

TABLA DE CONTENIDO

<u>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL.....</u>	<u>1</u>
1.1. Introducción.	1
1.2. Objetivo General.	2
1.3. Objetivos específicos.	2
1.4. Organización de este informe.....	3
<u>CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	<u>4</u>
2.1. Introducción	4
2.2. Normativa de Diseño Hidrológico de Depósitos de Relaves.....	4
2.3. Análisis de Eventos Extremos.....	5
2.4. Análisis de Tendencias	13
2.5. Evidencia de Tendencias en Series Hidrológicas.....	18
<u>CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA E INFORMACIÓN DISPONIBLE.....</u>	<u>21</u>
3.1. Metodología.	21
3.2. Información Disponible.	29
<u>CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE TENDENCIAS Y PRECIPITACIONES DE DISEÑO</u>	<u>32</u>
4.1. Análisis de Tendencias Estaciones Meteorológicas.	32
4.2. Selección de Depósitos de Relaves	36
4.3. Descripción de las Zonas de Estudio.....	36
4.4. Estaciones y Series Anuales de Máximas Precipitaciones Diarias.	45
4.5. Análisis de Tendencias sobre Series Completas.	47
4.6. Precipitaciones de Diseño.	56
<u>CAPÍTULO 5: HIDROGRAMAS DE CRECIDA Y RESULTADOS.....</u>	<u>64</u>
5.1. Datos asociados a Hidrogramas de Crecida.....	64
5.2. Hidrogramas y Caudales de Crecidas.....	66
5.3. Resumen de Resultados	69
<u>CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN.....</u>	<u>73</u>
<u>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES.....</u>	<u>79</u>
7.1. Conclusiones.	79
7.2. Trabajo a Futuro.	81
<u>BIBLIOGRAFÍA.....</u>	<u>82</u>
<u>ANEXOS</u>	<u>87</u>

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Categorías de los depósitos de relaves según la altura del muro o la capacidad del depósito.	5
Tabla 3.1 Descripción de Escenarios definidos, asociados a la estimación de la precipitación de diseño...	23
Tabla 3.2 Distribuciones de Varas de los distintos grupos asociados a una probabilidad del 50%.	25
Tabla 3.3 Parámetros HUS tipo Linsley ajustados a cada zona.	27
Tabla 3.4 Distribución por regiones de las distintas estaciones meteorológicas del CR2.....	29
Tabla 3.5 Distribución por región de los depósitos de relaves según el estado en que se encuentran.	30
Tabla 4.1 Distribución de estaciones filtradas a analizar por región.....	33
Tabla 4.2 Ejemplo de los resultados de análisis Tendencias sobre medias móviles de 20 años.	34
Tabla 4.3 Resumen Distribución espacial de estaciones por región y régimen (Estacionario o No Estacionario), considerando intervalo móvil de 20 años en las máximas precipitaciones diarias.	34
Tabla 4.4 Características de los Depósitos de relaves seleccionados.....	36
Tabla 4.5 Descripción de estaciones cercanas al Tranque de Relaves Amolanas.....	39
Tabla 4.6 Características Geomorfológicas de la cuenca aportante al Tranque Amolanas.....	39
Tabla 4.7 Descripción de Estaciones Cercanas al Tranque de Relaves El Gato	41
Tabla 4.8 Características Geomorfológicas de las cuencas aportantes al Tranque El Gato	41
Tabla 4.9 Descripción de Estaciones Cercanas al Tranque de Relaves Humo Corral.	43
Tabla 4.10 Características Geomorfológicas de las cuencas aportantes al Tranque Humo Corral.	43
Tabla 4.11 Descripción de Estaciones Cercanas al Tranque de Relaves El Torito.	44
Tabla 4.12 Características Geomorfológicas de la cuenca aportante al Tranque El Torito	44
Tabla 4.13 Descripción de estaciones a utilizar en la estimación de las precipitaciones de diseño.....	45
Tabla 4.14 Estaciones a utilizar en el relleno de información faltante a cada depósito de relaves.	45
Tabla 4.15 Resultados de Análisis de Tendencias iniciales (in) y después del relleno de información (fin). Estación Lautaro Embalse.....	47
Tabla 4.16 Resultados de Análisis de Tendencias Iniciales (in) y después del relleno de información (fin). Estación Copiapó.	47
Tabla 4.17 Resultados de los Análisis de Tendencias antes (in) y después del relleno de información(fin), Estación Almendral.....	48
Tabla 4.18 Resultados de los Análisis de Tendencias, Estación El Torito.....	48
Tabla 4.19 Interpretación de los análisis de tendencias en series móviles de media y varianza, en las estaciones Lautaro Embalse, Copiapó, Almendral y El Torito.	49
Tabla 4.20 Análisis de Tendencias considerando punto de cambio. Estaciones Lautaro Embalse, Copiapó y Almendral.	52
Tabla 4.21 Interpretación de los Análisis de Tendencias considerando punto de cambio. Estaciones Lautaro Embalse, Copiapó y Almendral.....	53
Tabla 4.22 Resumen de Tendencias en Estaciones de Estudio.	53
Tabla 4.23 Método aplicado y estimación de Escenario 0 de precipitación de diseño en cada una de las estaciones de estudio.....	56

