



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

**ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD EN EL DISEÑO
HIDRÁULICO DE ALGUNOS RELAVES CONSIDERANDO UN
ENFOQUE HIDROLÓGICO NO ESTACIONARIO. ANÁLISIS EN LAS
MACROZONAS NORTE Y CENTRO DE CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

IGNACIO ANDRÉS GUTIÉRREZ AGUILERA

PROFESOR GUÍA:
MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
XIMENA VARGAS MESA
FRANCO RICCHETTI CAMPOS

SANTIAGO DE CHILE
2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL
POR: IGNACIO GUTIÉRREZ AGUILERA
FECHA: JULIO 2020
PROF. GUÍA: SR. MIGUEL LAGOS Z.**

**ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD EN EL DISEÑO HIDRÁULICO DE ALGUNOS
RELAVES CONSIDERANDO UN ENFOQUE HIDROLÓGICO NO ESTACIONARIO.
ANÁLISIS EN LAS MACROZONAS NORTE Y CENTRO DE CHILE.**

Debido a la falta de estaciones fluviométricas con amplia estadística y cercanas a los depósitos de relaves, es que el diseño hidrológico se realiza en base a series de precipitación extrema, siendo necesario a nivel de país: 1.- la estimación de la Precipitación Máxima Probable (PMP) determinada comúnmente en Chile según el método de Hershfield, (1965); y 2.- la inclusión de un análisis de frecuencia (AF) con periodo de retorno de 10.000 años. Ambos métodos se encuentran sujetos a la media y varianza de las series, las que se han considerado invariantes o estacionarias (E) en el diseño de relaves, a pesar de haberse comprobado la existencia de tendencias en uno u ambos estadísticos al aumento (o disminución) en distintos lugares del mundo, como en el país. Lo anterior puede traer consecuencias de existir tendencias positivas en las series de precipitación extrema y considerar un diseño no estacionario (NE), generando que, con la misma información y un criterio de diseño distinto, pueda existir un mayor riesgo hidrológico y vulnerabilidad de la obra.

La presente memoria se centra en el estudio de tendencias en series anuales de máximas precipitaciones diarias (MPD), como así mismo, en el análisis de la vulnerabilidad a la cual pueden estar expuestos cuatro depósitos de relaves ubicados en las macrozonas Norte y Centro del país, al considerar la NE de tendencias positivas y el aumento en los registros de información. Lo anterior por medio de diferencias entre un caso base de diseño y 4 Escenarios que incluyen una consideración no estacionaria de la PMP (PMP-NE) planteada por Hershfield. Así mismo se incluye un AF-NE con periodo de retorno de 10.000 años (Escenario 5), para evaluar diferencias con el caso base y comparar el riesgo hidrológico en relación al análisis de frecuencia estacionario.

Los resultados muestran que, de 118 estaciones meteorológicas analizadas, en el 63 y 68% de las series anuales de MPD existe una tendencia estadísticamente significativa en la media y varianza según los test de Mann-Kendall y Sen. En relación a los Escenarios de diseño y en comparación con el caso base, se determinan importantes diferencias en los Escenarios 2 y 5, correspondientes a la máxima PMP-NE y al AF-NE, siendo en promedio del +40% y -45% respectivamente. Mientras que en los Escenarios 1, 3 y 4 las diferencias son aproximadamente del +13%. En términos de riesgo hidrológico, existe un aumento promedio del 25%, en comparación con el AF-E al año 10.000; mientras que al año 2.100 existe un aumento del 3%. En los análisis no estacionarios se destaca la varianza como la variable de mayor incidencia en los resultados.

Se concluye la necesidad de realizar estudios hidrológicos que incluyan la no estacionariedad en el diseño de los distintos pasivos ambientales mineros, ya que, al incluir esta y cambiar la metodología de estimación de la precipitación de diseño, los caudales presentan diferencias importantes que pueden comprometer la seguridad de la obra, y con ello, la de personas y localidades cercanas. Si se considera además potenciales proyecciones de cambio climático y que 170 de los 720 tranques de relaves que existen en el país se encuentran abandonados, sin medidas acordadas a la actual normativa o de contingencia, se amplifica el riesgo asociado y con ello, la necesidad de considerar estas metodologías en la normativa para desarrollar un análisis robusto.

*A mis padres
Viviana e Iván*

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Viviana, por las conversaciones y copuchas que me compartía las cuales ayudaban a distraerme cuando escribía; gracias por estar siempre cuando lo necesité y en las distintas etapas de mi vida, velando siempre por mi bienestar. A mi padre Iván, por las incontables noches junto a la fogata y las conversaciones que hacían volar el tiempo y mi mente, gracias por las enseñanzas de vida, por la perseverancia y siempre estar presente en mi vida, aún en la distancia.

A mi hija Isidora, que, aunque aún no lo sepa, con sus ganas de jugar y su alegría desbordante, me hacían olvidar las preocupaciones y problemas, recordándome las cosas importantes de la vida, lo que me dio las fuerzas y energía necesaria para seguir avanzando.

A mi *hermosa mía*, Patty, por estos once años de amor y entendimiento, estando a lo largo de todo este proceso y muchos otros, escuchando mis quejas, problemas y dudas existenciales con una sonrisa, dispuesta siempre a ayudar a lograr mis metas, con tardes de tecito que hacían olvidar mis preocupaciones. Así mismo, a la familia Abarca-Pinto que me aceptó como otro miembro, una segunda familia que agradezco haber conocido.

A mi abueli Victoria, una de las personas más importante en mi vida, siempre estando cuando lo he necesitado, preocupada de que nunca me falte nada para lograr mis objetivos en la vida, y siempre brindándome su cariño y amor. A mi hermano Tomás, compañero de travesuras, de estudio por las noches, de “bajones” a las tres de la mañana, de conversaciones extensas y de innumerables momentos. Agradezco tu amistad, lealtad y compañía desde pequeños. A mi tía Sandra y prima Sam, por su preocupación, cariño y cuidado de que nunca me faltase algo.

A Juan Pablo y Jano, las primeras personas que me ofrecieron su amistad al ingresar a la universidad, y una de las pocas amistades que ha perdurado a pesar de no seguir los mismos caminos. Con una cantidad de anécdotas, conversaciones y cosas que nos han pasado cuando estamos los tres, que solo sacan risas y me alegran el día. A Alonso, Darío, Feña, Pipe, Paula y Nico, quienes me aceptaron y dieron su amistad en los últimos años de la carrera, con noches de Age of Empires, salidas, compañía y conversaciones que espero sigan con el tiempo. Así mismo, a la compañía de Álvaro, Cata, Celis, Chico, Clau, Fabi, Karol, Nico y Seba; amigos de diversas situaciones, y que alegraron mis días en la universidad con sus conversaciones de pasillos, en el tercer piso y en incontables fiestas en las que compartimos. Amistades que se han mantenido intactas y han complementado mi vida, haciéndome muy feliz y esperando que siga siendo así.

A mi profesor guía Miguel, quien sin conocerme me dio la oportunidad y el apoyo necesario para lograr este objetivo final, resolviendo mis dudas cuando existieron y siempre atento a mis avances. A la profesora Ximena y Franco, por el tiempo, amabilidad y disposición de ayudar con el desarrollo de mi memoria. Nunca olvidaré el apoyo y conocimiento que aportaron ustedes tres a lograr esta memoria, esperando compartir y seguir conociéndolos en un futuro cuando seamos colegas.

Existen muchos pensamientos, emociones y recuerdos, y la verdad es que, no soy capaz de describir en tan poco espacio todo lo que pienso y siento por ustedes, quienes han marcado mi vida y me han ayudado a llegar a este punto, el cual está lleno de buenos recuerdos. No me queda más que agradecer por el apoyo que me dieron a lo largo de este proceso que culmina con mi tesis. Sin ustedes nada de lo que he logrado hasta ahora sería posible, y, aunque la cercanía no es algo posible en este momento, sepan que siempre están presentes en mi día a día.

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

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Introducción.

Debido a la falta de estaciones fluviométricas con amplia estadística y cercanas a los depósitos de relaves, es que el diseño hidrológico se realiza en base a series de precipitación extrema, siendo necesario a nivel de país: 1.- la estimación de la Precipitación Máxima Probable (PMP) determinada comúnmente en Chile según el método de Hershfield, (1965); y 2.- la inclusión de un análisis de frecuencia con periodo de retorno de 10.000 años. Ambos métodos se encuentran sujetos a la media y varianza de las series, las que se han considerado invariantes o estacionarias en el diseño de relaves, a pesar de haberse comprobado la existencia de tendencias al aumento (o disminución), de uno o ambos estadísticos en distintos lugares del mundo (Easterling et al., 2000) como en el país. Lo anterior puede traer consecuencias en el diseño, ya que, si se considera un análisis no estacionario en el cual existe una tendencia al alza en la media y/o varianza de la serie, se genera que, con la misma información y bajo un criterio de diseño distinto, pueda existir un mayor riesgo y vulnerabilidad de la obra.

El enfoque clásico de análisis y predicción de eventos extremos se basa en la teoría de valores extremos de series estacionarias, en donde la distribución de probabilidades de la precipitación es invariante en el tiempo: sin tendencias, cambios en sus estadísticos y periodicidades (Villarini & Smith, 2010); con lo cual los estadísticos como la media y la desviación estándar son considerados fijos e invariables en el tiempo o fluctuantes entorno a un valor fijo. A pesar de lo anterior y debido al cambio climático y la intervención humana en distintos aspectos como: la urbanización, cambios del uso de suelo, deforestación, minería, explotación de acuíferos e intervención de cauces (Bayazit 2015), es que ha sido cuestionado este enfoque, debido principalmente a que la hidrología en determinados lugares no cumple con ser invariante en el tiempo, existiendo una tendencia al aumento o disminución de los estadísticos a lo largo del tiempo (Salas & Obeysekera, 2014). Al respecto existen una serie de trabajos que documentan esta situación (Vogel et al., 2011), encontrándose tendencias en Europa y distintos países (Easterling et al., 2000).

En base a esto es que en los últimos años ha cobrado fuerza en la hidrología el concepto de análisis no estacionario, el cual, a diferencia del anterior considera cambios espaciales y temporales en el comportamiento de procesos hidrometeorológicos como la precipitación y el caudal (Salas et al., 2018). Lo anterior puede generar repercusiones al momento de diseñar una obra, especialmente cuando se observa un aumento en los estadísticos, ya que implicaría que el riesgo asociado al periodo de retorno de diseño aumentase, produciendo un sub-dimensionamiento de la obra y con ello un potencial riesgo de falla conforme avanza el tiempo.

Por otra parte, Chile es el mayor productor y exportador de cobre a nivel mundial (sin considerar otros minerales), aportando aproximadamente el 10% del Producto Interno Bruto (International Copper Alliance, 2018). Debido a la importancia productiva en el país y a las bajas proporciones en que se encuentran los metales en las rocas, es que este genera una importante cantidad de relaves (García, 2007), los que corresponden según el Ministerio de Minería a *“residuos, mezclas de mineral molido con agua y otros compuestos, que quedan como resultado de haber extraído los minerales sulfurados en el proceso de flotación”* los cuales son almacenados en estructuras conocidas como tranques o embalses de relaves, que corresponden a grandes obras de ingeniería.

Dada esta situación y el contexto actual, en que la sociedad demanda transparencia, resguardo y seguridad en relación a estas obras e infraestructuras; acompañado además de las consecuencias judiciales que lleva para el dueño del relave un fallo en esta (Hartford & Baecher, 2004), es que resulta de suma importancia garantizar la seguridad de la obra. A pesar de esto, según los criterios de revisión de la Dirección General de Aguas en relación al diseño hidrológico, se considera un análisis estadístico estacionario, recordando que esto no necesariamente es correcto de suponer para diversos lugares.

Si en base a esto además se considera que en Chile existen actualmente 720 tranques y embalses de relaves (SERNAGEOMIN, 2018) cuyo diseño fue realizado bajo una mirada estacionaria, es que resulta necesario conocer el estado en que se encuentran sus diseños y como estos pueden verse afectados si es que el análisis hidrológico es realizado bajo un enfoque no estacionario. Con lo antes mencionado, se vuelve relevante conocer e identificar esta situación en el país, con el fin de catastrar las posibles obras que se encuentren sub dimensionadas, y con ello tomar cartas en el asunto que permitan abordar lo planteado en este trabajo, tanto en depósitos existentes como así mismo en nuevas obras.

1.2. Objetivo General.

En base a lo mencionado, la presente memoria tiene como objetivo general estudiar la vulnerabilidad a la cual pueden estar expuestas distintas obras de relaves en las macro zonas Norte y Centro de Chile, considerando para esto la extensión en registros de precipitación al año 2018 y la aplicación del enfoque no estacionario en series de precipitación extrema, en la determinación del caudal de diseño de los relaves.

1.3. Objetivos específicos.

Según el objetivo general planteado, los objetivos específicos de esta memoria corresponden a:

- Estudiar potenciales tendencias en la media y varianza de las series anuales de máximas precipitaciones diarias, de distintas estaciones meteorológicas existentes en las macrozonas Norte y Centro del país que cuenten con más de 30 años de registros.
- Identificar espacialmente depósitos de relaves que se encuentren potencialmente vulnerables debido a la no estacionariedad de las series de tiempo utilizadas para el diseño.
- Determinar y verificar cambios en el caudal de diseño de los relaves identificados, sujetos a la no estacionariedad y extensión de la información meteorológica, según normativa de diseño vigente.

1.4. Organización de este informe.

El trabajo realizado se compone de siete capítulos, dentro de los cuales es posible encontrar información específica y necesaria para lograr los objetivos propuestos. En base a esto es que a continuación se presenta al lector un breve resumen de los temas a tratar en cada uno de dichos capítulos:

En primera instancia, en el capítulo dos se realiza una revisión bibliográfica referente a la normativa existente y asociada al diseño hidrológico de relaves, como así mismo de los criterios y metodologías utilizadas para esto. A lo anterior se suma una revisión de los eventos extremos y la forma estadística en que estos son considerados, revisando los métodos estacionarios y no estacionarios. Seguido de esto, se presenta los antecedentes relacionados al análisis de tendencia, que resulta necesario para determinar si existe o no un cambio en la media y varianza de la serie de precipitación, mostrando para ello las metodologías existentes para determinar tendencias en las series de datos. Finalmente se presenta una breve revisión de casos existentes, tanto a nivel nacional como internacional de tendencias en las series de precipitación y otras variables hidrológicas.

En el tercer capítulo de este informe se presenta la metodología asociada y utilizada en la estimación de los caudales de crecida, interiorizando en los distintos escenarios de precipitación a utilizar, y la metodología asociada a la estimación de caudales a partir de relaciones precipitación-escorrentía. Así mismo se incluye una revisión de la información disponible, en relación a estaciones meteorológicas y depósitos de relaves en el país.

El cuarto capítulo corresponde a los análisis de tendencias sobre las series de precipitaciones extremas, lo cual permite definir los casos y zonas de estudio; para finalizar con la estimación de las precipitaciones de diseño de los distintos Escenarios.

En el quinto capítulo de este trabajo se determinan finalmente los caudales de crecida por medio de las relaciones precipitación-escorrentía utilizadas en el diseño de los depósitos, estimando con esto las diferencias y el riesgo hidrológico asociado a los distintos escenarios considerados.

En el sexto capítulo se realiza la discusión asociada a los resultados, para luego finalizar en el séptimo capítulo con las principales conclusiones generadas en base al trabajo realizado.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introducción

En este capítulo se presenta una revisión de los antecedentes existentes necesarios para cumplir con los objetivos propuestos de esta memoria, enfocándose principalmente en: la normativa nacional y el diseño hidrológico de depósitos de relaves, la metodología existente para abordar la información estadística de los eventos de precipitación extrema; como así mismo se revisa la forma en que se realiza la búsqueda de tendencia en las series de precipitación para realizar un análisis no estacionario. Finalmente se presenta la evidencia existente en relación a tendencias de estadísticos de precipitación y otras variables hidrológicas tanto a nivel nacional como internacional.

2.2. Normativa de Diseño Hidrológico de Depósitos de Relaves

2.2.1. Normativa en Chile

A nivel de país los depósitos de relaves comenzaron a aparecer con las primeras operaciones mineras importantes a inicios del siglo anterior. A pesar de ello, el interés por regular y fiscalizar este tipo de obras no llegaría hasta el terremoto del año 1965 y el colapso de varios de estos depósitos (AMTC, 2019). De esta forma, en el año 1970 el Ministerio de Minería crea el Decreto N° 86: “*Reglamento de construcción y operación de tranques de relave*”, del cual es necesario mencionar los Artículos 30 y 36 del texto citado, ya que en estos se hace mención al manejo de aguas en este tipo de obras. Por una parte, el Artículo 30 comenta que: “*No se permitirá que ninguna agua del tiempo o de las quebradas adyacentes se incorporen sobre dicha superficie con la sola excepción de las precipitaciones*”; mientras que el Artículo 36 solicita la inclusión de “*Obras civiles [...] y la justificación de su dimensionamiento*” para hacer cumplir lo mencionado en el Artículo anterior.

Si bien este Decreto fija una base para el diseño de los depósitos, el Artículo 36 solo comenta la necesidad de incluir las obras civiles, sin profundizar en qué tipo de obras son necesarias; lo cual es considerado 37 años después, cuando se deroga el Decreto antes mencionado y se reemplaza por el DS N°248 del Ministerio de Minería, el cual plantea la necesidad de contar con un: “*Manual de Emergencias del Depósito de Relaves [...] que permita enfrentar en forma exitosa las situaciones adversas, climatológicas, hidrológicas*”; y (por otra parte) resolviendo la ambigüedad de las obras civiles necesarias, solicitándolas explícitamente como son: el vertedero de emergencia, canales de desvío de aguas lluvias, y construcción de canales de contorno.

Finalmente, no es hasta el año 2015 con el Decreto N°50 del Ministerio de Obras Públicas (MOP) en donde se complementa y establece en forma explícita la condición de diseño de las obras. En este sentido, si bien el Decreto Supremo N°248 del Ministerio de Minería corresponde al reglamento que fija las bases para el diseño, construcción, operación y cierre de Relaves; es el Decreto N°50 del Ministerio de Obras Públicas, el que establece las condiciones técnicas que deberán cumplirse en el proyecto, construcción y operación de obras hidráulicas (en este caso, relaves).

El Artículo 36 del decreto fija la normativa en relación, y desde el punto de vista hidrológico, del periodo de retorno de diseño de la obra según su tamaño, existiendo tres categorías según la capacidad y altura del embalse de relave, las que se pueden observar en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Categorías de los depósitos de relaves según la altura del muro o la capacidad del depósito.

Categoría	Altura del muro	Capacidad depósito
A: Pequeños	Mayor a 5 [m] e inferior a 15 [m]	Superior a 50.000 [m ³] e inferior a 1.500.000 [m ³]
B: Medianos	Mayor o igual a 15 [m] e inferior a 30 [m]	Superior a 1.500.000 [m ³] e inferior a 60.000.000 [m ³]
C: Grandes	Mayor o igual a 30 [m]	Superior a 60.000.000 [m ³]

Según lo mencionado, se debe implementar y diseñar un vertedero de seguridad que opere durante toda la vida útil, considerando un periodo de retorno de 1.000 y 10.000 años, para las categorías A y B (respectivamente); mientras que el diseño en el caso de la categoría C se realiza en base a la crecida máxima probable (CMP), siempre y cuando esta no sea menor a la crecida de un periodo de retorno de 10.000 años, en cuyo caso se utiliza este último valor. Sin perjuicio de lo anterior, el Artículo 38 fija que previo al término de la vida útil de la obra se debe diseñar el evacuador de crecida definitivo, asociado a la crecida máxima probable o, en su defecto, a la de 10.000 años si esta última es mayor.

Por otra parte, no todos los depósitos de relaves se encuentran sujetos a esta normativa, ya que según el Artículo 3 del documento citado “*Se exceptúan del alcance de este reglamento [...] los depósitos de Relaves en Pasta, Filtrados y aquellos Depósitos de Relaves Espesados que contengan como valor mínimo, al momento de depositarse, un 65% o más de concentración en peso de sólidos*”; siempre y cuando estos no se sitúen dentro de un cauce.

Finalmente, es importante destacar que aquellos relaves más antiguos principalmente los abandonados, no se encuentran normados y se desconoce si es que estos poseen alguna medida de seguridad después de su abandono. Bajo esta idea, aquellos depósitos diseñados con anterioridad al año 1970 no cuentan con obras civiles (o se desconocen); aquellas anteriores al 2007 cuentan con obras, pero se desconocen de que tipo; mientras que los depósitos diseñados con anterioridad al 2015 se conoce el tipo de obra, pero no está definido el periodo de retorno de diseño.

2.3. Análisis de Eventos Extremos

Para diseñar distintas obras del relave se deben considerar los eventos extremos de caudal que puedan afectar la integridad de la obra. A pesar de ello, el trabajo se dificulta cuando: no se dispone de información fluviométrica en dicho lugar, en otras secciones del mismo curso de agua o en otros cursos pertenecientes a cuencas hidrológicamente similares; siendo necesario recurrir al uso de métodos indirectos basados en relaciones precipitación-escorrentía para evaluar los caudales de diseño (DGA, 1995).

2.3.1. Estimación de Precipitación Máxima Probable.

Como se observó en el punto 2.2.1 sin importar el tamaño de la obra de relave, después de cumplir su vida útil, y según la normativa actual de diseño, se debe diseñar para la Crecida Máxima Probable (CMP); siendo su estimación realizada por medio de la Precipitación Máxima Probable (PMP). La estimación de la PMP habitualmente es realizada por medio de dos métodos: el hidrometeorológico y el estadístico.

El primero de estos métodos se basa en la modelación de los mecanismos que intervienen en la generación de una tormenta, estableciendo que esta será máxima cuando se maximice el contenido de agua precipitable y la velocidad de convergencia de dicha humedad al lugar donde se centra la tormenta (WMO, 2009).

El segundo método, propuesto por Hershfield, (1965), se basa en trazar un límite superior para la precipitación por medio del ajuste de un factor de frecuencia, en función del valor promedio y desviación estándar de la precipitación (para una estación meteorológica dada).

Debido a la cantidad de información que requiere el primero de los métodos (precipitación, temperatura, humedad y velocidad del viento) y la necesidad de que esta se encuentre a nivel horario en lo posible, es que resulta complejo de aplicar en determinadas zonas, siendo común utilizar el método de Hershfield en los proyectos de ingeniería a nivel de país.

El método estadístico puede ser aplicado cuando se dispone de al menos 20 años de información y en cuencas no mayores a 1.000 [km²], aunque ha sido aplicado en cuencas de mayores áreas (WMO, 2009). En este sentido, según lo planteado por Campos, (1998): el procedimiento se basa en el método del factor de frecuencia presentado por Chow, (1961) en la ecuación (2.1):

$$X(T_r) = \mu_n + K \cdot \sigma_n \quad (2.1)$$

Donde $X(T_r)$ corresponde a la Precipitación asociada a un determinado periodo de retorno T_r ; μ_n y σ_n son la media y desviación estándar (respectivamente) del registro de precipitación de largo n ; y finalmente K es el factor de frecuencia asociada al periodo de retorno y el modelo probabilístico.

De esta forma, si se considera X_m como la precipitación máxima observada y se reemplaza por $X(T_r)$, entonces K_m corresponde al número de σ_n que deben ser adicionadas a μ_n para obtener la precipitación máxima observada. De esta forma Hershfield analizó más de 2.600 estaciones pluviométricas (un 90% de estas situadas en los Estados Unidos), y en base a los estadísticos de estas estimó el valor del factor de frecuencia K_m (siendo del orden de 15), el cual varía según la magnitud del promedio de las máximas precipitaciones diarias de las series anuales, y de la duración de la precipitación como se muestra en la Figura 2.1.

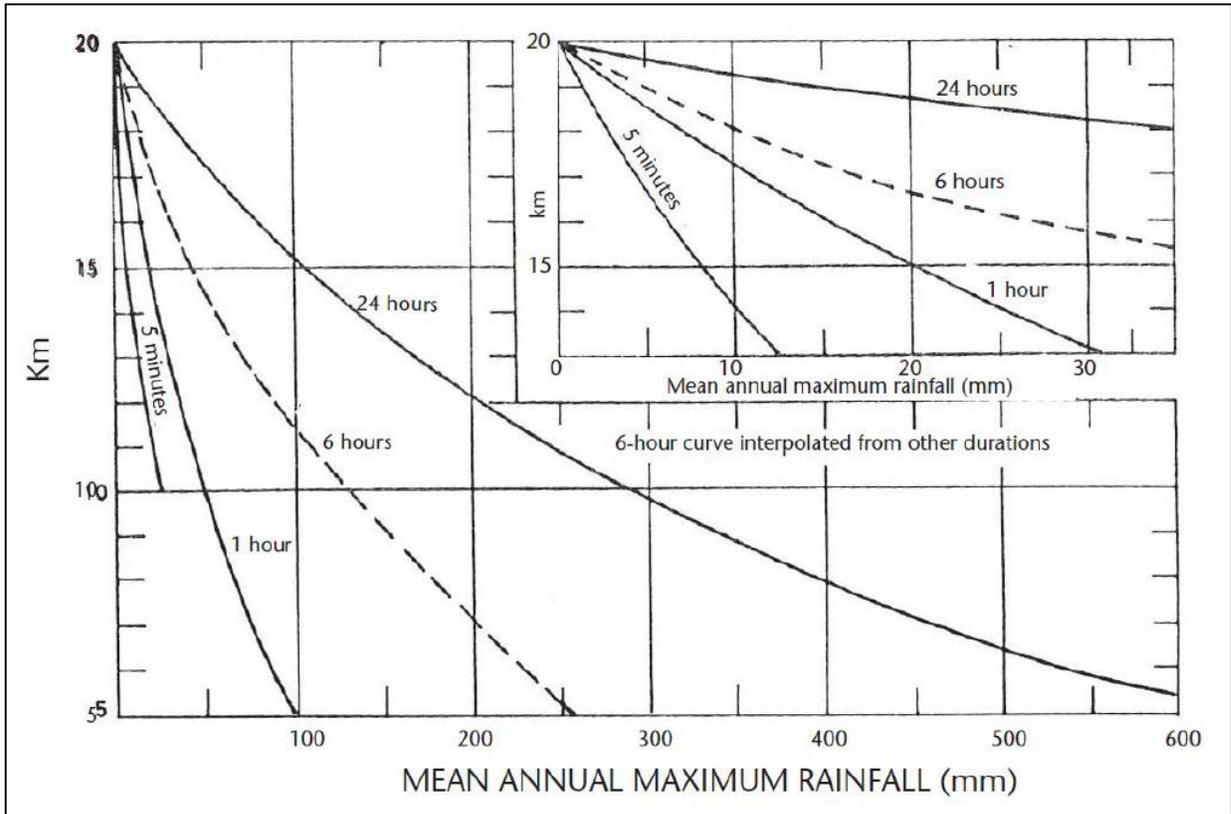


Figura 2.1 Estimación del factor de Frecuencia en función de la duración y la media de la serie anual de máximos diarios.
Fuente: WMO, 2009.

La metodología propuesta para estimar la PMP según Hershfield consiste en:

- Suprimir el evento máximo X_m de la muestra de n datos de la serie anual de máximas precipitaciones diarias, formando dos series de datos n y $n - m$.
- Se calcula la media y desviación estándar a cada serie, y se corrigen los estadísticos del total de las series (μ_n y σ_n), según la proporción que hay entre la serie suprimida y esta misma (C_{μ_{n-m}/μ_n} y $C_{\sigma_{n-m}/\sigma_n}$), por medio de las Figura 2.2 y Figura 2.3 (a); además de corregir la media y desviación estándar (C_{μ_L} y C_{σ_L}) según el largo del registro de información por medio de la Figura 2.3 (b). Con lo cual los valores corregidos corresponden a los de la ecuación (2.2).

$$\mu'_n = \mu_n \cdot \frac{C_{\mu_{n-m}}}{\mu_n} \cdot C_{\mu_L} \qquad \sigma'_n = \sigma_n \cdot \frac{C_{\sigma_{n-m}}}{\sigma_n} \cdot C_{\sigma_L} \qquad (2.2)$$

- Finalmente, se estima el valor K_m según la Figura 2.1, y se reemplaza en la ecuación (2.3), determinando así la PMP.

$$PMP = \mu'_n + K_m \cdot \sigma'_n \qquad (2.3)$$

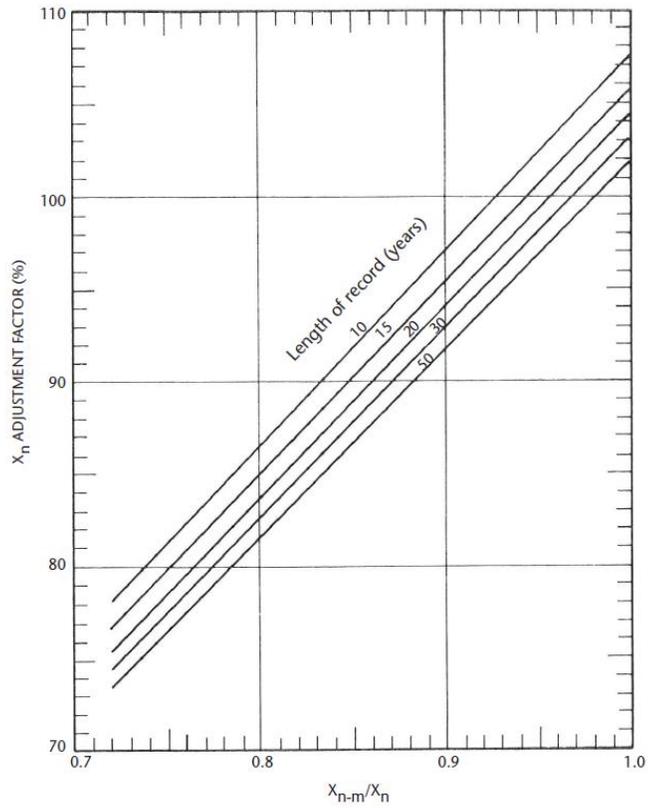


Figura 2.2 Corrección de la media de los datos según proporción entre μ_n y μ_{n-m} y el largo de la serie de información. Fuente: WMO, 2009.

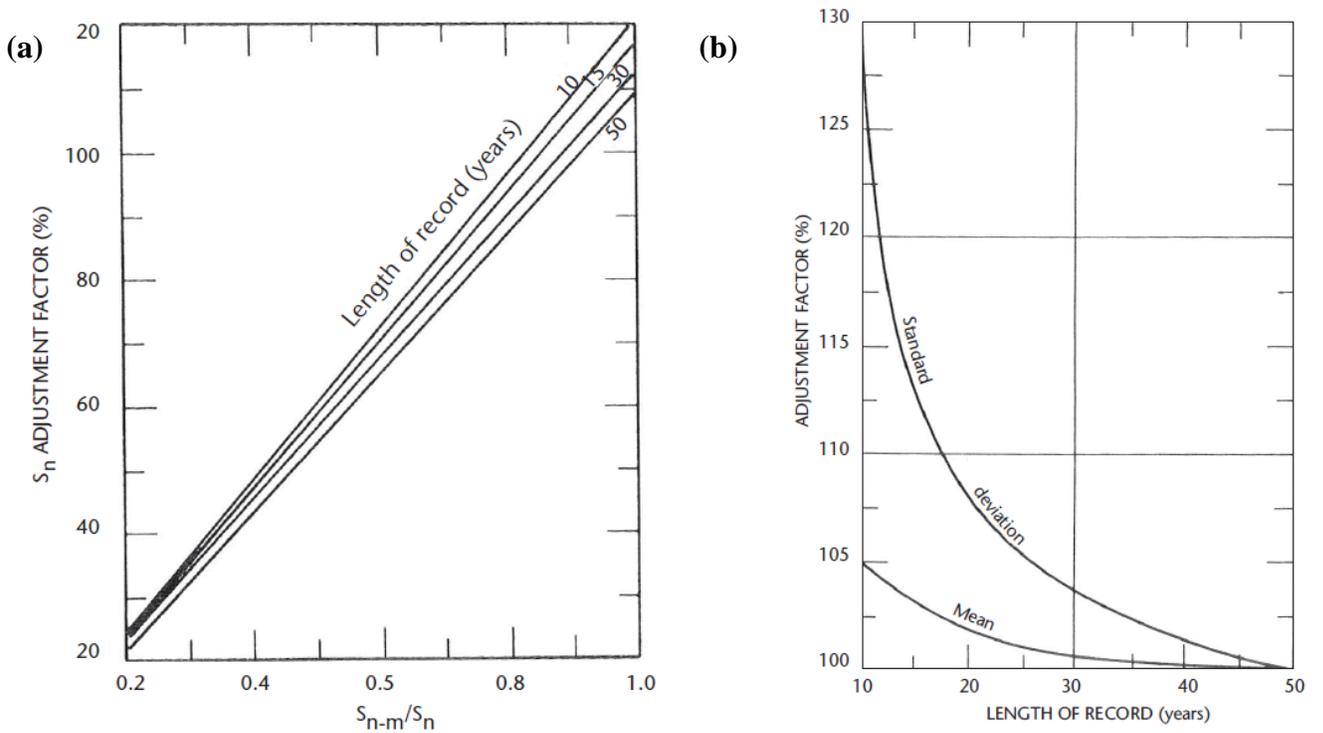


Figura 2.3 (a) Corrección de la desviación estándar de la serie según proporción entre σ_n y σ_{n-m} y largo del registro. (b) Corrección de estadísticos de la muestra según largo de la serie. Fuente: WMO, 2009.

2.3.2. Ajuste de PMP según Stowhas (1983)

Stowhas, (1983) propone una modificación al método propuesto por Hershfield, a partir del análisis de estadísticas de precipitaciones de estaciones pluviométricas chilenas, ya que el primero tendería a sobreestimar la PMP en Chile (Stowhas, 1983). De esta forma, analizó 190 estaciones a lo largo del país, concluyendo al respecto que un coeficiente de frecuencia máximo igual a $K_m = 11$, entrega resultados con diferencias más o menos balanceadas a diferencia de Hershfield, que siempre es más conservador. Así, siguiendo la misma metodología descrita (considerando la corrección de los estadísticos) se obtiene la ecuación (2.3), pero en vez de estimar el valor del factor de frecuencia, este se reemplaza directamente por el obtenido por Stowhas.

2.3.3. Análisis hidrológico Estacionario y No Estacionario

Además de la estimación de la PMP, es necesario obtener la precipitación asociada a un periodo de retorno de 10.000 años (para comprobar que esta no sea superior a la PMP, según el DS N°50), lo cual se realiza por medio de un análisis de frecuencias. En este sentido, los métodos probabilísticos tradicionales suponen que la serie de información hidrológica es independiente e idénticamente distribuida, además de considerar que los parámetros y momentos que definen las distribuciones de probabilidades, son fijos (estáticos) (Read et al., 2015), suponiendo así, que tanto para el pasado, presente y futuro la información está sujeta a una única distribución (Liang et al. 2011), lo que se conoce como análisis de frecuencia estacionario.

A pesar de esto, distintas investigaciones han documentado que en algunos lugares, la serie de información hidrológica (por ejemplo, series de precipitaciones extremas) exhibe un comportamiento no estacionario en los parámetros o momentos que definen las distribuciones de probabilidad, lo cual se ve reflejado en tendencias al aumento o disminución de la serie (Salas et al., 2014), y con ello, incumpliendo el supuesto de ser estáticos.

Lo anterior tiene repercusiones al momento de estimar el periodo de retorno asociado al diseño de una obra, ya que, en caso de existir evidencia de tendencias en las series hidrológicas, cada uno de estos análisis determina un periodo de retorno distinto para un valor de precipitación extrema fijo. En este sentido, surge la necesidad de entender como es que estas se diferencian y como es posible abordarlas de un modo adecuado, resguardando la seguridad de las obras. Con esto en mente, a continuación se procede a describir cada una de las metodologías que se utilizan para estimar el periodo de retorno y el riesgo hidrológico.

Análisis Estacionario

Los métodos tradicionales para determinar el periodo de retorno y el riesgo de los eventos hidrológicos extremos consideran dos condiciones claves: (1) los eventos extremos surgen de una distribución estacionaria, y (2) la ocurrencia de eventos extremos es independiente o débilmente dependiente (Leadbetter, 1983).

De esta forma, para entender mejor el trasfondo de lo mencionado y siguiendo lo planteado por Salas & Obeysekera, (2014): se considera una precipitación de diseño " z_q " de una obra, en la cual se desea saber la probabilidad de que z_q ocurra en el año " x " por primera vez. Definiendo así el tiempo de espera para que esto ocurra como una variable aleatoria " X "; " p " como la probabilidad de excedencia de la precipitación de diseño, y " q " como la probabilidad de no excedencia de ese valor. Así, se tiene por la condición (2) del enfoque estacionario, que la probabilidad de que esto suceda viene dado por la multiplicación de: cada una de las probabilidades de no excedencia " q ", en los años anteriores al " x "; con la probabilidad de que ocurra en el año " x ".

En este sentido, dado por la condición (1) del enfoque estacionario, se tiene que cada una de las probabilidades de no excedencia son iguales como se ilustra en las Figuras 2.4 y Figura 2.5, obteniéndose lo planteado en la ecuación (2.4).

Año	1	2	3	...	$x - 1$	x
¿ Evento?	NO	NO	NO	NO	NO	SI
Probabilidad	$1 - p$	p				

Figura 2.4 Esquema de probabilidades al considerar que el caudal de diseño se excede en el año "x".

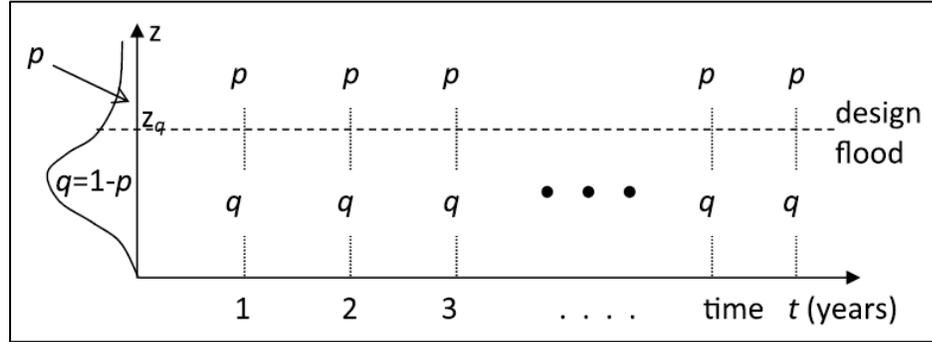


Figura 2.5 Esquema del enfoque estacionario. Fuente: Salas & Obeysekera, 2014.

$$f(x) = P(X = x) = (1 - p)^{x-1}p \quad (2.4)$$

Con lo cual se reconoce la distribución geométrica y cuyo valor esperado corresponde al periodo de retorno "T" de la ecuación (2.5):

$$T = \frac{1}{p} = \frac{1}{1 - q} \quad (2.5)$$

De esta forma se define ahora el riesgo hidrológico " R_h " asociado a una obra, como: la probabilidad de que se exceda la precipitación de diseño z_q antes de un año n , es decir, $R_h = P(X \leq n) = F_X(n)$, en donde este último valor corresponde a la función de distribución acumulada, descrito en la ecuación (2.6).

$$R_h = \sum_{x=1}^n f(x) = p \sum_{x=1}^n (1 - p)^{x-1} = 1 - (1 - p)^n \quad (2.6)$$

Finalmente la confiabilidad o seguridad de una obra "S", corresponde al inverso del riesgo siendo este el de la ecuación (2.7).

$$S = 1 - R_h = (1 - p)^n \quad (2.7)$$

Por otra parte, para determinar eventos asociados a cierta probabilidad de excedencia, Chow, (1951) propuso realizar un análisis de frecuencia, utilizando factores de frecuencia basado en estadígrafos estacionarios, "obteniendo de esta manera un valor de precipitación asociado a un periodo de retorno, el que está dado por un ajuste estadístico" (Ricchetti, 2018) según la ecuación (2.8).

$$X(pb_{exc}) = \mu + \sigma * K_T(pb_{exc}) \quad (2.8)$$

Donde:

- $X(pb_{exc})[mm]$: Variable asociada a una probabilidad de excedencia.
- $Pb_{exc}[-]$: Probabilidad de excedencia.
- $\mu[mm]$: Media de la serie de información de precipitación.
- $\sigma[mm]$: Desviación estándar de la serie de información de precipitación.
- $K_T[-]$: Factor de frecuencia asociado a una determinada distribución de probabilidad y probabilidad de excedencia.

Bajo esta idea, la obtención de la precipitación de diseño se realiza a partir de los parámetros estadísticos estacionarios y la obtención del factor de frecuencia, el que se encuentra asociado a una distribución de probabilidad que se ajuste a la información, permitiendo así determinar para distintos periodos de retorno el caudal de excedencia asociado.

Análisis No Estacionario

A diferencia del caso estacionario, en el análisis no estacionario los eventos extremos no se caracterizan por una distribución estacionaria (diferencias con la condición (1)), por lo cual los parámetros de esta distribución varían en el tiempo y con ello la precipitación para un periodo de retorno dado. Con esto, la ecuación (2.8) presenta una diferencia por parte de los estadísticos, ya que estos dependen ahora del tiempo (o alguna covariable), reescrita según la ecuación (2.9).

$$X(pb_{exc}, t) = \mu(t) + \sigma(t) * K_T(pb_{exc}) \quad (2.9)$$

De esta forma, pueden darse tres casos para cada uno de los estadísticos (media y desviación estándar) por separados, en relación a la variación de estos según la tendencia de los eventos extremos, pudiendo: aumentar, disminuir o variar en patrones aleatorios (Salas & Obeysekera, 2014). El caso más relevante corresponde a aquel en que ambos aumentan, ya que, si la frecuencia de los eventos extremos aumentan con el tiempo, implica que la probabilidad de excedencia (p_t) también lo hará, generando con esto que el periodo de retorno inicialmente utilizado para el diseño (considerando un análisis estacionario) se vea reducido, aumentando así el riesgo asociado a la obra y su diseño.

En la Figura 2.6 es posible notar un ejemplo del aumento en la tendencia de los valores extremos, en donde a medida que avanza el tiempo las probabilidades de excedencia aumentan como así mismo varía la distribución, produciendo que la precipitación de diseño sea más probable con el paso del tiempo.

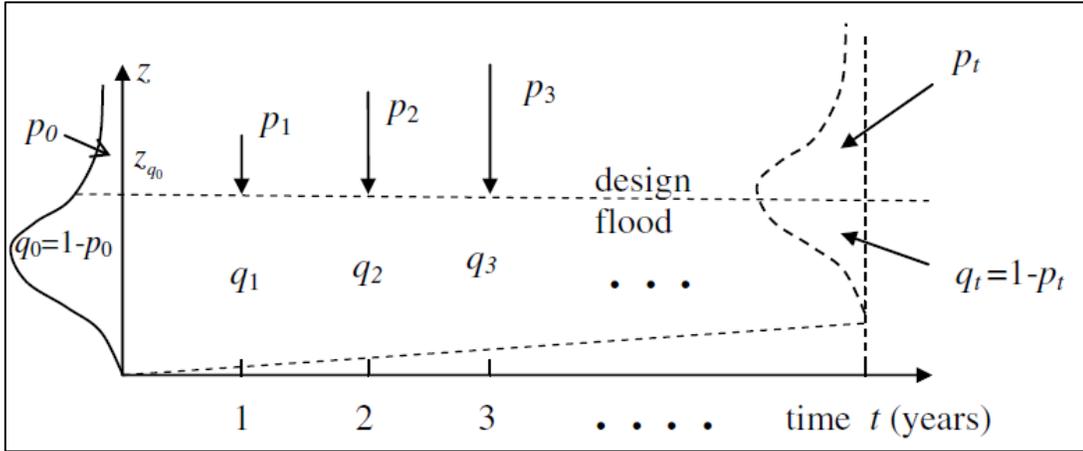


Figura 2.6 Enfoque del enfoque no estacionario considerando tendencia al aumento de los estadísticos. Fuente: Salas & Obeysekera, 2014.

En función de lo expuesto y en contraste con el caso estacionario, la probabilidad de que la precipitación z_q ocurra en el año "x" por primera vez, viene dado por la multiplicación de: a) las probabilidades de no excedencia " p_t " de años anteriores (t) al año "x", las cuales son distintas debido a la diferencia con la condición (1) del caso estacionario (consideración de distribución estacionaria); y b) por la probabilidad de excedencia " p_x " asociada al año "x", como se describe en las ecuaciones (2.10) y (2.11).

$$f(x) = P(X = x) = (1 - p_1)(1 - p_2)(1 - p_3) \dots (1 - p_{x-1})p_x \quad (2.10)$$

$$f(x) = p_x \prod_{t=1}^{x-1} (1 - p_t) \quad (2.11)$$

En función de estos resultados, se redefine el periodo de retorno, como se presenta en la ecuación (2.12):

$$T = E(X) = \sum_{x=1}^{x_{max}} x p_x \prod_{t=1}^{x-1} (1 - p_t) \quad (2.12)$$

De esta forma, el riesgo hidrológico asociado a un año "n" y la confiabilidad al mismo año, se pueden expresar según las ecuaciones (2.13) y (2.14) respectivamente.

$$R_h = 1 - \prod_{t=1}^n (1 - p_t) \quad (2.13)$$

$$S = \prod_{t=1}^n (1 - p_t) \quad (2.14)$$

Con lo cual se puede observar que bajo un régimen estacionario se recupera lo expuesto anteriormente en las ecuaciones (2.6) y (2.7).

2.3.4. Estadística Hidrológica

Como fue visto en las secciones anteriores, tanto los métodos estacionarios como no estacionarios requieren un análisis de frecuencia para determinar así los valores máximos de precipitación (o caudal, según sea el caso) asociados a un periodo de retorno. En este sentido, para el caso estacionario se suelen utilizar distintas distribuciones como: Normal, LogNormal, Exponencial, Gamma, Pearson, Valores Extremos Generalizados (GEV por sus siglas en inglés)¹; las cuales determinan la posibilidad de que una observación de la variable quede en un rango especificado (Chow et al., 1988), siendo una de las más utilizada en diversos estudios la GEV (Xavier, 2019) principalmente por el tipo de información que se busca representar. En este sentido, la distribución GEV en un análisis estacionario queda descrita según la ecuación (2.15).

$$F(z, \theta) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-\frac{1}{\xi}} \right\} \quad (2.15)$$

Por otra parte, en relación a la metodología no estacionaria, la ecuación (2.15) se puede reescribir considerando covariables (como por ejemplo, el tiempo), con lo cual la distribución GEV queda descrita según la ecuación (2.16).

$$F(z, \theta_t) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{z - \mu_t}{\sigma_t} \right) \right]^{-\frac{1}{\xi}} \right\} \quad (2.16)$$

En donde θ_t representa al set de parámetros (μ_t, σ_t, ξ) dependientes de alguna covariable (en este caso del tiempo); mientras que ξ corresponde al parámetro de forma, el cual si se considera nulo, reduce la expresión (2.15) y (2.16) a la distribución Gumbel. Finalmente, el valor z corresponde a la variable de estudio, siendo en este caso la precipitación.

2.4. Análisis de Tendencias

La existencia de un régimen no estacionario depende de las condiciones espaciales y temporales de la zona de estudio, por lo cual suponer este tipo de análisis no tiene relevancia en zonas en que no existe una tendencia. Por esta razón, surge la necesidad de conocer en primera instancia si existe o no una tendencia de la variable de interés, lo cual se logra por medio de un análisis de tendencias.

En este sentido, los cambios en una serie de información pueden ocurrir de múltiples formas, con la posibilidad de ser graduales (tendencia), abrupto (fase de cambio) o en alguna otra forma más compleja (Kundzewic & Robson, 2004). La metodología para determinar la existencia o no de tendencias es por medio de distintos test no paramétricos los que aplican los conceptos de hipótesis nula y la alternativa, siendo la primera -por ejemplo- que no hay cambio en los valores medios de una serie de información (sin tendencia) y la segunda que existe un cambio en la serie (con tendencia).

¹ Mayor información al respecto de las distintas distribuciones de probabilidades pueden ser consultadas en Chow et al. (1988).

Respecto a los test utilizados, existen distintos métodos que permiten caracterizar una tendencia, como así mismo determinar la magnitud de los estadísticos para un análisis no estacionario. Según esto se presentan y describen algunos de los más utilizados, los cuales serán la base para el análisis de tendencias en esta memoria.

2.4.1. Test de Mann-Kendall

Corresponde a uno de los test de análisis de tendencia más utilizado a nivel internacional (Madsen et al., 2014), basado en rankings según la correlación de dos variables, que pueden ser la serie de información hidrológica y el periodo de estudio, siendo un test no paramétrico (Kundzewicz & Robson, 2004).

Para determinar si existe tendencia, el test busca determinar la estadística de prueba normalizada z_{MK} y compararla con un nivel de significancia definido por el analista, tomando usualmente el valor de $Z_{\alpha} = 0,05$. En este sentido, la metodología corresponde a determinar en primera instancia la suma de los signos S , la cual se describe en la ecuación (2.17).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2.17)$$

Donde los valores dentro de las sumatorias corresponden a valores de la serie de tiempo (x) a analizar, determinando así el signo de todas las variaciones existentes en la muestra. Realizado esto, se debe determinar la varianza de la suma de signos, lo cual se realiza por medio de la ecuación (2.18).

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{t=1}^n t(t-1)(2t-5)}{18} \quad (2.18)$$

En donde el primer término de la sustracción corresponde a la frecuencia total de los datos, mientras que el segundo término corresponde a la frecuencia de los valores repetidos (*ties*) dentro de la serie, los que se descuentan para evitar una mala estimación de la varianza. Finalmente, es posible determinar la estadística de prueba normalizada z_{MK} según las relaciones presentes en la ecuación (2.19).

$$z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

Comparando este valor con el nivel de significancia definido anteriormente, se determina si existe tendencia, rechazando la hipótesis nula cuando $|z_{MK}| > Z_{\alpha}$. En el caso que se cumpla lo anterior y si el signo de z_{MK} es positivo (o negativo), se dice que la serie tiene una tendencia al aumento (disminución) en el tiempo. Su única condición es la existencia de un registro de información de al menos 8 datos, ya que sobre esta cantidad la estadística de S se distribuye aproximadamente normal con un valor esperado $E(S) = 0$ (Mondal et al., 2012).

Si bien no fue considerado para este trabajo, existe un test de características similares conocido como el Test *Rho de Spearman* (Kundzewicz & Robson, 2004), cuyos resultados se han visto que son similares al test de Mann-Kendall (Hamed, 2016; Scheng et. al, 2016).

2.4.2. Ajustes de Tendencias Lineales

Este método consiste en realizar un ajuste lineal de la información hidrológica, basado en la minimización del error cuadrático medio (EMC), es decir, la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores reales observados " y_i " y los valores estimados " \hat{y}_i " (Carrollo, 2012) como se ve en la Figura 2.7, para así determinar si existe un orientación creciente o decreciente.

