



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTRATEGIA PARA ESTABLECER INSTRUMENTACIÓN MÍNIMA PARA EL  
MONITOREO GEOTÉCNICO DE DEPÓSITOS DE RELAVES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

CARLOS IVÁN CATRIPÁN QUIJADA

PROFESOR GUÍA:  
ROBERTO GESCHE SCHÜLER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
CÉSAR PASTÉN PUCHI  
GULLIBERT NOVOA GODOY  
KARINA MONSALVE STANGE

SANTIAGO DE CHILE  
2024

# Resumen

La minería en Chile desempeña un papel crucial en la economía del país, siendo uno de los principales motores de su desarrollo y crecimiento. Sin embargo, esta actividad, conlleva consigo el desafío de gestionar de manera efectiva los desechos mineros, entre los que destacan los relaves. Estos subproductos de la actividad minera pueden representar riesgos significativos para la salud humana y el medio ambiente si no se gestionan adecuadamente. Ante este escenario, resulta esencial implementar un riguroso y adecuado monitoreo geotécnico de los depósitos de relaves, con el fin de detectar a tiempo posibles fallas o desviaciones en su comportamiento.

El objetivo de este trabajo de título es definir una estrategia para establecer instrumentación mínima de monitoreo geotécnico de depósitos de relaves de forma justificada y fundamentada, mejorando la calidad de la información y la toma de decisiones respecto a la construcción y operación segura de un depósito.

Para lograr lo anterior, se lleva a cabo una revisión de antecedentes de estudio sobre depósitos de relaves, la identificación de sus modos de falla de un depósito, una investigación histórica sobre incidentes de depósitos en Chile y el mundo, una comparación de normativas nacionales y extranjeras, y la elaboración de un catastro de instrumentación para el monitoreo geotécnico de depósitos según información compartida por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Estos antecedentes establecen las bases de referencia necesarias para plantear una estrategia de diseño de ingeniería de instrumentación y monitoreo.

El enfoque principal de esta estrategia es proponer una lógica para la elección de la instrumentación adecuada basado en un trabajo de ingeniería ordenado y sistemático, asegurando que esté fundamentada y no seleccionada arbitrariamente. Este marco se presenta como una herramienta útil no solo para ingenieros experimentados, sino también para aquellos menos experimentados, brindando orientación durante el diseño, implementación y operación de sistemas de monitoreo específicos para depósitos de relaves activos. El objetivo último de esta estrategia es lograr establecer una herramienta que ayude a tomar decisiones informadas conociendo la condición de estabilidad del depósito.

Los resultados de este trabajo incluyen; el catastro de fallas de depósitos en el mundo (actualizado hasta el 20 de octubre de 2023), el catastro de instrumentación geotécnica de depósitos en Chile (actualizado hasta el 30 de septiembre de 2023), catastro de normativa, y la estrategia para definir la instrumentación mínima de depósitos de relaves.

*Muchas Gracias*

# Agradecimientos

Quisiera comenzar expresando mi profundo agradecimiento a las personas que más han aportado en mi vida, mis padres. A mi madre, quien desde mi infancia me inculcó el hábito de estudiar, y a mi padre, por siempre estar ahí cuando lo necesitaba. A ambos les agradezco por enseñarme que la vida no es fácil, pero que siempre es posible salir adelante. A lo largo de mi vida, me brindaron las facilidades necesarias para concentrarme en mis estudios y así no tener otras preocupaciones.

Muchas gracias a mis amigos de la U, con quienes nos apañamos en todo este largo proceso. Vivimos muchas excelentes anécdotas que hicieron de esta etapa una de las mejores de mi vida y espero que me sigan acompañando y sigamos generando recuerdos bacanes.

También quiero expresar mi gratitud al profesor Roberto Gesche, cuya ayuda y disposición fueron fundamentales durante la realización de mi trabajo, además de ser de los excelentes profesores del área que me brindaron las herramientas para poder realizar un buen trabajo.

Gracias a Karina y Gullibert por su muy buena disposición para ayudarme en todo lo necesario para cumplir con mi trabajo. Su apoyo hizo que esta última etapa fuera mucho más grata.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo General . . . . .	2
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	3
1.3. Metodología . . . . .	3
<b>2. Marco teórico</b>	<b>5</b>
2.1. Relaves y depósitos de relaves . . . . .	5
2.2. Tipos de depósitos . . . . .	7
2.3. Métodos constructivos . . . . .	7
2.4. Catastro nacional de depósitos de relaves . . . . .	9
2.5. Clasificación de depósitos según tamaño . . . . .	10
<b>3. Antecedentes de estudio</b>	<b>12</b>
3.1. Incidentes en depósitos de relaves reportados a nivel mundial y nacional . . .	12
3.1.1. Incidentes a nivel mundial . . . . .	13
3.1.2. Incidentes a nivel nacional . . . . .	16
3.1.3. Revisión de bibliografía complementaria asociada a fallas de depósitos de relaves . . . . .	17
3.2. Antecedentes normativos en cuanto a diseño, operación y monitoreo en Chile y el mundo . . . . .	18
3.2.1. Australia . . . . .	22

3.2.2.	Brasil . . . . .	23
3.2.3.	Canadá . . . . .	24
3.2.4.	Chile . . . . .	24
3.2.5.	Estados Unidos . . . . .	26
3.2.6.	México . . . . .	26
3.2.7.	Perú . . . . .	27
3.3.	Buenas prácticas en Chile y el mundo respecto a instrumentación y monitoreo de depósitos de relave . . . . .	29
3.3.1.	Chile . . . . .	29
3.3.2.	Guías internacionales respecto a la instrumentación y monitoreo de depósitos de relave . . . . .	30
3.3.3.	Organización Internacional de Normalización . . . . .	32
3.3.4.	Estándar global de gestión de relaves para la industria minera (GISTM, por sus siglas en inglés) . . . . .	33
3.4.	Identificación de modos de falla de un depósito de relaves . . . . .	34
3.4.1.	Falla de fundación . . . . .	35
3.4.2.	Erosión interna . . . . .	38
3.4.3.	Rebalse (Overtopping) . . . . .	41
3.4.4.	Licuefacción Sísmica . . . . .	43
3.4.5.	Inestabilidad de taludes . . . . .	45
3.5.	Identificación de parámetros críticos . . . . .	47
3.6.	Identificación de eventos gatilladores . . . . .	50
<b>4.</b>	<b>Catastro de instrumentación de monitoreo de depósitos de relaves en Chile</b>	<b>53</b>
4.1.	Ficha de instrumentación geotécnica . . . . .	54
4.1.1.	Piezómetros . . . . .	54
4.1.2.	Hitos de control topográficos . . . . .	54
4.1.3.	Inclinómetros (o similar) . . . . .	55
4.1.4.	Acelerómetros . . . . .	55

4.1.5.	Meteorología . . . . .	55
4.1.6.	Drenes . . . . .	56
4.1.7.	Cota Laguna . . . . .	56
4.1.8.	Monitoreo no invasivo . . . . .	57
4.1.9.	Monitoreo semi invasivo . . . . .	57
4.1.10.	Plataforma . . . . .	58
4.2.	Clasificación de depósitos . . . . .	59
4.3.	Interpretación del catastro . . . . .	61
4.3.1.	Piezómetros . . . . .	62
4.3.2.	Hitos de control topográfico . . . . .	64
4.3.3.	Inclinómetros (o similar) . . . . .	64
4.3.4.	Acelerómetros . . . . .	66
4.3.5.	Monitoreo meteorológico . . . . .	66
4.3.6.	Drenes . . . . .	68
4.3.7.	Cota Laguna . . . . .	69
4.3.8.	Monitoreo no invasivo . . . . .	71
4.3.9.	Monitoreo semi invasivo . . . . .	73
4.3.10.	Plataforma de monitoreo . . . . .	75
<b>5.</b>	<b>Definición de estrategia para establecer instrumentación mínima para el monitoreo geotécnico de depósitos de relaves</b>	<b>77</b>
5.1.	Instrumentación y monitoreo . . . . .	78
5.2.	Planteamiento de la estrategia . . . . .	79
5.3.	Estrategia para definir un plan de instrumentación geotécnica adecuado para el monitoreo de depósitos de relaves . . . . .	80
5.3.1.	Declaración del propósito y objetivos . . . . .	81
5.3.2.	Requerimientos . . . . .	82
5.3.3.	Identificación de modos de falla de un DR . . . . .	83
5.3.4.	Identificación de parámetros críticos . . . . .	83

5.3.5. Identificación de eventos gatilladores . . . . .	83
5.3.6. Identificación de zonas y elementos críticos . . . . .	84
5.3.7. Valores de control y/o umbrales . . . . .	85
5.3.8. Diseño preliminar del sistema . . . . .	86
5.3.9. Diseño detallado de los subsistemas . . . . .	87
<b>6. Análisis y discusiones</b>	<b>89</b>
<b>7. Conclusiones</b>	<b>92</b>
<b>8. Recomendaciones</b>	<b>95</b>
<b>9. Bibliografía</b>	<b>96</b>
<b>A. Depósitos convencionales</b>	<b>100</b>
A.1. Piezómetros . . . . .	100
A.2. Hitos de control . . . . .	103
A.3. Inclínómetros . . . . .	104
A.4. Acelerómetros . . . . .	106
A.5. Metereología . . . . .	107
A.6. Drenes . . . . .	109
A.7. Cota Laguna . . . . .	112
A.8. Monitoreo no invasivo . . . . .	114
A.9. Monitoreo semi invasivo . . . . .	116
A.10. Plataforma . . . . .	118
<b>B. Depósitos no convencionales</b>	<b>120</b>
B.1. Piezómetros . . . . .	120
B.2. Hitos de control . . . . .	122
B.3. Inclínómetros . . . . .	123
B.4. Acelerómetros . . . . .	125



B.5. Metereología . . . . .	126
B.6. Drenes . . . . .	128
B.7. Cota Laguna . . . . .	129
B.8. Monitoreo no invasivo . . . . .	131
B.9. Monitoreo semi invasivo . . . . .	133
B.10. Plataforma . . . . .	135

# Índice de Tablas

3.1. Comparación de normativa internacional de depósitos de relaves (Australia, Brasil, Canadá y Chile). (PGS Chile, 2018) . . . . .	20
3.2. Comparación de normativa internacional de depósitos de relaves (Estados Unidos, México y Perú). (PGS Chile, 2018) . . . . .	21
3.3. Principales guías de buenas prácticas. (Modificado de Clarkson 2021). . . . .	31
3.4. Parámetros críticos y de apoyo para cada modo de falla. (Modificado de Clarkson, 2021) . . . . .	50
3.5. Eventos gatilladores que alteran los parámetros críticos (Naturales (N), Problemas de Diseño (D) u Operación (O) del depósito). (Modificado de Clarkson 2021 y Carvajal 2018) . . . . .	52
4.1. Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Piezómetros”. . . . .	54
4.2. Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Hitos de control”. . . . .	54
4.3. Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Inclinómetros (o similar)”. . . . .	55
4.4. Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Acelerómetros”. . . . .	55
4.5. Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Meteorología”. . . . .	56
4.6. Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Drenes”. . . . .	56
4.7. Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Cota Laguna”. . . . .	56
4.8. Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Monitoreo no invasivo”. . . . .	57
4.9. Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Monitoreo semi invasivo”. . . . .	57
4.10. Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Plataforma”. . . . .	58
4.11. Depósitos que conforman el catastro de instrumentación. . . . .	61

# Índice de Ilustraciones

2.1. Esquema básico en planta de un depósito de relaves. (ATG Ltda., 2021) . . .	6
2.2. Esquema básico en perfil de un depósito de relaves. (ATG Ltda., 2021) . . .	6
2.3. Métodos constructivos: a) Método aguas arriba, b) Método eje central, c) Método aguas abajo. (Mine Safety and Health Administration MSHA, 2010)	8
2.4. Distribución de depósitos de relave por región. (Elaboración propia, según información de Sernageomin) . . . . .	9
2.5. Cantidad de depósitos según su estado. Fuente: Elaboración propia, según información de Sernageomin. . . . .	10
2.6. Cantidad de depósitos según el tipo. (Elaboración propia, según información de Sernageomin) . . . . .	10
2.7. Depósitos convencionales y no convencionales, activos, inactivos y abandonados de Chile por Categoría. . . . .	11
3.1. Fallas por país (Modificado de TSF Failures 1915-31Jan23, ICOLD 2001, Villavicencio 2014 y WISE 2023) . . . . .	14
3.2. Causa de falla para cada incidente. (Modificado de TSF Failures 1915-31Jan23, ICOLD 2001, Villavicencio 2014 y WISE 2023) . . . . .	15
3.3. Incidentes a nivel nacional. (Modificado de TSF Failures 1915-31Jan23, ICOLD 2001, Villavicencio 2014 y WISE 2023) . . . . .	17
3.4. Caso 1 de ruptura a los pies del muro. (Modificado de Clarkson, 2021). . . .	37
3.5. Caso 2 de ruptura a los pies del muro. (Modificado de Clarkson, 2021). . . .	37
3.6. Influencia de la permeabilidad de la fundación sobre el nivel freático a través del muro (Modificado de Clarkson, 2021). . . . .	37
4.1. Clasificación de los depósitos según Estado, Tipo de instalación, Región y Categoría. . . . .	60

4.2. Partes del diagrama de caja y bigotes. . . . .	61
4.3. Cantidad de piezómetros por Categoría para depósitos convencionales y no convencionales. . . . .	62
4.4. Frecuencia de monitoreo de piezómetros por Categoría para depósitos convencionales. . . . .	63
4.5. Frecuencia de monitoreo de piezómetros por Categoría para depósitos no convencionales. . . . .	63
4.6. Cantidad de Hitos de control por por Categoría para depósitos convencionales y no convencionales. . . . .	64
4.7. Cantidad de Inclínómetros por Categoría para depósitos convencionales y no convencionales. . . . .	64
4.8. Frecuencia de monitoreo de inclinómetros por Categoría para depósitos convencionales. . . . .	65
4.9. Frecuencia de monitoreo de inclinómetros por Categoría para depósitos no convencionales. . . . .	65
4.10. Cantidad de Acelerómetros por Categoría para depósitos convencionales y no convencionales. . . . .	66
4.11. Cantidad de sensores para el monitoreo meteorológico por Categoría para depósitos convencionales y no convencionales. . . . .	66
4.12. Frecuencia de monitoreo de sensores para el monitoreo meteorológico por Categoría para depósitos convencionales. . . . .	67
4.13. Frecuencia de monitoreo de sensores para el monitoreo meteorológico por Categoría para depósitos no convencionales. . . . .	67
4.14. Cantidad de instrumentos para el monitoreo de drenes por Categoría para depósitos convencionales y no convencionales. . . . .	68
4.15. Frecuencia de monitoreo de instrumentos para el monitoreo de drenes por Categoría para depósitos convencionales. . . . .	69
4.16. Frecuencia de monitoreo de instrumentos para el monitoreo de drenes por Categoría para depósitos no convencionales. . . . .	69
4.17. Cantidad de instrumentos para el monitoreo de la cota de la laguna por Categoría para depósitos convencionales y no convencionales. . . . .	70
4.18. Frecuencia de monitoreo de instrumentos para el monitoreo de la cota de la laguna por Categoría para depósitos convencionales. . . . .	70
4.19. Frecuencia de monitoreo de instrumentos para el monitoreo de la cota de la laguna por Categoría para depósitos no convencionales. . . . .	71

4.20. Cantidad de instrumentos de monitoreo no invasivo por Categoría para depósitos convencionales y no convencionales. . . . .	71
4.21. Frecuencia monitoreo no invasivo por Categoría para depósitos convencionales. . . . .	72
4.22. Frecuencia monitoreo no invasivo por Categoría para depósitos no convencionales. . . . .	72
4.23. Cantidad de instrumentos de monitoreo semi invasivo por Categoría para depósitos convencionales y no convencionales. . . . .	73
4.24. Frecuencia de monitoreo semi invasivo por Categoría para depósitos convencionales. . . . .	74
4.25. Frecuencia de monitoreo semi invasivo por Categoría para depósitos no convencionales. . . . .	75
4.26. Depósitos que poseen Plataforma de monitoreo integrada por Categoría. . . . .	76
5.1. Aplicación del diagrama V para sistemas de monitoreo. (Fuentes, 2010) . . . . .	80
5.2. Diagrama semi-V aplicado al sistema de monitoreo de depósitos de relaves activos. (Modificado de Fuentes 2010) . . . . .	81
A.1. Cantidad de piezómetros por Categoría para depósitos convencionales. . . . .	100
A.2. Características Piezómetros Categoría A (Depósitos convencionales). . . . .	101
A.3. Características Piezómetros Categoría B (Depósitos convencionales). . . . .	101
A.4. Características Piezómetros Categoría C (Depósitos convencionales). . . . .	102
A.5. Características Piezómetros Categoría D (Depósitos convencionales). . . . .	102
A.6. Cantidad de hitos de control por Categoría para depósitos convencionales. . . . .	103
A.7. Total de Hitos por Categoría y Tipo de instalación (Depósitos convencionales). . . . .	103
A.8. Cantidad de inclinómetros por Categoría para depósitos convencionales. . . . .	104
A.9. Total de Inclinómetros Categoría B (Depósitos convencionales). . . . .	104
A.10. Total de Inclinómetros Categoría C (Depósitos convencionales). . . . .	105
A.11. Total de Inclinómetros Categoría D (Depósitos convencionales). . . . .	106
A.12. Cantidad de acelerómetros por Categoría para depósitos convencionales. . . . .	106
A.13. Total de Acelerómetros por Categoría y Tipo de instalación (Depósitos convencionales). . . . .	107

A.14.Cantidad de sensores para el monitoreo meteorológico por Categoría para depósitos convencionales. . . . .	107
A.15.Instrumentación de Metereología Categoría B (Depósitos convencionales). . .	108
A.16.Instrumentación de Metereología Categoría C (Depósitos convencionales). . .	108
A.17.Instrumentación de Metereología Categoría D (Depósitos convencionales). . .	109
A.18.Cantidad de instrumentos para el monitoreo de drenes por Categoría para depósitos convencionales. . . . .	109
A.19.Instrumentación de Drenes Categoría A (Depósitos convencionales). . . . .	110
A.20.Instrumentación de Drenes Categoría B (Depósitos convencionales). . . . .	110
A.21.Instrumentación de Drenes Categoría C (Depósitos convencionales). . . . .	111
A.22.Instrumentación de Drenes Categoría D (Depósitos convencionales). . . . .	111
A.23.Cantidad de instrumentos para el monitoreo de la cota de la laguna por Categoría para depósitos convencionales. . . . .	112
A.24.Instrumentación de Cota Laguna Categoría B (Depósitos convencionales). . .	112
A.25.Instrumentación de Cota Laguna Categoría C (Depósitos convencionales). . .	113
A.26.Instrumentación de Cota Laguna Categoría D (Depósitos convencionales). . .	113
A.27.Cantidad de instrumentos no invasivos por Categoría para depósitos convencionales. . . . .	114
A.28.Instrumentación de Monitoreo no invasivo Categoría A (Depósitos convencionales). . . . .	114
A.29.Instrumentación de Monitoreo no invasivo Categoría B (Depósitos convencionales). . . . .	115
A.30.Instrumentación de Monitoreo no invasivo Categoría C (Depósitos convencionales). . . . .	115
A.31.Instrumentación de Monitoreo no invasivo Categoría D (Depósitos convencionales). . . . .	116
A.32.Cantidad de instrumentos de monitoreo semi invasivo por Categoría para depósitos convencionales. . . . .	116
A.33.Instrumentación de Monitoreo semi invasivo Categoría B (Depósitos convencionales). . . . .	117
A.34.Instrumentación de Monitoreo semi invasivo Categoría C (Depósitos convencionales). . . . .	117

A.35.Instrumentación de Monitoreo semi invasivo Categoría D (Depósitos convencionales). . . . .	118
A.36.Instrumentación de Plataforma Categoría C (Depósitos convencionales). . . . .	118
A.37.Instrumentación de Plataforma Categoría D (Depósitos convencionales). . . . .	119
B.1. Cantidad de piezómetros por Categoría para depósitos no convencionales. . . . .	120
B.2. Características Piezómetros Categoría A (Depósitos no convencionales). . . . .	121
B.3. Características Piezómetros Categoría B (Depósitos no convencionales). . . . .	121
B.4. Características Piezómetros Categoría C (Depósitos no convencionales). . . . .	122
B.5. Cantidad de hitos de control por Categoría para depósitos no convencionales. . . . .	122
B.6. Total de Hitos por Categoría y Tipo de instalación (Depósitos no convencionales). . . . .	123
B.7. Cantidad de inclinómetros por Categoría para depósitos no convencionales. . . . .	123
B.8. Total de Inclinómetros Categoría B (Depósitos no convencionales). . . . .	124
B.9. Total de Inclinómetros Categoría C (Depósitos no convencionales). . . . .	125
B.10.Cantidad de acelerómetros por Categoría para depósitos no convencionales. . . . .	125
B.11.Total de Acelerómetros por Categoría y Tipo de instalación (Depósitos no convencionales). . . . .	126
B.12.Cantidad de sensores para el monitoreo meteorológico por Categoría para depósitos no convencionales. . . . .	126
B.13.Instrumentación de Metereología Categoría B (Depósitos no convencionales). . . . .	127
B.14.Instrumentación de Metereología Categoría C (Depósitos no convencionales). . . . .	127
B.15.Cantidad de instrumentos para el monitoreo de drenes por Categoría para depósitos no convencionales. . . . .	128
B.16.Instrumentación de Drenes Categoría B (Depósitos no convencionales). . . . .	128
B.17.Instrumentación de Drenes Categoría C (Depósitos no convencionales). . . . .	129
B.18.Cantidad de instrumentos para el monitoreo de la cota de la laguna por Categoría para depósitos no convencionales. . . . .	129
B.19.Instrumentación de Cota Laguna Categoría B (Depósitos no convencionales). . . . .	130
B.20.Instrumentación de Cota Laguna Categoría C (Depósitos no convencionales). . . . .	130
B.21.Cantidad de instrumentos de monitoreo no invasivo por Categoría para depósitos no convencionales. . . . .	131

B.22. Instrumentación de Monitoreo no invasivo Categoría A (Depósitos no convencionales). . . . .	131
B.23. Instrumentación de Monitoreo no invasivo Categoría B (Depósitos no convencionales). . . . .	132
B.24. Instrumentación de Monitoreo no invasivo Categoría C (Depósitos no convencionales). . . . .	132
B.25. Cantidad de instrumentos de monitoreo semi invasivo por Categoría para depósitos no convencionales. . . . .	133
B.26. Instrumentación de Monitoreo semi invasivo Categoría A (Depósitos no convencionales). . . . .	133
B.27. Instrumentación de Monitoreo semi invasivo Categoría B (Depósitos no convencionales). . . . .	134
B.28. Instrumentación de Monitoreo semi invasivo Categoría C (Depósitos no convencionales). . . . .	134
B.29. Instrumentación de Plataforma Categoría B (Depósitos no convencionales). .	135
B.30. Instrumentación de Plataforma Categoría C (Depósitos no convencionales). .	135



# Capítulo 1

## Introducción

En Chile, la minería es una de las principales actividades económicas, y el país es uno de los mayores productores de cobre en el mundo. La producción de este u otros metales implica la generación de grandes cantidades de relaves, que se depositan en instalaciones de almacenamiento de relaves (TSF), estructuras terrestres diseñadas para aislar los relaves depositados del ecosistema circundante. Debido a los riesgos asociados con estas estructuras, es esencial contar con un monitoreo geotécnico adecuado para detectar posibles fallas o inestabilidades que podrían poner en peligro la seguridad de las personas y el medio ambiente.

En los últimos años, han ocurrido varios accidentes relacionados con la falla de presas o depósitos de relaves en distintos países, lo que ha generado una mayor conciencia sobre la importancia de contar con un monitoreo geotécnico adecuado. En Chile, la autoridad encargada de supervisar la seguridad de los depósitos de relaves es el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), el cual ha establecido una serie de normas y requisitos para el diseño, construcción y operación de estructuras.

Sin embargo, es importante destacar que contar con una buena normativa no es suficiente, ya que es necesario que esta se aplique de manera efectiva y se realice un monitoreo constante y riguroso para velar por la estabilidad y seguridad de los depósitos de relaves. Sumado a lo anterior, existen apartados que la normativa no alcanza a cubrir, como la justificación de la instrumentación y monitoreo realizado por un depósito de relaves. Por esta razón, el objetivo de este trabajo de título es desarrollar una estrategia para definir o establecer instrumentación mínima para el monitoreo geotécnico de depósitos de relaves en Chile, con el fin de mejorar la calidad y confiabilidad de la información obtenida, y así tomar decisiones más informadas en materia de seguridad y operación de estas estructuras.

Un programa efectivo de instrumentación y monitoreo (I&M) es crucial para que los propietarios de las represas gestionen los riesgos asociados con la operación y mantenimiento de estas estructuras. El uso de instrumentación proporciona información más completa y oportuna, mejorando así la capacidad del propietario para monitorear de manera segura y continua el rendimiento de la represa (USSD, 2008).

El propósito de la instrumentación y el monitoreo es salvaguardar y mejorar la seguridad

de la represa proporcionando información que permita: 1) evaluar el rendimiento en comparación con las expectativas y 2) alertar sobre perturbaciones que puedan comprometer la seguridad de la represa. La planificación y ejecución meticulosas de la instrumentación y el monitoreo son esenciales para lograr los objetivos establecidos. Cada instrumento instalado en una represa debe tener un propósito específico, contribuyendo así a un sistema integral que garantice la funcionalidad segura y continua de la estructura (FERC, 2003).

En este contexto, se propone una estrategia específica para establecer una instrumentación mínima adecuada que garantice la efectividad del monitoreo y, por lo tanto, contribuya a la reducción de incertidumbres y riesgos.

Además, se introduce una herramienta muy útil para la aplicación de la estrategia, un detallado catastro de instrumentación de monitoreo geotécnico de depósitos de relaves en Chile en la actualidad, el cual se encuentra en los anexos al final del documento. Este catastro se elabora con la ayuda de información compartida por SERNAGEOMIN y la utilización del programa Power BI para asegurar una presentación de datos óptima, clara y más atractiva.

## **1.1. Motivación**

El análisis retrospectivo realizado por varios autores sobre las fallas estructurales en las instalaciones de almacenamiento de relaves (TSF, por sus siglas en inglés) revela patrones preocupantes y subraya la importancia de un monitoreo efectivo en la detección oportuna de estos eventos catastróficos. Estos estudios han demostrado de manera consistente que muchas de las fallas podrían haberse mitigado significativamente, o incluso evitado, con la implementación adecuada de sistemas de instrumentación y monitoreo.

Dado lo anterior es que la motivación principal de este trabajo es proponer una lógica para la elección de la instrumentación adecuada basado en un trabajo de ingeniería ordenado y sistemático, asegurando que esté fundamentada y no seleccionada arbitrariamente. Este marco se presenta como una herramienta útil no solo para ingenieros experimentados, sino también para aquellos menos experimentados, brindando orientación durante el diseño, implementación y operación de sistemas de monitoreo específicos para depósitos de relaves activos.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

El objetivo principal corresponde a la definición de una estrategia que permita establecer la instrumentación mínima necesaria para el monitoreo geotécnico de depósitos de relaves, proporcionando lineamientos claros y fundamentados que guíen la implementación de una instrumentación adecuada y efectiva, contribuyendo a la estabilidad y seguridad de los depósitos de relaves.

## 1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar una revisión histórica de incidentes de depósitos de relaves a nivel mundial clasificándolos en base a su país, año y causa. Dicho catastro de fallas esta acompañado de análisis realizados por expertos que hacen referencia a la falta de un monitoreo adecuado como un factor significativo en la ocurrencia de estos eventos.
- Realizar una revisión de normativa nacional e internacional referente al diseño, operación y monitoreo de los depósitos de relave, con el propósito de analizar y determinar la eficacia de las disposiciones existentes en cuanto a la definición y detalle de los requisitos de monitoreo.
- Elaborar un catastro de la instrumentación geotécnica de monitoreo de los depósitos de relaves chilenos en la actualidad con el fin de que se pueda utilizar como benchmarking, lo cual se integra y termina siendo una herramienta para la estrategia propuesta, es decir, el objetivo general. Dicho catastro se encuentra disponible en los anexos al final del documento.
- Examinar y analizar exhaustivamente la bibliografía presentada en las diferentes secciones, con el fin de identificar los aspectos faltantes en las estrategias y buenas prácticas existentes. Con base en esta revisión, se busca definir una estrategia sólida y lo más completa posible que satisfaga los requerimientos identificados y pueda ser adaptada y aplicada de manera efectiva en los depósitos de relaves.

## 1.3. Metodología

Para cumplir con los objetivos anteriormente indicados, se procede con la siguiente metodología:

1. Estudio de antecedentes de depósitos de relaves: Consiste en realizar una búsqueda exhaustiva de literatura científica, estudios técnicos, informes y documentos relevantes sobre depósitos de relaves, normativa asociada. Además, recopilar información sobre los procesos de formación de depósitos de relaves, características geotécnicas, comportamientos geotécnicos, instrumentación geotécnica, monitoreo geotécnico, modos de falla de un depósito, entre otros aspectos relevantes.
2. Revisión histórica de incidentes en depósitos de relaves a nivel mundial: Investigar y recopilar información sobre las fallas o accidentes de depósitos de relaves ocurridas en el mundo, clasificándolas según su país, su causa, además de indagar en análisis realizados por expertos sobre estos incidentes.
3. Catastro de instrumentación geotécnica de depósitos chilenos: Elaborar un catastro de la instrumentación geotécnica utilizada actualmente para el monitoreo en los depósitos de relaves del país, para lo anterior se realizará una revisión exhaustiva de la base de datos proporcionada por SERNAGEOMIN que contenga la información, además de utilizar programas como Power BI para una presentación óptima y clara de los datos recopilados.

4. Definición de una estrategia para establecer instrumentación mínima para el monitoreo geotécnica de depósitos de relaves: Utilizando la información recopilada en los pasos anteriores se desarrolla esta estrategia con el propósito de poder diseñar sistemas de instrumentación y monitoreo que contribuyan al cumplimiento del propósito último de cada obra. De esta forma se suma una herramienta que provee información valiosa para la toma de decisiones que beneficie oportunamente operaciones seguras y eficientes.
5. Análisis de resultados y discusiones
6. Conclusiones

# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1. Relaves y depósitos de relaves

El relave es un sólido finamente molido, que se descarta en operaciones mineras. En particular, la minería de sulfuros de cobre extrae grandes cantidades de material (roca) del yacimiento que se explota. Sólo una pequeña fracción corresponde al elemento de interés económico que se desea recuperar (algo menos de 1%). Una vez que ese material (la roca) ha sido finamente molido y concentrado por procesos de flotación, se obtiene un material (el concentrado) con una concentración más alta de cobre (entre 20 y 30%), que se puede vender como concentrado o procesar hasta cobre metálico puro. El resto del material (muy pobre en cobre) se denomina "relave", y se debe depositar de forma segura y ambientalmente responsable (Sernageomin, 2023).

Para la disposición segura de estos relaves, se construyen los depósitos de relaves, que corresponden a toda obra estructurada en forma segura para contener los relaves provenientes de una planta de concentración húmeda de especies de minerales. Además, contempla sus obras anexas. Su función principal es la de servir como depósito, generalmente, definitivo de los materiales sólidos proveniente del relave transportado desde la planta, permitiendo así la recuperación, en gran medida, del agua que transporta dichos sólidos (Decreto Supremo 248, 2007).

Los depósitos generalmente son construidos a partir de un muro inicial conformado por material de empréstito, estéril y/o material grueso del relave previamente separado en procesos de tratamiento físico. El muro inicial y el suelo de fundación del depósito deben estar impermeabilizados con el objetivo de evitar infiltraciones que influyan en la estabilidad física o contaminen las fuentes hídricas subterráneas. Estas estructuras cuentan por lo general con canales perimetrales, sistemas de drenajes subsuperficiales y tuberías de desagüe para minimizar la saturación de los relaves, con aguas del proceso, aguas superficiales, y aguas lluvias. El agua captada se conduce por lo general a sistemas de sedimentación y tratamiento, para realizar posteriormente procesos de recirculación, siendo reutilizada en la operación minera o vertida según los parámetros estipulados por la normativa vigente (ATG Ltda, 2021).

A continuación, se observa un esquema básico de una presa o depósito de relaves, vista de planta (Figura 2.1) y perfil (Figura 2.2).

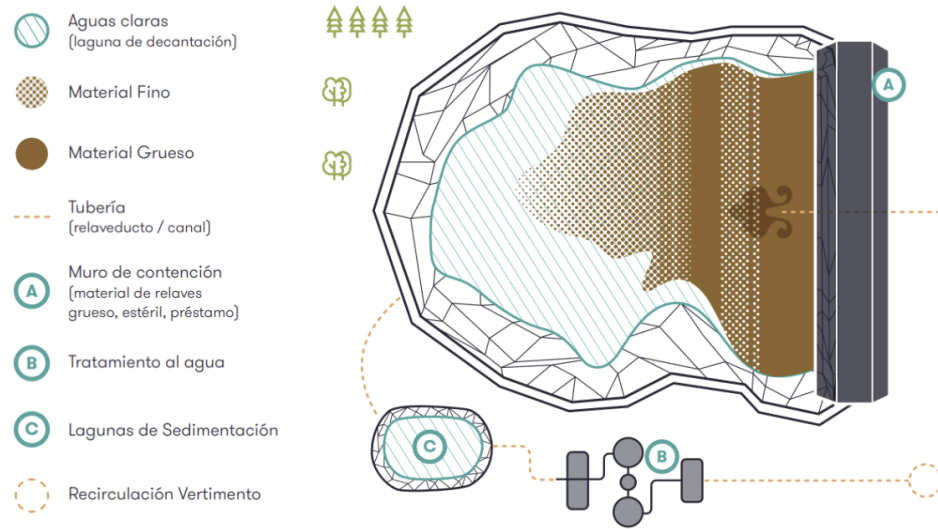


Figura 2.1: Esquema básico en planta de un depósito de relaves. (ATG Ltda., 2021)

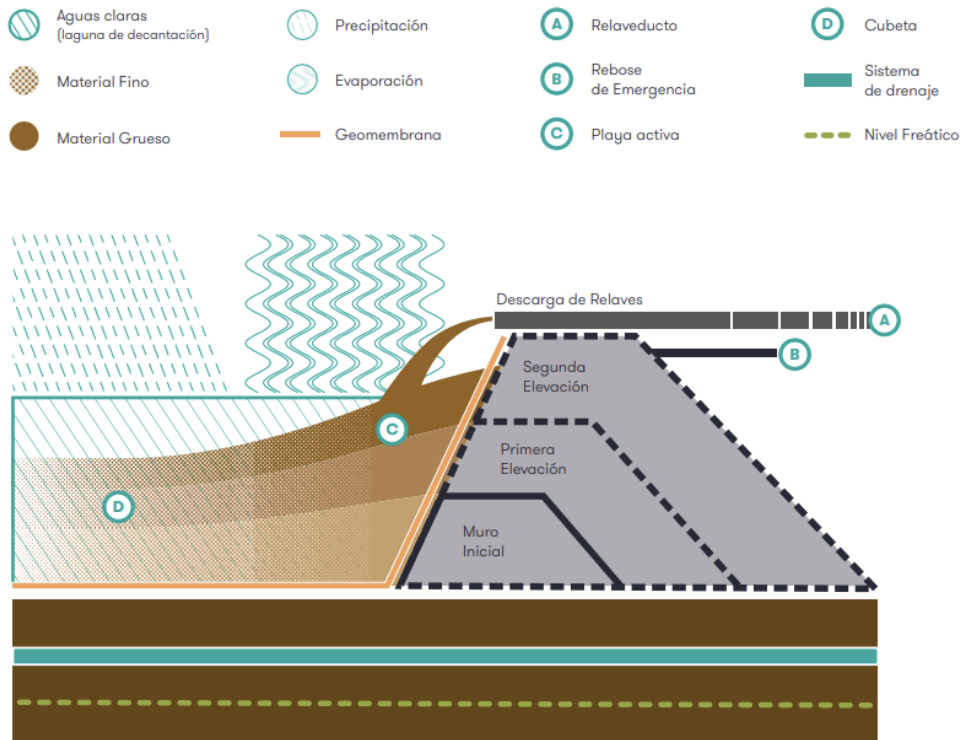


Figura 2.2: Esquema básico en perfil de un depósito de relaves. (ATG Ltda., 2021)

## 2.2. Tipos de depósitos

Actualmente, existen varios tipos de depósitos de relaves, que varían según la cantidad de agua que acompaña al relave (es decir, la densidad del relave), y según la forma de contener la depositación. De esta forma existen los siguientes tipos (Sernageomin, 2023):

- **Tranque de Relave:** Depósito en el cual el muro es construido por la fracción más gruesa del relave, compactado, proveniente de un hidrociclón (operación que separa sólidos gruesos de sólidos más finos, mediante impulsión por flujo de agua). La parte fina, denominada Lama, se deposita en la cubeta del depósito.
- **Embalse de relave:** Es aquel depósito donde el muro de contención está construido de material de empréstito (tierra y rocas aledañas) y se encuentra impermeabilizado en el coronamiento y en su talud interno. También se llaman embalses de relaves aquellos depósitos ubicados en alguna depresión del terreno en que no se requiere construcción de un muro de contención.
- **Relave Espesado:** Depósitos en el que la superficie es previamente sometida a un proceso de sedimentación, en equipo denominado Espesador, que favorece la sedimentación de los sólidos (de manera similar a la limpieza de agua de ríos para hacer agua potable), con el objetivo de retirar parte importante del agua contenida, la que puede ser reutilizada para reducir el consumo hídrico de fuentes de agua limpia. El depósito de relave espesado se construye de forma tal que impida que el relave fluya a otras áreas distintas a las del sitio autorizado, y contar con un sistema de piscinas de recuperación de agua remanente que pudiese fluir fuera del depósito.
- **Relave Filtrado:** Se trata de un depósito en que el material contiene aún menos agua, gracias al proceso de filtrado, para asegurar así una humedad menor a 20%. Esta filtración es también similar a la utilizada en Agua Potable.
- **Relave en pasta:** Corresponden a una mezcla de agua con sólido, que contiene abundante partículas finas y bajo contenido de agua, de modo que la mezcla tenga una consistencia espesa, similar a una pulpa de alta densidad.
- **Otros tipos:** Existen otros tipos de depósitos de relaves, como por ejemplo los depósitos en minas subterráneas, en rajes abandonados, entre otros.

## 2.3. Métodos constructivos

Los depósitos de relave convencional se construyen mediante la elevación de muros de contención, durante la operación del depósito, salvo en el caso de uso de depresiones naturales que no requieren muros. El depósito se inicia con un pequeño muro, que luego se eleva a medida que hay más relave que depositar. Existen 3 formas de elevar muros, pero en Chile, desde 1970 sólo se permiten 2 tipos: “Método Aguas Abajo” y “Método Eje Central”. El “Método Aguas Arriba” está prohibido en Chile desde 1970, ejemplo que se ha seguido progresivamente en los demás países con vocación minera. De todas formas a continuación se describen los 3 métodos (Sernageomin, 2023):

- Método Aguas Arriba: Los pisos se construyen sobre el borde superior del piso anterior, desplazados en la dirección desde donde llegan los relaves, de modo que se forma una especie de playa al sedimentar las partículas más pesadas de lamas (sólidos finos) y gran parte del agua escurre, formando una laguna de sedimentación. Este método requiere menor volumen de material arenoso que los otros métodos de construcción, principalmente se hallan en proyectos antiguos de la pequeña minería, aunque no constituyen una norma aceptada ni deberían considerarse una metodología apropiada, sus muros son menos resistentes frente a sismos y condiciones climatológicas (Ministerio de Minería, 2019) (Figura 2.3.a)).
- Método Eje Central o Mixto: Se inicia también con un muro de partida de material de empréstito compactado, sobre el cual se depositan las arenas hacia el lado aguas abajo y los sedimentos finos o lamas hacia el lado de aguas arriba. En este caso, los pisos se construyen sobre el borde superior del piso anterior sin desplazamientos respecto del inmediatamente inferior. Este método requiere disponer de un volumen de arenas intermedio entre los otros dos métodos, permitiendo a su vez tener muros estables (Ministerio de Minería, 2019) (Figura 2.3.b)).
- Método Aguas Abajo: La construcción también se inicia con un muro de partida de material de empréstito compactado, desde el cual los pisos se construyen sobre el borde superior del piso anterior desplazados en la dirección de avance de los relaves. Este método requiere disponer de un gran volumen de arenas, sin embargo, permite hacer muros más resistentes y estables desde el punto de vista de resistencia sísmica (Ministerio de Minería, 2019) (Figura 2.3.c)).

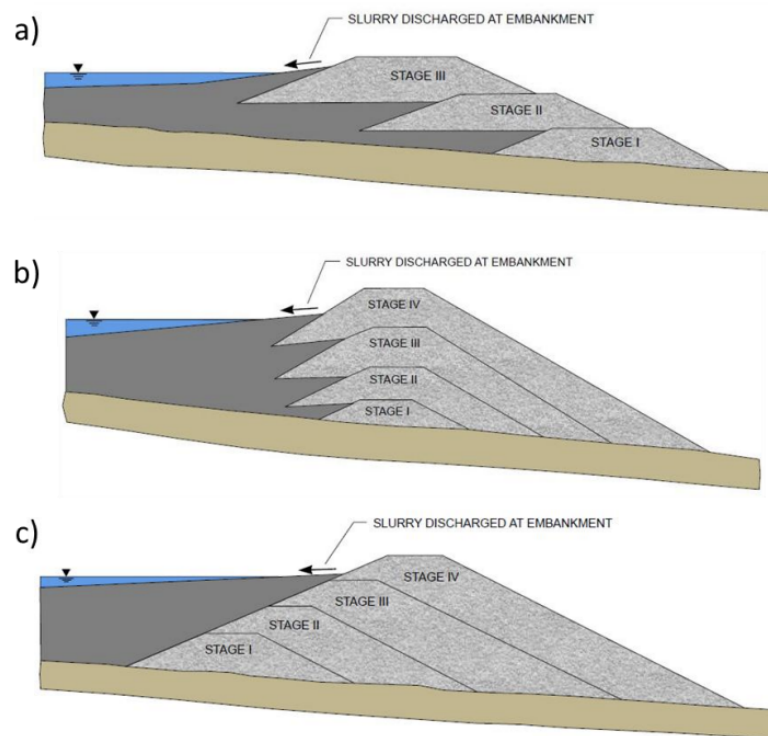


Figura 2.3: Métodos constructivos: a) Método aguas arriba, b) Método eje central, c) Método aguas abajo. (Mine Safety and Health Administration MSHA, 2010)



## 2.4. Catastro nacional de depósitos de relaves

Desde 2015, la Unidad de Depósitos de Relaves de la Subdirección Nacional de Minería de Sernageomin ha compilado y actualizado exhaustivamente la información relacionada con los depósitos de relaves en Chile, dando origen al Catastro Nacional de Depósitos de Relaves. Este registro abarca diversos parámetros característicos de cada depósito, incluyendo tonelaje, ubicación, propietario, método constructivo, tipo de instalación, coordenadas geográficas (UTM), estado operativo (activo, inactivo, abandonado, en construcción), volúmenes autorizados y actuales, así como las resoluciones que lo respaldan, entre otros.

La última actualización del catastro, con fecha 26 de diciembre de 2023, identifica un total de 764 depósitos distribuidos en 9 de las 16 regiones, desde Arica y Parinacota hasta Aysén, cabe recalcar que el total incluye depósitos de cualquier tipo y tamaño. La mayoría de estos depósitos se concentran en las regiones de Atacama y Coquimbo, representando el 74 % del total como se puede ver en la Figura 2.4.

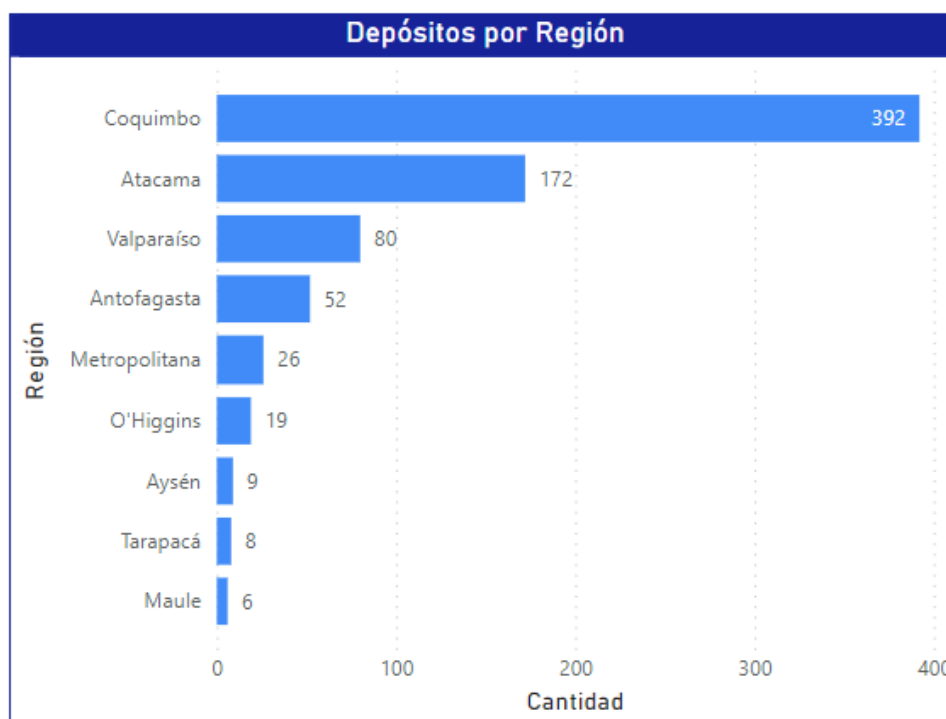


Figura 2.4: Distribución de depósitos de relave por región. (Elaboración propia, según información de Sernageomin)

En cuanto al estado operativo, se destaca que el 62 % de los depósitos se encuentra inactivo, mientras que 173 depósitos se hallan en estado abandonado y 110 permanecen activos, representando el 14,4 % del total (Figura 2.5).

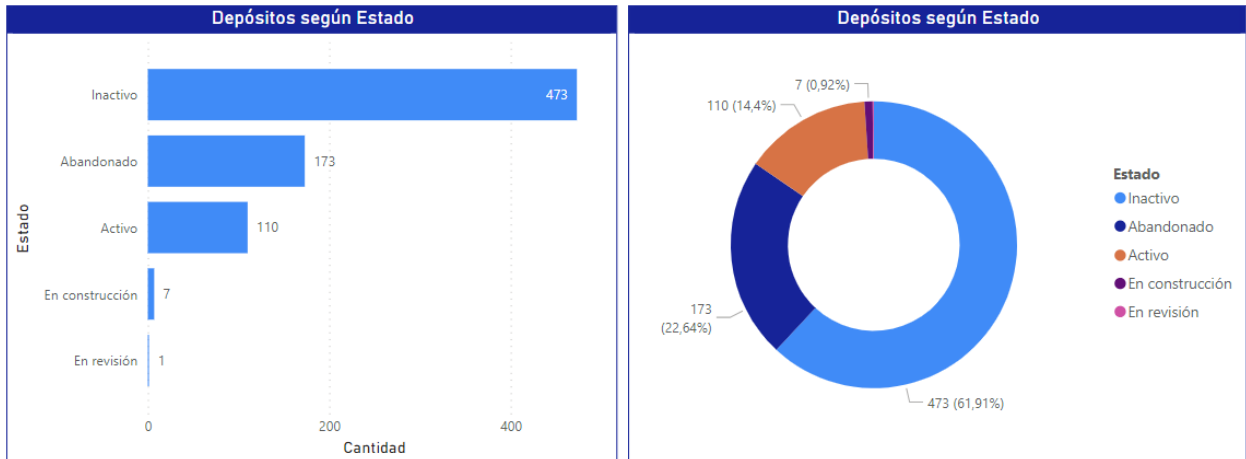


Figura 2.5: Cantidad de depósitos según su estado. Fuente: Elaboración propia, según información de Sernageomin.

Los depósitos se distribuyen según el tipo de la siguiente manera: 611 corresponden a tranques de relaves, lo que representa el 80 % del total. Además, se identifican 123 embalses, considerando estos como aquellos que contienen relaves de tipo convencional, lo que constituye el 16,1 %. Asimismo, se registran 16 depósitos filtrados, 7 espesados y 5 en pasta, lo cual se refleja en la Figura 2.6, en donde Dreim significa que es un depósito en mina subterránea.

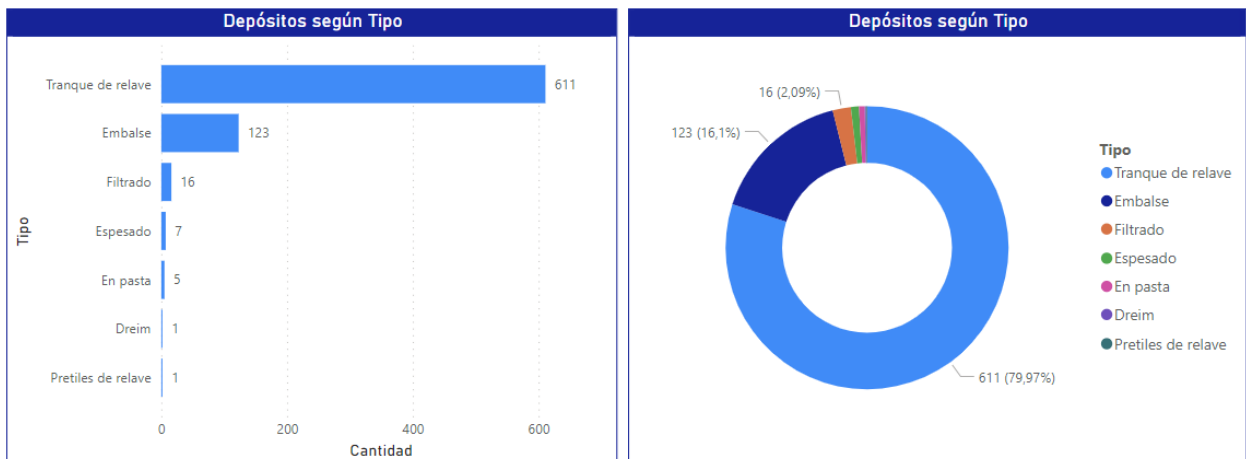


Figura 2.6: Cantidad de depósitos según el tipo. (Elaboración propia, según información de Sernageomin)

## 2.5. Clasificación de depósitos según tamaño

Con el propósito de realizar un catastro de instrumentación más preciso y específico según el tipo de depósito de relaves, se utilizará una clasificación basada en su tamaño. Para este fin, se utilizarán las categorías establecidas en el Artículo 12 del Decreto 50 del Reglamento de Obras Hidráulicas Mayores del Ministerio de Obras Públicas (MOP). En dicho artículo,

los depósitos de relaves se dividen en tres categorías, considerando la altura máxima del muro y/o la capacidad total del depósito en metros cúbicos (Decreto 50, 2015):

- Categoría A: Pequeños, de altura de muro máxima mayor a 5 m e inferior a 15 m, o bien de capacidad superior a 50.000 m<sup>3</sup> e inferior a 1.500.000 m<sup>3</sup>.
- Categoría B: Medianos, de altura de muro máxima mayor o igual a 15 m e inferior a 30 m, o bien de capacidad igual o superior a 1.500.000 m<sup>3</sup> e inferior a 60.000.000 m<sup>3</sup>.
- Categoría C: Grandes, de altura máxima de muro igual o superior a 30 m, o bien de capacidad igual o superior a 60.000.000 m<sup>3</sup>.

