11.5	252
4 590,0	13.9	379
4 591,0	16.5	531
4 592,0	19.3	710
4 593,0	30.5	963
4 594,0	31.6	1 273
4 595,0	32.8	1595

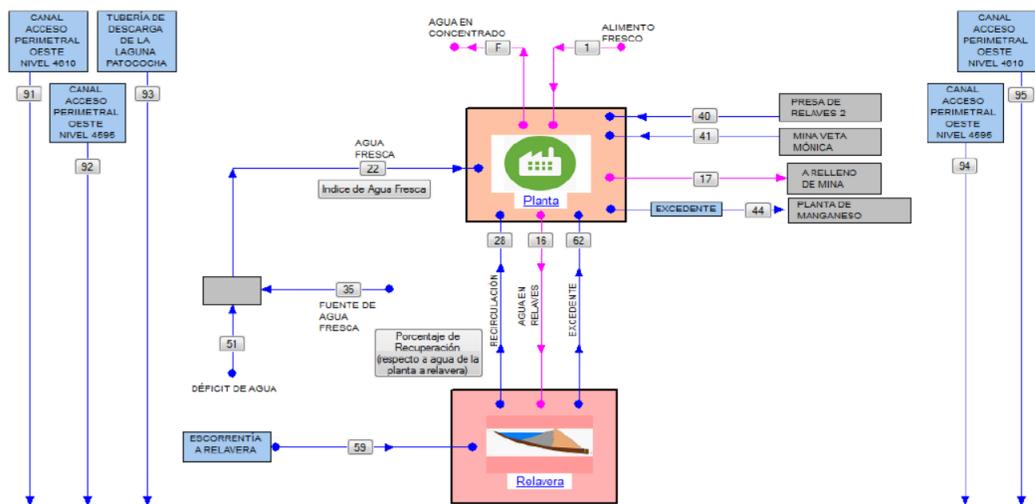
Fuente: Ingeniería de detalle

4.6.3 Modelo de Balance de Aguas

El balance de agua de Pallancata fue preparada en la plataforma de software GoldSim™. En términos generales el balance de agua está dado por el principio de conservación de masa:

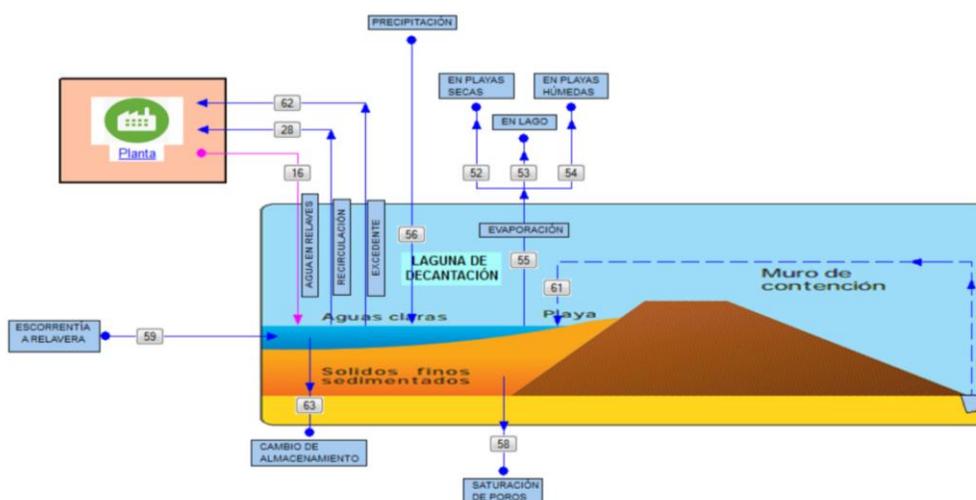
Ingresos de agua - Egresos de agua = Cambio en el almacenamiento de agua

Figura 32 Esquema General de Balance de Agua



Fuente: Ingeniería de detalle

Figura 33 Esquema de Balance de Agua del Depósito de Relaves



Fuente: Ingeniería de detalle

4.7 Investigaciones Geotécnicas

4.7.1 Trabajo de Campo

A fin de investigar las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de los materiales que conforman la cimentación del Dique Principal y del dique Patococha, Ausenco desarrolló un programa de investigaciones de campo desarrollada el mes de junio del 2017, este programa consistió en el mapeo geológico-geotécnico, la ejecución de calicatas mecánicas. Así también, se realizó la búsqueda y evaluación de canteras. Estos estudios se complementaron con investigaciones de campo desarrolladas para estudios previos.

4.7.1.1 Mapeo Geológico – Geotécnico

Durante la investigación geotécnica se realizó el mapeo geológico-geotécnico detallado del área de estudio y de las áreas circundantes, con el fin de identificar los rasgos geológicos y unidades geotécnicas presentes. Este mapeo fue complementado con el realizado en estudios anteriores.

Localmente, la presa de relaves Pallancata se emplaza en una naciente de una pequeña quebrada de fondo amplio, pendiente de cauce bajo a moderada, y flancos asimétricos que conforman laderas de baja a

moderada pendiente conformados mayormente por depósitos morrénicos y afloramientos rocosos aislados. En su cabecera se distingue restos de un circo glaciar fuertemente erosionado, a cuyo pie se encuentra una pequeña laguna denominada Patococha. La morfología ha sido modificada por la actividad antrópica por el emplazamiento de la presa de relaves, plataformas y accesos.

Litológicamente, el área en evaluación está conformada de la más antigua a las más reciente, por afloramientos de rocas ígneas volcánicas conformadas por tobas líticas con matriz de arenas y cenizas pertenecientes a la Formación Aniso, las que han sido afectadas por intrusión de cuerpos subvolcánicos de naturaleza riolítica (rocas ricas en sílice). Cubriendo a estas unidades se tiene depósitos cuaternarios de naturaleza morrénica de gran espesor, y finalmente depósitos recientes de origen coluvial, bofedal y antrópicos. Cabe indicar, que los afloramientos rocosos se presentan en parte fuertemente meteorizados debido a los agentes.

4.7.1.2 Mapeo de Líneas de Detalle

La evaluación geológica contempló el mapeo de líneas de detalle en los afloramientos rocosos en las canteras para enrocado “Ausenco 5 y Cantera de Roca 1”. Esto con el objetivo de definir taludes de corte para la explotación. La Tabla 21 presenta un resumen del mapeo de las líneas detalle.

Tabla 21 Resumen de Estaciones de Mapeo Superficial

Área	Estación	Coordenadas	Coordenadas	RMR
		Norte	Este	
Cantera de Roca	E-1	8 376 902,31	698 887,10	60
	E-2	8 376 859,90	698 863,97	57
1	E-3	8 376 912,63	698 942,98	67
	E-4	8 377 285,85	698 533,98	64
	E-5	8 377 307,51	698 588,37	66
Ausenco 5	E-6	8 377 305,85	698 648,98	62
	E-7	8 377 289,85	698 687,98	63

Fuente: Ingeniería de detalle

4.7.2 Ensayos de Laboratorio

Durante el desarrollo de la exploración geotécnica de campo se obtuvieron muestras representativas de las calicatas y mapeo geológico en zonas de interés del estudio.

En los materiales indicados se llevaron a cabo ensayos de mecánica de suelos y rocas para determinar los parámetros geotécnicos a emplearse en los diseños. Los ensayos de caracterizaciones física, mecánica y química fueron llevados a cabo en los laboratorios de Ausenco, la Universidad Nacional de Ingeniería y Cesel Ingenieros, todos en la ciudad de Lima, siguiendo los procedimientos recomendados según las versiones actualizadas de la American Society for Testing and Materials (ASTM).

4.7.2.1 Ensayos Índice

En las muestras obtenidas en la exploración de campo, se llevaron a cabo ensayos estándar de laboratorio con fines de identificación y clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Las propiedades índices de los suelos ensayados se resumen en la Tabla 22 en términos de granulometría, límite de plasticidad y contenido de humedad.

Las normas correspondientes que rigen estos ensayos para clasificar muestras de suelo son:

- Análisis Granulométrico por Tamizado, NTP 339.128;
- Límite Líquido y Límite Plástico, NTP 339.129 / ASTM D-4318;
y
- Contenido de Humedad, NTP 339.127 / ASTM D-2216.

Tabla 22 Resumen de Ensayos de Clasificación de Suelos

Zona	Prof. (m)	SUCS	Granulometría			Límites de Atterberg		CH (%)
			(%)	(%)	(%)	LL	IP	
			Grava	Arena	Finos			
Presa de Relaves Pallanca ta	1,80 – 3,80	GM	38.8	26.2	35.3	36	11	21.4
	1,70 – 3,00	SC	4.4	49.4	46.2	29	9	19.1
	0,40 – 4,50	GC- GM	52.1	28.6	19.3	22	6	11.8
Cantera de Suelo Golder	0,00 – 5,10	GC	43.6	28.4	28	31	15	12.3
	0,00 – 1,00	GC	49.6	23.4	27	38	17	17.6
	--	GC	48.3	27.1	24.6	30	14	10.5
Cantera Ausenco 6	0,00 – 5,00	SC	33.2	40	26.8	27	10	11.5
	---	SC	37	40.8	22.2	32	12	12.3

	0,00 – 4,70	GC	42.7	30.3	27	45	23	11.9
Cantera Cosapi	0,00 – 5,60	GC	36.8	27.9	35.3	39	19	11.3
	0,00 – 7,00	GC	43.9	34.4	21.7	44	22	13.1

Fuente: Ingeniería de detalle

4.7.2.2 Ensayo de Compactación Proctor

La variación de la densidad seca con el contenido de humedad, fue determinada para las muestras de las canteras de material de baja permeabilidad y relleno estructural. Se siguieron los procedimientos de la norma ASTM D-698, Proctor Estándar y los resultados de estos ensayos se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23 Resumen de Ensayo Proctor

Compañía / Zona	Proctor Estándar		
	SUCS	OCH (%)	MDS (KN/m ³)
Cantera de Suelo Golder	GC	6.8	20.21
Cantera Ausenco 6	SC	8.5	20.06
Desmonte	GP-GC	8.5	19.52

Fuente: Ingeniería de detalle

4.7.2.3 Ensayos de Compresión Triaxial

Con el objetivo de estimar los parámetros de resistencia cortante del material de relleno estructural, se han realizado ensayos de compresión triaxial del tipo consolidados no drenados (CU) con medición de presión de poros. Los ensayos se llevaron a cabo de acuerdo a la norma ASTM D-4767. Para obtener los especímenes para los ensayos; los materiales fueron

remoldeados al 95% de la máxima densidad seca obtenido del ensayo Proctor Estándar. El resumen de los resultados obtenidos de estos ensayos se presenta en la Tabla 24.

Tabla 24 Resumen de Resultados de los Ensayos de Compresión Triaxiales (CU)

Compañía / Zona	Densidad (KN/m ³)	Esfuerzos Efectivos		Esfuerzos Totales	
		C (Kpa)	Ø (°)	C (Kpa)	Ø (°)
Cantera de Suelo Golder	18.43	7	35.9	1	19.1
Cantera Ausenco 6	18.21	1	37.3	0	17.4
Desmonte	--	--		5	40

Fuente: Ingeniería de detalle

4.7.2.4 Ensayos de Carga Puntual

Se efectuaron una serie de ensayos en muestras de roca extraída de las canteras Roca 1 – Golder y Ausenco 5, que serían empleadas como canteras para extraer material de grava de drenaje y enrocado. Estos ensayos se realizaron de acuerdo a los procedimientos de la norma ASTM D-5731 y los resultados se presentan en la Tabla 25, en términos de la resistencia a la compresión no confinada equivalente a σ_c y de la resistencia de la roca.

Tabla 25 Resumen de Ensayos de Carga Puntual

ZONA	Profundidad	Carga Puntual		Grado de Dureza
	(m)	Is (50) Mpa	σ_c Mpa	
Presa de Relaves	3,80 – 3,85	0.68	16	R2
	1,00 – 1,30	6.62	159	R5
	0,80 – 1,00	0.97	23	R2

	1,80 – 2,30	0.46	11	R2
Cantera Roca 1	0,00 – 5,00	7.89	189	R5
Cantera Roca 1	0,00 – 3,00	6.78	163	R5
Cantera Roca 1	0,00 – 2,50	7.9	190	R5
Cantera Ausenco 5	0,00 – 2,00	5.44	131	R5
Cantera Ausenco 5	0,00 – 5,00	5.6	134	R5
Cantera Ausenco 5	0,00 – 10,00	4.25	102	R5

Fuente: Ingeniería de detalle

4.7.2.5 Ensayo de Abrasión

Se determinó la resistencia a la degradación en agregados gruesos de tamaño grande por abrasión e impacto en la máquina de los Ángeles según la norma ASTM C 535. Los resultados se presentan en la Tabla 26.

Tabla 26 Ensayo de Abrasión

Material	Cantera	Tipo de Agregado	Resistencia a la Degradación (%)
Enrocado	Cantera Roca 1	Grueso	18

Fuente: Ingeniería de detalle

4.7.3 Caracterización Geotécnica

Las investigaciones geotécnicas planteadas en campo sirvieron para identificar y definir las características geotécnicas de la zona de interés, así como de los materiales que constituirán el material de préstamo para el proyecto.

A continuación, se hace referencia de lo concerniente a los resultados obtenidos en las investigaciones geotécnicas de campo.

4.7.3.1 Unidades Geológicas Geotécnicas

De acuerdo a la investigación de realizadas, se han definido las siguientes unidades geotécnicas:

Depósito Coluvial (Unidad Geotécnica I), Depósito Morrénico (Unidad Geotécnica II), Suelo Residual (Unidad Geotécnica III), y Basamento Rocoso (Unidad Geotécnica IV).

a) Depósito Coluvial (Unidad Geotécnica I)

Estos depósitos están conformados principalmente por material fragmentado transportado y acumulado por acción de la gravedad, se ubican en el talud de los afloramientos de roca Riolíta que se encuentran adyacentes a la Laguna Patococha, son heterogéneos tanto en la forma como en el tamaño. Este suelo sobreyace a los depósitos morrénicos, depósitos residuales y a los afloramientos de roca.

Esta unidad dada sus características de compacidad suelta a medianamente densa, son inadecuados para propósitos de cimentación, por lo que, durante la construcción del recrecimiento del depósito de relaves, deberán ser removidas en su totalidad.

b) Depósito Morrénico (Unidad Geotécnica II)

Son depósitos de origen glaciar, contiene fragmentos polimícticos y heterométricos de forma subredondeadas a sub-angulosas, tamaños variables hasta bolonería y bloques de roca, empotrados en matriz de arena limosa arcillosa, medianamente densas a densas. La potencia de este depósito es variable siendo menor hacia el fondo de la quebrada y más potente en las laderas y crestas de las colinas de forma alargada existente en ambas márgenes de la Presa de Relaves de Pallancata.

Esta unidad sobreyace a los depósitos residuales y a los afloramientos de roca.

Esta unidad representa el subsuelo de fundación principal en el área donde se proyecta el recrecimiento de depósito de relaves Pallancata. La

clasificación SUCS de estos materiales está constituido por gravas limosas “GM”, grava arcillo limoso “GC-GM”, grava arcillosa con arena “GC”, y arenas limosas “SM”. La compactidad varía de medianamente densa a densa para los suelos gruesos y la consistencia de firme a rígida para los suelos finos; estos suelos presentan tonalidades que van desde el marrón amarillento y se encuentran húmedas.

Esta unidad geotécnica en general es adecuada como nivel de desplante de cimentación, dependiendo del grado de consistencia o compactidad en el que se encuentre.

c) Suelo Residual (Unidad Geotécnica III)

Corresponde a suelos generados producto de la meteorización in-situ mayormente de la roca

Toba. El grado de compactidad y consistencia varía con la profundidad desde medianamente densa a densa para los suelos gruesos y firme a rígida para los suelos finos. Se le puede encontrar principalmente al sur y al este de la laguna Patococha y en áreas circundantes al Botadero Este.

Esta unidad proviene de la alteración del basamento rocoso mayormente del tipo Toba, La plasticidad de estos depósitos varía de baja a alta, dependiendo la profundidad del perfil de intemperización existente en cada punto de prospección.

Esta unidad geotécnica en general es adecuada como nivel de desplante de cimentación, dependiendo del grado de consistencia o compactidad en el que se encuentre.

d) Basamento Rocosos (Unidad Geotécnica IV)

Estos afloramientos de roca se ubican en lugares puntuales, en el caso de las tobas se les puede observar en alrededores del dique principal, Botadero Oeste (Top Soil) y del Botadero Este (Material Inadecuado) colindantes a la presa de relaves Pallancata, Las Riolitas se encuentran como

promontorios rocosos de fuerte pendiente ubicados adyacentes a la laguna Patococha.

Esta unidad geotécnica se ha identificado en base del mapeo geológico de los afloramientos rocosos en superficie, excavación de calicatas y el registro de las estaciones estructurales, se determinó que esta unidad geotécnica se presenta como basamento rocoso por debajo de la cobertura de depósitos coluviales, morrénicos y residuales en la totalidad del área donde se proyecta el recrecimiento de la presa de relaves Pallancata, esta unidad geotécnica en general es adecuada como nivel de desplante de cimentación donde se encuentre como afloramiento en superficie. El basamento rocoso se ha diferenciado en:

e) Basamento Rocosos Mayormente Tobas

Este tipo de basamento rocoso consiste mayormente de tobas andesíticas, gris verdoso a gris plomizo por alteración, moderada a intensamente alterada, con dureza de R2 a R3; fracturado a muy fracturado, con un RQD que va de 0 hasta 75 %. Calidad de roca RMR de mala a regular.

f) Basamento Rocosos Mayormente Riolitas

Este tipo de basamento rocoso consiste mayormente de Riolitas, gris claro a gris oscuro con pátinas de óxidos por alteración, moderada a intensamente alterada, con dureza de R3 a R4; fracturado a muy fracturado, con un RQD que va de 0 hasta 85 %. Calidad de roca RMR de regular a Buena.

4.7.3.2 Nivel de Agua

Para definir los niveles de agua, nos basaremos en los resultados de monitoreo geotécnico desarrollados como parte del estudio “Proyecto Estabilidad de Presas de Relaves en las Unidades Mineras de Ares - Presa de Relaves N°3 – Unidad Minera Pallancata - Ausenco 2017”.

De acuerdo a los planos As built y a lo observado en campo, en total se han instalado 3 piezómetros, 2 instalados al pie del dique principal (PM-01 y PM-02) y 1 al pie del dique Patococha PM-03.

Con respecto a la información de monitoreo, contamos con lecturas tomadas entre el 12 de enero y el 14 de agosto del 2016. En lo que respecta al PM-01 y PM-02 ubicados al pie del dique principal, aledaño a la poza de monitoreo, los niveles de agua fueron encontrados entre 1,60 y 3,50m por debajo del nivel de tapa. En el piezómetro PM-03 los niveles identificados se encuentran entre 1,30 y 2,0 m por debajo del nivel de la tapa del piezómetro.

4.7.3.3 Nivel de Cimentación

Durante la investigación geotécnica se determinaron los niveles de desplante de cimentación del Dique Principal y del Dique Patococha, en función a las calicatas ejecutadas en estas zonas.

En la zona de ampliación del dique principal se removerán hasta 2 m de material de cobertura, principalmente en el eje de la quebrada, en tanto que en la margen derecha e izquierda se deberá retirar 0,5 m y 1,0 m de suelo de cobertura. Es importante indicar, que de encontrar roca o material rígido no se deberá excavar más.

En el área proyectada para el Dique Patococha, se deberá retirar aproximadamente 2 m de material de cobertura suelto. De encontrar suelo residual rígido o roca no se deberá excavar más.

En el embalse se deberá remover el material suelto, se retirarán los bolones y bloques de roca, y se eliminará material orgánico. Posteriormente se perfilará la superficie y compactará in situ.

4.7.4 Evaluación de Canteras

Durante las investigaciones geotécnicas de campo se definieron áreas de préstamo o canteras de material a ser utilizado para la construcción de las instalaciones correspondientes al crecimiento de la Presa de Relaves Pallancata.

4.7.4.1 Canteras de Suelo de Baja Permeabilidad y Relleno Estructural

Las canteras identificadas y evaluadas para suelo de baja permeabilidad son: Cantera de Suelo Golder y Ausenco 6. Los materiales de estas canteras podrán ser empleados en los diques Principal y Patococha (Materiales Tipo 1 y 4).

a) Cantera de Suelo Golder

Se ubica en la margen derecha de la presa de relaves Pallancata, con coordenadas UTM WGS84 de un punto central 699 500E y 8 376 280N. Está conformado por una ladera de pendiente suave a moderada constituida por suelos morrénicos.

El material obtenido ha sido clasificado como GC; posee características granulométricas de 43 a 48% de grava, 23 a 28% de arena, 24 a 28% de finos con índice de plasticidad de 14 a 17%, y su permeabilidad se estima en el orden de $5,4 \times 10^{-10}$ m/s.

b) Cantera Ausenco 6

Se ubica en la margen izquierda de la presa de relaves Pallancata, con coordenadas UTM WGS84 de un punto central 699 930E y 8 375 500N.

El material obtenido ha sido clasificado como SC; posee características granulométricas de 33 a 37% de grava, 40% de arena, 22 a 26% de finos con índice de plasticidad de 10 a 12%, y su permeabilidad se estima en el orden de $1,2 \times 10^{-9}$ m/s.

c) Cantera Cosapi

Se ubica a 7,5 km al suroeste de la presa de relaves Pallancata, con coordenadas UTM WGS84 de un punto central 694 650E y 8 371 591N.

El material obtenido ha sido clasificado como GC; posee características granulométricas de 36 a 43% de grava, 27 a 34% de arena, 21 a 35% de finos con índice de plasticidad de 19 a 23%, y su permeabilidad se estima en el orden de $6,6 \times 10^{-7}$ m/s (Ensayo ejecutado como parte del estudio

“Botadero de Desmonte Pallancata - Informe de Diseño Final” desarrollado por Knight Piésold - febrero 2010).