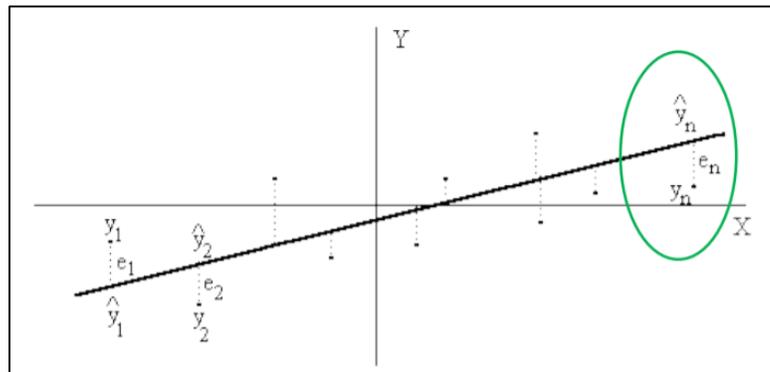


Figura 2.7 Representación de distribución de puntos y cálculo del ECM de la variable "y". Fuente: Carrollo, 2012.

De esta forma se obtiene la expresión (2.20) y (2.21) para la pendiente " m " y el coeficiente de posición " n " respectivamente

$$n = \bar{y} - m\bar{x} \quad (2.20)$$

$$m = \frac{S_{xy}}{S_x^2} \quad (2.21)$$

En donde \bar{x} e \bar{y} corresponden a las medias muestrales de " x " e " y "; mientras que S_x^2 y S_{xy} corresponden a la varianza de " x " y la covarianza muestral de " x " e " y ", respectivamente. En este sentido, las diferentes pendientes ajustadas cuantificarán una disminución/aumento promedio de la variable (Ricchetti, 2018), permitiendo determinar si existe una tendencia en relación a la información.

2.4.3. Estimador de Pendiente de Sen

Otro método de ajuste corresponde al realizado por Sen (1968), el cual propone un procedimiento no paramétrico para estimar la pendiente de una tendencia en una muestra de N pares de datos (Gocic & Trajkovic, 2013). Según este, para cada tupla posible $N = \binom{n}{2}$ de valores en los tiempos $(t_i - t_j)$ con $1 \leq i \leq j \leq n$, se calcula la pendiente según la ecuación (2.22):

$$m_i = \frac{x_j - x_i}{t_j - t_i} \quad (2.22)$$

Del vector que contiene cada m_i se obtiene la mediana Q_m y según su magnitud y signo se determina la pendiente y dirección (respectivamente) de la tendencia. Para determinar si existe tendencia significativa, se debe calcular el intervalo de confianza de Q_m , obteniendo así un mínimo y un máximo (Q_{min} y Q_{max}), cuya estimación se realiza según las ecuaciones (2.23) y (2.24).

$$Q_{max} = 1 + \frac{N + C_{\alpha}}{2} \quad (2.23)$$

$$Q_{min} = \frac{N - C_{\alpha}}{2} \quad (2.24)$$

En donde N corresponde al número de tuplas posible, mientras que C_{α} corresponde al valor presente en la ecuación (2.25).

$$C_{\alpha} = Z_{1-\alpha/2} * [Var(S)]^{1/2} \quad (2.25)$$

Siendo $Z_{1-\alpha/2}$ el nivel de significancia, y $Var(S)$ la varianza de la suma de signos del test de Mann-Kendall, presente en la ecuación (2.18). De esta forma, determinado el intervalo de confianza y acorde al valor que adopten Q_{min} y Q_{max} , se puede demostrar la existencia de tendencia según los signos de estos, que, en caso de ser similares, se dice que la pendiente es estadísticamente distinta de cero (Gocic & Trajkovic, 2013).

La ventaja que posee este test, radica en eliminar el efecto de posibles “outliers” en la muestra, en comparación con el método del ECM que puede estar sesgado por valores extremos. Lo anterior, dado que el método de la pendiente de Sen, ordena las pendientes optando por la mediana, evitando así que cambios abruptos entre valores consecutivos sean considerados como la pendiente real; a diferencia del ECM, el cual considera todos los valores, sin una diferenciación de posibles errores u “outliers” en la serie.

2.4.4. Simulación de Montecarlo.

Acorde a lo mencionado por Ricchetti, (2018), con el objetivo de descartar que las tendencias que se estimen sean explicadas exclusivamente producto de la aleatoriedad del clima, se realizan una serie de simulaciones de los análisis de tendencias por medio del método de Montecarlo. En este sentido, se toma la serie observada y se desordena de forma aleatoria, realizando un análisis de tendencia sobre la serie generada; proceso el cual se repite una cantidad suficiente de veces para obtener una distribución de probabilidades de la serie de tendencias generadas.

Finalmente, se ubica el resultado del test de la serie observada en la distribución acumulada de probabilidades estimada, y según la posición que adopte se descartará (o no) la existencia de tendencias en la serie inicial, lo cual dependerá de su cercanía a la probabilidad del 50%, la que corresponde a una tendencia nula.

2.4.5. Estadísticos Móviles.

Los estadísticos móviles corresponden a una estimación de los estadísticos (media, desviación estándar) de una serie de datos, por medio de sub-series de la original, con el objeto de facilitar la detección de tendencias, siendo un procedimiento recomendado para el análisis hidrológico de frecuencias de datos máximos anuales, que presentan tendencia y variabilidad cambiante a través de su registro (Aranda, 2018). La razón de esto es que la estimación de los estadísticos móviles suaviza la serie temporales y con ello, facilita la detección de tendencias en la información (Ricchetti, 2018), disminuyendo la ventana temporal de análisis.

Para cuantificar los estadísticos típicos (promedio y desviación estándar), se calculan en ventanas de (k) tiempos móviles según las ecuaciones (2.26) y (2.27).

$$\mu(t) = \frac{1}{k} \sum_{i=t_1}^{t_2} x_i \quad (2.26)$$

$$\sigma(t) = \frac{1}{k} \sqrt{\sum_{i=t_1}^{t_2} (x_i - \mu(t))^2} \quad (2.27)$$

Donde:

- k [-]: Corresponde a la ventana móvil de tiempo.
- t_1, t_2 [-]: Corresponden a los años de inicio y término según la ventana móvil.

De esta forma, el método permite obtener los estadísticos bajo distintas ventanas de tiempo, siendo la información necesaria para realizar el análisis no estacionario, como así mismo los test de análisis de tendencia.

2.4.6. Change Point Analysis, Test de Pettitt (1979).

En determinadas situaciones existe la posibilidad que en la serie a analizar haya saltos o cambios de tendencias en un determinado momento, lo cual no queda bien reflejado en los métodos de análisis de tendencias vistos con anterioridad (Ricchetti, 2018). De esta forma y para caracterizar esta singularidad, se realiza un análisis del punto de cambio (*Change-Point Analysis*), siendo común para la detección de cambios en series continuas de variables hidrológicas o climáticas, el uso del test no paramétrico de Pettitt (Pohlert, 2020).

En este sentido y acorde a lo planteado por Xie et al., (2013): considerando una serie continua de " T " datos ($x_0, x_1 \dots x_T$), la cual se divide en dos partes tal que la primera corresponde a $x_0, x_1 \dots x_{t_0}$ y la segunda a $x_{t_0+1}, x_{t_0+2} \dots x_T$, las que comparten una distribución de probabilidad $F_1(x)$ y $F_2(x)$ respectivamente. La hipótesis nula del test propone que no existe un cambio en el valor medio de la serie, tal que $F_1(x) \cong F_2(x)$; mientras que la hipótesis alternativa propone de forma contraria que $F_1(x) \neq F_2(x)$, identificando un punto de cambio en t_0 . De esta forma el índice estadístico $U_{t,T}$ se define según la ecuación (2.28).

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2.28)$$

El punto de cambio más probable τ corresponde al dado por la relación (2.29).

$$K_\tau = \max |U_{\tau,T}| \quad (2.29)$$

De esta forma, se comprueba la existencia de un punto de cambio en el tiempo " τ " (y con ello se rechaza la hipótesis nula), si el valor " p " estimado a partir de la ecuación (2.30), es menor a un nivel de significancia α (usualmente igual al 5%).

$$p = 2 \exp\left(\frac{-6K_\tau^2}{T^2 + T^3}\right) \quad (2.30)$$

2.5. Evidencia de Tendencias en Series Hidrológicas

A lo largo de esta revisión bibliográfica se han presentado una serie de conceptos como información en relación a la obtención y determinación de las precipitaciones de diseño bajo un escenario no estacionario, pero a pesar de ello, es necesario resaltar la conexión que existe de esta información con las tendencias (o evidencias de estas) en distintas partes del mundo. En esta breve sección se busca presentar distintos trabajos que han llevado a cabo este tipo de análisis.

2.5.1. Tendencias en Chile

La DGA, por medio de la Universidad de Chile y la Pontificia Universidad Católica de Chile, realizó una actualización del balance hídrico nacional en el año 2017. Parte del trabajo realizado consistió en el análisis de 848 estaciones de precipitación en las distintas macro zonas del país, verificando la existencia de tendencias en los valores medios de precipitación decadal. De esta forma y a modo de ejemplo, en la Figura 2.8 es posible observar el análisis de tendencias realizado en la cuenca del río Loa, en la cual se determinó la existencia de tendencias significativas según el test de Mann-Kendall en 6 de las 16 estaciones estudiadas (círculos en color amarillo), siendo 4 de estas, valores correspondientes a la baja (color café), mientras que las otras 2 al aumento (color verde).

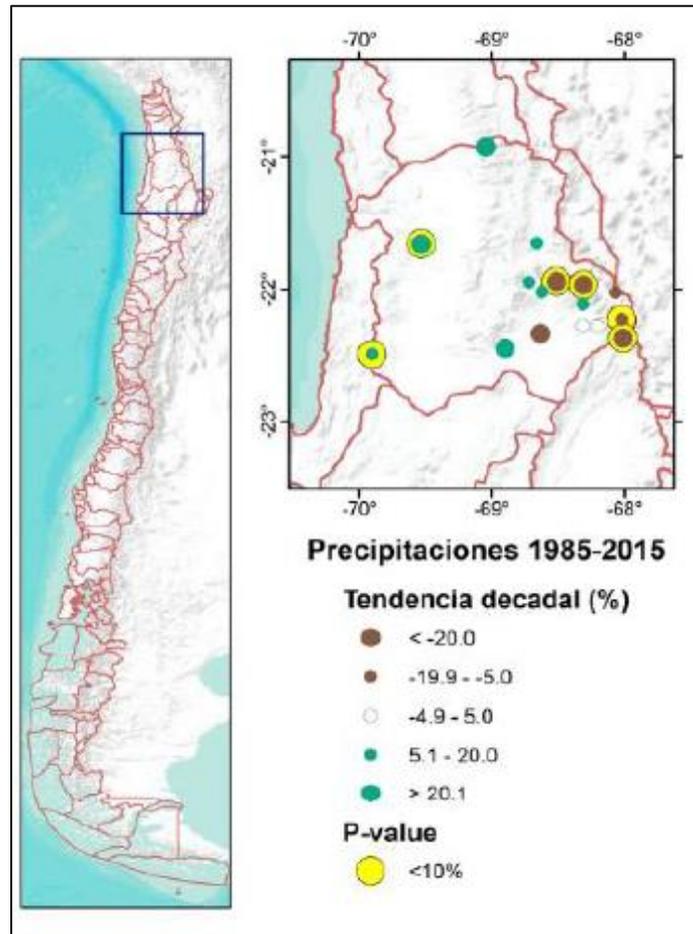


Figura 2.8 Resultados Análisis de Tendencias en valores medios de precipitación decadal en la Cuenca del Río Loa. Fuente: DGA, (2017).

Así mismo y por medio de una regionalización de los resultados, se determinó que en general en las macro zonas Norte y Centro del país existen tendencias a la baja del orden de -12,93 y -4,87% respectivamente en los valores decadales; mientras que en las macrozonas Sur y Austral, existe un incremento de las tendencias del orden de 2,34 y 5,28% respectivamente, siendo esta última no significativa (DGA, 2017).

Sarricolea et al., (2017) analizaron las tendencias en la precipitación en el Norte Grande de Chile, encontrando que el Altiplano es la región donde se aprecia una reducción significativa de la precipitación anual entre 1972 y 2013. La zona de pre cordillera posee tendencias de incremento para Poroma y San Pedro de Atacama; mientras que el desierto costero no muestra tendencias significativas, lo que implica la mantención de las condiciones hiperáridas. Así mismo, Quintana y Aceituno, (2011) concluyeron sobre el centro norte de Chile, que la media de la precipitación anual no ha presentado variaciones significativas en los últimos 50 años. Toledo, (2015) realizó un análisis de tendencias a mediano plazo (20-30 años) para precipitaciones entre los valles del Huasco y Biobío, evidenciando para la zona comprendida entre los valles del Huasco y del Choapa, una disminución en la magnitud de las precipitaciones totales anuales, la cual varía entre un 11% para el valle del Limarí y hasta un 55% en el Valle del Huasco.

Por otra parte, Schulz et al., (2012), detectaron cambios en las precipitaciones para la zona norte de Chile, mostrando una disminución principalmente en la zona costera y una fuerte influencia en años de El Niño implicando aumentos en los eventos extremos. Así mismo, Ricchetti, (2018) incorporó el enfoque no estacionario para estudiar las precipitaciones diarias en Chile central, concluyendo al respecto la existencia de tendencias a la baja para las series de precipitación semestral ($-0,4$ a $-2,7$ mm/año) y para el caso de las precipitaciones extremas, determinó tendencias levemente a la baja ($-0,1$ mm/año) en las medias, con una marcada tendencia al alza en la varianza (hasta $0,2$ mm/año).

2.5.2. Tendencias en el Mundo

A nivel mundial existen una serie de trabajos que documentan las tendencias encontradas en diferentes partes; un ejemplo de esto es lo efectuado por Madsen et al., (2014) quienes revisan los distintos trabajos realizados en Europa sobre análisis de tendencias, encontrando 46 estudios asociados a 22 países de este continente. De estos trabajos la información se resume en el mapa presente en la Figura 2.9, en donde es posible observar los distintos países y variables hidrológicas estudiadas. De la información proporcionada se comenta que en los distintos trabajos existe una tendencia ya sea al aumento o disminución de los estadísticos estudiados, demostrando así la existencia de tendencias a nivel de Europa.

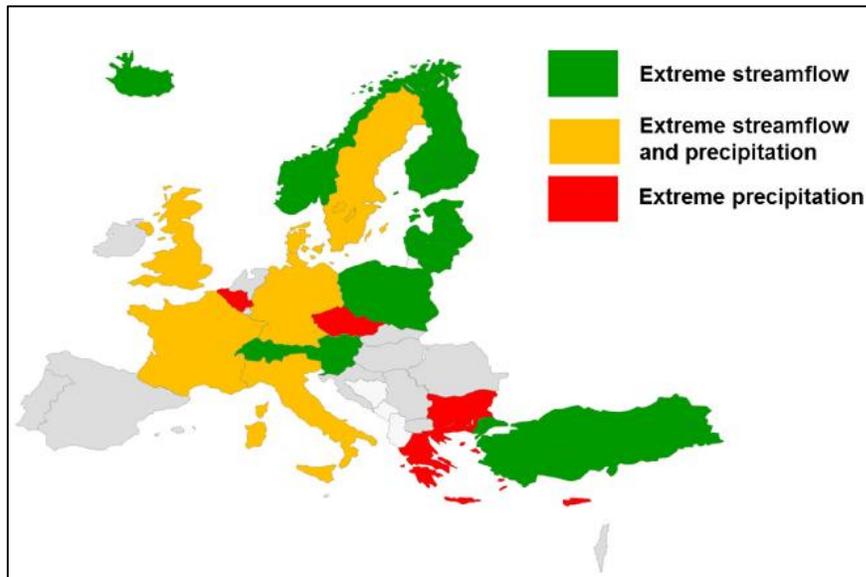


Figura 2.9 Países con análisis de tendencias según estudios revisados de precipitación extrema y caudal.
Fuente: Madsen et al., 2014.

Easterling, (2000) analizó variaciones de precipitación en distintos países, observando cambios en algunos países mayores al 10%, en lo que respecta a precipitaciones extremas; mientras que la precipitación anual presentó menores variaciones y en general a la disminución, resumiendo lo mencionado en la Figura 2.10.

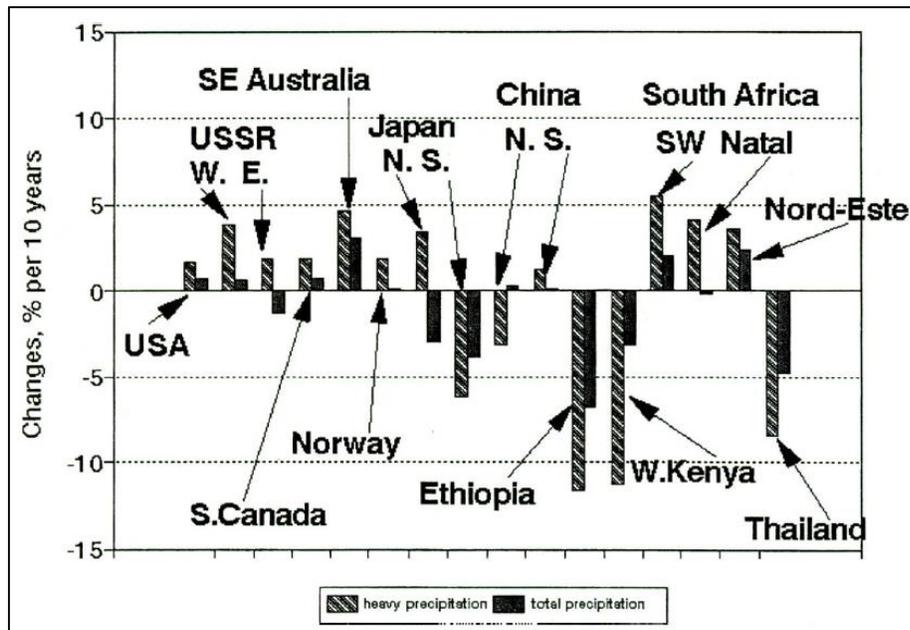


Figura 2.10 Cambios en valores de precipitaciones extremas y totales en distintos países, considerando un análisis de 10 años de información. Fuente: Easterling, 2000.

Por otra parte, Gocic & Trajkovic, (2013) estudiaron distintas variables meteorológicas en Serbia para las distintas estaciones del año, encontrando bajas diferencias en relación a la precipitación (régimen estacionario).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA E INFORMACIÓN

DISPONIBLE

3.1. Metodología.

Según lo planteado en la revisión bibliográfica, las crecidas de diseño para sistemas de relaves corresponden a la CMP o a crecidas asociadas a un determinado periodo de retorno (según sea el tamaño de la obra y la normativa), utilizando relaciones precipitación-escorrentía en la obtención de este valor. En este sentido, la estimación de la precipitación asociada a un determinado periodo de retorno se ha realizado en algunos trabajos considerando un régimen no estacionario, teniendo en cuenta así, las variaciones de los estadísticos en el tiempo y mejorando con ello las predicciones y la precisión de los resultados.

A pesar de esto, la estimación de la PMP, el cual es un método común de diseño en lo que respecta a depósitos de relave, se ha considerado independiente de estas variaciones en los estadísticos, obteniéndose un valor único según el año de diseño (refiriéndose a la estimación basada en el método estadístico de Hershfield). En este sentido, con el fin de incluir estas variaciones de los estadísticos y ver sus influencias en la estimación de caudales de crecidas, se optó por considerar una metodología asociada a la PMP, pero bajo un régimen no estacionario.

3.1.1. Precipitación Máxima Probable No Estacionaria

La estimación de la PMP se realiza por medio del método estadístico de Hershfield o la simplificación de Stowhas, pero dentro de las consideraciones de estos, se encuentra la media y desviación estándar de la muestra (Ver ecuación (2.1)), que como fue visto en la sección no estacionaria, pueden variar en el tiempo. De esta forma, se podría intuir que la estimación de la PMP podría estar sujeta a las variaciones temporales de los estadísticos de la muestra, si es que estos son considerados en el análisis. En línea con lo mencionado anteriormente, se propone estimar la PMP por medio de un análisis no estacionario, haciendo para ello uso de las medias y desviaciones estándar móviles de la muestra (Ver Sección 2.4.5), con lo cual la ecuación de Hershfield sería reescrita según la ecuación (3.1).

$$PMP(t) = \mu'_n(t) + K_m(t) \cdot \sigma'_n(t) \quad (3.1)$$

Obteniendo así una PMP según: el tamaño de la ventana temporal analizada (en la cual los estadísticos son móviles) y la cantidad de intervalos generados por esta ventana. Para ejemplificar lo anterior, suponer una estación meteorológica con "n" años de registro completos –y por ende con "n" valores de la serie anual de máximas precipitaciones diarias. Si se considera una ventana móvil de "k = 3" años² sobre la cual se estima la PMP por medio del método de Hershfield, se obtendrán "n – k + 1" valores de esta última, como se representa en la Figura 3.1.

² Es necesario mencionar que esto es solo una representación esquemática de la metodología, ya que 3 años no es una cantidad de años suficientes para estimar un valor de PMP.

Ventana Móvil de k=3 años												
Año	1	2	3	4	5	n			
PMD	PMD_1		PMD_2		PMD_3		PMD_4		PMD_5		...	PMD_n
Media	μ_1		μ_2		μ_3		μ_{n-k+1}					
Desv. Est.	σ_1		σ_2		σ_3		σ_{n-k+1}					
PMP	PMP_1		PMP_2		PMP_3		PMP_{n-k+1}					

Figura 3.1 Representación de la metodología de estimación de la PMP no estacionaria.

Lo anterior genera que la estimación de la PMP se encuentre sujeta a la variabilidad de los estadísticos de la muestra móvil, y por ende, se estiman diferentes valores de PMP que varían en función de los estadísticos. En este sentido, a diferencia del análisis de frecuencia no estacionario presentado por Salas & Obeysekera, (2014), se obtendrán distintos valores de PMP los cuales dependen del tamaño de la ventana temporal analizada.

En relación a la longitud del registro necesaria para llevar a cabo esta metodología, se recomienda que existan al menos 30 años de información, para poder estimar valores de PMP con al menos 20 años de información, y contar así con al menos 10 valores de PMP para realizar conjeturas en relación a la tendencia que presenta esta estimación. Lo anterior se debe a que una cantidad menor de años no asegura que exista una clara tendencia en los estadísticos, como así mismo, que existan suficientes puntos de información para realizar el análisis.

A continuación, se buscan definir distintos escenarios de diseño en relación a la PMP no estacionaria, los cuales servirán para comparar las metodologías actuales de diseño y estudiar como estos varían en función de cada caso.

3.1.2. Precipitaciones de Diseño según Escenarios.

La estimación de precipitación es algo fundamental al momento de estimar los caudales de crecidas, y la metodología asociada a esta se encuentra sujeta a la actual normativa de los depósitos de relaves, particularmente en relación a la estimación de la Precipitación Máxima Probable (PMP) y a la precipitación asociada a un periodo de retorno de 10.000 años.

En este sentido y para considerar el escenario no estacionario, se encuentran dos situaciones comentadas en los puntos 2.3.3 y 3.1.1, la primera de ellas en relación al análisis de frecuencia no estacionario asociado a periodos de retorno; y la segunda en relación a considerar la PMP de forma no estacionaria. De esta forma y a modo de mostrar las diferencias que existen con las metodologías tradicionales de diseño (PMP y Análisis de Frecuencia Estacionario), se presentan en la Tabla 3.1 los escenarios de cálculo para cada proyecto a estudiar.

Tabla 3.1 Descripción de Escenarios definidos, asociados a la estimación de la precipitación de diseño.

Escenario	Descripción
0	Corresponde a la precipitación de diseño utilizada en el depósito de relaves a estudiar, la cual –según el año de diseño- puede ser la precipitación asociada a un determinado periodo de retorno o la PMP
1	Estimación de la PMP por medio del método Hershfield, considerando toda la información de precipitación disponible al año 2018, siendo una metodología asociada a la extensión del registro de información.
2	Estimación de la PMP de Hershfield considerando el enfoque metodológico del punto 3.1.1. Para esto, se consideran todos los años disponibles de información al 2018 y se estima por medio de ventanas móviles la PMP para cada intervalo, tomando la máxima en el registro de información, como el valor de diseño
3	Corresponde a una extrapolación lineal del ajuste de PMP no estacionarias del Escenario 2 al año 2100, tomándose el valor obtenido a este año como la precipitación de diseño. En caso de no ser posible la extrapolación, se considera el promedio de los valores mencionados como Escenario 3.
4	Este caso corresponde a estimar múltiples valores de PMP, pero por medio de considerar distintos años de diseño, lo cual se puede entender como la variación de la PMP asociada al aumento de la información disponible de precipitación. En este sentido, se estima la PMP con los primeros 20 años de información de la estación meteorológica, y se vuelve a repetir el proceso, pero aumentando en 1 año la información a la vez. Finalmente, el valor máximo de esta serie de resultados corresponderá al escenario 4.
5	Este corresponde a la estimación de la precipitación de diseño considerando un análisis de frecuencia no estacionario asociado al periodo de retorno de 10.000 años (siguiendo la metodología del punto 2.3.3).

Existen diversas formas de estimar la precipitación de diseño, como es el caso de la PMP por medio del método de Hershfield o la simplificación de Stowhas, como así mismo el análisis de frecuencia considera distintas distribuciones de probabilidad que se pueden ajustar a la serie de información. Por lo anterior, se considera en el caso de los depósitos de relaves que posean información, la metodología de diseño adoptada en el proyecto, con el fin de caracterizar solo las diferencias entre los Escenarios definidos, evitando así diferencias según la metodología adoptada.

Con lo antes mencionado, se debe comentar además como serán abordados aquellos depósitos que no posean información de diseño (refiriéndose a los relaves abandonados o inactivos), ya que estos no poseen una precipitación de diseño (correspondiente al Escenario 0). Por esta razón se considerará un valor de diseño estimado en función de lo planteado en los puntos a continuación:

- En primera instancia se revisa el catastro de relaves del SERNAGEOMIN, y en caso de que el depósito posea fecha de resolución de su aprobación, se utiliza esta como año de diseño del depósito.
- En caso contrario, según el estado del depósito (inactivo u abandonado) se adopta el año 2000 para aquellos abandonados y el año 2007 para los inactivos. La elección de estos años resulta de considerar fechas claves en relación a la creación de normativas, pero, dado que no existe información en relación a los depósitos, simplemente corresponde a una elección arbitraria la cual busca representar una fecha de diseño aproximada, ya que no se posee información alguna de estos depósitos.
- En relación a la precipitación de diseño del depósito (Escenario 0) se considera la estimación de la PMP, por medio de la simplificación de Stowhas.

Por otra parte, la estimación de una precipitación de diseño para aquellos casos en que no se posea información, se considera en función de la estación más cercana al depósito, sin realizar correcciones asociadas a la altura o distribución en el espacio. Lo anterior se justifica en función de los distintos proyectos estudiados, en los cuales era este tipo de estaciones las que definían finalmente el diseño.

3.1.3. Estimación de Crecidas sin Información Fluviométrica.

Visto lo anterior e independiente si la metodología es estacionaria o no estacionaria, se deben estimar los caudales máximos en base a la información de precipitaciones, por lo cual es necesario recurrir a métodos indirectos basados en relaciones precipitación-escorrentía para evaluar los caudales de diseño. A continuación se describe en mayor detalle los parámetros y metodologías a utilizar en la estimación de estos valores.

-Duración de la Tormenta de Diseño

Uno de los factores necesarios para determinar la magnitud del caudal de diseño, corresponde a definir la duración de la tormenta, que en este caso se considera igual a 24 horas, dado que con este valor se generan los mayores volúmenes de escorrentía, siendo un factor crítico al momento de diseñar los depósitos de relaves.

-Hietograma de Diseño

La distribución en el tiempo de la lluvia caída durante un temporal, es sin dudas, un factor primordial en la determinación del escurrimiento de respuesta de la cuenca y, en consecuencia, debe ser considerado en la definición de una tormenta (Berrios, 2008). Para determinar esta componente, se considera una distribución de precipitación acorde a lo planteado por Varas, (1985). En este sentido, se consideran distribuciones con una probabilidad del 50% dadas por la Tabla 3.2 y la Figura 3.2, optando por aquel Grupo (en donde se concentra la mayor proporción de la tormenta dentro de la duración total) que generó la situación más desfavorable en relación al caudal de diseño.

Tabla 3.2 Distribuciones de Varas de los distintos grupos asociados a una probabilidad del 50%.

% Tiempo	Grupos [%]			
	Grupo I	Grupo II	Grupo III	Grupo IV
0	0	0	0	0
10	15	9	6	8
20	30	19	14	17
30	41	31	22	25
40	51	44	31	31
50	60	59	42	40
60	69	70	58	50
70	76	79	70	60
80	83	87	83	73
90	92	95	94	88
100	100	100	100	100

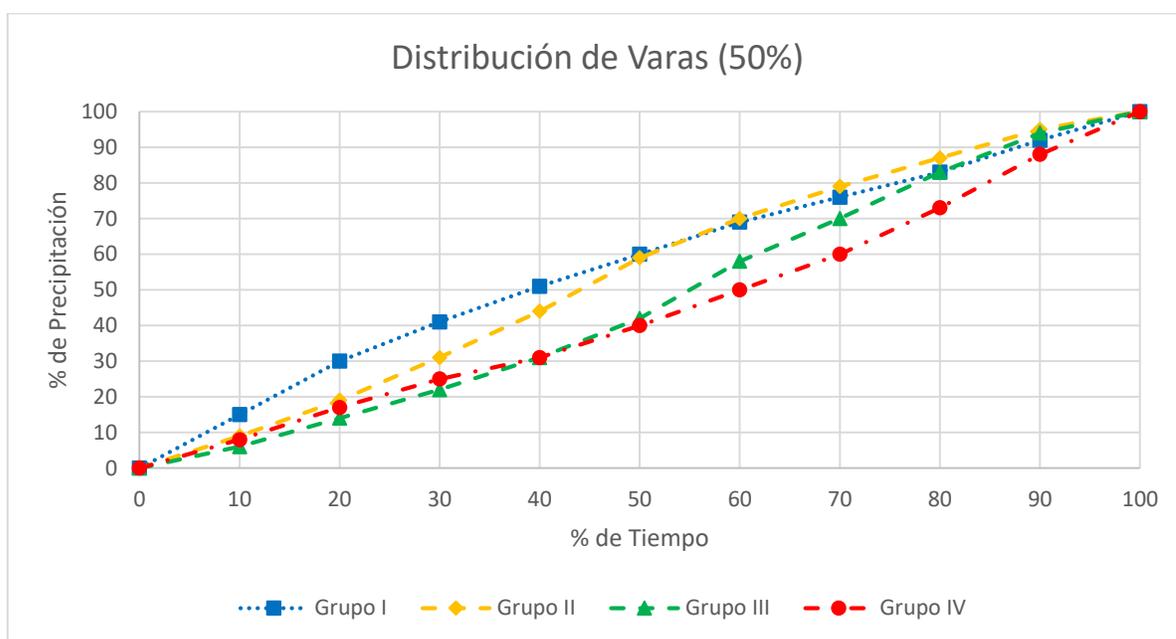


Figura 3.2 Ajuste de Distribuciones de Varas asociadas a una probabilidad del 50%.

-Hietograma de precipitación Efectiva

Al momento de estimar el caudal generado por la precipitación de diseño, es necesario considerar solo aquella parte que se convierte en escorrentía directa (precipitación efectiva). Por esta razón, el método considerado para obtener la precipitación efectiva (P_e), corresponde al del “Soil Conservation Service (SCS) para abstracciones” (Chow, 1994), el cual considera una abstracción inicial (I_a) y una continua (F_a) que disminuye en función del tiempo y la duración de la tormenta. La estimación de estas abstracciones depende del valor de la Curva Número (CN), parámetro adimensional empírico que se calcula con el método desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos SCS, (1972) (Ver Anexo F).

De esta forma, un área con $CN = 0$ no tiene escurrimiento y otra con $CN = 100$ es impermeable y, por ende, toda la precipitación genera escurrimiento (INTA, 2012). A modo general, las ecuaciones (3.2) y (3.3) describen la estimación de las abstracciones inicial y continua a partir de la CN.

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad (3.2)$$

$$F_a = \frac{S(P_p - I_a)}{P_p - I_a + S} \quad (3.3)$$

El valor de " P_p " corresponde a la precipitación acumulada a un intervalo de tiempo dado (obtenida a partir del Hietograma de diseño), mientras que " S " corresponde a la retención potencial máxima, y su estimación se realiza a partir de la ecuación (3.4), en donde es considerado el valor de la Curva Número.

$$S = \frac{25400}{CN} - 25,4 \quad (3.4)$$

De esta forma, la estimación de la precipitación efectiva corresponde a la diferencia entre la precipitación total y las abstracciones, según la ecuación (3.5).

$$P_e = P_p - I_a - F_a \quad (3.5)$$

Finalmente, es necesario mencionar que dependiendo de las condiciones de humedad antecedentes en la zona de estudio, el valor de la CN puede variar según si son secas $CN(I)$ o húmedas $CN(III)$, acorde a las ecuaciones (3.6) y (3.7).

$$CN(I) = \frac{4,2 \cdot CN(II)}{10 - 0,058 \cdot CN(II)} \quad (3.6)$$

$$CN(III) = \frac{23 \cdot CN(II)}{10 + 0,13 \cdot CN(II)} \quad (3.7)$$

El valor de la $CN(II)$ corresponde al estimado según el método del SCS, considerando una situación normal de humedad antecedente.

-Hidrograma Unitario Sintético (HUS)

Dentro de las relaciones precipitación-escurrimiento existentes para estimar hidrogramas de crecidas en cuencas sin control fluviométrico, el Hidrograma Unitario Sintético (HUS) corresponde a uno de los procedimientos más utilizados en el país (MOP, 1995), y que, para este estudio será el adoptado. En este sentido, se considera el HUS tipo Linsley (ajustado por la DGA para las zonas de estudio) dado por su simplicidad y facilidad de aplicación. Este requiere determinar: el tiempo al peak (t_p), el tiempo unitario (t_u), caudal peak (q_p) y el tiempo de duración del hidrograma o tiempo base (t_B); los cuales están sujetos a las características geomorfológicas de la cuenca, y parámetros regionales, siendo descritos según las ecuaciones (3.8) a la (3.11).

$$t_p = C_t \cdot \left(\frac{L \cdot L_g}{A^{0,5}} \right)^{n_t} \quad (3.8)$$

$$t_B = C_B \cdot t_p^{n_B} \quad (3.9)$$

$$q_p = C_p \cdot t_p^{n_p} \quad (3.10)$$

$$t_u = \frac{t_p}{5,5} \quad (3.11)$$

Según el Manual de Cálculo de Crecidas (MOP, 1995) los parámetros regionales se dividen en tres zonas:

- Zona I: Corresponde a la zona comprendida entre la Región de Atacama (III) y la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins (VI).
- Zona II: Región del Maule (VII).
- Zona III: Corresponde a la zona comprendida entre la Región del Biobío (VIII) y la Región del (VI).

Los parámetros mencionados y asociados a los HUS se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Parámetros HUS tipo Linsley ajustados a cada zona.

Parámetro	Zona I	Zona II	Zona III
C_t	0,323	0,584	1,351
n_t	0,422	0,327	0,237
C_p	144,141	522,514	172,775
n_p	-0,796	-1,511	-0,835
C_B	5,377	1,822	5,428
n_B	0,805	1,412	0,717

De esta forma, es necesario mencionar que en el caso de que exista información de diseño de las obras de relaves: se mantendrá la metodología, pero se utilizarán los parámetros o variables consideradas en el proyecto, con el fin de caracterizar las diferencias entre: (1) el caudal de diseño estimado en el estudio y (2) los Escenarios de precipitación considerados; evitando así las diferencias que puedan existir entre parámetros o variables en las relaciones precipitación-escorrentía, como lo podrían ser: valores de curva número, HUS, distribución de Varas a utilizar, etc. En este sentido, la metodología se aplica para todos los depósitos a estudiar en este trabajo.

Para aclarar el entendimiento de lo descrito, en la Figura 3.3 se presenta un cuadro resumen de la metodología general asociada a la estimación de caudales, a través las relaciones precipitación-escorrentía a utilizar en este trabajo.

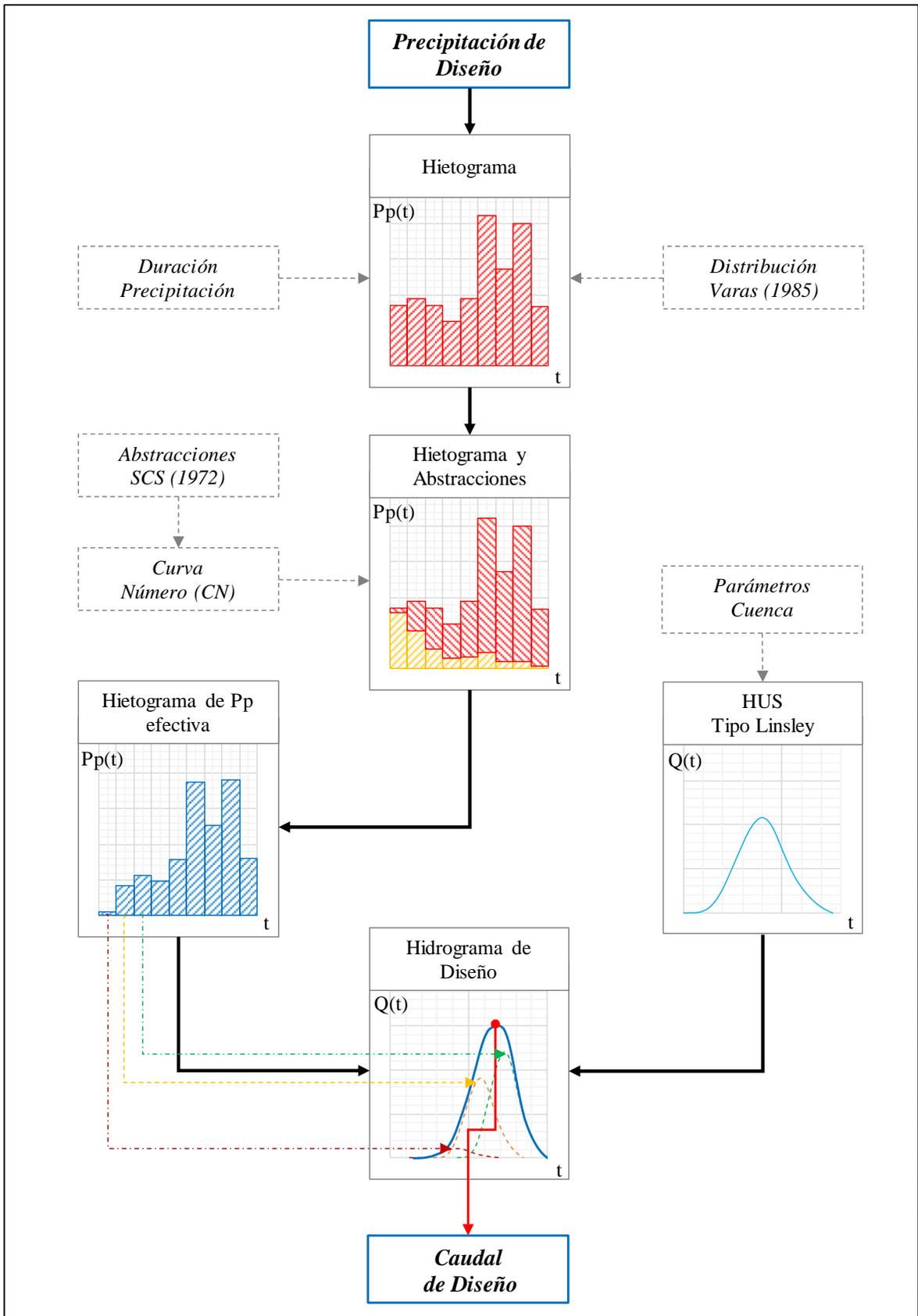


Figura 3.3 Esquema general de la metodología asociada a la estimación de caudales a partir de la precipitación de diseño.

3.2. Información Disponible.

3.2.1. Estaciones Meteorológicas.

En primera instancia es necesario contar con el registro de estaciones meteorológicas a las cuales será realizado el análisis no estacionario, haciendo uso del catastro del *Center of Climate and Resilience Research* (CR2), de donde es posible descargar datos obtenidos de 874 estaciones de precipitación acumulada diaria a nivel de país, entre los años 1900 y 2018. Esta base de datos cuenta con el registro histórico de estaciones de la *Dirección General de Aguas* (DGA) y la *Dirección Meteorológica de Chile* (DMC), las cuales se utilizan como base para identificar zonas que se encuentren bajo un régimen no estacionario (Ver Figura 4.1 (a)). En este sentido, las zonas de estudio corresponden a las macro zonas Norte y Centro, dado que es en estas en donde se ubican principalmente los depósitos de relaves en el país. Según lo anterior, la cantidad de estaciones a lo largo de las regiones consideradas en este trabajo, se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Distribución por regiones de las distintas estaciones meteorológicas del CR2.

Región	N° Estaciones
Arica y Parinacota	44
Tarapacá	38
Antofagasta	56
Atacama	38
Coquimbo	95
Valparaíso	70
Metropolitana	62
O'Higgins	34
Maule	70
Total	507

3.2.2. Depósitos de Relaves.

En relación a los depósitos de relaves, la primera fuente de información revisada corresponde al SERNAGEOMIN, el cual por medio de la oficina de Depósitos de Relaves actualiza y recopila información en relación a los depósitos existentes en el país. El registro está catalogado según: su ubicación, tipo de obra (tranque, embalse, en pasta, espesado o filtrado), estado (activo, inactivo o abandonado), volumen autorizado y fecha de aprobación del depósito. De esta información primero se desprende el tipo de obra, el cual permite conocer aquellos depósitos que no deban ser analizados según el DS°248 (como fue mencionado en el punto 2.2.1).

Por otra parte, en relación a los estados de los depósitos: los activos corresponden a aquellos que se encuentran operando, y por ende, recibiendo relaves; los inactivos son aquellos que no se encuentran operando (paralizados) pero aún no se realiza el cierre de estos; y finalmente los abandonados, son aquellos que se encuentran inactivos, pero sin información alguna respecto a las características de estos (según el SERNAGEOMIN).

Es importante la diferencia entre estos tres, ya que los activos cuentan con información en relación al diseño o al menos se conoce la empresa dueña y la fecha de aprobación del proyecto; pero no así los abandonados y (en ciertos casos) los inactivos, siendo parte fundamental al momento de ver las diferencias que puedan existir entre los diseños y metodologías utilizadas, además de permitir definir finalmente el año de diseño con el cual contrastar los resultados obtenidos. En la Figura 3.4 se presenta la distribución espacial de los depósitos de relaves en el país, mientras que en la Tabla 3.5 se resume la distribución por región de los depósitos según el estado.

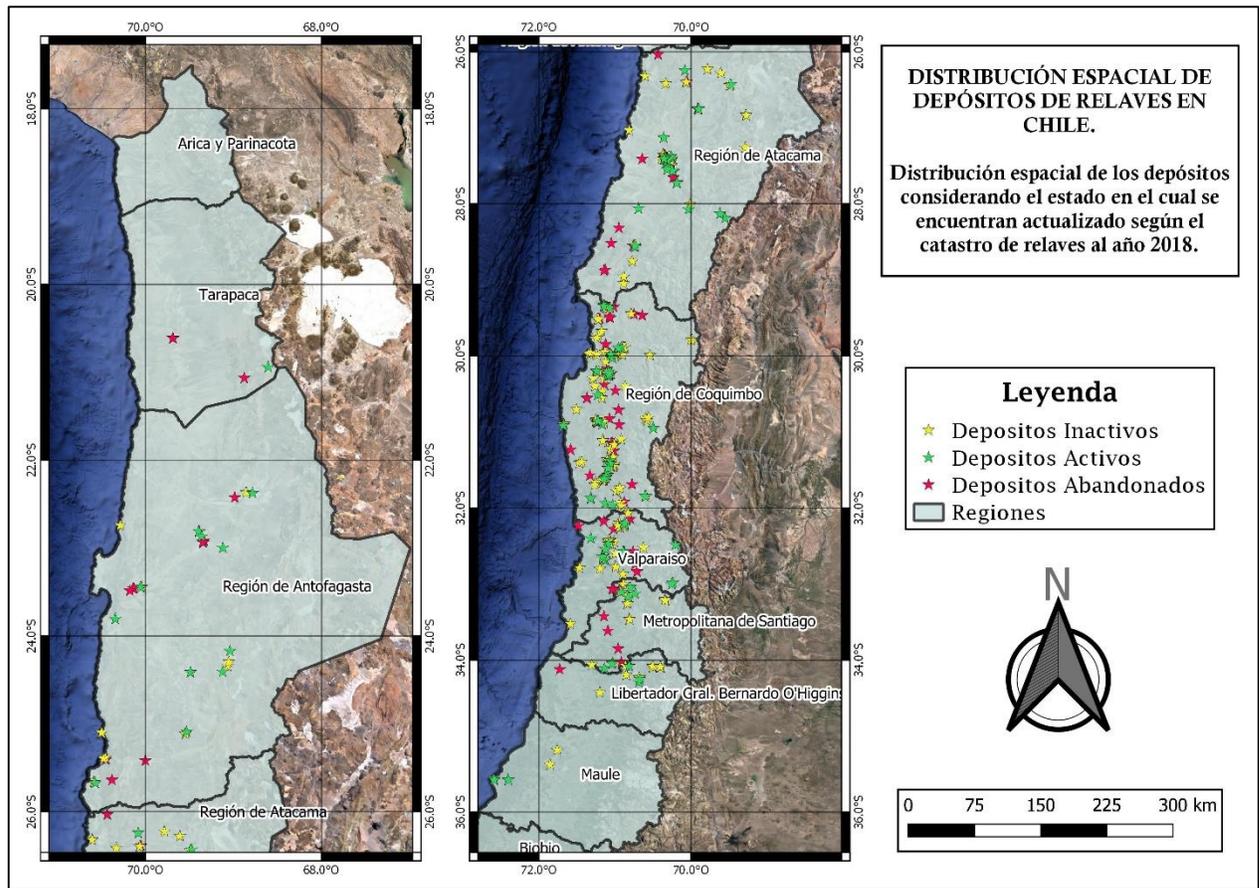


Figura 3.4 Distribución Espacial de depósitos según el estado: Activo, Inactivo o Abandonado en las macro zonas Norte y Centro del país.

Tabla 3.5 Distribución por región de los depósitos de relaves según el estado en que se encuentran.

Región	Activos	Inactivos	Abandonados	Total Región
Tarapacá	1	0	6	7
Antofagasta	13	22	16	51
Atacama	30	106	23	161
Coquimbo	32	247	106	385
RM	6	14	6	26
Valparaíso	14	53	11	78
O'Higgins	3	15	1	19
Maule	4	2	-	6
Total por Estado	103	459	169	733

Otra fuente de información disponible corresponde al Sistema de Evaluación Ambiental (SEA), en el cual es posible encontrar los distintos proyectos y sus características, dentro de las cuales se encuentra el diseño hidrológico utilizado. Lo anterior dado por medio de los Permisos Ambientales Sectoriales, en particular el 155, que es “*para la construcción de ciertas obras hidráulicas*”, el cual utiliza como base lo dispuesto en el DS 50 del MOP en relación a los depósitos de relaves. Esta información complementa lo mencionado anteriormente, ya que permite obtener los diseños en relación a los depósitos activos³. Finalmente, si bien la DGA es la institución encargada de la revisión de antecedentes hidrológicos, en su portal no cuenta con los informes y solo es posible encontrar algunos proyectos antiguos y desarrollados por esta misma.

³ Para años anteriores al Decreto, en el SEA se pueden encontrar los informes, pero estos no siempre están disponibles.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE TENDENCIAS Y PRECIPITACIONES DE DISEÑO

4.1. Análisis de Tendencias Estaciones Meteorológicas.

Con el objetivo de determinar posibles tendencias en las series de máximas precipitaciones diarias en las macro zonas Norte y Centro del país, en la sección presente se buscan aplicar distintos análisis de tendencias. A pesar de esto, no es posible analizar todas las estaciones meteorológicas existentes en estas zonas, debido a que no todas poseen suficiente información o son relevantes en términos de la estimación de crecidas en depósitos de relaves. Por ello, antes de realizar los distintos análisis de tendencias, es necesario reducir el número de estaciones meteorológicas a analizar, según aquellas que puedan ser consideradas en el presente estudio. Para ello, haciendo uso del catastro de relaves del *Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN)*, es posible reducir el número de estaciones existentes en el CR2 (Ver sección 3.2.1) considerando solo aquellas estaciones que se encuentren en las macro zonas Norte y Centro y/o se encuentren a una distancia menor de 30 [km] de un depósito (Filtro N°1). De esta forma, se reduce de 874 a 284 estaciones como se puede apreciar en la Figura 4.1 (b).

Respecto a la elección de estaciones con una distancia menor a 30 [km], esta se justifica ya que los proyectos en general utilizan la estación más cercana a la obra. Así mismo, a esta distancia es posible contar con al menos una estación para cada uno de los depósitos de relaves (sin importar el largo del registro de información), evitando también el estudio de estaciones con poca relevancia, vale decir, de aquellas estaciones que se encuentren lo suficientemente alejadas de los depósitos.

