



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

ANÁLISIS DEL CONFLICTO A NIVEL OPERACIONAL ENTRE LA
HIDROELECTRICIDAD Y LA CONSERVACIÓN DEL ECOSISTEMA FLUVIAL EN LA
CUENCA DEL RÍO BIOBÍO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

MATÍAS IGNACIO CONTRERAS GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA:
MARCELO OLIVARES ALVEAL

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MATÍAS PEREDO PARADA
RODRIGO PALMA BEHNKE

SANTIAGO DE CHILE
2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: MATÍAS IGNACIO CONTRERAS GONZÁLEZ
FECHA: 2021
PROF. GUÍA: MARCELO OLIVARES ALVEAL

ANÁLISIS DEL CONFLICTO A NIVEL OPERACIONAL ENTRE LA HIDROELECTRICIDAD Y LA CONSERVACIÓN DEL ECOSISTEMA FLUVIAL EN LA CUENCA DEL RÍO BIOBÍO

La cuenca del río Biobío corresponde a una zona de gran riqueza de fauna íctica, en particular de fauna endémica de alto valor de conservación. Pese a lo anterior, se encuentra altamente intervenida por actividades antrópicas, dentro de las cuales se destacan, provisión de agua potable, uso industrial y generación hidroeléctrica. La hidroelectricidad corresponde al uso principal del recurso hídrico en la zona, debido a su alto potencial de generación, sumado a la necesidad del sistema eléctrico de contar con centrales de punta que sean capaces de responder rápidamente a los momentos de mayor consumo energético. La construcción y operación de centrales hidroeléctricas de embalse puede ser perjudicial para la conservación de los ecosistemas fluviales en donde están emplazadas, dado que, alteran el régimen hidrológico natural de la zona, sumado a la operación en punta que deben ejercer para suplir la demanda del sistema interconectado central (SIC).

Para analizar el conflicto entre hidroelectricidad y conservación del ecosistema fluvial en la cuenca del río Biobío, en el presente trabajo de título se estudia el efecto que tiene la operación de las centrales hidroeléctricas Ralco, Pangue y Angostura sobre el ecosistema fluvial, cuantificando la alteración hidrológica adoptando un enfoque de alteración hidrológica, a través de la cuantificación de los índices de alteración hidrológica (IHA), y el análisis de rango de variabilidad (RVA) de estos mismos. Para ello, se recopilan y procesan series de caudales naturalizados y post operación de las centrales, con el fin de comparar los índices hidrológicos calculados en ambos periodos. Adicionalmente, se cuantifica el grado de alteración hidrológica a escala intradiaria debido a la operación en punta de las centrales (*hydropeaking*), determinando las métricas usadas para evaluar las fluctuaciones intradiarias de caudal, a partir de los datos del coordinador eléctrico nacional y estaciones fluviométricas.

Los resultados obtenidos muestran que la operación de las centrales Ralco y Pangue alteró de forma importante el régimen natural de caudales en la parte alta del río Biobío en el periodo 2004 - 2020, exhibiendo importantes variaciones de los IHA para el régimen natural e intervenido, lo cual evidencia cambios en el régimen hidrológico de la zona. Por otro lado, la operación en punta de las centrales produce una importante alteración respecto a las fluctuaciones intradiarias del régimen natural. La central que produce un mayor grado de alteración intradiaria producto de su operación en punta, corresponde a la central Ralco, cuyos efectos se ven acentuados en la temporada húmeda del año (abril - septiembre). La central Pangue por su parte también presenta un alza en los niveles de alteración hidrológica producto de su operación, en los meses húmedos del año, pero en menor magnitud que Ralco. Por último, la central Angostura, corresponde a la generadora que menos altera el régimen hidrológico a una escala intradiaria, y al contrario de las otras centrales, los niveles de alteración producto de su operación se ven acrecentados en los meses secos (octubre - marzo).