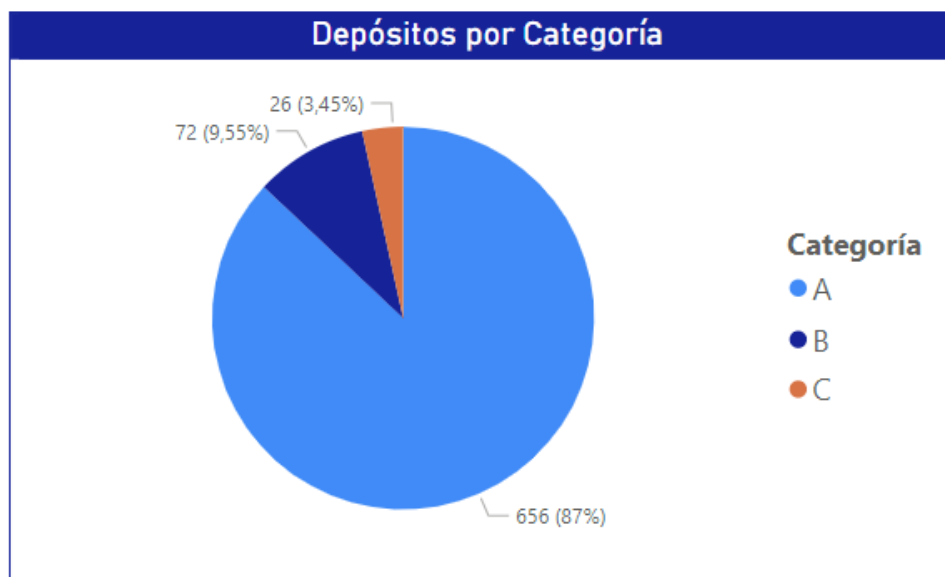


Figura 2.7: Depósitos convencionales y no convencionales, activos, inactivos y abandonados de Chile por Categoría.

Tras explorar el marco teórico sobre depósitos de relaves, es crucial complementar este conocimiento con una revisión de antecedentes de estudio. Esta revisión nos permitirá contextualizar los conceptos teóricos dentro del panorama actual de la investigación y las prácticas en la industria minera. Al integrar estos dos aspectos, podremos desarrollar una comprensión más completa y actualizada de los desafíos, las tendencias y las mejores prácticas en el monitoreo y la gestión de depósitos de relaves.

# Capítulo 3

## Antecedentes de estudio

El capítulo de antecedentes de estudio constituye una exploración exhaustiva y estructurada de diversas fuentes académicas y técnicas relacionadas con la gestión y el monitoreo de depósitos de relaves. Este capítulo está diseñado para abordar múltiples aspectos clave, organizados de manera lógica para proporcionar una visión integral de la temática.

En primer lugar, se analizarán los incidentes en depósitos de relaves reportados a nivel mundial y nacional, lo que permitirá comprender la magnitud y la frecuencia de estos eventos a escala global y local. A continuación, se examinarán los antecedentes normativos en cuanto a depósitos de relaves, tanto en Chile como en otras partes del mundo, con el fin de contextualizar las regulaciones y estándares existentes. Posteriormente, se presentarán las buenas prácticas en Chile y en el ámbito internacional, destacando las guías y recomendaciones desarrolladas por expertos en la materia. Seguidamente, se procederá a la identificación de modos de falla, con el objetivo de comprender los mecanismos que pueden conducir a incidentes en los depósitos de relaves.

Finalmente, se abordará la identificación de parámetros críticos y eventos gatilladores, aspectos fundamentales para el diseño de sistemas de monitoreo efectivos y la prevención de riesgos asociados a estos depósitos. Esta estructura permitirá al lector obtener una visión completa y ordenada de la literatura relevante en este campo.

### **3.1. Incidentes en depósitos de relaves reportados a nivel mundial y nacional**

Los incidentes se dividen en las categorías de fallas y accidentes. Los informes de la US-COLD en 1994 y del ICOLD en 2001 proporcionan definiciones y clasificaciones de incidentes históricos ocurridos en depósitos de relaves a nivel mundial. Las fallas y los accidentes se diferencian de acuerdo al estado activo o inactivo del depósito en el momento del incidente (Sernageomin, 2018).

- **Fallas o roturas en depósitos de relave:** Grieta o brecha en un depósito que conduce a la liberación de relave contenido (USCOLD, 1994; ICOLD, 2001).
  - Rotura Activa: falla que se presenta en un depósito activo. Un depósito activo se encuentra recibiendo relave al momento del incidente.
  - Rotura Inactiva: falla que se presenta en un depósito inactivo. Un depósito inactivo no se encuentra recibiendo relave al momento del incidente. Generalmente un depósito inactivo no presenta una laguna de aguas claras.
- **Accidentes en depósitos de relave:** Daño físico como una grieta o movimiento de taludes que no resulta en una liberación del relave depositado. Los accidentes también incluyen situaciones físicas no dañinas, en las que se puede justificar una acción correctiva (USCOLD, 1994; ICOLD, 2001).
  - Accidente Activo: accidente que se presenta en un depósito activo. Un depósito activo se encuentra recibiendo relave al momento del incidente.
  - Accidente Inactivo: accidente que se presenta en un depósito inactivo. Un depósito inactivo NO se encuentra recibiendo relave al momento del incidente. Generalmente un depósito inactivo no presenta una laguna de aguas claras.

### 3.1.1. Incidentes a nivel mundial

A continuación, se ofrece una visión general de incidentes ocurridos en depósitos de relaves a nivel mundial, detallando la cantidad de fallas en los 14 países en donde más ocurrieron y el tipo de modo de falla que desencadenó el accidente o falla del depósito. Este catastro se ha elaborado a través de la recopilación y complementación de información proveniente de diversas fuentes, actualizado hasta el 20 de octubre de 2023. Entre las fuentes consultadas se incluyen los informes de la ICOLD (2001), los estudios de Villavicencio (2014), así como datos recopilados de WISE (<http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>) y el Center for Science in Public Participation CSP2 (<http://www.csp2.org/tsf-failures-from-1915>). Este análisis propio busca proporcionar una perspectiva integral de los incidentes pasados en depósitos de relaves, destacando las lecciones aprendidas y resaltando la importancia de estrategias proactivas para la seguridad y monitoreo continuo de estas instalaciones cruciales en la industria minera.

Es fundamental tener en cuenta que las estadísticas incluidas en estos datos comprenden sólo las fallas de depósitos reportadas. Muchos fracasos y los aprendizajes asociados no se publican debido a cuestiones de sensibilidad o implicaciones legales.

Un total de 50 países informaron tener fallas en presas de relaves, de los cuales 15 cuentan con 5 o más fallas en su historia (Figura 3.1).

En Azam y Li (2010) se teoriza que el aumento de fallas con el pasar de los años observado puede “atribuirse al aumento de la actividad minera inmediatamente después de la Segunda Guerra Mundial para abordar la alta demanda global de metales, minerales y materias primas”, al servicio tanto de la reconstrucción en América del Norte y Europa y el nuevo desarrollo postcolonial en Asia y África.

De las 375 fallas documentadas en 50 países distintos, Estados Unidos encabeza la lista

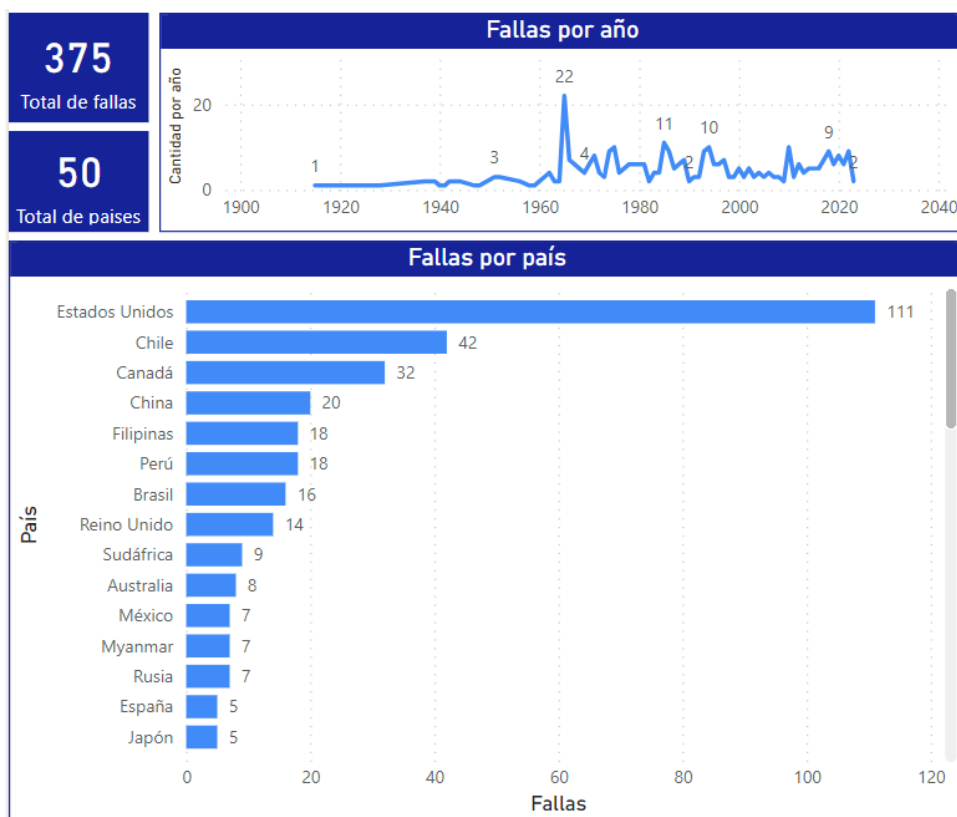


Figura 3.1: Fallas por país (Modificado de TSF Failures 1915-31Jan23, ICOLD 2001, Villavicencio 2014 y WISE 2023)

con 111 incidentes (29,6%), seguido por Chile en segundo lugar con 42 (11,2%). Canadá se posiciona en tercer lugar con 32 (8,5%), mientras que China ocupa el cuarto lugar con 20 (5,3%). Filipinas y Perú comparten el quinto lugar, registrando 18 fallas cada uno (4,8%). Estos datos guardan coherencia en su mayoría con la magnitud de la actividad minera en cada país y el de depósitos que se espera tenga cada uno de ellos.

De la Figura 3.2 se desprende que la falla por rebalse (overtopping) corresponde al conteo más alto de causas de fallas conocidas, con un total de 73, siendo la principal causa en los Estados Unidos, representando alrededor de un 22% del total de fallas de este país. La siguiente causa más común corresponde a inestabilidad de taludes con un total de 56 fallas, seguido de los sismos con 54, en donde Chile es el principal afectado por estos con un total de 34 fallas como resultado. Los terremotos representan el 81% de todas las fallas de presas de relaves en Chile, siendo el terremoto de La Ligua en 1965 el que tuvo la influencia más extendida, con 17 fallas registradas como resultado.

### Análisis sobre fallas o incidentes de depósitos de relaves

El análisis retrospectivo de diversos autores sobre fallas estructurales de depósitos de relaves revela patrones preocupantes y subraya la esencialidad del monitoreo efectivo en la detección oportuna de estos eventos catastróficos. Estos estudios han evidenciado de manera consistente que muchos colapsos podrían haber sido notablemente reducidos en su impacto, o incluso evitado, mediante una implementación adecuada de sistemas de instrumentación y

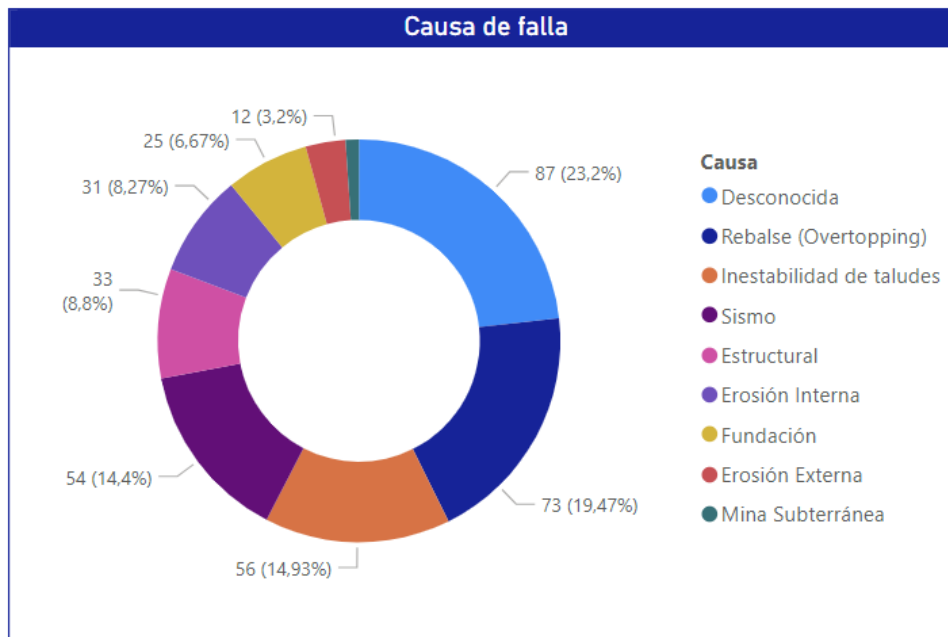


Figura 3.2: Causa de falla para cada incidente. (Modificado de TSF Failures 1915-31Jan23, ICOLD 2001, Villavicencio 2014 y WISE 2023)

monitoreo. Algunos ejemplos se presentan a continuación:

En su tesis, Clarkson (2021) aborda las fallas en presas de relaves en diez países durante el período de 1915 a 2018, destacando a Estados Unidos (102 fallas), Chile (45 fallas) y Canadá (18 fallas) con el mayor número de incidentes debidamente documentados. Su análisis concluye que, en retrospectiva, las fallas en las presas de relaves eran predecibles. Aunque cada presa requiere un diseño único, se identifica un potencial para prevenir fallas mediante un compromiso efectivo y la implementación de prácticas operativas y de diseño apropiadas.

El boletín 121 de ICOLD (2001) recopila 221 casos de incidentes en presas de relaves hasta el año 2000. Se encontró que las principales causas fueron la ausencia de un balance hídrico, la construcción y la comprensión deficiente de las características que afectan la operación segura. Aunque algunos casos se debieron a eventos impredecibles o condiciones climáticas inesperadas, se argumenta que, con el conocimiento actual, estos eventos deberían haberse tenido en cuenta. En sus conclusiones, destaca que los enfoques para mitigar los riesgos en el sistema de depósitos pueden abarcar una vigilancia, monitoreo y mantenimiento mejorados. Asimismo, subraya que la seguridad continua del sistema de depósitos dependerá de algún método de observación que integre vigilancia y monitoreo, empleando instrumentos idóneos para detectar las condiciones internas.

Por su parte, Davies et al. (2002) en “Tailings Dams: When things go wrong” menciona que los revisores de los estudios de casos rara vez llegan a la conclusión más importante; es decir, que no ha habido eventos de falla inexplicables. Indica que si uno se convierte en un estudiante de historias de casos de fallas de presas de relaves, y todos los diseñadores y reguladores deberían hacer precisamente eso, surge una única conclusión. Estos fracasos, todos y cada uno de ellos, eran totalmente predecibles en retrospectiva.

En su artículo para la revista Science sobre las causas de fallas en Depósitos de Relaves en Europa, Santamarina et al (2019) resalta la crucial importancia de una instrumentación mejorada y un monitoreo efectivo para prevenir no solo fallas inminentes, sino también para comprender y abordar los factores desencadenantes y causales subyacentes. Esto implica la necesidad de tecnologías avanzadas, cumplimiento riguroso de regulaciones y estrategias adaptativas para garantizar la seguridad y prevenir futuros desastres en embalses y depósitos.

Sobre las referencias anteriores, se debe hacer una diferencia entre las fallas frágiles y las no frágiles. Por un lado, la falla frágil corresponde a una falla en donde se tiene un tiempo de respuesta muy acotado, ya que es repentina o la misma falla ocurre en cuestión de minutos, por lo que no es viable poder prever o evitar su ocurrencia. Por otro lado, en una falla no frágil muestra un proceso de deformación gradual, lo que brinda un período de tiempo en el cual, teniendo un adecuado programa de instrumentación y monitoreo, es posible tomar medidas para reducir la probabilidad de ocurrencia o mitigar sus posibles consecuencias.

Estos análisis resaltan la crucial importancia de adoptar un enfoque proactivo y holístico en el diseño y monitoreo de presas de relaves. En este contexto, la anticipación de posibles fallas se ve considerablemente facilitada al implementar prácticas operativas y de diseño bien fundamentadas. Es esencial subrayar que la base de una estrategia exitosa radica en un sistema de monitoreo efectivo con un propósito bien definido. La correcta elección de la instrumentación, guiada por una estrategia de diseño sólida y una gestión del riesgo adecuada a lo largo del ciclo de vida del proyecto, juega un papel esencial para asegurar que el sistema cumpla con su objetivo principal de salvaguardar la seguridad y estabilidad del depósito a lo largo del tiempo considerando las distintas circunstancias a las que se verá expuesta.

### **3.1.2. Incidentes a nivel nacional**

Del catastro previo, al filtrar el caso de Chile en la Figura 3.3, observamos que 34 de las 42 fallas registradas se atribuyen a sismos, representando el 81 % del total. Le sigue en frecuencia el rebalse con 7 eventos, constituyendo el 16,7 %, y se registra una sola falla debida a erosión interna.

Villavicencio (2014), en su artículo "Failures of sand tailings dams in a highly seismic country", examina incidentes registrados en tranques de relaves de arena en Chile desde 1915, en donde identifica los mecanismos de falla. Villavicencio rescata que las fallas han ocurrido principalmente debido a licuefacción sísmica con falla de flujo, seguidas en orden de ocurrencia por inestabilidad de taludes con deformaciones inducidas sísmicamente y, en algunos casos, desbordamiento. Estas fallas se han producido principalmente en presas operativas de relaves de arena construidas con el método "aguas arriba", ubicadas en áreas con un régimen de precipitaciones promedio, incluyendo Valparaíso, Santiago, Rancagua (zonas centrales) y Maule (centro-sur), (ICOLD 2001).

Villavicencio (2014) establece cuatro causas como los principales factores que contribuyen a la inestabilidad de los tranques de relaves de arena chilenos: método de construcción, mala compactación, alto contenido de finos en las arenas de relaves del ciclón y un elevado grado



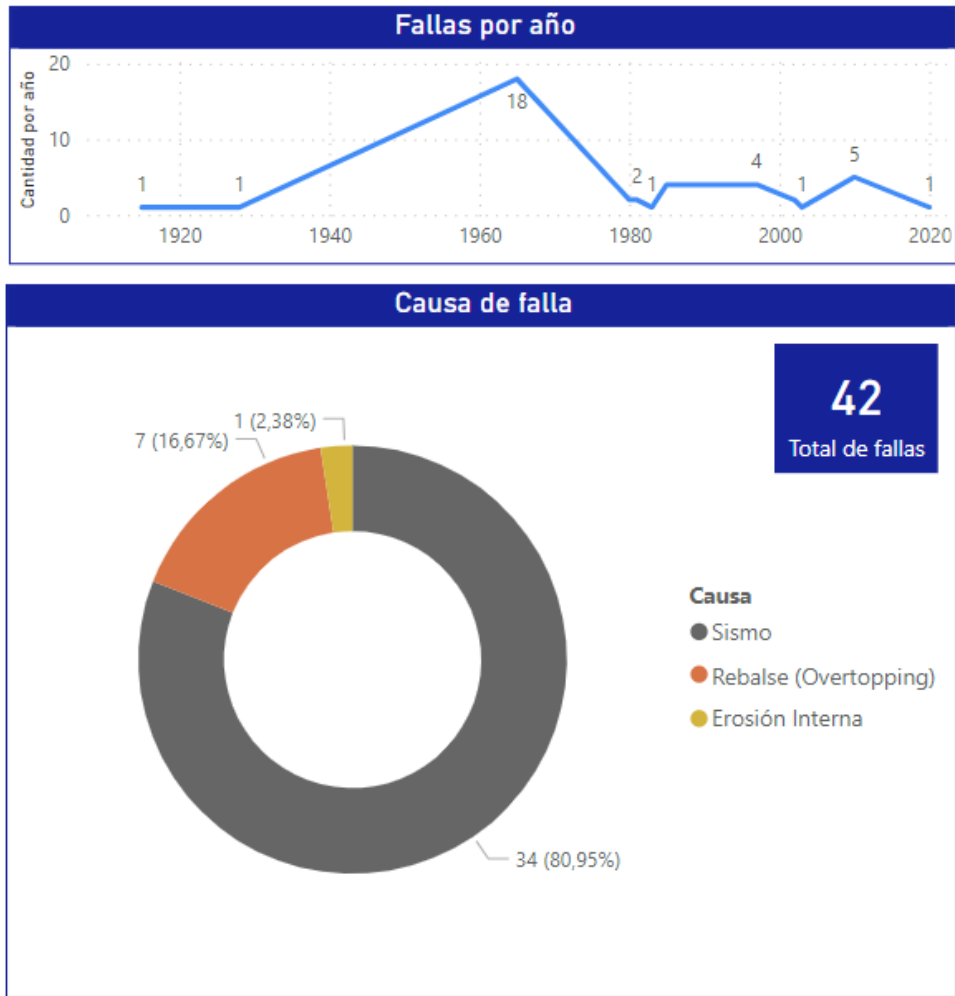


Figura 3.3: Incidentes a nivel nacional. (Modificado de TSF Failures 1915-31Jan23, ICOLD 2001, Villavicencio 2014 y WISE 2023)

de saturación. Estas causas pueden atribuirse a un diseño, construcción y operación inadecuados, o combinaciones de estos factores. Los mecanismos de falla dominantes asociados que se han observado son: licuefacción sísmica con falla de flujo (licuefacción verdadera), inestabilidades de taludes, deformaciones inducidas sísmicamente y desbordamiento.

### 3.1.3. Revisión de bibliografía complementaria asociada a fallas de depósitos de relaves

En Azam y Li (2010), el razonamiento se propone como “los materiales no consolidados con altas presiones de poro... [presentes en las primeras etapas de desarrollo de las presas] aún no han desarrollado una resistencia al corte adecuada para contrarrestar las fuerzas de resistencia”. Por otro lado, se sugiere que las represas más grandes incluyan “un mejor diseño, seguimiento y vigilancia”, de Fell et al. (2015).

Teniendo en cuenta estas estadísticas, se puede reconocer la necesidad crítica de realizar evaluaciones integrales de riesgos. La consideración de los riesgos socioeconómicos y de las partes interesadas con respecto a la ubicación, metodología y características únicas de cada depósito de relaves exige planes de diseño, monitoreo y gestión personalizados. Independientemente de las tendencias y la manipulación de datos de una base de datos tan extensa, la conclusión más importante se identifica en Davies et al. (2002): no ha habido eventos de falla inexplicables. Existen lagunas en los informes en diferentes detalles, sin embargo, se plantea “no es necesario cuestionar los principios fundamentales de la ingeniería mecánica/hidráulica” (Davies et al. 2002); Las fallas en las presas de relaves fueron completamente predecibles en retrospectiva. Por ende, si bien cada presa de relaves requiere un diseño único, se reconoce la capacidad de prevenir fallos a través del compromiso efectivo y la implementación de prácticas operativas y de diseño adecuadas. En resumen, un diseño, construcción y operación apropiados, junto con un monitoreo diligente, tienen el potencial de prevenir fallas.

Las imágenes satelitales nos han llevado a darnos cuenta de que las instalaciones de relaves son probablemente las estructuras más grandes construidas por el hombre en la Tierra. Su seguridad, para la protección de la vida, el medio ambiente y la propiedad, es una necesidad esencial en las operaciones mineras actuales. Estos factores, y el historial de seguridad relativamente deficiente revelado por el número de fallas en las presas de relaves, han llevado a una mayor conciencia de la necesidad de mejorar las disposiciones de seguridad en el diseño y operación de las presas de relaves. (ICOLD 2001).

### **3.2. Antecedentes normativos en cuanto a diseño, operación y monitoreo en Chile y el mundo**

A nivel nacional e internacional, se encuentran diversos documentos, como decretos, leyes, reglamentos, guías y manuales de buenas prácticas, que regulan las diversas etapas del ciclo de vida de los depósitos de relaves. El siguiente capítulo se fundamenta en el análisis comparativo de normativa nacional e internacional efectuado por PGS Chile en 2018, bajo el título “Estudios de Normativas Internacionales de Diseño, Construcción y Operación, Cierre y Post Cierre de Depósitos de Relaves”, en donde el objetivo principal es identificar los aspectos más relevantes de cada marco legal, así como sus objetivos específicos al diseñar y construir un depósito de relaves, especialmente en lo que respecta a la protección ambiental y la regulación de la estabilidad física y química de las instalaciones.

Es crucial reconocer que cada país analizado presenta singularidades, necesidades y características propias que influyen en la formulación de su marco legal. Factores como diferencias geográficas, administrativas, históricas y de recursos influyen en la forma en que cada país aborda la regulación de los depósitos de relaves. Por ejemplo, la distinción entre países unitarios como Chile y Perú que tienen un Estado único con leyes aplicables a todo el territorio, y países federados, donde cada estado aplica sus propias regulaciones según sus necesidades y jurisdicción, es esencial. En estos últimos, es común que no exista una entidad única a nivel nacional encargada de la fiscalización de aspectos regulatorios de los relaves, sino que organismos específicos en cada estado cumplen esa función.

Otro punto clave es la variabilidad en el desarrollo minero, donde algunos países, como Chile, Perú, Estados Unidos, Australia, Canadá, Brasil, y México, tienen un desarrollo minero significativo, por lo mismo, de todos los países analizados por PGS Chile, estos son escogidos para presentar su análisis a lo largo de esta sección.

A continuación se presenta una lista de las normas estudiadas por PGS Chile, relacionadas con alguna etapa del ciclo de vida de los depósitos de relave, o bien algún aspecto relacionado con su funcionamiento o posibles efectos. En la Tabla 3.1 y 3.2 se realiza una comparación de la normativa internacional de los países mencionados anteriormente. Este análisis facilita la identificación de similitudes, diferencias y mejores prácticas a nivel mundial para la gestión adecuada de los depósitos de relaves.

Luego de las tablas, se presenta un resumen de la normativa de cada uno de estos países, destacando los aspectos normativos relacionados con la regulación de los depósitos, los programas de evaluación ambiental, la fiscalización y las sanciones correspondientes, los entes responsables, así como las indicaciones sobre la gestión del riesgo y la regulación de la estabilidad física para los depósitos, incluyendo lo referente al monitoreo, especialmente durante la fase operativa del depósito.

Tabla 3.1: Comparación de normativa internacional de depósitos de relaves (Australia, Brasil, Canadá y Chile). (PGS Chile, 2018)

País	N° Norma	Tipo de norma	Materia	Nombre de la norma	Año	Diseño	Construcción	Operación	Cierre y Post-cierre	Otros
Australia	09-a0-02	Act (estatuto)	Minería	Mining Act	1978					x
	11-j0-00	Reglamento	Minería	Mining Regulations	1981					x
	No. 91	Act (estatuto)	Medio Ambiente	Environmental Protection and Biodiversity Conservation Act	1999					x
	06-a0-01	Act (estatuto)	Minería	Mines Safety and Inspection Act	1994			x		
	06-d0-03	Reglamento	Minería	Mines Safety and Inspection Regulations	1995			x		
	-	Guía	Minería	Department of Mines and Petroleum Guideline	2013	x	x			
Brasil	Ley 12.334	Ley	Obras Públicas: Represas	Establece la Política Nacional de Seguridad de Represas	2010	x	x			
	Ordenanza 70.389	Decreto	Minería	Portaria n° 70.389 Ministério de Minas y Energía	2017	x		x		
Canadá	-	Constitución	Constitución (regula actividad minera)	Constitution Act	1867					x
	-	Guía	Obras Públicas: Tranques y represas	Dam Safety Guidelines	2007	x	x	x		
	RS. Chap. 296	Código	Minería	Health, Safety and Reclamation Code for Mines (British Columbia)	2003					x
	c.M.14	Act (estatuto)	Minería	Mining Act (Ontario)	1990					x
	m.13.1	Act (estatuto)	Minería	Mining Act (Quebec)	2000					x
M08-03a-1711	Guía	Minería	Guidelines for Preparing Mine Closure Plans (Quebec)	2017						
Chile	DS N° 248	Reglamento	Minería	Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relave	2007	x	x	x	x	
	DS N° 50	Reglamento	Obras Públicas	Reglamento que establece las condiciones técnicas que deberán cumplirse en el proyecto, construcción y operación de las obras hidráulicas del art. 294 del Código de Aguas.	2015		x			
	Ley 19.300	Ley marco	Medio Ambiente	Ley sobre Bases Generales del Medioambiente	1994					x
	DS N° 148	Reglamento	Salud	Reglamento sanitario sobre manejo de recursos peligrosos	2004					x
	DS N°40	Reglamento	Medio Ambiente	Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto ambiental	2013					x
	Ley 20.551	Ley	Minería	Regula el cierre de faenas e instalaciones mineras	2011				x	

Tabla 3.2: Comparación de normativa internacional de depósitos de relaves (Estados Unidos, México y Perú). (PGS Chile, 2018)

País	N° Norma	Tipo de norma	Materia	Nombre de la norma	Año	Diseño	Construcción	Operación	Cierre y Post-cierre	Otros
Estados Unidos	Pub.L. 94-579	Act (estatuto)	Medio Ambiente	Federal Land Policy and Management Act	1976	x				x
	Pub.L. 91-190	Act (estatuto)	Medio Ambiente	National Environmental Policy Act	1970					x
	Pub.L. 95-164	Act (estatuto)	Minería y Salud	Federal Mine Safety & Health Act	1977					x
	Pub.L. 99-215	Act (estatuto)	Medio Ambiente	Solid Waste Disposal Act	1965			x		x
	Sess. 2, ch. 152, 17 Stat 91-96	Act (estatuto)	Minería	General Mining Act	1872					x
	FEMA 93	Guía	Minería	Federal Guidelines for Dam Safety	2004			x	x	
	FEMA 333	Guía	Obras Públicas: Tranques y represas	Federal Guidelines for Dam Safety: Hazard Potential Classification System of Dams	2004	x			x	
	FEMA 64	Guía	Obras Públicas: Tranques y represas	Federal Guidelines for Dam Safety: Emergency Action Planning For Dam Owners	2013	x	x	x	x	
	EPA 530-R-94-038	Guía	Medio Ambiente y Minería	Technical Report Design and Evaluation of Tailing Dams	1994	x				
EPA 910-B-00-001	Guía	Medio Ambiente y Minería	Abandoned Mine Site Characterization and Cleanup Handbook	2000					x	
México	NOM-141	Norma Oficial Mexicana	Minería	Procedimiento para caracterizar los jales, así como especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación, postoperación de presas de jales	2004	x	x	x	x	
	DOF-04/06/13	Ley	Medio Ambiente	Ley general de equilibrio ecológico y la protección del ambiente	2012					x
	DOF 22-05-2006	Ley	Gestión de Residuos	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos	2006					x
	DOF-07/06/13	Ley federal	Medio Ambiente	Ley Federal de Responsabilidad Ambiental	2013					x
Perú	RD N° 19-97-EM/DGAA	Ley guía	Medio Ambiente y Minería	Incluye en la Guía Ambiental para el Manejo de Relaves Mineros, la estructura de reporte de estabilidad física de depósitos de relave	1997			x		
	Ley 28.090	Ley	Minería	Ley que regula el cierre de minas	2003				x	
	DS N° 2003-35-EM	Reglamento	Minería	Reglamento para el cierre de minas	2005				x	
	DS N° 016/93/EM	Reglamento	Medio Ambiente y Minería	Reglamento para la protección ambiental en la actividad minero-metalúrgica	1993	x				x
	DS N° 40	Reglamento	Medio Ambiente y Minería	Reglamento de protección y gestión ambiental para las actividades de explotación, beneficio, labor general, transporte y almacenamiento minero	2014		x			x
Ley 29.968	Ley	Medio Ambiente	Ley de creación del Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles (SENACE)	2012					x	

### 3.2.1. Australia

En Australia, la gestión de relaves y otros desechos mineros se aborda en los planes de gestión ambiental presentados para obtener aprobaciones ambientales a nivel estatal y territorial. Si un proyecto de almacenamiento de relaves tiene un impacto significativo a nivel nacional, debe ser aprobado bajo la regulación "Environment Protection and Biodiversity Conservation Act" de 1999. El objetivo de esta ley y de las autoridades reguladoras es garantizar que los depósitos sean seguros tanto en términos de estabilidad física como química, tanto durante la operación como después del cierre de la mina. Algunos estados, como Australia Occidental, emiten guías sobre el diseño de depósitos de relaves.

En todos los estados australianos, los empresarios mineros deben presentar una solicitud de arrendamiento de minas que incluya una propuesta de desarrollo y planificación para la restauración del área afectada. La responsabilidad recae en el arrendatario, quien debe constituir una fianza en la mayoría de los estados o contribuir regularmente a un fondo de rehabilitación en Australia Occidental.

Además, en Australia, se requiere informar al Departamento de Minas y Petróleo sobre diversos aspectos, incluyendo investigación, diseño, supervisión de construcción, clasificación de riesgos y altura de los muros, categorizados según el código de prácticas del departamento. La autorización para la construcción de tranques de relaves se determina en base a estas evaluaciones. La Agencia de Protección Ambiental también participa y puede rechazar proyectos que no cumplan con requisitos específicos, como la gestión de la contaminación o descargas de aguas.

En cuanto a la regulación de la estabilidad física de los depósitos, Australia sigue las directrices entregadas por ANCOLD (Comité Nacional Australiano de Grandes Presas).

En cuanto al monitoreo, las prácticas de gestión de relaves destacan la necesidad de una responsabilidad operativa clara a niveles superiores de la gestión minera. Cada instalación requiere un manual de operación alineado con los objetivos de diseño y los controles clave de ingeniería y riesgo operacional. Este manual abarca aspectos como los principios de buena deposición de relaves, manejo del estanque de decantación, operación diaria, procedimientos operacionales, mantenimiento programado y estrategia de cierre prevista.

Para la gestión de riesgos, las instalaciones de almacenamiento de relaves deben diseñarse y operarse para minimizar los riesgos para el operador, la salud pública y la seguridad. Se destaca un enfoque de diseño basado en riesgos, que implica la identificación y gestión de riesgos asociados con el almacenamiento de relaves. Se espera que los ingenieros demuestren que el método seleccionado manejará los riesgos dentro de niveles aceptables. Se sugiere evaluar estrategias alternativas de gestión de relaves, considerando el drenaje de relaves y la gestión efectiva del agua superficial. La gestión operativa basada en riesgos implica la observación continua del rendimiento y una respuesta rápida a los indicadores de fallas o impactos potenciales.

### 3.2.2. Brasil

En Brasil, la obligación de recuperar el impacto ambiental de las actividades mineras está consagrada constitucionalmente. La empresa minera debe informar al Ministerio de Minas y Energía y presentar un informe ambiental detallado. Se requiere un "Plan de Aprovechamiento Económico" con información sobre sustancias minerales, reservas, flujo de producción y un "Informe de Plan de Recuperación del Área Degradada" aprobado por la Agencia de Protección Ambiental para obtener la Licencia Preliminar.

Brasil no tiene normas específicas para el plan de cierre de relaves mineros, utilizando la Evaluación de Impacto Ambiental para manejar aspectos relacionados con el cierre. A diferencia de otros países, no se exige un instrumento financiero como garantía para restaurar posibles daños ambientales.

En Brasil, la atención se centra en medidas para garantizar la estabilidad física, destacando la preocupación por sistemas de drenaje y medidas contra inundaciones, erosión eólica y deslizamientos.

Se mencionan diversas ordenanzas y resoluciones, como la creación del Registro Nacional de Represas de Minería, que establece pautas para la seguridad de represas. La legislación de Minas Gerais clasifica represas en función de criterios específicos, y hay disposiciones para auditorías técnicas extraordinarias de seguridad de represas.

En resumen, Brasil aborda la seguridad de las represas con un enfoque legal y técnico específico, destacando la importancia de la evaluación de impacto ambiental y la seguridad física de las represas.

La legislación brasileña establece la obligatoriedad de fiscalizar y monitorear continuamente los depósitos a lo largo de su vida útil. La empresa minera debe realizar inspecciones periódicas y especiales, según lo detallado en el Plan de Seguridad de Represas (PSB). Las inspecciones periódicas son responsabilidad del personal del depósito, y los informes resultantes se entregan al organismo fiscalizador y a la sociedad civil. Las inspecciones especiales son realizadas por un equipo multidisciplinario de expertos, dependiendo de la categoría de riesgo de la represa.

Además, la empresa debe implementar un sistema de monitoreo de seguridad de los depósitos, cuya complejidad depende de la clasificación en Daño Potencial Asociado (DPA) del depósito. Para depósitos con DPA alto y población aguas abajo, se exige un seguimiento a tiempo completo para garantizar la estabilidad. Los estados mineros destacan la importancia de estudios geotécnicos, dispositivos de drenaje, factores de seguridad adecuados, medidas preventivas, observación del ángulo de inclinación máximo, y sistemas de drenaje para evitar inundaciones.

Los depósitos deben contar con un Plan de Acción frente a Emergencias (PAEBM), que detalla acciones a ejecutar en situaciones de emergencia y notificaciones a agentes relevantes. A nivel federal, la legislación no establece criterios para la estabilidad física de depósitos de

relaves, dejando esta responsabilidad a los estados federados. El Decreto N°70.389 clasifica las presas según riesgo y daño potencial, definiendo el plan de seguridad y acción frente a emergencias.

### **3.2.3. Canadá**

En Canadá, los proyectos mineros deben cumplir tanto con la legislación ambiental provincial como federal. Posterior a una falla en 2014, el estado de British Columbia actualizó su Código de Salud, Seguridad y Reclamación para Minas, incluyendo auditorías periódicas en depósitos de relaves. Los empresarios mineros deben contratar ingenieros registrados para garantizar el cumplimiento legal y reportar problemas al Inspector Jefe de Minas. A nivel federal, el gobierno interviene en asuntos regulatorios de relaves relacionados con aguas, peces, navegación, relaves de uranio o asuntos ambientales de interés internacional.

La legislación clave incluye la "Constitution Act, 1867" y las "Dam Safety Guidelines" de la Canadian Dam Association (CDA). Las provincias tienen regulaciones específicas, como el "Health, Safety and Reclamation Code for Mines in British Columbia" y el "Mining Act" de Ontario y Quebec. Se requieren garantías financieras y planes de cierre aprobados antes de la producción minera. Fiscalizaciones anuales provinciales, según la CDA, incluyen clasificación de riesgo y seguimiento de elementos de riesgo identificados, con obligación de seguir sugerencias e indicaciones.

El diseño debe asegurar la estabilidad física, siguiendo la "Dam Safety Guidelines" de la CDA. La legislación de British Columbia establece algunos criterios, como una pendiente mayor a 2H:1V, un factor de seguridad mínimo de 1,5 y consideraciones sísmicas específicas. La fiscalización incluye monitoreo detallado, como la clasificación de relaves según sus fallas, registro de cambios desde la última inspección y evaluación de control de aguas superficiales, entre otros aspectos.

Respecto al monitoreo, en Canadá Se llevan a cabo auditorías periódicas en los depósitos, conforme a las actualizaciones en el Código de Salud, Seguridad y Reclamación para Minas de British Columbia. La supervisión anual, guiada por las "Dam Safety Guidelines" de la CDA, es un proceso riguroso que abarca aspectos clave como la clasificación del riesgo de los relaves, el registro detallado de cambios desde la última inspección, el control de aguas superficiales y el seguimiento de la revancha. Además, las empresas están obligadas a seguir las sugerencias e indicaciones derivadas de estas inspecciones anuales. Este vela por que los depósitos de relaves mantengan su estabilidad física y cumplan con las normativas establecidas por las autoridades provinciales y federales.

### **3.2.4. Chile**

La legislación ambiental chilena, enmarcada en la Ley N°19.300 de 1994, establece al Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) como el organismo encargado de evaluar proyectos, incluyendo la minería. Los proyectos mineros, desde prospecciones hasta disposición de resi-



duos, deben someterse al sistema de evaluación de impacto ambiental. El SERNAGEOMIN, a través de la Ley N° 20.551 de 2011, supervisa y aprueba los aspectos técnicos de los planes de cierre de faenas mineras, con el objetivo de garantizar la estabilidad física y química de las instalaciones. Además, el Decreto Supremo (DS) N°41 de 2012 regula el cierre de faenas mineras, y el DS N°248 de 2007 establece normas para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves, confiando a SERNAGEOMIN funciones de control y fiscalización.

En términos de fiscalización, la Superintendencia del Medio Ambiente es responsable de verificar el cumplimiento de normas ambientales y resoluciones de clasificación ambiental. La Ley N° 20.417 de 2010 creó este organismo, que coordina la supervisión ambiental y trabaja en conjunto con organismos sectoriales, como el SERNAGEOMIN. La Ley N° 20.551 también faculta al SERNAGEOMIN para aplicar sanciones en caso de incumplimiento de los planes de cierre. Se establecen sanciones, como multas y cierre temporal o indefinido en casos de reincidencia o infracciones graves.

En cuanto a estabilidad física, el Decreto Supremo N°248 es el encargado de su regulación. En el Artículo 14, se establecen requisitos para la aprobación de proyectos, abarcando las etapas de proyecto, operación y post-operación. En cuanto a la construcción, se prohíbe el método aguas arriba y se detallan aspectos como dimensiones del depósito, método constructivo, características del muro de arena, y sistemas asociados como drenaje y recuperación de aguas claras. También se pide una descripción de las características especiales de diseño, parámetros geotécnicos, y un análisis de estabilidad de taludes. Además, se destaca la importancia de la gestión del riesgo, exigiendo la presentación de un Manual de Emergencias que aborde accidentes, situaciones de emergencia y eventos naturales en la etapa de proyecto.

El DS N°50 de 2015 establece condiciones técnicas para obras hidráulicas, incluyendo tranques de relaves. Sin embargo, excluye depósitos de relaves en pasta, filtrados, y espesados con más del 65 % de concentración en peso de sólidos. Ambos decretos reflejan el compromiso regulatorio chileno para asegurar la estabilidad física y seguridad de los depósitos de relaves.

En relación al monitoreo, el Decreto Supremo 248 establece requisitos específicos para la presentación de un proyecto, cuando sea necesario, exige la descripción de los sistemas de instrumentación y control destinados a supervisar el comportamiento estructural e hidráulico del depósito. Estos sistemas deben abarcar variables como las presiones de poros, niveles freáticos, desplazamientos, asentamientos, filtraciones, aceleraciones sísmicas, y otras que los expertos a cargo consideren recomendables. Adicionalmente, en el artículo 51, se especifica que el proyecto debe incorporar un plan de control y monitoreo. En el artículo 52, se establece que durante la operación del depósito de relaves, el operador está obligado a llevar a cabo el monitoreo y control de las instalaciones para verificar su conformidad con las especificaciones y requerimientos impuestos por las respectivas Autoridades Fiscalizadoras.

### 3.2.5. Estados Unidos

En los Estados Unidos, la autorización para la construcción de depósitos de relaves se rige por regulaciones a nivel estatal y federal. La revisión ambiental es realizada de manera independiente por cada estado, con parámetros específicos para el cierre del proyecto que abordan medidas como control de erosión, protección del agua, reforestación, entre otras. A nivel federal, la General Mining Act de 1872 autoriza la extracción de minerales en tierras públicas, sin abordar la disposición de residuos mineros. La Federal Land Policy and Management Act de 1976 establece que las autorizaciones mineras no deben resultar en una degradación innecesaria de territorios públicos.

En cuanto a normativas ambientales, la National Environmental Policy Act de 1969 impone estudios de impacto ambiental. La Federal Water Pollution Control Act regula la calidad del agua superficial y las descargas. La Solid Waste Disposal Act de 1965 gestiona residuos peligrosos, mientras que la Toxic Substance Control Act de 1976 regula sustancias químicas riesgosas. La Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act de 1980 permite la recuperación de daños causados por sustancias peligrosas.

En lo que respecta a la seguridad, la Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management de 2015 establece pautas para el manejo del riesgo en seguridad de presas. La Mine Safety Health Act de 1977 vela por la seguridad en la industria minera, considerando los depósitos de relaves como parte integral de la "mina". Además, existen guías específicas para la evaluación del riesgo y planes de procedimientos de emergencia para fallas de represas. El incumplimiento de regulaciones puede acarrear multas sustanciales, aplicadas por diversas agencias dependiendo de la naturaleza de la violación.

En relación con la estabilidad física en Estados Unidos, los tranques de relaves son diseñados conforme a los parámetros y recomendaciones de ICOLD y USSD (United States Society on Dams). La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) ha emitido una guía que proporciona directrices para el diseño seguro de presas y análisis de sismicidad. Aunque no es obligatoria, al ser de carácter federal, algunos estados la utilizan. En cuanto a especificaciones concretas para la estabilidad física, el Título 30 del CDF, sobre Recursos Minerales, establece que el diseño debe ser capaz de resistir un evento de máximas precipitaciones, a menos que se demuestre que la falla de la represa no puede causar pérdida de vidas o daños severos en su entorno.

### 3.2.6. México

En México, el almacenamiento de relaves se rige por regulaciones específicas. En áreas naturales protegidas, la autorización para construir presas de relaves está sujeta a evaluación de impacto ambiental y a los decretos respectivos. Existen requisitos más estrictos para zonas de valor histórico o cultural, donde se puede exigir seguros o garantías de cumplimiento. México y Chile son únicos al contar con regulaciones detalladas para fases de diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves, reduciendo la interpretación judicial.

Las regulaciones mexicanas, como la "Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente" la NOM-141-SEMARNAT-2003, establecen normas para la ubicación y formas de depósitos de relaves. La "Ley Federal de Responsabilidad Ambiental" regula la responsabilidad ambiental y su reparación. La "Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos" se centra en residuos de la industria minerometalúrgica, definiendo su disposición y manejo conforme a normas oficiales mexicanas. La NOM-052-SEMARNAT-1993 establece características y límites de residuos peligrosos, incluyendo relaves de ciertos minerales. Además, las empresas mineras están obligadas a notificar eventos adversos relacionados con derrames o vertidos de materiales peligrosos.

La NOM-141-SEMARNAT-2003 abarca el monitoreo de los tranques de relaves, exigiendo que el titular presente a la autoridad un programa de monitoreo que evalúe la eficacia de las acciones de protección implementadas. En la caracterización del sitio, se incluye la estimación del "Potencial de daño".

Según la normativa, la responsabilidad de la supervisión y cumplimiento recae en la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, a través de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), cuyo personal llevará a cabo las labores de inspección y vigilancia necesarias. Asimismo, la Comisión Nacional del Agua intervendrá en el ámbito de su competencia. Las violaciones a esta norma se sancionarán conforme a la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, la Ley de Aguas Nacionales y demás ordenamientos jurídicos aplicables.

### **3.2.7. Perú**

En Perú, la construcción de presas de relaves con el método de aguas arriba y la disposición submarina o subacuática de desmontes y relaves están expresamente prohibidas por el DS N° 40, a menos que no haya una alternativa ambientalmente viable. El plan de cierre debe incluir medidas para la rehabilitación del lugar, garantizando la estabilidad física y química, y el usuario debe constituir una garantía financiera conforme a la ley.

La legislación peruana también exige estudios geotécnicos e hidrológicos antes de la operación de depósitos de relaves. Se enfatiza la priorización del uso de sólidos contenidos en los relaves, la circulación del agua al proceso de beneficio, el uso de materiales impermeables y sistemas de control. Dado que Perú es un país sísmico, se destaca la importancia de asegurar la capacidad de los depósitos para resistir sismos.

Las leyes y reglamentos relevantes incluyen la Ley N°28.611 de 2005, que regula aspectos ambientales, el DS N°016/1993/EM que establece acciones de previsión y control, y la Ley N°28.090 de 2003 que regula el cierre de minas. Además, el DS N°40 de 2014 prohíbe ciertos métodos de construcción de presas de relaves y disposición de desmontes, y la Ley N°28.271 de 2004 regula los pasivos ambientales de la actividad minera. Normativas como DS N°10-2010-MINAM y DS N°33-2005-EM establecen límites máximos permisibles y reglamentos para el cierre de minas, respectivamente. La Ley N°28.271 regula los pasivos ambientales de

la actividad minera, y el DS N°078-2009-EM implementa medidas de remediación ambiental.

Guías como la Resolución Directoral N°035-95-EM-DGAA y la Resolución Directoral N°19-97-EM/DGAA proporcionan lineamientos para la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental y programas de manejo ambiental, incluyendo el manejo de relaves mineros.

En relación con la regulación de la estabilidad física de los depósitos, la guía que proporciona los parámetros y recomendaciones fundamentales para la construcción de depósitos de relaves es la "Guía Ambiental para el Manejo de Relaves Mineros".

Por otro lado, la legislación peruana establece que el concesionario minero debe llevar a cabo diversas medidas, entre las cuales se incluyen:

- Fundamentar la construcción de los depósitos de relaves en estudios geotécnicos e hidrológicos realizados previamente a la etapa de operación.
- Garantizar, a lo largo de todas las etapas, la resistencia ante sismos, licuefacción o posibles deformaciones estructurales. En este contexto, se deben detallar las medidas adoptadas para fortalecer la estabilidad, como el rebajado de taludes, la implementación de bermas de pie, protección contra la erosión, entre otras.
- Implementar medidas para asegurar la estabilidad física del relave a largo plazo.
- Priorizar la utilización de los sólidos presentes en los relaves para optimizar el área de disposición final y favorecer la circulación del agua contenida en los relaves hacia el proceso de beneficio.
- Emplear materiales impermeables y sistemas de control de filtraciones en el área de la presa y los depósitos de relaves.
- Adoptar medidas para prevenir posibles derrames.
- Establecer acciones para estabilizar las superficies expuestas de los relaves.

Durante la operación de proyectos mineros en Perú, la fiscalización es llevada a cabo por la Dirección General de Minería, con la autoridad para tomar medidas inmediatas para prevenir daños a la salud humana o al ambiente. OSINERGMIN, el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería, tiene la facultad de verificar el cumplimiento de obligaciones legales, contractuales o técnicas por parte de las entidades supervisadas.

Las inspecciones de fiscalización se realizan según lo determinado en el Programa Anual de Fiscalización, siendo al menos anuales y potencialmente más frecuentes cercanas al final de la vida útil de la unidad minera. La Dirección General de Minería es responsable de fiscalizar el cumplimiento de acciones y montos comprometidos en los Planes de Cierre de Minas, a menos que esta función haya sido descentralizada.

En relación con la gestión del riesgo, el proceso de formulación del proyecto exige un "Análisis de riesgos ambientales y a la salud" en el área de influencia del proyecto. Además, el DS-040-2014-EM establece la obligación de contar con un Plan de Contingencia que aborde medidas

de control y respuesta en situaciones de emergencia, con un análisis de riesgo y mecanismos de corrección.

### **3.3. Buenas prácticas en Chile y el mundo respecto a instrumentación y monitoreo de depósitos de relave**

#### **3.3.1. Chile**

En el año 2007, SERNAGEOMIN emitió la "Guía Técnica de Operación y Control de Depósitos de Relaves", la cual tiene como objetivo principal proporcionar recomendaciones, especialmente orientadas a la pequeña y mediana minería, sobre medidas de control operacional y mantenimiento de depósitos de relaves. Algunas de las medidas destacadas, según Ramírez (2007), son las siguientes:

- Realización de controles periódicos mediante densidad in-situ en el muro de arenas, considerando la toma de muestras a 1/3 y 2/3 de la altura total.
- Control del nivel freático mediante piezómetros en el muro de arenas, comparándolo con la cota del nivel del coronamiento del muro de partida impermeabilizado. Se destaca la importancia de mantener el nivel freático por debajo de dicha cota, especialmente en tranques sin un sistema de drenaje eficiente.
- Reducción rápida del nivel freático mediante la evacuación de agua clara de la laguna, con la medición del nivel freático aguas abajo del tranque y el mantenimiento de una estadística gráfica.
- Control periódico de la granulometría de las arenas de relave, con especial atención a aumentos repentinos en el porcentaje de finos, lo cual compromete la seguridad de la obra (formación de bolsones saturados y superficies localizadas menos resistentes al corte). La exigencia actual del contenido de finos en las arenas de relave de los muros de contención en los tranques de relave, es que debe estar constituida por no más de un 20 % de partículas menores del 200 mallas (74 micrones).
- Mantenimiento de una revancha suficiente y verificación periódica del ángulo de talud operacional y el ancho del coronamiento del muro de arenas.
- Operatividad constante de torres colectoras o balsas con bombas de impulsión para evacuar las aguas de la laguna de clarificación.
- Verificación regular del estado de las tuberías de conducción de los relaves, así como de las válvulas y bombas de impulsión de la pulpa de relaves. Programación anticipada del traslado de las tuberías a las posiciones de descarga siguientes.
- Evitar esquinas en ángulo recto en la construcción de muros de algunos tranques, optando por uniones redondeadas para mejorar la resistencia estructural ante sollicitaciones sísmicas.

