



UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN

Ilumina el futuro

**FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
SEDE CONCEPCIÓN**

**COMPARACIÓN ENTRE METODOLOGÍAS DIRECTA E INDIRECTA
PARA LA ESTIMACIÓN DE CRECIDAS: PROPUESTA DE
COEFICIENTES DE AJUSTE AL MÉTODO INDIRECTO DEL MANUAL
DE CÁLCULO DE CRECIDAS EN CUENCAS SIN DATOS
FLUVIOMÉTRICOS**

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil.

Profesor Guía: MSc. Patricio Ignacio Fuentes Aguilera.

Estudiante: Javier Álvaro Ignacio Riffo del Solar.

© Javier Álvaro Ignacio Rizzo del Solar

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento siempre y cuando se incluya cita bibliográfica del documento.

Concepción, Chile

2025

CALIFICACIÓN DE LA MEMORIA

En Concepción, el de de, los abajo firmantes dejan constancia que el alumno Javier Álvaro Ignacio Riffo del Solar de la carrera Ingeniería Civil ha aprobado la memoria para optar al título de Ingeniero Civil con una nota de _____.

Profesor MSc. Patricio Fuentes Aguilera.

Profesor MSc. Javiera Padilla Reyes.

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar expresando mi gratitud hacia mí mismo, hacia ese joven de 17 años, Javier Álvaro Ignacio Rizzo del Solar, que tomó la valiente decisión de estudiar Ingeniería Civil. Aquella determinación fue el primer paso de un camino que hoy culmina con la finalización de esta tesis.

Agradezco profundamente a mi madre, mi hermana y mi hermano, por confiar siempre en mis decisiones, incluso en los momentos de mayor incertidumbre. Su apoyo incondicional ha sido el cimiento sobre el cual he construido cada logro.

Con el paso del tiempo, personas maravillosas se fueron sumando a mi vida universitaria: compañeros, amigos y docentes que contribuyeron, cada uno a su manera, a formar al Javier que hoy concluye esta etapa.

Finalmente, quiero dedicar unas palabras muy especiales a esa persona que conocí un 14 de septiembre, quien creyó en mí, me entregó confianza y me inspiró con su presencia y determinación. Su apoyo fue un impulso decisivo para alcanzar esta meta y cerrar con orgullo este capítulo de mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|--------|
| Agradecimientos..... | IV |
| Índice de Figuras..... | VIII |
| Índice de Tablas..... | XVII |
| Índice de Ecuaciones..... | XXIII |
| Glosario..... | XXV |
| Resumen..... | XXVIII |
| Abstract..... | XXIX |
| Introducción..... | 30 |
| CAPÍTULO I: Introducción..... | 31 |
| 1.1. Antecedentes preliminares..... | 31 |
| 1.2. Importancia del problema de investigación..... | 32 |
| 1.3. Problema de investigación..... | 33 |
| 1.4. Pregunta de investigación..... | 34 |
| 1.5. Objetivos..... | 34 |
| 1.5.1. Objetivo General: | 34 |
| 1.5.2. Objetivos específicos: | 34 |
| CAPÍTULO II: Descripción del área de estudio..... | 36 |
| 2.1. Descripción del área de estudio..... | 36 |
| 2.2. Geografía y Geología..... | 38 |
| 2.3. Demografía | 39 |
| 2.4. Características climáticas..... | 41 |
| 2.5. Uso de suelo..... | 44 |
| 2.6. Biodiversidad..... | 46 |

| | | |
|---|---|----|
| 2.6.1. | Flora. | 46 |
| 2.6.2. | Fauna. | 46 |
| 2.7. | Actividades económicas. | 47 |
| 2.8. | Hidrografía. | 48 |
| 2.8.1. | Cuenca del Río Budi. | 49 |
| 2.8.2. | Cuenca del Río Imperial. | 50 |
| 2.8.3. | Cuenca del Río Queule. | 51 |
| 2.8.4. | Cuenca del Río Toltén. | 52 |
| 2.8.5. | Cuenca costera entre el Río Budi y el Río Toltén | 53 |
| 2.8.6. | Cuenca del Río Bio-Bío. | 54 |
| CAPÍTULO III: Fundamentos teóricos y metodológicos. | | 56 |
| 3.1. | Datos. | 56 |
| 3.2. | Método directo. | 58 |
| 3.2.1. | Descripción de datos. | 58 |
| 3.2.2. | Estimación de crecidas. | 61 |
| 3.2.3. | Análisis de frecuencia y ajuste de distribuciones. | 62 |
| 3.3. | Régimen fluvial. | 67 |
| 3.4. | Método indirecto. | 68 |
| 3.4.1. | Descripción de datos. | 68 |
| 3.4.2. | Delimitación de cuenca. | 72 |
| 3.4.3. | Polígonos de Thiessen. | 74 |
| 3.4.4. | Precipitación media areal (PMA). | 74 |
| 3.4.5. | Precipitación máxima en 24 horas. | 75 |
| 3.4.6. | Procedimientos empíricos desarrollados por la DGA para la estimación de crecidas. | 76 |

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO IV: Resultados de la investigación..... | 88 |
| 4.1. Método directo..... | 88 |
| 4.2. Estimación régimen fluvial..... | 90 |
| 4.3. Método Indirecto. | 93 |
| 4.4. Determinación de coeficientes de ajuste..... | 110 |
| CAPÍTULO V: Discusión..... | 120 |
| 5.1. Comportamiento espacial de los coeficientes de reducción. | 120 |
| 5.1.1. Gradiente latitudinal. | 120 |
| 5.1.2. Gradiente longitudinal. | 121 |
| 5.1.3. Régimen fluvial..... | 122 |
| 5.1.4. Tamaño de cuenca. | 122 |
| 3.1.5. Conclusión del análisis. | 124 |
| 5.2. Implicancias hidrológicas y de diseño..... | 125 |
| 5.3. Limitaciones del estudio | 125 |
| CAPÍTULO VI: Conclusión. | 126 |
| Conclusión..... | 127 |
| Bibliografía..... | 127 |
| Anexos..... | 132 |
| Anexo A..... | 132 |
| Anexo B..... | 179 |
| Anexo C..... | 219 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Localización de volcanes activos y división provincial en la Región de La Araucanía. Fuente: elaboración propia en QGIS, datos de MMA Datos Abiertos Línea Base Pública, actualización 25 de julio de 2024. (MMA, 2025). | 39 |
| Figura 2. Geografía de la Región de La Araucanía. Representación cartográfica de sus divisiones provinciales: Malleco al norte y Cautín al sur. Fuente: Elaboración propia en QGIS a partir de capas vectoriales del Sistema de Información Territorial, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN, 2025). | 40 |
| Figura 3. Clima de la Región de La Araucanía. Clasificación climática según Köppen y distribución de las principales zonas climáticas. Fuente: Elaboración propia en QGIS a partir de capas vectorial (Departamento de Geografía Universidad de Chile, 2025). | 41 |
| Figura 4. Precipitación media de la Región de La Araucanía. Distribución espacial de la precipitación anual según la clasificación de Köppen-Geiger. de La Araucanía. Fuente: Elaboración propia en QGIS a partir de capas vectorial (Departamento de Geografía Universidad de Chile, 2025). | 42 |
| Figura 5. Temperatura media de la Región de La Araucanía. Distribución espacial de la temperatura anual según la clasificación de Köppen-Geiger. Fuente: Elaboración propia en QGIS a partir de capas vectorial (Departamento de Geografía Universidad de Chile, 2025). | 43 |
| Figura 6. Usos de suelo en la Región de La Araucanía. Representación cartográfica de su distribución. Fuente: Elaboración propia en QGIS a partir de capas vectorial (Corporación Nacional Forestal, 2025). | 44 |
| Figura 7 . Usos de suelo en la Región de La Araucanía. Distribución porcentual de las distintas categorías de uso del suelo. Fuente: Elaboración propia en QGIS a partir de capas vectorial (Corporación Nacional Forestal, 2025). | 45 |

| | |
|---|-----|
| Figura 8.Distribución territorial de cuencas en la Región de La Araucanía. Ubicación y límites aproximados de las principales cuencas consideradas en el estudio. Fuente: Elaboración propia en QGIS a partir de capas vectorial (DGA, 2024)..... | 49 |
| Figura 9 Distribución territorial de estaciones fluviométricas en la Región de La Araucanía. Ubicación de las principales estaciones consideradas en el estudio. Fuente: Elaboración propia en QGIS..... | 58 |
| Figura 10 Distribución territorial de estaciones Meteorológicas en la Región de La Araucanía. Ubicación de las principales estaciones consideradas en el estudio. Fuente: Elaboración propia en QGIS..... | 69 |
| Figura 11 metodología empleada para la delimitación de cuencas | 73 |
| Figura 12 Esquema metodológico del Método DGA-AC aplicado a la estimación de caudales de crecida..... | 79 |
| Figura 13 Esquema del procedimiento para la estimación de caudales mediante el Método Verni y King. | 83 |
| Figura 14 Esquema del procedimiento del Método de la Fórmula Racional para la estimación de caudales instantáneos máximos..... | 87 |
| Figura 15 Curvas de régimen fluvial del río Lonquimay antes de su confluencia con el río Biobío, para probabilidades de no falla mensuales. | 91 |
| Figura 16 Delimitación de la cuenca del río Cautín en Almagro y localización de estaciones meteorológicas utilizadas para el método de polígonos de Thiessen. Fuente: Elaboración propia..... | 94 |
| Figura 17 Estimación de caudales máximos mediante metodologías directa e indirecta para la estación 8304001. | 104 |
| Figura 18 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 8342001 para distintas probabilidades de no falla..... | 133 |

| | |
|--|-----|
| Figura 19 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 8343001 para distintas probabilidades de no falla..... | 134 |
| Figura 20 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 8351001 para distintas probabilidades de no falla..... | 136 |
| Figura 21 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 8358001 para distintas probabilidades de no falla..... | 137 |
| Figura 22 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9101001 para distintas probabilidades de no falla..... | 139 |
| Figura 23 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9102001 para distintas probabilidades de no falla..... | 140 |
| Figura 24 Curva de caudal mensual estimado en la estación 9104001 para distintas probabilidades de no falla..... | 142 |
| Figura 25. Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9104002 para distintas probabilidades de no falla..... | 144 |
| Figura 26 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9106001 para distintas probabilidades de no falla..... | 145 |
| Figura 27 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9107001 para distintas probabilidades de no falla..... | 147 |
| Figura 28 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9113001 para distintas probabilidades de no falla..... | 148 |
| Figura 29 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9116001 para distintas probabilidades de no falla..... | 150 |
| Figura 30 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9122001 para distintas probabilidades de no falla..... | 151 |

| | |
|---|-----|
| Figura 31 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9123001 para distintas probabilidades de no falla..... | 153 |
| Figura 32 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9127001 para distintas probabilidades de no falla..... | 154 |
| Figura 33 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9129002 para distintas probabilidades de no falla..... | 156 |
| Figura 34 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9131001 para distintas probabilidades de no falla..... | 157 |
| Figura 35 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9134001 para distintas probabilidades de no falla..... | 159 |
| Figura 36 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9135001 para distintas probabilidades de no falla..... | 160 |
| Figura 37 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9140001 para distintas probabilidades de no falla..... | 162 |
| Figura 38 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9402001 para distintas probabilidades de no falla..... | 163 |
| Figura 39 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9404001 para distintas probabilidades de no falla..... | 165 |
| Figura 40 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9412001 para distintas probabilidades de no falla..... | 166 |
| Figura 41 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9414001 para distintas probabilidades de no falla..... | 168 |
| Figura 42 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9416001 para distintas probabilidades de no falla..... | 169 |

| | |
|--|-----|
| Figura 43 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9420001 para distintas probabilidades de no falla..... | 171 |
| Figura 44 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9423001 para distintas probabilidades de no falla..... | 172 |
| Figura 45 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9433001 para distintas probabilidades de no falla..... | 174 |
| Figura 46 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9434001 para distintas probabilidades de no falla..... | 175 |
| Figura 47 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9436001 para distintas probabilidades de no falla..... | 177 |
| Figura 48 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9437001 para distintas probabilidades de no falla..... | 178 |
| Figura 49 Delimitación de la cuenca del río Renaico en Longitudinal y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen..... | 179 |
| Figura 50 Delimitación de la cuenca del río Mininco en Longitudinal y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen..... | 180 |
| Figura 51 Delimitación de la cuenca del río Malleco en Collipulli I y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen..... | 182 |
| Figura 52 Delimitación de la cuenca del río Vergara en Tijeral y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen..... | 183 |
| Figura 53 Delimitación de la cuenca del río Purén en Tranamán y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen..... | 184 |
| Figura 54 Delimitación de la cuenca del río Lumaco y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen..... | 185 |

| | |
|--|-----|
| Figura 55 Delimitación de la cuenca del río Traiguén en Victoria y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen..... | 187 |
| Figura 56. Delimitación de la cuenca del río Dumo en Santa Ana y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen..... | 188 |
| Figura 57 Delimitación de la cuenca del río Quino en Longitudinal y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen..... | 189 |
| Figura 58 Delimitación de la cuenca del estero Chufquén en Chufquén y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen..... | 190 |
| Figura 59 Delimitación de la cuenca del río Quillén en Galvarino y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen..... | 191 |
| Figura 60 Delimitación de la cuenca del río Cholchol en Cholchol y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen..... | 193 |
| Figura 61 Delimitación de la cuenca del río Blanco en Curacautín y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen..... | 194 |
| Figura 62 Delimitación de la cuenca del río Cautín en Rariruca y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen..... | 195 |
| Figura 63 Delimitación de la cuenca del río Muco en Puente Muco y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen..... | 197 |
| Figura 64. Delimitación de la cuenca del río Cautín en Cajón y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen..... | 198 |
| Figura 65 Delimitación de la cuenca del río Quepe en Vilcún y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen..... | 200 |
| Figura 66 Delimitación de la cuenca del río Huichahue en Faja 24000 y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen..... | 201 |

| | |
|--|-----|
| Figura 67 Delimitación de la cuenca del río Quepe en Quepe y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen. | 202 |
| Figura 68 Delimitación de la cuenca del río Cautín en Almagro y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen. | 203 |
| Figura 69 Delimitación de la cuenca del río Allipén en Melipeuco y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen. | 205 |
| Figura 70 Delimitación de la cuenca del río Allipén en Los Laureles y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen. | 206 |
| Figura 71 Delimitación de la cuenca del río Trancura en Curarrehue y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen. | 207 |
| Figura 72 Delimitación de la cuenca del río Trancura antes de su confluencia con el río Llafenco y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen. | 208 |
| Figura 73 Delimitación de la cuenca del río Liucura en Liucura y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen. | 209 |
| Figura 74 Delimitación de la cuenca del río Toltén en Villarrica y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen. | 210 |
| Figura 75 Delimitación de la cuenca del río Toltén en Coipue y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen. | 212 |
| Figura 76 Delimitación de la cuenca del río Puyehue en Quitratúe y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen. | 213 |
| Figura 77 Delimitación de la cuenca del río Donguil en Gorbea y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen. | 214 |
| Figura 78 Delimitación de la cuenca del río Mahuidanche en Santa Ana y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen. | 216 |

| | |
|---|-----|
| Figura 79 Delimitación de la cuenca del río Toltén en Teodoro Schmidt y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen. | 217 |
| Figura 80. Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 8304001..... | 219 |
| Figura 81 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 8342001..... | 219 |
| Figura 82 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 8343001..... | 220 |
| Figura 83. Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 8351001..... | 220 |
| Figura 84 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 8358001..... | 221 |
| Figura 85 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9101001..... | 221 |
| Figura 86 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9102001..... | 222 |
| Figura 87 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9104001..... | 222 |
| Figura 88 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9104001..... | 223 |
| Figura 89 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9106001..... | 223 |
| Figura 90 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9107001..... | 224 |
| Figura 91 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9113001..... | 224 |
| Figura 92 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9116001..... | 225 |
| Figura 93 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9122002..... | 225 |
| Figura 94 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9123001..... | 226 |
| Figura 95 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9127001..... | 226 |
| Figura 96 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9129001..... | 227 |
| Figura 97 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9131001..... | 227 |

| | |
|--|-----|
| Figura 98 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9134001..... | 228 |
| Figura 99 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9135001..... | 228 |
| Figura 100 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9140001..... | 229 |
| Figura 101 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9402001..... | 229 |
| Figura 102. Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9404001..... | 230 |
| Figura 103 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9412001..... | 230 |
| Figura 104. Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9414001..... | 231 |
| Figura 105 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9416001..... | 231 |
| Figura 106 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9420001..... | 232 |
| Figura 107 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9423001..... | 232 |
| Figura 108 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9433001..... | 233 |
| Figura 109 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9434001..... | 233 |
| Figura 110 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9436001..... | 234 |
| Figura 111 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9437001..... | 234 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Parámetros físicos de la cuenca del Río Budi..... | 50 |
| Tabla 2 Subcuencas principales del río Imperial y sus características físicas. | 51 |
| Tabla 3 Características físicas generales de la cuenca del río Queule..... | 52 |
| Tabla 4 Subcuencas y características físicas generales de la cuenca del río Toltén..... | 53 |
| Tabla 5 Parámetros físicos principales de la cuenca costera entre el río Budi y el río Toltén. | 54 |
| Tabla 6 Parámetros físicos principales de las subcuencas del río Biobío en la Región de La Araucanía. | 54 |
| Tabla 7 Estaciones fluviométricas seleccionadas para la aplicación del método directo. | 59 |
| Tabla 8 Estaciones meteorológicas utilizadas en la aplicación del método indirecto..... | 69 |
| Tabla 9. Distribuciones de probabilidad con mejor ajuste por estación fluviométrica. ... | 88 |
| Tabla 10 Resultados del ajuste de distribuciones de probabilidad en caudales máximos mensuales. | 90 |
| Tabla 11 Estaciones fluviométricas y su clasificación de régimen hidrológico. | 92 |
| Tabla 12 Áreas de influencia y ponderación de estaciones fluviométricas para el cálculo de la PMA. | 94 |
| Tabla 13 Áreas de drenaje asociadas a las estaciones fluviométricas consideradas en el estudio km ² | 95 |
| Tabla 14 Resultados de caudales máximos anuales y precipitación diaria máxima de período de retorno de 10 años (P_{24}^{10}) en mm, con mejor ajuste por estación. | 98 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 15 Método adoptado para la estimación de caudales máximos mediante metodología indirecta en cuencas seleccionadas de la Región de La Araucanía. | 101 |
| Tabla 16 Diferencia mínima entre metodologías directa e indirecta y período asociado en cuencas seleccionadas de la Región de La Araucanía. | 105 |
| Tabla 17. Diferencia máxima entre metodologías directa e indirecta y período asociado en cuencas seleccionadas de la Región de La Araucanía. | 107 |
| Tabla 18 Comparación de caudales máximos estimados mediante metodologías directa e indirecta en cuencas seleccionadas de la Región de La Araucanía. | 111 |
| Tabla 19 Coeficientes de reducción o amplificación obtenidos en distintos períodos de retorno para cuencas seleccionadas de la Región de La Araucanía. | 114 |
| Tabla 20 Clasificación de coeficientes de reducción/amplificación en estaciones seleccionadas de la Región de La Araucanía. | 116 |
| Tabla 21 Resultados ajustes mensuales estación 8342001. | 132 |
| Tabla 22 Resultados ajustes mensuales estación 8343001. | 133 |
| Tabla 23 Resultados ajustes mensuales estación 8351001. | 135 |
| Tabla 24 Resultados ajustes mensuales estación 8358001. | 136 |
| Tabla 25 Resultados ajustes mensuales estación 9101001. | 138 |
| Tabla 26 Resultados ajustes mensuales estación 9102001. | 139 |
| Tabla 27 Resultados ajustes mensuales estación 9104001. | 141 |
| Tabla 28 Resultados ajustes mensuales estación 9104002. | 142 |
| Tabla 29 Resultados ajustes mensuales estación 9106001. | 144 |
| Tabla 30 Resultados ajustes mensuales estación 9107001. | 146 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 31 Resultados ajustes mensuales estación 9113001..... | 147 |
| Tabla 32 Resultados ajustes mensuales estación 9116001..... | 149 |
| Tabla 33 Resultados ajustes mensuales estación 9122001. | 150 |
| Tabla 34. Resultados ajustes mensuales estación 9123001. | 152 |
| Tabla 35 Resultados ajustes mensuales estación 9127001. | 153 |
| Tabla 36. Resultados ajustes mensuales estación 9129002. | 155 |
| Tabla 37 Resultados ajustes mensuales estación 9131001. | 156 |
| Tabla 38 Resultados ajustes mensuales estación 9134001. | 158 |
| Tabla 39 Resultados ajustes mensuales estación 9135001. | 159 |
| Tabla 40 Resultados ajustes mensuales estación 9140001. | 161 |
| Tabla 41 Resultados ajustes mensuales estación 9402001. | 162 |
| Tabla 42. Resultados ajustes mensuales estación 9404001. | 164 |
| Tabla 43. Resultados ajustes mensuales estación 9412001. | 165 |
| Tabla 44 Resultados ajustes mensuales estación 9414001. | 167 |
| Tabla 45 Resultados ajustes mensuales estación 9416001. | 168 |
| Tabla 46 Resultados ajustes mensuales estación 9420001. | 170 |
| Tabla 47 Resultados ajustes mensuales estación 9423001. | 171 |
| Tabla 48 Resultados ajustes mensuales estación 9433001. | 173 |
| Tabla 49 Resultados ajustes mensuales estación 9434001. | 174 |
| Tabla 50 Resultados ajustes mensuales estación 9436001. | 176 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 51 Resultados ajustes mensuales estación 9437001. | 177 |
| Tabla 52 Áreas de influencia y ponderación de estaciones fluviométricas en la cuenca del río Renaico para el cálculo de PMA. | 179 |
| Tabla 53 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Mininco para el cálculo de PMA..... | 181 |
| Tabla 54 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Malleco Collipulli para el cálculo de PMA..... | 182 |
| Tabla 55 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Vergara en Tijeral para el cálculo de PMA..... | 183 |
| Tabla 56 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Purén (Tranamán) para el cálculo de PMA..... | 185 |
| Tabla 57 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Lumaco para el cálculo de PMA..... | 186 |
| Tabla 58 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Traiguén (Victoria) para el cálculo de PMA..... | 187 |
| Tabla 59 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Dumo (Santa Ana) para el cálculo de PMA..... | 188 |
| Tabla 60 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Quino Longitudinal para el cálculo de PMA..... | 189 |
| Tabla 61 Áreas de influencia y ponderación cuenca del estero Chufquén para el cálculo de PMA..... | 190 |
| Tabla 62 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Quillén (Galvarino) para el cálculo de PMA..... | 192 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 63 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Cholchol en Cholchol para el cálculo de PMA..... | 193 |
| Tabla 64 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Blanco (Curacautín) para el cálculo de PMA..... | 195 |
| Tabla 65 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Cautín (Rariruca) para el cálculo de PMA..... | 196 |
| Tabla 66 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Muco en Puente Muco para el cálculo de PMA..... | 197 |
| Tabla 67 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Cautín (Cajón) para el cálculo de PMA..... | 199 |
| Tabla 68 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Quepe (Vilcún) para el cálculo de PMA..... | 200 |
| Tabla 69 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Huichahue (Faja 24000) para el cálculo de PMA..... | 201 |
| Tabla 70 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Quepe (Quepe) para el cálculo de PMA..... | 202 |
| Tabla 71 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Cautín (Almagro) para el cálculo de PMA..... | 204 |
| Tabla 72 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Allipén (Melipeuco) para el cálculo de PMA..... | 205 |
| Tabla 73 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Allipén (Los Laureles) para el cálculo de PMA..... | 206 |
| Tabla 74 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Trancura (Curarrehue) para el cálculo de PMA..... | 208 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 75 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Trancura (antes del río Llafenco) para el cálculo de PMA. | 209 |
| Tabla 76 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Liucura (Liucura) para el cálculo de PMA..... | 210 |
| Tabla 77 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Toltén (Villarrica) para el cálculo de PMA..... | 211 |
| Tabla 78 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Toltén (Coipue) para el cálculo de PMA..... | 212 |
| Tabla 79 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Puyehue (Quitratúe) para el cálculo de PMA..... | 214 |
| Tabla 80 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Donguil (Gorbea) para el cálculo de PMA..... | 215 |
| Tabla 81 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Mahuidanche (Santa Ana) para el cálculo de PMA. | 216 |
| Tabla 82 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Toltén (Teodoro Schmidt) para el cálculo de PMA. | 217 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|--|----|
| Ecuación 1 Ecuación de Weibull para la estimación de la probabilidad de posición. | 62 |
| Ecuación 2 Función de distribución acumulada de la Distribución de Gumbel..... | 63 |
| Ecuación 3 Función de densidad de probabilidad de la Distribución Log-Pearson Tipo III. | 64 |
| Ecuación 4 Función de distribución acumulada de la Distribución Normal..... | 64 |
| Ecuación 5 Función de distribución acumulada de la Distribución Log-Normal..... | 65 |
| Ecuación 6 Función de densidad de probabilidad de la Distribución Gamma. | 65 |
| Ecuación 7 Criterio de Máxima Diferencia..... | 66 |
| Ecuación 8 Cálculo del caudal de diseño mediante la función cuantil de la distribución ajustada. | 67 |
| Ecuación 9 Cálculo de la Precipitación Media Areal mediante el método de polígonos de Thiessen..... | 74 |
| Ecuación 10 caudal medio diario máximo (Q_{10}). | 77 |
| Ecuación 11 caudal medio diario máximo..... | 78 |
| Ecuación 12 caudal instantáneo máximo. | 78 |
| Ecuación 13 método Verni y King..... | 80 |
| Ecuación 14 tiempo de concentración. | 80 |
| Ecuación 15 coeficiente de escorrentía..... | 81 |
| Ecuación 16 precipitación máxima diaria en 24 horas..... | 81 |
| Ecuación 17 Fórmula Racional..... | 84 |

| | |
|--|----|
| Ecuación 18 coeficiente de escorrentía | 84 |
| Ecuación 19 precipitación máxima diaria en 24 horas..... | 85 |
| Ecuación 20 tiempo de concentración | 85 |
| Ecuación 21 intensidad media de precipitación..... | 86 |

GLOSARIO

- Afluentes: Cursos de agua secundarios que desembocan en un río principal, aportando caudal al sistema hídrico. Ejemplo: el río Lumaco es afluente del Imperial.
- Ajuste de distribución: Proceso estadístico que busca encontrar el modelo probabilístico que mejor representa los datos observados. En la tesis, se usó para ajustar Gumbel, Log-Normal, Gamma, etc. a los caudales máximos anuales.
- Área de drenaje: Superficie de terreno que aporta escorrentía a una sección de río o estación. Ejempló: la cuenca del Toltén tiene un área de drenaje mayor a 7,000 km².
- Bondad de ajuste: Medida de qué tan bien una distribución teórica representa los datos observados. En la tesis, se evaluó con la prueba Kolmogórov-Smirnov (K-S).
- Caudal (Q): Volumen de agua que atraviesa una sección de cauce por unidad de tiempo (m³/s). Ejemplo: Q=120 m³/s en el río Cautín en crecida.
- Coeficiente de ajuste (reducción/amplificación): Factor que corrige resultados del método indirecto con respecto al directo. Ejemplo: si el método indirecto sobreestima un 20 %, se aplica un coeficiente de 0.8.
- Coeficiente de variación (Cv): Relación entre desviación estándar y media, indica variabilidad. Ejemplo: un Cv alto refleja gran dispersión de caudales anuales.
- Cuenca hidrográfica: Área delimitada por divisorias topográficas que drena hacia un cauce principal. Ejemplo: la cuenca del río Imperial abarca más de 12,000 km².
- Curva de frecuencia regional: Relación empírica definida para zonas homogéneas que permite estimar caudales en sitios sin medición.
- Curva de probabilidad: Gráfico que relaciona valores de caudal con su probabilidad de ocurrencia. Ejemplo: se usó para verificar visualmente el ajuste de distribuciones
- Desembocadura: Punto donde un río fluye hacia otro cuerpo de agua. Ejemplo: el río Imperial desemboca en el océano Pacífico.
- Distribución de probabilidad: Función matemática que describe la probabilidad de distintos valores de caudal.

- Distribuciones aplicadas en hidrología:
 - Gumbel.
 - Normal.
 - Log-Normal.
 - Gamma.
 - Pearson III.
- Weibull: Usada empíricamente para comparación con distribuciones teóricas.
- Escorrentía: Agua de lluvia que fluye sobre la superficie sin infiltrarse. Ejemplo: aumenta en cuencas con plantaciones forestales.
- Evaporación: Proceso en el que el agua líquida pasa a vapor.
- Exutorio: Punto de salida de una cuenca donde se mide o estima el caudal.
- Frecuencia de excedencia (p): Probabilidad anual de superar un caudal. Ejemplo: $p=0,01 \rightarrow$ evento con periodo de retorno de 100 años.
- Función de distribución acumulada (FDA): Probabilidad de que el caudal sea menor o igual a cierto valor.
- Kolmogórov-Smirnov (K-S): Prueba estadística que mide la diferencia entre distribución observada y teórica.
- Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos (DGA): Norma chilena que define el método indirecto aplicado en tu tesis.
- Máxima verosimilitud (MLE): Técnica estadística para estimar parámetros optimizando la probabilidad de observar los datos.
- Método directo: Estima caudales extremos usando registros observados en estaciones fluviométricas. Aplicado con 32 estaciones de La Araucanía.
- Método indirecto: Estima crecidas en cuencas sin registros, usando fórmulas empíricas basadas en morfología y clima. Base de la propuesta de ajuste de tesis.
- Periodo de retorno (T): Tiempo promedio entre eventos de magnitud \geq a un valor dado.
- Polígonos de Thiessen: Método para calcular precipitación media ponderando por área de influencia de estaciones.
- Precipitación: Agua atmosférica caída en lluvia, nieve o granizo

- Precipitación máxima en 24 horas (P24h): Valor máximo de lluvia diaria registrado en un año. Dato fundamental para el método indirecto.
- Probabilidad (P): Valor entre 0 y 1 que indica posibilidad de ocurrencia de un evento.
- Probabilidad de falla: Posibilidad de que un caudal supere el de diseño.
- Probabilidad de no falla: Complemento de la anterior; seguridad de que el sistema no se exceda.
- Probabilidad teórica: Estimación calculada con modelos matemáticos, independiente de datos observados.
- Río principal: Curso de agua de mayor jerarquía en una red de drenaje.
- Subcuenca: Unidad menor dentro de una cuenca que drena hacia un afluente o tramo del río principal.
- Tiempo de concentración (T_c): Tiempo que tarda el agua en escurrir desde el punto más lejano de la cuenca hasta el exutorio.

Ejemplo: en una cuenca pequeña puede ser 1–2 horas; en una grande, más de 12.

RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo comparar la metodología directa e indirecta para la estimación de crecidas en cuencas sin información fluviométrica, específicamente en la Región de La Araucanía, Chile. Se basó en los procedimientos establecidos por el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos de la Dirección General de Aguas (DGA) y propuso coeficientes de ajuste que permitieron corregir las diferencias sistemáticas observadas entre ambos métodos.

Para ello, se utilizaron registros de estaciones fluviométricas con información suficiente para aplicar la metodología directa, cuyos resultados fueron contrastados con los obtenidos mediante el enfoque indirecto, que estimaba caudales máximos a partir de variables morfológicas, climáticas y valores de precipitación máxima en 24 horas. El análisis estadístico incluyó el ajuste de distribuciones de probabilidad (Gumbel, Log-Normal, Gamma, Pearson tipo III y Weibull), la evaluación de la probabilidad de no falla y la identificación de la distribución óptima por estación y por mes.

Los resultados evidenciaron discrepancias significativas entre los caudales estimados por ambas metodologías. En aproximadamente un 90,6 % de las cuencas, los coeficientes de ajuste fueron inferiores a 1, lo que confirmó que el método indirecto tendía a sobreestimar los caudales, requiriendo coeficientes de minoración. En un 6,3 % de las cuencas, los coeficientes fueron superiores a 1, reflejando una tendencia a la mayoración sostenida, mientras que en el 3,1 % restante se observó un comportamiento mixto, variable según el período de retorno. Estos coeficientes se presentaron, por tanto, como herramientas esenciales para corregir las diferencias sistemáticas y mejorar la precisión del enfoque indirecto en cuencas sin datos.

El estudio aportó al desarrollo de metodologías más ajustadas al contexto hidrológico regional, fortaleciendo la planificación de obras hidráulicas y la gestión del riesgo frente a eventos extremos en territorios con escasa instrumentación.

ABSTRACT

This study aimed to compare direct and indirect methodologies for flood peak estimation in ungauged basins, specifically in the La Araucanía Region of Chile. It followed the procedures established in the Manual for the Calculation of Floods and Minimum Flows of the General Water Directorate (DGA) and proposed adjustment coefficients to correct systematic differences that were identified between both approaches.

To achieve this, flow records from gauging stations were used to apply the direct method, and the results were contrasted with those derived from the indirect method, which estimated peak discharges based on morphoclimatic variables and 24-hour maximum precipitation values. The statistical analysis included the fitting of probability distributions (Gumbel, Log-Normal, Gamma, Pearson Type III, and Weibull), the evaluation of non-exceedance probability, and the selection of the best-fitting distribution per station and per month.

The results showed discrepancies between the methods, justifying the development of reduction or amplification coefficients to improve the accuracy of the indirect approach. These coefficients were proposed as complementary tools for professionals estimating peak flows in ungauged basins.

This study contributed to the development of regionally adapted hydrological methodologies, supporting the planning of hydraulic infrastructure and the management of flood risks in data-scarce areas.

Introducción.

Estimar crecidas en cuencas sin información fluviométrica representa aún uno de los principales desafíos para la ingeniería hidráulica, especialmente en territorios como la Región de La Araucanía. La diversidad geográfica y climática de esta zona, sumada a la limitada cobertura de estaciones de medición, exige el uso de herramientas que permitan aproximar caudales máximos con un grado de confiabilidad aceptable (DGA, 2016).

Ante esta necesidad, la Dirección General de Aguas desarrolló el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica (DGA, 1995), el cual contempla metodologías empíricas de estimación indirecta, basadas en variables morfológicas y climáticas, como la superficie de la cuenca, la pendiente y la precipitación máxima en 24 horas registradas (DGA, 1995).

Paralelamente, en contextos con datos fluviométricos disponibles, es posible aplicar enfoques directos basados en registros históricos de caudales observados, los cuales permiten estimar crecidas mediante análisis estadístico de frecuencia. Este enfoque, si bien no es el foco del manual, constituye una referencia válida para calibrar o contrastar resultados obtenidos mediante métodos indirectos (Chow, 1988).

La presente investigación se centra en comparar ambos métodos, poniendo especial énfasis en el desempeño del enfoque indirecto aplicado a cuencas de la Región de La Araucanía. A través de un análisis comparativo, se busca identificar tendencias sistemáticas de sobreestimación o subestimación, lo que permitiría justificar la incorporación de coeficientes de ajuste que corrijan sus resultados. Con ello, se espera mejorar la precisión del método indirecto y aportar una herramienta para su aplicación práctica en contextos reales de planificación y diseño hidráulico, particularmente en territorios sin cobertura de información fluviométrica (DGA, 2016).

CAPÍTULO I: Introducción.

1.1. Antecedentes preliminares.

El calentamiento global genera alteraciones profundas en los sistemas climáticos a nivel mundial, afectando directamente la disponibilidad y el comportamiento de los recursos hídricos (IPCC, 2022). En Chile, esta situación se traduce en una mayor frecuencia de eventos extremos, modificaciones en los patrones de precipitación y variaciones en los caudales; en escenarios climáticos futuros se proyectan disminuciones del orden de hasta un 30 % en el caudal anual en diversas zonas del país (MMA, 2020).

En este contexto, los métodos empíricos evolucionan como respuesta técnica para estimar caudales máximos en cuencas sin datos fluviométricos. Lo que comienza como aproximaciones simples basadas en observaciones locales deriva en modelos estadísticos de regresión que incorporan parámetros morfométricos, climáticos y caudales de crecida esperados. En Chile, esta línea metodológica se formaliza en el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica (DGA, 1995) y posteriormente se actualiza mediante guías técnicas para el diseño de obras hidráulicas (DGA, 2016).

Diversos autores advierten que el desempeño del método indirecto depende fuertemente del contexto regional, lo que hace necesario validar y ajustar sus resultados a escala local. En el caso de Chile, esta consideración se recoge en documentos técnicos oficiales de la Dirección General de Aguas, como el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica (DGA, 1995) y las Guías Metodológicas para Proyectos de Modificación de Cauces (DGA, 2016). Ambos señalan que las fórmulas y procedimientos deben aplicarse únicamente en rangos de datos y zonas hidrológicamente homogéneas para los que son desarrollados, ya que al

extrapolarlos a cuencas con características distintas se introducen sesgos que limitan su validez.

En la Región de La Araucanía, esta necesidad de ajustes resulta especialmente crítica. Las crecidas de años recientes, por ejemplo, el evento de junio de 2024 provoca inundaciones, aislamiento de comunidades y daños significativos en infraestructura vial y habitacional, afectando a más de 4.800 personas en uno de estos episodios (Radio Bío Bío, 2024). Esta realidad refuerza la urgencia de contar con herramientas de estimación de crecidas ajustadas a las condiciones locales; en ese marco, este estudio propone comparar métodos y generar coeficientes de ajuste que mejoren la aplicabilidad del enfoque indirecto en cuencas de la región.

1.2. Importancia del problema de investigación.

La Región de La Araucanía enfrenta con frecuencia eventos de crecida que afectan a comunidades y sistemas de infraestructura. Sin embargo, la carencia de estaciones de aforo con registros prolongados en muchas de sus cuencas limita la aplicación de métodos directos para la estimación de caudales. Frente a esta limitación, el método indirecto se convierte en una alternativa recurrente para estimar caudales máximos en cuencas sin información fluviométrica (DGA, 1995) (DGA, 2016).

Si bien el método indirecto demuestra ser útil en escenarios donde no existe información, su precisión depende del contexto local. Las fórmulas empíricas que lo sustentan, construidas sobre regresiones regionales, pueden no reflejar adecuadamente el comportamiento hidrológico fuera de su ámbito de desarrollo; por ello, se recomienda la validación y el ajuste local antes de utilizarlas en el diseño (WMO, 2012).

La presente investigación propone una solución práctica: validar empíricamente el método indirecto mediante la comparación con resultados del método directo. Esta aplicación permite generar coeficientes de ajuste que adecuan las estimaciones a la realidad local de La Araucanía, aportando evidencia técnica que contribuye a mejorar la calidad de los estudios hidrológicos en la región.

El impacto esperado es:

- Mejora de la seguridad comunitaria: caudales de diseño ajustados reducen el riesgo de falla de obras hidráulicas y protegen a poblaciones expuestas (DGA, 2016).
- Optimización de la inversión en obras: el diseño hidráulico sobre bases calibradas reduce los sobredimensionamientos y los costos asociados al ciclo de vida.
- Facilitación de la planificación empresarial: información hidrológica confiable disminuye la incertidumbre climática para sectores como agricultura y energía (World Bank., 2021).
- Contribución al desarrollo regional: menor exposición a daños y mejor gestión del riesgo generan condiciones más favorables para la inversión pública y privada (World Bank., 2021).

1.3. Problema de investigación.

Las obras civiles requieren estimaciones hidrológicas confiables para garantizar su funcionalidad y seguridad. La Dirección General de Aguas señala que, en ausencia de registros prolongados de caudales, la aplicación de métodos directos se ve restringida, por lo que resulta necesario recurrir a metodologías indirectas o complementarias para obtener caudales de diseño (DGA, 2016).

Como alternativa, la Dirección General de Aguas promueve el uso del método indirecto, fundamentado en características físicas de las cuencas y modelos empíricos regionales. Sin embargo, este enfoque puede generar resultados inexactos si se aplica fuera de los rangos de validez definidos, lo cual incrementa el riesgo de errores en la estimación de crecidas y, en consecuencia, en la planificación y el diseño de obras hidráulicas (MOP, 2010).

La presente investigación identifica como problema central la falta de mecanismos de calibración y ajuste para el método indirecto en el contexto específico de La Araucanía.

Esta necesidad genera una brecha entre los valores estimados y las condiciones reales de las cuencas, afectando la planificación técnica y presupuestaria de los proyectos. Frente a esta problemática, se propone desarrollar coeficientes de reducción o amplificación que permitan corregir las estimaciones del método indirecto a partir de la comparación sistemática con resultados del método directo en cuencas con registros disponibles.

1.4. Pregunta de investigación.

¿En qué medida la calibración de coeficientes locales de reducción mejora la precisión del método indirecto al ajustarlo a los resultados del método directo en subcuencas de la Región de La Araucanía para periodos de retorno de 5 a 100 años?

1.5. Objetivos.

1.5.1. Objetivo General:

Analizar la precisión del método indirecto de estimación de caudales de crecida en subcuencas de la Región de La Araucanía, mediante la aplicación y comparación del método directo y del método indirecto en distintos periodos de retorno (5 a 100 años), con el fin de calcular coeficientes de reducción o amplificación que permitan calibrar el método indirecto según condiciones locales.

1.5.2. Objetivos específicos:

- Aplicar el método directo y el método indirecto de estimación de caudales de crecida en subcuencas con información fluviométrica.
- Comparar los resultados de ambos métodos para distintos periodos de retorno (5 a 100 años).

- Calcular coeficientes de reducción o amplificación que permitan calibrar el método indirecto según condiciones locales.

CAPÍTULO II: Descripción del área de estudio.

2.1. Descripción del área de estudio.

La Región de La Araucanía, situada en el sur de Chile, se caracteriza por una geografía diversa que se extiende desde la costa hasta la cordillera de los Andes, conforma valles intermedios y zonas marcadas por un relieve volcánico activo (MOP, 2017). Esta variedad de paisajes, junto a un clima templado lluvioso donde la mayor parte de las precipitaciones se concentra en otoño e invierno, incide de manera directa en la dinámica hidrológica regional, generando respuestas distintas frente a eventos meteorológicos extremos (DGA, 2016).

Comprender estas condiciones físicas y ambientales resulta esencial para interpretar el comportamiento de los ríos y, en particular, para avanzar en estimaciones más precisas de crecidas. Con este propósito, se examinan distintos elementos que ofrecen una visión integral del territorio. Se consideran, por un lado, los rasgos geográficos y geológicos que modelan el relieve y condicionan los caudales (DGA, 2016), y, por otro, los factores demográficos, el clima y la temperatura, que determinan en gran medida la disponibilidad y la variación del agua. A ello se suma el análisis del uso del suelo y de la biodiversidad, donde la vegetación y la fauna cumplen un papel clave en procesos como la infiltración, la escorrentía y el equilibrio de los ecosistemas.

También se incorporan las actividades económicas, cuya interacción con el medio natural produce transformaciones significativas en el paisaje y en los recursos hídricos. Finalmente, se revisa la hidrografía y se destacan las principales cuencas de la zona de estudio: el río Budi, el río Imperial, el río Queule, el río Toltén, la cuenca costera ubicada entre el Budi y el Toltén, y el tramo correspondiente al río Biobío (DGA, 2016).

Esta mirada amplia permite no solo conocer mejor el contexto regional, sino también interpretar con mayor claridad los resultados hidrológicos que se presentan en esta investigación.

2.2. Geografía y Geología.

La Región de La Araucanía, ubicada en el sur de Chile, abarca 31,842 km² (BCN, 2025) y presenta un relieve diverso y contrastante: desde las altas cumbres de la Cordillera de los Andes hasta la franja costera bañada por el océano Pacífico. Su punto más elevado es el volcán Llaima, con aproximadamente 3,050 metros sobre el nivel del mar, mientras que el más bajo corresponde al nivel del mar en la franja costera (BCN, 2025).

El paisaje regional reúne montañas, valles y planicies que dan origen a una amplia red hidrográfica y a numerosos cuerpos de agua. En total, la región alberga 19 lagos y 261 lagunas, entre los que destacan Villarrica y Calafquén por su extensión y valor escénico. Estos espacios acuáticos, reconocidos por su importancia paisajística, recreacional y turística, se complementan con la presencia de acuíferos subterráneos en las principales cuencas, los cuales constituyen una reserva clave para la vida social y productiva de la región (Gobierno Regional de La Araucanía., 2017)

En cuanto a su geología, La Araucanía forma parte del Cinturón Volcánico Andino, caracterizado por una fuerte actividad tectónica. Destacan los volcanes Villarrica y Llaima, ambos activos y bajo permanente monitoreo por SERNAGEOMIN (Amigo, 2021). El Villarrica, uno de los más activos de Sudamérica, presenta numerosas erupciones y lahares que modifican cauces y generan depósitos volcánicos, lo que evidencia cómo la actividad volcánica modela el relieve y la dinámica hidrológica regional (Global Volcanism Program, 2023). Esta situación se observa en la Figura 1, donde se presenta la localización de los principales volcanes activos y su relación con las provincias de la región.

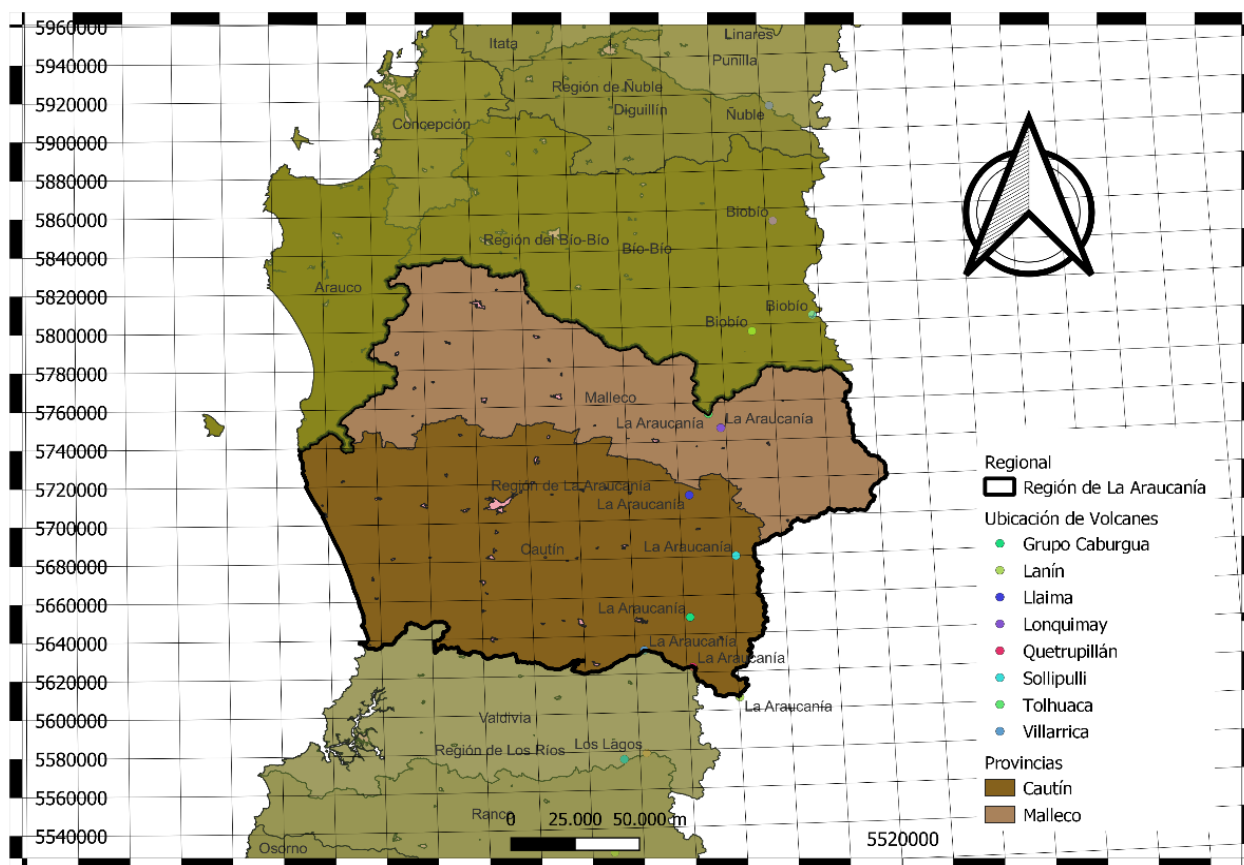


Figura 1. Localización de volcanes activos y división provincial en la Región de La Araucanía. Fuente: elaboración propia en QGIS, datos de MMA Datos Abiertos Línea Base Pública, actualización 25 de julio de 2024. (MMA, 2025).

2.3. Demografía

Desde lo administrativo, la Región de La Araucanía se divide en dos provincias: Malleco, al norte, y Cautín, al sur, que en conjunto comprenden un total de 32 comunas (BCN, 2025) . Temuco, su capital regional, concentra alrededor de un tercio de la población, mientras que la provincia de Cautín alberga aproximadamente el 77 % de los habitantes regionales (INE, 2019). Según los datos del último Censo, más de 957,000 personas residen en la región, con una distribución del 68 % en zonas urbanas y un 32 % en áreas rurales (INE, 2019).

Esta composición demográfica refleja una convivencia entre lo urbano y lo rural, donde las dinámicas modernas coexisten con tradiciones aún vigentes. Para complementar esta descripción, la Figura 2 muestra la representación geográfica de la Región de La Araucanía, en la que se destacan sus divisiones provinciales: Malleco al norte y Cautín al sur.

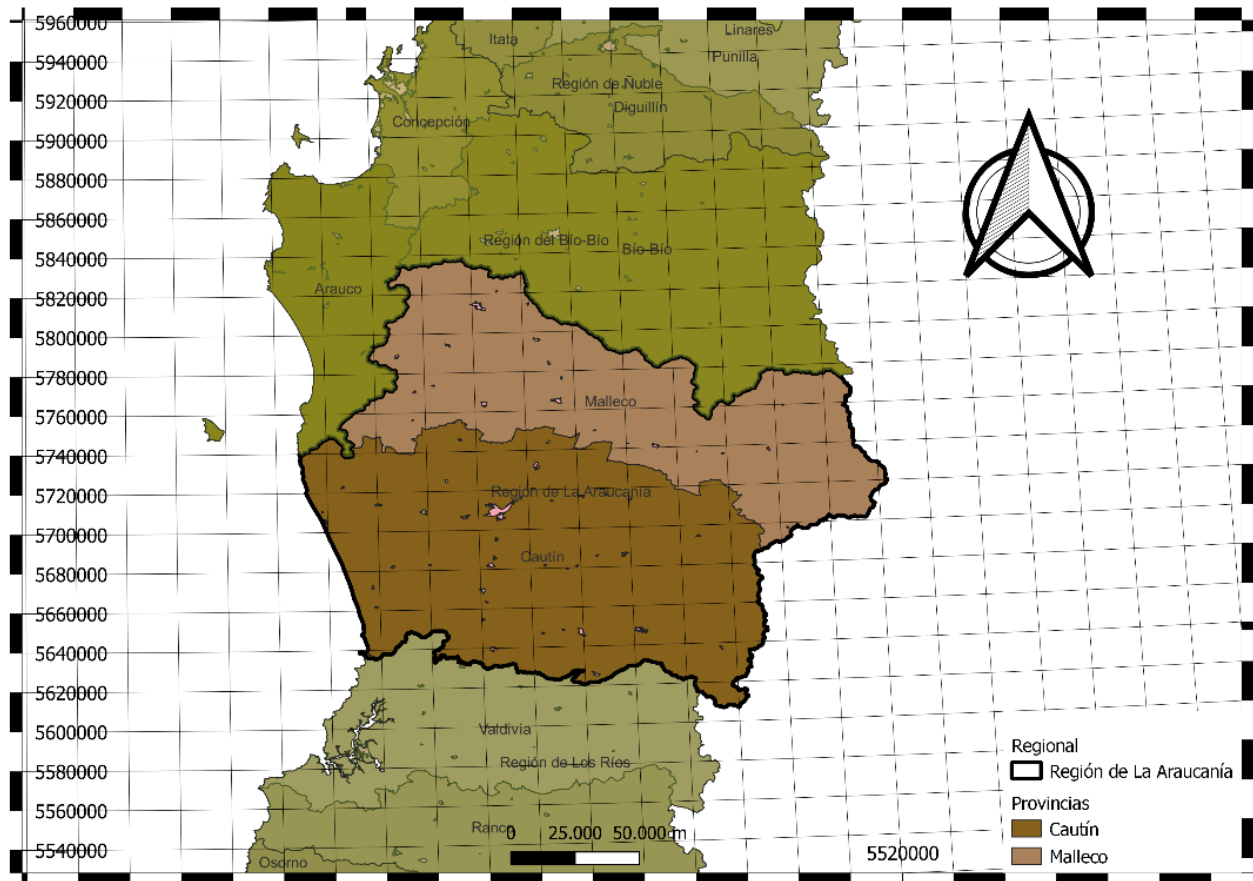


Figura 2. Geografía de la Región de La Araucanía. Representación cartográfica de sus divisiones provinciales: Malleco al norte y Cautín al sur. Fuente: Elaboración propia en QGIS a partir de capas vectoriales del Sistema de Información Territorial, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN, 2025).

2.4. Características climáticas.

La Región de La Araucanía presenta una marcada diversidad climática, determinada principalmente por su variada topografía, que se extiende desde las planicies costeras hasta las altas cumbres de la Cordillera de los Andes. Esta configuración origina climas que varían desde el templado oceánico lluvioso en la costa hasta el clima frío de alta montaña en los sectores cordilleranos (MOP, 2017). Para ilustrar esta distribución general, la Figura 3 muestra la clasificación climática de la región según Köppen, destacando la transición entre los distintos pisos climáticos que van de la costa hacia la cordillera.

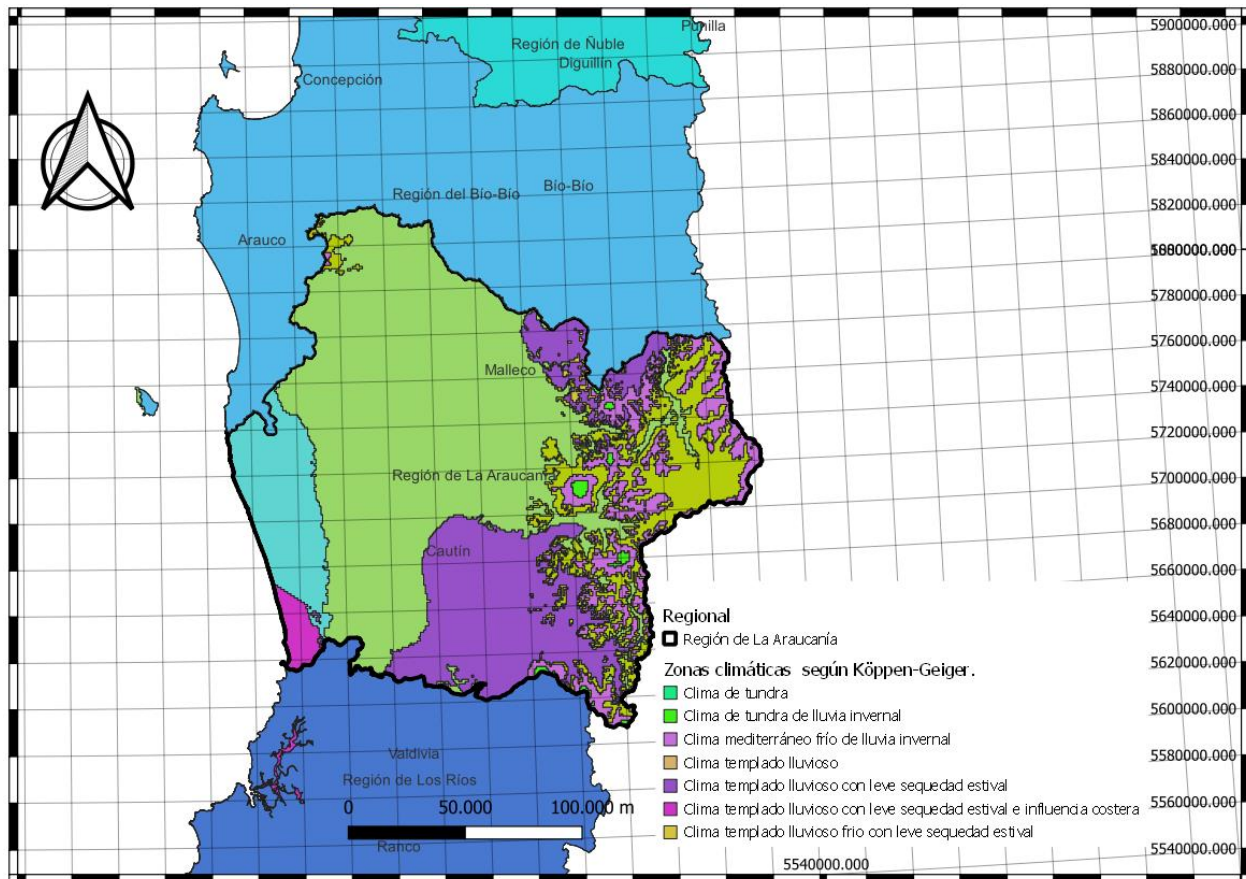


Figura 3. Clima de la Región de La Araucanía. Clasificación climática según Köppen y distribución de las principales zonas climáticas. Fuente: Elaboración propia en QGIS a partir de capas vectorial (Departamento de Geografía Universidad de Chile, 2025).

Las precipitaciones anuales muestran también una alta variabilidad espacial. Para el período 1981–2015, los registros fluctúan entre aproximadamente 3.000 mm en la precordillera andina y 1.000 mm en comunas de Malleco y en el seco costero de Cautín, mientras que en el valle central los valores oscilan entre 1.500 y 2.000 mm. En conjunto, la precipitación media anual regional alcanza los 2.058 mm, evidenciando cómo el relieve determina contrastes marcados entre la costa, el valle y la cordillera (MOP, 2017). Está marcada estacionalidad, con veranos más secos y uno o dos meses de baja precipitación, influye directamente en la magnitud y variabilidad de los caudales fluviales. La Figura 4 representa la distribución de la precipitación media anual en la Región de La Araucanía, mostrando con claridad el contraste entre la costa, el valle central y las zonas cordilleranas.

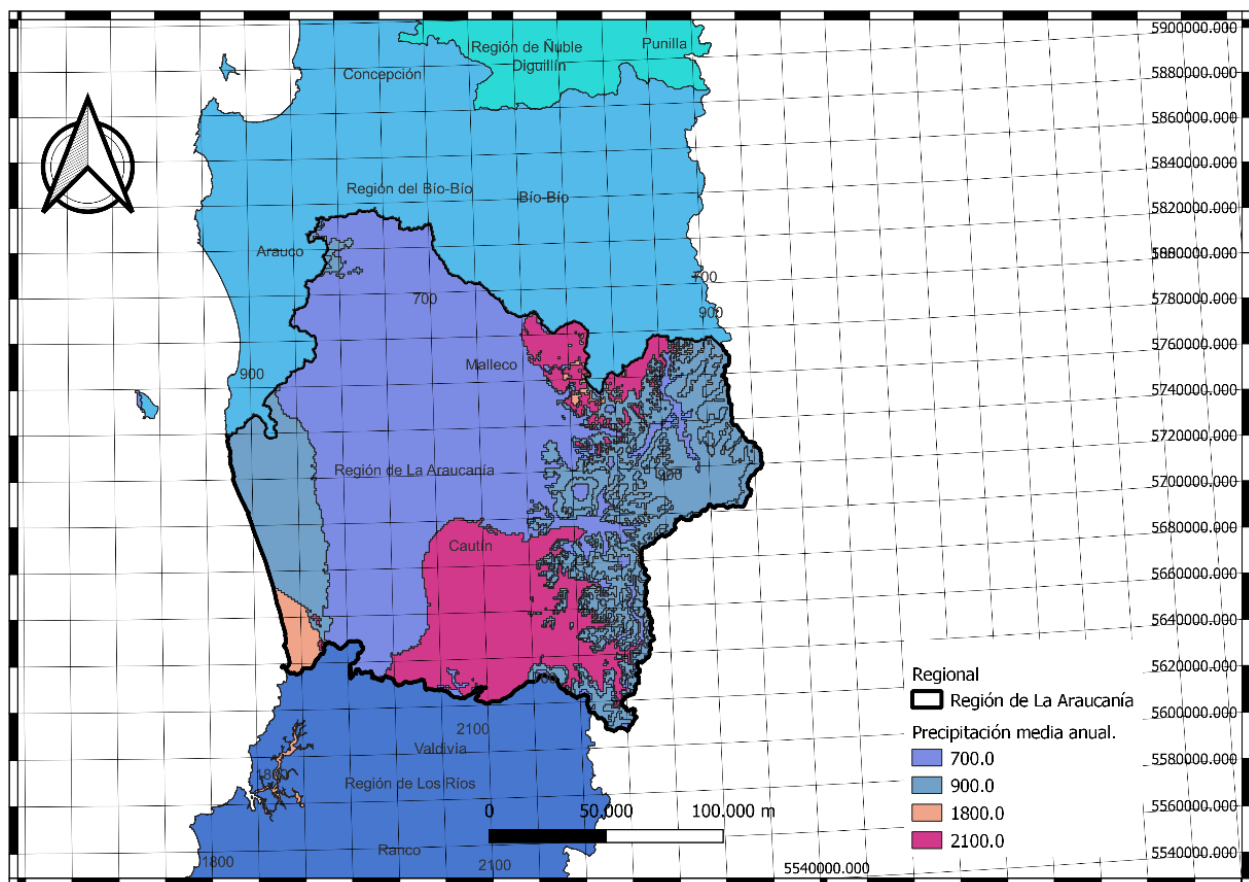


Figura 4. Precipitación media de la Región de La Araucanía. Distribución espacial de la precipitación anual según la clasificación de Köppen-Geiger. de La Araucanía. Fuente: Elaboración propia en QGIS a partir de capas vectorial (Departamento de Geografía Universidad de Chile, 2025).

En cuanto a la temperatura, se observa un claro gradiente altitudinal y latitudinal. En la costa predominan temperaturas medias cercanas a los 12 °C, mientras que en la cordillera los promedios descienden hasta los 3 °C, con prolongados períodos de nieve y bajas térmicas. Estos contrastes están regulados por la influencia del océano Pacífico en el occidente y por la altitud en el oriente, lo que configura una transición térmica marcada de oeste a este (DGA, 2016). La Figura 5 ilustra la distribución espacial de la temperatura media anual, destacando cómo los valores disminuyen progresivamente desde el litoral hacia las cumbres andinas.

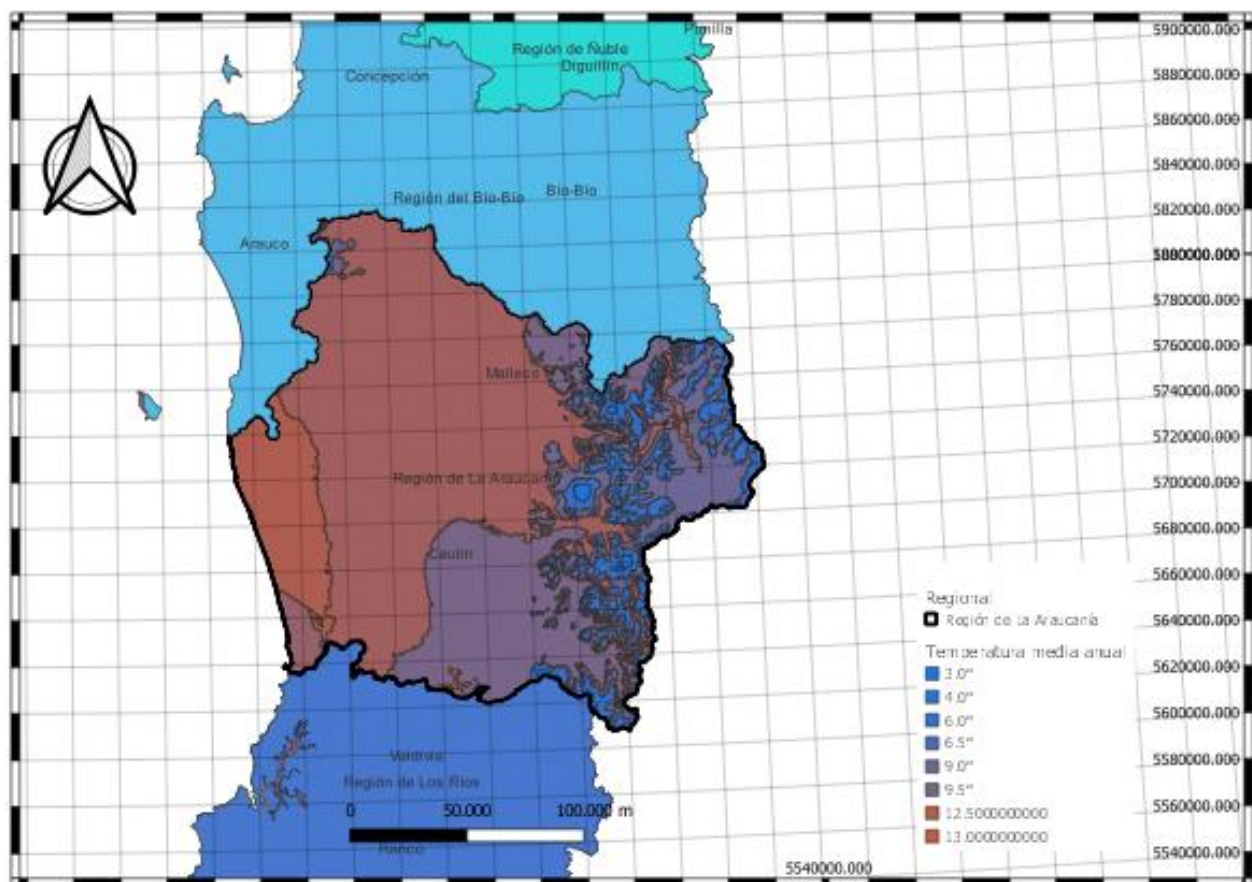


Figura 5. Temperatura media de la Región de La Araucanía. Distribución espacial de la temperatura anual según la clasificación de Köppen-Geiger. Fuente: Elaboración propia en QGIS a partir de capas vectorial (Departamento de Geografía Universidad de Chile, 2025).

2.5. Uso de suelo.

Los usos del suelo en la Región de La Araucanía reflejan la interacción entre procesos naturales y transformaciones humanas, conformando un mosaico territorial donde conviven bosques nativos, plantaciones forestales, áreas agrícolas de riego y secano, zonas urbanas y espacios de alto valor cultural para el pueblo Mapuche. Esta diversidad de coberturas es reconocida en la Estrategia Regional de Conservación y Uso Sustentable de la Biodiversidad (CONAMA, 2002), que destacaba la coexistencia de funciones productivas, ecológicas y sociales en el territorio.