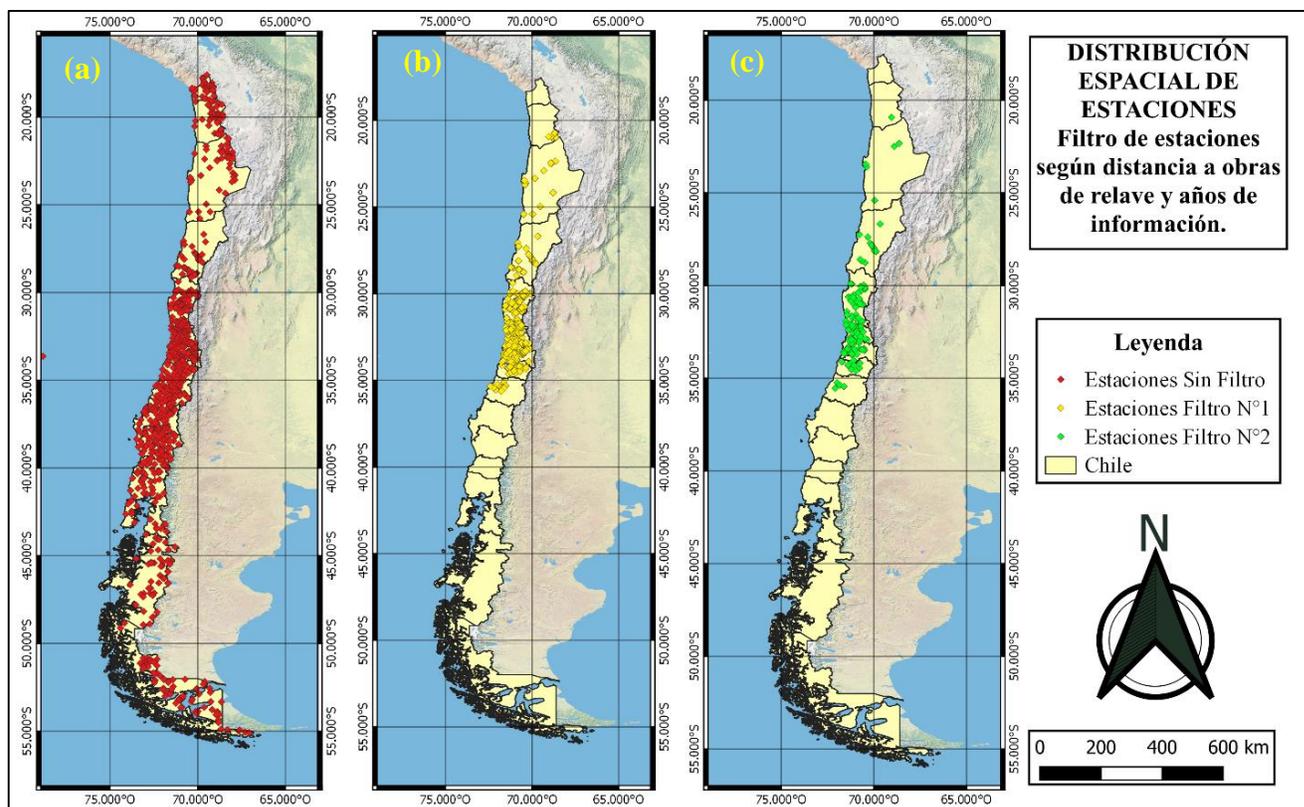


Figura 4.1 Mapa con Estaciones según distintos filtros. (a) (izquierda) estaciones sin filtrar; (b) (centro) estaciones filtradas por cercanía a relaves; (c) (derecha) estaciones filtradas según longitud de información mayor a 30 años.

Por otra parte, se disminuye el número de estaciones a analizar (Filtro N°2) según el largo del registro que estas posean, dejando solo aquellas con 30 o más años que posean información ininterrumpida. Respecto a esto último, se consideraron sin interrupciones de información aquellas estaciones que poseen a lo más un año sin información dentro del registro, con lo cual el número de estaciones posibles a revisar son 118, las que se presentan en la Figura 4.1 (c), y por región en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Distribución de estaciones filtradas a analizar por región.

Región	N° Estaciones
Tarapacá	1
Antofagasta	4
Atacama	11
Coquimbo	44
Valparaíso	30
Metropolitana	16
O'Higgins	8
Maule	4
Total	118

En base a las estaciones filtradas, corresponde realizar los distintos análisis de tendencia mencionados en el capítulo 2 de este trabajo. En relación a esta, si bien primero corresponde rellenar la información de las estaciones para realizar un correcto análisis de tendencias, esto se desestimó según lo presentado a continuación:

- Las estaciones a analizar poseen un registro con falta de datos menor a 365 datos (según el criterio mencionado en la sección anterior), motivo por el cual, si es que se comprobase una tendencia en los datos, es sensato considerar una baja probabilidad de que los datos a rellenar generen un cambio importante en la tendencia o en los datos.
- Si bien los datos faltantes pueden afectar principalmente la detección de tendencias positivas (ya que estos suelen ser los más antiguos en las series de información), se considera que no debiesen existir diferencias importantes en la estimación de tendencias, ya que la cantidad de datos faltantes está limitada a 365 datos, lo cual reduce el número de cambios que se pueda generar en la serie después del relleno de datos, como así mismo, el efecto que se pueda generar en el ajuste de tendencias.
- Decididas las estaciones a analizar, se realiza el relleno de datos y con este se vuelven a realizar los análisis de tendencias, verificando si existen variaciones en los resultados. De esta forma, sin importar el resultado obtenido en esta etapa, este se corregiría después.

De esta forma aplicando los Test de Mann-Kendall y Pendiente de Sen a los intervalos móviles de 20 años en los estadísticos, se obtuvieron a modo de ejemplo los resultados de la Tabla 4.2, presentando los análisis de tendencias sobre las medias móviles. La explicación y valores obtenidos de todas las estaciones y los test realizados es posible encontrarlos en el Anexo A.

Tabla 4.2 Ejemplo de los resultados de análisis Tendencias sobre medias móviles de 20 años.

Estación	Mann-Kendall		Ajuste de Sen		¿Tendencia μ ?
	τ_{μ}	p_{value}	m_{sen} [mm/año]	$IC_{95\%}$ [mm/año]	
Chacrilla	-0,30	13,8%	-0,11	[-0,37 ; 0,05]	Estacionario
Chalaco	0,68	0,0%	0,22	[0,17 ; 0,26]	Positiva
Chiu-Chiu	-0,30	4,7%	-0,04	[-0,07 ; 0,00]	Negativa

La cantidad de estaciones que presentan un régimen estacionario y no-estacionario (tendencias positivas y negativas) se presentan en la Tabla 4.3.

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.

Región	N° Estaciones	Tendencia sobre la Media μ			Tendencia sobre la σ		
		Estacionario	Negativa	Positiva	Estacionario	Negativa	Positiva
Tarapacá	1	-	-	1	-	-	1
Antofagasta	4	1	2	1	2	2	-
Atacama	11	6	4	1	3	5	3
Coquimbo	44	16	17	11	14	19	11
Valparaíso	30	11	10	9	8	13	9
Metropolitana	16	7	5	4	2	2	4
O'Higgins	8	2	2	4	1	3	
Maule	4	1	2	1	7	4	5
Total	118	44	42	32	37	48	33

Por otra parte, para esclarecer la distribución de tendencias (o estaciones con régimen no estacionario) en las macro zonas Norte y Centro, se puede observar la Figura 4.2, en donde en cada uno de los mapas se presenta la distribución de aquellas estaciones que poseen tendencia significativa, como aquellas que no, tanto para la media en la Figura 4.2(a) y la desviación estándar Figura 4.2(b).

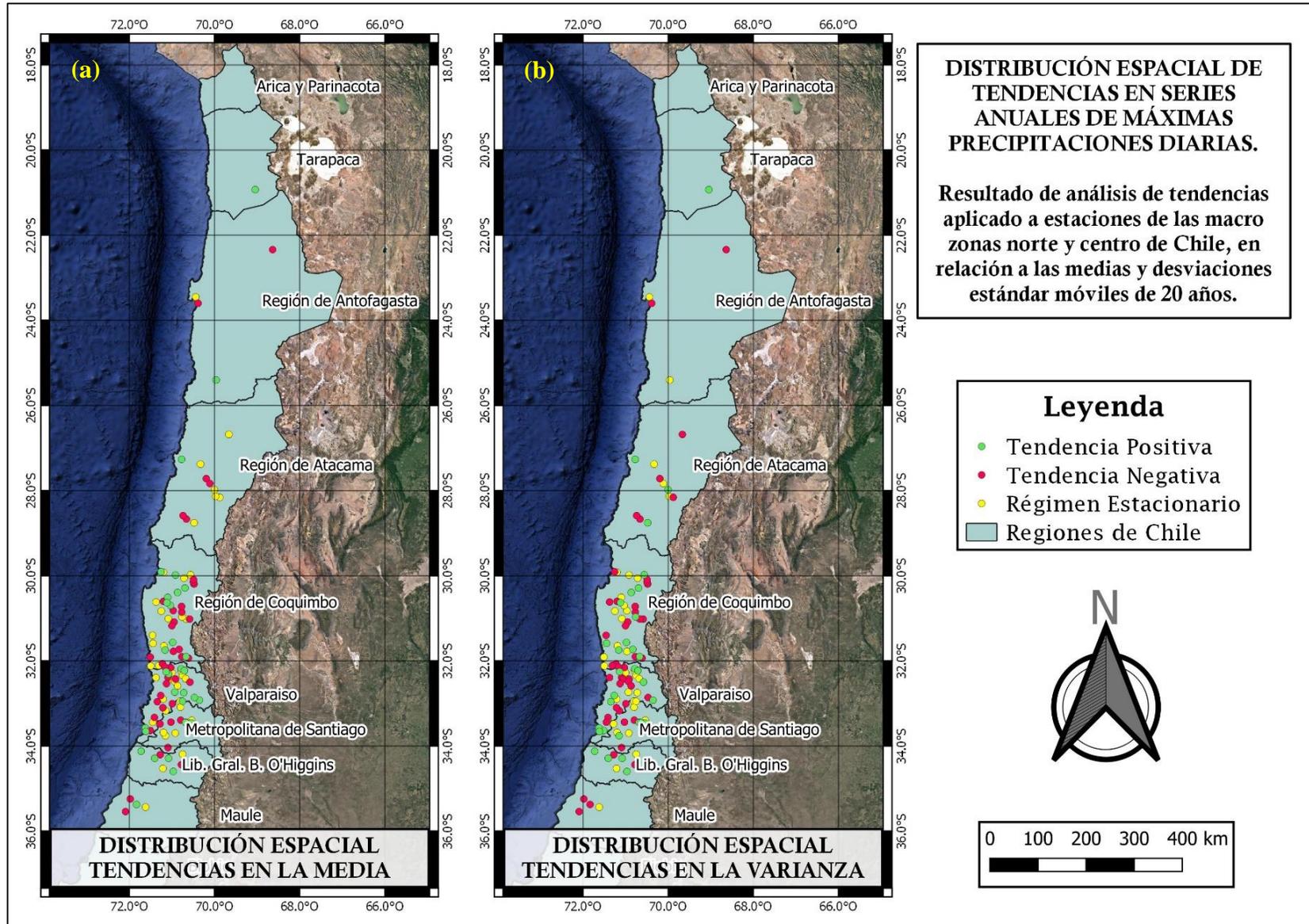


Figura 4.2 Distribución Espacial de tendencias significativas en series anuales de máximas precipitaciones diarias para un intervalo móvil de 20 años. (a) Tendencias en media de la serie; (b) Tendencias en desviación estándar de la serie.

4.2. Selección de Depósitos de Relaves

Según el análisis de tendencia realizado a las distintas estaciones consideradas y la ubicación de los depósitos de relaves presentados en la Sección 3.2.2, es posible seleccionar las obras de relaves a estudiar en este trabajo, para lo cual se consideró una superposición espacial entre aquellas estaciones que presentaron una tendencia al alza y las obras de relaves cercanas a estas. En este sentido, en función de las estaciones cercanas, la inspección visual de los depósitos y la revisión de los informes encontrados en el SEA; se optó por los presentes en la Tabla 4.4, cuya distribución espacial se puede encontrar en la Figura 4.3 (a).

Tabla 4.4 Características de los Depósitos de relaves seleccionados.

Nombre del Depósito	Tipo	Estado	Faena	Ubicación ⁴		
				Región	UTM Este	UTM Norte
Amolanas	Tranque	Inactivo	Amolanas	Atacama	6901628	400230
El Gato	Tranque	Activo	Kozán	Atacama	6971182	374840
Humo Corral	Tranque	Activo	San Gerónimo	Coquimbo	6691324	311072
El Torito	Tranque	Activo	El Soldado	Valparaíso	6386597	297088

Respecto a la elección de los depósitos, esta se basa en distintos criterios:

- Debido a que existen distintos depósitos de relaves según el estado de estos: Activo, Inactivo o Abandonado; se busca representar al menos uno de cada uno, considerando aquellos activos que cuenten con información de proyecto.
- La elección de los depósitos se realiza considerando la mayor cantidad de regiones, con el fin de representar las zonas definidas al inicio de este trabajo.
- En el caso de depósitos inactivos o abandonados, se considera aquellos que sean posibles apreciarlos desde imágenes satelitales.

4.3. Descripción de las Zonas de Estudio.

A continuación, se presentan las zonas de estudio donde se emplazan los distintos proyectos a analizar, con el objetivo de dar a conocer sus características principalmente en lo que respecta a la geomorfología de las cuencas aportantes, ubicación y régimen de precipitaciones. En este sentido las características y descripción de los depósitos se realiza dependiendo del estado de los depósitos:

- En el caso de los tranques (o embalses) activos, se consideran las características geomorfológicas de la cuenca aportante y la descripción del proyecto desarrolladas por el mandante del proyecto.
- En el caso de los relaves abandonados o inactivos, dado que no existe información del proyecto, se realiza una breve descripción del lugar de estudio y las características geomorfológicas en función de la información necesaria para la estimación de los caudales de diseño. Las características geomorfológicas de las cuencas son estimadas de imágenes satelitales, a partir de *Digital Elevation Models* (DEM), del producto SRTM.

En la Figura 4.3 se presenta la ubicación de los depósitos a estudiar junto a los poblados más cercanos a cada uno de estos.

⁴ Las coordenadas UTM pertenecen al Huso 19 Sur, Datum WGS84.

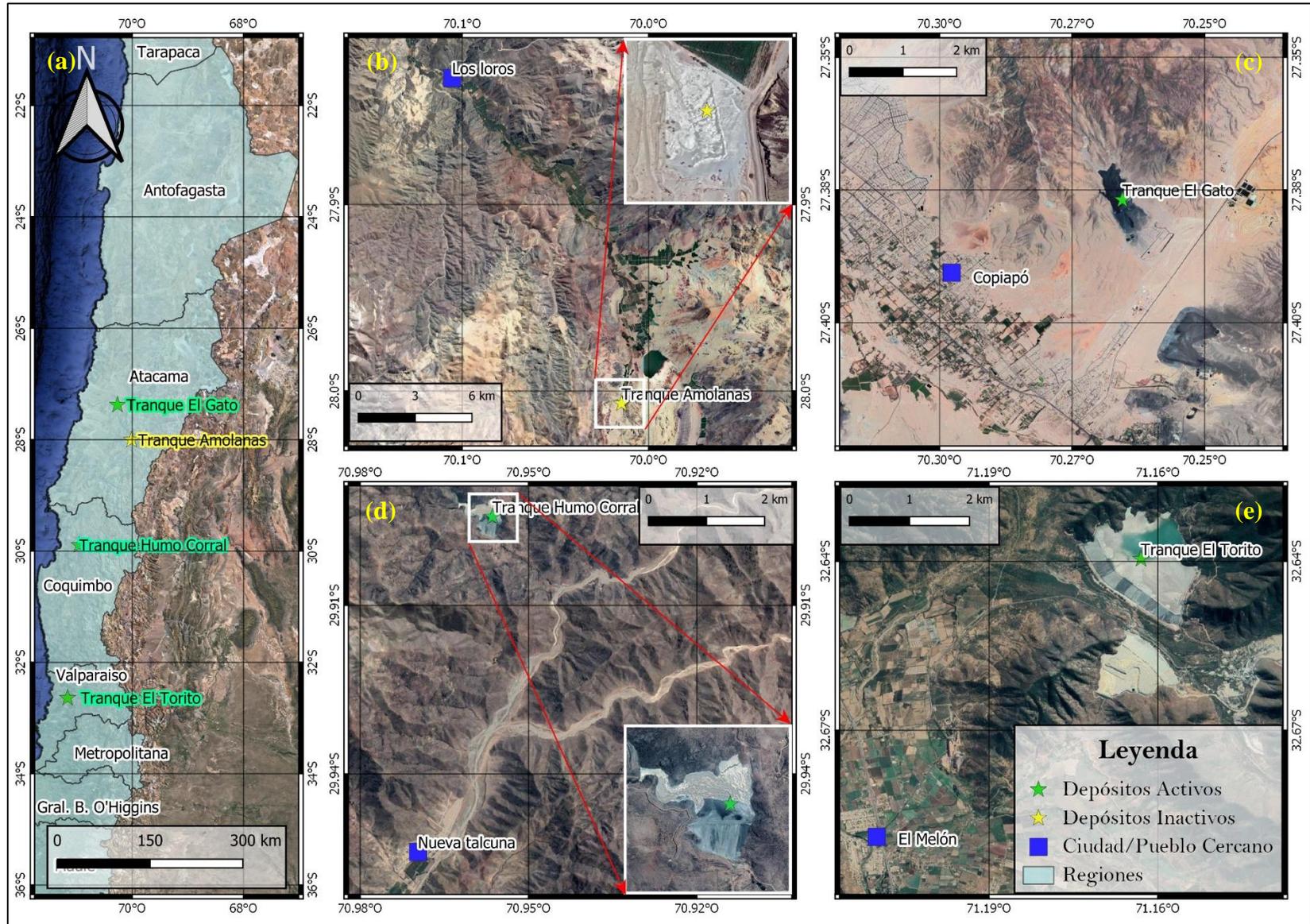


Figura 4.3 En la Figura (a) Distribución espacial a nivel de país de los depósitos de relaves a estudiar. En las demás Figuras la ubicación específica de cada depósito junto a los poblados más cercanos a cada uno: (b) Tranque Amolanas; (c) Tranque El Gato; (d) Tranque Humo Corral; (e) Tranque El Torito.

4.3.1. Descripción: Tranque de Relaves Amolanas.

Corresponde a un depósito inactivo perteneciente a la empresa de siglas “P.L. Servicios Ltda.” (se desconoce el nombre completo) y recibía los relaves producidos de la planta Amolanas. Según la información disponible del SERNAGEOMIN, posee un volumen de 184.415 [m³] y no se cuenta con información de la resolución o fecha de aprobación del proyecto. Sus coordenadas son 70,014°O-28,006°S, ubicado así en la Región de Atacama, Provincia de Copiapó, Comuna de Tierra Amarilla, al sur del Tranque Lautaro y a 21,3 [km] del poblado más cercano correspondiente al de “Los Loros” (Ver Figura 4.3 (b)).

Se encuentra dentro de la Cuenca del Río Copiapó, particularmente en donde nace la Sub-Cuenca del Río Copiapó Medio; con un clima cuyas principales características corresponden a altas temperaturas durante el día y ausencia de nubosidad (DGA, 2004). La cuenca aportante al proyecto y las estaciones cercanas se pueden observar en la Figura 4.4, mientras que las características de estas últimas se presentan en la Tabla 4.5.

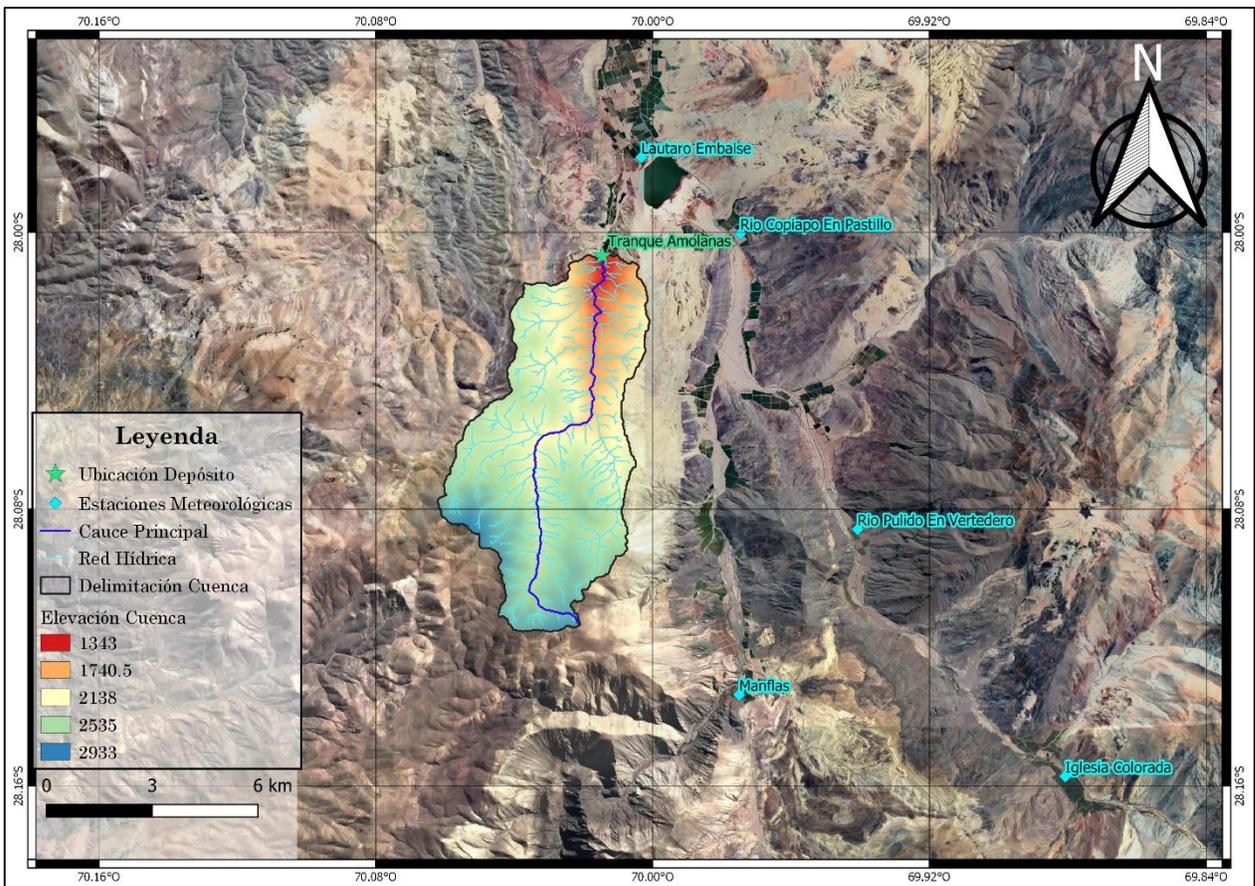


Figura 4.4 Distribución espacial de estaciones meteorológicas cercanas y Cuenca aportante al Tranque Amolanas.

Tabla 4.5 Descripción de estaciones cercanas al Tranque de Relaves Amolanas.

Código BNA	Nombre Estación	Longitud [°]	Latitud [°]	Altitud [m.s.n.m]	Fecha de Inicio	Fecha de Fin
03414002-2	Iglesia Colorada	-69,880	-28,157	1.550	jun-1988	Vigente
03430006-2	Lautaro Embalse	-70,003	-27,978	1.110	may-1930	Vigente
03421004-7	Manflas	-69,975	-28,133	1.410	jul-1966	Vigente
03430003-8	Rio Copiapó En Pastillo	-69,974	-28,000	1.300	abr-2013	Vigente
03414001-4	Rio Pulido En Vertedero	-69,940	-28,085	1.310	feb-2016	Vigente

En relación a las precipitaciones en la zona y considerando como base la Estación “Embalse Lautaro” de la DGA, estas se distribuyen principalmente durante los meses de Mayo a Agosto con una media de precipitación anual de 42 [mm] entre los años 1979-2018. Las características geomorfológicas de la cuenca asociada al tranque de relaves, se presentan en la Tabla 4.6, mientras que su curva hipsométrica en la Figura 4.5.

Tabla 4.6 Características Geomorfológicas de la cuenca aportante al Tranque Amolanas.

Descripción	Unidad	Valor
Área cuenca	[km ²]	44,32
Pendiente Media Cuenca	[m/m]	0,40
Largo Cauce Principal	[km]	15,60
Largo Cauce Principal Al Centro de Gravedad	[km]	8,60
Elevación Mínima de la Cuenca	[m. s. n. m]	1.344
Elevación Máxima de la Cuenca	[m. s. n. m]	2.933
Elevación Media de la Cuenca	[m. s. n. m]	1.900
Pendiente Media Cauce	[m/m]	0,102

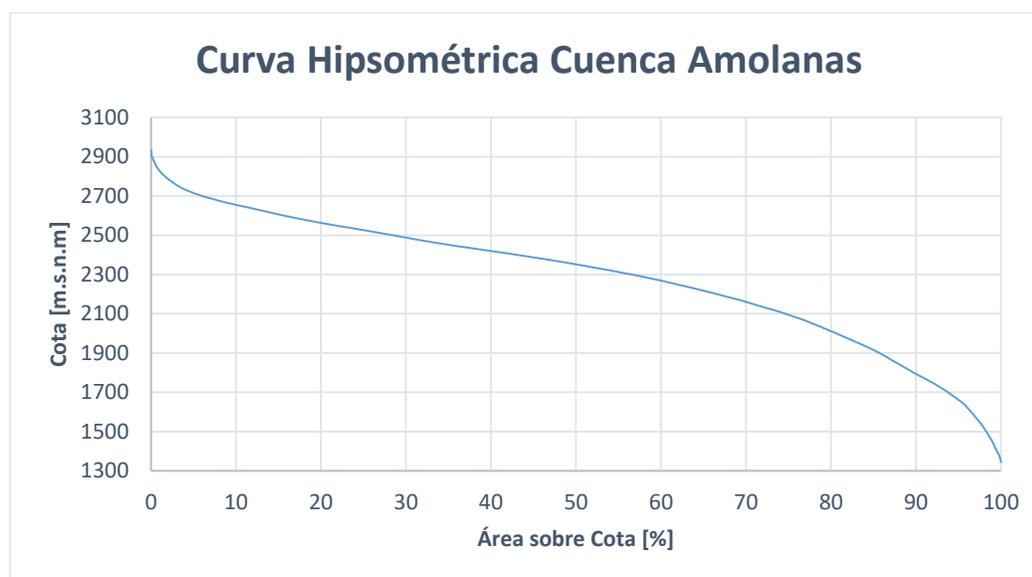


Figura 4.5 Curva Hipsométrica de la Cuenca Aportante al Proyecto. Tranque Amolanas..

4.3.2. Descripción: Tranque de Relaves El Gato.⁵

El tranque El Gato, corresponde a un depósito activo perteneciente a la empresa “Compañía Contractual Minera Atacama Kozán”, cuyo informe técnico de hidrología fue desarrollado en el año 2016 por “JO ingeniería” (JO, 2016). Este depósito surge como una ampliación del (en ese entonces) actual depósito de relaves ubicado en la quebrada El Gato para así aumentar la capacidad de la planta concentradora. Sus coordenadas son 70,265°O-27,376°S, ubicado en el sector bajo de la Quebrada El Gato, en la comuna de Copiapó, Región de Atacama; al Norte de la Intersección de la Quebrada Paipote en la ciudad de Copiapó, y unos 15 [kms] al Norte de la Planta Atacama Kozán de la cual recibe relaves (Ver Figura 4.3 (c)).

Así mismo, se ubica dentro de la Cuenca del Río Copiapó, particularmente en donde termina la Sub-Cuenca del Río Paipote; con un clima desértico marginal bajo, cuyas principales características corresponden a un clima desértico de menor significado, con la existencia de precipitaciones durante el periodo de invierno (DGA, 2004). Las cuencas aportantes al proyecto se pueden observar en la Figura 4.6; mientras que las características de las estaciones –utilizadas en el proyecto- se presentan en la Tabla 4.7.

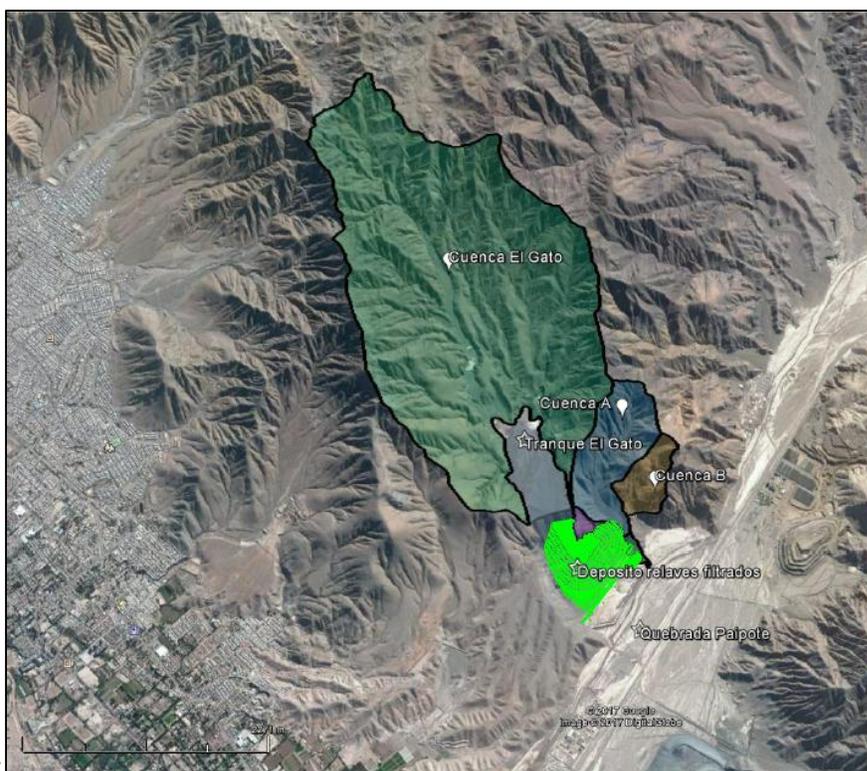


Figura 4.6 Cuencas Aportantes (Cuenca El Gato, Cuenca A y Cuenca B) al Nuevo depósito de Relaves de Minera Kozán (en color verde claro). Tranque El Gato. Fuente: Informe Hidrológico de Sitio, JO Ingeniería (2016).

⁵ En relación a los detalles y características asociadas a la descripción de este depósito, se utilizó como base el informe hidrológico desarrollado por JO Consultores, para la empresa minera Kozán.

Tabla 4.7 Descripción de Estaciones Cercanas al Tranque de Relaves El Gato⁶

Código BNA	Nombre Estación	Longitud [°]	Latitud [°]	Altitud [m.s.n.m]	Fecha de Inicio	Fecha de Fin
03450004-5	Copiapó	-70,330	-27,377	385	ene-1971	Vigente
03404002-8	Jorquera En La Guardia	-69,755	-27,836	2.000	oct-1966	Vigente
03430006-2	Lautaro Embalse	-70,003	-27,978	1.110	may-1930	Vigente
03441001-1	Pastos Grandes	-69,564	-27,114	2.260	ago-1966	Vigente

En relación a las precipitaciones en la zona y considerando como base la Estación “Copiapó” de la DGA, estas se distribuyen principalmente durante los meses de Junio a Agosto con un promedio anual de 20 [mm] entre los años 1980-2018. Por otra parte, como es posible observar de la Figura 4.6, el área aportante al depósito se encuentra compuesta por tres sub-cuencas cuyas características geomorfológicas se presentan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Características Geomorfológicas de las cuencas aportantes al Tranque El Gato

Descripción	Unidad	Cuenca A	Cuenca B	Quebrada El Gato
Área cuenca	[km ²]	0,6	0,2	7,05
Pendiente Media Cuenca	[m/m]	0,158	0,229	0,09
Largo Cauce Principal	[km]	1,36	0,79	4,5
Largo Cauce Principal Al Centro de Gravedad	[km]	0,95	0,55	2,0
Elevación Mínima de la Cuenca	[m. s. n. m]	518	528	540
Elevación Máxima de la Cuenca	[m. s. n. m]	745	762	1.014
Elevación Media de la Cuenca	[m. s. n. m]	602	587	770

⁶ En este caso en particular, se consideraron las estaciones cercanas utilizadas en el diseño del proyecto.

4.3.3. Descripción: Tranque de Relaves Humo Corral.

El tranque de Relaves Humo Corral, corresponde a un depósito activo perteneciente a la empresa “Cía. Minera San Gerónimo”; el cual surge con el objeto de albergar los relaves provenientes de la Planta Talcuna debido a la expansión de esta; puesto que el anterior depósito (Socorro N°6) cumplía su vida útil. Sus coordenadas son 70,956°O-29,894°S, encontrándose en la Región de Coquimbo, Provincia del Elqui, Comuna de Vicuña, a 9,8 [km] en dirección sur-poniente de la Faena Talcuna y con el poblado más cercano correspondiente al de “Nueva Talcuna” y “Marquesa”, aproximadamente 6,5 [km] al Sur del depósito (Ver Figura 4.3 (d)).

Se ubica dentro de la Cuenca del Río Elqui, particularmente en la Sub-Cuenca del Río Elqui Medio; las características principales del clima en la zona de emplazamiento según el Estudio de Impacto Ambiental presentado por la Compañía Minera San Gerónimo son: cielos predominantemente despejados, baja humedad relativa, temperaturas elevadas durante el día, aunque en las noches las temperaturas descienden bastante, con una amplitud térmica diaria del orden de 18-20° C. En relación a las precipitaciones, las medias anuales varían entre 75 y 100 [mm], las cuales se distribuyen principalmente entre los meses de abril a septiembre. La cuenca aportante al proyecto se puede observar en la Figura 4.7; mientras que las características de las estaciones utilizadas en el proyecto se presentan en la Tabla 4.9.

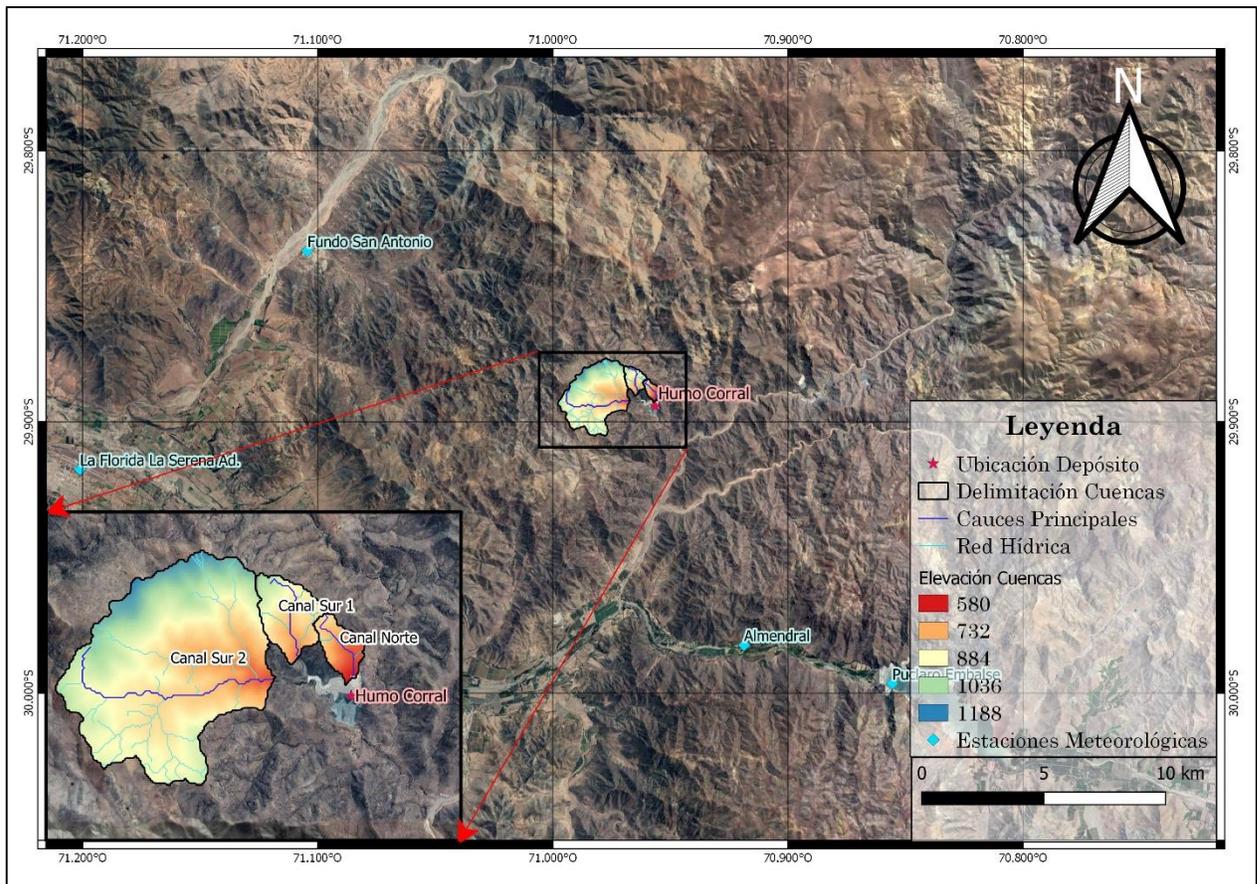


Figura 4.7 Distribución Espacial de estaciones meteorológicas cercanas al Proyecto y Cuenca aportante al Tranque Humo Corral.

Tabla 4.9 Descripción de Estaciones Cercanas al Tranque de Relaves Humo Corral.

Código BNA	Nombre Estación	Longitud [°]	Latitud [°]	Altitud [m.s.n.m]	Fecha de Inicio	Fecha de Fin
04323007-7	Almendral	-70,918	-29,982	370	sept-1958	Vigente
04334001-8	Fundo San Antonio	-71,104	-29,836	260	nov-1961	Vigente
290004	La Florida La Serena Ad.	-71,201	-29,917	142	ene-1950	Vigente
04335002-1	La Serena (Esc. Agrícola)	-71,255	-29,906	15	ene-1971	Vigente
04321001-7	Puclaro Embalse	-70,855	-29,996	460	ago-1962	may-2010

En relación al área aportante al depósito, y como es posible observar de la Figura 4.7, esta se encuentra compuesta por tres sub-cuencas cuyas características geomorfológicas se presentan en la Tabla 4.10, mientras que las respectivas curvas hipsométricas en la Figura 4.8.

Tabla 4.10 Características Geomorfológicas de las cuencas aportantes al Tranque Humo Corral.

Descripción	Unidad	Canal Norte	Canal Sur 1	Canal Sur 2
Área cuenca	[km ²]	0,36	0,72	5,94
Pendiente Media Cuenca	[m/m]	0,319	0,349	0,330
Largo Cauce Principal	[km]	1,18	1,40	3,61
Largo Cauce Principal Al Centro de Gravedad	[km]	0,53	0,65	1,89
Elevación Mínima de la Cuenca	[m. s. n. m]	578	673	638
Elevación Máxima de la Cuenca	[m. s. n. m]	842	1.066	1.188
Elevación Media de la Cuenca	[m. s. n. m]	701	834	887
Pendiente Media Cauce	[m/m]	0,224	0,281	0,152

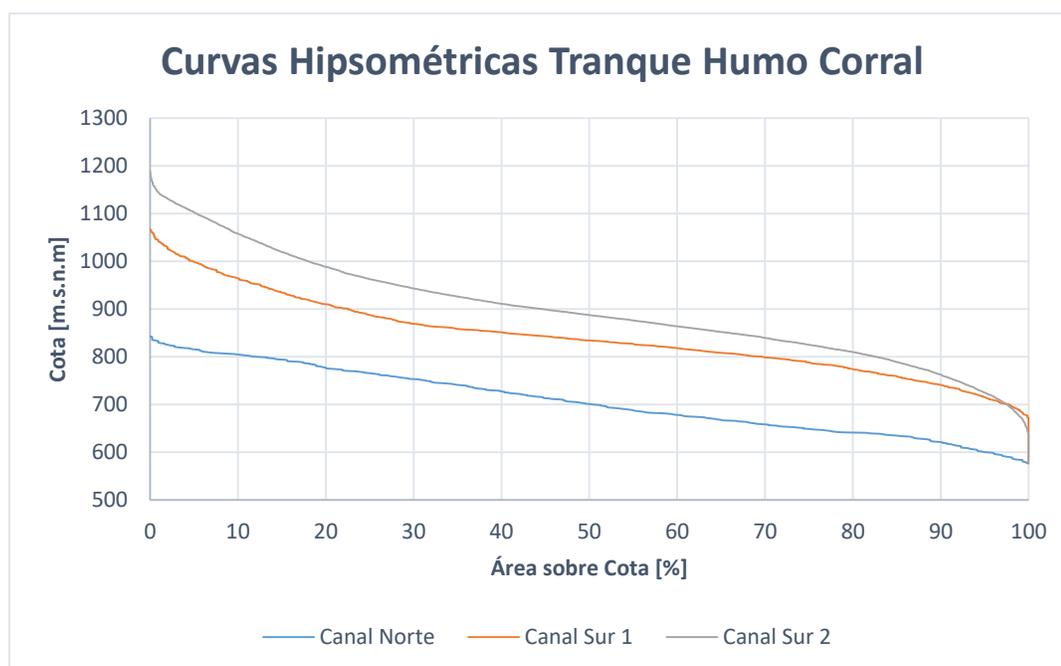


Figura 4.8 Curvas Hipsométricas de las Cuencas Aportantes al Proyecto. Tranque Humo Corral

4.3.4. Descripción: Tranque de Relaves El Torito.

Corresponde a un depósito activo de la compañía Minera “AngloAmerican Sur”; proyecto desarrollado con el objeto de albergar los relaves provenientes de la Planta Concentradora de El Soldado. Sus coordenadas son 71,162°O-32,639°S encontrándose en la Región de Valparaíso, Provincia de Quillota, Comuna de Nogales, al noreste de la localidad de El Melón, (Ver Figura 4.3 (e)). Se ubica dentro de la Sub-Cuenca del Río Aconcagua Bajo; cuyo régimen de lluvias se caracteriza por ser del tipo invernal precedida por una estación seca prolongada (Arcadis, 2018). En el sector del proyecto se consideran como meses lluviosos entre mayo y agosto, siendo junio normalmente el más lluvioso del año. Las estaciones cercanas y cuenca aportante se presentan en la Figura 4.9, mientras que las cars. de estas en la Tabla 4.11 y Tabla 4.12, respectivamente.

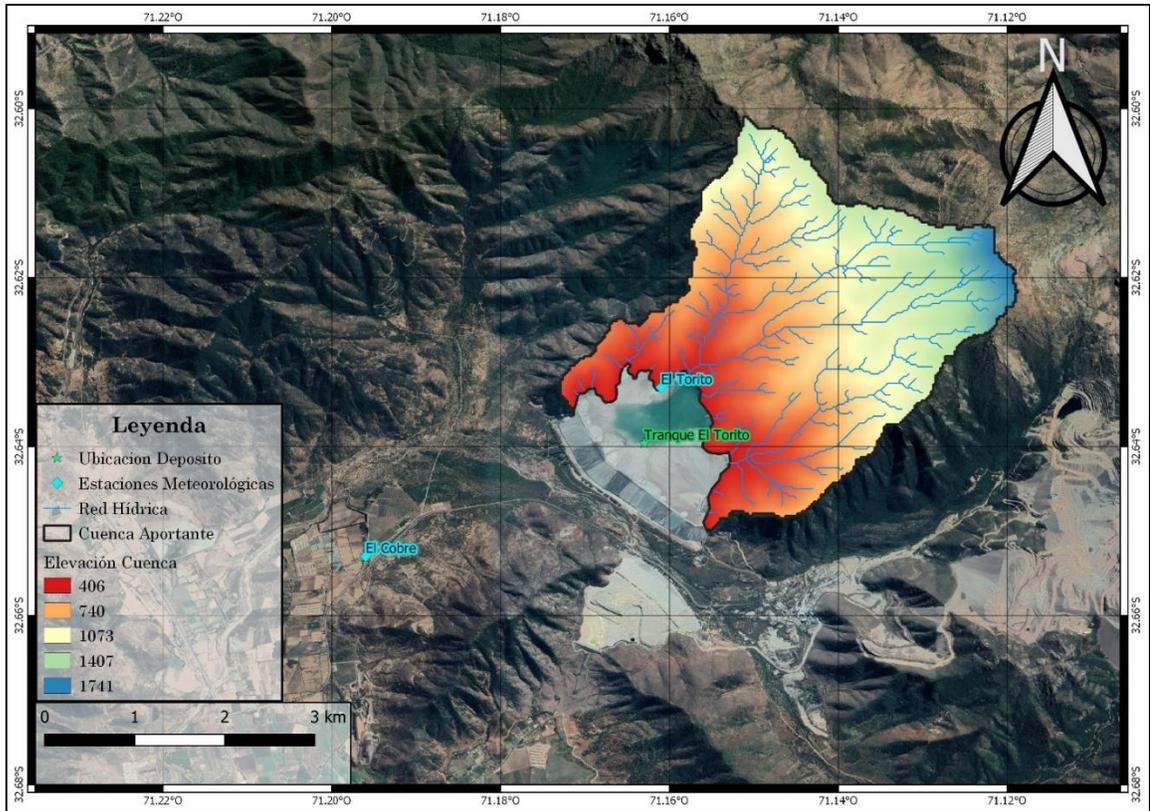


Figura 4.9 Distribución Espacial de estaciones meteorológicas cercanas al Proyecto y Cuenca aportante al Tranque El Torito.

Tabla 4.11 Descripción de Estaciones Cercanas al Tranque de Relaves El Torito.

Código BNA	Nombre Estación	Longitud [°]	Latitud [°]	Altitud [m.s.n.m]	Fecha de Inicio	Fecha de Fin
-	El Torito	-71,161	-32,633	398	ene-1986	Vigente
05424005-8	El Cobre	-71,196	-32,653	280	may-1989	Vigente

Tabla 4.12 Características Geomorfológicas de la cuenca aportante al Tranque El Torito

Descripción	Unidad	Valor
Área cuenca	[km ²]	14,7
Pendiente Media Cuenca	[m/m]	0,32
Largo Cauce Principal	[km]	2,9
Largo Cauce Principal Al Centro de Gravedad	[km]	0,32

4.4. Estaciones y Series Anuales de Máximas Precipitaciones Diarias.

4.4.1. Series Anuales de Máximas Precipitaciones Diarias.

Con el objeto de estimar las precipitaciones de diseño asociadas a los distintos depósitos de relaves a estudiar, primero es necesario definir las estaciones a utilizar. Acorde a esto y según la distribución espacial de las estaciones meteorológicas cercanas a los distintos depósitos, se opta por las presentes en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13 Descripción de estaciones a utilizar en la estimación de las precipitaciones de diseño.

Depósito de relaves	Tranque Amolanas	Tranque El Gato	Tranque Humo Corral	Tranque El Torito
Código BNA	03430006-2	03430006-2	4323007	-
Nombre Estación	Lautaro Embalse	Copiapó	Almendral	El Torito
Longitud [°]	-70,0033	-70,3308	-70,9186	-71,1614
Latitud [°]	-27,9783	-27,3772	-29,9822	-32,6335
Altitud [m.s.n.m]	1.110	385	370	398
Año Inicio Medición	1.962	1962	1959	1986
Año Fin Medición	Vigente	Vigente	Vigente	Vigente
Años de Información	57	57	60	32
Datos Faltantes [días]	152	58	1797	-

En el caso del Tranque Amolanas, la elección de la estación “Lautaro Embalse” se basa en la cercanía tanto altimétrica como espacial al depósito; mientras que en los demás casos se consideraron las estaciones utilizadas en los estudios hidrológicos respectivos.

En relación a las series de precipitación y dado que existen datos faltantes, se debe rellenar esta información antes de proceder con la estimación de las precipitaciones de diseño. Por ello, se realiza un análisis de cobertura de las estaciones existentes en las regiones de Atacama, Coquimbo y Valparaíso (regiones en las cuales se emplazan los depósitos a estudiar), con el fin de identificar y facilitar la elección de aquellas estaciones cercanas que posean un registro suficiente para completar la información faltante. El análisis de cobertura mencionado se presenta en el Anexo B, definiendo así las estaciones a utilizar en el relleno y presentes en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14 Estaciones a utilizar en el relleno de información faltante a cada depósito de relaves.

Depósitos de Relaves	Tranque Amolanas	Tranque El Gato	Tranque Humo Corral	Tranque El Torito
Estación a utilizar	Lautaro Embalse	Copiapó	Almendral	El Torito
Estación de relleno	Elibor Campamento	Elibor Campamento	La Florida La Serena (Ad.)	El Cobre

De esta forma, realizando el relleno de la información faltante (el cual se detalla en el Anexo C), se generan las series anuales de máximas precipitaciones diarias completas, las que se presentan en la Figura 4.10 para cada estación.

Series Anuales de Máximas Precipitaciones Diarias

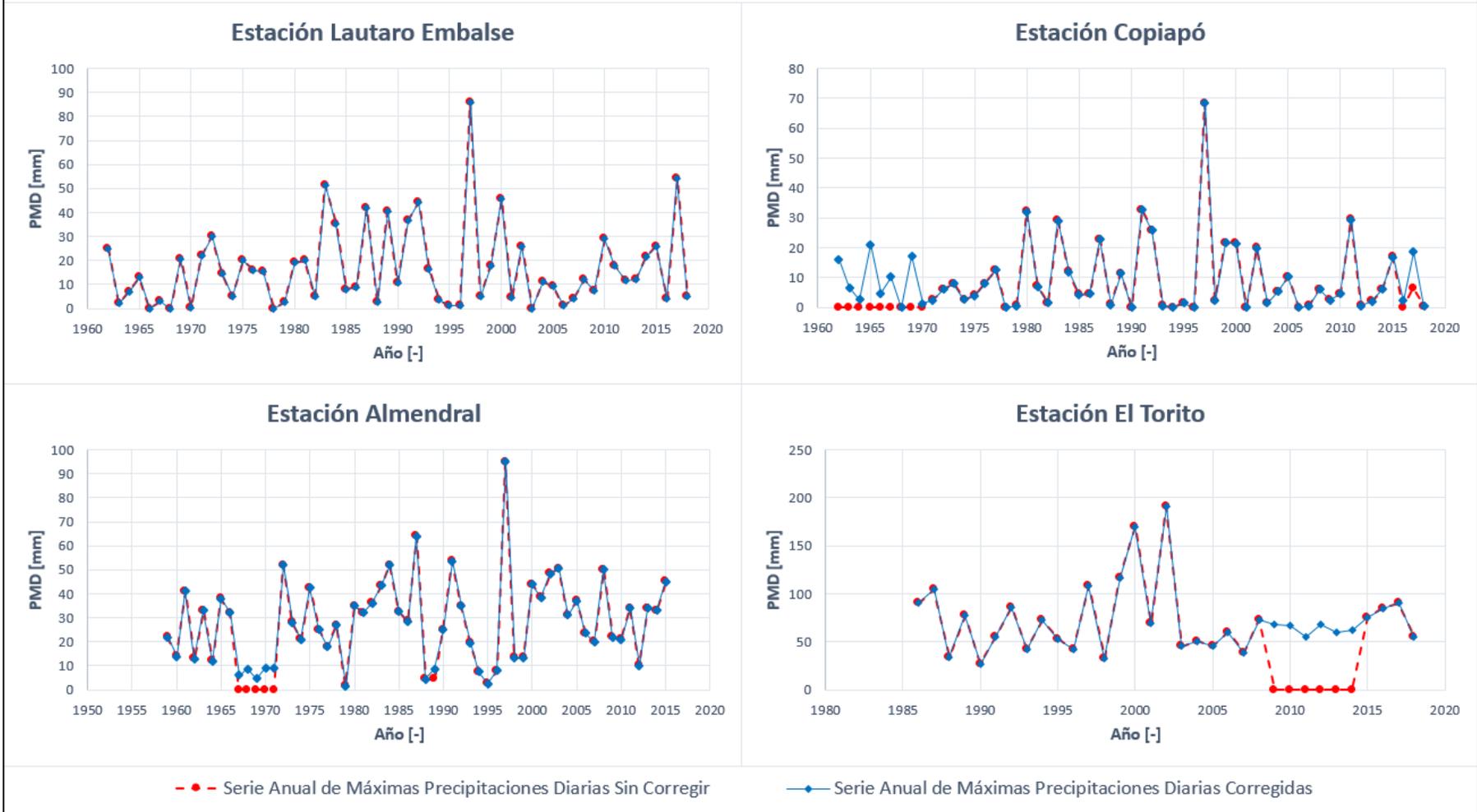


Figura 4.10 Series anuales de máximas precipitaciones diarias (PMD) antes y después del relleno de la información. Estaciones Lautaro Embalse, Copiapó, Almendral y El Torito.