4.7.4.2 Canteras de Enrocado (Materiales Tipo 2 y Tipo 3)

Las canteras identificadas y evaluadas como enrocado (Materiales Tipo 2 y Tipo 3) son: Cantera de Roca 1 y Cantera Ausenco 5. Adicionalmente se podría emplear en la construcción material extraído del Depósito de Desmonte Pallancata.

A continuación, presentamos una descripción detallada de las principales características de estas canteras:

a) Cantera de Roca 1

Se ubica al noroeste de la presa de relaves, con coordenadas UTM WGS84 de un punto central 698 923E y 8 376 901N. Está conformado por una ladera rocosa escarpada, constituida por un extenso afloramiento de roca Andesita.

Dado que el recrecimiento del dique principal se realizará en dos etapas, para la explotación de la cantera de roca también se han definido 2 etapas. La primera de ellas considera un área de 4 520 m², un volumen bruto de 61 560 m³, una eficiencia del 85%, con lo que se obtiene un volumen neto de 52 300m³. La segunda considera un área de 10 850 m², un volumen bruto de 144 960 m³, una eficiencia del 85%, con lo que se obtiene un volumen neto de 123 200 m³.

Las rocas son andesitas, con dureza R5; moderadamente fracturadas a muy fracturadas, con presencia de fallas poco evidentes en superficie, y RMR promedio 60. Para su evaluación se han realizado 3 estaciones estructurales. Se han realizado también ensayos de abrasión y durabilidad obteniendo valores favorables, por lo que se recomienda su uso como enrocado.

b) Cantera Ausenco 5

Se ubica al noroeste de la presa de relaves, con coordenadas UTM WGS84 de un punto central 698 623E y 8 377 310N. Está conformado por una ladera rocosa escarpada, constituida por un extenso afloramiento de roca Andesita. Se ha estimado un área de 23 000 m², una potencia promedio de 10 m, con lo que se obtiene un volumen bruto de 230 000 m³. Se ha considerado una eficiencia del 80%, por lo que se obtiene un volumen útil de 184 000 m³.

Las rocas son andesitas, con dureza R5; moderadamente fracturadas a muy fracturadas, con presencia de fallas poco evidentes en superficie, y RMR promedio 65.

4.8 Diseño Geotécnico

4.8.1 Propiedades Físicas e Hidráulicas

De acuerdo a los trabajos de exploración de campo y resultados de los ensayos de laboratorio, se ha determinado las propiedades físicas e hidráulicas de los materiales que conformarán el Dique Principal y Dique Patococha para los crecimientos proyectados.

Las propiedades físicas e hidráulicas de los materiales fueron obtenidas a partir de ensayos de campo y ensayos de laboratorio.

4.8.1.1 Relleno Estructural – Material Tipo 1

Fue empleado en la construcción de la Etapa 1 de la presa de relaves Pallancata, está formado por material proveniente de la “Cantera de Suelos Golder”, de acuerdo a las especificaciones técnicas del proyecto, este material fue compactado en capas de 0,25 m hasta alcanzar una densidad mínima similar al 95% de la obtenida en el ensayo de compactación Proctor estándar. Este material también fue empleado en las Etapas 2 y 3 formando parte del suelo reforzado, en estas etapas el material fue compactado en capas de 0,30 m, tal cual se indica en el reporte de construcción desarrollado por SVS -2013.

4.8.1.2 Material de Transición – Material Tipo 2

Este material es descrito como “Enrocado Fino”, ha sido empleado como transición entre el enrocado y el relleno estructural. Fue extraído de la Cantera de enrocado “Roca 1-Golder” ubicada al 2 km al noroeste de la presa de relaves y está conformado por material de enrocado de TM 12”. Este material fue empleado en la construcción de las Etapas 1, 2 y 3 de la presa. De acuerdo al reporte de construcción de SVS fue colocado compactado en capas de 0,60 m, en paralelo a la colocación de relleno estructural. El enrocado presenta durezas que van de R4 a R5.

4.8.1.3 Enrocado – Material Tipo 3

Este material también fue extraído de la cantera de enrocado “Roca 1-Golder” ubicada al 2 km al noroeste de la presa de relaves y está conformado por material de enrocado. Este material fue empleado en la construcción de las Etapas 1, 2 y 3 de la presa. Es material extraído de cantera, de hasta 39” de diámetro máximo.

4.8.1.4 Relave

Los materiales depositados contenidos en el vaso, lo conforman materiales húmedos a saturados de granulometría fina, de consistencia blanda a firme, mejorando sus condiciones a profundidad, conservadoramente se ha estimado un ángulo de fricción de 12° y 1 kPa de cohesión.

4.8.1.5 Basamento Rocoso

La roca de cimentación lo constituyen Tobas y Riolitas con una dureza de R4 a R5. Golder (2010), propuso un ángulo de fricción de 34 y 26,5 kPa de cohesión, valores que Ausenco considera coherentes con los materiales encontrados.

El resumen de los parámetros seleccionados se presenta en la Tabla 27 del presente reporte. Es importante indicar que la permeabilidad de los materiales fue definida en base a resultados de ensayos de laboratorio y a la experiencia de Ausenco en proyectos similares.

Tabla 27 Resumen de Propiedades de Materiales - Dique Principal

Material	γ total (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	K (m/s)	Estático	
				c (kPa)	Φ (°)
Enrocado	23	24	1,0 E-03	0	44
Material de Transición	21	22	1,0 E-03	0	38
Relleno Estructural	20	21	5,4 E-10	10	33
Relave	13	14	1,0 E-07	1	12
Basamento Rocoso	23	24	2,8 E-07	265	34

Fuente: Ingeniería de detalle

4.8.2 Análisis de Infiltración

El objetivo del análisis de infiltración es estimar el nivel piezométrico al interior del cuerpo de la presa en el recrecimiento del Dique Principal. El análisis de infiltración fue realizado utilizando el módulo de infiltración del programa SLIDE, el cual realiza el análisis numérico por el método de elementos finitos (MEF).

El modelo geotécnico utilizado para el análisis de infiltración en el cuerpo del dique principal se considera el método de elementos finitos a través de una malla de elementos triangulares tal como se observa en la fig. 35, las condiciones de contorno utilizadas son de flujo nodal cero, y carga piezométrica total (ver fig. 36). El escenario analizado se detalla a continuación:

Para cada dique considerando las diferentes etapas de recrecimiento, se ha analizado una sección representativa de la condición más crítica, en todos los casos la condición de contorno crítica corresponde al espejo de agua 2 m por debajo de la cresta.

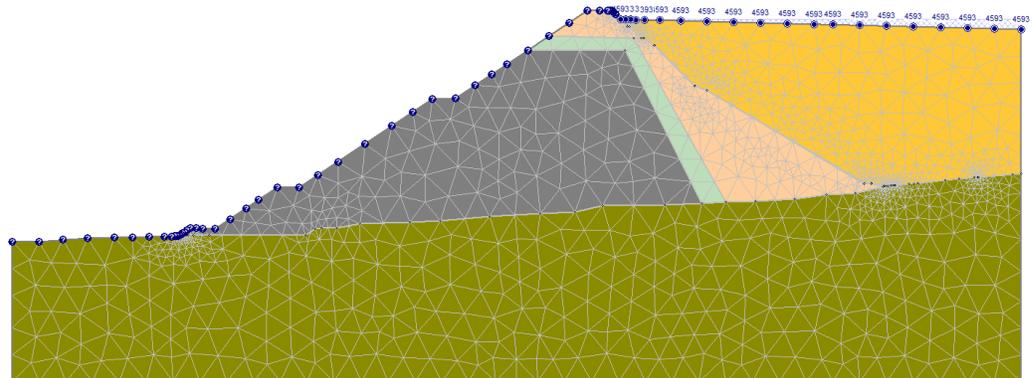
Las propiedades hidráulicas mostradas en la figura 34 que se usaron para este análisis se obtuvo de la ingeniería de detalle.

Figura 34 Propiedades hidráulicas del Dique Principal - Sección Geotécnica Analizada

Material Name	Color	Model	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle	Soil Type
ENROCADO		Simple	0.001	1	0	General
FILTRO		Simple	0.001	1	0	General
Relleno Estructural		Simple	5.4e-010	1	0	General
Relave		Simple	1e-007	1	0	General
Basamento Rocoso		Simple	2.8e-007	1	0	General
MEMBRANA		Simple	1e-013	1	0	General

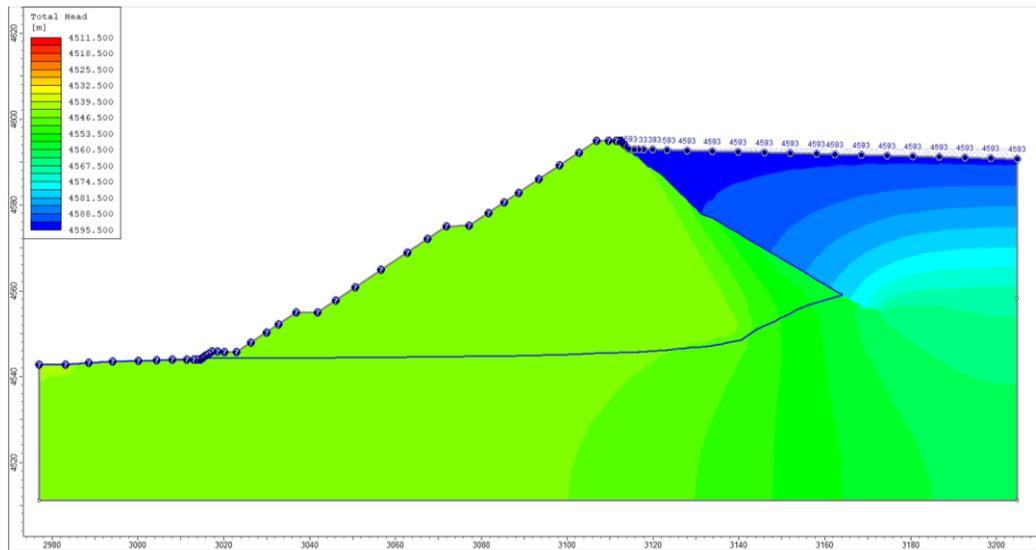
Fuente: Ingeniería de detalle

Figura 35 Análisis de Infiltración Cota 4595 msnm – Materiales y discretización



Fuente: Propia

Figura 36 Análisis de infiltración cota 4595 msnm – Carga total



Fuente: Propia

4.8.3 Análisis de Estabilidad de Taludes Estático y Pseudo-estático

Para el análisis de la estabilidad física de los taludes proyectados en las estructuras principales: diques Principal, se utilizó el software de cómputo SLIDE versión 6.0 (Rocscience, 2011). Este es un programa de análisis de estabilidad de taludes en equilibrio límite completamente integrado que permite desarrollar la geometría del talud interactivamente con la definición de los tipos y propiedades de los materiales.

El factor de seguridad se determina considerando un plano bidimensional usando la técnica de equilibrio límite, aproximando el problema a un estado de deformación plana.

Como hipótesis, el análisis considera que las propiedades de los materiales que conforman la estructura analizada, es homogéneas e isotrópicas y que el colapso se produciría como resultado de fallas simultáneas a lo largo de la superficie de deslizamiento. Cada material tiene sus propiedades y características físicas y mecánicas particulares como se puede observar en la fig. 37.

Para el análisis pseudo-estático (ver fig. 39) se considera que la masa involucrada en la falla está sometida a una aceleración horizontal igual a un coeficiente sísmico

multiplicado por la aceleración de la gravedad, de modo de tomar en cuenta el efecto de las fuerzas inerciales producidas por el terremoto de diseño. El coeficiente sísmico horizontal utilizado fue de 0,185.

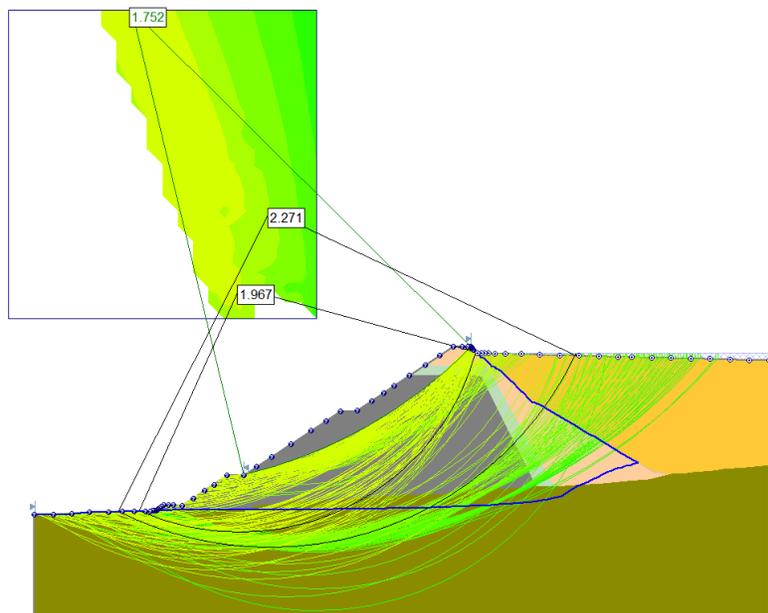
4.8.3.1 Resultados Obtenidos

Figura 37 Propiedades hidráulicas del Dique Principal - Sección Geotécnica Analizada

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi	Water Surface	Phi b	Air Entry
ENROCADO		23	Mohr-Coulomb	0	44	None	0	0
FILTRO		21	Mohr-Coulomb	0	38	None	0	0
Relleno Estructural		20	Mohr-Coulomb	10	33	None	0	0
Relave		13	Mohr-Coulomb	1	12	None	0	0
Basamento Rocoso		23	Mohr-Coulomb	26.5	34	None	0	0
MEMBRANA		9	Mohr-Coulomb	0	1	None	0	0

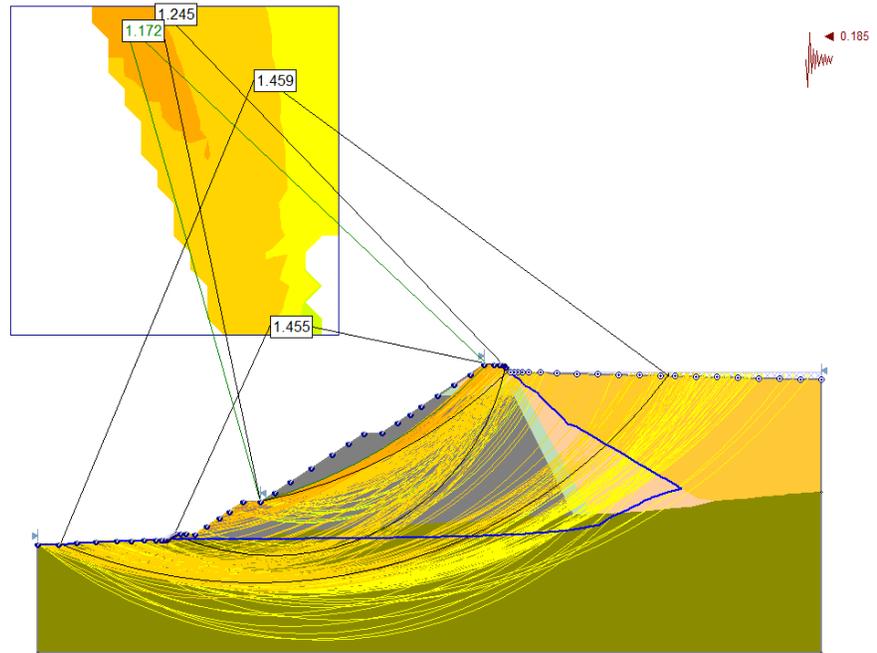
Fuente: Propia

Figura 38 Análisis estático Cota 4595 msnm



Fuente: Propia

Figura 39 Análisis pseudo-estático Cota 4595 msnm



Fuente: Propia

CAPITULO V: RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 Peligro según el cenepred

Los escenarios tomados en cuenta para hallar el peligro geotécnico fueron 4 tal como se muestran en la tabla 28, estos representan los peligros más comunes en una falla de presas, los cuales se dio una puntuación de acuerdo a la probabilidad de que puedan acontecer y tener una falla más crítica.

Tabla 28 Escenarios de Peligro

Escenarios de Peligro	Priorización
Aceleración Sísmica	0.445
Precipitación	0.107
Falla del talud en vaso	0.165
Infiltraciones por rotura de geomembrana	0.283

Fuente: Propia

5.1.1 Descriptores de Peligro

Cada escenario de Peligro se tiene que disgregar en distintos descriptores, y de esta forma se puede dar una correcta elección del descriptor de acuerdo a los valores de diseño.

De acuerdo a la ingeniería de detalle se diseñó la presa con un PGA (Peak Ground Accelerations) de 0.37g, lo cual tiene un valor de P4 tal como se observa en la tabla 29.

Tabla 29 Descriptores de la Aceleraciones sísmicas

Parámetro	Aceleración Sísmica	Peso	Ponderado:
		0.445	
Descriptores	Menor a 0.014g que representan sismos menores a III grados según la escala de Mercalli, los cuales nos dan factores de seguridad superiores a 3.0	P1	0.044
	0.014g a 0.092g que representan sismos entre III y IV grado según la escala de Mercalli los cuales nos dan factores de seguridad entre 2.0 – 3.0	P2	0.071

0.092g a 0.34 que representan sismos entre IV y VII grado según la escala de Mercalli los cuales nos dan factores de seguridad entre 1.7 – 2.0	P3	0.144
0.34g a 1.24g que representan sismos entre VII y IX grado según la escala de Mercalli los cuales nos dan factores de seguridad entre 0.55 – 1.7	P4	0.274
mayor a 1.24g que representan sismos mayores a X grados según la escala de Mercalli los cuales nos dan factores de seguridad inferiores a 0.55	P5	0.467

Fuente: Propia

En la tabla 30 se muestran los parámetros descriptores de la precipitación en la que se consideran el incremento del nivel del espejo del agua, según el caudal considerado. Para esta evaluación se trabajó con el Caudal de diseño teniendo un Peso 2.

Tabla 30 Descriptores de Precipitaciones

Parámetro	Precipitaciones	Peso Ponderado: 0.107
Descriptores	Qmin, incrementa el espejo del agua en 0.3 m,	P1 0.14
	Qd, incrementa el espejo de agua hasta en 0.70 m	P2 0.24
	Qmáx, que puede incrementar el espejo de agua hasta en 1 m	P3 0.62

Fuente: Propia

Para el parámetro de infiltraciones se consideró incrementos de cada 5 metros sobre el nivel de fundación tal como se observa en la tabla 31. Para la actual condición de la Presa según lecturas de los piezómetros estos niveles se encuentran por debajo de los 5m.

Tabla 31 Descriptores de Infiltraciones

Parámetro	Infiltraciones	Peso Ponderado: 0.283	
Descriptores	A 5m sobre el nivel de fundación.	P1	0.05
	A 10m sobre el nivel de fundación	P2	0.07
	A 15 m sobre el nivel de fundación	P3	0.12
	A 20m sobre el nivel de fundación	P4	0.26
	A 25m sobre el nivel de fundación	P5	0.51

Fuente: Propia

Para la consideración de los rangos de la pendiente del talud del vaso de la Presa Relavera en estudio se realizaron cortes de sección que se usaron para determinar las secciones críticas a analizar y se describen en la tabla 32. La topografía encontrada en el terreno nos da pendientes entre 20 y 30% por lo que tenemos un Peso 3.

Tabla 32 Descriptores de las pendientes en talud del vaso

Parámetro	Pendiente en talud de vaso	Peso Ponderado: 0.165	
Descriptores	Pendiente de terreno menores a 10%	P1	0.06
	Pendiente de terreno entre 10% a 20 %	P2	0.10
	Pendiente de terreno entre 20% a 30%	P3	0.16
	Pendiente de terreno entre 30% a 35%	P4	0.26
	Pendientes de terreno mayores a 35%	P5	0.42

Fuente: Propia

5.1.2 Valor del Peligro

Para determinar el Peligro se debe realizar la sumatoria del producto de los parámetros por sus descriptores. El valor obtenido es 0.188 tal como muestra la tabla 33.

Tabla 33 Valor del Peligro

Peligro								Valor
Aceleración sísmica		Precipitaciones		Pendientes en talud de vaso		Infiltraciones		
Parámetro	Descriptor	Parámetro	Descriptor	Parámetro	Descriptor	Parámetro	Descriptor	
0.445	0.274	0.107	0.239	0.165	0.161	0.283	0.05	0.188

Fuente: Propia

5.2 Susceptibilidad

5.2.1 Factores Condicionantes

Los factores condicionantes utilizados en este análisis fueron 3, los cuales se eligieron según la contribución favorable o no al desarrollo de los escenarios de peligro formulados en la tabla 34.

Tabla 34 Factores Condicionantes

Factores Condicionantes	Priorización
Tipo De Suelo	0.63
Uso De Suelo	0.11
Pendiente	0.26

Fuente: Propia

5.2.1.1 Descriptores de los Factores Condicionantes

Para plantear los descriptores del parámetro de tipo del suelo según el cenepred se tuvo en consideración el área de influencia y afectación de la presa relavera, y según los mapeos geológicos la zona del proyecto se encuentra sobre un afloramiento rocoso dando un Peso 4.

Tabla 35 Descriptores del Tipo de Suelo

Parámetro	Tipos de Suelo	Peso Ponderado: 0.63	
Descriptores	Rellenos sanitarios	P1	0.57
	Arena Eólica y/o limo (con agua)	P2	0.29
	Suelos granulares finos y suelos arcillosos sobre grava aluvial o coluvial	P3	0.09
	Afloramiento rocoso y estratos de grava	P4	0.04

Fuente: Propia

Para los descriptores del uso del suelo, se consideraron actividades mineras, pastos naturales y suelos sin uso los cuales son los más comunes del radio de influencia de la presa relavera.