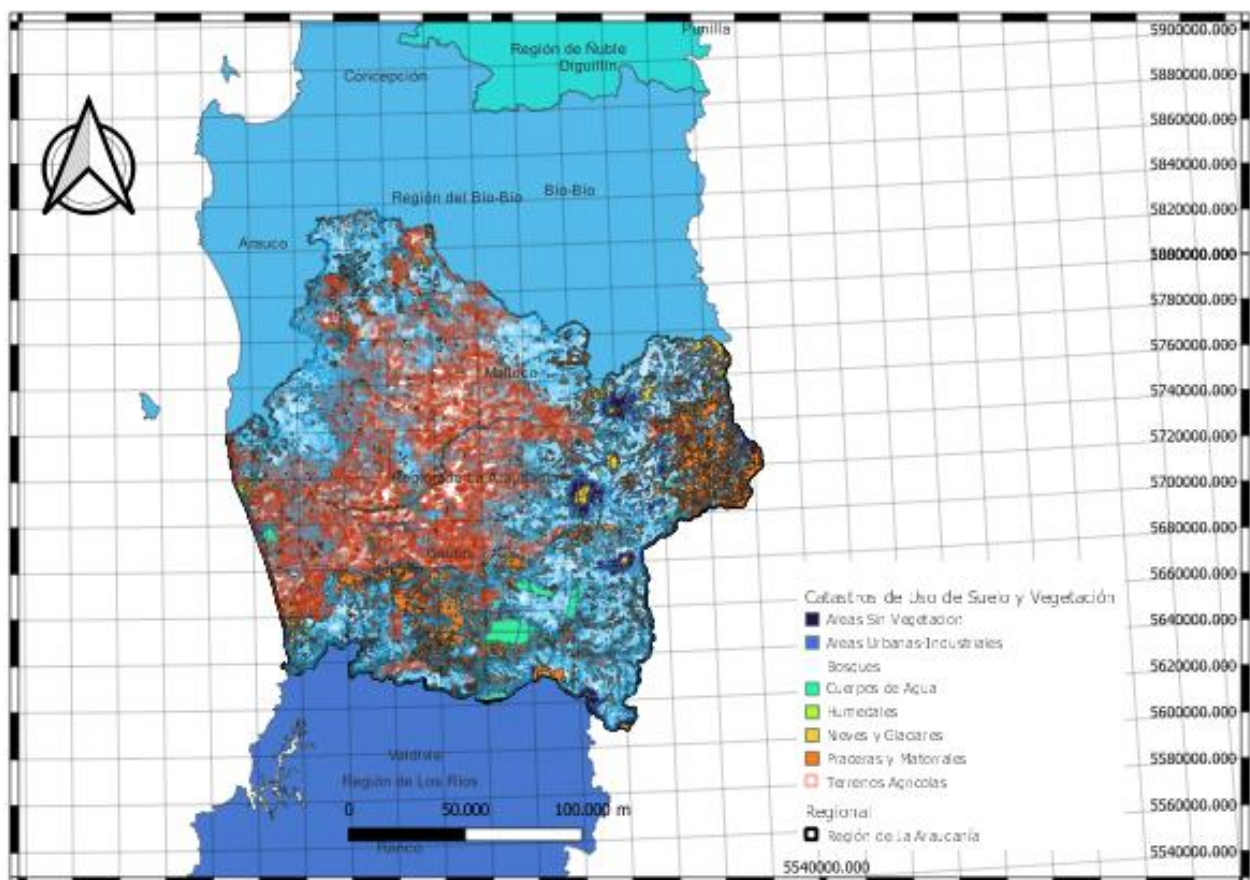


Figura 6. Usos de suelo en la Región de La Araucanía. Representación cartográfica de su distribución. Fuente: Elaboración propia en QGIS a partir de capas vectorial (Corporación Nacional Forestal, 2025).

La Figura 7 presenta una representación cartográfica de los distintos usos del suelo, lo que permite visualizar su distribución espacial y superposición en el territorio. De manera complementaria, los datos más recientes del Catastro de Recursos Vegetacionales Nativos de Chile muestran que la región cuenta con una marcada presencia de bosques nativos y mixtos (32 %) y plantaciones forestales (20 %), que en conjunto superan la mitad de la superficie regional.

A estas coberturas se suman los terrenos agrícolas (25 %) y las praderas o matorrales (18 %), mientras que las categorías de menor extensión corresponden a humedales, áreas urbanas e industriales, superficies sin vegetación, nieves, glaciares, y cuerpos de agua. La Figura 6 sintetiza estos porcentajes, evidenciando el marcado carácter agroforestal del paisaje regional y su relevancia tanto productiva como ecológica (CONAF, 2021).

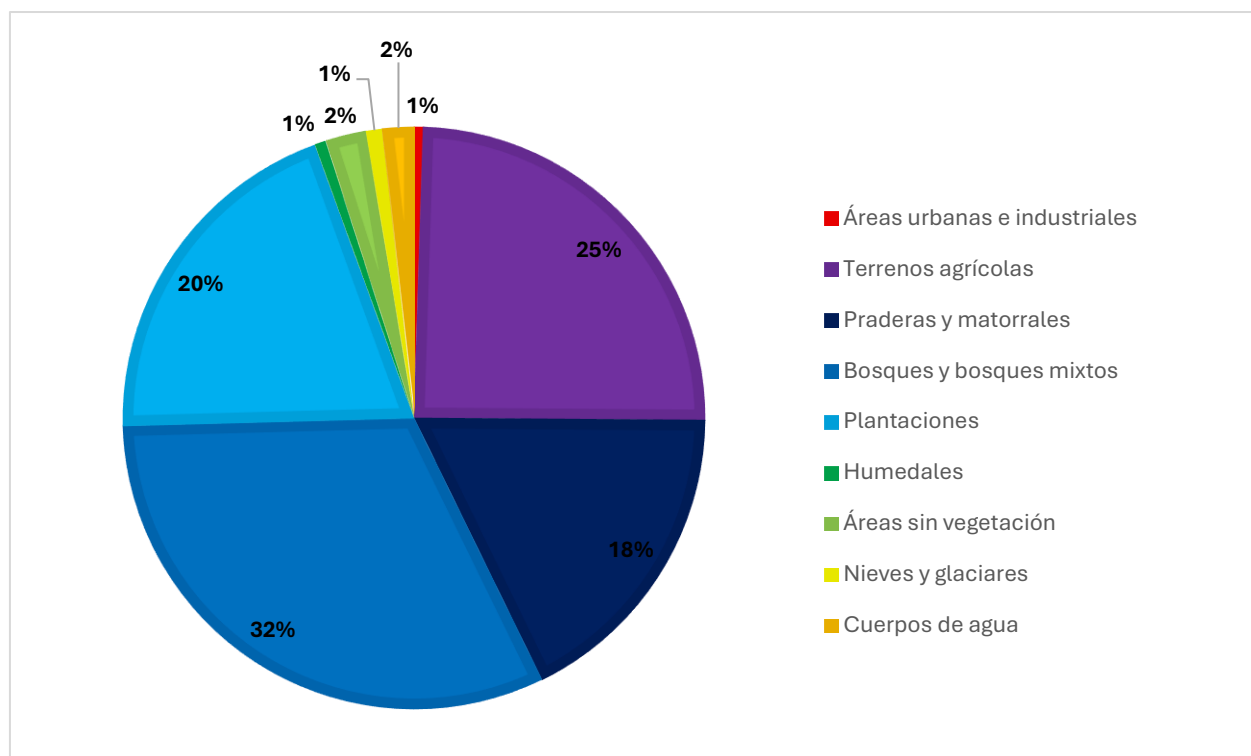


Figura 7 . Usos de suelo en la Región de La Araucanía. Distribución porcentual de las distintas categorías de uso del suelo.

Fuente: Elaboración propia en QGIS a partir de capas vectorial (Corporación Nacional Forestal, 2025).

2.6. Biodiversidad.

2.6.1. Flora.

La Región de La Araucanía se distingue por su riqueza florística, resultado de la combinación entre un clima templado lluvioso, suelos volcánicos y una geografía diversa (MMA, 2011). Estos factores permiten el desarrollo de bosques templados que cumplen funciones ecológicas esenciales, como la regulación hídrica, la protección contra la erosión y la provisión de hábitats para especies de flora y fauna.

En el Parque Nacional Araucanía, la guía oficial destaca que “la flora es variada ya que se observan *Araucaria araucana* (pehuén o araucaria), *Nothofagus alpina* (raulí), *Podocarpus salignus* (mañío de hoja larga), *Nothofagus dombeyi* (coigüe) y *Nothofagus pumilio* (lenga)” (SERNATUR–CONAF., 2019). Estas especies son parte del patrimonio natural más emblemático de la región y contribuyen a la estabilidad de los ecosistemas locales (MMA, 2011).

2.6.2. Fauna.

La biodiversidad de fauna en la región es igualmente relevante y está estrechamente vinculada a la conservación de los bosques y ecosistemas hídricos (MMA, 2011). El documento oficial del Parque Nacional Araucanía señala que “con respecto a la fauna, se observan *Myocastor coypus* (coipo), *Campephilus magellanicus* (carpintero negro), *Lycalopex fulvipes* (zorrito chilote o de Darwin), *Pudu puda* (pudú), *Vultur gryphus* (cóndor), entre otros” (SERNATUR–CONAF., 2019).

El MMA enfatiza además que especies sensibles como *Rhinoderma darwinii* (ranita de Darwin) cumplen un rol clave como bioindicadores, pues reflejan el estado de conservación de los ecosistemas acuáticos. Asimismo, *Lontra provocax* (huillín) constituye un componente crítico de los hábitats ribereños al ser una especie amenazada y altamente dependiente de la calidad de los cuerpos de agua.

En síntesis, la biodiversidad de la Región de La Araucanía no solo representa un valor ecológico y cultural, sino que constituye un factor clave en la dinámica hidrológica del territorio. Los bosques nativos y la vegetación ribereña inciden directamente en la regulación del caudal, la infiltración y la escorrentía, mientras que especies sensibles como el huillín y la ranita de Darwin actúan como bioindicadores del estado de los ecosistemas acuáticos (MMA, 2011) (SERNATUR–CONAF., 2019).

2.7. Actividades económicas.

La economía de La Araucanía mantiene un marcado carácter rural, sustentado en actividades primarias como la agricultura, la ganadería y la silvicultura, a las que en las últimas décadas se suma el turismo como motor de dinamismo regional. Todas estas actividades dependen directamente de la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos que abastecen a las principales cuencas, entre ellas el Biobío, el Imperial y el Toltén (Centro de Competitividad de La Araucanía – Universidad de La Frontera, 2020).

En el ámbito agrícola, la región se posiciona como la principal zona cerealista del país. Durante el período 2019/2020 concentró un 36.3 % de la superficie sembrada de cereales a nivel nacional, con cultivos predominantes como trigo, avena y cebada (Universidad de La Frontera, 2025). A ello se agregan los cultivos industriales, como el lupino y la remolacha, que han mostrado un desarrollo creciente en comunas como Lautaro, Collipulli y Nueva Imperial. Paralelamente, la ganadería bovina y ovina continúa siendo un pilar económico y social para numerosas familias rurales, tanto como fuente de sustento directo como por su aporte al mercado regional (Centro de Competitividad de La Araucanía – Universidad de La Frontera, 2020).

Por su parte, la silvicultura constituye un sector estratégico. La región dispone de más de 1,3 millones de hectáreas de bosques, de las cuales aproximadamente 360.000 corresponden a plantaciones de *Pinus radiata* (pino insigne) y *Eucalyptus globulus* (eucalipto), lo que refleja la importancia del sector forestal en la estructura productiva regional (Universidad de La Frontera, 2025).

En los últimos años, el turismo adquiere un rol protagónico, particularmente en destinos como Pucón, Villarrica y Curarrehue, que atraen visitantes por su oferta de lagos, volcanes y parques nacionales. A ello se suma el turismo cultural, vinculado a la revalorización de las tradiciones mapuche y su relación con el territorio, lo que favorece la aparición de pequeños emprendimientos locales que fortalecen un modelo de desarrollo más sustentable y conectado con la identidad regional (Centro de Competitividad de La Araucanía – Universidad de La Frontera, 2020).

2.8. Hidrografía.

En la Región de La Araucanía, las cuencas hidrográficas constituyen elementos clave para comprender la dinámica del agua en el territorio. Al estar definidas por la forma del relieve, recogen el agua de lluvia y nieve y la conducen hacia ríos, lagos y esteros. Su comportamiento está influido por factores como la pendiente, el tipo de vegetación y la distribución de las precipitaciones (GWP Perú, 2011). Todo ello afecta directamente la forma en que los caudales varían a lo largo del año.

Dado que cada cuenca presenta condiciones particulares, es fundamental analizarlas de manera individual, ya que solo así es posible comprender cómo responden frente a eventos extremos y ajustar las metodologías de estimación de crecidas según su realidad.

En este contexto, se prepara una caracterización general de las principales cuencas de la región. Esta información proviene del Estudio Hidrogeológico de la Región de La Araucanía, elaborado por la Dirección General de Aguas y desarrollado por Arcadis Chile S.A. (DGA, 2016).

Para apoyar este análisis, la Figura 8 muestra un mapa con la ubicación y los límites aproximados de las cuencas más representativas. Esta imagen sirve como base para la revisión comparativa que se presenta a continuación.

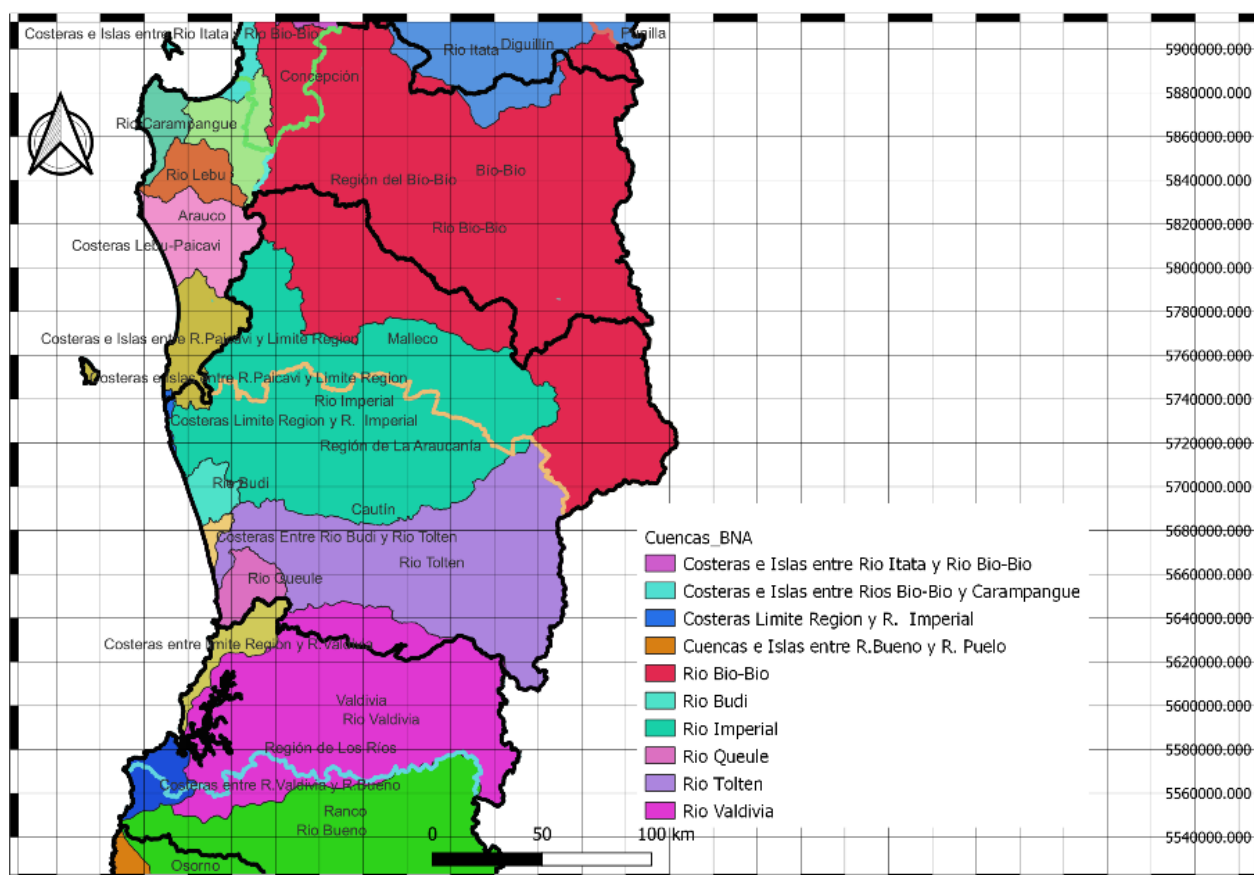


Figura 8. Distribución territorial de cuencas en la Región de La Araucanía. Ubicación y límites aproximados de las principales cuencas consideradas en el estudio. Fuente: Elaboración propia en QGIS a partir de capas vectorial (DGA, 2024).

2.8.1. Cuenca del Río Budi.

Ubicada en el extremo suroeste de La Araucanía, esta cuenca se caracteriza por su régimen costero exorreico y por albergar uno de los pocos lagos salados de Sudamérica: el lago Budi. Su hidrología está marcada por una barrera de arena que impide su desagüe directo al mar, provocando variaciones estacionales importantes en sus niveles de agua. A pesar de su reducida red de drenaje, el sistema cumple un rol importante a nivel ecológico.

Los principales parámetros físicos de esta cuenca se presentan en la Tabla 1, donde se detallan aspectos como superficie, pendiente y longitud del cauce principal.

Tabla 1 Parámetros físicos de la cuenca del Río Budi.

| Subcuenca | Área (km²) | Altura media (msnm) | Pendiente media (%) | Longitud cauce principal (km) |
|-----------------------------|---------------|---------------------------|------------------------|----------------------------------|
| Lago Budi y drenajes | 495.9 | 72.6 | 9.4 | 7 |

*Fuente: Dirección General de Aguas (DGA) – Gobierno Regional de La Araucanía.
Estudio hidrogeológico, Región de La Araucanía. Informe Final 2016-003. Realizado
por Arcadis Chile S.A., 2016.*

2.8.2. Cuenca del Río Imperial.

La cuenca del río Imperial se extiende por un amplio territorio del centro-oeste de La Araucanía, integrando una red hidrográfica compleja, compuesta por los ríos Cautín, Cholchol, Quepe y Lumaco. Desde su origen en la precordillera andina hasta su desembocadura en el océano Pacífico, cerca de Puerto Saavedra, esta cuenca atraviesa paisajes muy variados, con diferencias notables en altitud y pendiente. Su recorrido incluye zonas rurales y urbanas, lo que la convierte en un eje articulador entre ecosistemas naturales y dinámicas humanas. Las principales subcuencas que componen este sistema se presentan en la Tabla 2, con sus respectivas características físicas y de drenaje.

Tabla 2 Subcuencas principales del río Imperial y sus características físicas.

| Subcuenca | Área (km²) | Altura media (msnm) | Pendiente media (%) | Longitud cauce principal (km) |
|--|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|
| Río Lumaco | 2,985 | 368.7 | 10.9 | 111 |
| Río Cholchol | 2,703 | 282.9 | 12.4 | 157 |
| Río Cautín Alto | 3,223 | 697.1 | 15 | 160 |
| Quepe | 2,302 | 404.5 | 10.3 | 93 |
| Cautín (entre Quepe y Cholchol) | 91.5 | 74.3 | 5.1 | 13 |

Fuente: Dirección General de Aguas (DGA) – Gobierno Regional de La Araucanía. Estudio hidrogeológico, Región de La Araucanía. Informe Final 2016-003. Realizado por Arcadis Chile S.A.,

2.8.3. Cuenca del Río Queule.

Localizada en el sector costero sur de La Araucanía, la cuenca del río Queule se desarrolla en una zona de transición entre cordillera y mar. Su curso principal, que nace en la cordillera de Polcura, presenta un trayecto cambiante hasta llegar a la bahía de Queule. Se trata de una cuenca de régimen pluvial, por lo que su comportamiento está estrechamente ligado a las variaciones estacionales del clima.

El área cuenta con una cobertura vegetal significativa de bosque nativo, aunque en las últimas décadas ha experimentado una progresiva transformación producto de la expansión de monocultivos forestales. Esta presión sobre el paisaje ha modificado, en parte, su equilibrio ecológico. El río Boroa actúa como su principal afluente, aportando caudales en períodos de lluvias intensas.

Las características físicas generales de la cuenca pueden consultarse en la Tabla 3, que resume los parámetros técnicos más relevantes para el análisis de este sistema.

Tabla 3 Características físicas generales de la cuenca del río Queule.

| Subcuenca | Área (km ²) | Altura media (msnm) | Pendiente media (%) | Longitud cauce principal (km) |
|-----------|----------------------------|---------------------------|------------------------|--|
| Queule | 698 | 184.2 | 18 | 70 |

Fuente: Dirección General de Aguas (DGA) – Gobierno Regional de La Araucanía. Estudio hidrogeológico, Región de La Araucanía. Informe Final 2016-003. Realizado por Arcadis Chile S.A., 2016.

2.8.4. Cuenca del Río Toltén.

Considerada una de las más dinámicas y multifuncionales de La Araucanía, la cuenca del río Toltén se despliega desde las alturas cordilleranas hasta la costa del Pacífico, recorriendo un amplio rango altitudinal y ecológico. Su cauce principal nace en el lago Villarrica y recibe el aporte de diversos tributarios andinos, como los ríos Trancura, Pucón y Allipén, conformando una red fluvial activa y compleja.

Para complementar esta descripción, en la Tabla 4 se presentan las principales subcuencas que conforman el sistema del Toltén, con sus respectivas características físicas.

Tabla 4 Subcuencas y características físicas generales de la cuenca del río Toltén.

| Subcuenca | Área (km²) | Altura media (msnm) | Pendiente media (%) | Longitud cauce principal (km) |
|--|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|
| Río Allipén | 2,585.3 | 847.7 | 24.5 | 108 |
| Río Pucón | 2,383.8 | 1063.3 | 32.9 | 88 |
| Lago Villarrica y Toltén Alta | 1,134.5 | 433.9 | 11.4 | 70 |
| Toltén Bajo | 2,342.8 | 149.3 | 8.9 | 84 |

Fuente: Dirección General de Aguas (DGA) – Gobierno Regional de La Araucanía. Estudio hidrogeológico, Región de La Araucanía. Informe Final 2016-003. Realizado por Arcadis Chile S.A., 2016.

2.8.5. Cuenca costera entre el Río Budi y el Río Toltén

Esta unidad hidrográfica se ubica en la franja litoral comprendida entre las desembocaduras del río Budi y del río Toltén. Se trata de una cuenca menor en extensión, pero relevante por su rol en la conectividad ecológica entre los ecosistemas fluviales y marinos del borde costero. Su topografía está atravesada por cursos de agua de corto recorrido, como el estero Chelle, el Puyehue y el Pidunco, los cuales desembocan en la laguna Puyehue antes de llegar al mar.

La Tabla 1.5 presenta un resumen de los principales parámetros físicos de esta unidad hidrográfica, útiles para contextualizar su comportamiento dentro del sistema costero regional.

Tabla 5 Parámetros físicos principales de la cuenca costera entre el río Budi y el río Toltén.

| Subcuenca | Área (km ²) | Altura media (msnm) | Pendiente media (%) | Longitud cauce principal (km) |
|--|----------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------------------|
| Estero Chelle - Puyehue | 162.6 | 48.3 | 5.3 | 9 |

Fuente: Dirección General de Aguas (DGA) – Gobierno Regional de La Araucanía. Estudio hidrogeológico, Región de La Araucanía. Informe Final 2016-003. Realizado por Arcadis Chile S.A., 2016.

2.8.6. Cuenca del Río Bio-Bío.

En el extremo norte de la Región de La Araucanía, la cuenca del río Bio-Bío conforma una de las redes hidrográficas más extensas del país. Su origen se encuentra en sectores cordilleranos cercanos a la frontera con Argentina, donde nacen sus principales afluentes, alimentados en gran medida por precipitaciones nivales. Esta condición le otorga un régimen principalmente nival, con marcada influencia del deshielo estacional.

Tabla 6 Parámetros físicos principales de las subcuencas del río Biobío en la Región de La Araucanía.

| Subcuenca | Área estimada (km ²) | Altura media (msnm) | Pendiente media (%) | Longitud cauce principal (km) |
|-----------|--|---------------------------|------------------------|--|
| | | | | |

| | | | | |
|---|-----|------|-------|----|
| Alto Bio-bío (lagunas Galletué - Icalma) | 720 | 1200 | 15–20 | 40 |
| Lonquimay | 650 | 1000 | 12–18 | 35 |
| Curacautín | 500 | 800 | 10–15 | 30 |
| Collipulli y Angol | 730 | 350 | 5–8 | 45 |

Fuente: Dirección General de Aguas (DGA) – Gobierno Regional de La Araucanía. Estudio hidrogeológico, Región de La Araucanía. Informe Final 2016-003. Realizado por Arcadis Chile S.A., 2016.

CAPÍTULO III: Fundamentos teóricos y metodológicos.

3.1. Datos.

Para el desarrollo de esta investigación se recopila información hidrológica y meteorológica proveniente de estaciones con al menos 20 años de registros, con el fin de asegurar la representatividad estadística de los datos y la validez de los análisis. Este umbral mínimo está respaldado por el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica, el cual utiliza series con una longitud mínima de 20 años para la calibración y validación de las metodologías aplicadas a fenómenos extremos como crecidas y caudales mínimos (DGA, 1995). Asimismo, este criterio se alinea con las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial, que considera que un período de 20 a 30 años de datos es adecuado para realizar análisis de frecuencia de eventos extremos y garantizar la confiabilidad de los resultados (WMO, 2008).

En total, se identifican 54 estaciones fluviométricas activas en la Región de La Araucanía, registradas en el documento Informe Nacional de Estaciones DGA. De estas estaciones, se utilizan registros de caudales instantáneos (m^3/s) y caudales promedio mensuales (m^3/s), lo que permite aplicar el método directo de estimación de crecidas, basado en el análisis estadístico de los máximos observados.

Por otra parte, se contabilizan 80 estaciones meteorológicas activas en la región, según el mismo informe. Estas estaciones proporcionan la información necesaria para calcular la precipitación máxima en 24 horas, variable central en la aplicación del método indirecto. Este procedimiento se desarrolla mediante los modelos empíricos propuestos en el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información

Fluviométrica (DGA, 1995) los cuales relacionan las precipitaciones extremas con las características físicas de cada cuenca.

La información recopilada permite aplicar distintos enfoques de estimación de caudales. En aquellas cuencas con registros fluviométricos suficientes, es posible emplear el método directo, basado en el análisis estadístico de los caudales máximos observados. En contraste, para las cuencas sin datos de caudal, se implementan los procedimientos establecidos en el citado manual, que corresponden al método indirecto. Este manual propone modelos empíricos que vinculan las variables climáticas disponibles con los parámetros físicos de cada cuenca (DGA, 1995).

3.2. Método directo.

3.2.1. Descripción de datos.

El método directo se fundamenta en el análisis estadístico de los caudales máximos registrados en estaciones fluviométricas con series suficientemente largas. Este enfoque resulta aplicable en la Región de La Araucanía debido a la existencia de estaciones con más de 20 años de registros válidos, lo que garantiza la representatividad estadística de los resultados.

Se seleccionan 32 estaciones fluviométricas con información consistente para la estimación de crecidas. Estas estaciones constituyen la base del análisis, ya que permiten obtener curvas de frecuencia y calcular caudales asociados a distintos periodos de retorno. La Tabla 7 presenta el detalle de las estaciones consideradas, junto con su ubicación geográfica, complementada con la Figura 9.

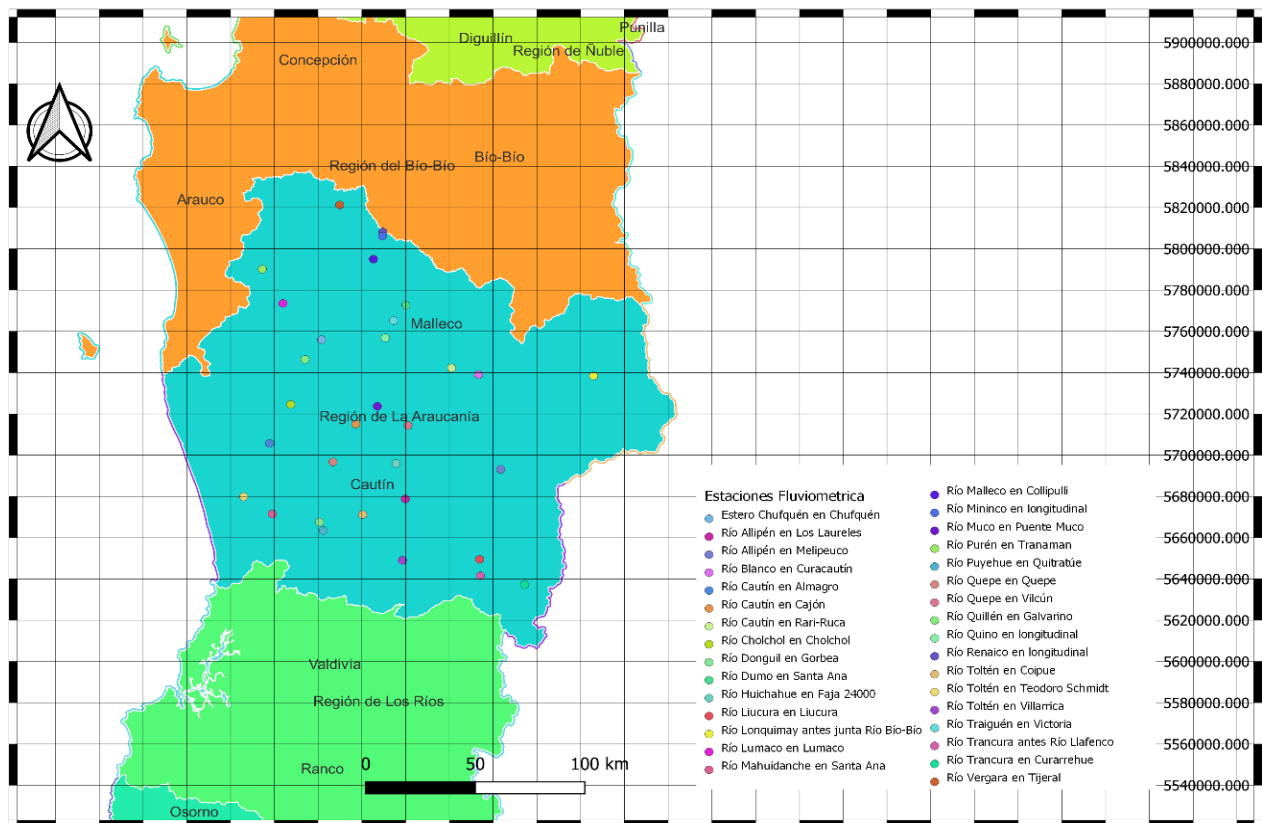


Figura 9 Distribución territorial de estaciones fluviométricas en la Región de La Araucanía. Ubicación de las principales estaciones consideradas en el estudio. Fuente: Elaboración propia en QGIS.

Tabla 7 Estaciones fluviométricas seleccionadas para la aplicación del método directo.

| Estación. | Latitud Sur. | Longitud Oeste. |
|--|---------------------|------------------------|
| Río Lonquimay antes junta Río Bío-Bío | 38°26'34" | 71°15'58" |
| Río Renaico en longitudinal | 37°50'41" | 72°23'27" |
| Río Mininco en longitudinal | 37°51'48" | 72°23'33" |
| Río Malleco en Collipulli | 37°57'53" | 72°26'08" |
| Río Vergara en Tijeral | 37°43'55" | 72°37'07" |
| Río Purén en Tranaman | 38°01'10" | 73°00'44" |
| Río Lumaco en Lumaco | 38°10'02" | 72°54'01" |
| Río Traiguén en Victoria | 38°13'52" | 72°19'19" |
| Río Dumo en Santa Ana | 38°09'43" | 72°15'34" |
| Río Quino en longitudinal | 38°18'25" | 72°21'41" |
| Estero Chufquén en Chufquén | 38°19'18" | 72°41'41" |
| Río Quillén en Galvarino | 38°24'35" | 72°46'42" |
| Río Cholchol en Cholchol | 38°36'28" | 72°50'51" |
| Río Blanco en Curacautín | 38°27'18" | 71°52'03" |
| Río Cautín en Rari-Ruca | 38°25'48" | 72°00'37" |
| Río Muco en Puente Muco | 38°36'22" | 72°23'31" |
| Río Cautín en Cajón | 38°41'12" | 72°30'10" |
| Río Quepe en Vilcún | 38°41'11" | 72°13'41" |
| Río Huichahue en Faja 24000 | 38°51'14" | 72°17'05" |

| | | |
|--|-----------|-----------|
| Río Quepe en Quepe | 38°51'15" | 72°37'01" |
| Río Cautín en Almagro | 38°46'46" | 72°57'11" |
| Río Allipén en Melipeuco | 38°51'55" | 71°44'01" |
| Río Allipén en Los Laureles | 39°00'26" | 72°13'48" |
| Río Trancura en Curarrehue | 39°21'51" | 71°35'00" |
| Río Trancura antes Río Llafenco | 39°19'56" | 71°49'09" |
| Río Liucura en Liucura | 39°15'38" | 71°49'37" |
| Río Toltén en Villarrica | 39°16'31" | 72°14'04" |
| Río Toltén en Coipue | 39°04'50" | 72°27'09" |
| Río Puyehue en Quitratúe | 39°09'17" | 72°39'30" |
| Río Donguil en Gorbea | 39°07'04" | 72°40'45" |
| Río Mahuidanche en Santa Ana | 39°05'15" | 72°55'48" |
| Río Toltén en Teodoro Schmidt | 39°00'52" | 73°04'58" |

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Dirección General de Aguas (DGA),
Informe_Nacional_EstacionesDGA.xlsx.*

En síntesis, la información recopilada se basa en registros de caudales instantáneos (m^3/s) obtenidos de estaciones fluviométricas con series extensas y consistentes, lo que constituye una base sólida para la investigación. La calidad y continuidad de estos antecedentes aseguran que los análisis posteriores representen de manera confiable el comportamiento hidrológico de la región, respaldando la aplicación del método.

3.2.2. Estimación de crecidas.

El método directo aplicado en esta investigación se fundamenta en el análisis de series históricas de caudales máximos anuales, con el propósito de estimar crecidas asociadas a períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Para ello, se ajustan distribuciones de probabilidad recomendadas por la Dirección General de Aguas, considerando el régimen hidrológico de la cuenca y su zona homogénea.

Las distribuciones utilizadas incluyen:

- Gumbel.
- Log-Normal.
- Normal.
- Gamma.
- Pearson tipo III.

Esta elección metodológica está respaldada por el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica (DGA, 1995), que sugiere expresamente estas funciones para el ajuste de caudales máximos anuales en cuencas con registros. Asimismo, la Guía de Prácticas Hidrológicas de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2008), respalda su aplicación, señalando que debe verificarse mediante pruebas estadísticas que aseguren una adecuada representación de los eventos extremos.

Una vez definidas las distribuciones de probabilidad a emplear, se realiza el análisis de frecuencia de los caudales máximos anuales, comparando los valores observados con los modelos teóricos mediante la función empírica de Weibull.

3.2.3. Análisis de frecuencia y ajuste de distribuciones.

Empírica de Weibull.

La posición empírica de Weibull se utiliza en hidrología para estimar la probabilidad de excedencia asociada a eventos extremos, como los caudales máximos anuales. A diferencia de las distribuciones teóricas, esta fórmula no asume una forma funcional específica, sino que construye una curva a partir del ordenamiento de los datos observados, lo que permite una representación objetiva del comportamiento hidrológico registrado (Chow V. T., 1988).

La expresión clásica para estimar la probabilidad de excedencia P_i de un valor observado x_i , ordenado de menor a mayor, se define según la Ecuación 1:

Ecuación 1 Ecuación de Weibull para la estimación de la probabilidad de posición.

$$P_i = \frac{i}{n + 1}$$

*i: orden del valor dentro del conjunto de datos. n: número
total de observaciones válidas.*

Este método genera una distribución acumulada empírica que sirve como referencia para el ajuste y la validación de las distribuciones teóricas aplicadas en el análisis de frecuencia. Su aplicación se encuentra ampliamente documentada en la literatura hidrológica debido a su simplicidad y a su independencia de supuestos paramétricos (Chow, 1988). Asimismo, la Guide to Hydrological Practices de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2008) recomienda su uso como herramienta inicial para evaluar la bondad de ajuste de los modelos probabilísticos empleados en la estimación de crecidas.

Ajuste de Distribuciones Teóricas.

El ajuste de distribuciones de probabilidad permite modelar estadísticamente el comportamiento de los datos observados y estimar con mayor precisión los eventos

hidrológicos extremos. En este estudio se consideran cinco distribuciones de uso frecuente en hidrología, seleccionadas por su capacidad para representar distintos grados de asimetría y dispersión en los caudales: Gumbel, Log-Pearson tipo III, Normal, Log-Normal y Gamma.

Estas funciones son reconocidas por la Dirección General de Aguas como las más utilizadas en el análisis de crecidas, según lo establecido en el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica (DGA, 1995).

En términos generales, las distribuciones de probabilidad aplicadas en hidrología se fundamentan en la representación estadística de los caudales extremos, y permiten caracterizar el comportamiento de las series de datos en función de su asimetría y dispersión. A continuación, se presenta una síntesis de las distribuciones más empleadas en el análisis de frecuencia de crecidas y su respectivo sustento teórico.

- Gumbel: La distribución de Gumbel se utiliza para modelar caudales máximos anuales, especialmente en la estimación de crecidas asociadas a altos períodos de retorno. Se ajusta mediante parámetros de ubicación y escala, y resulta adecuada cuando los datos presentan baja asimetría. Su aplicación se fundamenta en la teoría de valores extremos (Chow, 1988). La función se expresa en la Ecuación 2:

Ecuación 2 Función de distribución acumulada de la Distribución de Gumbel.

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(\frac{x - \mu}{\beta} \right) \right]$$

*x: variable aleatoria, μ : parámetro de ubicación, β :
parámetro de escala.*

- Log-Pearson Tipo III: La distribución Log-Pearson Tipo III aplica una transformación logarítmica al modelo Pearson Tipo III, lo que permite representar caudales extremos en series sesgadas. Resulta especialmente útil para datos con asimetría positiva y se ha consolidado como un estándar en las metodologías de análisis de frecuencia de crecidas (Chow, 1988). Su función se expresa en la Ecuación 3:

Ecuación 3 Función de densidad de probabilidad de la Distribución Log-Pearson Tipo III.

$$F(x) = \frac{\left(\frac{x - x_0}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-(x-x_0)}}{\Gamma(\alpha)\beta}, \quad x > 0$$

x: valor original del caudal, x_0 : parámetro de ubicación, α : parámetro de ubicación, β : parámetro de escala, $\Gamma(\alpha)$: función gamma.

- **Distribución Normal:** La distribución Normal se considera principalmente con fines comparativos, ya que su aplicación en el análisis de crecidas es limitada debido a su simetría. Resulta útil cuando los datos presentan una distribución aproximadamente normal; sin embargo, no constituye la opción preferida para modelar caudales extremos (Chow, 1988). Su función se expresa en la Ecuación 4:

Ecuación 4 Función de distribución acumulada de la Distribución Normal

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt$$

x: variable aleatoria, μ : media de la distribución, σ : desviación estándar, $\sigma\sqrt{2\pi}$: constante de normalización.

- **Distribución Log-Normal:** Adecuada para datos con comportamiento multiplicativo y asimetría positiva, la distribución Log-Normal se ajusta correctamente a caudales extremos transformados logarítmicamente. Su aplicación se encuentra ampliamente documentada en la literatura hidrológica internacional, destacando su capacidad para reducir la asimetría positiva de los datos (Chow, 1988). Representada por la Ecuación 5:

Ecuación 5 Función de distribución acumulada de la Distribución Log-Normal.

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma}\right)$$

*x: variable aleatoria, μ : media de los logaritmos de los
datos. σ : desviación estándar de los logaritmos, Φ :
función de distribución normal estándar.*

- **Distribución Gamma:** La distribución Gamma es flexible y útil para representar caudales con asimetría moderada. Se adapta adecuadamente a registros con colas largas sin requerir transformaciones, y proporciona un buen ajuste en cuencas cuyos datos presentan sesgo positivo (Chow, 1988). Su función se expresa en la Ecuación 6:

Ecuación 6 Función de densidad de probabilidad de la Distribución Gamma.

$$F(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{\frac{-x}{\beta}}, x > 0$$

x: variable aleatoria, α : parámetro de forma.

β : parámetro de escala, $\Gamma(\alpha)$: función gamma.

Criterio de Máxima Diferencia.

El criterio de máxima diferencia se utiliza para evaluar el grado de ajuste entre una distribución teórica y una distribución empírica, como la obtenida mediante el método de Weibull. Este procedimiento no paramétrico mide la mayor diferencia absoluta entre ambas funciones acumuladas, y se expresa mediante la Ecuación 7:

Ecuación 7 Criterio de Máxima Diferencia

$$D_{Max} = \max |F_{Weibull}(x) - F_{distribucion}(x)|$$

El valor de D_{Max} representa la distancia vertical máxima entre ambas curvas, y la distribución que presenta el menor valor de D_{Max} se considera la que mejor representa el comportamiento de los datos observados (Chow, 1988).

Evaluación del ajuste: prueba K–S.

Una vez ajustadas las distribuciones de probabilidad a los caudales extremos, se evalúa su capacidad para representar los datos observados mediante pruebas estadísticas y análisis gráficos. La herramienta principal corresponde a la prueba de Kolmogórov–Smirnov (K–S), la cual mide la mayor diferencia absoluta entre la distribución empírica y la distribución teórica del modelo.

La distribución que presenta el menor valor de diferencia se considera la que mejor representa el comportamiento de los datos observados (Chow, 1988).

Estimación de crecidas.

Con los parámetros obtenidos del ajuste de las distribuciones de probabilidad, se procede a estimar los caudales extremos correspondientes a diferentes períodos de retorno. Este cálculo se realiza para valores estándar de recurrencia, tales como 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, con el propósito de representar estadísticamente la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos (DGA, 1995).

Para cada período de retorno T , se determina la probabilidad de excedencia mediante la relación $P = 1/T$, y se estima el caudal correspondiente Q_T a partir de la función de distribución acumulada inversa de la distribución seleccionada (Chow, 1988). Esta relación se expresa en la Ecuación 8:

Ecuación 8 Cálculo del caudal de diseño mediante la función cuantil de la distribución ajustada.

$$Q_T = F^{-1}(1 - P)$$

donde F^{-1} corresponde a la función cuantil de la distribución de mejor ajuste. Este procedimiento permite obtener valores de diseño hidrológico representativos y coherentes con el comportamiento estadístico de los datos observados, constituyendo una etapa fundamental dentro del análisis de frecuencia de crecidas en estudios de diseño y evaluación de riesgo.

3.3. Régimen fluvial.

Para caracterizar el régimen fluvial en la Región de La Araucanía, se utilizan las mismas estaciones empleadas en la aplicación del método directo, considerando únicamente aquellas con registros completos y continuos. En total, 32 estaciones cumplen con estos requisitos y se presentan en la Tabla 7, garantizando la consistencia del análisis.

Este procedimiento aplica el mismo enfoque estadístico del método directo, utilizando registros de caudales máximos mensuales para representar la variabilidad estacional. Las distribuciones teóricas evaluadas corresponden a las mismas descritas en la subsección Ajuste de Distribuciones Teóricas del Capítulo 3.2.3, donde se desarrollan sus formulaciones y fundamentos matemáticos, presentadas en las Ecuaciones 2 a 6, elaboradas a partir de los planteamientos (Chow, 1988).

Para cada mes del año, se selecciona la distribución que presenta el mejor ajuste frente a la función empírica de Weibull, lo que permite estimar caudales asociados a distintas probabilidades de no falla y caracterizar la variabilidad estacional del régimen fluvial con base estadística.

De esta forma, la estimación probabilística de caudales máximos mensuales permite describir el régimen fluvial anual, calculando caudales con probabilidades de no falla entre 0,05 y 0,95. Los resultados se presentan en los gráficos de curvas de régimen fluvial

mensual por estación fluviométrica, los cuales muestran la evolución mensual del caudal según el nivel de confiabilidad, de acuerdo con los lineamientos establecidos por la Dirección General de Aguas (DGA, 2008).

3.4. Método indirecto.

3.4.1. Descripción de datos.

Para aplicar el método indirecto de estimación de crecidas en la Región de La Araucanía, se consideran inicialmente 80 estaciones meteorológicas, las cuales se someten a un proceso de selección destinado a garantizar la validez estadística de los resultados, en concordancia con los lineamientos establecidos en el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica (DGA, 1995).

El primer criterio de selección establece que las estaciones deben haber sido instaladas en el año 2002 o antes, con el fin de asegurar la disponibilidad de al menos 20 años de datos meteorológicos continuos, condición mínima para calcular la Precipitación Media Areal (PMA). Posteriormente, se verifica la completitud de los registros, descartando aquellas estaciones que presentan vacíos significativos, errores de digitación o series discontinuas.

El análisis se centra exclusivamente en la variable “Máxima en 24 horas de precipitación (mm)”, correspondiente al mayor valor de lluvia diaria registrado en cada año calendario para cada estación. Esta variable permite identificar los eventos extremos de precipitación anual, los cuales constituyen la base para la estimación de crecidas en cuencas sin registros fluviométricos.

Las estaciones que cumplen con estos criterios se presentan en la Tabla 8, la cual reúne la información meteorológica utilizada en la aplicación del método, mientras que la Figura 10 representa de forma visual la distribución espacial de las estaciones activas en la región.

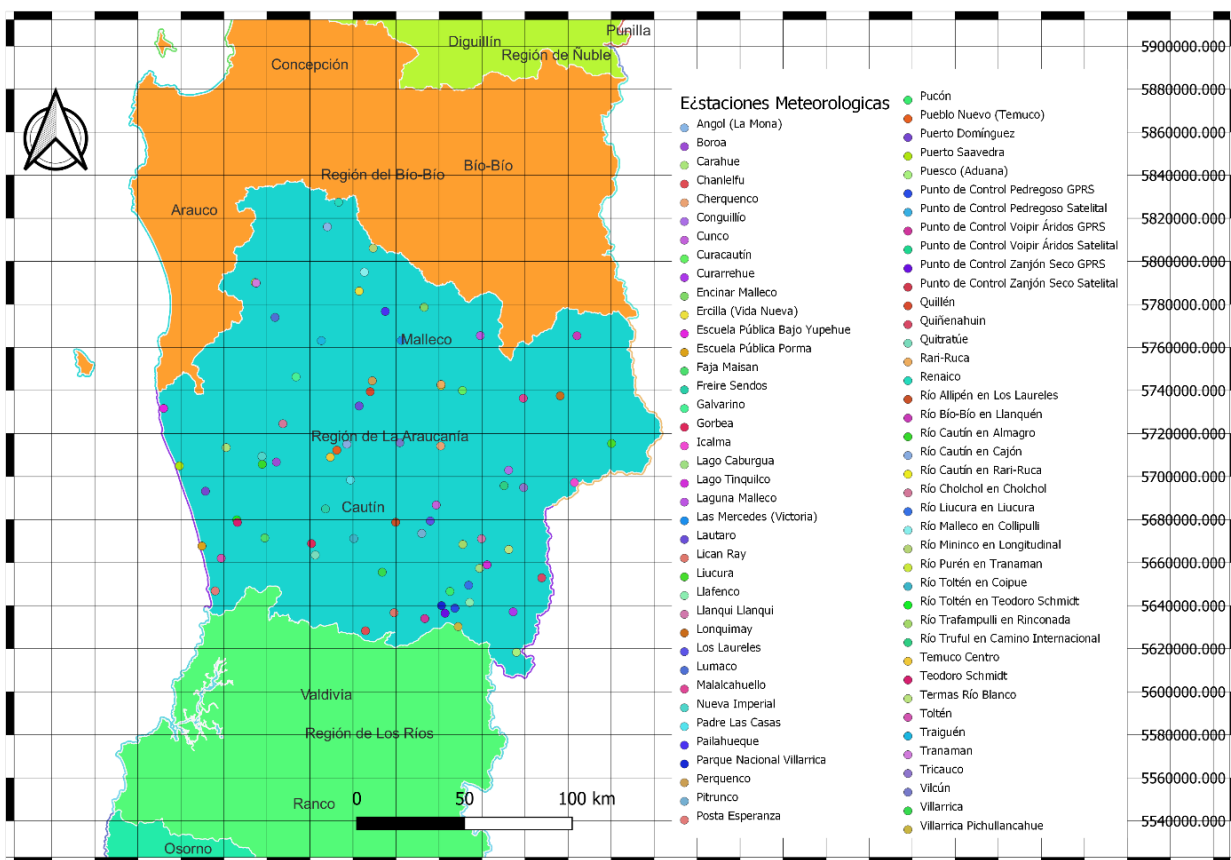


Figura 10 Distribución territorial de estaciones Meteorológicas en la Región de La Araucanía. Ubicación de las principales estaciones consideradas en el estudio. Fuente: Elaboración propia en QGIS.

Tabla 8 Estaciones meteorológicas utilizadas en la aplicación del método indirecto.

| Estación | Latitud Sur | Longitud Oeste | Estación | Latitud Sur | Longitud Oeste |
|-----------|-------------|----------------|------------------------------------|-------------|----------------|
| Icalma | 38°48'52" | 71°16'50" | Puerto Domínguez | 38°53'50" | 73°15'14" |
| Liucura | 38°38'42" | 71°05'28" | Escuela Pública Porma | 39°07'37" | 73°16'02" |
| Lonquimay | 38°27'17" | 71°22'30" | Río Triful en Camino Internacional | 38°50'21" | 71°39'22" |

| | | | | | |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-------------------------------------|-----------|-----------|
| Río Bío-Bío en Llanquén | 38°12'03" | 71°17'55" | Conguillío | 38°46'25" | 71°38'05" |
| Río Mininco en Longitudinal | 37°51'48" | 72°23'33" | Tricauco | 38°50'38" | 71°33'05" |
| Encinar Malleco | 38°06'16" | 72°06'49" | Cunco | 38°55'47" | 72°00'56" |
| Renaico | 37°40'30" | 72°34'52" | Río Allipén en Los Laureles | 39°00'26" | 72°13'48" |
| Laguna Malleco | 38°12'55" | 71°48'40" | Los Laureles | 38°59'50" | 72°02'41" |
| Río Malleco// en Collipulli | 37°57'53" | 72°26'08" | Río Trafampulli en Rinconada | 39°05'26" | 71°51'58" |
| Ercilla (Vida Nueva) | 38°02'41" | 72°27'37" | Llanqui Llanqui | 39°03'52" | 71°46'00" |
| Angol (La Mona) | 37°46'45" | 72°38'14" | Pitruncó | 39°03'02" | 72°05'18" |
| Escuela Pública Bajo Yupehue | 38°33'13" | 73°29'08" | Quiñenahuin | 39°13'06" | 71°26'08" |
| Río Purén en Tranaman | 38°01'10" | 73°00'44" | Curarrehue | 39°21'54" | 71°34'56" |
| Tranaman | 38°01'17" | 73°00'23" | Puesco (Aduana) | 39°32'01" | 71°33'22" |
| Lumaco | 38°09'49" | 72°54'08" | Llafenco | 39°19'57" | 71°49'05" |
| Las Mercedes (Victoria) | 38°14'46" | 72°13'44" | Termas Río Blanco | 39°06'18" | 71°37'07" |

| | | | | | |
|---------------------------------|-----------|-----------|---|-----------|-----------|
| Pailahueque | 38°07'36" | 72°19'08" | Río Liucura en Liucura | 39°15'38" | 71°49'37" |
| Traiguén | 38°15'22" | 72°39'13" | Lago Tinquilco | 39°10'21" | 71°43'55" |
| Quillén | 38°27'51" | 72°23'12" | Lago Caburgua | 39°11'17" | 71°46'18" |
| Perquenco | 38°25'07" | 72°22'38" | Punto de Control Pedregoso Satelital | 39°21'31" | 71°53'49" |
| Galvarino | 38°24'37" | 72°47'02" | Punto de Control Pedregoso GPRS | 39°21'31" | 71°53'49" |
| Río Cholchol en Cholchol | 38°36'28" | 72°50'51" | Pucón | 39°17'21" | 71°55'35" |
| Malalcahuello | 38°28'15" | 71°34'16" | Villarrica | 39°13'04" | 72°17'40" |
| Curacautín | 38°26'51" | 71°53'46" | Chanlelfu | 39°27'54" | 72°22'30" |
| Río Cautín en Rari-Ruca | 38°25'48" | 72°00'37" | Punto de Control Zanjón Seco Satelital | 39°22'52" | 71°56'57" |
| Rari-Ruca | 38°25'30" | 72°00'39" | Punto de Control Zanjón Seco GPRS | 39°22'52" | 71°56'57" |
| Lautaro | 38°31'31" | 72°26'37" | Parque Nacional Villarrica | 39°20'59" | 71°58'10" |
| Río Cautín en Cajón | 38°41'12" | 72°30'10" | Punto de Control Voipir Áridos Satelital | 39°24'23" | 72°03'26" |

| | | | | | |
|------------------------------|-----------|-----------|--|-----------|-----------|
| Pueblo Nuevo (Temuco) | 38°42'46" | 72°33'22" | Punto de Control Voipir Áridos GPRS | 39°24'23" | 72°03'26" |
| Temuco Centro | 38°44'33" | 72°35'23" | Río Toltén en Coipue | 39°04'50" | 72°27'09" |
| Boroa | 38°46'08" | 72°52'40" | Quitratúe | 39°09'15" | 72°39'24" |
| Cherquenco | 38°40'57" | 72°00'08" | Gorbea | 39°06'23" | 72°40'43" |
| Vilcún | 38°40'26" | 72°13'16" | Faja Maisan | 39°05'15" | 72°55'50" |
| Padre Las Casas | 38°50'09" | 72°28'43" | Río Toltén en Teodoro Schmidt | 39°00'52" | 73°04'58" |
| Freire Sendos | 38°57'35" | 72°36'30" | Teodoro Schmidt | 39°01'30" | 73°04'45" |
| Río Cautín en Almagro | 38°46'46" | 72°57'11" | Toltén | 39°10'35" | 73°09'44" |
| Nueva Imperial | 38°44'47" | 72°57'19" | Posta Esperanza | 39°18'49" | 73°11'28" |
| Carahue | 38°42'46" | 73°08'51" | Villarrica Pichullancahue | 39°26'06" | 71°52'33" |
| Puerto Saavedra | 38°47'35" | 73°23'45" | Lican Ray | 39°23'09" | 72°13'26" |

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Dirección General de Aguas (DGA),
Informe_Nacional_EstacionesDGA.xlsx.*

3.4.2. Delimitación de cuenca.

La delimitación de cuencas hidrográficas constituye una etapa fundamental dentro del análisis hidrológico, ya que permite definir el área de drenaje que capta y conduce las

aguas de precipitación hacia un punto común de salida, denominado exutorio. Su identificación se basa en criterios topográficos y morfométricos, utilizando el relieve como elemento delimitador natural del flujo superficial (Chow, 1988). La Figura 11 ilustra la metodología empleada para la delimitación de cuencas, la cual se desarrolla a partir del análisis del modelo digital de elevación y de la red de drenaje principal, conforme a los procedimientos establecidos en la hidrología aplicada.

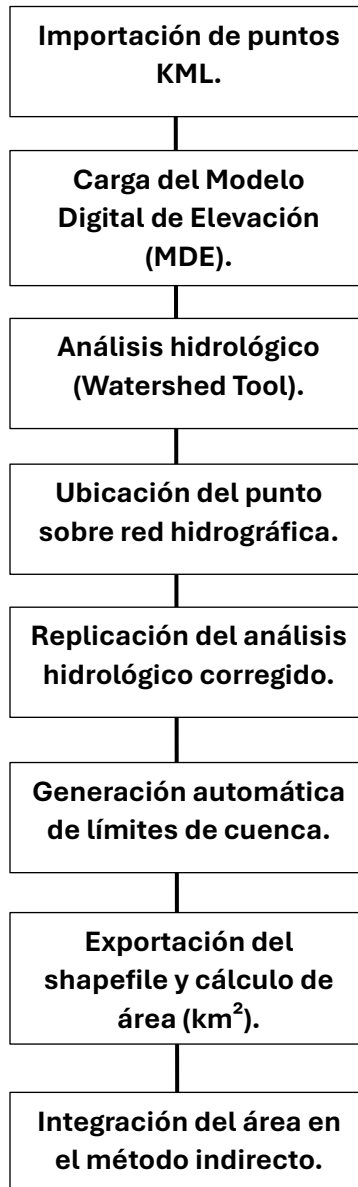


Figura 11 metodología empleada para la delimitación de cuencas.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3. Polígonos de Thiessen.

El método de polígonos de Thiessen corresponde a una técnica geométrica de interpolación espacial utilizada en hidrología y climatología para representar el área de influencia de cada estación meteorológica dentro de una cuenca.

Su principio se basa en dividir el territorio en polígonos de manera que todo punto del área se asocie a la estación más cercana, asumiendo que la precipitación es uniforme dentro de cada polígono y que las variaciones ocurren únicamente en los límites entre áreas adyacentes (Chow, 1988).

3.4.4. Precipitación media areal (PMA).

La precipitación media areal (PMA) representa el valor promedio de la precipitación que cae sobre una cuenca, obtenido a partir de los registros puntuales de las estaciones pluviométricas. Su estimación se realiza mediante la aplicación del método de polígonos de Thiessen, el cual pondera la precipitación registrada en cada estación según el área de influencia que le corresponde dentro de la cuenca.

De este modo, se obtiene una medida más representativa que el promedio aritmético simple, especialmente en cuencas con distribución irregular de estaciones. Desde el punto de vista teórico, la PMA se calcula aplicando la Ecuación 9:

Ecuación 9 Cálculo de la Precipitación Media Areal mediante el método de polígonos de Thiessen.

$$P_{med} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i}{A_{total}} * P_i \right)$$

donde A_i corresponde al área del polígono de Thiessen asociado a la estación i , P_i representa la precipitación registrada en dicha estación, y A_{total} es el área total de la cuenca (Chow, 1988). Esta formulación permite integrar espacialmente los valores

observados y obtener un promedio ponderado que representa la lluvia efectiva sobre toda la superficie de estudio.

En Chile, el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica de la Dirección General de Aguas (DGA, 1995) valida oficialmente el uso de este método para la estimación de la precipitación media areal en estudios hidrológicos, constituyéndose como referencia metodológica estándar en la evaluación de crecidas.

3.4.5. Precipitación máxima en 24 horas.

La precipitación máxima en 24 horas corresponde al valor extremo de lluvia acumulada durante un día dentro de un período de observación determinado. En hidrología aplicada, este parámetro se utiliza para estimar precipitaciones de diseño asociadas a distintos períodos de retorno (T), los cuales expresan la frecuencia promedio con que un evento de igual o mayor magnitud puede ocurrir (Chow, 1988).

El análisis de estos valores se basa en los principios del ajuste de distribuciones de probabilidad, descritos en la subsección “Análisis de frecuencia y ajuste de distribuciones” del marco conceptual. Entre las funciones teóricas comúnmente utilizadas para representar el comportamiento estadístico de los máximos anuales de precipitación se encuentran las distribuciones Normal, Log-Normal, Gumbel, Gamma y Pearson Tipo III, recomendadas por la Dirección General de Aguas (DGA, 1995).

La evaluación del ajuste entre los valores observados y los teóricos se realiza mediante la prueba de Kolmogórov–Smirnov (K–S), la cual determina la diferencia máxima entre la distribución empírica y la distribución teórica con el propósito de establecer el modelo que mejor representa el comportamiento estadístico de los datos (DGA, 1995).

A partir del modelo de mejor ajuste, se estiman los valores de precipitación extrema asociados a determinados percentiles, como el percentil 90, que corresponde a una precipitación con un 90 % de probabilidad de no ser superada y que se utiliza

habitualmente para representar eventos intensos de corta duración en el diseño hidrológico.

3.4.6. Procedimientos empíricos desarrollados por la DGA para la estimación de crecidas.

La Dirección General de Aguas desarrolla una serie de métodos empíricos orientados a la estimación de caudales máximos de crecida en cuencas sin información fluviométrica directa, los cuales se recopilan en el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica (DGA, 1995).

Estos procedimientos se fundamentan en relaciones estadísticas y morfoclimáticas derivadas del análisis de estaciones representativas a nivel nacional, lo que permite transferir información hidrológica desde cuencas con registros hacia aquellas que carecen de datos medidos.

El Manual distingue tres procedimientos principales para la estimación de caudales máximos en cuencas naturales: el Método DGA-AC, la fórmula modificada de Verni y King, y la Fórmula Racional adaptada. Estos métodos se emplean de manera complementaria, permitiendo analizar el comportamiento hidrológico de cada cuenca desde distintos enfoques empíricos.

Su aplicación comparativa posibilita evaluar la coherencia de los resultados obtenidos y seleccionar el método que mejor representa las condiciones morfoclimáticas locales, garantizando una estimación más confiable de los caudales máximos de diseño.

Método DGA-AC.

Este enfoque, conocido como Método DGA-AC, busca estimar los caudales máximos de crecida en lugares donde no existen registros fluviométricos directos. Para ello, se apoya en la información obtenida de cuencas vecinas con características similares, utilizando

curvas regionales de frecuencia y factores de ajuste empíricos que permiten trasladar la información hidrológica de zonas con datos hacia aquellas que no los tienen. Gracias a este método, es posible aproximar caudales de diseño con una base técnica sólida y acorde a los criterios establecidos por la DGA.

A continuación, se presentan los pasos que conforman el procedimiento del Método DGA-AC, detallando la forma en que se aplicó a las cuencas analizadas en este estudio:

1. Determinación de la zona homogénea hidro-pluvial:

La determinación de la zona homogénea hidro pluvial correspondiente a cada cuenca se realizó en base a la Figura 3.2 del Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica (DGA, 1995), donde se establece la delimitación oficial de las Zonas Homogéneas Pluviales.

2. Definición de la curva frecuencias regional adimensional $\left(\frac{Q_T}{Q_{10}}\right)$:

Esta se determina identificando la cuenca en la cual se contiene nuestra área de estudio. Dentro de las que aplican en el estudio se utilizan las desde la Tablas 3.1 a 3.23 del Manual (DGA, 1995), correspondientes a cada cuenca hidrográfica del país.

3. Determinación del caudal medio diario máximo (Q_{10}):

Se utiliza la Ecuación 10 correspondiente a la Región de La Araucanía, según lo establecido en el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica (DGA, 1995), para el área de estudio en la que se enfoca esta investigación, como se presenta en la Ecuación 10.

Ecuación 10 caudal medio diario máximo (Q_{10}).

$$Q_{10} = 1.94 * 10^{-7} A_p^{0.973} (P_{24}^{10})^{1.224}$$

siendo A_p : el area de la cuenca y P_{24}^{10} : Precipitación máxima en 24 horas (mm) con período de retorno de 10 años.

4. Se determina la curva de frecuencias caudal medio diario máximo:

La relación entre el caudal para un período de retorno T y el caudal base Q_{10} se calcula mediante la Ecuación 11:

Ecuación 11 caudal medio diario máximo

$$Q_T = \frac{Q_T}{Q_{10}} * Q_{10}$$

5. Estimación del caudal instantáneo máximo (Q_{ins}):

Una vez determinado α que se encuentra caracterizado en la Tabla 3.24 del Manual DGA (1995), se obtiene la curva de frecuencias del caudal instantáneo máximo para cada uno de los períodos de retorno (2, 5 10,25,50 y 100), como se observa en la Ecuación 12.

Ecuación 12 caudal instantáneo máximo.

$$Q_{ins} = Q_T * \alpha$$

Finalmente, además del Método DGA-AC, el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica, propone otros enfoques empíricos destinados a la estimación de caudales máximos en cuencas naturales sin información fluviométrica. Uno de ellos corresponde a la fórmula modificada de Verni y King, la cual amplía el alcance del método anterior al incorporar un coeficiente ajustado al período de retorno, permitiendo una representación más precisa del comportamiento hidrológico bajo diferentes condiciones de precipitación y extensión de cuenca. La Figura 12 resume de manera esquemática la metodología aplicada.

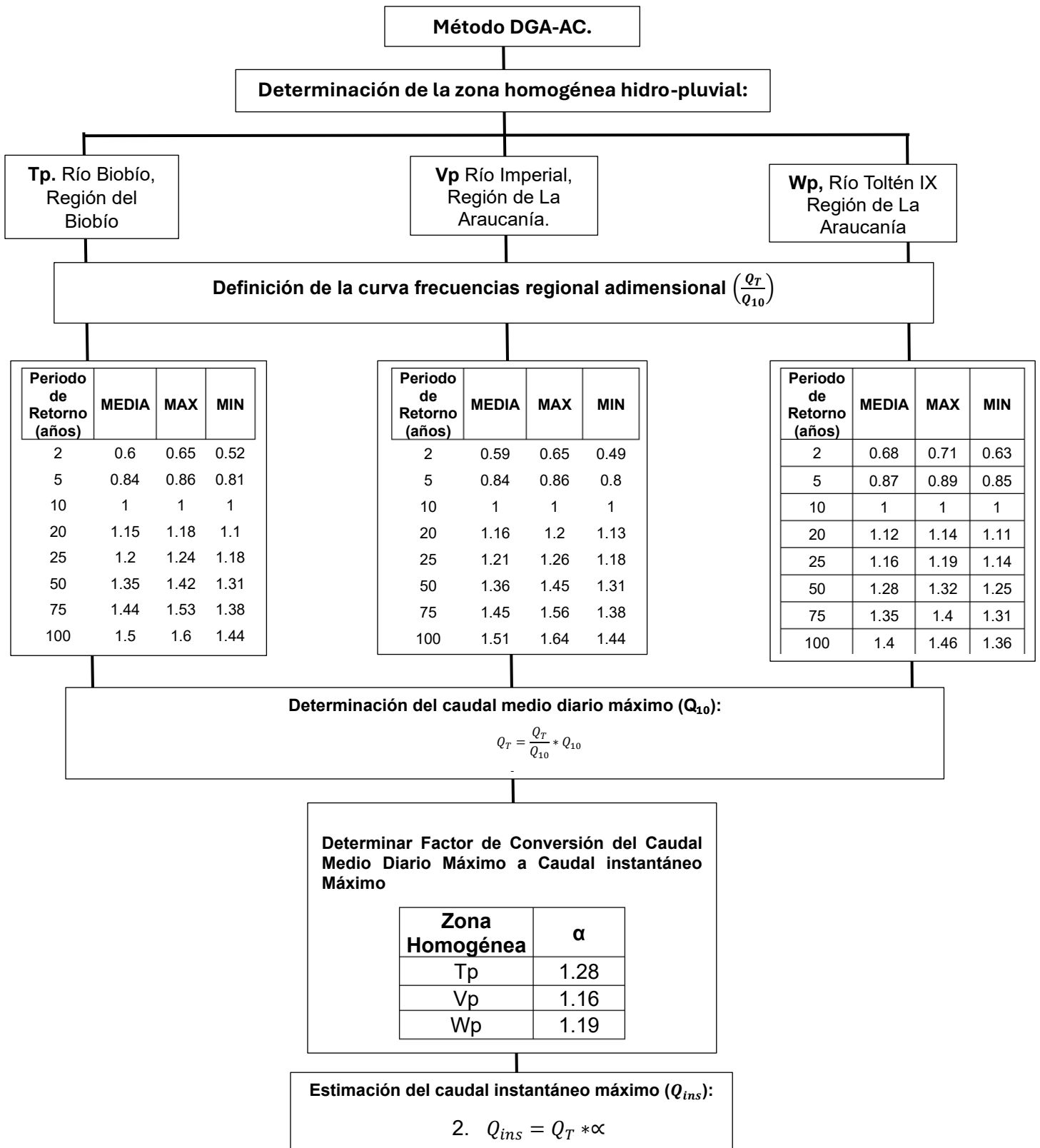


Figura 12 Esquema metodológico del Método DGA-AC aplicado a la estimación de caudales de crecida.

Fuente: Elaboración propia.

Verni y King

El método Verni y King constituye una herramienta empírica desarrollada para estimar el caudal instantáneo máximo en cuencas naturales sin registro fluviométrico, particularmente aplicable en regiones entre la III y la IX del país. Se basa en una relación potencial entre el caudal, la precipitación máxima diaria y el área pluvial, incorporando un coeficiente empírico dependiente del período de retorno. Este coeficiente fue calibrado mediante análisis de frecuencias realizados sobre datos de más de 130 estaciones hidrométricas del país, lo que permitió adaptar la formulación original a las condiciones locales. La expresión general que define este método se presenta en la ecuación 13:

Ecuación 13 método Verni y King.

$$Q = C(T) * 0.00618 * P_{24}^T^{1.24} * A_p^{0.88}$$

En esta fórmula, Q representa el caudal instantáneo máximo (m³/s); C(T) es el coeficiente empírico ajustado al período de retorno T; P_{24}^T corresponde a la precipitación diaria máxima en milímetros (mm) asociada al mismo período; y $A_p^{0.88}$ es el área pluvial de la cuenca. A continuación, se presenta el paso a paso de la aplicación del método:

1. Estimación del tiempo de concentración de la cuenca (t_c):

El tiempo de concentración de la cuenca t_c se estima utilizando la fórmula adoptada en el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica (DGA, 1995), como se presenta en la Ecuación 14:

Ecuación 14 tiempo de concentración.

$$t_c = 0.95 * \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$$

donde L representa la longitud del cauce principal (km) y H la diferencia de altura (m) entre la cabecera y la salida de la cuenca.