A todas esas personas que me han apoyado de las más diversas formas, en especial a mi motor de vida, Lucas.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a mi familia. A mi papá, por su cariño y sacrificio para que nunca nos faltara nada. A mi mamá por su amor y entrega, al postergar sus sueños por nosotros, y a ambos por brindarme una muy linda niñez. A mis hermanos pequeños, Vicho y Coni, por su compañía y todas las alegrías que me han regalado, agradezco haber presenciado su crecimiento y compartir con ustedes tantas vivencias. A mi hermano mayor, Seba, por siempre ser un apoyo y un pilar fundamental en mi vida, gracias por mostrarme el camino y ser un referente tan excepcional. A mi hijo, Lucas, por ser la luz de mis días, por enseñarme a ser padre y a entregarme por completo, gracias hijo. A mis abuelos por consentirme y hacerme sentir especial. A mis tios y primos, por todas las alegrías y risas compartidas durante las juntas familiares.

A la Noe, por soportarme durante todo este proceso y aprender juntos a ser padres, gracias por ser un apoyo y una gran madre, eres muy importante en mi vida.

A mis amigos del colegio, Leo, Tobal, Popo, Juanjo, Seba, Juanma, gracias por estos años de amistad sincera y por sin importar cuan seguido hablemos o nos veamos, la chispa sigue intacta y las risas abundan. A mis amigos y compañeros de universidad, por todos los momentos vividos durante este viaje, los atesoraré por siempre, gracias por hacerlo tan mágico. Una mención especial para el Lucho, Coloro, More, Fabi, Cote, por su compañía y apoyo durante toda la universidad, gracias por su cariño. A la Sra Carmen, por su constante preocupación, cariño y las siempre gratas conversaciones en el CeBiB o en civil.

Gracias a mis profesores guías por guiarme, en el amplio sentido de la palabra. Gracias Profe Marcelo, por el apoyo y confianza depositada en mi para realizar este trabajo.

A todos los profesores que han participado durante mi formación, en especial a los profesores de hidráulica, que me han motivado a seguir esta maravillosa carrera y por sobretodo su empatía en los momentos que necesité de su ayuda, una mención especial para los profesores Miguel, Pablo y Yarko.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
2. Revisión Bibliográfica	3
2.1. Métodos caudal mínimo que debe mantenerse en el río	5
2.2. Métodos hidrológicos	5
2.2.1. Índice de alteración hidrológica (IHA)	5
2.2.2. Índice de alteración hidrológica intradiaria	6
2.3. Estudios en el río Biobío	7
3. Antecedentes	9
3.1. Zona de estudio	9
3.2. Información sobre peces	12
3.3. Información fluviométrica	18
3.3.1. Estaciones fluviométricas	18
3.3.2. Operación centrales	25
4. Metodología	26
4.1. Análisis de series de tiempo	26
4.1.1. Escala diaria	26
4.1.2. Escala intradiaria	29
4.2. Recopilación de datos	29
4.2.1. Datos hidrológicos	29
4.2.2. Operación hidroeléctrica	30
4.3. Diagnóstico con respecto al grado de alteración hidrológica del río	30
4.3.1. Alteración hidrológica	30
4.3.2. Alteración producto del <i>hydropeaking</i>	31
5. Resultados	32
5.1. Resultados preliminares	32
5.2. Alteración hidrológica escala diaria.	39
5.2.1. Central hidroeléctrica Ralco	39
5.2.2. Central hidroeléctrica Pangue	40
5.3. Central hidroeléctrica Angostura	41

5.4. Alteración hidrológica producto del <i>hydropeaking</i>	44
5.4.1. Operación centrales hidroeléctricas	44
5.4.2. Estaciones fluviométricas	49
6. Análisis de Resultados	57
6.1. Alteración hidrológica escala diaria	57
6.2. Alteración hidrológica producto del <i>hydropeaking</i>	58
7. Conclusiones	60
7.1. Trabajo futuro y Recomendaciones	61
8. Bibliografía	63
A. Anexos	66