- Mantener la práctica de compactar el talud exterior a lo largo del muro de arenas con equipos adecuados, como rodillos lisos vibratorios, tractores o bulldozer pesados, para asegurar una compactación adecuada y mejorar la estabilidad sísmica.
- Reparar todas las fisuras o grietas que puedan surgir, ya que, de no cerrarse, constituyen puntos débiles que podrían afectar la eficiencia de la compactación posterior con material de relaves.

Esta guía proporciona recomendaciones más detalladas que la normativa previamente estudiada en cuanto a instrumentación y monitoreo. Va más allá de simplemente solicitar monitoreo, ofreciendo especificaciones concretas y detalladas sobre cómo llevar a cabo dicho monitoreo.

### **3.3.2. Guías internacionales respecto a la instrumentación y monitoreo de depósitos de relave**

En su tesis, Clarkson (2021) realizó una comparación de las guías sobre depósitos de relaves de mejores prácticas existentes y representativas a esa fecha. En esta sección se complementa el análisis de Clarkson, añadiendo un par de guías como "Tailing Dam Safety" de la ICOLD (2020) o la "Guía para el manejo de relaves" de la MAC (2019), además de actualizar algunas a años más recientes como la Guía de la Comisión Europea al año 2018. El listado completo se puede ver en la Tabla 3.3 en donde se encuentra la información necesaria en caso de que se quiera hacer uso de estas guías. Todas brindan recomendaciones para los planes de gestión de seguridad de presas o depósitos, lo cual incluye el monitoreo.

Las consideraciones críticas e integradas en términos de monitoreo e instrumentación que pudo extraer Clarkson son las siguientes:

- Muchas guías establecen que es necesario implementar una estrategia de monitoreo de depósitos, pero no brindan orientación sobre la mejor manera de monitorear los parámetros críticos;
- Se requieren auditorías y revisiones para evaluar el plan de seguimiento frente a la evaluación de riesgos;
- El monitoreo y la instrumentación son valiosos por razones de diagnóstico, predictivas, legales y de investigación;
- Las inspecciones visuales suelen ir acompañadas de un formulario o lista de verificación con el que comparar. Es importante considerar la coherencia de esto como una evaluación "en comparación con lecturas anteriores", pero también reconocer la familiaridad con el área y qué condiciones nuevas o cambiantes pueden inferir, incluso si no están incluidas en la lista de verificación;
- La frecuencia de lectura descrita contradice los estudios de caso en la literatura, donde la frecuencia definida no capturará un evento, si llegara a ocurrir. Por ejemplo, el requisito de evaluar la deformación de la superficie semestralmente o anualmente, cuando la deformación puede acelerarse hasta la falla en varios días, si no horas; y

Tabla 3.3: Principales guías de buenas prácticas. (Modificado de Clarkson 2021).

Región	Autor	Título	Año
Europa	Comision Europea	Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Management of Waste from Extractive Industries	2018
Canadá	Canadian Dam Association (CDA)	Dam Safety Guidelines	2019
	The Mining Association of Canada (MAC)	Developing an Operation, Maintenance and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities	2011
		Guía para el manejo de depósitos de relaves	2019
Australia	Commonwealth Department of Industry Innovation and Science	Commonwealth Department of Industry Innovation and Science	2016
	Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD)	Guidelines on Tailings Dams: Planning, Design, Construction, Operation and Closure	2019
Sudáfrica	Department of Mineral and Energy	Guideline for the Compilation of a Mandatory Code of Practice for Mine Residue Deposits (MRDs) (SANS 10286 ED. 1 1998)	2000
Brasil	National Department of Mineral Production	Portaria 70.389	2017
Estados Unidos	Federal Emergency Management Agency	Dam Safety: An Owner's Guidance Manual	1987
	U.S. Bureau of Reclamation (USBR)	Embankment Dam Instrumentation Manual	1987
	International Committee on Large Dams (ICOLD)	Guidelines for Dam Instrumentation and Monitoring Systems	1983
		Tailings Dam Safety	2020
Chile	Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin)	Guía Técnica de Operación y Control de Depósitos de Relaves	2007

- En algunos casos, el grado y la frecuencia del monitoreo se guían por la categoría de consecuencias de la falla del depósito. (Con lo cual el autor está de acuerdo; sin embargo, esto debe considerarse como obligatorio para garantizar que la practicidad prevalezca sobre la complacencia).

Clarkson concluye que, aunque se reconoce la importancia de las normas, leyes y reglamentos en la identificación de la necesidad de estrategias de instrumentación y monitoreo, la mayoría de las veces, el detalle, la complejidad y el enfoque de estas estrategias se abordan en documentos de directrices o guías. Sin embargo, una evaluación detallada de estas guías revela la prescripción de instrumentación sin proporcionar una justificación clara del "por qué" o "cómo" debería implementarse. La prescripción de instrumentos carece de valor si no se establece claramente el objetivo que se persigue.

### **3.3.3. Organización Internacional de Normalización**

La Organización Internacional de Normalización presenta estándares que especifican los requisitos de las organizaciones en términos de calidad, medio ambiente y gestión de riesgos en ISO 9000, ISO 14000 e ISO 31000, respectivamente. Estos estándares cuentan con técnicas de monitoreo ambiental que se pueden utilizar para evaluar el desempeño de los depósitos, de las cuales Clarkson (2021) logra destacar los siguientes elementos críticamente relevantes para el monitoreo y la instrumentación:

#### **AS/NZS ISO 9000: 2016 – Gestión de Calidad**

- Monitoreo: Determinar el estado de un sistema, un proceso, un producto, un servicio o una actividad. Para determinar el estado puede ser necesario comprobar, supervisar u observar críticamente. El seguimiento es generalmente una determinación del estado de un objeto, realizada en diferentes etapas o en diferentes momentos.
- Inspección: Determinación de la conformidad con los requisitos especificados.

#### **AS/NZS ISO 14000:2016 – Gestión medioambiental**

“La organización deberá monitorear, medir, analizar y evaluar su desempeño ambiental. La organización deberá determinar:

1. Qué es necesario monitorear y medir;
2. Los métodos de seguimiento, medición, análisis y evaluación, según corresponda, para asegurar resultados válidos;
3. Los criterios con los que la organización evaluará su desempeño ambiental y los indicadores apropiados;
4. Cuándo se realizará el seguimiento y medición; y
5. Cuándo se analizarán y evaluarán los resultados del seguimiento y medición.”



La organización debe garantizar la calibración y verificación, la evaluación de la eficacia del sistema de gestión ambiental, comunicar información relevante sobre el desempeño interna y externamente y conservar información documentada.

Cabe señalar que las técnicas de monitoreo ambiental también se pueden utilizar para monitorear y evaluar el desempeño geotécnico del depósito, incluso a través de piezómetros, sensores de flujo y calidad del agua, y otras necesidades superpuestas.

### **ISO 31000 – Gestión de Riesgos**

- **Monitoreo:** Verificación, supervisión, observación crítica o determinación continua del estado para identificar cambios respecto del nivel de desempeño requerido o esperado.
- **Revisión:** Actividad realizada para determinar la idoneidad, adecuación y eficacia del tema para lograr los objetivos establecidos.

Tanto el seguimiento como la revisión deberían ser una parte planificada del proceso de gestión de riesgos e implicar controles o vigilancia regulares. Puede ser periódico o ad hoc (con ese propósito).

Las responsabilidades de seguimiento y revisión deben definirse claramente.

Los procesos de seguimiento y revisión de la organización deben abarcar todos los aspectos del proceso de gestión de riesgos con el fin de:

- Asegurar que los controles sean efectivos y eficientes tanto en el diseño como en la operación;
- Obtener más información para mejorar la evaluación de riesgos;
- Analizar y aprender lecciones de eventos (incluidos los cuasi accidentes), cambios, tendencias, éxitos y fracasos;
- Detectar cambios en el contexto externo e interno, incluidos cambios en los criterios de riesgo y el riesgo en sí, que pueden requerir una revisión de los tratamientos y prioridades del riesgo; y
- Identificación de riesgos emergentes.

#### **3.3.4. Estándar global de gestión de relaves para la industria minera (GISTM, por sus siglas en inglés)**

La publicación del GISTM se realizó en 2020 y resultó de la colaboración del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), los Principios para la Inversión Responsable (PRI, por sus siglas en inglés) y el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM, por sus siglas en inglés). Este estándar, desarrollado por un panel de expertos multidisciplinario con aportaciones de un grupo asesor de múltiples partes interesadas, se

fundamenta en las mejores prácticas actuales y en lecciones aprendidas de incidentes previos en instalaciones de relaves. Su objetivo es establecer un marco integral que promueva la seguridad, la integridad y la responsabilidad en la gestión de relaves en la industria minera a nivel mundial.

Respaldo por un enfoque integrado para la gestión de relaves, el Estándar se propone evitar fallas catastróficas y mejorar la seguridad de las instalaciones de relaves mineros en todo el mundo, abordando aspectos cruciales, entre los cuales destacan:

- Fomentar la participación activa de las comunidades afectadas por el proyecto a lo largo de todo el ciclo de vida de la instalación de relaves mineros.
- Reforzar los estándares de protección ambiental, con especial énfasis en los impactos variables del cambio climático en las instalaciones de relaves mineros y las medidas de restauración.
- Aplicar un enfoque estructurado y robusto para la clasificación de riesgos, tanto en instalaciones en operación como en aquellas en proceso de construcción.
- Establecer un mecanismo de gobernanza para la gestión de las instalaciones de relaves, junto con la identificación de responsabilidades de alto nivel para la implementación del Estándar, con comunicación directa con la Junta ("Comité Directivo" o "Consejo Directivo" que supervisa y proporciona dirección estratégica para la implementación del sistema de gestión de seguridad de los relaves mineros).
- Favorecer la divulgación pública y la transparencia de la información sobre las instalaciones de relaves mineros hacia todas las partes interesadas.

El GISTM subraya la crucial importancia del monitoreo a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida de las instalaciones de relaves. Algunos aspectos esenciales del monitoreo son:

- Concebir, implementar y operar un programa de monitoreo integral destinado a evaluar el rendimiento de la instalación de relaves y sus estructuras asociadas.
- Establecer objetivos, indicadores, criterios y parámetros de desempeño que sean medibles.
- Adaptar los programas de monitoreo según los datos recopilados, asegurando una gestión eficaz de los riesgos.
- Analizar regularmente y de manera recomendada los datos técnicos provenientes del monitoreo.

### **3.4. Identificación de modos de falla de un depósito de relaves**

Para lograr formular una correcta estrategia para establecer instrumentación mínima para el monitoreo geotécnico de los depósitos de relaves, es fundamental comprender los modos de

falla de estos, los cuales ya se mencionaron en la sección 3.1. sobre incidentes.

En su trabajo del año 2021, Clarkson llevó a cabo un análisis exhaustivo de la literatura que se enfoca en la comprensión básica de los distintos modos de falla geotécnica y cómo estos conllevan a la inestabilidad y colapso de las estructuras de las presas de relaves. Este estudio se concentra en aspectos como las fallas en la fundación, erosión interna, rebalse, licuación sísmica y la inestabilidad de taludes.

A continuación, se presentan los modos de falla junto a los factores que contribuyen a la aparición de estos modos de falla y el cómo se desarrolla o progresa la falla en sí a raíz de dichos procesos.

### **3.4.1. Falla de fundación**

El deterioro del rendimiento y las características del suelo de fundación de la presa de relaves puede tener efectos catastróficos que se propaguen hacia el resto de la instalación, independientemente de la competencia, estabilidad o contingencia de la instalación.

#### **Factores que contribuyen a la falla**

El análisis retrospectivo llevado a cabo por Clarkson (2021) sobre varias fallas históricas resultó en la identificación de indicadores cruciales para la causa última de la falla, dentro del conjunto de datos disponibles. Aquellas características que se pueden investigar de manera razonable en la fase de diseño y que podrían contribuir a la falla de fundación incluyen:

- Estructuras geológicas;
- Superficies de deslizamiento de tierra;
- Fisuras en el suelo/roca;
- Presencia de suelos arcillosos, no cohesivos, dispersivos o blandos;
- Presencia de capas débiles y erosionadas en los cimientos;
- Actividad sísmica e inundaciones previstas;
- Inclinación/declinación de la superficie de la fundación; y
- Características del suelo de fundación, incluida la resistencia al corte, la compresibilidad y la permeabilidad.

Además, se identifican características que pueden ser difíciles de investigar en la etapa de diseño pero que podrían contribuir al fallo del suelo de fundación, tales como:

- Sumideros, antiguos pozos mineros y debilidades sobre explotaciones mineras subterráneas activas; y
- Elementos localizados, como cavidades kársticas aisladas y flujos de lava preferenciales.

## Progreso del modo de falla

El desempeño del depósito, capacidad del depósito para cumplir con sus objetivos previstos de manera efectiva y eficiente, se ve afectado por varios factores, entre ellos la resistencia al corte, la permeabilidad y el asentamiento.

**Resistencia al corte:** La falla puede ocurrir de acuerdo con la teoría de Mohr-Coulomb (Holtz y Kovacs 1981), cuando el esfuerzo de corte inducido es mayor que la resistencia al corte que lo contrarresta. Las condiciones desfavorables de resistencia al corte pueden existir previamente o ser introducidas, incluyendo:

- Características de resistencia al corte deficientes del suelo de fundación, sujeto a deslizamiento rotacional;
- Capas del suelo de fundación débiles que pueden representar un plano de debilidad ante cargas crecientes en la superficie;
- Discontinuidades débiles, continuas o casi continuas, con orientaciones desfavorables en el suelo de fundación (Fell et al. 2015), por ejemplo:
  - Superficies de estratificación;
  - Cizallamientos de superficie de estratificación;
  - Planos de clivaje;
  - Juntas de alivio de estrés; o
  - Fallas y cizallamientos.
- Suelos de fundación pre-cizallados con baja resistencia al corte;
- Inconsistencia entre los valores in situ y los valores de diseño para la resistencia al corte;
- Las geomembranas pueden formar un plano de debilidad, especialmente si separan el terraplén (roca permeable) de la base;
- Topografía del sitio y grado de inclinación de las bases;
- Compactación inadecuada de los materiales con relación al diseño, en la etapa de construcción.

**Permeabilidad:** Estratos impermeables o de baja permeabilidad pueden experimentar acumulación de presión de poros debido a la carga en la superficie y la actividad de almacenamiento de relaves. Como la fase líquida en el suelo de fundación recibe la carga inmediata, no hay aumento en la resistencia al corte, lo que puede conducir a la falla de la fundación.

En cambio, los estratos altamente permeables del suelo de fundación pueden transportar flujos significativos que erosionan el material de la base del muro del depósito, transportándolo aguas abajo. Esto puede resultar en erosión interna, hundimientos o una disminución de la resistencia al corte, lo que afecta la estabilidad del muro.

En fundaciones con estratos no cohesivos, se dan condiciones "rápidas" cuando se alcanza el gradiente hidráulico crítico; la presión de poros iguala el peso unitario sumergido del suelo, y por ende la tensión efectiva es nula. Físicamente, el material puede "elevarse" como se ve en la Figura 3.4

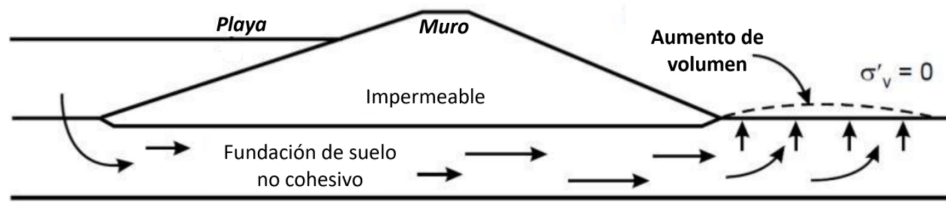


Figura 3.4: Caso 1 de ruptura a los pies del muro. (Modificado de Clarkson, 2021).

En una fundación con una capa de suelo confinado de baja permeabilidad (ej: arcilla) sobre una capa de suelo permeable (ej: arena), puede haber falla si las presiones de filtración a través del estrato permeable superan las presiones de sobrecarga en la zona aguas abajo del muro. Esto puede causar elevación o ruptura de la capa confinante como se puede ver en la Figura 3.5. La ubicación de la ruptura puede relacionarse con la máxima presión de elevación o con un defecto preexistente en la fundación.

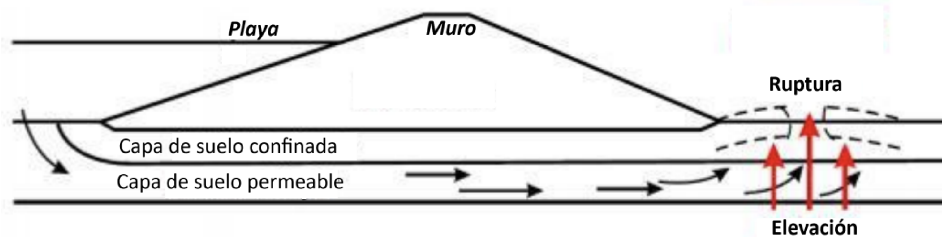


Figura 3.5: Caso 2 de ruptura a los pies del muro. (Modificado de Clarkson, 2021).

La permeabilidad de la fundación también afecta el nivel freático dentro del muro, influyendo en suposiciones simplificadas en la modelización de la estabilidad de taludes.

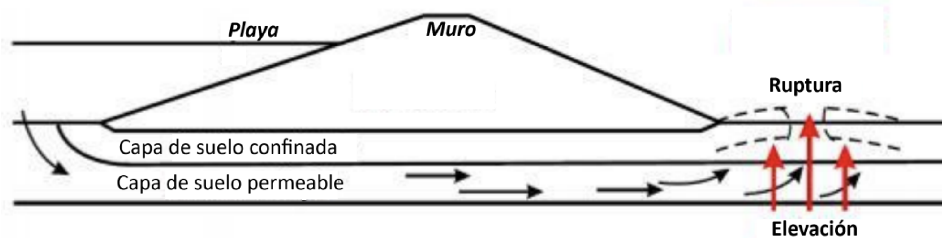


Figura 3.6: Influencia de la permeabilidad de la fundación sobre el nivel freático a través del muro (Modificado de Clarkson, 2021).

**Asentamiento:** Hay tres formas principales de asentamiento:

- Compactación/compresión: la carga aplicada, la remoción del agua subterránea o la vibración reducen el espacio poroso entre las partículas del suelo. Suelos arcillosos y limosos son los más susceptibles;

- Consolidación: El agua es expulsada de forma gradual de los espacios porosos del suelo debido a una carga aplicada. Suelos arcillosos y limosos son los más susceptibles; y
- Erosión: eliminación completa de material fino, causando cavidades e inestabilidad.

Las características en los estratos del suelo de fundación que tienen el potencial de progresar hacia una falla de la fundación incluyen:

- Compresión elástica e inelástica de la fundación debido a cargas en la superficie;
- Asentamiento escalonado que comprende inmediato, consolidación y fluencia;
- Contracción y expansión de suelos expansivos;
- Asentamiento diferencial; o
- Movimiento o subsidencia regional.

La magnitud del asentamiento depende principalmente del esfuerzo inducido y las características del material de la fundación:

- Estratos jóvenes como unidades sedimentarias de grano fino presentan una alta probabilidad de presentar fracturas y meteorización;
- Las características de contracción y expansión (determinadas por la presencia de minerales que absorben grandes cantidades de agua, como esmectita, montmorillonita, vermiculitas y algunos minerales mixtos) deben considerarse junto con otras propiedades que puedan fomentar la expansión natural de un suelo; y
- Por el contrario, los suelos expansivos también pueden volverse muy duros cuando están secos, lo que resulta en la contracción y fisuración del terreno.

El asentamiento y la consolidación pueden progresar hacia una falla al desestabilizar las medidas de protección supuestas e integradas, la infraestructura del depósito, su instrumentación y al mismo muro.

### **3.4.2. Erosión interna**

En cualquier situación en la que el agua sea contenida por estructuras de tierra, las partículas quedan expuestas a un gradiente hidráulico (pérdida de energía por unidad de longitud) y a presiones de filtración. Por lo general, se espera que se produzca la filtración y esto no suele ser problemático, siempre y cuando esté bajo control, no esté contaminada y no haya migración de partículas asociada (Jantzer 2009). Sin embargo, cuando el gradiente hidráulico y la velocidad son lo suficientemente altos como para vencer la estructura geométrica y la estabilidad del suelo, las partículas pueden empezar a desprenderse, moverse y desplazarse a través de la estructura de tierra, la base o cerca de los apoyos e infraestructura. Existen diferentes mecanismos de erosión interna, siendo el más común el *piping*, que es que se aborda

en este trabajo. El *piping* describe cómo se comporta la estructura del suelo cuando la erosión interna crea un camino de filtración continuo y abierto, actuando como una ruta de flujo no protegida y preferencial para la filtración.

En pocas palabras, erosión interna es el proceso general de eliminación de partículas finas por el flujo de agua, mientras que el *piping* es un resultado específico de este proceso en forma de canales o tubos que se forman en el suelo.

## **Factores que contribuyen a la falla**

La erosión interna se inicia cuando se produce una combinación desfavorable de susceptibilidad del suelo, condiciones de estrés y carga hidráulica en alguna ubicación del depósito. Las guías para cuantificar el riesgo de diferentes condiciones están detalladas por la Oficina de Recuperación de los Estados Unidos (USBR, 2015) y Fannin y Slangen (2014).

USBR (2015) ha detallado la siguiente lista de parámetros de influencia:

### ***Propiedades del Suelo:***

- Plasticidad: inversamente proporcional a la susceptibilidad a la erosión, relacionada con la fuerza de unión entre partículas;
- Graduación y tamaño de partícula: Cuanto mayor sea el tamaño de la partícula, más energía se requerirá para moverlas. Los suelos con una graduación amplia, especialmente si el suelo tiene una graduación discontinua, son particularmente susceptibles a una baja estabilidad interna (USBR 2015);
- Densidad: Un suelo más denso compone partículas más compactas, lo que dificulta el desprendimiento de las partículas del suelo y la iniciación de la erosión (USBR 2015);  
y
- Erodabilidad: Se refiere a la susceptibilidad de un material a ser erosionado o desplazado por la acción del agua u otros agentes externos, en el contexto esta es influida en gran medida por la plasticidad y el contenido de humedad compactada.

### ***Condiciones de Esfuerzo:***

- Influencia de las condiciones de esfuerzo en la estabilidad Interna: Las condiciones de esfuerzo definen si un material experimenta el proceso de sufolavado o sufusión. En el sufolavado, se produce una pérdida de masa sin cambio en el volumen y un aumento en la conductividad hidráulica. En la sufusión, las partículas finas transportadas por el flujo de filtración inducen el colapso de la estructura del suelo (FEMA 2014);
- Defectos en el muro y su base: Un mecanismo principal para la iniciación de la erosión interna.

### ***Condiciones Hidráulicas:***

- Papel de la filtración concentrada: Discontinuidades, defectos o capas naturalmente permeables en el muro o la base donde los flujos se concentran en caminos preferenciales de menor resistencia; y
- Gradientes: Los gradientes verticales (ascendentes) pueden fomentar el levantamiento o la ruptura y pueden llevar a salidas no filtradas (USBR, 2015) o a la iniciación de la erosión. Los gradientes horizontales (internos) a través de un muro y/o base son consideraciones críticas para la erosión por filtración concentrada, el lavado de erosión hacia atrás o el sufolavado/sufusión.

## Progreso del modo de falla

La falla puede desarrollarse en respuesta a tres escenarios de carga generales (Clarkson, 2021):

- Operación estática/normal (gestión deficiente del agua);
- Hidrológica (inundación, niveles imprevistos del depósito); o
- Sísmica (deformación/fisuración que proporciona la vía inicial para la erosión).

”Históricamente, la mayoría de las fallas por erosión interna han ocurrido cuando el embalse estaba a aproximadamente 1 metro del nivel máximo histórico o más alto” (USBR 2015). USBR (2015) resume los factores que tienen el potencial de contribuir al desarrollo de la erosión interna y el *piping*:

- ***Piping* de erosión retrograda:** La erosión comienza en el punto de salida de filtración y erosiona aguas arriba (hacia atrás). Con la distancia aguas arriba, el proceso genera caminos de filtración más cortos, gradientes hidráulicos más altos, un mayor flujo y un mayor potencial de erosión. Cuatro condiciones se identifican como características coincidentes (USBR 2015):
  - Trayecto de flujo o fuente de agua;
  - Salida no protegida o sin filtrar;
  - Material erosionable dentro del trayecto de flujo; y
  - Formas de techo continuas y estables que permiten que se forme el conducto.
- **Migración interna:** Un vacío que puede llegar a la superficie como un sumidero, iniciado debido a inestabilidad/sufusión interna, o debido a defectos en la fundación del muro. El suelo de amplia granulometría y sin cohesión no puede soportar un techo con cavidades, colapsando repetidamente hasta que la estructura del muro se vea comprometida;
- **Erosión por fuga concentrada:** Concentración de flujo a través de una grieta pre-existente, potencialmente causada por desecación o asentamiento diferencial causando erosión;



- **Erosión de contacto:** La erosión selectiva de partículas finas en el muro o la base como resultado del flujo de filtración a lo largo del contacto entre ambos; y
- **Sufusión y Sufosión:** En la sufusión, se produce una pérdida de masa sin cambio en el volumen y un aumento en la conductividad hidráulica. En la sufosión, las partículas finas transportadas por el flujo de filtración inducen el colapso de la estructura del suelo (Fannin y Slangen 2014).

A menos que las fuerzas erosivas sean mitigadas, el proceso de erosión continuará y potencialmente se agrandará. La fase final del desarrollo de la erosión interna y el *pipíng* es la brecha: una liberación descontrolada de material.

### 3.4.3. Rebalse (Overtopping)

La falla por rebalse o overtopping se produce cuando se excede la capacidad del depósito de relaves y puede tener lugar debido a diversas causas, como afluencias excesivas, mal funcionamiento de las estructuras de aliviadero (estructura diseñada para liberar de manera controlada el exceso de agua almacenada en el depósito) o salida, capacidad insuficiente del aliviadero, asentamiento de la presa, deslizamiento de tierra externo al embalse (ZagonJolli 2007) o incluso por la acción de olas impulsadas por el viento que llegan a subir y rebasar el depósito.

#### Factores que contribuyen a la falla

La estabilidad del depósito durante el desbordamiento está directamente vinculada a la resistencia a la erosión del material del muro. Zhang et al. (2016) detalla los mecanismos de erosión superficial y proporcionan una caracterización de la erosión del suelo como base para el análisis de la erosión durante el rebalse. La erosión superficial, según Zhang et al. (2016), es un proceso físico donde el flujo de agua elimina partículas de suelo de la superficie del muro.

#### *Erosión superficial*

La erosión superficial es un proceso físico en el cual el flujo de agua elimina partículas de suelo de la superficie de la presa.

En fase inicial, en suelos granulares, el flujo laminar arrastra partículas con fuerzas viscosas, mientras que en suelos cohesivos se pueden presentar tres tipos de erosión: pozo, línea y masa, que se definen por la separación individual de partículas, separación en "láminas delgadas" y separación en "trozos" de sedimento, respectivamente.

La erosión superficial implica el transporte de sedimentos, ya sea a lo largo del lecho por rodadura y saltación, o en suspensión en el fluido, sostenidos contra la gravedad por la turbulencia ascendente (Zhang et al., 2016).

#### *Caracterización de la erosionabilidad del suelo*

La caracterización de la erosionabilidad del suelo implica evaluar su facilidad para iniciar la erosión. Se utiliza el esfuerzo cortante erosivo crítico y el coeficiente de erosionabilidad, que se relaciona con propiedades específicas del suelo. En suelos granulares, se consideran factores como la distribución del tamaño de los granos y la densidad de las partículas, mientras que en suelos cohesivos se analizan aspectos como el contenido de arcilla, la densidad aparente y la composición química del agua. La compactación, la cohesión y el contenido de humedad también influyen en la erosionabilidad.

Algunas consideraciones influyentes, aunque menos comunes, incluyen:

- Acción del oleaje/avance de las olas.
- Desbordamiento de inundaciones (flujos de inundación, esorrentía de lluvia, cargas de inundación, afluencia de cuencas).
- Deslizamiento de tierra del terreno circundante.

### **Progreso del modo de falla**

En depósitos con muro de materiales no cohesivos, el proceso de rotura de un muro granular por rebalse, definido principalmente por la "erosión superficial progresiva", se caracteriza por las siguientes etapas:

1. Inicio del rebalse.
2. Erosión de laderas.
3. Posible erosión continua y deslizamientos superficiales inducidos.
4. Desarrollo gradual de un canal de brecha acelerado por erosión lateral.

La fase de desarrollo de la brecha (fase 4) implica que el proceso se vuelve rápido cuando la socavación alcanza el borde aguas arriba del coronamiento del muro, resultando en la falla por aplanamiento de la pendiente, apertura de brechas y erosión aguas abajo.

En depósitos con un muro de materiales cohesivos, el proceso de rotura del muro se define principalmente por la "erosión por corte de cabeza", la cual presenta las siguientes etapas:

1. Progresión del desbordamiento inicial y erosión superficial aguas abajo.
2. Desarrollo de cortes de cabeza a partir del desbordamiento en la cara aguas abajo.
3. Fusión de desbordamientos en cascada.
4. Concentración de presión y fuerzas erosivas en la punta del talud, creando un rodillo inverso.
5. Aceleración de la retirada de la erosión por corte de cabeza.

6. Ampliación gradual de la brecha debido al lavado de pendientes laterales.
7. Llegada del corte de cabeza a la cresta aguas arriba.

La fase de desarrollo de la brecha (fase 5 a 7) ocurre rápidamente cuando el corte alcanza el coronamiento aguas arriba, resultando en la falla por la ampliación de la brecha en profundidad y lateralmente, deteniéndose solo cuando se agotan los niveles de desbordamiento o aumenta la elevación aguas abajo.

### 3.4.4. Licuefacción Sísmica

La licuefacción o licuación sísmica es un proceso en el cual un suelo, pierde temporalmente su resistencia debido a la saturación de agua durante eventos sísmicos. Este cambio en la resistencia puede resultar en una pérdida significativa de capacidad de carga y, por ende, en la disminución de la estabilidad del muro del depósito de relaves. Las partículas del suelo, al perder contacto entre sí, se vuelven fluidas momentáneamente, afectando negativamente la integridad de la estructura.

La licuefacción sísmica es un fenómeno inducido por la sismicidad, donde la carga dinámica generada es cíclica a corto plazo y actúa en direcciones tanto horizontales como verticales (Fell et al. 2015). Este movimiento sísmico posee el potencial de desestabilizar el muro del depósito, propagar grietas internas e incrementar la presión de poro, lo que, a su vez, puede propiciar la licuefacción en diversos materiales.

#### Factores que contribuyen a la falla

Los terremotos representan la fuente más habitual de sismicidad, y la magnitud del daño provocado por un evento está condicionada por varios elementos (Fell et al., 2015):

- **Sismicidad de la zona:** La actividad sísmica inherente a la región.
- **Materiales de cimentación y condiciones topográficas:** Las características del suelo y la topografía en la ubicación del depósito, específicamente la ubicación del muro.
- **Tipo y construcción de la presa:** La estructura y diseño de la presa.
- **Nivel del agua en la laguna durante el sismo:** La cota de la laguna de aguas claras en el momento del sismo.
- **Potencial de licuefacción del material de relaves:** La susceptibilidad del material de relaves a la licuefacción (Liang & Elias, 2010).

#### *Potencial de licuación*

El potencial de licuación se refiere a la capacidad de un material para comportarse como

un líquido debido a la pérdida de resistencia en respuesta a ciertas condiciones, como vibraciones sísmicas o saturación por agua. En situaciones de licuefacción estática o dinámica de suelos saturados o parcialmente saturados, la rigidez y la resistencia al corte del material se reducen significativamente debido a los rápidos aumentos de carga. Este aumento de carga conlleva un incremento en el esfuerzo cortante, junto con la incapacidad de las presiones de poro resultantes para drenar o disiparse lo suficientemente rápido. La elevación de la presión de los poros supera la presión de contacto entre los granos del suelo, alterando la estructura del suelo y provocando su "licuefacción". Davies et al. (2002), al referirse a las características de licuefacción de los relaves, identifican cuatro posibles comportamientos del material:

- Ablandamiento por deformación frágil (licuefacción total con potencial de deformación ilimitada): comportamiento contractivo tras el corte hasta la condición de estado estacionario.
- Ablandamiento por deformación limitado (licuefacción limitada con deformación limitada): cierta contracción inicial seguida de dilatación del muro de relaves.
- Comportamiento dúctil con corte no drenado pero sin un grado significativo de ablandamiento por deformación (sin licuefacción).
- Endurecimiento por deformación (sin licuefacción o deformación apreciables); dilatación esencialmente pura.

### ***Sismicidad inducida***

Aunque menos frecuentes que los eventos sísmicos naturales, se ha demostrado empíricamente que los "sismos provocados por el hombre" son causados por actividades mineras y de exploración. Las fuentes de estos sismos, incluyen (Clakson, 2021):

- Disminución del esfuerzo normal:
  - Cambios en las fuerzas tectónicas causadas por la minería subterránea y la consiguiente disminución de las aguas subterráneas.
  - Explosión de rocas en minas subterráneas activas e inactivas.
  - Extracción de petróleo y gas.
- Aumento de la presión de los poros:
  - Inyección de fluidos y fracturación hidráulica.
  - Aumento de la presión de poro en fallas activas, ya sea por filtraciones, monzones o inducidas.
- Aumento de la tensión de corte:
  - Sismos inducidos por el yacimiento, caracterizados no solo por la carga del yacimiento, sino también por "el aumento de la presión del agua de los poros en las fallas, lo que lleva a una reducción en la resistencia al corte sobre fallas ya estresadas" (Fell et al. 2015).

## Progreso del modo de falla

La incidencia sísmica puede afectar diversas partes de un depósito de relaves en varios niveles, según investigaciones de Fell et al. (2015):

- Asentamiento y grietas: Manifestación de asentamientos y grietas a lo largo y a través del muro, especialmente en proximidad a coronamiento del depósito, lo que puede resultar en una disminución del margen de seguridad y un aumento en el riesgo de desbordamiento.
- Erosión y piping: Posibilidad de desarrollo de erosión interna e iniciación de piping en las grietas, con implicaciones en términos de filtraciones y estabilidad del talud.
- Licuefacción y pérdida de resistencia: Riesgo de licuefacción o pérdida de resistencia al corte debido al aumento de las presiones intersticiales en el terraplén y sus cimientos.

En términos más específicos, la carga sísmica podría desencadenar:

- Inestabilidad de taludes: Inestabilidad en los taludes tanto aguas arriba como aguas abajo del muro, con posibles deformaciones significativas.
- Asentamientos y fisuras diferenciales: Asentamientos diferenciales y formación de fisuras debido a fallas activas que atraviesan la fundación del muro.
- Movimiento diferencial: Movimiento diferencial entre el muro, los estribos y las estructuras de aliviadero, dando lugar a la formación de grietas transversales.
- Daño a infraestructuras de drenaje: Daño a las obras de drenaje que atraviesan el muro y asentamientos diferenciales que generan grietas.

### 3.4.5. Inestabilidad de taludes

Esta falla se manifiesta en un desprendimiento significativo del volumen del muro de contención, comprometiendo su equilibrio y generando desplazamientos y deformaciones que amenazan la integridad de la contención de relaves.

El monitoreo continuo de la pendiente del muro en depósitos de relaves es esencial para detectar tempranamente la inestabilidad. Este proceso puede realizarse de manera efectiva mediante múltiples métodos de verificación, especialmente valiosos cuando los resultados de monitoreo presentan inconsistencias (Fell et al. 2015).

#### Factores que contribuyen a la falla

La evaluación de la probabilidad de inestabilidad de taludes demanda la consideración cuidadosa de diversos aspectos, entre ellos, el alcance de los comportamientos potenciales del

suelo y la influencia del tiempo y la tasa de carga. En el diseño y análisis de la estabilidad de taludes, se centran en características fundamentales de los materiales, que abarcan (Clarkson, 2021):

- **Selección de resistencia al corte:** Considerando influencias como la "perturbación de la muestra, variabilidad en los materiales prestados, posibles variaciones en el contenido de agua de compactación y densidad de los materiales de relleno, tasa de carga, efectos de fluencia y posiblemente drenaje parcial" (USACE 2003).
- **Mecánica de suelos en estado crítico:** Describiendo que los suelos bajo corte alcanzan una relación densidad/vacíos crítica, donde no hay más cambios en el esfuerzo cortante ni en el volumen, y destacando la diferencia en el comportamiento entre suelos muy consolidados y dilatativos.
- **Resistencia no drenada:** Asignada a suelos de grano fino que se cargan rápidamente, como al final de la construcción, durante inundaciones o eventos sísmicos.
- **Resistencia drenada:** Esperada en materiales más permeables como arenas y gravas, que permiten la disipación instantánea de la presión de poro.
- **Presiones de agua de poro y resistencias asociadas:** Donde mayores presiones de poro dentro de las pendientes generan un aumento en los esfuerzos totales, y las diferencias en la saturación de los materiales pueden alterar su comportamiento.
- **Condiciones de carga:** Exige el análisis de diversas condiciones de carga y situaciones.
- **Influencias externas que aumentan la tensión de corte:** Incluyendo cambios en el ángulo de la pendiente, descargas, sobrecargas, tensiones sísmicas, y presiones laterales, entre otras.
- **Influencias internas que disminuyen la resistencia al corte:** Tales como la erosión, desintegración o cambios en el régimen hídrico.

## Progreso del modo de falla

El deterioro del rendimiento en las pendientes de los depósitos de relaves puede manifestarse a través de diversos mecanismos, según el informe del USACE en 2003:

- **Falla por corte:** Desplazamiento de una sección del terraplén a lo largo de una superficie discreta, en relación con su masa adyacente.
- **Correderas rotacionales (circulares):** Este fenómeno, considerado convencional en el análisis de estabilidad, implica movimientos de corte a través de zonas de espesor apreciable.
- **Deslizamientos traslacionales:** Desplazamiento plano a lo largo de la interfaz entre estratos de diferente rigidez.
- **Falla compuesta:** Combinación de los mecanismos de deslizamiento, donde una superficie circular de deslizamiento encuentra un estrato rígido, y la superficie de falla ocurre a lo largo de la interfaz, en lugar de cortar.

- **Desprendimiento de la Superficie:** Se refiere al corte y movimiento río abajo de una porción superficial del muro.
- **Deformación/Asentamiento/Hundimiento Excesivos:** Consolidación de los cimientos, provocando desplazamiento de partículas y desprendimiento de una pendiente construida uniformemente, afectando la integridad de la pendiente. La tasa de deformación influye más que la magnitud en la estabilidad.
- **Creep:** Deformación lenta y continua de los materiales del depósito con el tiempo, bajo la influencia de cargas aplicadas, y/o progresión de numerosos deslizamientos de pequeña escala. Este proceso es lento, duradero y difícil de recuperar.

En cada uno de los modos de falla mencionados para los depósitos de relaves, el agua desempeña un papel crucial. Desde las fallas en la fundación hasta la erosión interna, el rebalse, la licuefacción sísmica y la inestabilidad de taludes, el agua interviene de manera significativa en cada uno. Esta presencia hídrica influye en la estabilidad del terreno, la saturación de los materiales, la erosión de las estructuras y la respuesta sísmica del depósito. En resumen, el agua emerge como un factor fundamental que puede potenciar los riesgos asociados a cada uno de estos modos de falla, subrayando la importancia de una gestión efectiva del agua en la prevención y mitigación de desastres en los depósitos de relaves.

### 3.5. Identificación de parámetros críticos

Como se mencionaba en la sección anterior, la estabilidad física de un depósito se puede ver comprometida a través de varios modos o mecanismos de falla, cada uno de los cuales está influenciado por factores cruciales que condicionan su inicio. A estos factores fundamentales se les conoce como parámetros críticos.

Los parámetros críticos son propiedades cuantificables del depósito que individual o conjuntamente con otros parámetros podrían afectar a su estabilidad física. Entre ellos se cuentan la presión de poros del muro y cubeta, la pendiente del muro, la altura de la revancha, el caudal de recolección del sistema de drenaje, entre otros (Fundación Chile, 2018).

La consideración y comprensión de los parámetros críticos desempeña un papel determinante en la estabilidad y seguridad del depósito, conformando una de las partes más importantes en el monitoreo de estos. La interacción dinámica de factores como la sismicidad, la calidad de los materiales de construcción y las condiciones topográficas hace que la identificación y evaluación de estos parámetros críticos sean esenciales para prevenir posibles fallas y velar por la integridad a largo plazo de los depósitos. En este contexto, se revisan de manera detallada los aspectos clave relacionados con estos parámetros, destacando su impacto en la seguridad y estabilidad de los depósitos de relaves, y cómo su consideración minuciosa contribuye a un diseño robusto y resistente ante diversos escenarios.

Entonces, cada mecanismo de falla posee sus propios parámetros críticos, cuyo monitoreo y control, así como cualquier alteración en sus valores, pueden desencadenar una situación de inestabilidad. Estas propiedades cuantificables tienen el potencial de impactar la estabilidad

física de un depósito de manera individual o en combinación con otros factores.

Continuando con la estructura establecida en la tesis de Clarkson (2021), y considerando las contribuciones de Flores (2019) y Carvajal (2018), se identifican los siguientes parámetros críticos, que se abordan debido a su papel en la identificación y comprensión de los modos más frecuentes de falla de los depósitos de relaves:

- **Nivel freático:** La cota a la que se encuentra el nivel del agua en el depósito.
- **Presiones de poros:** La presión ejercida por los fluidos en los espacios entre las partículas del suelo.
- **Filtraciones:** El flujo de agua a través del muro o la fundación.
- **Deformaciones:** Cambios en la forma o dimensiones del muro debido a cargas externas.
- **Aceleraciones sísmicas:** La medida de la aceleración experimentada por el depósito durante un evento sísmico, ya sea natural o inducido.
- **Esfuerzos totales:** Tensiones percibidas por el muro o la fundación del depósito, debidas al peso propio, cargas externas o presiones de fluidos.
- **Condiciones climáticas:** Factores como la lluvia intensa, nieve o altas temperaturas que puedan afectar la estabilidad del depósitos así como alterar sus condiciones.
- **Turbidez:** Medida de la opacidad o la falta de claridad del agua que se encuentra en el depósito, principalmente en el sistema de drenaje. Indica cuánto sedimento o partículas sólidas hay suspendidas en el agua.
- **Índices hidroquímicos:** Medidas de la composición química del agua,
- **Revancha:** Distancia vertical entre la superficie del agua del depósito o la playa y el coronamiento del depósito.
- **Distancia a la laguna:** Distancia entre el coronamiento del muro y la laguna de aguas claras.

Estos parámetros ejercen impactos específicos en el depósito, como detalla Clarkson (2021):

**Nivel freático:** El nivel del agua en el estanque de una instalación de almacenamiento de relaves ejerce una influencia significativa en el comportamiento de la superficie freática. Monitorizando este nivel como punto de recarga y la tendencia de la superficie freática, se pueden comprender mejor dos escenarios de carga: operación estática/normal (relacionada con la gestión del agua) e hidrológica (inundaciones, niveles inesperados de embalses).

**Presión de poros:** La superficie freática establece una presión de poro cero, y la presión hidrostática del agua aumenta linealmente con la profundidad. Sin embargo, suelos de grano fino pueden tener presiones de poros negativas por encima del nivel freático. Cambios en la presión pueden desequilibrar las fuerzas impulsoras y de soporte, desestabilizando la



estructura del depósito.

**Filtraciones:** Los procesos de filtración describen el flujo de agua a través del terraplén, pudiendo causar inestabilidades como *piping*, inestabilidad de taludes, levantamiento de ci-mientos (aumento de presión de poro) o pérdidas excesivas de agua.

**Deformaciones:** La deformación y el movimiento pueden variar en escala y comportamiento. Cada observación requiere una evaluación de la causa raíz, considerando que el movimiento a menudo no está dentro del plan y diseño. La deformación puede manifestarse en la superfi-cie o internamente, con comportamientos típicos como movimientos verticales, horizontales, rotacionales o traslacionales.

**Aceleraciones sísmicas:** Las fuerzas de aceleración generadas por eventos sísmicos na-turales o inducidos por actividades mineras, se comprende a través de terremotos y técnicas de monitoreo. Las actividades mineras pueden inducir sismicidad, con desencadenantes como explosiones subterráneas, extracción de petróleo y gas, inyección de fluidos y fracturación hidráulica. La magnitud, distancia y la posible influencia se evalúan para gestionar riesgos.

**Esfuerzos totales:** Proporcionan información sobre la magnitud y la dirección de las ten-siones. Esta medición no solo revela la contribución relativa del agua y el suelo a las presiones totales, especialmente cuando se combina con datos de piezómetros, sino que también permite realizar una comparación entre las condiciones reales y las previstas en el diseño. Divergencias significativas entre las tensiones observadas y las anticipadas podrían indicar anomalías en el muro o fundación, factores que posiblemente no fueron considerados en la fase de diseño. Por ende, la evaluación y gestión de riesgos asociados pueden requerir una revisión y ajuste.

**Condiciones climáticas:** La variabilidad climática impacta el balance hídrico de la ins-talación de almacenamiento de relaves, influyendo en diferentes modos de falla desde una perspectiva geotécnica. Comprender la cantidad y ritmo del cambio es crucial para gestionar y prevenir desafíos futuros.

**Turbidez:** La turbidez puede ser un indicador importante de la presencia de partículas finas y sólidos en suspensión en el agua. Estas partículas pueden provenir de la erosión de los relaves y otros materiales circundantes. El aumento de la turbidez puede tener consecuen-cias negativas, como la degradación de la calidad del agua y la afectación de los ecosistemas acuáticos. Además, una alta turbidez puede indicar procesos de erosión y sedimentación en el depósito, lo que podría afectar la estabilidad física del muro.

**Índices hidroquímicos:** Los índices hidroquímicos, que incluyen la composición quími-ca del agua y los sedimentos, ofrecen información valiosa sobre la interacción entre el agua y los materiales depositados, como por ejemplo la presencia de sustancias corrosivas que pue-dan degradar estructuras de retención como diques o el muro, también ayuda a evaluar el potencial de lixiviación de sustancias desde los relaves, el cual puede alterar la composición de los materiales, afectando su cohesión y resistencia.

Además Clarkson (2021) divide estos parámetros en indicadores directos (parámetros críti-cos) e indicadores de apoyo (parámetros de apoyo) según su importancia relativa para cada

modo de falla, como se indica en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Parámetros críticos y de apoyo para cada modo de falla. (Modificado de Clarkson, 2021)

Modo de falla	Parámetros críticos	Parámetros de apoyo
Falla de fundación	Presiones de poros Filtraciones Deformaciones Esfuerzos totales	Nivel freático Aceleraciones sísmicas Condiciones climáticas
Erosión interna	Filtraciones Aceleraciones sísmicas Turbidez Índices hidroquímicos	Nivel freático Presiones de poros Deformaciones
Rebalse	Nivel freático Condiciones climáticas Revanca Distancia a la laguna	Defomraciones Aceleracioes sísmicas
Licuefacción sísmica	Nivel freático Presiones de poros Aceleraciones sísmicas	Filtraciones Deformaciones Condiciones climáticas
Inestabilidad de taludes	Nivel freático Presiones de poros Filtraciones Deformaciones Aceleraciones sísmicas Esfuerzos totales	Condiciones climáticas

### 3.6. Identificación de eventos gatilladores

Los eventos gatilladores son los agentes, fenómenos o intervenciones de tipo natural (lluvia, viento, sismo o un deslizamiento de tierra que alcance el depósito, entre otros) o de tipo antrópico (modificaciones en los canales de contorno, obras de desvíos de cauces, falla de vertedero de emergencia o en el sistema de recuperación de aguas claras, entre otros), que también pueden afectar la estabilidad del depósito. Se debe tener en consideración que la falla física del depósito no necesariamente es debida a la ocurrencia de un solo factor, sino que pueden ser resultado de la combinación de varios (Fundación Chile, 2018).

Estos eventos pueden estar vinculados a condiciones naturales (N), problemas de diseño (D) u operación (O) del depósito, son capaces de alterar los parámetros críticos, y según el grado de alteración, pueden llegar a desencadenar una falla. La Tabla 3.5 menciona los principales eventos gatilladores capaces de afectar un parámetro crítico específico. El objetivo de esta tabla es ayudar a priorizar los parámetros críticos; ya que por ejemplo, si para un depósito en particular es más probable la ocurrencia de un evento gatillador natural particular, se prestará mayor atención a sus parámetros críticos correspondientes. Del mismo modo, si se

identifican eventos gatilladores relacionados con operaciones o diseño, se podrá dar prioridad a esos parámetros críticos en la estrategia de monitoreo.

Tabla 3.5: Eventos gatilladores que alteran los parámetros críticos (Naturales (N), Problemas de Diseño (D) u Operación (O) del depósito). (Modificado de Clarkson 2021 y Carvajal 2018)

Parámetro crítico	Modo de falla	Evento gatillador
Nivel freático	Rebalse Inestabilidad de taludes Licuación sísmica	Lluvia, crecidas o viento (N). Obstrucción de los sistemas de drenaje (O). Falla de vertedero de emergencia (O). Falla del sistema de recuperación de aguas claras (O, D). Falla de los canales perimetrales (D, O).
Presión de poros	Falla de fundación Inestabilidad de taludes Licuación sísmica	Filtraciones desde el sistema de drenaje hacia la fundación (O). Lluvias que saturan los diferentes estratos (N). Sismos pueden inducir movimientos en la fundación (N). Gradiente hidráulico muy alto (O). Colapso del sistema de drenaje (N, O).
Filtraciones	Falla de fundación Erosión interna Inestabilidad de taludes	Asentamientos diferenciales generados por sismos u operación (N, O). Lluvias (N). Gradiente hidráulico muy alto (O). Colapso u obstrucción (parcial o completa) del sistema de drenaje (N, O). Falla de los canales perimetrales (D, O)
Deformaciones	Falla de fundación Inestabilidad de taludes	Sismos pueden inducir movimientos en la fundación (N). Cargas asociadas a mayores disposiciones de relave con respecto al diseño original (O). Reducción del prisma resistente mediante excavaciones en el pie del muro (O).
Aceleraciones sísmicas	Erosión interna Inestabilidad de taludes Licuación sísmica	Sismos (N). Sismicidad inducida producida por la actividad minera y de exploración (O).
Esfuerzos totales	Falla de fundación Inestabilidad de taludes	Cargas asociadas a mayores disposiciones de relave con respecto al diseño original (O). Estratos de suelo no identificados que puedan disminuir la capacidad de soporte de la fundación (D).
Revancha	Rebalse	Lluvias, crecidas o viento (N).
Distancia a la laguna	Rebalse	Lluvia, crecidas, viento o deshielo (N). Falla de vertedero de emergencia (O). Gradiente hidráulico muy alto (O).
Condiciones climáticas	Rebalse	Lluvia, crecidas, viento o deshielo (N).
Turbidez	Erosión interna	Filtraciones desde el sistema de drenaje hacia la fundación (O). Colapso u obstrucción (parcial o completa) del sistema de drenaje (N, O).
Índices hidroquímicos	Erosión interna Inestabilidad de taludes	Colmatación de drenes (N, O). Meteorización química (diluciones, precipitaciones, cementaciones) (N, O).