2. Determinación del coeficiente de escorrentía para un período de retorno T (C_t):

Este coeficiente expresa la proporción de la precipitación que se transforma en escorrentía superficial. Su valor varía con el período de retorno y se obtiene a partir de la siguiente relación, mediante la expresión 15:

Ecuación 15 coeficiente de escorrentía

$$C_t = C_{10} * \left(\frac{C_T}{C_{10}} \right)$$

donde C_{10} corresponde al coeficiente de escorrentía para 10 años, obtenido según la región o cuenca hidrográfica utilizando los valores de la Tabla 3.26 del Manual DGA (1995), y $\left(\frac{C_T}{C_{10}} \right)$, es la curva de frecuencia regional adimensional (Tabla 3.25 del mismo manual).

3. Estimación de la precipitación máxima diaria en 24 horas para el período de retorno T (P_{24}^T); Este valor se calcula mediante la Ecuación 16.

Ecuación 16 precipitación máxima diaria en 24 horas

$$P_{24}^T = P_{24}^{10} * CFT$$

donde P_{24}^{10} es la precipitación máxima diaria en 24 horas asociada a una probabilidad de no excedencia de 0.90, obtenida mediante análisis estadístico de estaciones pluviométricas cercanas; y CFT es el coeficiente de frecuencia de la cuenca, extraído de las Tablas 2.3 del Manual DGA (1995).

Con la aplicación del método Verni y King se obtiene el caudal instantáneo máximo para distintos períodos de retorno, integrando las características morfométricas y pluviométricas de cada cuenca. Este procedimiento complementa a lo propuesto por el manual al considerar un coeficiente ajustable al período de retorno, lo que permite reflejar mejor la variabilidad hidrológica.

A continuación, se presenta la Fórmula Racional, otro de los métodos propuestos por la DGA (1995) para estimar caudales máximos de diseño.

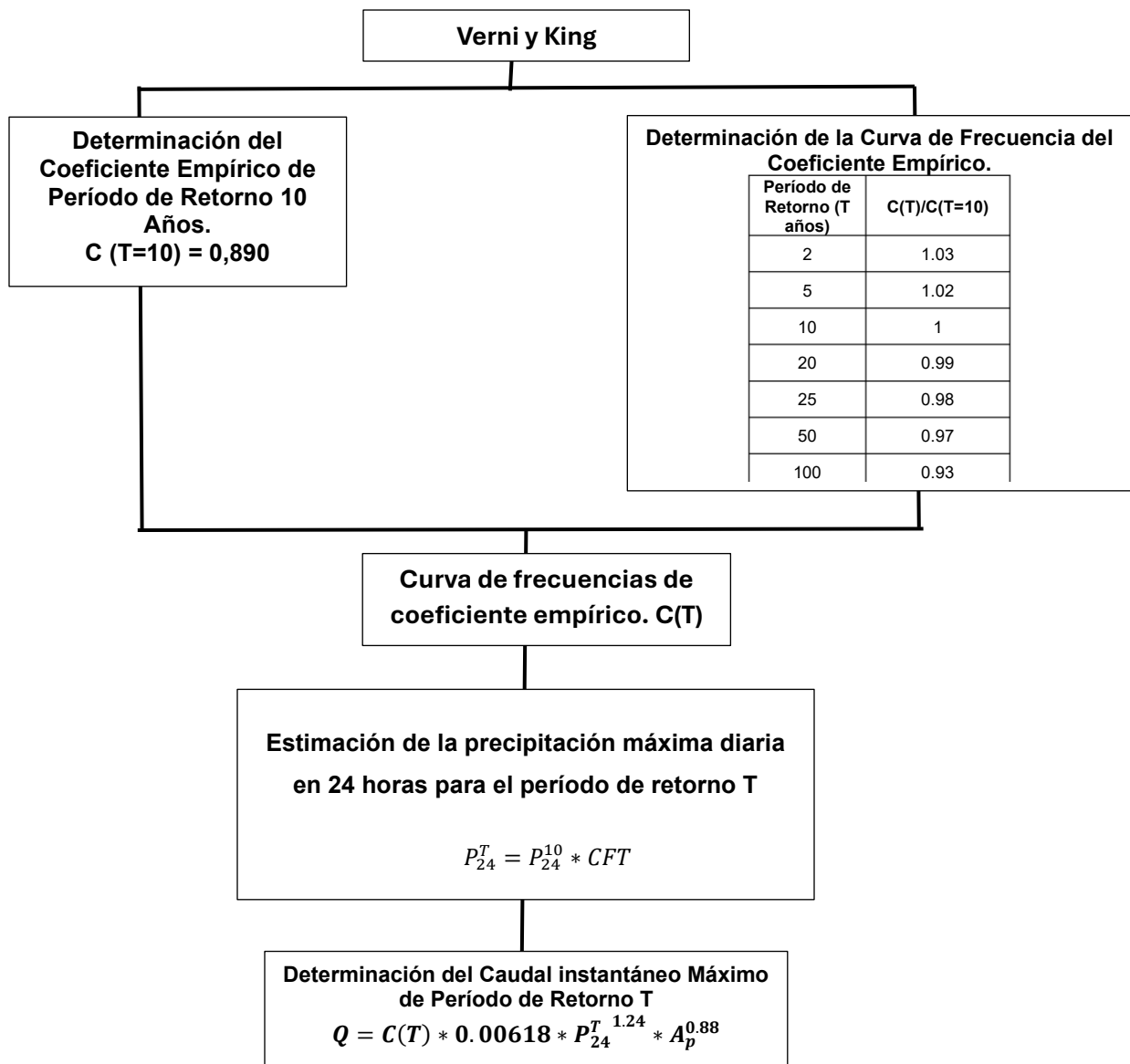


Figura 13 Esquema del procedimiento para la estimación de caudales mediante el Método Verni y King.

Fuente: Elaboración propia.

Fórmula Racional.

La Fórmula Racional es un método clásico de la hidrología que permite estimar caudales máximos instantáneos en cuencas pequeñas o medianas sin aforo. Se basa en la relación directa entre la intensidad de la lluvia, el área de aporte y un coeficiente que representa la respuesta de la cuenca ante un evento de precipitación.

En Chile, este método fue adaptado por la Dirección General de Aguas (DGA, 1995) para su aplicación en contextos naturales, ajustando sus parámetros a las condiciones hidrológicas locales. Su formulación se expresa mediante la siguiente Ecuación 17:

Ecuación 17 Fórmula Racional

$$Q = \frac{C * I * A}{3.6}$$

C es el coeficiente de escorrentía correspondiente al mismo período de retorno; i es la intensidad media de lluvia, en milímetros por hora (mm/h), calculada para un período de retorno T y una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca; y A corresponde al área pluvial aportante de la cuenca, expresada en kilómetros cuadrados (km²). A continuación, se presenta la determinación de los coeficientes contenido en la Formula 17.

A continuación, se presentan los pasos para la aplicación de este método según el procedimiento establecido por la DGA (1995).

1. Ajuste del coeficiente de escorrentía (C_t):

El coeficiente de escorrentía representa la fracción de precipitación que escurre superficialmente y depende del período de retorno T, de las condiciones del terreno y de la cobertura del suelo.

Se obtiene mediante la Ecuación 18:

Ecuación 18 coeficiente de escorrentía

$$C_t = C_{10} * \left(\frac{C_T}{C_{10}} \right)$$

donde C_{10} es el coeficiente de escurrimiento para $T = 10$ años (tomado de la Tabla 3.27 del Manual DGA, 1995), y $\frac{C_T}{C_{10}}$ es la curva de frecuencias regional adimensional, identificada según la cuenca o región hidrográfica correspondiente (Tabla 3.25 del mismo manual).

2. Estimación de la precipitación máxima diaria en 24 horas (P_{24}^T):

La precipitación máxima diaria para un período de retorno T se determina a partir de la ecuación 19:

Ecuación 19 precipitación máxima diaria en 24 horas

$$P_{24}^T = P_{24}^{10} * CFT * CD$$

La precipitación máxima diaria con probabilidad de no excedencia 0,90 (P_{24}^{10}) se obtiene mediante el análisis estadístico de estaciones pluviométricas cercanas al área de estudio. Este valor se ajusta utilizando el coeficiente de frecuencia de la cuenca (CFT), extraído de la Tabla 2.2 del *Manual DGA (1995)*, y el coeficiente de duración (CD), correspondiente al tiempo de concentración y a la región hidrográfica específica, según la Tabla 2.3 del mismo manual.

3. Determinación del tiempo de concentración (t_c):

El tiempo de concentración corresponde al período que demora el escurrimiento en recorrer la cuenca desde el punto más alejado hasta la salida.

Se calcula utilizando la ecuación empírica recomendada por la DGA (1995) Ecuación 20:

Ecuación 20 tiempo de concentración

$$t_c = 0.95 * \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$$

donde L es la longitud del cauce principal (km) y H la diferencia de altura (m) entre la cabecera y la salida.

4. Cálculo de la intensidad media de precipitación (I):

La intensidad se obtiene como la relación entre la precipitación acumulada en 24 horas y el tiempo de concentración de la cuenca, según la ecuación 21.

Ecuación 21 intensidad media de precipitación

$$I = \frac{P_{24}^T}{t_c}$$

Este valor permite representar la intensidad media de lluvia constante durante el tiempo en que la cuenca responde completamente al evento.

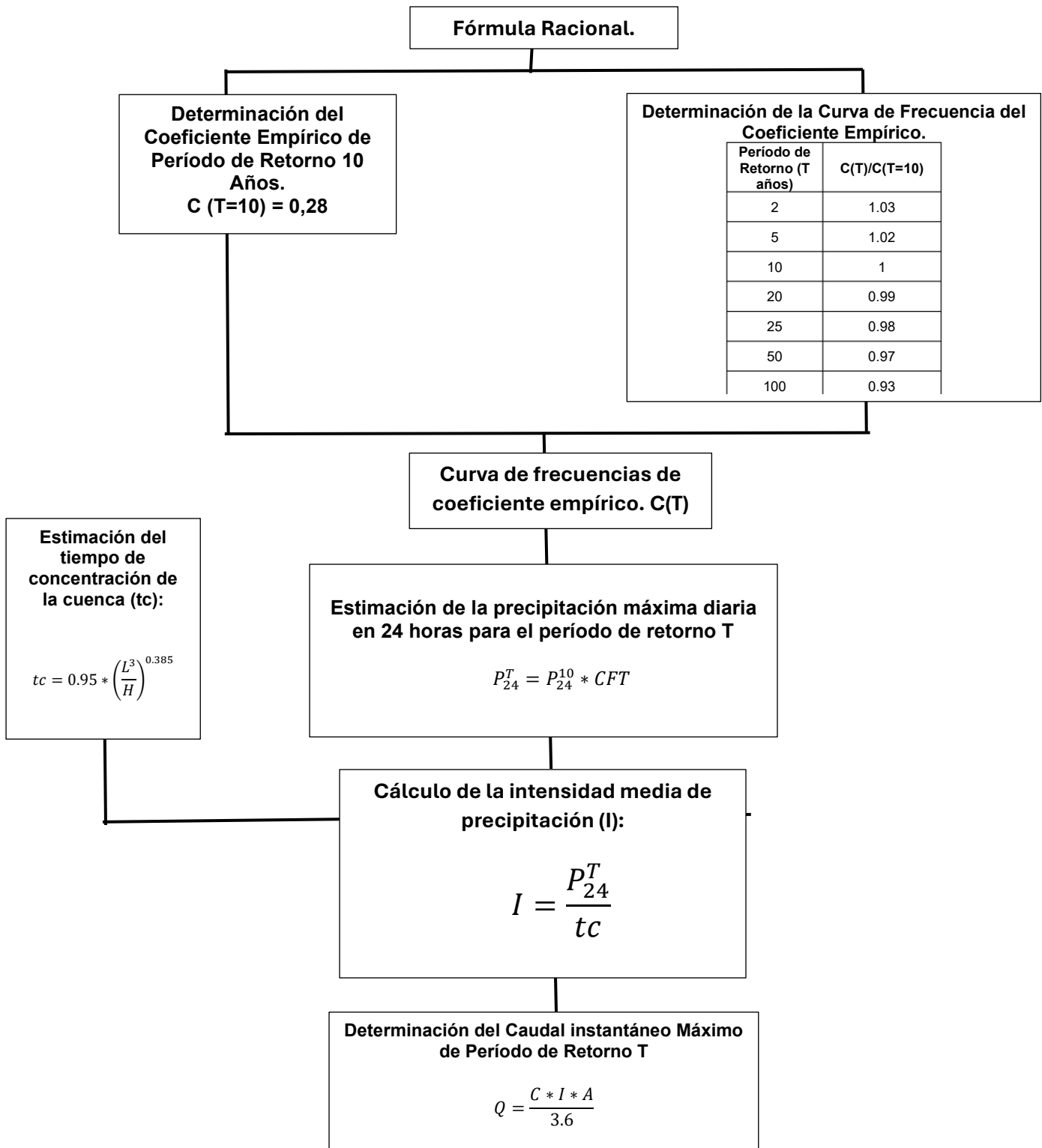


Figura 14 Esquema del procedimiento del Método de la Fórmula Racional para la estimación de caudales instantáneos máximos.

CAPÍTULO IV: Resultados de la investigación.

4.1. Método directo.

La Tabla 9 presenta los resultados del ajuste de distribuciones de probabilidad aplicadas a los registros de caudales máximos anuales mediante el método directo. En cada estación fluviométrica se indica la distribución que obtiene el mejor ajuste estadístico, definido como la menor diferencia entre la distribución teórica y los datos observados. Este criterio permite identificar la distribución que mejor representa el comportamiento extremo del caudal en cada punto de control.

La columna “Mejor Ajuste” señala la distribución de probabilidad más representativa para cada estación, determinada a partir de la comparación de las bandas de ajuste evaluadas.

Tabla 9. Distribuciones de probabilidad con mejor ajuste por estación fluviométrica.

| Estación DGA | Mejor Ajuste | Estación DGA | Mejor Ajuste |
|---|---------------------|------------------------------------|---------------------|
| Río Lonquimay antes junta Río Biobío | Pearson | Río Cautín en Cajón | Gumbel |
| Río Renaico en Longitudinal | Gamma | Río Quepe en Vilcún | Normal |
| Río Mininco en Longitudinal | Gumbel | Río Huichahue en Faja 24000 | Pearson |
| Río Malleco en Collipulli | Log Normal | Río Quepe en Quepe | Gamma |
| Río Vergara en Tijeral | Pearson | Río Cautín en Almagro | Normal |

| | | | |
|------------------------------------|---------|---|---------|
| Río Purén en Tranamán | Gamma | Río Allipén en Melipeuco | Pearson |
| Río Lumaco en Lumaco | Pearson | Río Allipén en Los Laureles | Normal |
| Río Traiguén en Victoria | Gumbel | Río Trancura en Curarrehue | Normal |
| Río Dumo en Santa Ana | Pearson | Río Trancura antes de Río Llafenco | Normal |
| Río Quino en Longitudinal | Gamma | Río Liucura en Liucura | Pearson |
| Estero Chufquén en Chufquén | Gamma | Río Toltén en Villarrica | Gamma |
| Río Quillén en Galvarino | Gamma | Río Toltén en Coipúe | Gamma |
| Río Cholchol en Cholchol | Gamma | Río Puyehue en Quitratúe | Gamma |
| Río Blanco en Curacautín | Gumbel | Río Donguil en Gorbea | Pearson |
| Río Cautín en Rariruca | Normal | Río Mahuidanche en Santa Ana | Pearson |
| Río Muco en Puente Muco | Pearson | Río Toltén en Teodoro Schmidt | Pearson |

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Dirección General de Aguas (DGA), Informe Nacional Estaciones DGA.

En la mayoría de las estaciones, la distribución que presenta el mejor ajuste corresponde a Pearson Tipo III (34,4 %), seguida de cerca por la Gamma (31,3 %). En conjunto, ambas representan casi dos tercios de los casos, lo que evidencia su capacidad para capturar con precisión el comportamiento de los eventos extremos en la región. La Normal se ajusta en el 18,8 % de las estaciones, mientras que la Gumbel, aunque es una de las

más utilizadas en hidrología, aparece en un 12,5 %. Finalmente, la Log-Normal resulta adecuada solo en un caso puntual (3,1 %).

En síntesis, los resultados confirman lo señalado en la literatura: Pearson III y Gamma constituyen las distribuciones más confiables para representar fenómenos extremos en contextos de alta variabilidad hidrológica, mientras que las demás se consideran alternativas válidas en situaciones específicas.

4.2. Estimación régimen fluvial.

La Tabla 10 presenta la distribución de probabilidad que obtiene el mejor ajuste a los caudales mensuales entre los modelos evaluados (Gumbel, Log-Pearson III, Normal, Log-Normal y Gamma), junto con la estadística de bondad de ajuste que respalda su selección. La Figura 15 muestra las curvas de régimen fluvial para probabilidades de no falla entre 0,05 y 0,95, lo que permite apreciar la concentración de los mayores caudales durante el otoño. El detalle completo de las tablas y figuras correspondientes a otras estaciones se incluye en el Anexo A.

Tabla 10 Resultados del ajuste de distribuciones de probabilidad en caudales máximos mensuales.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|---------------|-------------------------|------------------------|
| Abril | 0.094 | Gumbel |
| Mayo | 0.103 | Log Normal |
| Junio | 0.105 | Log Normal |
| Julio | 0.092 | Gumbel |
| Agosto | 0.072 | Normal |

| | | |
|-------------------|-------|---------|
| Septiembre | 0.062 | Pearson |
| Octubre | 0.116 | Normal |
| Noviembre | 0.071 | Gumbel |
| Diciembre | 0.068 | Gamma |
| Enero | 0.085 | Gamma |
| Febrero | 0.093 | Gumbel |
| Marzo | 0.08 | Pearson |

Fuente: Elaboración propia.

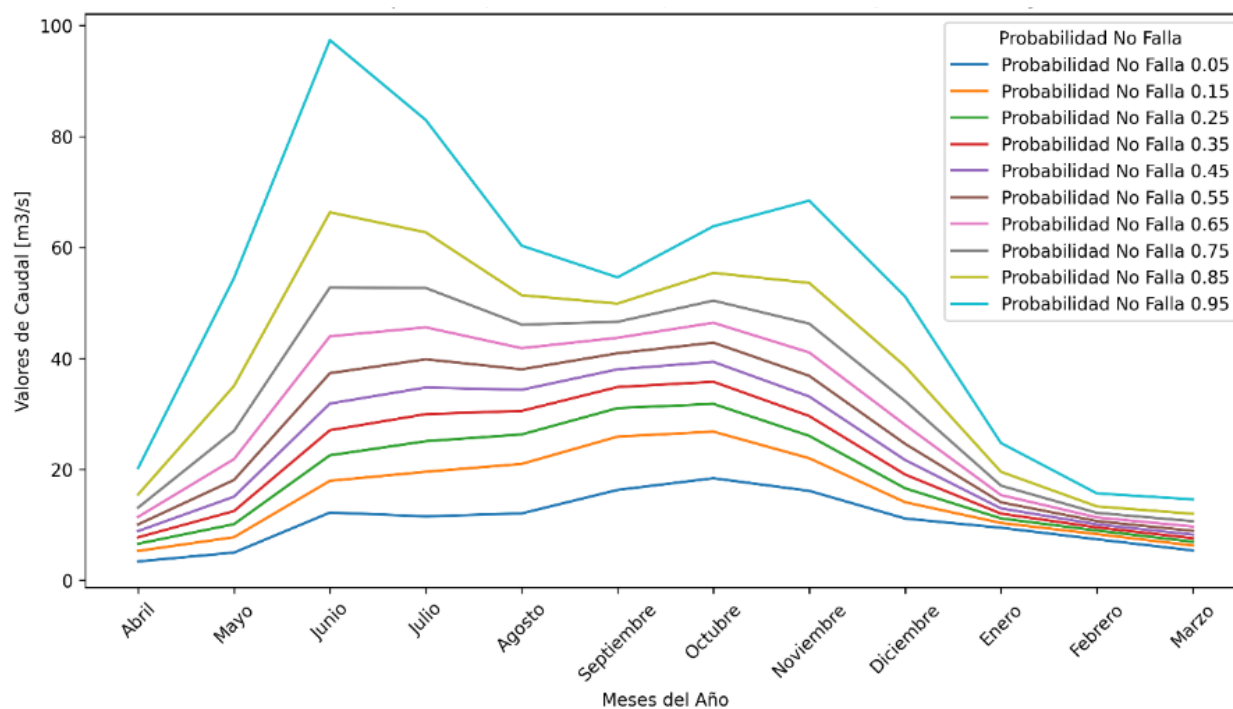


Figura 15 Curvas de régimen fluvial del río Lonquimay antes de su confluencia con el río Biobío, para probabilidades de no falla mensuales.

La Tabla 11 presenta la clasificación del régimen fluvial para 32 estaciones de la Región de La Araucanía, identificadas por su código BNA, nombre de estación y tipo de régimen. Del total, un 35 % corresponde a un régimen pluvial, donde la variabilidad del caudal depende principalmente de las precipitaciones, mientras que el 65 % restante exhibe un régimen pluvial-nival, en el que el deshielo contribuye de manera secundaria al caudal. Estas estaciones se ubican entre las latitudes 37°43'55" S y 39°21'51" S, y las longitudes 71°15'58" W y 73°04'58" W.

Tabla 11 Estaciones fluviométricas y su clasificación de régimen hidrológico.

| Código BNA. | Estación. | Régimen. | Código BNA. | Estación. | Régimen. |
|--------------------|---|-----------------|--------------------|---|-----------------|
| 8304001 | Río Lonquimay antes junta Río Bío-Bío. | Pluvial-Nival | 09129002 | Río Cautín en Cajon. | Pluvial-Nival |
| 08342001 | Río Renaico en longitudinal. | Pluvial | 09131001 | Río Quepe en Vilcun. | Pluvial-Nival |
| 08343001 | Río Mininco en longitudinal. | Pluvial | 09134001 | Río Huichahue en faja 24000. | Pluvial-Nival |
| 08351001 | Río Malleco en Collipulli. | Pluvial-Nival | 09135001 | Río Quepe en Quepe. | Pluvial-Nival |
| 08358001 | Río Vergara en Tijeral. | Pluvial | 09140001 | Río Cautín en Almagro. | Pluvial-Nival |
| 09101001 | Río Purén en Tranaman. | Pluvial | 09402001 | Río Allipén en Melipeuco. | Pluvial-Nival |
| 09102001 | Río Lumaco en Lumaco. | Pluvial | 09404001 | Río Allipén en los Laureles. | Pluvial-Nival |
| 09104001 | Río Traiguén en Victoria. | Pluvial-Nival | 9412001 | Río Trancura en Curarrehue. | Pluvial-Nival |
| 09104002 | Río Dumo en Santa Ana. | Pluvial-Nival | 09414001 | Río Trancura antes Río Llafenco. | Pluvial-Nival |
| 09106001 | Río Quino en longitudinal. | Pluvial-Nival | 09416001 | Río Liucura en Liucura. | Pluvial-Nival |
| 09107001 | Estero Chufquen en Chufquen. | Pluvial | 09420001 | Río Toltén en Villarrica. | Pluvial-Nival |

| | | | | | |
|-----------------|----------------------------------|-------------------|-----------------|---------------------------------------|-------------------|
| 09113001 | Río Quillen en Galvarino. | Pluvial | 09423001 | Río Toltén en Coipue. | Pluvial- Nival |
| 09116001 | Río Cholchol en Cholchol. | Pluvial | 09433001 | Río Puyehue en Quitratue. | Pluvial |
| 09122002 | Río Blanco en Curacautín. | Pluvial- Nival | 09434001 | Río Donguil en Gorbea. | Pluvial |
| 09123001 | Río Cautín en Rari-Ruca. | Pluvial- Nival | 09436001 | Río Mahuidanche en Santa Ana. | Pluvial |
| 09127001 | Río Muco en puente Muco. | Pluvial- Nival | 09437002 | Río Toltén en Teodoro Schmidt. | Pluvial- Nival |

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Dirección General de Aguas (DGA).

La revisión de las estaciones fluviométricas incluidas en el estudio evidencia una cobertura geográfica representativa en la Región de La Araucanía y una marcada diversidad de regímenes hidrológicos. Una parte importante corresponde a regímenes pluvio-nivales, donde los caudales están influenciados tanto por las precipitaciones como por el deshielo, condición característica de los sectores cordilleranos. En contraste, varias estaciones presentan un régimen pluvial, predominante en zonas bajas o costeras, donde las lluvias constituyen la principal fuente de escorrentía. Esta variabilidad evidencia que cada cuenca responde de manera particular a los eventos meteorológicos. Para un análisis más detallado, se recomienda consultar el Anexo A.

4.3. Método Indirecto.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación del método indirecto de estimación de crecidas en las cuencas seleccionadas. Para cada caso se incluye una figura georreferenciada Figura 16 que muestra la delimitación de la cuenca y la distribución de los polígonos de Thiessen contruidos a partir de las estaciones meteorológicas disponibles. Esta representación permite visualizar las áreas de influencia de cada estación y validar la cobertura espacial considerada en el cálculo de la Precipitación Media Areal (PMA).

Para un análisis complementario, el Anexo B presenta los resultados completos del método de polígonos de Thiessen, junto con una tabla resumen que indica el aporte de cada estación al cálculo de la PMA en cada cuenca.

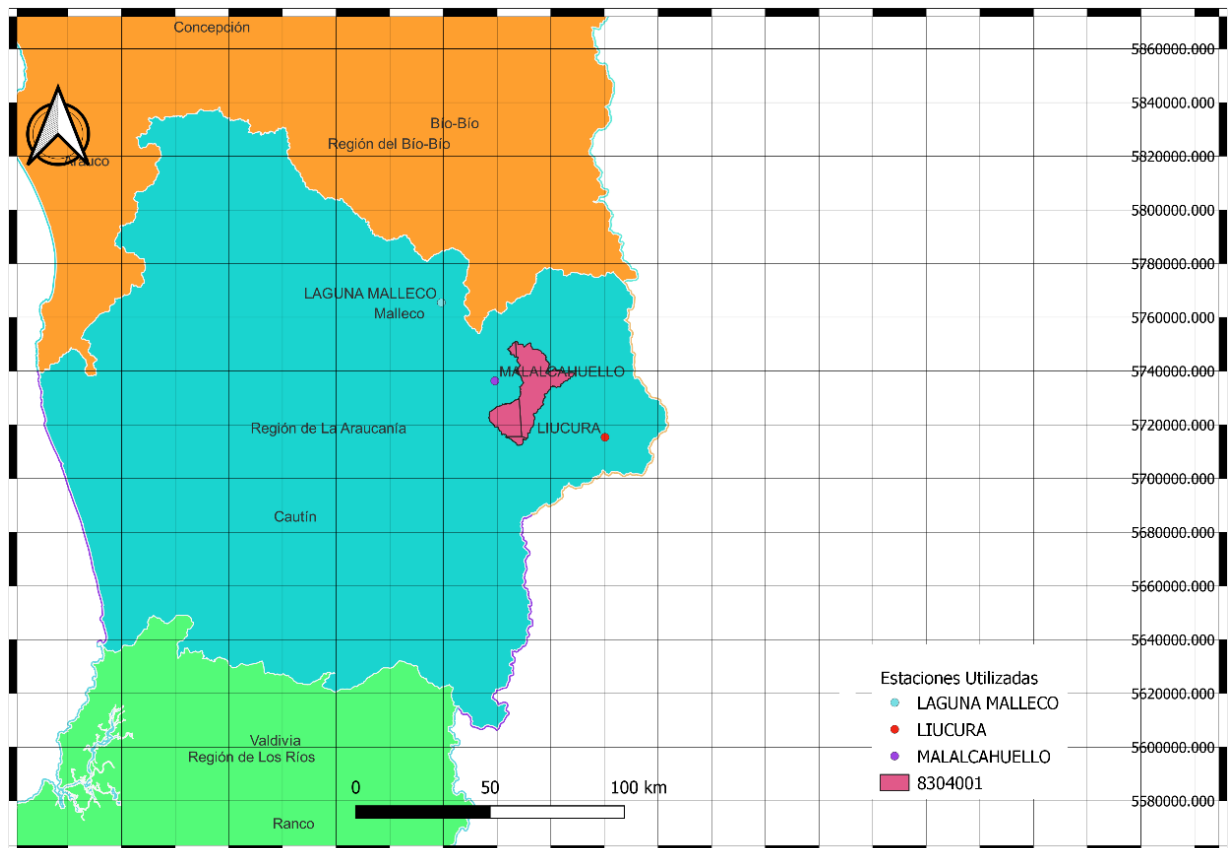


Figura 16 Delimitación de la cuenca del río Cautín en Almagro y localización de estaciones meteorológicas utilizadas para el método de polígonos de Thiessen. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12 Áreas de influencia y ponderación de estaciones fluviométricas para el cálculo de la PMA.

| Código BNA | Área km ² | Ponderación |
|------------|----------------------|-------------|
| 9416002 | 322.99 | 0.692115535 |

| | | |
|----------------|----------|-------------|
| 9412002 | 130.2972 | 0.279205838 |
| 9412003 | 13.38347 | 0.028678628 |
| Total. | 466.671 | — |

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Google earth.

La Tabla 13 presenta el aporte de área total de cada una de las estaciones meteorológicas asociadas al análisis de este estudio. Esta información se determina a partir del proceso de delimitación hidrológica de cada cuenca, utilizando modelos digitales de elevación y herramientas SIG, y representa la superficie efectiva de aporte hídrico hacia cada punto de control. El área de cuenca constituye un parámetro fundamental dentro del método indirecto, ya que interviene directamente en la estimación de caudales mediante el método contenido en el Manual de Cálculo de Crecidas para Estaciones sin Información Fluviométrica (DGA, 1995).

Tabla 13 Áreas de drenaje asociadas a las estaciones fluviométricas consideradas en el estudio km².

| Código BNA | Nombre de Estación DGA | Área total (km²) |
|-------------------|---|------------------------------------|
| 8304001 | Río Lonquimay antes junta Río Bio-Bio. | 466.135 |
| 8343001 | Río Mininco en longitudinal. | 440.282 |
| 8351001 | Río Malleco en Collipulli. | 413.141 |
| 8358001 | Río Vergara en Tijeral. | 2513.209 |

| | | |
|----------------|---|----------|
| 9101001 | Río Purén en Tranaman. | 341.502 |
| 9102001 | Río Lumaco en Lumaco. | 851.558 |
| 9104001 | Río Traiguén en Victoria. | 84.526 |
| 9104002 | Río Dumo en Santa Ana. | 412.126 |
| 9106001 | Río Quino en longitudinal. | 290.305 |
| 9107001 | Estero Chufquen en Chufquen. | 844.795 |
| 9113001 | Río Quillen en Galvarino. | 724.726 |
| 9116001 | Río Cholchol en Cholchol. | 5494.257 |
| 9122002 | Río Blanco en Curacautín. | 183.457 |
| 9123001 | Río Cautin en Rari-Ruca. | 1307.15 |
| 9127001 | Río Muco en puente Muco. | 649.867 |
| 9129002 | Río Cautín en Cajon. | 2794.622 |
| 9131001 | Río Quepe en Vilcun. | 376.728 |
| 9134001 | Río Huichahue en faja 24000. | 347.11 |
| 9135001 | Río Quepe en Quepe. | 1667.613 |
| 9140001 | Río Cautín en Almagro. | 5540.25 |
| 9402001 | Río Allipén en Melipeuco. | 819.353 |
| 9404001 | Río Allipén en los Laureles. | 1642.551 |
| 9412001 | Río Trancura en Curarrehue. | 362.73 |
| 9414001 | Río Trancura antes Río Llafenco. | 1407.171 |
| 9416001 | Río Liucura en Liucura. | 348.809 |

| | | |
|----------------|---------------------------------------|----------|
| 9420001 | Río Toltén en Villarrica. | 2945.932 |
| 9423001 | Río Toltén en Coipue. | 3489.339 |
| 9433001 | Río Puyehue en Quitratue. | 152.355 |
| 9434001 | Río Donguil en Gorbea. | 773.597 |
| 9436001 | Río Mahuidanche en Santa Ana. | 383.698 |
| 9437002 | Río Toltén en Teodoro Schmidt. | 7910.56 |

Fuente: Elaboración propia mediante cálculos realizados con apoyo de software de análisis espacial (Global Mapper y Google Earth).

El análisis de las áreas aportantes evidencia una marcada variabilidad en la extensión de las cuencas, que abarca desde superficies reducidas, como la de la estación Río Traiguén en Victoria (84,5 km²), hasta grandes cuencas como la del Río Toltén en Teodoro Schmidt, que supera los 7.900 km². Esta diferencia refleja la diversidad geomorfológica de la región y la necesidad de ajustar los modelos hidrológicos a las condiciones particulares de cada unidad territorial. En general, las cuencas más extensas concentran mayores volúmenes de escorrentía, lo que influye directamente en los caudales estimados.

La Tabla 14 resume los resultados obtenidos mediante la aplicación del método indirecto de estimación de crecidas, siguiendo los lineamientos de la Dirección General de Aguas (DGA, 1995). El análisis se desarrolla de manera individual para cada cuenca, utilizando como insumo principal las series anuales de precipitación máxima en 24 horas, registradas en estaciones meteorológicas con al menos 20 años de observaciones continuas.

Para cada estación se determina la distribución de probabilidad con mejor ajuste a la serie de precipitaciones extremas, mediante la comparación entre la función empírica de Weibull y las curvas teóricas correspondientes. Con la distribución seleccionada se estima el valor asociado al percentil 90, expresado como la precipitación máxima diaria de período de retorno de 10 años (P_{24}^{10}). Este valor se transforma posteriormente en

caudales (m^3/s) mediante las ecuaciones regionales por bandas de ajuste definidas en el Manual de Cálculo de Crecidas para Estaciones sin Información Fluviométrica

- Código DGA, correspondiente a su identificación oficial.
- Nombre de la estación meteorológica asociada.
- Años utilizados en el análisis y cantidad de registros válidos.
- Distribución de probabilidad con mejor ajuste a los datos (según la comparación con la función empírica de Weibull).
- Precipitación diaria máxima de período de retorno de 10 años (P_{24}^{10} mm).

Tabla 14 Resultados de caudales máximos anuales y precipitación diaria máxima de período de retorno de 10 años (P_{24}^{10}) en mm, con mejor ajuste por estación.

| Código DGA | Nombre de Estación DGA | Cantidad años | Mejor ajuste | P_{24}^{10} (mm) |
|-------------------|---|----------------------|---------------------|--|
| 8304001 | Río Lonquimay antes junta Río Bio-bío. | 31 | Pearson | 126.013 |
| 8342001 | Río Renaico en Longitudinal. | 34 | Gamma | 95.293 |
| 8343001 | Río Mininco en Longitudinal. | 34 | Log Normal | 146.883 |
| 8351001 | Río Malleco en Collipulli. | 31 | Gumbel | 108.057 |
| 8358001 | Río Vergara en Tijeral. | 26 | Gumbel | 92.105 |
| 9101001 | Río Purén en Tranamán. | 74 | Gumbel | 83.823 |
| 9102001 | Río Lumaco en Lumaco. | 34 | Pearson | 80.808 |

| | | | | |
|----------------|--------------------------------------|----|---------------|---------|
| 9104001 | Río Traiguén en Victoria. | 52 | Gumbel | 101.416 |
| 9104002 | Río Dumo en Santa Ana. | 24 | Pearson | 114.627 |
| 9106001 | Río Quino en Longitudinal. | 31 | Log Normal | 125.256 |
| 9107001 | Estero Chufquén en Chufquén. | 36 | Gumbel | 91.013 |
| 9113001 | Río Quillén en Galvarino. | 36 | Gumbel | 75.162 |
| 9116001 | Río Cholchol en Cholchol. | 24 | Pearson | 78.216 |
| 9122002 | Río Blanco en Curacautín. | 30 | Log Normal | 117.347 |
| 9123001 | Río Cautín en Rari-Ruca. | 26 | Pearson | 124.488 |
| 9127001 | Río Muco en Puente Muco. | 30 | Gumbel | 72.74 |
| 9129002 | Río Cautín en Cajón. | 31 | Gumbel | 90.052 |
| 9131001 | Río Quepe en Vilcún. | 31 | Log Normal | 102.499 |
| 9134001 | Río Huichahue en Faja 24.000. | 34 | Normal | 100.58 |
| 9135001 | Río Quepe en Quepe. | 34 | Gumbel | 101.997 |
| 9140001 | Río Cautín en Almagro. | 35 | Pearson | 94.693 |
| 9402001 | Río Allipén en Melipeuco. | 34 | Gamma | 116.465 |

| | | | | |
|----------------|---|----|---------------|---------|
| 9404001 | Río Allipén en Los Laureles. | 26 | Gumbel | 149.564 |
| 9412001 | Río Trancura en Curarrehue. | 35 | Log Normal | 138.04 |
| 9414001 | Río Trancura antes Río Llafenco. | 36 | Pearson | 149.879 |
| 9416001 | Río Liucura en Liucura. | 26 | Gumbel | 144.761 |
| 9420001 | Río Toltén en Villarrica. | 33 | Normal | 122.457 |
| 9423001 | Río Toltén en Coipue. | 33 | Log Normal | 129.088 |
| 9433001 | Río Puyehue en Quitratúe. | 61 | Log Normal | 135.159 |
| 9434001 | Río Donguil en Gorbea. | 29 | Log Normal | 106.817 |
| 9436001 | Río Mahuidanche en Santa Ana. | 29 | Log Normal | 107.232 |
| 9437002 | Río Toltén en Teodoro Schmidt. | 34 | Pearson | 132.957 |

Fuente: Dirección General de Aguas (2025); elaboración propia a partir del ajuste de distribuciones de probabilidad.

El análisis de los registros de 32 estaciones fluviométricas de la Región de La Araucanía permite identificar las distribuciones estadísticas que mejor se ajustan a las series de caudales máximos anuales, con el objetivo de estimar la precipitación diaria máxima asociada a un período de retorno de 10 años (P_{24}^{10}). Este parámetro constituye un elemento clave del método indirecto, ya que actúa como valor de entrada para la aplicación de las tres variantes que lo componen.

Los resultados indican que la distribución Gumbel es la más recurrente, ajustándose en 13 estaciones. Este comportamiento resulta coherente, dado que dicha distribución es efectiva para modelar eventos hidrológicos extremos, como los caudales máximos. En segundo lugar, se identifican las distribuciones Pearson III y Log-Normal, seleccionadas en 9 estaciones cada una, lo que refleja series con alta variabilidad y sesgo positivo moderado, características comunes en registros hidrológicos. En contraste, las distribuciones Normal y Gamma resultan poco representativas, ajustándose únicamente en 2 estaciones cada una, lo que evidencia su limitada capacidad para describir el comportamiento de los datos en la mayoría de los casos.

Respecto de los valores estimados de P_{24}^{10} , se observa una marcada variabilidad espacial, con rangos entre 72,74 mm en la estación Río Muco y 149,88 mm en el Río Trancura antes del Llafenco. Las precipitaciones más intensas se concentran en las cuencas cordilleranas, especialmente en Trancura, Allipén y Liucura, donde los valores superan los 140 mm. En contraste, los menores registros corresponden a sectores interiores y costeros, con precipitaciones inferiores a 85 mm. Esta distribución espacial evidencia la influencia de la altitud y la morfología de la cuenca sobre la magnitud de los eventos extremos.

La Tabla 15 resume las cuencas de interés del estudio, junto con el método de cálculo de crecidas aplicado en cada una. La elección entre los métodos Racional y Verni-King no es aleatoria, sino que se basa en identificar cuál de los tres métodos aplicados entrega la mayor estimación de caudal.

Tabla 15 Método adoptado para la estimación de caudales máximos mediante metodología indirecta en cuencas seleccionadas de la Región de La Araucanía.

| Código cuenca | Nombre | Método adoptado |
|--------------------------|---|----------------------------|
| 8304001 | Río Lonquimay antes junta Río Bio-bío. | Racional |

| | | |
|----------------|-------------------------------------|------------|
| 8342001 | Río Renaico en longitudinal. | Verni King |
| 8343001 | Río Mininco en longitudinal. | Verni King |
| 8351001 | Río Malleco en Collipulli. | Verni King |
| 8358001 | Río Vergara en Tijeral. | Verni King |
| 9101001 | Río Purén en Tranaman. | Racional |
| 9102001 | Río Lumaco en Lumaco. | Verni King |
| 9104001 | Río Traiguén en Victoria. | Verni King |
| 9104002 | Río Dumo en Santa Ana. | Verni King |
| 9106001 | Río Quino en longitudinal. | Verni King |
| 9107001 | Estero Chufquén en Chufquén. | Verni King |
| 9113001 | Río Quillén en Galvarino. | Verni King |
| 9116001 | Río Cholchol en Cholchol. | Verni King |
| 9122002 | Río Blanco en Curacautín. | Racional |
| 9123001 | Río Cautín en Rari-Ruca. | Racional |
| 9127001 | Río Muco en Puente Muco. | Racional |
| 9129002 | Río Cautín en Cajón. | Verni King |
| 9131001 | Río Quepe en Vilcún. | Racional |

| | | |
|----------------|---|------------|
| 9134001 | Río Huichahue en Faja 24.000. | Racional |
| 9135001 | Río Quepe en Quepe. | Verni King |
| 9140001 | Río Cautín en Almagro. | Verni King |
| 9402001 | Río Allipén en Melipeuco. | Racional |
| 9404001 | Río Allipén en Los Laureles. | Verni King |
| 9412001 | Río Trancura en Curarrehue. | Racional |
| 9414001 | Río Trancura antes Río Llafenco. | Racional |
| 9416001 | Río Liucura en Liucura. | Racional |
| 9420001 | Río Toltén en Villarrica. | Verni King |
| 9423001 | Río Toltén en Coipue. | Verni King |
| 9433001 | Río Puyehue en Quitratúe. | Racional |
| 9434001 | Río Donguil en Gorbea. | Verni King |
| 9436001 | Río Mahuidanche en Santa Ana. | Verni King |
| 9437002 | Río Toltén en Teodoro Schmidt. | Verni King |

Fuente: Dirección General de Aguas (Manual de Cálculo de Crecidas en Cuencas sin Información Fluviométrica, 1995); elaboración propia a partir de su aplicación (2025).

Del total de 32 estaciones analizadas en la Región de La Araucanía, 19 aplican el método Verni-King y 12 el método Racional, lo que representa un 61,3 % de preferencia por el

primero. Esta tendencia evidencia una mayor adopción del método Verni-King en la mayoría de las cuencas estudiadas, mientras que el método Racional se utiliza en el 38,7 % de los casos. En conjunto, los resultados reflejan una aplicación diferenciada y estratégica de los métodos según las características hidrológicas y geomorfológicas de cada cuenca.

La Figura 17 presenta la comparación entre los valores estimados mediante el método indirecto y aquellos obtenidos con el método directo para la estación 8304001 (Río Lonquimay antes de la junta con el Río Biobío). El eje horizontal representa los períodos de retorno (en años), mientras que el eje vertical muestra el caudal estimado (m^3/s).

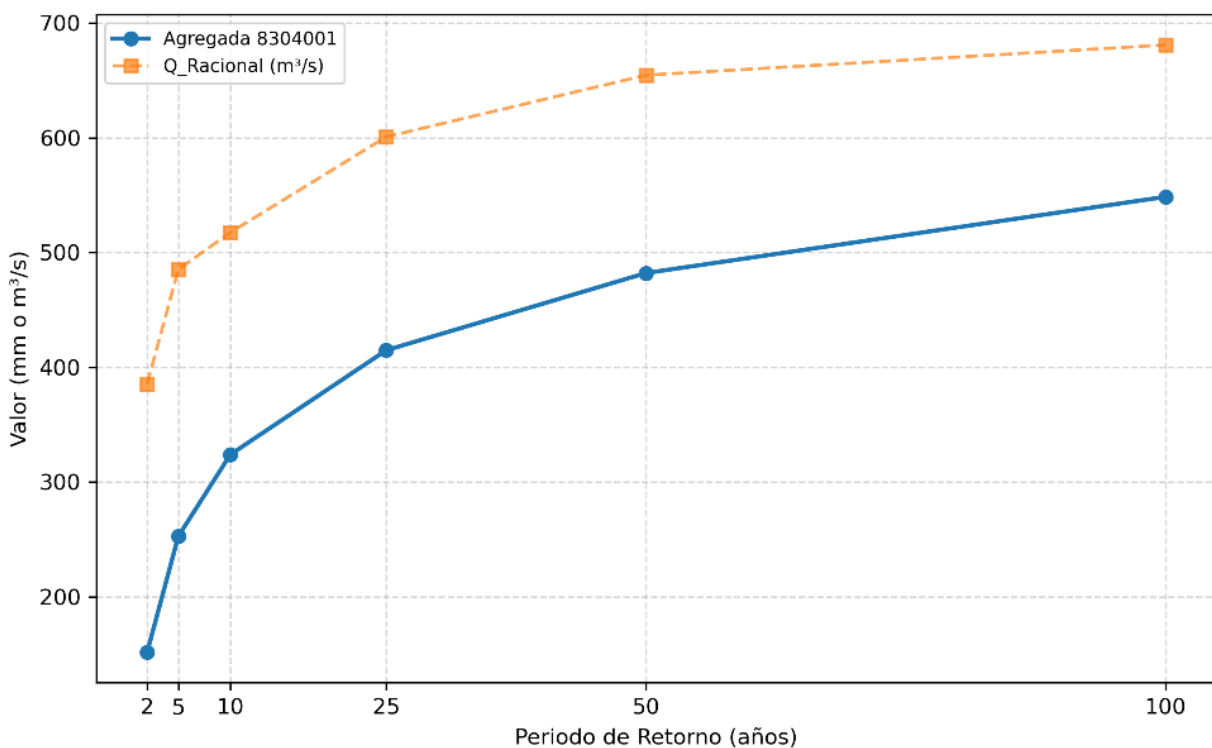


Figura 17 Estimación de caudales máximos mediante metodologías directa e indirecta para la estación 8304001.

Como se observa en la Figura 17, el método indirecto tiende a sobreestimar los caudales en comparación con el método directo, especialmente en los períodos de retorno más bajos. Esta diferencia se mantiene de forma consistente y creciente, lo que evidencia la

necesidad de aplicar coeficientes de reducción al utilizar el método indirecto, con el fin de evitar sobredimensionamientos en la estimación de crecidas.

Para una revisión más completa de las estaciones analizadas, el Anexo C incluye la representación gráfica individual de cada cuenca. Estas curvas permiten observar en detalle la variación de resultados y facilitan la toma de decisiones informadas al momento de seleccionar o ajustar una metodología de estimación.

A continuación, se presentan la Tabla 16 y la Tabla 17, que resumen las diferencias entre los métodos de estimación de crecidas para todas las estaciones incluidas en el estudio. La Tabla 16 muestra la diferencia mínima registrada entre métodos y el período de recurrencia en que ocurre, lo que permite identificar los intervalos en que ambos enfoques presentan mayor concordancia. En cambio, la Tabla 17 recopila la diferencia máxima observada y su correspondiente período de ocurrencia, lo que permite detectar los puntos donde los métodos divergen de forma significativa.

Este contraste entre valores extremos resulta fundamental para evaluar el comportamiento de los métodos en distintos rangos de recurrencia y, sobre todo, para justificar la aplicación de ajustes metodológicos por cuenca, especialmente en escenarios sin registros fluviométricos directos.

Tabla 16 Diferencia mínima entre metodologías directa e indirecta y período asociado en cuencas seleccionadas de la Región de La Araucanía.

| Cuenca | Mínima diferencia (m³/s) | Período |
|---|--|----------------|
| Río Lonquimay antes junta Río Bio-bío. | 132.29 | 100 |
| Río Renaico en Longitudinal. | -200.84 | 2 |
| Río Mininco en Longitudinal. | 231.7 | 2 |

| | | |
|--------------------------------------|--------|-----|
| Río Malleco en Collipulli. | -81.87 | 2 |
| Río Vergara en Tijeral. | 451.44 | 2 |
| Río Purén en Tranamán. | 113.17 | 2 |
| Río Lumaco en Lumaco. | 190.39 | 2 |
| Río Traiguén en Victoria. | 4.94 | 100 |
| Río Dumo en Santa Ana. | 228.53 | 2 |
| Río Quino en Longitudinal. | 69.82 | 2 |
| Estero Chufquén en Chufquén. | 95.89 | 100 |
| Río Quillén en Galvarino. | 57.51 | 10 |
| Río Cholchol en Cholchol. | 652.62 | 2 |
| Río Blanco en Curacautín. | 91.51 | 2 |
| Río Cautín en Rari-Ruca. | 369.92 | 2 |
| Río Muco en Puente Muco. | 16.23 | 10 |
| Río Cautín en Cajón. | -43.29 | 25 |
| Río Quepe en Vilcún. | 62.78 | 10 |
| Río Huichahue en Faja 24.000. | 89.13 | 2 |
| Río Quepe en Quepe. | 2.62 | 10 |

| | | |
|---|---------|----|
| Río Cautín en Almagro. | 131.54 | 2 |
| Río Allipén en Melipeuco. | 479.75 | 2 |
| Río Allipén en Los Laureles. | 340.96 | 2 |
| Río Trancura en Curarrehue. | 187.33 | 2 |
| Río Trancura antes Río Llafenco. | 685.32 | 2 |
| Río Liucura en Liucura. | 126.34 | 10 |
| Río Toltén en Villarrica. | 914.14 | 2 |
| Río Toltén en Coipue. | 1098.21 | 2 |
| Río Puyehue en Quitratúe. | 116.48 | 2 |
| Río Donguil en Gorbea. | 205.67 | 2 |
| Río Mahuidanche en Santa Ana. | 103.39 | 2 |
| Río Toltén en Teodoro Schmidt. | 1554.76 | 2 |

*Fuente: Dirección General de Aguas (registros hidrológicos, 2025);
elaboración propia a partir de la comparación entre metodologías
directa e indirecta.*

Tabla 17. Diferencia máxima entre metodologías directa e indirecta y período asociado en cuencas seleccionadas de la Región de La Araucanía.

| Cuenca | Máxima diferencia (m³/s) | Período máx. |
|---------------|---|-------------------------|
|---------------|---|-------------------------|

| | | |
|--|----------|-----|
| Río Lonquimay antes junta Río Biobío. | 233.64 | 2 |
| Río Renaico en Longitudinal. | -597.04 | 100 |
| Río Mininco en Longitudinal. | 343.21 | 50 |
| Río Malleco en Collipulli. | -2037.14 | 100 |
| Río Vergara en Tijeral. | 755.23 | 100 |
| Río Purén en Tranamán. | 217.39 | 100 |
| Río Lumaco en Lumaco. | 297.2 | 100 |
| Río Traiguén en Victoria. | 16.09 | 2 |
| Río Dumo en Santa Ana. | 502.48 | 100 |
| Río Quino en Longitudinal. | 112.26 | 50 |
| Estero Chufquén en Chufquén. | 141.32 | 2 |
| Río Quillén en Galvarino. | 86.19 | 2 |
| Río Cholchol en Cholchol. | 1629.48 | 100 |
| Río Blanco en Curacautín. | 134.75 | 50 |
| Río Cautín en Rari-Ruca. | 744.62 | 100 |
| Río Muco en Puente Muco. | 38.96 | 50 |

| | | |
|---|---------|-----|
| Río Cautín en Cajón. | -167.66 | 100 |
| Río Quepe en Vilcún. | 96.03 | 50 |
| Río Huichahue en Faja 24.000. | 135.97 | 50 |
| Río Quepe en Quepe. | 118.87 | 2 |
| Río Cautín en Almagro. | 876.42 | 100 |
| Río Allipén en Melipeuco. | 773.7 | 100 |
| Río Allipén en Los Laureles. | 1029.81 | 100 |
| Río Trancura en Curarrehue. | 317.39 | 100 |
| Río Trancura antes Río Llafenco. | 1254.99 | 100 |
| Río Liucura en Liucura. | 177.62 | 50 |
| Río Toltén en Villarrica. | 2277.77 | 100 |
| Río Toltén en Coipue. | 2627.6 | 100 |
| Río Puyehue en Quitratúe. | 210.46 | 100 |
| Río Donguil en Gorbea. | 458.57 | 100 |
| Río Mahuidanche en Santa Ana. | 242.94 | 100 |
| Río Toltén en Teodoro Schmidt. | 3460.48 | 100 |

Fuente: Dirección General de Aguas (registros hidrológicos, 2025); elaboración propia a partir de la comparación entre metodologías directa e indirecta.

El análisis conjunto de las diferencias mínimas y máximas entre los métodos de estimación de crecidas revela patrones consistentes que respaldan la necesidad de generar coeficientes de ajuste diferenciados por cuenca y período de recurrencia. En la mayoría de los casos (90 %), las diferencias mínimas se concentran en el período de 2 años, lo que indica que los desajustes más frecuentes ocurren en eventos de baja recurrencia, es decir, en crecidas comunes, pero igualmente relevantes para el diseño y la calibración de modelos hidrológicos.

Por su parte, el análisis de las diferencias máximas muestra que el 93,5 % de las estaciones presenta su mayor discrepancia en el período de 100 años, lo que evidencia que los eventos extremos también están sujetos a desviaciones significativas entre métodos, siendo estas más críticas por su impacto en obras de gran envergadura. Algunas estaciones registran sobreestimaciones superiores a 1.000 m³/s, y en casos extremos, como el Río Toltén en Teodoro Schmidt, se alcanzan diferencias de hasta 3.460 m³/s, lo que podría generar diseños sobredimensionados si no se aplican correcciones adecuadas.

En conjunto, los resultados demuestran que los métodos indirectos presentan un comportamiento variable según la recurrencia y el tipo de cuenca, por lo que no es posible aplicar un ajuste único. La implementación de coeficientes de ajuste calibrados por período y cuenca permite mejorar la coherencia entre estimaciones, reducir la variabilidad entre métodos y garantizar decisiones de diseño hidráulico más confiables, especialmente en contextos sin información fluviométrica directa.

4.4. Determinación de coeficientes de ajuste.

La Tabla 18 compara los caudales estimados mediante los métodos directo e indirecto para distintas cuencas de la región. Más allá de los valores individuales, resulta relevante analizar la variación en las estimaciones entre ambos métodos. La diferencia media porcentual actúa como un indicador objetivo de la tendencia del método indirecto, permitiendo identificar si este sobreestima o subestima los caudales respecto al método de referencia.

Esta diferencia no constituye solo un dato técnico, sino una herramienta clave para la toma de decisiones. Cuando el método indirecto entrega valores superiores al método directo, se requiere aplicar un coeficiente de reducción; en cambio, si los valores son menores, resulta necesario un coeficiente de amplificación para corregir la subestimación.

Tabla 18 Comparación de caudales máximos estimados mediante metodologías directa e indirecta en cuencas seleccionadas de la Región de La Araucanía.

| Nombre de Cuenca DGA | Directo (m³/s) | Indirecto (m³/s) | Variación (m³/s) | Media diferencia % |
|--|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Río Lonquimay antes junta Río Biobío. | 362.3 | 554 | 191.7 | 52.9 |
| Río Renaico en Longitudinal. | 767.3 | 334.8 | 432.5 | -56.4 |
| Río Mininco en Longitudinal. | 294.3 | 590.7 | 296.4 | 100.7 |
| Río Malleco en Collipulli. | 1340.6 | 381.7 | 958.9 | -71.5 |
| Río Vergara en Tijeral. | 922.2 | 1533.7 | 611.5 | 66.3 |
| Río Purén en Tranamán. | 114.8 | 286.3 | 171.5 | 149.3 |
| Río Lumaco en Lumaco. | 257.2 | 507.4 | 250.2 | 97.3 |
| Río Traiguén en Victoria. | 77.2 | 88.1 | 10.9 | 14.1 |
| Río Dumo en Santa Ana. | 35 | 413.3 | 378.2 | 1079.7 |
| Río Quino en Longitudinal. | 248.8 | 338.9 | 90.1 | 36.2 |

| | | | | |
|---|--------|--------|--------|-------|
| Estero Chufquén en Chufquén. | 467.3 | 583.9 | 116.5 | 24.9 |
| Río Quillén en Galvarino. | 330.3 | 402.4 | 72.2 | 21.8 |
| Río Cholchol en Cholchol. | 1354.1 | 2513.5 | 1159.4 | 85.6 |
| Río Blanco en Curacautín. | 137.6 | 254.4 | 116.9 | 84.9 |
| Río Cautín en Rari-Ruca. | 780.5 | 1351.7 | 571.3 | 73.2 |
| Río Muco en Puente Muco. | 314.6 | 345.9 | 31.2 | 9.9 |
| Río Cautín en Cajón. | 1668.3 | 1651.3 | 17 | -1 |
| Río Quepe en Vilcún. | 325.2 | 408.7 | 83.5 | 25.7 |
| Río Huichahue en Faja 24.000. | 221.6 | 335.5 | 113.9 | 51.4 |
| Río Quepe en Quepe. | 1160.7 | 1223.4 | 62.7 | 5.4 |
| Río Cautín en Almagro. | 2738.7 | 3209.4 | 470.7 | 17.2 |
| Río Allipén en Melipeuco. | 478.6 | 1126.8 | 648.1 | 135.4 |
| Río Allipén en Los Laureles. | 1253.5 | 1940.5 | 687 | 54.8 |
| Río Trancura en Curarrehue. | 343.6 | 598.9 | 255.3 | 74.3 |
| Río Trancura antes Río Llafenco. | 945.4 | 1938.5 | 993.2 | 105.1 |
| Río Liucura en Liucura. | 401.3 | 553 | 151.8 | 37.8 |
| Río Toltén en Villarrica. | 882.8 | 2532.2 | 1649.3 | 186.8 |

| | | | | |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|-------|
| Río Toltén en Coipue. | 1219 | 3137.6 | 1918.6 | 157.4 |
| Río Puyehue en Quitratúe. | 68 | 237.1 | 169.1 | 248.7 |
| Río Donguil en Gorbea. | 320.3 | 659 | 338.7 | 105.8 |
| Río Mahuidanche en Santa Ana. | 181 | 357.3 | 176.3 | 97.4 |
| Río Toltén en Teodoro Schmidt. | 4169.5 | 6688.1 | 2518.6 | 60.4 |

Fuente: Dirección General de Aguas (registros hidrológicos, 2025); elaboración propia a partir de la aplicación de metodologías directa e indirecta.

El análisis evidencia que las cuencas no presentan un comportamiento uniforme. Algunas muestran diferencias leves entre métodos, mientras que otras registran discrepancias significativas respecto al método directo. Por ejemplo, el Río Dumo en Santa Ana presenta una diferencia superior al 1.000 %, lo que refleja una sobreestimación considerable del método indirecto. En total, 27 cuencas exhiben sobreestimaciones y requieren correcciones a la baja, mientras que 7 cuencas presentan subestimaciones que demandan ajustes al alza.

Mediante este enfoque es posible identificar las cuencas que requieren ajustes y su sentido de corrección, avanzando hacia estimaciones más realistas y útiles para el diseño de infraestructura hidráulica.

La Tabla 19 pesenta los coeficientes de reducción aplicados al método indirecto de estimación de caudales para cada cuenca analizada. Estos coeficientes se determinan para distintos períodos de retorno hidrológico (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años), con el propósito de ajustar los valores obtenidos por el método indirecto en relación con los resultados del método directo. Los valores permiten identificar tendencias de sobreestimación o subestimación sistemática y orientar la aplicación de factores de corrección según el comportamiento hidrológico característico de cada cuenca.

Tabla 19 Coeficientes de reducción o amplificación obtenidos en distintos períodos de retorno para cuencas seleccionadas de la Región de La Araucanía.

| Nombre de cuenca | T=2 | T=5 | T=10 | T=25 | T=50 | T=100 |
|--|------------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Río Lonquimay antes junta Río Biobío. | 0.39 | 0.52 | 0.63 | 0.69 | 0.74 | 0.81 |
| Río Renaico en Longitudinal. | 1.96 | 2.2 | 2.4 | 2.34 | 2.32 | 2.37 |
| Río Mininco en Longitudinal. | 0.37 | 0.44 | 0.5 | 0.51 | 0.53 | 0.56 |
| Río Malleco en Collipulli. | 1.34 | 2.12 | 2.89 | 3.62 | 4.25 | 5.1 |
| Río Vergara en Tijeral. | 0.53 | 0.58 | 0.63 | 0.61 | 0.61 | 0.62 |
| Río Purén en Tranamán. | 0.41 | 0.4 | 0.42 | 0.4 | 0.39 | 0.39 |
| Río Lumaco en Lumaco. | 0.37 | 0.45 | 0.51 | 0.52 | 0.53 | 0.56 |
| Río Traiguén en Victoria. | 0.7 | 0.79 | 0.89 | 0.9 | 0.91 | 0.96 |
| Río Dumo en Santa Ana. | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.08 | 0.09 |
| Río Quino en Longitudinal. | 0.66 | 0.71 | 0.77 | 0.75 | 0.73 | 0.75 |
| Estero Chufquén en Chufquén. | 0.6 | 0.72 | 0.82 | 0.83 | 0.84 | 0.88 |
| Río Quillén en Galvarino. | 0.64 | 0.75 | 0.84 | 0.84 | 0.85 | 0.89 |
| Río Cholchol en Cholchol. | 0.57 | 0.56 | 0.58 | 0.54 | 0.51 | 0.51 |
| Río Blanco en Curacautín. | 0.46 | 0.49 | 0.54 | 0.55 | 0.56 | 0.59 |

| | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|
| Río Cautín en Rari-Ruca. | 0.59 | 0.59 | 0.61 | 0.58 | 0.56 | 0.56 |
| Río Muco en Puente Muco. | 0.84 | 0.89 | 0.95 | 0.92 | 0.91 | 0.93 |
| Río Cautín en Cajón. | 0.87 | 0.93 | 1.03 | 1.02 | 1.03 | 1.08 |
| Río Quepe en Vilcún. | 0.68 | 0.77 | 0.83 | 0.82 | 0.8 | 0.82 |
| Río Huichahue en Faja 24.000. | 0.6 | 0.64 | 0.68 | 0.67 | 0.66 | 0.68 |
| Río Quepe en Quepe. | 0.84 | 0.92 | 1 | 0.97 | 0.95 | 0.97 |
| Río Cautín en Almagro. | 0.93 | 0.9 | 0.93 | 0.85 | 0.8 | 0.79 |
| Río Allipén en Melipeuco. | 0.37 | 0.4 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 0.45 |
| Río Allipén en Los Laureles. | 0.71 | 0.68 | 0.7 | 0.64 | 0.61 | 0.6 |
| Río Trancura en Curarrehue. | 0.53 | 0.57 | 0.6 | 0.58 | 0.57 | 0.58 |
| Río Trancura antes Río Llafenco. | 0.47 | 0.49 | 0.51 | 0.49 | 0.48 | 0.48 |
| Río Liucura en Liucura. | 0.64 | 0.7 | 0.75 | 0.74 | 0.73 | 0.75 |
| Río Toltén en Villarrica. | 0.4 | 0.37 | 0.38 | 0.34 | 0.33 | 0.32 |
| Río Toltén en Coipue. | 0.42 | 0.4 | 0.42 | 0.39 | 0.37 | 0.37 |
| Río Puyehue en Quitratúe. | 0.27 | 0.28 | 0.3 | 0.29 | 0.28 | 0.29 |
| Río Donguil en Gorbea. | 0.48 | 0.49 | 0.52 | 0.49 | 0.47 | 0.48 |
| Río Mahuidanche en Santa Ana. | 0.52 | 0.52 | 0.54 | 0.51 | 0.49 | 0.49 |

| | | | | | | |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Río Toltén en Teodoro Schmidt. | 0.61 | 0.63 | 0.67 | 0.63 | 0.61 | 0.61 |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|

Fuente: Dirección General de Aguas (registros hidrológicos, 2025); coeficientes de reducción/amplificación calculados por el autor.

Del análisis de los coeficientes se observa que algunas cuencas presentan valores consistentemente inferiores a la unidad, lo que indica la necesidad de reducir los caudales estimados por el método indirecto (por ejemplo: Río Lonquimay, Río Purén y Río Toltén). En contraste, otras cuencas muestran coeficientes superiores a 1, reflejando una mayoración sistemática (por ejemplo: Río Malleco, Río Cautín en Cajón y Río Renaico). Asimismo, se identifican cuencas con comportamiento mixto o intermedio, donde los ajustes varían según el período de retorno.

Esta caracterización permite aplicar correcciones diferenciadas, mejorando la confiabilidad del método indirecto en escenarios de diseño hidrológico. A continuación, se presentan las tablas resumen que detallan el tipo de ajuste requerido en cada cuenca.

La Tabla 20 clasifica las cuencas hidrográficas según el tipo de ajuste necesario para los caudales obtenidos mediante el método indirecto, en relación con los resultados del método directo. Esta categorización se basa en los coeficientes de reducción calculados para distintos períodos de retorno, permitiendo identificar si corresponde aplicar una minoración, una mayoración o un tratamiento mixto al caudal estimado indirectamente.

Tabla 20 Clasificación de coeficientes de reducción/amplificación en estaciones seleccionadas de la Región de La Araucanía.

| Nombre de cuenca | Tipo de coeficiente |
|--|----------------------------|
| Río Lonquimay antes junta Río Biobío. | Minoración |

| | |
|-------------------------------------|------------|
| Río Renaico en Longitudinal. | Mayoración |
| Río Mininco en Longitudinal. | Minoración |
| Río Malleco en Collipulli. | Mayoración |
| Río Vergara en Tijeral. | Minoración |
| Río Purén en Tranamán. | Minoración |
| Río Lumaco en Lumaco. | Minoración |
| Río Traiguén en Victoria. | Minoración |
| Río Dumo en Santa Ana. | Minoración |
| Río Quino en Longitudinal. | Minoración |
| Estero Chufquén en Chufquén. | Minoración |
| Río Quillén en Galvarino. | Minoración |
| Río Cholchol en Cholchol. | Minoración |
| Río Blanco en Curacautín. | Minoración |
| Río Cautín en Rari-Ruca. | Minoración |
| Río Muco en Puente Muco. | Minoración |
| Río Cautín en Cajón. | Mixta |
| Río Quepe en Vilcún. | Minoración |

| | |
|---|------------|
| Río Huichahue en Faja 24.000. | Minoración |
| Río Quepe en Quepe. | Minoración |
| Río Cautín en Almagro. | Minoración |
| Río Allipén en Melipeuco. | Minoración |
| Río Allipén en Los Laureles. | Minoración |
| Río Trancura en Curarrehue. | Minoración |
| Río Trancura antes Río Llafenco. | Minoración |
| Río Liucura en Liucura. | Minoración |
| Río Toltén en Villarrica. | Minoración |
| Río Toltén en Coipue. | Minoración |
| Río Puyehue en Quitratúe. | Minoración |
| Río Donguil en Gorbea. | Minoración |
| Río Mahuidanche en Santa Ana. | Minoración |
| Río Toltén en Teodoro Schmidt. | Minoración |

Fuente: Dirección General de Aguas (registros hidrológicos, 2025); elaboración propia a partir de coeficientes calculados por el autor.

Del total de cuencas analizadas, la gran mayoría (90,6 %) presenta coeficientes de reducción menores a 1 en todos los períodos de retorno, lo que evidencia una tendencia clara del método indirecto a sobreestimar los caudales. Un grupo reducido de dos estaciones (6,3 %) muestra valores superiores a 1, reflejando el comportamiento opuesto, con estimaciones más altas en el método directo. Finalmente, una cuenca (3,1 %) exhibe un comportamiento intermedio, con variaciones según el período de retorno considerado.