Índice de Tablas

2.1. Métricas usadas para evaluar las fluctuaciones intradiarias basadas en datos horario. Fuente: modificado de Zimmerman et al. [2010]	7
3.1. Características centrales hidroeléctricas ubicadas en la zona de estudio . . .	10
3.2. Peces endémicos seleccionados como objeto de conservación. Fuente: modificado de García et al. [2015].	12
3.3. Estaciones fluviométricas seleccionadas para el análisis de los caudales naturales.	19
3.4. Información estaciones cercanas a centrales hidroeléctricas (puntos de interés).	20
3.5. Disponibilidad de registros en estaciones fluviométricas seleccionadas para los distintos periodos definidos.	22
3.6. Período de análisis de los caudales horarios turbinados por cada central hidroeléctrica.	25
4.1. Lista de grupos de índices de alteración hidrológica y los parámetros hidrológicos que los definen. Fuente: <i>The Nature Conservancy (2011)</i>	27
4.2. Lista de componentes del caudal ecológico, definición y parámetros hidrológicos que los definen. Fuente: Richter et al. [1997]	28

Índice de Ilustraciones

2.1. Clasificación de problemas de operación de embalses, centrándose en su conflicto con la preservación de ecosistemas. Fuente: modificado de Jager and Smith [2008]	4
3.1. Cuenca del río Biobío, centrales hidroeléctricas Angostura, Pangué y Ralco, y estaciones fluviométricas.	11
3.2. Puntos de muestreo de peces en área de estudio.	13
3.3. Distribución de <i>Basichthys australis</i> a lo largo del río Biobío	14
3.4. Distribución de <i>Bullockia Maldonadoi</i> a lo largo del río Biobío	14
3.4. Distribución de <i>Bullockia Maldonadoi</i> a lo largo del río Biobío (cont.)	15
3.5. Distribución de <i>Cheirodon Galusdae</i> a lo largo del río Biobío	15
3.6. Distribución de <i>Trichomycterus Areolatus</i> a lo largo del río Biobío	15
3.6. Distribución de <i>Trichomycterus Areolatus</i> a lo largo del río Biobío (cont.)	16
3.7. Distribución de <i>Percilia Irwini</i> a lo largo del río Biobío	16
3.8. Distribución de <i>Percichthys Trucha</i> a lo largo del río Biobío	17
3.9. Distribución de <i>Geotria Australis</i> a lo largo del río Biobío	17
3.10. Distribución de <i>Galaxias Maculatus</i> a lo largo del río Biobío	18
3.11. Series diarias de Caudal estaciones fluviométricas seleccionadas.	20
3.11. Series diarias de Caudal estaciones fluviométricas seleccionadas (cont.).	21
3.12. Régimen hidrológico estaciones seleccionadas, periodo previo a la intervención antrópica, periodo 1.	23
3.13. Régimen hidrológico estaciones seleccionadas, posterior a la entrada en operación de la central Pangué, periodo 2.	23
3.14. Régimen hidrológico estaciones seleccionadas, posterior a la entrada en operación de la central Ralco, periodo 3.	24
3.15. Régimen hidrológico estaciones seleccionadas, posterior a la entrada en operación de la central Angostura, periodo 4	24
5.1. Correlación estación río Biobío en Rucalhue y río Biobío antes Junta Pangué, periodo 3	33
5.2. Correlación estación río Biobío en Rucalhue y río Biobío antes Junta Huirí Huirí, periodo 3	33
5.3. Correlación estación río Biobío en Rucalhue y río Biobío antes Junta Pangué, periodo 4	34
5.4. Correlación estación río Biobío en Rucalhue y río Biobío antes Junta Huirí Huirí, periodo 4	34