## Capítulo 4

# Catastro de instrumentación de monitoreo de depósitos de relaves en Chile

En esta sección, se elabora el catastro de la instrumentación utilizada en el monitoreo de depósitos de relaves en Chile, clasificándolos según las categorías establecidas en el Decreto 50 del MOP. La recopilación de este registro se basa en la información proporcionada por Sernageomin, que solicitó a las empresas responsables de los depósitos que completaran una ficha de instrumentación geotécnica asociada al monitoreo de depósitos de relaves.

El principal propósito de este catastro es que sirva como referencia fundamental para investigaciones y proyectos futuros en este ámbito, lo cual se conoce como *benchmarking*. En este contexto, el benchmarking se define como la utilización de datos y experiencias de monitoreo de otros depósitos de relaves. Esto fomenta la posibilidad de compartir información entre distintas empresas encargadas de la administración de depósitos de relaves, propiciando el intercambio de conocimientos y mejores prácticas en el monitoreo de estos depósitos.

Esta sección se inicia con una detallada explicación de la ficha de instrumentación que las empresas responsables de depósitos de relaves en Chile debieron completar a solicitud del Sernageomin el año 2023. Posteriormente, se presenta la clasificación de los depósitos que respondieron la ficha, para finalmente presentar los resultados obtenidos, es decir, el catastro de instrumentación de monitoreo.

## 4.1. Ficha de instrumentación geotécnica

A través del Memorandum N°033/2023, Sernageomin solicitó a las empresas que disponen de depósitos de relaves información acerca de su instrumentación operativa de acuerdo con una ficha de instrumentación geotécnica específica, con la finalidad de complementar y mejorar el catastro de depósitos de relaves dispuesto en la pagina web con información actualizada de monitoreo de relaves.

A continuación se realiza una breve descripción de la ficha, detallando los tipos de monitoreo consultados junto a una breve descripción del requerimiento e instrumento, detalles que se exponen como resultados en los anexos.

### 4.1.1. Piezómetros

Los piezómetros son instrumentos de medición utilizados para determinar las presiones de poros y el nivel del agua en estructuras geotécnicas. A continuación, se detallan los requerimientos para cada ítem para “Piezómetros”.

Tabla 4.1: Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Piezómetros”.

Ítem	Requerimiento
Identificación	Indicar la identificación del instrumento
Tipo de piezómetro	Indicar el tipo de piezómetro el cual puede ser: fibra óptica, casagrande, casagrande automatizado, cuerda vibrante, neumático u otro.
Ubicación del sensor / Zona de medición	Para cada piezómetro, se debe indicar la ubicación donde se encuentra el sensor o la zona de medición.
Frecuencia de monitoreo	Indicar la frecuencia con la cual se realiza una medición en condición normal. Dicha frecuencia puede ser horaria, diaria, semanal, mensual, trimestral, etc.
Obtención del dato	Indicar el mecanismo de obtención del dato, el cual puede ser Manual o Automático.
Transmisión en línea	Para el caso de mediciones automáticas, indicar si los datos se transmiten directamente al operador (Sí) o bien se deben recolectar manualmente (No).

### 4.1.2. Hitos de control topográficos

Los hitos de control topográfico son puntos físicos establecidos en el terreno con coordenadas geográficas precisas. Se utilizan para marcar ubicaciones específicas y proporcionar referencias para mediciones topográficas. Estos hitos son fundamentales para realizar mediciones precisas y repetibles del terreno, lo que permite monitorear cambios en la topografía a lo largo del tiempo y garantizar la exactitud de los levantamientos topográficos. A continuación, se detallan los requerimientos para cada ítem solicitado para “Hitos de control”.

Tabla 4.2: Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Hitos de control”.

Ítem	Requerimiento
Identificación	Indicar la identificación del hito de control

### 4.1.3. Inclinómetros (o similar)

Es un instrumento utilizado para monitorear y medir el cambio de inclinación (rotación) de puntos en el suelo o estructuras. A continuación, se detallan los requerimientos para cada ítem solicitado para “Inclinómetros (o similar)”.

Tabla 4.3: Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Inclinómetros (o similar)”.

Ítem	Requerimiento
Identificación	Indicar la identificación del instrumento.
Tipo de instrumento	Indicar el tipo de instrumento el cual puede ser: inclinómetro, clinoextensómetro u otro.
Frecuencia de monitoreo	Indicar la frecuencia con la cual se realiza una medición en condición normal. Dicha frecuencia puede ser horaria, diaria, semanal, mensual, trimestral, etc.
Obtención del dato	Indicar el mecanismo de obtención del dato, el cual puede ser Manual o Automático.
Transmisión en línea	Para el caso de mediciones automáticas, indicar si los datos se transmiten directamente al operador (Sí) o bien se deben recolectar manualmente (No).

### 4.1.4. Acelerómetros

Este instrumento se utiliza para registrar y cuantificar las aceleraciones experimentadas producto de eventos sísmicos. A continuación, se detallan los requerimientos para cada ítem solicitado para “Acelerómetros”.

Tabla 4.4: Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Acelerómetros”.

Ítem	Requerimiento
Identificación	Indicar la identificación del instrumento.
Transmisión en línea	Para el caso de mediciones automáticas, indicar si los datos se transmiten directamente al operador (Sí) o bien se deben recolectar manualmente (No).

### 4.1.5. Meteorología

El monitoreo meteorológico se refiere al seguimiento y registro de las condiciones atmosféricas en un lugar específico utilizando sensores para diferentes variables. Se utiliza para obtener datos en tiempo real sobre el clima local y regional, lo que permite realizar pronósticos meteorológicos precisos, evaluar riesgos climáticos. A continuación, se detallan los requerimientos para cada ítem solicitado para “Meteorología”.

Tabla 4.5: Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Meteorología”.

Ítem	Requerimiento
Identificación	Indicar la identificación del sensor.
Tipo de sensor	Indicar el tipo de sensor el cual puede ser utilizado para monitorear: velocidad y dirección del viento, presión, precipitación, radiación solar, temperatura, humedad relativa, evaporación u otro.
Frecuencia de monitoreo	Indicar la frecuencia con la cual se realiza una medición en condición normal. Dicha frecuencia puede ser horaria, diaria, semanal, mensual, trimestral, etc.
Obtención del dato	Indicar el mecanismo de obtención del dato, el cual puede ser Manual o Automático.
Transmisión en línea	Para el caso de mediciones automáticas, indicar si los datos se transmiten directamente al operador (Sí) o bien se deben recolectar manualmente (No).

#### 4.1.6. Drenes

El monitoreo de drenes consiste en la utilización de instrumentación o sensores para la supervisión y evaluación de los sistemas de drenaje. A continuación, se detallan los requerimientos para cada ítem solicitado para “Drenes”.

Tabla 4.6: Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Drenes”.

Ítem	Requerimiento
Identificación	Indicar la identificación del instrumento
Tipo de instrumento	Indicar el tipo de sensor el cual puede ser: turbidímetro, caudalímetro u otro.
Frecuencia de monitoreo	Indicar la frecuencia con la cual se realiza una medición en condición normal. Dicha frecuencia puede ser horaria, diaria, semanal, mensual, trimestral, etc.
Obtención del dato	Indicar el mecanismo de obtención del dato, el cual puede ser Manual o Automático.
Transmisión en línea	Para el caso de mediciones automáticas, indicar si los datos se transmiten directamente al operador (Sí) o bien se deben recolectar manualmente (No).

#### 4.1.7. Cota Laguna

El monitoreo de la cota de la laguna en depósitos de relaves implica medir y registrar regularmente el nivel del agua en la laguna asociada al depósito. A continuación, se detallan los requerimientos para cada ítem solicitado para “Cota Laguna”.

Tabla 4.7: Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Cota Laguna”.

Ítem	Requerimiento
Identificación	Indicar la identificación del instrumento
Tipo de instrumento	Indicar el tipo de instrumento, el cual puede ser: regleta, sensor de nivel u otro.
Frecuencia de monitoreo	Indicar la frecuencia con la cual se realiza una medición en condición normal. Dicha frecuencia puede ser horaria, diaria, semanal, mensual, trimestral, etc.
Obtención del dato	Indicar el mecanismo de obtención del dato, el cual puede ser Manual o Automático.
Transmisión en línea	Para el caso de mediciones automáticas, indicar si los datos se transmiten directamente al operador (Sí) o bien se deben recolectar manualmente (No).



#### 4.1.8. Monitoreo no invasivo

El monitoreo no invasivo en un depósito de relaves implica la utilización de tecnologías y métodos que no requieren la inserción de sensores o instrumentos dentro o cerca del depósito de relaves. A continuación, se detallan los requerimientos para cada ítem solicitado para “Monitoreo no invasivo”.

Tabla 4.8: Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Monitoreo no invasivo”.

Ítem	Requerimiento
Identificación	Indicar la identificación del monitoreo no invasivo.
Tipo de monitoreo no invasivo	Indicar el tipo de monitoreo no invasivo, el cual puede ser: Imagen satelital, InSAR, Dron, Cámaras u Otro.
Frecuencia de monitoreo	Indicar la frecuencia con la cual se realiza una medición en condición normal. Dicha frecuencia puede ser horaria, diaria, semanal, mensual, trimestral, etc.
Obtención del dato	Indicar el mecanismo de obtención del dato, el cual puede ser Manual o Automático.
Transmisión en línea	Para el caso de mediciones automáticas, indicar si los datos se transmiten directamente al operador (Sí) o bien se deben recolectar manualmente (No).

#### 4.1.9. Monitoreo semi invasivo

El monitoreo semi invasivo en un depósito de relaves implica el uso de tecnologías y métodos que requieren una intervención limitada en la estructura del depósito, es decir, se utilizan instrumentos o sensores que se colocan en la superficie o áreas cercanas al depósito. A continuación, se detallan los requerimientos para cada ítem solicitado para “Monitoreo semi invasivo”.

Tabla 4.9: Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Monitoreo semi invasivo”.

Ítem	Requerimiento
Identificación	Indicar la identificación del monitoreo semi invasivo.
Tipo de monitoreo no invasivo	Indicar el tipo de monitoreo no invasivo, el cual puede ser: Levantamiento batimétrico, Radar de estabilidad de taludes (SSR), Radar de apertura sintética (SAR), Escáner laser, Estación total, Tomografía eléctrica u Otro.
Frecuencia de monitoreo	Indicar la frecuencia con la cual se realiza una medición en condición normal. Dicha frecuencia puede ser horaria, diaria, semanal, mensual, trimestral, etc.
Obtención del dato	Indicar el mecanismo de obtención del dato, el cual puede ser Manual o Automático.
Transmisión en línea	Para el caso de mediciones automáticas, indicar si los datos se transmiten directamente al operador (Sí) o bien se deben recolectar manualmente (No).

#### 4.1.10. Plataforma

Una plataforma que centraliza los datos de monitoreo es un sistema integrado diseñado para recopilar, almacenar, procesar y presentar información proveniente de diferentes dispositivos y sensores utilizados en el monitoreo de un depósito de relaves. Esta plataforma actúa como un centro de control que permite a los usuarios acceder y analizar datos en tiempo real. A continuación, se detallan los requerimientos para cada ítem solicitado para “Plataforma”.

Tabla 4.10: Detalle de los requerimientos para cada ítem solicitado para “Plataforma”.

Ítem	Requerimiento
¿Posee plataforma de monitoreo?	Si posee una plataforma que centraliza los datos de monitoreo indicar Sí, en caso contrario, indicar No.
Variables controladas en plataforma	Indicar las variables controladas desde la plataforma las cuales pueden ser: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Presión de poros</li> <li>- Nivel freático</li> <li>- Topografía general</li> <li>- Desplazamientos y/o deformaciones</li> <li>- Aceleraciones</li> <li>- Variables meteorológicas</li> <li>- Caudal del sistema de drenaje</li> <li>- Turbidez del sistema de drenaje</li> <li>- Cota de la laguna</li> <li>- Presencia de humedad</li> <li>- Presencia de grietas</li> <li>- Tamaño de la laguna</li> <li>- Volumen de la laguna</li> <li>- Otro</li> </ul>
Tipo de monitoreo asociado	Indicar el tipo de monitoreo asociado para la medición de la variable específica, cuyos resultados se transmiten y analizar por medio de la plataforma. Este tipo de monitoreo debe estar asociado a los elementos declarados en la ficha.
Obtención del dato	Indicar el mecanismo de obtención del dato, el cual puede ser Manual o Automático.
Transmisión en línea	Para el caso de mediciones automáticas, indicar si los datos se transmiten directamente al operador (Sí) o bien se deben recolectar manualmente (No).

## 4.2. Clasificación de depósitos

Como se indicó previamente, la clasificación de los depósitos que completaron la ficha se lleva a cabo conforme al DS 50 (Ministerio de Obras Públicas, 2015), que establece 3 categorías para depósitos con relave convencional (tranques y embalses). Para clasificar los depósitos no convencionales (espesados, en pasta, filtrados), se considera exclusivamente su volumen, dado que sus muros son de baja altura debido al tipo de relave que contienen. Además, se introduce una categoría adicional, la Categoría D: "Mega-depósitos", para distinguir aquellos depósitos que superan significativamente el límite definido para la Categoría C.

Modificando, en este trabajo, la normativa establecida en el Decreto 50 del MOP, las categorías para depósitos de relaves, ya sean convencionales o no convencionales, quedan de la siguiente manera:

- Categoría A: Pequeños, de altura de muro máxima mayor a 5 m e inferior a 15 m, o bien de capacidad superior a 50.000 m<sup>3</sup> e inferior a 1.500.000 m<sup>3</sup>.
- Categoría B: Medianos, de altura de muro máxima mayor o igual a 15 m e inferior a 30 m, o bien de capacidad igual o superior a 1.500.000 m<sup>3</sup> e inferior a 60.000.000 m<sup>3</sup>.
- Categoría C: Grandes, de altura máxima de muro igual o superior a 30 m e inferior 80 m, o bien de capacidad igual o superior a 60.000.000 m<sup>3</sup> e inferior a 400.000.000 m<sup>3</sup>.
- Categoría D: Mega-Depósitos, de altura máxima de muro igual o superior a 80 m, o bien de capacidad igual o superior a 400.000.000 m<sup>3</sup>.

Los umbrales para definir la nueva Categoría D se basaron en las características de los depósitos que respondieron la ficha, para de esta forma tener un catastro más diferenciado y por ende pueda ser más útil.

En total, 46 depósitos respondieron la ficha, 40 se encuentran activos y 6 inactivos. En la Figura 4.1 se presenta un resumen de las características de los depósitos, en donde se puede ver la clasificación resultante de estos en base a lo indicado anteriormente.

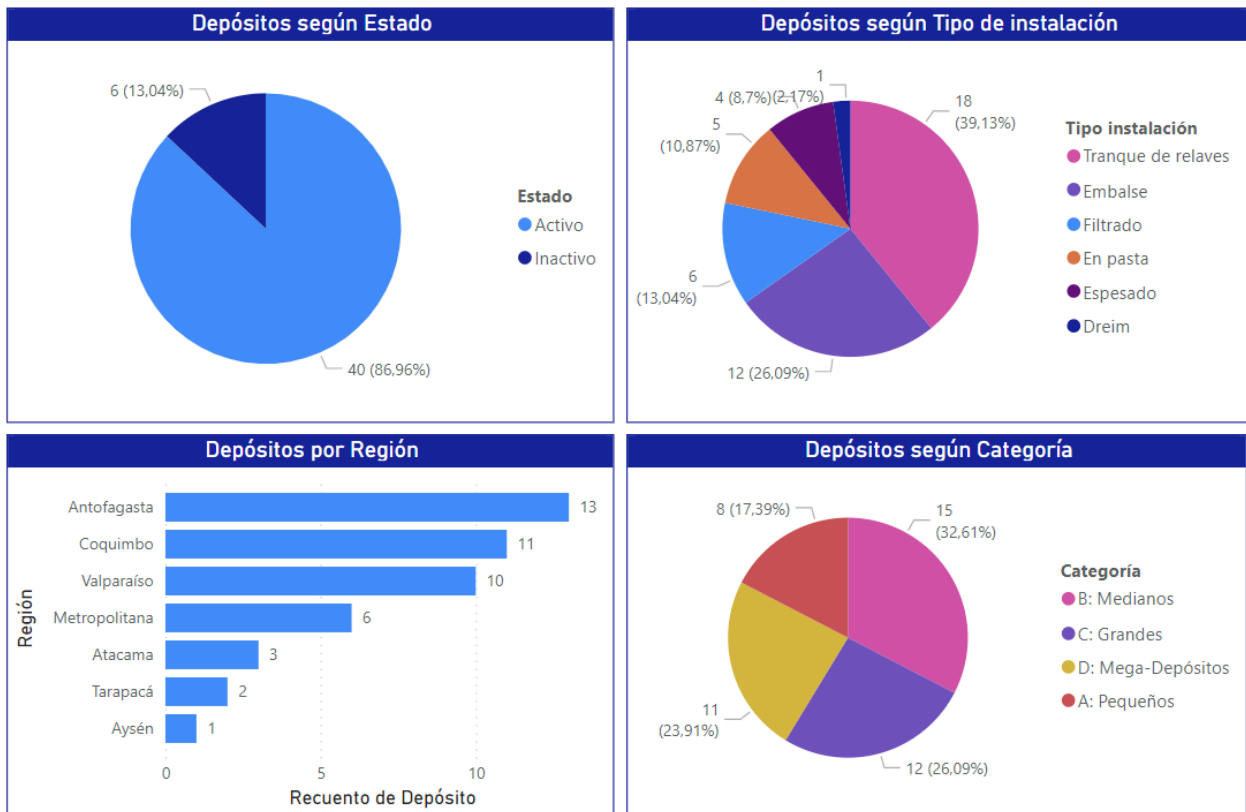


Figura 4.1: Clasificación de los depósitos según Estado, Tipo de instalación, Región y Categoría.

Se tiene que de los 656 depósitos Categoría A existentes en el país, solo 8 depósitos (1,2%) respondieron la ficha, para el caso de la Categoría B respondieron 15, es decir, un 20,8% de los 72 existentes, y sumando los de Categoría C y D que respondieron, o sea 23 depósitos, que corresponden a un 88,5% de los 26 depósitos Categoría C existentes, recordando que la Categoría D solo fue una modificación para propósitos del trabajo.

### 4.3. Interpretación del catastro

En la Tabla 4.11 se muestran los depósitos con los que se elabora el catastro de instrumentación divididos en categoría, depósitos convencionales y no convencionales, que es como se dividen al momento de presentar sus resultados.

Tabla 4.11: Depósitos que conforman el catastro de instrumentación.

Categoría	Depósitos convencionales		Depósitos no convencionales				
	Tranque	Embalse	Espesado	En pasta	Filtrado	Dreim	
<b>D: Mega-Depósitos</b>	7	4	0	0	0	0	<b>11</b>
<b>C: Grandes</b>	6	3	2	0	1	0	<b>12</b>
<b>B: Medianos</b>	3	2	2	5	2	1	<b>15</b>
<b>A: Pequeños</b>	2	3	0	0	3	0	<b>8</b>
	<b>18</b>	<b>12</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	

En las siguientes secciones se exhibe la cantidad de instrumentación, sensores o tipos de monitoreo (dependiendo del ítem según la ficha) según su categoría, es decir se presenta la cantidad promedio de instrumentos por categoría separando los depósitos convencionales de los no convencionales. Esta cantidad se presenta utilizando un diagrama de caja y bigotes (Figura 4.2), en donde la propia caja indica el intervalo en el que se encuentra el 50% de todos los valores, el extremo inferior de la caja es el 1er cuartil y el extremo superior es el 3er cuartil, la línea continua indica la mediana y la 'x' indica la media o promedio y los bigotes en forma de T se extienden hasta los valores máximo y mínimo.

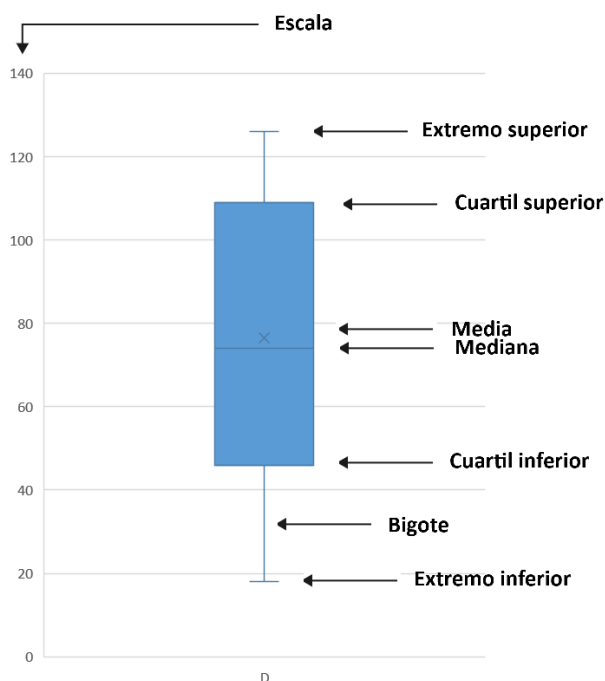


Figura 4.2: Partes del diagrama de caja y bigotes.

En los anexos se muestra la cantidad total de instrumentos por categoría, y no solo su promedio, ya que de esta forma se logra presentar de manera más clara las características de estos, tales como tipo, ubicación, frecuencia, entre otras. Estos detalles específicos se encuentran detallados en los anexos al final de este documento, el cual está dividido en dos partes: depósitos convencionales (Anexo A) y no convencionales (Anexo B). Además, cada una de estas partes se divide en secciones correspondientes a los 10 tipos de monitoreo presentados en la ficha.

### 4.3.1. Piezómetros

Se tiene, según la Figura 4.3, que para los depósitos convencionales Categoría D se hay 70 piezómetros en promedio, para la Categoría C se tienen 43, para la Categoría B se tienen 6 y para la Categoría A se tienen 6. En el caso de los depósitos no convencionales, para la Categoría C se tienen 65 piezómetros en promedio por depósito, para la categoría B se tienen 11 y para la Categoría A se tienen 4.

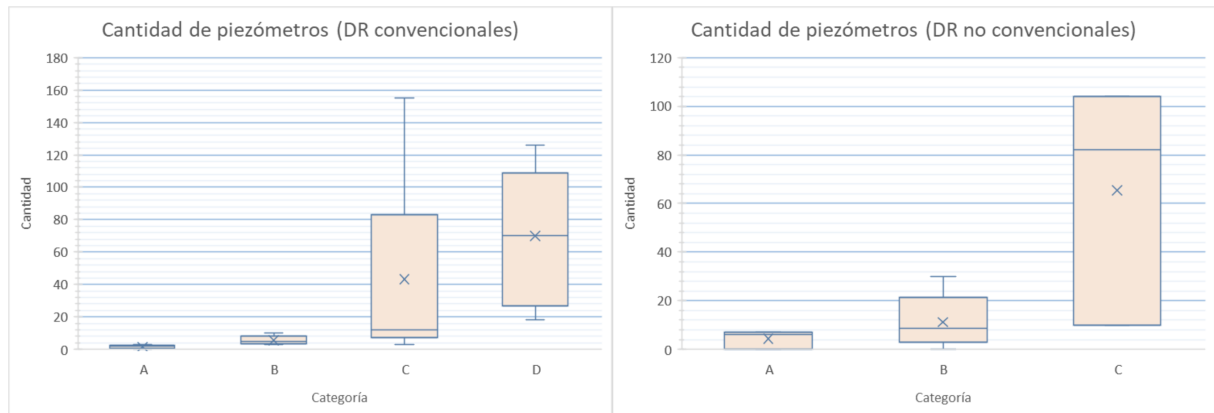


Figura 4.3: Cantidad de piezómetros por Categoría para depósitos convencionales y no convencionales.

La Figura 4.4 muestra la frecuencia de monitoreo respectiva de los piezómetros de los depósitos convencionales, en donde la más común para la categoría A es cada 3 meses, para la Categoría B es semanal, para la Categoría C es mensual y para la Categoría D es horaria. En cuanto a los depósitos no convencionales, la Figura 4.5 muestra que la frecuencia más común para los depósitos Categoría A es semanal, al igual que para los Categoría C y para los Categoría B es mensual.

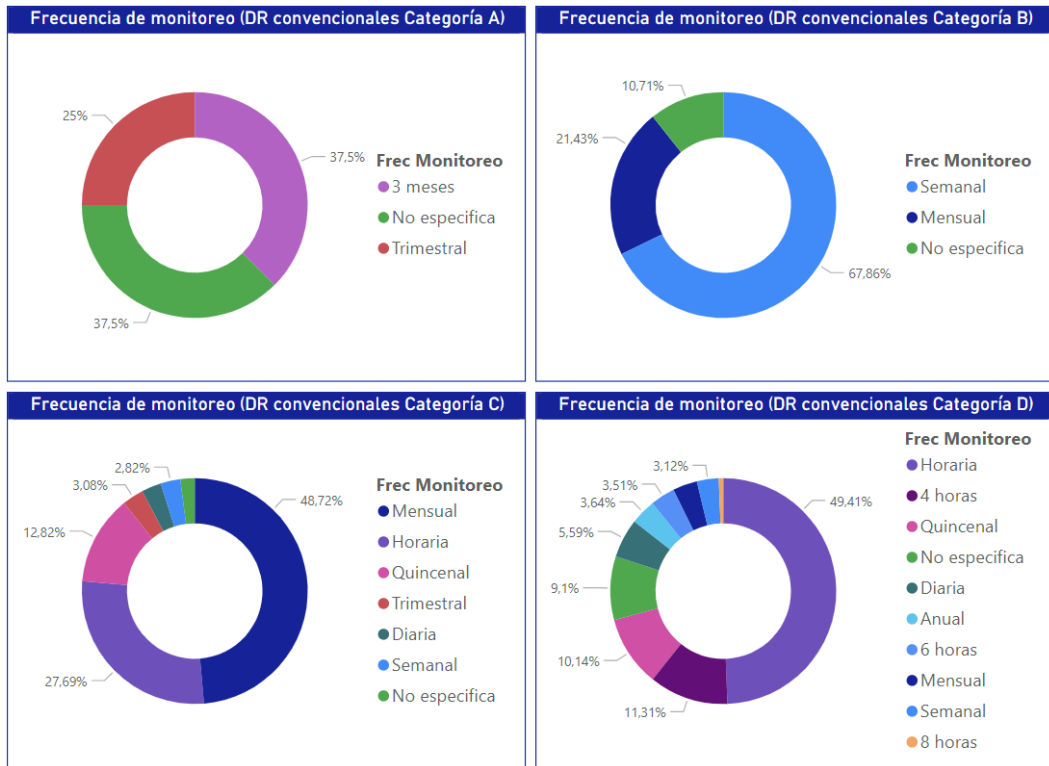


Figura 4.4: Frecuencia de monitoreo de piezómetros por Categoría para depósitos convencionales.

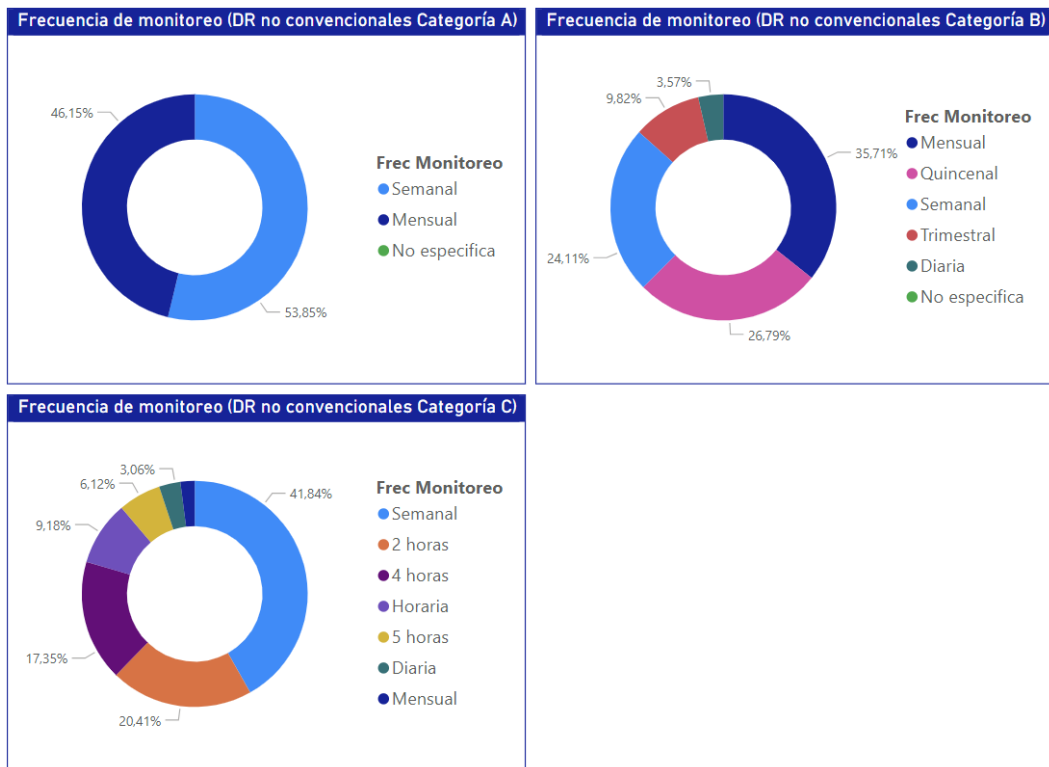


Figura 4.5: Frecuencia de monitoreo de piezómetros por Categoría para depósitos no convencionales.

### 4.3.2. Hitos de control topográfico

Siguiendo con lo explicado anteriormente, en base a la Figura 4.6, se tiene que en promedio, para depósitos convencionales Categoría D existen 17 hitos de control, para la Categoría C existen 10, para la Categoría B existen 2 y para la Categoría A 0. Para los depósitos no convencionales, en promedio, para la Categoría C existen 16 hitos de control, para la Categoría B existen 11 y para la Categoría A 0.

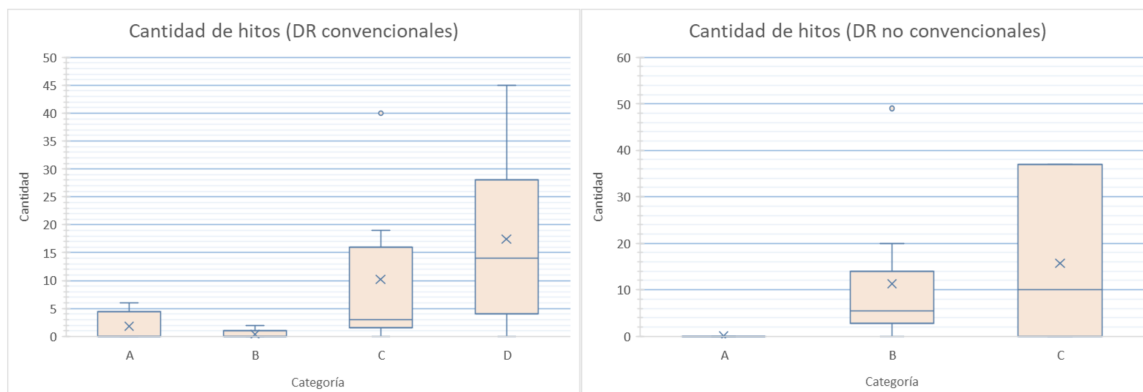


Figura 4.6: Cantidad de Hitos de control por por Categoría para depósitos convencionales y no convencionales.

### 4.3.3. Inclínómetros (o similar)

La Figura 4.7 revela que, en promedio, los depósitos convencionales de Categoría D cuentan con 4 inclinómetros, mientras que los de Categoría C tienen 1, los de Categoría B también tienen 1, y los de Categoría A no cuentan con ninguno. Para los depósitos no convencionales, la cantidad de inclinómetros varía, con 2 para la Categoría C, 1 para la Categoría B, y ninguno para la Categoría A.

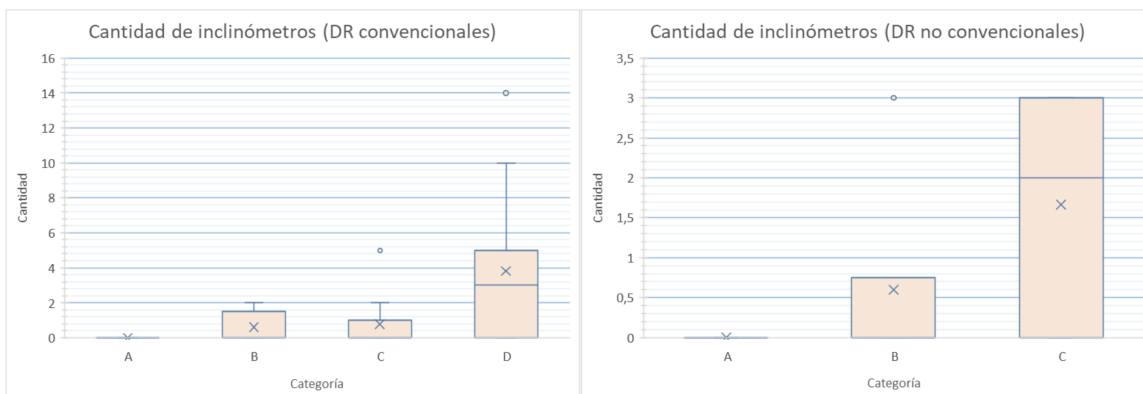


Figura 4.7: Cantidad de Inclinómetros por Categoría para depósitos convencionales y no convencionales.

La Figura 4.8 muestra la frecuencia de monitoreo respectiva de los inclinómetros de los



depósitos convencionales, en donde la más común para la Categoría B es mensual, para la Categoría C es semanal y para la Categoría D es anual. En cuanto a los depósitos no convencionales, la Figura 4.9 muestra que la frecuencia más común para los depósitos Categoría B es mensual y para los Categoría C es semanal.

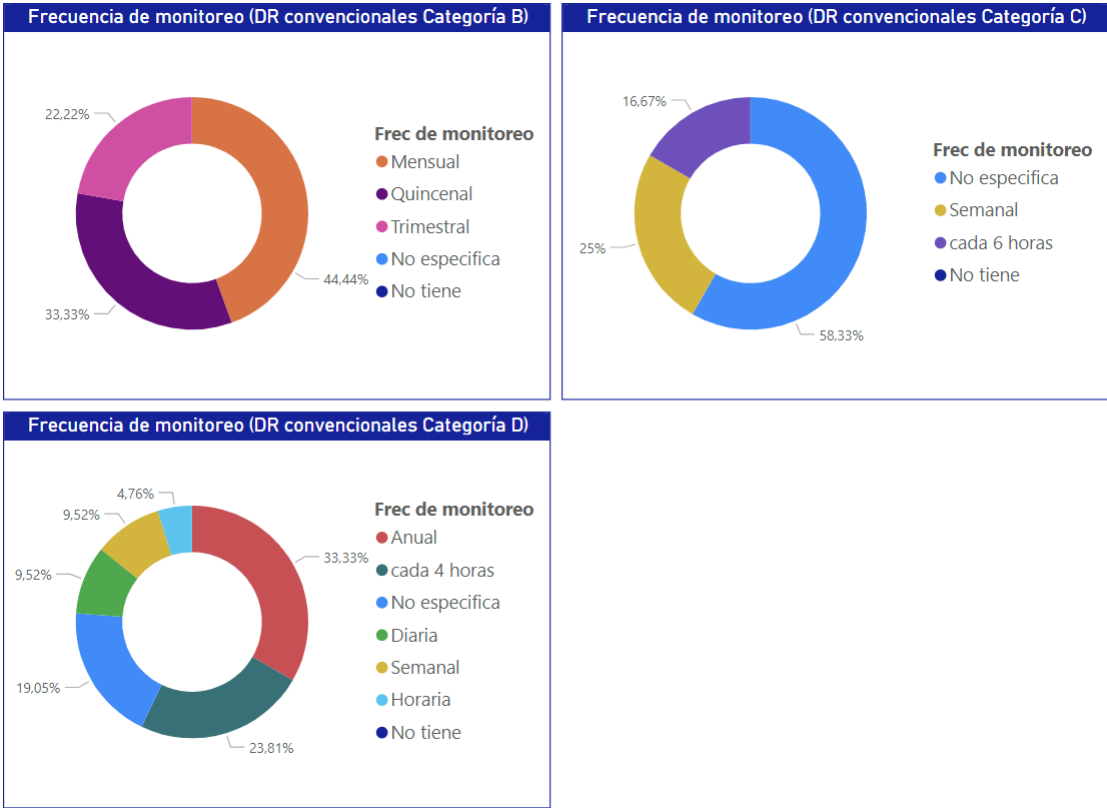


Figura 4.8: Frecuencia de monitoreo de inclinómetros por Categoría para depósitos convencionales.

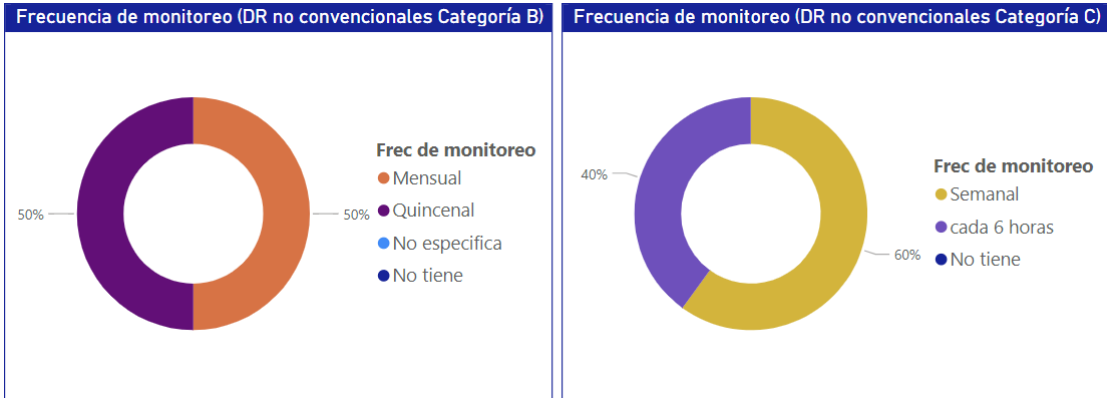


Figura 4.9: Frecuencia de monitoreo de inclinómetros por Categoría para depósitos no convencionales.

### 4.3.4. Acelerómetros

La Figura 4.10 muestra que, en promedio, los depósitos convencionales de Categoría D cuentan con 3 acelerómetros, mientras que los de Categoría C tienen 2, los de Categoría B y los de Categoría A no cuentan con ninguno. Para los depósitos no convencionales, la cantidad de acelerómetros varía, con 3 para la Categoría C, 1 para la Categoría B, y ninguno para la Categoría A.

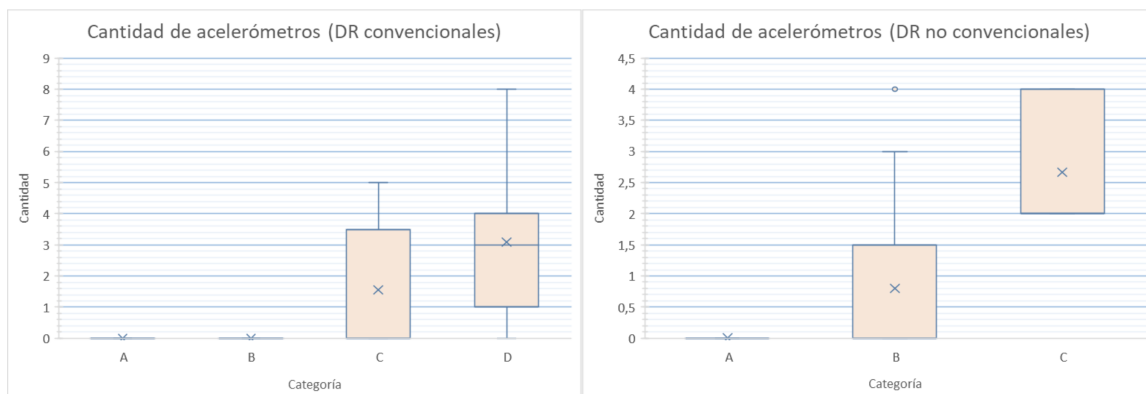


Figura 4.10: Cantidad de Acelerómetros por Categoría para depósitos convencionales y no convencionales.

### 4.3.5. Monitoreo meteorológico

La Figura 4.11 muestra que, en promedio, los depósitos convencionales de Categoría D cuentan con 12 sensores, mientras que los de Categoría C tienen 6, los de Categoría B cuentan con 1 y los de Categoría A no cuentan con ninguno. Para los depósitos no convencionales, la cantidad de sensores son 4 para la Categoría C, 3 para la Categoría B, y ninguno para la Categoría A.

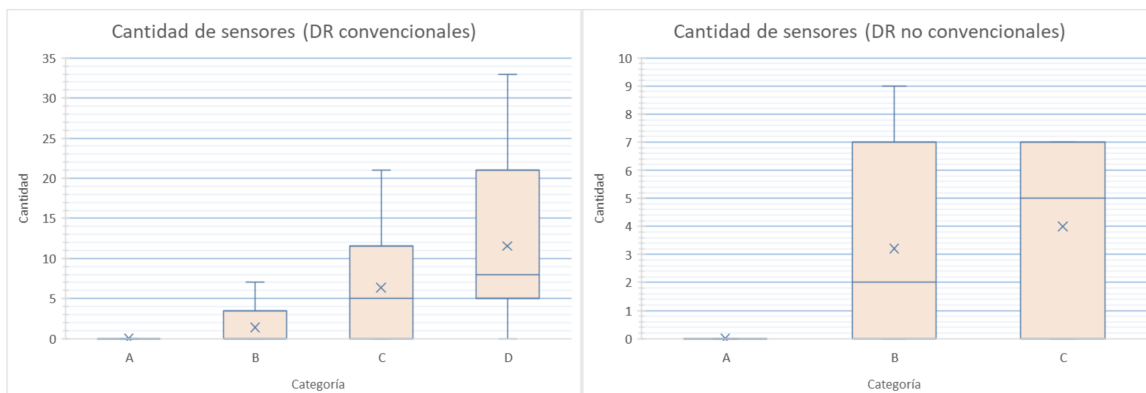


Figura 4.11: Cantidad de sensores para el monitoreo meteorológico por Categoría para depósitos convencionales y no convencionales.

La Figura 4.12 muestra la frecuencia de monitoreo respectiva de los sensores para monito-

reos meteorológicos de los depósitos convencionales, en donde la más común para la Categoría B es continua, para la Categoría C es horaria y para la Categoría D es diaria. En cuanto a los depósitos no convencionales, la Figura 4.13 muestra que la frecuencia más común para los depósitos Categoría B es continua y para los Categoría C es horaria.

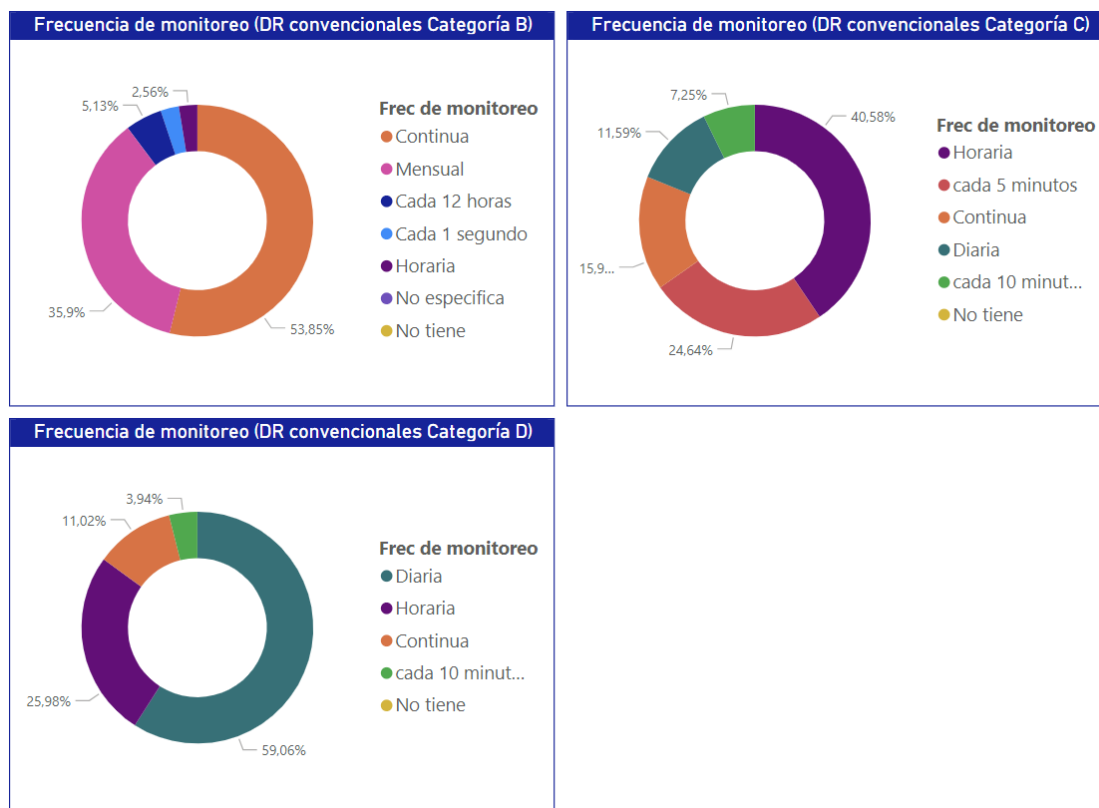


Figura 4.12: Frecuencia de monitoreo de sensores para el monitoreo meteorológico por Categoría para depósitos convencionales.

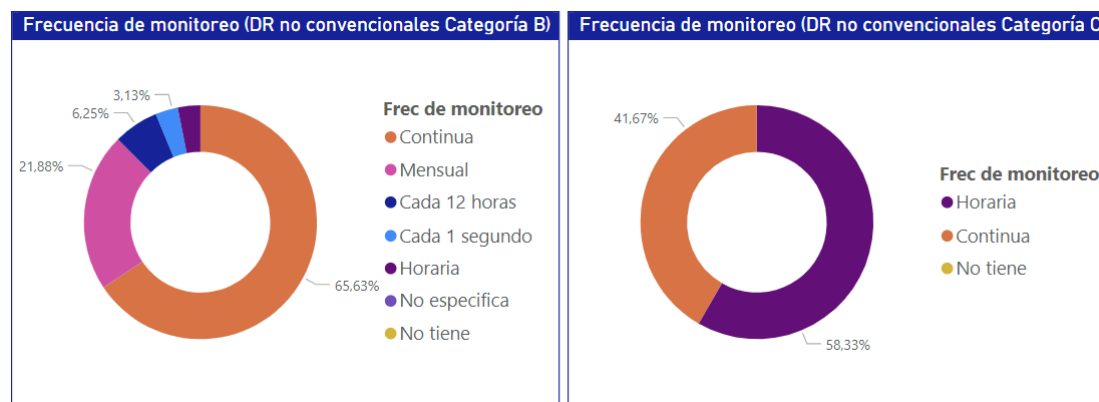


Figura 4.13: Frecuencia de monitoreo de sensores para el monitoreo meteorológico por Categoría para depósitos no convencionales.

### 4.3.6. Drenes

La Figura 4.14 indica que, en promedio, los depósitos convencionales de Categoría D cuentan con 5 instrumentos, mientras que los de Categoría C tienen 4, los de Categoría B tienen 5, y los de Categoría A solo 1. Por otro lado, en el caso de los depósitos no convencionales, se observa que los de Categoría C tienen 9 instrumentos, los de Categoría B tienen 1, y los de Categoría A no cuentan con instrumentos.

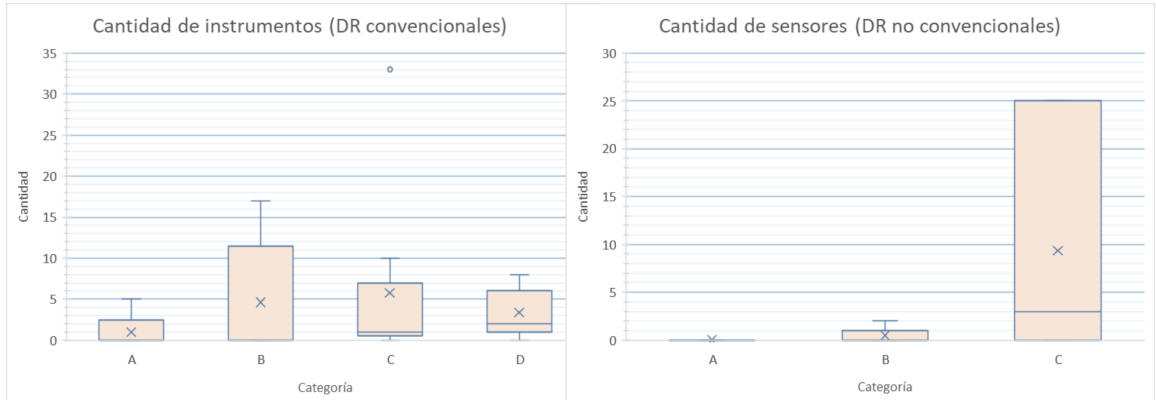


Figura 4.14: Cantidad de instrumentos para el monitoreo de drenes por Categoría para depósitos convencionales y no convencionales.

La Figura 4.15 muestra la frecuencia de monitoreo respectiva de los instrumentos de monitoreo de drenes de los depósitos convencionales, en donde la más común para la Categoría A es trimestral, para la Categoría B es diaria, para la Categoría C es horaria y para la Categoría D es cada segundo. En cuanto a los depósitos no convencionales, la Figura 4.16 muestra que la frecuencia más común para los depósitos Categoría B es diaria y para los Categoría C es horaria.

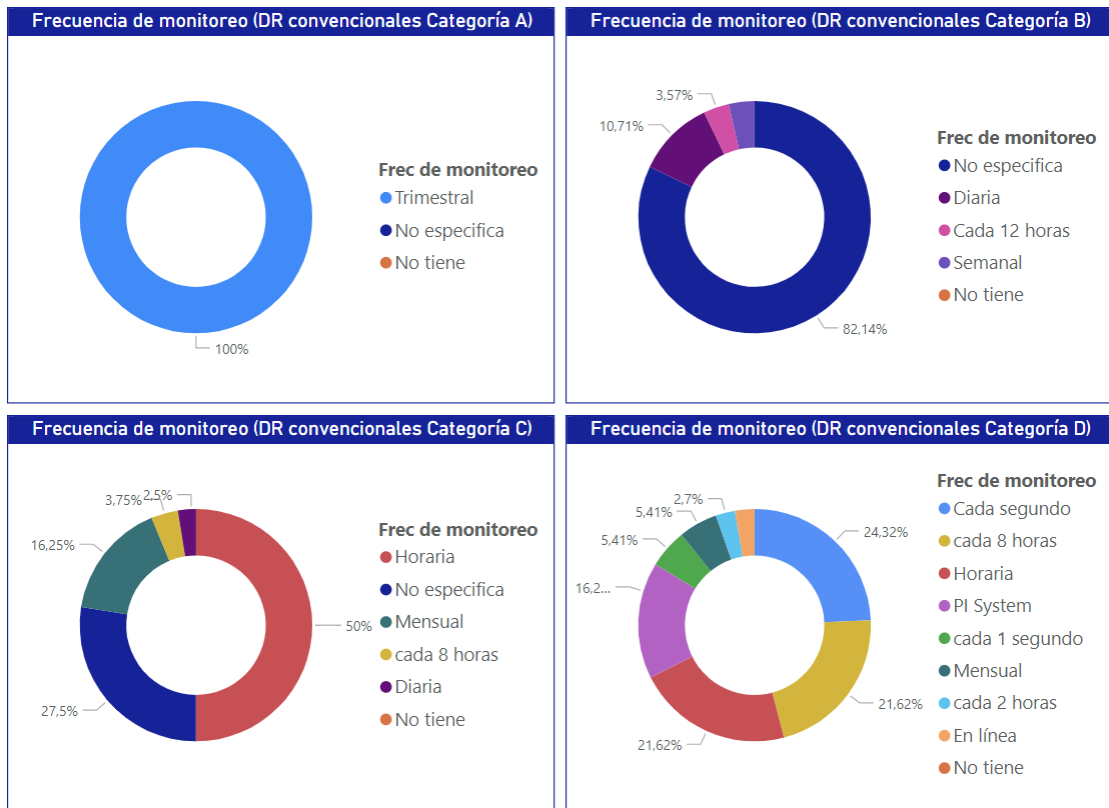


Figura 4.15: Frecuencia de monitoreo de instrumentos para el monitoreo de drenes por Categoría para depósitos convencionales.