En conjunto, los resultados confirman la necesidad de aplicar ajustes para obtener proyecciones más realistas y útiles en el diseño hidrológico y la gestión del riesgo.

CAPÍTULO V: Discusión.

5.1. Comportamiento espacial de los coeficientes de reducción.

Al analizar el comportamiento espacial de los coeficientes de reducción, se identifican patrones que aportan información valiosa sobre las diferencias entre los métodos directo e indirecto en distintos sectores de la Región de La Araucanía. Para este propósito, se calcula el promedio de los coeficientes por estación, considerando los seis períodos de retorno utilizados en el estudio (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años).

Esta medida permite obtener una visión general del comportamiento del ajuste en cada cuenca, más allá de las variaciones puntuales entre períodos, y facilita la identificación de tendencias generales. Al mismo tiempo, entrega la base para analizar el comportamiento de los coeficientes según criterios espaciales y condiciones naturales específicas, tales como latitud, longitud, altitud, régimen fluvial y tamaño de cuenca.

5.1.1. Gradiente latitudinal.

El gradiente latitudinal permite analizar la variación de los coeficientes propuestos desde el norte hacia el sur de la Región de La Araucanía. Este criterio resulta fundamental, ya que la latitud refleja cambios en el régimen de precipitaciones: en el norte se concentran lluvias más intensas y de corta duración, mientras que hacia el sur se observa una mayor regularidad y, en los sectores cordilleranos, aportes nivales adicionales.

En el sector norte, los coeficientes propuestos muestran valores superiores a 2,0, alcanzando hasta 5,1 para un período de retorno de 100 años, lo que corrige la subestimación del método indirecto. Ejemplos representativos:

- Río Renaico en Longitudinal (8342001)
- Río Malleco en Collipulli (8351001)

En el sector sur, los coeficientes se ubican en rangos de 0,3 a 0,6, ajustando la sobrestimación del método indirecto y acercando las estimaciones al método directo.

Estaciones destacadas:

- Río Puyehue en Quintratúe (9433001)
- Río Toltén en Teodoro Schmidt (9437002)
- Río Trancura en Curarrehue (9412001)

En síntesis, la latitud marca un patrón claro:

En el norte, los coeficientes corrigen subestimaciones más severas. En el sur, permiten controlar sobrestimaciones más estables, reflejando la transición climática e hidrológica característica de la región.

5.1.2. Gradiente longitudinal.

El gradiente longitudinal permite analizar la variación de los coeficientes propuestos desde la cordillera hasta la costa. Este criterio es relevante, ya que el eje este-oeste está estrechamente ligado al relieve y, en consecuencia, al régimen de crecidas:

- En la cordillera predominan regímenes nivales o mixtos.
- En el valle central se observan respuestas rápidas y más extremas.
- En la costa las lluvias son más homogéneas y prolongadas.

Zonas cordilleranas: Las estaciones cordilleranas presentan coeficientes bajos (0,4–0,6), propuestos para reducir la sobrestimación del método indirecto, frecuente en sectores donde los aportes nivales y el deshielo suavizan la respuesta de las crecidas.

Valle central: En esta zona se registran los ajustes más altos, con coeficientes superiores a 2,0, que pueden alcanzar hasta 5,1 en Collipulli para $T = 100$ años. Estos valores corrigen la subestimación del método indirecto, habitual en cuencas donde la combinación de pendientes moderadas y lluvias intensas genera crecidas más violentas que las estimadas empíricamente.

5.1.3. Régimen fluvial.

El análisis de los coeficientes propuestos según el régimen fluvial permite distinguir cómo varía la corrección aplicada al método indirecto en función de la fuente principal de aportes de cada cuenca. En la Región de La Araucanía se identifican dos tipos predominantes de régimen: pluvial y pluvial–nival, cada uno con comportamientos diferenciados frente a la estimación de crecidas.

- Regímenes pluviales.

En las cuencas con aporte casi exclusivo de lluvias, los coeficientes propuestos tienden a ser cercanos a 1 o inferiores, lo que confirma que el método indirecto tiende a sobreestimar los caudales. Los valores ajustados permiten corregir dicha sobrestimación y aproximar la estimación indirecta a la directa.

Ejemplos representativos:

- Río Renaico (8342001).
- Río Vergara en Tijeral (8358001).
- Río Quillén en Galvarino (9113001).
- Río Cholchol (9116001).

- Regímenes pluvial–nivales.

La mayoría de las estaciones de la región presenta este tipo de régimen, que combina aportes de lluvias y deshielos. En estas cuencas, los coeficientes muestran un comportamiento más variable:

- En sectores altos, predominan valores bajos (0,4–0,6) que corrigen la sobrestimación del método indirecto.
- En valles intermedios, como Río Malleco en Collipulli (8351001), aparecen coeficientes altos ($>2,0$), necesarios para corregir la subestimación del método.

5.1.4. Tamaño de cuenca.

El área de drenaje constituye un parámetro determinante en la respuesta hidrológica de las cuencas, ya que controla la rapidez, magnitud y atenuación de los caudales

generados por los eventos de precipitación. Según Chow, Maidment y Mays (1988), el tiempo de concentración aumenta con la superficie de drenaje, lo que explica que las cuencas pequeñas respondan con mayor rapidez y presenten picos de caudal más pronunciados y variables, mientras que las cuencas extensas exhiben una respuesta más retardada y uniforme. Esta diferencia en el comportamiento hidrológico se refleja directamente en los coeficientes de corrección propuestos, los cuales capturan la sensibilidad del método indirecto frente al tamaño del sistema.

Cuencas pequeñas (<500 km²): Estas cuencas muestran la mayor dispersión en los coeficientes, evidenciando su alta sensibilidad hidrológica. Los valores fluctúan entre ajustes bajos (0,08 en Dumo) —que corrigen fuertes sobrestimaciones— y coeficientes altos (3–5 en Malleco), necesarios para compensar subestimaciones severas.

Ejemplos representativos:

- Río Traiguén en Victoria (9104001, 84 km²)
- Río Dumo en Santa Ana (9104002, 412 km²)
- Río Purén en Tranamán (9101001, 341 km²)

Esto confirma que las cuencas de menor superficie son las más sensibles y requieren coeficientes de corrección específicos.

Cuencas medianas (500–3000 km²): En estas cuencas, los coeficientes tienden a estabilizarse entre 0,4 y 0,9, reflejando una sobrestimación más consistente del método indirecto. Los ajustes propuestos permiten alinear las estimaciones con los resultados del método directo.

Ejemplos representativos:

- Río Allipén en Melipeuco (9402001, 819 km²).
- Río Quepe en Quepe (9135001, 1668 km²).
- Río Toltén en Villarrica (9420001, 2946 km²).

Cuencas grandes (>3000 km²): Los coeficientes propuestos se concentran en un rango más estrecho (0,4–0,7), lo que refleja un comportamiento hidrológico más integrado y

uniforme. En estos casos, el método indirecto sobrestima de manera sistemática, y los ajustes aplicados corrigen dicha tendencia de forma homogénea.

Ejemplos representativos:

- Río Cholchol en Cholchol (9116001, 5494 km²).
- Río Toltén en Coipue (9423001, 3489 km²).
- Río Toltén en Teodoro Schmidt (9437002, 7911 km²).

En conclusión, el tamaño de la cuenca condiciona la magnitud y estabilidad de los coeficientes: en las pequeñas se concentran los valores más extremos y variables, mientras que en las medianas y grandes predominan sobrestimaciones más consistentes que se corrigen con coeficientes moderados. Esto demuestra la necesidad de aplicar ajustes diferenciados según la superficie de drenaje para lograr estimaciones más confiables y cercanas al método directo.

3.1.5. Conclusión del análisis.

El análisis de los coeficientes propuestos muestra que el desempeño del método indirecto depende de las condiciones físicas e hidrológicas de cada cuenca. En el norte, los coeficientes altos corrigen la subestimación, mientras que en el sur los valores bajos ajustan la sobrestimación. De este a oeste, la cordillera y la costa requieren reducciones, y el valle central necesita aumentos. En cuanto a la altitud, las zonas altas y bajas demandan correcciones a la baja, y las intermedias, ajustes al alza.

Por régimen fluvial, las cuencas pluviales tienden a sobrestimar y las pluvial-nivales muestran comportamientos mixtos. En cuanto al tamaño, las cuencas pequeñas concentran los valores más extremos, mientras que en las medianas y grandes los coeficientes son más estables.

En síntesis, los coeficientes propuestos constituyen un ajuste diferenciado que mejora la precisión del método indirecto, acercándolo a los resultados del método directo.

5.2. Implicancias hidrológicas y de diseño

Los coeficientes propuestos no constituyen solo un ejercicio estadístico, sino una herramienta práctica que puede marcar la diferencia en el diseño de obras hidráulicas de la región. En las cuencas donde el método indirecto sobredimensiona los caudales, aplicar los ajustes propuestos permite evitar construcciones más grandes y costosas de lo necesario. Por el contrario, en sectores donde el método subestima los caudales, como en Renaico (8342001) y Malleco en Collipulli (8351001), los coeficientes corrigen la deficiencia, previniendo estructuras subdimensionadas que podrían fallar ante crecidas reales.

En términos simples, los coeficientes afinan las estimaciones, adaptando los cálculos a las condiciones específicas de cada cuenca, ya sea por su ubicación, altitud, régimen o tamaño. Esta calibración no solo mejora la precisión técnica, sino que también optimiza el uso de los recursos y aumenta la seguridad de las comunidades que dependen de estas infraestructuras.

5.3. Limitaciones del estudio

Aunque los resultados obtenidos son consistentes y útiles, es importante reconocer algunas limitaciones. No todas las cuencas de la región cuentan con series extensas ni de calidad homogénea: varias estaciones poseen registros inferiores a 30 años, lo que aumenta la incertidumbre en las estimaciones. Además, en algunos sectores la red fluviométrica es poco densa, lo que dificulta representar con precisión la variabilidad espacial de las crecidas.

Otro aspecto relevante es que los coeficientes se construyen a partir de la información actualmente disponible. Si bien el estudio utiliza la totalidad de los datos existentes, los cambios en las condiciones climáticas podrían modificar los patrones de escorrentía y, con ello, afectar la validez de los ajustes a largo plazo.

Estas limitaciones no restan valor a los coeficientes propuestos, pero sí invitan a utilizarlos con criterio, como una herramienta de apoyo que debe complementarse con estudios adicionales, especialmente en proyectos de gran envergadura o en cuencas con información limitada.

El análisis de los coeficientes demuestra que el método indirecto no se comporta de manera uniforme en toda la Región de La Araucanía: en los valles intermedios tiende a subestimar los caudales, mientras que en las zonas altas y bajas predomina la sobrestimación. Factores como la ubicación geográfica, la altitud, el régimen fluvial y el tamaño de cuenca explican estas diferencias y justifican la aplicación de ajustes diferenciados.

En este contexto, los coeficientes propuestos cumplen el rol de corregir los sesgos del método indirecto, alineando sus resultados con el método directo y ofreciendo una base más confiable para el diseño de obras hidráulicas y la gestión del riesgo en la región. Con ello, la discusión establece el marco para avanzar hacia las conclusiones, donde se destacan los principales aportes y proyecciones del estudio.

CAPÍTULO VI: Conclusión.

Conclusión.

Este estudio tiene como propósito analizar la precisión del método indirecto de estimación de caudales máximos en la Región de La Araucanía, mediante su comparación con el método directo y la propuesta de coeficientes de ajuste que permitan mejorar los resultados en cuencas sin datos fluviométricos. El análisis demuestra que las diferencias entre ambos métodos no son aleatorias, sino que responden a factores como el régimen hidrológico, la altitud y la ubicación geográfica de las cuencas.

En general, el método indirecto tiende a sobrestimar los caudales en la mayoría de las estaciones, mientras que en valles intermedios se observa una subestimación significativa. Estas discrepancias se reflejan en los coeficientes de ajuste propuestos, los cuales corrigen los sesgos del modelo empírico y permiten obtener resultados más coherentes con el método directo.

El trabajo constituye un aporte concreto al conocimiento hidrológico regional, al proponer coeficientes adaptados a la realidad climática y geomorfológica de La Araucanía, caracterizada por una alta variabilidad y por la presencia de numerosas cuencas sin registros suficientes. En este sentido, los coeficientes tienen un valor aplicado, ya que pueden utilizarse directamente en proyectos de diseño hidráulico y gestión del riesgo, reduciendo la incertidumbre en la estimación de crecidas y mejorando la seguridad de las comunidades.

En conclusión, no resulta recomendable aplicar el método indirecto de manera uniforme en toda la región. Por el contrario, se requiere el uso de coeficientes de ajuste diferenciados por estación y contexto hidrológico, con el fin de obtener estimaciones más confiables y representativas de la realidad local de la Región de La Araucanía.

Bibliografía.

- Amigo, Á. (2021). *Vigilancia volcánica y evaluación de peligros en Chile*. Obtenido de Volcánica: <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.0120>

- BCN. (2025). *bIBLIOTECA DEL BANCO NACIONAL* . Obtenido de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region9/relieve.htm>
- BCN. (23 de 09 de 2025). *Biblioteca del banco nacional de Chile*. . Obtenido de https://www.bcn.cl/siit/mapas_vectoriales
- BCN. (2025). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region9/>
- Centro de Competitividad de La Araucanía – Universidad de La Frontera. (2020). *Análisis macroeconómico de la Región de La Araucanía*.
- Chow. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- CONAF. (2021). *Catastro de los recursos vegetacionales nativos de Chile: Actualización 2020*.
- CONAMA. (2002). *strategia Regional de Conservación y Uso Sustentable de la Biodiversidad: Región de La Araucanía*.
- Corporación Nacional Forestal. (25 de 09 de 2025). Obtenido de IDE: Corporación Nacional Forestal
- Departamento de Geografía Universidad de Chile. (24 de 09 de 2025). *IDE*. Obtenido de <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/35414/Zonas%20clim%C3%A1ticas%20de%20Chile%20seg%C3%BAAn%20K%C3%B6ppen-Geiger%20escala%201:1.500.000>
- DGA. (1995). *Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica*.
- DGA. (2008). *Procedimientos para la evaluación de disponibilidades hídricas*.

- DGA. (2016). *Estudio hidrogeológico de la Región de La Araucanía: Informe final*. La araucania .
- DGA. (2016). *Guías metodológicas para presentación y revisión técnica de proyectos de modificación de cauces naturales y artificiales*.
- Gobierno de Chile. (2025). *Gobierno de Chile* . Obtenido de <https://www.gob.cl/regiones/region-de-la-araucania/>
- Gobierno Regional de La Araucanía. (2017). *Política regional de recursos hídricos 2017–2027*.
- GWP Perú. (2011). *¿Qué es cuenca hidrológica? Sociedad Geográfica de Lima*.
- INE. (2019). *SÍNTESIS DE RESULTADOS CENSO 2017 REGIÓN DE LA ARAUCANÍA INFORME COMPARATIVO CENSOS*. Araucania : INE.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, et al., eds.)*. Cambridge University Press.
- MINVU. (2019). *Guía 2: Elaboración de planes de emergencia comunitarios*. Santiago: MINVU.
- MMA. (2011). *Estrategia Nacional de Biodiversidad de Chile 2011–2020*.
- MMA. (2020). *Atlas de Riesgo Climático (ARClím): Recursos Hídricos*. Gobierno de Chile.
- MMA. (04 de 09 de 2025). *LBP*. Obtenido de https://lineasdebasepublicas.mma.gob.cl/datos_abiertos/dataset/areas-de-riesgo/resource/418d1bd9-61c8-40d8-aee1-971d43eed87f

- MMA. (23 de 09 de 2025). *Lineas de base publica* . Obtenido de Fuente: elaboración propia en QGIS, datos de “Ubicación de Volcanes” (SERNAGEOMIN), MMA Datos Abiertos Línea Base Pública, actualización 25 de julio de 2024.
- MOP. (2010). *Manual para Obras de Aprovechamiento Hidráulico*.
- MOP. (2017). *Política Regional de Recursos Hídricos 2017–2027: Región de La Araucanía*.
- Radio Bío Bío. (9 de Junio de 2024). *Unas 4.800 personas están aisladas en La Araucanía tras las inundaciones que impactan a la región*. Obtenido de Biobiochile.cl: <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-de-la-araucania/2024/06/29/unas-4-800-personas-estan-aisladas-en-la-araucania-tras-las-inundaciones-que-impactan-a-la-region.shtml>
- SERNATUR–CONAF. (2019). *Parque Nacional Araucanía – Naturaleza Originaria*.
- Universidad de La Frontera. (08 de 09 de 2025). *Kimün-Ko*. Obtenido de Kimün-Ko: <https://kimunko.ufro.cl/actividades-economicas/>
- USGS. (2021). *Development of Regression Equations for the Estimation of the Magnitude and Frequency of Floods at Rural, Unregulated Gaged and Ungaged Streams in Puerto Rico Through Water Year 2017*.
- Wallis, H. &. (1997). *Regional Frequency Analysis*.
- WMO. (2008). *Guide to Hydrological Practices, Vol. I*.
- WMO. (2012). *Guide to Hydrological Practices, Vol. II*.
- World Bank. (2021). *El agua en Chile: Elemento de desarrollo y resiliencia*.

Anexos.

Anexo A.

Tabla 21 Resultados ajustes mensuales estación 8342001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|-------------------------|------------------------|
| Abril | 0.081 | Log Normal |
| Mayo | 0.116 | Log Normal |
| Junio | 0.067 | Log Normal |
| Julio | 0.141 | Pearson |
| Agosto | 0.084 | Gamma |
| Septiembre | 0.145 | Log Normal |
| Octubre | 0.047 | Gamma |
| Noviembre | 0.109 | Pearson |
| Diciembre | 0.093 | Log Normal |
| Enero | 0.077 | Pearson |
| Febrero | 0.134 | Gumbel |
| Marzo | 0.073 | Gamma |

Fuente: elaboración propia.

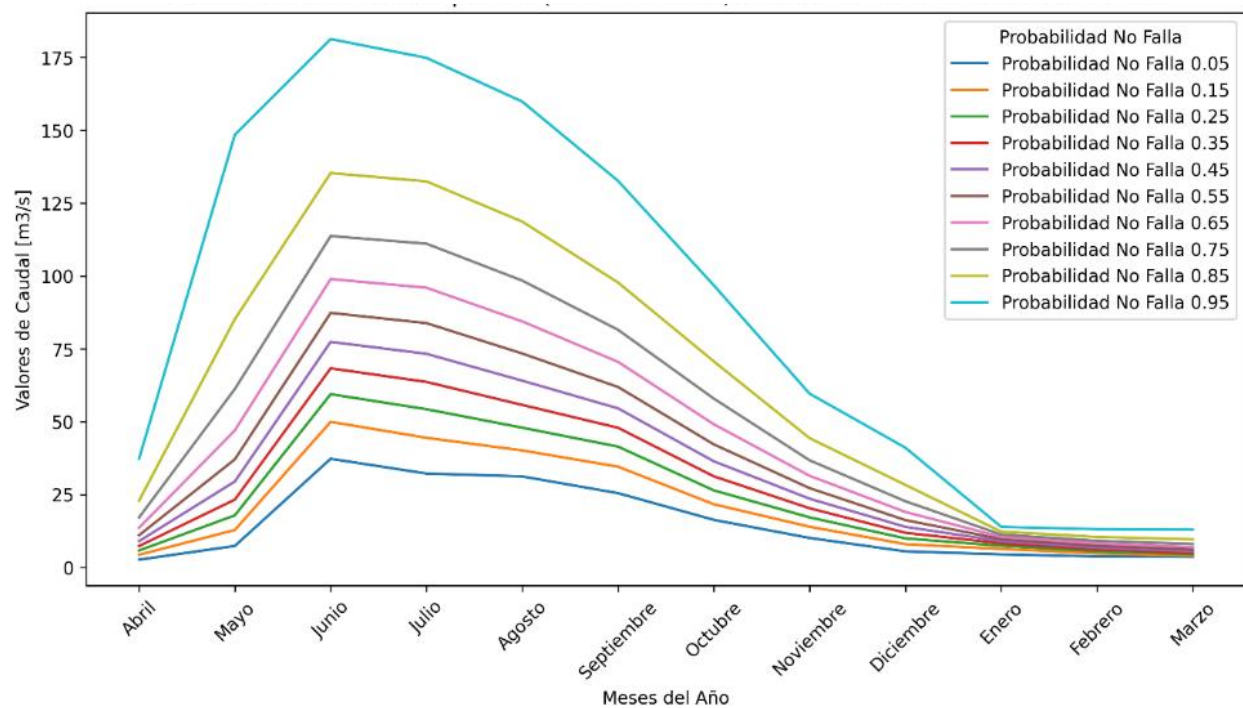


Figura 18 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 8342001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 22 Resultados ajustes mensuales estación 8343001

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|------------------|-----------------|
| Abril | 0.082 | Gamma |
| Mayo | 0.086 | Log Normal |
| Junio | 0.078 | Gumbel |
| Julio | 0.085 | Gumbel |
| Agosto | 0.09 | Normal |
| Septiembre | 0.093 | Normal |

| | | |
|------------------|-------|---------|
| Octubre | 0.068 | Pearson |
| Noviembre | 0.068 | Pearson |
| Diciembre | 0.068 | Gumbel |
| Enero | 0.06 | Gumbel |
| Febrero | 0.078 | Gumbel |
| Marzo | 0.076 | Gumbel |

Fuente: elaboración propia.

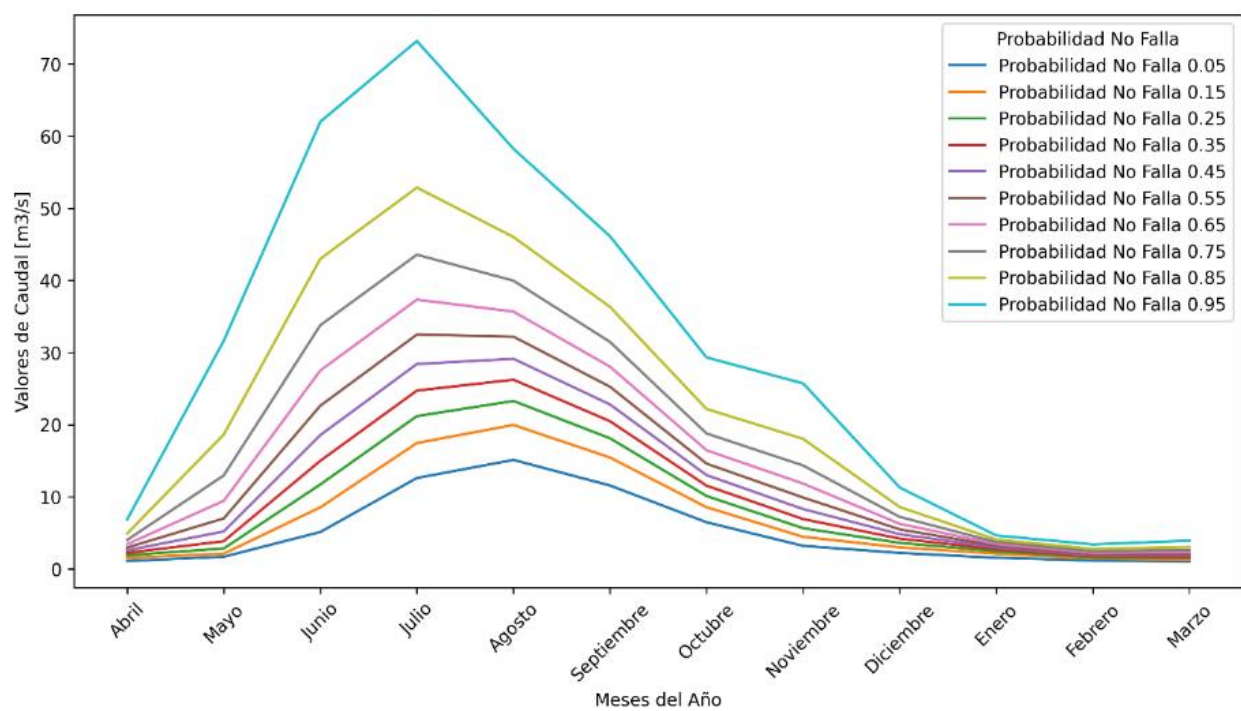


Figura 19 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 8343001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 23 Resultados ajustes mensuales estación 8351001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|-------------------------|------------------------|
| Abril | 0.116 | Normal |
| Mayo | 0.125 | Gamma |
| Junio | 0.093 | Gumbel |
| Julio | 0.085 | Pearson |
| Agosto | 0.102 | Log Normal |
| Septiembre | 0.142 | Gumbel |
| Octubre | 0.073 | Gumbel |
| Noviembre | 0.111 | Log Normal |
| Diciembre | 0.079 | Normal |
| Enero | 0.086 | Normal |
| Febrero | 0.097 | Pearson |
| Marzo | 0.118 | Pearson |

Fuente: elaboración propia.

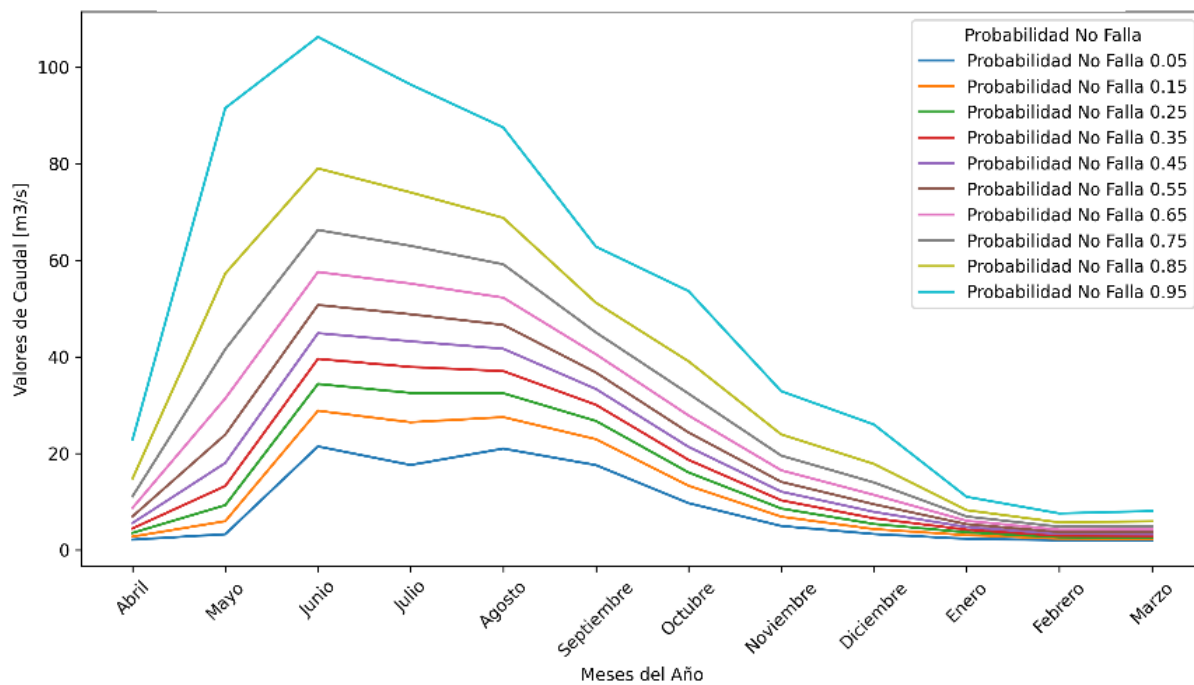


Figura 20 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 8351001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 24 Resultados ajustes mensuales estación 8358001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|------------------|-----------------|
| Abril | 0.066 | Gumbel |
| Mayo | 0.089 | Pearson |
| Junio | 0.095 | Log Normal |
| Julio | 0.071 | Gamma |
| Agosto | 0.09 | Pearson |
| Septiembre | 0.084 | Gumbel |

| | | |
|------------------|-------|------------|
| Octubre | 0.096 | Gumbel |
| Noviembre | 0.091 | Gumbel |
| Diciembre | 0.059 | Gumbel |
| Enero | 0.111 | Normal |
| Febrero | 0.097 | Normal |
| Marzo | 0.106 | Log Normal |

Fuente: elaboración propia.

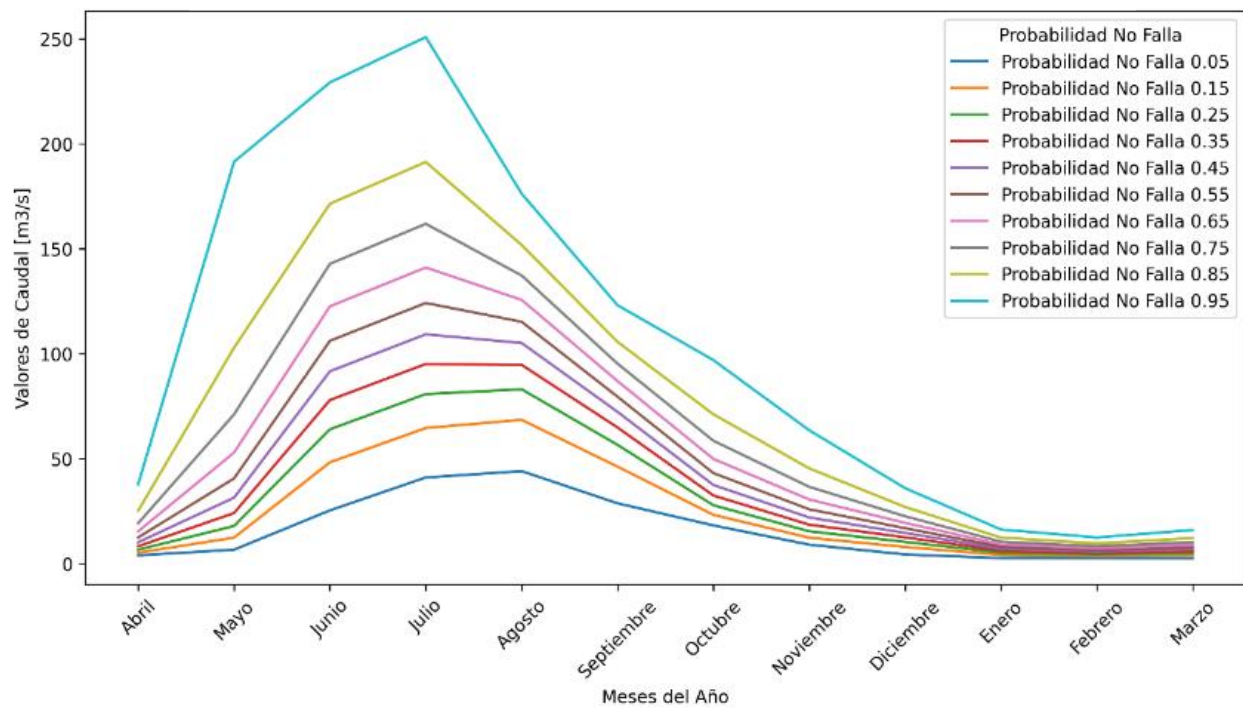


Figura 21 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 8358001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 25 Resultados ajustes mensuales estación 9101001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|-------------------------|------------------------|
| Abril | 0.116 | Normal |
| Mayo | 0.125 | Gamma |
| Junio | 0.093 | Gumbel |
| Julio | 0.085 | Pearson |
| Agosto | 0.102 | Log Normal |
| Septiembre | 0.142 | Gumbel |
| Octubre | 0.073 | Gumbel |
| Noviembre | 0.111 | Log Normal |
| Diciembre | 0.079 | Normal |
| Enero | 0.086 | Normal |
| Febrero | 0.097 | Pearson |
| Marzo | 0.118 | Pearson |

Fuente: elaboración propia.

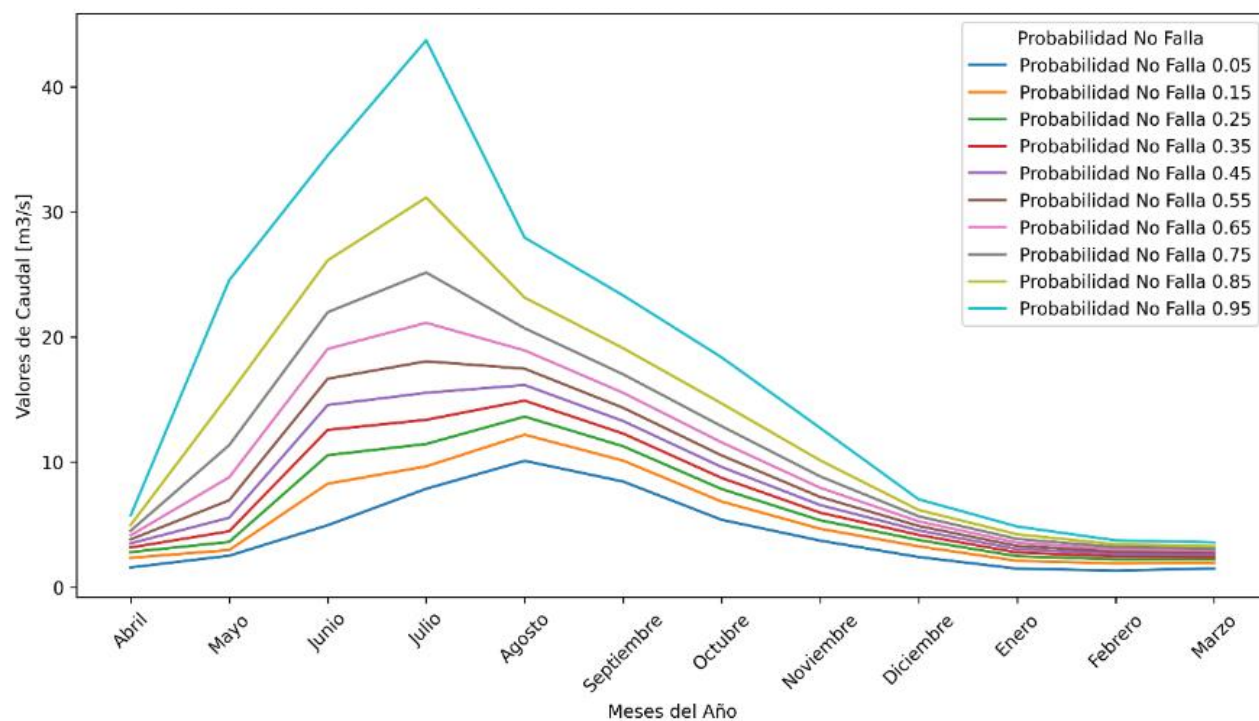


Figura 22 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9101001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 26 Resultados ajustes mensuales estación 9102001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|------------|------------------|-----------------|
| Abril | 0.066 | Gumbel |
| Mayo | 0.089 | Pearson |
| Junio | 0.095 | Log Normal |
| Julio | 0.071 | Gamma |
| Agosto | 0.09 | Pearson |
| Septiembre | 0.084 | Gumbel |

| | | |
|------------------|-------|------------|
| Octubre | 0.096 | Gumbel |
| Noviembre | 0.091 | Gumbel |
| Diciembre | 0.059 | Gumbel |
| Enero | 0.111 | Normal |
| Febrero | 0.097 | Normal |
| Marzo | 0.106 | Log Normal |

Fuente: elaboración propia.

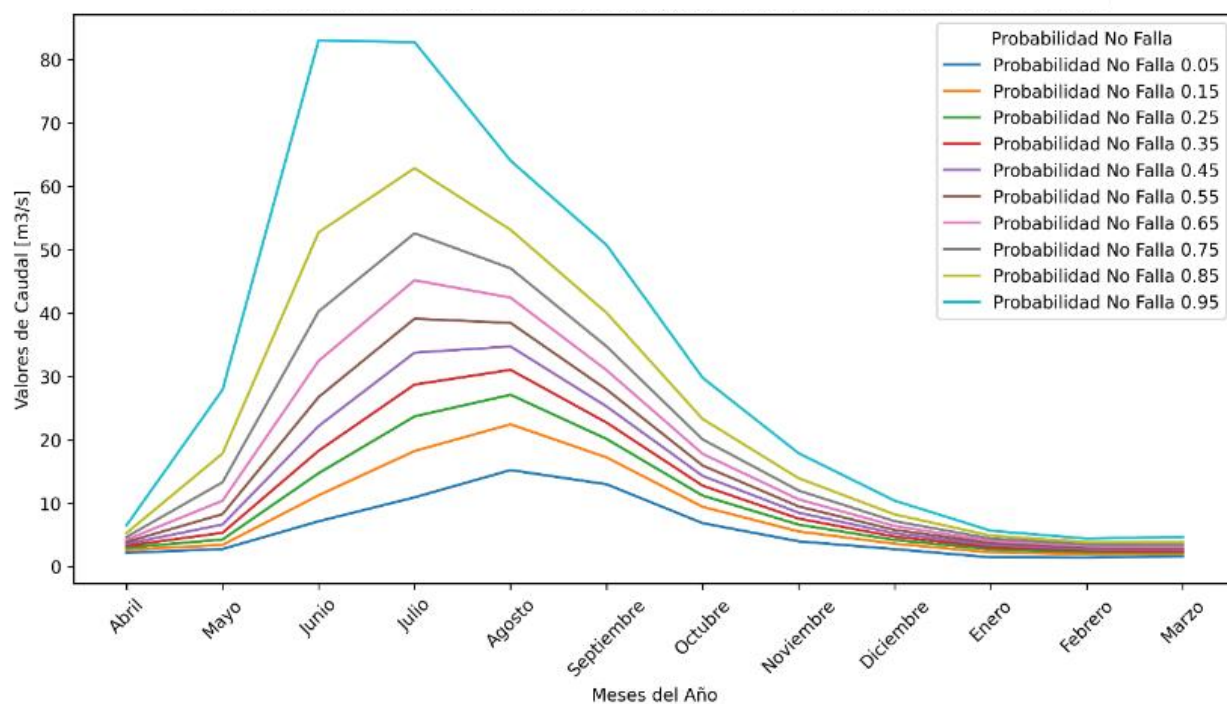


Figura 23 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9102001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 27 Resultados ajustes mensuales estación 9104001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|-------------------------|------------------------|
| Abril | 0.071 | Log Normal |
| Mayo | 0.087 | Pearson |
| Junio | 0.058 | Gumbel |
| Julio | 0.053 | Gamma |
| Agosto | 0.066 | Normal |
| Septiembre | 0.089 | Log Normal |
| Octubre | 0.096 | Gamma |
| Noviembre | 0.085 | Gamma |
| Diciembre | 0.093 | Pearson |
| Enero | 0.098 | Log Normal |
| Febrero | 0.078 | Gumbel |
| Marzo | 0.072 | Log Normal |

Fuente: elaboración propia.

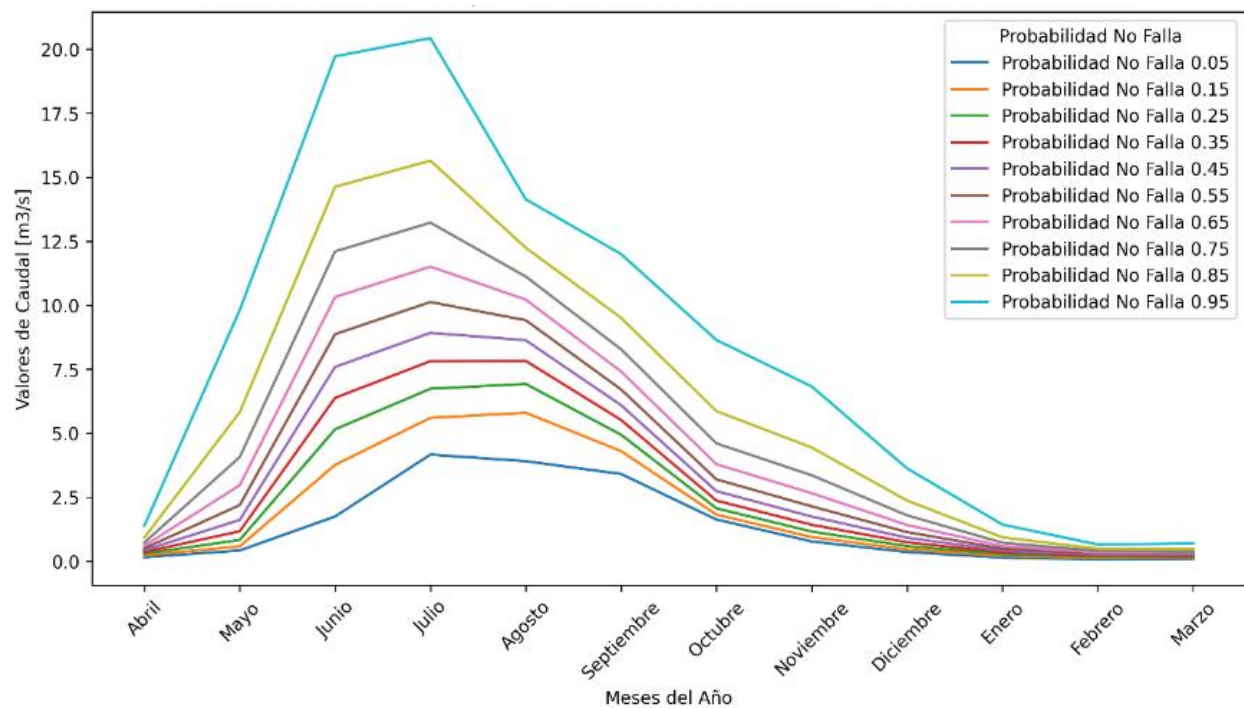


Figura 24 Curva de caudal mensual estimado en la estación 9104001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 28 Resultados ajustes mensuales estación 9104002.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|------------------|-----------------|
| Abril | 0.115 | Pearson |
| Mayo | 0.065 | Gamma |
| Junio | 0.081 | Normal |
| Julio | 0.053 | Gumbel |
| Agosto | 0.063 | Pearson |
| Septiembre | 0.084 | Pearson |

| | | |
|------------------|-------|------------|
| Octubre | 0.074 | Pearson |
| Noviembre | 0.104 | Log Normal |
| Diciembre | 0.08 | Gamma |
| Enero | 0.075 | Log Normal |
| Febrero | 0.061 | Log Normal |
| Marzo | 0.06 | Pearson |

Fuente: elaboración propia.

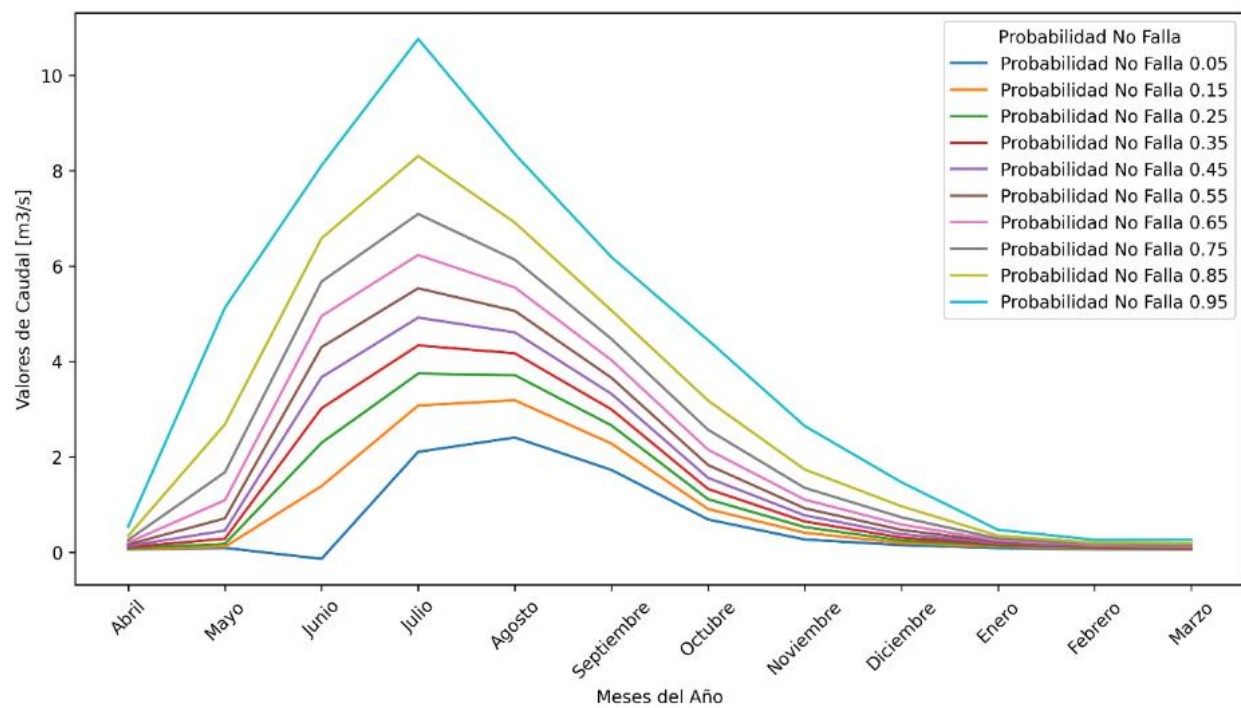


Figura 25. Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9104002 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 29 Resultados ajustes mensuales estación 9106001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|------------|------------------|-----------------|
| Abril | 0.065 | Log Normal |
| Mayo | 0.09 | Gamma |
| Junio | 0.075 | Gumbel |
| Julio | 0.083 | Gamma |
| Agosto | 0.073 | Normal |
| Septiembre | 0.09 | Log Normal |

| | | |
|------------------|-------|---------|
| Octubre | 0.084 | Pearson |
| Noviembre | 0.082 | Pearson |
| Diciembre | 0.07 | Gamma |
| Enero | 0.096 | Pearson |
| Febrero | 0.097 | Gumbel |
| Marzo | 0.072 | Normal |

Fuente: elaboración propia.

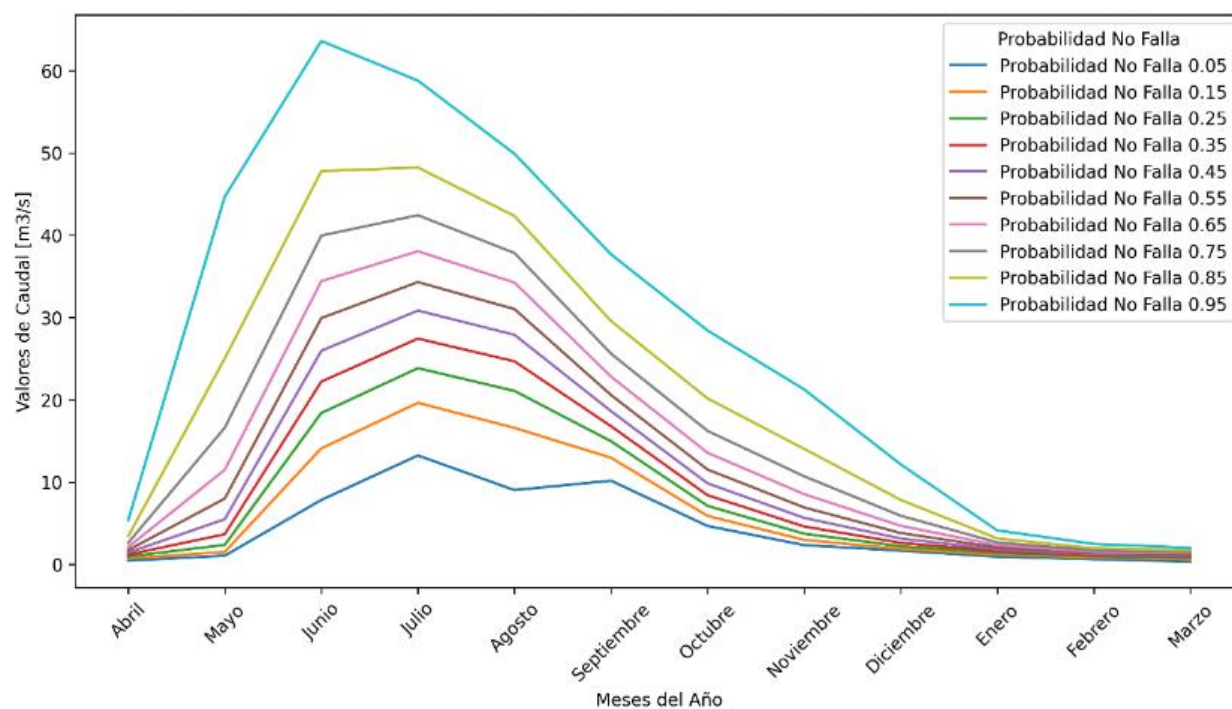


Figura 26 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9106001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 30 Resultados ajustes mensuales estación 9107001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|-------------------------|------------------------|
| Abril | 0.052 | Gumbel |
| Mayo | 0.105 | Gamma |
| Junio | 0.086 | Pearson |
| Julio | 0.079 | Log Normal |
| Agosto | 0.084 | Normal |
| Septiembre | 0.075 | Log Normal |
| Octubre | 0.103 | Log Normal |
| Noviembre | 0.126 | Pearson |
| Diciembre | 0.122 | Gamma |
| Enero | 0.104 | Pearson |
| Febrero | 0.081 | Pearson |
| Marzo | 0.116 | Gamma |

Fuente: elaboración propia.

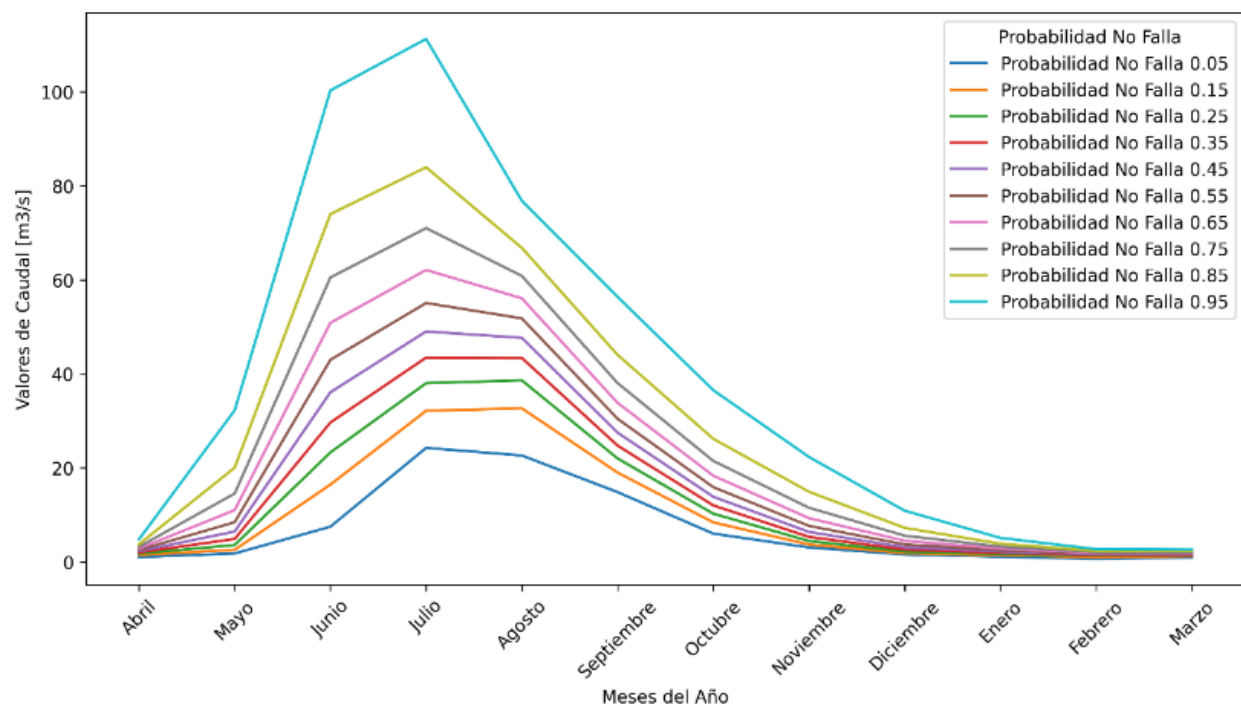


Figura 27 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9107001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 31 Resultados ajustes mensuales estación 9113001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|------------------|-----------------|
| Abril | 0.109 | Pearson |
| Mayo | 0.102 | Pearson |
| Junio | 0.064 | Gumbel |
| Julio | 0.055 | Log Normal |
| Agosto | 0.066 | Gamma |
| Septiembre | 0.078 | Pearson |

| | | |
|------------------|-------|------------|
| Octubre | 0.106 | Pearson |
| Noviembre | 0.1 | Log Normal |
| Diciembre | 0.049 | Gamma |
| Enero | 0.083 | Gumbel |
| Febrero | 0.054 | Pearson |
| Marzo | 0.055 | Log Normal |

Fuente: elaboración propia.

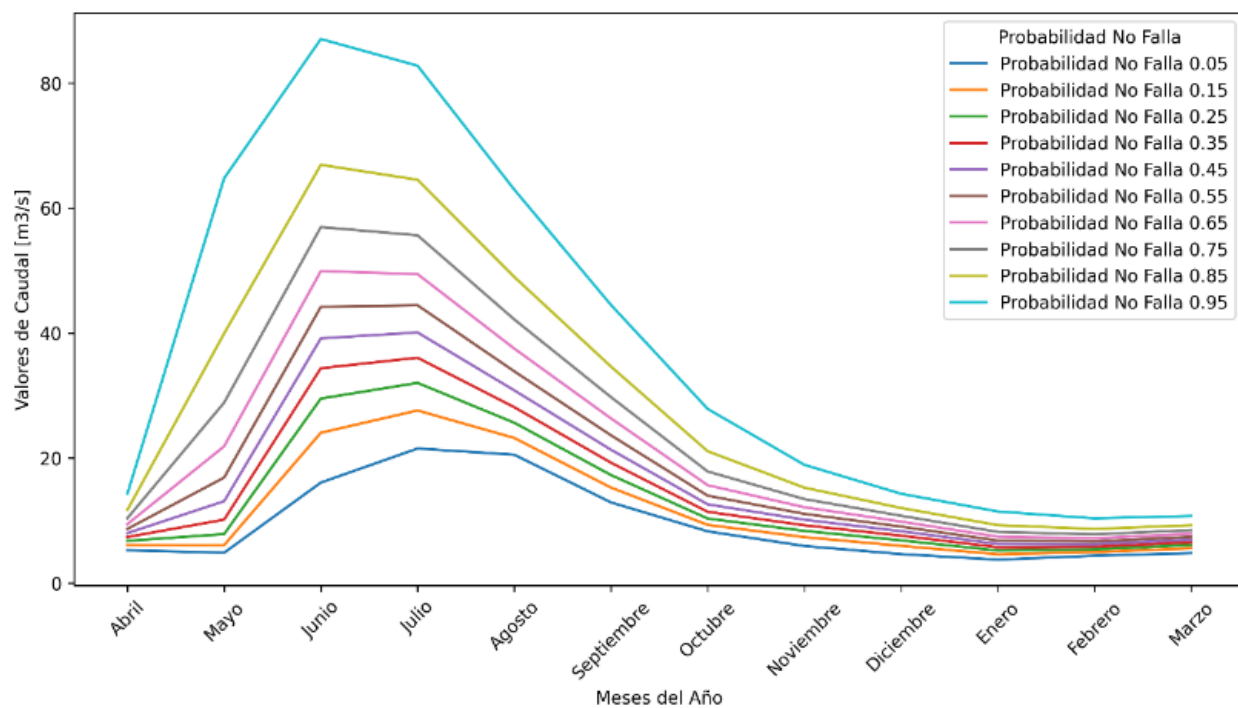


Figura 28 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9113001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 32 Resultados ajustes mensuales estación 9116001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|-------------------------|------------------------|
| Abril | 0.094 | Pearson |
| Mayo | 0.119 | Gamma |
| Junio | 0.073 | Gamma |
| Julio | 0.054 | Gumbel |
| Agosto | 0.097 | Pearson |
| Septiembre | 0.096 | Gumbel |
| Octubre | 0.048 | Log Normal |
| Noviembre | 0.091 | Log Normal |
| Diciembre | 0.112 | Pearson |
| Enero | 0.114 | Log Normal |
| Febrero | 0.093 | Log Normal |
| Marzo | 0.121 | Gumbel |

Fuente: elaboración propia.

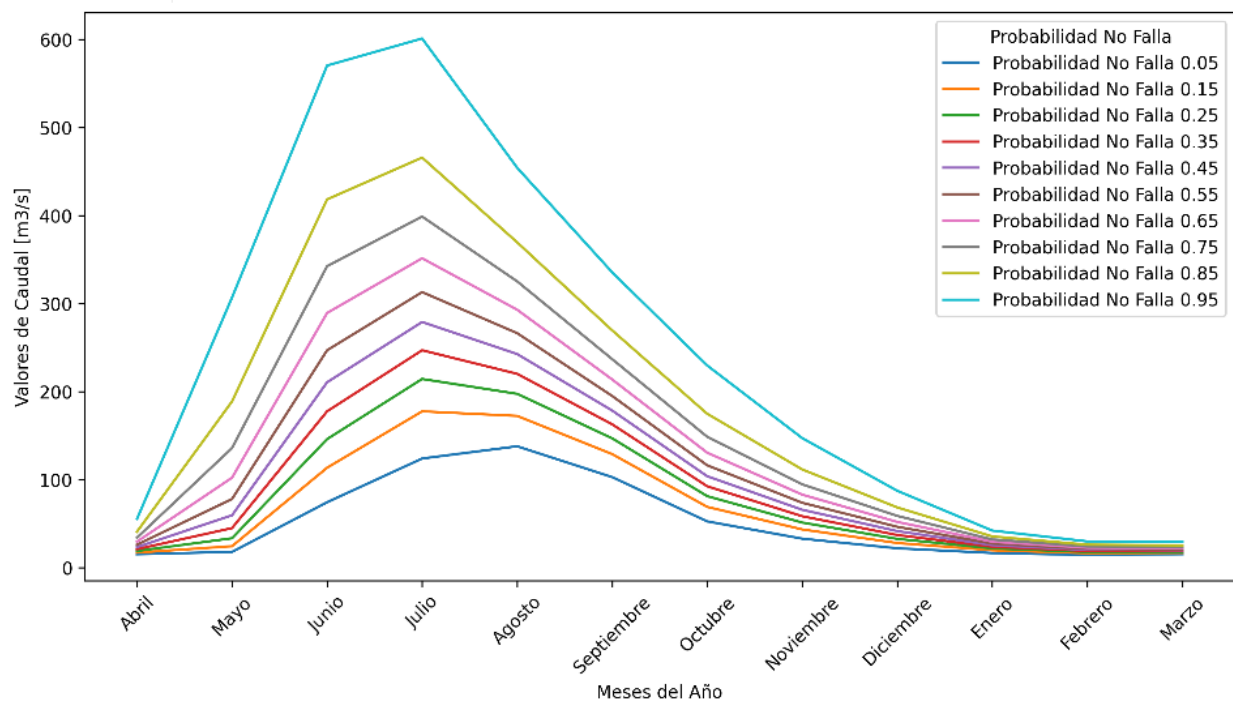


Figura 29 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9116001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 33 Resultados ajustes mensuales estación 9122001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|------------------|-----------------|
| Abril | 0.087 | Log Normal |
| Mayo | 0.086 | Gamma |
| Junio | 0.09 | Gumbel |
| Julio | 0.063 | Gamma |
| Agosto | 0.124 | Normal |
| Septiembre | 0.066 | Gumbel |

| | | |
|------------------|-------|------------|
| Octubre | 0.067 | Gumbel |
| Noviembre | 0.059 | Gamma |
| Diciembre | 0.056 | Log Normal |
| Enero | 0.098 | Normal |
| Febrero | 0.082 | Pearson |
| Marzo | 0.083 | Normal |

Fuente: elaboración propia.

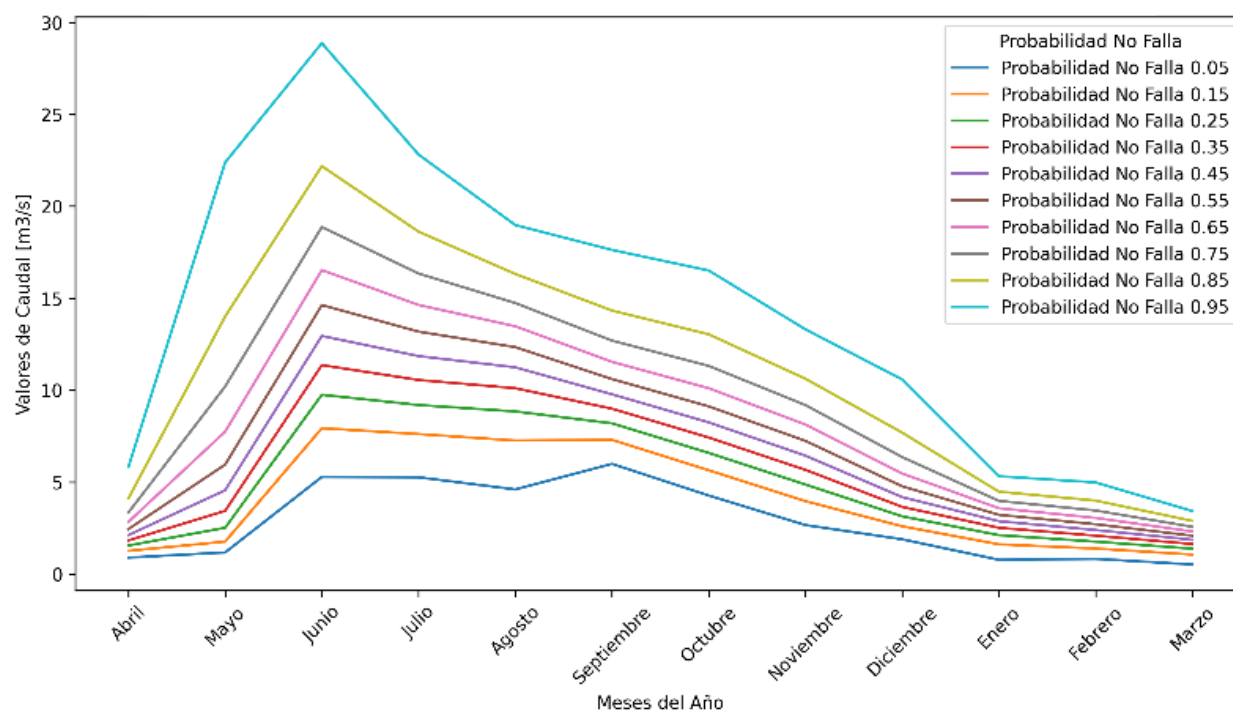


Figura 30 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9122001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 34. Resultados ajustes mensuales estación 9123001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|-------------------------|------------------------|
| Abril | 0.114 | Gumbel |
| Mayo | 0.088 | Gamma |
| Junio | 0.086 | Pearson |
| Julio | 0.055 | Gamma |
| Agosto | 0.102 | Normal |
| Septiembre | 0.065 | Gumbel |
| Octubre | 0.041 | Gumbel |
| Noviembre | 0.077 | Gamma |
| Diciembre | 0.07 | Gamma |
| Enero | 0.076 | Log Normal |
| Febrero | 0.088 | Log Normal |
| Marzo | 0.078 | Normal |

Fuente: elaboración propia.

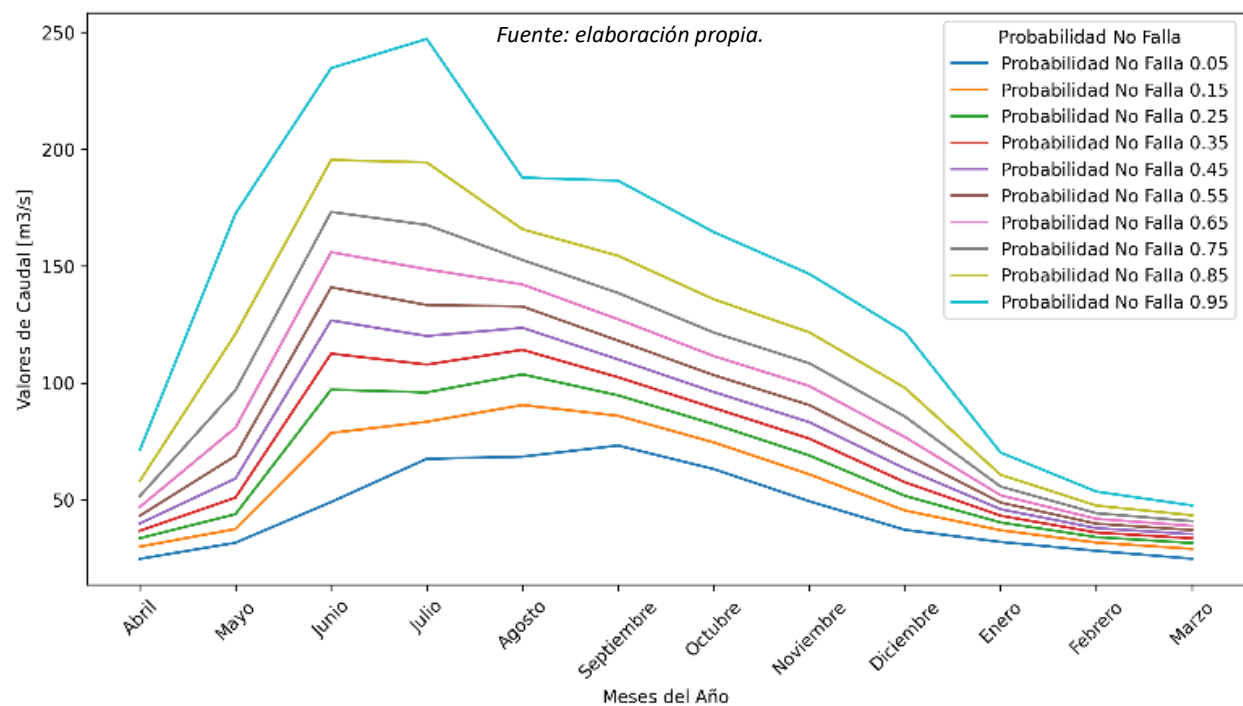


Figura 31 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9123001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 35 Resultados ajustes mensuales estación 9127001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|------------|------------------|-----------------|
| Abril | 0.109 | Gamma |
| Mayo | 0.077 | Pearson |
| Junio | 0.051 | Pearson |
| Julio | 0.061 | Gumbel |
| Agosto | 0.103 | Normal |
| Septiembre | 0.079 | Gumbel |

| | | |
|------------------|-------|---------|
| Octubre | 0.076 | Gamma |
| Noviembre | 0.084 | Pearson |
| Diciembre | 0.077 | Pearson |
| Enero | 0.093 | Gamma |
| Febrero | 0.042 | Gumbel |
| Marzo | 0.099 | Gumbel |

Fuente: elaboración propia.