Debido a que la Presa de Relaves proviene de una actividad minera se le da un Peso 1 tal como indica la tabla 36.

Tabla 36 Descriptores del Uso del suelo

Parámetro	Uso de Suelo	Peso Ponderado: 0.11	
Descriptores	Actividades Mineras	P1	0.78
	Pastos naturales, extensiones muy amplias	P2	0.15
	Sin uso / improductivos	P3	0.07

Fuente: Propia

Para la consideración de los rangos de la pendiente del talud del vaso de la Presa Relavera en estudio se realizaron cortes de sección que se usaron para determinar las secciones críticas a analizar y se describen en la tabla 37. La topografía encontrada en el terreno nos da pendientes entre 20 y 30% por lo que tenemos un Peso 3.

Tabla 37 Descriptores de Pendientes del terreno

Parámetro	Pendientes de Terreno	Peso Ponderado: 0.26	
Descriptores	Pendiente menores a 10%	P1	0.06
	Pendiente de 10% a 20 %	P2	0.10
	Pendiente de 20% A 30%	P3	0.16
	Pendiente de 30% a 35%	P4	0.26
	Pendientes mayores a 35%	P5	0.42

Fuente: Propia

5.2.1.2 Valor del Factor Condicionante

Para determinar el Valor del Factor Condicionante se debe realizar la sumatoria del producto de los parámetros por sus descriptores. El valor obtenido es 0.153 tal como muestra la tabla 38.

Tabla 38 Valor del Factor Condicionante

Factores Condicionantes						
Tipo de Suelo		Uso de Suelo		Pendiente		Valor
Parámetro	Descrip tor	Parámetro	Descrip tor	Parámetro	Descrip tor	
0.633	0.044	0.106	0.777	0.260	0.161	0.153

Fuente: Propia

5.2.2 Factores Desencadenantes

El factor desencadenante hace que el peligro sea aún mayor, tal es el caso de las actividades inducidas por el ser humano como la explotación de minerales, de canteras, construcciones de grandes infraestructuras como en el caso presente.

Tabla 39 Factor Desencadenante

Factor Desencadenante	Priorización
Inducido Por El Ser Humano	1

Fuente: Propia

5.2.2.1 Descriptores del Factor desencadenante

Para las consideraciones de la tabla 40 se consideraron descriptores desencadenantes inducidos por el ser humano que incrementa la probabilidad de que ocurra un peligro. Como descriptor se considera el de infraestructura ya que es lo que representa a una Presa, por lo que se tiene un Peso 3 en este caso.

Tabla 40 Descriptores Inducidos por el ser humano

Parámetro	Inducido Por El Ser Humano	Peso Ponderado: 1	
Descriptores	Actividades económicas	P1	0.080
	Sobre explotación de recursos naturales	P2	0.467
	Infraestructura	P3	0.315
	Crecimientos demográficos	P4	0.139

Fuente: Propia

5.2.2.2 Valor del Factor Desencadenante

Para obtener el valor del factor desencadenante se debe multiplicar el parámetro por su descriptor lo cual nos da un valor de 0.315.

Tabla 41 Valor del Factor Desencadenante

Factor Desencadenante		
Inducido por el ser Humano		Valor
Parámetro	Descriptor	
1.000	0.315	0.315

Fuente: Propia

5.2.2.3 Valor de la Susceptibilidad

La susceptibilidad se obtiene al sumar los valores de los factores condicionantes y desencadenantes multiplicado por sus respectivos pesos. Tal como se observa en la tabla 42.

Tabla 42 Valor de la Susceptibilidad

Susceptibilidad				
F. Condicionantes		F. desencadenante		Valor
Valor	Peso	Valor	Peso	
0.153	0.667	0.315	0.333	0.206

Fuente: Propia

5.2.3 Peligrosidad

La peligrosidad es el resultado entre el Peligro y la Susceptibilidad, los cuales tienen pesos para cada tipo, por lo cual se obtuvo un valor de 0.171 tal como se puede apreciar en la tabla 43 lo que lo ubica en un nivel de peligro alto.

Tabla 43 Valor de la Peligrosidad

Peligrosidad				
PELIGRO		Susceptibilidad		Valor
Valor	Peso	Valor	Peso	
0.153	0.667	0.206	0.333	0.171

Fuente: Propia

5.3 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad se conoce como la susceptibilidad de la población y estructura física, actividades socio económicas y del medio ambiente, de sufrir daños por acción de un peligro. Los cuales se puede analizar mediante su exposición, fragilidad y resiliencia frente al peligro.

5.3.1 Vulnerabilidad Social

Debido a que una falla de la presa no afectaría a un poblado por la distancia entre estos, se analizó la vulnerabilidad que tendrían los trabajadores del proyecto.

5.3.1.1 Exposición Social

Para la exposición social se tomó como muestra a los trabajadores del proyecto, los cuales se consideraron por edades.

Tabla 44 Exposición Social

EXPOSICION SOCIAL	Priorización
Grupo Etario	1

Fuente: Propia

Descriptor de Exposición Social

Según la consideración de la edad de los trabajadores, se observa en la tabla 45 que los trabajadores más expuestos son los de 20 a 25 años, pero según nuestra base de datos la mayoría de los trabajadores tienen entre 35 y 45 años.

Tabla 45 Descriptores del Grupo Etario

Parámetro	Grupo Etario	Peso Ponderado: 1	
Descriptores	Edad de trabajadores entre 20 - 25 años	P1	0.35
	Edad de trabajadores entre 25 - 35 años	P2	0.21
	Edad de trabajadores entre 35 - 45 años	P3	0.07
	Edad de trabajadores entre 45 - 55 años	P4	0.12
	Edad de trabajadores entre 55 - 65 años	P5	0.25

Fuente: Propia

5.3.1.2 Fragilidad Social

Para la fragilidad social, consideramos la experiencia de los trabajadores en actividades mineras, cuantos más años se tenga la probabilidad de tener un accidente será menor en comparación a un nuevo trabajador.

Tabla 46 Fragilidad Social

FRAGILIDAD SOCIAL	Priorización
Experiencia de Trabajadores	1

Fuente: Propia

Descriptor de la Fragilidad Social

Se puede observar en la tabla 47 que cuantos más años se tenga en actividades mineras menor será el peso que los representa frente a un peligro. Según la base de datos los trabajadores que actualmente se encuentran en el proyecto tienen entre 10 y 15 años de experiencia en su mayoría.

Tabla 47 Descriptores de los años en trabajos mineros

Parámetro	Experiencia de Trabajadores en Mina	Peso Ponderado: 1	
Descriptores	0 - 5 años	P1	0.56
	5 - 10 años	P2	0.26
	10 - 15 años	P3	0.12
	más de 15 años	P4	0.06

Fuente: Propia

5.3.1.3 Resiliencia Social

La tabla 48 nos muestra los parámetros de la fragilidad social, siendo la capacitación en temas de gestión de Riesgos el más importante.

Tabla 48 Fragilidad Social

FRAGILIDAD SOCIAL	Priorización
Capacitación en temas de Gestión del Riesgo de presas relaveras	0.54
Conocimiento de falla de presas de relaves	0.16
Actitud frente al riesgo	0.30

Fuente: Propia

Descriptor de la Resiliencia Social

En la resiliencia, con fines de reducir la probabilidad de riesgo se considera 3 parámetros los cuales son capacitación en Gestión de Riesgos, conocimiento de falla de presas de relaves y la actitud frente al riesgo. Esto aplicado para todo el personal involucrado en la operación de la Presa Relavera y toda la población aguas abajo del radio de influencia.

Para los descriptores de Capacitación en Gestión de Riesgos, se consideró 3 niveles tal como se observa en la tabla 49, del cual el personal de obra se capacita con regular frecuencia.

Tabla 49 Descriptores de Capacitación en Gestión de Riesgos

Parámetro	Capacitación en temas de Gestión del Riesgo de presas relaveras	Peso Ponderado: 0.54	
Descriptores	El personal de obra es escasamente capacitado	P1	0.63
	El personal de obra se capacita con regular frecuencia	P2	0.26
	El personal de obra se capacita constantemente	P3	0.11

Fuente: Propia

El descriptor considerado en la tabla 50, es que el personal tiene conocimientos sobre causas y consecuencias que puedan tener.

Tabla 50 Descriptores de conocimiento de fallas de presas de relaves

Parámetro	Conocimiento de falla de presas de relaves	Peso Ponderado: 0.16	
Descriptores	El personal tiene escaso conocimiento del tema	P1	0.724
	El personal tiene regular conocimiento del tema	P2	0.193
	El personal tiene conocimientos sobre las causas y consecuencias de fallas de presas	P3	0.083

Fuente: Propia

La actitud del personal del proyecto es previsor de todos los trabajadores. Lo cual se muestra en la tabla 51.

Tabla 51 Descriptores de actitud frente al riesgo

Parámetro	Actitud frente al riesgo	Peso Ponderado: 0.30	
Descriptores	Escasamente previsor de la mayoría del personal	P1	0.67
	Actitud parcialmente previsor de la mayoría del personal	P2	0.24
	Actitud previsor de todos los trabajadores	P3	0.09

Fuente: Propia

5.3.2 Vulnerabilidad Económica

5.3.2.1 Exposición Económica

La exposición económica que se contempla en una posible falla de la presa es el % que este podría deslizarse, y que causará pérdidas significativas.

Tabla 52 Exposición Económica

Exposición Económica	Priorización
% de presa de Relaves que falla	1.00

Fuente: Propia

Los descriptores del % que puede fallar se dividió en 4 niveles como se observa en la tabla 53, según los análisis de falla de los anexos 3, 4, 5, 6 y 7 se puede apreciar que fallaría un 25 a 50% de la Presa.

5.3.2.2 Descriptor de Exposición Económica

Tabla 53 Descriptor del % que falla de la Presa de Relaves

Parámetro	% que falla de la Presa de Relaves	Peso Ponderado: 1	
Descriptores	10% -25%	P1	0.05
	25% - 50%	P2	0.12
	50% - 75%	P3	0.26
	75% - 100%	P4	0.58

Fuente: Propia

5.3.2.3 Fragilidad Económica

Para la fragilidad económica se consideraron como parámetros los materiales, método de construcción y la elevación de la presa, para esto se usó las estadísticas de fallas que se puede encontrar en el anexo 2, lo cual nos ayuda para priorizar los parámetros según la tabla 54.

Tabla 54 Fragilidad Económica

Fragilidad Económica	Priorización
Materiales de Construcción	0.31
Método de Construcción	0.58
Elevación de la Presa	0.11

Fuente: Propia

Descriptor de Fragilidad Económica

En la tabla 55 para los descriptores de los materiales construcción, se muestran 3 materiales de construcción más comunes para la construcción de una Presas relavera o recrecimiento de esta según la configuración de la Ingeniería. Se visualiza que relave filtrado es el material más frágil en una Presa relavera. El presente proyecto se diseñó con materiales de enrocado.

Tabla 55 Descriptor de los materiales de Construcción

Parámetro	Materiales de Construcción	Peso Ponderado: 0.31	
Descriptores	Enrocado	P1	0.106
	Suelo Reforzado	P2	0.260
	Relaves filtrados	P3	0.633

Fuente: Propia

En cuestión a los métodos de construcción a nivel mundial se usan los métodos descritos en la tabla 55, para el presente caso se construyó con el método aguas abajo, siendo este el más común en Latinoamérica, pero como se muestra en la tabla 56 el método de construcción más frágil es aguas arriba según la figura 46 del anexo 4.

Tabla 56 Descriptor de los Métodos de construcción

Parámetro	Método de Construcción	Peso Ponderado: 0.58	
Descriptores	Aguas Arriba	P1	0.54
	Línea Central	P2	0.16
	Aguas Abajo	P3	0.30

Fuente: Propia

El rango de la elevación de la Presa en la tabla 57 se realizó tomando de las estadísticas del anexo 2 fig. 44 en la cual se puede apreciar que cuanto más pequeña la presa es más frágil.

Tabla 57 Descriptor de elevación de presa

Parámetro	Elevación de presa	Peso Ponderado: 0.11	
Descriptores	0 - 15 m	P1	0.56
	15 - 35 m	P2	0.26
	35 - 55 m	P3	0.12
	más de 55 m	P4	0.06

Fuente: Propia

5.3.2.4 Resiliencia Económica

Para mitigar la fragilidad económica tenemos que considerar una resiliencia tal como se aprecia en la tabla 58, en la cual se consideran instrumentación geotécnica y algunos alcances de seguridad de presas relavera con la finalidad de tener un mejor control de estas en la etapa de operación y cierre.

Tabla 58 Resiliencia Económica

Resiliencia Económica	Priorización
Implementación y monitoreo del Acelerógrafo	0.133
Lectura de Piezómetro	0.106
Lectura de hitos topográficos	0.088
Lectura de inclinómetros	0.050
Lectura y procesamiento de datos de celdas de Asentamiento	0.040
Cumplimiento del alcance de calidad	0.269
Check list de Presa Relavera	0.148
Revisión de seguridad de la Presa Relavera	0.166

Fuente: Propia

Descriptor de Resiliencia Económica

A continuación, se muestran en las tablas 59, 60, 61, 62, 63, 65 y 66 los periodos de monitoreo o recolección de datos de la instrumentación geotécnica indicada en cada tabla.

Tabla 59 Descriptor de Periodo de Monitoreo

Parámetro	Periodo de Monitoreo del Acelerógrafo	Peso Ponderado: 0.133	
Descriptores	Diario	P1	0.11
	Semanal	P2	0.26
	Quincenal	P3	0.63

Fuente: Propia

Tabla 60 Descriptor de lectura de Piezómetro

Parámetro	Lectura de Piezómetro	Peso Ponderado: 0.106	
Descriptores	Diariamente	P1	0.05
	Inter diario	P2	0.09
	Semanal	P3	0.15
	Quincenal	P4	0.26
	Mensual	P5	0.44

Fuente: Propia

Tabla 61 Descriptor de lectura de hitos topográficos

Parámetro	Lectura de hitos topográficos	Peso Ponderado: 0.088	
Descriptores	Diariamente	P1	0.05
	Inter diario	P2	0.09
	Semanal	P3	0.15
	Quincenal	P4	0.26
	Mensual	P5	0.44

Fuente: Propia

Tabla 62 Descriptor de lectura de inclinómetros

Parámetro	Lectura de inclinómetros	Peso Ponderado: 0.050	
Descriptores	Semanal	P1	0.11
	Quincenal	P2	0.26
	Mensual	P3	0.63

Fuente: Propia

Tabla 63 Descriptor de lectura y procesamiento de datos de celda de asentamiento

Parámetro	Lectura y procesamiento de datos de celdas de Asentamiento	Peso Ponderado: 0.040	
Descriptores	Semanal	P1	0.11
	Quincenal	P2	0.26
	Mensual	P3	0.63

Fuente: Propia

Se consideró parte de la resiliencia el cumplimiento del alcance de la calidad debido a que esta nos garantiza el correcto procedimiento de construcción y la calidad de los materiales utilizados para la construcción de las Presas, teniendo en consideración la ingeniería de detalle.

Tabla 64 Descriptor de cumplimiento del alcance de calidad

Parámetro	Cumplimiento del alcance de calidad	Peso Ponderado: 0.269	
Descriptores	Cumplimiento del manual CQA al 70 - 80 %	P1	0.63
	Cumplimiento del manual CQA al 80 - 90%	P2	0.26
	Cumplimiento del manual CQA al 90 - 100%	P3	0.11

Fuente: Propia

Se consideran el Check List de Presas de Relaves como una medida mitigadora de riesgo, ya que con este descriptor se llegará a conocer

algunas fallas que se pueden tener en operación o etapa de cierre de Presa Relavera.

Tabla 65 Descriptores de Check List de Presas de Relaves

Parámetro	Check List de Presa Relavera	Peso Ponderado: 0.148	
Descriptores	Bimestral	P1	0.11
	Semestral	P2	0.26
	Anual	P3	0.63

Fuente: Propia

Tabla 66 Descriptor de Revisión de Seguridad de Presa de Relaves

Parámetro	Revisión de seguridad de la Presa Relavera	Peso Ponderado: 0.166	
Descriptores	Bimestral	P1	0.11
	Semestral	P2	0.26
	Anual	P3	0.63

Fuente: Propia

5.3.3 Vulnerabilidad Ambiental

5.3.3.1 Exposición Ambiental

Como exposición ambiental ante la falla de una presa, se verá afectado directamente el suelo y agua como se indica en la tabla 67.

Tabla 67 Exposición ambiental

Exposición Ambiental	Priorización
Suelo	0.333
Agua	0.667

Fuente: Propia

El área de contaminación de suelo expuesto ante una falla de la presa de relaves se considera de una a dos hectáreas, tal como se muestra en la tabla 68. Para obtener un dato más exacto del área expuesta se debe realizar un estudio de rotura de presa.

Descriptor de Exposición Ambiental

Tabla 68 Descriptor de área de contaminación del suelo

Parámetro	Área de Contaminación del Suelo	Peso Ponderado: 0.333	
Descriptores	0 - 1 ha	P1	0.04
	1 - 2 ha	P2	0.07
	3 - 5 ha	P3	0.15
	5 - 10 ha	P4	0.28
	más de 10 ha	P5	0.45

Fuente: Propia

La principal condicionante de que ocurra la contaminación del agua es que ocurra el rebalse de la Presa relavera debido a que las lamas contienen un PH de entre 7.5 y 11.5 y algunos químicos utilizados en la planta concentradora. En la tabla 69 se muestra que el rango de contaminación del agua se encontrará entre los 7.5 y 11.5 de PH.

Tabla 69 Descriptor de contaminación del agua

Parámetro	Contaminación del Agua (PH)	Peso Ponderado: 0.667	
Descriptores	PH 0 - 3	P1	0.30
	PH 3 - 6.5	P2	0.12
	PH 6.5 - 7.5	P3	0.03
	PH 7.5 - 11.5	P4	0.16
	PH 11.5 -14	P5	0.40

Fuente: Propia

5.3.3.2 Fragilidad Ambiental

Para la fragilidad ambiental se consideró las características geológicas del suelo y la localización de los centros poblados tal como se aprecia en la tabla 70 ya que estos serán los que usen estos recursos naturales.

Tabla 70 Fragilidad Ambiental

Fragilidad Ambiental	Priorización
Características geológicas del suelo	0.333
Localización de Centros Poblados	0.667

Fuente: Propia

Descriptor de Fragilidad Ambiental

La fracturación del suelo es un descriptor principal ya que será debido a este que las lamas no puedan ingresar al sub suelo y la limpieza en caso un rebalse sea más rápida y la contaminación no sea permanente.

Tabla 71 Descriptor de Fragilidad Ambiental

Parámetro	Características geológicas del suelo	Peso Ponderado: 0.333	
Descriptores	Zona muy fracturada, fallada, suelos colapsables	P1	0.50
	Zona medianamente fracturada, fracturada, suelos con baja capacidad portante	P2	0.26
	Zona ligeramente fracturada suelos de mediana capacidad portante	P3	0.13
	Zonal ligeramente fracturada suelos de alta capacidad portante	P4	0.07
	Zonas sin fallas ni fracturas, suelos con buenas características geotécnicas	P5	0.03

Fuente: Propia

Como se puede apreciar en la tabla 72 se muestran parámetros de distanciamiento de la presa de relaves a centro poblados aguas abajo, como se aprecia a mayor distancia menor fragilidad.

Tabla 72 Descriptor de localización de Centro Poblados

Parámetro	Localización de Centros Poblados	Peso Ponderado: 0.667	
Descriptores	0 - 1 km de la Presa de Relaves	P1	0.50
	1 - 3 km de la Presa de Relaves	P2	0.26
	3 - 6 km de la Presa de Relaves	P3	0.13
	6 - 10 km de la Presa de Relaves	P4	0.07
	más de 10 km	P5	0.03

Fuente: Propia

De acuerdo a la tabla 73, para evitar que las consecuencias ante una posible falla no sean tan graves, se consideró como resiliencia ambiental un equipo de contingencia que apoye en la limpieza de la zona afectada, además de eso se deberá hacer monitoreos químicos de las aguas subterráneas para verificar que estas no sea hayan contaminado.

5.3.3.3 Resiliencia Ambiental

Tabla 73 Resiliencia Ambiental

Resiliencia Ambiental	Priorización
Equipo de contingencia	0.751
Monitoreo químico	0.249

Fuente: Propia

Descriptor de la Resiliencia Ambiental

Para el parámetro de equipo de contingencia, se llega a considerar días que se encuentre establecidos para la remediación según el MINEM que es dentro de 21 días, según la tabla 74 se puede observar que las consecuencias son directamente proporcionales a los días en que se demoren en realizar la limpieza de los relaves.

Tabla 74 Descriptor de Equipo de contingencia

Parámetro	Equipo de contingencia	Peso Ponderado: 0.751	
Descriptores	Equipo de contingencia inmediata para la limpieza de relaves	P1	0.11
	Equipo de contingencia llega a la zona afectada después de 5 días para la limpieza de relaves	P2	0.26
	Equipo de contingencia llega a la zona afectada después de 15 días para la limpieza de relaves	P3	0.63

Fuente: Propia

Después de la limpieza de la zona afectada se deberá tener un constante monitoreo de las aguas abajo para garantizar los niveles adecuados de la composición química y de acuerdo a estos se deberá realizar trabajos correctivos.

Tabla 75 Descriptor de Monitoreo químico de aguas subterráneas

Parámetro	Monitoreo químico de aguas subterráneas	Peso Ponderado: 0.249	
Descriptores	Diarios	P1	0.11
	Inter diarios	P2	0.26
	Semanales	P3	0.63

Fuente: Propia

5.3.4 Valor de la Vulnerabilidad

Para hallar el valor de la exposición, fragilidad y resiliencia social, se deberá hacer la sumatoria de los productos de los parámetros por sus descriptores. Luego de esto estos valores se deben multiplicar por sus respectivos los cuales fueron obtenidos de acuerdo a la metodología de Satty, y realizar la sumatoria respectiva, para finalmente tener un valor de 0.087.