4.5. Análisis de Tendencias sobre Series Completas.

Ya con las series anuales completas, es necesario realizar nuevamente los análisis de tendencias sobre los intervalos móviles de 20 años, para verificar si existieron cambios en la magnitud o dirección de las tendencias en relación a las estimadas con información incompleta. De esta forma, para complementar los test de Mann-Kendall y Thiel-Sen, se utiliza el método de Montecarlo sobre las medias y desviaciones estándar móviles de las series, incluyéndose además un análisis de punto de cambio para verificar la existencia (o no) de cambios abruptos en las tendencias identificadas. Los resultados de los análisis de tendencias antes y después del relleno se presentan en la Tabla 4.15 a la Tabla 4.18, mientras que los ajustes gráficos del método de Montecarlo se presentan en el Anexo D.

Tabla 4.15 Resultados de Análisis de Tendencias iniciales (*in*) y después del relleno de información (*fin*). Estación Lautaro Embalse.

Estación Lautaro Embalse						
Test	Parámetros	Unidades	μ_{in}	μ_{fin}	σ_{in}	σ_{fin}
Mann-Kendall	τ	[-]	0,124	0,124	0,336	0,336
	p-value	[-]	27,954%	27,954%	0,313%	0,313%
Thiel-Sen	Pendiente	[mm/año]	0,061	0,061	0,253	0,253
	I. Confianza (-)	[mm/año]	-0,067	-0,067	0,157	0,157
	I. Confianza (+)	[mm/año]	0,179	0,179	0,344	0,344
ECM	Pendiente	[mm/año]	0,068	0,068	0,236	0,236
MonteCarlo	Prob. Precip.	[-]	-	62,8%	-	90,5%
Pettitt Test	Punto de Cambio	[Año]	-	1979	-	1986
	p-value	[-]	-	1,000%	-	0,004%

Tabla 4.16 Resultados de Análisis de Tendencias Iniciales (*in*) y después del relleno de información (*fin*). Estación Copiapó.

Estación Copiapó						
Test	Parámetros	Unidades	μ_{in}	μ_{fin}	σ_{in}	σ_{fin}
Mann-Kendall	τ	[-]	-0,106	0,238	0,005	0,300
	p-value	[-]	44,10%	3,686%	98,42%	0,829%
Thiel-Sen	Pendiente	[mm/año]	-0,030	0,065	0,001	0,239
	I. Confianza (-)	[mm/año]	-0,137	0,003	-0,057	0,034
	I. Confianza (+)	[mm/año]	0,045	0,123	0,231	0,292
ECM	Pendiente	[mm/año]	-0,006	0,065	0,192	0,216
MonteCarlo	Prob. Precip.	[-]	-	69,9%	-	93,6%
Pettitt Test	Punto de Cambio	[Año]	-	1986	-	1986
	p-value	[-]	-	0,060%	-	0,011%

Tabla 4.17 Resultados de los Análisis de Tendencias antes (in) y después del relleno de información(fin), Estación Almendral.

Estación Almendral						
Test	Parámetros	Unidades	μ_{in}	μ_{fin}	σ_{in}	σ_{fin}
Mann-Kendall	τ	[-]	-0,106	0,673	0,005	0,359
	p-value	[-]	44,10%	0,000%	98,42%	0,100%
Thiel-Sen	Pendiente	[mm/año]	-0,030	0,219	0,001	0,196
	I. Confianza (-)	[mm/año]	-0,137	0,159	-0,057	0,120
	I. Confianza (+)	[mm/año]	0,045	0,278	0,231	0,250
ECM	Pendiente	[mm/año]	-0,006	0,230	0,192	0,171
MonteCarlo	Prob. Precip.	[-]	-	88,5%	-	89,6%
Pettitt Test	Punto de Cambio	[Año]	-	1986	-	1985
	p-value	[-]	-	0,003%	-	0,009%

Tabla 4.18 Resultados de los Análisis de Tendencias, Estación El Torito.

Estación El Torito				
Test	Parámetros	Unidades	μ	σ
Mann-Kendall	τ	[-]	0,451	-0,890
	p-value	[-]	2,854%	0,001%
Thiel-Sen	Pendiente	[mm/año]	0,298	-0,361
	I. Confianza (-)	[mm/año]	0,040	-0,422
	I. Confianza (+)	[mm/año]	0,528	-0,292
ECM	Pendiente	[mm/año]	0,260	-0,367
MonteCarlo	Prob. Precip.	[-]	65,8%	31,4%
Pettitt Test	Punto de Cambio	[Año]	2004	2001
	p-value	[-]	10,500%	1,489%

De la Tabla 4.18, el análisis de tendencias en la estación El Torito se realizó considerando inicialmente la serie completa, por ende, no existe un caso inicial y final para este caso.

En relación al significado de los valores obtenidos en las Tabla 4.15 a la Tabla 4.18, es necesario mencionar cuáles son los valores de corte para declarar que existe o no tendencia en cada uno de los test realizados. En este sentido, según las metodologías de análisis de tendencias de la sección 2.4, se demuestra la existencia de tendencia significativa en los distintos test según lo planteado a continuación:

- La existencia de tendencia en el test de Mann-Kendall se considera con un *p-value* dado menor al 5% (lo que equivale a un nivel de confianza del 95%).
- En el ajuste de Thiel-Sen viene dada por pendientes de igual signo en el intervalo de confianza, los que son estimados con un nivel de confianza del 95%.
- La declaración de tendencia significativa para el método de Montecarlo viene dada por un valor de corte mínimo del 75% para tendencias al alza y un valor máximo del 25% para tendencias a la baja.

Así mismo, en el caso de existir discrepancia en la detección (o no) de tendencia, se considera el resultado obtenido por la mayoría. A continuación en la Tabla 4.19, se presentan las interpretaciones de los resultados, según los test realizados.

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.

Estación Lautaro Embalse				
Test	μ_{in}	μ_{fin}	σ_{in}	σ_{fin}
Mann-Kendall	S/T	S/T	+	+
Thiel-Sen	S/T	S/T	+	+
Montecarlo		S/T		+
Resultado	Sin Tendencia	Sin Tendencia	Tendencia Positiva	Tendencia Positiva
Estación Copiapó				
Test	μ_{in}	μ_{fin}	σ_{in}	σ_{fin}
Mann-Kendall	S/T	+	S/T	+
Thiel-Sen	S/T	+	S/T	+
Montecarlo		S/T		+
Resultado	Sin Tendencia	Tendencia Positiva	Sin Tendencia	Tendencia Positiva
Estación Almendral				
Test	μ_{in}	μ_{fin}	σ_{in}	σ_{fin}
Mann-Kendall	+	+	S/T	+
Thiel-Sen	+	+	S/T	+
Montecarlo		+		+
Resultado	Tendencia Positiva	Tendencia Positiva	Sin Tendencia	Tendencia Positiva
Estación El Torito				
Test	μ		σ	
Mann-Kendall	+		-	
Thiel-Sen	+		-	
Montecarlo	S/T		S/T	
Resultado	Tendencia Positiva		Tendencia Negativa	

De forma gráfica, los ajustes de tendencias tanto en las medias como desviaciones estándar móviles, se presentan en la Figura 4.11 y Figura 4.12 respectivamente.

Ajuste de Tendencias en Medias Móviles de 20 años

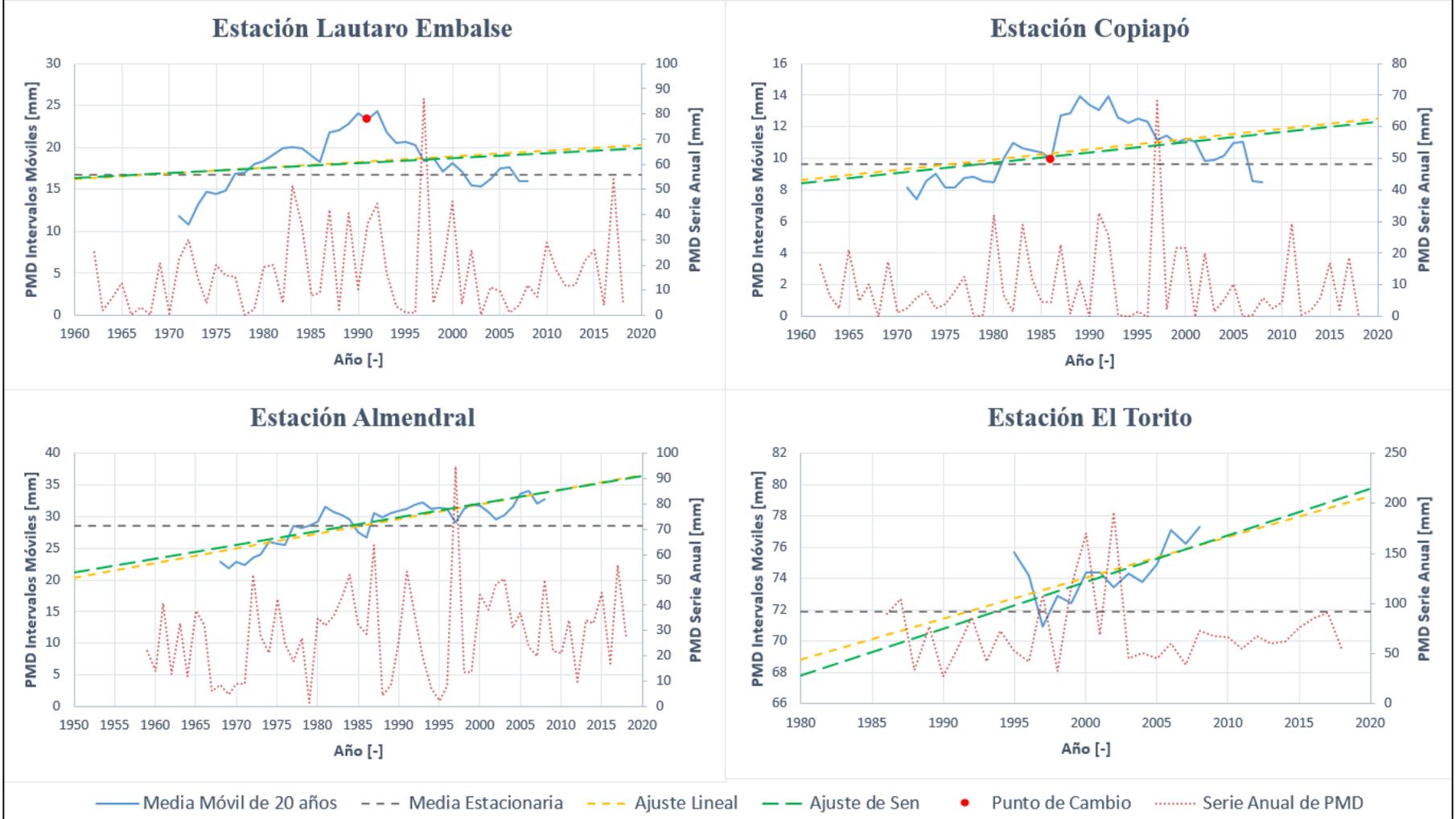


Figura 4.11 Ajustes de tendencias sobre medias móviles de 20 años en series anuales de máximas precipitaciones diarias (SAMPD), para las distintas estaciones de estudio. Punto rojo representa existencia de punto de cambio en la serie generada, así mismo, línea roja punteada corresponde a SAMPD, medida en el eje secundario.

Ajuste de Tendencias en Desviaciones Estándar Móviles de 20 años

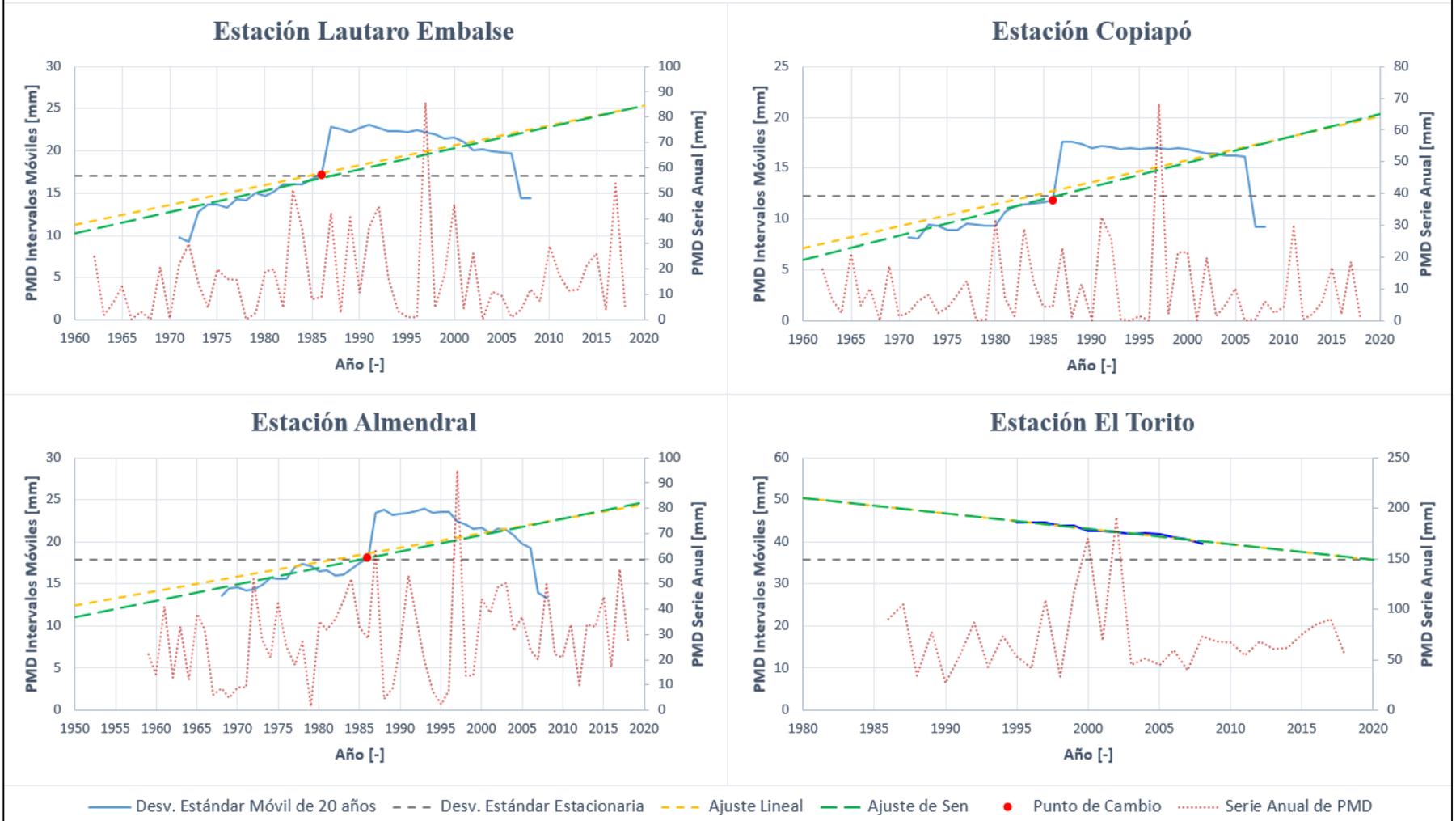


Figura 4.12 Ajustes de tendencias sobre varianzas móviles de 20 años en series anuales de máximas precipitaciones diarias (SAMPD), para las distintas estaciones de estudio. Punto rojo representa existencia de punto de cambio en la serie generada, así mismo, la línea roja punteada corresponde a SAMPD, medida en el eje secundario.

Según estos resultados y como se puede observar de las figuras anteriores, en el caso de las series de medias móviles, tanto en la estación Lautaro Embalse y Copiapó existe un aumento inicial el cual decae en los años móviles 1991 y 1986 respectivamente⁷; observándose la misma situación en la varianza de ambas estaciones como así mismo de Almendral, en el año 1986. En este sentido, los ajustes lineales de tendencias (ECM y Thiel-Sen) de los estadísticos en los casos en que existe un punto de cambio, no son consistentes con la forma que adoptan las series. Por ello, con el objeto de mejorar los ajustes se corrigen las tendencias en las series de media y varianza móviles acorde al punto de cambio identificado en cada caso, dividiendo el ajuste en dos partes las cuales se analizan por separado.

Con lo mencionado, los análisis de tendencias considerando los puntos de cambio se presentan en la Tabla 4.20, mientras que la interpretación de estos en la Tabla 4.21.

Tabla 4.20 Análisis de Tendencias considerando punto de cambio. Estaciones Lautaro Embalse, Copiapó y Almendral.

Estación Lautaro Embalse						
Test	Parámetros	Unidades	μ_1	μ_2	σ_1	σ_2
Mann-Kendall	τ	[-]	0,867	-0,696	0,900	-0,833
	p-value	[-]	0,000%	0,012%	0,000%	0,000%
Thiel-Sen	Pendiente	[mm/año]	0,587	-0,438	0,358	-0,215
	I. Confianza (-)	[mm/año]	0,504	-0,588	0,293	-0,282
	I. Confianza (+)	[mm/año]	0,658	-0,277	0,472	-0,156
ECM	Pendiente	[mm/año]	0,579	-0,425	0,431	-0,296
MonteCarlo	Prob. Precip.	[-]	99,9%	1,0%	97,3%	13,9%
Estación Copiapó						
Test	Parámetros	Unidades	μ_1	μ_2	σ_1	σ_2
Mann-Kendall	τ	[-]	0,538	-0,749	0,767	-0,801
	p-value	[-]	0,448%	0,000%	0,004%	0,000%
Thiel-Sen	Pendiente	[mm/año]	0,179	-0,225	0,239	-0,077
	I. Confianza (-)	[mm/año]	0,079	-0,273	0,169	-0,103
	I. Confianza (+)	[mm/año]	0,271	-0,160	0,289	-0,061
ECM	Pendiente	[mm/año]	0,188	-0,215	0,244	-0,221
MonteCarlo	Prob. Precip.	[-]	91,3%	4,5%	94,3%	32,6%
Estación Almendral						
Test	Parámetros	Unidades	μ	σ_1	σ_2	
Mann-Kendall	τ	[-]	0,673	0,600	-0,367	
	p-value	[-]	0,000%	0,139%	1,091%	
Thiel-Sen	Pendiente	[mm/año]	0,219	0,187	-0,180	
	I. Confianza (-)	[mm/año]	0,159	0,117	-0,276	
	I. Confianza (+)	[mm/año]	0,278	0,283	-0,100	
ECM	Pendiente	[mm/año]	0,230	0,199	-0,139	
MonteCarlo	Prob. Precip.	[-]	89,8%	89,2%	12,4%	

⁷ El punto de cambio considerado en el gráfico corresponde a un punto considerado de forma visual en función de la distribución de las variables. En este sentido, se considera el test de Pettit como apoyo, pero no corresponde necesariamente al punto de cambio a seleccionar.

Tabla 4.21 Interpretación de los Análisis de Tendencias considerando punto de cambio. Estaciones Lautaro Embalse, Copiapó y Almendral.

Estación Lautaro Embalse				
Test	μ_1	μ_2	σ_1	σ_2
Mann-Kendall	+	-	+	-
Thiel-Sen	+	-	+	-
MonteCarlo	+	-	+	-
Tendencia	Tendencia Positiva	Tendencia Negativa	Tendencia Positiva	Tendencia Negativa
Estación Copiapó				
Test	μ_1	μ_2	σ_1	σ_2
Mann-Kendall	+	-	+	-
Thiel-Sen	+	-	+	-
MonteCarlo	+	-	+	S/T
Tendencia	Tendencia Positiva	Tendencia Negativa	Tendencia Positiva	Tendencia Negativa
Estación Almendral				
Test	μ		σ_1	σ_2
Mann-Kendall	+		+	-
Thiel-Sen	+		+	-
MonteCarlo	+		+	-
Tendencia	Tendencia Positiva		Tendencia Positiva	Tendencia Negativa

Finalmente el tipo de tendencia y los puntos de cambio asociados a las series móviles para cada una de las estaciones de estudio, se resumen en la Tabla 4.22. Así mismo, los nuevos ajustes gráficos sobre la media y varianza se presentan en la Figura 4.13 y la Figura 4.14 respectivamente.

Tabla 4.22 Resumen de Tendencias en Estaciones de Estudio.

Estación Meteorológica	Tendencia sobre la μ		Año Punto de Cambio μ	Tendencia sobre la σ		Año Punto de Cambio σ
Lautaro Embalse	+	-	1991	+	-	1986
Copiapó	+	-	1986	+	-	1986
Almendral	+		[-]	+	-	1986
El Torito	+		[-]	-		[-]

Ajuste de Tendencias en Medias Móviles de 20 años Considerando Punto de Cambio

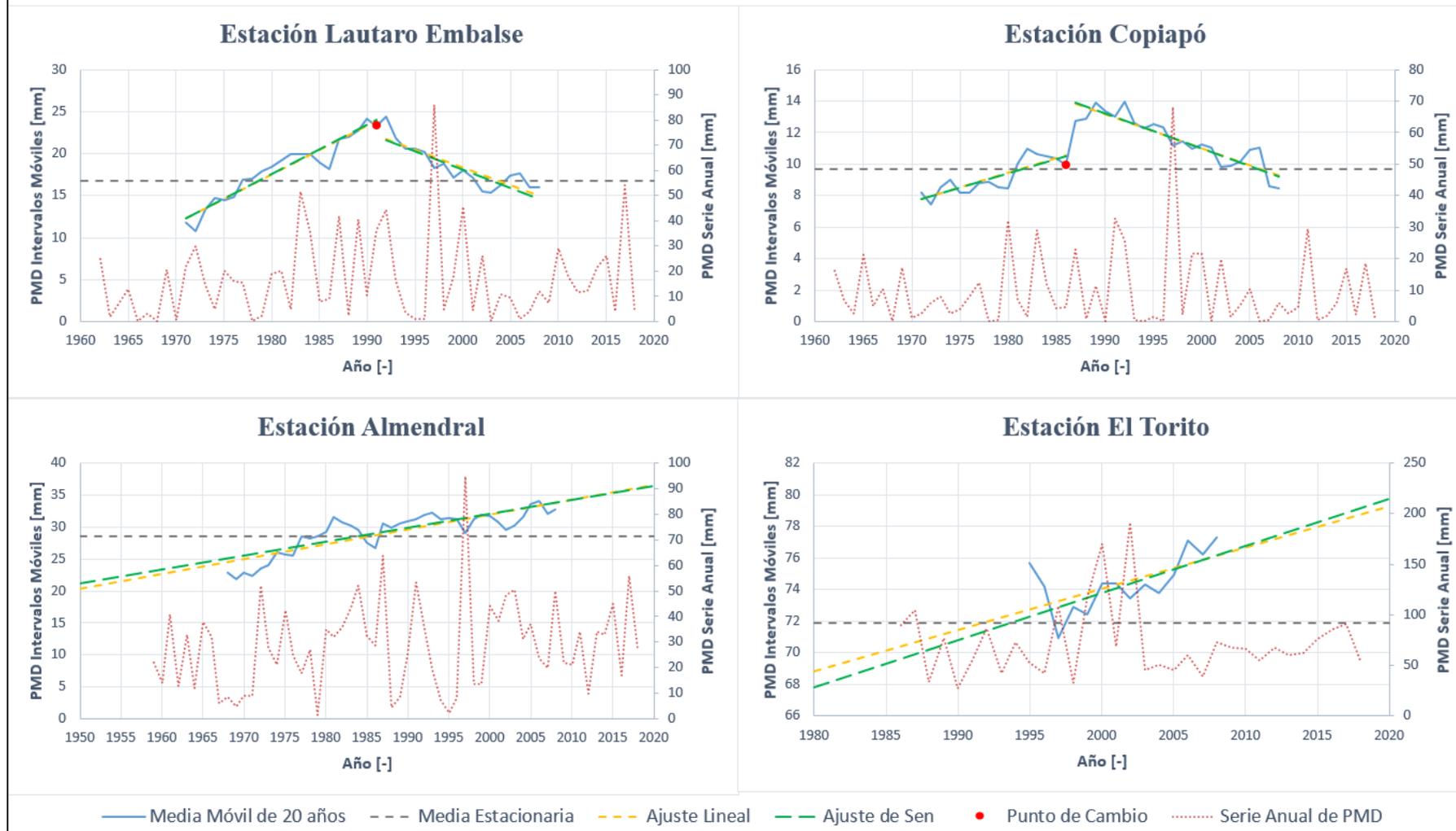


Figura 4.13 Ajustes de tendencias sobre medias móviles de 20 años en series anuales de máximas precipitaciones diarias (SAMPD) para las distintas estaciones de estudio, considerando el punto de cambio destacado en rojo. Línea roja punteada corresponde a SAMPD, medida en el eje secundario.

Ajuste de Tendencias en Desviaciones Estándar Móviles de 20 años Considerando Punto de Cambio

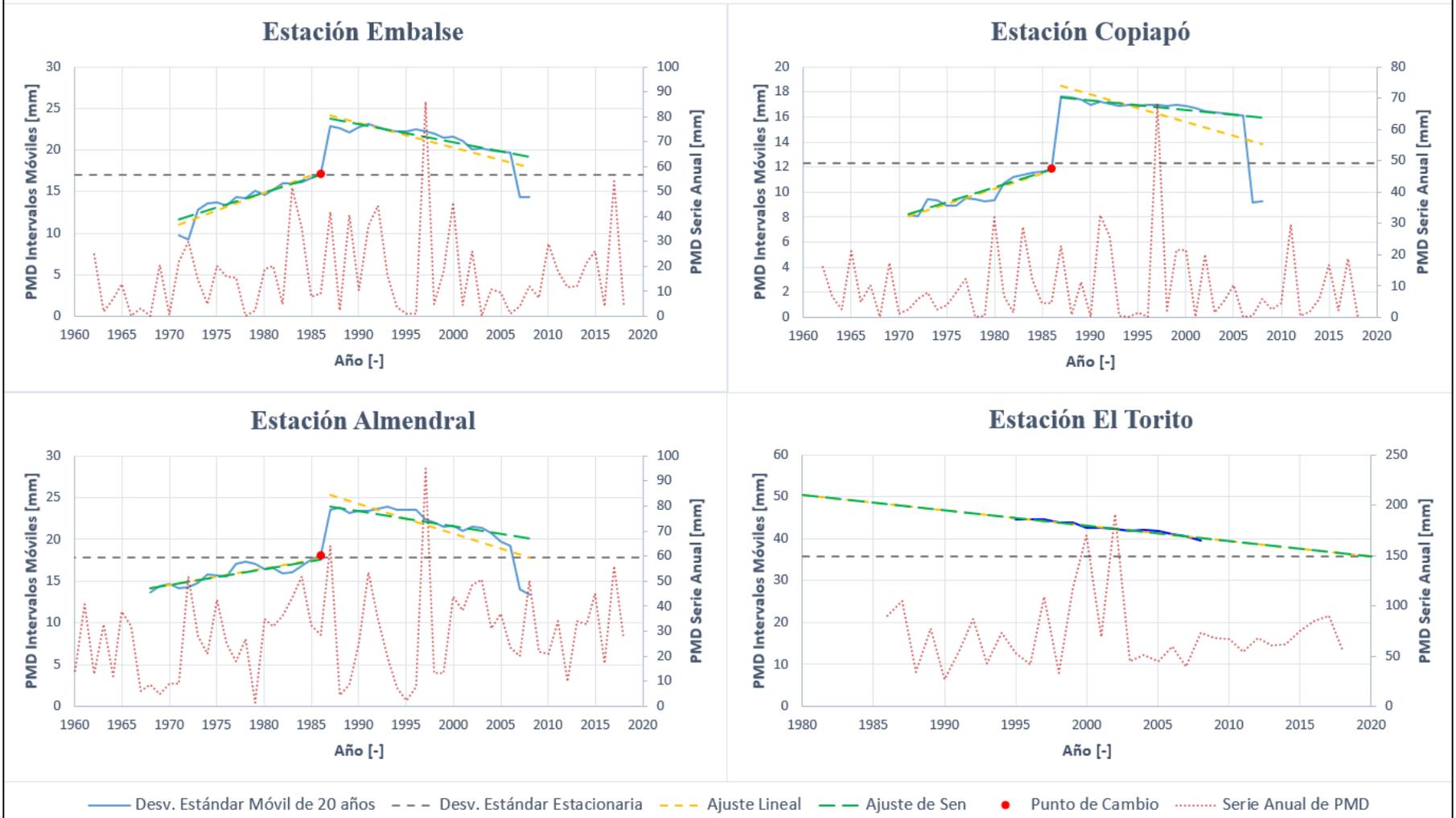


Figura 4.14 Ajustes de tendencias sobre varianzas móviles de 20 años en series anuales de máximas precipitaciones diarias (SAMPD) para las distintas estaciones de estudio, considerando el punto de cambio destacado en rojo. Línea roja punteada corresponde a SAMPD, medida en el eje secundario.

4.6. Precipitaciones de Diseño.

4.6.1. Precipitaciones de Diseño: Escenario 0 y Escenario 1.

Ya con los resultados de los análisis de tendencia, es posible realizar la estimación de cada uno de los escenarios de precipitación. Según esto, y en función de lo expuesto en la sección 3.1.2, el Escenario 0 corresponde a la precipitación de diseño del proyecto. De esta forma, el método de cálculo y la precipitación para cada depósito se presentan en la Tabla 4.23.

Tabla 4.23 Método aplicado y estimación de Escenario 0 de precipitación de diseño en cada una de las estaciones de estudio.

Estación Meteorológica	Depósito de Relaves	Método	Año de Diseño	Escenario 0 [mm]
<i>Lautaro Embalse</i>	Amolanas	Stowhas	2007	211
<i>Copiapó</i>	El Gato	Stowhas	2004	144
<i>Almendral</i>	Humo Corral	Hershfield	2008	332
<i>El Torito</i>	El Torito	Stowhas	2017	517

En relación a los resultados (y de forma similar a la elección de estaciones meteorológicas), estos se basan en los estudios hidrológicos asociados a cada uno de los proyectos, considerando los mismos valores como métodos de estimación de la precipitación de diseño. Lo anterior con la excepción del tranque Amolanas, que, como fue mencionado en la descripción del depósito (sección 4.3.1), este se encuentra inactivo y no existe información en relación al diseño realizado, implicando que la estimación del Escenario 0 se realice a partir de la simplificación de Stowhas al año 2007 (siguiendo lo planteado en la sección 3.1.2).

Por otra parte, la estimación del Escenario 1 corresponde a considerar la metodología del Escenario 0, pero determinando la PMP (de Hershfield o Stowhas) con la totalidad de años de información existentes al año 2018 (extensión del registro en la información de precipitación), obteniéndose así los valores presentes en la Tabla 4.24.

Tabla 4.24 Precipitaciones de diseño del Escenario 1, según extensión del registro de información.

Estación Meteorológica	Depósito de Relaves	Escenario 1 [mm]
<i>Lautaro Embalse</i>	Amolanas	206
<i>Copiapó</i>	El Gato	134
<i>Almendral</i>	Humo Corral	373
<i>El Torito</i>	El Torito	511

4.6.2. Precipitaciones de Diseño: Escenario 2 y Escenario 3.

El Escenario 2 es algo distinto a los dos anteriores, ya que como fue mencionado en la sección 3.1.1, su estimación corresponde a estimar la PMP de forma no estacionaria, por medio de intervalos móviles de 20 años y en función de los ajustes de tendencias que existan en la media y varianza de la precipitación. En este sentido, si los intervalos móviles de alguna serie presentan una tendencia en la media de los datos, pero la varianza es estacionaria, la estimación de cada PMP se realiza considerando una media variable (en función del ajuste lineal de Sen) y una varianza única, cuyo valor corresponde al de la totalidad de los datos. Acorde a lo mencionado, en la Figura 4.15 se presentan los valores de PMP estimadas en cada intervalo móvil según las estaciones de estudio y los ajustes de tendencias (Ver Tabla 4.22).

Escenario 2: Estimación de PMP a partir de intervalos móviles de 20 años

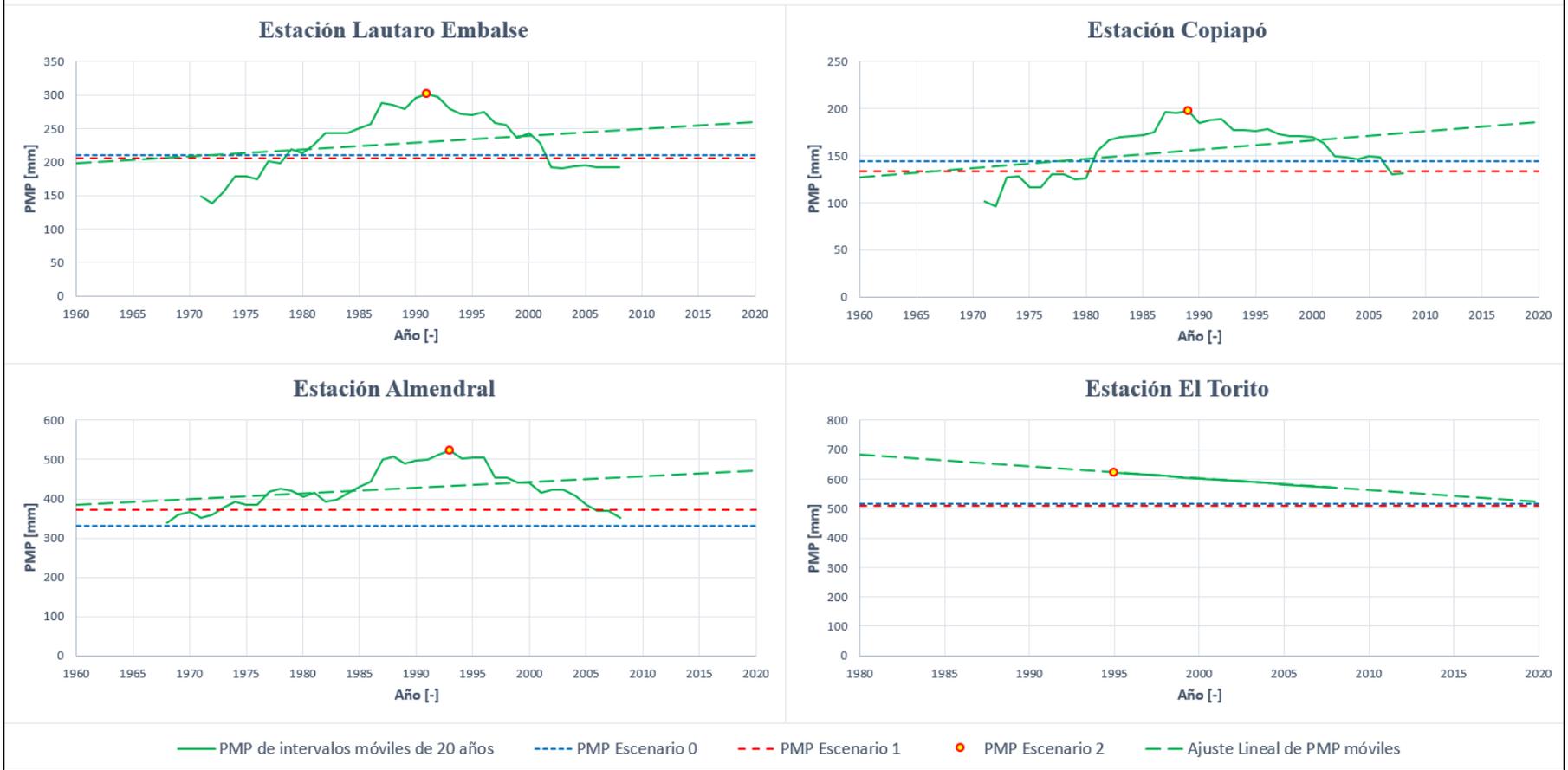


Figura 4.15 Distribución de PMP no estacionarias según intervalos móviles de 20 años. Punto en cada figura corresponde al valor adoptado como Escenario 2.

Al observar la Figura 4.15, las gráficas son acordes a los ajustes de tendencias generados, presentando en algunos casos aumento y luego una disminución según los puntos de cambios considerados en estos, pero marcados de forma general en función de la varianza móvil. Mencionado esto, el valor máximo de las distintas gráficas de la Figura 4.15 corresponde al valor de diseño del Escenario 2, el cual se resume en la Tabla 4.25.

Tabla 4.25 Precipitaciones de diseño asociadas al Escenario 2 (máxima PMP no estacionaria)..

Estación Meteorológica	Depósito de Relaves	Escenario 2 [mm]
<i>Lautaro Embalse</i>	Amolanas	301
<i>Copiapó</i>	El Gato	197
<i>Almendral</i>	Humo Corral	523
<i>El Torito</i>	El Torito	623

En relación al Escenario 3, este corresponde a la extrapolación del ajuste lineal de los resultados obtenidos en el Escenario 2 al año 2100, pero al observar estos en la Figura 4.15 solo la estación El Torito mantiene un ajuste que es posible representar según una extrapolación lineal. Por ello, en los casos de Lautaro Embalse, Copiapó y Almendral, se considera el promedio de las PMP no estacionarias como el valor a adoptar en el Escenario 3. Los resultados obtenidos acorde a lo mencionado se presenta en la Tabla 4.26.

Tabla 4.26 Precipitaciones de diseño Escenario 3 y método de estimación.

Estación Meteorológica	Depósito de Relaves	Método	Escenario 3 [mm]
<i>Lautaro Embalse</i>	Amolanas	Promedio	229
<i>Copiapó</i>	El Gato	Promedio	156
<i>Almendral</i>	Humo Corral	Promedio	426
<i>El Torito</i>	El Torito	Extrapolación	198

4.6.3. Precipitación de Diseño: Escenario 4

El Escenario 4, corresponde a un análisis estacionario con 20 años de información inicialmente, pero aumentando en un año la información de valores extremos hasta utilizar la totalidad de años para estimar la PMP. En este sentido, el primer resultado corresponde a la estimación de la PMP con 20 años de información, luego se agrega la información del año n°21 y se determina un nuevo valor de PMP (dato n°2), repitiendo el proceso hasta considerar la totalidad de años del registro. Con lo anterior, el valor de precipitación asociado a este escenario corresponde al máximo valor de la serie mencionada, siendo los presentes en la Tabla 4.27 para cada estación. En la Figura 4.16 se presentan la series de PMP asociadas al Escenario 4, como así mismo se incluyen las precipitaciones de diseño de los Escenarios 0 al 3, a modo de comparación.

Tabla 4.27 Precipitaciones de diseño del Escenario 4 según máxima PMP Estacionaria.

Estación Meteorológica	Depósito de Relaves	Escenario 4 [mm]
<i>Lautaro Embalse</i>	Amolanas	224
<i>Copiapó</i>	El Gato	146
<i>Almendral</i>	Humo Corral	405
<i>El Torito</i>	El Torito	633

Escenario 4: Estimación de PMP según año de diseño

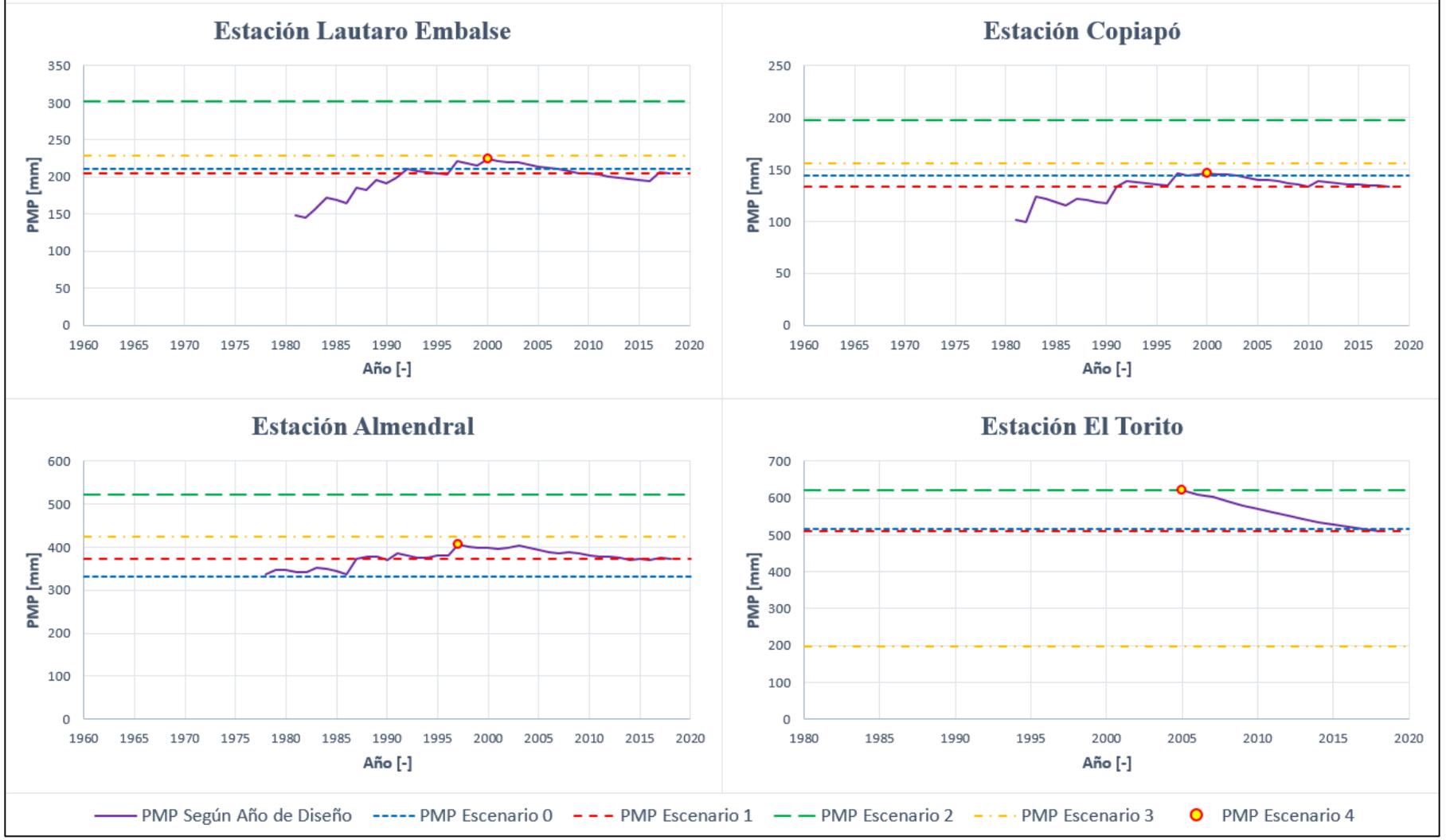


Figura 4.16 Distribución de PMP estacionaria según el año de diseño que se considere. Puntos corresponden al valor adoptado como Escenario 4.

4.6.4. Precipitación de Diseño: Escenario 5.

Finalmente, el Escenario 5 se obtiene de la precipitación extrema asociada a un periodo de retorno de 10.000 años, considerando un análisis de frecuencia no estacionario. Según esta noción, se considera la conversión de las precipitaciones máximas diarias en precipitaciones máximas en 24 horas ($P_{max\ 24\ hrs.}$), amplificando la serie por un factor de 1,13 (WMO, 2009); y en función de estos valores, utilizando tanto las distribuciones GEV y Gumbel estacionarias como no estacionarias, se determinan las $P_{max\ 24\ hrs.}$ asociadas a distintos periodos de retorno⁸, obteniendo los resultados presentes en la Tabla 4.28 a la Tabla 4.31.

Tabla 4.28 Resultados de Análisis de Frecuencias Estacionario y No Estacionario en [mm]. Lautaro Embalse

Distribución	Parámetros	Periodos de Retorno (Tr=años), Estación Lautaro Embalse			
		10	100	1000	10000
Análisis de Frecuencia Estacionario [I.C. 95%]					
Gumbel	μ, σ	39,2	67,5	95,3	123,1
		[31,3-47,0]	[53,5-81,5]	[75,2-115,5]	[96,7-149,5]
GEV	μ, σ, ξ	45,5	150,5	440,7	1248
		[26,5-64,5]	[-6,4-307,5]	[-354,1-1236]	[-2026-4523]
Análisis de Frecuencia No Estacionario					
Gumbel	μ_t, σ	39,7	68,0	95,8	123,5
	μ, σ_t	42,6	74,6	106,0	137,4
	μ_t, σ_t	44,9	77,9	110,4	142,8
GEV	μ_t, σ, ξ	46,3	154,3	459,3	1327
	μ, σ_t, ξ	43,6	145,3	432,6	1250
	μ_t, σ_t, ξ	46,1	153,6	457,4	1323

Tabla 4.29 Resultados de Análisis de Frecuencias Estacionario y No Estacionario en [mm]. Copiapó.

Distribución	Parámetros	Periodos de Retorno (Tr=años), Estación Copiapó			
		10	100	1000	10000
Análisis de Frecuencia Estacionario [I.C. 95%]					
Gumbel	μ, σ	24,8	43,8	62,3	80,9
		[19,4-30,3]	[34,0-53,6]	[48,2-76,5]	[62,3-99,5]
GEV	μ, σ, ξ	34,3	243,5	1.613	10.608
		[11,3-57,3]	[-148,7-635,7]	[-2.661-5.889]	[-28.759-49.977]
Análisis de Frecuencia No Estacionario					
Gumbel	μ_t, σ	23,6	42,4	60,9	79,3
	μ, σ_t	30,4	54,9	79,1	103,1
	μ_t, σ_t	29,6	53,9	77,7	101,5
GEV	μ_t, σ, ξ	33,2	243,2	1642	10.980
	μ, σ_t, ξ	39,8	291,7	1979	13.309
	μ_t, σ_t, ξ	26,3	208,2	1526	11.095

⁸ Un mayor detalle de los resultados y la metodología asociada se encuentra en el Anexo E.

Tabla 4.30 Resultados de Análisis de Frecuencias Estacionario y No Estacionario en [mm]. Almendral.

Distribución	Parámetros	Periodos de Retorno (Tr=años), Estación Almendral			
		10	100	1000	10000
Análisis de Frecuencia Estacionario [I.C. 95%]					
Gumbel	μ, σ	57,6 [48,4-66,9]	94,4 [78,2-110,6]	130,5 [107,3-153,8]	166,6 [136,3-197,0]
GEV	μ, σ, ξ	57,2 [47,7-66,6]	91,4 [63,3-119,5]	123,2 [61,9-184,4]	153,2 [46,5-259,9]
Análisis de Frecuencia No Estacionario					
Gumbel	μ_t, σ	62,9	98,9	134,2	169,4
	μ, σ_t	59,3	98,2	136,4	174,5
	μ_t, σ_t	67,4	107,6	147,2	186,6
GEV	μ_t, σ, ξ	62,6	96,0	127,1	156,4
	μ, σ_t, ξ	59,3	95,1	127,6	157,6
	μ_t, σ_t, ξ	67,0	103,9	137,9	169,5

Tabla 4.31 Resultados de Análisis de Frecuencias Estacionario y No Estacionario en [mm]. El Torito

Distribución	Parámetros	Periodos de Retorno (Tr=años), Estación El Torito			
		10	100	1000	10000
Análisis de Frecuencia Estacionario [I.C. 95%]					
Gumbel	μ, σ	120,7 [100,1-141,3]	180,8 [144,5-217,2]	239,9 [187,5-292,3]	298,9 [230,3-367,4]
GEV	μ, σ, ξ	125,5 [95,7-155,2]	224,0 [103,4-344,7]	365,9 [20,9-711,0]	572,9 [-231,9-1.377]
Análisis de Frecuencia No Estacionario					
Gumbel	μ_t, σ	127,2	184,6	240,9	297,1
	μ, σ_t	89,8	114,3	138,4	162,4
	μ_t, σ_t	95,0	120,8	146,2	171,5
GEV	μ_t, σ, ξ	143,6	327,9	789,0	1952,5
	μ, σ_t, ξ	88,6	134,8	218,3	370,7
	μ_t, σ_t, ξ	101,3	168,7	300,9	562,8

Según los análisis de tendencias, la comparación entre los modelos y ajustes gráficos presentes en el Anexo E.4, se opta por considerar como Escenario 5 los resultados presentes en la Tabla 4.32.

Tabla 4.32 Precipitaciones de Diseño Escenario 5, distribuciones y parámetros no estacionarios considerados.

Estación Meteorológica	Depósito de Relaves	Distribución y Estadísticos	Escenario 5 [mm]
Lautaro Embalse	Amolanas	Gumbel [$\mu, \sigma_{t(+)}$]	137
Copiapó	El Gato	Gumbel [$\mu_{t(-)}, \sigma_{t(+)}$]	102
Almendral	Humo Corral	Gumbel [$\mu_{t(+)}, \sigma$]	169
El Torito	El Torito	Gumbel [$\mu_{t(+)}, \sigma_{t(-)}$]	172

4.6.5. Resumen Precipitaciones de Diseño.

De esta forma a continuación se presenta un resumen de la estimación de las distintas precipitaciones de diseño según los distintos Escenarios considerados. En relación a este, con el objetivo de caracterizar el riesgo asociado a considerar una metodología distinta de diseño y, dado que no existe un concepto de “riesgo hidrológico” asociado al valor de la PMP, se adopta como tal, las diferencias porcentuales (Δ) que existan entre los distintos Escenarios y el caso base de diseño (Escenario 0).

Además de esto, dado que el Escenario 5 corresponde a una metodología de diseño distinta a las otras, se considera una comparación entre el Escenario 5 (correspondiente a un análisis de frecuencia no estacionario) y el análisis de frecuencia estacionario de igual distribución y periodo de retorno, caracterizando en estas, las diferencias y el riesgo hidrológico (R_h) asociado a cada método. Lo antes mencionado se presenta en la Tabla 4.33 a la Tabla 4.36.

Tabla 4.33 Precipitaciones de diseño, diferencias porcentuales y Riesgo Hidrológico. Estación Lautaro Embalse.