Tabla 4.24 Precipitaciones de diseño del Escenario 1, según extensión del registro de información.....	56
Tabla 4.25 Precipitaciones de diseño asociadas al Escenario 2 (máxima PMP no estacionaria).....	58
Tabla 4.26 Precipitaciones de diseño Escenario 3 y método de estimación.	58
Tabla 4.27 Precipitaciones de diseño del Escenario 4 según máxima PMP Estacionaria.....	58
Tabla 4.28 Resultados de Análisis de Frecuencias Estacionario y No Estacionario en [mm]. Lautaro Embalse.....	60
Tabla 4.29 Resultados de Análisis de Frecuencias Estacionario y No Estacionario en [mm]. Copiapó.....	60
Tabla 4.30 Resultados de Análisis de Frecuencias Estacionario y No Estacionario en [mm]. Almendral. .	61
Tabla 4.31 Resultados de Análisis de Frecuencias Estacionario y No Estacionario en [mm]. El Torito.....	61
Tabla 4.32 Precipitaciones de Diseño Escenario 5, distribuciones y parámetros no estacionarios considerados.....	61
Tabla 4.33 Precipitaciones de diseño, diferencias porcentuales y Riesgo Hidrológico. Estación Lautaro Embalse.....	62
Tabla 4.34 Precipitaciones de diseño diferencias porcentuales y Riesgo Hidrológico Estación Copiapó...	62
Tabla 4.35 Precipitaciones de diseño, diferencias porcentuales y Riesgo Hidrológico. Estación Almendral.	63
Tabla 4.36 Precipitaciones de diseño diferencias porcentuales y Riesgo Hidrológico Estación El Torito..	63
Tabla 5.1 Cuencas afluentes a los depósitos de relaves.	64
Tabla 5.2 Parámetros Ajustados del HUS a la cuenca del Tranque Amolanas	64
Tabla 5.3 Parámetros Ajustados de los HUS a las cuencas aportantes al Tranque El Gato.....	65
Tabla 5.4 Parámetros Ajustados de los HUS a las cuencas aportantes al Tranque Humo Corral.	65
Tabla 5.5 Parámetros Ajustados del HUS a la cuenca del Tranque El Torito.....	65
Tabla 5.6 Grupo de distribución de Varas (1985) adoptado en cada tranque.	65
Tabla 5.7 Valores de Curva Número y condición antecedente para cada Tranque de Relaves.	66
Tabla 5.8 Caudales de Diseño y diferencia porcentual según caso base y Escenarios. Tranque de Relaves Amolanas.	68
Tabla 5.9 Caudales de Diseño y diferencia porcentual según caso base y Escenarios. Tranque de Relaves El Gato.	68
Tabla 5.10 Caudales de Diseño y diferencia porcentual según caso base y Escenarios. Tranque de Relaves Humo Corral	68
Tabla 5.11 Caudales de Diseño y diferencia porcentual según caso base y Escenarios. Tranque de Relaves El Torito.....	68
Tabla 5.12 Resumen de Resultados asociados al Tranque de Relaves Amolanas.	69
Tabla 5.13 Resumen de Resultados asociados al Tranque de Relaves El Gato.	70
Tabla 5.14 Resumen de Resultados asociados al Tranque de Relaves Humo Corral.	70
Tabla 5.15 Resumen de Resultados asociados al Tranque de Relaves El Torito.	71
Tabla 5.16 Promedio de diferencias porcentuales entre Escenarios y promedio de riesgo hidrológico entre análisis de frecuencia estacionario y no estacionario. Entre paréntesis, número de datos utilizados en el promedio de cada estimación.	71