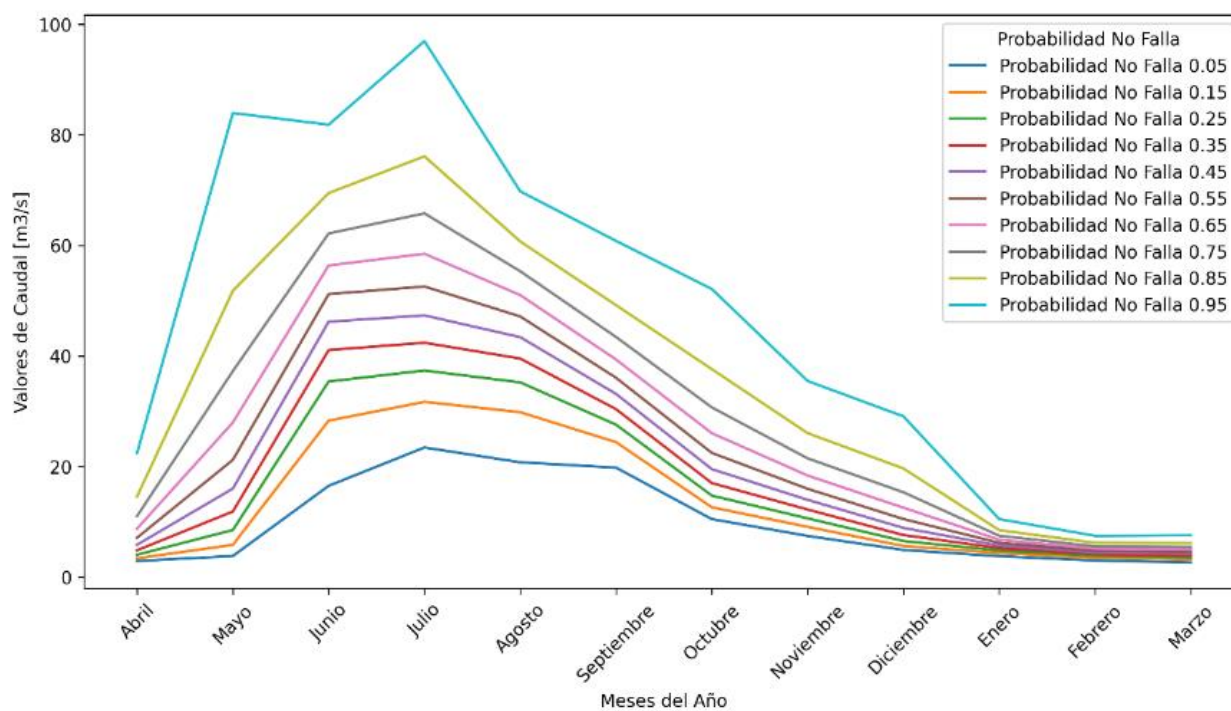


Figura 32 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9127001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 36. Resultados ajustes mensuales estación 9129002.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|-------------------------|------------------------|
| Abril | 0.08 | Gamma |
| Mayo | 0.077 | Log Normal |
| Junio | 0.065 | Gamma |
| Julio | 0.062 | Log Normal |
| Agosto | 0.087 | Normal |
| Septiembre | 0.084 | Gamma |
| Octubre | 0.067 | Log Normal |
| Noviembre | 0.055 | Log Normal |
| Diciembre | 0.102 | Gamma |
| Enero | 0.082 | Pearson |
| Febrero | 0.067 | Gumbel |
| Marzo | 0.057 | Pearson |

Fuente: elaboración propia.

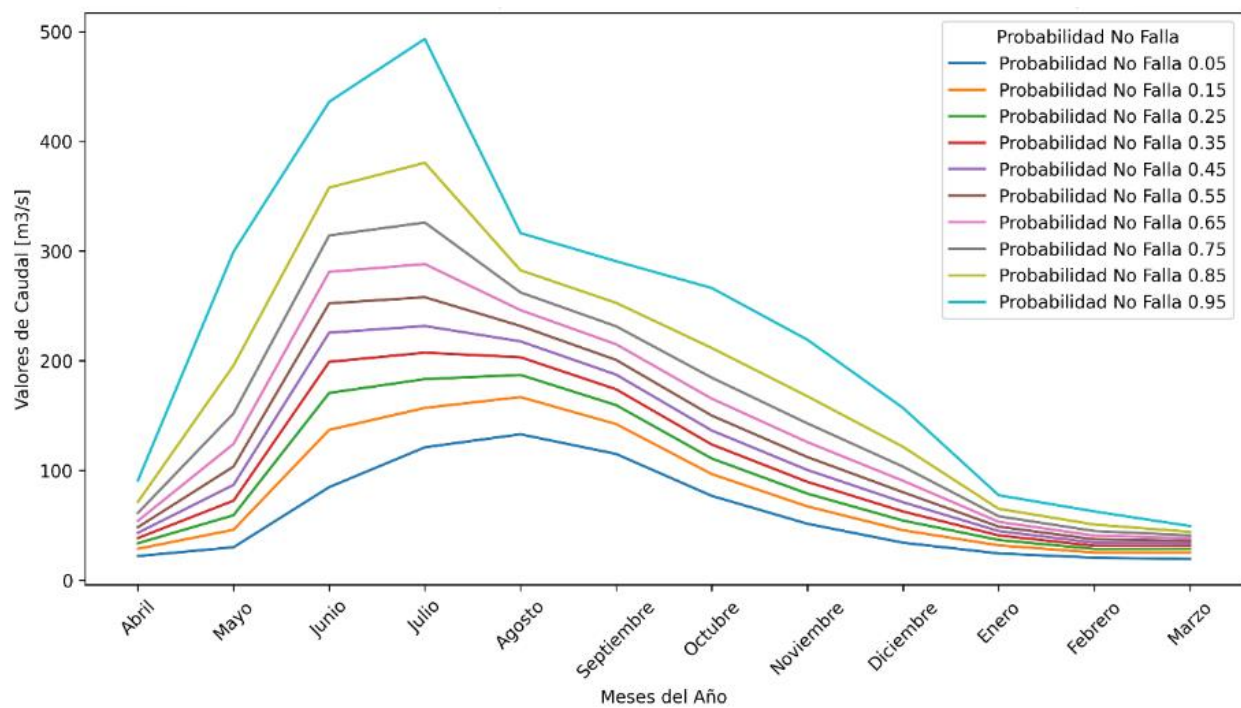


Figura 33 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9129002 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 37 Resultados ajustes mensuales estación 9131001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|------------------|-----------------|
| Abril | 0.089 | Gamma |
| Mayo | 0.1 | Pearson |
| Junio | 0.087 | Log Normal |
| Julio | 0.084 | Normal |
| Agosto | 0.084 | Pearson |
| Septiembre | 0.058 | Gamma |

| | | |
|------------------|-------|------------|
| Octubre | 0.054 | Log Normal |
| Noviembre | 0.061 | Gumbel |
| Diciembre | 0.069 | Pearson |
| Enero | 0.12 | Pearson |
| Febrero | 0.105 | Gumbel |
| Marzo | 0.063 | Log Normal |

Fuente: elaboración propia.

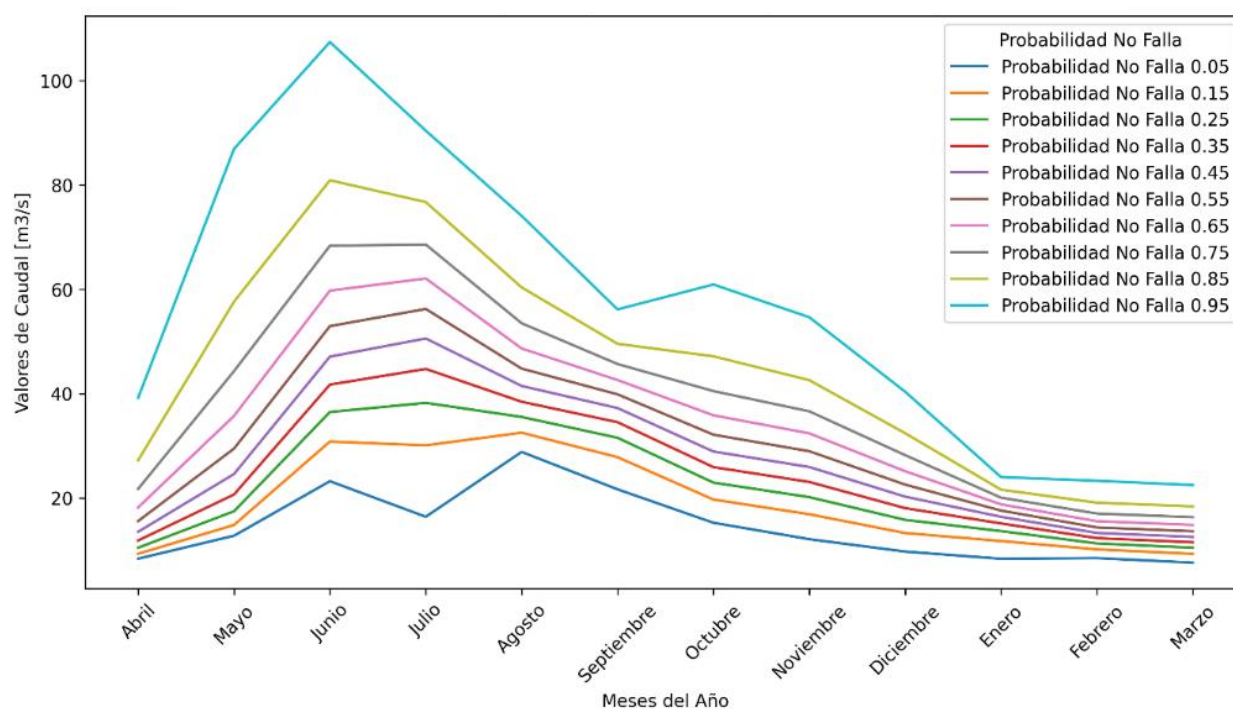


Figura 34 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9131001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 38 Resultados ajustes mensuales estación 9134001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|-------------------------|------------------------|
| Abril | 0.082 | Pearson |
| Mayo | 0.08 | Log Normal |
| Junio | 0.086 | Pearson |
| Julio | 0.076 | Log Normal |
| Agosto | 0.086 | Gamma |
| Septiembre | 0.058 | Pearson |
| Octubre | 0.081 | Gumbel |
| Noviembre | 0.08 | Pearson |
| Diciembre | 0.134 | Log Normal |
| Enero | 0.104 | Normal |
| Febrero | 0.061 | Gamma |
| Marzo | 0.145 | Normal |

Fuente: elaboración propia.

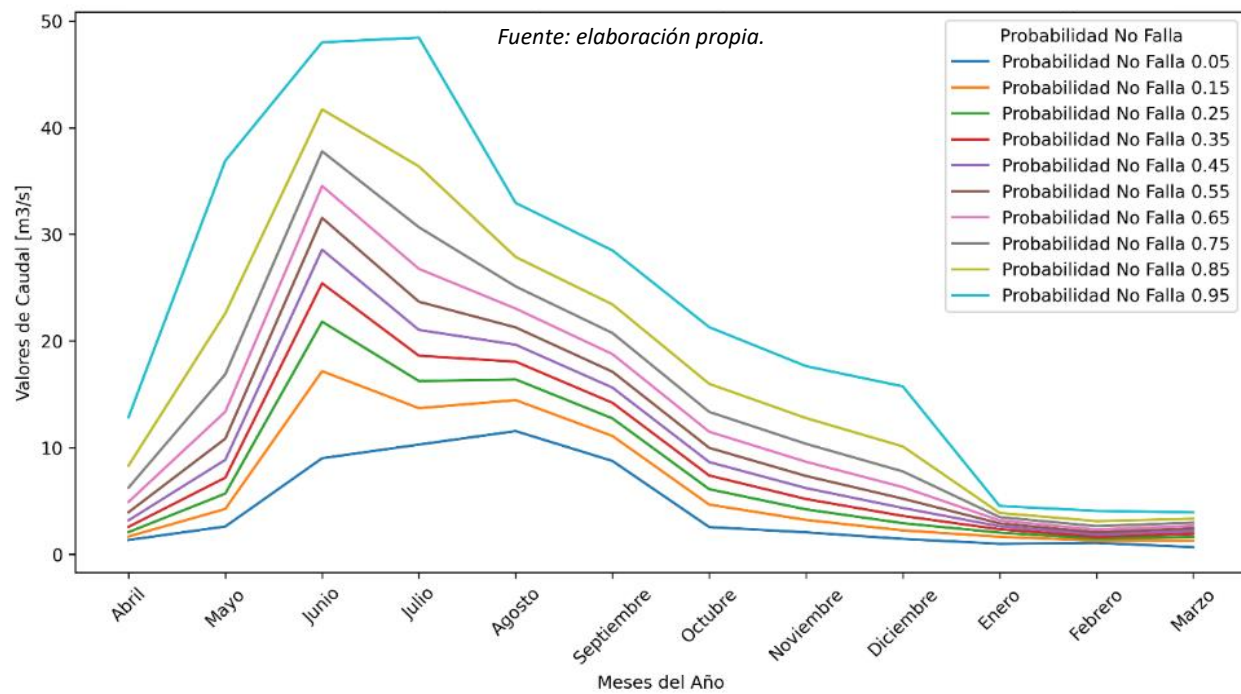


Figura 35 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9134001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 39 Resultados ajustes mensuales estación 9135001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|------------|------------------|-----------------|
| Abril | 0.067 | Gamma |
| Mayo | 0.082 | Pearson |
| Junio | 0.069 | Normal |
| Julio | 0.063 | Pearson |
| Agosto | 0.077 | Pearson |
| Septiembre | 0.143 | Gumbel |

| | | |
|------------------|-------|------------|
| Octubre | 0.058 | Log Normal |
| Noviembre | 0.059 | Gumbel |
| Diciembre | 0.076 | Gamma |
| Enero | 0.108 | Normal |
| Febrero | 0.078 | Gumbel |
| Marzo | 0.07 | Gamma |

Fuente: elaboración propia.

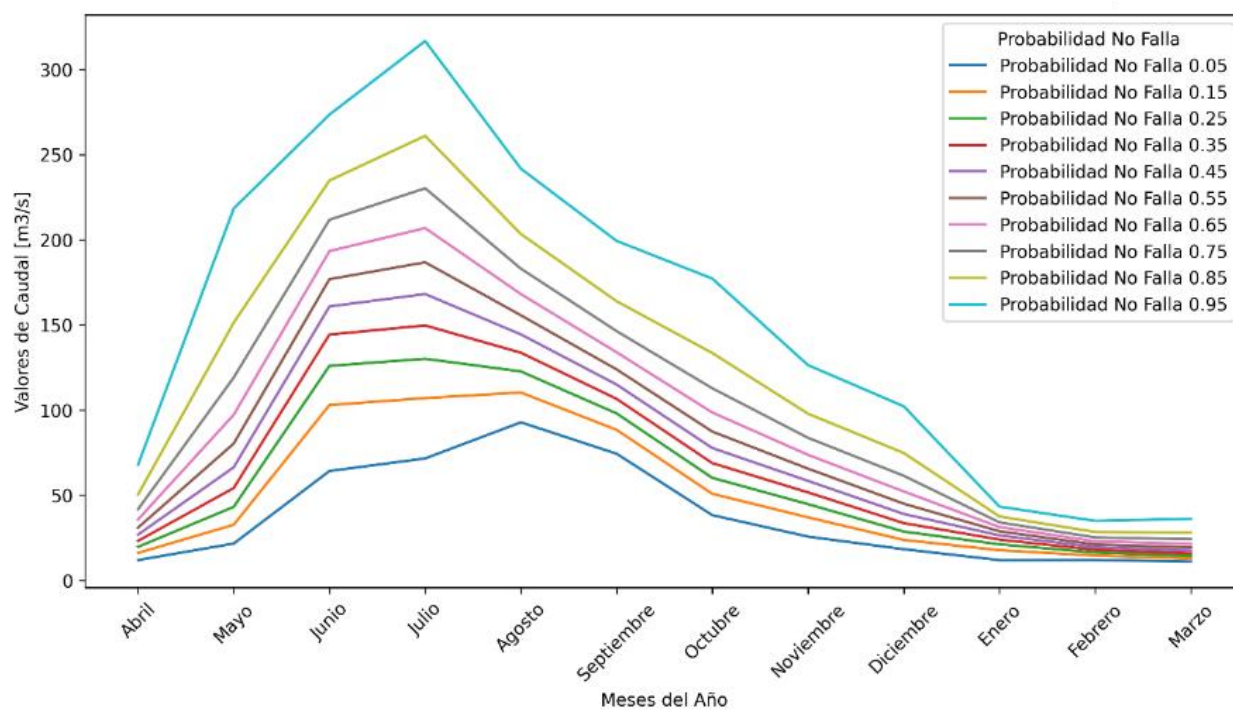


Figura 36 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9135001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 40 Resultados ajustes mensuales estación 9140001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|-------------------------|------------------------|
| Abril | 0.104 | Pearson |
| Mayo | 0.088 | Pearson |
| Junio | 0.095 | Gumbel |
| Julio | 0.077 | Normal |
| Agosto | 0.068 | Pearson |
| Septiembre | 0.076 | Gumbel |
| Octubre | 0.086 | Gamma |
| Noviembre | 0.089 | Pearson |
| Diciembre | 0.075 | Log Normal |
| Enero | 0.086 | Gumbel |
| Febrero | 0.105 | Pearson |
| Marzo | 0.077 | Gumbel |

Fuente: elaboración propia.

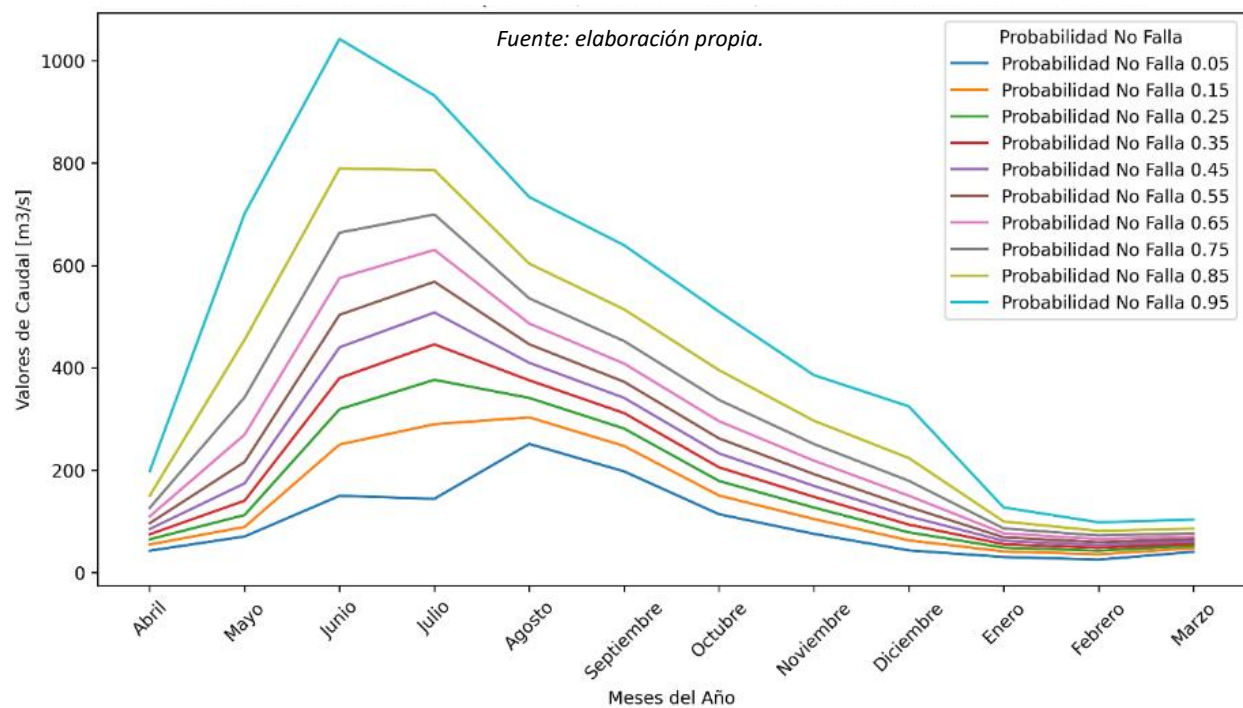


Figura 37 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9140001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 41 Resultados ajustes mensuales estación 9402001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|------------------|-----------------|
| Abril | 0.068 | Gamma |
| Mayo | 0.099 | Pearson |
| Junio | 0.083 | Gamma |
| Julio | 0.082 | Log Normal |
| Agosto | 0.109 | Gamma |
| Septiembre | 0.07 | Gumbel |
| Octubre | 0.117 | Log Normal |

| | | |
|------------------|-------|------------|
| Noviembre | 0.063 | Log Normal |
| Diciembre | 0.036 | Gumbel |
| Enero | 0.055 | Gumbel |
| Febrero | 0.082 | Pearson |
| Marzo | 0.088 | Gamma |

Fuente: elaboración propia.

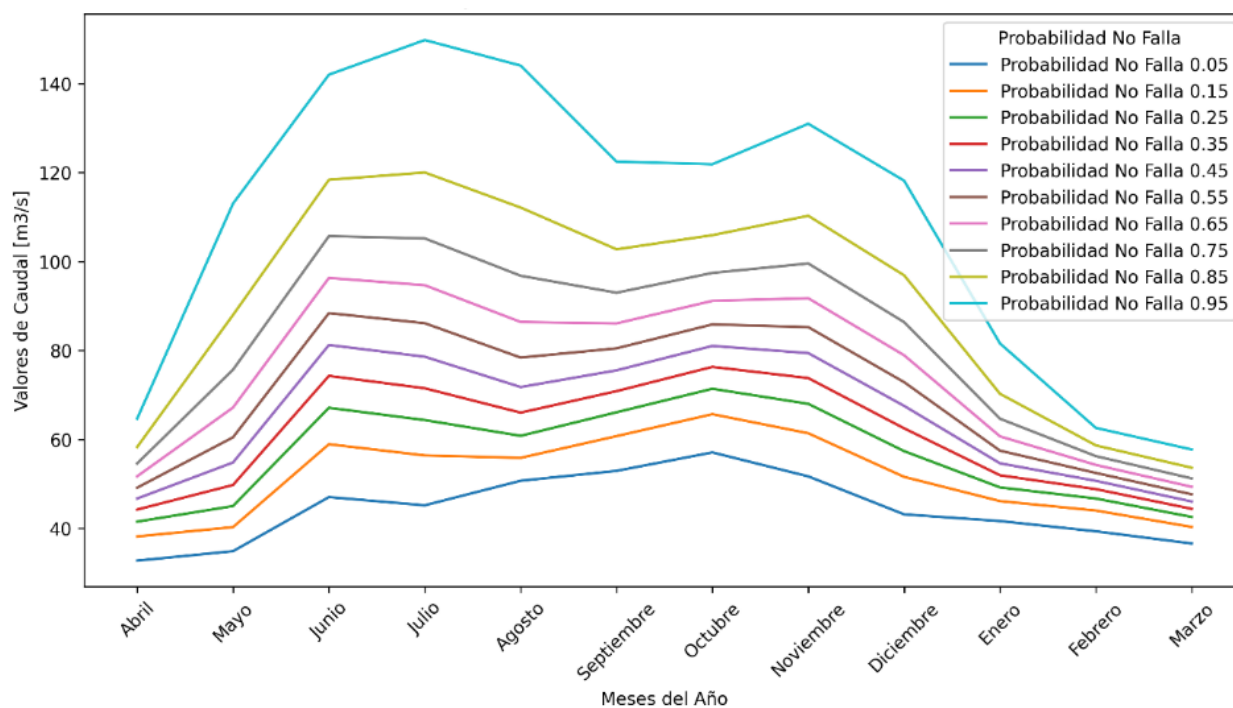


Figura 38 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9402001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 42. Resultados ajustes mensuales estación 9404001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|-----------------------------|------------------------|
| Abril | 0.104 | Pearson |
| Mayo | 0.088 | Pearson |
| Junio | 0.095 | Gumbel |
| Julio | 0.077 | Normal |
| Agosto | 0.068 | Pearson |
| Septiembre | 0.076 | Gumbel |
| Octubre | 0.086 | Gamma |
| Noviembre | 0.089 | Pearson |
| Diciembre | 0.075 | Log Normal |
| Enero | 0.086 | Gumbel |
| Febrero | 0.105 | Pearson |
| Marzo | 0.077 | Gumbel |

Fuente: elaboración propia.

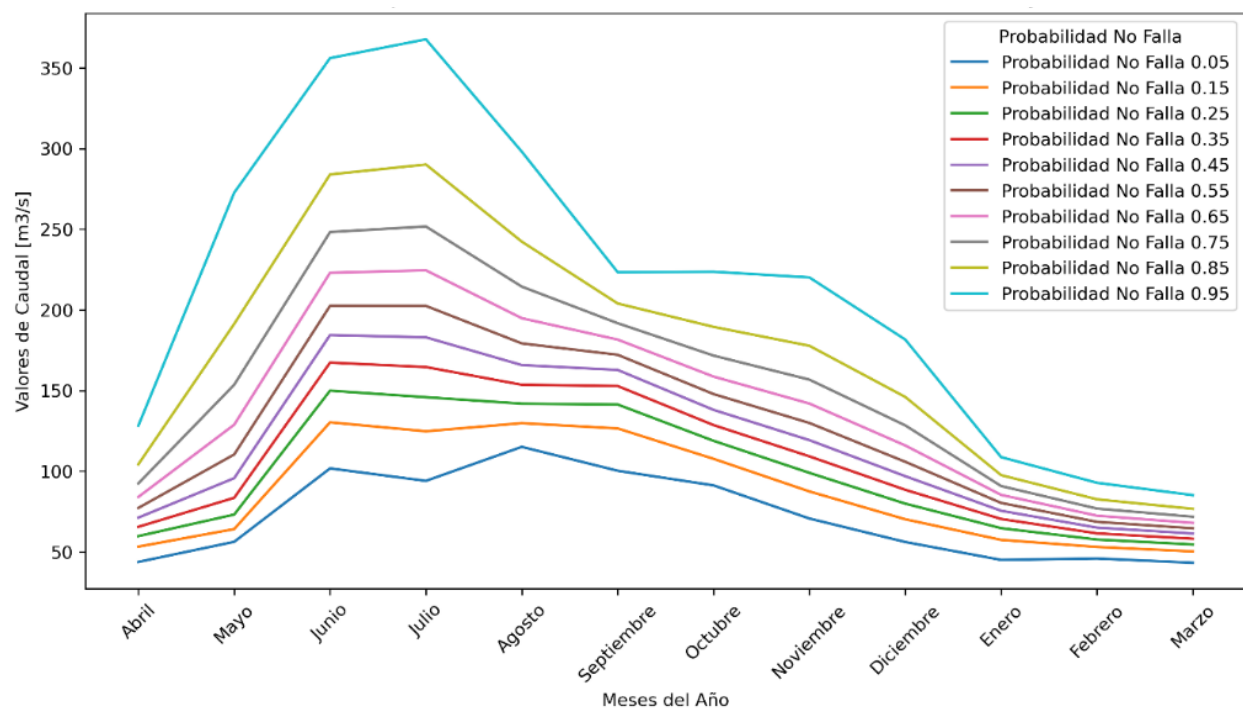


Figura 39 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9404001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 43. Resultados ajustes mensuales estación 9412001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|------------------|-----------------|
| Abril | 0.067 | Gumbel |
| Mayo | 0.068 | Gamma |
| Junio | 0.084 | Pearson |
| Julio | 0.076 | Gamma |
| Agosto | 0.064 | Gamma |
| Septiembre | 0.124 | Pearson |

| | | |
|------------------|-------|---------|
| Octubre | 0.078 | Pearson |
| Noviembre | 0.068 | Gamma |
| Diciembre | 0.064 | Pearson |
| Enero | 0.07 | Gamma |
| Febrero | 0.101 | Gumbel |
| Marzo | 0.103 | Pearson |

Fuente: elaboración propia.

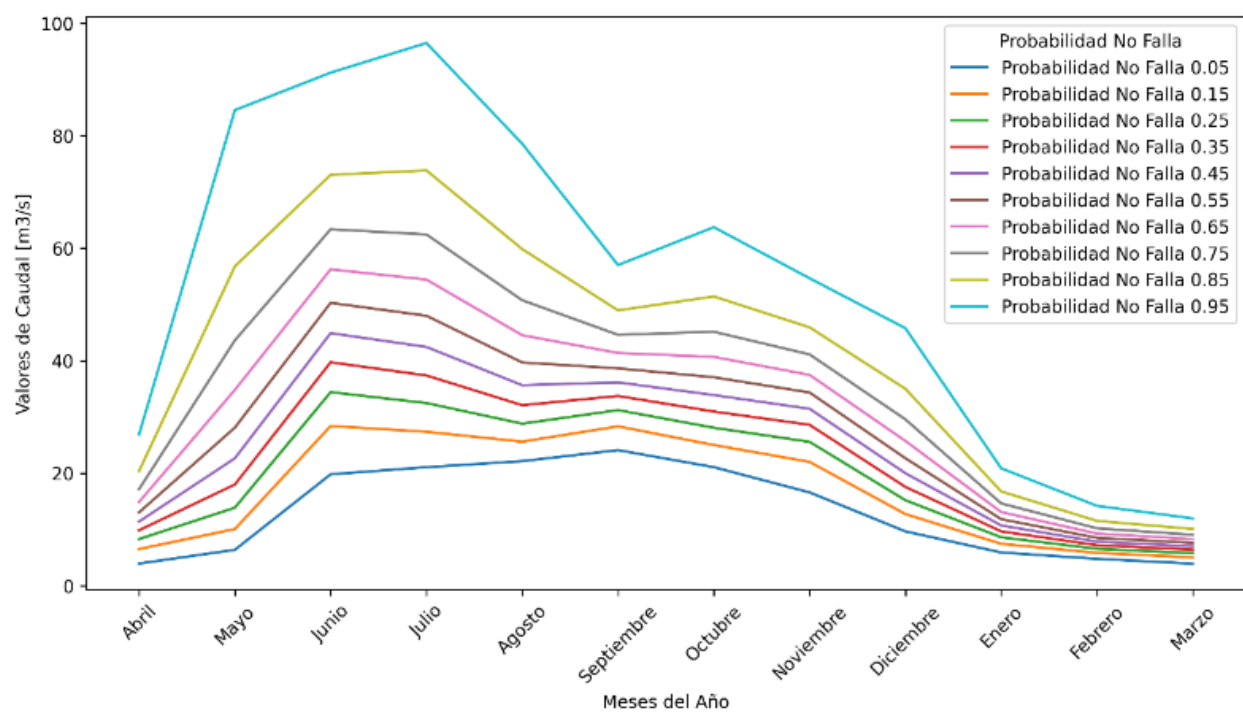


Figura 40 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9412001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 44 Resultados ajustes mensuales estación 9414001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|-------------------------|------------------------|
| Abril | 0.077 | Pearson |
| Mayo | 0.063 | Gamma |
| Junio | 0.075 | Pearson |
| Julio | 0.083 | Gamma |
| Agosto | 0.076 | Pearson |
| Septiembre | 0.107 | Gamma |
| Octubre | 0.084 | Gumbel |
| Noviembre | 0.077 | Pearson |
| Diciembre | 0.06 | Gamma |
| Enero | 0.045 | Gamma |
| Febrero | 0.103 | Pearson |
| Marzo | 0.09 | Log Normal |

Fuente: elaboración propia.

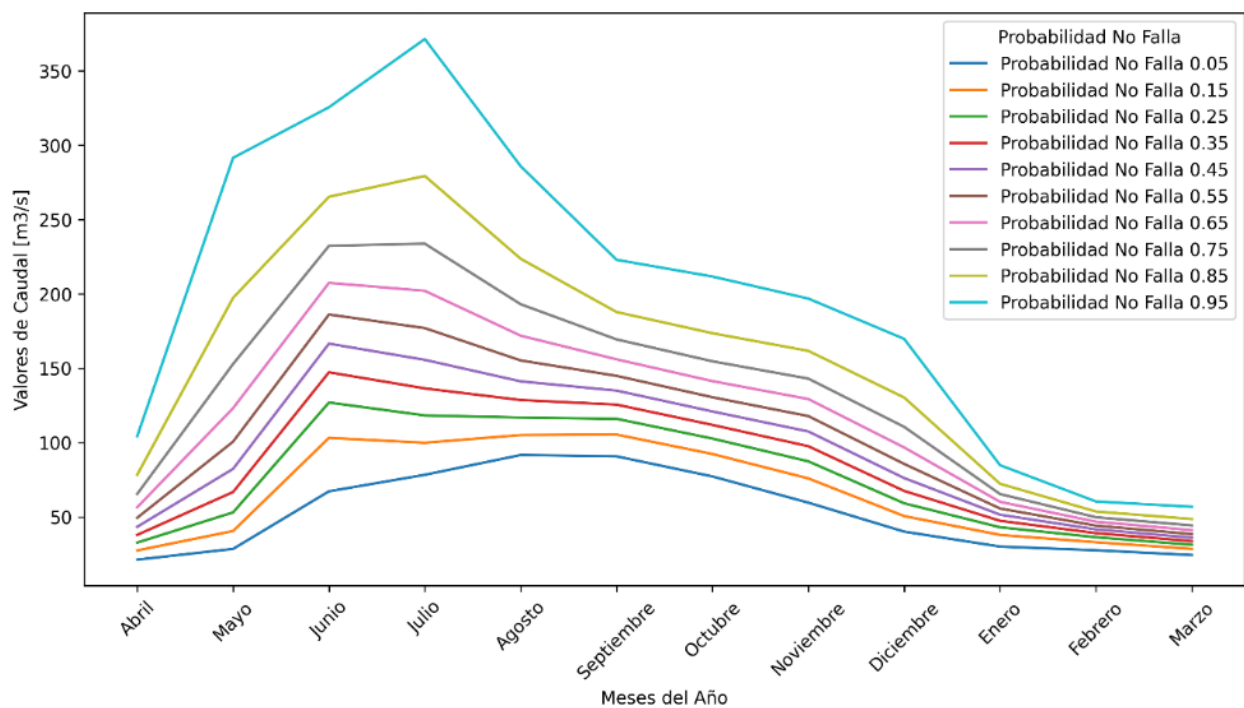


Figura 41 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9414001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 45 Resultados ajustes mensuales estación 9416001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|------------------|-----------------|
| Abril | 0.115 | Normal |
| Mayo | 0.077 | Pearson |
| Junio | 0.081 | Pearson |
| Julio | 0.089 | Log Normal |
| Agosto | 0.092 | Log Normal |
| Septiembre | 0.123 | Pearson |

| | | |
|------------------|-------|------------|
| Octubre | 0.081 | Gumbel |
| Noviembre | 0.09 | Normal |
| Diciembre | 0.098 | Log Normal |
| Enero | 0.084 | Gamma |
| Febrero | 0.07 | Gamma |
| Marzo | 0.083 | Pearson |

Fuente: elaboración propia.

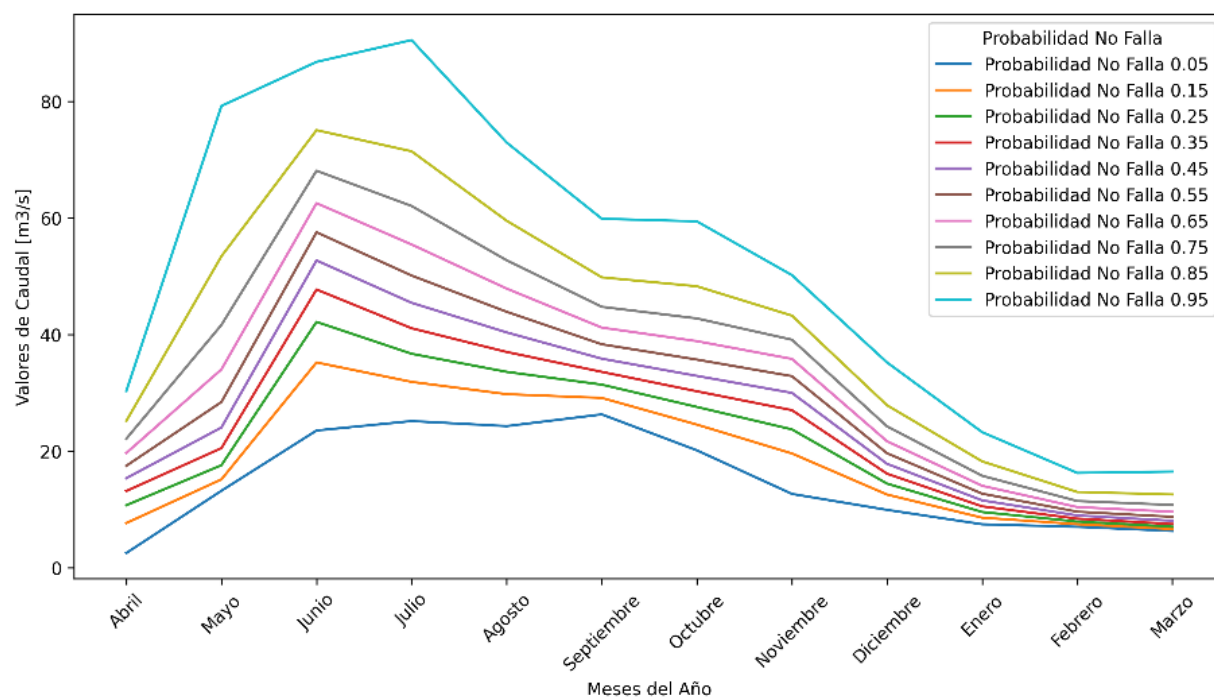


Figura 42 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9416001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 46 Resultados ajustes mensuales estación 9420001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|-------------------------|------------------------|
| Abril | 0.082 | Gumbel |
| Mayo | 0.067 | Pearson |
| Junio | 0.082 | Gumbel |
| Julio | 0.058 | Pearson |
| Agosto | 0.053 | Gumbel |
| Septiembre | 0.078 | Gumbel |
| Octubre | 0.055 | Log Normal |
| Noviembre | 0.057 | Pearson |
| Diciembre | 0.066 | Gamma |
| Enero | 0.111 | Gamma |
| Febrero | 0.082 | Log Normal |
| Marzo | 0.139 | Gumbel |

Fuente: elaboración propia.

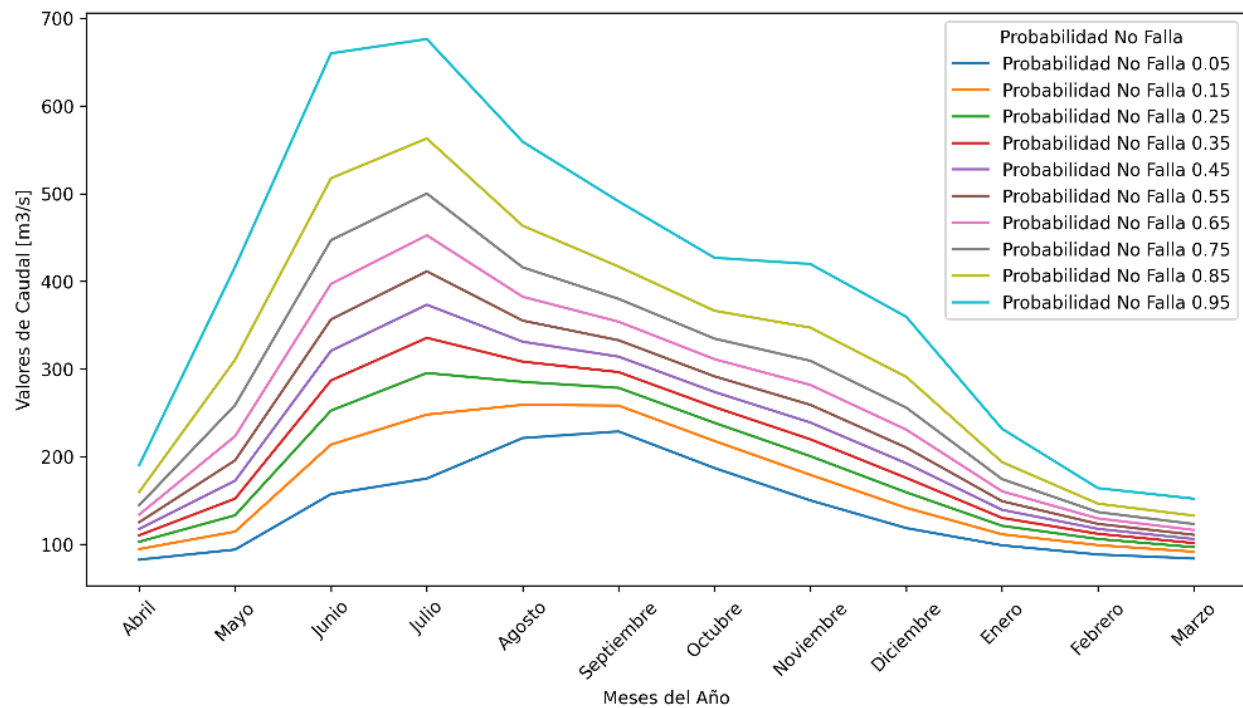


Figura 43 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9420001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 47 Resultados ajustes mensuales estación 9423001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|------------------|-----------------|
| Abril | 0.11 | Pearson |
| Mayo | 0.109 | Gamma |
| Junio | 0.058 | Gamma |
| Julio | 0.08 | Normal |
| Agosto | 0.106 | Pearson |
| Septiembre | 0.069 | Gumbel |

| | | |
|------------------|-------|---------|
| Octubre | 0.093 | Pearson |
| Noviembre | 0.06 | Pearson |
| Diciembre | 0.094 | Pearson |
| Enero | 0.085 | Normal |
| Febrero | 0.059 | Pearson |
| Marzo | 0.139 | Gamma |

Fuente: elaboración propia.

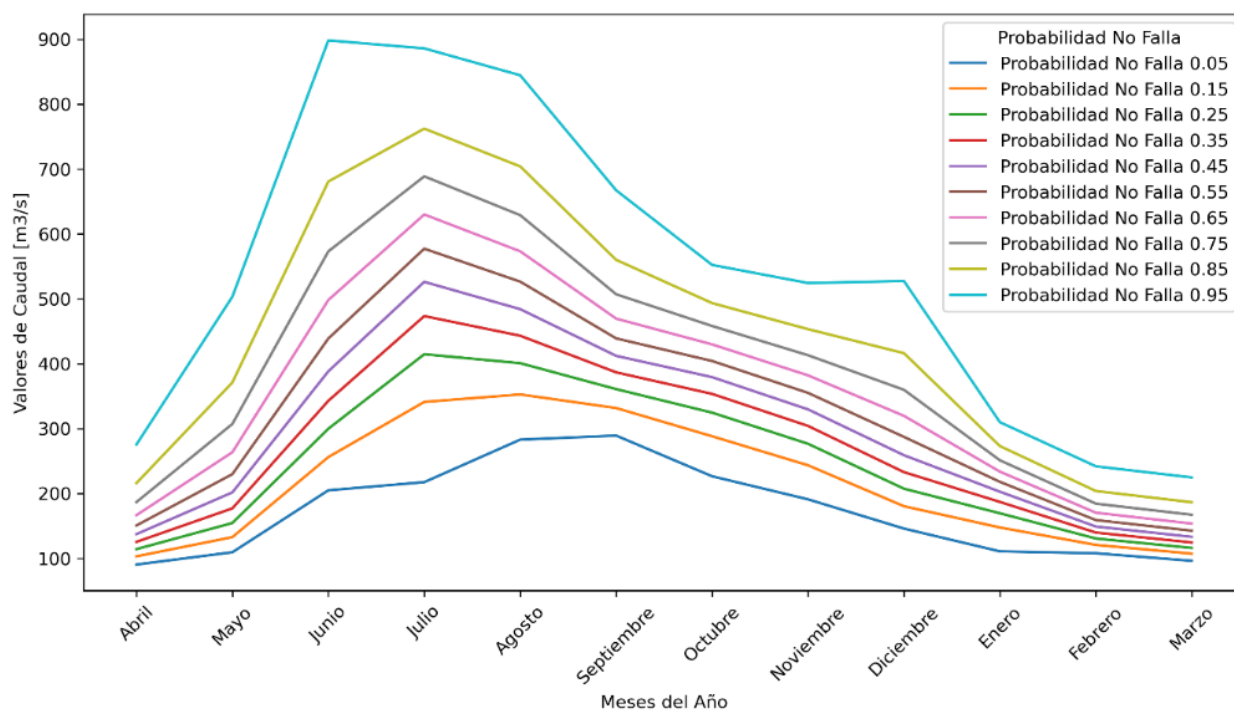


Figura 44 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9423001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 48 Resultados ajustes mensuales estación 9433001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|-------------------------|------------------------|
| Abril | 0.087 | Pearson |
| Mayo | 0.068 | Pearson |
| Junio | 0.097 | Log Normal |
| Julio | 0.109 | Normal |
| Agosto | 0.079 | Gamma |
| Septiembre | 0.082 | Pearson |
| Octubre | 0.071 | Gamma |
| Noviembre | 0.128 | Pearson |
| Diciembre | 0.088 | Pearson |
| Enero | 0.096 | Gumbel |
| Febrero | 0.08 | Log Normal |
| Marzo | 0.071 | Gumbel |

Fuente: elaboración propia.

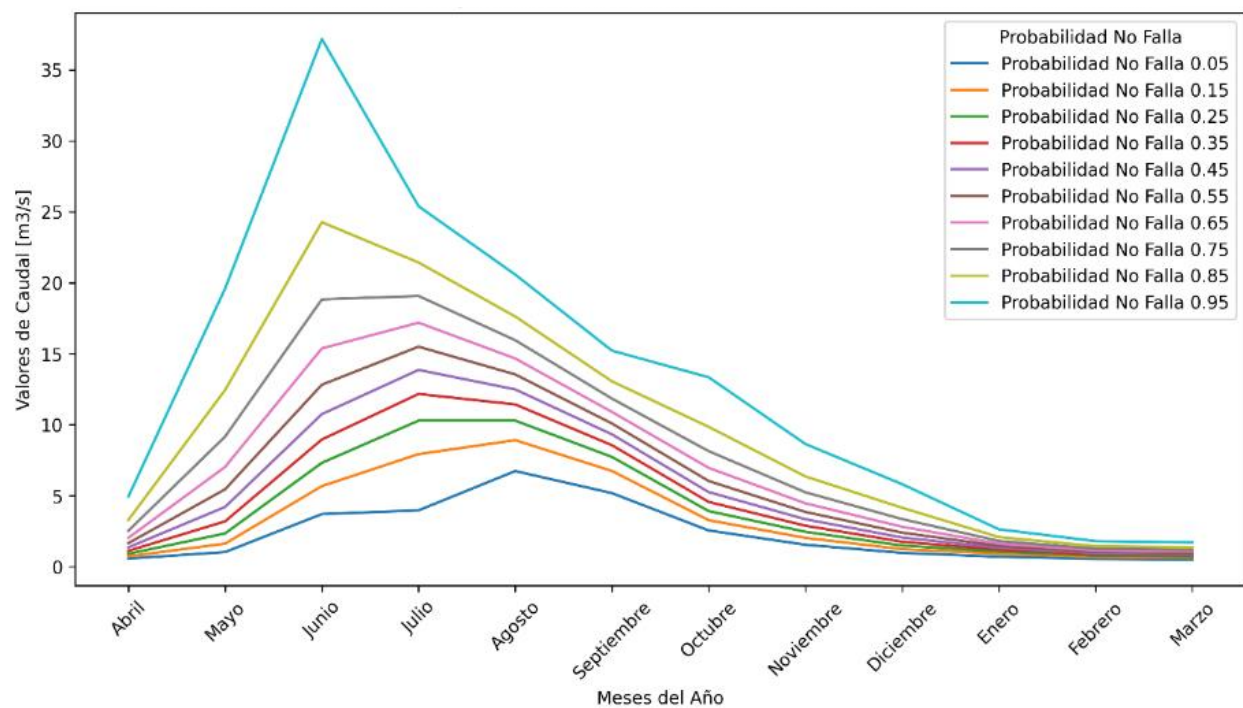


Figura 45 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9433001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 49 Resultados ajustes mensuales estación 9434001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|------------------|-----------------|
| Abril | 0.061 | Pearson |
| Mayo | 0.088 | Pearson |
| Junio | 0.099 | Log Normal |
| Julio | 0.048 | Gamma |
| Agosto | 0.074 | Log Normal |
| Septiembre | 0.05 | Gamma |

| | | |
|------------------|-------|------------|
| Octubre | 0.093 | Gamma |
| Noviembre | 0.083 | Gamma |
| Diciembre | 0.063 | Log Normal |
| Enero | 0.06 | Log Normal |
| Febrero | 0.15 | Gumbel |
| Marzo | 0.079 | Gumbel |

Fuente: elaboración propia.

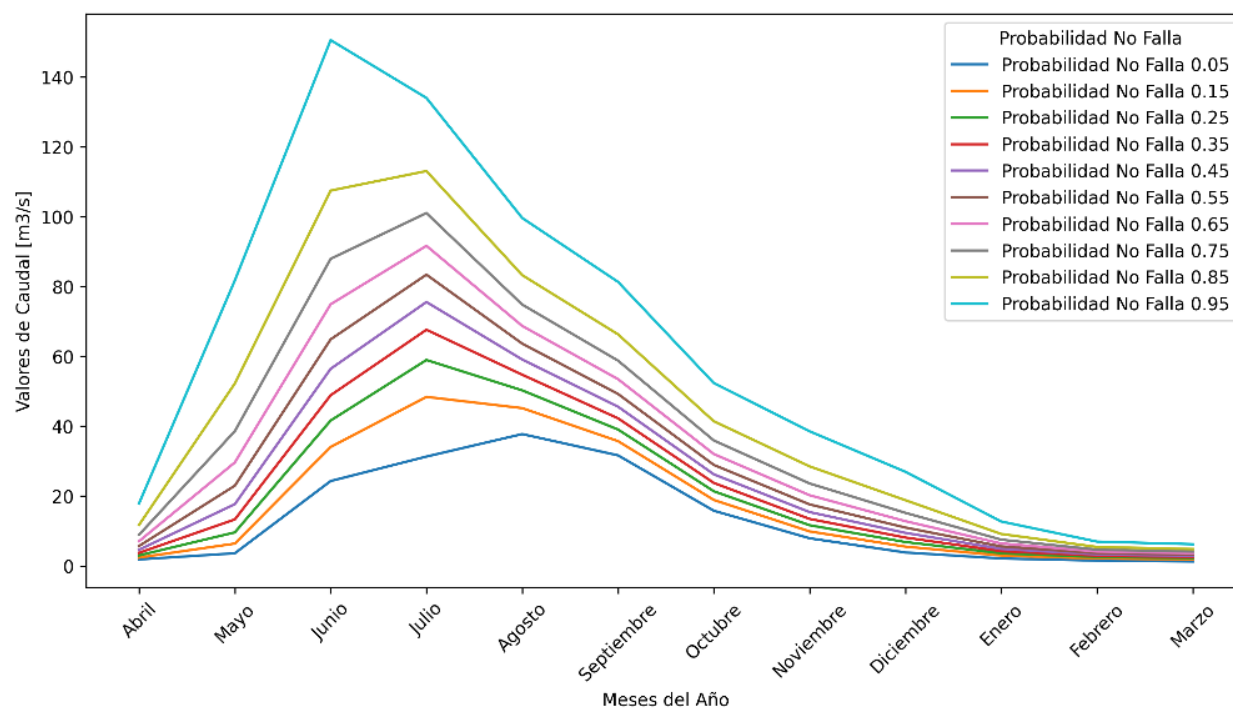


Figura 46 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9434001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 50 Resultados ajustes mensuales estación 9436001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|-------------------------|------------------------|
| Abril | 0.094 | Log Normal |
| Mayo | 0.094 | Pearson |
| Junio | 0.143 | Normal |
| Julio | 0.083 | Normal |
| Agosto | 0.075 | Log Normal |
| Septiembre | 0.062 | Gumbel |
| Octubre | 0.068 | Log Normal |
| Noviembre | 0.091 | Gamma |
| Diciembre | 0.083 | Log Normal |
| Enero | 0.082 | Pearson |
| Febrero | 0.122 | Log Normal |
| Marzo | 0.101 | Pearson |

Fuente: elaboración propia.

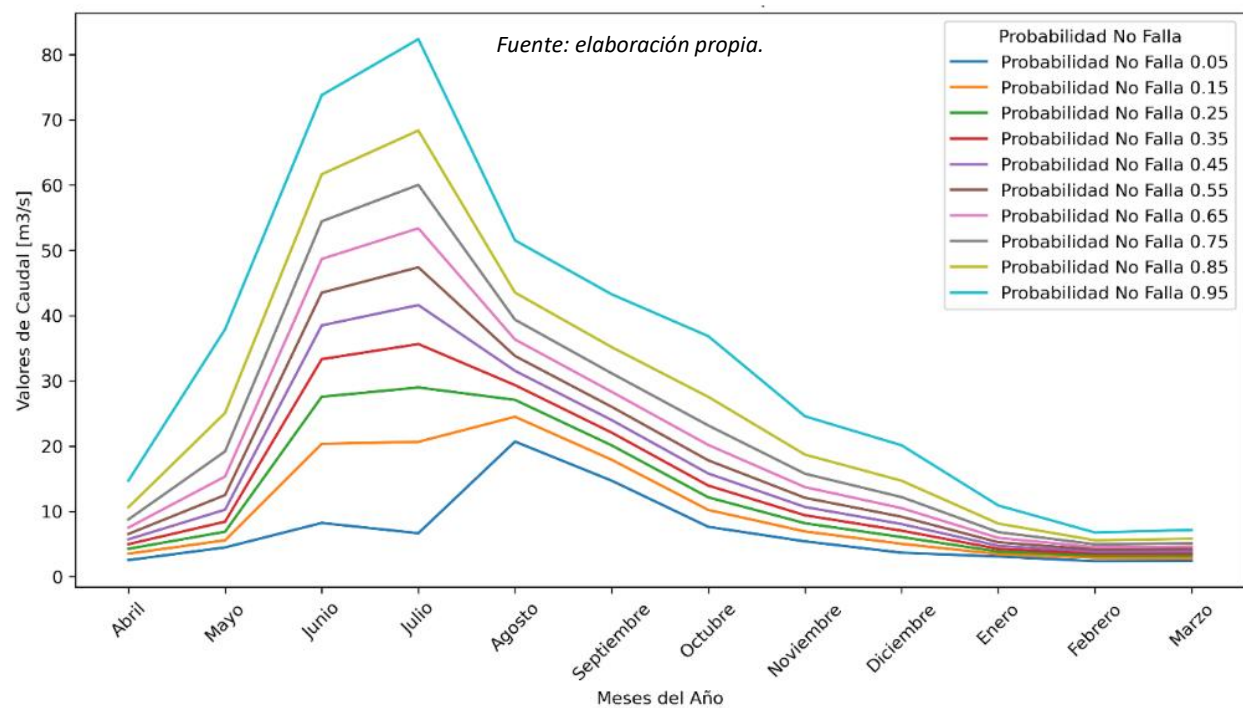


Figura 47 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9436001 para distintas probabilidades de no falla.

Tabla 51 Resultados ajustes mensuales estación 9437001.

| Mes | Menor Diferencia | Método Efectivo |
|-------------------|------------------|-----------------|
| Abril | 0.064 | Gumbel |
| Mayo | 0.088 | Log Normal |
| Junio | 0.117 | Pearson |
| Julio | 0.076 | Gumbel |
| Agosto | 0.076 | Gumbel |
| Septiembre | 0.099 | Log Normal |

| | | |
|------------------|-------|---------|
| Octubre | 0.055 | Gumbel |
| Noviembre | 0.051 | Gamma |
| Diciembre | 0.067 | Gamma |
| Enero | 0.102 | Gumbel |
| Febrero | 0.054 | Normal |
| Marzo | 0.079 | Pearson |

Fuente: elaboración propia.

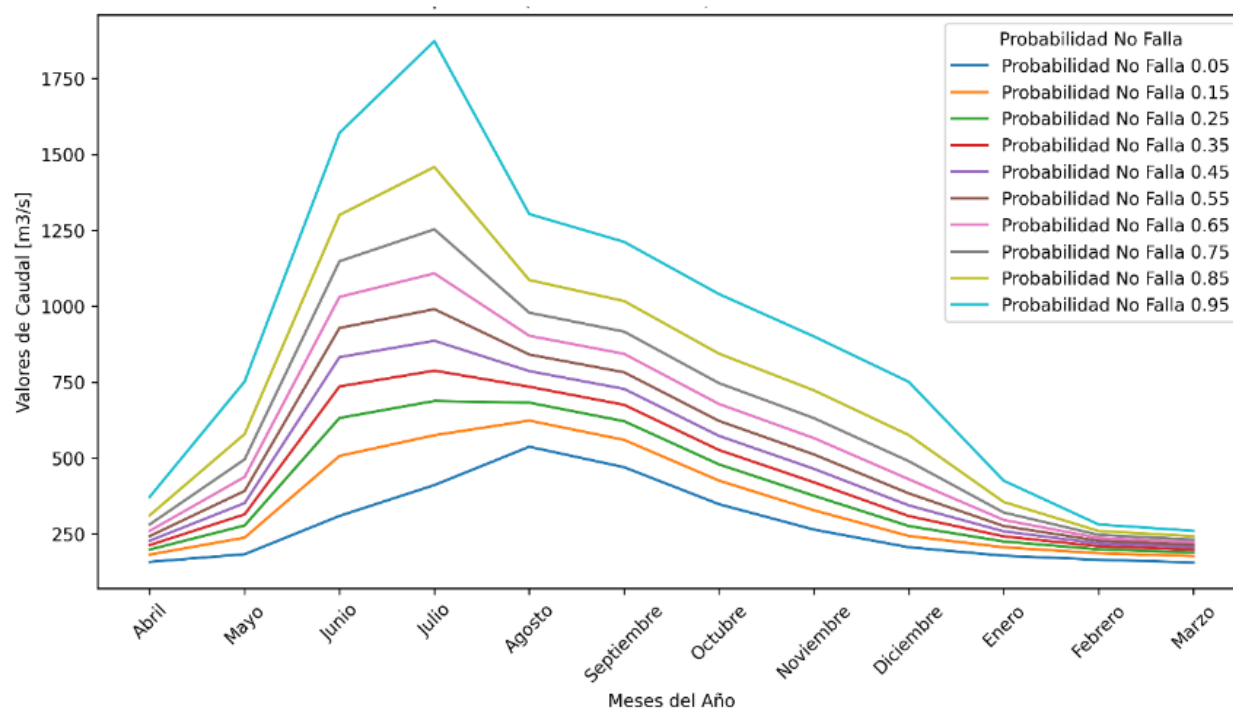


Figura 48 Curvas de caudal mensual estimado en la estación 9437001 para distintas probabilidades de no falla.

Anexo B.

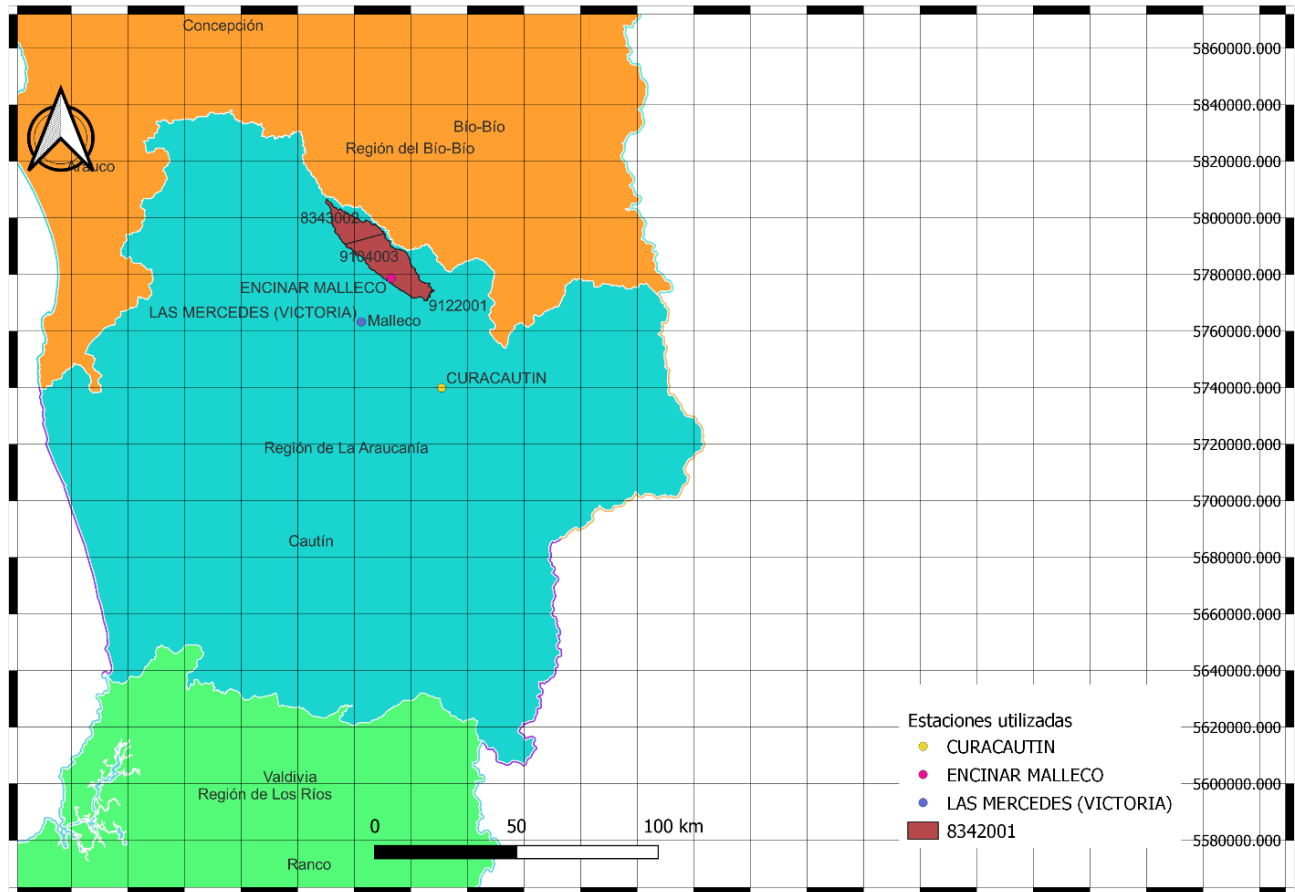


Figura 49 Delimitación de la cuenca del río Renaico en Longitudinal y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 52 Áreas de influencia y ponderación de estaciones fluviométricas en la cuenca del río Renaico para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km ² | Ponderación |
|------------|----------------------|-------------|
| 8343002 | 133.050 | 0.313 |
| 9104003 | 290.499 | 0.684 |

| | | |
|---------------|---------|-------|
| 9122001 | 1.443 | 0.003 |
| Total. | 424.992 | |

Fuente: elaboración propia.

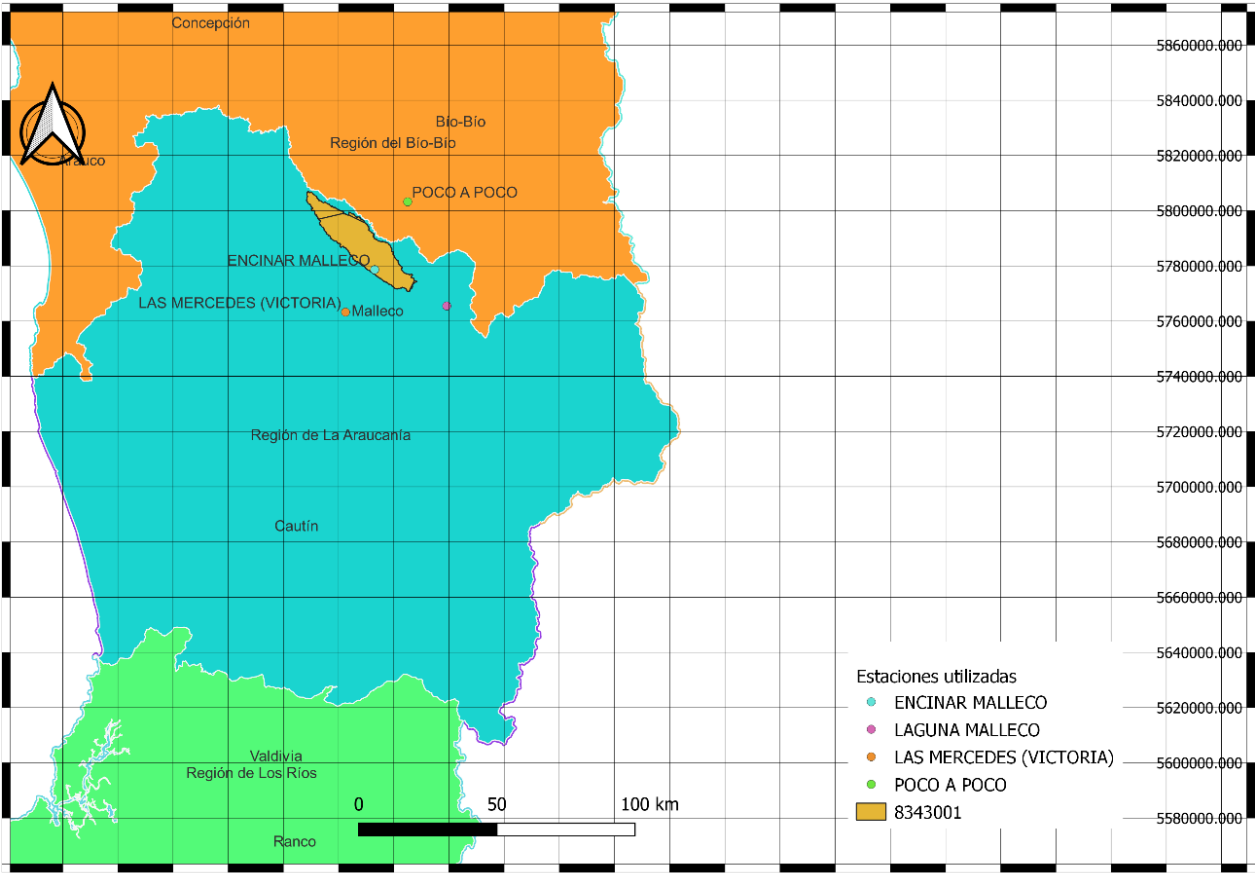


Figura 50 Delimitación de la cuenca del río Mininco en Longitudinal y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 53 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Mininco para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km² | Ponderación |
|-------------------|----------------------------|--------------------|
| 8343002 | 4.987 | 0.011 |
| 8358004 | 57.614 | 0.131 |
| 9104003 | 1.444 | 0.003 |
| 8350002 | 376.238 | 0.855 |
| Total. | 440.282 | |

Fuente: elaboración propia.

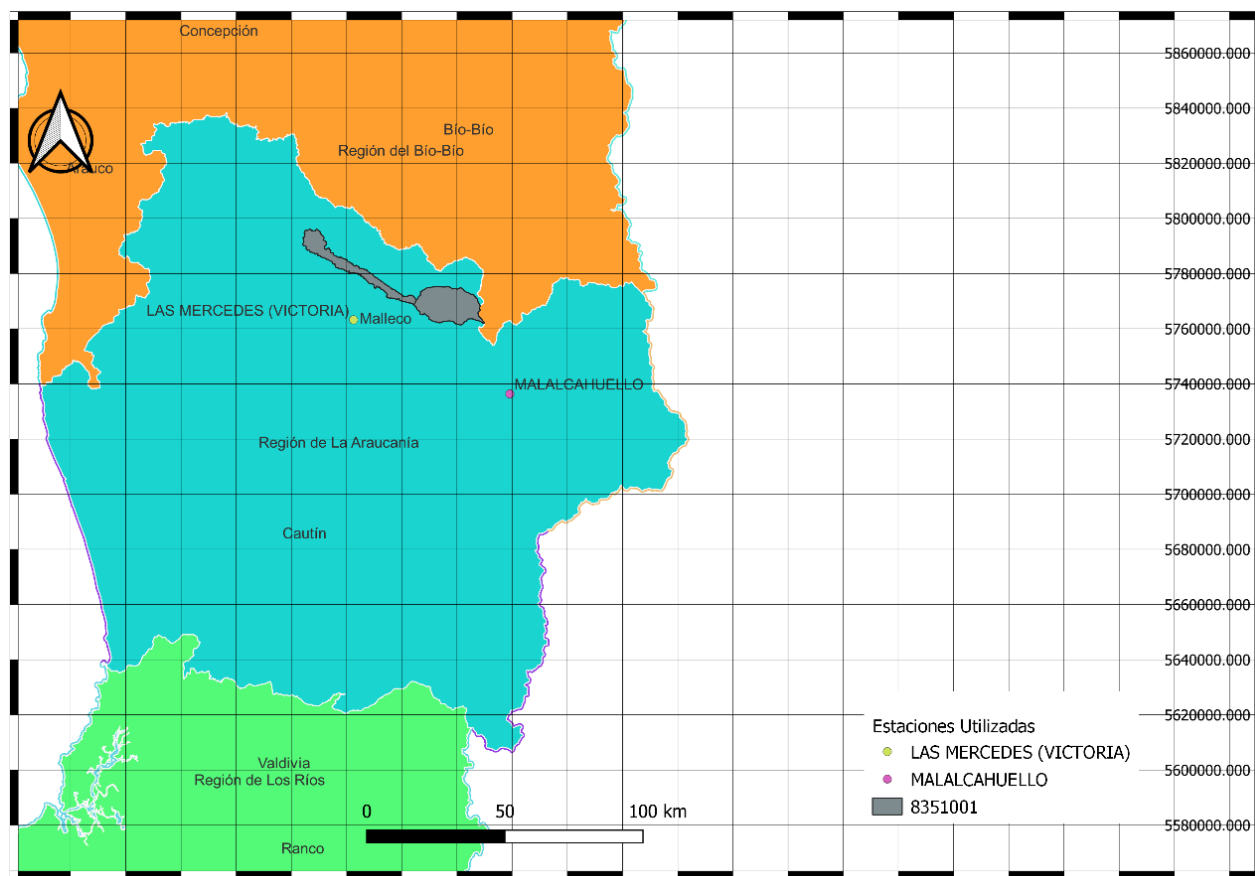


Figura 51 Delimitación de la cuenca del río Malleco en Collipulli I y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 54 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Malleco Collipulli para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km ² | Ponderación |
|---------------|----------------------|-------------|
| 9104003 | 165.437 | 0.400 |
| 9120003 | 247.703 | 0.599 |
| Total. | 413.141 | |

Fuente: elaboración propia.