Precipitaciones de diseño según Escenario Lautaro Embalse				
Escenario	Tipo	P_p [mm]	Δ [%]	
0	Precipitación de Diseño Proyecto (2007)	211	-	
1	PMP Estacionaria (2018)	206	-2%	
2	Máxima PMP No Estacionaria ($n = 20$)	301	+43%	
3	Promedio PMP No Estacionaria	229	+9%	
4	PMP máxima según año diseño	224	+6%	
5	Precipitación No Estacionaria T=10.000 años	137	-35%	
Diferencias y Riesgo entre Análisis de Frecuencia $T_r = 10.000$ años				
Gumbel	Parámetros	$P_{max\ 24\ hrs.}$ [mm]	Δ [%]	R_h [%]
Estacionaria	μ, σ	123	-	63,2%
No Estacionaria	$\mu, \sigma_{t(+)}$	137	+11,6%	94,0%

Tabla 4.34 Precipitaciones de diseño diferencias porcentuales y Riesgo Hidrológico Estación Copiapó

Precipitaciones de diseño según Escenario Copiapó				
Escenario	Tipo	P_p [mm]	Δ [%]	
0	Precipitación de Diseño Proyecto (2004)	144	-	
1	PMP Estacionaria (2018)	134	-7%	
2	Máxima PMP No Estacionaria ($n = 20$)	197	+37%	
3	Promedio PMP No Estacionaria	156	+8%	
4	PMP máxima según año diseño	147	+2%	
5	Precipitación No Estacionaria T=10.000 años	102	-30%	
Diferencias y Riesgo entre Análisis de Frecuencia $T_r = 10.000$ años				
Gumbel	Parámetros	$P_{max\ 24\ hrs.}$ [mm]	Δ [%]	R_h [%]
Estacionaria	μ, σ	81	-	63,2%
No Estacionaria	$\mu_{t(-)}, \sigma_{t(+)}$	102	+25,5%	99,9%

Tabla 4.35 Precipitaciones de diseño, diferencias porcentuales y Riesgo Hidrológico. Estación Almendral.

Precipitaciones de diseño según Escenario 0 Almendral				
Escenario	Tipo		P_p [mm]	Δ [%]
0	Precipitación de Diseño Proyecto (2008)		332	-
1	PMP Estacionaria (2018)		372	+12%
2	Máxima PMP No Estacionaria ($n = 20$)		523	+58%
3	Promedio PMP No Estacionaria		425	+28%
4	PMP máxima según año diseño		405	+22%
5	Precipitación No Estacionaria T=10.000 años		169	-49%
Diferencias y Riesgo entre Análisis de Frecuencia $T_r = 10.000$ años				
Gumbel	Parámetros	$P_{max\ 24\ hrs.}$ [mm]	Δ [%]	R_h [%]
Estacionaria	μ, σ	167	-	63,2%
No Estacionaria	$\mu_{t(+)}, \sigma$	169	1,7%	69,9%

Tabla 4.36 Precipitaciones de diseño diferencias porcentuales y Riesgo Hidrológico Estación El Torito

Precipitaciones de diseño según Escenario El Torito				
Escenario	Tipo		P_p [mm]	Δ [%]
0	Precipitación de Diseño Proyecto (2017)		516	-
1	PMP Estacionaria (2018)		511	-1%
2	Máxima PMP No Estacionaria ($n = 20$)		623	+21%
3	PMP No Estacionaria Al año 2100		198	-62%
4	PMP máxima según año diseño		623	+21%
5	Precipitación No Estacionaria T=10.000 años		172	-67%
Diferencias y Riesgo entre Análisis de Frecuencia $T_r = 10.000$ años				
Gumbel	Parámetros	$P_{max\ 24\ hrs.}$ [mm]	Δ [%]	R_h [%]
Estacionaria	μ, σ	299	-	63,2%
No Estacionaria	$\mu_{t(+)}, \sigma_{t(-)}$	172	-42,6%	0,0%

CAPÍTULO 5: HIDROGRAMAS DE CRECIDA Y RESULTADOS

Para estimar los caudales de crecidas, resulta necesario conocer primero los datos de entrada de los Hidrogramas, los cuales dependen de una serie de factores que se resumen y presentan en la sub-secciones a continuación

5.1. Datos asociados a Hidrogramas de Crecida.

Cuencas Afluentes a los depósitos.

El primero de estos factores corresponde a las cuencas aportantes a considerar en cada caso, ya que, como fue visto en la sección 4.3, existen depósitos los cuales poseen más de una cuenca afluente. En la Tabla 5.1 se resumen las cuencas aportantes a cada uno de los tranques.

Tabla 5.1 Cuencas afluentes a los depósitos de relaves.

Depósito de Relaves	Cuenca 1	Cuenca 2	Cuenca 3
Tranque Amolanas	Cuenca Amolanas		
Tranque El Gato	Cuenca A	Cuenca B	Quebrada El Gato
Tranque Humo Corral	Cuenca Canal Norte	Cuenca Canal Sur 1	Cuenca Canal Sur2
Tranque El Torito	Cuenca El Torito		

En el caso de los depósitos que poseen más de una cuenca aportante, se consideró (acorde a los estudios hidrológicos) que la precipitación de diseño es la misma para todas. Por otra parte, las características geomorfológicas de cada una de estas se presentaron en la sección 4.3, siendo las utilizadas en las sub-secciones a continuación.

-Hidrograma Unitario Sintético.

Acorde a lo mencionado en la sección 3.1.3, es necesario verificar la zona en la cual se ubican los proyectos, para con ello definir los parámetros regionales que describen (según la DGA) los HUS tipo Linsley en Chile. En este sentido, dado que todos los depósitos se encuentran entre las regiones de Atacama y Valparaíso, los parámetros mencionados corresponden a los de la Zona I. Con lo anterior y en base a los parámetros de la Tabla 3.3, se determinan las variables que definen los HUS para las zonas de estudio, presentes en la Tabla 5.2 a la Tabla 5.5.

Tabla 5.2 Parámetros Ajustados del HUS a la cuenca del Tranque Amolanas

Variable	Unidad	Parámetros HUS
t_p	[hrs]	4,22
t_B	[hrs]	17,15
q_p	[lts/s/mm/km ²]	45,78
Q_p	[m ³ /s/mm]	2,00
t_u	[hrs]	0,80

Tabla 5.3 Parámetros Ajustados de los HUS a las cuencas aportantes al Tranque El Gato

Variable	Unidad	Cuenca A	Cuenca B	Quebrada El Gato
t_p	[hrs]	0,53	0,30	2,02
t_B	[hrs]	3,23	2,01	9,46
q_p	[lts/s/mm/km ²]	238,51	380,87	82,47
Q_p	[m ³ /s/mm]	0,14	0,09	0,58
t_u	[hrs]	0,10	0,05	0,40

Tabla 5.4 Parámetros Ajustados de los HUS a las cuencas aportantes al Tranque Humo Corral.

Variable	Unidad	Canal Norte	Canal Sur 1	Canal Sur 2
t_p	[hrs]	0,34	0,38	0,93
t_B	[hrs]	2,25	2,49	5,05
q_p	[lts/s/mm/km ²]	341,69	309,10	153,22
Q_p	[m ³ /s/mm]	0,12	0,22	0,91
t_u	[hrs]	0,06	0,06	0,20

Tabla 5.5 Parámetros Ajustados del HUS a la cuenca del Tranque El Torito

Variable	Unidad	Parámetros HUS
t_p	[hrs]	1,33
t_B	[hrs]	6,77
q_p	[lts/s/mm/km ²]	114,73
Q_p	[m ³ /s/mm]	1,69
t_u	[hrs]	0,32

-Duración y Distribución de Precipitaciones.

La duración de precipitación adoptada para los depósitos de relaves a estudiar se considera igual a 24 horas, según fue comentado en la sección 3.1.3, mientras que la forma en que estas se distribuyen es acorde a lo planteado por Varas, (1985). En este sentido, se consideraron aquellos Grupos de distribuciones que generen la situación más desfavorable de caudal, siendo estas las presentes en la Tabla 5.6 para cada uno de los depósitos a estudiar.

Tabla 5.6 Grupo de distribución de Varas (1985) adoptado en cada tranque.

Depósito	Cuenca	Grupo
Tranque Amolanas	Cuenca Amolanas	IV
Tranque El Gato	Cuenca A	I
	Cuenca B	I
	Quebrada El Gato	I
Tranque Humo Corral	Canal Norte	III
	Canal Sur 1	III
	Canal Sur 2	III
Tranque El Torito	Cuenca El Torito	III

Es necesario mencionar, que en el caso del tranque El Gato, la distribución adoptada corresponde a la del Grupo I, pero si bien esta no corresponde a la más desfavorable, es la utilizada en el diseño del tranque, por lo cual, se mantiene con el fin de evitar diferencias en la estimación del caudal de diseño, dadas por la metodología aplicada. Los hietogramas de diseño generados a partir de esta distribución para cada uno de los depósitos se presentan en el Anexo G.

-Precipitación Efectiva.

Para determinar la precipitación efectiva (y con ello los hietogramas de precipitación efectiva), es necesario determinar la Curva Número (CN), considerándose en este caso los estimados en cada uno de los estudios hidrológicos revisados, a excepción del Tranque Amolanas, cuya metodología de estimación de la CN se presenta en el Anexo F, dado que no existe información de diseño del depósito. Mencionado lo anterior, los valores de CN para cada proyecto se presentan en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7 Valores de Curva Número y condición antecedente para cada Tranque de Relaves.

Tranque de Relaves	Curva Número	Condición Antecedente
Amolanas	90	III
El Gato	90	-
Humo Corral	89	-
El Torito	91	III

En relación a la condición antecedente de humedad, se consideró siempre el valor de CN adoptado en cada proyecto⁹, la cual solo en el Tranque El Torito se explicita que es de tipo III, correspondiendo a la condición más desfavorable. Así mismo y siguiendo la idea de condición más desfavorable, en el Tranque Amolanas se consideró el mismo criterio. Los Hietogramas de precipitación efectiva se presentan en el Anexo G.

5.2. Hidrogramas y Caudales de Crecidas.

Ya con la información generada en la sección anterior, es posible confeccionar los hidrogramas de crecidas asociados a cada una de las cuencas y proyectos vistos. En este sentido, en el caso de los proyectos que poseían más de una cuenca aportante (Tranque El Gato y Humo Corral), se consideró la superposición de hidrogramas de crecidas de cada sub-cuenca. De esta forma, los Hidrogramas de Crecida asociados a cada depósito se presentan en la Figura 5.1. Así mismo, el caudal de diseño para los 4 depósitos corresponde al máximo valor observado en los hidrogramas de la Figura 5.1 para cada uno de los escenarios de precipitación, presentándose estos entre la Tabla 5.8 y Tabla 5.11.

⁹ En el caso de depósitos de relaves con múltiples cuencas, se utilizó el mismo valor, dado por los estudios vistos.

Hidrogramas de Crecidas Tranques de Relaves

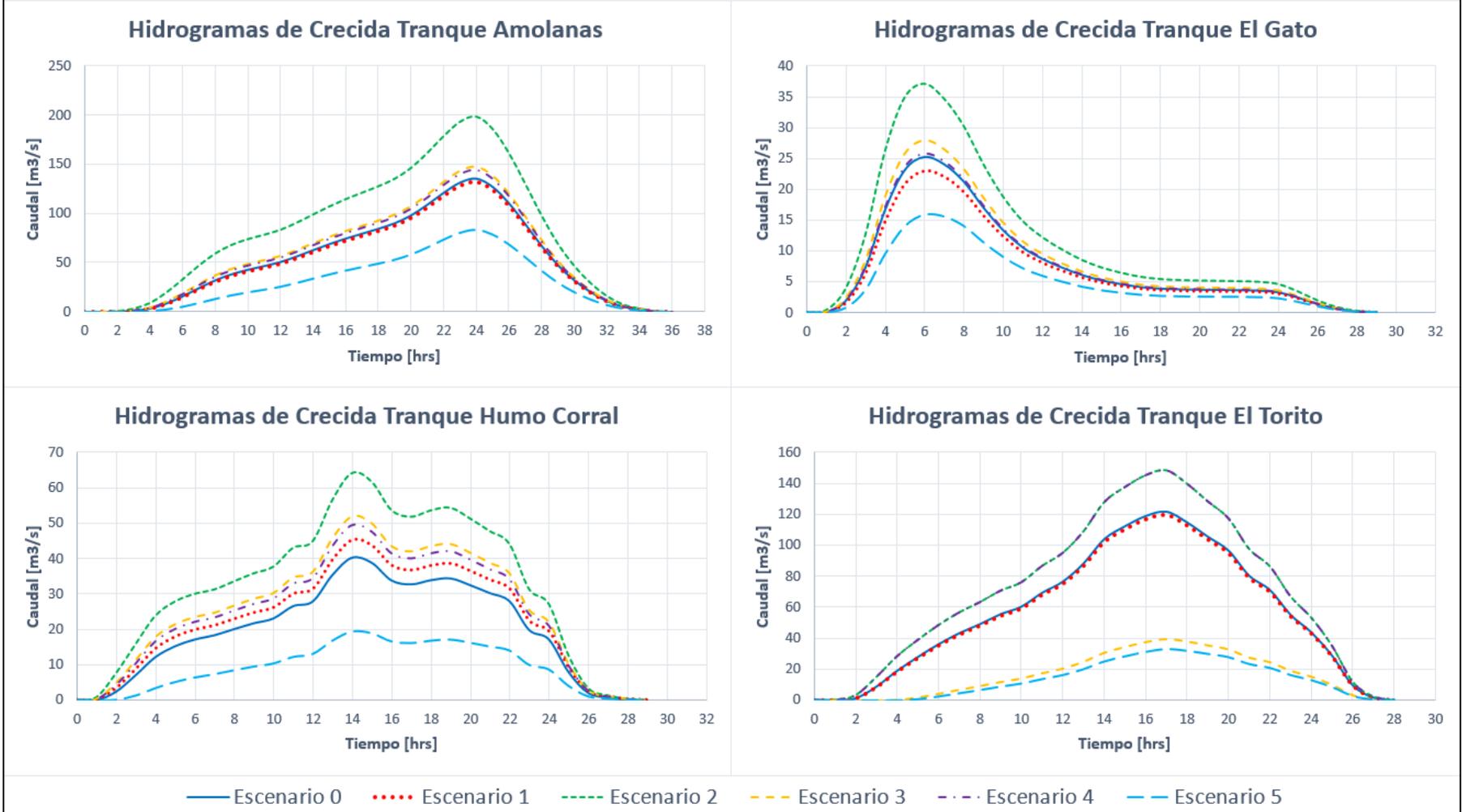


Figura 5.1 Hidrogramas de Crecidas de los Tranques de Relaves considerando los distintos Escenarios de precipitación.

Tabla 5.8 Caudales de Diseño y diferencia porcentual según caso base y Escenarios. Tranque de Relaves Amolanas.

Tranque de Relaves Amolanas			
Escenario	Descripción	Caudal de Diseño [m^3/s]	Δ [%]
0	Precipitación de Diseño Proyecto (2007)	135	-
1	PMP Estacionaria (2018)	132	-3%
2	Máxima PMP No Estacionaria ($n = 20$)	199	+47%
3	Promedio PMP No Estacionaria	148	+9%
4	PMP máxima según año diseño	145	+7%
5	Precipitación No Estacionaria T=10.000 años	83	-39%

Tabla 5.9 Caudales de Diseño y diferencia porcentual según caso base y Escenarios. Tranque de Relaves El Gato.

Tranque de Relaves El Gato			
Escenario	Descripción	Caudal de Diseño [m^3/s]	Δ [%]
0	Precipitación de Diseño Proyecto (2004)	25,3	-
1	PMP Estacionaria (2018)	23,0	-9%
2	Máxima PMP No Estacionaria ($n = 20$)	37,3	+48%
3	Promedio PMP No Estacionaria	27,9	+10%
4	PMP máxima según año diseño	25,8	+2%
5	Precipitación No Estacionaria T=10.000 años	15,9	-37%

Tabla 5.10 Caudales de Diseño y diferencia porcentual según caso base y Escenarios. Tranque de Relaves Humo Corral

Tranque de Relaves Humo Corral			
Escenario	Descripción	Caudal de Diseño [m^3/s]	Δ [%]
0	Precipitación de Diseño Proyecto (2008)	40,8	-
1	PMP Estacionaria (2018)	46,1	+13%
2	Máxima PMP No Estacionaria ($n = 20$)	65,3	+60%
3	Promedio PMP No Estacionaria	52,9	+30%
4	PMP máxima según año diseño	50,3	+23%
5	Precipitación No Estacionaria T=10.000 años	19,7	-52%

Tabla 5.11 Caudales de Diseño y diferencia porcentual según caso base y Escenarios. Tranque de Relaves El Torito.

Tranque de Relaves El Torito			
Escenario	Descripción	Caudal de Diseño [m^3/s]	Δ [%]
0	Precipitación de Diseño Proyecto (2017)	121	-
1	PMP Estacionaria (2018)	120	-1%
2	Máxima PMP No Estacionaria ($n = 20$)	148	+22%
3	Extrapolación PMP No Estacionaria	40	-67%
4	PMP máxima según año diseño	148	+22%
5	Precipitación No Estacionaria T=10.000 años	33	-73%

5.3. Resumen de Resultados

Con el objetivo de relacionar y facilitar el entendimiento de los resultados generados a lo largo de este trabajo, en esta sección se presentan los valores de mayor influencia en la obtención de los caudales de diseño para los distintos escenarios como depósitos de relaves estudiados. En este sentido, se presentan los resultados de los análisis de tendencia, las precipitaciones y los caudales de diseño según cada depósito en la Tabla 5.12 a la Tabla 5.15.

En relación a estas tablas: en la parte superior se incluye el signo de las tendencias estimadas considerando los test no paramétricos y el punto de cambio; en la segunda parte de la tabla, se incluyen los resultados de precipitación y caudal junto a las diferencias porcentuales entre el caso base y cada Escenario; finalmente en la parte inferior se incluye el análisis de frecuencia estacionario y no estacionario, junto a: 1.- los parámetros de la distribución no estacionaria que son considerados variables (μ_t, σ_t) y la dirección de la tendencia en estos (positiva o negativa); 2.- así mismo se incluyen las diferencias porcentuales y el riesgo hidrológico de la estimación No Estacionaria respecto al método Estacionario.

Tabla 5.12 Resumen de Resultados asociados al Tranque de Relaves Amolanas.

Tranque de Relaves Amolanas, Estación Lautaro Embalse				
Resultado de Tendencias				
Parámetro	Intervalo 1	Año Punto de Cambio		Intervalo 2
μ	+	1991		-
σ	+	1986		-
Comparación entre Escenarios de Precipitación y Caudal				
Escenario	Precipitación Diseño	Δ Precipitación	Caudal de Diseño	Δ Caudal
[-]	[mm]	[%]	[m ³ /s]	[%]
0	210,6	-	135,0	-
1	205,7	-2%	131,6	-3%
2	301,4	+43%	198,8	+47%
3	228,7	+9%	147,8	+9%
4	224,2	+6%	144,7	+7%
5	137,4	-35%	83,0	-39%
Comparación entre Análisis de Frecuencia $Tr = 10.000$ años				
Gumbel	Parámetros	$P_{max\ 24\ hrs.}$	Δ	R
	[-]	[mm]	[%]	[%]
Estacionaria	μ, σ	123	-	63,2%
No Estacionaria	$\mu, \sigma_{t(+)}$	137	+11,6%	94,0%

Tabla 5.13 Resumen de Resultados asociados al Tranque de Relaves El Gato.

Tranque de Relaves El Gato, Estación Copiapó				
Resultado de Tendencias				
Parámetro	Intervalo 1	Año Punto de Cambio		Intervalo 2
μ	+	1986		-
σ	+	1986		-
Comparación entre Escenarios de Precipitación y Caudal				
Escenario	Precipitación Diseño	Δ Precipitación	Caudal de Diseño	Δ Caudal
[-]	[mm]	[%]	[m ³ /s]	[%]
0	144,0	-	25,3	-
1	133,7	-7%	23,0	-9%
2	197,2	+37%	37,3	+48%
3	155,8	+8%	27,9	+10%
4	146,5	+2%	25,8	+2%
5	101,5	-30%	15,9	-37%
Comparación entre Análisis de Frecuencia $Tr = 10.000$ años				
Gumbel	Parámetros	$P_{max\ 24\ hrs.}$	Δ	R
	[-]	[mm]	[%]	[%]
Estacionaria	μ, σ	81	-	63,2%
No Estacionaria	$\mu_{t(-)}, \sigma_{t(+)}$	102	+25,5%	99,9%

Tabla 5.14 Resumen de Resultados asociados al Tranque de Relaves Humo Corral.

Tranque de Relaves Humo Corral, Estación Almendral				
Resultado de Tendencias				
Parámetro	Intervalo 1	Año Punto de Cambio		Intervalo 2
μ	+	[-]		+
σ	+	1986		-
Comparación entre Escenarios de Precipitación y Caudal				
Escenario	Precipitación Diseño	Δ Precipitación	Caudal de Diseño	Δ Caudal
[-]	[mm]	[%]	[m ³ /s]	[%]
0	332,0	-	40,8	-
1	372,9	+12%	46,1	+13%
2	523,0	+58%	65,3	+60%
3	425,8	+28%	52,9	+30%
4	405,3	+22%	50,3	+23%
5	169,4	-49%	19,7	-52%
Comparación entre Análisis de Frecuencia $Tr = 10.000$ años				
Gumbel	Parámetros	$P_{max\ 24\ hrs.}$	Δ	R
	[-]	[mm]	[%]	[%]
Estacionaria	μ, σ	167	-	63,2%
No Estacionaria	$\mu_{t(+)}, \sigma$	169	+1,7%	69,9%

Tabla 5.15 Resumen de Resultados asociados al Tranque de Relaves El Torito.

Tranque de Relaves El torito, Estación El torito				
Resultado de Tendencias				
Parámetro	Intervalo 1	Año Punto de Cambio		Intervalo 2
μ	+	[-]		+
σ	-	[-]		-
Comparación entre Escenarios de Precipitación y Caudal				
Escenario	Precipitación Diseño	Δ Precipitación	Caudal de Diseño	Δ Caudal
[-]	[mm]	[%]	[m ³ /s]	[%]
0	516,5	-	121,4	-
1	510,5	-1%	119,9	-1%
2	622,9	+21%	148,3	+22%
3	198,1	-62%	39,6	-67%
4	622,8	+21%	148,3	+22%
5	171,5	-67%	32,7	-73%
Comparación entre Análisis de Frecuencia $Tr = 10.000$ años				
Gumbel	Parámetros	$P_{max\ 24\ hrs.}$	Δ	R
	[-]	[mm]	[%]	[%]
Estacionaria	μ, σ	299	-	63,2%
No Estacionaria	$\mu_{t(+)}, \sigma_{t(-)}$	172	-42,6%	0,0%

De esta forma, en términos generales se presenta en la Tabla 5.16 el promedio de las diferencias porcentuales entre los distintos casos, como así mismo el riesgo hidrológico asociado a los análisis de frecuencia estacionario y no estacionario.

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.

Promedio de Diferencias Porcentuales con el Escenario 0				
Escenario	Descripción	$\Delta_{(+)}$ %	$\Delta_{(-)}$ %	
0	Precipitación de Diseño Proyecto	-	-	
1	PMP Estacionaria (2018)	+12% (1)	-4% (3)	
2	Máxima PMP No Estacionaria	+40% (4)	-	
3	Promedio PMP No Estacionaria	+15% (3)	-62% (1)	
4	PMP máxima según año diseño	+13% (4)	-	
5	$P_{max\ 24\ hrs.}$ No Estacionaria T=10.000 años	-	-45% (4)	
Diferencia Porcentual y Riesgo Hidrológico de Análisis No Estacionario				
Análisis	$\Delta_{(+)}$ %	$\Delta_{(-)}$ %	R_{\uparrow} [%]	R_{\downarrow} [%]
Estacionario	-	-	63,2%	63,2%
No Estacionario	12,9% (3)	-42,6% (1)	88% (3)	0% (1)

Por otra parte, en la Figura 5.2 se incluye la distribución de precipitaciones de diseño de los distintos Escenarios y de los análisis de frecuencia realizados.

Precipitaciones de Diseño según Escenarios

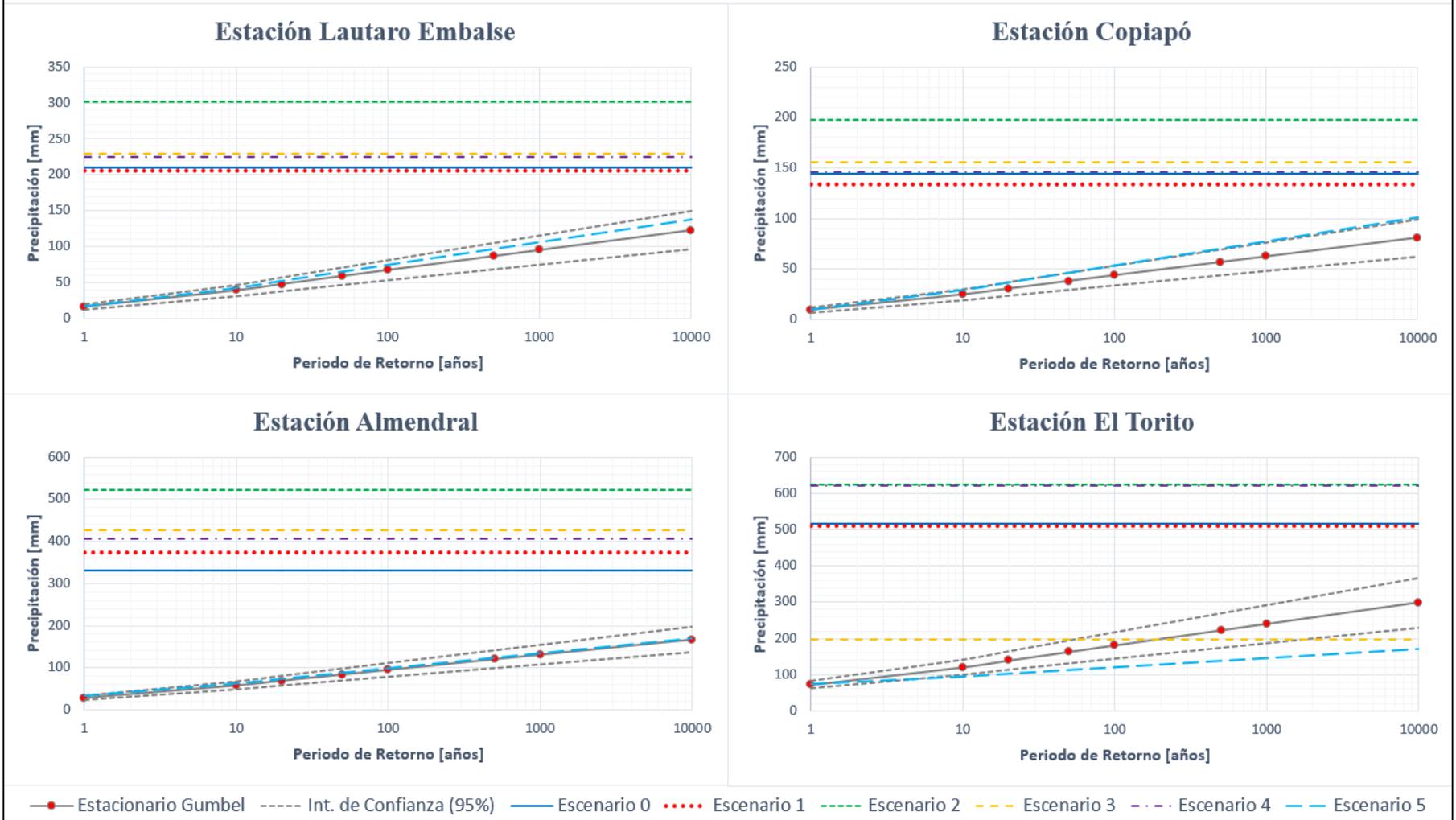


Figura 5.2 Distribución Gráfica de cada una de las estaciones de interés, considerando los distintos Escenarios propuestos. Se incluye análisis de frecuencia estacionario de igual distribución que el caso No Estacionario (Escenario 5).

CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN.

-Zonas de Estudio.

Se debe mencionar la simplificación que se realiza en lo que respecta al área de estudio de los depósitos que no cuentan con información hidrológica del proyecto. En este sentido, si bien se supuso que solo existe una cuenca aportante al Tranque Amolanas (depósito inactivo). Este hecho no es necesariamente cierto, pero dado que no se conoce realmente el área de influencia del depósito (como si ocurre con los depósitos El Gato y Humo Corral), se consideró correcto para esta situación. Esto puede generar impactos al momento de estimar los caudales de diseño, ya que existen una serie de variables que dependen del área aportante a la cuenca, influyendo así en la seguridad de la obra. Además de esto, surge la pregunta de cómo abordar el área de influencia de los depósitos de relaves abandonados, ya que de estos no se posee información alguna y lo más cercano son imágenes satelitales, siendo insuficientes para representar el área de influencia del proyecto, como así mismo de las cuencas aportantes que definen parte del caudal de diseño de las obras.

Por otra parte, al momento de realizar un estudio hidrológico en el caso de depósitos inactivos, existen diferencias en relación a los que cuentan con información hidrológica, tanto en la representación de la información como así mismo de los datos generados (características de las cuencas y curvas hipsométricas). Lo anterior debido a los múltiples criterios que existen en el desarrollo de los proyectos, como así mismo en relación a lo complejo de aplicar una metodología distinta sin contar con información sobre el proyecto. De esta forma, se buscó generar la información suficiente para replicar un proyecto de ingeniería de estas características, siendo similar a la utilizada tanto en los depósitos estudiados como observados de otros proyectos.

-Análisis de Tendencias.

De los valores generados en los test se puede observar que, salvo que existan mayores cambios en la serie de precipitación extremas, no habría diferencias importantes en los resultados asociados a las tendencias generadas sin relleno de información, como es el caso de Lautaro Embalse. Por esta razón, los valores obtenidos en el capítulo 4 de este trabajo se pueden considerar de utilidad, siempre que se cumpla que los datos faltantes sean pocos (menor a un año); ya que en caso contrario podría ocurrir lo visto en la estación Almendral, en donde al considerar 5 años de información pluviométrica extra, se produce un cambio en las tendencias desde un régimen estacionario a uno no estacionario. Lo anterior también abre la pregunta de ¿Qué tan válido es un ajuste de tendencia a futuro si al considerar un par de años extra (por ejemplo, 5) existen cambios en la estacionariedad de la información? En este sentido, realizar un ajuste de tendencias en función del tiempo no parece ser extrapolable a futuro, siendo necesario considerar alguna otra variable o suponer que la serie se mantendrá estacionaria.

Al considerar un punto de cambio en los análisis, existen diferencias importantes en relación a las tendencias identificadas por el método de Sen y Mann-Kendall sin considerar estos puntos. Lo anterior, ya que en general se observaba un aumento inicial importante seguido de una disminución de menor pendiente, tanto en la media como en la varianza de las series, lo cual, si bien generaba que existiese un alza general en la tendencia detectado por los test, resultaba no ser concordante con la forma de las series móviles.

Respecto a los intervalos móviles considerados en el análisis de tendencia, estos corresponden a ventanas móviles de 20 años de información, pero por ejemplo Ricchetti, (2018) consideró ventanas de 19, 29 y 31 años móviles (para diferentes análisis relacionados con precipitaciones y temperaturas). Lo anterior genera incertidumbre en relación a que ventana temporal considerar, ya que, ventanas de menor longitud poseen un mayor número de datos a analizar, pero no son suficientes para atenuar las variaciones de los estadísticos en el tiempo, dificultando la detección de tendencias; mientras que ventanas de mayor longitud logran suavizar las series, pero a cambio de generar una menor cantidad de datos para analizar, al menos según la metodología planteada.

A modo de ejemplo, en la realización de este trabajo se consideró 20 años como ventana temporal, principalmente por la cantidad de información disponible (un dato a nivel anual, con aproximadamente 50 años de información); ya que, al considerar una ventana de tiempo mayor, no existirían suficientes datos para generar los Escenarios 2 al 4; mientras que una ventana menor dificultaba la representación de tendencias en los estadísticos. De esta forma, no existe un criterio único para definir el tamaño de la ventana temporal a utilizar, sino más bien, la elección de esta se realiza en función del criterio del modelador y la información disponible.

Por otra parte, -de los casos estudiados- en el tranque El Torito se observa una particularidad dada por los valores generados en el análisis de tendencia, exhibiendo un aumento en la media, pero una disminución en la desviación estándar de los datos, lo cual podría generar incertidumbre en relación a los valores de precipitación a obtener; pero, como es de esperarse, dado que la estimación de la precipitación por medio del método de Hershfield depende de: 1.- el factor de frecuencia K_m y 2.-su ponderación por la desviación estándar de la muestra, esta última tiene una mayor incidencia sobre el cálculo y obtención de la precipitación de diseño.

-Precipitación Máxima Probable

A lo largo de este trabajo se estimó bajo distintas metodologías un valor asociado a la PMP según el método de Hershfield y la simplificación de Stowhas, (1983), siendo este método el utilizado en distintos proyectos de ingeniería a nivel de país y en las 4 obras analizadas. A pesar de esto, acorde a la WMO, (2009) este tipo de métodos son de mínimos esfuerzo, utilizados en etapas preliminares y generalmente no son confiables, siendo necesario realizar estudios complementarios que avalen (o nieguen) estos resultados.

En este sentido, es posible notar según la experiencia que este método no necesariamente corresponde a una correcta estimación de diseño, sino más bien, una primera aproximación que se debe contrastar con otras para definir la magnitud de la precipitación de diseño. A pesar de esto, la normativa actual a nivel de país no solicita estudios extras que avalen estos resultados, más allá de verificar que sea superior al análisis de frecuencia de periodo de retorno de 10.000 años, existiendo así un vacío que no ha sido considerado en los proyectos de diseño, y el cual debiese ser abordado en el futuro, acompañado –por ejemplo- con alguna de las metodologías propuestas a lo largo de esta memoria, e incorporando así la no estacionariedad de la información.

Lo anterior también abre la pregunta ¿Tiene sentido comparar análisis de frecuencia con estimaciones de PMP?, ya que ambos corresponden a métodos con distintas bases, y en general se observa que existen diferencias importantes, siendo un 45% menor el análisis de frecuencia. En línea con esto, la PMP determinada por Koutsoyiannis & Baloutsos, (2000) corresponde a una precipitación de periodo de retorno cercano a 60.000 años, lo cual ratifica las diferencias que se pueden encontrar entre ambos y la necesidad de verificar que tipo de análisis se ajusta mejor a la información, o si existe un punto medio entre ambos.

En función de esto y en términos de normativa, se cree necesario definir uno de los dos métodos a considerar para el diseño, ya que (según lo expuesto) ambos entregan resultados de diferente magnitud y no comparables. De esta forma e independiente del método seleccionado, se debe incluir el análisis no estacionario con el fin de mejorar los actuales requerimientos de diseño, esperando disminuir con ello la incertidumbre de las estimaciones.

Así mismo, la simplificación realizada por Stowhas fue desarrollada hace más de 30 años, con un menor número tanto de estaciones como registros de precipitación, implicando que la media como varianza de las series se vean modificadas al considerar información actualizada. Lo anterior se puede comprobar al observar las series anuales de máximas precipitaciones diarias de las estaciones utilizadas, en donde se ve que los máximos de las series se encuentran en el año 1997 en tres de los cuatro casos revisados, lo cual, ocurrió 15 años después del trabajo desarrollado por Stowhas.

Según Lagos, (2012) y Stowhas, (1983), la PMP de Hershfield tiende a ser un valor mayor al que realmente pueda suceder (sobrestima la PMP), siendo mejor considerar un método Hidrometeorológico en la estimación de crecidas. Si además de esto se considera que la PMP de Hershfield ya corresponde a una maximización de una distribución de probabilidades, los resultados obtenidos por medio de los distintos Escenarios, estarían sobre maximizando este valor, sin representar finalmente las características de la zona de estudio (de forma similar a lo expuesto en párrafos anteriores). A pesar de lo anterior, si se consideran válidos para el Tranque Humo Corral (Región de Coquimbo) los resultados generados por Lagos, (2012) de PMP en 24 horas estimados en base al registro de información entre 1960-1999 y la maximización de tormentas locales según PDA de la Cuenca Puclaro; se observa que solo el Escenario 2 (523 *mm*) se acerca a los ~610 *mm* determinado por el autor. Lo anterior se puede deber en parte a que la zona de estudio como el registro de información considerado es otro, y con ello la información utilizada, pero aun así no se descarta que las diferencias que existen se deban principalmente a la variabilidad del método de Hershfield.

-Análisis de Frecuencia No Estacionario

Al estimar las precipitaciones asociadas a distintos periodos de retornos en los Tranque El Gato y Amolanas, existieron diferencias importantes entre la distribución Gumbel y GEV (10000 [mm] en algunos casos). La razón de estas diferencias se debe por una parte a la serie de valores extremos, dado por el régimen de precipitaciones del Norte del país, con la existencia de algunos años de precipitaciones extremas cercanas (y en algunos casos iguales) a ceros, lo que producía que el ajuste de las distribuciones Gumbel estuviese influenciado mayoritariamente por valores extremos “pequeños” (esto a pesar de quitar los valores nulos de la serie), con lo cual el ajuste tendía a subestimar la precipitación de diseño. Así mismo, según Koutsoyiannis & Baloutsos, (2000) esto se puede deber al largo del registro de información considerado, ya que al ser mayor la cantidad de años a estudiar (mayor a 30 años), esta distribución tiende a subestimar los valores extremos relacionados a altos periodos de retorno, ya que no representa bien la cola de la distribución. A pesar de lo comentado, el ajuste de la distribución GEV presentaba una dispersión mayor en su estimación en los Tranque El Gato y Amolanas, motivo por el cual se optó por considerar la distribución Gumbel.

Según Cai & Hames, (2011) la información mínima necesaria para realizar buenas inferencias estadísticas de ajustes GEV, depende de la forma en que se distribuye la variable de estudio y el periodo de retorno de interés, siendo necesario al menos (en promedio) 50 años de información para realizar una inferencia sobre el periodo de retorno de 100 años. De esta forma, en ninguno de los casos analizados es de esperarse que se cumpla lo anterior, resaltando así la influencia del largo del registro de información, en como este puede afectar los ajustes y con ello, las estimaciones principalmente de altos periodos de retorno como los revisados en este trabajo, en donde la incertidumbre predomina.

Por otra parte, en relación a los análisis de tendencia y la estimación considerando un análisis de frecuencia no estacionario de precipitación, existe una concordancia entre las tendencias encontradas en los estadísticos de la serie, como así mismo en los ajustes de los parámetros de las distribuciones no estacionarias. Lo anterior se cumplió siempre que en los estadísticos no existiese punto de cambio, ya que, en los casos contrarios se comprobó que el análisis de frecuencia no estacionario no era estadísticamente significativo (estaciones Lautaro Embalse y Copiapó). De esta forma, el Tranque El torito que no posee punto de cambio en la varianza, presenta una mejora significativa en comparación al análisis estacionario, al considerar el parámetro de escala variable.

-Precipitaciones de diseño

Primero es necesario mencionar un caso particular de la estimación de precipitaciones de diseño, correspondiente al Tranque de Relaves Humo Corral, ya que, al observar la metodología de obtención de la precipitación de diseño, fue posible ver que no se consideraron los últimos (en ese momento) 7 años de información hidrológica a pesar de estar completas las series, lo cual conlleva a diferencias en los resultados y a errores que en su debido momento el ente revisor no logro percatarse (o consideró). Así mismo, el Tranque El Torito tampoco realiza una corrección de la media y varianza en el método de Hershfield, pudiendo generar subestimaciones (o sobreestimaciones) en el cálculo de las precipitaciones de diseño.

En este sentido y sumado a la alta variabilidad del método de Hershfield vista, pareciera (a modo de crítica) no existir un mayor esfuerzo o interés en la estimación de los caudales de diseño en los proyectos revisados, utilizando metodologías e información suficientes a nivel de normativa, pero insuficientes para garantizar la seguridad de las personas como el medio ambiente.

En relación a las precipitaciones de diseño en cada Escenario, se desprende lo siguiente:

- a) En el Escenario 1 no se presentan mayores cambios en relación al caso base, siendo la mayor diferencia del orden de un $\pm 12\%$. Lo anterior se debe en parte a que los años de diseño de los depósitos de relaves (Escenario 0) en general fueron realizados en momentos en que la PMP se encontraba cercano al máximo de la serie estacionaria (según la serie generada en el Escenario 4). A pesar de ello, a medida que el año de diseño se encuentra más alejado del año actual, se nota una mayor variación de los resultados. Si bien la estimación de este Escenario no depende de los análisis de tendencia realizados, se esperaría que fuese acorde a las tendencias generadas, pero resulta no presentarse esto, ya que en los primeros tres depósitos las tendencias eran al alza, y solo en el caso de Almendral existió un aumento acorde a este análisis.

- b) El Escenario 2 presenta una variación mayor en relación al caso base, siendo en promedio del orden del +40% según los depósitos estudiados, lo cual demuestra el efecto de estimar la PMP por medio de ventanas móviles según las tendencias en los estadísticos. La razón de que siempre sea mayor para los distintos proyectos, se debe en parte a las tendencias consideradas (al alza), como así mismo a que este se estima en base a 20 años de información y tomando el máximo valor de la serie, generando un aumento en la varianza y con ello en la PMP no estacionaria. Finalmente, el único caso que presenta una variación menor al 40% corresponde a El Torito, en donde la desviación estándar presenta una tendencia a la baja, lo cual demuestra su influencia en los resultados, pero que en este caso es menor, dado que el Escenario 2 toma el máximo valor de la serie no estacionaria.
- c) El Escenario 3 es el que mayor cambio presenta en relación al caso base (-60%), lo cual se debe a la metodología utilizada, en donde se extrapola los valores de PMP estimadas en el Escenario 2 acorde a la tendencia que presenten estas (ajuste lineal) al año 2100. A pesar de esto, el único caso que fue estimado en base a este ajuste corresponde a la estación El Torito, ya que fue el único en donde la serie de PMP no estacionaria presentaba un ajuste de las tendencias acorde a la serie. En los demás casos solo fue posible considerar el promedio de los Escenarios, siendo siempre mayor al caso base.
- En relación al valor del Escenario 3 del Tranque El Torito, la estimación genera una variación extrema que no necesariamente representa de buena forma el futuro, y por ende, un valor a considerar para diseñar un depósito. En este sentido, suponer que la tendencia se mantiene al futuro no parece un supuesto válido, descartándose como estimación.
- Una opción que podría mejorar los resultados expuestos del Escenario 3, es considerar escenarios de cambio climático en su estimación, determinando un valor de PMP estacionaria, pero con información al año 2100 y obteniendo así un resultado con una mayor coherencia, a diferencia del caso considerado en donde se realiza una extrapolación del ajuste lineal al año 2100. Así mismo, considerar el ajuste de tendencias (siempre que esta sea significativa) a futuro y en función del tiempo, carece de sentido, ya que, al depender del tiempo siempre aumentará o disminuirá según el ajuste de los estadísticos; por ello, el análisis de proyecciones futuras para estimar la PMP debe ser considerado en función de alguna otra covariable que permita un ajuste con mayor sentido.
- d) El Escenario 4, en general presenta un aumento en relación al caso base, en promedio del 13% al alza, siendo siempre positivo dado que considera el año de diseño con la mayor estimación de PMP en el registro, de forma similar al Escenario 2. Si bien este método no depende explícitamente de las tendencias analizadas sobre los estadísticos, podría considerarse una primera medida en relación a considerar la variación de la PMP en el diseño de depósitos de relaves, valor que no resulta ser único y dependiente fuertemente del año de diseño considerado. Es posible notar así mismo de la serie generada, que el método de Hershfield atenúa el valor de la PMP a medida que se consideran más años, pero sufriendo aumentos en caso que aparezcan nuevos extremos mayores a la media de la serie.
- e) Finalmente, el Escenario 5 siempre resulta ser menor al caso base (en promedio un -45%), lo cual indica que la precipitación asociada a un periodo de retorno de 10.000 años, nunca es considerada en el diseño del depósito. A pesar de esto, al comparar el riesgo hidrológico con la distribución estacionaria, en tres de los cuatro casos revisados existe un aumento del riesgo promedio del 25% (88% en total), lo cual muestra el efecto de considerar la no estacionariedad en los análisis de frecuencia.

La aplicación de los distintos Escenarios mencionados, permitió mostrar diferencias de distintas magnitudes en los resultados. A pesar de ello, considerar todos estos al momento de realizar un estudio hidrológico, resulta complejo y largo (sin considerar además la decisión de: ¿cuál escoger de estos?), por lo cual, en relación a los métodos desarrollados y vistos a lo largo de este trabajo, se considera que el Escenario 3 asociado al promedio de PMP no estacionarias entrega valores conservadores y suficientes como primera aproximación en la inclusión del análisis no estacionario. A pesar de esto, se debe contrastar con otros métodos para verificar si es suficiente esta estimación (por sí sola) para ser considerada en el diseño de depósitos de relaves.

-Caudales de Diseño.

De los hidrogramas de crecidas asociados a depósitos con múltiples cuencas aportantes, fue posible observar que la cuenca de mayor área es la que influye mayoritariamente en el caudal de crecida, debiéndose principalmente a las diferencias de tamaño entre estas. De esta forma, en términos de caudal y según la diferencia de tamaño que exista entre las cuencas aportantes, estas últimas podrían ser obviadas según sea el caso.

La magnitud de los caudales de diseño, se encuentra asociada a las características geomorfológicas de la cuenca y a los hietogramas de precipitación efectiva. En este sentido, si bien las precipitaciones de diseño corresponden al input principal de la estimación, la geomorfología, duración y distribución de la precipitación son los que definen finalmente la magnitud del caudal, y con ello el diseño de los depósitos. A modo de ejemplo, es posible notar de los resultados obtenidos, que la precipitación de diseño estimada en la estación Almendral es del orden de 330 [mm], pero el caudal estimado corresponde a 34 [m³/s] en la sub-cuenca principal y 2 [m³/s] en la sub-cuenca menor. Por esta razón, el valor de precipitación de diseño por sí solo no es suficiente para estimar el riesgo asociado que puede existir en un depósito en particular, siendo necesario la obtención del caudal de diseño de la obra.

A pesar de esto, dado valores de precipitación y caudal de diseño de un depósito existente, es posible determinar a partir de una precipitación de diseño distinta, un nuevo caudal, sin aplicar relaciones precipitación-escorrentía. Permitiendo con esto evaluar de forma rápida diferencias en el caudal de diseño, y con ello, verificar las condiciones de las obras existentes (o a desarrollar).

Lo anterior se fundamenta por las diferencias porcentuales vistas entre distintas precipitaciones y caudales de diseño, las que se mantienen aproximadamente iguales en los casos de estudio. A pesar de esto, lo anterior se encuentra sujeto a: 1.- las relaciones precipitación-escorrentía utilizadas en el proyecto, siendo necesario verificar que sean las mismas a las utilizadas en esta memoria (Ver sección 3.1.3); y 2.- la magnitud de las precipitaciones de diseño, verificando que estas sean mayores al menos a las abstracciones iniciales. De otra forma, no es posible asegurar en función de los resultados obtenidos, que estas diferencias entre precipitación y caudal se mantengan.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES.

7.1. Conclusiones.

Del objetivo relacionado a la identificación de los distintos depósitos de relaves que se pueden encontrar vulnerables según el régimen no estacionario de precipitaciones, se logró caracterizar 4 de estos, mientras que la revisión del estado de los demás si bien no fue posible realizarlo debido a la necesidad de definir las estaciones cercanas a los depósitos y realizar un estudio sobre las mismas; es posible en función de los análisis de tendencias desarrollados, realizar conjeturas de aquellos depósitos de relaves que se pueden encontrar vulnerables o expuestos a la no estacionariedad y extensión en el registro de la información.

Del total de estaciones analizadas (118) en las macro zonas Norte y Centro del país, al menos el 63% presenta una tendencia en la media de los datos (ya sea al alza o a la baja), mientras que un 68% de las series presenta tendencia en la varianza. En general no se observan regiones con un régimen en particular, pero aproximadamente 2/3 de las series analizadas, exhiben un comportamiento no estacionario en la media o la varianza. De esta forma, se demuestra la existencia de un régimen no estacionario en las series anuales de máximas precipitaciones diarias, por medio de distintos test de análisis de tendencias.

Los test de Mann-Kendall y Sen no son siempre suficientes para caracterizar tendencias en las series estudiadas, siendo necesario la inspección visual de los ajustes y descartar la existencia de puntos de cambios que puedan modificar la dirección de la tendencia, y con ello el régimen de precipitación. Lo anterior también se ve reflejado en los ajustes de distribución GEV no estacionarios de las estaciones Lautaro Embalse y Copiapó, en donde, al existir un punto de cambio en la serie analizada, el ajuste resulta no ser mejor (estadísticamente) que el análisis estacionario.

En relación a las precipitaciones estimadas según los distintos escenarios, la extensión en el registro de información (Escenario 1) en tres de los cuatro casos resultó ser menor al caso base, con una diferencia en promedio del -4%; a pesar de esto, la magnitud de la diferencia depende del año de diseño del tranque (Escenario 0), pudiendo existir diferencias mayores en otras obras que consideren (o hayan considerado) un registro de información distinto (ya sea mayor o menor).

El Escenario 2 correspondiente a la PMP por medio de ventanas móviles de 20 años es siempre mayor al caso base, encontrando una diferencia en promedio del +40% y máxima del +58%, siendo acorde a las tendencias. A pesar de esto, su estimación se encuentra ligada al largo de la ventana móvil considerada, siendo menor las diferencias según una ventana de mayor longitud y viceversa.

El escenario 3 considerando una extrapolación al año 2100 solo fue posible llevarlo a cabo en el caso del Tranque El Torito, en donde existe una diferencia del 62% a la baja; en los demás casos se consideró un promedio de las PMP no estacionarias estimadas en el Escenario 2, siendo siempre mayor en relación al caso base y en promedio un +15%. De esta forma, se descarta adoptar una extrapolación al año 2100 en función del tiempo ya que, si bien la variación es mayor, supondría que en algún punto (año) y considerando una tendencia a la baja, la precipitación sería 0.

El Escenario 4 resulto ser siempre superior al caso base, en promedio un +13%, siendo posible notar que, al variar el año de diseño del depósito la PMP estacionaria sufre cambios importantes en su estimación, llegando a ser del orden de 200 [mm] como sucedió en El Torito.

El Escenario 5 correspondiente al análisis de frecuencia no estacionario, siempre fue menor en comparación al caso base, en promedio un -45%; aunque comparando el riesgo hidrológico con el análisis de frecuencia estacionario de igual distribución, en tres de los casos fue mayor y con un riesgo promedio del 88%, un 25% mayor al estacionario. Con esto, se comprueban diferencias significativas entre estimar la PMP y realizar un análisis de frecuencia, siendo necesario verificar la validez que existe en la normativa actual asociada la comparación de estos dos métodos, ya que en ningún caso lo son. Con lo anterior solo se considera la PMP, que no necesariamente representa las condiciones de la zona de estudio (al menos) cuando se estima según el método de Hershfield.

De esta forma, se puede observar que existen diferencias significativas según el Escenario de diseño, siendo del orden del 58% al alza y -62% a la baja en los peores casos, dependiendo de la metodología de estimación de la precipitación de diseño y el régimen no estacionario de la media y varianza considerado. Así mismo, si se consideran los análisis de frecuencia no estacionarios, existe un riesgo hidrológico promedio de los tranques de relave del 88% cuando alguno de los estadísticos presenta tendencias al alza, a diferencia del 63% asociado a un análisis de frecuencia estacionario (25% mayor) al año 10.000; mientras que al año 2100, existe un aumento promedio del 3% del riesgo (3,82%) en comparación al caso estacionario (0,82%).