5.5. Correlación estación río Biobío en Rucalhue y río Biobío en Puente Piulo, periodo 4	35
5.6. Serie de Caudales completada Estación río Biobío en Rucalhue	36
5.7. Serie de Caudales Estación río Biobío en Llanquén	36
5.8. Correlación estación río Biobío antes Junta Huiiri Huiiri y río Biobío en Llanquén, Periodo previo operación Central Ralco, año 2003	37
5.9. Serie de Caudales completada Estación río Biobío en Rucalhue	38
5.10. Serie de Caudales completada Estación río Biobío en Rucalhue	39
5.11. Valor del índice IHA “ conteo de pulsos bajos ”, para el periodo natural y alterado (2004 - 2020), para la central hidroeléctrica Ralco.	40
5.12. Valor del índice IHA “ conteo de pulsos bajos ”, para el periodo natural y alterado (2003 - 2020), para la central hidroeléctrica Pangué.	41
5.13. Valor del índice IHA “ Tasa de descenso ”, para el periodo natural (2004-2013) y alterado (2014-2020), para la central hidroeléctrica Angostura.	42
5.14. Mayor alteración hidrológica entre las tres categorías para cada índice, para la central hidroeléctrica Pangué, periodo 2003 - 2020.	43
5.15. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para todas las centrales, considerando periodo completo.	44
5.15. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para todas las centrales, considerando periodo completo (cont.).	45
5.16. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para todas las centrales hidroeléctricas, considerando estación húmeda y seca.	46
5.17. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada mes, central hidroeléctrica Ralco.	47
5.18. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada mes, central hidroeléctrica Pangué.	48
5.19. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada mes, central hidroeléctrica Angostura.	49
5.20. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para todas las estaciones fluviométricas, considerando periodo completo.	50
5.21. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para todas las estaciones fluviométricas, considerando estación húmeda y seca.	51
5.22. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada mes, estación fluviométrica Río Biobío en Lanquén.	52
5.23. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada mes, estación fluviométrica Río Biobío antes junta Huiiri Huiiri	53
5.24. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada mes, estación fluviométrica Río Biobío antes junta Pangué	54
5.25. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada mes, estación fluviométrica Río Biobío en Rucalhue	55
5.26. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria en distintos puntos, para los meses de abril, junio y octubre.	56
A.1. histograma de frecuencias absolutas para indicador RBF de la central Angostura, considerando periodo completo.	66
A.2. histograma de frecuencias relativas para indicador RBF de la central Angostura, considerando periodo completo.	67

A.3. histograma de frecuencias absolutas para indicador RBF de la central Pangué, considerando periodo completo.	67
A.4. histograma de frecuencias relativas para indicador RBF de la central Pangué, considerando periodo completo.	68
A.5. histograma de frecuencias absolutas para indicador RBF de la central Ralco, considerando periodo completo.	68
A.6. histograma de frecuencias relativas para indicador RBF de la central Ralco, considerando periodo completo.	69
A.7. histograma de frecuencias absolutas para indicador NREVS de la central Angostura, considerando periodo completo.	69
A.8. histograma de frecuencias relativas para indicador NREVS de la central Angostura, considerando periodo completo.	70
A.9. histograma de frecuencias absolutas para indicador NREVS de la central Pangué, considerando periodo completo.	70
A.10. histograma de frecuencias relativas para indicador NREVS de la central Pangué, considerando periodo completo.	71
A.11. histograma de frecuencias absolutas para indicador NREVS de la central Ralco, considerando periodo completo.	71
A.12. histograma de frecuencias relativas para indicador NREVS de la central Ralco, considerando periodo completo.	72
A.13. histograma de frecuencias absolutas para indicador PTF de la central Angostura, considerando periodo completo.	72
A.14. histograma de frecuencias relativas para indicador PTF de la central Angostura, considerando periodo completo.	73
A.15. histograma de frecuencias absolutas para indicador PTF de la central Pangué, considerando periodo completo.	73
A.16. histograma de frecuencias relativas para indicador PTF de la central Pangué, considerando periodo completo.	74
A.17. histograma de frecuencias absolutas para indicador PTF de la central Ralco, considerando periodo completo.	74
A.18. histograma de frecuencias relativas para indicador PTF de la central Ralco, considerando periodo completo.	75
A.19. histograma de frecuencias absolutas para indicador CDV de la central Angostura, considerando periodo completo.	75
A.20. histograma de frecuencias relativas para indicador CDV de la central Angostura, considerando periodo completo.	76
A.21. histograma de frecuencias absolutas para indicador CDV de la central Pangué, considerando periodo completo.	76
A.22. histograma de frecuencias relativas para indicador CDV de la central Pangué, considerando periodo completo.	77
A.23. histograma de frecuencias absolutas para indicador CDV de la central Ralco, considerando periodo completo.	77
A.24. histograma de frecuencias relativas para indicador PTF de la central Ralco, considerando periodo completo.	78
A.25. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para todas las centrales, estación húmeda.	79