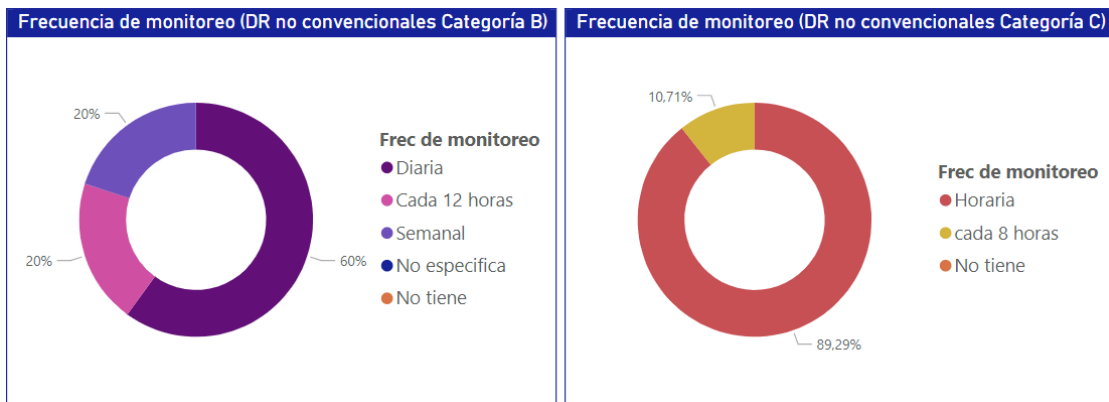


Figura 4.16: Frecuencia de monitoreo de instrumentos para el monitoreo de drenes por Categoría para depósitos no convencionales.

### 4.3.7. Cota Laguna

La Figura 4.17 muestra que, en promedio, los depósitos convencionales de Categoría D miden con 1 instrumento al igual que los de Categoría C, los de Categoría B y los de Categoría A no disponen de instrumento (solo 2 instrumentos entre los 5 depósitos Categoría B). En el

caso de los depósitos no convencionales, los de Categoría C disponen de 2 instrumentos para medir, los de Categoría B tienen 1, y los de Categoría A carecen de instrumentos.

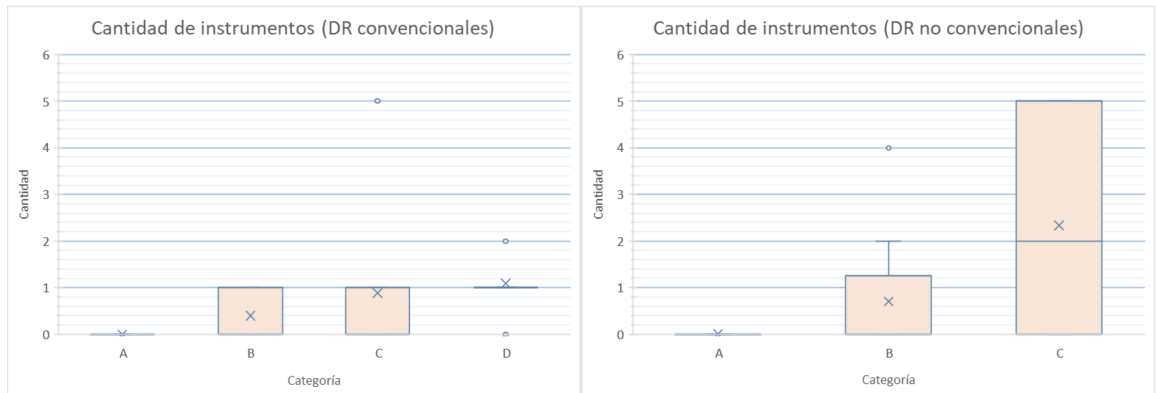


Figura 4.17: Cantidad de instrumentos para el monitoreo de la cota de la laguna por Categoría para depósitos convencionales y no convencionales.

La Figura 4.18 muestra la frecuencia de monitoreo respectiva de los instrumentos para monitorear la cota de la laguna de los depósitos convencionales, en donde la más común para la Categoría B y C es mensual, mientras que para la Categoría D es diaria. En cuanto a los depósitos no convencionales, la Figura 4.19 muestra que la frecuencia más común para los depósitos Categoría B y C es mensual.

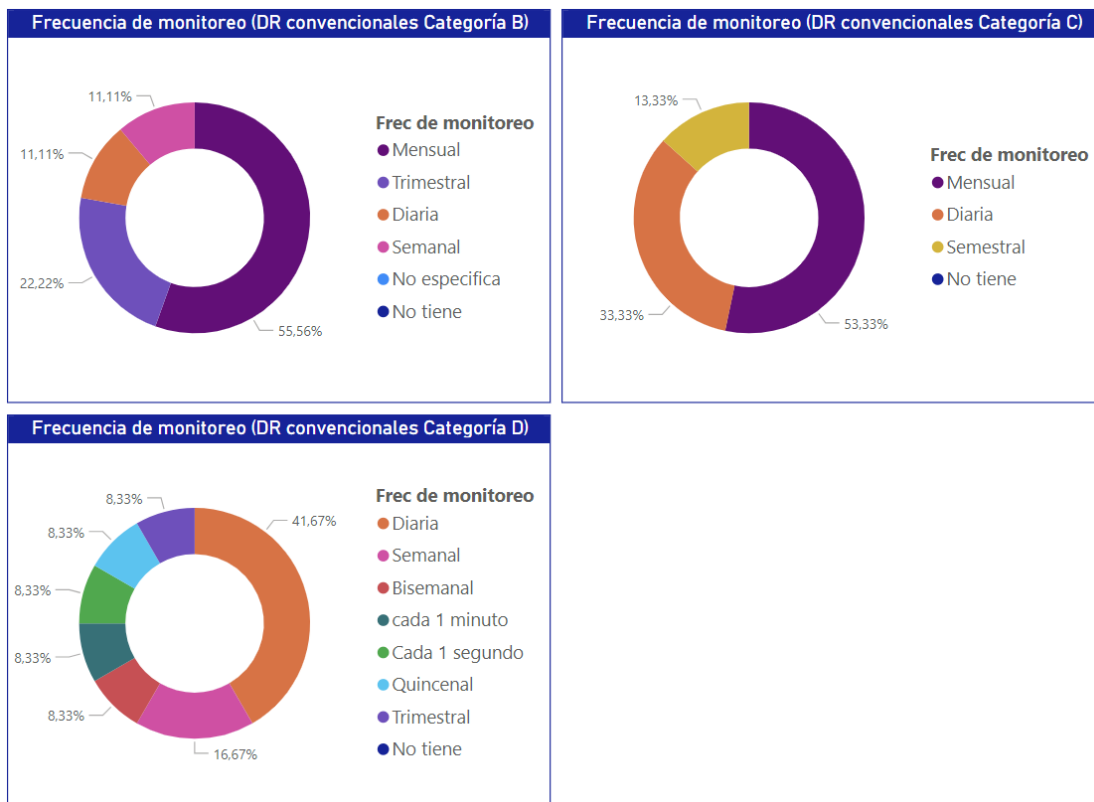


Figura 4.18: Frecuencia de monitoreo de instrumentos para el monitoreo de la cota de la laguna por Categoría para depósitos convencionales.

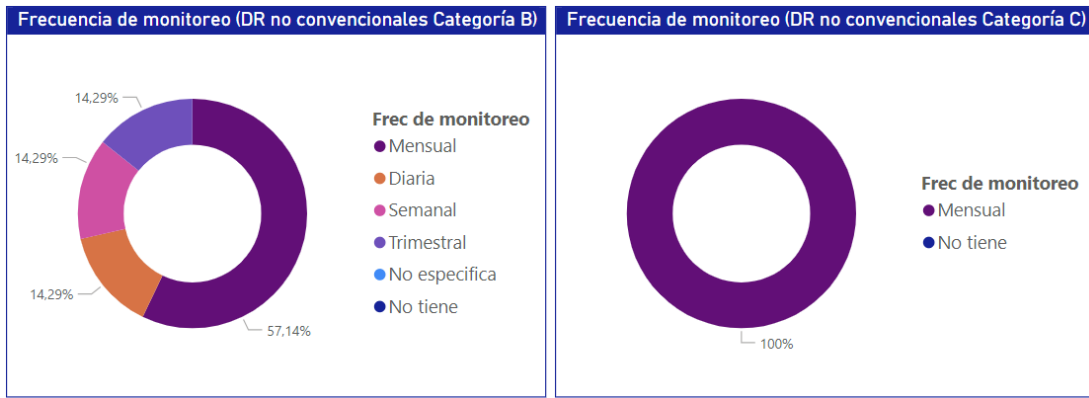


Figura 4.19: Frecuencia de monitoreo de instrumentos para el monitoreo de la cota de la laguna por Categoría para depósitos no convencionales.

### 4.3.8. Monitoreo no invasivo

La Figura 4.20 indica que, en promedio, los depósitos convencionales de Categoría D cuentan con 2 tipos de monitoreo no invasivos, mientras que los de Categoría C tienen 1, los de Categoría B tienen 2, y los de Categoría A ninguno (solo 1 depósitos de los 5 cuenta con monitoreo no invasivo en la Categoría A). En el caso de los depósitos no convencionales, se observa que los de Categoría C tienen 3 tipos de monitoreo invasivo por depósito, los de Categoría B tienen 2, y los de Categoría A no cuentan con monitoreo no invasivo (solo 1 depósito de categoría A cuenta con monitoreo no invasivo).

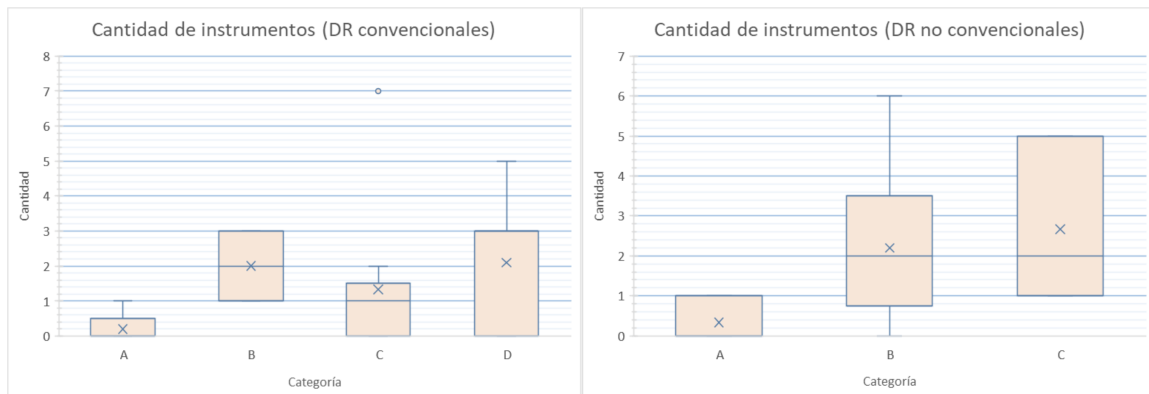


Figura 4.20: Cantidad de instrumentos de monitoreo no invasivo por Categoría para depósitos convencionales y no convencionales.

La Figura 4.21 muestra la frecuencia de monitoreo respectiva de los instrumentos de monitoreo no invasivo de los depósitos convencionales, en donde la más común para la Categoría A es semestral, mientras que para la Categoría B, C y D es anual. En cuanto a los depósitos no convencionales, la Figura 4.22 muestra que la frecuencia más común para los depósitos Categoría A es semestral, mientras que para los de Categoría B y C es semanal.

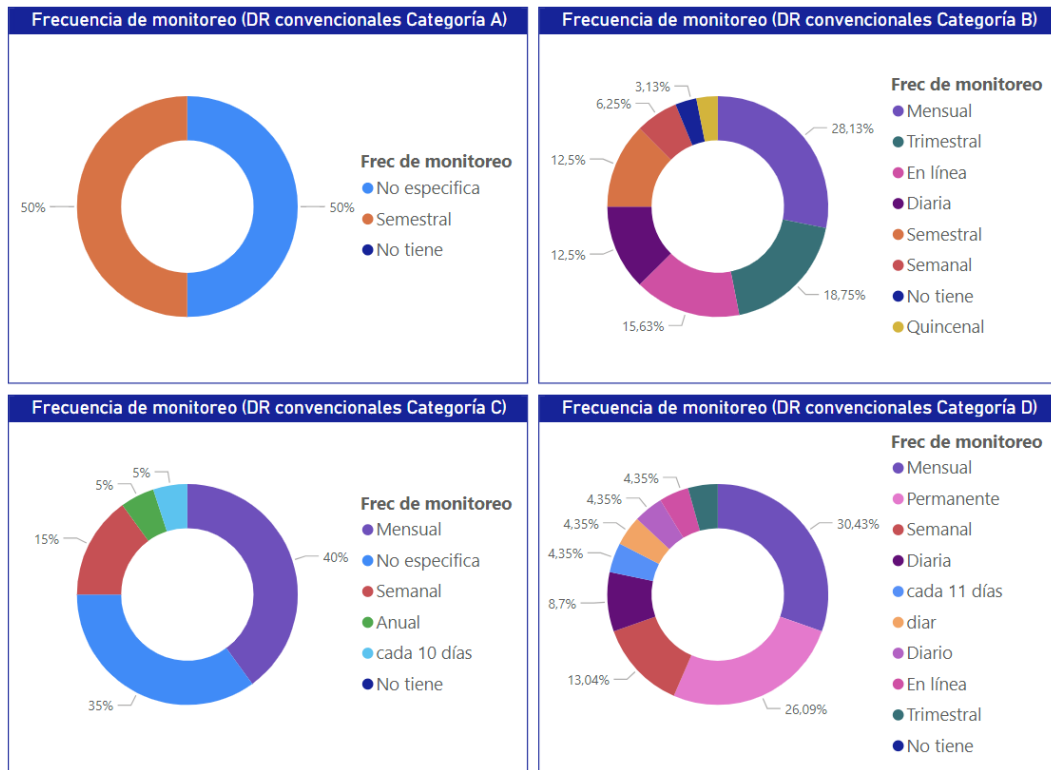


Figura 4.21: Frecuencia monitoreo no invasivo por Categoría para depósitos convencionales.

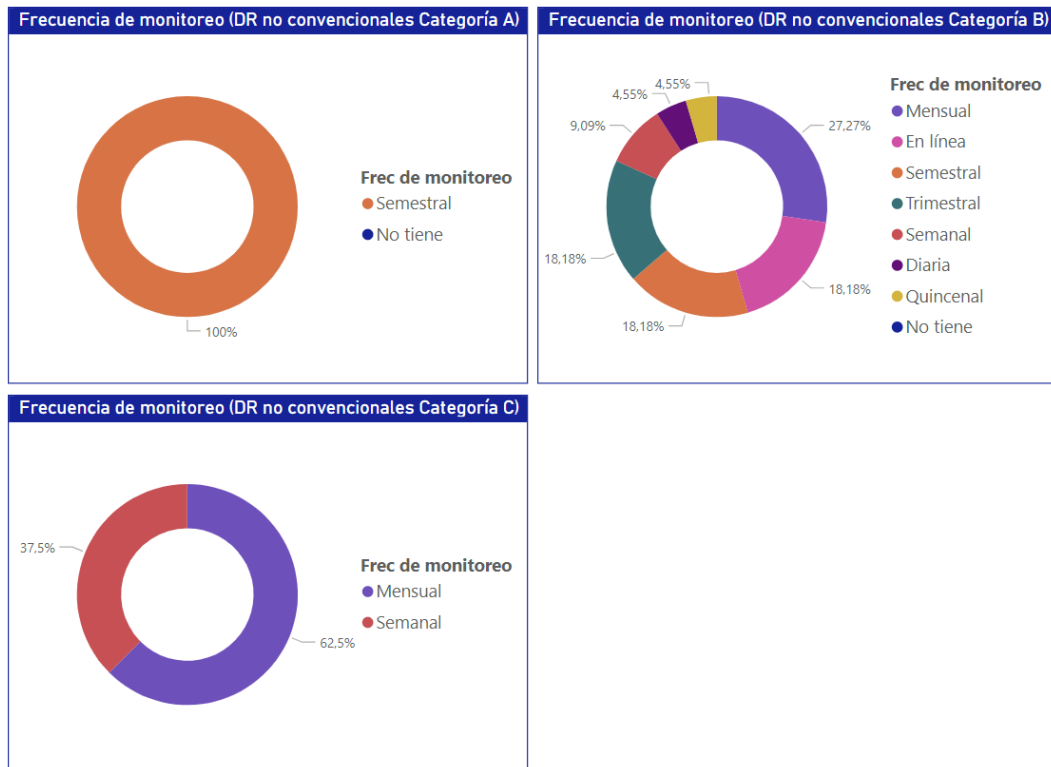


Figura 4.22: Frecuencia monitoreo no invasivo por Categoría para depósitos no convencionales.



### 4.3.9. Monitoreo semi invasivo

La Figura 4.20 señala que, en promedio, los depósitos convencionales de Categoría D cuentan con 2 tipos de monitoreo semi invasivos, mientras que los de Categoría C y los de Categoría B cuentan con 1, y los de Categoría A ninguno. En cuanto a los depósitos no convencionales, se aprecia que los de Categoría C y Categoría B disponen de 1 tipo de monitoreo semi invasivo por depósito, y los de Categoría A no cuentan con monitoreo no invasivo (solamente 1 depósito de categoría A cuenta con monitoreo no invasivo).

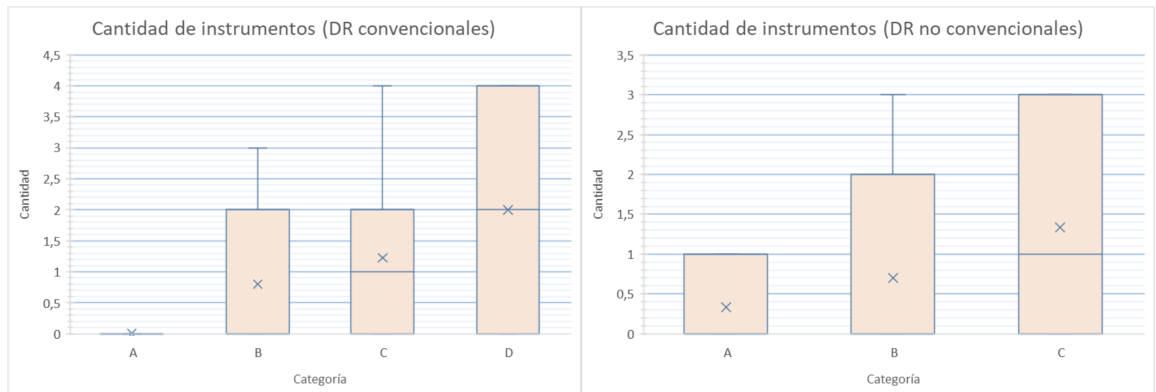


Figura 4.23: Cantidad de instrumentos de monitoreo semi invasivo por Categoría para depósitos convencionales y no convencionales.

La Figura 4.24 muestra la frecuencia de monitoreo respectiva de los instrumentos de monitoreo semi invasivo de los depósitos convencionales, en donde la más común para la Categoría A es trimestral, para la Categoría B es mensual, para la Categoría C es semanal y para la Categoría D es diaria. En cuanto a los depósitos no convencionales, la Figura 4.25 muestra que la frecuencia más común para los depósitos Categoría A es trimestral, para la Categoría B es mensual y para los Categoría C es anual.

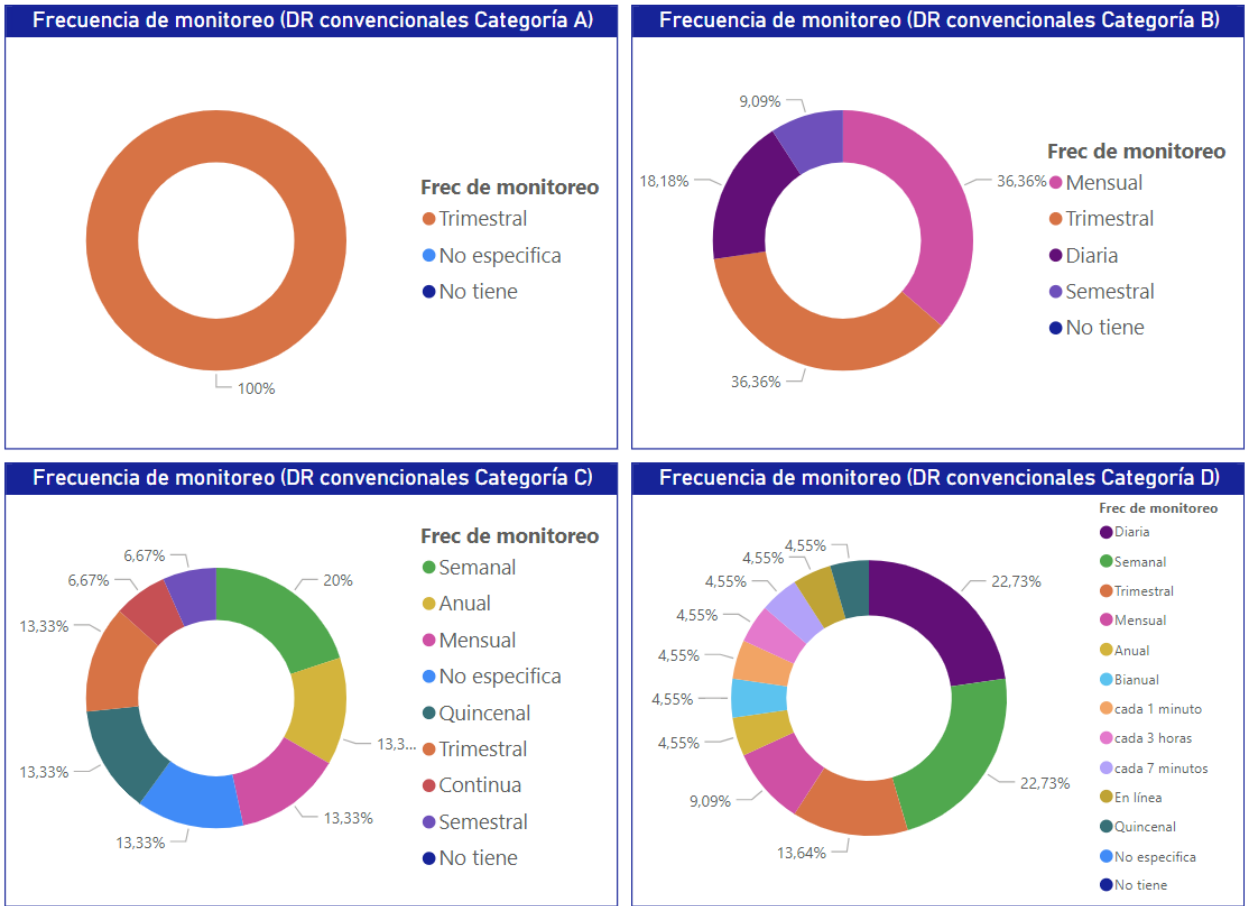


Figura 4.24: Frecuencia de monitoreo semi invasivo por Categoría para depósitos convencionales.

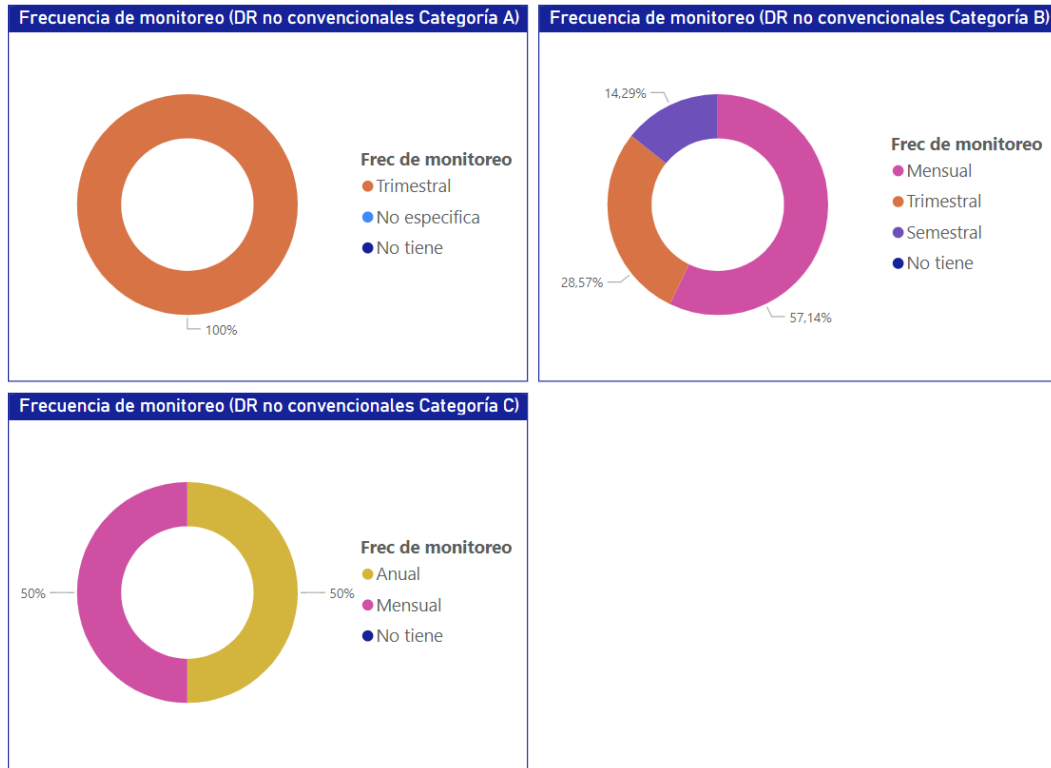


Figura 4.25: Frecuencia de monitoreo semi invasivo por Categoría para depósitos no convencionales.

#### 4.3.10. Plataforma de monitoreo

De la Figura 4.26 se tiene que 14 de los 30 depósitos convencionales cuentan con Plataforma de monitoreo, de los cuales 5 pertenecen a la Categoría C y 9 a la Categoría D, mientras que ninguno de la Categoría B o A cuenta con Plataforma. En el caso de los depósitos no convencionales, solo 5 de los 16 cuentan con Plataforma de monitoreo, 3 corresponden a la Categoría B y 2 a la Categoría C, mientras que ninguno de Categoría A cuenta con Plataforma. En las Figuras del Anexo A.10 y B.10 se puede revisar las variables controladas en plataforma y el tipo de monitoreo asociado.

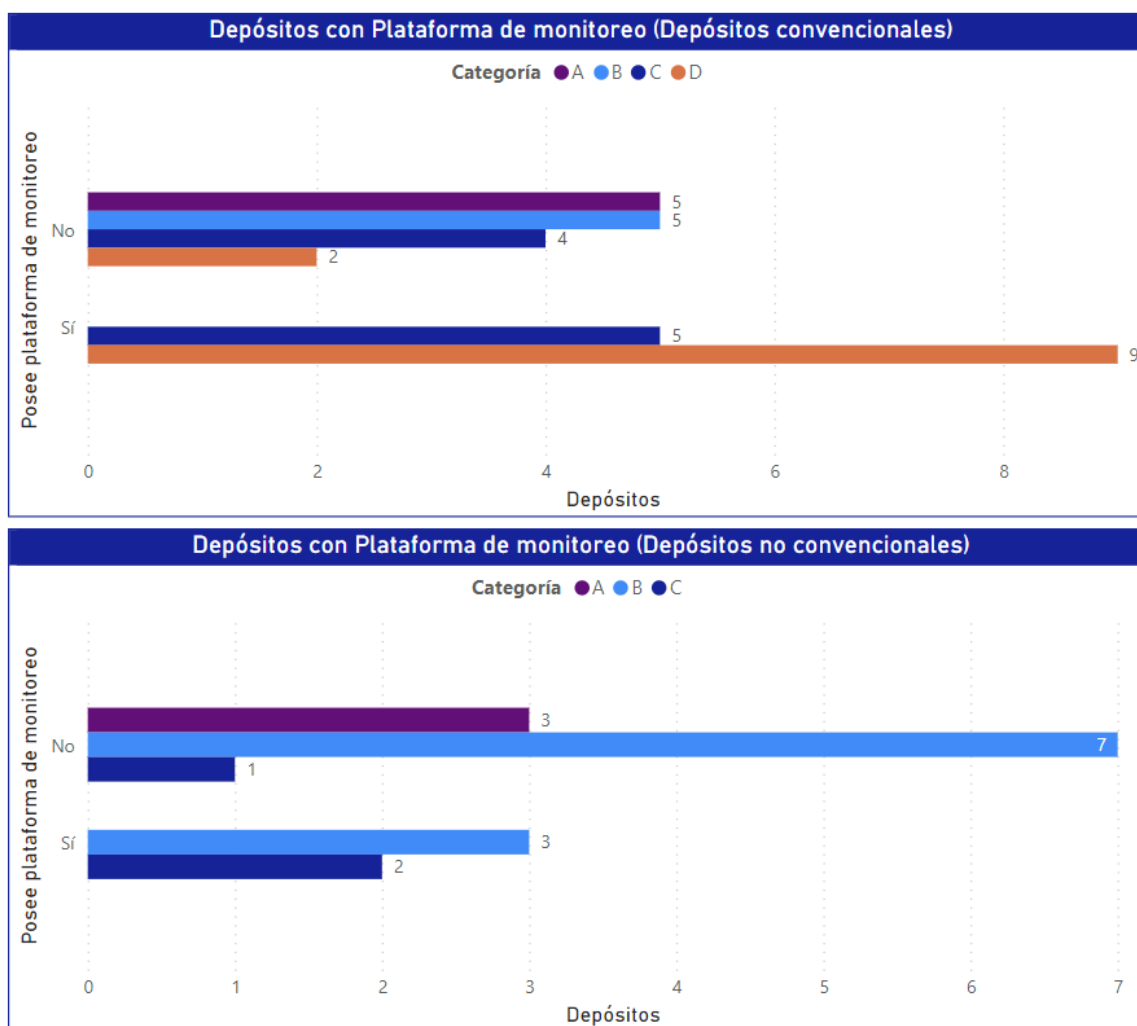


Figura 4.26: Depósitos que poseen Plataforma de monitoreo integrada por Categoría.

El catastro presentado hasta el momento se considera parcial, dado que se basa únicamente en la información proporcionada por 46 depósitos. Es importante destacar que esta recopilación inicial representa solo una fracción de la totalidad de depósitos de relaves en el país. Sin embargo, se espera que este registro continúe expandiéndose y enriqueciéndose a medida que más depósitos completen y respondan la ficha solicitada por Sernageomin. Por lo tanto, el catastro se podrá ir completando gradualmente, incorporando nuevos datos y ofreciendo una visión más completa y representativa de la realidad de los depósitos de relaves en Chile. Este enfoque de mejora constante lo posiciona como una herramienta de benchmarking cada vez más robusta y eficiente.

## Capítulo 5

# Definición de estrategia para establecer instrumentación mínima para el monitoreo geotécnico de depósitos de relaves

Históricamente, según los análisis retrospectivos de colapsos de depósitos de relaves presentados en la sección 3.1, la importancia de los sistemas de monitoreo en estas obras ha sido subestimada. La mayoría de las fallas no frágiles podrían haberse reducido, o incluso algunas evitado, con una implementación adecuada de sistemas de instrumentación y monitoreo. Necesitamos entonces poder diseñar sistemas de instrumentación y monitoreo que contribuyan al cumplimiento del propósito último de cada obra. De esta forma se suma una herramienta que provee información valiosa para la toma de decisiones que beneficie oportunamente operaciones seguras y eficientes.

La creación de una estrategia para definir un plan de instrumentación y monitoreo efectivo comienza con el cumplimiento de objetivos clave tales como: velar por la seguridad, estabilidad y operación eficiente de depósitos de relaves. Este enfoque estructurado aborda las complejidades técnicas, ambientales y operativas asociadas con estas estructuras críticas y permite establecer el nivel de exigencia y/o estándar que se pretende alcanzar.

Además, pretende servir como punto de partida para la elaboración de una guía que estandarice el proceso de selección de instrumentación o la formulación de un plan o programa de instrumentación y monitoreo, buscando que se justifique y fundamente la elección de la instrumentación utilizada en un depósito, con el fin de abordar la incertidumbre respecto a esta, generada a las autoridades reguladoras pertinentes como Sernageomin.

La integración de una estrategia fundamentada para diseñar un adecuado sistema de instrumentación y monitoreo en la gestión de riesgos de proyectos de depósitos de relaves (DR) mejora la seguridad y reduce los riesgos. Este proceso implica un análisis detallado de modos de falla, identificación de parámetros críticos y eventos gatilladores, así como la tolerancias de desempeño y la definición de requerimientos de información que son cruciales para la se-

lección de la instrumentación adecuada para el depósito.

La adopción de estas prácticas no solo beneficia la seguridad de los depósitos de relaves, sino que también aporta ventajas a toda la industria minera reduciendo la incertidumbre.

El enfoque principal de esta estrategia es proponer una lógica para la elección de la instrumentación adecuada basado en un trabajo de ingeniería ordenado y sistemático, asegurando que esté fundamentada y no seleccionada arbitrariamente. Este marco se presenta como una herramienta útil no solo para ingenieros experimentados, sino también para aquellos menos experimentados, brindando orientación durante el diseño, implementación y operación de sistemas de monitoreo específicos para depósitos de relaves activos.

## 5.1. Instrumentación y monitoreo

Un programa de instrumentación y monitoreo (I&M) efectivo es crucial para que los propietarios de presas gestionen los riesgos asociados con las operaciones y el mantenimiento de estas estructuras. La utilización de instrumentación proporciona una información más completa y oportuna, mejorando así la capacidad del propietario para supervisar de manera segura y continua el funcionamiento de la presa (USSD, 2008).

La instrumentación consta de diversos instrumentos o sistemas eléctricos y mecánicos utilizados para medir la presión, el flujo, el movimiento, la tensión, la deformación y la temperatura. El monitoreo es la recopilación, reducción, presentación y evaluación de los datos de instrumentación. La instrumentación y el monitoreo son herramientas que deben integrarse dentro de un programa de inspección detallado para evaluar continuamente la seguridad del depósito, conformando así el plan de I&M (FERC, 2003).

El propósito de la instrumentación y el monitoreo es salvaguardar y perfeccionar la seguridad de la presa al suministrar información que permite: 1) evaluar el rendimiento conforme a las expectativas y 2) alertar ante alteraciones que puedan comprometer la seguridad de la presa. La planificación y ejecución meticulosa de la instrumentación y el monitoreo son esenciales para alcanzar los objetivos establecidos. Cada instrumento instalado en una presa debe tener un propósito específico, contribuyendo así a un sistema integral que asegure la funcionalidad segura y continua de la estructura (FERC, 2003).

En este contexto, se propone una estrategia específica para establecer una instrumentación mínima adecuada que garantice la efectividad del monitoreo y, por ende, contribuya a la reducción de incertidumbres y riesgos.

La estrategia se fundamenta en un diseño sistemático para establecer instrumentación geotécnica adecuada que corresponde a la base del sistema de monitoreo. En este sentido, se ha tomado como referencia el trabajo de Fuentes et al. (2010) "Monitoring Systems: Effective Implementation for Risk Reduction", en donde se llevó a cabo un análisis retrospectivo de fallas en estructuras geotécnicas, tales como túneles, examinando sus causas a través de hallazgos en informes autorizados y concluyendo que las fallas podrían haberse evitado o, al menos, sus

consecuencias podrían haber sido reducidas si el sistema de monitoreo se hubiera diseñado, implementado y operado adecuadamente, lo cual respalda la aplicación de un enfoque similar a las instalaciones de depósitos de relaves.

Fuentes (2010), destaca la importancia de una denominación precisa del sistema de monitoreo y aboga por la aplicación de enfoques estructurados en su diseño. En dicho artículo se proporciona una base al enfatizar la necesidad de una identificación clara y una jerarquía en el diseño del sistema de instrumentación y monitoreo.

El artículo de Fuentes aborda la denominación del “Sistema de monitoreo” como un componente clave en la conceptualización y comprensión del mismo, en donde la razón para utilizar este término es aceptar, desde el primer momento, que el concepto que estamos tratando es un sistema que necesita de todas sus partes para funcionar correctamente y cumplir satisfactoriamente un propósito en común.

La presente estrategia de monitoreo se erige como un marco metodológico que fusiona la conceptualización precisa, inspirada en la propuesta de Fuentes, con la estructuración lógica proporcionada por los diagramas tipo V. Este enfoque integral tiene como objetivo principal no solo cumplir con los estándares regulatorios, sino también adaptarse de manera eficiente a las dinámicas cambiantes de los depósitos de relaves a lo largo de su vida útil.

## 5.2. Planteamiento de la estrategia

Fuentes (2010) propone un enfoque de ingeniería de sistemas y, por lo tanto, sugiere utilizar el término “sistema de monitoreo”, porque, argumenta, al usar este término se acepta desde el principio que el concepto que nos concierne es un sistema que necesita que todas sus partes funcionen correctamente. Se elige una definición de sistema propuesta por la NASA (1995): Un sistema es un conjunto de componentes interrelacionados que interactúan entre sí de manera organizada hacia un objetivo común.

Además, incorpora el enfoque de los diagramas tipo “V” (Figura 5.1) en el diseño del sistema de monitoreo, su diagrama se crea a partir de una modificación del diagrama V genérico presentado por Elliot & Deasly (2007). Esta metodología, proporciona una estructura lógica que abarca desde la definición de objetivos hasta el diseño detallado de subsistemas.

El lado izquierdo del diagrama representa la partición y el lado derecho representa la integración. El tiempo transcurre de izquierda a derecha. Las relaciones (líneas horizontales) entre ambos lados de la ‘V’ representan las pruebas que se deben realizar, en cada etapa, para integrar y crear un sistema robusto, lo que se denomina prueba sistemática. Los elementos nublados representan procesos, los elementos horizontales que unen ambos lados del diagrama representan pruebas y los elementos restantes entre nubes representan las etapas de desarrollo del sistema. La línea ‘discontinua’ agrupa los conceptos, etapas, pruebas y procesos que deben cubrirse en el desarrollo del plan de instrumentación y monitoreo, mientras que la línea ‘semi-discontinua’ muestra, igualmente, la arquitectura del sistema que debe considerarse en la especificación técnica de construcción incluyendo su puesta en marcha satisfactoria.

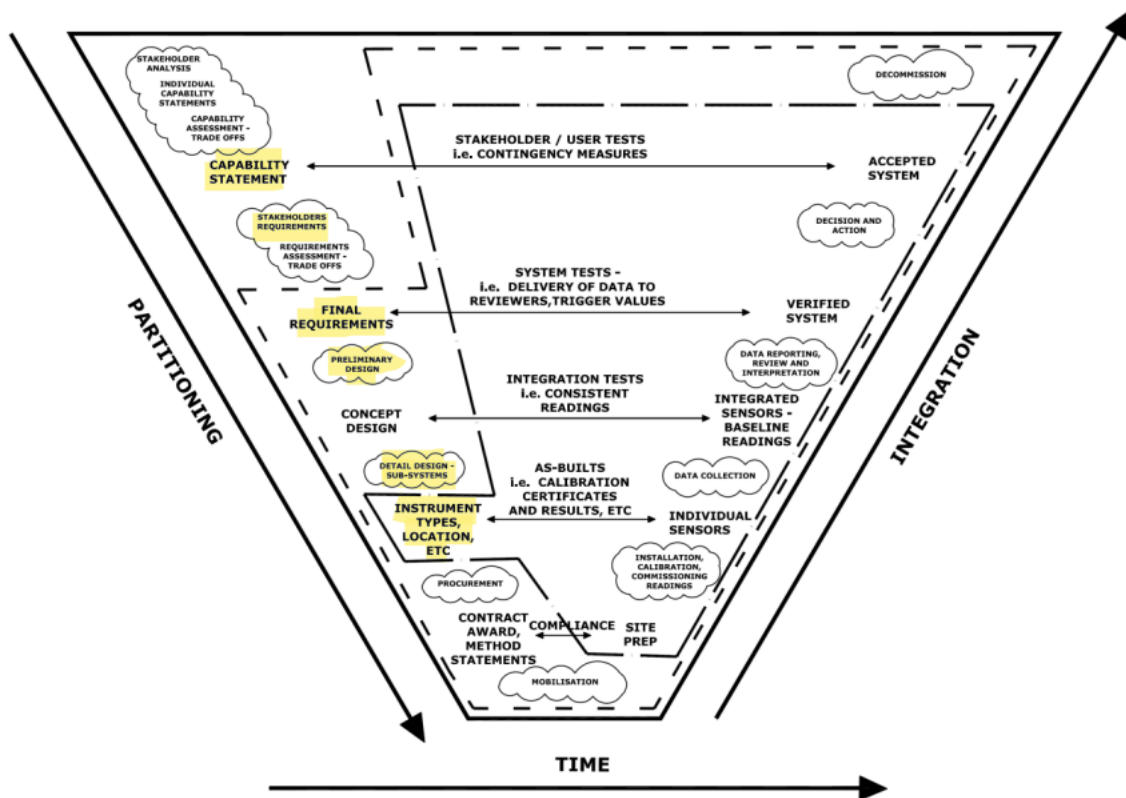


Figura 5.1: Aplicación del diagrama V para sistemas de monitoreo. (Fuentes, 2010)

### 5.3. Estrategia para definir un plan de instrumentación geotécnica adecuado para el monitoreo de depósitos de relaves

Como se mencionaba anteriormente, el lado derecho del diagrama V representa la fase de integración, que implica la evaluación del sistema una vez instalado. Sin embargo, esta etapa no está dentro del alcance ni de los objetivos de este trabajo, por lo que no será desarrollada. Entonces, se utiliza la parte izquierda del diagrama V, que se centra en la partición del sistema para su diseño, de manera que se rescatan los términos destacados en amarillo y se adapta el diagrama para un sistema de monitoreo de depósitos de relaves (Figura 5.2). Esto tiene como objetivo definir la estrategia para llegar a una adecuada elección de la instrumentación para el sistema de monitoreo.





Figura 5.2: Diagrama semi-V aplicado al sistema de monitoreo de depósitos de relaves activos. (Modificado de Fuentes 2010)

El diagrama se puede interpretar como una serie de etapas secuenciales que comprenden la propuesta de estrategia para el sistema de instrumentación y monitoreo de depósitos de relaves activos. A continuación se describe cada una de ellas y el cómo abordarlas.

### 5.3.1. Declaración del propósito y objetivos

En esta fase inicial, se establecen el propósito y los objetivos fundamentales del sistema de monitoreo. Desde una perspectiva holística, se consideran las prioridades de todas las partes interesadas (Principio 1 GISTM), abarcando aspectos geotécnicos, ambientales, operacionales y comerciales. El propósito debe declarar la expectativa que se tiene del DR en cuanto a su vida útil e impacto esperado (i.e. qué se espera lograr en términos de seguridad y/o nivel de daño máximo tolerable). En relación al objetivo principal, éste debiese ser consistente con las recomendaciones del GISTM: el sistema de monitoreo debe entregar información del suelo y las estructuras asociadas que permita confirmar que el depósito opera dentro de límites seguros en todas las fases del ciclo de vida de la instalación de relaves, incluso su cierre. (Modificado de Principio 7 GISTM)

En términos del sistema, una Declaración del Propósito y Objetivos estaría constituido por consideraciones de ingeniería simultáneamente con el análisis de otras partes interesadas. Estas partes interesadas incluyen típicamente al dueño del DR, al diseñador y el ingeniero de registro y a las comunidades vecinas al DR.

A modo de ejemplo, una de Declaración de Propósito y Objetivos podría ser de la siguiente forma:

1. Según el propietario de un terreno cercano a un depósito de relaves: *”El sistema de monitoreo deberá asegurar que mi propiedad y sus estructuras asociadas se mantengan dentro de límites seguros, mitigando cualquier impacto potencial causado por el depósito de relaves, garantizando la estabilidad del terreno y la seguridad de las estructuras a lo largo del tiempo y la vida de las personas que ahí habitan.”*
2. Según el dueño del DR, que podría ser una empresa minera o entidad responsable del DR: *”El sistema de instrumentación y monitoreo debe proporcionar información en tiempo real para la toma de decisiones informadas sobre la gestión del depósito, asegurando el cumplimiento de las regulaciones y minimizando cualquier riesgo potencial para el medio ambiente circundante. Como consecuencia de lo anterior, los datos de monitoreo deben poder mostrar que se cumple con las normativas medioambientales y técnicas aplicables, garantizando la continuidad operativa del depósito de relaves frente a todo evento.”*

Una vez que se han completado las Declaraciones de Propósito y Objetivos, la ingeniería de sistemas muestra que inevitablemente habrá conflictos y/o contradicciones entre las respectivas declaraciones de las partes interesadas. Resolver estos conflictos y racionalizarlos en una Declaración única se llama “Evaluación de Objetivo o Compensaciones”, donde se determina la mejor opción.

### 5.3.2. Requerimientos

De acuerdo a lo expuesto en la sección anterior, los requisitos se desprenden de la evaluación de objetivo o compensaciones. Un requisito está definido por Elliot & Deasly (2007) como: “Una declaración inequívoca de la capacidad que el sistema debe ofrecer. Se expresa en términos operativos (qué hará el sistema) en lugar de soluciones (cómo lo hará el sistema; si no se puede probar o medir, no es un requisito). Para que el sistema funcione, debe existir un conjunto único de requisitos que formen la base del diseño del sistema. Para lograr esto, se debe emprender un proceso similar de eliminación de conflictos y compensaciones al que se realiza para la definición de la declaración del propósito y objetivos. Se recomienda tener en cuenta los requisitos respectivos al Principio 7 del GISTM.

Ejemplos de requisitos, en este caso consistentes con el Propósito y Objetivos dados como ejemplo en la sección anterior:

- Sistema de instrumentación redundante para todas las variables consideradas críticas.
- Sistema de instrumentación y monitoreo que permita un seguimiento en línea y en tiempo real de las variables de monitoreo consideradas críticas.

- Sistema de monitoreo que cuente con sistema inalámbrico, de energización local autónoma e individual que garantice la auscultación y envío de datos de manera ininterrumpida frente a todo evento.
- Sistema de monitoreo que permita el respaldo seguro de la información auscultada con backup.
- Sistema de monitoreo conectado a plataforma digital de visualización de datos de monitoreo y en línea.
- Considerar herramienta de predicción de tendencias utilizando algoritmos de inteligencia artificial alimentados por la base de datos del propio DR.

### **5.3.3. Identificación de modos de falla de un DR**

Esto se basa en las causas de las fallas de los DR registradas en todo el mundo, y los llamados "modos de falla" identificados por Clarkson (2021). Para el desarrollo de esta etapa, se recomienda basarse en el análisis de modos y efectos de fallas (FMEA, por sus siglas en inglés), realizado durante la fase de diseño de ingeniería de los DR. Este análisis evalúa el riesgo y la probabilidad de ocurrencia de cada modo de falla, permitiendo focalizarse en los modos de falla creíbles y sus parámetros correspondientes a monitorear. La aplicación de este análisis (FMEA) en el diseño proporciona una base sólida para establecer estrategias de monitoreo efectivas.

### **5.3.4. Identificación de parámetros críticos**

Se define parámetro crítico como una propiedad cuantificable en un depósito de relaves, que individualmente o de manera combinada con otros parámetros, puede reflejar la afectación de la estabilidad física del depósito (Fundación Chile, 2018). Los parámetros críticos pueden ser medidos de forma puntual, global, y/o en direcciones longitudinal o transversal al muro, por medio de inspección visual o instrumentación.

Conociendo los modos de falla probables de la etapa anterior, se identifican sus correspondientes parámetros críticos que actúan como indicadores tempranos del desarrollo de posibles problemas. En la Tabla 3.4 de la sección 3.5 se presentan los parámetros críticos para cada modo de falla.

### **5.3.5. Identificación de eventos gatilladores**

Los eventos gatilladores se definen como agentes, fenómenos o intervenciones, ya sean de origen natural (como lluvias, vientos o sismos) o de origen antropogénico (modificaciones en los canales de contorno, construcción de desvíos de cauces, etapas constructivas de recrecimiento, entre otros), que pueden tener un impacto significativo en la estabilidad del depósito (Fundación Chile, 2018). Estos eventos pueden estar vinculados a condiciones naturales (N),

problemas de diseño (D) u operación (O) del depósito. Son capaces de alterar los parámetros críticos, y según el grado de alteración, podrían desencadenar una falla.

La Tabla 3.5 de la sección 3.6 menciona los principales eventos gatilladores capaces de afectar un parámetro crítico específico. El objetivo de esta tabla es ayudar a priorizar los parámetros críticos; ya que por ejemplo, si para un depósito en particular es más probable la ocurrencia de un evento gatillador natural particular, se prestará mayor atención a sus parámetros críticos correspondientes. Del mismo modo, si se identifican eventos gatilladores relacionados con operaciones o diseño, se podrá dar prioridad a esos parámetros críticos en la estrategia de monitoreo.

### 5.3.6. Identificación de zonas y elementos críticos

Esta identificación permite concentrar el monitoreo en áreas críticas, mejorando la eficiencia del sistema al dirigir la atención a aquellas áreas de la presa de relaves que presentan singularidades que representan condiciones particulares que no pueden generalizarse a otros ejes. Debido a lo anterior, en esta etapa se debe realizar la identificación de zonas críticas o ejes críticos dentro del depósito. En el caso de los ejes críticos, estos corresponden a un plano perpendicular al eje principal del muro que se considera especialmente importante desde una perspectiva de estabilidad física. Ejemplo de estos ejes pueden ser los siguientes:

- Eje de mayor altura: Este eje se encuentra donde el muro alcanza su altura máxima.
- Zona de máxima sollicitación: Zonas donde se espera que la carga debida a la acumulación de relaves sea máxima.
- Eje asociado a cambio en la geometría del muro: Este eje se identifica en puntos donde el muro experimenta un cambio significativo en su geometría de planta, como curvas pronunciadas, transiciones entre secciones rectas y curvas, o cambios en la dirección del muro.

Esta identificación permite concentrar el monitoreo en áreas críticas, mejorando la eficacia del sistema al dirigir la atención hacia aquellas zonas del depósito que presentan singularidades que representan condiciones particulares no generalizables a otros ejes.

Consecuentemente con lo anterior, se requiere la identificación de los periodos críticos, los cuales representan intervalos específicos a lo largo del ciclo de vida del depósito (incluido el periodo post cierre) donde el riesgo de falla puede incrementarse debido a la alteración de parámetros críticos. Esta situación implica una necesaria adaptación en la frecuencia de monitoreo de “operación normal” a “situación eventual” durante el periodo en cuestión. Algunos de estos períodos críticos que se recomienda considerar son los siguientes:

- Eventos climáticos extremos (ECE): Se refiere a eventos gatilladores de origen natural, como precipitación excesiva, deshielos, sequía, etc.

- Sismos: Específicamente en depósitos ubicados en zonas sísmicas, el monitoreo en tiempo real de parámetros críticos, como aceleraciones sísmicas, presiones de poros y deformaciones es esencial para una respuesta oportuna en caso de una posible falla o colapso.
- Post-evento: Después de eventos críticos, como terremotos y ECE, se debe aumentar la frecuencia de monitoreo para evaluar cualquier cambio en el comportamiento del depósito. Luego evaluar un reajuste de la frecuencia normal de monitoreo en caso de que las condiciones normales del depósito se hayan visto alteradas.
- Operaciones específicas: Si el depósito está sujeto a cambios operativos significativos como: cambios en las tasas de deposición o retirada de relaves, detención de la deposición, etc.