Tabla 76 Valor de Vulnerabilidad

Vulnerabilidad Social						
Exposición Social		Fragilidad Social		Resiliencia Social		Valor
Peso	Valor	Peso	Valor	Peso	Valor	
0.623	0.068	0.137	0.122	0.239	0.115	0.087

Fuente: Propia

Para hallar la vulnerabilidad económica se debe realizar los mismos pasos que se hizo para obtener la vulnerabilidad social. Para este caso se tuvo un valor de 0.136.

Tabla 77 Valor de Vulnerabilidad Económica

Vulnerabilidad Económica						
Exposición Económica		Fragilidad Económica		Resiliencia Económica		Valor
Peso	Valor	Peso	Valor	Peso	Valor	
0.623	0.117	0.137	0.219	0.239	0.136	0.136

Fuente: Propia

Para hallar la vulnerabilidad económica se debe realizar los mismos pasos que se hizo para obtener la vulnerabilidad social. Para este caso se tuvo un valor de 0.104.

Tabla 78 Valor de Vulnerabilidad Ambiental

Vulnerabilidad Ambiental						
Exposición Ambiental		Fragilidad Ambiental		Resiliencia Ambiental		Valor
Peso	Valor	Peso	Valor	Peso	Valor	
0.608	0.130	0.272	0.046	0.120	0.106	0.104

Fuente: Propia

Para obtener la vulnerabilidad general se debe multiplicar los valores de vulnerabilidad social, económico y ambiental por sus respectivos pesos, obteniendo así un valor de 0.102, lo cual lo ubica en un nivel de vulnerabilidad media.

Tabla 79 Valor de la Vulnerabilidad

Vulnerabilidad						
Vulnerabilidad Social		Vulnerabilidad Económica		Vulnerabilidad Ambiental		Valor
Peso	Valor	Peso	Valor	Peso	Valor	
0.539	0.087	0.164	0.136	0.297	0.110	0.102

Fuente: Propia

5.4 Riesgo

El riesgo según el manual del cenepred se obtiene mediante el producto de la Peligrosidad y Vulnerabilidad. Los cuales se hallaron de acuerdo a las indicaciones del manual y los resultados se encuentran líneas arriba. El valor de riesgo obtenido para el caso de la Presa de Relaves N°3 en la unidad minera Pallancata-Ayacucho es de 0.017 lo que nos da un riesgo Medio según la tabla 80.

Tabla 80 Valor del Riesgo

Riesgo Geotécnico		
Peligrosidad	Vulnerabilidad	Valor
0.171	0.102	0.017

Fuente: Propia

5.5 Evaluación del riesgo según el árbol de eventos

Según lo analizado un mal comportamiento de la presa de relaves y sus estructuras adyacentes podría tener consecuencias que van desde daños menores, que podrían repararse rápidamente, hasta una liberación incontrolada de relaves y agua de la presa durante un período de tiempo. La liberación podría deberse a una falla en la presa o un desbordamiento sin falla en la presa.

En los árboles de eventos presentados, se calcularán las probabilidades anuales de los eventos que condujeron a la falla de la presa y/o a sus estructuras adyacentes. Las probabilidades de resultado se consideraron de acuerdo al tipo de consecuencias enumeradas en la Tabla 81.

Tabla 81 Clases de consecuencias

Consecuencia	Descripción	Valor
Menor	Daño físico menor que requiera algunas reparaciones; sin escape de relaves ni de agua; operaciones mineras no afectadas.	1
Significante	Daño físico significativo a la presa y/o sus estructuras adyacentes que requieren reparaciones mayores; se escapa una pequeña cantidad de relaves y agua; las operaciones mineras tendrían que detenerse por días o semanas.	2
Mayor	Daños materiales importantes y contaminación aguas abajo, que pueden incluir efectos en zonas fuera de los límites si los volúmenes liberados son muy grandes. Millones de dólares en costos de reparación. Las operaciones mineras deben detenerse por meses. Muchas bajas río abajo. Daños físicos del orden de millones de dólares. Contaminación significativa aguas	3
Catastrófico	abajo con gran impacto a largo plazo en el medio ambiente. La reputación de CMA y los consultores involucrados en el proyecto se verían gravemente dañados. La mina se cerraría permanentemente.	4

Fuente: Ausenco, 2019

Y en base al número de fatalidades en un evento con consecuencia catastrófica y a la probabilidad de ocurrencia de este, se utiliza los criterios del CDA para determinar la clasificación de la presa. Para el caso de la presa de relaves Pallancata se está considerando que, ante un evento de consecuencia catastrófica, las fatalidades que podrían ocurrir serían las que se encuentran aguas debajo de la presa, siendo estas las personas que operan en el dique principal y pozas, es decir, un número menor a 8.

5.5.1 Descripción de Escenarios

5.5.1.1 Escenario 1 – Sismo de gran magnitud

De manera general, un sismo de gran magnitud podría generar eventos de falla en la presa por licuefacción de la cimentación, y/o falla por estabilidad en el cuerpo de esta. Asimismo, debido a un sismo de gran magnitud se podría generar asentamientos diferenciales en la presa y minimizar el borde libre, pudiendo provocar un desbordamiento erosionando el dique.

Se ha evaluado este escenario debido a que la presa de relaves se encuentra en una zona de alta actividad sísmica, y para el diseño de las estructuras se ha utilizado el valor de aceleración máxima para un evento de 475 años de periodo de retorno, correspondiente a una aceleración de diseño igual a 0.37g.

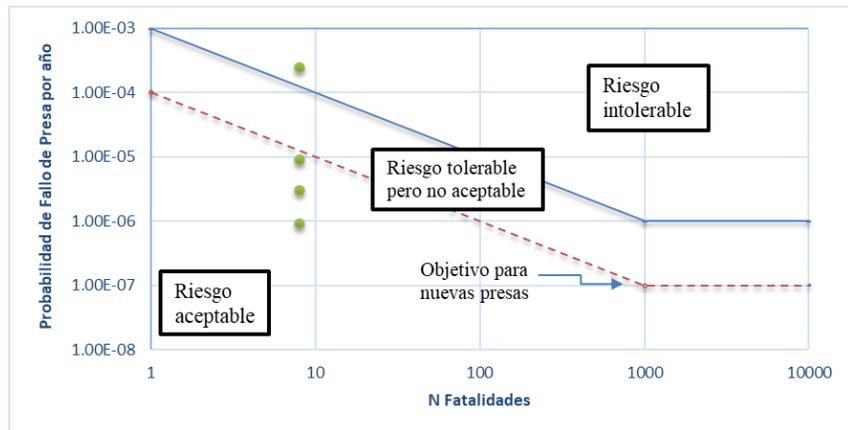
Debido a los materiales utilizados para la construcción del dique de la presa de relaves, no podría ocurrir licuefacción, por lo cual no se ha tomado en cuenta para el presente análisis.

En el árbol de eventos del presente escenario se evaluó los casos en que el evento sísmico fuese mayor o menor que el sismo de diseño, y las consecuencias que podría ocurrir para cada uno de los casos.

El peor escenario evaluado es cuando ocurre un sismo de gran magnitud mayor al del sismo de diseño, y la presa falla y ocurre un rebalse descontrolado de agua y relave. Y dentro del caso que la presa no falle, se ha evaluado la posibilidad que pueda existir asentamientos que minimicen el borde libre y pueda generar una descarga de relave al medio ambiente.

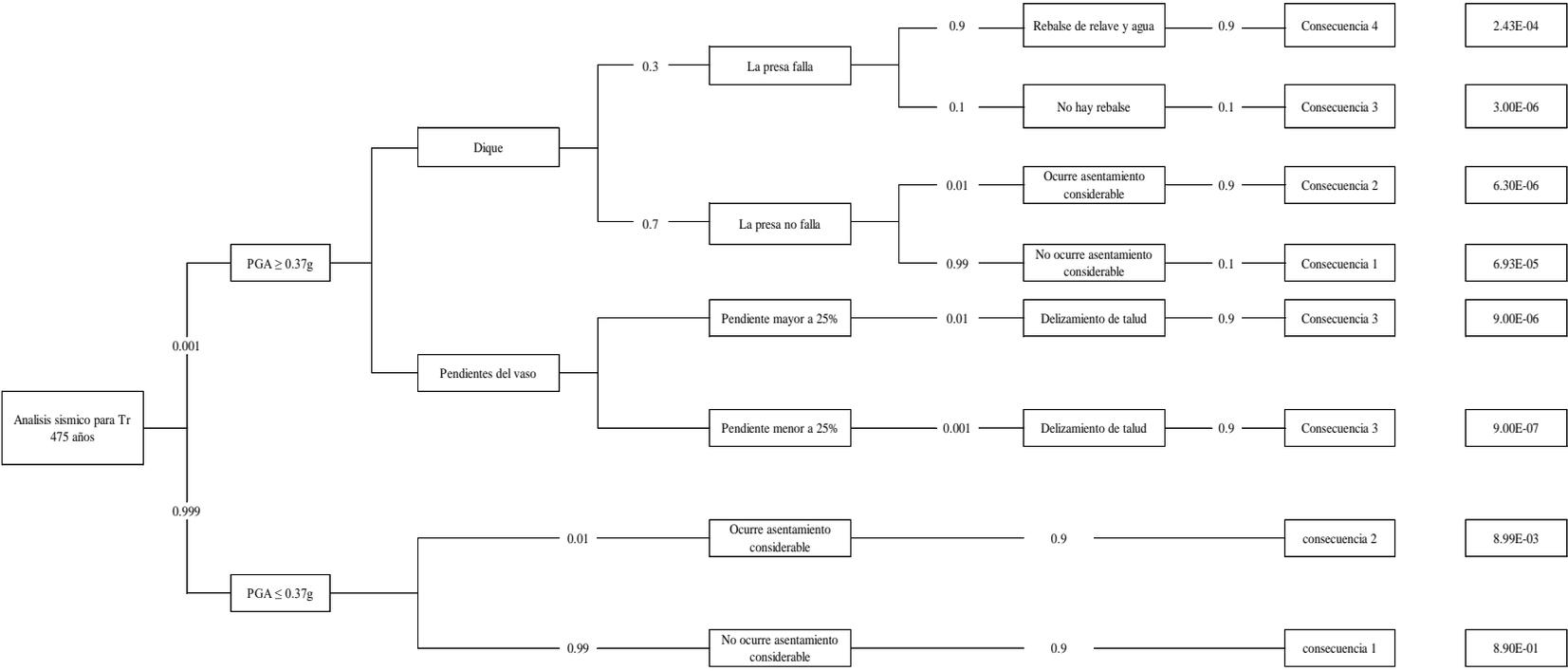
Para el árbol de eventos de sismos de gran magnitud mostrado en la figura 41, se obtuvieron consecuencias de tipo 3 y 4 las cuales se plasman en la figura 40.

Figura 40 Clasificación de la Presa según consecuencias 3 y 4



Fuente: Propia

Figura 41 Sismo de gran magnitud



Fuente: Propia

5.5.1.2 Escenario 2 – Precipitación extrema

Una precipitación extrema puede provocar una sobre elevación del agua por encima del borde libre, y en consecuencia un desbordamiento de la presa y falla de la misma, debido a la erosión provocada por el paso del flujo.

Asimismo, de acuerdo la clasificación de la presa, el flujo de diseño de ingreso de depósito se consideró en el diseño, de manera conservadora, 1 000 años de periodo de retorno, obteniendo un borde libre normal (distancia vertical entre la cresta de la presa y el nivel de aguas máximo de operación (NAMO)) de 2 m.

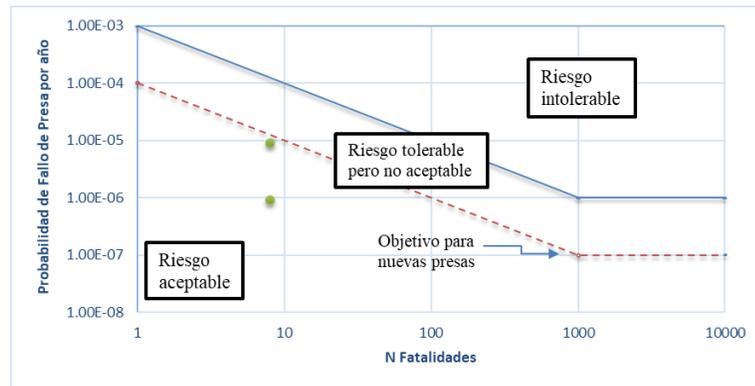
En el árbol de eventos se ha considerado los escenarios en que la precipitación sea mayor y menor a la de un periodo de retorno de 1000 años.

En el caso que el caudal de escorrentía de un periodo de retorno mayor al de 1000 años ocurriera, podría generar un aumento del nivel de agua por encima del NAME (nivel de agua máximo extraordinario) y en el peor de los escenarios un desbordamiento descontrolado de relaves.

También se ha considerado la alternativa, que en el caso que ocurriera el evento de periodo de retorno mayor a 1000 años, la presa de relaves pudiese necesitar un aliviadero de emergencia, que podría minimizar las consecuencias en un evento extremo.

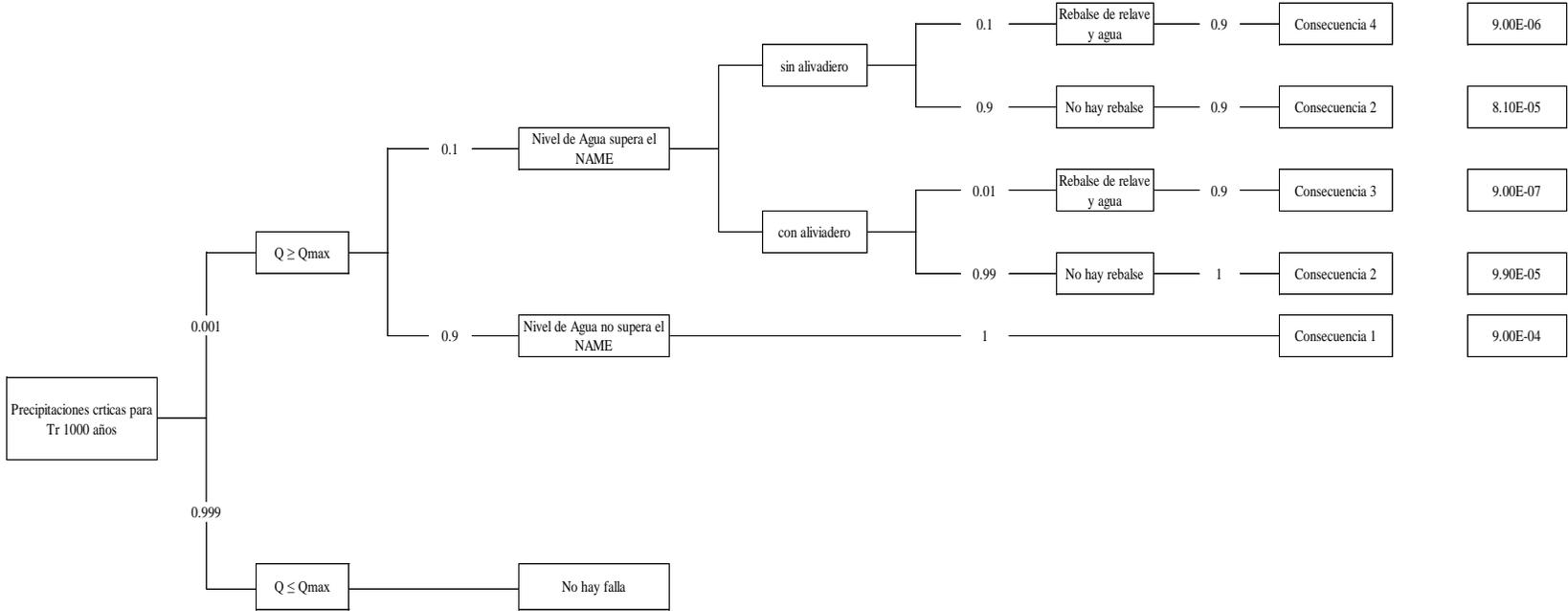
Para el árbol de eventos de precipitación extrema mostrado en la figura 43, se obtuvieron consecuencias de tipo 3 y 4 las cuales se plasman en la figura 42.

Figura 42 Clasificación de la Presa según consecuencias 3 y 4



Fuente: Propia

Figura 43 Precipitación Extrema



Fuente: Propia

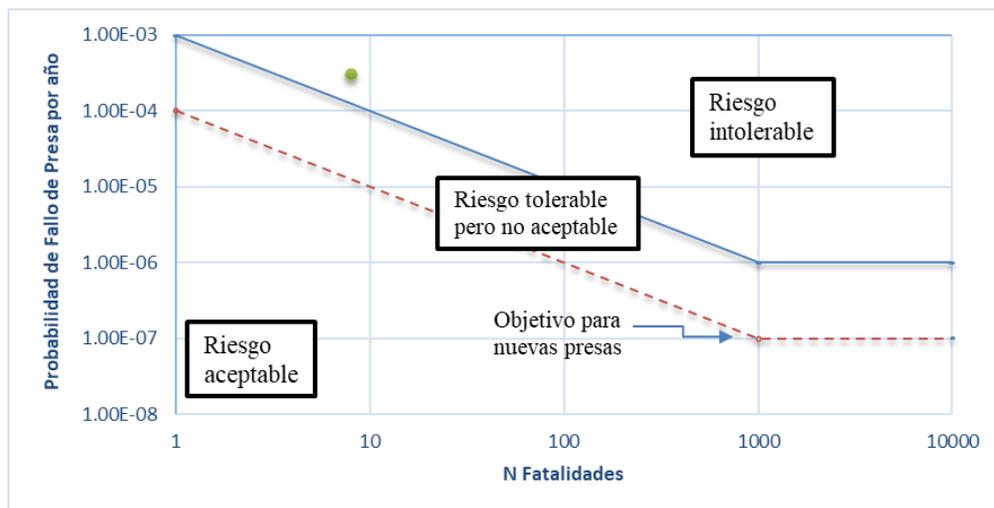
5.5.1.3 Escenario 3 – Filtración por Rotura de Revestimiento de Geomembrana

La rotura del revestimiento de geomembrana podría generar tubificación en el dique y esto puede provocar erosión en el cuerpo de la presa, desestabilizándola y provocando su falla, también esto produciría que el relave pueda salir del vaso de la presa, provocando contaminación al medio ambiente.

En el caso de la presa Pallancata, se ha considerado este escenario debido al tipo de material que está compuesto el dique principal; si bien el dique es de enrocado, tiene una capa de material fino que en el caso de una rotura de geomembrana puede generar tubificación y descarga de relave al medio ambiente. Debido a que siempre va a existir la incertidumbre del estado del revestimiento de geomembrana que se encuentra cubierta de relave.

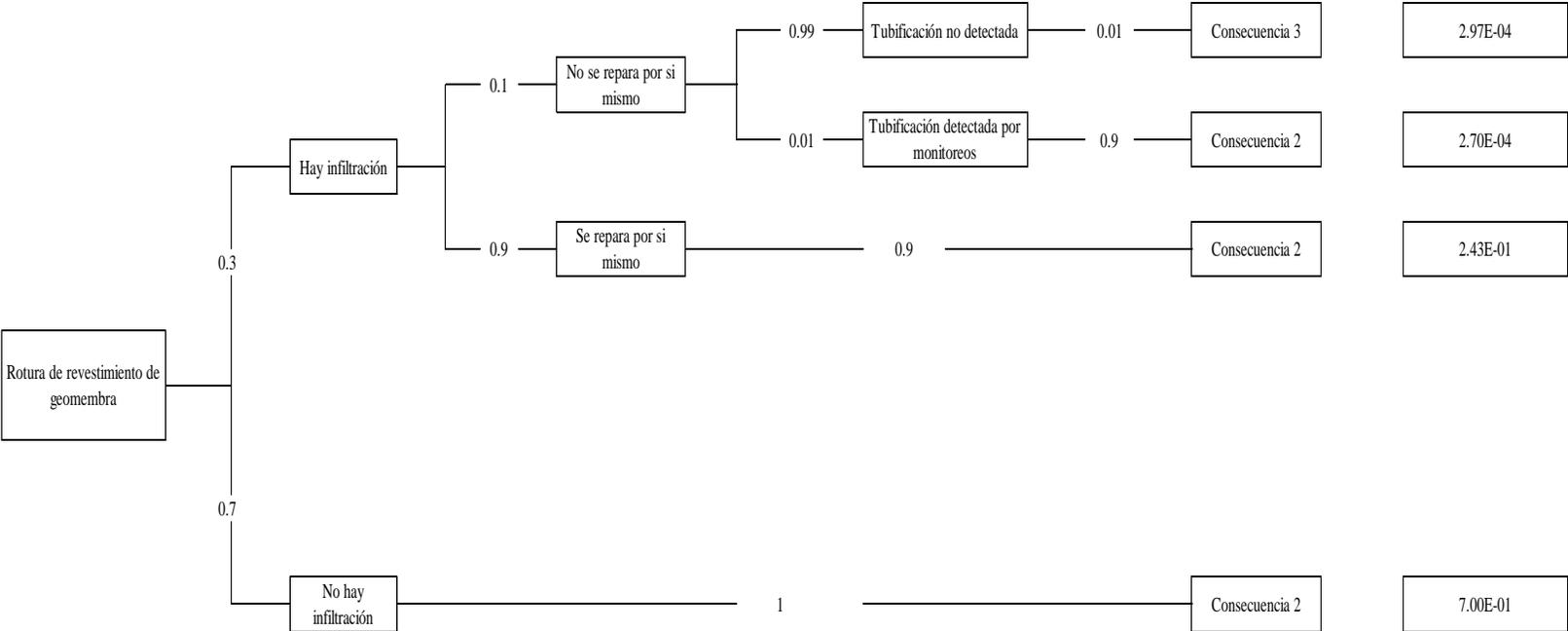
Para el árbol de eventos de filtración por rotura de geomembrana mostrado en la figura 45, se obtuvo una consecuencia de tipo 3 la cual se plasma en la figura 44.