A.26. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para todas las centrales, estación seca.	80
A.27. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para todas las estaciones fluviométricas, estación húmeda.	81
A.28. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para todas las estaciones fluviométricas, estación seca.	82
A.29. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de enero.	83
A.30. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de febrero.	84
A.31. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de marzo.	85
A.32. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de abril.	86
A.33. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de mayo.	87
A.34. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de junio.	88
A.35. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de julio.	89
A.36. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de agosto.	90
A.37. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de septiembre.	91
A.38. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de octubre.	92
A.39. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de noviembre.	93
A.40. Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de diciembre.	94

Capítulo 1

Introducción

Todo sistema eléctrico sujeto a una demanda variable requiere contar con centrales que sean capaces de responder rápidamente a los momentos en donde se registran fluctuaciones. La alternativa más práctica y económica para solventar esta necesidad corresponde a la hidroelectricidad, ya que dada su estructura de generación le permite cambiar de manera rápida la cantidad de energía que generan. Pese a sus ventajas existe un daño relacionado a generar en este esquema, denominado *hydropеaking*, relacionado con fuertes fluctuaciones de caudal aguas abajo del punto de restitución, las cuales son bruscas, impredecibles y repetitivas. Debido al *hydropеaking* se presenta una fuerte alteración en los ecosistemas ya que se tiene un aumento repentino del caudal turbinado el cual una vez superada la hora punta disminuye más rápido que en procesos naturales.

Para analizar el conflicto entre la preservación del ecosistema fluvial y generación hidroeléctrica se estudiará la cuenca del río Biobío, que cuenta con un alto porcentaje de intervención hidroeléctrica, además de ser considerada como un punto de alta concentración de biodiversidad endémica Villagrán and Hinojosa [1997].

El presente trabajo de título se realiza en el marco del Proyecto Chile-China NSFC 190025 "*Comparative Study on water-food-energy nexus at the river basin level in Chile and China: Reconciling Hydropower and competing water uses*" financiado por la ANID. Este proyecto, tiene como objetivo profundizar los conocimientos sobre la naturaleza de los tradeoffs entre hidroelectricidad y otros usos como, riego, recreación y conservación de ecosistemas, y así identificar alternativas de manejo del recurso hídrico que disminuyan el conflicto.

Para lo anterior, se debe en primera instancia cuantificar la alteración hidrológica generada por la construcción y operación de las centrales hidroeléctricas Pangué (1996) Ralco (2004) y Angostura (2014) en la zona de interés, la cual será comparada con la alteración hidrológica del régimen natural, que favorece la conservación de la fauna íctica. Para realizar esto, existen distintas metodologías como la presentada en Jowett [1997]. En el presente trabajo de título se emplea el método hidrológico, llamado alteración hidrológica, el cual a través de los índices de alteración hidrológica, IHA por sus siglas en inglés [Richter et al., 1996] y el rango de variabilidad de estos, RVA por sus siglas en inglés [Richter et al., 1997]. Adicionalmente, se cuantifica el grado de alteración hidrológica debido a la operación en punta de las centrales

(*hydropeaking*), determinando las métricas usadas para evaluar las fluctuaciones intradiarias de caudal, a partir de los datos del coordinador eléctrico nacional y estaciones fluviométricas [Zimmerman et al., 2010].