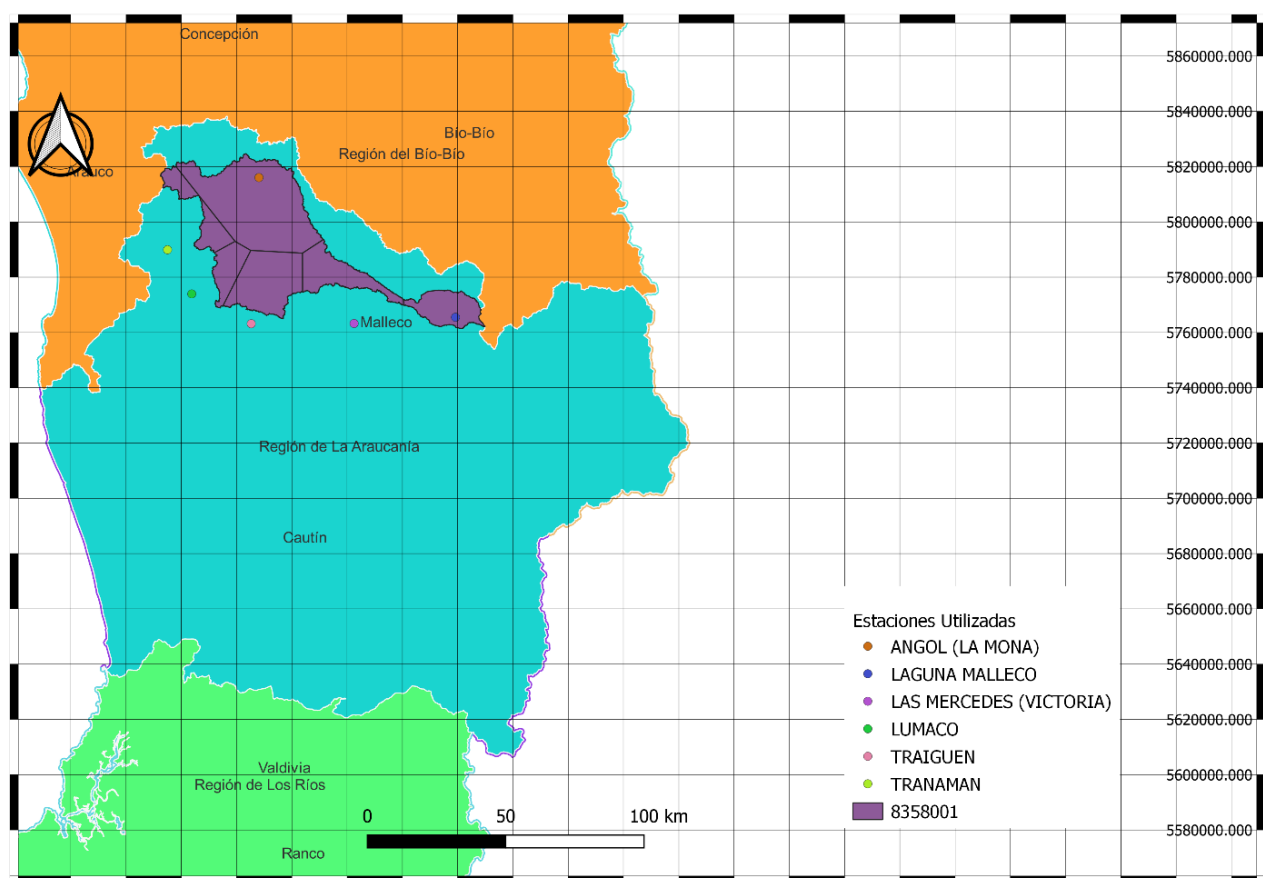


Figura 52 Delimitación de la cuenca del río Vergara en Tijeral y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 55 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Vergara en Tijeral para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km ² | Ponderación |
|----------------|----------------------|-------------|
| 8350002 | 209.383 | 0.083 |
| 8358002 | 171.909 | 0.068 |
| 9104003 | 1090.647 | 0.434 |
| 9105002 | 479.639 | 0.190 |

| | | |
|----------------|-----------|-------|
| 9102003 | 258.188 | 0.102 |
| 9101003 | 303.439 | 0.120 |
| Total. | 2513.2086 | |

Fuente: elaboración propia.

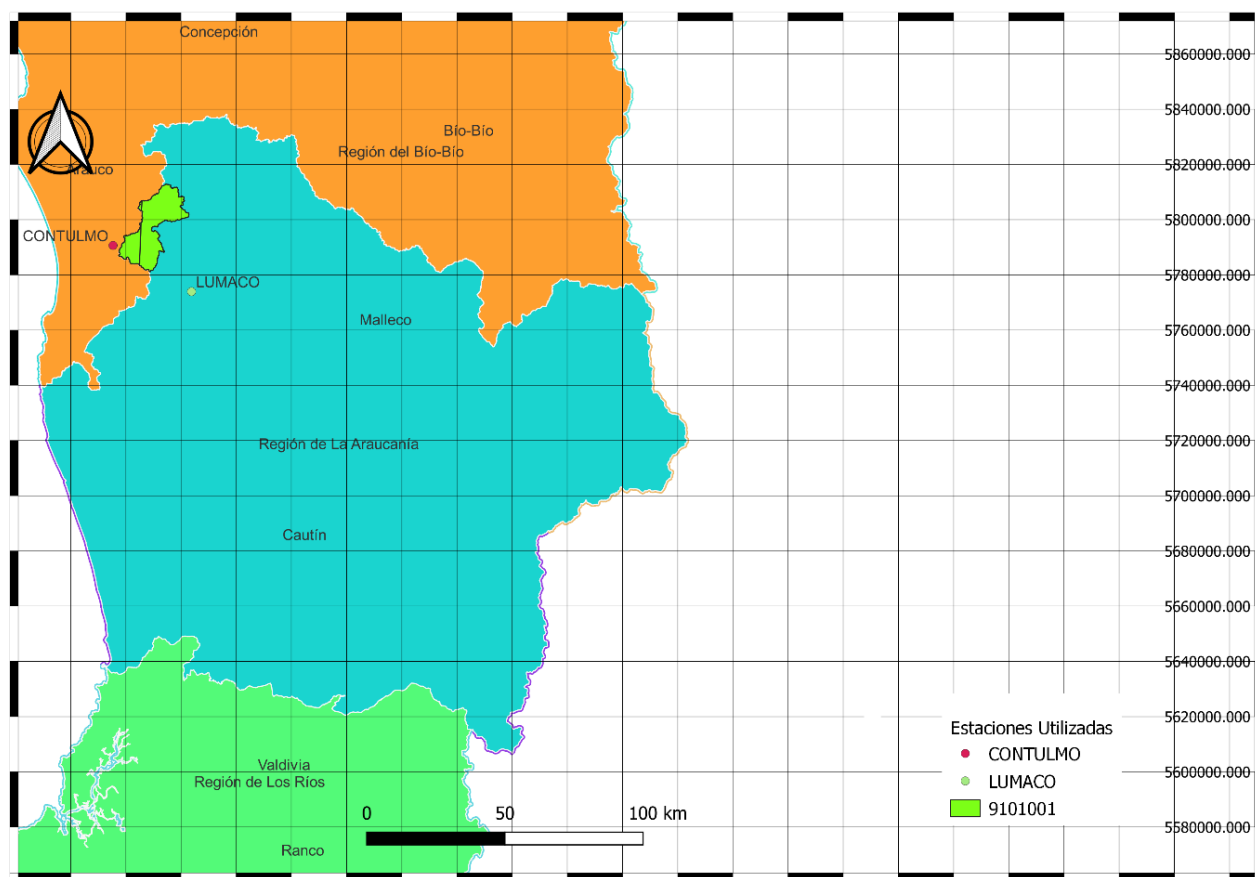


Figura 53 Delimitación de la cuenca del río Purén en Tranamán y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 56 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Purén (Tranamán) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km ² | Ponderación |
|---------------|----------------------|-------------|
| 8822008 | 271.340 | 0.795 |
| 9102003 | 70.162 | 0.205 |
| Total. | 341.502 | |

Fuente: elaboración propia.

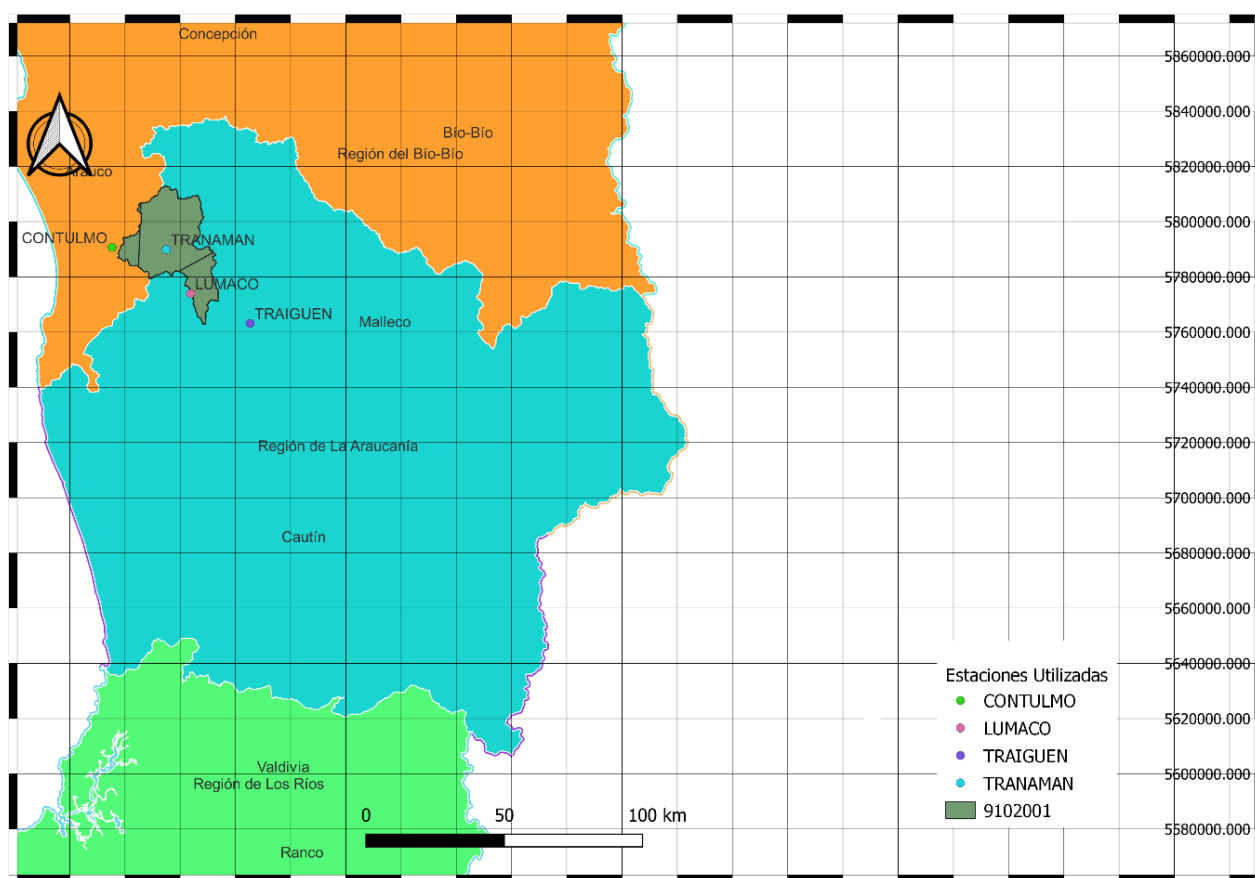


Figura 54 Delimitación de la cuenca del río Lumaco y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 57 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Lumaco para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km² | Ponderación |
|-------------------|----------------------------|--------------------|
| 9102003 | 70.0950 | 0.082 |
| 8822008 | 178.5073 | 0.209 |
| 9101003 | 0.002719 | 0.000003 |
| 9105002 | 602.953 | 0.708 |
| Total. | 851.558 | |

Fuente: elaboración propia.

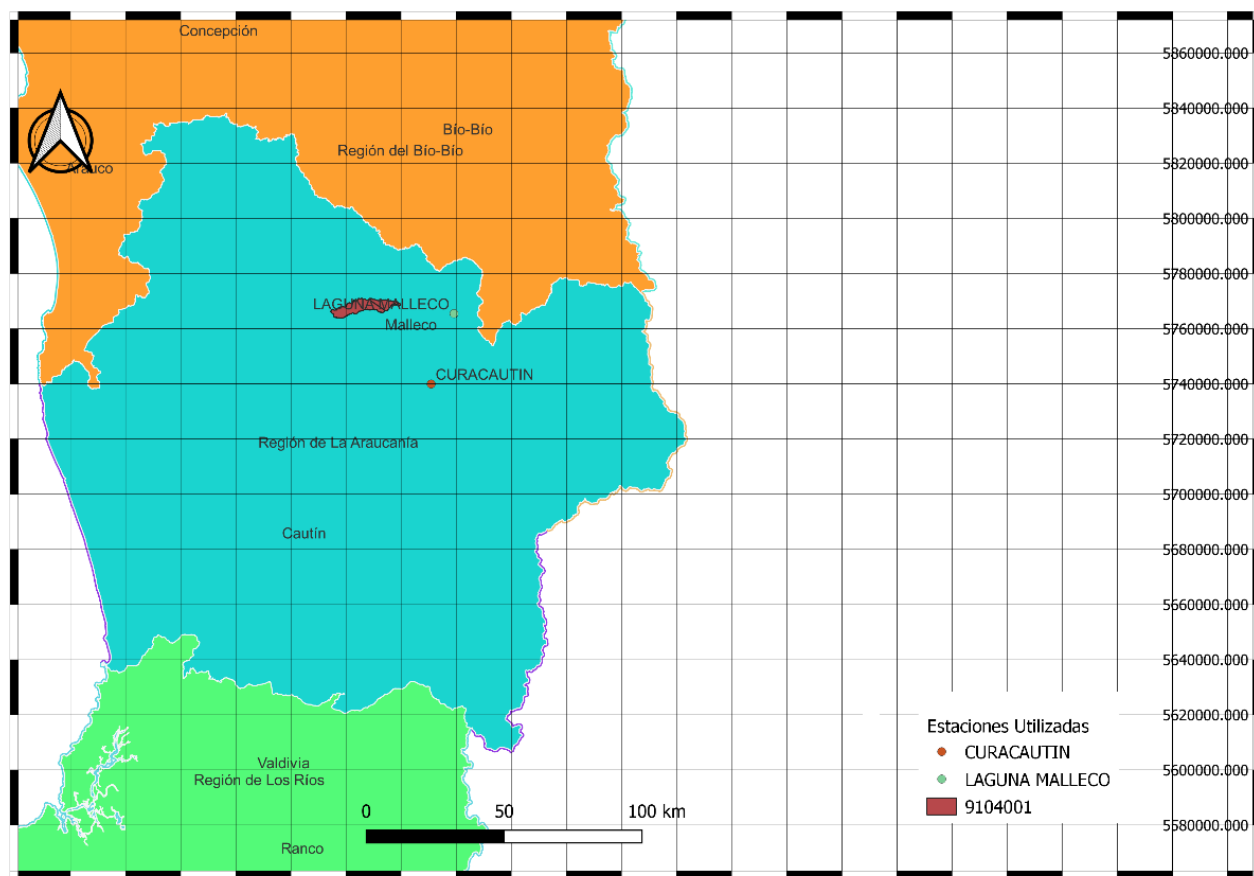


Figura 55 Delimitación de la cuenca del río Traiguén en Victoria y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 58 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Traiguén (Victoria) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km ² | Ponderación |
|---------------|----------------------|-------------|
| 8350002 | 21.198 | 0.251 |
| 9122001 | 63.328 | 0.749 |
| Total. | 84.526 | |

Fuente: elaboración propia.

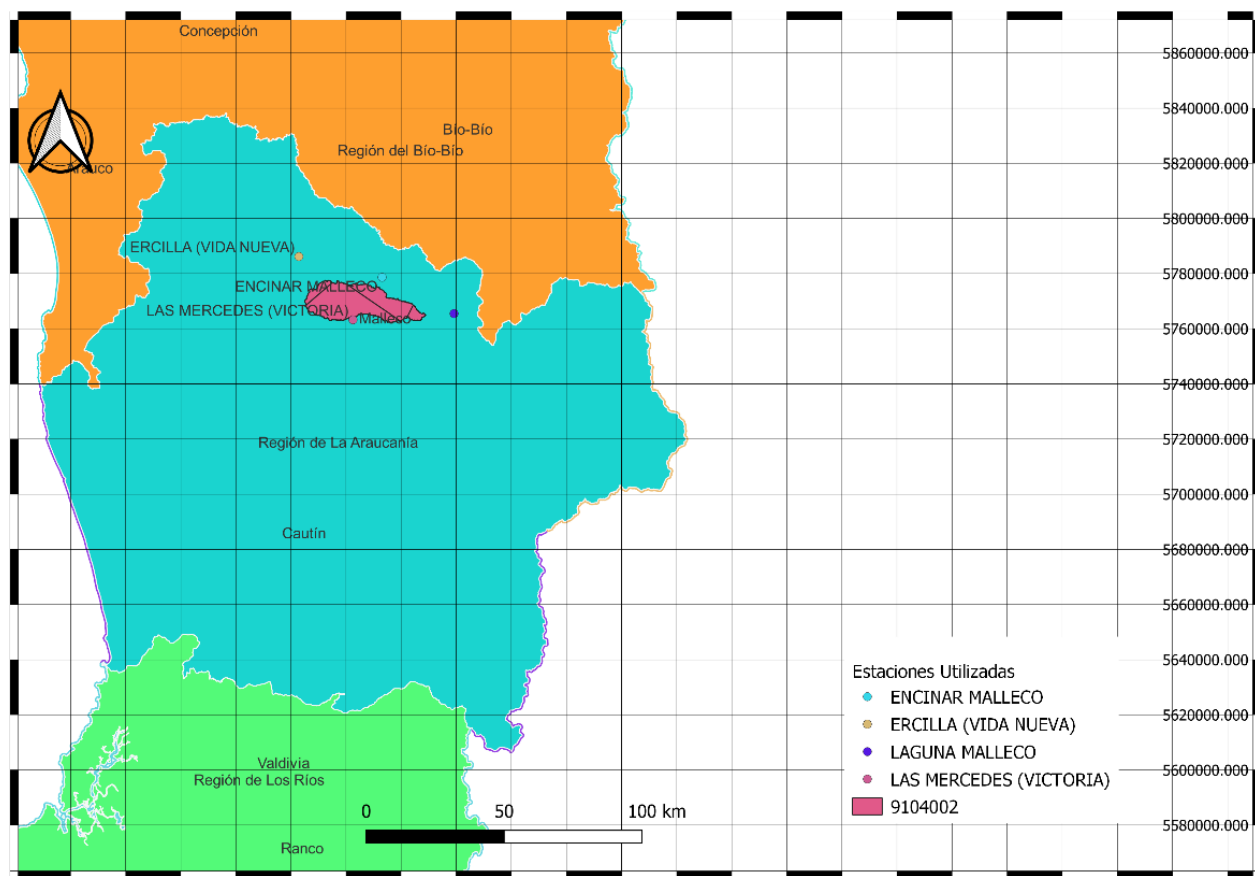


Figura 56. Delimitación de la cuenca del río Dumo en Santa Ana y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 59 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Dumo (Santa Ana) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km ² | Ponderación |
|----------------|----------------------|-------------|
| 9104003 | 28.418 | 0.069 |
| 8350002 | 114.790 | 0.279 |
| 8343002 | 249.730 | 0.606 |
| 8353001 | 19.188 | 0.047 |

| | | |
|---------------|-----------|--|
| Total. | 412.12606 | |
|---------------|-----------|--|

Fuente: elaboración propia.

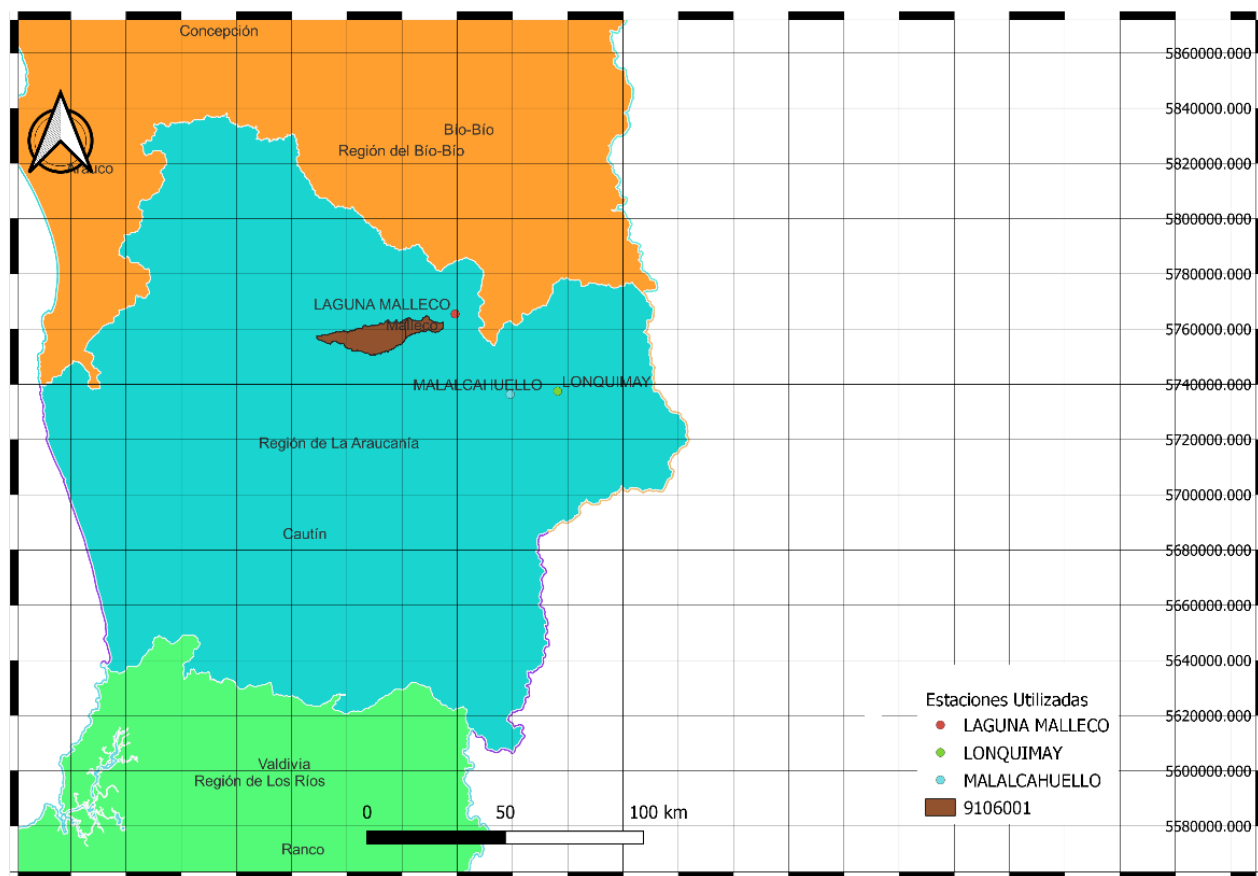


Figura 57 Delimitación de la cuenca del río Quino en Longitudinal y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 60 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Quino Longitudinal para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km ² | Ponderación |
|----------------|----------------------|-------------|
| 8350002 | 1.859 | 0.006 |
| 9120003 | 227.804 | 0.785 |

| | | |
|----------------|---------|-------|
| 8304004 | 60.641 | 0.209 |
| Total. | 290.305 | |

Fuente: elaboración propia.

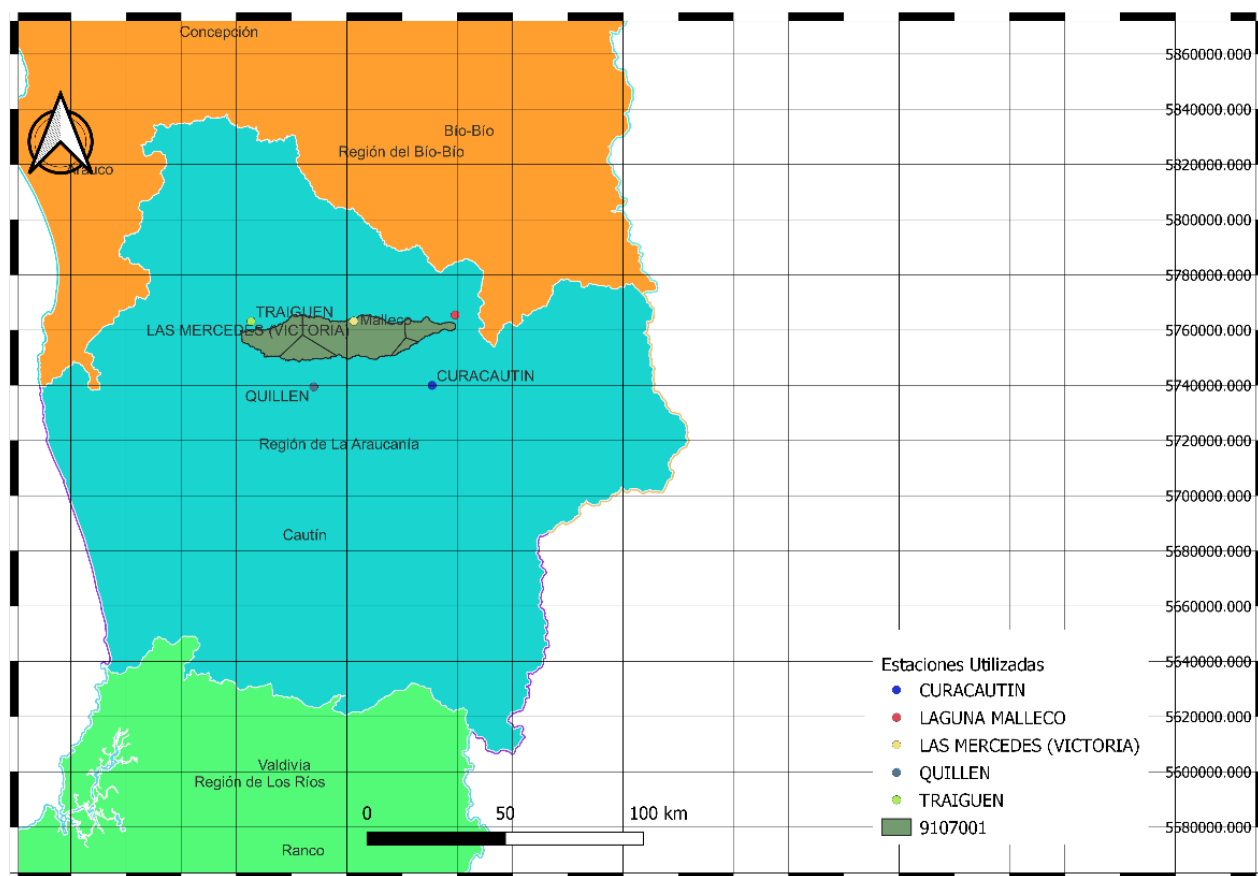


Figura 58 Delimitación de la cuenca del estero Chufquén en Chufquén y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 61 Áreas de influencia y ponderación cuenca del estero Chufquén para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km² | Ponderación |
|-------------------|----------------------------|--------------------|
| 9105002 | 190.341 | 0.225 |

| | | |
|----------------|---------|-------|
| 9104003 | 441.868 | 0.523 |
| 9111002 | 89.722 | 0.106 |
| 8350002 | 101.105 | 0.120 |
| 9122001 | 21.759 | 0.026 |
| Total. | 844.795 | |

Fuente: elaboración propia.

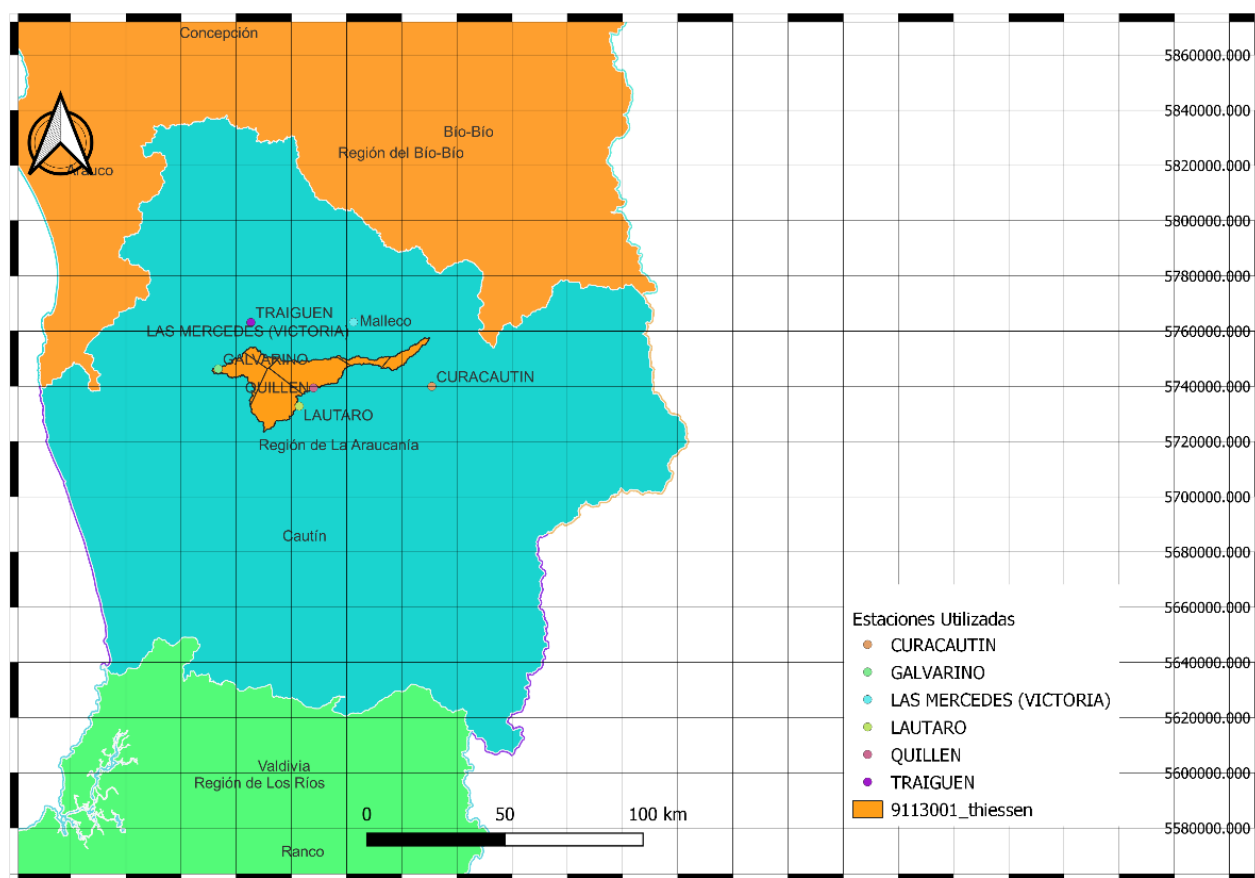


Figura 59 Delimitación de la cuenca del río Quillén en Galvarino y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 62 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Quillén (Galvarino) para el cálculo de PMA

| Código BNA | Área km² | Ponderación |
|-------------------|----------------------------|--------------------|
| 9113003 | 121.625 | 0.168 |
| 9124001 | 238.729 | 0.329 |
| 9111002 | 38.486 | 0.053 |
| 9105002 | 230.369 | 0.318 |
| 9122001 | 37.821 | 0.052 |
| 9104003 | 57.695 | 0.080 |
| Total. | 724.726 | |

Fuente: elaboración propia.

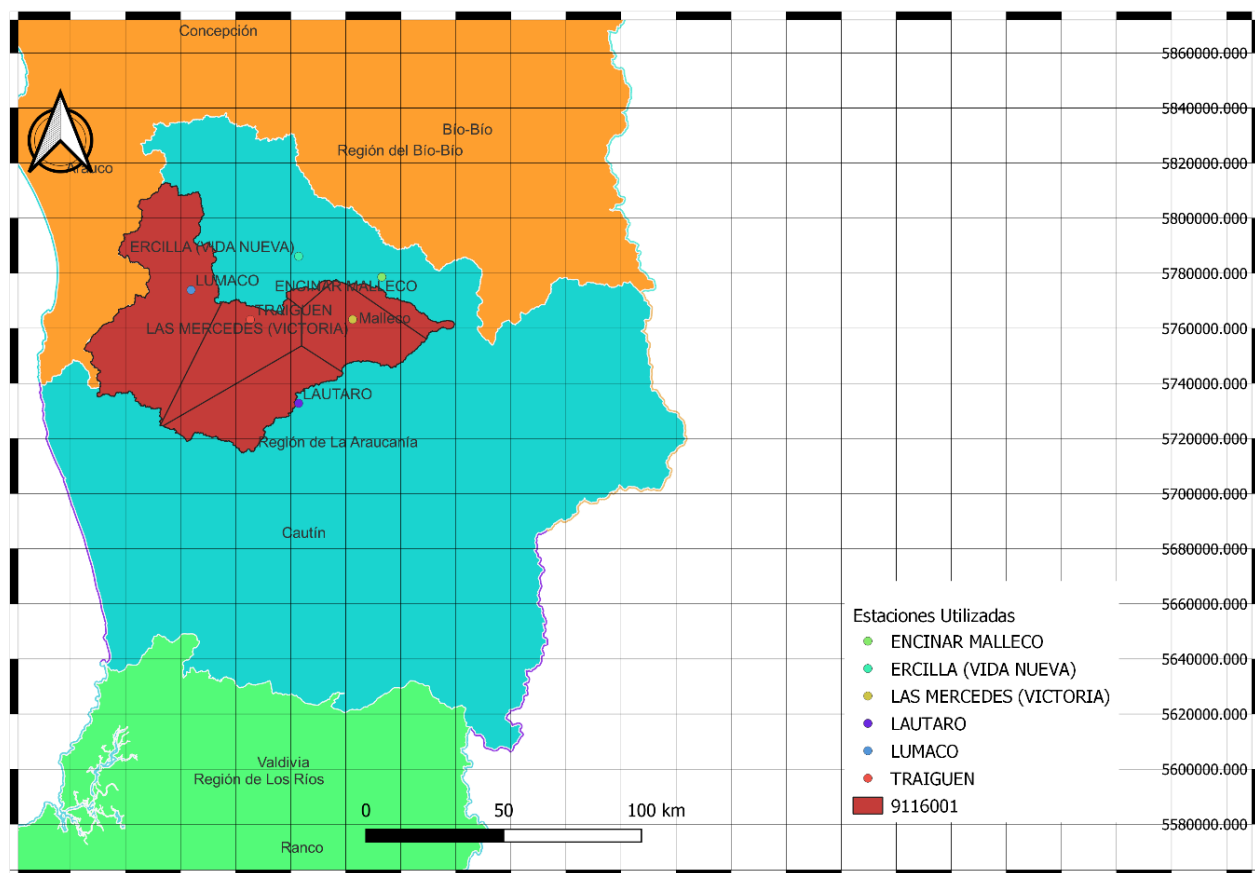


Figura 60 Delimitación de la cuenca del río Cholchol en Cholchol y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 63 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Cholchol en Cholchol para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km ² | Ponderación |
|------------|----------------------|-------------|
| 8353001 | 2285.37 | 0.42 |
| 8343002 | 984.17 | 0.18 |
| 9102003 | 68.73 | 0.01 |

| | | |
|----------------|---------|------|
| 9105002 | 1037.18 | 0.19 |
| 9104003 | 912.08 | 0.17 |
| 9124001 | 206.73 | 0.04 |
| Total. | 5494.26 | — |

Fuente: elaboración propia.

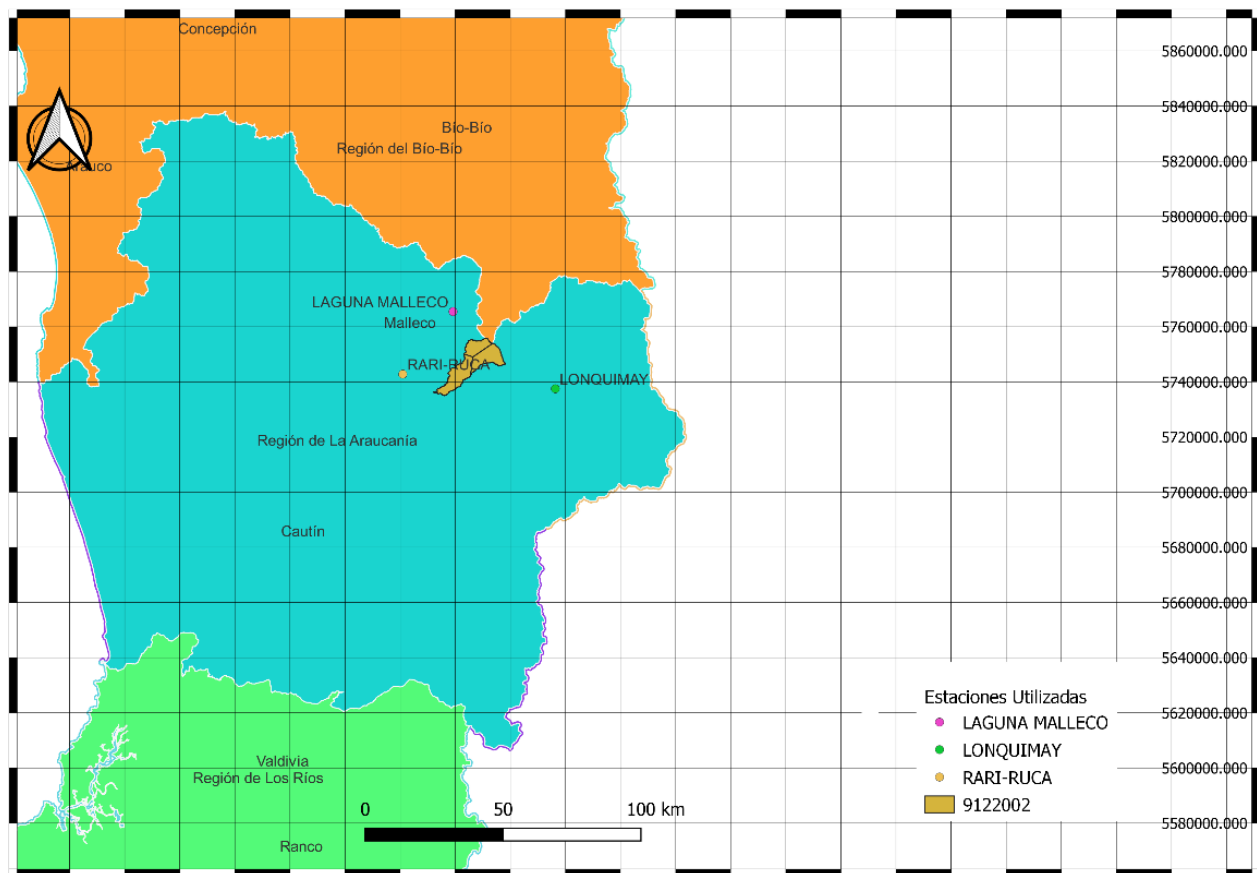


Figura 61 Delimitación de la cuenca del río Blanco en Curacautín y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 64 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Blanco (Curacautín) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km ² | Ponderación |
|----------------|----------------------|-------------|
| 8304004 | 39.455 | 0.215 |
| 8350002 | 79.337 | 0.432 |
| 9123002 | 64.665 | 0.352 |
| Total. | 183.457 | |

Fuente: elaboración propia.

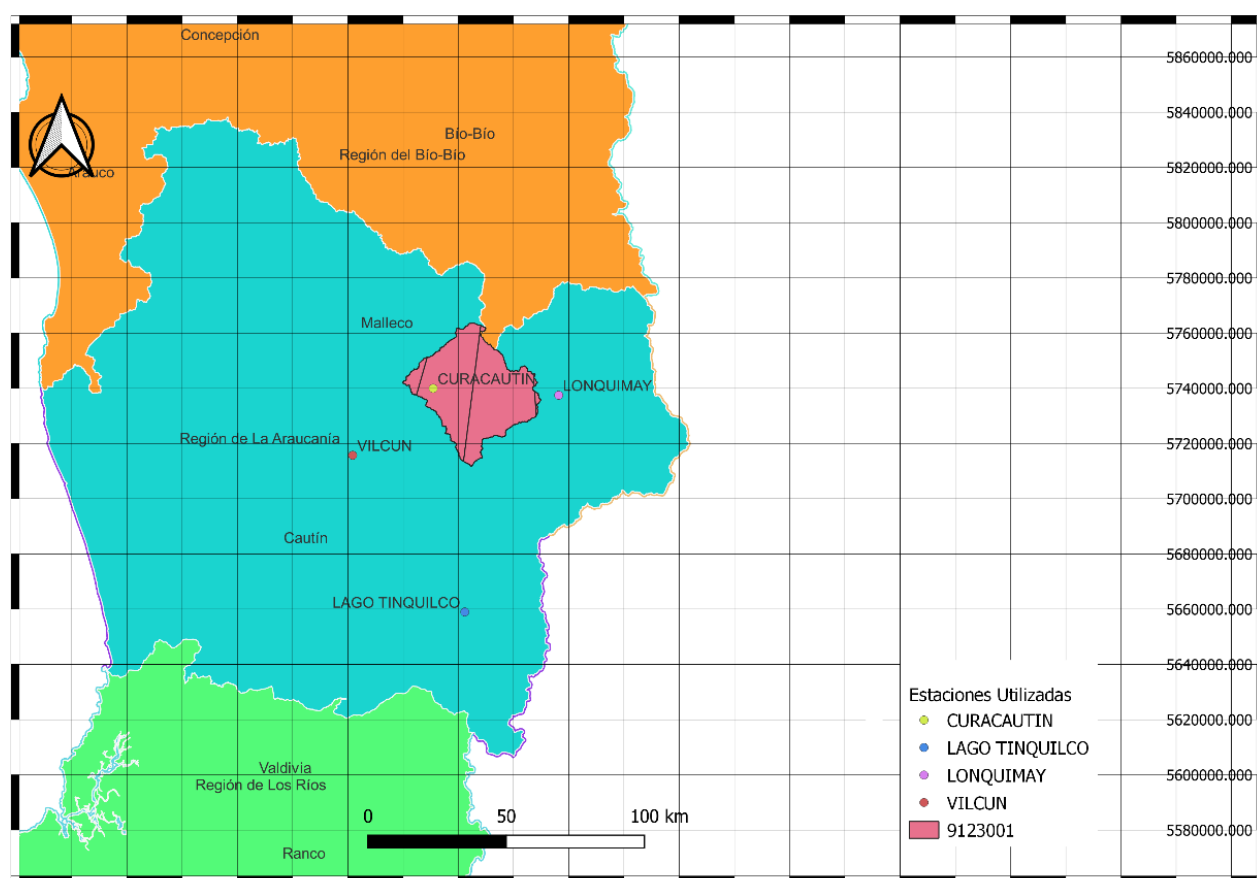


Figura 62 Delimitación de la cuenca del río Cautín en Rariruca y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 65 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Cautín (Rariruca) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km² | Ponderación |
|-------------------|----------------------------|--------------------|
| 9122001 | 596.791 | 0.457 |
| 8304004 | 45.822 | 0.035 |
| 9131002 | 10.925 | 0.008 |
| 9416002 | 653.611 | 0.500 |
| Total. | 1307.150 | |

Fuente: elaboración propia.

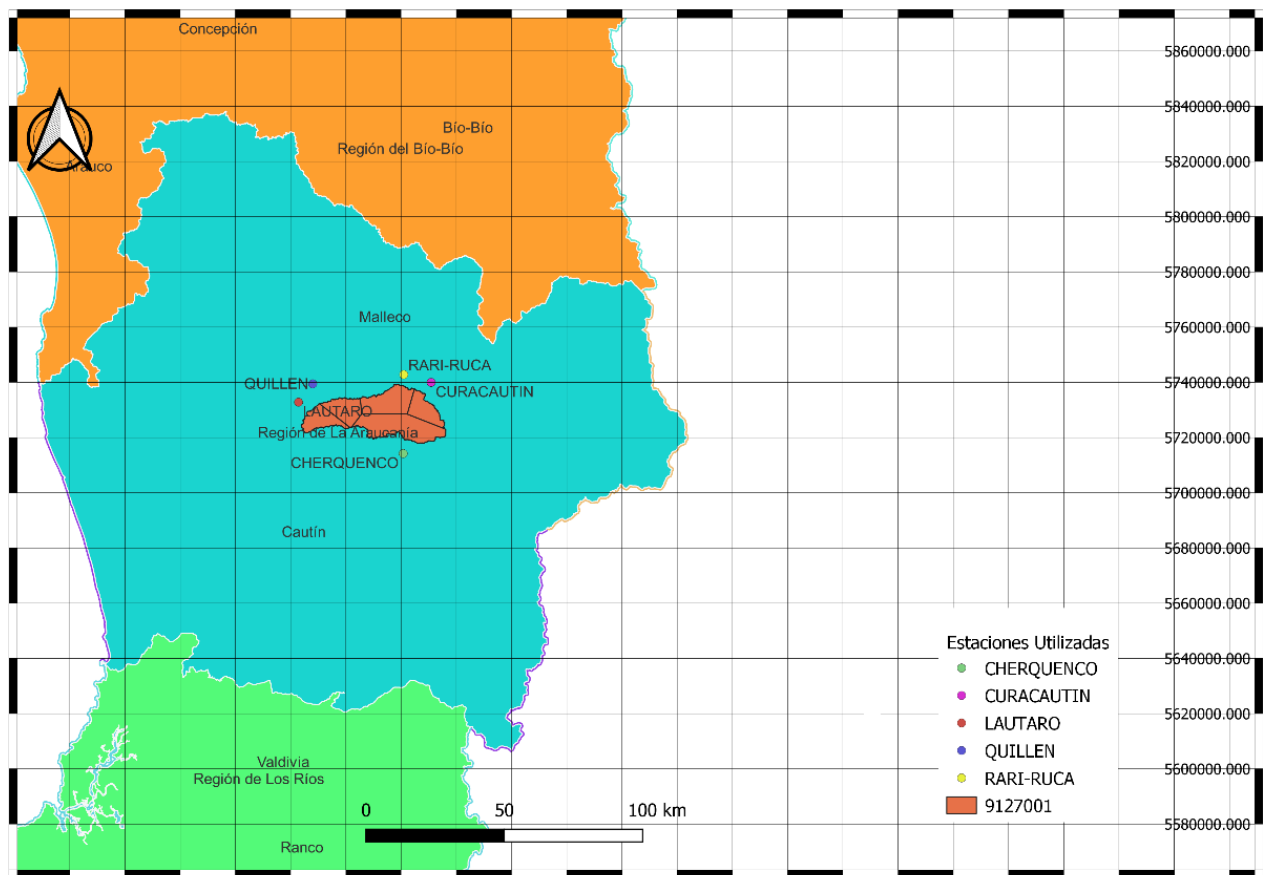


Figura 63 Delimitación de la cuenca del río Muco en Puente Muco y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 66 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Muco en Puente Muco para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km ² | Ponderación |
|------------|----------------------|-------------|
| 9124001 | 87.920 | 0.135 |
| 9111002 | 228.747 | 0.352 |
| 9123002 | 95.137 | 0.146 |

| | | |
|----------------|---------|-------|
| 9122001 | 148.008 | 0.228 |
| 9130001 | 90.055 | 0.139 |
| Total. | 649.867 | |

Fuente: elaboración propia.

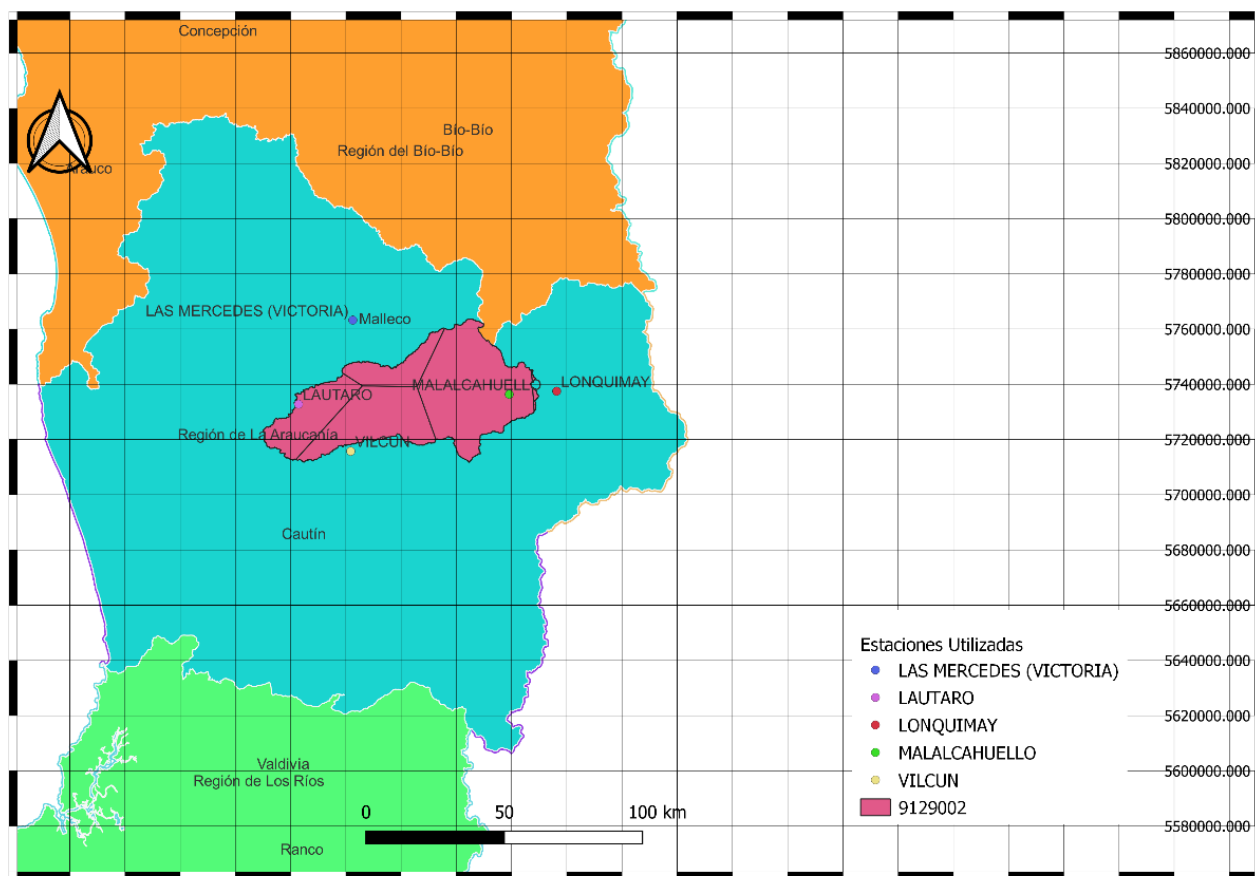


Figura 64. Delimitación de la cuenca del río Cautín en Cajón y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 67 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Cautín (Cajón) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km² | Ponderación |
|-------------------|----------------------------|--------------------|
| 9124001 | 479.787 | 0.172 |
| 9131002 | 713.409 | 0.255 |
| 9120003 | 291.612 | 0.104 |
| 9104003 | 1298.904 | 0.465 |
| 8304004 | 10.910 | 0.004 |
| Total. | 2794.622 | — |

Fuente: elaboración propia.

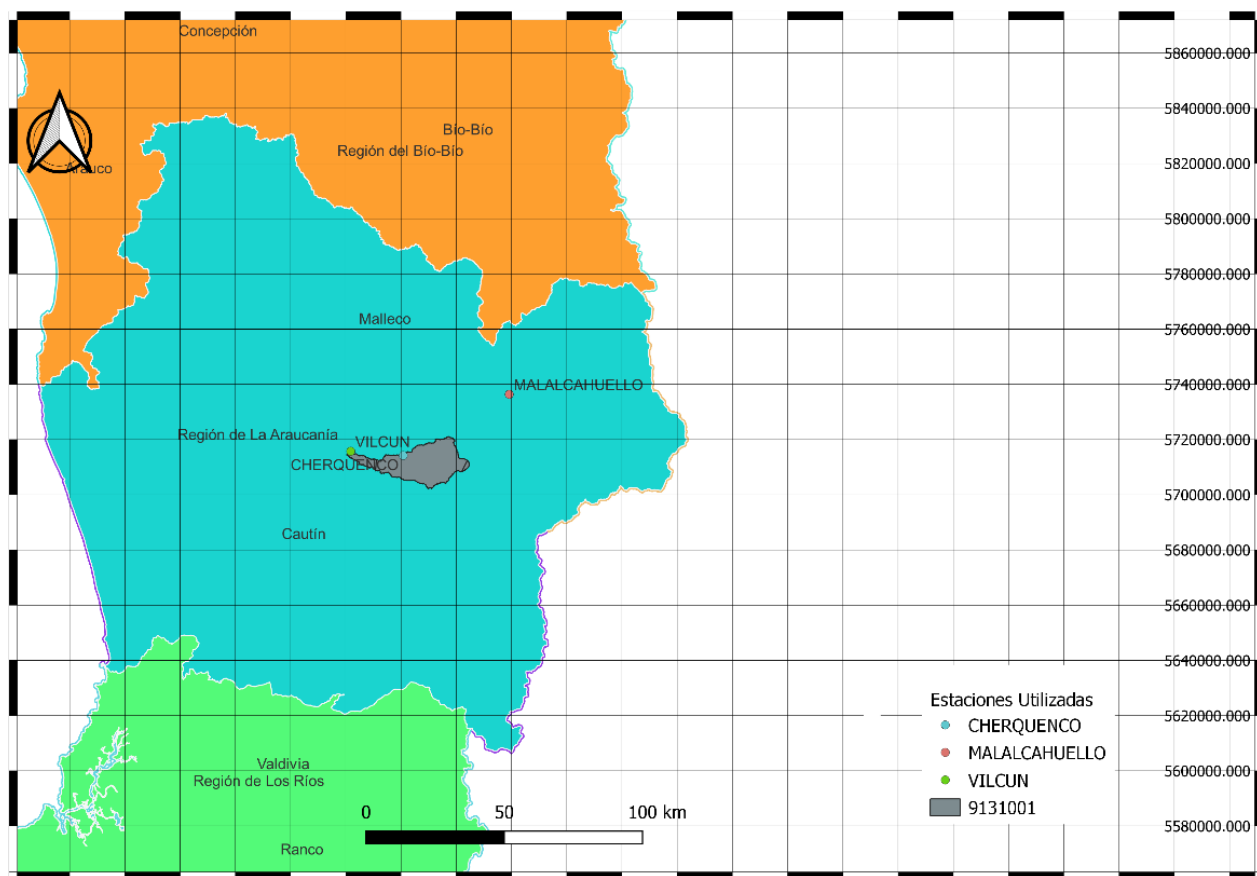


Figura 65 Delimitación de la cuenca del río Quepe en Vichu y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 68 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Quepe (Vichu) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km ² | Ponderación |
|---------------|----------------------|-------------|
| 9130001 | 28.293 | 0.075 |
| 9131002 | 344.117 | 0.913 |
| 9120003 | 4.317 | 0.011 |
| Total. | 376.728 | |

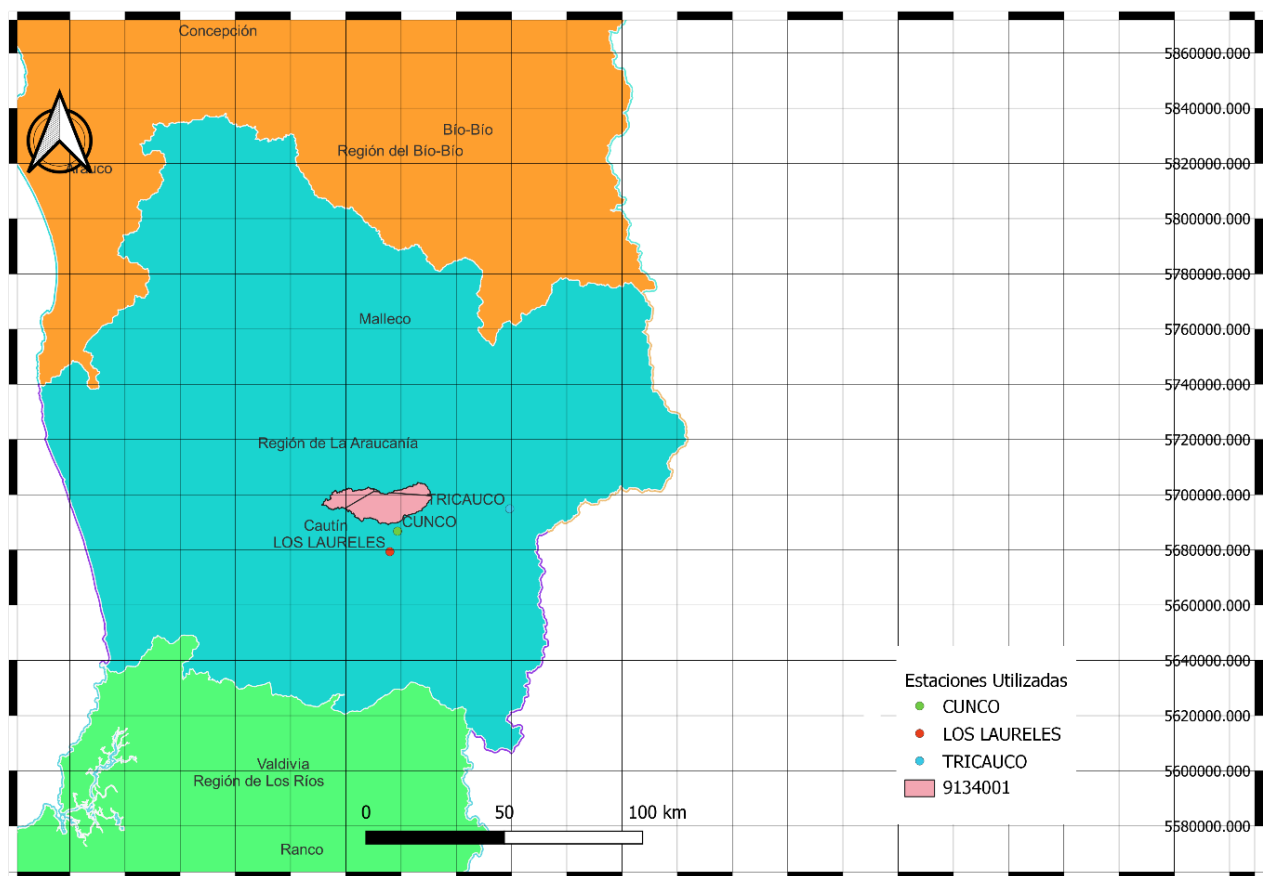


Figura 66 Delimitación de la cuenca del río Huichahue en Faja 24000 y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 69 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Huichahue (Faja 24000) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km2 | Ponderación |
|----------------|----------|-------------|
| 9404002 | 77.569 | 0.223 |
| 9403001 | 233.113 | 0.672 |
| 9401001 | 36.428 | 0.105 |
| Total. | 347.110 | |

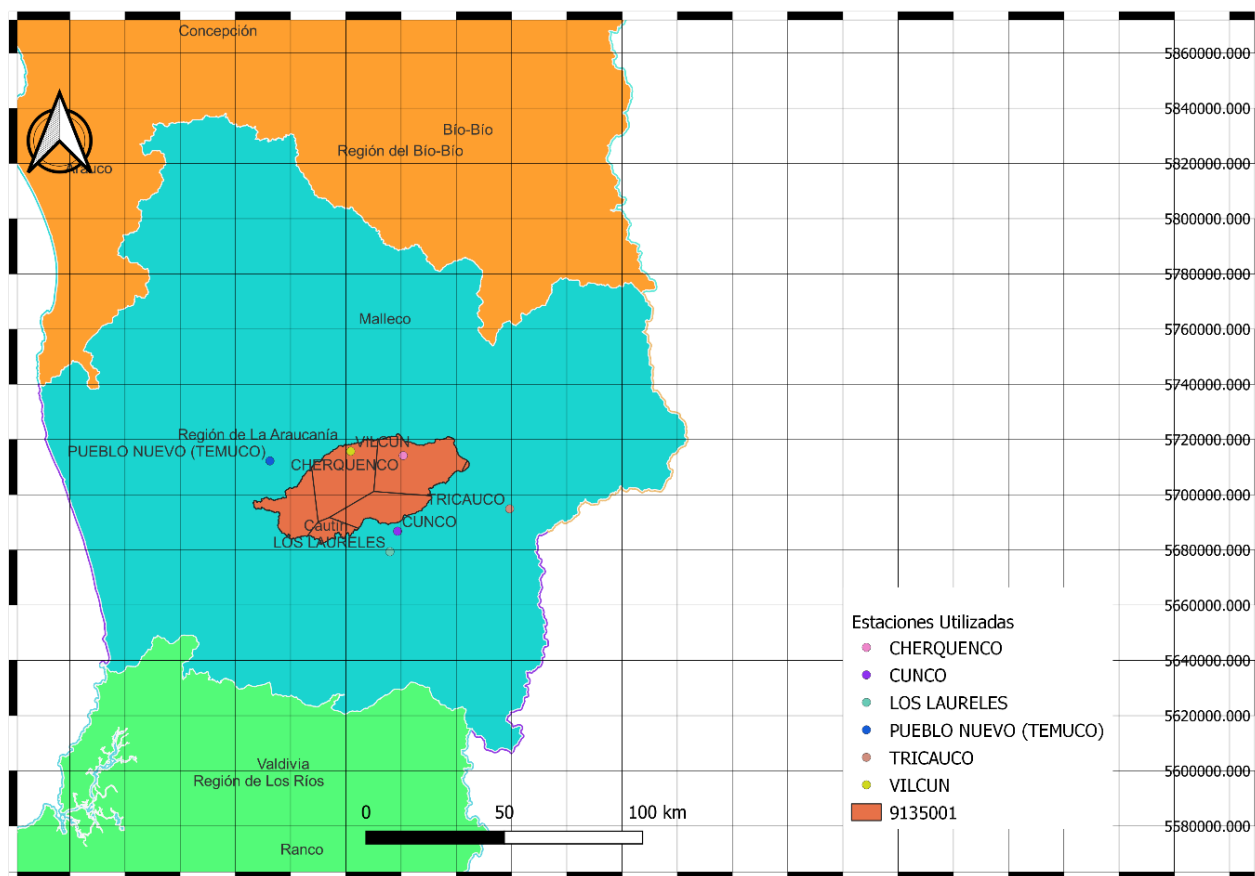


Figura 67 Delimitación de la cuenca del río Quepe en Quepe y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 70 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Quepe (Quepe) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km2 | Ponderación |
|------------|----------|-------------|
| 9404002 | 278.770 | 0.167 |
| 9403001 | 89.354 | 0.054 |
| 9401001 | 483.203 | 0.290 |
| 9130001 | 275.292 | 0.165 |

| | | |
|----------------|----------|-------|
| 9131002 | 536.742 | 0.322 |
| 9129005 | 4.253 | 0.003 |
| Total. | 1667.613 | |

Fuente: elaboración propia.

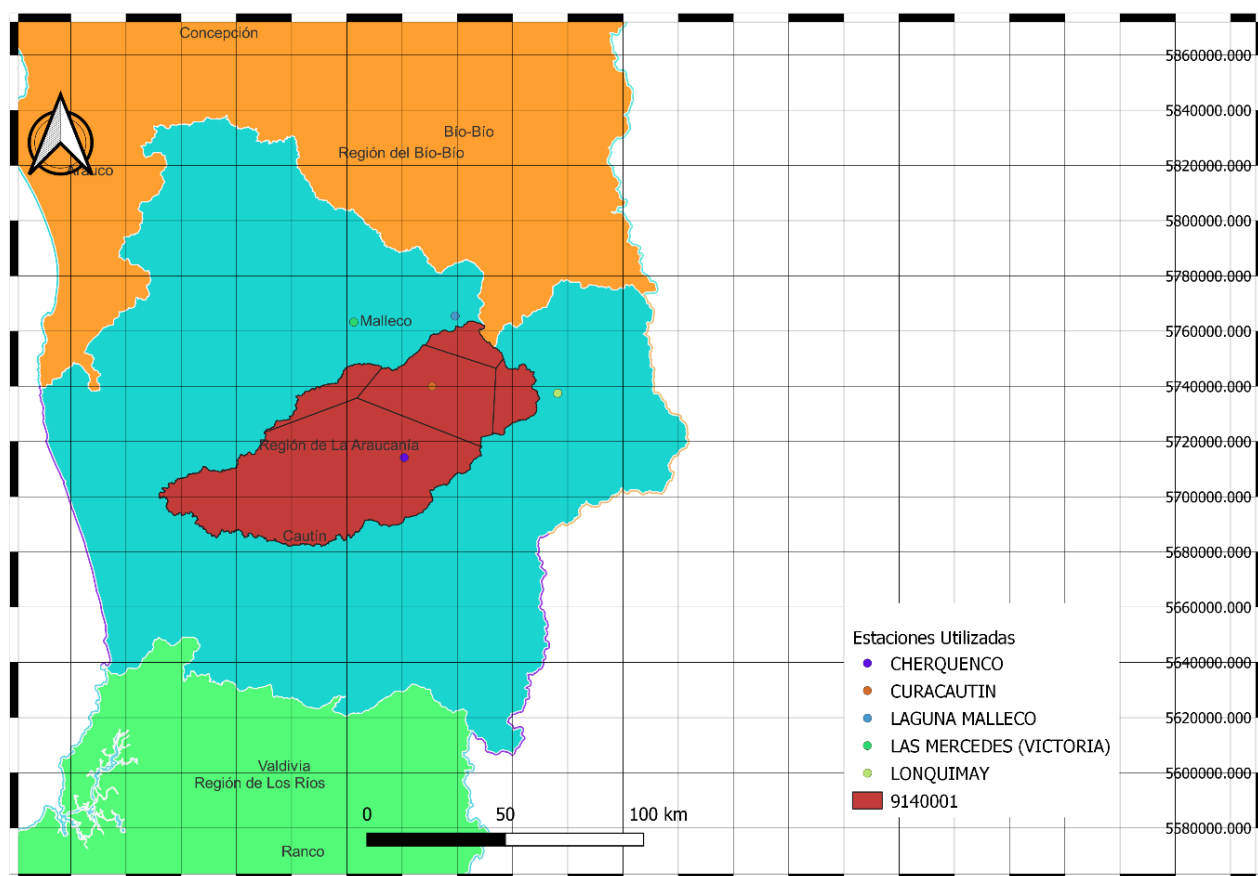


Figura 68 Delimitación de la cuenca del río Cautín en Almagro y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 71 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Cautín (Almagro) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km2 | Ponderación |
|-------------------|-----------------|--------------------|
| 9130001 | 294.277 | 0.053 |
| 9122001 | 1096.198 | 0.198 |
| 9104003 | 3600.448 | 0.650 |
| 8350002 | 240.466 | 0.043 |
| 8304004 | 308.861 | 0.056 |
| Total. | 5540.250 | — |

Fuente: elaboración propia.