Figura 44 Clasificación de la Presa según consecuencias 3 y 4



Fuente: Propia

Figura 45 Rotura de Revestimiento de Geomembrana



Fuente: Propia

5.5.1.4 Escenario 4 - Rebalse por falla de Sistema de Bombeo

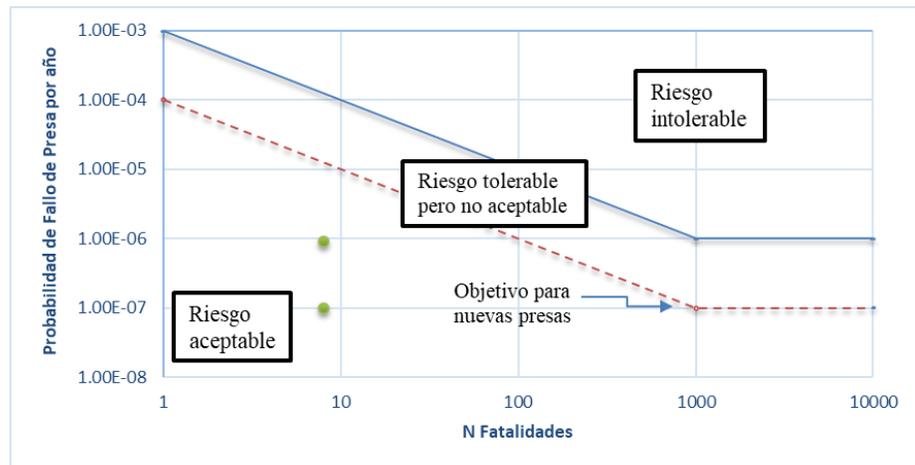
Una falla eléctrica o mecánica en el sistema de bombeo del agua que se encuentra dentro del depósito a la planta de Manganese puede provocar la sobreelevación del agua en el depósito, con lo cual podría ocurrir el desbordamiento de la presa y falla de la misma, debido a la erosión provocada por el paso del flujo y erosión en el dique.

Este escenario se ha considerado, tomando en cuenta que en cualquier momento este sistema podría fallar generando un aumento del nivel de agua por encima del NAME (nivel de agua máximo extraordinario) y en el peor de los escenarios un desbordamiento descontrolado de relaves.

También se ha considerado la alternativa que la presa de relaves pudiese necesitar un aliviadero de emergencia, que podría minimizar las consecuencias ante un evento de esta índole.

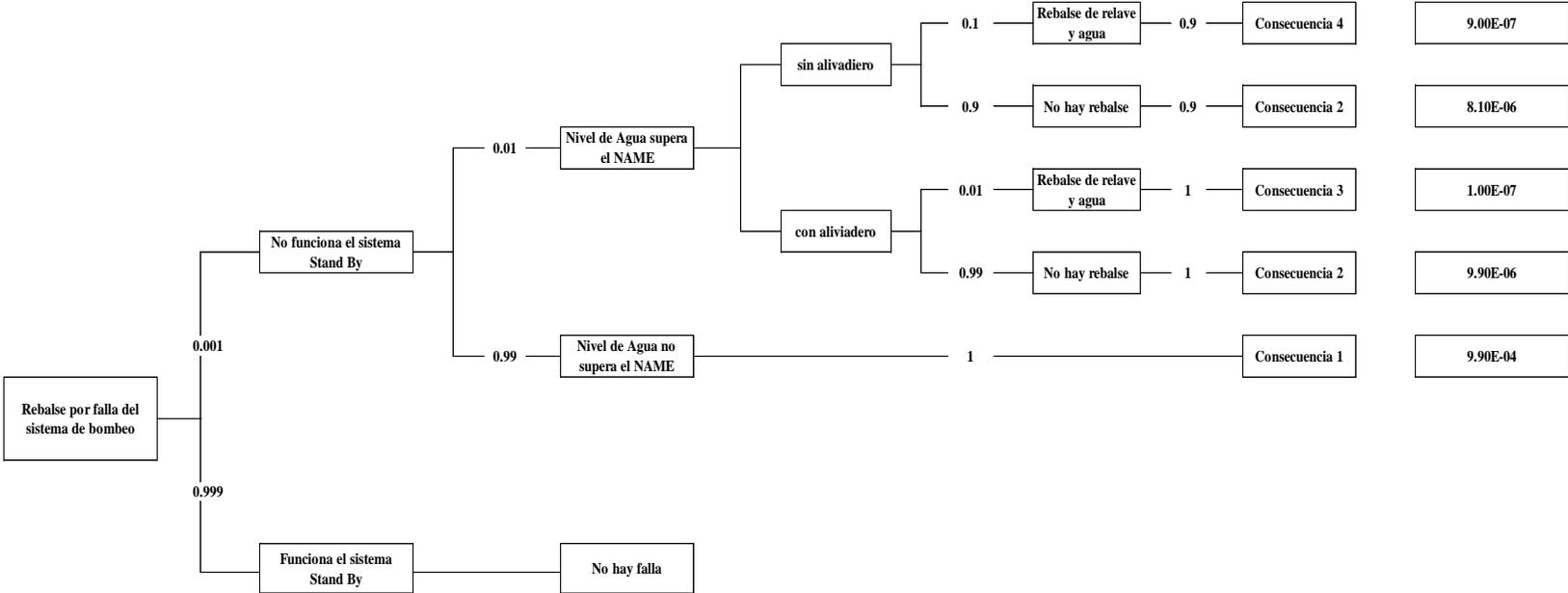
Para el árbol de eventos de rebalse por falla de sistema de bombeo mostrado en la figura 47, se obtuvieron consecuencias de tipo 3 y 4 las cuales se plasman en la figura 46.

Figura 46 Clasificación de la Presa según consecuencias 3 y 4



Fuente: Propia

Figura 47 Rebalse por falla del sistema de bombeo



Fuente: Propia

5.5.2 Riesgo Económico

El riesgo económico que se puede obtener según la guía del CDA y ICOLD, mediante el producto de la probabilidad de fallo de la presa y su consecuencia en un valor monetario, tal como se muestra en la tabla 82.

Tabla 82 Riesgo Económico

Evento de Riesgo	Probabilidad de falla	Consecuencia		Riesgo (\$)
		Tipo	Costo (\$)	
	2.43E-04	4	21000000	5103.00
Sismo de gran magnitud	3.00E-06	3		45.00
	9.00E-06	3	15000000	0.00
	9.00E-07	3		0.00
Precipitaciones extremas	9.00E-06	4	21000000	189.00
	9.00E-07	3	21000000	13.50
Filtraciones por rotura de geomembrana	2.97E-04	3	15000000	4455.00
	9.00E-07	4	21000000	18.90
Rebalse	1.00E-07	3	15000000	1.50

Fuente: Propia

5.6 Análisis y discusión de resultados

En el presente capítulo se mostrarán los resultados obtenidos de acuerdo a la aplicación del manual de evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales del Cenepred y de las pautas de seguridad de Presas de Relaves del CDA, para el procedimiento de análisis de la presente investigación se seleccionaron escenarios de falla (Aceleraciones sísmicas, filtraciones por rotura de Geomembrana, Rebalse por Falla en el sistema de bombeo, deslizamiento de talud en la zona del vaso, precipitaciones extremas), de esta manera se logra cubrir la mayoría de fallas que puedan cubrir ante una evaluación de riesgos geotécnicos de la Presa de Relaves N°3 en la unidad minera Pallancata.

De acuerdo al desarrollo de la investigación se obtuvo resultados cuantitativos lo cuales fueron respaldados por modelamientos realizados por el software Slide V.6.0 y de estadísticas de fallas de presas de relaves en el mundo.

A continuación, se muestran los resultados hallados.

5.6.1 Cenepred

De acuerdo a los resultados obtenidos siguiendo la metodología del manual de evaluación de riesgos del Cenepred se obtuvo un valor de Peligro Geotécnico de 0.165 lo cual lo ubica en un nivel de Peligro Alto según la tabla siguiente.

Tabla 83 Matriz de Peligro

NIVEL	RANGO
Peligro Muy Alto	$0.260 \leq R < 0.503$
Peligro Alto	$0.134 \leq R < 0.260$
Peligro Medio	$0.068 \leq R < 0.134$
Peligro Bajo	$0.035 \leq R < 0.068$

Fuente: Cenepred

El peligro geotécnico fue hallado mediante 4 escenarios los cuales son aceleraciones sísmicas, Precipitaciones extremas, Infiltraciones y fallas de talud en las laderas del vaso, de estos el que tuvo mayor priorización fue el escenario de aceleraciones sísmicas, debido a que este escenario es impredecible y es el que causa un mayor daño a la presa.

Con los parámetros analizados se obtuvo un valor de vulnerabilidad de 0.102, que es un indicador de vulnerabilidad media según la tabla 84. Este valor tiene consistencia con lo analizado ya que en el aspecto social la presa se encuentra ubicada estratégicamente alejada de un poblado en un radio de 20 km, además el personal de obra se encuentra correctamente capacitado ante alguna eventualidad que pueda ocurrir, en el aspecto económico la presa fue diseñada siguiendo parámetros nacionales e internacionales cumpliendo correctamente con ingeniería de detalle y manual de operaciones, finalmente en el ambiental se tiene asignado un equipo de contingencia que de soporte a algún suceso.

Tabla 84 Matriz de Vulnerabilidad

NIVEL	RANGO
Vulnerabilidad Muy Alta	$0.260 \leq R < 0.503$
Vulnerabilidad Alta	$0.134 \leq R < 0.260$
Vulnerabilidad Media	$0.068 \leq R < 0.134$
Vulnerabilidad Baja	$0.035 \leq R < 0.068$

Fuente: Cenepred

El riesgo según parámetros del Manual del Cenepred resultó en 0.17 y se ubica en un nivel de Riesgo Medio, este resultado es el análisis final que comprende los escenarios de falla considerados en la investigación y la vulnerabilidad social, económica y ambiental establecidos.

Tabla 85 Matriz de Riesgo

NIVEL	RANGO
RIESGO MUY ALTO	$0.068 \leq R < 0.253$
RIESGO ALTO	$0.018 \leq R < 0.068$
RIESGO MEDIO	$0.005 \leq R < 0.18$
RIESGO BAJO	$0.001 \leq R < 0.005$

Fuente: Cenepred

Este riesgo significa que el área de influencia se encuentra en un peligro regular y contaminación de aguas abajo en corto tiempo, a este nivel de riesgo medio se puede implementar medidas de mitigación con la finalidad de que este pase a ser un riesgo bajo.

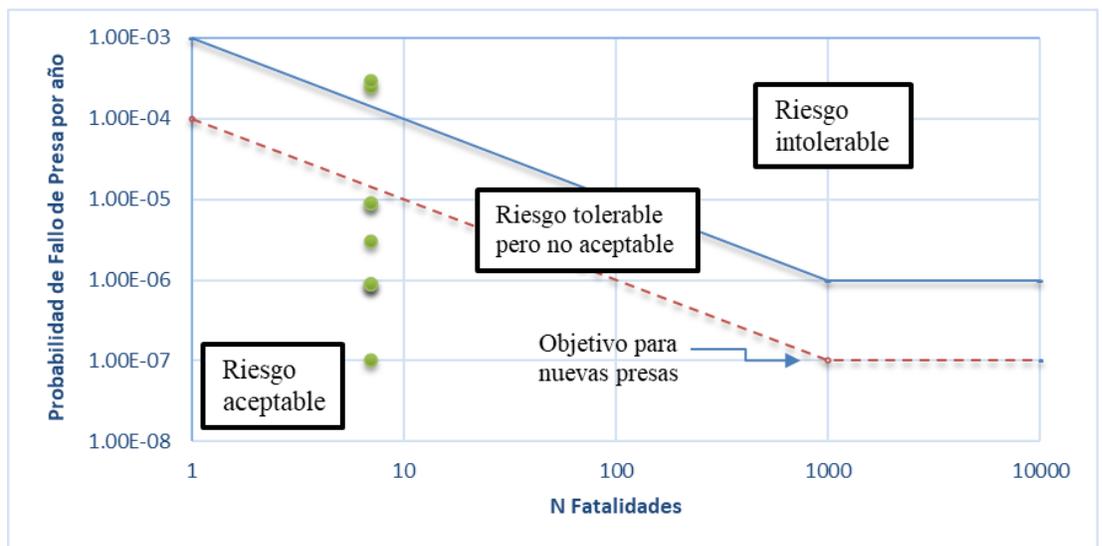
5.6.2 Árbol de eventos

En base a los análisis de eventos se obtuvo que para los escenarios 1 y 3, correspondientes a un sismo de gran magnitud y filtraciones por rotura de geomembrana, respectivamente, se tiene que el riesgo es intolerable para la probabilidad de una consecuencia catastrófica tal como se puede observar en la

figura 48 y tabla 86. Para que estos riesgos puedan considerarse como aceptables, se deberán realizar estudios complementarios y medidas de mitigación para evaluar dicha posibilidad.

En cuanto al escenario 2 y 4, correspondiente a las precipitaciones extremas y rebalse por falla eléctrica de sistema de bombeo, se obtuvo del árbol de eventos que existe posibilidad de una consecuencia 4 y 3 pero con probabilidades bajas que hacen que se encuentre en un nivel aceptable por lo que no se requiere de hacer trabajos complementarios sino continuar con los trabajos de monitoreo e inspección de la presa como se ha venido realizando.

Figura 48 Clasificación de la Presa según los escenarios analizados



Fuente: Propia

Tabla 86 Niveles de Riesgo

Evento de Riesgo	Probabilidad de Falla	Nivel de Consecuencia	Riesgo
Sismo de gran magnitud	2.43E-04	4	Intolerable
Precipitaciones extremas	9.00E-06	4	Aceptable
Filtraciones por rotura de geomembrana	2.97E-04	3	Intolerable
Rebalse	9.00E-07	4	Aceptable

Fuente: Propia

5.6.3 Medidas de Mitigación

Se pueden considerar varias medidas de mitigación de riesgos para la presa de relaves Pallancata para reducir la probabilidad y/o la gravedad de las consecuencias de estos. Las cuales se enumeran a continuación:

- 1) Con la finalidad de capacitar al personal de operación durante un evento de riesgo, se propone implementar un sistema de alerta temprana y rutinas de evacuación para personas que se encuentren aguas debajo de la presa de relaves. Adicional a ello considerar que el número de personas que realizan trabajos sea la menor cantidad posible.
- 2) Para asegurar la estabilidad y buen funcionamiento de todas las subestructuras de la presa de relaves se deberá continuar con el programa de inspección y mantenimiento regular de estas, garantizando un buen funcionamiento de todo el sistema.
- 3) Para garantizar que no existan problemas ocultos a lo largo de la vida útil de la presa de relaves, se deberá tener un control exhaustivo durante la etapa de construcción de futuros recrecimientos de la presa.
- 4) Según las características de la presa del depósito de relaves y el entorno en el que se encuentra, la ingeniería de detalle considero una clasificación

de presa como “Significante” según el CDA (2013). Per con la finalidad de tener una clasificación más precisa se recomienda realizar un estudio de rotura de presas.

- 5) Para implementar mejores niveles de alerta de la Presa de Pallancata se debe tener lecturas periódicas de monitoreos y procesamiento de datos de la instrumentación geotécnica, en vista de que la presa no cuenta con acelerógrafos sería de vital importancia implementar estos.

5.6.4 Contrastación de Hipótesis

- Hipótesis Principal: El riesgo de falla geotécnica de la presa de relaves N°3 en la unidad minera Pallancata - Ayacucho frente a un evento sísmico e hidrológico es bajo.

La hipótesis principal no se llegó a cumplir, ya que el riesgo obtenido de la Presa de Relaves N°3 en la unidad minera Pallancata – Ayacucho resultó en riesgo medio/ aceptable frente a un evento sísmico e hidrológico lo que significa que la presa no falla. Se debe considerar las medidas de mitigación las cuales se plantea en el capítulo 5.6.3. para que los riesgos obtenidos sean bajos.

- Hipótesis secundaria 1: Con la información obtenida sobre los fenómenos sísmicos y las condiciones Hidrológicas de la zona de Ayacucho se podrá realizar un correcto análisis de la estabilidad del talud de la Presa de relaves N°3 en la unidad minera Pallancata - Ayacucho.

La hipótesis secundaria 1 se cumplió, ya que con la información que se pudo recabar de los fenómenos sísmicos y condiciones hidrológicas de la zona del proyecto obtenida de la ingeniería de detalle, se pudo realizar correctos modelamientos de estabilidad de taludes tal como se pueden observar en los anexos 3, 4, 5, 6 y 7.

- Hipótesis secundaria 2: El uso del manual para la evaluación de riesgo originados por fenómenos naturales del Cenepred y pautas de seguridad de Presas del CDA nos garantiza la seguridad de la presa.

Se cumplió la hipótesis 2 debido a que al realizar la evaluación de riesgo de la Presa por el manual del Cenepred y las Pautas de seguridad de Presas del CDA, obtuvimos resultados similares por lo cual esto da confianza en que la evaluación se realizó correctamente por lo que nos garantiza la seguridad de la Presa.

- Hipótesis secundaria 3: El análisis de la modelación de estabilidad del talud de la presa de relaves identifica la superficie de falla y verifica que los factores de seguridad del talud frente a un sismo, posibles infiltraciones y precipitaciones de la zona cumplan la normativa vigente.

La presente hipótesis se cumplió ya que los modelamientos realizados frente a un sismo de gran magnitud, infiltraciones y precipitaciones nos dieron una superficie de falla, lo cual evidencia como podría fallar la presa frente a estos eventos, además los factores de seguridad obtenidos de estos análisis cumplen con norma técnica peruana.

CONCLUSIONES

1. La presente investigación tuvo como objetivo principal la evaluación del riesgo geotécnico de la presa de relaves n°3 en la unidad minera Pallancata – Ayacucho. Para la identificación de los niveles de riesgo se usó el manual del Cenepred y Pautas del CDA/ICOLD, según el Cenepred se obtuvo un valor de Riesgo Medio, y según las Pautas de Seguridad de Presas del CDA, nos dio un riesgo aceptable en 2 escenarios y 2 intolerables, siendo posible de reducir a un nivel de riesgo aceptable tomando medidas de mitigación social tal como se indicó en el análisis de resultados.
2. La aceleración sísmica de diseño y las precipitaciones de la zona de Pallancata se pueden obtener de la ingeniería de detalle del recrecimiento de la Presa en su tercera etapa, Los resultados del estudio indicaron que la aceleración horizontal máxima (PGA), obtenidos mediante la combinación indicada de leyes de atenuación, son: 0.37g para un periodo de retorno de 475 años y 0.45g para un periodo de retorno de 975 años. Para el sismo de diseño de las estructuras en el área del proyecto se recomendó utilizar el valor de aceleración máxima para un evento de 475 años de periodo de retorno, que corresponde a una exposición sísmica de 50 años con una probabilidad de excedencia de 10%. Para el cálculo de la PMP, la media de la máxima en 24 horas fue tomada de las estadísticas de la estación Santo Tomás (35,2 mm). El factor de crecimiento es una función de la media de la precipitación máxima y de la duración de 24 horas. El factor de crecimiento resultó 16,2, y en consecuencia la PMP ha sido estimada en 245 mm. El borde libre mínimo se estimó para un Tr de 1000 años lo cual resultó en 1.3 m. Considerando estos parámetros calculados se procedió a realizar modelamientos en el programa Slide de la sección más crítica del dique tal como se muestra en las figuras 57, 58 y 61, considerando los parámetros de aceleración y precipitaciones máximas probable y realizando el análisis de infiltración para ubicar el nivel freático se obtiene como resultado el factor de seguridad pseudo-estático de 1.172 para un tr de 475 años y 1.083 para un tr de 975 años. El resultado del análisis nos muestra que los fenómenos sísmicos y las condiciones hidrológicas de la zona no afectan a la estabilidad del talud, ya que estos

resultados superan los factores mínimos establecidos por el Ministerio de Energía y Minas que son de 1.0 para condiciones pseudo-estáticas.

3. Para la evaluación del riesgo según el Cenepred se plantearon diversos escenarios de falla en la cual se analizó parámetros de Peligro, vulnerabilidad (social, económica y ambiental) y sus respectivos descriptores en base a un análisis jerárquico según la metodología de Saaty obteniendo un valor de Riesgo Medio, además de ello para reforzar los resultados hallados se siguió las Pautas de Seguridad de Presas del CDA, lo cual recomiendan realizar un análisis del riesgo mediante el método de árbol de eventos respaldado por estadísticas de fallas de presas relaveras y juicio de experto, obteniendo 2 escenarios de falla (Precipitaciones extremas y Rebalse por falla del sistema de bombeo) aceptables y 2 escenarios (Aceleraciones de gran magnitud y Filtraciones por rotura de geomembrana) intolerables. Estos resultados nos indica que la seguridad de la Presa es alta ya que las probabilidades de falla son bajas.
4. Se realizaron modelamientos de secciones del dique principal y el vaso considerando parámetros geotécnicos, aceleraciones sísmicas, PMP, infiltraciones y piping, estos modelamientos son parte del análisis de los escenarios de falla de la presente investigación, de los resultados obtenidos se puede concluir que estos factores de seguridad superan a los factores mínimos establecido por el Ministerio de Energía y Minas.