Lo anterior permite verificar los cambios en el caudal asociado a un régimen estacionario, generando que, desde un punto de vista no estacionario exista una mayor vulnerabilidad de la obra, siempre y cuando los estadísticos presenten tendencias al alza. Se resalta con esto la importancia de generar distintos criterios de diseño, como así mismo la inclusión de análisis no estacionarios, los que pueden traer consecuencias al no ser incluidos en la estimación y determinación del diseño hidrológico de los pasivos mineros.

La estimación de la PMP según intervalos móviles y estadísticos variables, permitió identificar la mayor influencia que posee la varianza por sobre la media en la estimación de la PMP, resaltando así la necesidad de no solamente considerar los cambios de la media de los datos, sino también de la varianza en la estimación de la precipitación de diseño, al menos en los métodos estadísticos. Lo anterior también se observa en los análisis de frecuencia no estacionarios de los tranques Humo Corral y El Torito, en donde el primero posee una tendencia significativa en la media; mientras que el segundo en la varianza (ambos sin puntos de cambio). De esta forma se observa que el análisis no cambia significativamente en relación al caso estacionario cuando se considera un ajuste lineal de la media; a diferencia de la varianza, la que produce un cambio significativo en el ajuste no estacionario, quedando fuera del intervalo de confianza (95%) del caso estacionario.

Al aplicar las mismas relaciones precipitación-escorrentía, se nota que los caudales de diseño asociados a distintos Escenarios, mantienen aproximadamente las mismas diferencias porcentuales que las precipitaciones de diseño. A pesar de esto, la precipitación de diseño como un valor para medir el riesgo no es suficiente, ya que la proporcionalidad que existe no implica conocer la magnitud de la crecida, la cual depende de las características geomorfológicas de la cuenca aportante y la forma en que se distribuya la precipitación temporalmente (hietogramas). Siendo este último factor el que condiciona mayoritariamente el caudal, y con ello el diseño.

Finalmente según lo mencionado, se logra cumplir a cabalidad los objetivos de este trabajo, resaltando la necesidad de realizar estudios que incluyan análisis no estacionarios para realizar los diseños hidrológicos de los distintos pasivos ambientales mineros; ya que, al cambiar la metodología de estimación de precipitación, los caudales de diseño presentan diferencias importantes que pueden comprometer la seguridad de los depósitos de relaves, y con ello, la de personas, localidades cercanas y el medio ambiente. Si se considera además que 170 de los 720 tranques de relaves que existen en el país se encuentran abandonados, vale decir, sin medidas de contingencia o acordes a la actual normativa, se amplifica el riesgo y con ello la necesidad de considerar estas metodologías en criterios de diseño futuros.

7.2. Trabajo a Futuro.

Si bien para determinar la PMP se recomienda el uso de métodos hidrometeorológicos, en Chile es usualmente utilizado en el diseño de relaves el método de Hershfield, por medio de la simplificación del factor de frecuencia de Stowhas ($K_m = 11$), que resulta de una estimación presentada hace más de 30 años. En este sentido, la validez de este factor se puede ver afectado tanto por el aumento del registro de información como el número de estaciones existentes, con lo cual un trabajo a futuro a realizar corresponde a actualizar y verificar que este factor no se haya modificado con el pasar de los años. Así mismo es necesario comprobar si este valor es suficiente a nivel de país o es necesario estimar uno acorde a distintas zonas, ya que no necesariamente el régimen de precipitaciones se distribuye de igual forma a lo ancho y largo del país.

Por otra parte, se debe considerar la realización de un análisis de tendencias en series de precipitación extrema a nivel de país, con el fin de caracterizar e identificar posibles zonas en donde la información quede representada por un régimen no estacionario. Una opción para realizar esto corresponde a utilizar el producto grillado “CR2 met”, que contiene estadísticas diarias de precipitación entre los años 1979-2018 del territorio chileno. Si bien esta última no es necesariamente suficiente, pudiendo existir diferencias con estaciones de un mayor registro, permitiría tener una primera aproximación del problema, la cual pueda ser incluida en el criterio de diseño de proyectos futuros.

Finalmente, en la normativa se debe considerar la actualización de los criterios de diseño, incluyendo la no estacionariedad de las series en el diseño de relaves, tanto de la metodología de PMP no estacionaria desarrollada, como así mismo del análisis de frecuencia no estacionario.

BIBLIOGRAFÍA

Advanced Mining Technology Center (AMTC), (2019). “Estado del Arte de cambio climático y evolución de normativa, Informe Final”. Estudio para Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO).

Álvarez, G. & Escalante, C. (2016). “Análisis de frecuencias no estacionario de series de lluvia anual”. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7, pp. 71-88.

Aranda, D. F. C. (2018). “Ajuste con momentos l móviles de la distribución gve con parámetros variables de ubicación y escala”. *Agrociencia*, 52(7), 933-950.

Arcadis (2018). “Actualización Estudio Hidrológico Tranque El Torito”. Ingeniería del Estudio de Impacto Ambiental Continuidad Operativa Tranque El Torito para Angloamerican Sur, División El Soldado.

Bayazit, M. (2015). “Nonstationarity of Hydrological Records and Recent Trends in Trend Analysis: A State-of-the-art Review”. *Environmental Processes*, 2, pp. 527-542.

Berríos, F. (2008). “Análisis espacial de hietogramas para la estimación de caudales de diseño”. Memoria para optar al título de ingeniero civil, Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.

Cai, Y., & Hames, D. (2010). “Minimum sample size determination for generalized extreme value distribution”. *Communications in Statistics—Simulation and Computation*, 40(1), 87-98.

Carrollo, M. (2012). “Regresión Lineal Simple” [31]. Recuperado 31 Agosto, 2019, de: http://eio.usc.es/eipc1/BASE/BASEMASTER/FORMULARIOS-PHP-DPTO/MATERIALES/Mat_50140116_Regr_%20simple_2011_12.pdf

Cheng, L., AghaKouchak, A., Gilleland, E., & Katz, R. W. (2014).” Non-stationary extreme value analysis in a changing climate”. *Climatic change*, 127(2), 353-369.

Cheng, Y., He, H., Cheng, N., & He, W. (2016). “The effects of climate and anthropogenic activity on hydrologic features in Yanhe River”. *Advances in Meteorology*.

Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., & Saldarriaga, J. G. (1994). “Hidrología aplicada” (No. 551.48 C4H5).

Clarke, T. (2013). “How should trends in hydrological extremes be estimated?”. *Water Resources Research*, 49(10), 6756-6764.

Compañía Minera San Gerónimo (2007). “Estudio de Impacto Ambiental Tranque de Relaves Humo Corral”.

Daza, J. (2016). “Aplicación del enfoque no estacionario para la estimación de áreas inundables en la cuenca del río Tunjuelo”. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Magister en Ingeniería-Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia.

De Paola, F., Giugni, M., Pugliese, F., Annis, A., & Nardi, F. (2018). “GEV parameter estimation and stationary vs. non-stationary analysis of extreme rainfall in African test cities”. *Hydrology*, 5(2), 28.

Dirección General de Aguas. (2004). “Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del Río Copiapó”.

Dirección General de Aguas. (2016). “Guías Metodológicas para presentación y revisión técnica de proyectos de modificación de cauces naturales y artificiales”.

Dirección General de Aguas. (2017). “Actualización del Balance Hídrico Nacional”.

Easterling, D. R., Evans, J. L., Groisman, P. Y., Karl, T. R., Kunkel, K. E., & Ambenje, P. (2000). “Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review”. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(3), 417-426.

Fattorelli, S., & Fernandez, P. C. (2011). “Diseño Hidrológico”, segunda edición en español, edición digital.

García, F. (2007). “Modelo de Balance Hídrico del Tranque de Relaves Ovejería”. Memoria para optar al título de ingeniero civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Girardi, B. (2017). “Obtención de relaciones para la aplicación del método del hidrograma unitario sintético en la zona altiplánica de la XV, I y II región de Chile”. Memoria para optar al título de ingeniero civil, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María.

Gocic, M., & Trajkovic, S. (2013). “Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia”. *Global and Planetary Change*, 100, 172-182.

Golder Associates (2010). “Determinación de Caudales Máximos Instantáneos – Lomas Bayas”. Estudio Hidrológico para Compañía Minera Xstrata Lomas Bayas (CMLXB).

Groisman, P. Y., Knight, R. W., Easterling, D. R., Karl, T. R., Hegerl, G. C., & Razuvaev, V. N. (2005). “Trends in intense precipitation in the climate record”. *Journal of climate*, 18(9), 1326-1350.

Hamed, K. & Rao, R. (1997). “A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data”. *Journal of Hydrology*, 204, pp. 182-196.

Hamed, K. H. (2016). “The distribution of Spearman's rho trend statistic for persistent hydrologic data”. *Hydrological Sciences Journal*, 61(1), 214-223.

Hartford, D. N., & Baecher, G. B. (2004). “Risk and uncertainty in dam safety”. Thomas Telford.

Hernández, H., Galleguillos, M., Estados C. (2016). “Mapa de Cobertura de Suelos de Chile 2014: Descripción del Producto”. Laboratorio de Geomática y Ecología de Paisajes (GEP), Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza (CFCN), Universidad de Chile.

Hershfield, D. M. (1965). “Method for estimating probable maximum rainfall”. *Journal-American Water Works Association*, 57(8), 965-972.

International Copper Alliance (2018). “El impacto de la minería del cobre en Chile, Implicancias Económicas y Sociales para el País”. Recuperado: 26, Agosto, 2019 de <https://www.procobre.org/es/wp-content/uploads/sites/2/2018/04/ica-summary-document-el-impacto-de-la-mineria-del-cobre-en-chile-vf-04.04.2018.pdf>.

JO Ingeniería (2016). “Ingeniería conceptual avanzada depósito de relaves filtrado El Gato, Informe Hidrológico de Sitio”. Informe Hidrológico para S.C.M. Atacama Kozan.

- Khaliq, M. N., Ouarda, T. B. M. J., Ondo, J. C., Gachon, P., & Bobée, B. (2006). "Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review". *Journal of hydrology*, 329(3-4), 534-552.
- Koutsoyiannis, D. (2006). "Nonstationarity versus scaling in hydrology". *Journal of Hydrology*, 324(1-4), 239-254.
- Koutsoyiannis, D., & Baloutsos, G. (2000). "Analysis of a long record of annual maximum rainfall in Athens, Greece, and design rainfall inferences". *Natural Hazards*, 22(1), 29-48.
- Kundzewicz, Z. W., & Robson, A. J. (2004). "Change detection in hydrological records—a review of the methodology/revue méthodologique de la détection de changements dans les chroniques hydrologiques". *Hydrological sciences journal*, 49(1), 7-19.
- Lagos, M. (2012). "Impacto del Cambio Climático en eventos extremos y análisis de la vulnerabilidad de algunas obras hidráulicas en Chile". Memoria para optar al título de ingeniero civil, departamento de ingeniería civil, Universidad de Chile.
- Liang, Z. M., Hu, Y. M., & Wang, J. (2011). "Advances in hydrological frequency analysis of non-stationary time series". *Advances in Water Science*, 22(6), 864-871.
- Madsen, H., Lawrence, D., Lang, M., Martinkova, M., & Kjeldsen, T. R. (2014). "Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe". *Journal of Hydrology*, 519, 3634-3650.
- Ministerio de Minería (2007). "Decreto Supremo N° 248: Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves". *Diario Oficial de la República de Chile. Hydrological Sciences Journal*, 49, pp. 7-19.
- Ministerio de Obras Públicas (1995), "Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica".
- Ministerio de Obras Públicas (2015). "Decreto n°50: Aprueba Reglamento a que se Refiere el Artículo 295 Inciso 2°, del código de aguas, estableciendo las condiciones técnicas que deberán cumplirse en el proyecto, construcción y operación de las Obras Hidráulicas identificadas en el artículo 294 del referido texto legal". *Diario Oficial de la República de Chile*.
- Mondal, A., Kundu, S., & Mukhopadhyay, A. (2012). "Rainfall trend analysis by Mann-Kendall test: A case study of north-eastern part of Cuttack district, Orissa". *International Journal of Geology, Earth and Environmental Sciences*, 2(1), 70-78.
- Parey, S., Hoang, T. T. H., & Dacunha-Castelle, D. (2013). "The importance of mean and variance in predicting changes in temperature extremes". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(15), 8285-8296.
- Quintana, J. M., & Aceituno, P. (2012). "Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30-43° S". *Atmósfera*, 25(1), 1-22.
- Rao, A. R., Hamed, K. H., & Chen, H. L. (2012). "Nonstationarities in hydrologic and environmental time series" (Vol. 45). Springer Science & Business Media.
- Read, L. K., and R. M. Vogel (2015), "Reliability, return periods, and risk under nonstationarity". *Water Resources Research*, 51, pp. 6381–6398,

- Ricchetti, F. (2018). "Incorporación del efecto de la no estacionariedad en el análisis de series hidrometeorológicas de precipitación y temperatura media diaria. Caso de Estudio: Valores Extremos y Mensuales en Chile Central". Memoria para optar al título de ingeniero civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Rowe & Asoc. (1996). "Estudio Hidrológico de las crecidas afluentes al Tranque de Relaves "El Bronce de Atacama".
- Salas, J. & J. Obeysekera (2014). "Revisiting the concepts of return period and risk for nonstationary hydrologic extreme events". *Journal of Hydrologic Engineering*, 19, pp. 554-568.
- Salas, J. D., Obeysekera, J., & Vogel, R. M. (2018). "Techniques for assessing water infrastructure for nonstationary extreme events: a review". *Hydrological sciences journal*, 63(3), 325-352.
- Salazar, A. (2017). "Determinación de una metodología para la predicción de forzantes meteorológicas a escala local en un clima no estacionario. Aplicación a cuencas de Chile Central". Memoria para optar al título de ingeniero civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Sarricolea, P., Meseguer Ruiz, O., & Romero-Aravena, H. (2017). "Tendencias de la precipitación en el Norte Grande de Chile y su relación con las proyecciones de cambio climático". *Diálogo andino*, (54), 41-50.
- Servicio nacional de Geología y Minería. (2018). "Estudios de normativas internacionales de diseño, construcción, cierre y post cierre de depósitos de relaves", 239.
- Schulz, N., Boisier, J. P., & Aceituno, P. (2012). "Climate change along the arid coast of northern Chile". *International Journal of Climatology*, 32(12), 1803-1814.
- Toledo, H. (2015). "Análisis de Tendencias de Mediano Plazo para precipitaciones y volúmenes de escorrentía de deshielo, entre los valles del Huasco y Biobío". Memoria para optar al título de ingeniero civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Toro, D. (2017). "Propuesta para la regulación jurídica de pasivos ambientales mineros: Casos de relaves Chañaral y Andacollo". Actividad formativa equivalente a tesis para optar al grado de magister en Derecho Ambiental, Universidad de Chile.
- Tóth, R., & Somorčík, J. (2017). "On a non-parametric confidence interval for the regression slope". *METRON*, 75(3), 359-369.
- Towler, E., Rajagopalan, B., Gilleland, E., Summers, R. S., Yates, D., & Katz, R. W. (2010). "Modeling hydrologic and water quality extremes in a changing climate: A statistical approach based on extreme value theory". *Water Resources Research*, 46(11).
- USGS (2019). "Guidelines for determining flood flow frequency, bulletin 17c". United State Department of the Interior and United State Geological Survey. Provisional form for obtaining public comment.
- Valenzuela, A. (2007). "Formulación y evaluación de alternativas para el saneamiento del estero Leña Seca-Valdivia". Tesis para optar al título de ingeniero civil en obras civiles, Universidad Austral de Chile.
- Varas, E. (1985). "Hietogramas de tormentas de diseño". VII Congreso Nacional, Soc. Chilena de Ingeniería Hidráulica, Concepción, Chile, 533-548.

Wi, S., Valdés, J. B., Steinschneider, S., & Kim, T. W. (2016). “Non-stationary frequency analysis of extreme precipitation in South Korea using peaks-over-threshold and annual maxima”. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 30(2), 583-606.

World Meteorological Organization. (2009). “Manual on estimation of probable maximum precipitation (PMP)”. World meteorological organization.

Xie, H., Li, D., & Xiong, L. (2014). “Exploring the ability of the Pettitt method for detecting change point by Monte Carlo simulation”. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 28(7), 1643-1655.

Yue, S., Pilon, P., & Cavadias, G. (2002). “Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series”. *Journal of hydrology*, 259(1-4), 254-271.

Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., & Cavadias, G. (2002). “The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series”. *Hydrological processes*, 16(9), 1807-1829.

Yue, S., & Wang, C. (2004). “The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series”. *Water resources management*, 18(3), 201-218.

ANEXOS

Anexo A : Resultados Análisis de Tendencias.

En las Tabla. A.1 y Tabla. A.2 se presentan los resultados de los test de análisis de tendencias aplicados (Test de Mann-Kendall y Ajuste de Sen) a las series anuales de máximas precipitaciones diarias de las distintas estaciones consideradas antes del relleno de información, con intervalos móviles de 20 años en la media (primera tabla) y desviación estándar (segunda tabla). La existencia de tendencia es dada por el *p-value* del test de Mann-Kendall (menor a 5%) y un intervalo de confianza de igual signo en el caso del Ajuste de Sen. En este sentido, si es que ambos test cumplen lo mencionado, se dice que existe tendencia en la serie; mientras que el tipo de tendencia (positiva o negativa) es dado por el signo de τ en el caso de Mann-Kendall, y por el signo de la pendiente en el Ajuste de Sen.

Tabla. A.1 Resultados de Análisis de Tendencias sobre el estadístico de la media en las 118 estaciones analizadas.

Estación	Mann-Kendall		Ajuste de Sen		¿Tendencia?
	τ_{μ}	<i>pvalue</i>	m_{sen} [mm/año]	$IC_{95\%}$ [mm/año]	
Aguas Verdes	0,54	1,9%	0,25	[0,01 ; 0,41]	Positiva
Alicahue	0,23	5,9%	0,08	[0 ; 0,17]	Estacionario
Almendral	0,34	1,5%	0,10	[0,03 ; 0,18]	Positiva
Antofagasta	-0,54	0,1%	-0,05	[-0,13 ; -0,02]	Negativa
Antupiren	0,52	0,3%	0,25	[0,09 ; 0,49]	Positiva
Artificio	-0,38	0,8%	-0,15	[-0,25 ; -0,06]	Negativa
Caleu	-0,85	0,0%	-1,56	[-1,8 ; -1,28]	Negativa
Caren	-0,69	0,0%	-0,36	[-0,45 ; -0,28]	Negativa
Carmen De Las Rosas	0,02	85,9%	0,01	[-0,06 ; 0,07]	Estacionario
Casablanca	-0,48	3,4%	-0,46	[-0,61 ; -0,14]	Negativa
Catemu	0,41	0,1%	0,16	[0,06 ; 0,26]	Positiva
Cerrillos De Leyda	-0,43	0,1%	-0,15	[-0,25 ; -0,07]	Negativa
Cerro Calan	-0,22	15,4%	-0,14	[-0,41 ; 0,06]	Estacionario
Cerro Moreno Antofagasta Ap.	-0,16	10,3%	-0,01	[-0,02 ; 0]	Estacionario
Chacrilla	-0,30	13,8%	-0,11	[-0,37 ; 0,05]	Estacionario
Chalaco	0,68	0,0%	0,22	[0,17 ; 0,26]	Positiva
Chiu-Chiu	-0,30	4,7%	-0,04	[-0,07 ; 0]	Negativa
Cocalan	-0,56	0,1%	-0,26	[-0,49 ; -0,12]	Negativa
Cogoti 18	-0,54	0,0%	-0,27	[-0,35 ; -0,19]	Negativa
Cogoti Embalse	-0,07	51,8%	-0,01	[-0,06 ; 0,04]	Estacionario
Coiron	-0,73	0,0%	-0,52	[-0,68 ; -0,4]	Negativa
Colliguay	-0,30	5,7%	-0,28	[-0,5 ; 0,06]	Estacionario
Coltauco	0,56	0,1%	0,35	[0,13 ; 0,59]	Positiva
Combarbala	-0,63	0,0%	-0,34	[-0,46 ; -0,22]	Negativa
Copiapó	-0,11	44,1%	-0,03	[-0,14 ; 0,04]	Estacionario
Culimo Embalse	-0,67	0,0%	-0,38	[-0,46 ; -0,29]	Negativa
Cuncumen	-0,55	0,0%	-0,30	[-0,41 ; -0,18]	Negativa
Desierto De Atacama Caldera	0,51	0,0%	0,16	[0,11 ; 0,21]	Positiva
El Salvador	0,31	4,5%	0,11	[0 ; 0,19]	Positiva
El Sobrante Hacienda	0,00	98,8%	0,00	[-0,08 ; 0,1]	Estacionario
El Tome	-0,29	1,9%	-0,11	[-0,2 ; -0,01]	Negativa

Estación	Mann-Kendall		Ajuste de Sen		¿Tendencia?
	τ_μ	<i>p</i> value	m_{sen} [mm/año]	$IC_{95\%}$ [mm/año]	
El Trapiche	0,10	57,6%	0,02	[-0,09 ; 0,19]	Estacionario
El Trapiche	0,34	2,5%	0,23	[0,03 ; 0,46]	Positiva
El Vergel	-0,44	11,8%	-0,22	[-0,48 ; 0,07]	Estacionario
Elibor Campamento	-0,64	0,0%	-0,26	[-0,35 ; -0,17]	Negativa
Eulogio Sánchez Tobalaba Ad.	0,28	4,5%	0,11	[0 ; 0,26]	Positiva
Frutillar Alto	-0,48	0,6%	-0,33	[-0,49 ; -0,12]	Negativa
Fundo Las Bateas	0,30	19,3%	0,18	[-0,06 ; 0,48]	Estacionario
Gualleco	-0,60	0,0%	-0,58	[-0,71 ; -0,42]	Negativa
Guatacondo Dga	0,59	0,0%	0,14	[0,09 ; 0,19]	Positiva
Hierro Viejo	0,06	72,6%	0,05	[-0,17 ; 0,24]	Estacionario
Huechun Embalse	-0,44	11,8%	-0,37	[-0,64 ; 0,07]	Estacionario
Huintil	0,43	0,1%	0,26	[0,12 ; 0,39]	Positiva
Hurtado	0,47	0,0%	0,15	[0,11 ; 0,19]	Positiva
Ibacache Alto	-0,67	1,6%	-0,46	[-0,84 ; -0,17]	Negativa
Iglesia Colorada	-0,11	75,4%	-0,16	[-0,74 ; 0,48]	Estacionario
Illapel Dga	-0,07	63,7%	-0,02	[-0,13 ; 0,06]	Estacionario
Junta Del Carmen	-0,07	49,0%	-0,03	[-0,09 ; 0,07]	Estacionario
La Canela Dmc	0,16	28,3%	0,07	[-0,08 ; 0,17]	Estacionario
La Florida La Serena Ad.	-0,06	62,8%	-0,02	[-0,1 ; 0,06]	Estacionario
La Mostaza	0,09	62,4%	0,05	[-0,17 ; 0,21]	Estacionario
La Ortiga	-0,37	3,0%	-0,15	[-0,35 ; -0,01]	Negativa
La Serena (Escuela Agrícola)	0,37	0,7%	0,10	[0,03 ; 0,18]	Positiva
La Torre	-0,21	20,6%	-0,09	[-0,3 ; 0,09]	Estacionario
La Tranquilla	0,32	1,2%	0,11	[0,03 ; 0,18]	Positiva
La Vía	-0,43	1,2%	-0,21	[-0,37 ; -0,03]	Negativa
Lagunillas	0,07	81,5%	0,01	[-0,15 ; 0,39]	Estacionario
Las Pataguas	-0,65	0,0%	-0,38	[-0,54 ; -0,22]	Negativa
Las Puertas	-0,02	91,6%	-0,01	[-0,17 ; 0,12]	Estacionario
Las Ramadas	-0,41	0,3%	-0,11	[-0,18 ; -0,04]	Negativa
Las Vegas	-0,05	84,3%	-0,06	[-0,79 ; 0,19]	Estacionario
Lautaro Embalse	0,01	93,2%	0,01	[-0,16 ; 0,15]	Estacionario
Limahuida	0,73	0,0%	0,32	[0,24 ; 0,41]	Positiva
Litueche	0,77	0,0%	0,55	[0,46 ; 0,65]	Positiva
Lliu-Lliu Embalse	-0,62	0,0%	-0,47	[-0,64 ; -0,31]	Negativa
Lo Rojas	-0,51	0,0%	-0,25	[-0,34 ; -0,12]	Negativa
Longotoma	0,21	26,6%	0,14	[-0,08 ; 0,27]	Estacionario
Los Aromos	-0,56	0,0%	-0,30	[-0,47 ; -0,2]	Negativa
Los Cóndores	-0,10	57,6%	-0,03	[-0,23 ; 0,14]	Estacionario
Los Loros	-0,51	0,1%	-0,35	[-0,51 ; -0,15]	Negativa
Los Nichos	-0,52	0,3%	-0,44	[-0,66 ; -0,22]	Negativa
Los Panguiles	-0,49	0,7%	-0,24	[-0,43 ; -0,07]	Negativa
Los Vilos Dmc	-0,75	0,0%	-0,87	[-1,17 ; -0,59]	Negativa
Manflas	-0,26	5,5%	-0,12	[-0,28 ; 0]	Estacionario
Melipilla	0,14	36,7%	0,05	[-0,08 ; 0,18]	Estacionario
Millahue	0,11	52,9%	0,08	[-0,06 ; 0,17]	Estacionario
Mina Cerro Negro	-0,10	59,6%	-0,11	[-0,36 ; 0,23]	Estacionario

Estación	Mann-Kendall		Ajuste de Sen		¿Tendencia?
	τ_{μ}	<i>p</i> value	m_{sen} [mm/año]	$IC_{95\%}$ [mm/año]	
Mincha Norte	0,06	69,1%	0,01	[-0,05 ; 0,11]	Estacionario
Monte Grande	-0,53	0,0%	-0,23	[-0,33 ; -0,13]	Negativa
Nirivilo	-0,69	0,0%	-0,79	[-0,92 ; -0,62]	Negativa
Ovalle Dga	-0,60	0,0%	-0,25	[-0,31 ; -0,16]	Negativa
Paloma Embalse	0,24	1,0%	0,06	[0,02 ; 0,12]	Positiva
Palquico	0,40	0,6%	0,22	[0,1 ; 0,27]	Positiva
Pencahue	0,48	3,4%	0,21	[0,01 ; 0,37]	Positiva
Pichasca	0,30	0,7%	0,15	[0,05 ; 0,25]	Positiva
Pichidegua	0,43	0,4%	0,25	[0,11 ; 0,36]	Positiva
Pisco Elqui Dmc	-0,16	38,3%	-0,10	[-0,29 ; 0,19]	Estacionario
Popeta	-0,94	0,0%	-0,94	[-1 ; -0,89]	Negativa
Pudahuel Santiago	-0,77	0,0%	-0,33	[-0,39 ; -0,26]	Negativa
Punitaqui	-0,11	47,2%	-0,04	[-0,16 ; 0,11]	Estacionario
Quelon	-0,40	0,6%	-0,13	[-0,22 ; -0,06]	Negativa
Quilimari	-0,36	11,5%	-0,13	[-0,2 ; 0,01]	Estacionario
Quillota	-0,27	13,0%	-0,09	[-0,25 ; 0,02]	Estacionario
Quinta Normal Santiago	0,36	0,0%	0,10	[0,05 ; 0,15]	Positiva
Rancagua (Cachapoal - Dcp)	-0,12	49,6%	-0,05	[-0,23 ; 0,11]	Estacionario
Rapel	-0,42	0,1%	-0,21	[-0,31 ; -0,11]	Negativa
Rapel	-0,02	79,4%	-0,01	[-0,05 ; 0,04]	Estacionario
Recoleta Embalse	0,49	0,0%	0,13	[0,07 ; 0,19]	Positiva
Resguardo Los Patos	-0,22	1,4%	-0,05	[-0,09 ; -0,01]	Negativa
Rieillos	0,56	0,0%	0,29	[0,23 ; 0,34]	Positiva
Rincón De Los Valles	0,47	0,0%	0,18	[0,09 ; 0,26]	Positiva
Rivadavia	0,11	29,3%	0,06	[-0,06 ; 0,2]	Estacionario
Salamanca	-0,46	0,2%	-0,26	[-0,39 ; -0,11]	Negativa
San Agustín	-0,46	0,0%	-0,13	[-0,17 ; -0,09]	Negativa
San Antonio (Pta. Panul)	0,51	0,1%	0,26	[0,07 ; 0,41]	Positiva
San Felipe	0,35	0,3%	0,09	[0,03 ; 0,18]	Positiva
San Fernando	0,28	4,5%	0,09	[0 ; 0,2]	Positiva
Santa Juana	-0,64	0,0%	-0,41	[-0,57 ; -0,29]	Negativa
Santo Domingo Ad.	0,56	0,0%	0,63	[0,44 ; 0,78]	Positiva
Sotaqui	0,23	2,8%	0,06	[0,01 ; 0,1]	Positiva
Talca U.C.	-0,18	32,2%	-0,09	[-0,29 ; 0,03]	Estacionario
Tascadero	-0,34	5,3%	-0,21	[-0,53 ; 0]	Estacionario
Terraza Oficinas Centrales Dga	-0,04	75,3%	-0,01	[-0,06 ; 0,04]	Estacionario
Tulahuén	-0,19	5,5%	-0,09	[-0,19 ; 0]	Estacionario
Vallenar Dga	-0,52	0,0%	-0,23	[-0,31 ; -0,15]	Negativa
Vicua (Inia)	-0,11	42,8%	-0,04	[-0,12 ; 0,05]	Estacionario
Vilcuya	0,41	0,1%	0,13	[0,07 ; 0,2]	Positiva
Villa Alhue	-0,40	1,7%	-0,22	[-0,35 ; -0,05]	Negativa

Tabla. A.2 Resultados de Análisis de Tendencias sobre el estadístico desviación estándar en las distintas estaciones

Estación	Mann-Kendall		Ajuste de Sen		¿Tendencia?
	τ_{σ}	p_{value}	m_{Sen} [mm/año]	$IC_{95\%}$ [mm/año]	
Aguas Verdes	0,26	26,9%	0,07	[-0,04 ; 0,51]	Estacionario
Alicahue	0,09	47,8%	0,03	[-0,04 ; 0,11]	Estacionario
Almendral	0,02	93,0%	0,01	[-0,19 ; 0,2]	Estacionario
Antofagasta	-0,49	0,3%	-0,02	[-0,14 ; 0]	Negativa
Antupiren	0,79	0,0%	0,28	[0,22 ; 0,36]	Positiva
Artificio	-0,39	0,6%	-0,29	[-0,35 ; -0,14]	Negativa
Caleu	-0,55	0,1%	-0,79	[-1,03 ; -0,52]	Negativa
Caren	-0,70	0,0%	-0,37	[-0,48 ; -0,27]	Negativa
Carmen De Las Rosas	0,55	0,0%	0,13	[0,08 ; 0,16]	Positiva
Casablanca	-0,52	2,4%	-0,27	[-0,44 ; -0,11]	Negativa
Catemu	-0,02	91,0%	-0,01	[-0,32 ; 0,1]	Estacionario
Cerrillos De Leyda	0,33	1,5%	0,15	[0,02 ; 0,23]	Positiva
Cerro Calan	0,24	11,3%	0,21	[-0,1 ; 0,34]	Estacionario
Cerro Moreno Antofagasta Ap.	0,14	14,5%	0,01	[0 ; 0,02]	Estacionario
Chacrilla	-0,83	0,0%	-0,37	[-0,52 ; -0,21]	Negativa
Chalaco	0,36	0,2%	0,06	[0,02 ; 0,11]	Positiva
Chiu-Chiu	-0,70	0,0%	-0,14	[-0,2 ; -0,03]	Negativa
Cocalan	-0,53	0,2%	-0,25	[-0,45 ; -0,12]	Negativa
Cogoti 18	-0,24	3,3%	-0,13	[-0,26 ; -0,01]	Negativa
Cogoti Embalse	0,16	12,9%	0,06	[-0,03 ; 0,14]	Estacionario
Coiron	-0,50	0,1%	-0,60	[-0,8 ; -0,42]	Negativa
Colliguay	-0,34	3,2%	-0,30	[-0,57 ; -0,07]	Negativa
Coltauco	0,50	0,3%	0,27	[0,12 ; 0,45]	Positiva
Combarbala	-0,72	0,0%	-0,30	[-0,39 ; -0,22]	Negativa
Copiapo	0,01	98,4%	0,00	[-0,06 ; 0,23]	Estacionario
Culimo Embalse	-0,57	0,0%	-0,35	[-0,47 ; -0,24]	Negativa
Cuncumen	-0,78	0,0%	-0,55	[-0,67 ; -0,41]	Negativa
Desierto De Atacama Caldera	0,63	0,0%	0,26	[0,22 ; 0,28]	Positiva
El Salvador	0,18	24,7%	0,07	[-0,04 ; 0,14]	Estacionario
El Sobrante Hacienda	-0,08	38,3%	-0,01	[-0,03 ; 0,02]	Estacionario
El Tome	-0,06	61,5%	-0,04	[-0,11 ; 0,14]	Estacionario
El Trapiche	-0,61	0,0%	-0,16	[-0,21 ; -0,11]	Negativa
El Trapiche	0,53	0,0%	0,47	[0,3 ; 0,59]	Positiva
El Vergel	0,28	34,8%	0,08	[-0,12 ; 0,2]	Estacionario
Elibor Campamento	-0,91	0,0%	-0,24	[-0,27 ; -0,21]	Negativa
Eulogio Sánchez Tobaraba Ad.	0,75	0,0%	0,33	[0,23 ; 0,44]	Positiva
Frutillar Alto	-0,49	0,5%	-0,24	[-0,35 ; -0,06]	Negativa
Fundo Las Bateas	-0,24	30,4%	-0,06	[-0,33 ; 0,03]	Estacionario
Gualleco	-0,78	0,0%	-0,49	[-0,56 ; -0,42]	Negativa
Guatacondo Dga	0,39	1,8%	0,13	[0,01 ; 0,22]	Positiva
Hierro Viejo	0,16	36,3%	0,13	[-0,1 ; 0,7]	Estacionario

Estación	Mann-Kendall		Ajuste de Sen		¿Tendencia?
	τ_{σ}	$pvalue$	m_{sen} [mm/año]	$IC_{95\%}$ [mm/año]	
Huechun Embalse	0,22	46,6%	0,07	[-0,04 ; 0,13]	Estacionario
Huintil	0,31	1,2%	0,30	[0,17 ; 0,39]	Positiva
Hurtado	0,49	0,0%	0,16	[0,12 ; 0,22]	Positiva
Ibacache Alto	-0,39	17,5%	-0,10	[-0,24 ; 0,06]	Estacionario
Iglesia Colorada	-0,94	0,1%	-0,30	[-0,44 ; -0,13]	Negativa
Illapel Dga	-0,10	50,3%	-0,08	[-0,16 ; 0,07]	Estacionario
Junta Del Carmen	0,50	0,0%	0,25	[0,17 ; 0,32]	Positiva
La Canela Dmc	-0,48	0,1%	-0,09	[-0,2 ; -0,05]	Negativa
La Florida La Serena Ad.	0,10	37,1%	0,02	[-0,08 ; 0,1]	Estacionario
La Mostaza	-0,22	20,8%	-0,09	[-0,21 ; 0,03]	Estacionario
La Ortiga	-0,65	0,0%	-0,45	[-0,6 ; -0,23]	Negativa
La Serena (Escuela Agrícola)	-0,51	0,0%	-0,17	[-0,26 ; -0,11]	Negativa
La Torre	-0,69	0,0%	-0,32	[-0,43 ; -0,18]	Negativa
La Tranquilla	0,33	0,9%	0,29	[0,12 ; 0,47]	Positiva
La Vía	-0,35	4,2%	-0,23	[-0,39 ; -0,03]	Negativa
Lagunillas	-0,85	0,0%	-0,46	[-0,63 ; -0,18]	Negativa
Las Pataguas	-0,42	1,4%	-0,28	[-0,48 ; -0,08]	Negativa
Las Puertas	-0,38	2,7%	-0,31	[-0,46 ; -0,07]	Negativa
Las Ramadas	-0,65	0,0%	-0,20	[-0,27 ; -0,14]	Negativa
Las Vegas	-0,58	0,3%	-0,39	[-2,78 ; -0,13]	Negativa
Lautaro Embalse	0,25	4,9%	0,21	[0 ; 0,33]	Positiva
Limahuida	0,45	0,2%	0,28	[0,07 ; 0,36]	Positiva
Litueche	0,72	0,0%	0,81	[0,67 ; 0,96]	Positiva
Lliu-Lliu Embalse	-0,40	1,5%	-0,33	[-0,52 ; -0,09]	Negativa
Lo Rojas	0,56	0,0%	0,28	[0,18 ; 0,4]	Positiva
Longotoma	-0,50	0,6%	-0,29	[-0,41 ; -0,09]	Negativa
Los Aromos	0,40	0,8%	0,08	[0,02 ; 0,18]	Positiva
Los Cóndores	-0,70	0,0%	-0,24	[-0,43 ; -0,17]	Negativa
Los Loros	-0,05	75,1%	-0,02	[-0,16 ; 0,07]	Estacionario
Los Nichos	-0,54	0,2%	-0,54	[-0,86 ; -0,09]	Negativa
Los Panguiles	-0,37	4,4%	-0,15	[-0,28 ; -0,02]	Negativa
Los Vilos Dmc	-0,23	22,4%	-0,03	[-0,07 ; 0,05]	Estacionario
Manflas	-0,14	31,7%	-0,08	[-0,22 ; 0,03]	Estacionario
Melipilla	-0,30	5,5%	-0,12	[-0,23 ; 0,01]	Estacionario
Millahue	0,18	29,4%	0,09	[-0,06 ; 0,22]	Estacionario
Mina Cerro Negro	-0,59	0,1%	-0,94	[-1,35 ; -0,32]	Negativa
Mincha Norte	0,55	0,0%	0,21	[0,12 ; 0,28]	Positiva
Monte Grande	-0,69	0,0%	-0,34	[-0,47 ; -0,23]	Negativa
Nirivilo	-0,60	0,0%	-0,43	[-0,51 ; -0,36]	Negativa
Ovalle Dga	-0,59	0,0%	-0,40	[-0,54 ; -0,19]	Negativa
Paloma Embalse	0,08	41,2%	0,03	[-0,02 ; 0,14]	Estacionario
Palquico	0,50	0,0%	0,41	[0,16 ; 0,52]	Positiva
Pencahue	-0,64	0,5%	-0,25	[-0,34 ; -0,18]	Negativa

Estación	Mann-Kendall		Ajuste de Sen		¿Tendencia?
	τ_{σ}	<i>p</i> value	m_{sen} [mm/año]	$IC_{95\%}$ [mm/año]	
Pichasca	0,49	0,0%	0,24	[0,15 ; 0,33]	Positiva
Pichidegua	0,41	0,5%	0,35	[0,06 ; 0,5]	Positiva
Pisco Elqui Dmc	-0,20	25,6%	-0,22	[-0,42 ; 0,05]	Estacionario
Popeta	-0,84	0,0%	-0,62	[-0,69 ; -0,53]	Negativa
Pudahuel Santiago	-0,59	0,0%	-0,16	[-0,19 ; -0,13]	Negativa
Punitaqui	-0,25	9,7%	-0,22	[-0,41 ; 0,12]	Estacionario
Quelon	-0,54	0,0%	-0,28	[-0,37 ; -0,13]	Negativa
Quilimari	-0,33	15,0%	-0,08	[-0,17 ; 0,07]	Estacionario
Quillota	-0,12	49,5%	-0,02	[-0,11 ; 0,05]	Estacionario
Quinta Normal Santiago	0,65	0,0%	0,17	[0,13 ; 0,2]	Positiva
Rancagua (Cachapoal - Dcp)	-0,03	87,1%	-0,01	[-0,12 ; 0,12]	Estacionario
Rapel	-0,51	0,0%	-0,30	[-0,42 ; -0,17]	Negativa
Rapel	0,02	85,8%	0,00	[-0,03 ; 0,04]	Estacionario
Recoleta Embalse	0,03	81,8%	0,02	[-0,1 ; 0,1]	Estacionario
Resguardo Los Patos	0,31	0,1%	0,10	[0,04 ; 0,22]	Positiva
Riecillos	0,71	0,0%	0,30	[0,26 ; 0,35]	Positiva
Rincón De Los Valles	0,17	11,8%	0,08	[-0,03 ; 0,22]	Estacionario
Rivadavia	0,26	1,3%	0,12	[0,03 ; 0,28]	Positiva
Salamanca	0,09	56,8%	0,11	[-0,17 ; 0,24]	Estacionario
San Agustín	0,49	0,0%	0,16	[0,11 ; 0,22]	Positiva
San Antonio (Pta. Panul)	0,92	0,0%	0,54	[0,33 ; 0,8]	Positiva
San Felipe	-0,03	84,2%	-0,02	[-0,11 ; 0,11]	Estacionario
San Fernando	0,69	0,0%	0,44	[0,24 ; 0,65]	Positiva
Santa Juana	-0,68	0,0%	-0,41	[-0,56 ; -0,29]	Negativa
Santo Domingo Ad.	0,65	0,0%	0,62	[0,45 ; 0,77]	Positiva
Sotaqui	0,39	0,0%	0,09	[0,05 ; 0,17]	Positiva
Talca U.C.	-0,19	30,3%	-0,03	[-0,1 ; 0,02]	Estacionario
Tascadero	-0,59	0,1%	-0,27	[-0,37 ; -0,14]	Negativa
Terraza Oficinas Centrales Dga	0,40	0,0%	0,09	[0,05 ; 0,13]	Positiva
Tulahuen	0,20	5,0%	0,08	[0 ; 0,18]	Positiva
Vallendar Dga	-0,50	0,0%	-0,21	[-0,32 ; -0,09]	Negativa
Vicua (Inia)	-0,14	31,7%	-0,04	[-0,11 ; 0,03]	Estacionario
Vilcuya	-0,25	3,9%	-0,09	[-0,2 ; -0,01]	Negativa
Villa Alhue	-0,42	1,4%	-0,20	[-0,36 ; -0,04]	Negativa

Anexo B : Análisis de Cobertura por Región.

En la sección continuación se presentan los análisis de coberturas realizados a las distintas estaciones del país, divididos por región. En este sentido, se presenta en primera instancia la Tabla. B.1, la cual corresponde a la nomenclatura de colores utilizados en las sub-secciones siguientes. En este sentido, un valor de 0% -el cual se observa en color rojo- corresponde a 0 datos en el año, y 100% -observado en color azul- a 365 días completos de información. En base a lo anterior, las siguientes sub secciones presentan los análisis de cobertura realizados con la información existente en el CR2 desde el año 1900 al 2018.

Tabla. B.1 Leyenda de Colores Utilizados en el entendimiento del Análisis de Cobertura regional.

Escala de Colores			
% de Información	Color	% de Información	Color
0		50-62.5	
0-12.5		62.5-75	
12.5-25		75-87.5	
25-37.5		87.5-100	
37.5-50		100	

El objetivo de este análisis es facilitar –principalmente- la búsqueda de estaciones que cuenten con datos de precipitación suficientes y acordes a la situación, para poder realizar el relleno de información hidrológica de las estaciones a utilizar en este trabajo. En este sentido, dado que las estaciones a utilizar se ubican entre la región de Atacama y Valparaíso, se presentan tres sub-secciones para cada uno de las regiones mencionadas.

Solo se debe acotar a lo anterior, que la información del CR2 no se encontraba actualizada al año 2018 en su totalidad, lo cual es debido principalmente a que esta es obtenida de la DGA en su mayoría, y esta última actualiza esporádicamente la información de su portal. En este sentido, la base de datos del CR2 no cuenta siempre con la última información que posee la DGA, la cual fue agregada manualmente para los casos de estudio (vale decir, para el año 2018).

Anexo C : Relleno de Datos de Precipitación Estaciones.

En la sección presente, se desarrolla en mayor detalle el relleno de información de precipitación realizado a las distintas estaciones de estudio, con el fin de esclarecer la metodología de relleno como así mismo mostrar las series anuales de máximas precipitaciones diarias obtenidas.

Anexo C.1 Relleno Estación Lautaro Embalse: Tranque Amolanas.

En relación a la estación de estudio, la serie de anual de máximas precipitaciones diarias de Lautaro Embalse se presenta en la Tabla. C.1.

Tabla. C.1 Serie Anual de Máximas Precipitaciones Diarias (PMD) antes del relleno de información. Estación Lautaro Embalse

Año	Fecha	PMD [mm]
1962	-	25,0
1963	-	2,0
1964	-	7,0
1965	-	13,0
1966	-	0,0
1967	-	3,0
1968	-	0,0
1969	-	20,8
1970	12-mar	0,5
1971	01-ene	22,0
1972	27-jun	30,0
1973	07-jun	14,5
1974	02-jul	5,0
1975	04-jun	20,0
1976	27-may	16,0
1977	07-abr	15,5
1978	28-jun	0,0
1979	28-mar	2,5
1980	25-jul	19,0
1981	06-ago	20,0
1982	25-sept	5,0
1983	30-jun	51,5
1984	02-jul	35,5
1985	22-jul	8,0
1986	14-ago	9,0
1987	10-ago	42,0
1988	08-may	2,5
1989	20-ago	40,5
1990	07-jul	10,5
1991	17-jun	36,5
1992	27-may	44,5
1993	11-ago	16,5
1994	08-ago	3,5
1995	10-sept	1,0
1996	04-ago	1,0
1997	12-jun	86,0
1998	08-feb	5,0
1999	04-oct	18,0
2000	23-jun	45,5
2001	21-mar	4,5
2002	25-may	26,0
2003	15-may	0,0
2004	26-jul	11,0
2005	24-abr	9,5
2006	29-ago	1,0
2007	04-may	4,0
2008	20-jul	12,0
2009	20-jul	7,5
2010	28-may	29,0
2011	08-jul	18,0
2012	13-abr	11,5
2013	17-may	12,0
2014	22-may	21,5
2015	24-mar	26,0
2016	07-dic	4,0
2017	10-may	54,0
2018	17-jul	5,0

Acorde a la información existente en la DGA, el inicio de medición de la estación corresponde al año 1930, pero desde el año 1938 a 1966 no existen datos en la estación, por lo cual se consideró el año 1967 como año de inicio. Así mismo, al observar las series de información utilizada en el Tranque de Relaves El Gato, estos consideran información desde el año 1962¹⁰ en la Estación Lautaro Embalse; por ende y con el objetivo de tener un registro mayor de información, se determinó complementar la información con las series anuales utilizadas en el diseño del depósito.

En este sentido, según los valores predispuestos en la Tabla. C.1 los valores existentes entre los años 1962-1969 y el año 1972 (destacados en *cursivas* y **negritas**) fueron rellenos en base al *Estudio Hidrológico Tranque de Relaves El Bronce de Atacama*; mientras que los valores amarillos son aquellos años en que existen falta de datos, correspondiendo así a pseudo valores máximos, ya que en función del relleno de información que se realice, estos valores podrían cambiar.

¹⁰ "Estudio Hidrológico del Tranque de Relaves El Bronce de Atacama" (Kozán, 1996).

Mencionado esto último, las fechas asociadas que presentan falta de datos, se encuentran en la Tabla. C.2.

Tabla. C.2 Datos Faltantes en Estación Lautaro Embalse.

Lautaro Embalse		
Desde	Hasta	Días
01-05-1997	31-05-1997	31
29-02-2000		1
Total Días Faltantes		32

Vistas las fechas faltantes a rellenar, se considera la estación Elibor Campamento para el relleno de los datos faltantes en Lautaro Embalse, desarrollando un ajuste lineal entre los valores de precipitación diaria entre ambas series (vale decir aquellas fechas en las cuales al menos exista registro de precipitación en alguna de las estaciones), presente en la Figura. C.1.

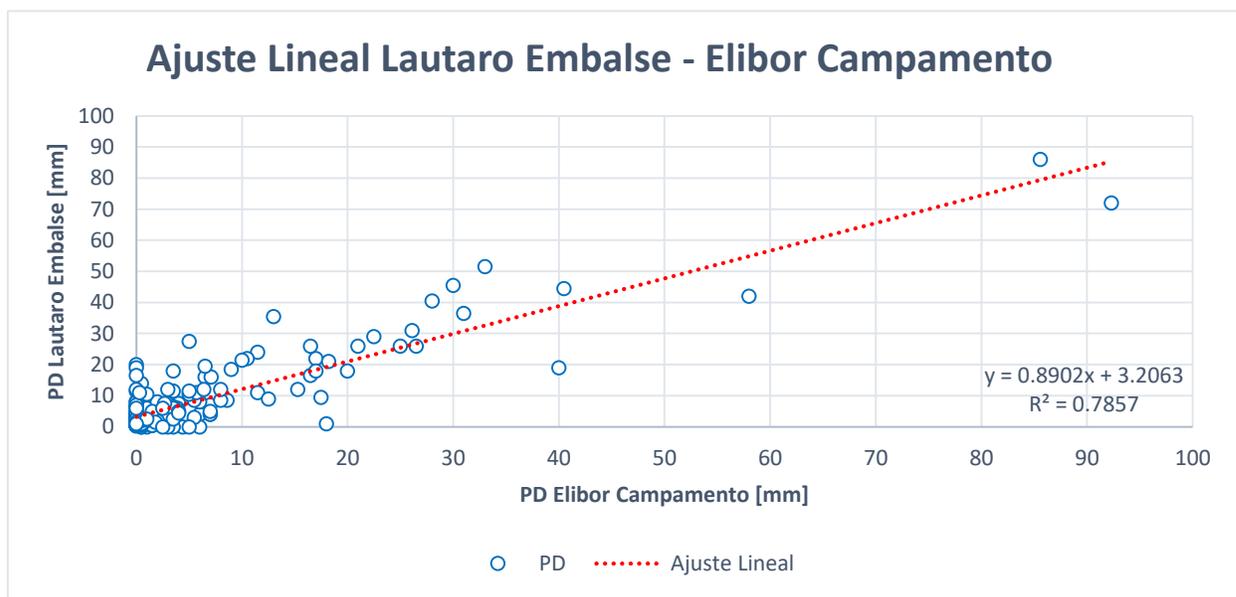


Figura. C.1 Ajuste Lineal entre datos de Precipitación Diaria (PD) Lautaro Embalse – Elibor Campamento.

A pesar de contar con el ajuste lineal entre ambas series con el cual se podría rellenar directamente la información faltante, es importante observar que algunas veces mientras en una estación existían registros de precipitación, en la otra no necesariamente ocurría lo mismo (y viceversa), por lo cual resulta necesario con el fin de mejorar la estimación, considerar dos casos que pueden darse al momento de rellenar una fecha faltante en la estación: el primero corresponde a conocer la probabilidad de que precipite en Lautaro Embalse dado que en Elibor Campamento precipitó; y el segundo, corresponde a considerar la precipitación asociada a Lautaro Embalse dado que en Elibor Campamento no precipitó. Lo anterior corresponde a considerar las probabilidades condicionales de ambos sucesos y se resumen en la Tabla. C.3.