La motivación del trabajo de título presentado, es identificar y cuantificar la alteración hidrológica producto de la operación de las centrales hidroeléctricas Ralco, Pangue y Angostura, considerando la operación interdiaria e intradiaria. Además, se pretende sentar las bases para futuros estudios que consideren el objetivo de conservación de la fauna íctica.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo consiste en identificar y cuantificar la alteración hidrológica producto de la operación de las centrales hidroeléctricas Ralco, Pangue y Angostura, considerando *hydropeaking*.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar el régimen hidrológico natural de la cuenca del río Biobío.
- Identificar las diferencias entre el régimen natural y alterado.
- Caracterizar y cuantificar las fluctuaciones intradiarias de caudal, empleando índices de alteración hidrológica intradiaria.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

La cuenca del río Biobío presenta una gran riqueza de especies endémicas, además, este cauce es uno de los más importantes para el uso humano. Dentro de los usos que posee destacan, provisión de agua potable, riego, generación hidroeléctrica y uso industrial. Para entender los efectos de la actividad humana en el río Biobío Habit et al. [2006] documentó los cambios en la comunidad de peces. Para ello comparó la distribución y abundancia de peces en la situación luego del incremento de la actividad humana con el patrón longitudinal esperado y a los datos históricos de estudios previos al rápido desarrollo de la última década, se emplearon datos de distribución de peces, biomasa, abundancia (evaluada como captura por unidad de esfuerzo) y diversidad en 8 estaciones de muestreo en las zonas medias y bajas del río en condiciones de alto y bajo caudal. Como resultado de su estudio, se concluye que existe disminución de la riqueza, diversidad y abundancia de peces aguas abajo de las estaciones de muestreo. Además, se aprecia una pérdida o reducción en la distribución de especies nativas, la cual va de la mano con un aumento en la distribución de especies introducidas (toleradas), estas consecuencias se ven reflejadas en los últimos 10 - 15 años, lo cual implica que existe un efecto a larga escala de los impactos humanos en el río.

Si se profundiza en los efectos de la operación de centrales hidroeléctricas sobre el ecosistema, surge la necesidad de compatibilizar ambos usos, es decir, asegurar la demanda energética y los requerimientos para la preservación del ecosistema. En esta línea, Jager and Smith [2008] realizan una recopilación de antecedentes de distintos enfoques de esquema de operación de centrales hidroeléctricas. Se analizaron estudios que consideran las metas ambientales desde 3 enfoques distintos; Régimen de caudales que maximiza la generación hidroeléctrica, considerando caudal ambiental o caudal mínimo, rampas entre entregas son menos bruscas, de modo de satisfacer restricciones de calidad del agua (requerimientos de oxígeno disuelto), por último, rampas entre entregas menos bruscas para así mejorar la salud y distribución de las comunidades de peces. Además, se plantea una metodología de 3 etapas para abordar este problema:

- Identificar que características de la variación de caudal son esenciales para la preservación del ecosistema fluvial.
- Desarrollar métodos para evaluar el estado de preservación del ecosistema fluvial en el río.

- desarrollar softwares óptimos que combinen el modelamiento del balance hídrico con modelos de predicción de la respuesta del ecosistema al caudal circundante.