Este enfoque de identificación y adaptación de frecuencias de monitoreo a periodos críticos contribuye a un monitoreo más efectivo y específico, asegurando una respuesta proactiva frente a condiciones que podrían representar riesgos potenciales.

### 5.3.7. Valores de control y/o umbrales

En esta etapa es necesario establecer los valores de control y/o umbrales de seguridad que permitan un seguimiento controlado del comportamiento de la presa, monitoreando los diferentes modos de falla probables. Estos criterios corresponden a los requisitos finales y son fundamentales para la elección adecuada de la instrumentación de monitoreo.

Para la definición de los valores de control y/o umbrales existen 2 enfoques principales; el numérico-analítico y el empírico. El procedimiento numérico-analítico se basa en métodos cuantitativos y modelos físico-matemáticos. El enfoque empírico se apoya en la experiencia práctica, datos históricos de monitoreo y observaciones directas. Ambos enfoques tienen sus méritos y aplicaciones específicas, y la elección entre uno u otro (o de ambos) dependerá de las características particulares del depósito, de la etapa operacional en la que se encuentre y las preferencias de los responsables del diseño del depósito..

El **método numérico analítico** se apoya en modelos físico-matemáticos avanzados, proporcionando resultados precisos y detallados. Su capacidad para adaptarse a diversas condiciones geotécnicas y realizar predicciones cuantitativas, en término de tensiones y deformaciones, es una ventaja destacada. Sin embargo, su complejidad y requisitos de conocimientos especializados, así como la necesidad de recursos computacionales, pueden plantear desafíos, y los resultados pueden ser susceptibles a incertidumbres cuando los parámetros de entrada no son fruto de una investigación geotécnica exhaustiva para cumplir con este propósito buscado.

Por su parte, el **método empírico** se basa en la experiencia práctica y observaciones directas, a menudo utilizando datos históricos de monitoreo del mismo depósito o eventualmente depósitos similares. Su simplicidad y rapidez son ventajas clave, pero puede carecer de precisión para condiciones específicas del depósito. Además, si el depósito en cuestión tiene particularidades no representadas en los datos históricos, la efectividad del enfoque empírico

puede verse limitada.

La elección de un enfoque implica un equilibrio entre la precisión deseada, la disponibilidad de recursos, información, y la complejidad del sistema. Aunque también se puede optar por una combinación de ambos para obtener resultados más completos y robustos.

El método empírico se puede ver inicialmente fortalecido por el uso de datos o experiencias de monitoreo de otros depósitos de relaves, concepto conocido como “benchmarking”. En este análisis estratégico se busca identificar patrones, tendencias y mejores prácticas mediante la comparación de datos históricos relevantes. Esto incluye evaluar el comportamiento del depósito en condiciones similares, analizando eventos pasados, modos de falla y la eficacia de las estrategias de monitoreo implementadas. El benchmarking implica una comparación con datos de depósitos similares, promoviendo la posibilidad de compartir datos entre diferentes empresas administradoras de depósitos de relaves. Esta colaboración mutua es vital y podría contribuir al fomento de buenas prácticas, aumentar la cantidad de datos disponibles y mejorar el diseño de nuevos depósitos, la eficacia del monitoreo en depósitos existentes, y facilitar el aprendizaje para ingenieros(as) sin experiencia al acceder a información compartida y detallada.

Como resultado de esta etapa, se logrará la definición de los valores de control y/o umbrales del sistema de monitoreo. Un ejemplo concreto de un requisito final podría ser: “Durante operación normal, el desplazamiento vertical en la zona “X” del muro del depósito no debe exceder los 20 mm en un año”. En este ejemplo específico se ilustra que, para la Declaración de Objetivos, se establecerán múltiples requisitos interrelacionados, contemplando factores como desplazamientos horizontales, inclinaciones, formación de grietas, entre otros, los cuales se integrarán a los valores de control y/o umbrales.

Cabe recalcar que la formulación de estos criterios está sujeta a la evaluación y experiencia de los expertos encargados del diseño del depósito de relaves, quienes seleccionarán la metodología más apropiada según las condiciones particulares y características específicas del depósito. Este enfoque garantiza que los requisitos sean robustos, adaptándose a las particularidades de cada depósito y asegurando un sistema de instrumentación y monitoreo efectivo y alineado con los objetivos establecidos.

### **5.3.8. Diseño preliminar del sistema**

A partir de este punto, se puede desarrollar el Diseño Preliminar del sistema para la instrumentación y monitoreo de depósitos de relaves. Esto implica determinar con precisión la ubicación estratégica para la medición de parámetros críticos incluyendo la identificación de los puntos clave en el depósito donde se instalarán los instrumentos de monitoreo (zonas críticas). Además, se establecerá el sistema de recolección de datos, definiendo cómo se llevará a cabo la auscultación para velar por una cobertura efectiva en espacio y tiempo. También se define la frecuencia de lecturas para los distintos periodos críticos. Se planifica el procesamiento de la información, diseñar los informes a generar, establecer la frecuencia de interpretación de los resultados, entre otros aspectos relevantes. Por último, se debe definir el

alcance de las inspecciones visuales que se realizarán de manera complementaria para obtener una evaluación cualitativa del depósito y las estructuras que lo componen (Federal Energy Regulatory Commission, 2015).

Como resultado tangible en esta etapa, se desarrollará un documento clave conocido como la **”filosofía de instrumentación y monitoreo”**. Este entregable proporcionará una visión completa y detallada de cómo se estructurará el sistema de instrumentación y monitoreo, abordando sus componentes fundamentales.

Se debe declarar qué se espera de la herramienta de monitoreo a nivel de plataforma de visualización y qué información complementaria debe proyectarse en conjunto con lo auscultado por sensores del proyecto de instrumentación. Esto hace referencia a la información asociada a construcción y operación del depósito que permita ayudar a entender la posible **”causa”** respecto a los **”efectos”** que se van detectando en la evolución de los datos de monitoreo. Ejemplo de estos son: interrupciones o modificaciones en plan de deposición de relaves, eventos constructivos, eventos meteorológicos, alteraciones de los caudales de bombeo de aguas subterráneas, entre otros. Esta información debe ser incorporada en la plataforma de monitoreo para que la interpretación de los valores auscultados no solo se haga en función de la evolución del dato, sino que también se pueda realizar un análisis causa-efecto en el comportamiento del depósito. Esto es fundamental a la hora de entender el **”estado de salud”** de la estructura. En definitiva, en la formulación de la filosofía de instrumentación y monitoreo se debe declarar si es de interés entender cómo responde el depósito frente a estímulos naturales y/o antrópicos.

### **5.3.9. Diseño detallado de los subsistemas**

A continuación, se llevaría a cabo el Diseño Detallado de los subsistemas. En esta etapa se selecciona la instrumentación que cumpla con los requerimientos definidos previamente, es decir, un instrumento que se pueda instalar en la ubicación predeterminada y pueda obtener datos con la frecuencia establecida (incluyendo la frecuencia de los periodos críticos). Es crucial destacar que en esta fase también se definen los procesos y se establecen las responsabilidades de las partes involucradas en el suministro, instalación y puesta en marcha de la instrumentación.

Dado que la configuración de la instrumentación puede depender de la ubicación específica del sensor, como en el caso de estaciones robóticas limitadas por líneas de visión, el diseño debe ser flexible y adaptarse a las condiciones particulares del depósito de relaves.

Los entregables de esta etapa corresponden a las EETT (especificaciones técnicas) de construcción, planos detallados que reflejen la disposición de la instrumentación en el depósito, y procedimientos detallados para la puesta en marcha del sistema. La correcta elaboración de estos documentos son un paso clave para la implementación del sistema de monitoreo, asegurando que la construcción se realice de acuerdo con las especificaciones y que la instrumentación funcione de manera óptima una vez que esté operativa.

En conjunto, estas etapas conforman un marco integral para el desarrollo de un plan de instrumentación y monitoreo efectivo, asegurando que se aborden todas las consideraciones críticas para la seguridad y estabilidad a lo largo de la vida útil del depósito de relaves, incluyendo su cierre.

Cada fase contribuye de manera única para velar por que el sistema no solo cumpla con los estándares regulatorios y de seguridad, sino que también sea adaptable a los cambios y desafíos específicos asociados con los depósitos de relaves a lo largo del tiempo.

Un plan de instrumentación y monitoreo deberá revisarse y eventualmente ajustarse, cada vez que se introduzcan modificaciones al diseño y/o a la construcción del depósito.



# Capítulo 6

## Análisis y discusiones

En la sección de antecedentes normativos, se observa una ausencia de criterios específicos más allá de la simple solicitud de monitoreo. Aparentemente, estas normativas no ofrecen pautas detalladas o criterios específicos para la selección, instalación y operación de los sistemas de monitoreo. Esta carencia de criterios específicos puede plantear desafíos significativos para los propietarios y operadores de los depósitos de relaves, ya que no cuentan con orientación clara sobre las mejores prácticas y estándares para evaluar la seguridad y estabilidad de las estructuras. Por lo tanto, se hace evidente la necesidad de desarrollar pautas más detalladas y criterios específicos en materia de monitoreo para abordar eficazmente los riesgos asociados con los depósitos de relaves.

Respecto a los incidentes/fallas en depósitos de relaves, los países que cuentan con la mayoría de estas, concuerdan con la estimación que se tiene de la cantidad de depósitos de relaves de acuerdo a su actividad minera, como Estados Unidos, Chile, Canadá, Australia y Perú por ejemplo. Los análisis sobre este catastro de fallas, presentados en la misma sección, resaltan la crucial importancia de adoptar un enfoque proactivo y holístico en el diseño, operación, construcción y monitoreo de presas de relaves. En este contexto, la identificación anticipada de posibles fallas se ve considerablemente facilitada al implementar prácticas operativas y de diseño bien fundamentadas.

El análisis de los datos del catastro de instrumentación de DR chilenos revela patrones significativos en relación con la cantidad y distribución de instrumentación, especialmente en función de la clasificación de los depósitos. Se observa de manera coherente que la cantidad de instrumentación aumenta a medida que también lo hace la categoría (A, B, C o D). En particular, los embalses y tranques (depósitos convencionales), son los que cuentan con más instrumentación debido a que las características (y dimensiones) propias de estos lo hacen más susceptibles a tener más modos de falla creíbles que un depósito no convencional como los depósitos filtrados. Sin embargo, es importante destacar que esta afirmación no es una regla absoluta, ya que la experiencia acumulada en la gestión de riesgos puede variar. Por ejemplo, aunque hay una mayor experiencia en la identificación y mitigación de riesgos en depósitos convencionales, los depósitos filtrados pueden presentar desafíos únicos que requieren una atención especial y un enfoque adaptativo en términos de monitoreo y gestión de riesgos.

Un hallazgo preocupante es la baja presencia de acelerómetros, sobre todo teniendo en cuenta que los sismos son la principal causa de fallas en Chile, según lo indicado en el catastro de fallas. La escasa disponibilidad de este instrumento sugiere una limitación en la capacidad de monitorear adecuadamente las aceleraciones sísmicas y el daño que estas generan, parámetro crítico esencial para evaluar y gestionar el riesgo asociado a este tipo de eventos.

En términos de la disposición de acelerómetros, se observa una tendencia común de ubicar tres instrumentos, uno en la roca, otro en el suelo natural o la base, y el último en el coronamiento. Esta práctica demuestra una preocupación por captar las variaciones en la aceleración en distintas ubicaciones críticas, lo cual es importante para una evaluación integral de los efectos sísmicos y su amplificación en la estructura.

Otro aspecto destacado, esta vez en el apartado de inclinómetros, es la limitada presencia de instrumentación para medir deformaciones, especialmente en el muro, a pesar de su importancia para depósitos con muros grandes, como los de categoría C o D. La falta de atención a este parámetro crítico es una brecha significativa en el monitoreo, ya que las deformaciones pueden ser indicadores tempranos de la posible iniciación de un modo de falla en estos depósitos.

Es una práctica cada vez más común en los depósitos utilizar métodos de monitoreo no invasivos o semi invasivos, específicamente para evaluar la topografía general. En particular, el uso de drones se ha vuelto una elección frecuente en el monitoreo no invasivo.

A medida que se profundiza en el análisis de la instrumentación catastrada, se hace evidente la necesidad imperante de establecer un riguroso sistema de monitoreo. El catastro proporciona una valiosa visión de la infraestructura existente y su distribución, pero su mera existencia no es suficiente para garantizar la seguridad y la eficacia en la gestión de los depósitos de relaves. Más allá de contar con una amplia gama de instrumentación, es fundamental implementar una estrategia de monitoreo continuo y sistemático que permita detectar de manera temprana o anticipada cualquier anomalía o potencial riesgo en la estabilidad y funcionamiento de los depósitos.

Respecto al análisis de la estrategia propuesta se tiene que, en primer lugar, considera las prioridades de todas las partes interesadas a la hora de velar por la estabilidad del depósito, asegurando una perspectiva holística en la declaración del propósito y los objetivos del sistema de monitoreo, reconociendo la posibilidad de conflictos entre las declaraciones de partes interesadas y propone una Evaluación de Objetivo o Compensaciones, demostrando un enfoque proactivo para resolver discrepancias.

Adicionalmente, se propone la identificación de ejes críticos y zonas críticas para concentrar el monitoreo, así como la adaptación de la frecuencia de monitoreo a periodos críticos específicos. La estrategia destaca dos enfoques para establecer valores de control, numérico-analítico y empírico, y resalta la importancia del benchmarking y la experiencia práctica en la definición de estos valores.

Finalmente, se aborda la ubicación estratégica de la instrumentación y la necesidad de fle-

xibilidad en el diseño, asegurando que la instrumentación sea adaptable a las condiciones específicas del depósito. Se subraya la importancia de una filosofía de instrumentación y monitoreo clara, enfocándose en la selección cuidadosa de instrumentación para garantizar una cobertura efectiva en espacio y tiempo.

En resumen, esta estrategia secuencial se puede entender como una guía detallada para el desarrollo de un plan de instrumentación y monitoreo (I&M) efectivo para depósitos de relaves activos.

También resulta beneficioso en caso de modificaciones en el plan I&M, ya que es posible iniciar la estrategia en la etapa de interés. Por ejemplo, si un cambio en las características del depósito conduce a un nuevo análisis FMEA, incorporando un modo de falla probable adicional, se puede retroceder a la etapa de identificación de modos de falla y proceder desde allí para ajustar el plan I&M, ya que las etapas anteriores no deberían experimentar modificaciones.

# Capítulo 7

## Conclusiones

Sobre los depósitos que respondieron la ficha de instrumentación, se observa que la mayoría de los depósitos más grandes, clasificados como Categoría C y D, del país respondieron casi en su totalidad (88,5 %). En contraste, solo un 20,8 % de los depósitos medianos clasificados como Categoría B respondieron, mientras que los depósitos más pequeños, es decir, clasificados como Categoría A, solo representaron un 1,2 % de cumplimiento. Esta disparidad en las respuestas puede atribuirse al tipo de minería a la que pertenecen, ya sea gran, mediana o pequeña minería, y sus respectivas capacidades y recursos disponibles para cumplir con los requisitos de instrumentación y monitoreo.

A partir de del análisis del catastro, se tiene que la cantidad de instrumentación se correlaciona directamente con la categoría asignada a los depósitos (A, B, C o D). Específicamente, los embalses y tranques (depósitos convencionales) sobresalen con una mayor cantidad de instrumentación, lo cual se atribuye a sus características y dimensiones particulares que los vuelven más susceptibles, a presentar más modos de falla creíbles en comparación con depósitos no convencionales, como los depósitos filtrados. Esta relación entre la categoría del depósito y la cantidad de instrumentación subraya la importancia de adaptar estratégicamente los sistemas de monitoreo según las características específicas y los riesgos inherentes a cada tipo de depósito.

Otra correlación directa con el tamaño del depósito, es que a medida que aumenta la categoría, también lo hace la automatización, tecnología y frecuencia de monitoreo de los instrumentos o sensores utilizados. Esta tendencia nuevamente se atribuye al tipo de minería a la que pertenece el depósito y los recursos disponibles. Sin embargo, esta correlación no justifica la escasa o nula instrumentación observada en algunos tipos de monitoreo realizados por pequeños depósitos, ya que aunque una operación minera sea de pequeña o mediana escala, el monitoreo e instrumentación debería recibir una adecuada prioridad dentro del presupuesto y los recursos disponibles.

Como una conclusión más del catastro se subraya la necesidad de mejorar y diversificar la instrumentación, especialmente en aspectos cruciales como las aceleraciones sísmicas y las deformaciones en muros, para fortalecer la capacidad de monitoreo y gestión de riesgos asociados a los eventos sísmicos.

En la estrategia propuesta, la declaración de un propósito y objetivos, la evaluación de modos de falla, la identificación de parámetros críticos y eventos gatilladores, y la formulación de criterios de seguridad proporcionan una base sólida para la selección adecuada de la instrumentación mínima necesaria para cumplir con el propósito buscado.

Un correcto análisis de modos de falla (FMEA) ofrece una visión clara de los riesgos potenciales, permitiendo una priorización informada en la elección de los parámetros a monitorear. La consideración de eventos gatilladores y periodos críticos asegura una respuesta proactiva a condiciones cambiantes, aumentando la efectividad del monitoreo.

La etapa de definición de valores de control o umbrales, con enfoques numéricos y empíricos, proporciona flexibilidad y adaptabilidad, esenciales dada la variabilidad en las condiciones de los depósitos. Además, la identificación de zonas críticas y ejes críticos mejora la focalización de la instrumentación, optimizando recursos.

El catastro de instrumentación se presenta como una valiosa herramienta para la etapa mencionada anteriormente, siendo un ejemplo de benchmarking, al compartir datos de depósitos clasificados con el fin de poder utilizar esta información para un trabajo o proyecto de instrumentación de un depósito con características similares. Así, se recalca, la importancia crítica de la colaboración entre las diversas entidades involucradas (empresas mineras), ya que puede contribuir al fomento de buenas prácticas, aumentar la cantidad de datos disponibles y mejorar el diseño de nuevos depósitos, la eficacia del monitoreo en depósitos existentes, y facilitar el aprendizaje para ingenieros(as) sin experiencia al acceder a información compartida y detallada.

En cuanto al Diseño Preliminar del Sistema, la cuidadosa planificación de la ubicación de instrumentos, la frecuencia de lecturas y el procesamiento de datos sienta las bases para un monitoreo eficiente. Con eso se le da forma a una herramienta de interpretación que entregue información relevante para la toma de decisiones de operación y/o construcción. La "filosofía de instrumentación y monitoreo" se convierte en una guía fundamental para su implementación, asegurando la coherencia y cohesión del sistema.

Este enfoque estructurado para diseñar un plan de instrumentación y monitoreo no solo es crucial para mitigar riesgos sino que también contribuye al desarrollo sostenible de la industria minera, al permitir un seguimiento controlado del comportamiento de los depósitos de relaves en pos de su seguridad y estabilidad a lo largo de la vida útil.

El diagrama que representa la serie de etapas secuenciales que comprenden la propuesta de estrategia para el sistema de instrumentación y monitoreo debe ser entendido como un ejercicio que forma parte del diseño de ingeniería de un depósito de relaves y que debe ser desarrollado en paralelo. Algunas de estas etapas, como la declaración de objetivos y el estudio FMEA, entre otros, no son propios de un proyecto de instrumentación y monitoreo, sino que son elementos fundamentales del diseño de ingeniería del depósito.

La estrategia de monitoreo se encuentra focalizada en abordar las fallas no frágiles, dado que las fallas frágiles suelen tener un tiempo de respuesta muy limitado o son tan repentinas

que resulta imposible preverlas o mitigar sus consecuencias. Sin embargo, esta estrategia permite manejar la información necesaria para, en caso de existir un tiempo pertinente, alertar a la población que pueda verse afectada o mitigar los daños ambientales. Aunque no sea posible evitar por completo las fallas frágiles, el monitoreo adecuado proporciona una herramienta valiosa para minimizar su impacto en la medida de lo posible y para tomar acciones oportunas cuando sea factible.

En resumen, se logra alcanzar el objetivo principal de definir una estrategia que establezca la instrumentación mínima necesaria para el monitoreo geotécnico de depósitos de relaves. Este enfoque puede servir como punto de partida para el desarrollo de una guía que estandarice el proceso de selección de instrumentación o para la formulación de un plan integral de monitoreo e instrumentación, el cual deberá justificar de manera clara y fundamentada la elección de la instrumentación utilizada.

# Capítulo 8

## Recomendaciones

Como recomendaciones para el trabajo futuro, se puede mencionar lo siguiente:

Resulta evidente la necesidad de establecer una etapa de validación del diseño del plan de instrumentación y monitoreo evaluando si el producto logra cumplir con el objetivo declarado, probando esta estrategia en un depósito existente y revisar la cantidad, ubicaciones, frecuencias y tipo de instrumentación resultante.

La elaboración del catastro se llevó a cabo con el principal propósito de utilizarlo como una herramienta. Por lo que solo se llevó a cabo un análisis preliminar, pero no exhaustivo, ni se realizó una evaluación crítica de la instrumentación de los depósitos de relaves en Chile. Esta tarea, que podría ser considerada como un trabajo futuro, resultaría fundamental para determinar la utilidad real del catastro como Benchmarking en Chile.

Para ampliar el conjunto de herramientas, como el catastro de instrumentación, sería altamente beneficioso desarrollar un recurso similar para la obtención de valores de control y/o umbrales empleados en el monitoreo de parámetros críticos en depósitos de relaves. Esta iniciativa se convertiría en un recurso valioso para aplicar el benchmarking en los depósitos de relaves en Chile. Para llevar a cabo este proyecto de manera efectiva, es crucial contar con la colaboración y apoyo de entidades clave, como SERNAGEOMIN, así como la participación activa de un número significativo de empresas mineras.

La revisión continua y la actualización de los sistemas de monitoreo en función de los avances tecnológicos y nuevas lecciones aprendidas son prácticas esenciales.

# Capítulo 9

## Bibliografía

Azam, S & Li, Q. (2010). 'Tailings Dam Failures: A Review of the Last 100 Years', *Geotechnical News: Waste GEOtechnics*, pp. 50-53.

Carvajal, M. (2018). Desarrollo de una metodología para análisis de estabilidad física de depósitos de relaves.

Center for Science in Public Participation (CSP2). Tailings Dam Failures 1915-2023, viewed 03 Jan 2024. <http://www.csp2.org/tsf-failures-from-1915/>

Clarkson, L. (2021). *Comprehensive Monitoring Strategy for Tailings Dams*. University of Queensland.

Davies, M., Martin, D. & Lighthall, P. (2002). 'Mine Tailings Dams - When Things go Wrong' *Proceedings of Tailings Dams 2000*, Association of State Dam Safety Officials, U.S. Committee on Large Dams, Las Vegas, Nevada: 261-273.

Elliot, C. & Deasly, P. (2007). *Creating systems that work: Principles of engineering systems for the 21st century*. ISBN: 1-903496-34-9. The Royal Academy of Engineering.

Fannin, R.J., & Slangen, P. (2014). 'On the distinct phenomena of suffusion and suffosion', *Géotechnique*, vol. 4, iss. 4, pp. 289-294.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2014). *Technical Manual: Overtopping Protection Alternatives for Dams*.

Federal Energy Regulatory Commission (FERC). (2015). *Engineering Guidelines for the*



Evaluation of Hydropower Projects, Chapter 9, “Instrumentation and Monitoring”.

Fell, R, MacGregor, P, Stapledon, D, Bell, G & Foster, M. (2015). *Geotechnical Engineering of Dams*, 2nd edn, CRC Press/Balkema, The Netherlands.

Flores, A. (2019). Propuesta metodológica de instrumentación y monitoreo para evaluar la estabilidad física de un depósito de relaves abandonado en Chile.

Fuentes, R., Ferreira, P., & Swain, A. (2010). Monitoring systems: Effective implementation for risk reduction. In: 11th DFI / EFFC International Conference on Geotechnical Challenges in Urban Regeneration, 26-28 May 2010, London.

Fundación Chile (2018). Avances y retos para la gestión de los depósitos de relaves en Chile. Santiago, Chile.

Global tailings Review (2020). Global Industry Standard on Tailings Management.

Holtz R. D., Kovacs W. D. (1981). “An Introduction to Geotechnical Engineering”, Prentice Hall

International Commission on Large Dams (ICOLD). (2001). Tailings dams: risk of dangerous occurrences: lessons learnt from practical experiences (Vol. 121). United Nations Publications.

Jantzer, I. (2009). ‘Critical hydraulic gradients in tailings dams: Comparison to natural analogies’, Licentiate Thesis, Luleå University of Technology, Sweden.

Mine Safety and Health Administration MSHA. (2010). Engineering and Design Manual Coal Refuse Disposal Facilities.

Ministerio de Minería de Chile. (2007). Decreto Supremo No 248: Reglamento para la aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves

Ministerio de Minería de Chile. (2019). Plan nacional de depósitos de relaves para una minería sostenible.

Ministerio de Obras Públicas. (2015). Decreto 50.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). (1995) Systems engineering handbook. SP610S.

Liang, JZ & Elias, D. (2010). 'Seismic Evaluation of Tailings Storage Facility', Australian Earthquake Engineering Society, Perth, Western Australia.

PGS Chile (2018). Estudios de normativas internacionales de diseño, construcción, operación, cierre y post cierre de depósitos de relaves.

Ramírez, N. (2007) Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves. Chile, SERNAGEOMIN

Santamarina, J., Torres-Cruz, L. Bachus, R. (2019). Why coal ash and tailings dam disasters occur. *Science* 364 (6440), 526-528.

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2018). Guía Metodológica para Evaluación de Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remanentes

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2023). Datos públicos depósitos de relaves. <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>

U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (2003). 'Slope Stability', in Engineer Manuals.

U.S. Bureau of Reclamation (USBR). (2015). 'Internal Erosion Risks for Embankments and Foundations', in Best Practice and Risk Methodology, Security, Safety, and Law Enforcement Office – Dam Safety.

Villavicencio, G., Espinace, R., Palma, J., Fourie, A., & Valenzuela Pamela. (2014). Failures of sand tailings dams in a highly seismic country.

ZagonJolli, M. (2007). 'Dam Break Modelling, Risk Assessment and Uncertainty Analysis for Flood Mitigation', PhD thesis, Delft University of Technology, the Netherlands.

Zhang, L, Peng, M, Chang, D, & Xu, Y. (2016). Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment, 1st edn, John Wiley & Sons, Singapore.

# ANEXOS

# Anexo A

## Depósitos convencionales

### A.1. Piezómetros

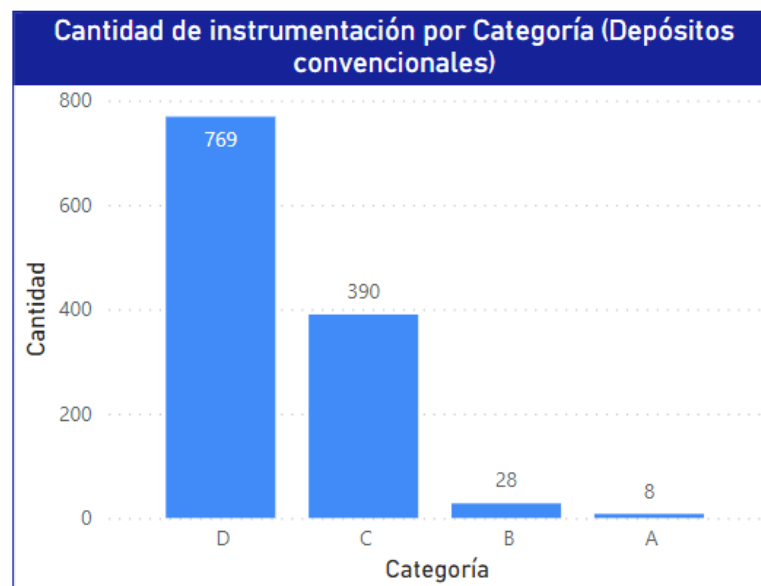


Figura A.1: Cantidad de piezómetros por Categoría para depósitos convencionales.

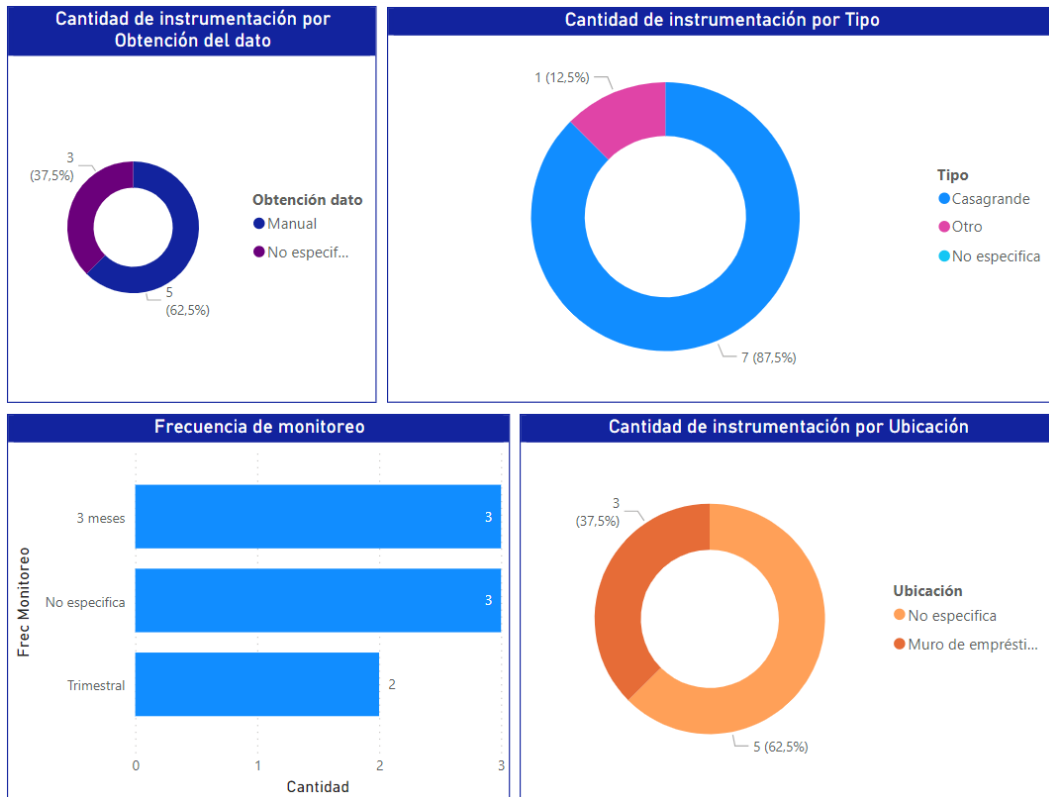


Figura A.2: Características Piezómetros Categoría A (Depósitos convencionales).

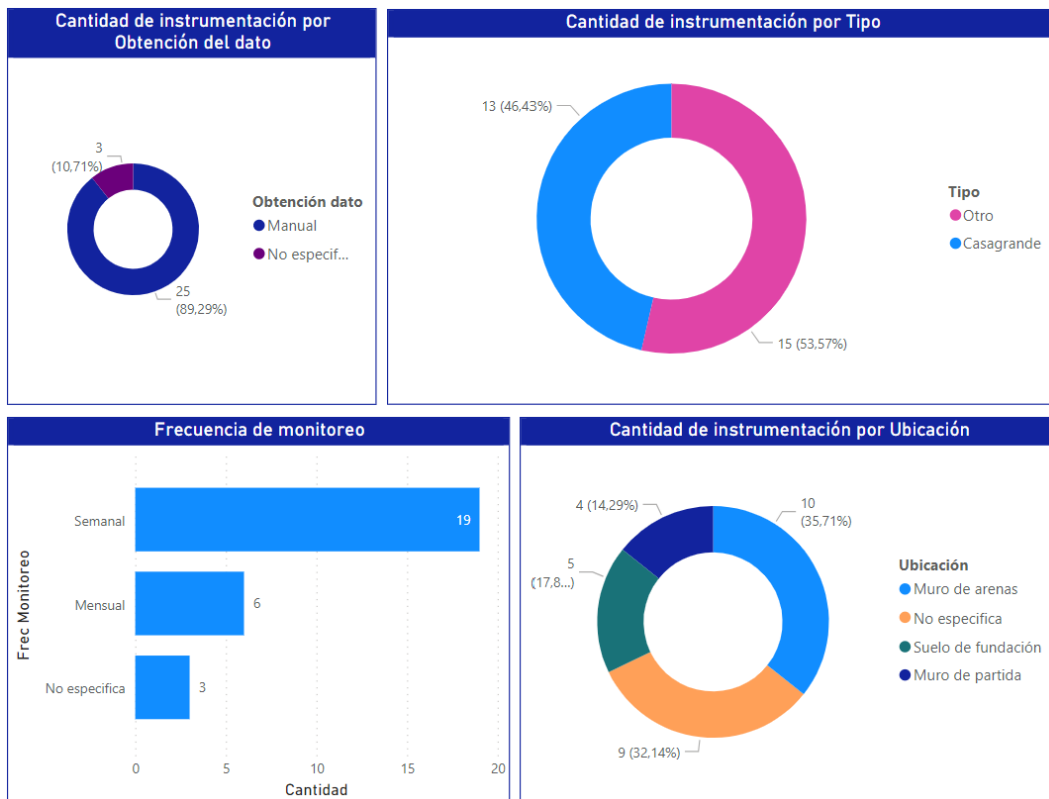


Figura A.3: Características Piezómetros Categoría B (Depósitos convencionales).

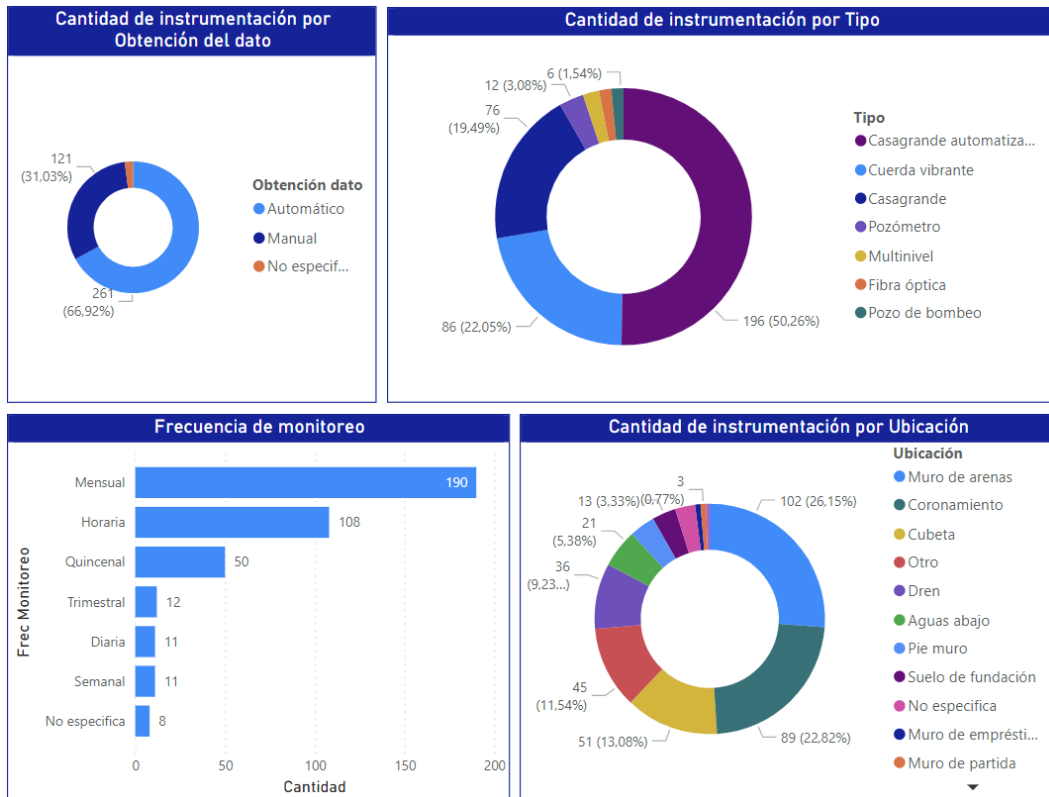


Figura A.4: Características Piezómetros Categoría C (Depósitos convencionales).

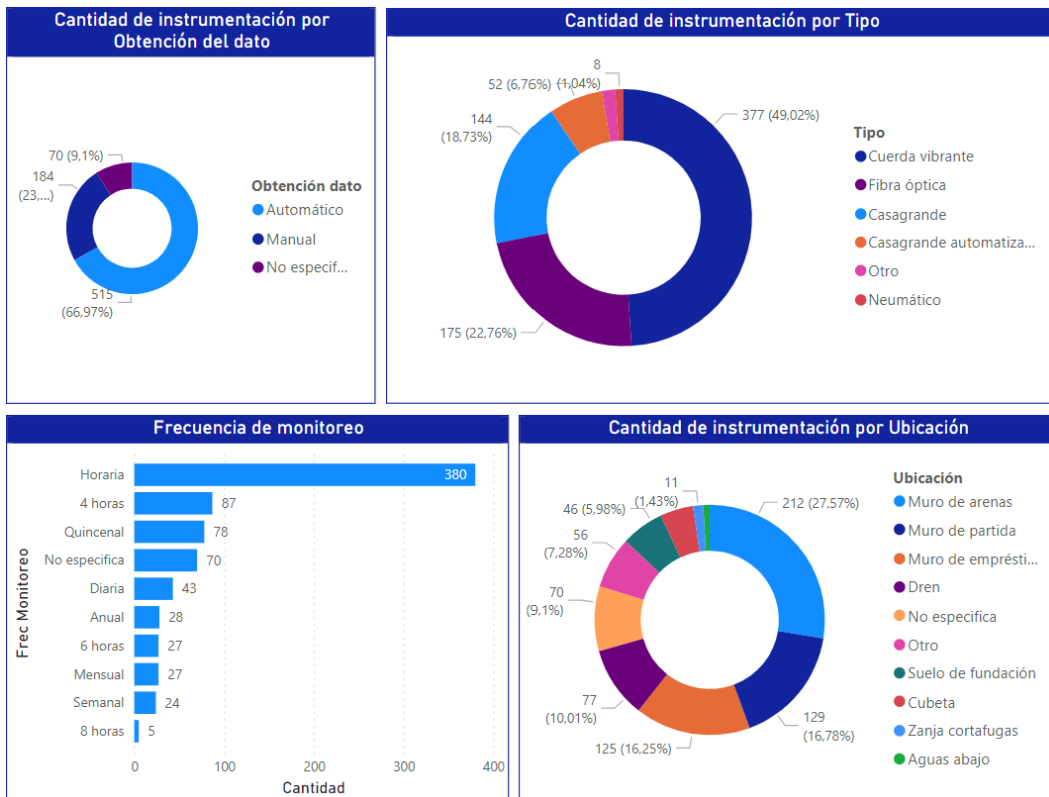


Figura A.5: Características Piezómetros Categoría D (Depósitos convencionales).

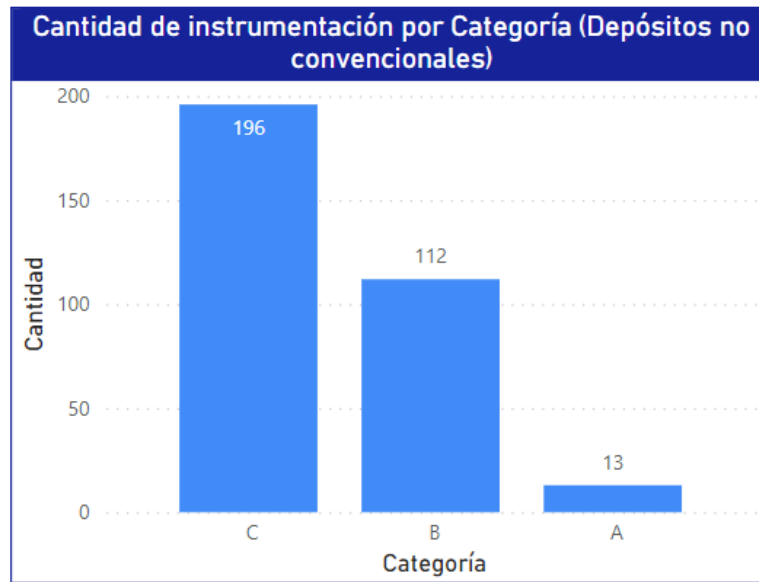


Figura A.6: Cantidad de hitos de control por Categoría para depósitos convencionales.

## A.2. Hitos de control

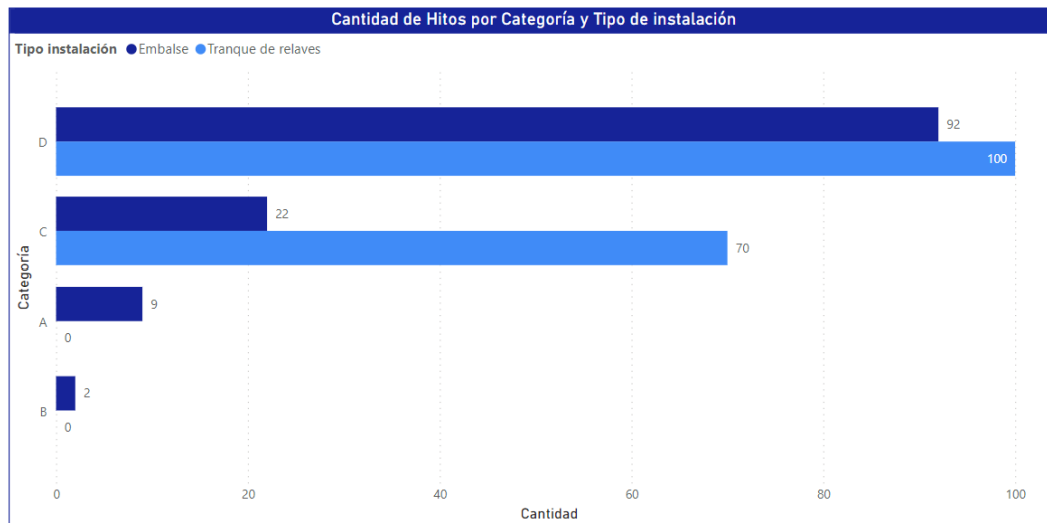


Figura A.7: Total de Hitos por Categoría y Tipo de instalación (Depósitos convencionales).

### A.3. Inclínómetros

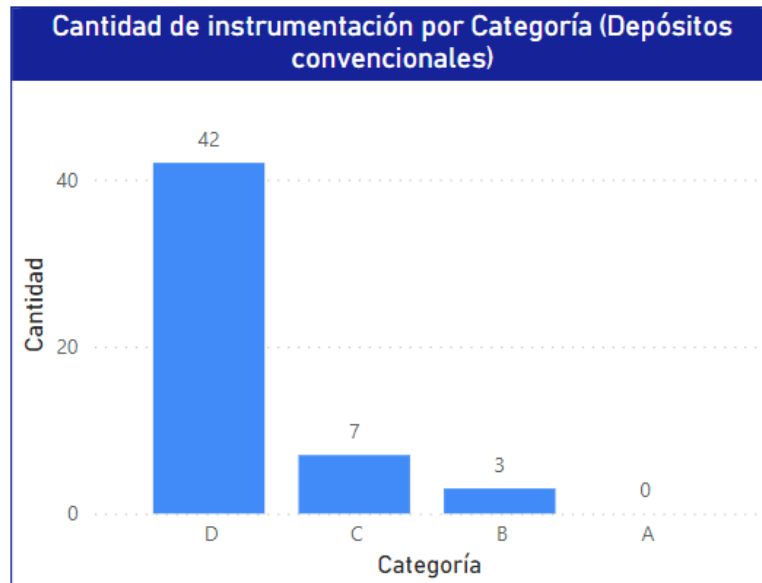


Figura A.8: Cantidad de inclinómetros por Categoría para depósitos convencionales.

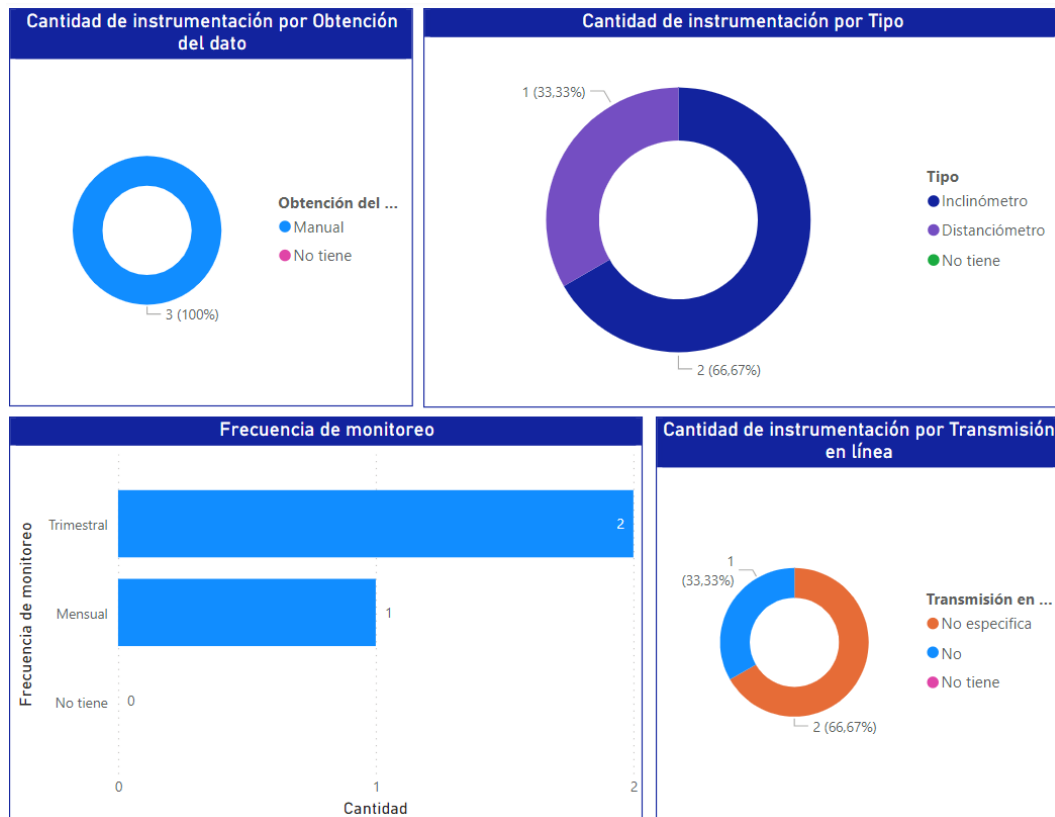


Figura A.9: Total de Inclínómetros Categoría B (Depósitos convencionales).



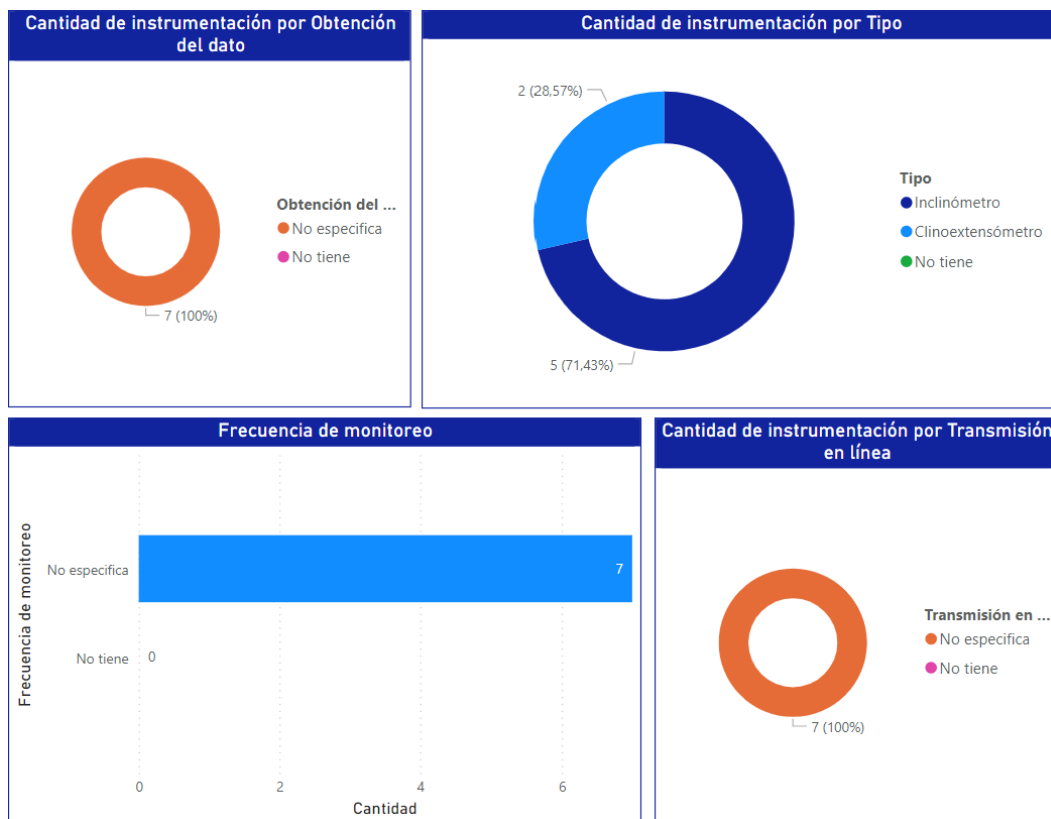


Figura A.10: Total de Inclinómetros Categoría C (Depósitos convencionales).

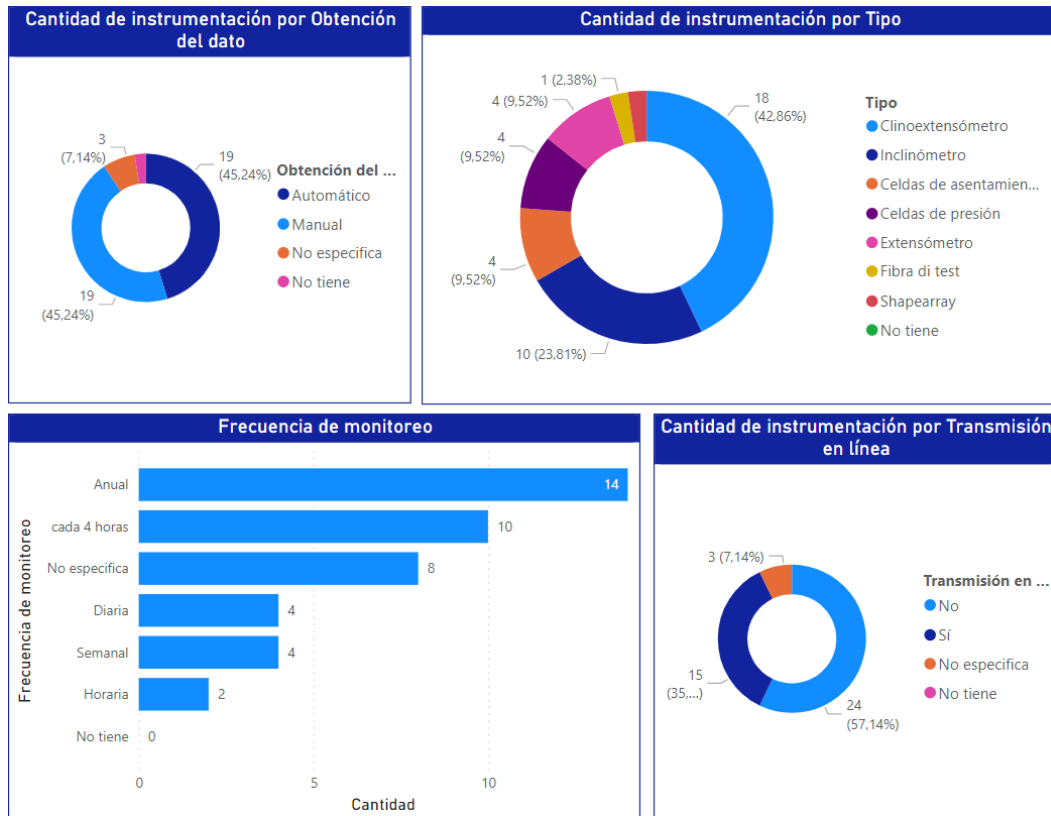


Figura A.11: Total de Inclinómetros Categoría D (Depósitos convencionales).