Tabla. C.3 Probabilidades Condicionales de que precipite en Lautaro Embalse dado que precipitó (o no) en Elibor Campamento.

Probabilidad de Precipitación	
Lautaro Embalse Llueve=A	
Elibor Campamento Llueve=B	
Prob. De A dado B	
$P(B)$	0,009
$P(A \cap B)$	0,008
$P(A B)$	0,924
Prob. De A dado B'	
$P(B')$	0,991
$P(A \cap B')$	0,006
$P(A B')$	0,006

Realizado esto, se verifica la homogeneidad entre ambas series por medio de una curva doble acumulada, presente en la Figura. C.2.

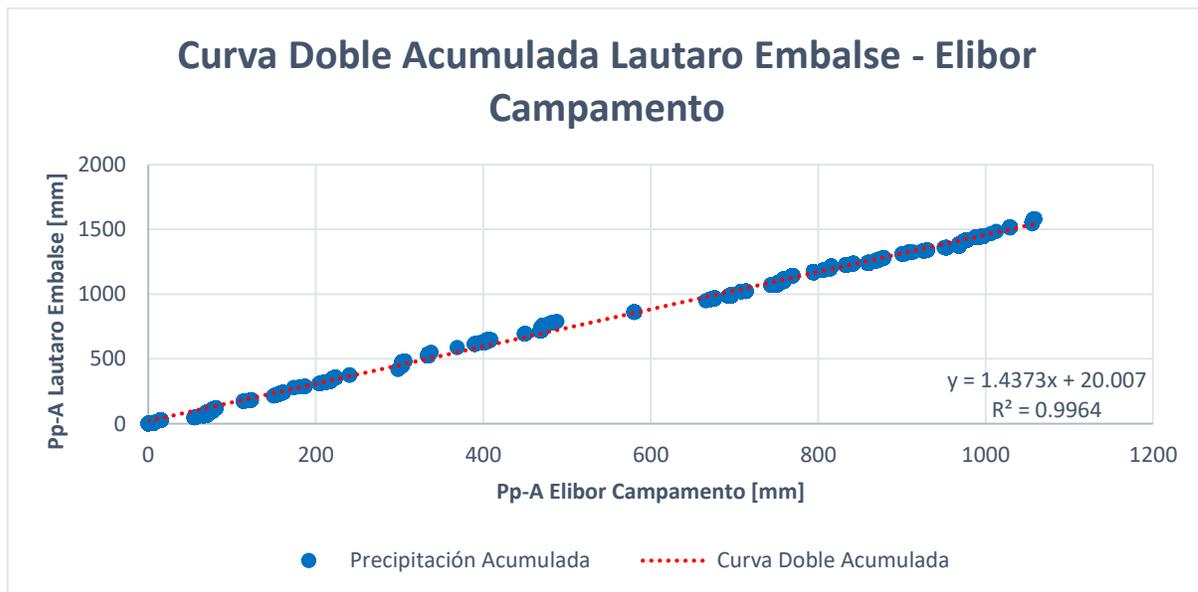


Figura. C.2 Curva Doble Acumulada de Precipitaciones Diarias Acumuladas (Pp-A) entre Estación Lautaro Embalse y Elibor Campamento.

Ya con estos resultados y el ajuste lineal, la serie anual de máximas precipitaciones diarias se presenta en la Tabla. C.4, de los cuales solo se resaltan en verde aquellos valores que presentaron una variación respecto a la situación inicial (dado que este no es el caso, no existen celdas marcadas).

Tabla. C.4 Serie Anual de Máximas Precipitaciones Diarias (PMD) después del relleno de información. Estación Lautaro Embalse.

Año	Fecha	PMD [mm]
1962	-	25,0
1963	-	2,0
1964	-	7,0
1965	-	13,0
1966	-	0,0
1967	-	3,0
1968	-	0,0
1969	-	20,8
1970	12-mar	0,5
1971	01-ene	22,0
1972	27-jun	30,0
1973	07-jun	14,5
1974	02-jul	5,0
1975	04-jun	20,0
1976	27-may	16,0
1977	07-abr	15,5
1978	28-jun	0,0
1979	28-mar	2,5
1980	25-jul	19,0
1981	06-ago	20,0
1982	25-sept	5,0
1983	30-jun	51,5
1984	02-jul	35,5
1985	22-jul	8,0
1986	14-ago	9,0
1987	10-ago	42,0
1988	08-may	2,5
1989	20-ago	40,5
1990	07-jul	10,5
1991	17-jun	36,5
1992	27-may	44,5
1993	11-ago	16,5
1994	08-ago	3,5
1995	10-sept	1,0
1996	04-ago	1,0
1997	12-jun	86,0
1998	08-feb	5,0
1999	04-oct	18,0
2000	23-jun	45,5
2001	21-mar	4,5
2002	25-may	26,0
2003	15-may	0,0
2004	26-jul	11,0
2005	24-abr	9,5
2006	29-ago	1,0
2007	04-may	4,0
2008	20-jul	12,0
2009	20-jul	7,5
2010	28-may	29,0
2011	08-jul	18,0
2012	13-abr	11,5
2013	17-may	12,0
2014	22-may	21,5
2015	24-mar	26,0
2016	07-dic	4,0
2017	10-may	54,0
2018	17-jul	5,0

Anexo C.2 Relleno Estación Copiapó: Tranque El Gato.

De forma similar a lo realizado en la estación Lautaro Embalse, se presenta en la Tabla. C.5 la serie histórica preliminar de información existente en la estación Copiapó.

Tabla. C.5 Serie Anual de Máximas Precipitaciones Diarias (PMD) antes del relleno de información. Estación Copiapó.

Año	Fecha	PMD [mm]
1971	20-jun	2,5
1972	05-jul	6,0
1973	07-jun	8,0
1974	10-sept	2,6
1975	31-may	4,0
1976	27-may	8,0
1977	11-jun	12,5
1978	01-ene	0,0
1979	28-mar	0,5
1980	25-jul	32,0
1981	06-ago	7,0
1982	25-sept	1,5
1983	30-jun	29,0
1984	10-jul	12,0
1985	22-jul	4,4
1986	18-may	4,5
1987	24-jul	22,8
1988	21-may	1,0
1989	20-ago	11,4
1990	01-ene	0,0
1991	17-jun	32,7
1992	27-may	25,8
1993	11-ago	0,5
1994	01-ene	0,0
1995	19-may	1,5
1996	01-ene	0,0
1997	12-jun	68,3
1998	09-jun	2,2
1999	31-mar	21,6
2000	23-jun	21,5
2001	01-ene	0,0
2002	27-ago	20,0
2003	01-jun	1,5
2004	20-jul	5,3
2005	15-jul	10,2
2006	01-ene	0,0
2007	24-jun	0,5
2008	20-jul	6,0
2009	21-jul	2,5
2010	28-may	4,5
2011	08-jul	29,5
2012	05-sept	0,5
2013	18-jul	2,0
2014	22-may	6,0
2015	12-jul	16,8
2016	01-ene	2,2
2017	16-mar	18,7
2018	26-jul	0,4

Los años destacados corresponden a aquellos con falta de información, siendo estos los presentes en la Tabla. C.6; además de esto, se consideró el estudio del depósito para complementar (de forma similar a Lautaro Embalse) la información existente en la estación Copiapó desde el año 1962 a 1970. Ahora, por medio del ajuste lineal presente en la Figura. C.3, fue posible rellenar la serie de valores de precipitaciones faltantes, considerando para esto las probabilidades condicionales de precipitación presentes en la Tabla. C.7 (de forma similar a lo comentado en el caso anterior).

Tabla. C.6 Datos Faltantes Estación Copiapó.

Datos Faltantes Estación Copiapó		
Fecha Desde	Fecha Hasta	Días
16-03-1995	18-03-1995	3
	30-03-1995	1
	01-04-1995	1
05-04-1995	06-04-1995	2
	25-06-1995	1
	07-07-1995	1
01-07-1999	31-07-1999	31
	29-02-2000	1
01-06-2014	17-06-2014	17
Total Días Faltantes		58

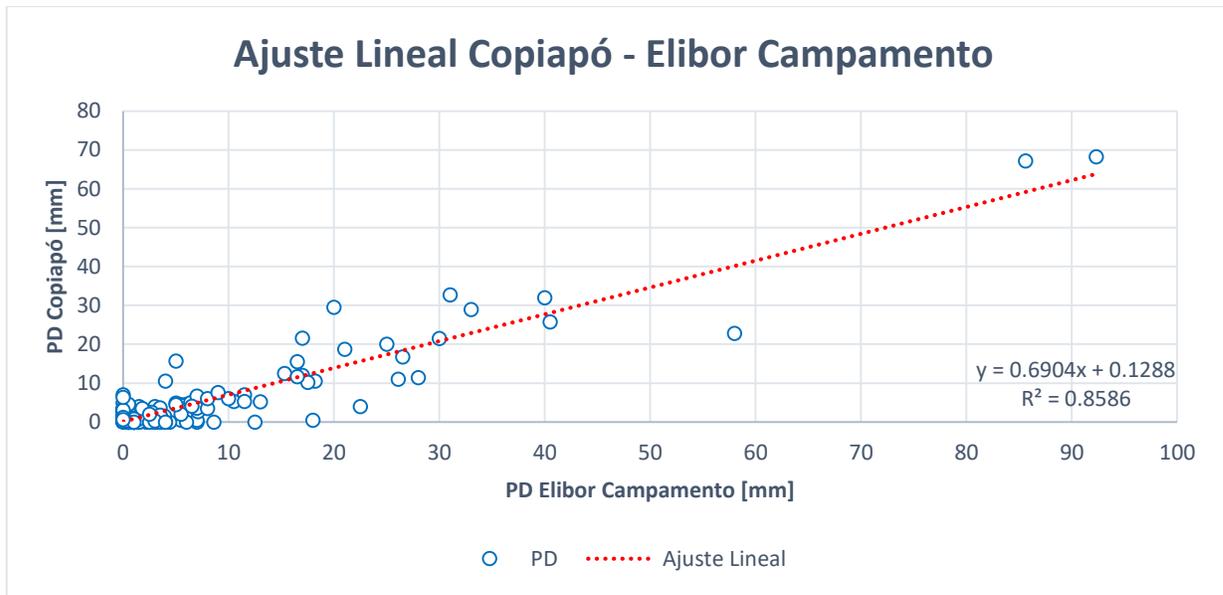


Figura. C.3 Ajuste Lineal entre datos de PD Copiapó– Elibor Campamento.

Tabla. C.7 Probabilidades condicionales de precipitación Copiapó – Elibor Campamentos.

Copiapó Llueve=A	
Elibor Campamento Llueve=B	
Prob. De A dado B	
P(B)	0,008
P(A^B)	0,006
P(A B)	0,748
Prob. De A dado B'	
P(B')	0,992
P(A^B')	0,003
P(A B')	0,003

La homogeneidad entre las series rellenas se comprueba por medio de una curva doble acumulada entre la estación Elibor Campamento y Copiapó, según la Figura. C.4.

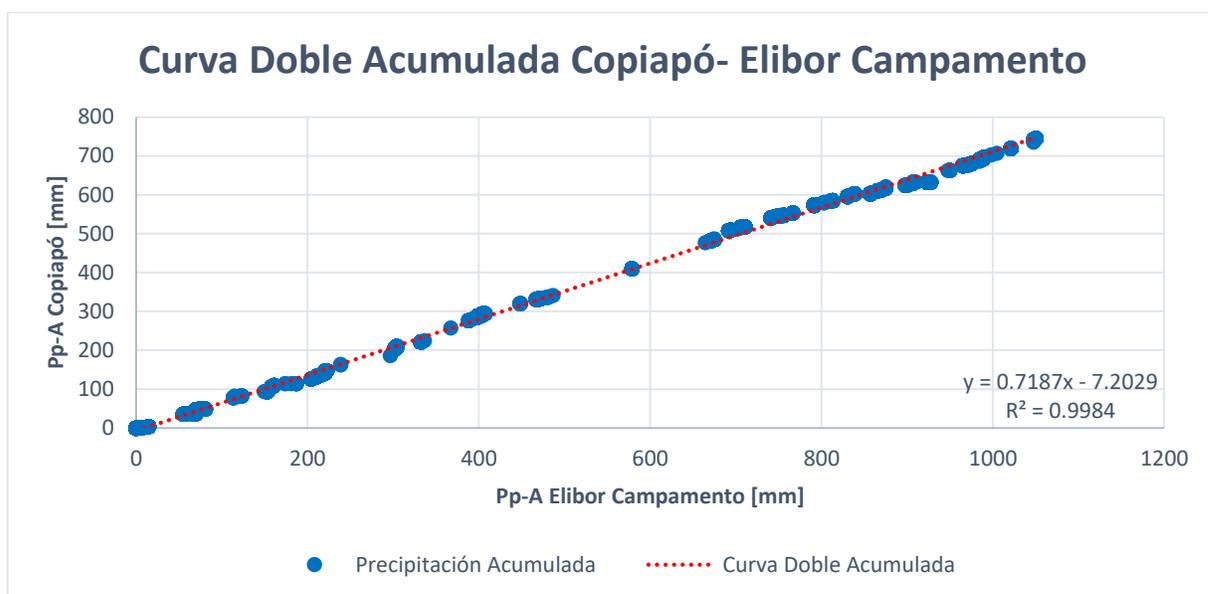


Figura. C.4 Curva Doble Acumulada de Precipitaciones Diarias Acumuladas (Pp-A) entre Estación Copiapó y Elibor Campamento.

La serie de datos completa corresponde a la presente en la Tabla. C.8, en donde se destacó en color verde aquellos años en los que existieron variaciones en el valor de la PMD.

Tabla. C.8 Serie Anual de Máximas Precipitaciones Diarias (PMD) después del relleno de información. Estación Copiapó.

Año	Fecha	PMD [mm]
1962	-	16,2
1963	-	6,7
1964	-	2,6
1965	-	21,1
1966	-	4,8
1967	-	10,3
1968	-	0,0
1969	-	17,3
1970	-	1,3
1971	20-jun	2,5
1972	05-jul	6,0
1973	07-jun	8,0
1974	10-sept	2,6
1975	31-may	4,0
1976	27-may	8,0
1977	11-jun	12,5
1978	-	0,0
1979	28-mar	0,5

1980	25-jul	32,0
1981	06-ago	7,0
1982	25-sept	1,5
1983	30-jun	29,0
1984	10-jul	12,0
1985	22-jul	4,4
1986	18-may	4,5
1987	24-jul	22,8
1988	21-may	1,0
1989	20-ago	11,4
1990	01-ene	0,0
1991	17-jun	32,7
1992	27-may	25,8
1993	11-ago	0,5
1994	-	0,0
1995	19-may	1,5
1996	-	0,0
1997	12-jun	68,3
1998	09-jun	2,2
1999	31-mar	21,6

2000	23-jun	21,5
2001	01-ene	0,0
2002	27-ago	20,0
2003	01-jun	1,5
2004	20-jul	5,3
2005	15-jul	10,2
2006	-	0,0
2007	24-jun	0,5
2008	20-jul	6,0
2009	21-jul	2,5
2010	28-may	4,5
2011	08-jul	29,5
2012	05-sept	0,5
2013	18-jul	2,0
2014	22-may	6,0
2015	12-jul	16,8
2016	-	2,2
2017	16-mar	18,7
2018	26-jul	0,4

Anexo C.3 Relleno Estación Almendral: Tranque Humo Corral.

La información disponible e incompleta de la estación Almendral se presenta en la Tabla. C.9 a continuación:

Tabla. C.9 Serie Anual de Máximas Precipitaciones Diarias (PMD) antes del relleno de información. Estación Almendral.

Año	Fecha	PMD [mm]
1959	13-abr	22,0
1960	21-jun	14,0
1961	27-ago	41,0
1962	02-oct	13,0
1963	19-jul	33,0
1964	17-ago	12,0
1965	17-jul	38,0
1966	10-jul	32,0
1967	-	-
1968	-	-
1969	-	-
1970	-	-
1971	-	-
1972	24-ago	52,0
1973	15-jun	28,0
1974	24-jun	21,0
1975	31-may	42,5
1976	07-ago	25,0
1977	06-oct	18,0
1978	12-sept	27,0
1979	31-jul	1,5
1980	25-jul	35,0
1981	12-may	32,0
1982	12-ago	36,0
1983	07-jul	43,5
1984	01-jul	52,0
1985	29-jul	32,5
1986	13-ago	28,5
1987	24-jul	64,0
1988	16-jun	4,5
1989	04-may	4,5
1990	07-jul	25,0
1991	17-jun	53,5
1992	07-jun	35,0
1993	29-ago	19,5
1994	29-jun	7,5
1995	12-sept	2,5
1996	04-ago	8,0
1997	16-ago	95,0
1998	14-jun	13,5
1999	30-oct	13,5
2000	23-jun	44,0
2001	19-jul	38,5
2002	04-jun	48,5
2003	21-may	50,5
2004	21-jul	31,2
2005	03-may	37,0
2006	26-jul	23,6
2007	14-jun	20,0
2008	16-ago	50,0
2009	15-ago	22,0
2010	13-jun	21,0
2011	05-jun	34,0
2012	22-ago	10,0
2013	17-may	34,0
2014	11-jun	33,0
2015	08-ago	45,0
2016	24-jul	17,0
2017	11-may	56,0
2018	10-jun	27,0

En relación a estos valores, destacados en color amarillo se encuentran aquellos años en que existen datos faltantes, siendo estos últimos los presentes en la Tabla. C.10. En base a lo mencionado, utilizando la estación “La Florida La Serena (Ad.)” se generó el ajuste presente en la Figura. C.5, como así mismo las probabilidades condicionales en la Tabla. C.11. Se verificó además el ajuste de una curva doble acumulada, presente en la Figura. C.6.

Tabla. C.10 Intervalos de fechas y días faltantes en la estación Almendral.

Datos Faltantes Almendral		
Fecha Desde	Fecha Hasta	Días
01-04-1967	31-12-1971	1736
01-06-1972	30-06-1972	30
01-07-1975	31-07-1975	31
01-08-1989	31-08-1989	31
01-12-1989	31-12-1989	31
15-01-2009	16-01-2009	2
Total Días Faltantes		1861

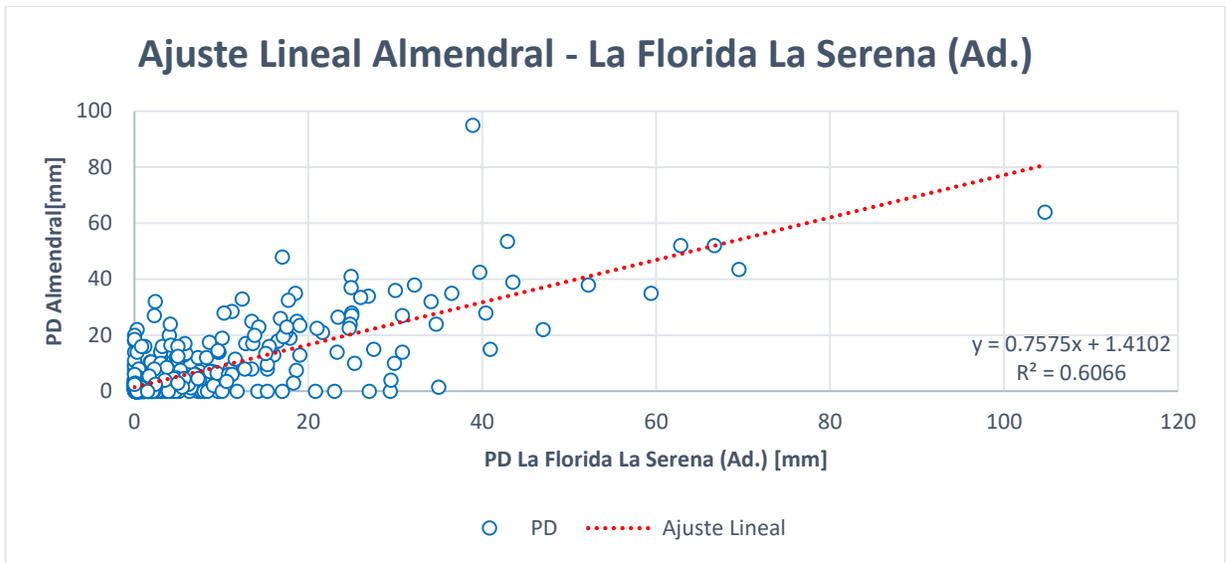


Figura. C.5 Ajuste lineal entre valores diarios de precipitación (PD) de la estación Almendral y La Florida La Serena.

Tabla. C.11 Probabilidades condicionales entre estaciones.

Almendral Llueve=A	
La Florida La Serena (Ad.) Llueve=B	
Prob. De A dado B	
P(B)	0,025
P(A^B)	0,010
P(A B)	0,387
Prob. De A dado B'	
P(B')	0,975
P(A^B')	0,003
P(A B')	0,004

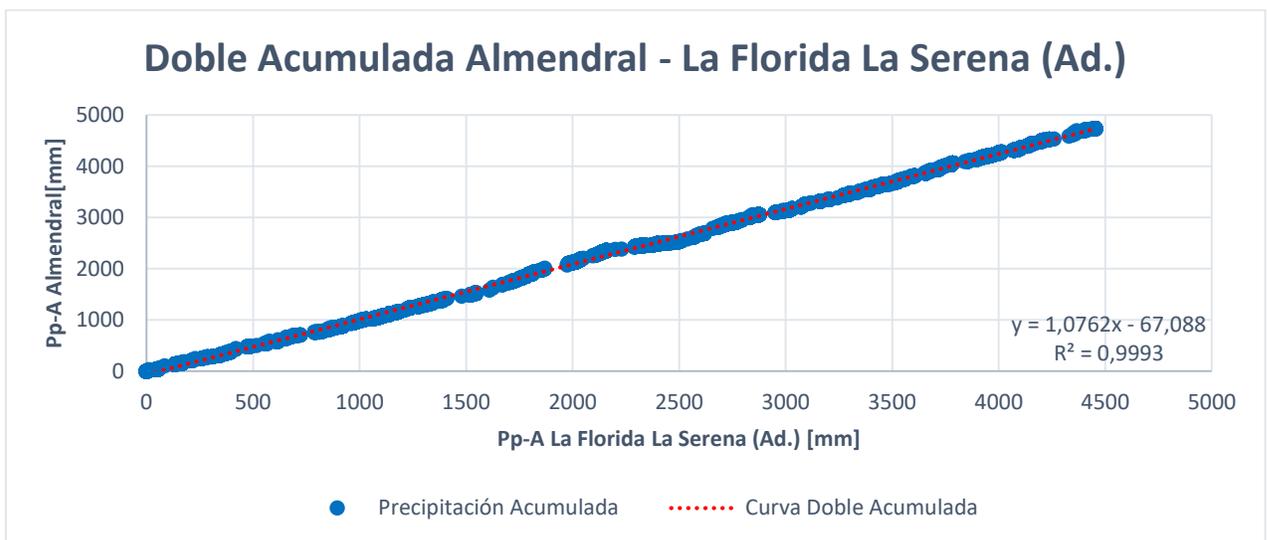


Figura. C.6 Curva Doble Acumulada de Precipitaciones Diarias Acumuladas (Pp-A) Almendral y La Florida La Serena (Ad.).

La serie anual de máximas precipitaciones diarias completa, se presenta en la Tabla. C.12, en donde se encuentra destacado en color verde los años que presentaron diferencias en relación a la serie incompleta.

Tabla. C.12 Serie Anual de Máximas Precipitaciones Diarias (PMD) después del relleno de información. Estación Almendral.

Año	Fecha	PMD [mm]
1959	13-abr	22,0
1960	21-jun	14,0
1961	27-ago	41,0
1962	02-oct	13,0
1963	19-jul	33,0
1964	17-ago	12,0
1965	17-jul	38,0
1966	10-jul	32,0
1967	-	6,1
1968	-	8,7
1969	-	4,8
1970	-	9,2
1971	-	9,0
1972	24-ago	52,0
1973	15-jun	28,0
1974	24-jun	21,0
1975	31-may	42,5
1976	07-ago	25,0
1977	06-oct	18,0
1978	12-sept	27,0
1979	31-jul	1,5
1980	25-jul	35,0
1981	12-may	32,0
1982	12-ago	36,0
1983	07-jul	43,5
1984	01-jul	52,0
1985	29-jul	32,5
1986	13-ago	28,5
1987	24-jul	64,0
1988	16-jun	4,5

1989	04-may	8,8
1990	07-jul	25,0
1991	17-jun	53,5
1992	07-jun	35,0
1993	29-ago	19,5
1994	29-jun	7,5
1995	12-sept	2,5
1996	04-ago	8,0
1997	16-ago	95,0
1998	14-jun	13,5
1999	30-oct	13,5
2000	23-jun	44,0
2001	19-jul	38,5
2002	04-jun	48,5
2003	21-may	50,5
2004	21-jul	31,2
2005	03-may	37,0
2006	26-jul	23,6
2007	14-jun	20,0
2008	16-ago	50,0
2009	15-ago	22,0
2010	13-jun	21,0
2011	05-jun	34,0
2012	22-ago	10,0
2013	17-may	34,0
2014	11-jun	33,0
2015	08-ago	45,0
2016	24-jul	17,0
2017	11-may	56,0
2018	10-jun	27,0

Anexo C.4 Relleno Estación El Torito: Tranque El Torito.

La metodología de relleno en el caso del Tranque El Torito difiere a los ajustes realizados anteriormente, consistiendo en este caso en ver la correlación que existe entre las series anuales de máximas precipitaciones diarias entre las estaciones El Torito y El Cobre por medio de un ajuste lineal, y estimando en base a este los datos faltantes. El ajuste lineal corresponde al utilizado en el informe hidrológico desarrollado por Arcadis (2018), siendo este el presente en la Figura. C.7.

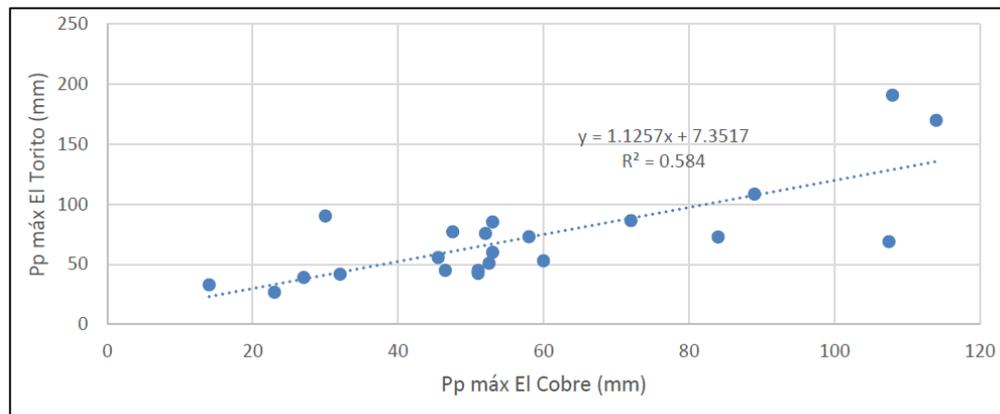


Figura. C.7 Correlación de precipitaciones máximas diarias entre Estación El Torito y El Cobre. Fuente: Arcadis (2018).

De esta forma, la serie anual de máximas precipitaciones antes y después del relleno en la estación el Torito corresponde al presente en la Tabla. C.13.

Tabla. C.13 Serie Anual de Máximas Precipitaciones Diarias (PMD) antes y después del relleno de información. Estación El Torito.

Año	PMD_{in} [mm]	PMD_{fin} [mm]
1986	90,0	90,0
1987	104,6	104,6
1988	34,0	34,0
1989	77,0	77,0
1990	26,9	26,9
1991	55,6	55,6
1992	86,4	86,4
1993	42,5	42,5
1994	72,8	72,8
1995	52,9	52,9
1996	41,8	41,8
1997	108,6	108,6
1998	33,0	33,0
1999	116,8	116,8
2000	170,0	170,0
2001	69,0	69,0
2002	191,0	191,0
2003	45,1	45,1
2004	50,9	50,9
2005	45,1	45,1
2006	60,0	60,0
2007	39,0	39,0
2008	73,0	73,0
2009	0,0	67,6
2010	0,0	67,0
2011	0,0	54,6
2012	0,0	68,1
2013	0,0	60,3
2014	0,0	61,9
2015	75,7	75,7
2016	85,2	85,2
2017	90,4	90,4
2018	55,2	55,2

Anexo D : Ajustes Gráficos Montecarlo.

Con el objetivo de esclarecer y complementar lo expuesto en el Capítulo IV de este trabajo, se añade esta sección en donde es posible encontrar un mayor detalle de la información en relación a los análisis de tendencias realizados sobre las estaciones de estudios post-relleno de información.

En función de lo expuesto, a continuación se presentan en las Figura. D.1a la Figura. D.4 los resultados obtenidos por medio del método de Montecarlo con el fin complementar los resultados expuestos en las secciones del capítulo 4.

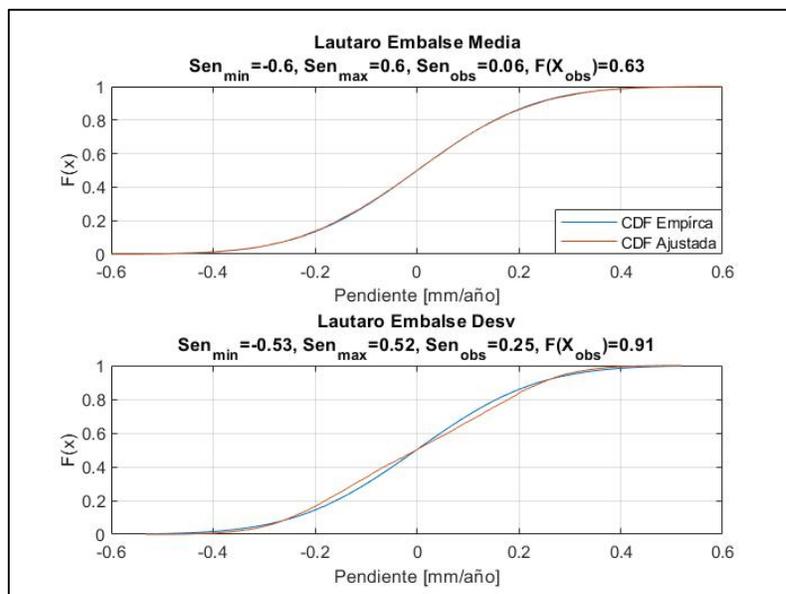


Figura. D.1 Simulación de Montecarlo sobre las series anuales de máximas precipitaciones diarias considerando una ventana móvil de 20 años. Análisis de la media y desviación estandar, Lautaro Embalse.

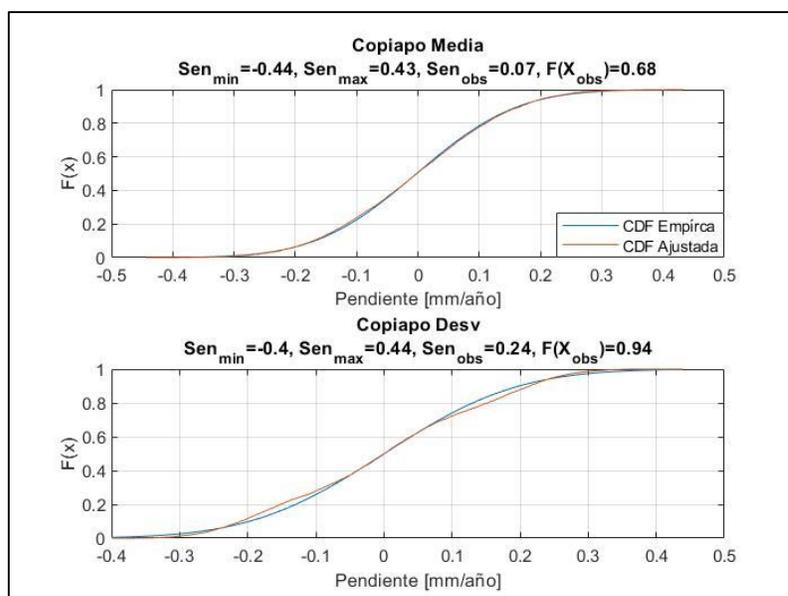


Figura. D.2 Simulación de Montecarlo sobre las series anuales de máximas precipitaciones diarias considerando una ventana móvil de 20 años. Análisis de la media y desviación estandar, Copiapó.

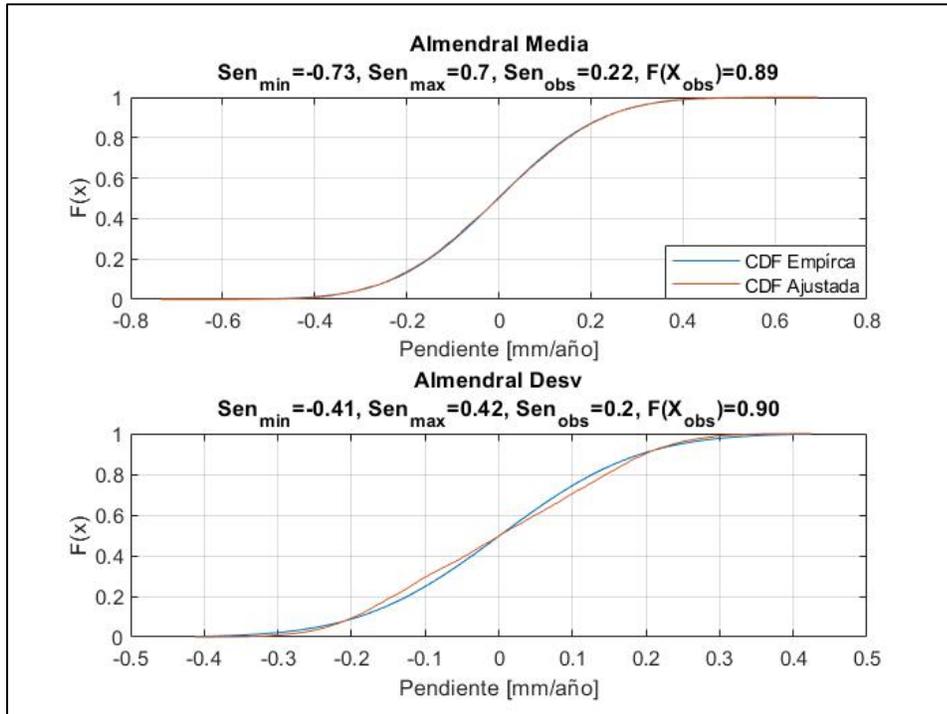


Figura. D.3 Simulación de Montecarlo sobre las series anuales de máximas precipitaciones diarias considerando una ventana móvil de 20 años. Análisis de la media y desviación estandar, Almendral.

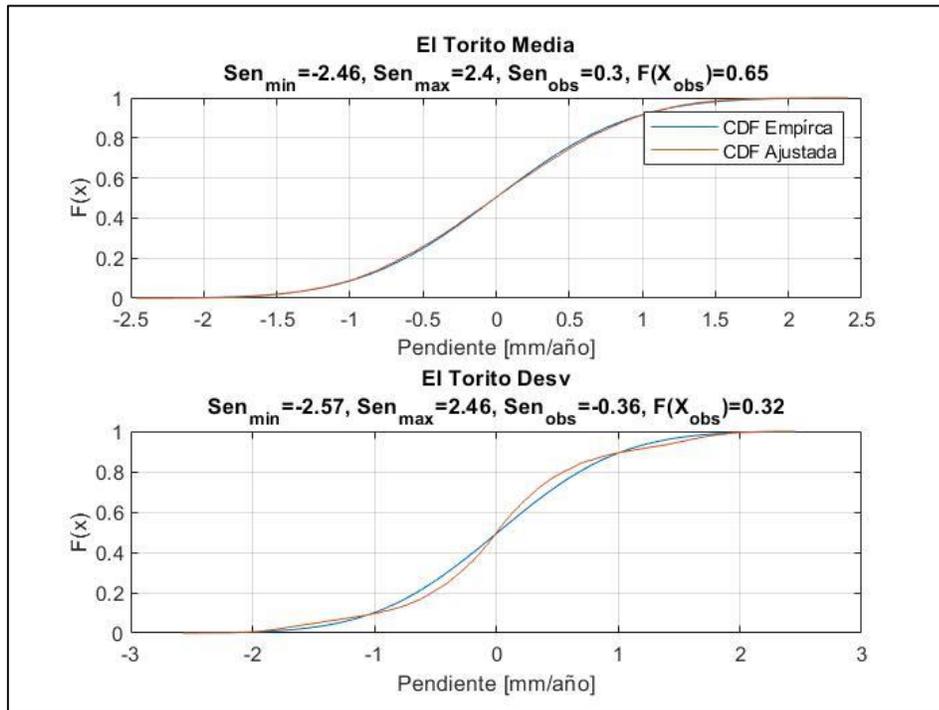


Figura. D.4 Simulación de Montecarlo sobre las series anuales de máximas precipitaciones diarias considerando una ventana móvil de 20 años. Análisis de la media y desviación estandar, El Torito.

Anexo E : Estimación Precipitación de Diseño Escenario 5.

A diferencia de los Escenarios antes vistos en donde se estima un valor de PMP según distintas metodologías, la estimación del Escenario 5 corresponde a realizar un análisis de frecuencia sobre las series anuales de máximas precipitaciones diarias bajo un régimen estacionario como no estacionario. La realización de este escenario, se basa principalmente en la actual normativa en relación al abandono de depósitos de relaves, en donde se debe comprobar que la crecida asociada a un periodo de retorno de $T = 10.000$ años, no sea mayor a la CMP; ya que en caso contrario se debe adoptar el primer valor de los mencionados.

Por esta razón surge la necesidad de revisar -y comprobar en primera instancia- que no se de esta situación en los depósitos estudiados, como así mismo estudiar lo que sucede al considerar un enfoque de diseño no estacionario. Mencionado esto, siguiendo la metodología del capítulo 2 punto 2.3.3, se realiza un análisis de frecuencia estacionario como no estacionario considerando las distribuciones GEV en cada uno de las estaciones de estudio.

Anexo E.1 Parámetros Distribuciones No Estacionarias.

Los casos a revisar en función del análisis de frecuencia consideran dos situaciones: la distribución GEV con parámetro de forma libre ($\xi \neq 0$), y el segundo, un parámetro de forma igual a 0 para generar la distribución Gumbel; por otra parte, en relación al régimen, el estacionario considera un parámetro de localización (μ) y escala (σ) constantes; a diferencia del régimen no estacionario que puede considerar una variación lineal en función del tiempo de uno u ambos parámetros, como se puede observar en la ecuación (E.1) el parámetro de localización variable:

$$\mu(t) = \mu_1 t + \mu_0 \quad (E.1)$$

En este sentido, según lo mencionado se generan 8 casos posibles en función de las situaciones consideradas, cuyos parámetros según cada uno de los regímenes se resumen en las Tabla. E.1 a la Tabla. E.4 para cada una de las estaciones de estudio.

Tabla. E.1 Parámetros y errores asociados a las Distribuciones según régimen, estación Lautaro Embalse.

Distribución	Tipo	Parámetros					Desviación Parámetros				
		μ_0	μ_1	σ_0	σ_1	ξ	μ_0'	μ_1'	σ_0'	σ_1'	ξ'
Gumbel	Estacionario	12,05	-	12,06	-	-	1,73	-	1,40	-	-
GEV		9,50	-	9,30	-	0,45	1,63	-	1,49	-	0,19
Gumbel	No Estacionario	11,55	0,02	12,05	-	-	3,35	0,11	1,40	-	-
		11,95	-	10,52	0,06	-	1,74	-	2,79	0,10	-
		10,87	0,05	10,11	0,08	-	3,28	0,12	2,98	0,11	-
GEV		8,80	0,02	9,25	-	0,45	2,34	0,06	1,50	-	0,20
		9,47	-	9,83	-0,02	0,45	1,61	-	2,35	0,07	0,20
		8,82	0,02	9,31	0,00	0,46	3,00	0,09	3,13	0,10	0,20

Tabla. E.2 Parámetros y errores asociados a las Distribuciones según régimen, estación Copiapó.

Distribución	Tipo	Parámetros					Desviación Parámetros				
		μ_0	μ_1	σ_0	σ_1	ξ	μ_0'	μ_1'	σ_0'	σ_1'	ξ'
Gumbel	Estacionario	6,72	-	8,05	-	-	1,19	-	0,99	-	-
GEV		4,08	-	4,67	-	0,82	0,86	-	0,96	-	0,24
Gumbel	No Estacionario	7,86	-0,05	8,00	-	-	2,28	0,08	0,99	-	-
		6,82	-	5,63	0,10	-	1,14	-	1,84	0,08	-
		7,13	-0,02	5,72	0,09	-	2,04	0,08	1,95	0,08	-
GEV		4,91	-0,03	4,56	-	0,82	1,16	0,03	0,94	-	0,23
		4,19	-	3,93	0,03	0,83	0,86	-	1,13	0,03	0,24
		5,52	-0,06	5,61	-0,04	0,86	1,66	0,05	2,20	0,08	0,24

Tabla. E.3 Parámetros y errores asociados a las Distribuciones según régimen, estación Almendral.

Distribución	Tipo	Parámetros					Desviación Parámetros				
		μ_0	μ_1	σ_0	σ_1	ξ	μ_0'	μ_1'	σ_0'	σ_1'	ξ'
Gumbel	Estacionario	22,36	-	15,66	-	-	2,13	-	1,59	-	-
GEV		22,56	-	15,80	-	-0,02	2,33	-	1,72	-	0,10
Gumbel	No Estacionario	16,43	0,20	15,30	-	-	4,17	0,12	1,56	-	-
		22,11	-	14,75	0,03	-	2,34	-	3,92	0,12	-
		16,12	0,21	13,41	0,06	-	3,95	0,12	3,70	0,12	-
GEV		16,54	0,20	15,44	-	-0,02	4,25	0,12	1,67	-	0,10
		22,33	-	14,65	0,04	-0,03	2,44	-	3,90	0,13	0,11
		16,31	0,21	13,49	0,07	-0,03	4,05	0,12	3,69	0,12	0,10

Tabla. E.4 Parámetros y errores asociados a las Distribuciones según régimen, estación El Torito.

Distribución	Tipo	Parámetros					Desviación Parámetros				
		μ_0	μ_1	σ_0	σ_1	ξ	μ_0'	μ_1'	σ_0'	σ_1'	ξ'
Gumbel	Estacionario	63,09	-	25,60	-	-	4,66	-	3,62	-	-
GEV		60,85	-	23,72	-	0,17	4,69	-	3,64	-	0,14
Gumbel	No Estacionario	53,53	0,57	24,40	-	-	9,27	0,47	3,60	-	-
		66,35	-	40,70	-0,92	-	3,82	-	8,47	0,33	-
		56,11	0,43	37,85	-0,81	-	10,63	0,43	8,16	0,32	-
GEV		41,68	0,98	19,05	-	0,40	6,96	0,30	3,54	-	0,19
		64,34	-	39,54	-0,96	0,26	3,47	-	8,38	0,33	0,18
		50,39	0,56	30,88	-0,63	0,30	9,59	0,38	8,62	0,35	0,18

Anexo E.2 Periodos de Retorno No Estacionarios.

Estimados los parámetros según las diversas situaciones consideradas, se determinan las precipitaciones máximas en 24 horas para distintos periodos de retornos, presentándose en la Tabla. E.5 a la Tabla. E.8. En relación a estas, la tendencia se consideró hasta el último año con información, manteniéndose estacionaria la serie para periodos de retorno mayores a este.

Tabla. E.5 Precipitación [mm] según régimen de diseño para distintos periodos de retorno, estación Lautaro Embalse.

Distribución	Parámetros	Periodos de Retorno (Tr=año)							
		2	10	20	50	100	500	1,000	10,000
Gumbel	μ, σ	16	39	48	59	68	87	95	123
GEV	μ, σ, ξ	13	46	67	107	151	321	441	1249
Gumbel	μ_t, σ	17	40	48	60	68	87	96	124
	μ, σ_t	17	43	52	65	75	97	106	137
	μ_t, σ_t	18	45	55	68	78	101	110	143
GEV	μ_t, σ, ξ	14	46	68	110	154	332	459	1327
	μ, σ_t, ξ	13	44	64	103	145	313	433	1250
	μ_t, σ_t, ξ	14	46	68	109	154	331	457	1322

Tabla. E.6 Precipitación [mm] según régimen de diseño para distintos periodos de retorno, estación Copiapó.

Distribución	Parámetros	Periodos de Retorno (Tr=año)							
		2	10	20	50	100	500	1,000	10,000
Gumbel	μ, σ	10	25	31	38	44	57	62	81
GEV	μ, σ, ξ	6	34	63	137	243	915	1614	10609
Gumbel	μ_t, σ	9	24	29	37	42	55	61	79
	μ, σ_t	11	30	38	48	55	72	79	103
	μ_t, σ_t	10	30	37	47	54	71	78	102
GEV	μ_t, σ, ξ	5	33	62	136	243	926	1642	10980
	μ, σ_t, ξ	7	40	74	163	292	1114	1979	13309
	μ_t, σ_t, ξ	4	26	50	114	208	840	1527	11096

Tabla. E.7 Precipitación [mm] según régimen de diseño para distintos periodos de retorno, estación Almendral.

Distribución	Parámetros	Periodos de Retorno (Tr=año)							
		2	10	20	50	100	500	1,000	10,000
Gumbel	μ, σ	28	58	69	83	94	120	131	167
GEV	μ, σ, ξ	28	57	68	81	91	114	123	153
Gumbel	μ_t, σ	34	63	74	88	99	124	134	169
	μ, σ_t	28	59	71	87	98	125	136	175
	μ_t, σ_t	35	67	80	96	108	135	147	187
GEV	μ_t, σ, ξ	34	63	73	86	96	118	127	156
	μ, σ_t, ξ	29	59	71	85	95	118	128	158
	μ_t, σ_t, ξ	35	67	79	93	104	128	138	170

Tabla. E.8 Precipitación [mm] según régimen de diseño para distintos periodos de retorno, estación El torito.

Distribución	Parámetros	Periodos de Retorno (Tr=año)							
		2	10	20	50	100	500	1,000	10,000
Gumbel	μ, σ	72	121	139	163	181	222	240	299
GEV	μ, σ, ξ	70	125	152	191	224	317	366	573
Gumbel	μ_t, σ	81	127	145	168	185	224	241	297
	μ, σ_t	70	90	97	107	114	131	138	162
	μ_t, σ_t	74	95	103	113	121	139	146	171
GEV	μ_t, σ, ξ	81	144	183	254	328	603	789	1953
	μ, σ_t, ξ	67	89	100	118	135	188	218	371
	μ_t, σ_t, ξ	73	101	117	144	169	251	301	563

A pesar de contar con estos resultados, surge la incógnita de cuál de todos estos adoptar para considerar como valor asociado al Escenario 5, por lo cual –para realizar esta elección- se deben considerar: los resultados de análisis de tendencias, criterio del modelador, ajustes gráficos, indicadores de desempeño y la comparación de desempeño entre los modelos.

Anexo E.3 Indicadores y Comparación Modelos.

De esta forma, se utilizan los indicadores de Akaike (AIC) y Bayesiano (BIC) que dependen del valor de máxima verosimilitud y el número de parámetros de la estimación; como así mismo se comparan el desempeño de los modelos en función del radio de verosimilitud. Los indicadores de desempeño como el radio de verosimilitud para cada caso se presentan en la Tabla. E.9 a la Tabla. E.12.

Tabla. E.9 Indicadores de desempeño (rendimiento) y comparación de modelos anidados, estación Lautaro Embalse.

Distribución	Tipo	Rendimiento			Comparación Modelos		
		NL-LH	AIC	BIC	LRT	χ^2	p-value
Gumbel	μ, σ	219,06	442,12	446,06	-	-	-
GEV	μ, σ, ξ	214,86	435,72	441,63	8,40	3,84	0,00
Gumbel	μ_t, σ	219,04	444,09	450,00	0,03	3,84	0,86
	μ, σ_t	218,89	443,78	449,69	0,33	3,84	0,56
	μ_t, σ_t	218,80	445,60	453,48	0,52	5,99	0,77
GEV	μ_t, σ, ξ	214,78	437,56	445,44	0,16	3,84	0,69
	μ, σ_t, ξ	214,81	437,62	445,50	0,10	3,84	0,76
	μ_t, σ_t, ξ	214,78	439,56	449,41	0,16	5,99	0,93

Tabla. E.10 Indicadores de desempeño (rendimiento) y comparación de modelos anidados, estación Copiapó.

Distribución	Tipo	Rendimiento			Comparación Modelos		
		NL-LH	AIC	BIC	LRT	χ^2	p-value
Gumbel	μ, σ	187,82	379,64	383,47	-	-	-
GEV	μ, σ, ξ	177,66	361,32	367,06	20,32	3,84	0,00
Gumbel	μ_t, σ	187,65	381,31	387,04	0,34	3,84	0,56
	μ, σ_t	187,09	380,18	385,92	1,46	3,84	0,23
	μ_t, σ_t	187,07	382,15	389,80	1,49	5,99	0,47
GEV	μ_t, σ, ξ	176,80	361,61	369,26	1,71	3,84	0,19
	μ, σ_t, ξ	177,24	362,48	370,13	0,84	3,84	0,36
	μ_t, σ_t, ξ	176,64	363,27	372,83	2,05	5,99	0,36

Tabla. E.11 Indicadores de desempeño (rendimiento) y comparación de modelos anidados, estación Almendral.

Distribución	Tipo	Rendimiento			Comparación Modelos		
		NL-LH	AIC	BIC	LRT	χ^2	p-value
Gumbel	μ, σ	259,53	523,06	527,25	-	-	-
GEV	μ, σ, ξ	259,50	525,01	531,29	0,05	3,84	0,82
Gumbel	μ_t, σ	258,12	522,24	528,52	2,82	3,84	0,09
	μ, σ_t	259,50	525,00	531,28	0,06	3,84	0,80
	μ_t, σ_t	257,98	523,96	532,34	3,10	5,99	0,21
GEV	μ_t, σ, ξ	258,09	524,19	532,56	2,82	3,84	0,09
	μ, σ_t, ξ	259,45	526,91	535,28	0,10	3,84	0,75
	μ_t, σ_t, ξ	257,94	525,89	536,36	3,12	5,99	0,21

Tabla. E.12 Indicadores de desempeño (rendimiento) y comparación de modelos anidados, estación El Torito.

Distribución	Tipo	Rendimiento			Comparación Modelos		
		NL-LH	AIC	BIC	LRT	χ^2	p-value
Gumbel	μ, σ	160,60	325,19	328,18	-	-	-
GEV	μ, σ, ξ	159,70	325,40	329,89	1,79	3,84	0,18
Gumbel	μ_t, σ	159,91	325,81	330,30	1,38	3,84	0,24
	μ, σ_t	157,79	321,57	326,06	5,62	3,84	0,02
	μ_t, σ_t	157,30	322,60	328,59	6,59	5,99	0,04
GEV	μ_t, σ, ξ	156,79	321,58	327,57	5,82	3,84	0,02
	μ, σ_t, ξ	156,26	320,52	326,51	6,88	3,84	0,01
	μ_t, σ_t, ξ	155,27	320,53	328,01	8,87	5,99	0,01

Anexo E.4 Ajustes de Bondad, gráficas QQ-plot Estacionarias.