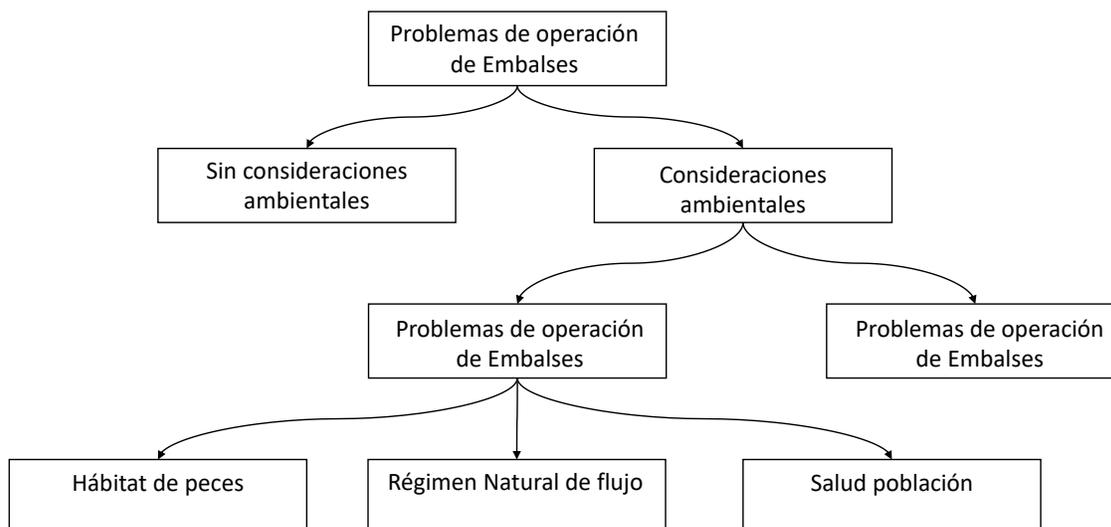


Figura 2.1: Clasificación de problemas de operación de embalses, centrándose en su conflicto con la preservación de ecosistemas. Fuente: modificado de Jager and Smith [2008]

Previo a la elección de los atributos hidrológicos esenciales para la preservación del medio ambiente, se debe establecer cual es la escala del conflicto que predomina en la cuenca del río Biobío. Es importante notar que, la operación de las centrales se define a partir de dos etapas las cuales poseen resolución semanal e intradiaria. Por otro lado, esto puede tener consecuencias en el ecosistema a escala estacional, diaria, horaria o una combinación de las anteriores, ya que, se pueden ver afectados procesos de escalas distintas.

Es por lo anterior que se debe en primera instancia definir qué atributo del ecosistema fluvial se desea preservar o cuales especies que habitan en la cuenca del río Biobío, dada su importancia ecológica, tienen que subsistir. Para ello, dependiendo del enfoque que se adopte, existen distintas metodologías para la cuantificación del caudal que debe mantenerse en un cauce, dentro de las cuales destacan los métodos de caudal histórico, geometría hidráulica y hábitat. Por otro lado, se encuentran los métodos hidrológicos que no solo permiten el cálculo de un caudal mínimo en el río, sino que incluye otros atributos hidrológicos, con el objetivo de generar una serie temporal de caudales que incorporen las necesidades del ecosistema fluvial.

2.1. Métodos caudal mínimo que debe mantenerse en el río

Establecer caudales mínimos en los ríos proporciona cierto nivel de protección del ecosistema fluvial. el grado de protección está descrito por una medida como una proporción prescrita de los caudales históricos, perímetro mojado o idoneidad de hábitat. Es por ello que los métodos enfocados en establecer un caudal mínimo en el cauce pueden ser clasificados en tres categorías: caudal histórico, geometría hidráulica y hábitat. Existen diferencias conceptuales básicas entre los métodos. La evaluación del caudal proveniente de los métodos de caudal histórico e hidráulicos está relacionada con el tamaño del río y tiende a retener su carácter. Por otro lado, los métodos basados en hábitat no hacen suposiciones sobre el estado natural del río y la evaluación del caudal está basada principalmente en los requisitos de profundidad de la lamina de agua y velocidad [Jowett, 1997].

2.2. Métodos hidrológicos

A continuación, se presentan métodos hidrológicos que permiten extender el análisis, proporcionando no solo el cálculo de un caudal mínimo que debe mantenerse en el río, sino que considera otros atributos del régimen hidrológicos que pueden ser importantes para la conservación del ecosistema fluvial, de este modo, es posible generar una serie diaria de caudales que incluyan las necesidades de la biota fluvial.

2.2.1. Índice de alteración hidrológica (IHA)

Los regímenes hidrológicos juegan un papel importante en la determinación de la composición de la biota, la estructura y función de ecosistemas acuáticos inundables y riparios [Richter et al., 1996]. Sin embargo, el uso del recurso por parte del hombre está alterando substancialmente los regímenes hidrológicos, y surge la necesidad de mejores evaluaciones de los cambios antrópicos, sus consecuencias sobre la biota fluvial y así definir planes de manejo y/o restauración del ecosistema.

En Richter et al. [1996] se propone un método para evaluar el grado de alteración hidrológica atribuible a impactos humanos dentro de un ecosistema fluvial. El método se basa en el análisis de datos hidrológicos disponibles dentro del ecosistema en estudio (series diarias). Se utilizan 32 parámetros organizados en cinco grupos para caracterizar la variación hidrológica de cada año, los parámetros se clasifican de la siguiente manera:

- Grupo 1: Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales.
- Grupo 2: Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales.
- Grupo 3: Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales.
- Grupo 4: Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos.
- Grupo 5: Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas.