RECOMENDACIONES

1. Realizar más investigaciones dirigidas a Presas relaveras asociando el manual de evaluaciones del cenepred y las pautas de seguridad de Presas del CDA para así poder tener un manual nacional estandarizado para la evaluación geotécnica de Presas de Relaves.
2. Para realizar una correcta evaluación de riesgos de una presa de relaves se requiere poder conocer la zona de estudio con más detalle para así poder establecer criterios de medición de Riesgo más exactos y conocer las áreas vulnerables o de afectación.
3. Para una adecuada identificación de modos de fallas potenciales se debe realizar una visita e inspección al sitio con un especialista geotécnico para así evaluar correctamente los peligros de la Presa.
4. Se recomienda realizar un análisis de rotura de presas y mapeos de inundación para conocer la afectación que pueda tener la presa de Pallancata, de esta forma conocer con más exactitud en área de influencia.
5. Para mitigar el riesgo hallado según las pautas de seguridad del CDA se recomienda que las personas involucradas aguas abajo sea menores a 4 y de esta forma se garantiza que el riesgo social de la Presa Pallancata sea aceptable.
6. Para complementar el análisis geotécnico de la Presa Relavera N°3 de Pallancata se recomienda realizar modelamientos geotécnicos con software más especializados considerando la data de la instrumentación geotécnica actual para obtener resultados como asentamientos y deformaciones del dique, así como la tubificación que se podría formar por la rotura de la geomembrana.
7. Identificar aquellos escenarios geotécnicos críticos que tienen mayor relevancia sobre otros. Esto permitiría definir la cantidad de parámetros fuera de rango que indican que la presa de relaves está en riesgo de falla.
8. Realizar una base de datos nacional de falla de Presas de Relaves, ya que la que manejan las instituciones internacionales como el CDA, el ICOLD entre otras, no se asemejan a la realidad geográfica y climática del Perú.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, M. G. & Richards, K. S. (1987) *Slope Stability: Geotechnical Engineering and Geomorphology*. John Wiley and Sons, N.Y.
- ANCOLD (1994). *Guidelines on Risk Assessment, Australian National Committee on Large Dams*.
- Andrés, C. C. O., & Aldo, O. (2012). *Inestabilidad de Laderas. Análisis Geotécnico y Evaluación de Riesgos*. Eae Editorial Academia Española.
- Andrews, D. C. A. and Martin, G. R. (2000). *Criteria for liquefaction of silty soils. Proc., 12th World Conf. on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand*.
- Belandria, N. (2020). *Análisis del riesgo geotécnico en la carretera tovar - zea, sector la roca, estado Mérida*.
- Borja, Manuel (2012), *Metodología de la investigación científica para ingenieros*, Chiclayo, Perú.
- Bray, J. D., Sancio, R. B., Riemer, M. F., and Durgunoglu, T. (2004). *Liquefaction susceptibility of finegrained soils. Proc., 11th Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and 3rd Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Stallion Press, Singapore*.
- Brawner, C. (1979), *Design, Construction, and Repair of Tailings Dams for Metal Mine Waste Disposal, Current Geotechnical Practice in Mine Waste Disposal*, ASCE
- Canadian Dam Association (2014), *Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams*.
- Castro, G. and Poulos, S.J. (1977) *Factors Affecting Liquefaction and Cyclic Mobility. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 103, 501-516*.
- Carbajal M. (2018). *Desarrollo de una metodología para análisis de estabilidad física de depósitos de relaves*. Chile.
- CENEPRED, C. N. (2015). *Manual para la Evaluación de Riesgos Originados por Fenómenos Naturales*.

- Dorbath, L., Cisternas, A., and Dorbath, C., (1990), *Assessment of the Size of Large and Great Historical Earthquakes in Peru*.
- Fell, R., Wan, C. F., Cyganiewicz, J., & Foster, M. (2003). *Time for development of internal erosion and piping in embankment dams*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(4), 307–314.
- Figueroa, A. Solans, D. Gonzalez, A. & Campaña, A (2017), *Comportamiento sísmico de presas de relaves construidas aguas abajo y línea central*. *Obras y proyectos 21*.
- Foster, M., Fell, R., & Spannagle, M. (2000). *A Method for Assessing the Relative Likelihood of Failure of Embankment Dams by Piping*. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 497–500.
- ICOLD (1999). *Bulletin on risk assessment: Risk assessment as an aid to dam safety management*.
- Ishihara, K. (1984), *Post-earthquake failure of a tailings dam due to liquefaction of the pond deposit*. In Proc., Inter. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering.
- Knight, Z. (2015). *Slope Stability Analysis of Tailings Dam Embankments*. Charles Darwin University.
- Ministerio de Energía y Minas (2015), *Guía Ambiental para el Manejo de Relaves Mineros*, Perú.
- Ramírez Morandé Nelson A. (2007), *Guía Técnica De Operación y Control De Depósitos De Relaves*. *Servicio Nacional de Geología y Minería Departamento de Seguridad Minera (Sernageomin)*, Chile.
- Rivas, D., Meza, H., Belandria, N., Bongiorno, F. (2016). *Análisis De Estabilidad De Taludes Para La Generación De Un Mapa De Riesgo Geotécnico Empleando Interpolaciones Geoestadísticas*.
- SERNAGEOMIN (2007). *Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves* (Inédito): 41 pp. Santiago, Chile.
- Slunga, Eero (2001), *Concept and bases of risk analysis for dams with an example application on Kyrkösjärvi Dam*.

De la Cruz Sonny (2017). *Evaluación del fallo de Presas de Relaves con el método del árbol de fallos*, España.

Troncoso, J. (1995), *Design and Behavior of Tailings Dams Under Seismic Conditions*.

Zhang, L., Peng, M., Chang, D., & Xu, Y. (2016). *Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment (First)*. Singapore: John Wiley & Sons.

ANEXOS

Anexo 1 Matriz de consistencia

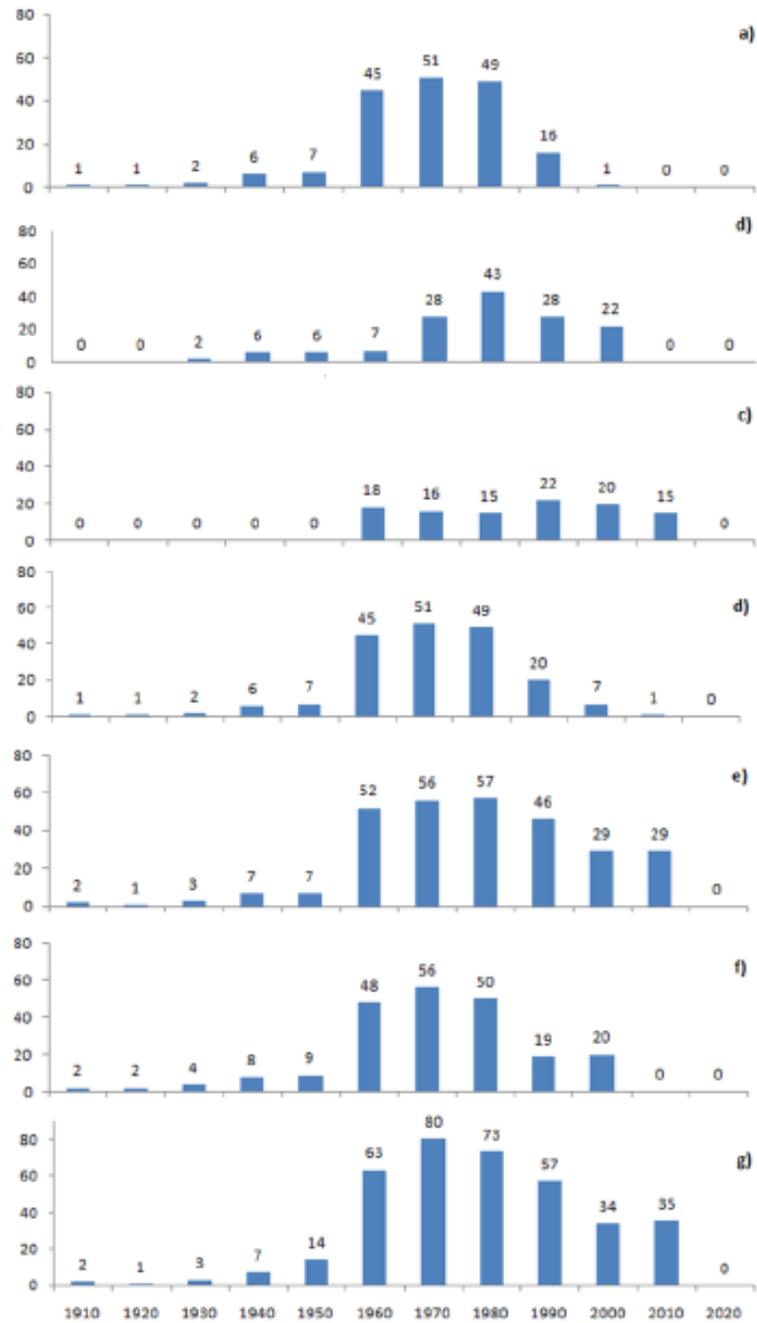
Tabla 87 Matriz de Consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS
General		
¿Cómo realizar la evaluación de riesgo geotécnico de la presa de relaves N°3 en la unidad minera Pallancata - Ayacucho?	Evaluar el riesgo geotécnico de la presa de relaves n°3 en la unidad minera Pallancata - Ayacucho	El riesgo de falla geotécnica de la presa de relaves N°3 en la unidad minera Pallancata - Ayacucho frente a un evento sísmico e hidrológico es bajo.
Específico		
¿Cómo afecta los fenómenos sísmicos y las condiciones hidrológicas de la zona a la estabilidad del talud de la presa de relaves N°3 en la unidad minera Pallancata - Ayacucho?	Determinar los fenómenos sísmicos y las condiciones hidrológicas de la zona que afectan a la estabilidad del talud de la presa de relaves N°3 en la unidad minera Pallancata - Ayacucho.	Con la información obtenida sobre los fenómenos sísmicos y las condiciones Hidrológicas de la zona de Ayacucho se podrá realizar un correcto análisis de la estabilidad del talud de la Presa de relaves N°3 en la unidad minera Pallancata - Ayacucho.
¿Cómo aplicar el manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales del Cenepred y pautas de seguridad de Presas del CDA?	Utilizar el manual del Cenepred y pautas de seguridad de Presas del CDA para la evaluación del riesgo de la presa de relaves n°3.	El uso del manual para la evaluación de riesgo originados por fenómenos naturales del Cenepred y pautas de seguridad de Presas del CDA nos garantiza la seguridad de la presa.
¿De qué forma el modelamiento geotécnico de la presa de relaves n°03 en la unidad minera Pallancata - Ayacucho cumplirá con el factor de seguridad establecido por la normativa vigente?	Realizar el modelamiento geotécnico de la presa de relaves n°03 en la unidad minera Pallancata - Ayacucho, para verificar el factor de seguridad establecido por la normativa vigente.	El análisis de la modelación de estabilidad del talud de la presa de relaves identifica la superficie de falla y verifica que los factores de seguridad del talud frente a un sismo, posibles infiltraciones y precipitaciones de la zona cumplan la normativa vigente.

Fuente: Propia

Anexo 2 Estadística de fallas de Presas de Relaves

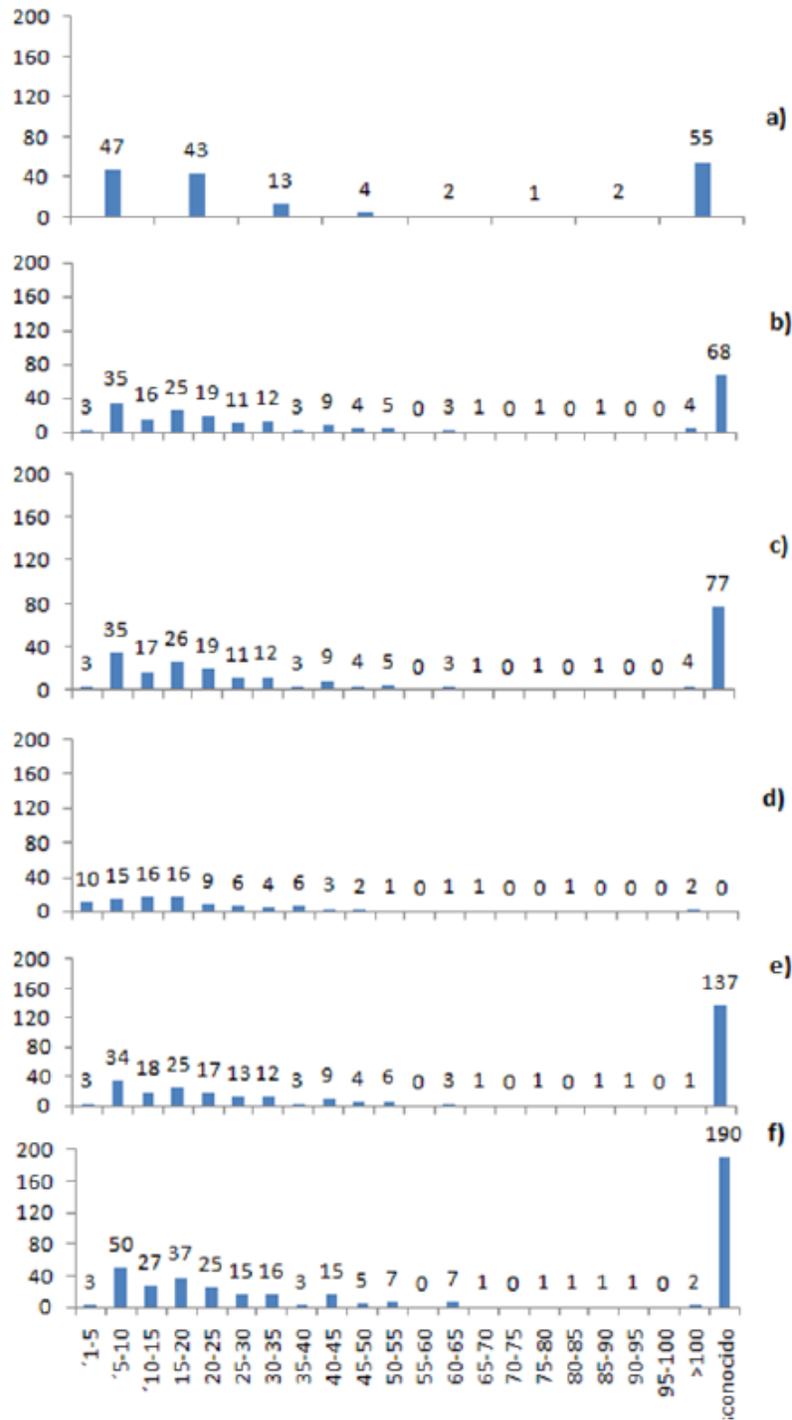
Figura 49 Evolución de las fallas de presas en el mundo



a) ICOLD/UNEP (2001); b) Davies (2001) c) WISE (2016) d) Tailing.info (2016); e) CSP2 (2016);
f) Shahid Azam (2010); g) Cruz (2017)

Fuente: Sonny, Cruz (2017)

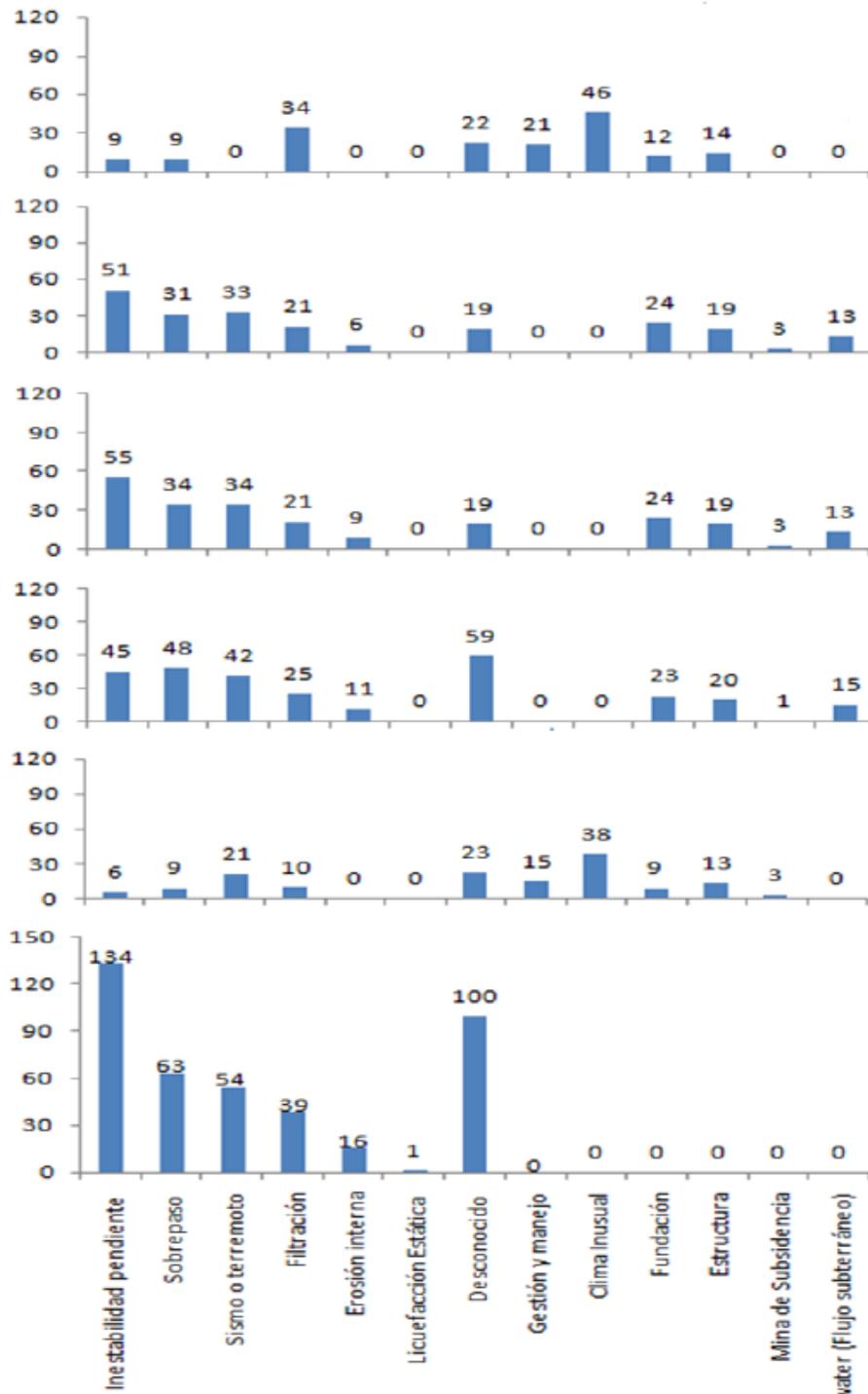
Figura 50 Número de fallos de acuerdo a la altura de Presas



a) Shahid Azam y Qiren Li (2010) b) ICOLD/UNEP (2001); b) Davies (2001) c) Tailing.info (2016); d) CSP2 (2016); e) Mayte Rico (2008); f) Cruz (2017)

Fuente: Sonny, Cruz (2017)

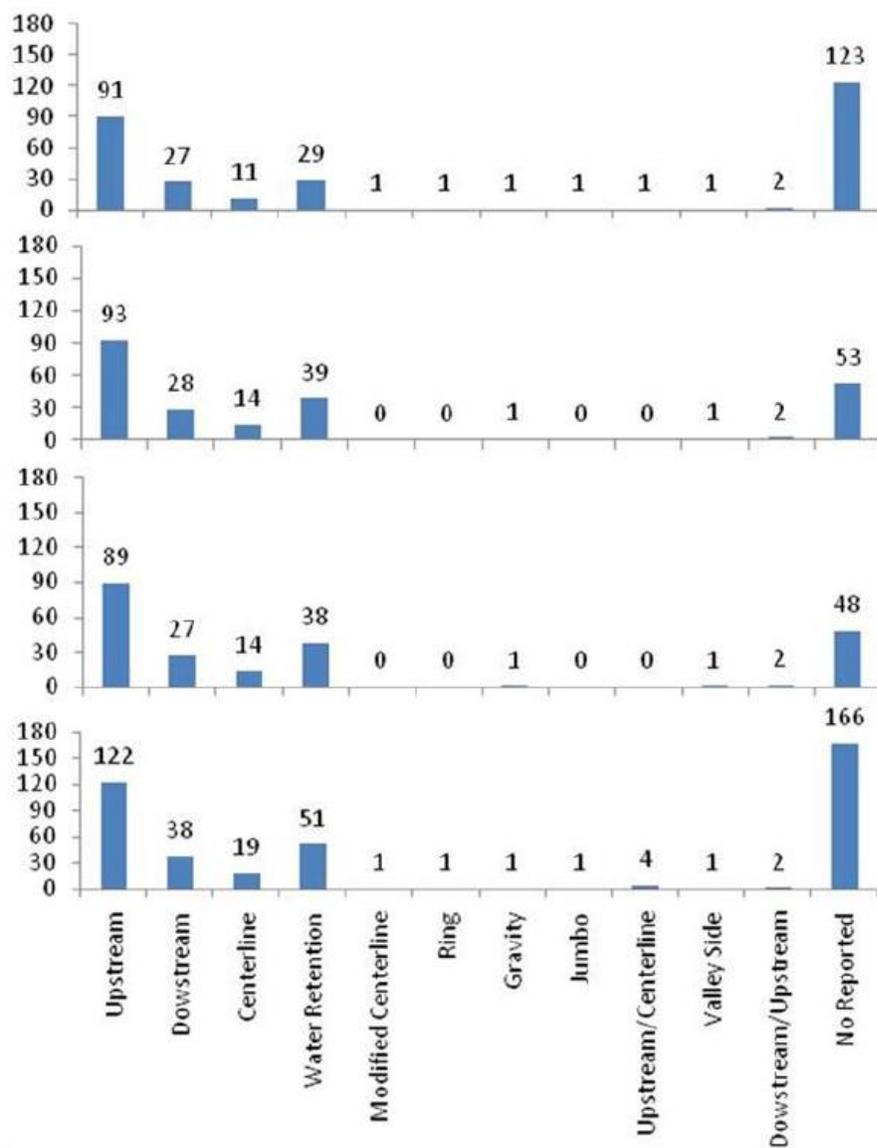
Figura 51 Mecanismos de Falla de las Presas de Relaves



a) Shahid Azam y Qiren Li (2010) b) ICOLD/UNEP (2001); b) Davies (2001) c) Tailing.info (2016); d) CSP2 (2016); e) Mayte Rico (2008); f) Cruz (2017)