#### A.4. Acelerómetros

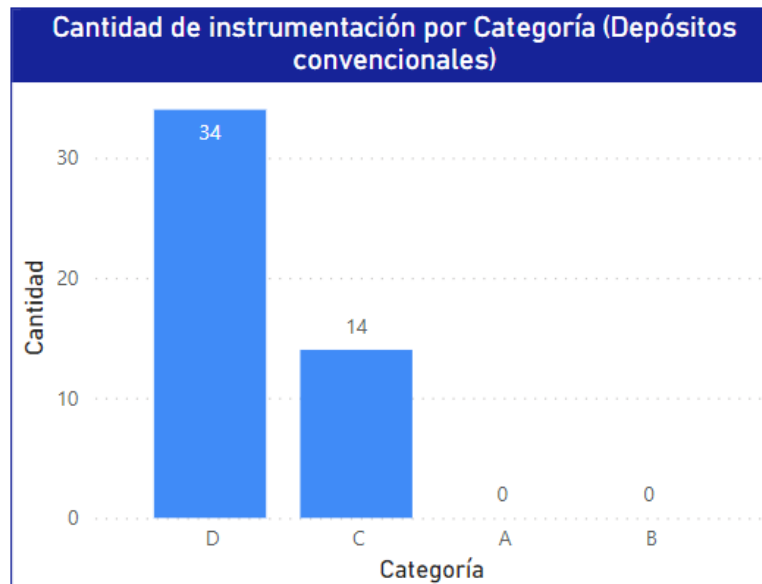


Figura A.12: Cantidad de acelerómetros por Categoría para depósitos convencionales.

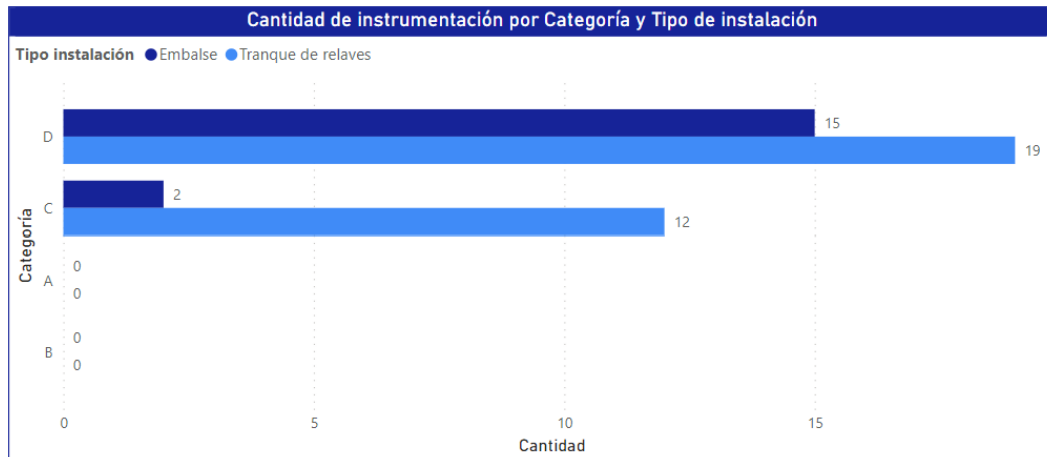


Figura A.13: Total de Acelerómetros por Categoría y Tipo de instalación (Depósitos convencionales).

## A.5. Metereología

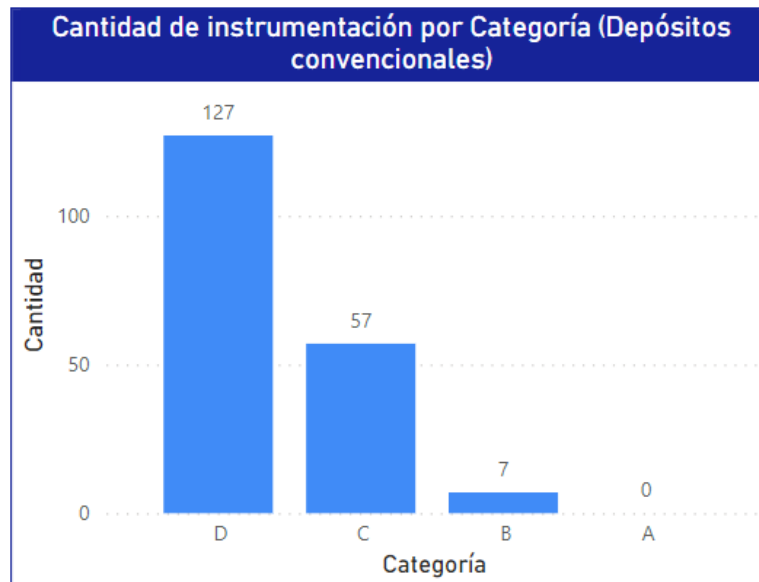


Figura A.14: Cantidad de sensores para el monitoreo meteorológico por Categoría para depósitos convencionales.

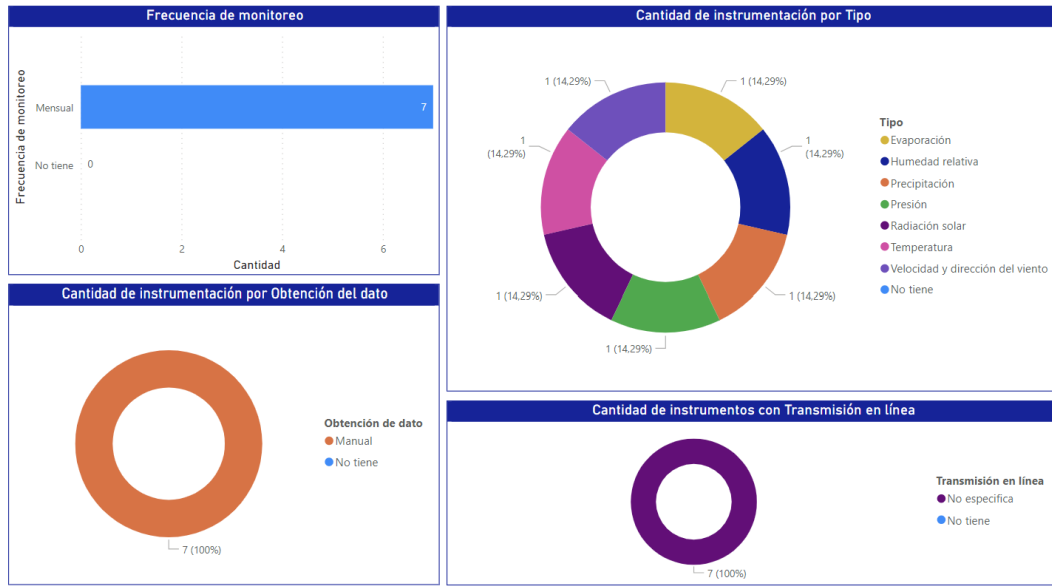


Figura A.15: Instrumentación de Meteorología Categoría B (Depósitos convencionales).

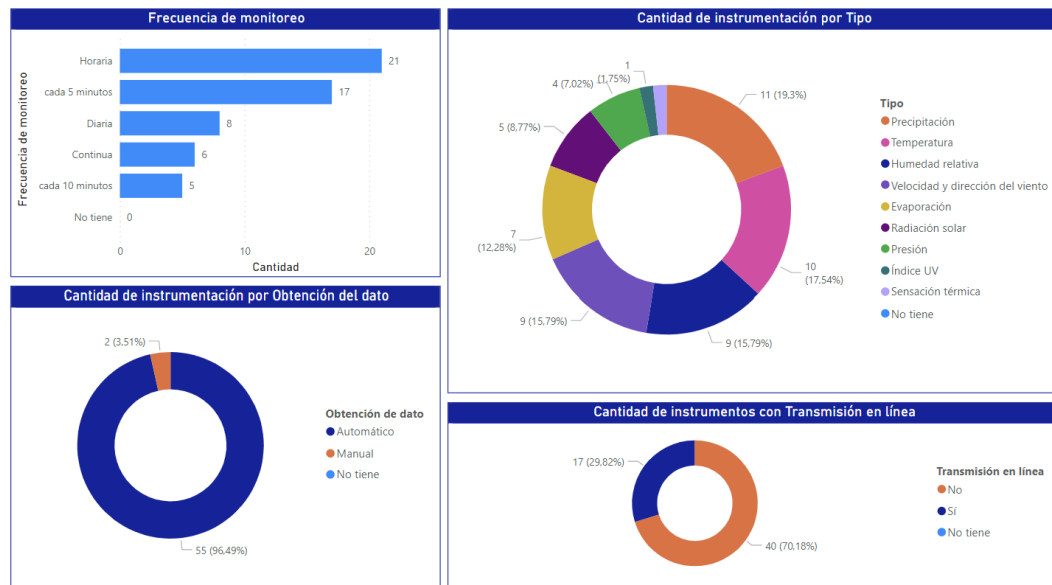


Figura A.16: Instrumentación de Meteorología Categoría C (Depósitos convencionales).

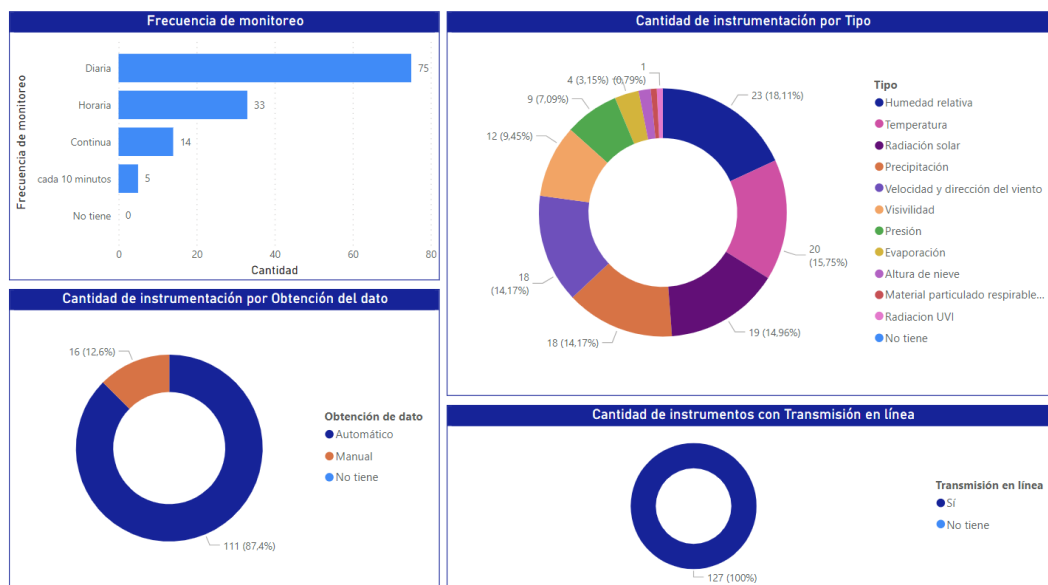


Figura A.17: Instrumentación de Metereología Categoría D (Depósitos convencionales).

## A.6. Drenes

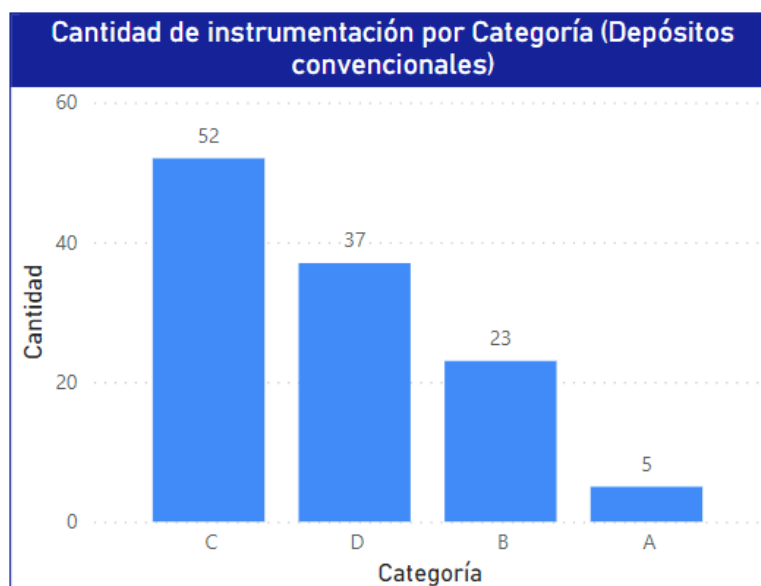


Figura A.18: Cantidad de instrumentos para el monitoreo de drenes por Categoría para depósitos convencionales.

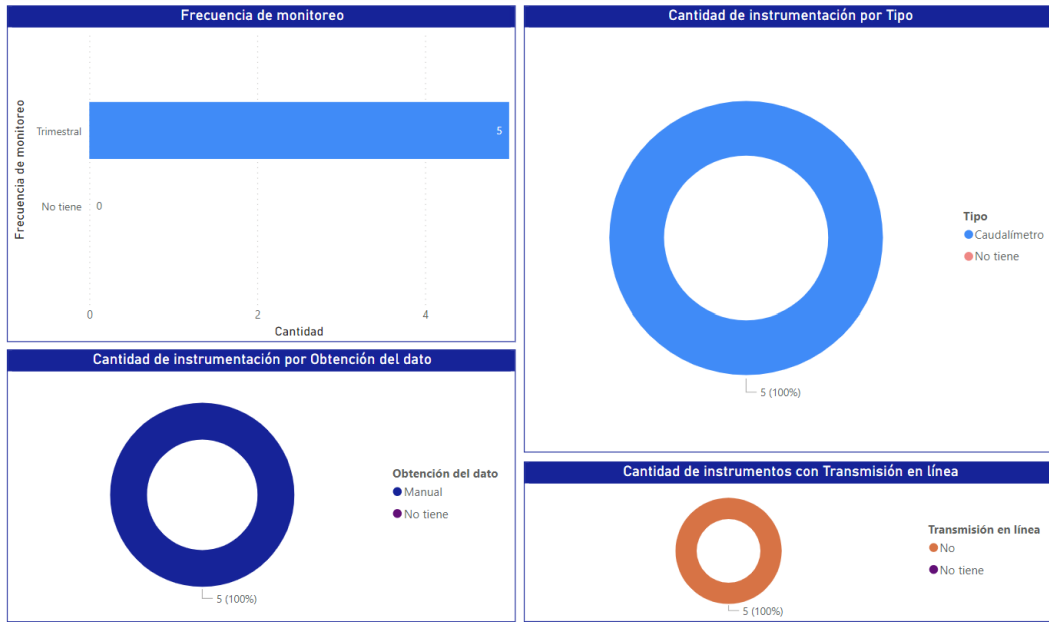


Figura A.19: Instrumentación de Drenes Categoría A (Depósitos convencionales).

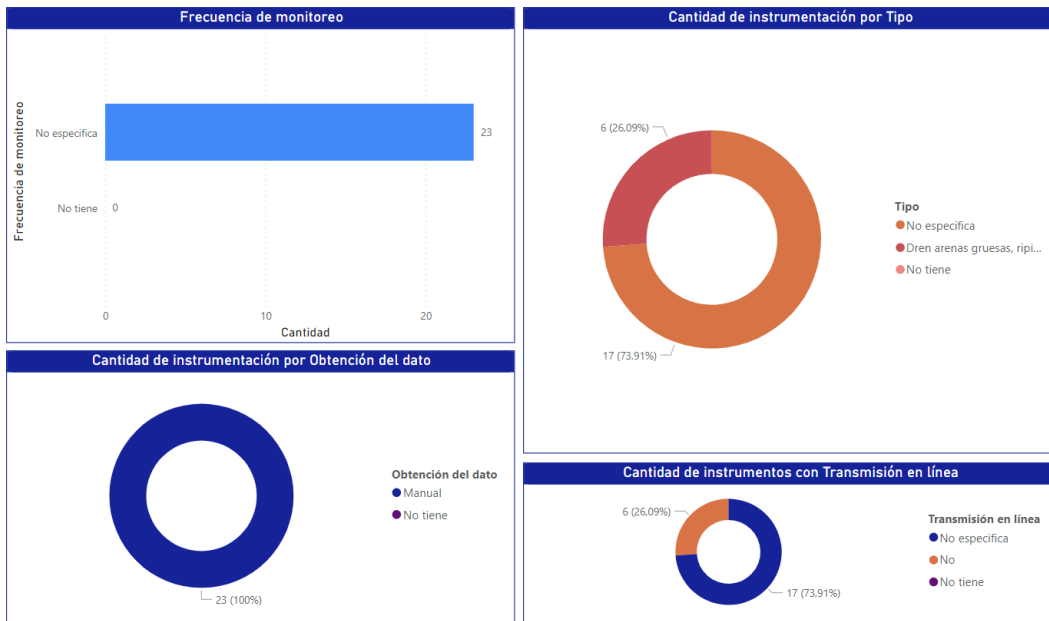


Figura A.20: Instrumentación de Drenes Categoría B (Depósitos convencionales).

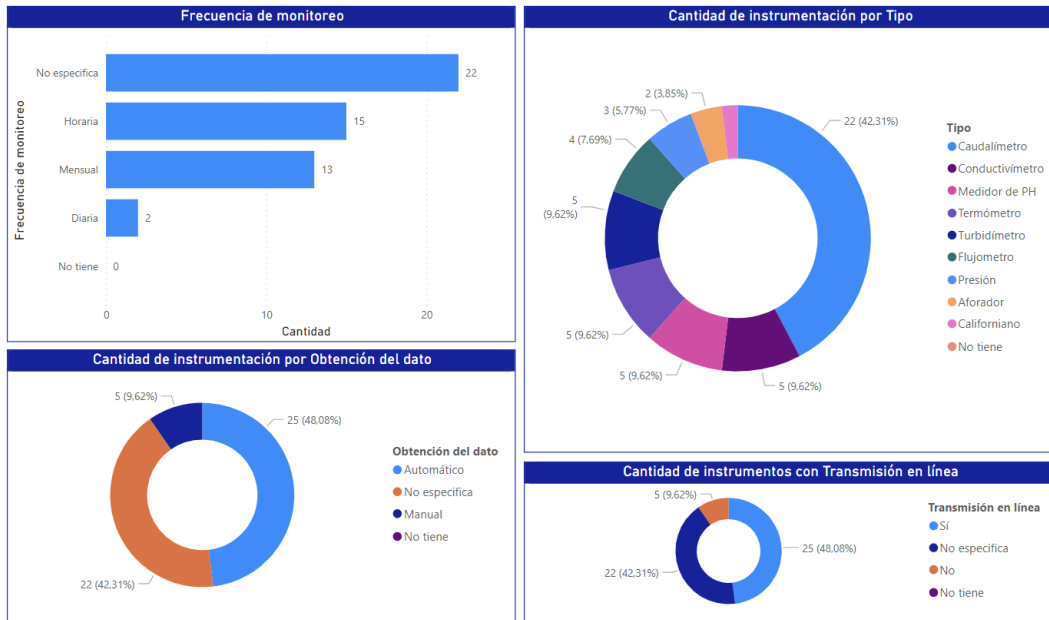


Figura A.21: Instrumentación de Drenes Categoría C (Depósitos convencionales).

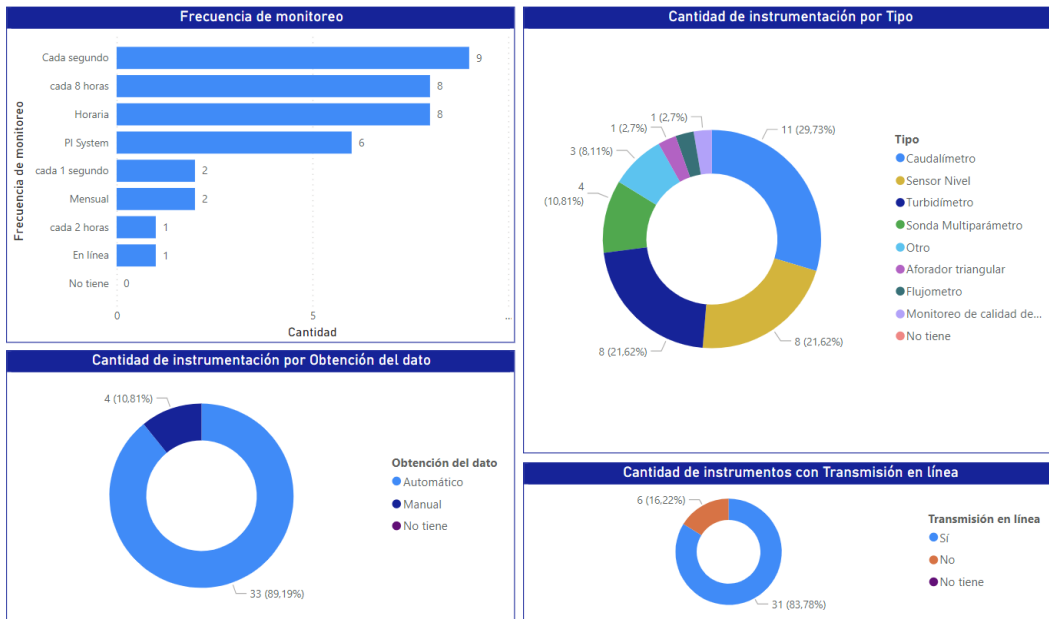


Figura A.22: Instrumentación de Drenes Categoría D (Depósitos convencionales).

## A.7. Cota Laguna

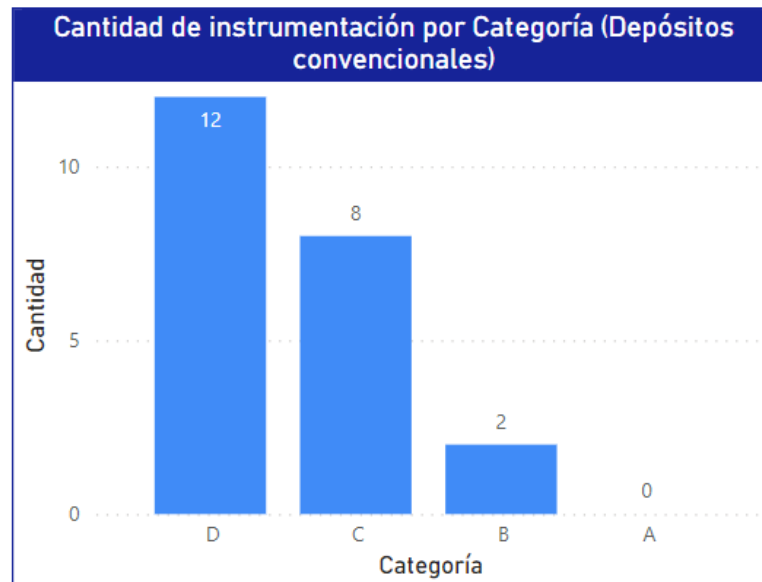


Figura A.23: Cantidad de instrumentos para el monitoreo de la cota de la laguna por Categoría para depósitos convencionales.

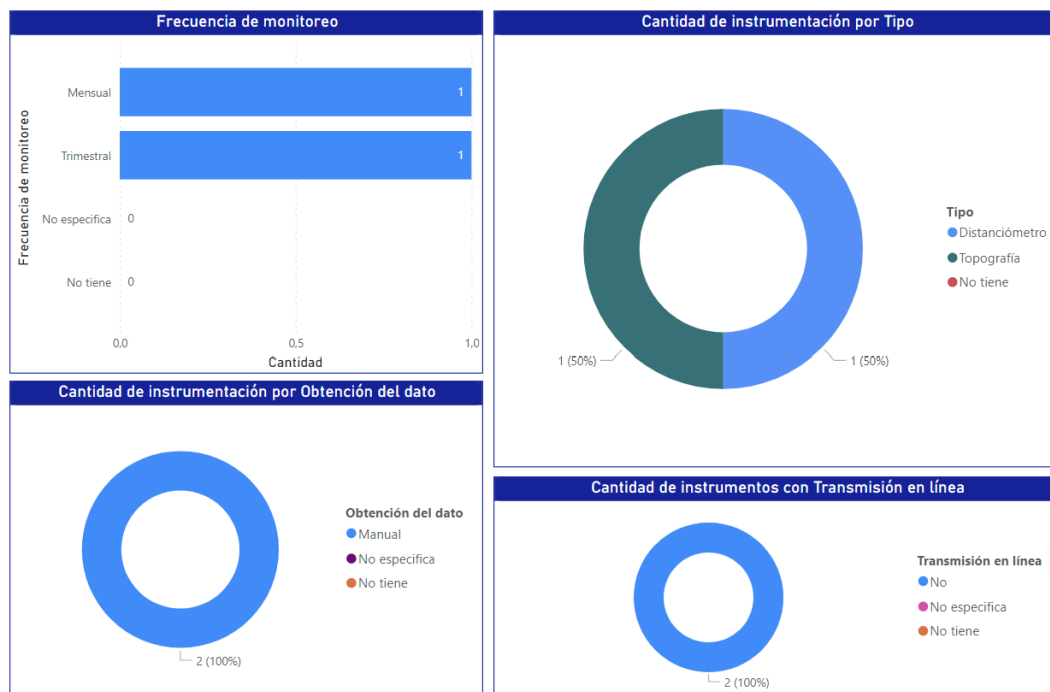


Figura A.24: Instrumentación de Cota Laguna Categoría B (Depósitos convencionales).



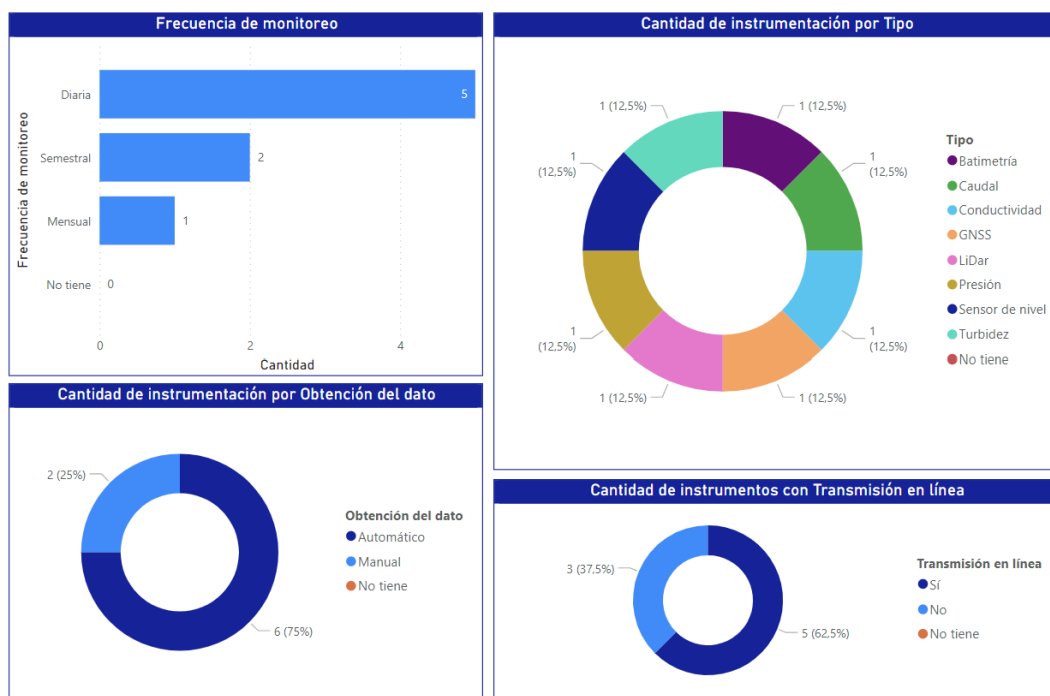


Figura A.25: Instrumentación de Cota Laguna Categoría C (Depósitos convencionales).

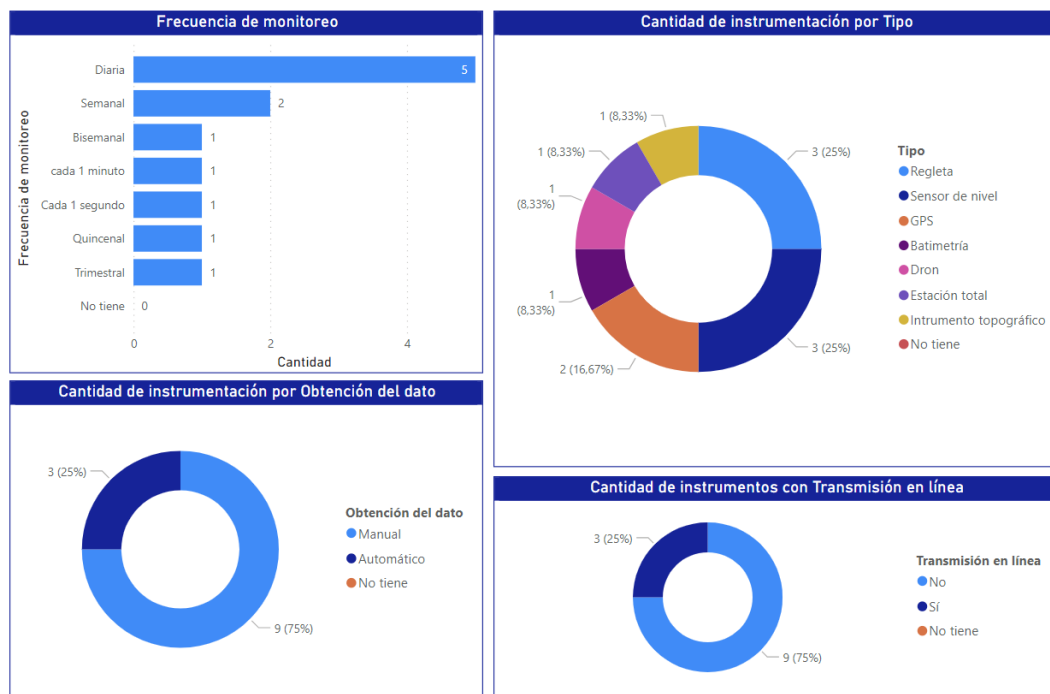


Figura A.26: Instrumentación de Cota Laguna Categoría D (Depósitos convencionales).

## A.8. Monitoreo no invasivo

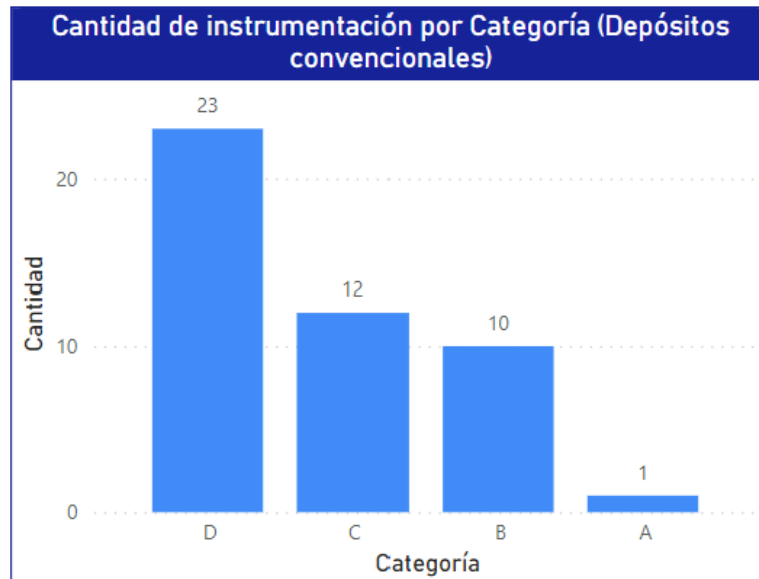


Figura A.27: Cantidad de instrumentos no invasivos por Categoría para depósitos convencionales.



Figura A.28: Instrumentación de Monitoreo no invasivo Categoría A (Depósitos convencionales).

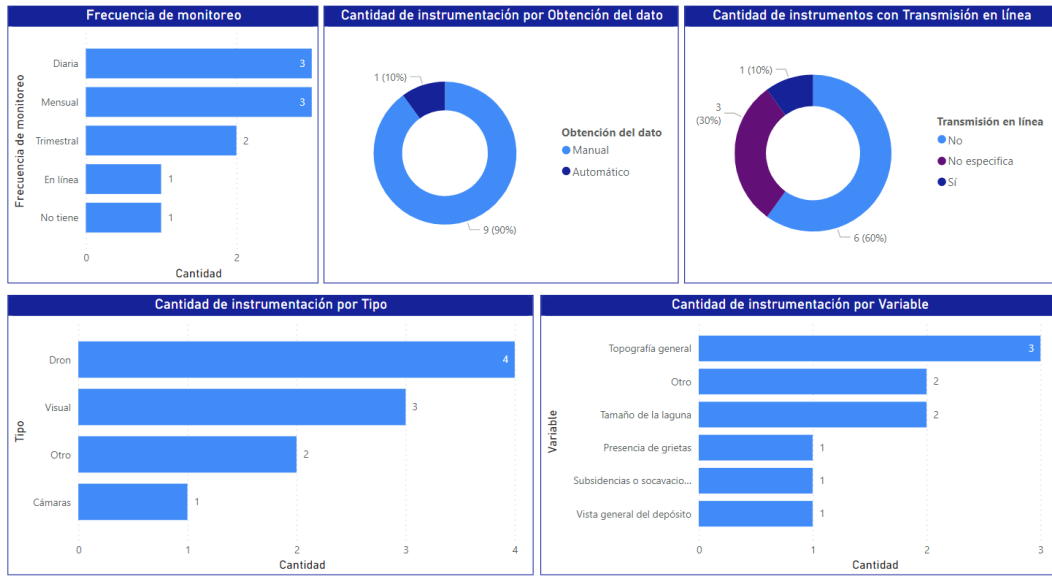


Figura A.29: Instrumentación de Monitoreo no invasivo Categoría B (Depósitos convencionales).

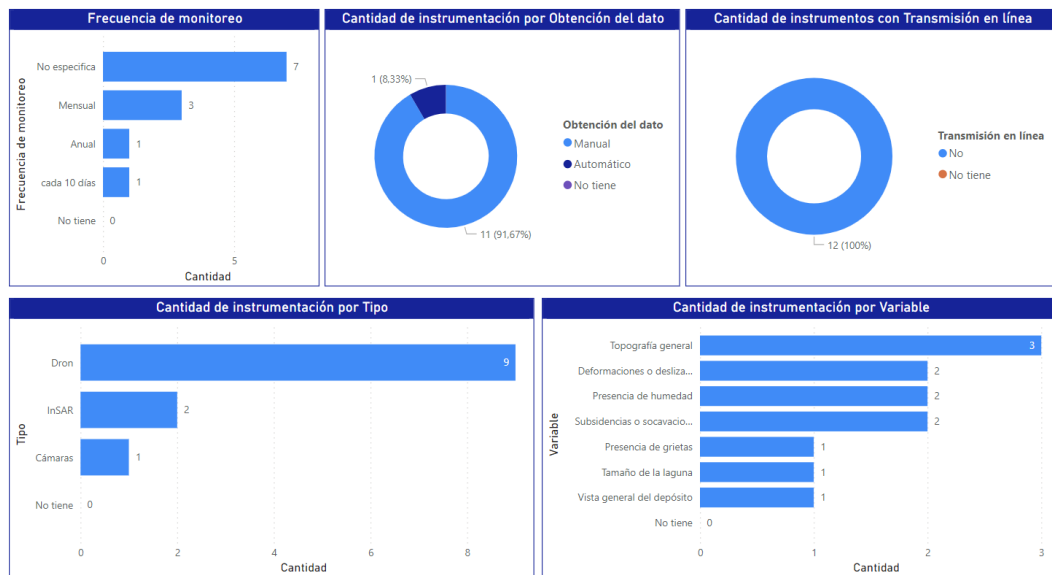


Figura A.30: Instrumentación de Monitoreo no invasivo Categoría C (Depósitos convencionales).

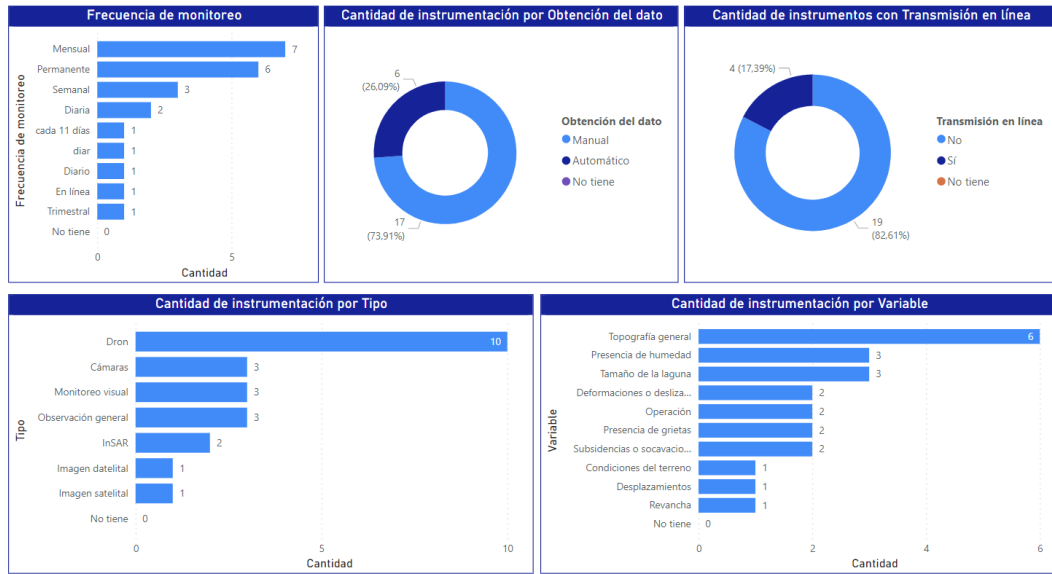


Figura A.31: Instrumentación de Monitoreo no invasivo Categoría D (Depósitos convencionales).

## A.9. Monitoreo semi invasivo

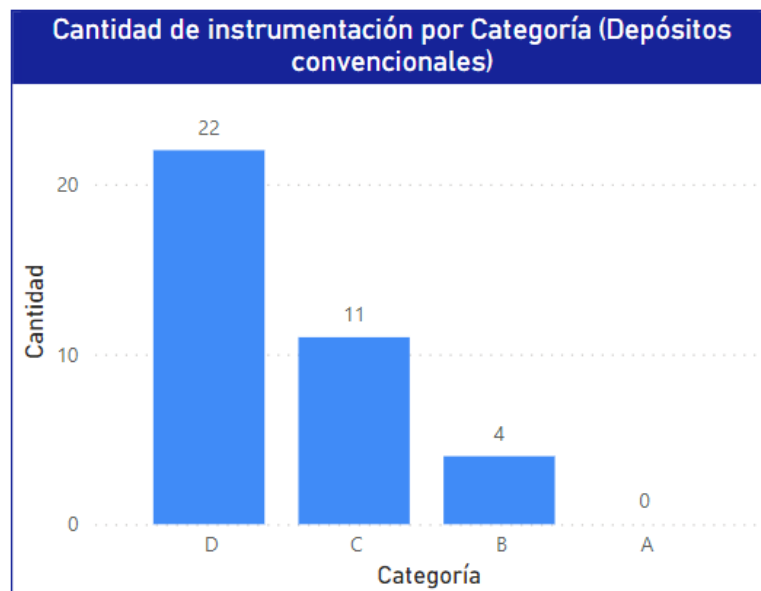


Figura A.32: Cantidad de instrumentos de monitoreo semi invasivo por Categoría para depósitos convencionales.

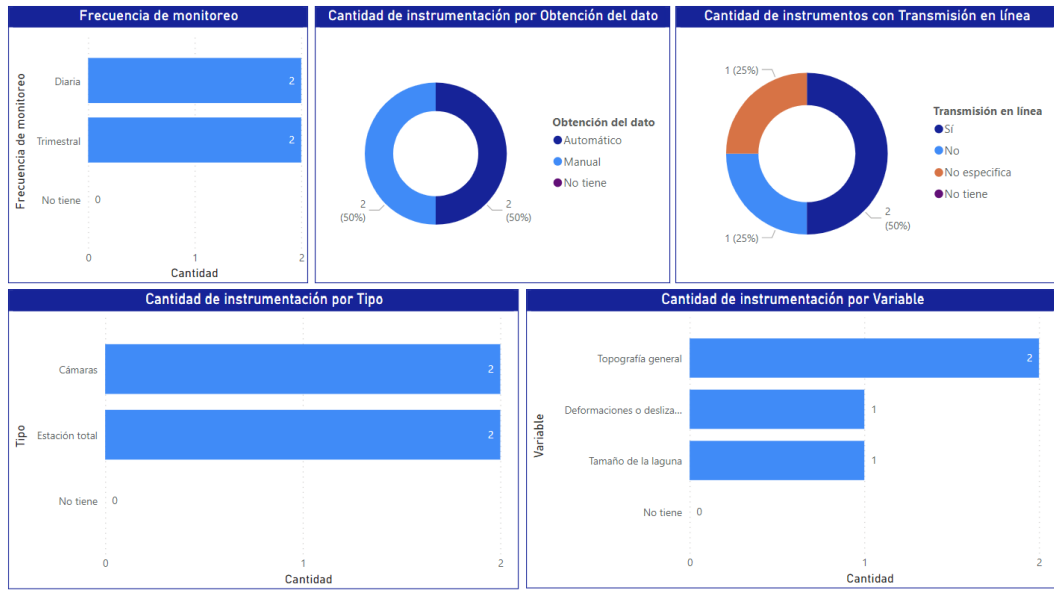


Figura A.33: Instrumentación de Monitoreo semi invasivo Categoría B (Depósitos convencionales).

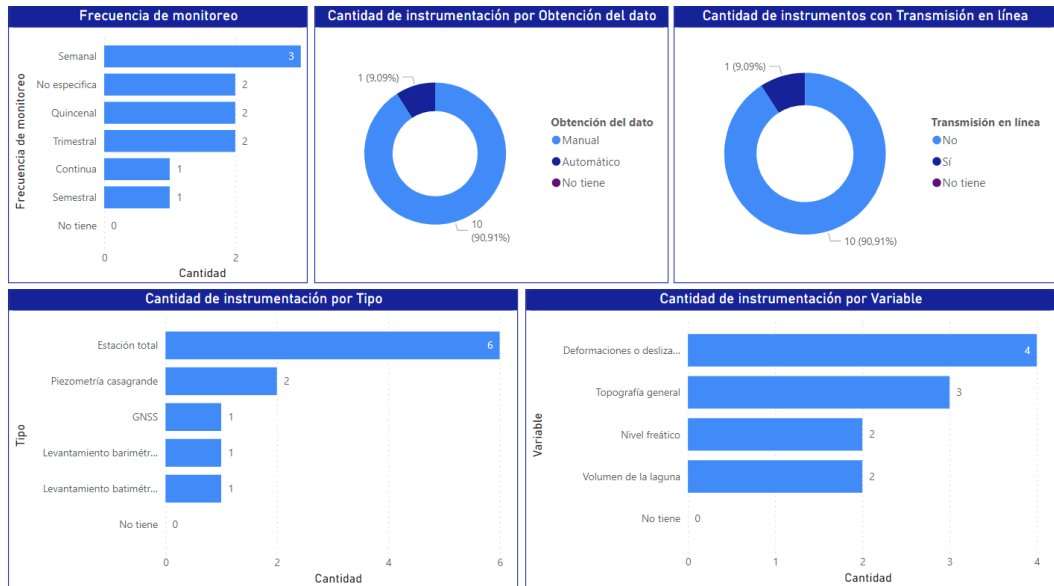


Figura A.34: Instrumentación de Monitoreo semi invasivo Categoría C (Depósitos convencionales).

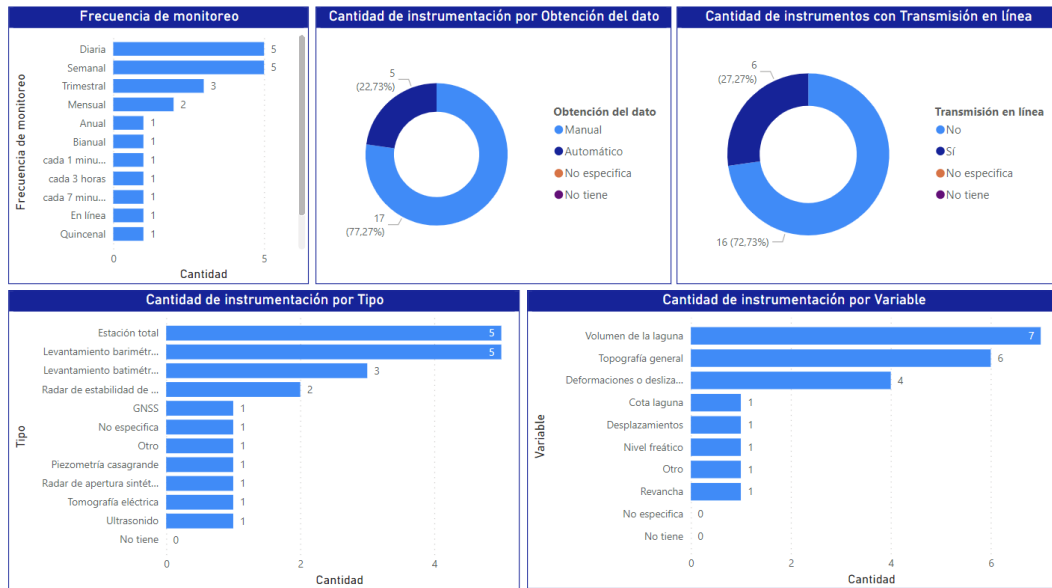


Figura A.35: Instrumentación de Monitoreo semi invasivo Categoría D (Depósitos convencionales).

## A.10. Plataforma

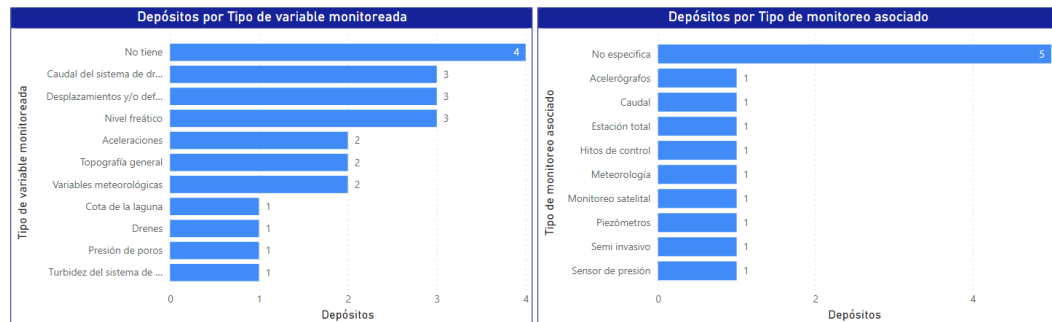


Figura A.36: Instrumentación de Plataforma Categoría C (Depósitos convencionales).

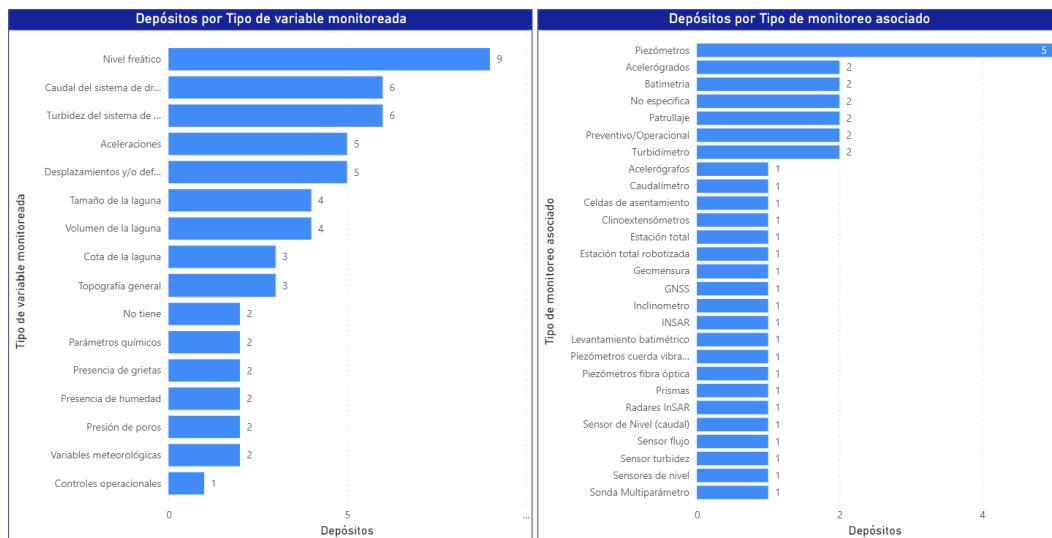


Figura A.37: Instrumentación de Plataforma Categoría D (Depósitos convencionales).

# Anexo B

## Depósitos no convencionales

### B.1. Piezómetros

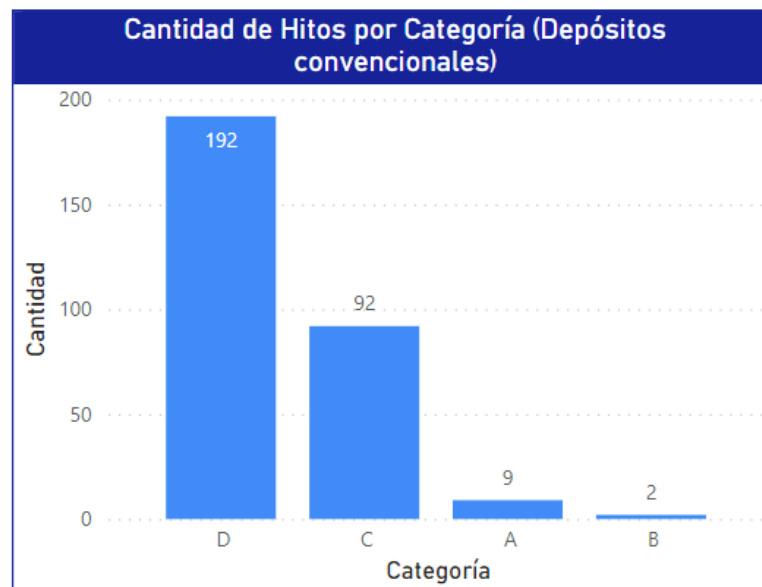


Figura B.1: Cantidad de piezómetros por Categoría para depósitos no convencionales.



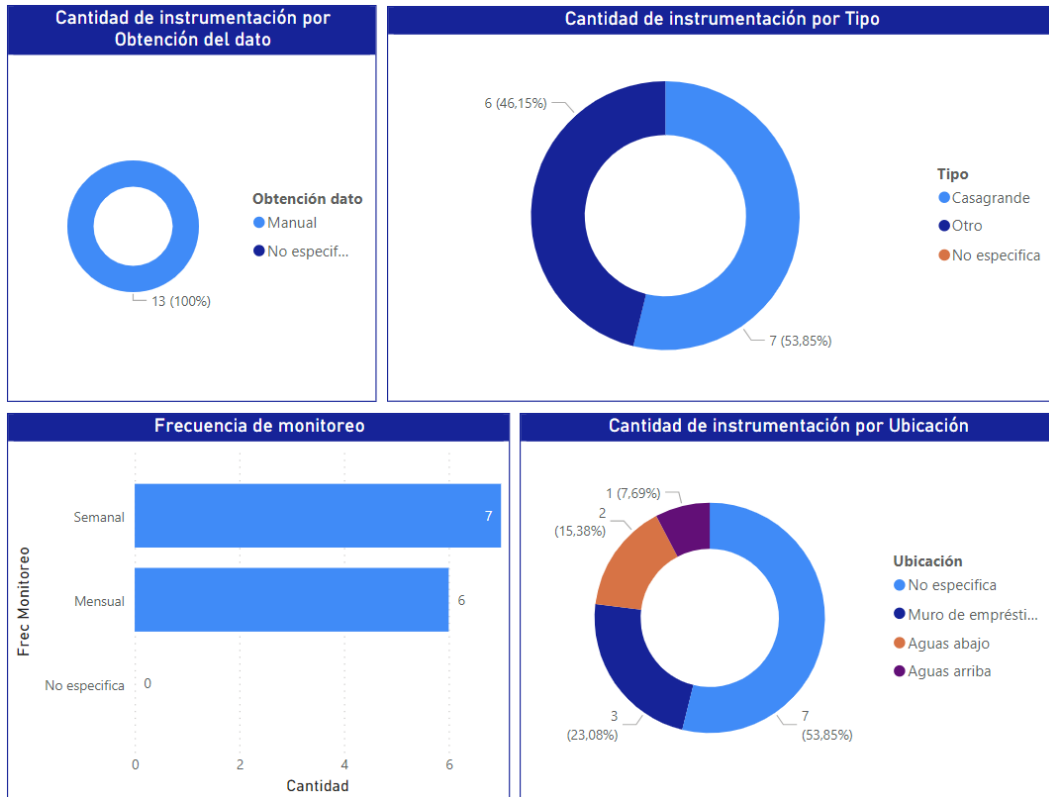


Figura B.2: Características Piezómetros Categoría A (Depósitos no convencionales).