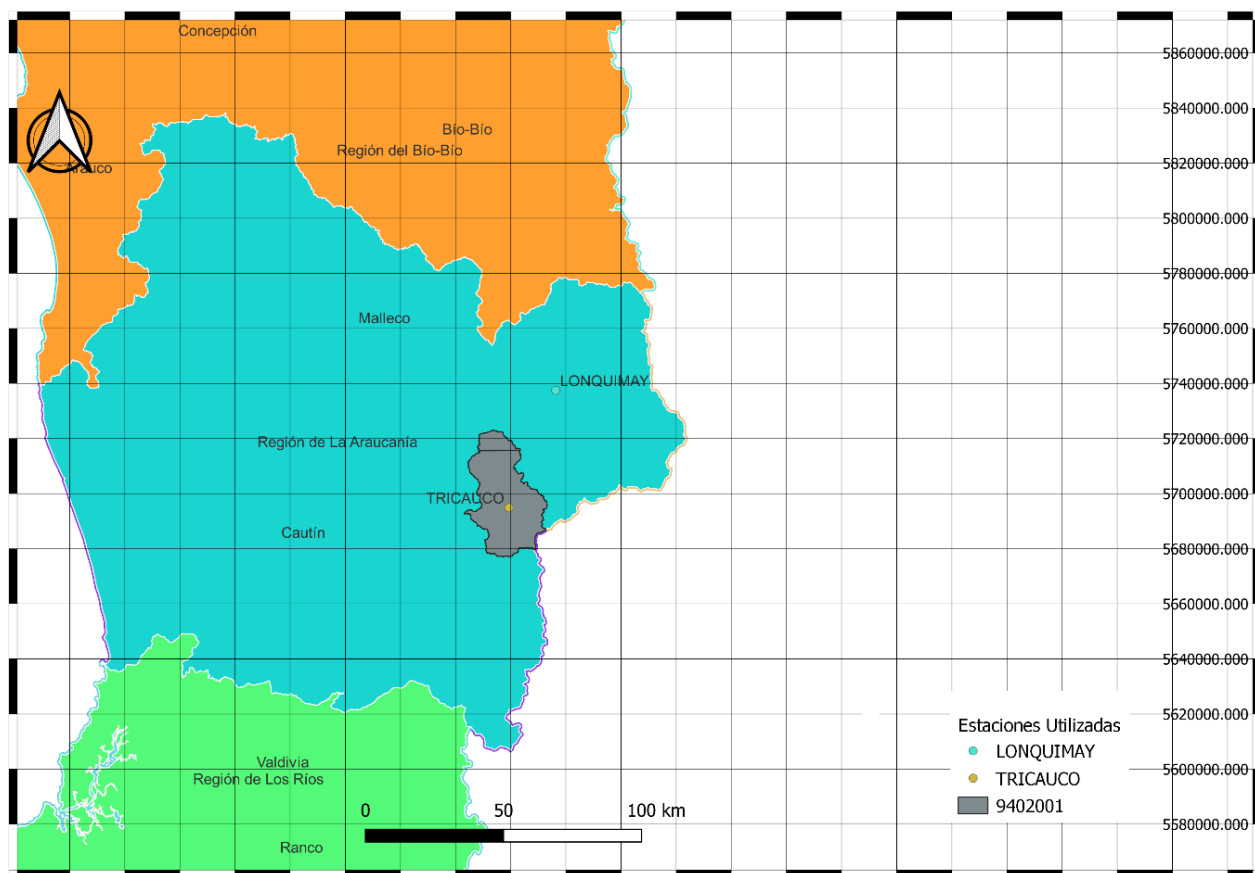


Figura 69 Delimitación de la cuenca del río Allipén en Melipuco y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 72 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Allipén (Melipuco) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km2 | Ponderación |
|------------|----------|-------------|
| 9401001 | 76.913 | 0.094 |
| 8304004 | 742.439 | 0.906 |
| Total. | 819.353 | — |

Fuente: elaboración propia.

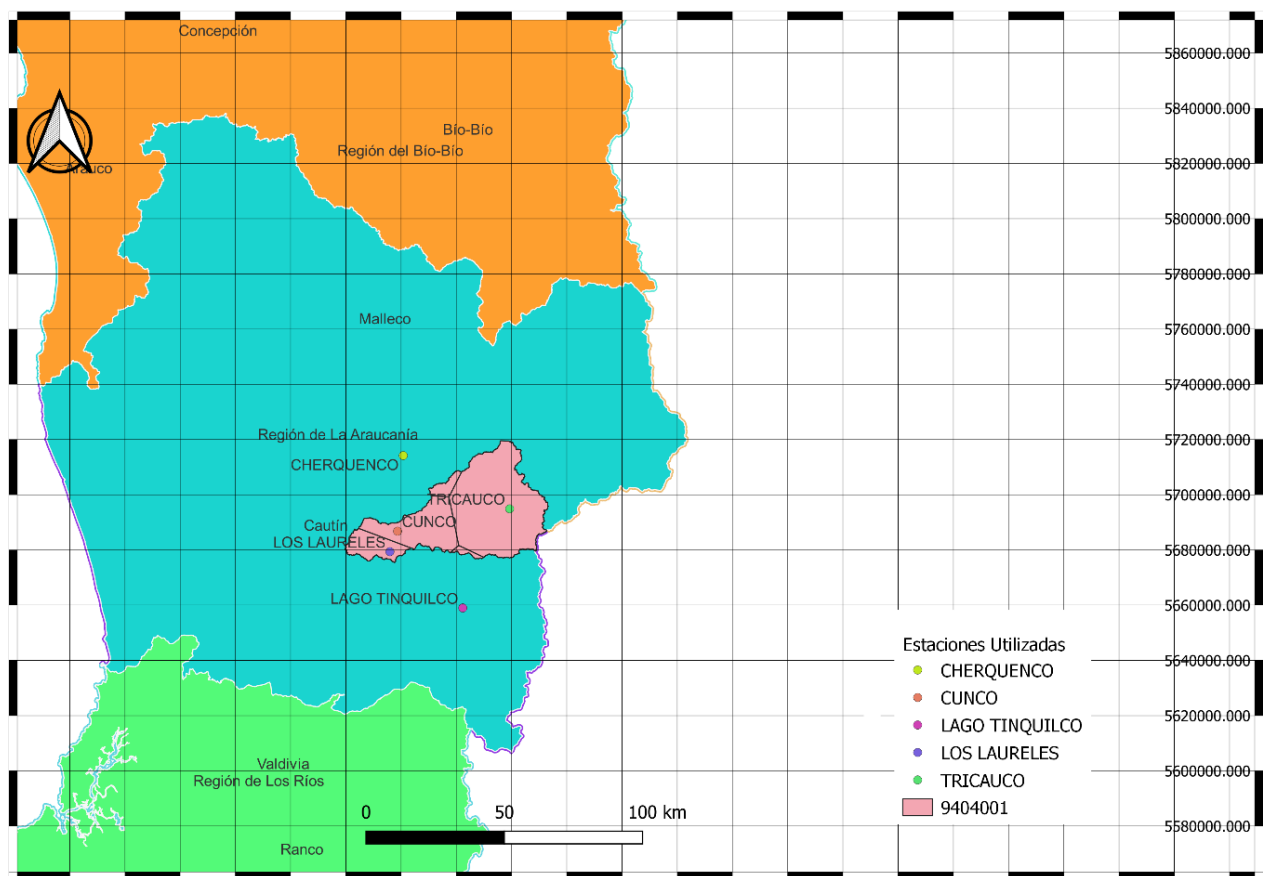


Figura 70 Delimitación de la cuenca del río Allipén en Los Laureles y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 73 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Allipén (Los Laureles) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km2 | Ponderación |
|------------|----------|-------------|
| 9404002 | 161.331 | 0.098 |
| 9403001 | 49.475 | 0.030 |
| 9401001 | 18.660 | 0.011 |
| 9130001 | 1033.383 | 0.629 |

| | | |
|----------------|----------|-------|
| 9416002 | 379.702 | 0.231 |
| Total. | 1642.551 | |

Fuente: elaboración propia.

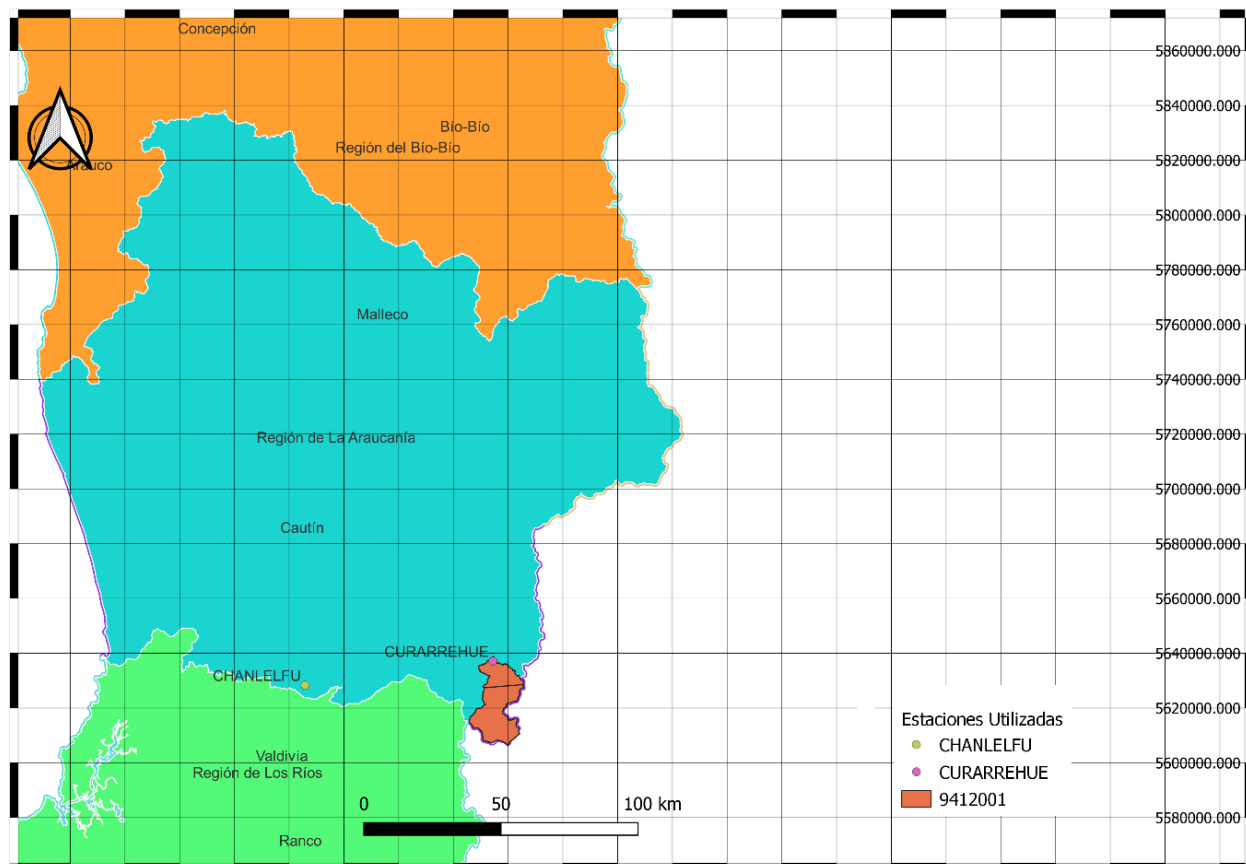


Figura 71 Delimitación de la cuenca del río Trancura en Curarrehue y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 74 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Trancura (Curarrehue) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km2 | Ponderación |
|----------------|----------|-------------|
| 9412002 | 259.534 | 0.716 |
| 9420004 | 103.196 | 0.284 |
| Total. | 362.730 | — |

Fuente: elaboración propia.

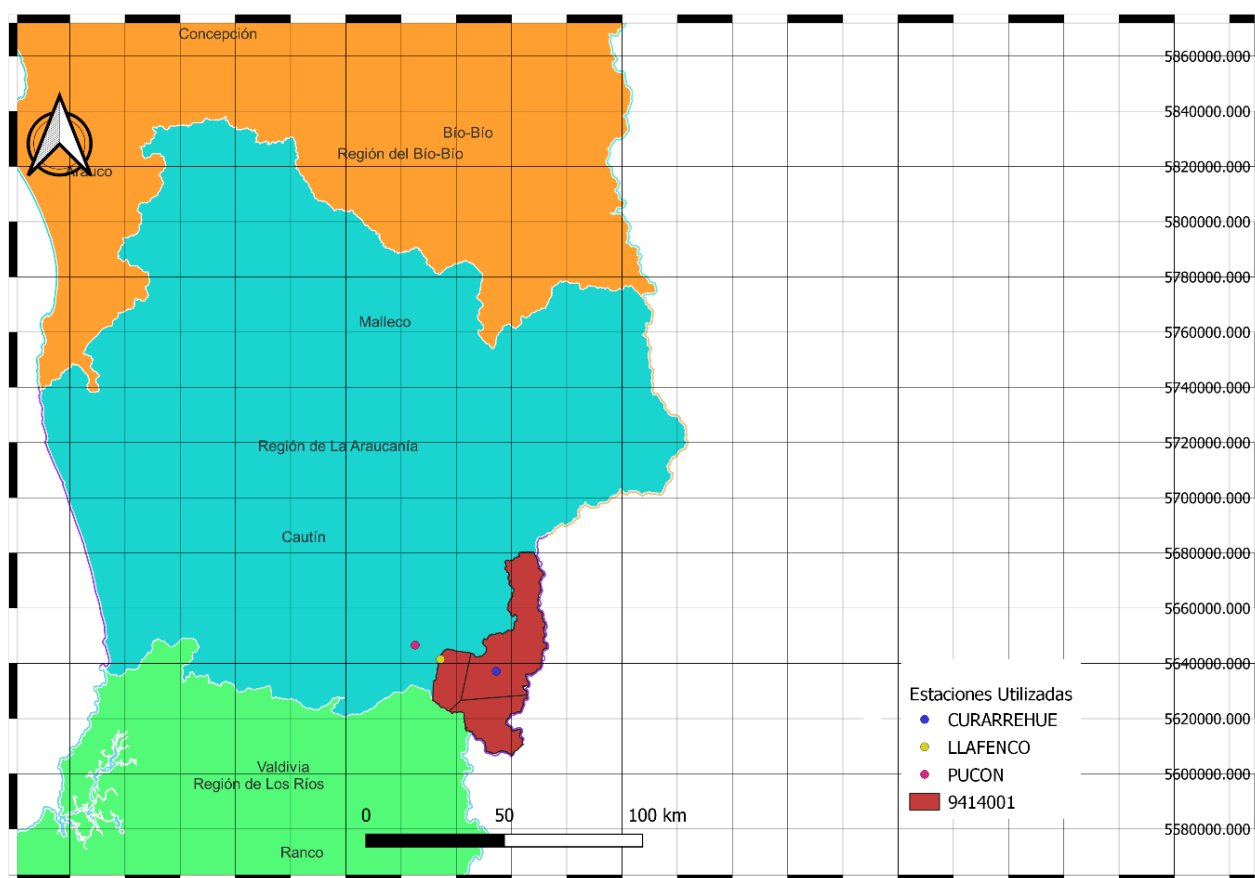


Figura 72 Delimitación de la cuenca del río Trancura antes de su confluencia con el río Llafenco y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 75 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Trancura (antes del río Llafenco) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km2 | Ponderación |
|---------------|----------|-------------|
| 9412002 | 348.898 | 0.248 |
| 9414002 | 844.497 | 0.600 |
| 9420002 | 213.776 | 0.152 |
| Total. | 1407.171 | — |

Fuente: elaboración propia.

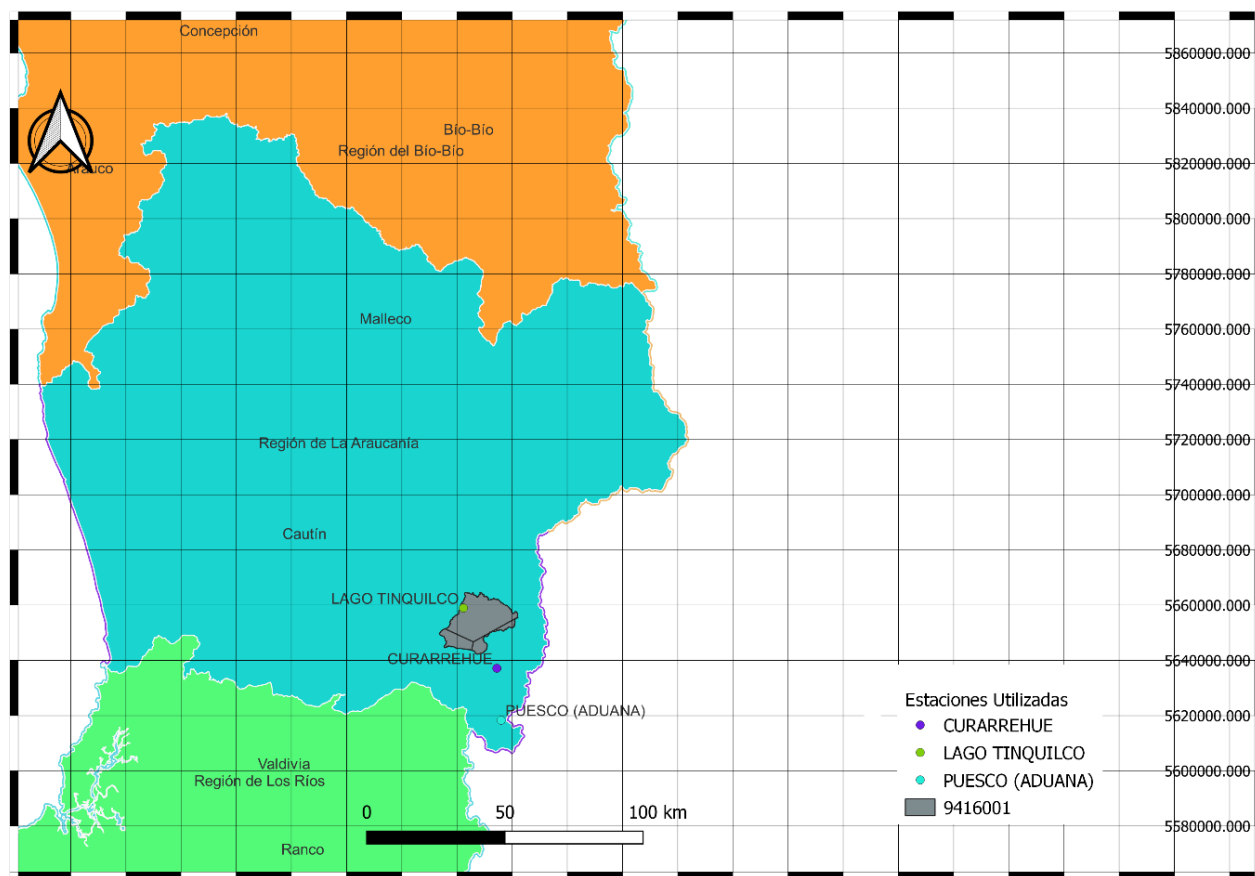


Figura 73 Delimitación de la cuenca del río Liucura en Liucura y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 76 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Liucura (Liucura) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km2 | Ponderación |
|---------------|----------------|-------------|
| 9416002 | 50.586 | 0.145 |
| 9412002 | 261.301 | 0.749 |
| 9412003 | 36.922 | 0.106 |
| Total. | 348.809 | — |

Fuente: elaboración propia.

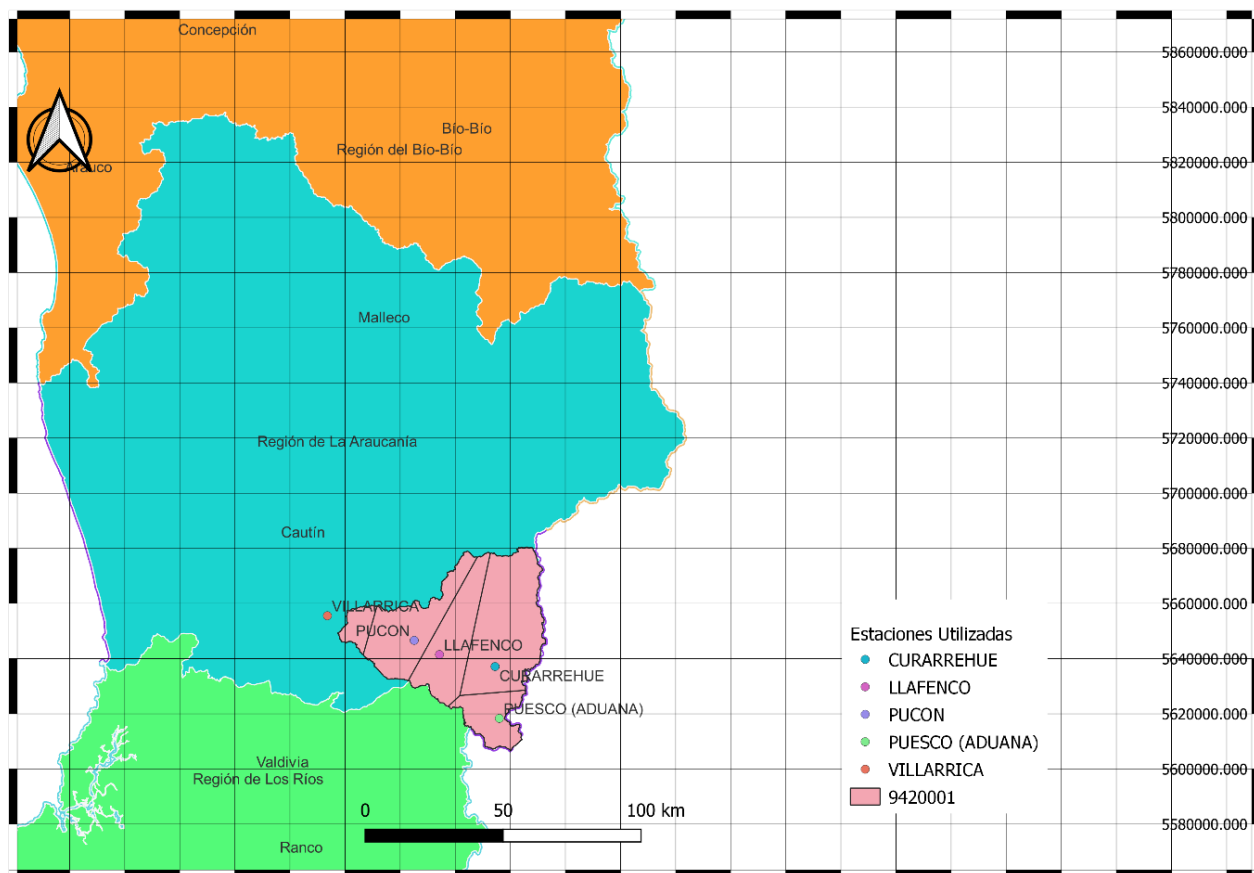


Figura 74 Delimitación de la cuenca del río Toltén en Villarrica y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 77 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Toltén (Villarrica) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km2 | Ponderación |
|-------------------|-----------------|--------------------|
| 9412003 | 137.494 | 0.047 |
| 9412002 | 349.196 | 0.119 |
| 9414002 | 671.579 | 0.228 |
| 9420002 | 1143.940 | 0.388 |
| 9420003 | 643.722 | 0.219 |
| Total. | 2945.932 | — |

Fuente: elaboración propia.

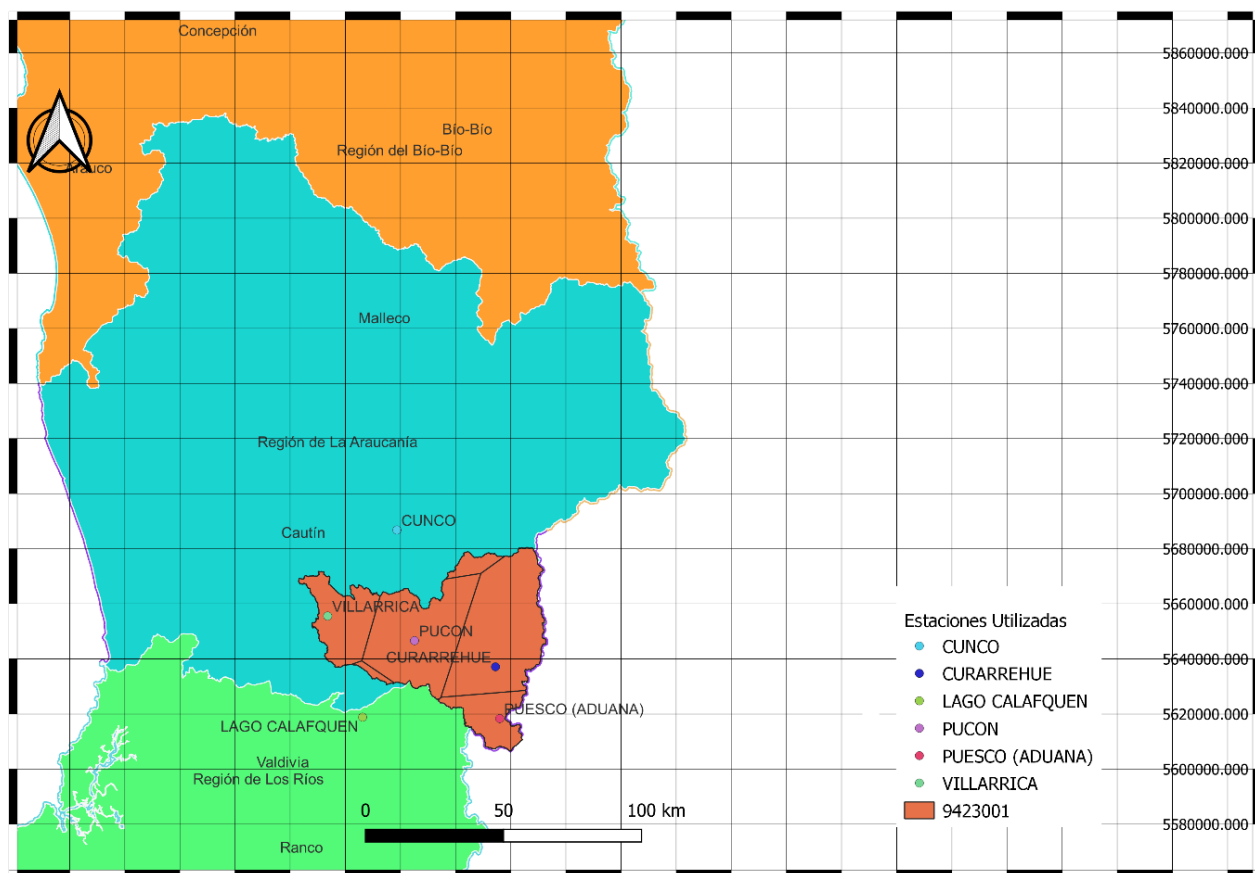


Figura 75 Delimitación de la cuenca del río Toltén en Coipue y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 78 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Toltén (Coipue) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km2 | Ponderación |
|------------|----------|-------------|
| 9420003 | 551.118 | 0.158 |
| 9420002 | 99.971 | 0.029 |
| 9412002 | 32.498 | 0.009 |
| 9412003 | 1110.578 | 0.318 |

| | | |
|-----------------|----------|-------|
| 9403001 | 1329.023 | 0.381 |
| 10106002 | 366.152 | 0.105 |
| Total. | 3489.339 | — |

Fuente: elaboración propia.

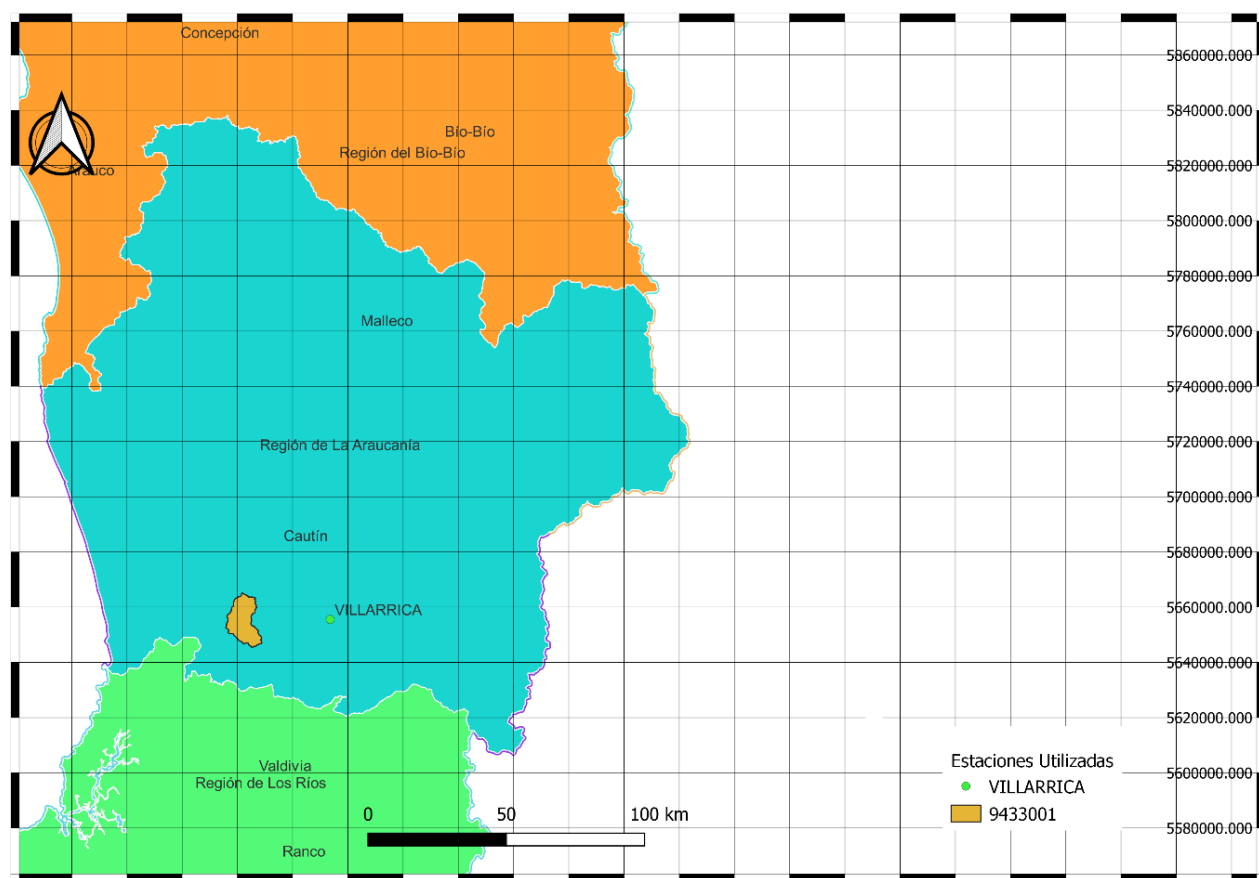


Figura 76 Delimitación de la cuenca del río Puyehue en Quitratúe y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 79 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Puyehue (Quitratúe) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km2 | Ponderación |
|---------------|----------|-------------|
| 9420003 | 152.3552 | 1 |
| Total. | 152.3552 | |

Fuente: elaboración propia.

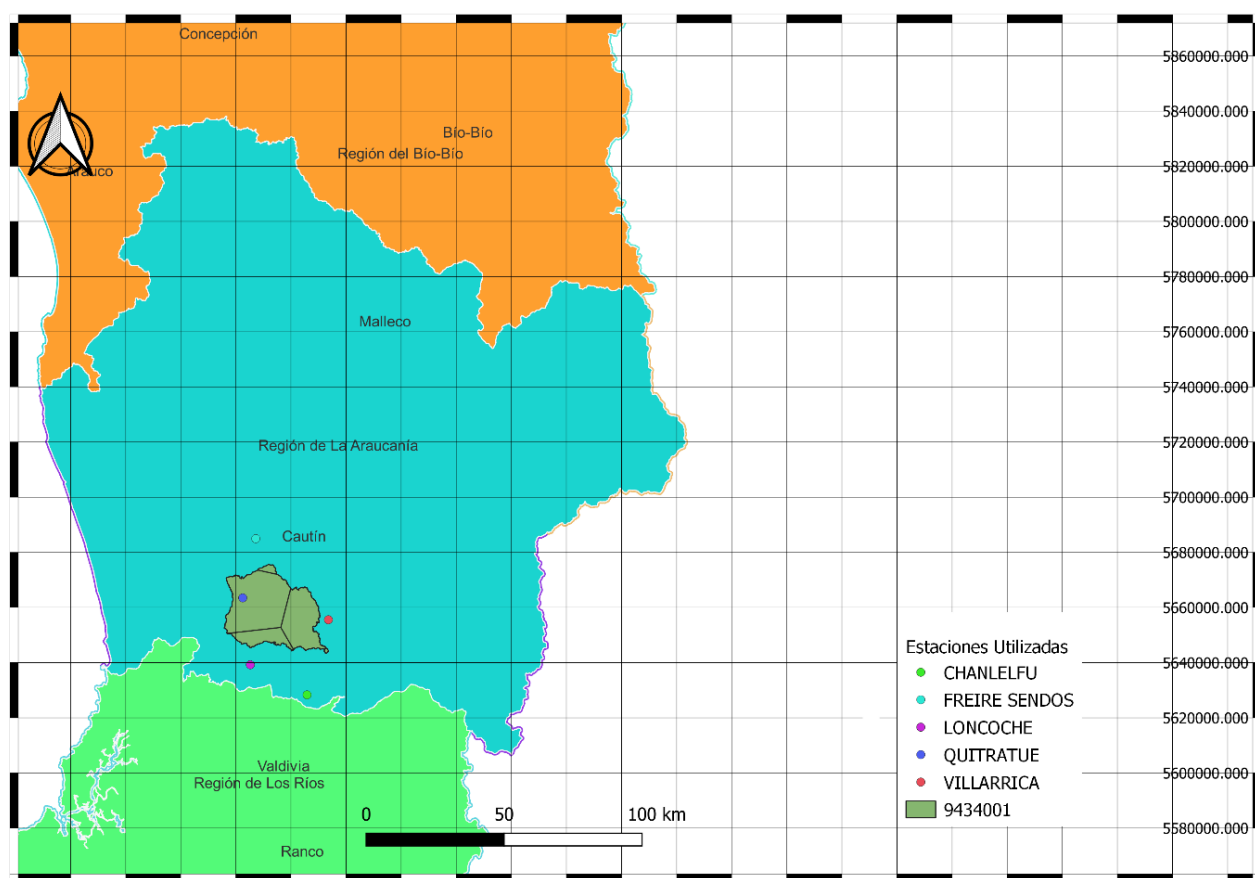


Figura 77 Delimitación de la cuenca del río Donguil en Gorbea y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 80 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Donguil (Gorbea) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km2 | Ponderación |
|-------------------|-----------------|--------------------|
| 9433003 | 13.619 | 0.018 |
| 10130001 | 419.106 | 0.542 |
| 9135003 | 96.917 | 0.125 |
| 9420003 | 242.121 | 0.313 |
| 9420004 | 1.834 | 0.002 |
| Total. | 773.597 | — |

Fuente: elaboración propia.

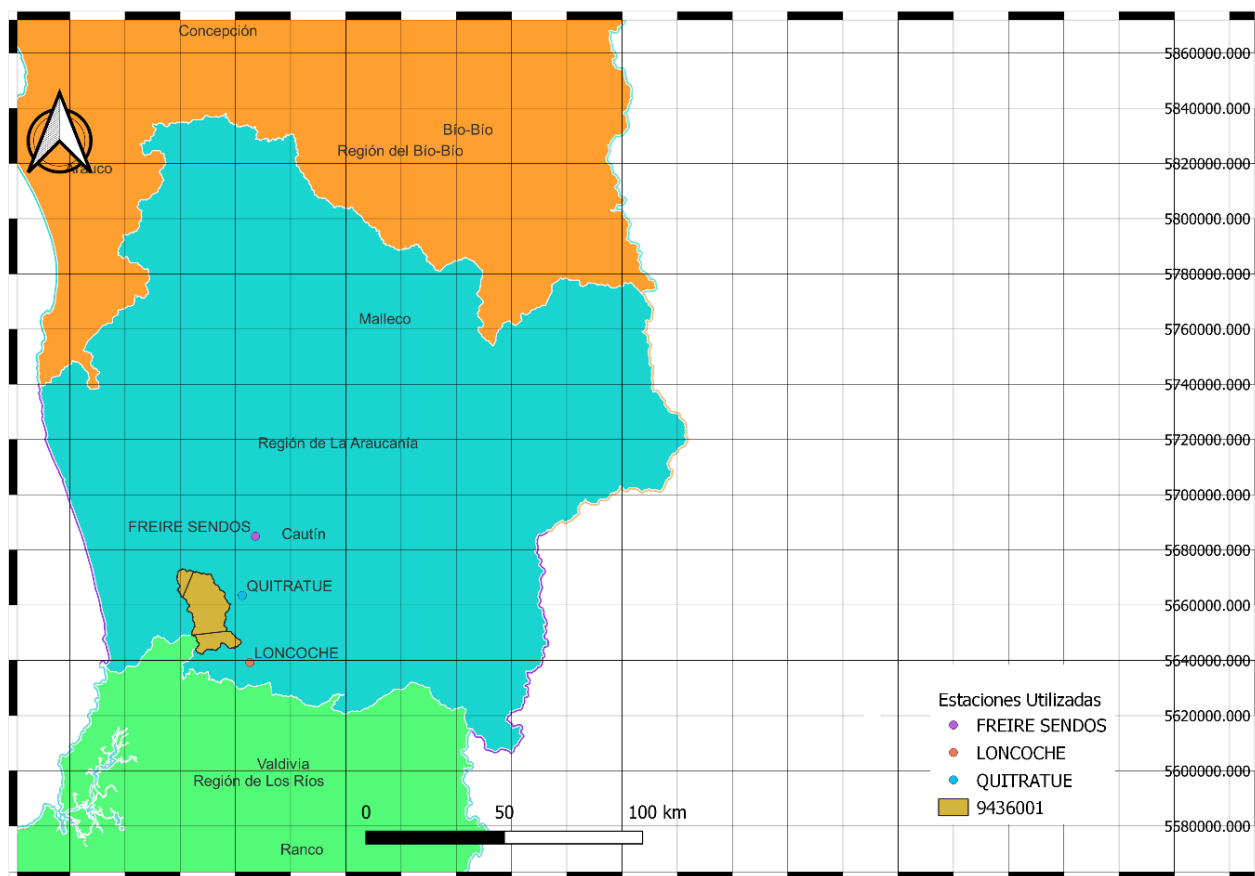


Figura 78 Delimitación de la cuenca del río Mahuidanche en Santa Ana y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 81 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Mahuidanche (Santa Ana) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km2 | Ponderación |
|------------|----------|-------------|
| 10130001 | 34.679 | 0.090 |
| 9433003 | 85.888 | 0.224 |
| 9135003 | 263.130 | 0.686 |

| | | |
|---------------|---------|---|
| Total. | 383.698 | — |
|---------------|---------|---|

Fuente: elaboración propia.

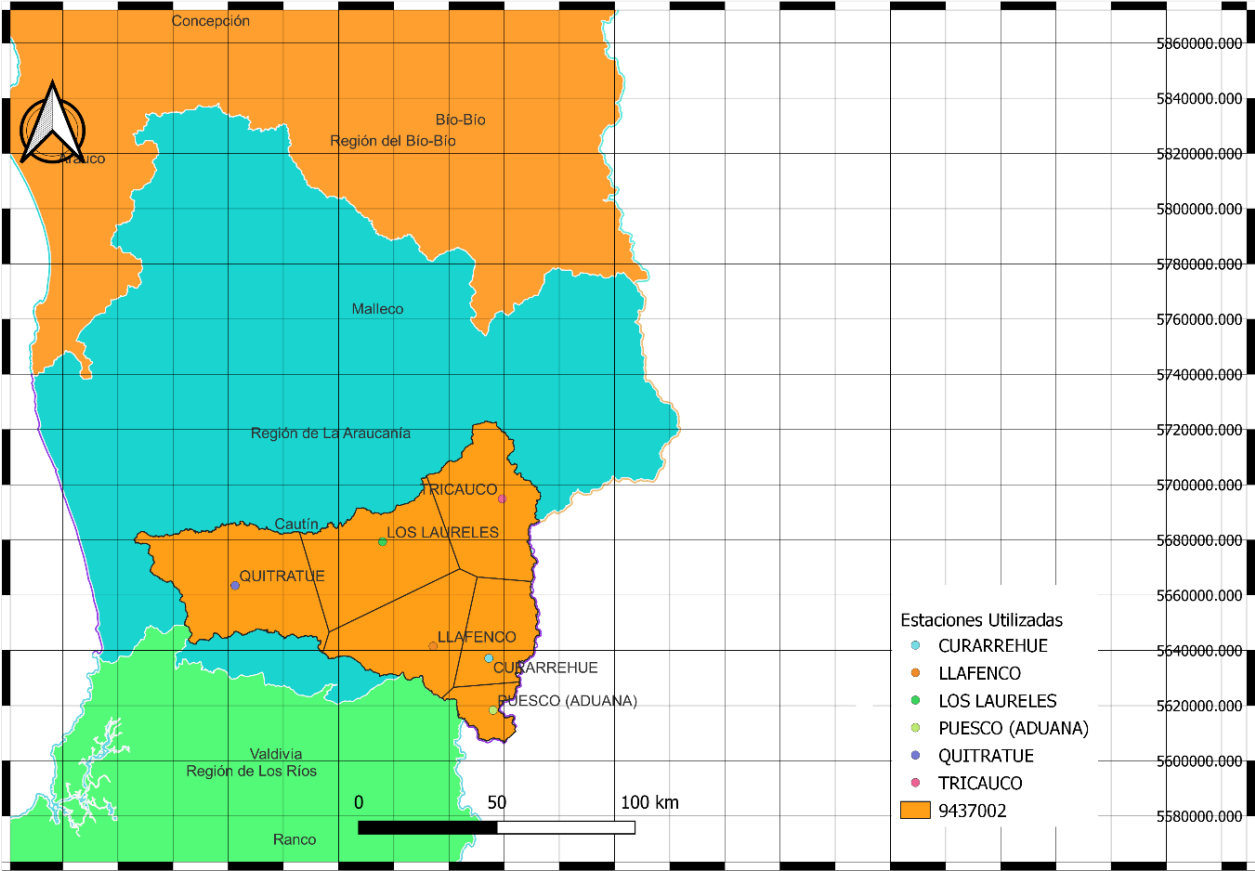


Figura 79 Delimitación de la cuenca del río Toltén en Teodoro Schmidt y localización de estaciones utilizadas para el método de polígonos de Thiessen.

Tabla 82 Áreas de influencia y ponderación cuenca del río Toltén (Teodoro Schmidt) para el cálculo de PMA.

| Código BNA | Área km2 | Ponderación |
|------------|-----------|-------------|
| 9401001 | 2058.9726 | 0.2603 |
| 9412002 | 349.2887 | 0.0442 |

| | | |
|----------------|-----------|--------|
| 9412003 | 1524.0514 | 0.1927 |
| 9414002 | 1694.3820 | 0.2142 |
| 9404002 | 1381.4845 | 0.1746 |
| 9433003 | 902.3813 | 0.1141 |
| Total. | 7910.5604 | |

Fuente: elaboración propia.

Anexo C.

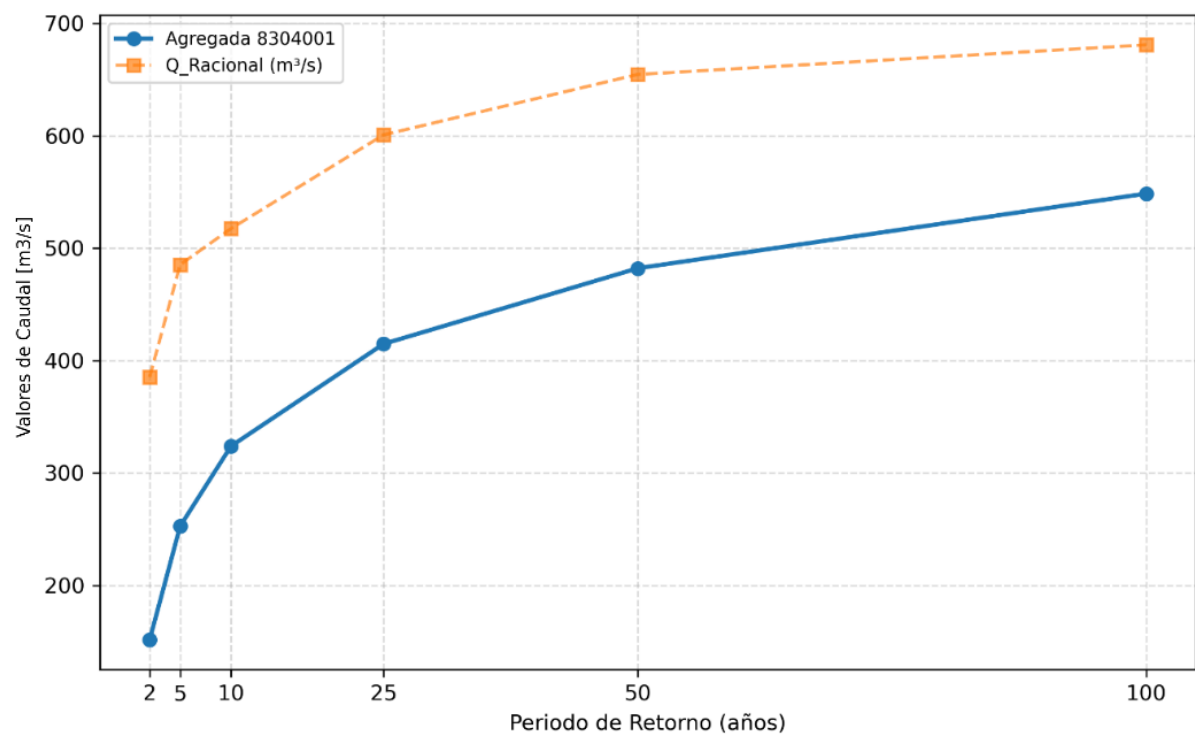


Figura 80. Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 8304001.

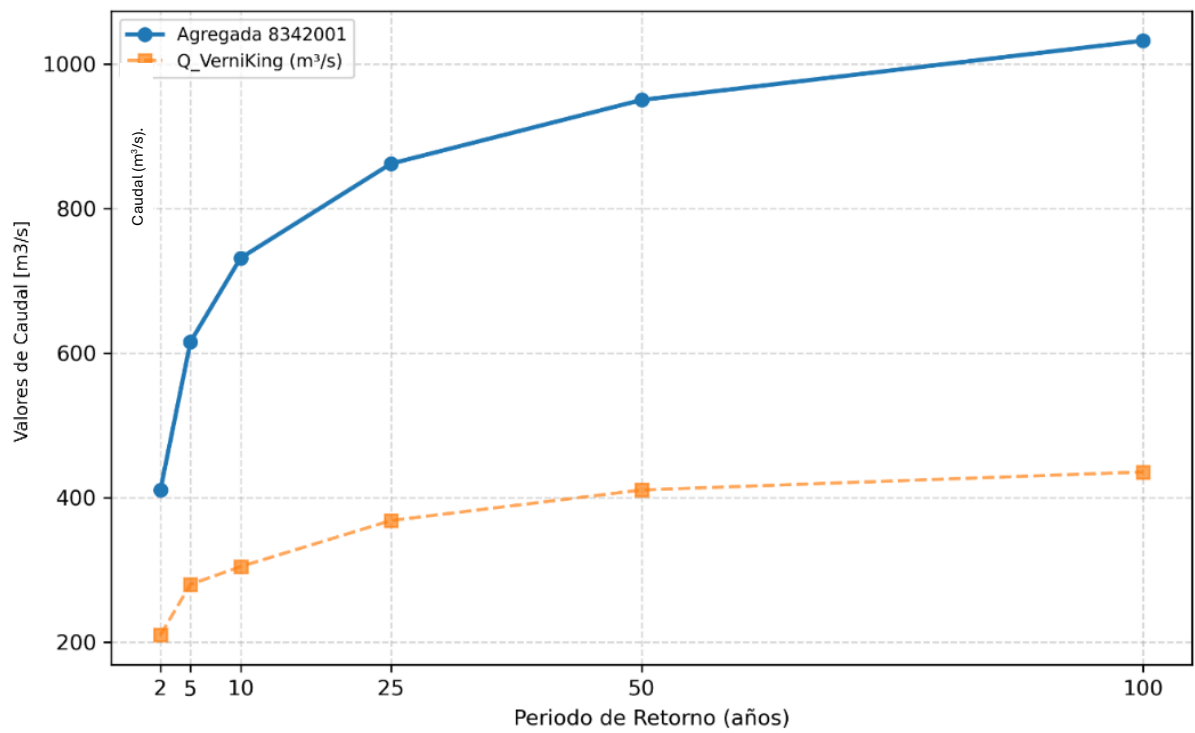


Figura 81 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 8342001.

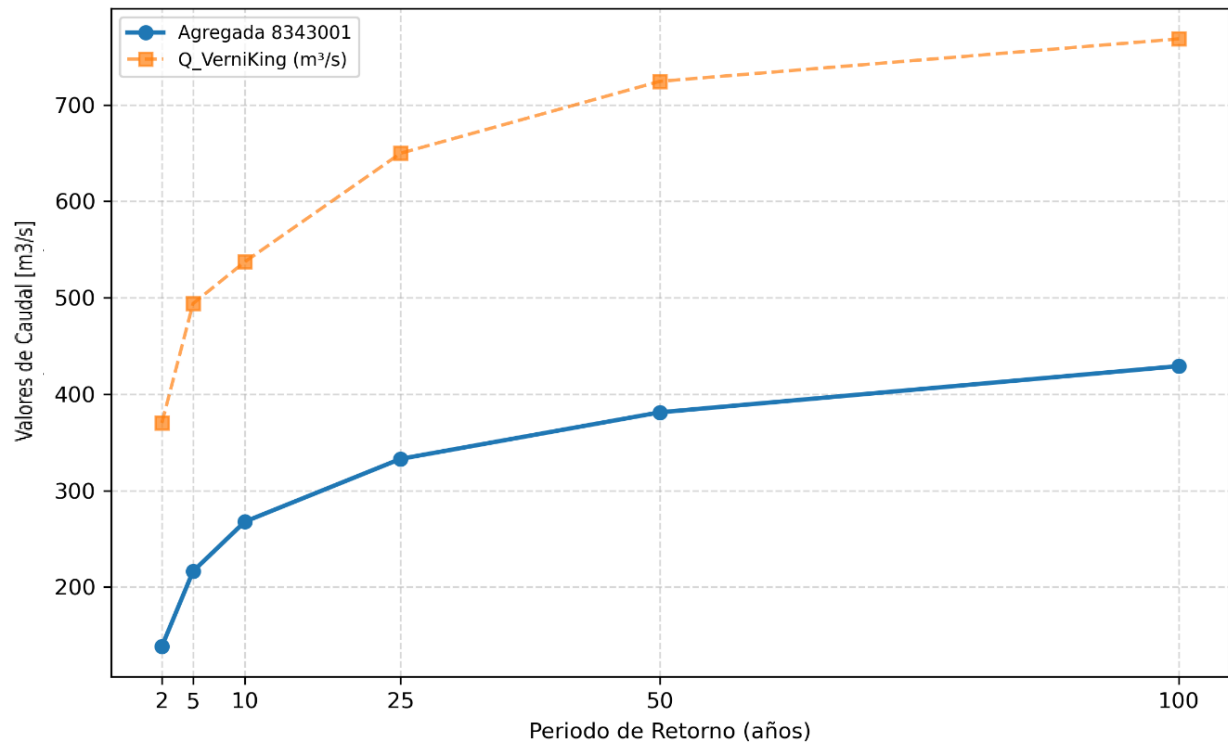


Figura 82 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 8343001.

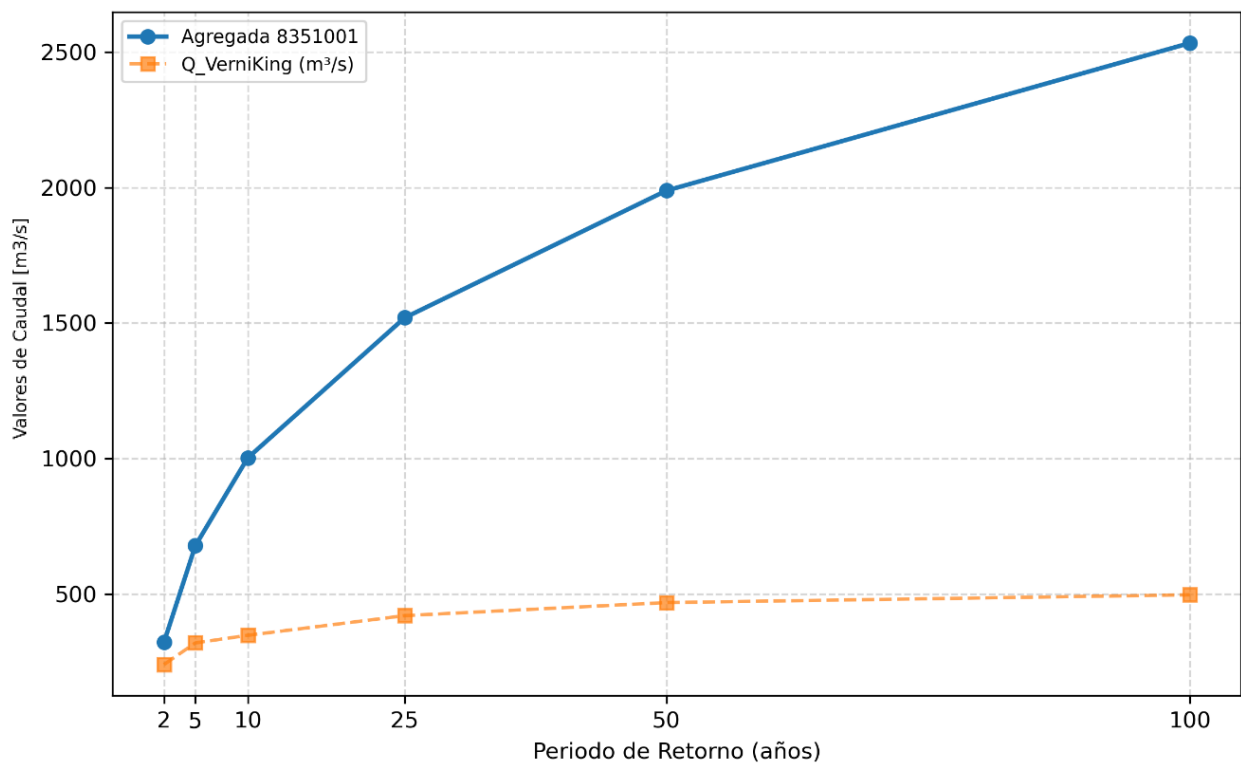


Figura 83. Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 8351001.

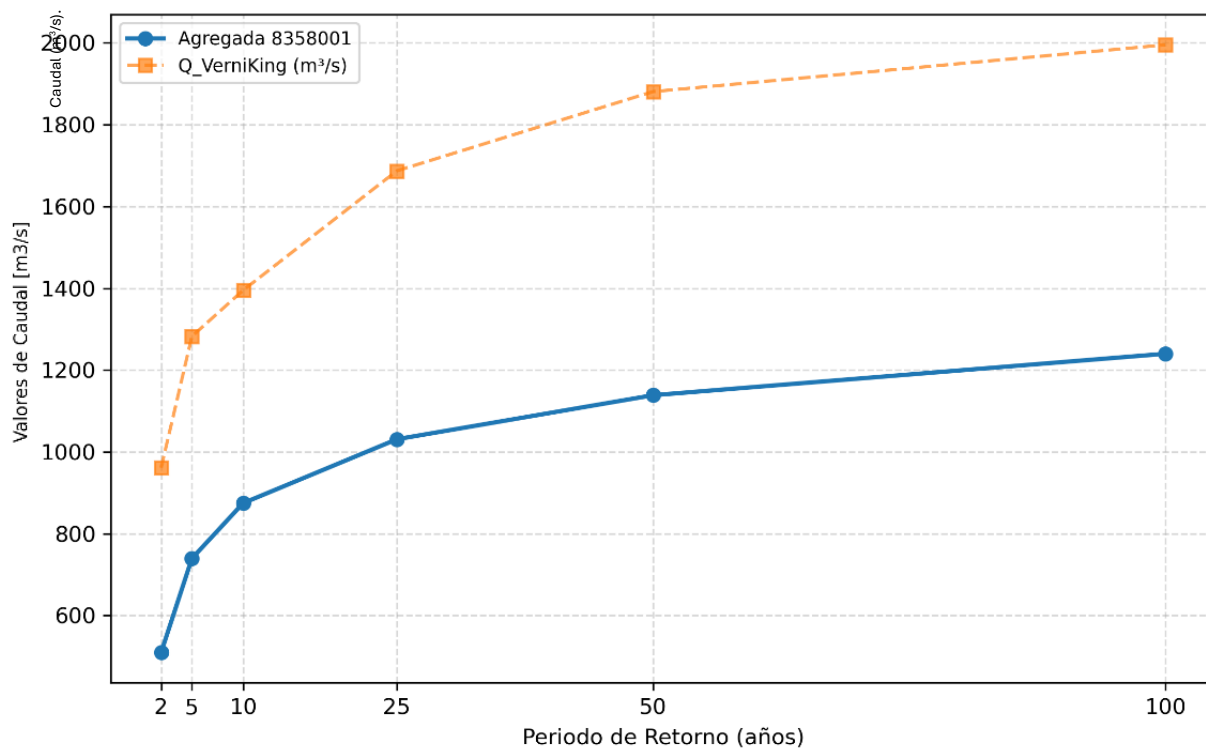


Figura 84 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 8358001.

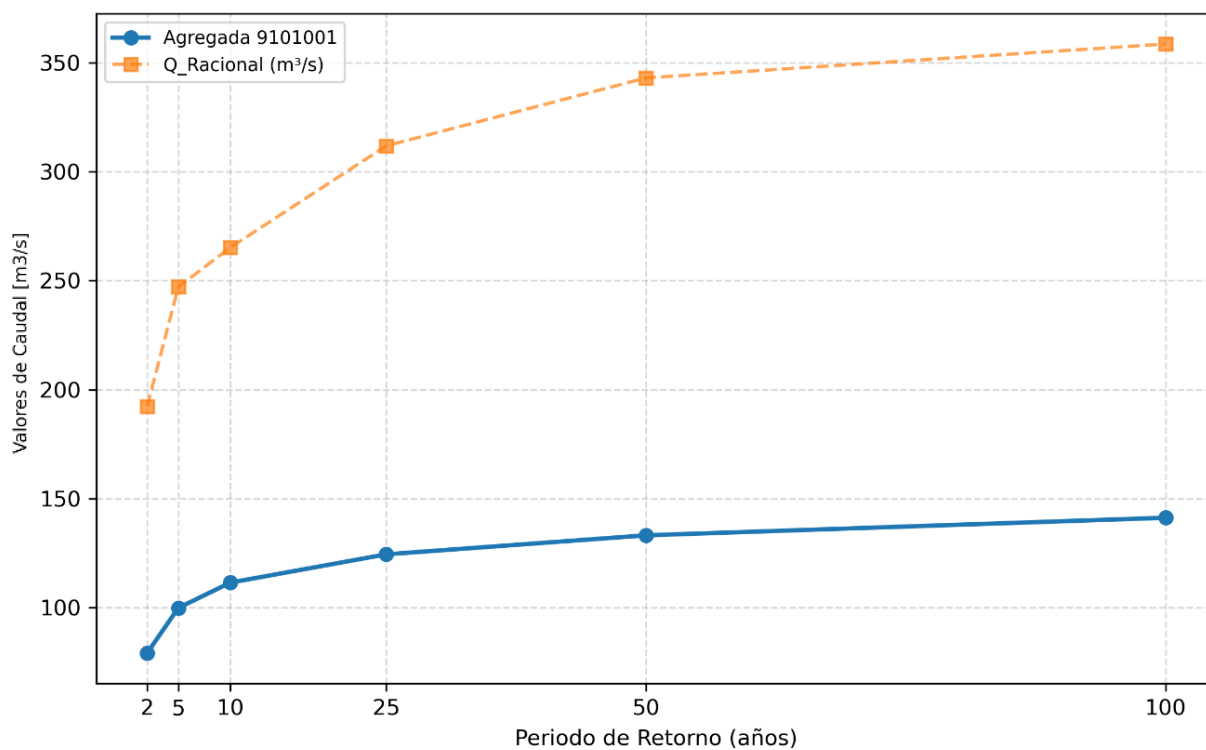


Figura 85 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9101001.

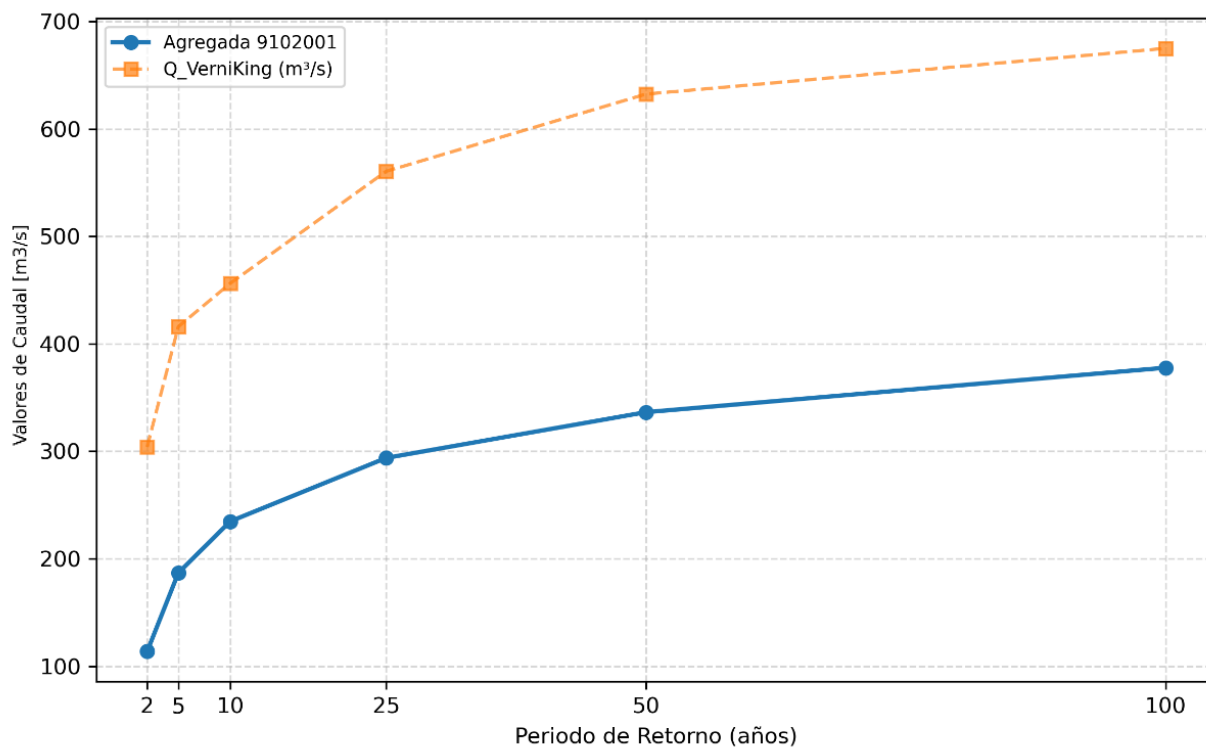


Figura 86 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9102001.

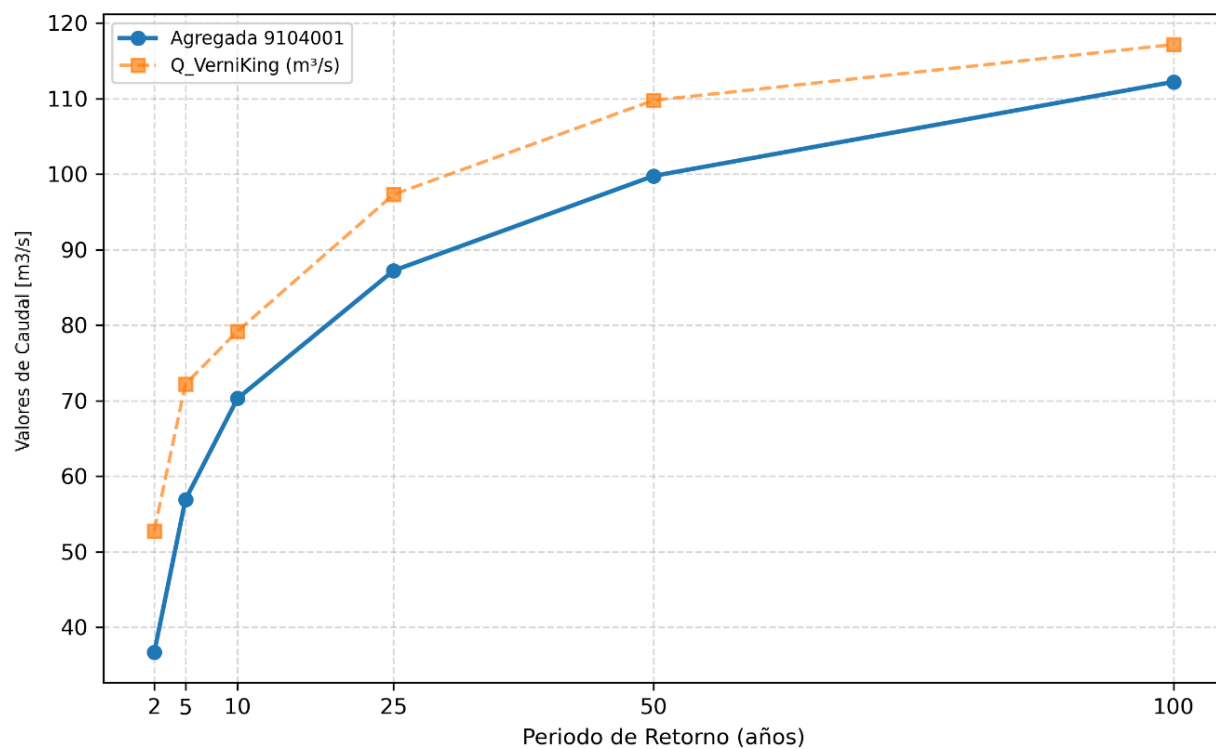


Figura 87 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9104001.