Se incluyen los ajustes gráficos de las distribuciones Gumbel y GEV estacionarias en las Figura. E.1 a la Figura. E.8.

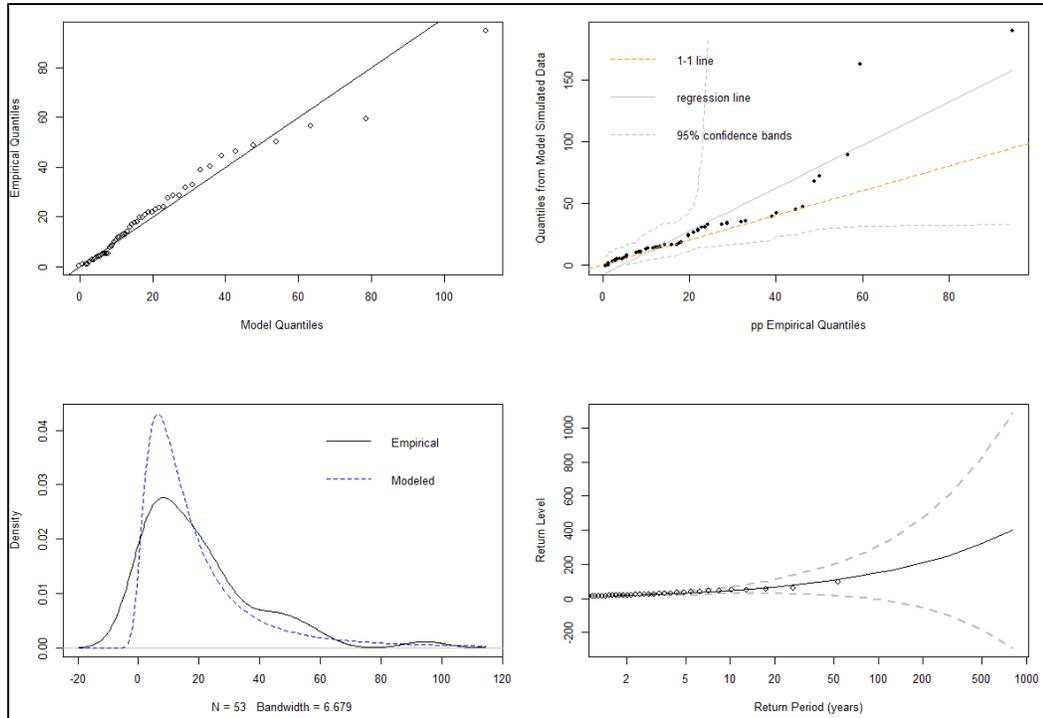


Figura. E.1 Bondad de Ajuste (QQ-plot) distribución GEV Estacionaria. Estación Lautaro Embalse.

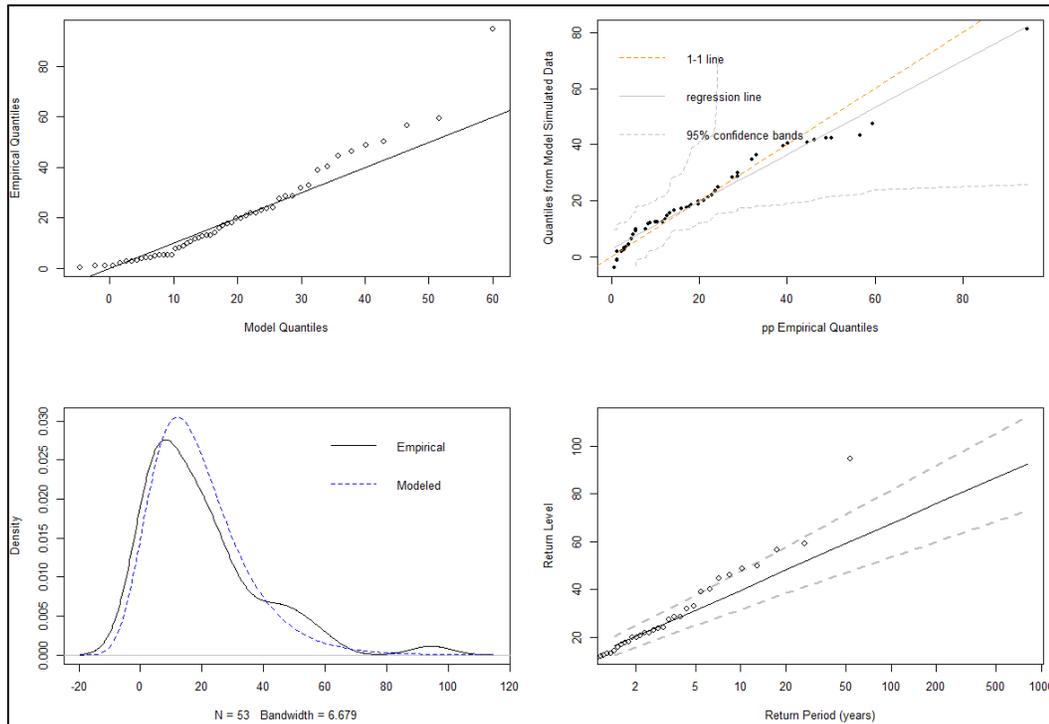


Figura. E.2 Bondad de Ajuste (QQ-plot) distribución Gumbel Estacionaria. Estación Lautaro Embalse.

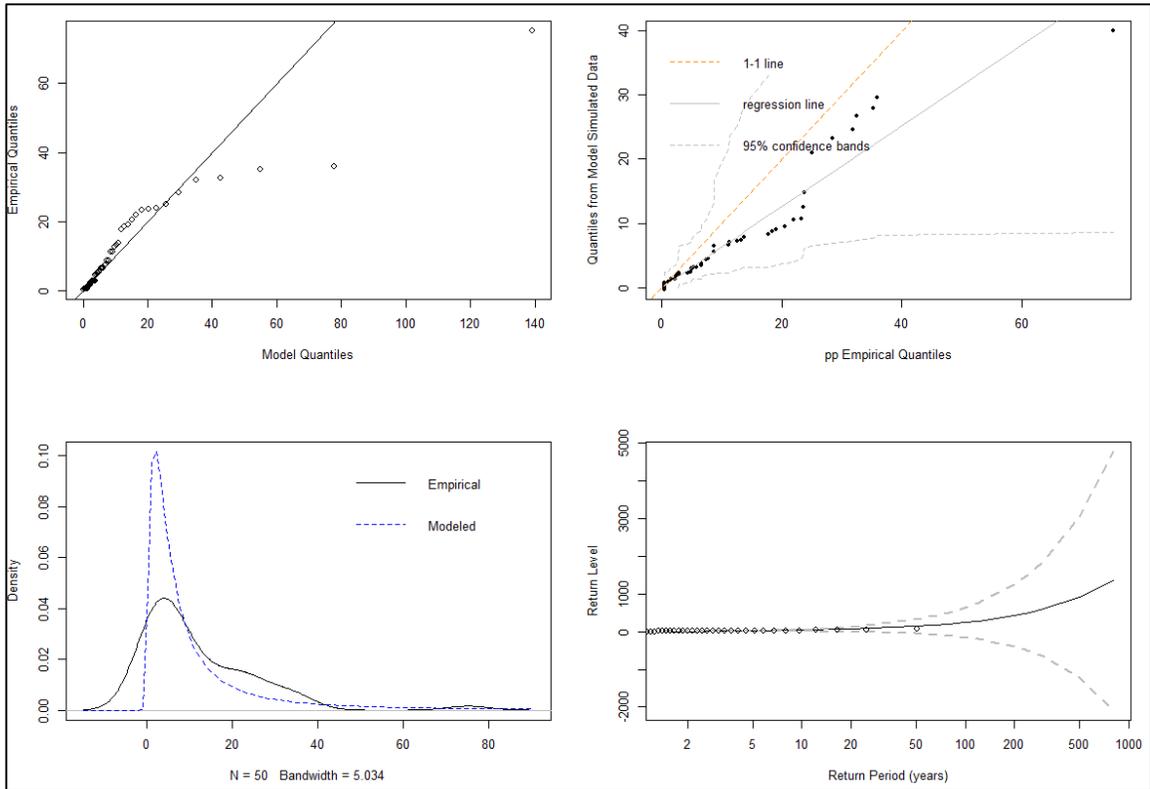


Figura. E.3 Bondad de Ajuste (QQ-plot) distribución GEV Estacionaria. Estación Copiapó.

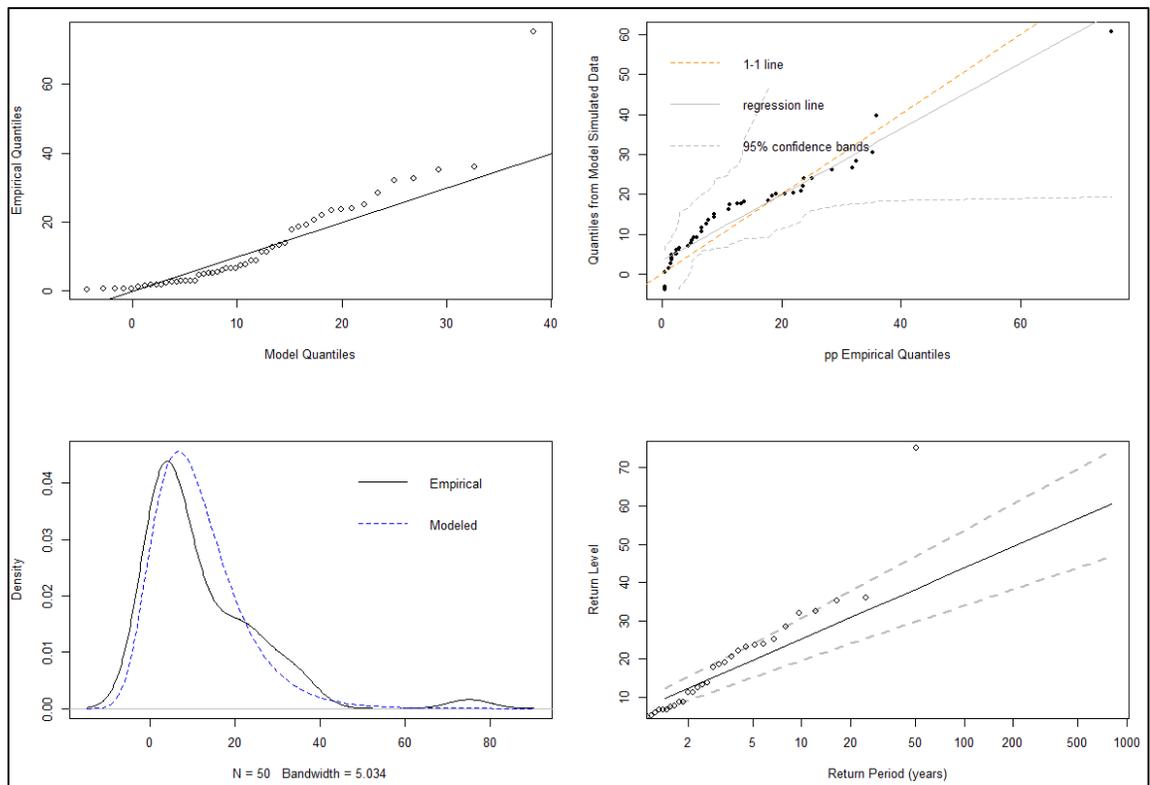


Figura. E.4 Bondad de Ajuste (QQ-plot) distribución Gumbel Estacionaria. Estación Copiapó.

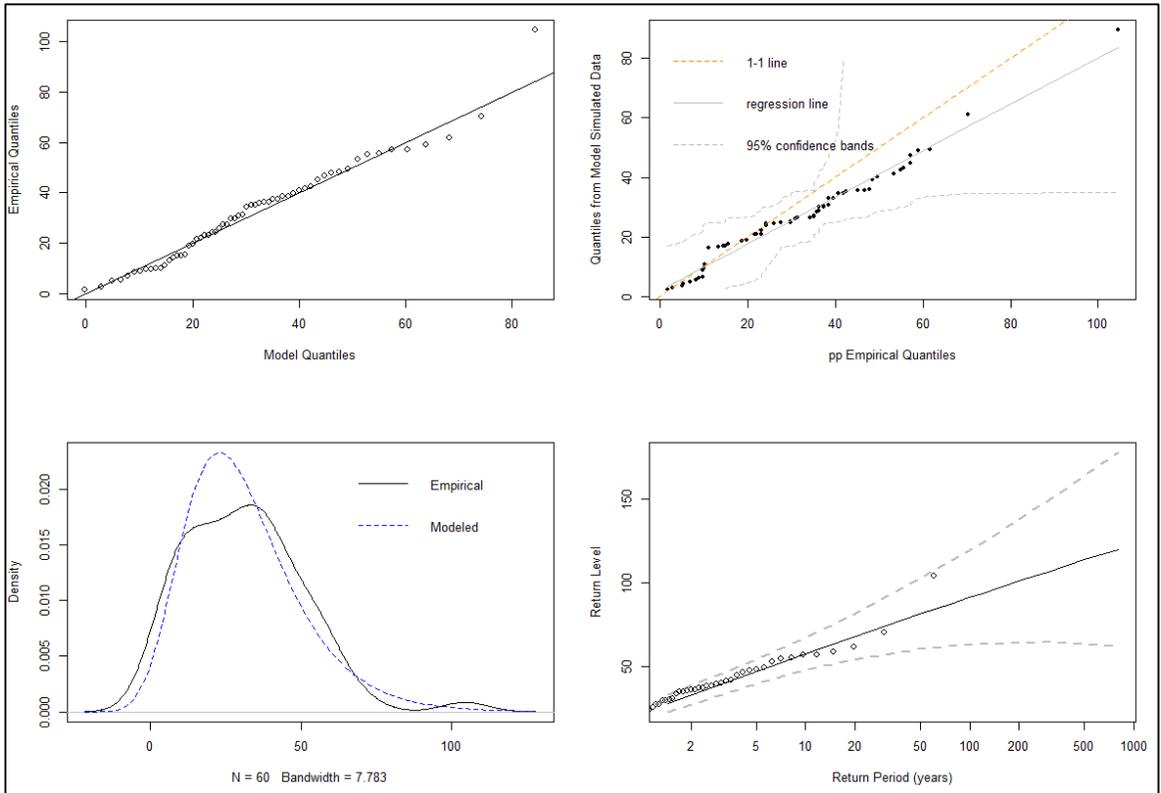


Figura. E.5 Bondad de Ajuste (QQ-plot) distribución GEV Estacionaria. Estación Almendral.

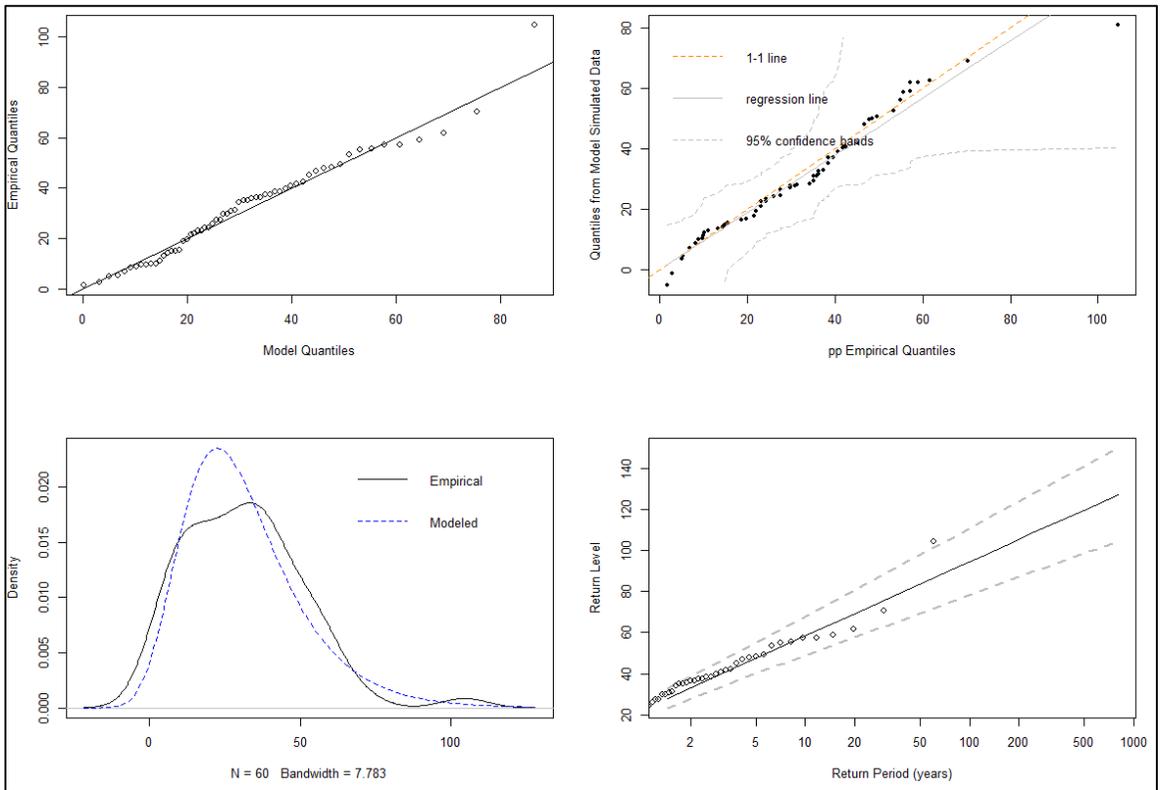


Figura. E.6 Bondad de Ajuste (QQ-plot) distribución Gumbel Estacionaria. Estación Almendral.

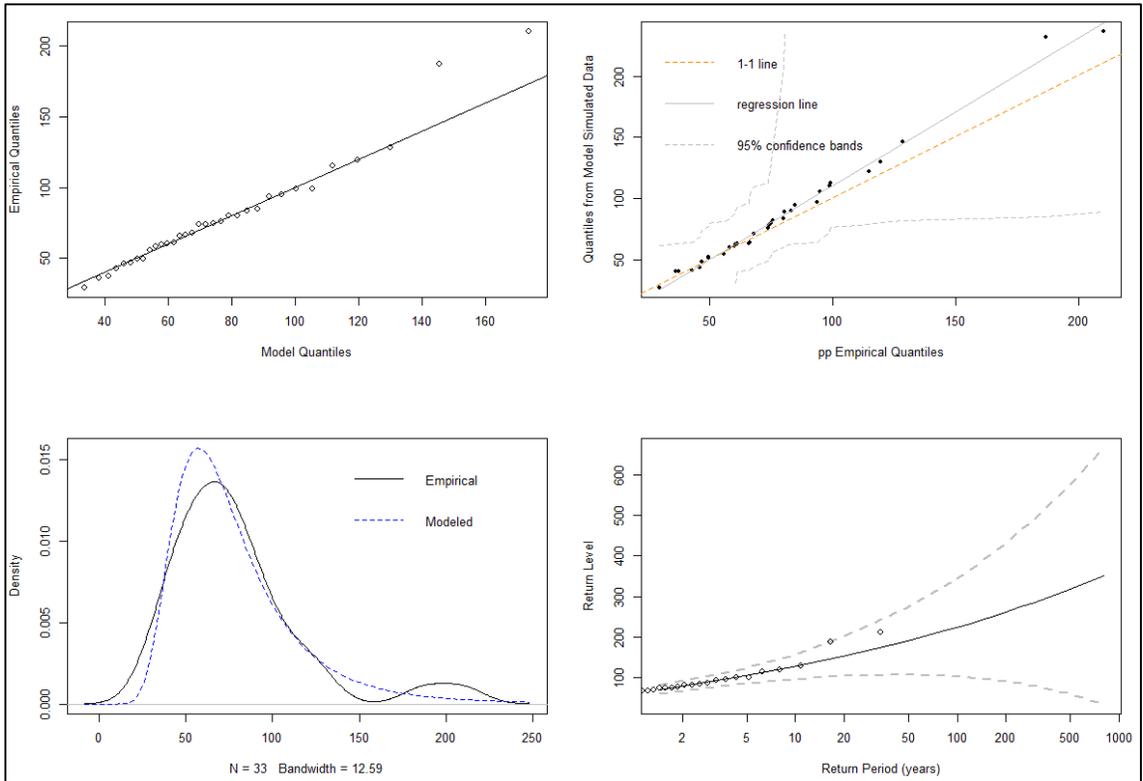


Figura. E.7 Bondad de Ajuste (QQ-plot) distribución GEV Estacionaria. Estación El Torito.

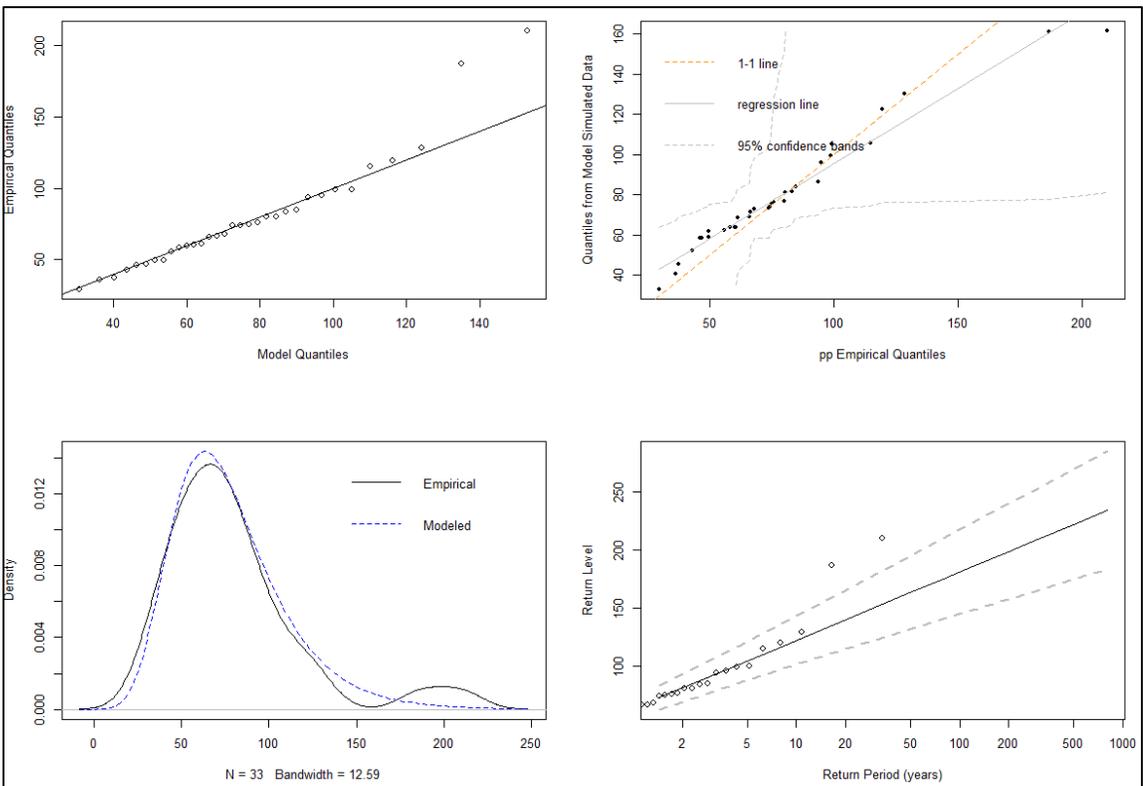


Figura. E.8 Bondad de Ajuste (QQ-plot) distribución Gumbel Estacionaria. Estación El Torito.

Anexo E.5 Intervalos de Confianza distintos periodos de retorno.

Se incluye el intervalo de confianza asociado a los distintos periodos de retorno y los parámetros de las distribuciones en la Tabla. E.13 y Tabla. E.14, respectivamente.

Tabla. E.13 Precipitaciones máximas en 24 horas e intervalos de confianza en [mm] asociados a distintos periodos de retorno.
Estaciones Lautaro Embalse, Copiapó, Almendral y El Torito

Estación Lautaro Embalse									
Ajuste	Tr (años)	2	10	20	50	100	500	1000	10000
Gumbel	IC95%(↓)	13	31	38	47	54	69	75	97
	$P_{\max 24 \text{ hrs}}$	16	39	48	59	68	87	95	123
	IC95%(↑)	20	47	58	71	81	105	115	149
GEV	IC95%(↓)	9	26	28	18	-6	-182	-354	-2027
	$P_{\max 24 \text{ hrs}}$	13	46	67	107	151	321	441	1249
	IC95%(↑)	17	65	106	197	307	823	1236	4524
Estación Copiapó									
Ajuste	Tr (años)	2	10	20	50	100	500	1000	10000
Gumbel	IC95%(↓)	7	19	24	30	34	44	48	62
	$P_{\max 24 \text{ hrs}}$	10	25	31	38	44	57	62	81
	IC95%(↑)	12	30	37	47	54	70	77	99
GEV	IC95%(↓)	4	11	4	-42	-149	-1219	-2661	-28760
	$P_{\max 24 \text{ hrs}}$	6	34	63	137	243	915	1614	10609
	IC95%(↑)	8	57	122	316	636	3049	5889	49978
Estación Almendral									
Ajuste	Tr (años)	2	10	20	50	100	500	1000	10000
Gumbel	IC95%(↓)	23	48	58	69	78	99	107	136
	$P_{\max 24 \text{ hrs}}$	28	58	69	83	94	120	131	167
	IC95%(↑)	33	67	80	98	111	141	154	197
GEV	IC95%(↓)	23	48	55	61	63	64	62	46
	$P_{\max 24 \text{ hrs}}$	28	57	68	81	91	114	123	153
	IC95%(↑)	33	67	81	102	119	164	184	260
Estación El Torito									
Ajuste	Tr (años)	2	10	20	50	100	500	1000	10000
Gumbel	IC95%(↓)	62	100	114	131	144	175	188	230
	$P_{\max 24 \text{ hrs}}$	72	121	139	163	181	222	240	299
	IC95%(↑)	83	141	164	195	217	270	292	367
GEV	IC95%(↓)	59	96	105	108	103	59	21	-232
	$P_{\max 24 \text{ hrs}}$	70	125	152	191	224	317	366	573
	IC95%(↑)	81	155	199	273	345	576	711	1378

Tabla. E.14 Parámetros de Distribuciones estacionarias e intervalos de confianza asociados a cada estadístico en [mm].
Estaciones Lautaro Embalse, Copiapó, Almendral y El Torito.

Estación Lautaro Embalse				
Ajuste	Parámetros	IC95%(↓)	Estimado	IC95%(↑)
Gumbel	μ	8,66	12,05	15,44
	σ	9,32	12,05	14,79
GEV	μ	6,31	9,50	12,69
	σ	6,38	9,30	12,23
	ξ	0,07	0,45	0,82
Estación Copiapó				
Ajuste	Parámetros	IC95%(↓)	Estimado	IC95%(↑)
Gumbel	μ	4,40	6,72	9,04
	σ	6,12	8,05	9,99
GEV	μ	2,40	4,08	5,76
	σ	2,78	4,67	6,55
	ξ	0,35	0,82	1,28
Estación Almendral				
Ajuste	Parámetros	IC95%(↓)	Estimado	IC95%(↑)
Gumbel	μ	18,18	22,36	26,54
	σ	12,54	15,66	18,79
GEV	μ	18,00	22,56	27,12
	σ	12,44	15,80	19,16
	ξ	-0,22	-0,02	0,18
Estación El Torito				
Ajuste	Parámetros	IC95%(↓)	Estimado	IC95%(↑)
Gumbel	μ	53,96	63,09	72,22
	σ	18,50	25,60	32,69
GEV	μ	51,66	60,85	70,04
	σ	16,58	23,72	30,87
	ξ	-0,11	0,16	0,44

Ya con estos valores y los análisis de tendencias es posible realizar una conjetura en función de los resultados obtenidos, considerando en primera prioridad las tendencias de los estadísticos quienes definen el escenario de régimen no estacionario. Luego, en función de los valores obtenidos para los distintos periodos de retorno, ajustes gráficos y el desempeño entre los modelos, se considera la distribución Gumbel o GEV para decidir finalmente el valor de la precipitación No Estacionaria asociada al periodo de retorno de $T = 10.000$ años. Los resultados considerados en cada caso de estudio se presentan en la Tabla. E.15, en donde se indica además, la distribución, los parámetros (estacionarios o no estacionarios) considerados en la obtención de esta precipitación y el riesgo hidrológico en comparación con el caso estacionario para el año 10.000. Finalmente en la Tabla. E.16 se incluye el riesgo hidrológico al año 2.100 a modo de comparativa.

Tabla. E.15 Resumen de resultados y comparación entre análisis de frecuencia estacionario y no estacionario. Estaciones Lautaro Embalse, Copiapó, Almendral y El Torito.

Estación Lautaro Embalse				
Gumbel	Parámetros	$P_{max\ 24\ hrs.}$	Δ	R
	[-]	[mm]	[%]	[%]
Estacionaria	μ, σ	123	-	63,2%
No Estacionaria	$\mu, \sigma_{t(+)}$	137	+11,6%	94,0%
Estación Copiapó				
Gumbel	Parámetros	$P_{max\ 24\ hrs.}$	Δ	R
	[-]	[mm]	[%]	[%]
Estacionaria	μ, σ	81	-	63,2%
No Estacionaria	$\mu_{t(-)}, \sigma_{t(+)}$	102	+25,5%	99,9%
Estación Almendral				
Gumbel	Parámetros	$P_{max\ 24\ hrs.}$	Δ	R
	[-]	[mm]	[%]	[%]
Estacionaria	μ, σ	167	-	63,2%
No Estacionaria	$\mu_{t(+)}, \sigma$	169	+1,7%	69,9%
Estación El Torito				
Gumbel	Parámetros	$P_{max\ 24\ hrs.}$	Δ	R
	[-]	[mm]	[%]	[%]
Estacionaria	μ, σ	299	-	63,2%
No Estacionaria	$\mu_{t(+)}, \sigma_{t(-)}$	172	-42,6%	0,0%

Tabla. E.16 Riesgo Hidrológico al año 2100 casos estacionarios y no estacionarios.

Riesgo Hidrológico (R_h) al año 2.100 [%]		
Estación	Caso Estacionario	Caso No Estacionario
Lautaro Embalse	0,8%	2,3%
Copiapó		5,8%
Almendral		1,0%
El Torito		0,0%

Anexo F : Curva Número Tranque Amolanas.

A diferencia de los demás depósitos estudiados, el Tranque Amolanas no posee información en relación al diseño hidrológico, por lo cual se debió estimar el valor Curva Número; y dado que no se cuenta con información detallada de la zona de estudio, se debió adoptar una metodología alternativa considerando el uso de imágenes satelitales.

De esta forma, dado que este parámetro depende de la cobertura de suelo en la cuenca aportante, se consideró el uso de un producto cartográfico de Land Cover (Cobertura de Suelo) de Chile continental para el año 2014, generado a través de un proyecto de colaboración internacional que incorporó a investigadores de China, Estados Unidos y Chile –este último por medio del Laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje (GEP), de la universidad de Chile- (GEP, 2014). Este producto corresponde a una capa raster en la cual es posible encontrar clases de la cobertura de suelo en el país, dividida en: Cultivos, Bosques, Pastizales, Matorrales, Humedales, Cuerpos de Agua, Superficies Impermeables, Tierras Desnudas, Hielo y Nieves; y Nubes. Las cuales se dividen a su vez en sub-categorías con un mayor nivel de especificación¹¹ (a modo de ejemplo los Cuerpos de Agua se dividen en: Lagos, Reservorios, Ríos y Océanos).

En función de las clases mencionadas y los valores de Curva Número correspondientes a la clasificación de la Cobertura de Superficie del SCS en la Tabla. F.1, se realizó un cruce entre ambas clasificaciones para poder hacer uso de este producto satelital, la cual se presenta en la Tabla. F.2.

Tabla. F.1 Clasificación de la Cobertura de Superficie Según el SCS.

Tipo	Sub-Tipo	A	B	C	D
Tierra Cultivada	Sin Conservar	72	81	88	91
	Conservados	62	71	78	81
Pastizales	Conds. Pobres	68	79	86	89
	Conds. Óptimas	39	61	74	80
Vegas de Ríos		30	58	71	78
Bosques	Cubierta Pobre	45	66	77	83
	Cubierta Buena	25	55	70	77
Áreas Abiertas	Pasto <50%	68	79	86	89
	Pasto 50-75%	49	69	79	84
	Pasto >75%	39	61	74	80
Caminos y Calles	Pavimentados	98	98	98	98
	Grava	76	85	89	91
	Tierra	72	82	87	89
Distritos Urbanos	Comercial	89	92	94	95
	Industrial	81	88	91	93
Residencial	<500 m2	77	85	90	92
	1000 m2	61	75	83	87
	2000 m2	54	70	80	85
	5000 m2	51	68	79	84
	10000 m2	46	65	77	82

¹¹ Para una mayor comprensión de las clases y el producto en sí, se puede revisar la página web del Laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje, de la Universidad de Chile.

Tabla. F.2 Clasificación de Producto de Cobertura de Suelo, ajustado a valores de Curva Número.

Código	Nombre	Curva Número
100	Cultivos	81
200	Bosques	66
300	Pastizales	79
400	Matorrales	79
500	Humedales	78
600	Cuerpos de Agua	0
800	Superficies Impermeables	100
910	Salares	0
920	Suelos Arenosos	76
931	Rocas	91
932	Gravas	76
1000	Hielo y Nieves	0
1200	Nubes	100

Ya con la clasificación realizada, solo resta estimar la proporción de área de cada una de las coberturas de suelo en la cuenca aportante, con lo cual es posible ponderar y generar un valor de Curva Número en función de la clasificación realizada en la Tabla. F.2.

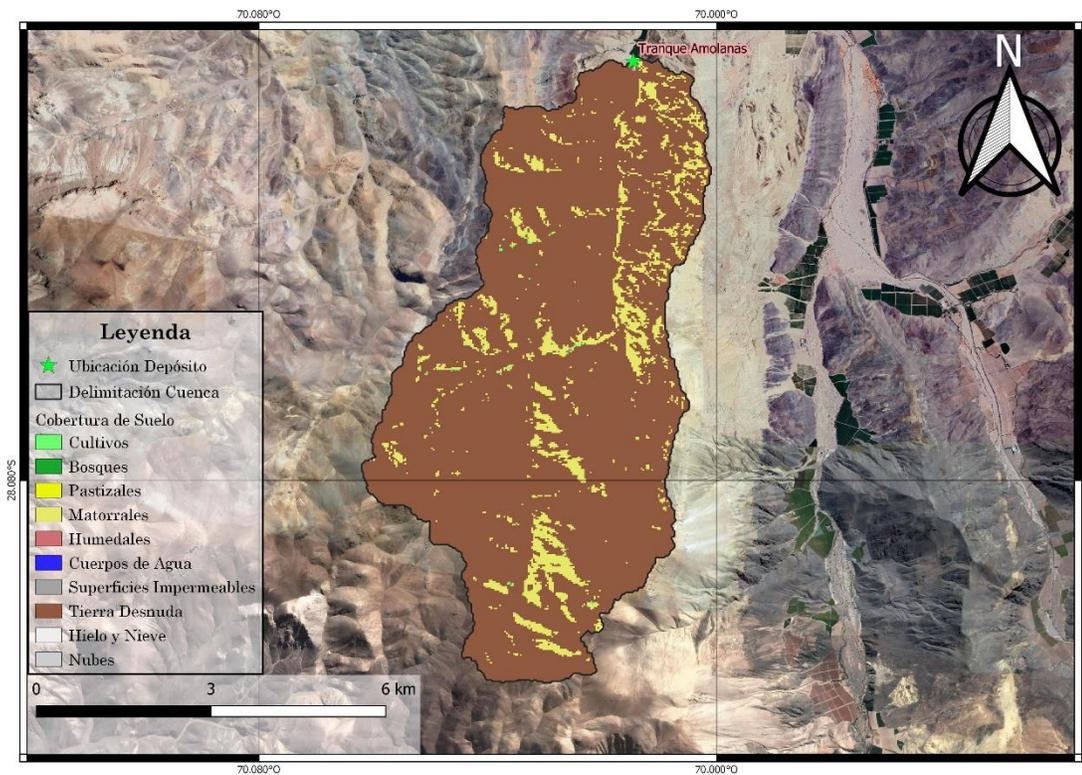


Figura. F.1 Cobertura de Suelo según Producto Cartográfico de la Cuenca Aportante al Tranque Amolanas.

Para esto, ajustando la cobertura del país a la zona de estudio, se genera la Figura. F.1, de la cual se obtienen las áreas y proporciones de cobertura de suelo según el tipo de estos, cuyos valores se presentan en la Tabla. F.3.

Tabla. F.3 Distribución del área de Tipo de Suelo en la cuenca aportante y ponderación de CN según clasificación realizada (en función del área) al Tranque Amolanas.

Código	Área [m2]	Tipo de Suelo	CN [-]	CN Ponderada [-]
140	16208.8	Cultivos	81	0.38
150	2701.5	Cultivos	81	0.06
212	900.5	Bosques	66	0.02
320	8104.4	Pastizales	79	0.18
410	74741.1	Matorrales	79	1.69
450	776225.5	Matorrales	79	17.52
510	900.5	Humedales	78	0.02
800	5403.0	Superficies Impermeables	100	0.15
910	900.5	Salares	0	0.00
920	107159.3	Suelos Arenosos	76	2.33
931	1773956.4	Rocas	91	46.11
932	733900.6	Gravas	76	15.93

De esta forma, ponderando el área de cada tipo de cobertura según el valor de CN, se estima que el valor de la zona de estudio (para una condición antecedente tipo II) corresponde a $CN = 80$, el cual está dentro del rango de valores utilizados en los proyectos, como se puede observar en la Tabla 5.7.

Anexo G : Hietogramas de Precipitación Total y Efectiva máxima en 24 horas según Escenarios de diseño.

Tabla. G.1 Hietogramas de Precipitación Total y Efectiva máxima en 24 horas según los distintos casos (Escenarios) de diseño. Tranque Amolanas.

Tranque Amolanas												
Tiempo	Hietograma de Precipitación Total máxima en 24 horas [mm]						Hietograma de Precipitación Efectiva máxima en 24 horas [mm]					
[hrs]	Caso 0	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 0	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
1	7,02	6,86	10,05	7,62	7,47	4,58	0,02	0,01	0,21	0,04	0,03	0,00
2	7,02	6,86	10,05	7,62	7,47	4,58	0,53	0,47	1,96	0,75	0,69	0,02
3	7,55	7,37	10,80	8,19	8,03	4,92	2,05	1,92	4,69	2,53	2,41	0,44
4	7,90	7,71	11,30	8,57	8,41	5,15	3,42	3,25	6,62	4,02	3,87	1,21
5	7,72	7,54	11,05	8,38	8,22	5,04	4,35	4,18	7,72	5,00	4,84	1,88
6	7,02	6,86	10,05	7,62	7,47	4,58	4,49	4,32	7,62	5,10	4,95	2,11
7	7,02	6,86	10,05	7,62	7,47	4,58	4,87	4,70	8,05	5,50	5,34	2,41
8	5,61	5,48	8,04	6,10	5,98	3,66	4,12	3,98	6,67	4,62	4,50	2,11
9	5,26	5,14	7,53	5,72	5,60	3,44	4,04	3,91	6,44	4,51	4,39	2,13
10	6,32	6,17	9,04	6,86	6,73	4,12	5,01	4,85	7,89	5,58	5,44	2,70
11	7,90	7,71	11,30	8,57	8,41	5,15	6,44	6,25	10,04	7,16	6,98	3,55
12	7,90	7,71	11,30	8,57	8,41	5,15	6,63	6,43	10,22	7,34	7,17	3,72
13	8,77	8,57	12,56	9,53	9,34	5,73	7,56	7,35	11,54	8,36	8,16	4,33
14	8,77	8,57	12,56	9,53	9,34	5,73	7,71	7,49	11,67	8,50	8,31	4,47
15	8,77	8,57	12,56	9,53	9,34	5,72	7,83	7,62	11,78	8,62	8,43	4,60
16	8,77	8,57	12,56	9,53	9,34	5,73	7,93	7,72	11,87	8,72	8,53	4,70
17	9,30	9,08	13,31	10,10	9,90	6,07	8,52	8,29	12,68	9,35	9,15	5,10
18	11,41	11,14	16,33	12,39	12,14	7,44	10,55	10,28	15,64	11,57	11,32	6,37
19	11,41	11,14	16,33	12,39	12,14	7,44	10,65	10,38	15,73	11,67	11,42	6,48
20	15,62	15,25	22,35	16,96	16,63	10,19	14,72	14,34	21,65	16,11	15,76	9,03
21	16,67	16,28	23,86	18,10	17,75	10,88	15,86	15,46	23,23	17,34	16,97	9,81
22	12,81	12,51	18,33	13,91	13,64	8,36	12,26	11,95	17,91	13,39	13,11	7,62
23	7,02	6,86	10,05	7,62	7,47	4,58	6,74	6,58	9,83	7,36	7,21	4,21
24	6,32	6,17	9,04	6,86	6,73	4,12	6,08	5,93	8,86	6,64	6,50	3,80

Tabla. G.2 Hietogramas de Precipitación Total y Efectiva máxima en 24 horas según los distintos casos (Escenarios) de diseño. Tranque El Gato.

Tranque El Gato												
Tiempo	Hietograma de Precipitación Total máxima en 24 horas [mm]						Hietograma de Precipitación Efectiva máxima en 24 horas [mm]					
[hrs]	Caso 0	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 0	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
1	8,86	8,22	12,13	9,58	9,01	6,24	0,48	0,35	1,47	0,66	0,52	0,08
2	11,38	10,56	15,58	12,31	11,57	8,02	4,49	3,82	8,21	5,28	4,65	1,94
3	15,84	14,71	21,70	17,14	16,11	11,17	11,38	10,17	17,75	12,78	11,68	6,49
4	22,46	20,85	30,77	24,31	22,85	15,83	18,14	16,49	26,63	20,03	18,53	11,36
5	12,74	11,83	17,46	13,79	12,96	8,98	11,39	10,43	16,30	12,49	11,62	7,43
6	12,46	11,56	17,06	13,48	12,67	8,78	11,48	10,55	16,27	12,55	11,71	7,61
7	11,09	10,29	15,19	12,00	11,28	7,82	10,04	9,24	14,13	10,95	10,23	6,73
8	7,42	6,88	10,16	8,02	7,54	5,23	7,36	6,78	10,32	8,02	7,50	4,97
9	5,47	5,08	7,50	5,92	5,57	3,86	5,12	4,72	7,16	5,58	5,22	3,47
10	4,61	4,28	6,31	4,99	4,69	3,25	4,48	4,13	6,26	4,88	4,56	3,05
11	3,89	3,61	5,33	4,21	3,96	2,74	3,72	3,44	5,19	4,05	3,79	2,54
12	3,89	3,61	5,33	4,21	3,96	2,74	3,73	3,44	5,20	4,06	3,80	2,55
13	2,52	2,34	3,45	2,73	2,56	1,78	2,41	2,22	3,36	2,62	2,45	1,65
14	2,38	2,21	3,25	2,57	2,42	1,67	2,30	2,13	3,20	2,50	2,34	1,57
15	2,38	2,21	3,25	2,57	2,42	1,67	2,25	2,08	3,13	2,44	2,29	1,54
16	1,94	1,80	2,66	2,10	1,98	1,37	1,92	1,77	2,67	2,08	1,95	1,31
17	1,94	1,80	2,66	2,10	1,98	1,37	1,88	1,73	2,61	2,04	1,91	1,29
18	1,94	1,80	2,66	2,10	1,98	1,37	1,88	1,74	2,61	2,04	1,91	1,29
19	1,94	1,80	2,66	2,10	1,98	1,37	1,88	1,74	2,61	2,04	1,92	1,29
20	1,94	1,80	2,66	2,10	1,98	1,37	1,88	1,74	2,61	2,05	1,92	1,29
21	1,87	1,74	2,56	2,03	1,90	1,32	1,81	1,68	2,52	1,97	1,85	1,25
22	1,87	1,74	2,56	2,03	1,90	1,32	1,82	1,68	2,52	1,97	1,85	1,25
23	1,80	1,67	2,47	1,95	1,83	1,27	1,69	1,56	2,35	1,84	1,72	1,16
24	1,10	1,02	1,51	1,19	1,12	0,78	1,13	1,04	1,56	1,22	1,15	0,77

Tabla. G.3 Hietogramas de Precipitación Total y Efectiva máxima en 24 horas según los distintos casos (Escenarios) de diseño. Tranque Humo Corral.

Tranque Humo Corral												
Tiempo	Hietograma de Precipitación Total máxima en 24 horas [mm]						Hietograma de Precipitación Efectiva máxima en 24 horas [mm]					
[hrs]	Caso 0	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 0	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
1	8,30	9,32	13,07	10,65	10,13	4,24	0,12	0,27	1,21	0,53	0,42	0,00
2	8,30	9,32	13,07	10,65	10,13	4,24	2,43	3,23	6,49	4,32	3,89	0,14
3	9,96	11,19	15,69	12,77	12,16	5,08	5,41	6,60	11,18	8,19	7,57	1,23
4	11,07	12,43	17,43	14,19	13,51	5,65	7,70	9,12	14,39	10,97	10,25	2,40
5	11,07	12,43	17,43	14,19	13,51	5,65	8,71	10,15	15,43	12,02	11,29	3,13
6	11,07	12,43	17,43	14,19	13,51	5,65	9,33	10,76	16,02	12,62	11,91	3,64
7	11,07	12,43	17,43	14,19	13,51	5,65	9,73	11,16	16,38	13,01	12,29	4,01
8	12,17	13,67	19,18	15,61	14,86	6,21	11,02	12,58	18,29	14,60	13,82	4,73
9	12,45	13,98	19,61	15,97	15,20	6,35	11,51	13,10	18,90	15,16	14,36	5,10
10	13,56	15,23	21,35	17,39	16,55	6,92	12,73	14,46	20,75	16,68	15,82	5,77
11	15,22	17,09	23,97	19,52	18,58	7,77	14,47	16,40	23,43	18,88	17,92	6,69
12	15,22	17,09	23,97	19,52	18,58	7,77	14,61	16,53	23,53	19,00	18,05	6,87
13	22,13	24,86	34,86	28,39	27,02	11,30	21,42	24,21	34,36	27,80	26,41	10,22
14	22,13	24,86	34,86	28,39	27,02	11,30	21,57	24,35	34,47	27,92	26,54	10,42
15	18,81	21,13	29,63	24,13	22,97	9,60	18,42	20,77	29,36	23,81	22,64	8,98
16	16,60	18,64	26,15	21,29	20,27	8,47	16,31	18,38	25,95	21,05	20,02	8,00
17	16,88	18,95	26,58	21,64	20,60	8,61	16,62	18,72	26,41	21,43	20,38	8,19
18	17,98	20,20	28,33	23,06	21,95	9,18	17,74	19,98	28,16	22,87	21,75	8,78
19	17,98	20,20	28,33	23,06	21,95	9,18	17,77	20,00	28,18	22,89	21,77	8,82
20	15,77	17,71	24,84	20,23	19,25	8,05	15,60	17,56	24,73	20,09	19,11	7,77
21	15,22	17,09	23,97	19,52	18,58	7,77	15,07	16,96	23,87	19,40	18,45	7,52
22	12,45	13,98	19,61	15,97	15,20	6,35	12,34	13,88	19,54	15,88	15,11	6,17
23	8,30	9,32	13,07	10,65	10,13	4,24	8,23	9,26	13,03	10,59	10,08	4,12
24	7,47	8,39	11,77	9,58	9,12	3,81	7,41	8,34	11,73	9,53	9,07	3,71

Tabla. G.4 Hietogramas de Precipitación Total y Efectiva máxima en 24 horas según los distintos casos (Escenarios) de diseño. Tranque El Torito.

Tranque El Torito												
Tiempo	Hietograma de Precipitación Total máxima en 24 horas [mm]						Hietograma de Precipitación Efectiva máxima en 24 horas [mm]					
[hrs]	Caso 0	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 0	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
1	15,06	14,89	18,17	5,78	18,16	5,00	0,01	0,01	0,06	0,00	0,06	0,00
2	15,06	14,89	18,17	5,78	18,16	5,00	1,80	1,72	3,60	0,00	3,60	0,00
3	15,06	14,89	18,17	5,78	18,16	5,00	5,29	5,15	7,92	0,01	7,92	0,00
4	15,06	14,89	18,17	5,78	18,16	5,00	7,59	7,42	10,57	0,42	10,57	0,11
5	15,49	15,32	18,69	5,94	18,68	5,14	9,44	9,27	12,69	1,10	12,68	0,62
6	17,22	17,02	20,76	6,60	20,76	5,72	11,86	11,65	15,55	1,87	15,55	1,24
7	17,22	17,02	20,76	6,60	20,76	5,72	12,89	12,69	16,63	2,44	16,63	1,73
8	18,94	18,72	22,84	7,26	22,84	6,29	15,06	14,83	19,18	3,22	19,18	2,38
9	19,37	19,15	23,36	7,43	23,35	6,43	16,11	15,87	20,33	3,79	20,32	2,87
10	21,09	20,85	25,44	8,09	25,43	7,00	18,15	17,89	22,73	4,59	22,72	3,55
11	23,67	23,40	28,55	9,08	28,54	7,86	20,93	20,65	26,05	5,62	26,04	4,42
12	23,67	23,40	28,55	9,08	28,54	7,86	22,02	21,72	27,26	6,22	27,25	4,95
13	32,28	31,91	38,93	12,38	38,92	10,72	29,09	28,71	35,86	8,60	35,85	6,92
14	32,28	31,91	38,93	12,38	38,92	10,72	30,19	29,80	37,07	9,28	37,06	7,55
15	33,57	33,19	40,49	12,87	40,48	11,15	31,77	31,37	38,90	10,09	38,89	8,27
16	34,43	34,04	41,53	13,20	41,52	11,43	32,88	32,48	40,17	10,71	40,16	8,84
17	33,14	32,76	39,97	12,71	39,96	11,00	31,88	31,49	38,87	10,60	38,86	8,80
18	27,98	27,65	33,74	10,73	33,73	9,29	27,05	26,72	32,93	9,14	32,92	7,61
19	27,98	27,65	33,74	10,73	33,73	9,29	27,15	26,82	33,02	9,28	33,01	7,76
20	21,09	20,85	25,44	8,09	25,43	7,00	20,52	20,28	24,94	7,08	24,94	5,93
21	19,37	19,15	23,36	7,43	23,35	6,43	18,89	18,66	22,94	6,56	22,94	5,51
22	15,92	15,74	19,21	6,11	19,20	5,29	15,55	15,37	18,89	5,43	18,88	4,57
23	10,76	10,64	12,98	4,13	12,97	3,57	10,52	10,40	12,77	3,69	12,77	3,10
24	9,68	9,57	11,68	3,71	11,68	3,22	9,48	9,36	11,50	3,33	11,50	2,81