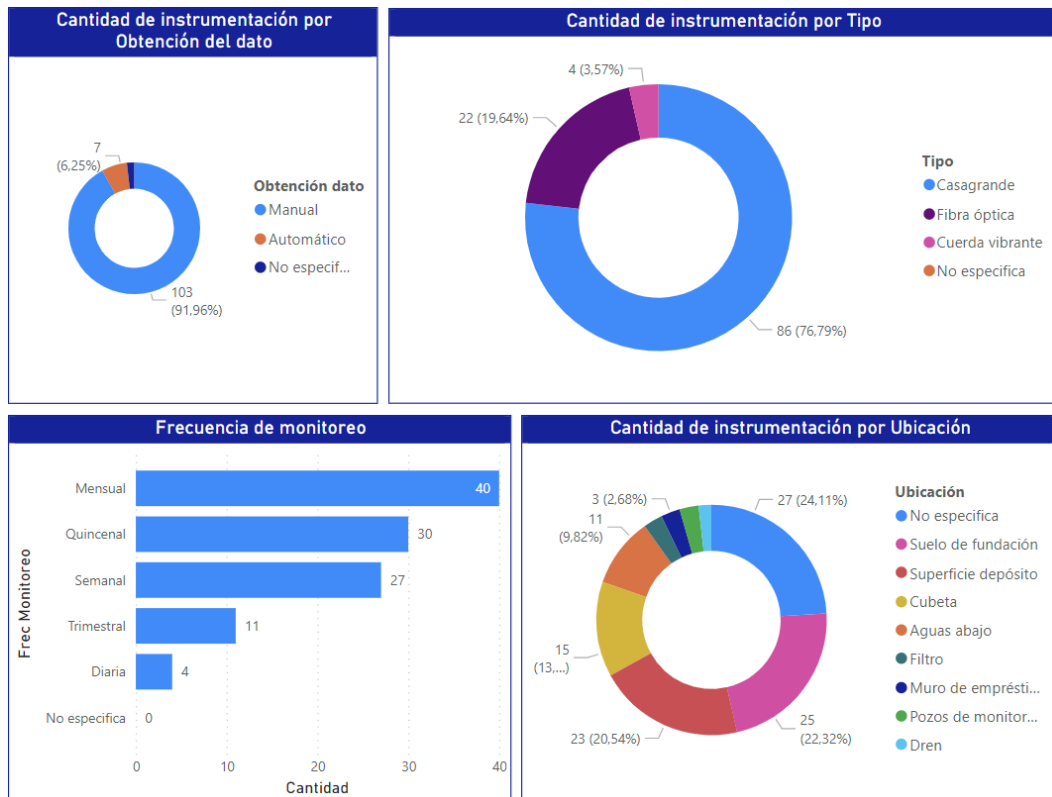


Figura B.3: Características Piezómetros Categoría B (Depósitos no convencionales).

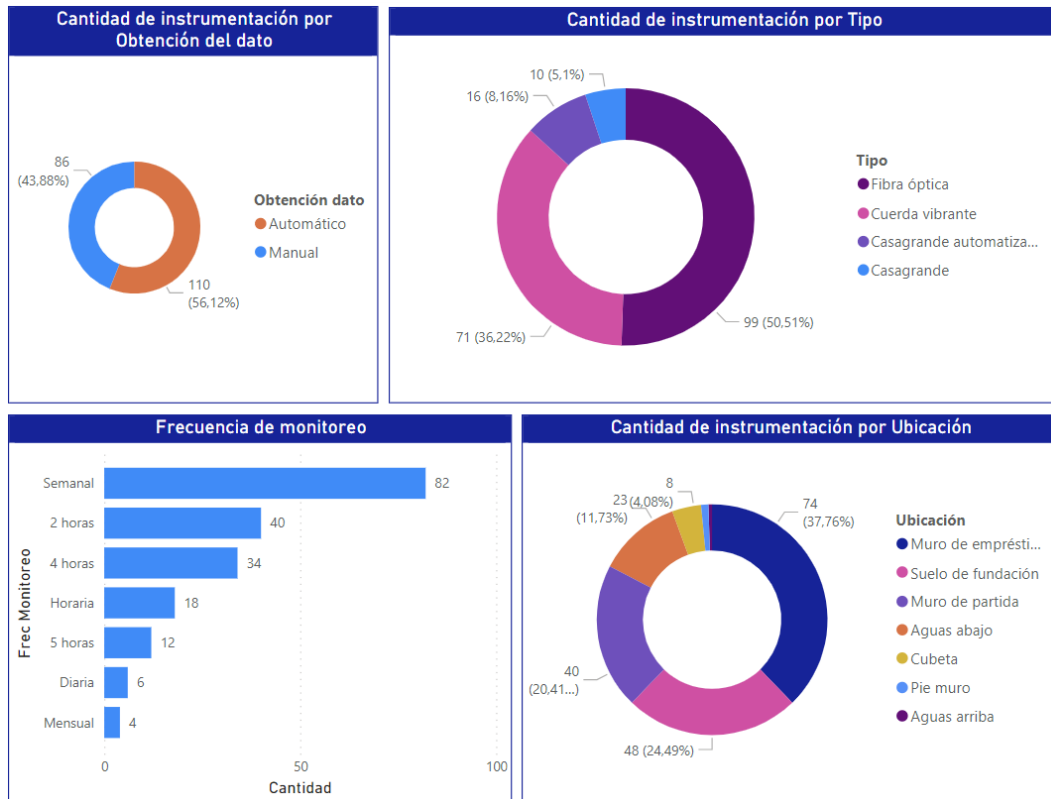


Figura B.4: Características Piezómetros Categoría C (Depósitos no convencionales).

## B.2. Hitos de control

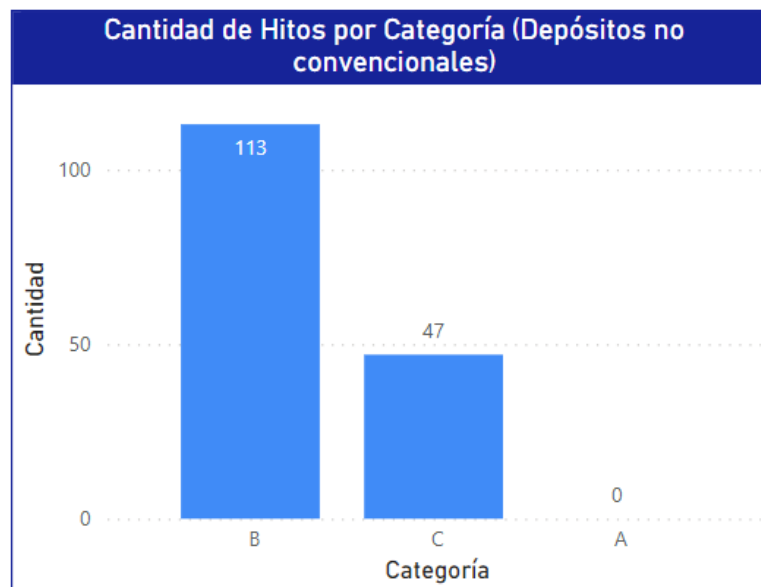


Figura B.5: Cantidad de hitos de control por Categoría para depósitos no convencionales.

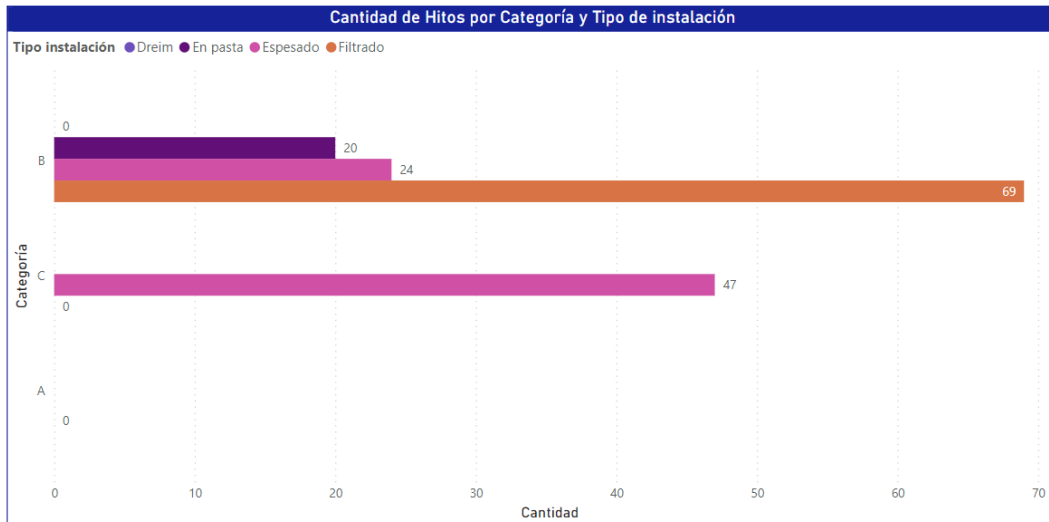


Figura B.6: Total de Hitos por Categoría y Tipo de instalación (Depósitos no convencionales).

### B.3. Inclínómetros

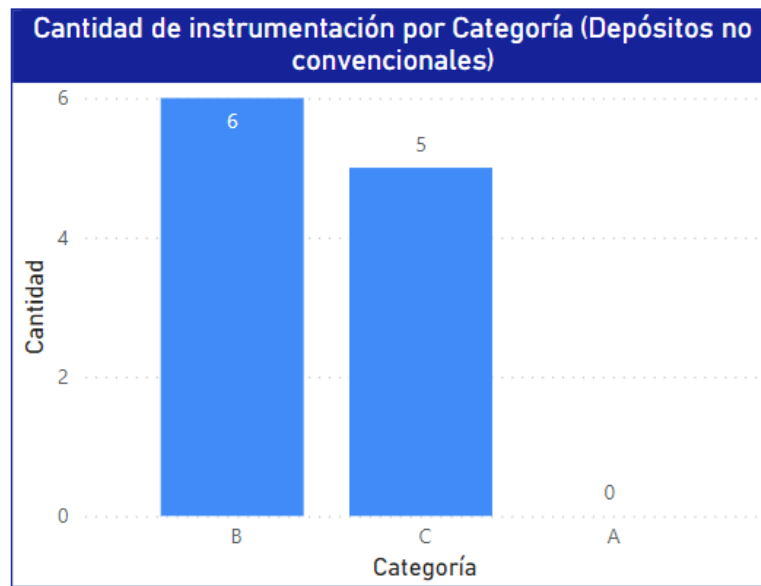


Figura B.7: Cantidad de inclinómetros por Categoría para depósitos no convencionales.



Figura B.8: Total de Inclinómetros Categoría B (Depósitos no convencionales).

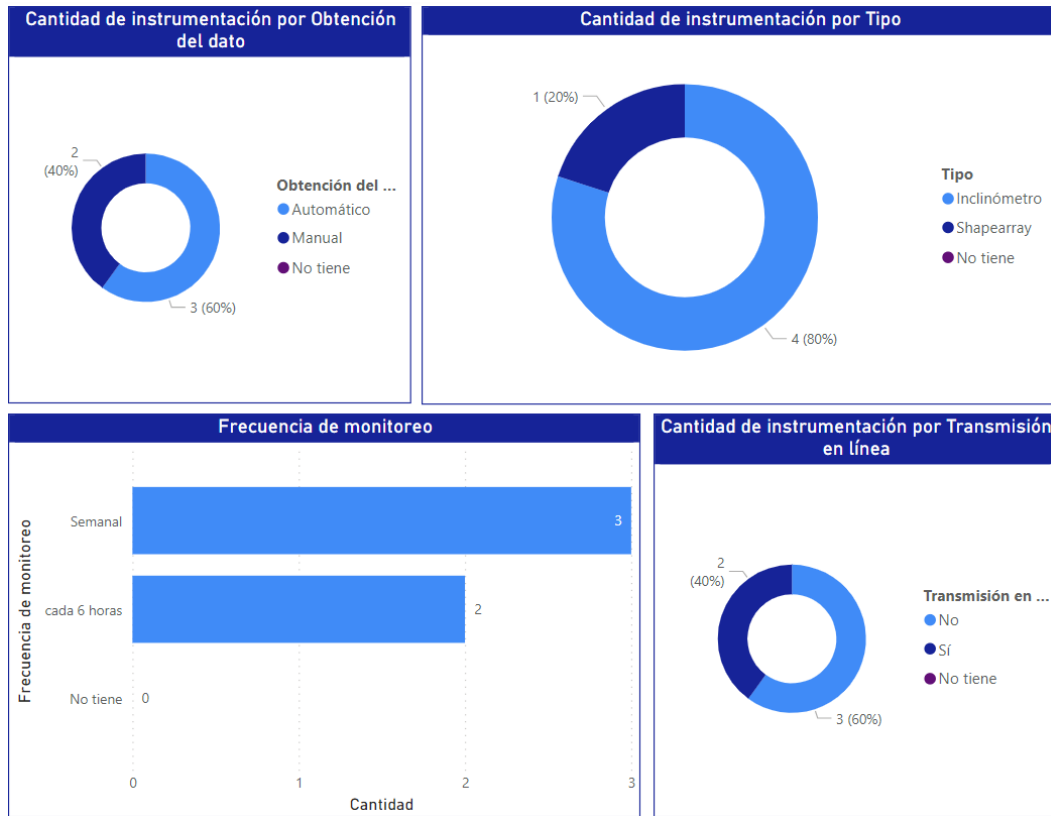


Figura B.9: Total de Inclinómetros Categoría C (Depósitos no convencionales).

## B.4. Acelerómetros

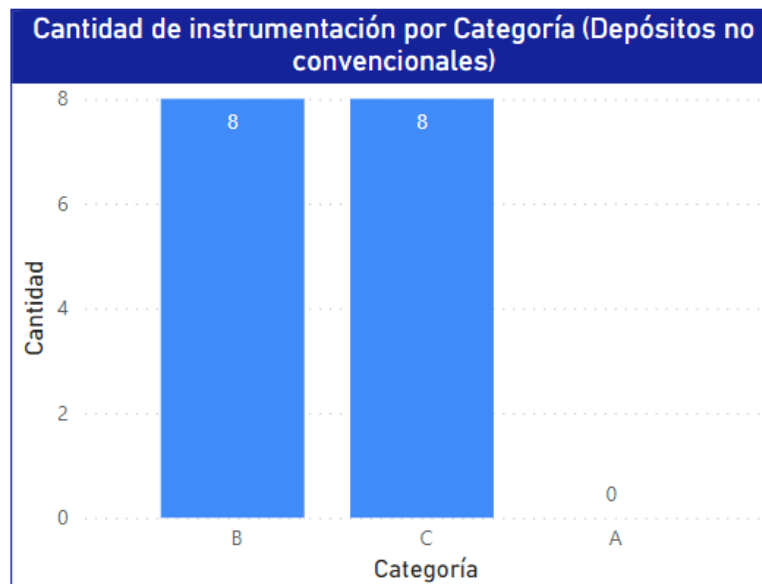


Figura B.10: Cantidad de acelerómetros por Categoría para depósitos no convencionales.

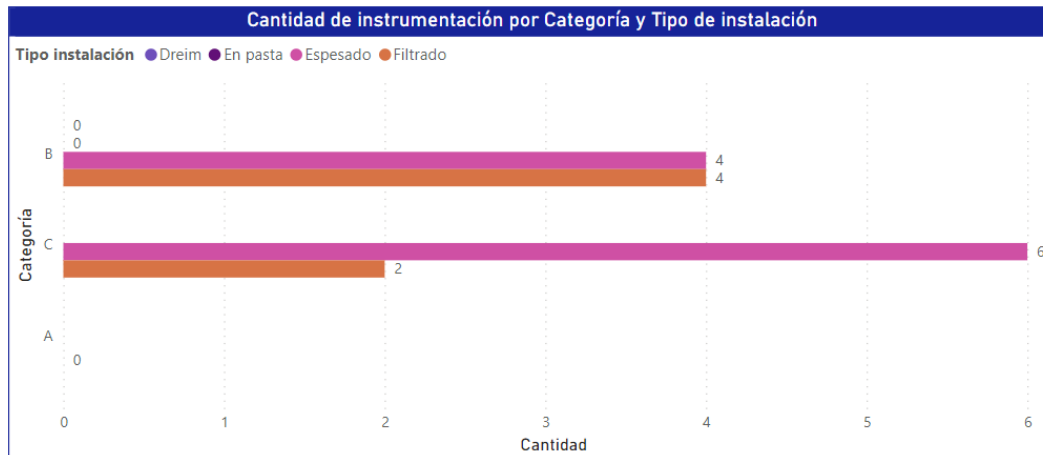


Figura B.11: Total de Acelerómetros por Categoría y Tipo de instalación (Depósitos no convencionales).

## B.5. Meteorología

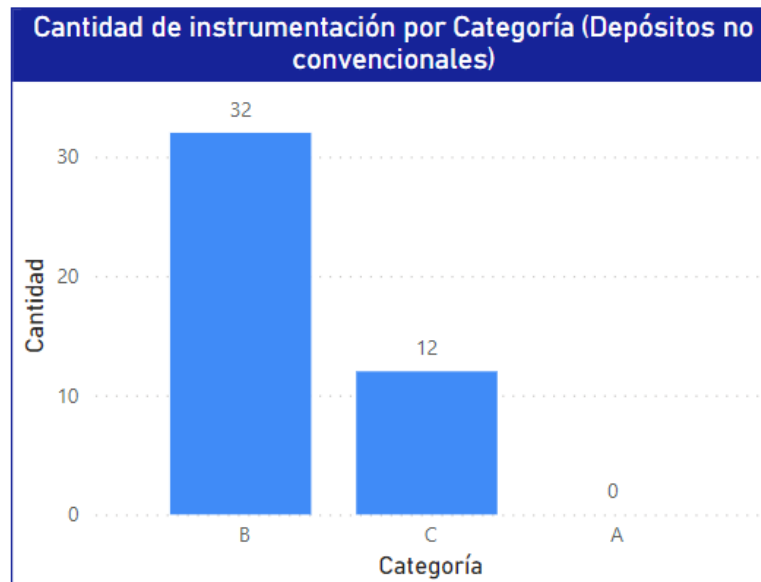


Figura B.12: Cantidad de sensores para el monitoreo meteorológico por Categoría para depósitos no convencionales.

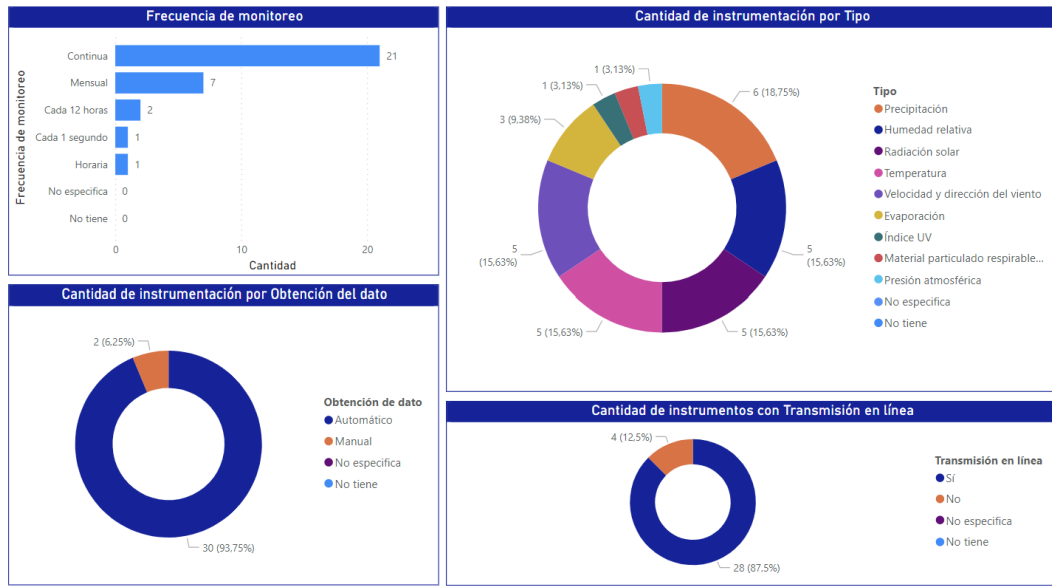


Figura B.13: Instrumentación de Meteorología Categoría B (Depósitos no convencionales).

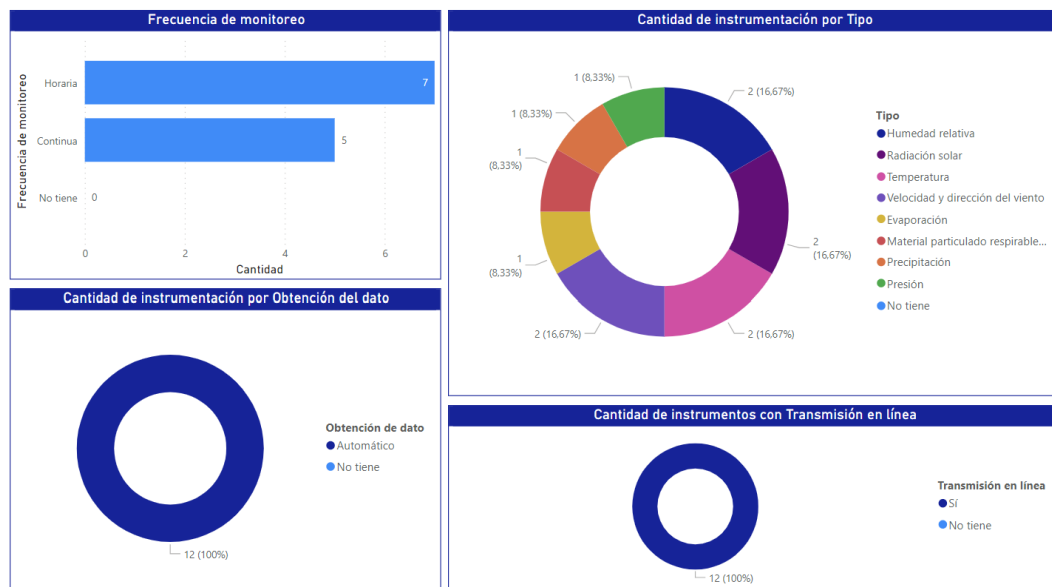


Figura B.14: Instrumentación de Meteorología Categoría C (Depósitos no convencionales).

## B.6. Drenes

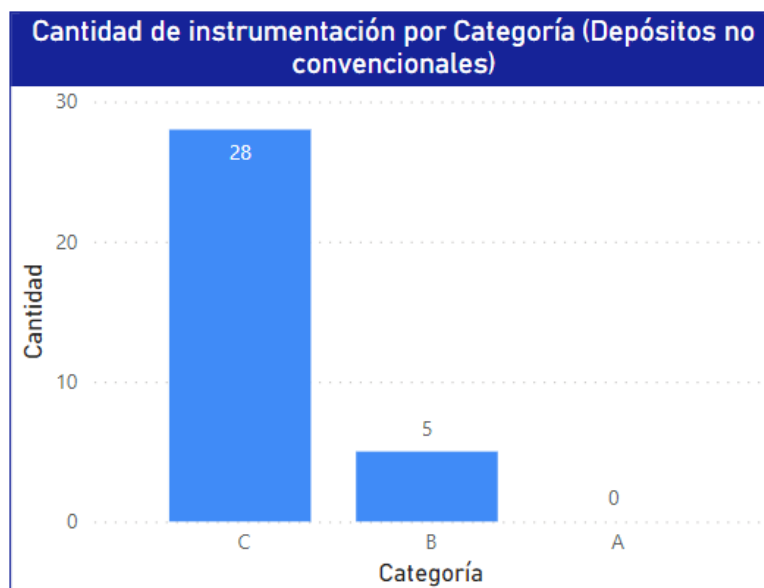


Figura B.15: Cantidad de instrumentos para el monitoreo de drenes por Categoría para depósitos no convencionales.

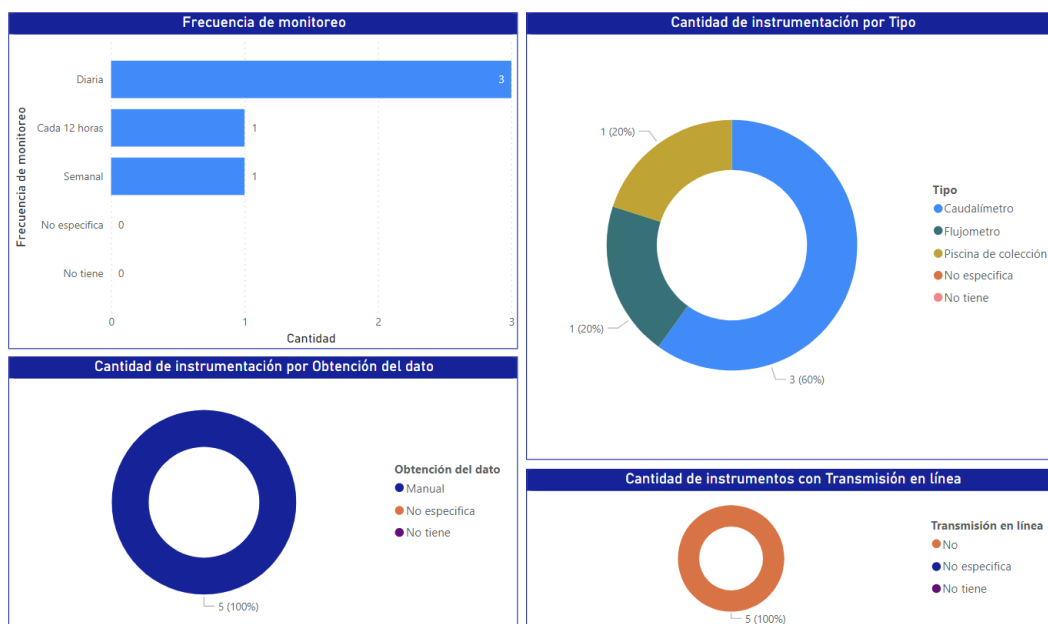


Figura B.16: Instrumentación de Drenes Categoría B (Depósitos no convencionales).



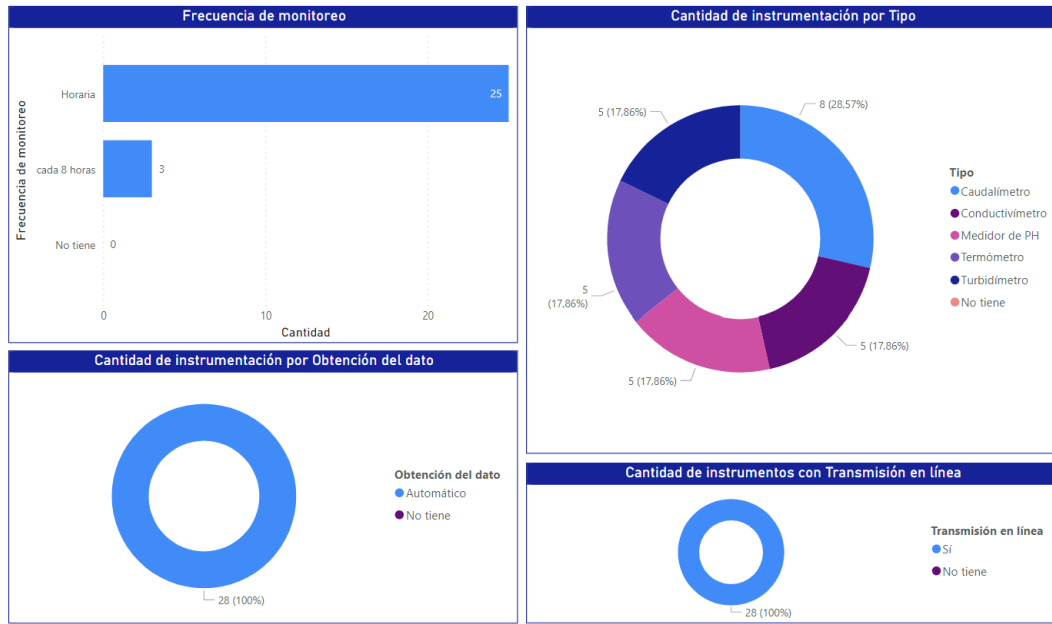


Figura B.17: Instrumentación de Drenes Categoría C (Depósitos no convencionales).

## B.7. Cota Laguna

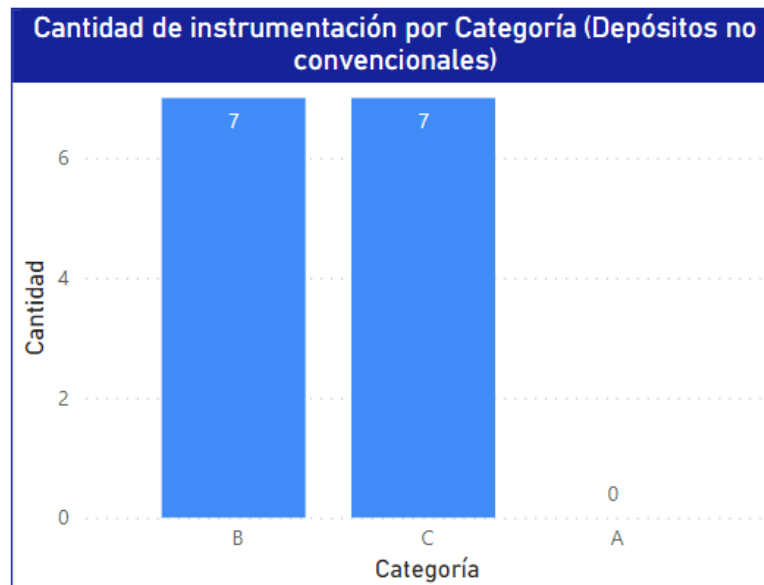


Figura B.18: Cantidad de instrumentos para el monitoreo de la cota de la laguna por Categoría para depósitos no convencionales.

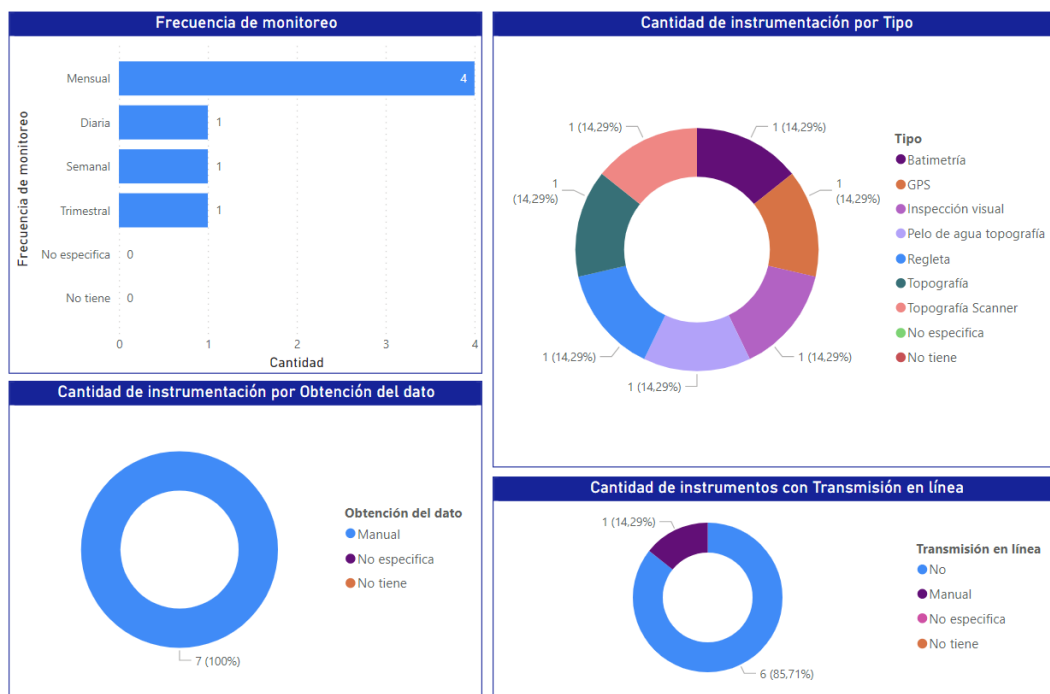


Figura B.19: Instrumentación de Cota Laguna Categoría B (Depósitos no convencionales).

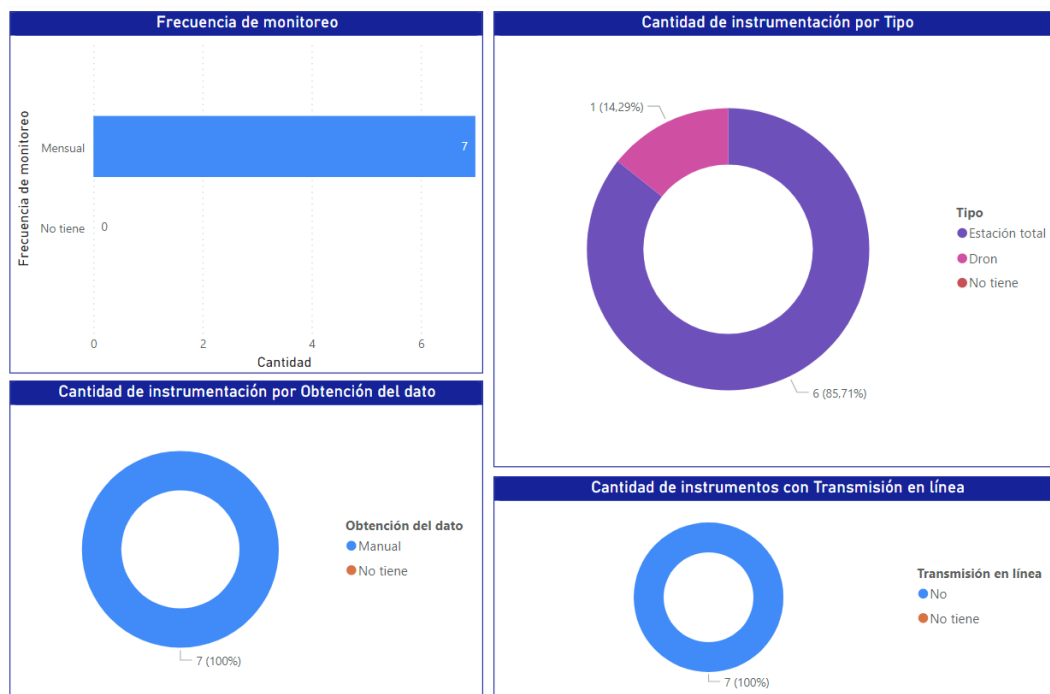


Figura B.20: Instrumentación de Cota Laguna Categoría C (Depósitos no convencionales).

## B.8. Monitoreo no invasivo

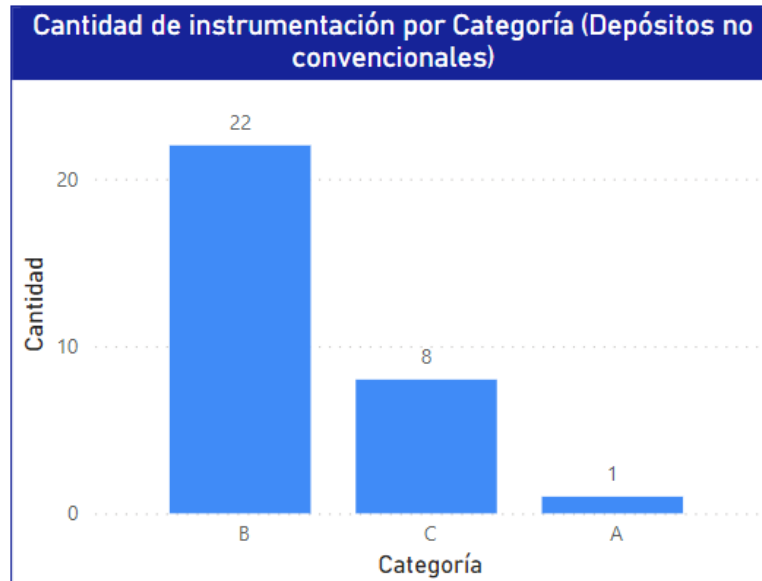


Figura B.21: Cantidad de instrumentos de monitoreo no invasivo por Categoría para depósitos no convencionales.

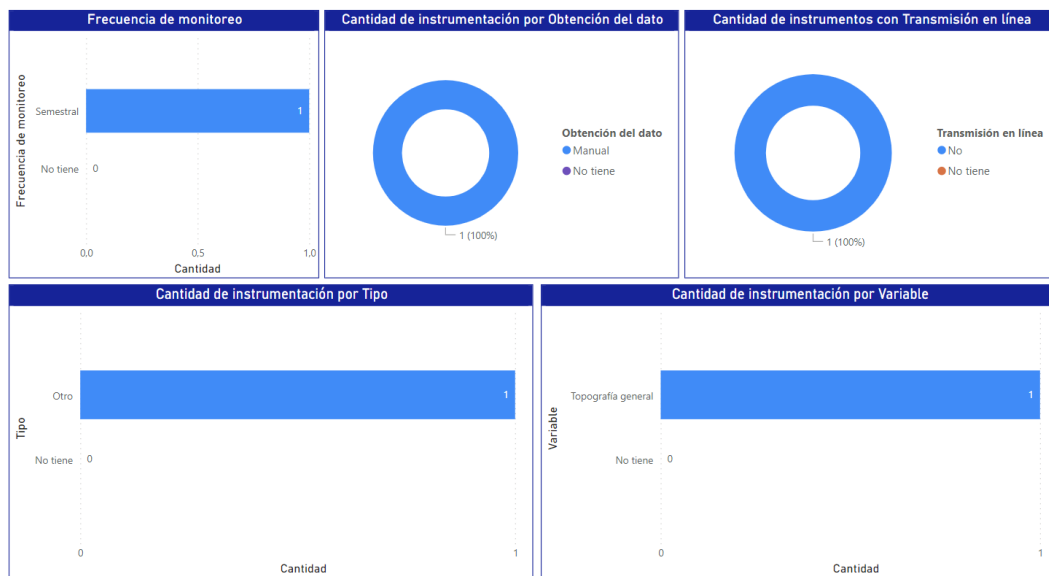


Figura B.22: Instrumentación de Monitoreo no invasivo Categoría A (Depósitos no convencionales).

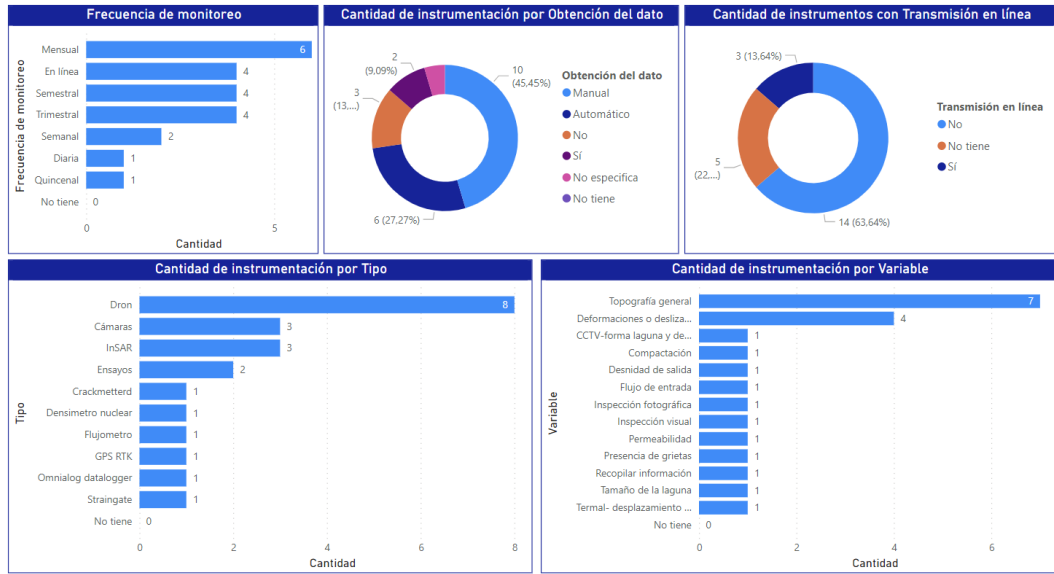


Figura B.23: Instrumentación de Monitoreo no invasivo Categoría B (Depósitos no convencionales).

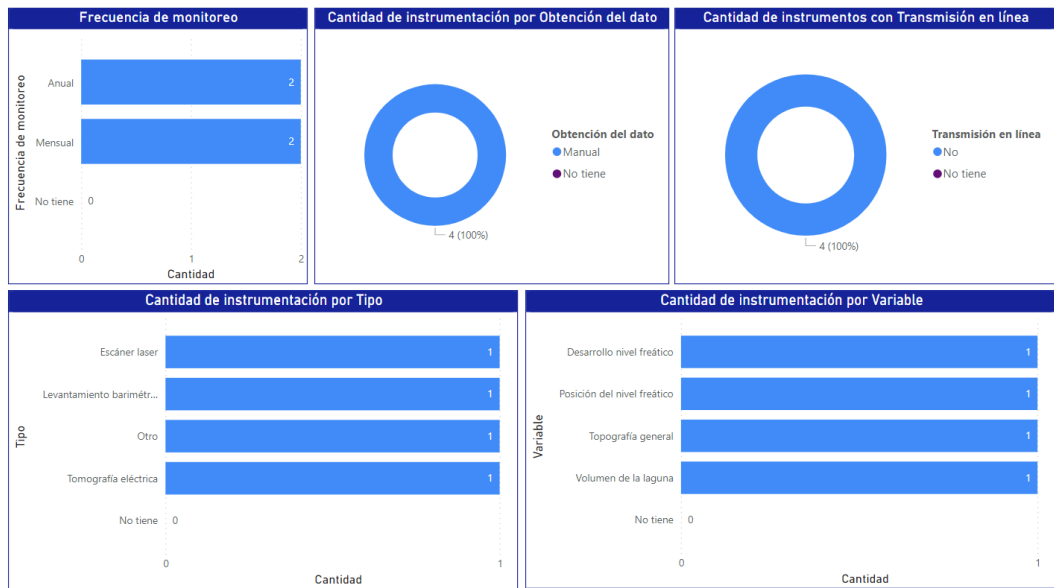


Figura B.24: Instrumentación de Monitoreo no invasivo Categoría C (Depósitos no convencionales).

## B.9. Monitoreo semi invasivo

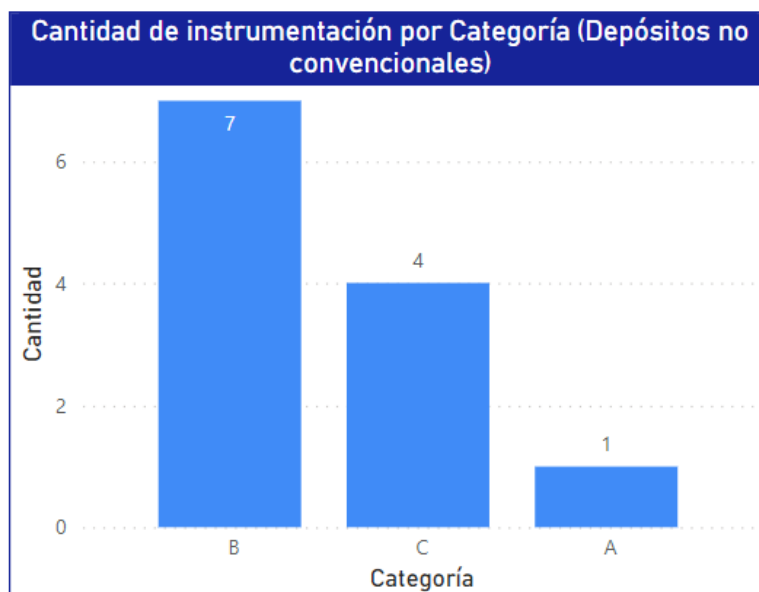


Figura B.25: Cantidad de instrumentos de monitoreo semi invasivo por Categoría para depósitos no convencionales.

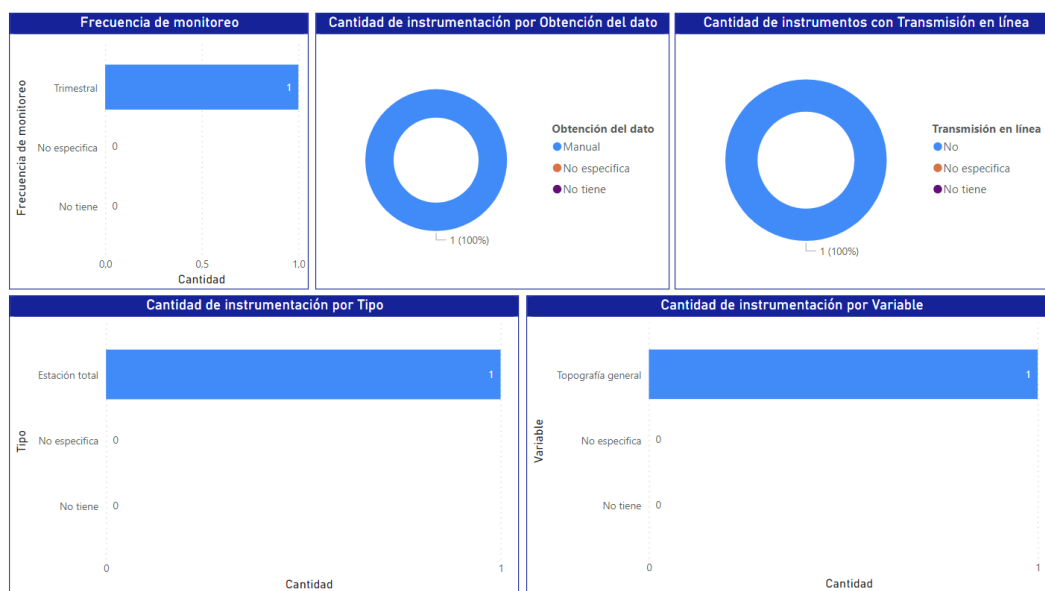


Figura B.26: Instrumentación de Monitoreo semi invasivo Categoría A (Depósitos no convencionales).



Figura B.27: Instrumentación de Monitoreo semi invasivo Categoría B (Depósitos no convencionales).

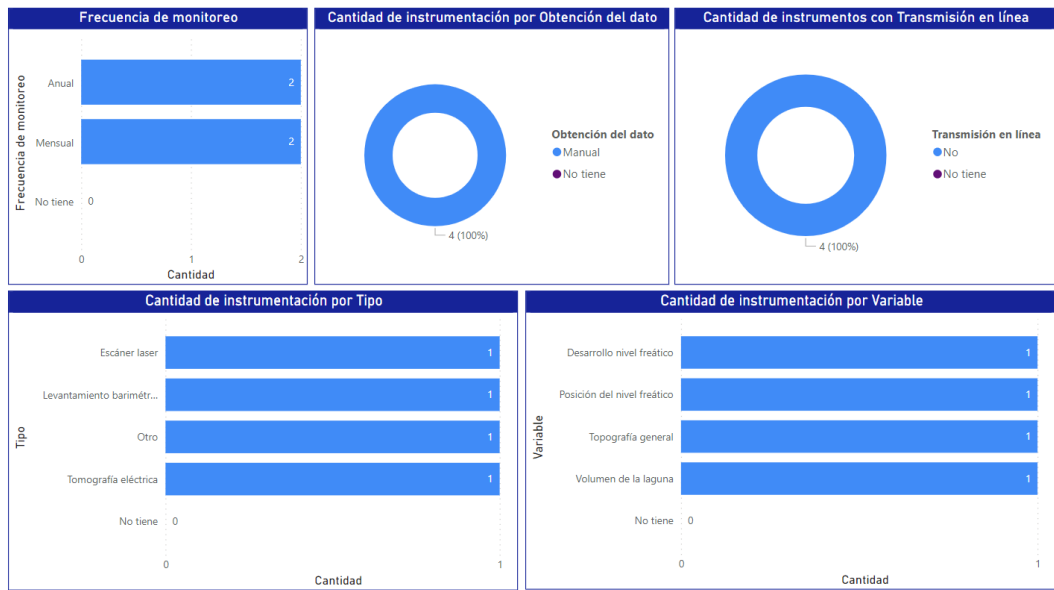


Figura B.28: Instrumentación de Monitoreo semi invasivo Categoría C (Depósitos no convencionales).

## B.10. Plataforma

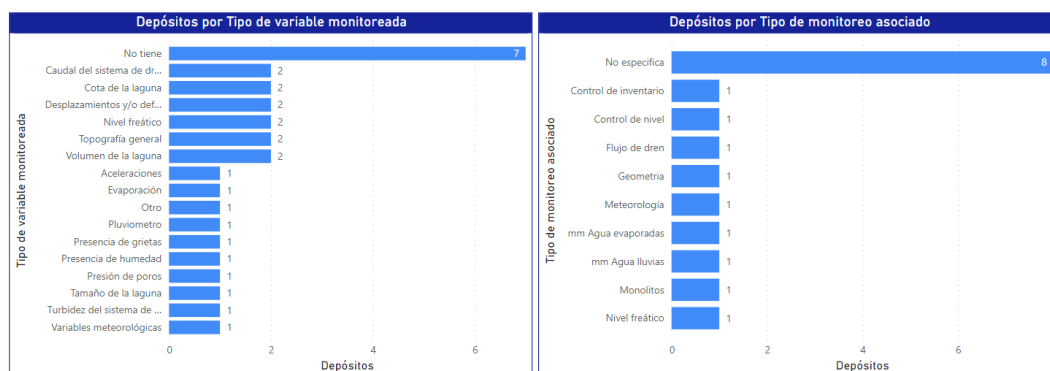


Figura B.29: Instrumentación de Plataforma Categoría B (Depósitos no convencionales).

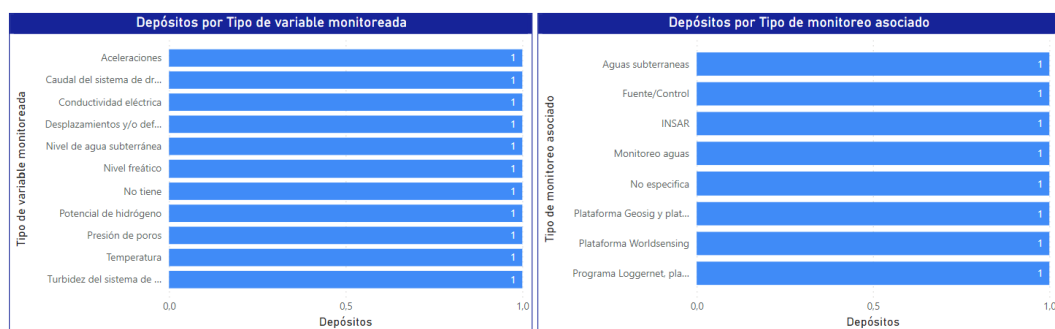


Figura B.30: Instrumentación de Plataforma Categoría C (Depósitos no convencionales).