Fuente: Sonny, Cruz (2017)

Figura 52 Distribución de Fallas de acuerdo al método constructivo

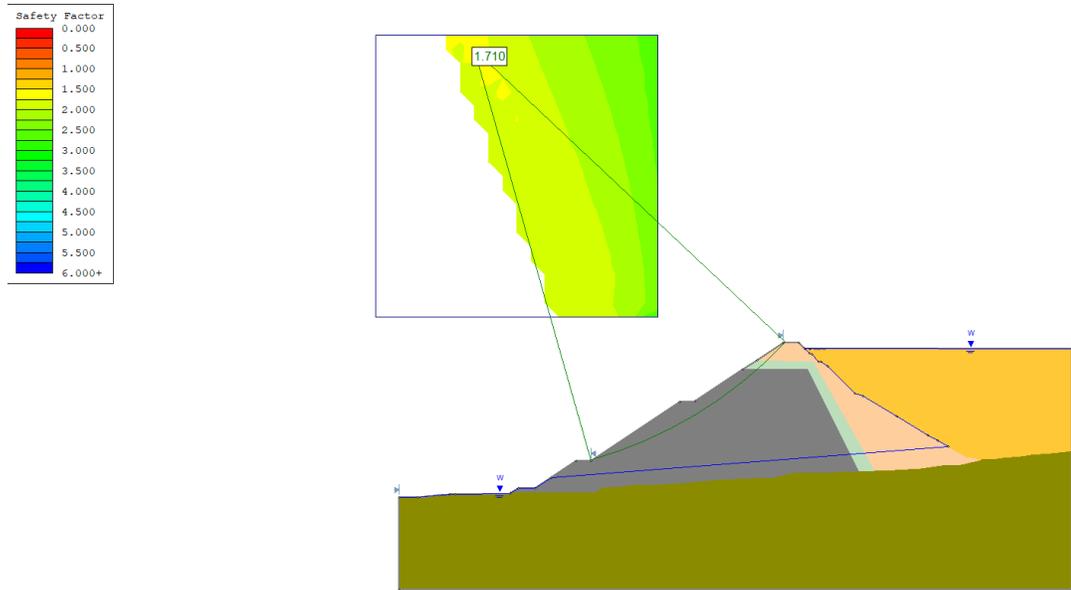


a) CSP2 (2016); b) Tailing.info (2006); c) ICOLD (2001); d) Cruz (2017)

Fuente: Sonny, Cruz (2017)

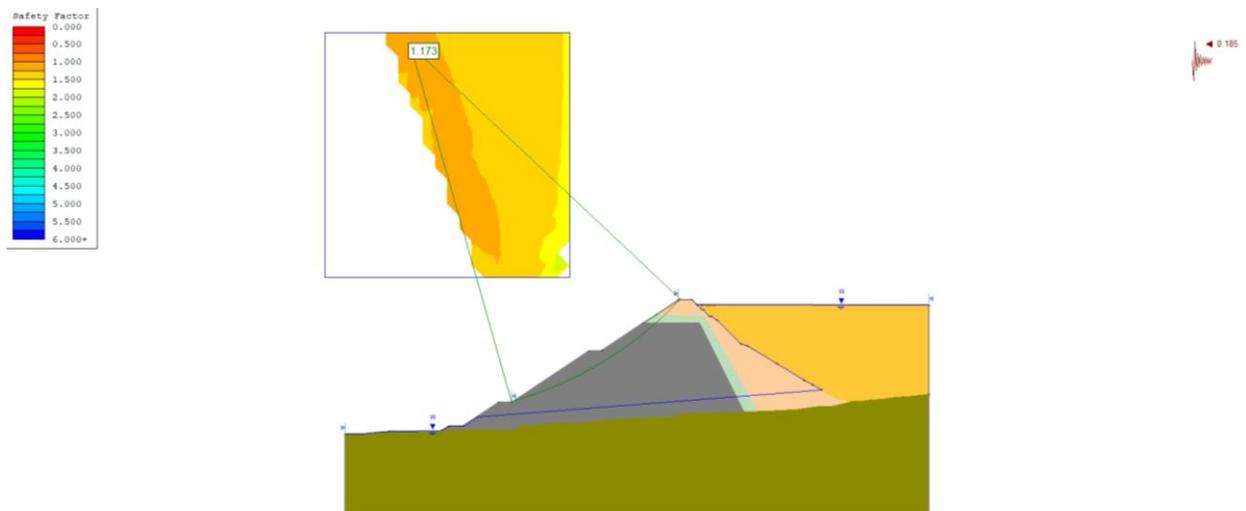
Anexo 3 Análisis de Infiltración

Figura 53 Análisis de estabilidad estático con infiltración con un nivel freático 5m sobre la base de fundación



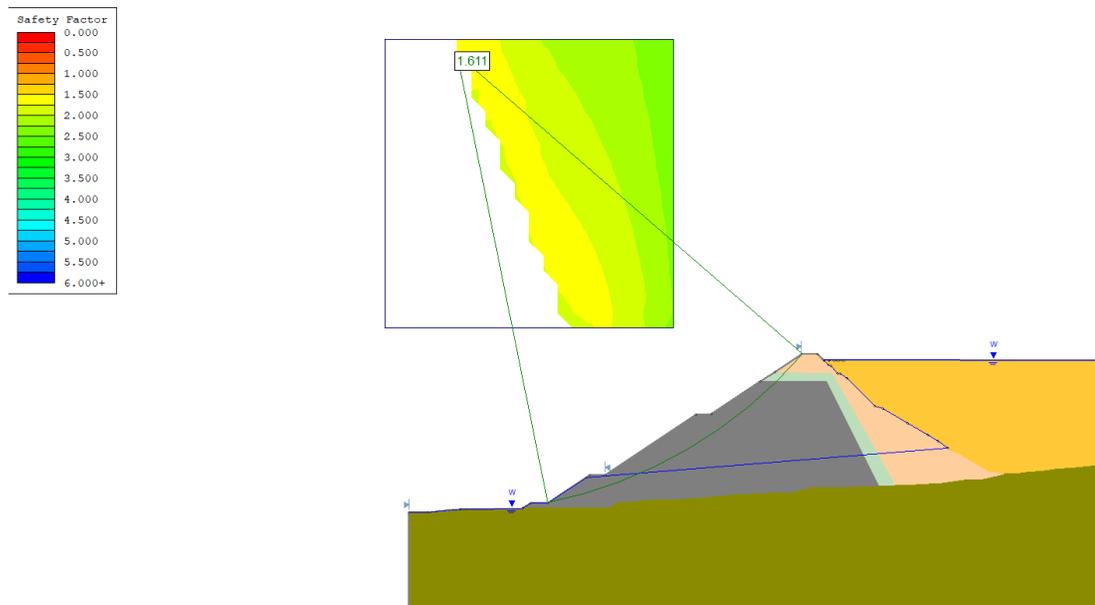
Fuente: Propia

Figura 54 Análisis de estabilidad Pseudo - estático con infiltración con un nivel freático 5m sobre la base de fundación



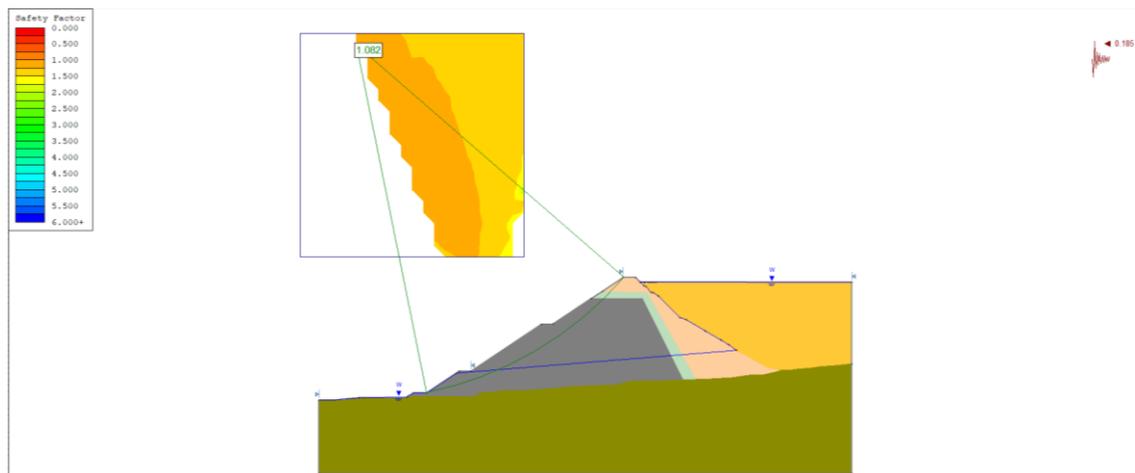
Fuente: Propia

Figura 55 Análisis de estabilidad estático con infiltración con un nivel freático de 10 m sobre la base de fundación



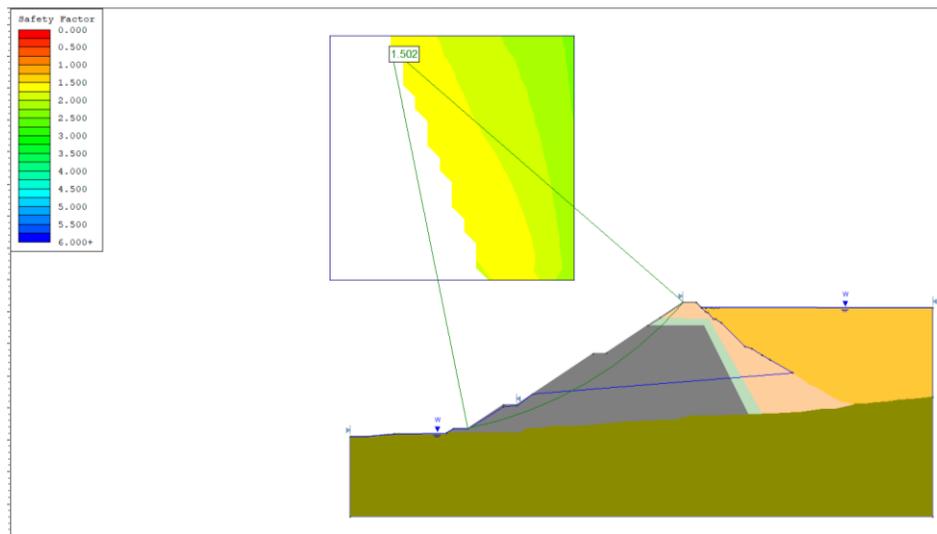
Fuente: Propia

Figura 56 Análisis de estabilidad Pseudo - estático con infiltración con un nivel freático de 10 m sobre la base de fundación.



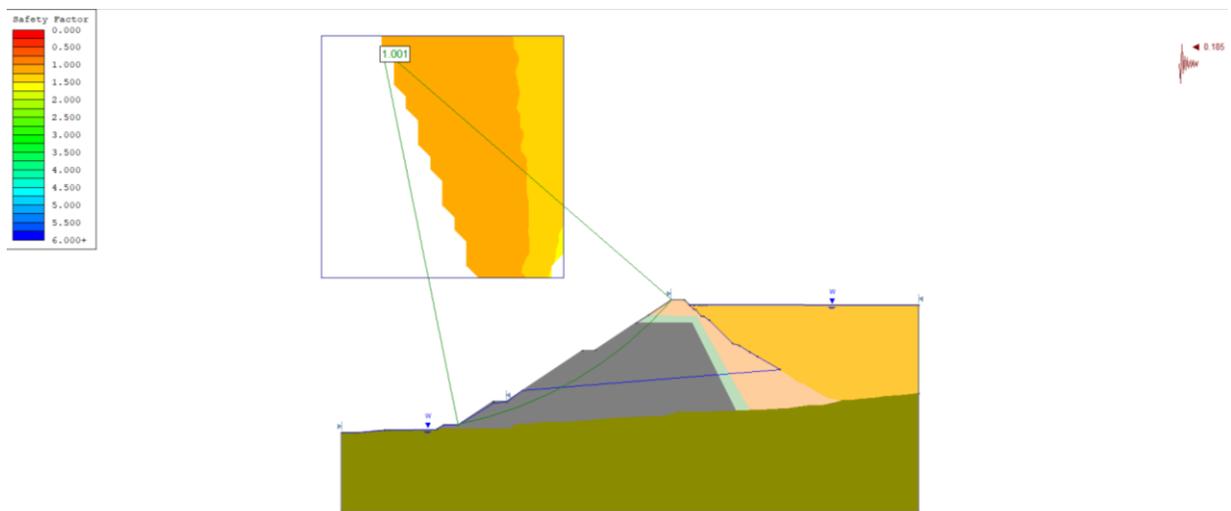
Fuente: Propia

Figura 57 Análisis de estabilidad estático con infiltración con un nivel freático de 15 m sobre la base de fundación



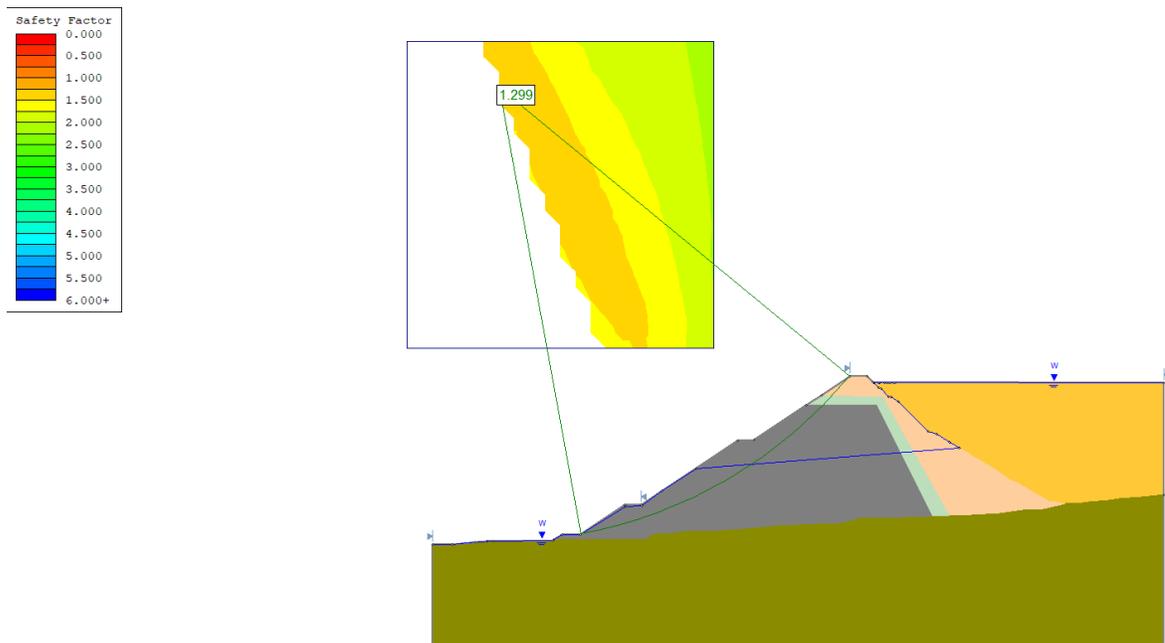
Fuente: Propia

Figura 58 Análisis de estabilidad Pseudo - estático con infiltración con un nivel freático de 15 m sobre la base de fundación



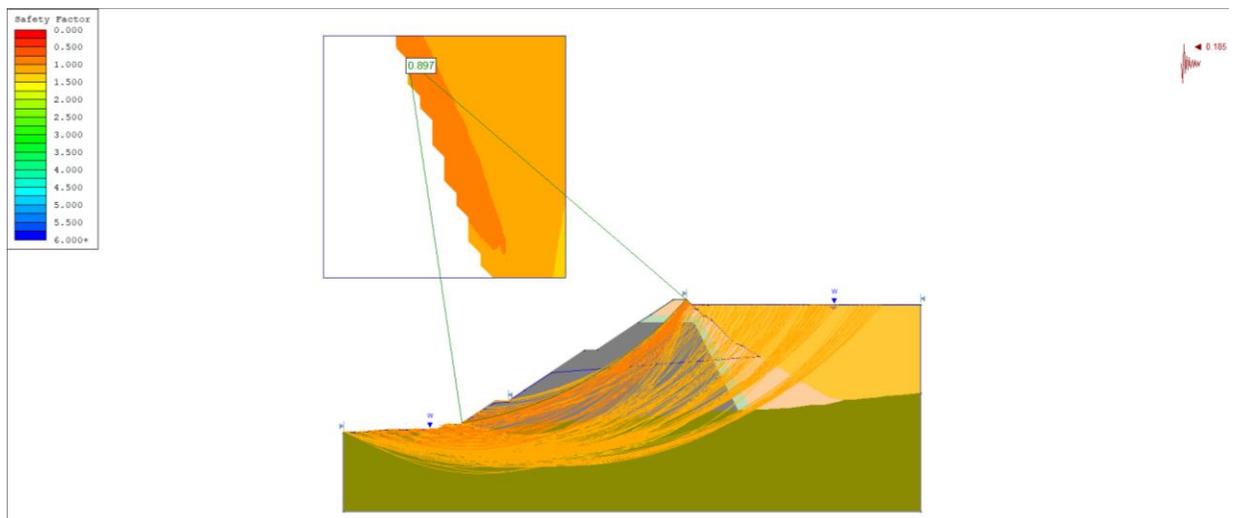
Fuente: Propia

Figura 59 Análisis de estabilidad estático con infiltración con un nivel freático de 20 m sobre la base de fundación



Fuente: Propia

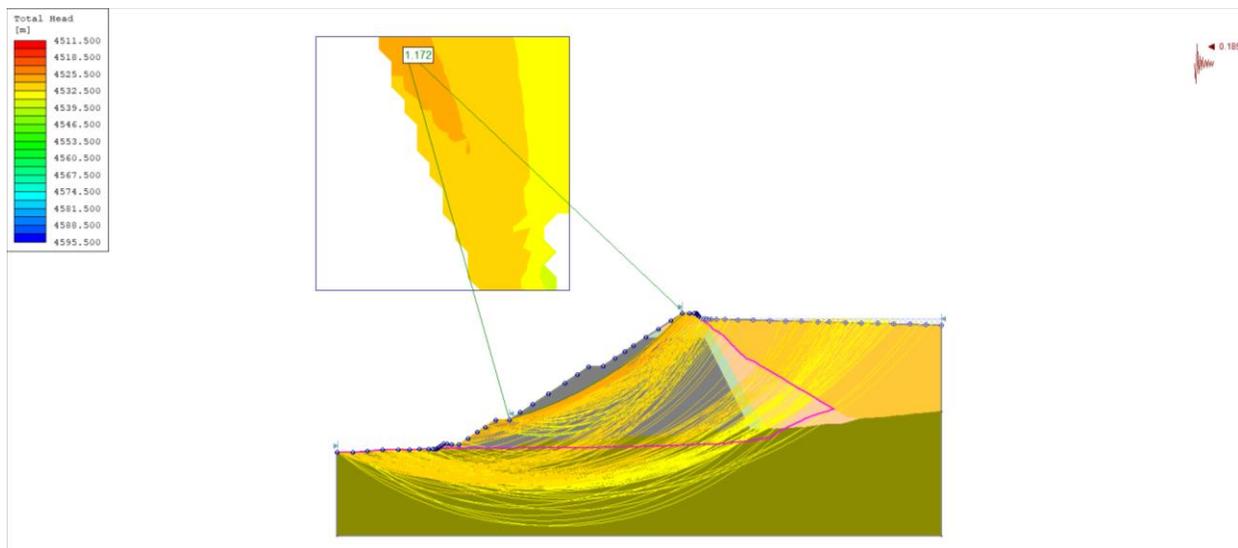
Figura 60 Análisis de estabilidad Pseudo - estático con infiltración con un nivel freático de 20 m sobre la base de fundación



Fuente: Propia

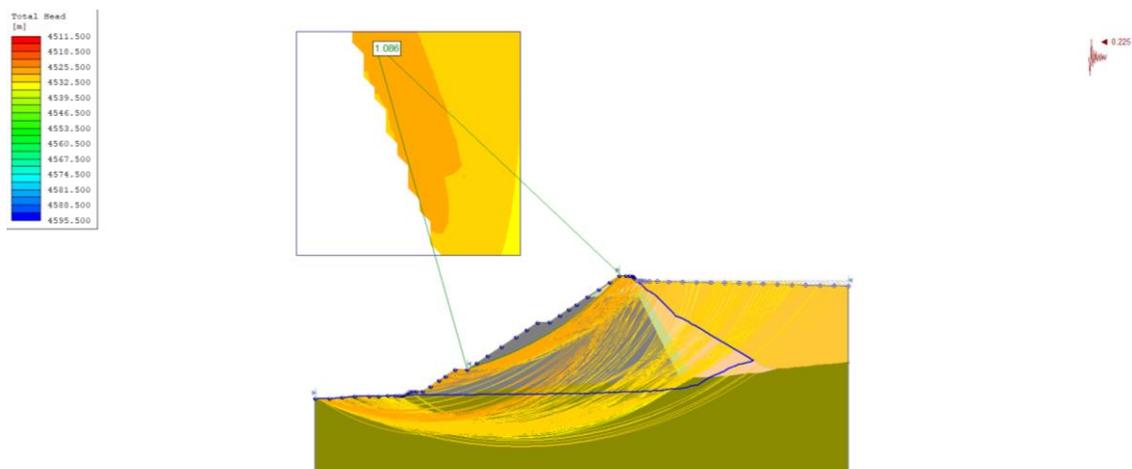
Anexo 4 Análisis Sísmico

Figura 61 Análisis Pseudo – estático con una aceleración de diseño para un Tr: 475 años