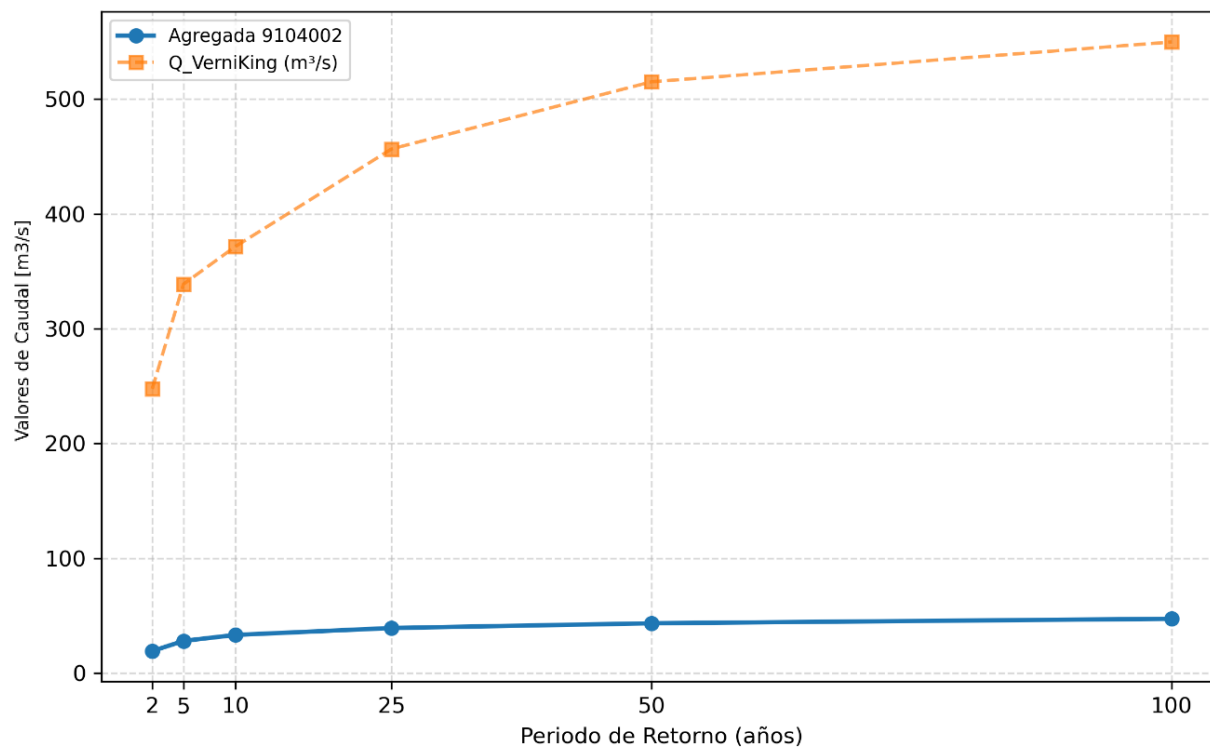


Figura 88 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9104001.

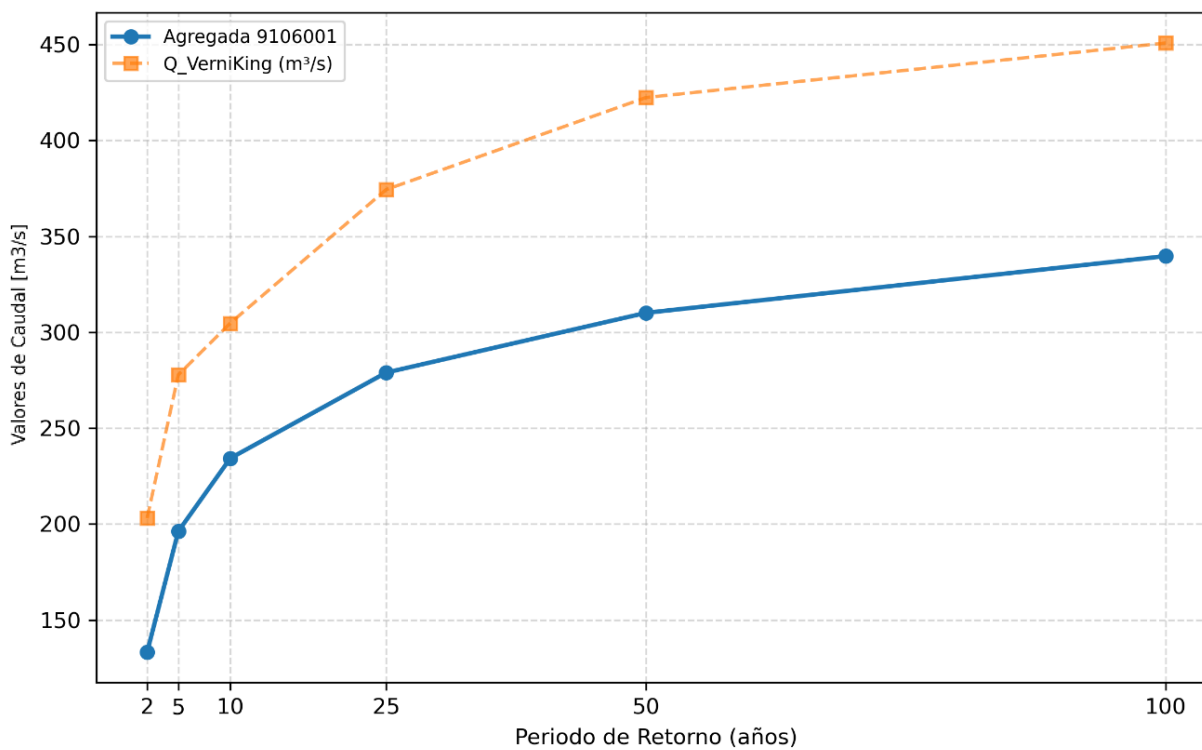


Figura 89 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9106001.

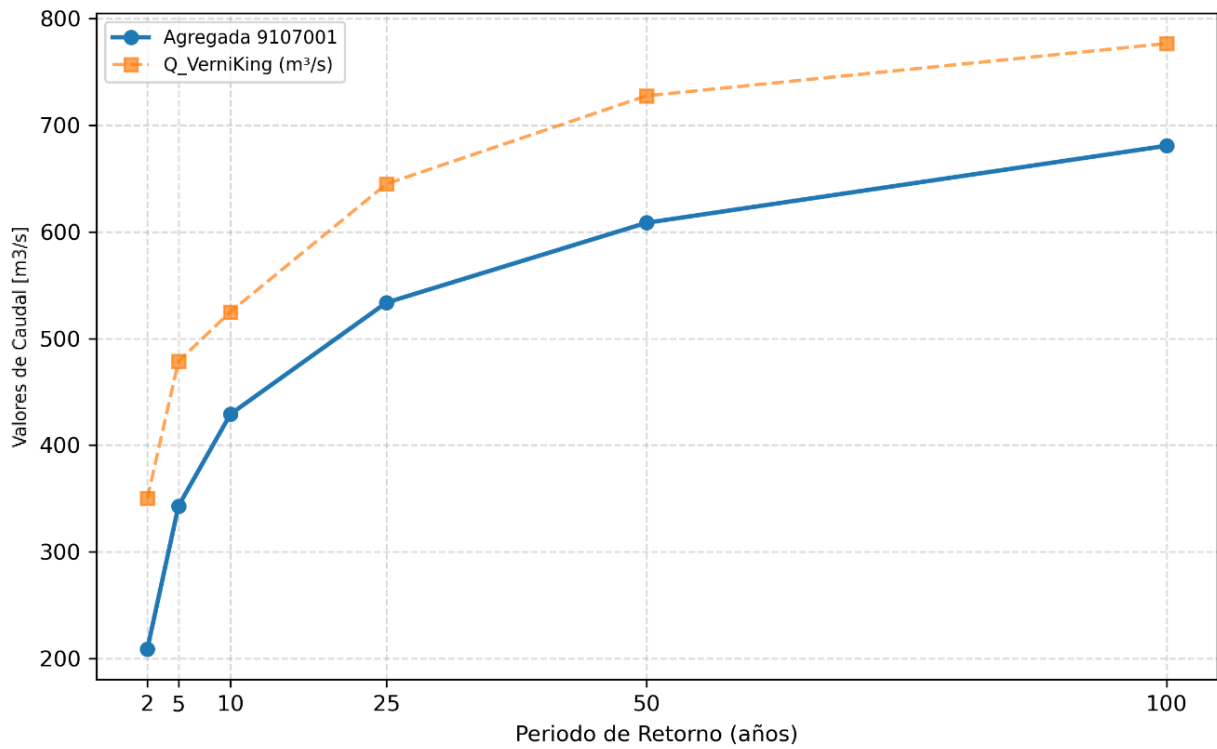


Figura 90 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9107001.

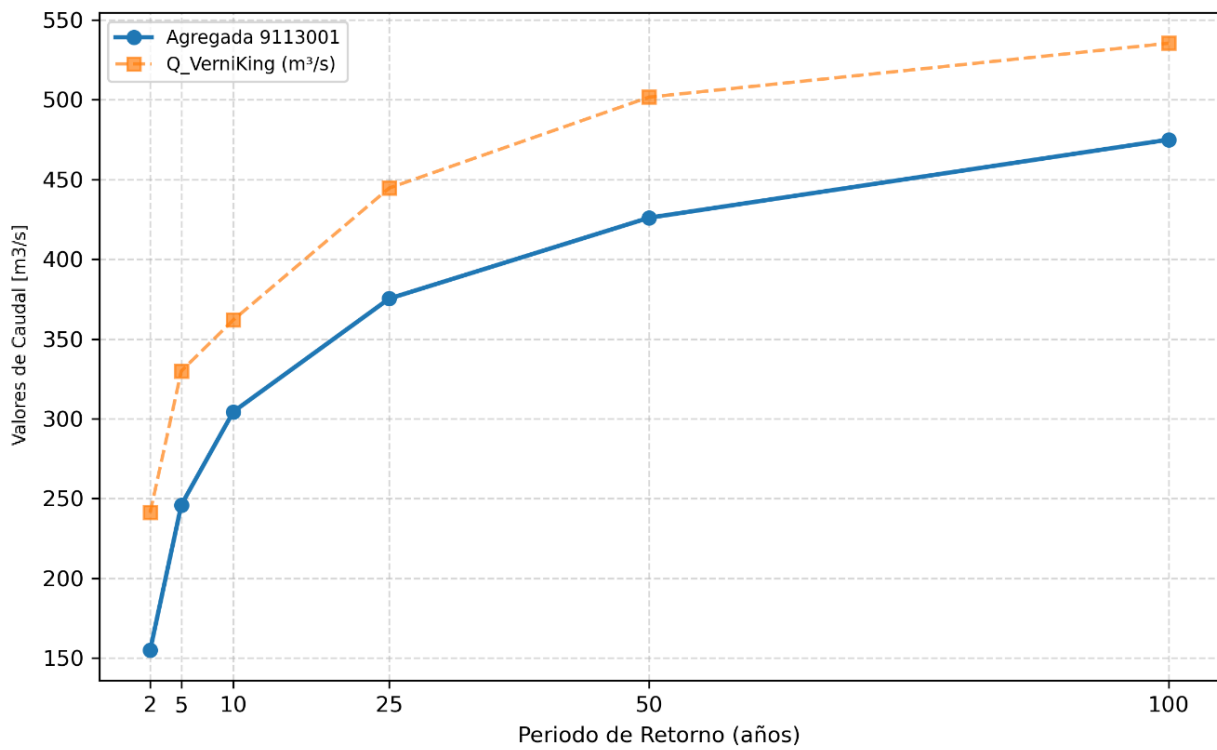


Figura 91 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9113001.

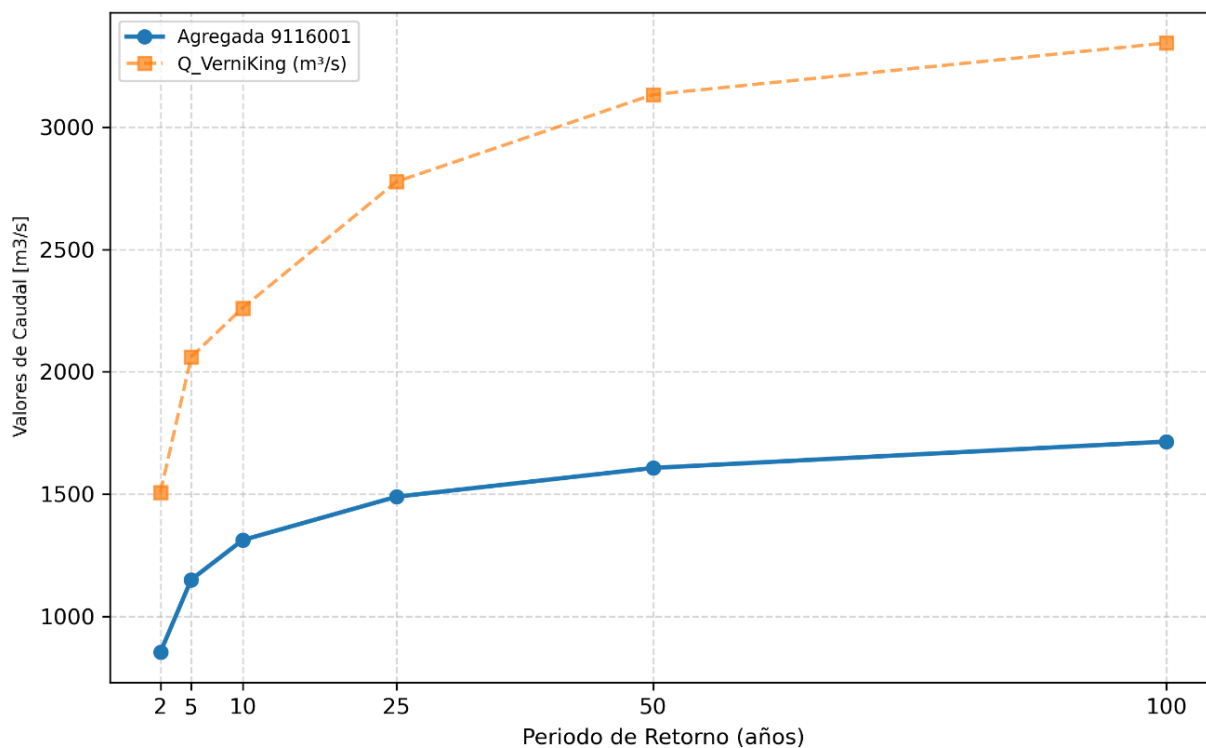


Figura 92 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9116001.

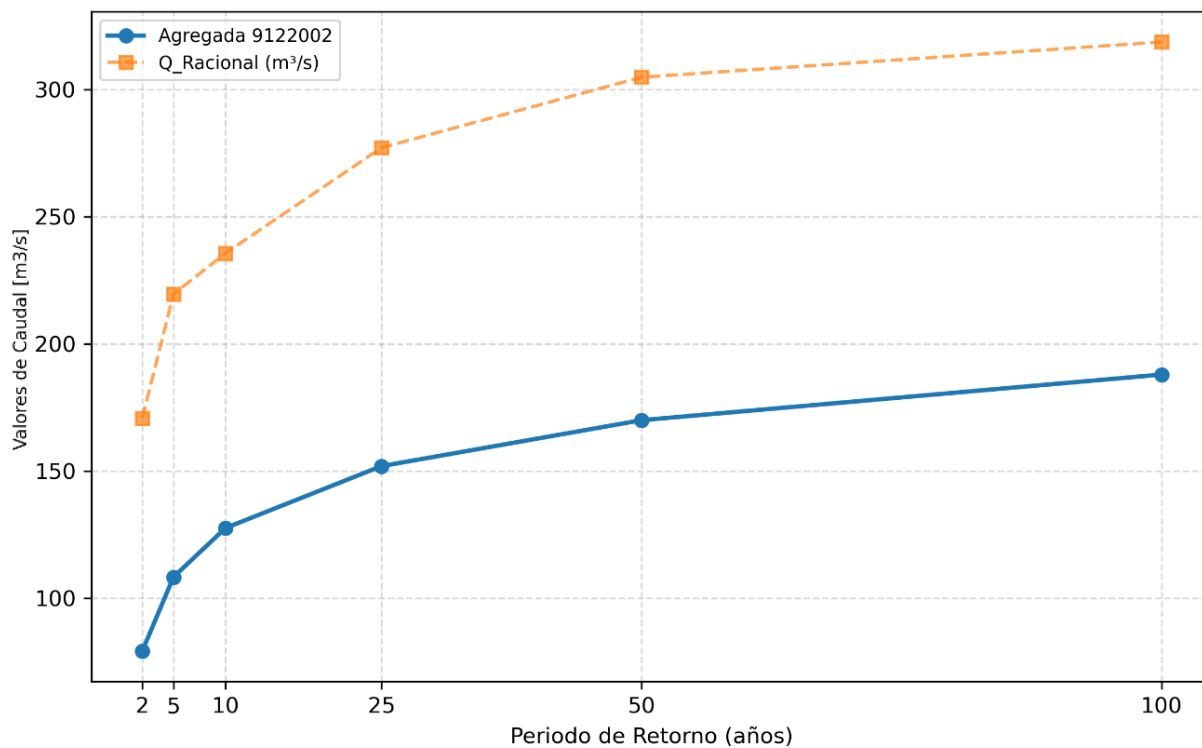


Figura 93 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9122002.

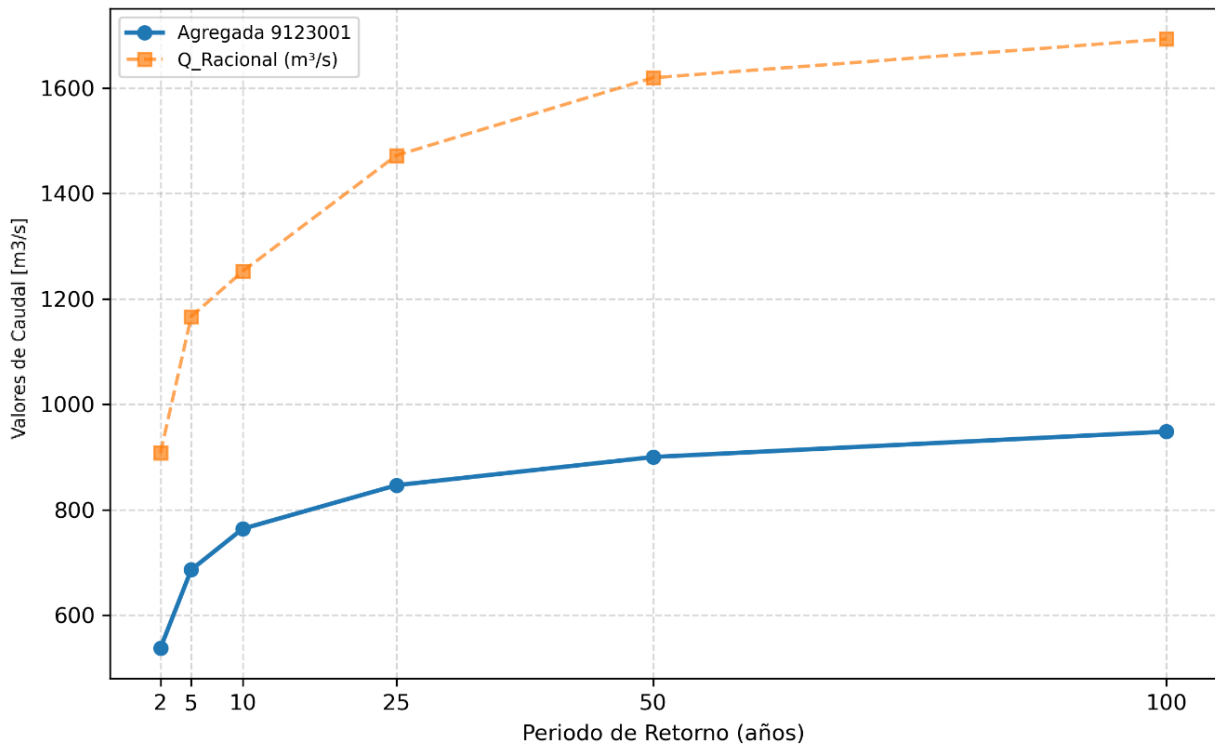


Figura 94 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9123001.

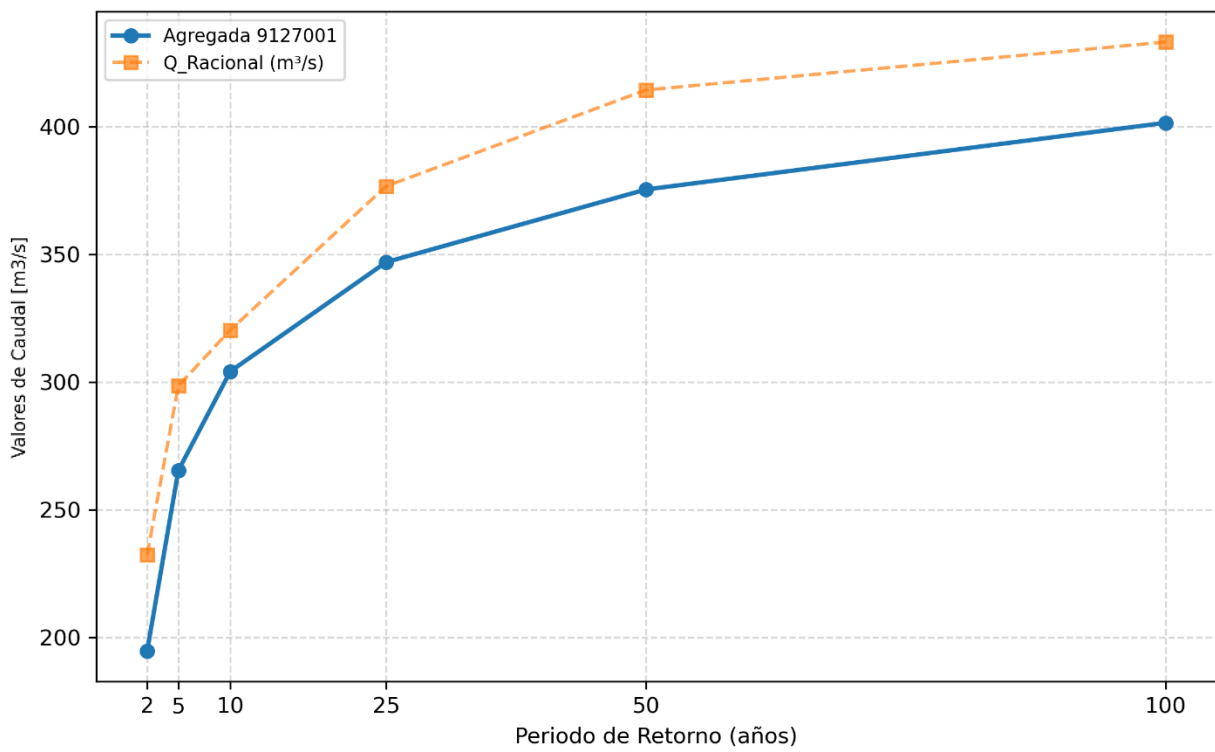


Figura 95 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9127001.

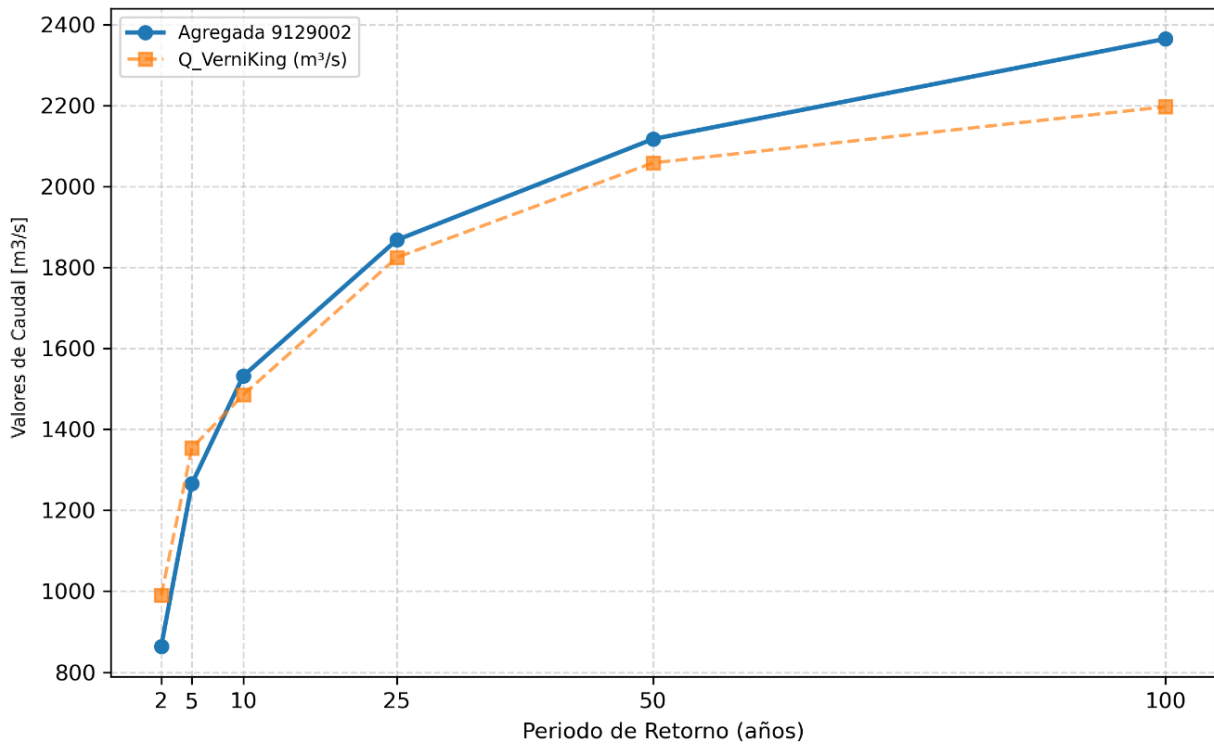


Figura 96 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9129001.

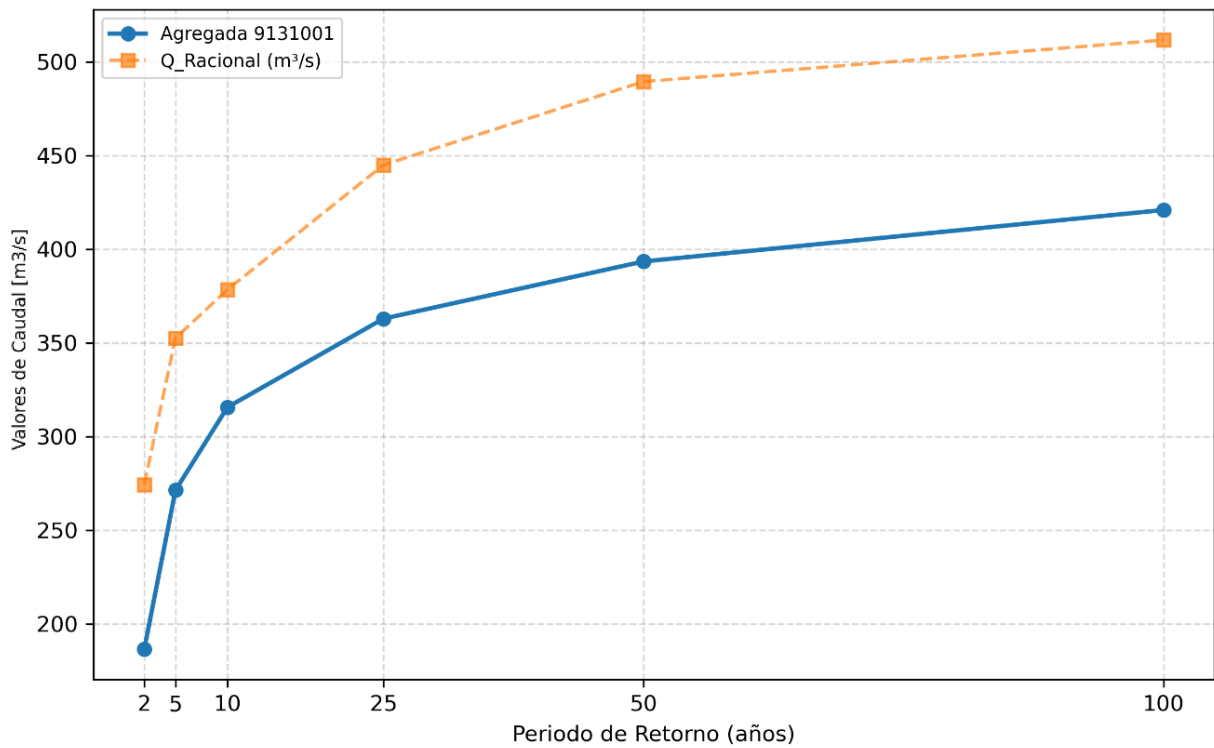


Figura 97 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9131001.

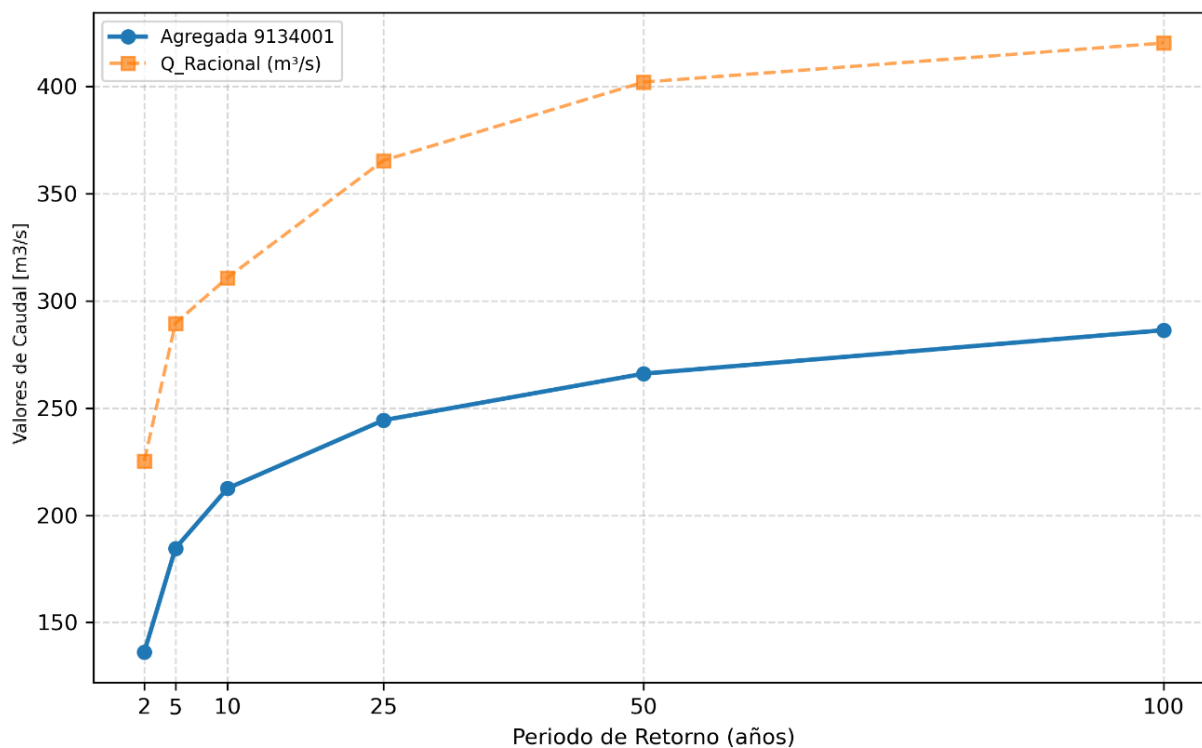


Figura 98 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9134001.

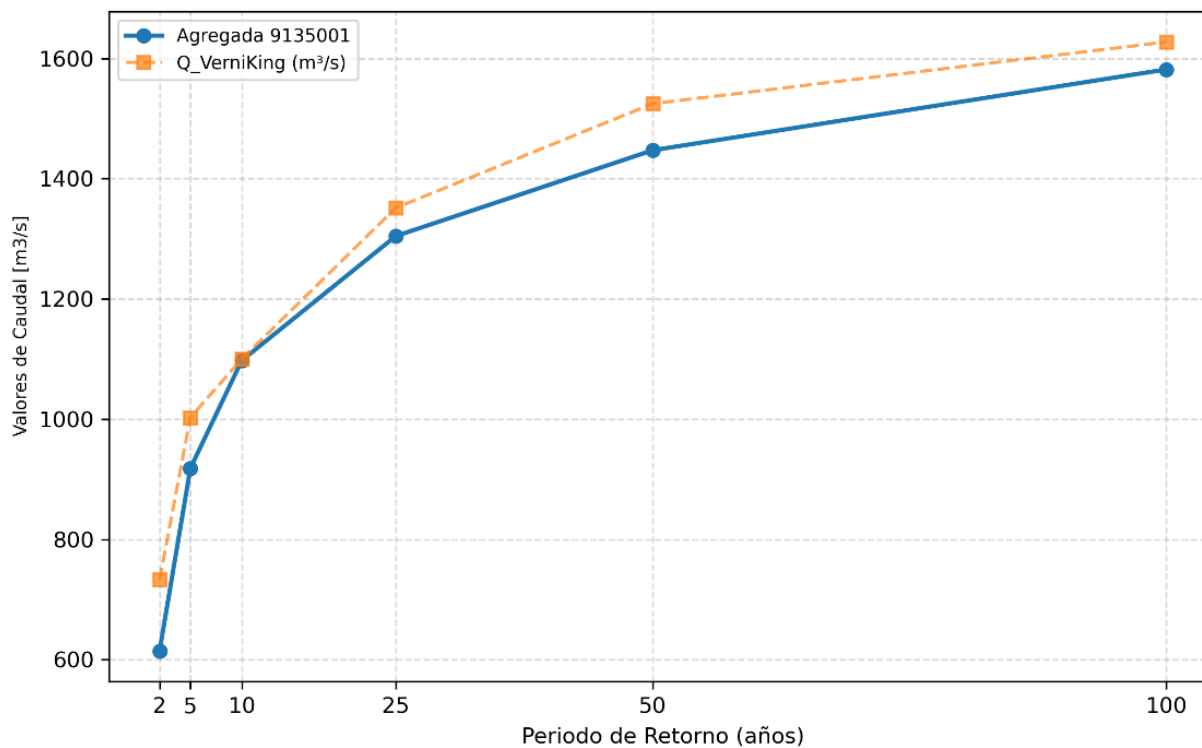


Figura 99 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9135001.

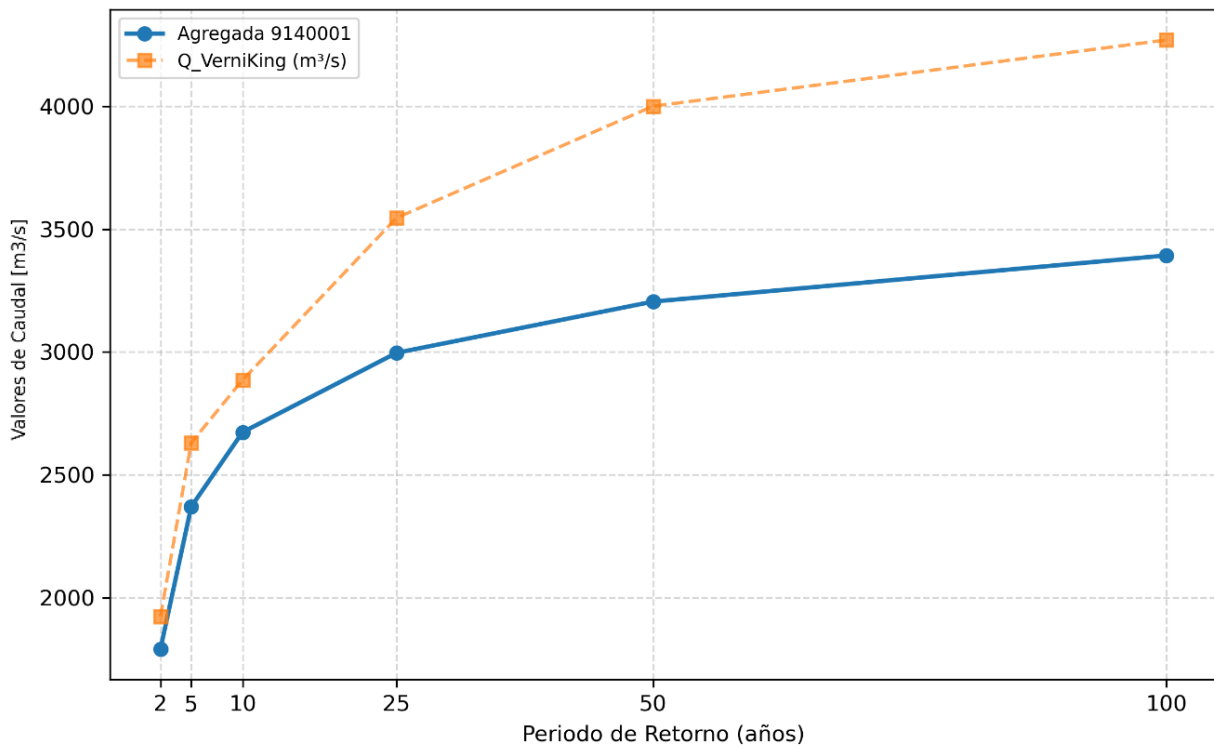


Figura 100 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9140001.

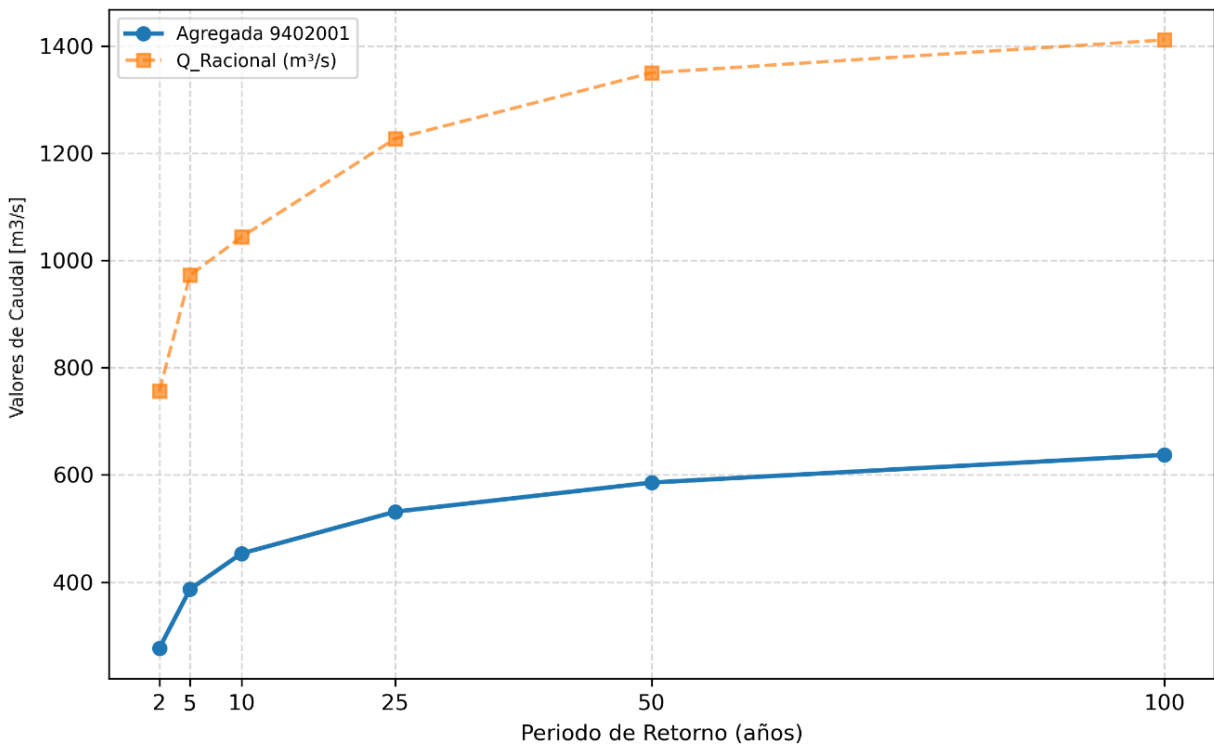


Figura 101 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9402001.

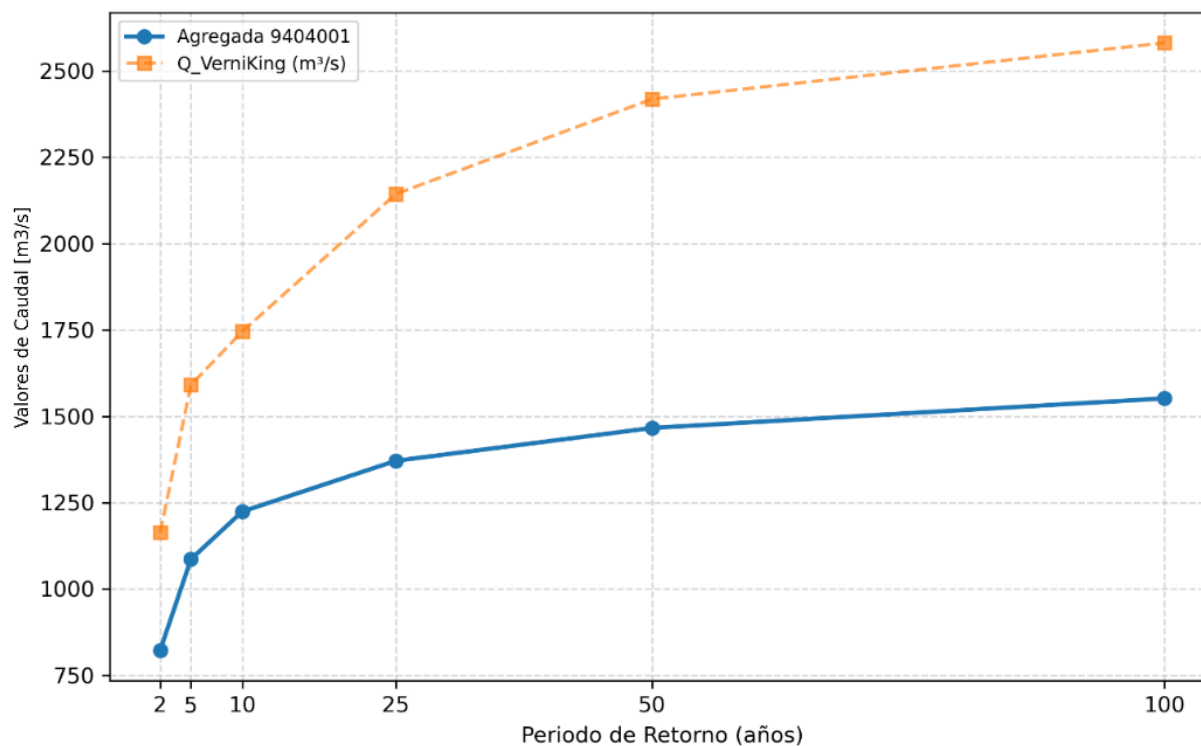


Figura 102. Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9404001.

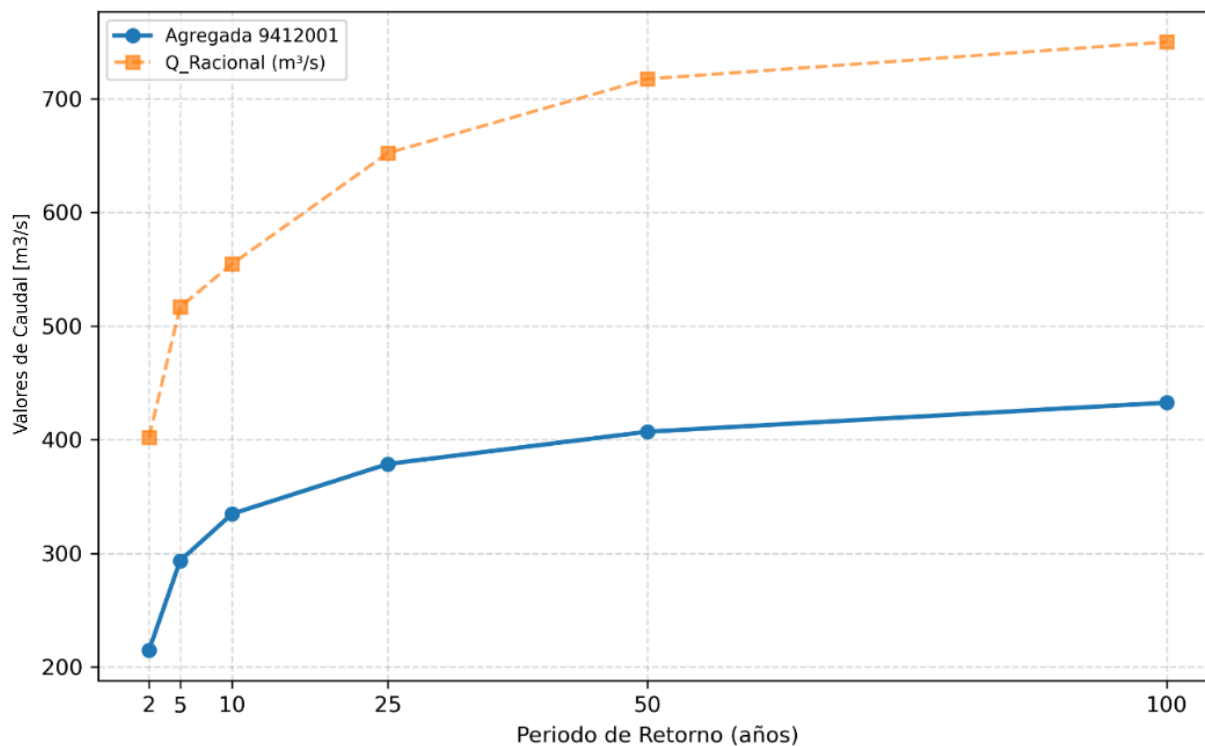


Figura 103 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9412001.

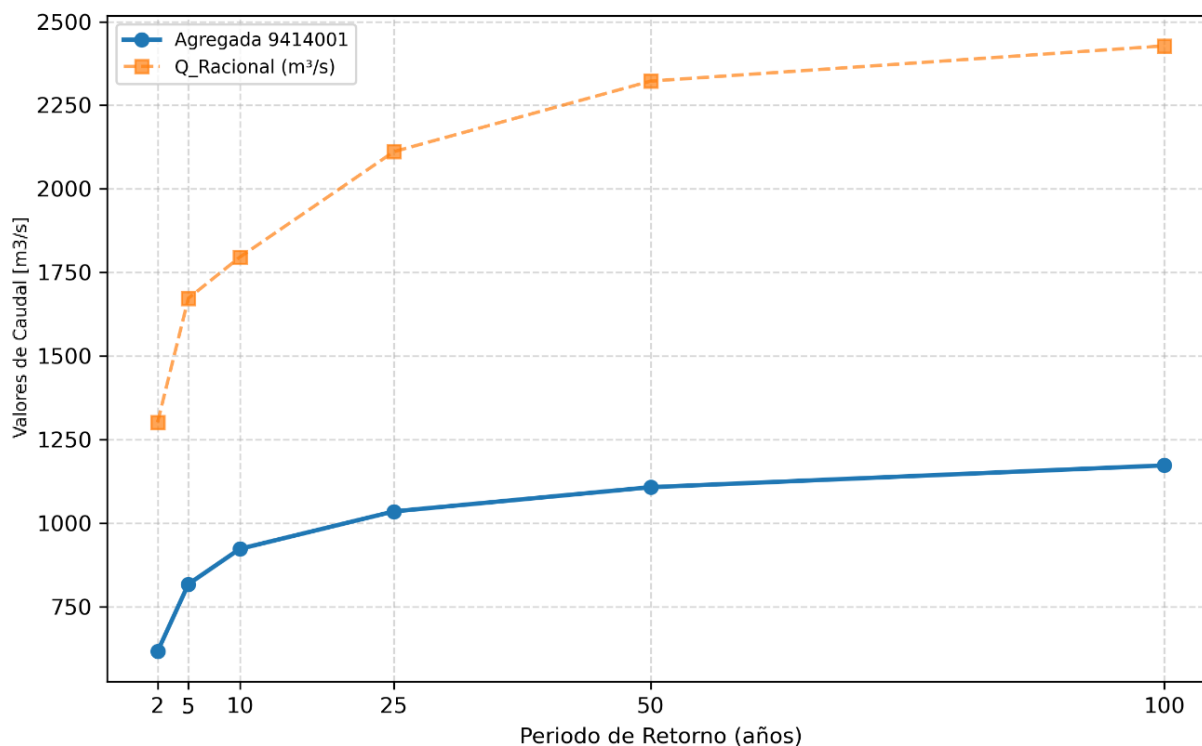


Figura 104. Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9414001.

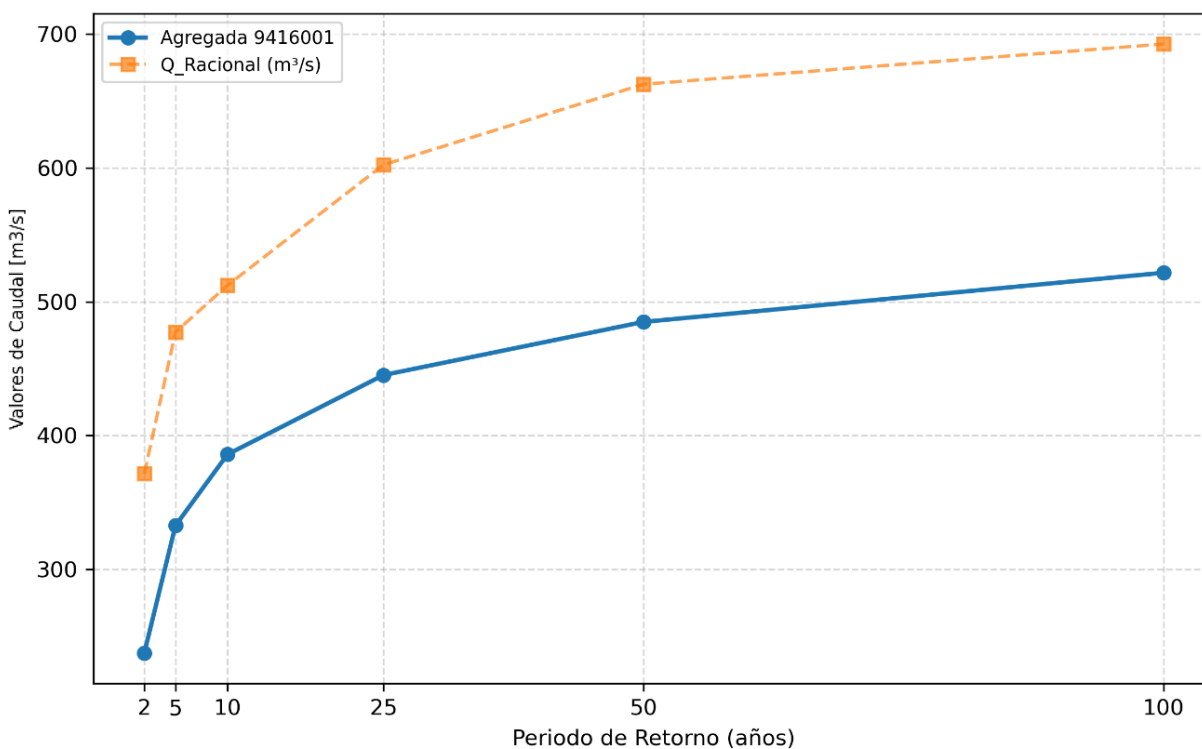


Figura 105 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9416001.

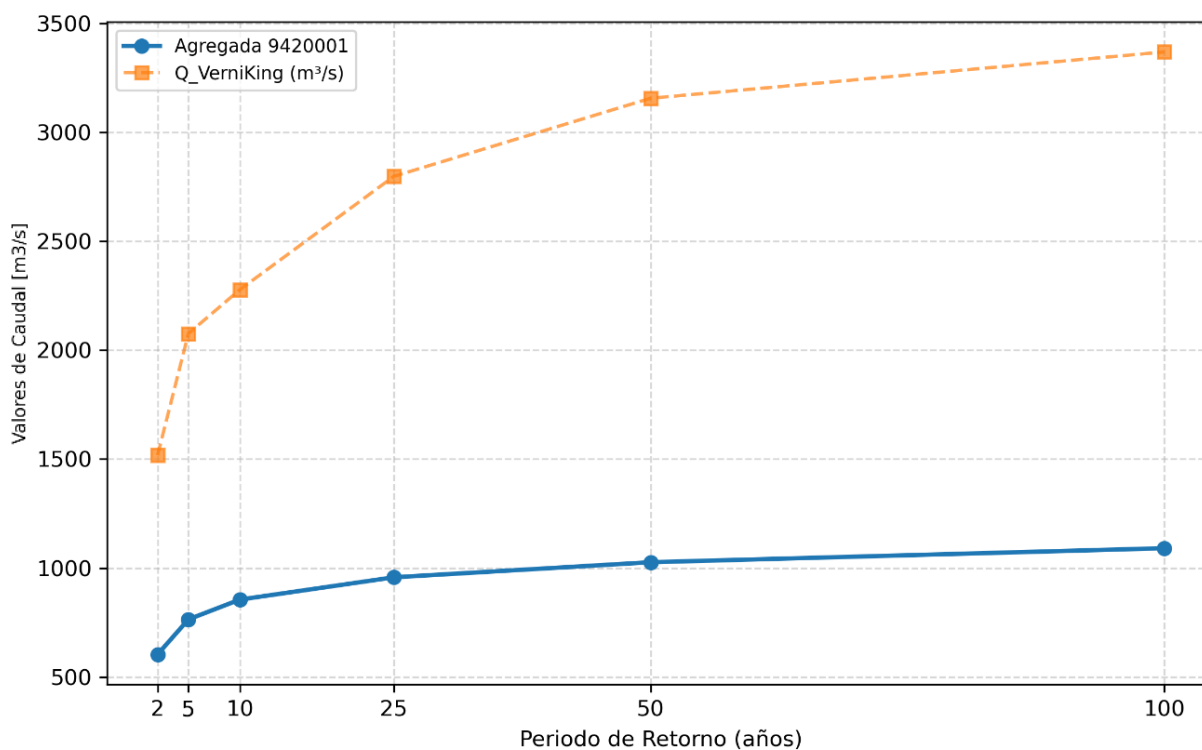


Figura 106 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9420001.

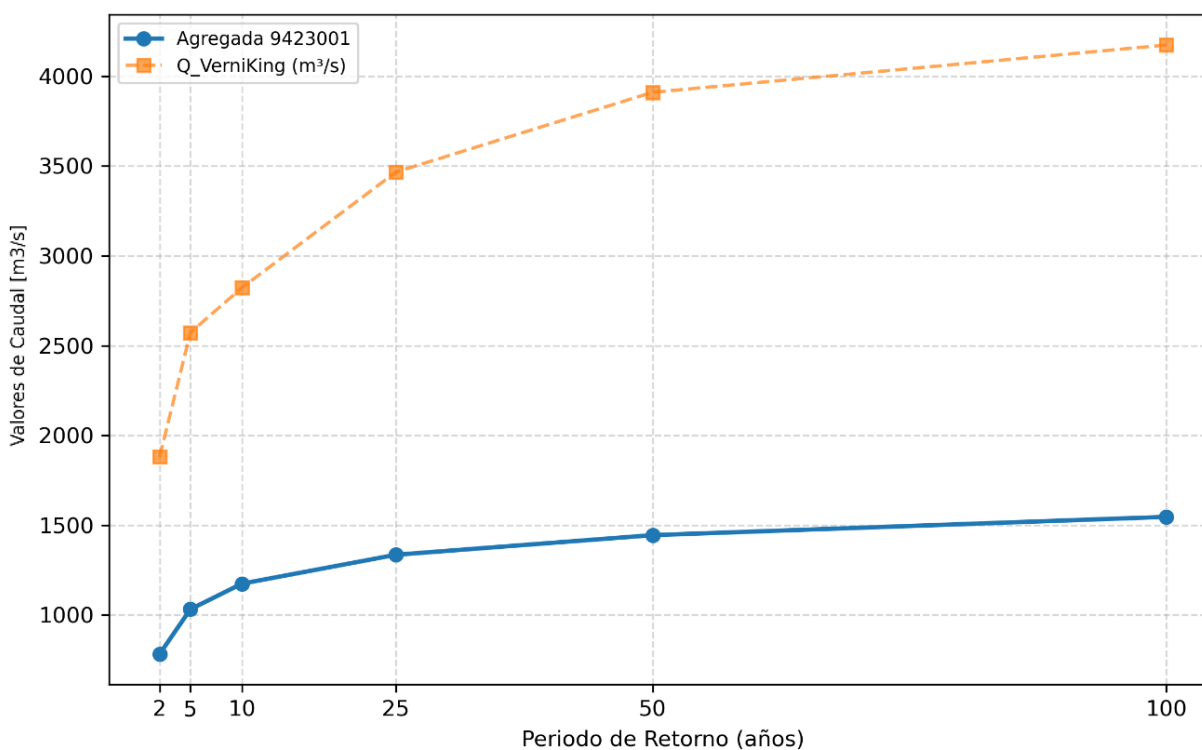


Figura 107 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9423001.

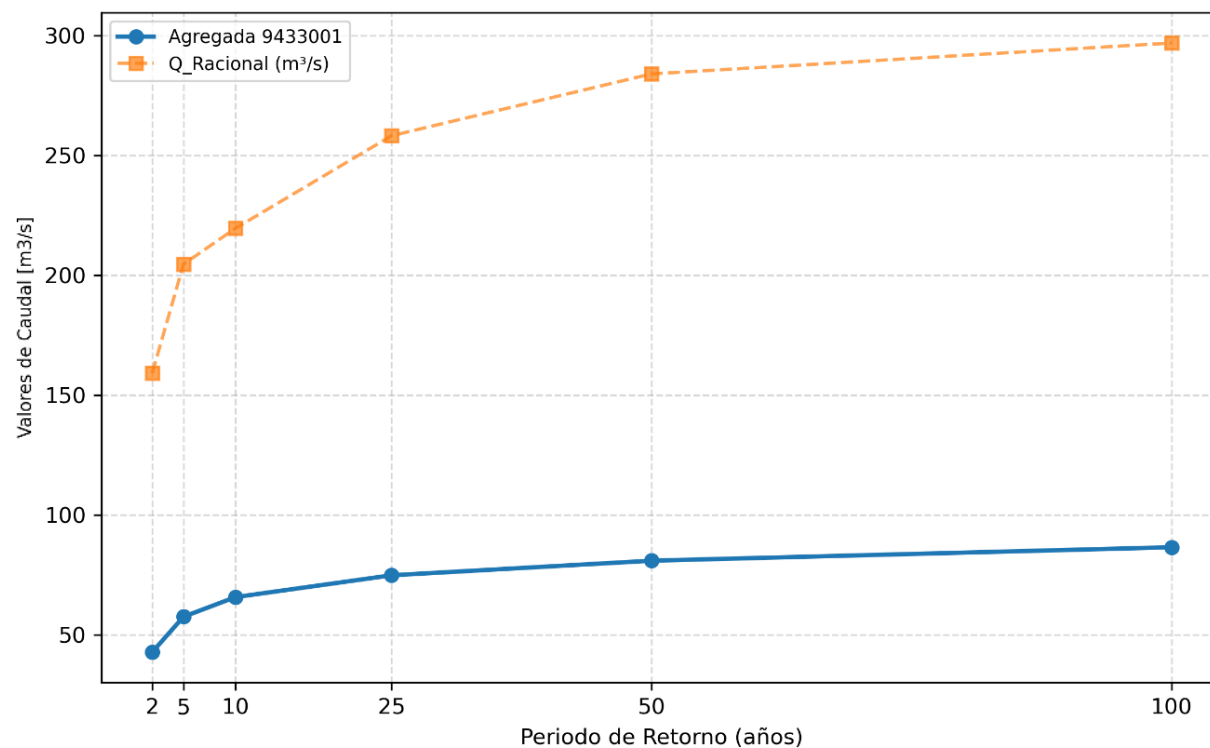


Figura 108 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9433001.

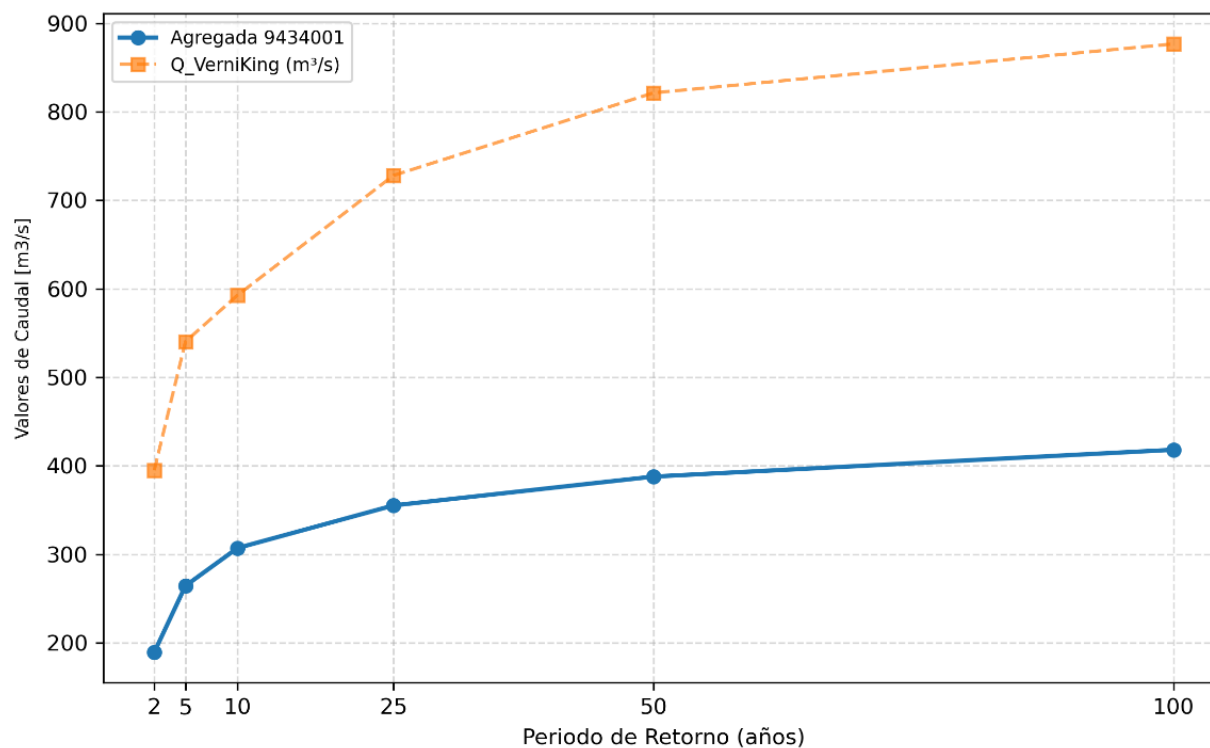


Figura 109 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9434001.

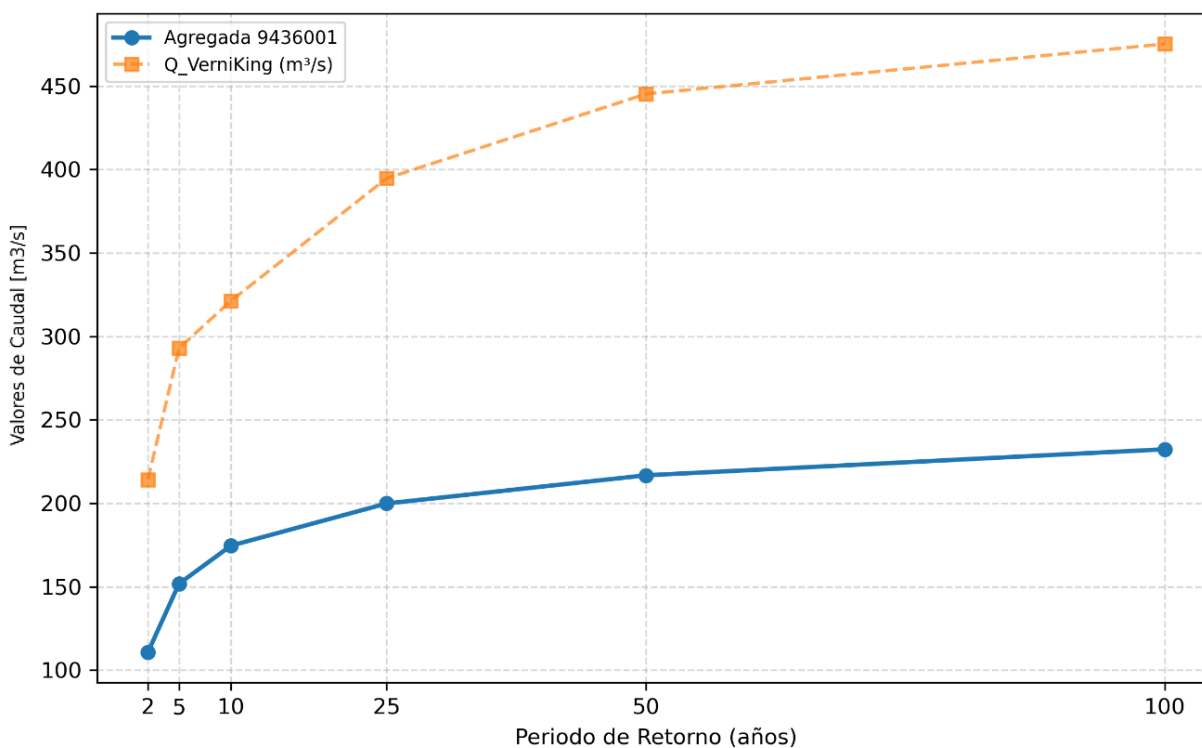


Figura 110 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9436001.

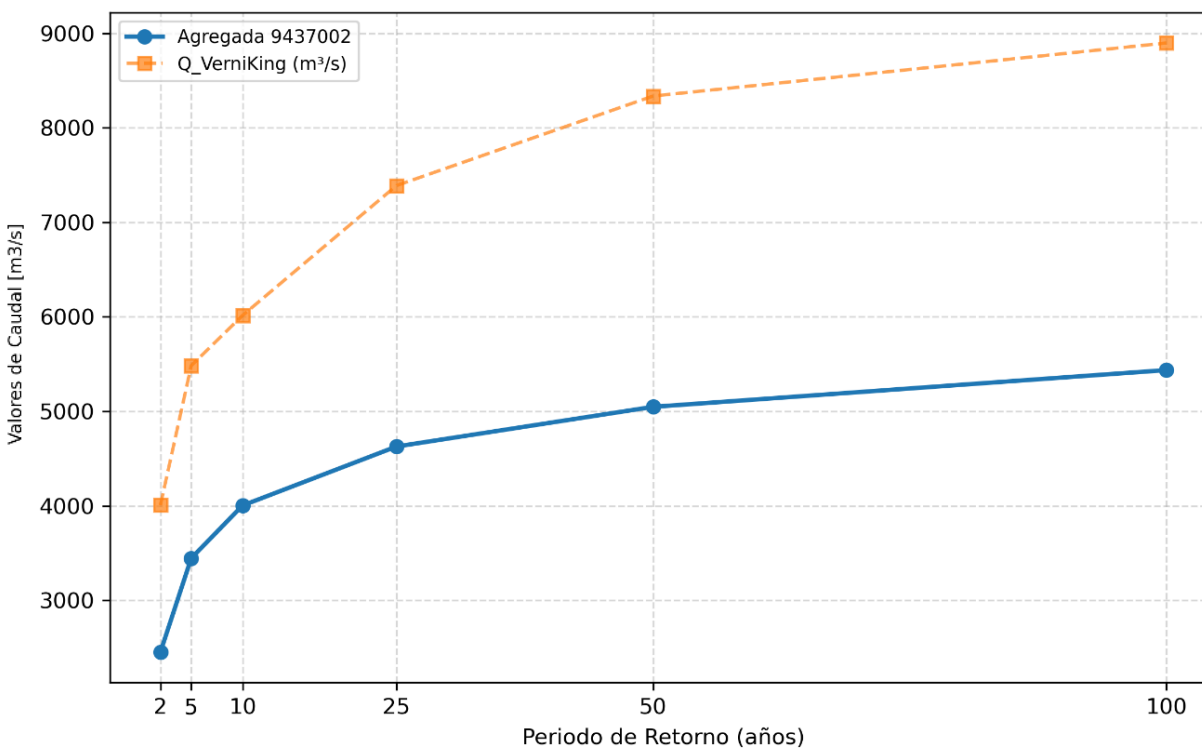


Figura 111 Comparativa entre Método Directo e Indirecto, para cuenca 9437001.