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estimación del factor de Frecuencia en función de la duración y la media de la serie anual de máximos diarios. Fuente: WMO, 2009.	7
Figura 2.2 Corrección de la media de los datos según proporción entre μn y $\mu n - m$ y el largo de la serie de información. Fuente: WMO, 2009.	8
Figura 2.3 (a) Corrección de la desviación estándar de la serie según proporción entre σn y $\sigma n - m$ y largo del registro. (b) Corrección de estadísticos de la muestra según largo de la serie. Fuente: WMO, 2009.	8
Figura 2.4 Esquema de probabilidades al considerar que el caudal de diseño se excede en el año "x".....	10
Figura 2.5 Esquema del enfoque estacionario. Fuente: Salas & Obeysekera, 2014.....	10
Figura 2.6 Enfoque del enfoque no estacionario considerando tendencia al aumento de los estadísticos. Fuente: Salas & Obeysekera, 2014.	12
Figura 2.7 Representación de distribución de puntos y cálculo del ECM de la variable "y". Fuente: Carrollo, 2012.	15
Figura 2.8 Resultados Análisis de Tendencias en valores medios de precipitación decadal en la Cuenca del Río Loa. Fuente: DGA, (2017).	18
Figura 2.9 Países con análisis de tendencias según estudios revisados de precipitación extrema y caudal. Fuente: Madsen et al., 2014.	20
Figura 2.10 Cambios en valores de precipitaciones extremas y totales en distintos países, considerando un análisis de 10 años de información. Fuente: Easterling, 2000.	20
Figura 3.1 Representación de la metodología de estimación de la PMP no estacionaria.....	22
Figura 3.2 Ajuste de Distribuciones de Varas asociadas a una probabilidad del 50%.....	25
Figura 3.3 Esquema general de la metodología asociada a la estimación de caudales a partir de la precipitación de diseño.	28
Figura 3.4 Distribución Espacial de depósitos según el estado: Activo, Inactivo o Abandonado en las macro zonas Norte y Centro del país.	30
Figura 4.1 Mapa con Estaciones según distintos filtros. (a) (izquierda) estaciones sin filtrar; (b) (centro) estaciones filtradas por cercanía a relaves; (c) (derecha) estaciones filtradas según longitud de información mayor a 30 años.....	32
Figura 4.2 Distribución Espacial de tendencias significativas en series anuales de máximas precipitaciones diarias para un intervalo móvil de 20 años. (a) Tendencias en media de la serie; (b) Tendencias en desviación estándar de la serie.	35
Figura 4.3 En la Figura (a) Distribución espacial a nivel de país de los depósitos de relaves a estudiar. En las demás Figuras la ubicación específica de cada depósito junto a los poblados más cercanos a cada uno: (b) Tranque Amolanas; (c) Tranque El Gato; (d) Tranque Humo Corral; (e) Tranque El Torito.	37
Figura 4.4 Distribución espacial de estaciones meteorológicas cercanas y Cuenca aportante al Tranque Amolanas.	38
Figura 4.5 Curva Hipsométrica de la Cuenca Aportante al Proyecto. Tranque Amolanas..	39
Figura 4.6 Cuencas Aportantes (Cuenca El Gato, Cuenca A y Cuenca B) al Nuevo depósito de Relaves de Minera Kozán (en color verde claro). Tranque El Gato. Fuente: Informe Hidrológico de Sitio, JO Ingeniería (2016).	40

Figura 4.7 Distribución Espacial de estaciones meteorológicas cercanas al Proyecto y Cuenca aportante al Tranque Humo Corral.....	42
Figura 4.8 Curvas Hipsométricas de las Cuencas Aportantes al Proyecto. Tranque Humo Corral	43
Figura 4.9 Distribución Espacial de estaciones meteorológicas cercanas al Proyecto y Cuenca aportante al Tranque El Torito.....	44
Figura 4.10 Series anuales de máximas precipitaciones diarias (PMD) antes y después del relleno de la información. Estaciones Lautaro Embalse, Copiapó, Almendral y El Torito.....	46
Figura 4.11 Ajustes de tendencias sobre medias móviles de 20 años en series anuales de máximas precipitaciones diarias (SAMPD), para las distintas estaciones de estudio. Punto rojo representa existencia de punto de cambio en la serie generada, así mismo, línea roja punteada corresponde a SAMPD, medida en el eje secundario.	50
Figura 4.12 Ajustes de tendencias sobre varianzas móviles de 20 años en series anuales de máximas precipitaciones diarias (SAMPD), para las distintas estaciones de estudio. Punto rojo representa existencia de punto de cambio en la serie generada, así mismo, la línea roja punteada corresponde a SAMPD, medida en el eje secundario.....	51
Figura 4.13 Ajustes de tendencias sobre medias móviles de 20 años en series anuales de máximas precipitaciones diarias (SAMPD) para las distintas estaciones de estudio, considerando el punto de cambio destacado en rojo. Línea roja punteada corresponde a SAMPD, medida en el eje secundario.	54
Figura 4.14 Ajustes de tendencias sobre varianzas móviles de 20 años en series anuales de máximas precipitaciones diarias (SAMPD) para las distintas estaciones de estudio, considerando el punto de cambio destacado en rojo. Línea roja punteada corresponde a SAMPD, medida en el eje secundario.	55
Figura 4.15 Distribución de PMP no estacionarias según intervalos móviles de 20 años. Punto en cada figura corresponde al valor adoptado como Escenario 2.	57
Figura 4.16 Distribución de PMP estacionaria según el año de diseño que se considere. Puntos corresponden al valor adoptado como Escenario 4.....	59
Figura 5.1 Hidrogramas de Crecidas de los Tranques de Relaves considerando los distintos Escenarios de precipitación.....	67
Figura 5.2 Distribución Gráfica de cada una de las estaciones de interés, considerando los distintos Escenarios propuestos. Se incluye análisis de frecuencia estacionario de igual distribución que el caso No Estacionario (Escenario 5).	72