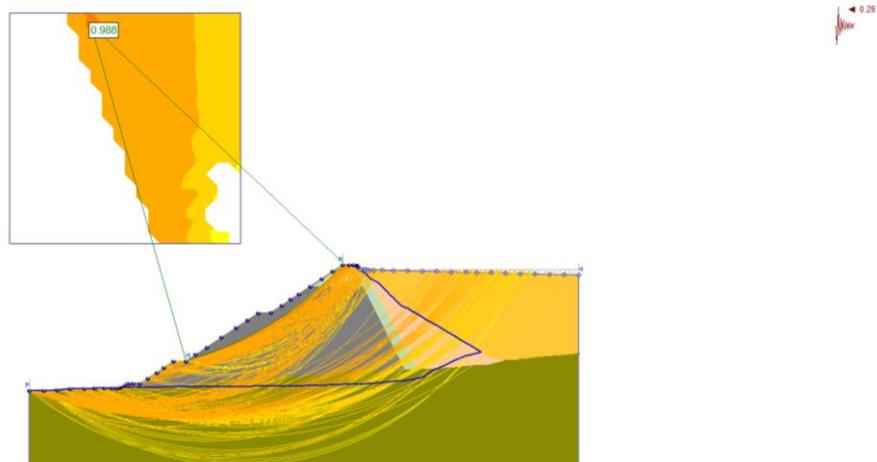
Fuente: Propia

Figura 62 Análisis Pseudo – estático con una aceleración de diseño para un Tr: 950 años



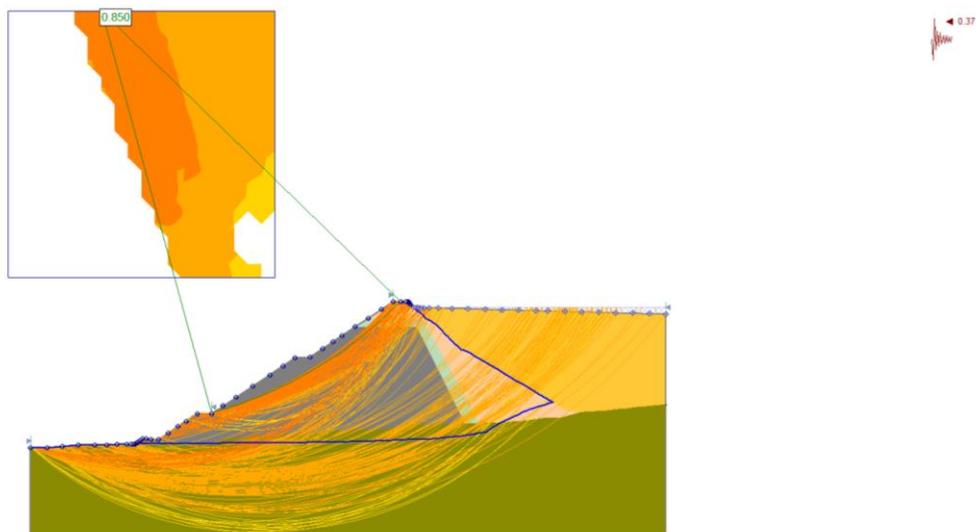
Fuente: Propia

Figura 63 Análisis Pseudo – estático con una aceleración de 0.28g



Fuente: Propia

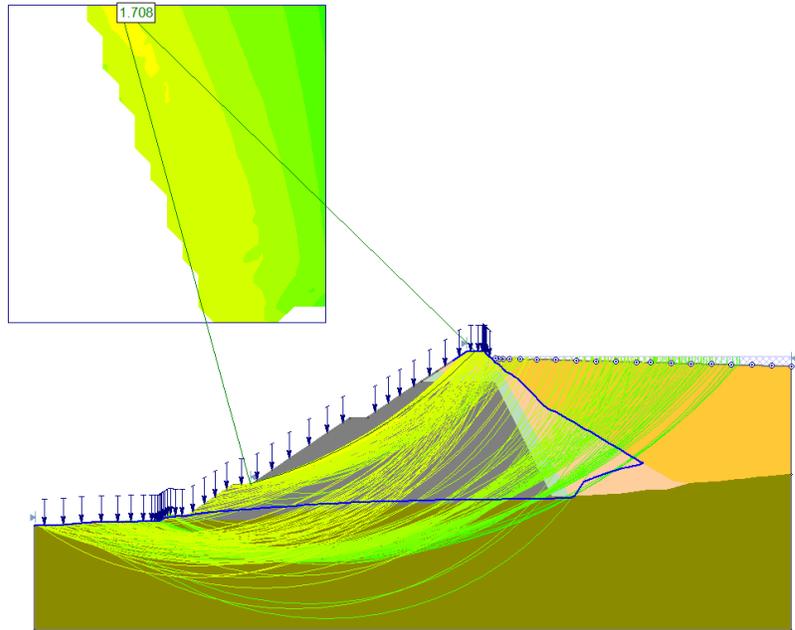
Figura 64 Análisis Pseudo – estático con una aceleración de 0.37g



Fuente: Propia

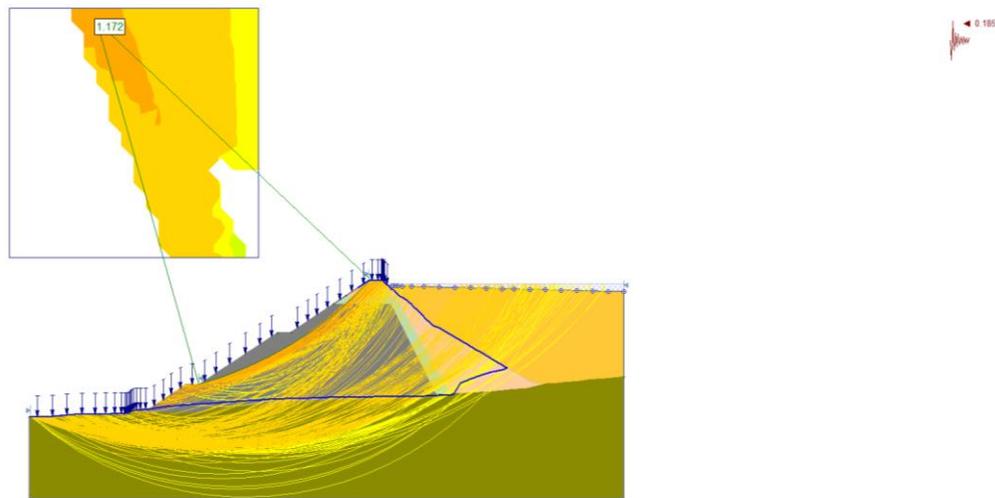
Anexo 5 Análisis de talud con Precipitaciones

Figura 65 Análisis de estabilidad de talud considerando una tormenta de diseño de 1000 años con Precipitaciones de 255 mm/día.



Fuente: Propia

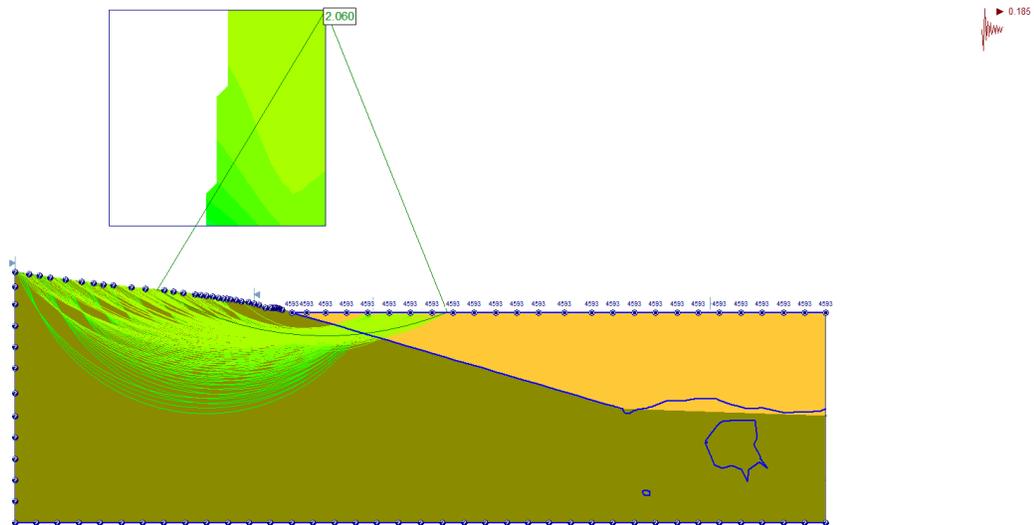
Figura 66 Análisis de estabilidad de talud Pseudo – estático considerando una tormenta de diseño de 1000 años con Precipitaciones de 115 mm/día.



Fuente: Propia

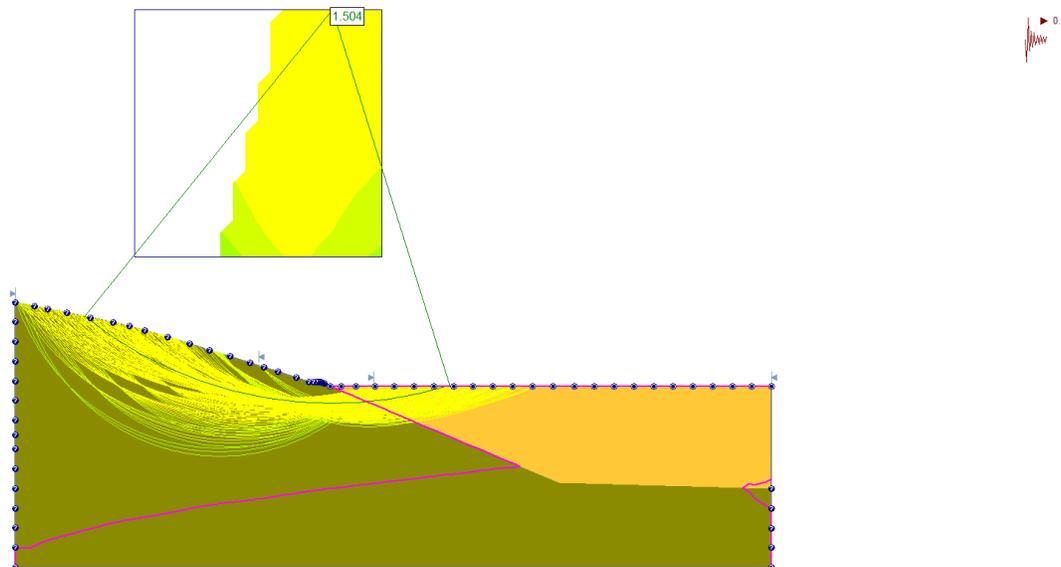
Anexo 6 Análisis de estabilidad de Talud en vaso de la Presa

Figura 67 Análisis Pseudo – estático en una pendiente de 15% del vaso



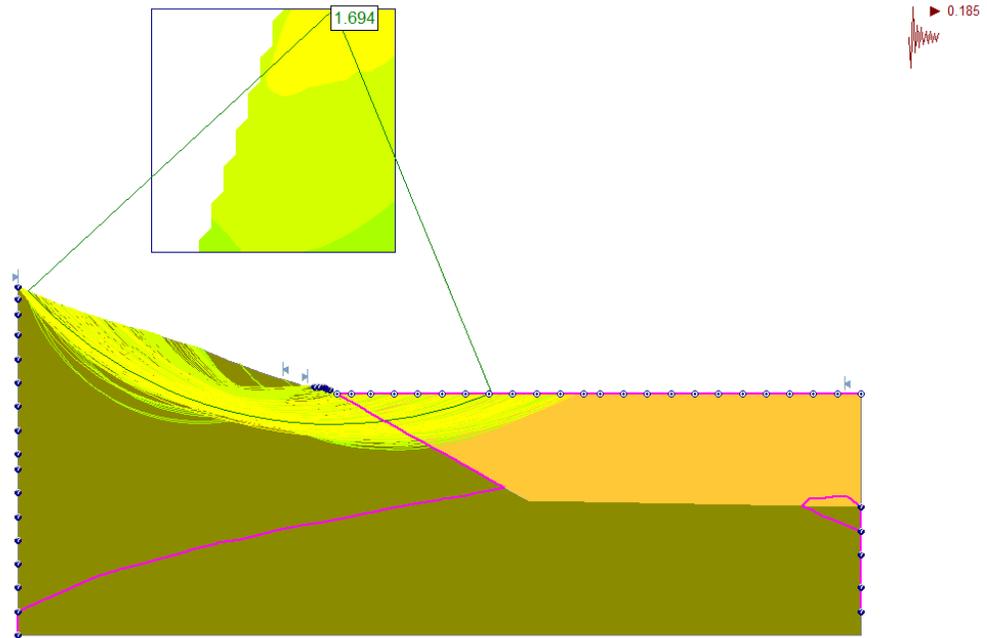
Fuente: Propia

Figura 68 Análisis Pseudo – estático en una pendiente de 25% del vaso



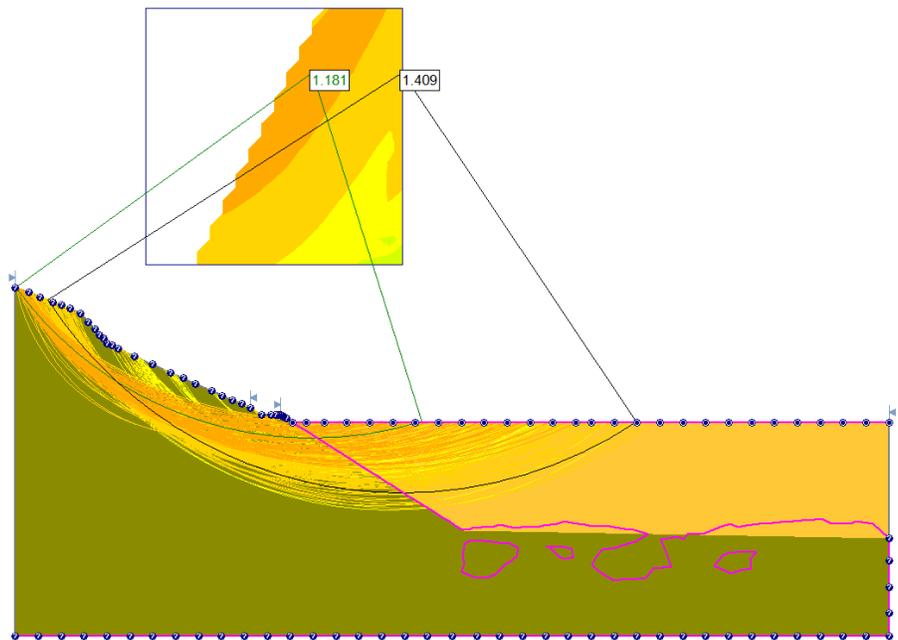
Fuente: Propia

Figura 69 Análisis Pseudo – estático en una pendiente de 37% del vaso



Fuente: Propia

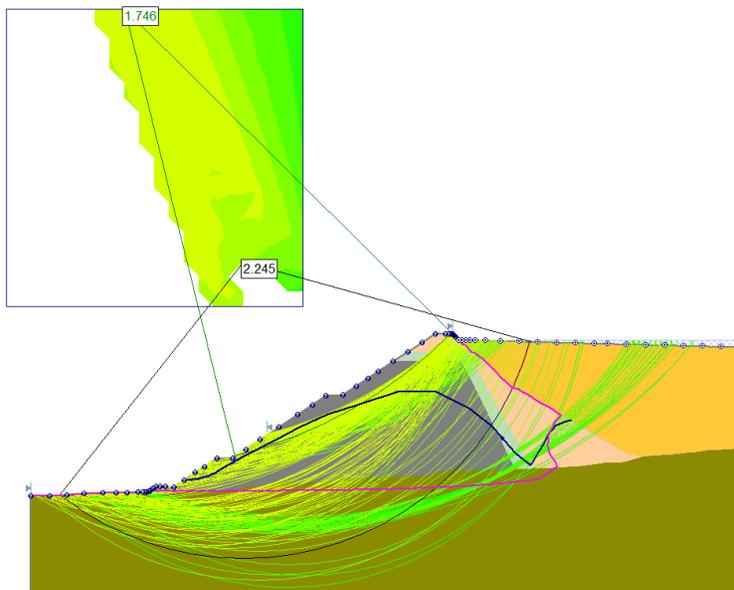
Figura 70 Análisis Pseudo – estático en una pendiente de 42% del vaso



Fuente: Propia

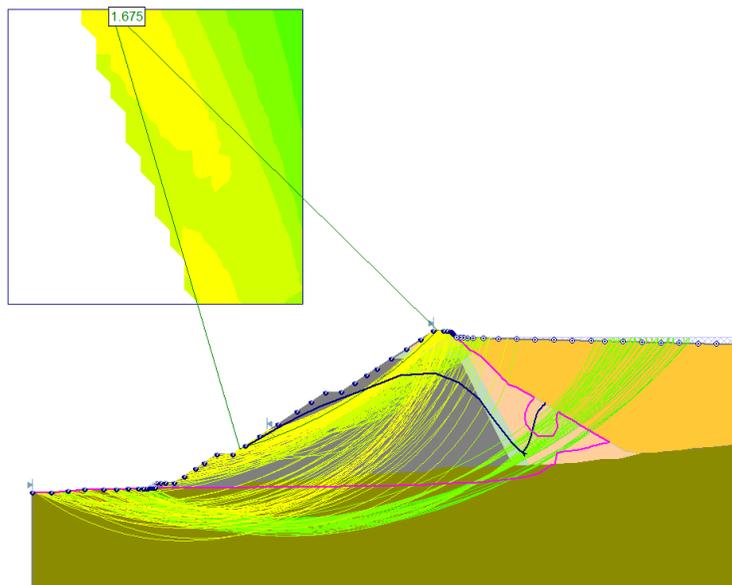
Anexo 7 Análisis de piping

Figura 71 Análisis Estático, Erosión interna a 15 m sobre la base de fundación



Fuente: Propia

Figura 72 Análisis Pseudo-estático, Erosión interna a 20 m sobre la base de fundación



Fuente: Propia

Anexo 8 Panel Fotográfico

Figura 73 Vista panorámica aguas abajo



Fuente: Ausenco (2019)

Figura 74 Vista panorámica aguas abajo



Fuente: Ausenco (2019)

Figura 75 Margen Izquierdo de Dique de Presa



Fuente: Ausenco (2019)

Figura 76 Margen Izquierdo de Dique de Presa



Fuente: Ausenco (2019)

Figura 77 Colocación de Geomembrana



Fuente: Ausenco (2019)

Figura 78 Colocación de Geomembrana



Fuente: Ausenco (2019)

Figura 79 Vista frontal del dique de la presa de Relaves



Fuente: Ausenco (2019)

Figura 80 Vista frontal del dique de la presa de Relaves



Fuente: Ausenco (2019)

Figura 81 Vista panorámica de la margen izquierda de la Presa de Relaves Pallancata, se observa además a la Cantera Ausenco-6.



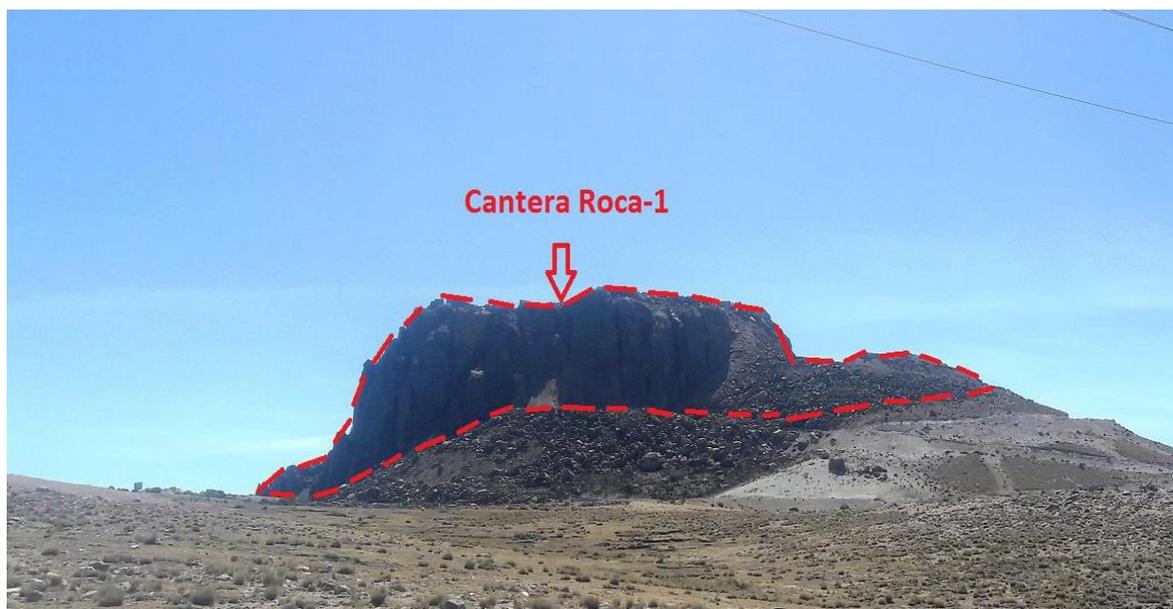
Fuente: Ausenco (2019)

Figura 82 Vista panorámica de la margen derecha de la Presa de Relaves Pallancata, se observa además a la Cantera de Suelo-Golder.



Fuente: Ausenco (2019)

Figura 83 Vista panorámica de la Cantera: “Roca-1“.



Fuente: Ausenco (2019)

Figura 84 Vista panorámica de la Cantera: “Ausenco-5“.



Fuente: Ausenco (2019)