Estos parámetros proporcionan información de rasgos ecológicamente significativos de los regímenes de aguas superficiales y subterráneas que influyen en ecosistemas acuáticos, inundables y riparios. Adicionalmente, se evaluaron las perturbación hidrológicas asociadas a

actividad antrópicas mediante la comparación de medidas de tendencia central y dispersión para cada parámetro, entre rangos de tiempo definidos como "pre-impacto" y "post-impacto". El método puede ser usado para comparar el estado de un sistema en el tiempo, el estado de un sistema con otro de referencia o condiciones actuales con resultados simulados a partir de futuras modificaciones al sistema.

Posteriormente, en Richter et al. [1997] se introduce una nueva metodología para establecer los objetivos de manejo del ecosistema fluvial de un sistema, y su nombre es el rango de variabilidad hidrológica (RVA). Este enfoque se deriva a partir de la teoría de la ecología acuática relativa al rol crítico de la variabilidad hidrológica, y sus características asociadas de tiempo, frecuencia, duración y tasas de cambio en el mantenimiento de los ecosistemas acuáticos. El enfoque RVA usa como punto de partida series de caudal medidas o sintetizadas para un periodo previo a la intervención antrópica. Luego la muestra es caracterizada utilizando los 32 parámetros de alteración hidrológica previamente descritos en Richter et al. [1996] y selecciona un rango de variación en cada uno (se debe contar con información hidrológica y ecológica), como objetivos iniciales de manejo del caudal. Estos objetivos son utilizados posteriormente como pautas de diseño de un sistema de gestión adecuado, capaz de alcanzar las condiciones de caudal deseadas. Este método es de gran utilidad para establecer objetivos preliminares, para ríos con regímenes hidrológicos altamente alterados ya que, caracteriza la variación de los parámetros IHA entre un caudal naturalizado y otro con alteración antrópica.

Por último, en Mathews and Richter [2007], a partir de metodologías holísticas desarrolladas en todo el mundo, se agregan a los IHA existentes 5 componentes del flujo importantes para la salud del ecosistema fluvial (EFC): flujos extremadamente bajos, flujos bajos, pulsos de flujo alto, pequeñas inundaciones y grandes inundaciones. De esta manera es posible caracterizar el hidrograma de una manera que sea representativa de las relaciones importantes entre caudal y ecología.

Una ventaja práctica de las componentes ambientales del flujo (EFC) es que una prescripción de caudal ambiental basada en ellos se puede implementar fácilmente en la mayoría de los entornos de gestión del agua. Generalmente los valores de IHA se emplean de manera independiente, como un generador de índices y estadísticas de un régimen hidrológico, sin embargo, la importancia de estos aumenta cuando se usa interactivamente con modelos ecológicos [Mathews and Richter, 2007].

2.2.2. Índice de alteración hidrológica intradiaria

La regulación de los caudales puede alterar la frecuencia y magnitud de su variabilidad intradiaria, provocando mayores impactos en la estructura y función ecológica [Zimmerman et al., 2010]. Dado que los IHA no son aplicables a escalas menores que las diarias, en Zimmerman et al. [2010] desarrollan un enfoque que permite cuantificar la variación intradiaria del flujo para evaluar los potenciales impactos de la operación de represas en el ecosistema fluvial. Como resultado del estudio Zimmerman et al. [2010] concluyen que estimaciones de la variabilidad del caudal basadas en el caudal medio diario no son suficientes para caracterizar los patrones de flujo intradiarios. Además, sostienen que todos los ríos pueden exhibir flujos intradiarios muy variables, pero los ríos alterados exhiben esta variabilidad más frecuentemente. Por último, se determinó que el *hydropeaking* ocasiona la mayor alteración en

los caudales intradiarios. Zimmerman et al. [2010] establecen las principales métricas para evaluar fluctuaciones intradiarias producto del *hydropeaking* (ver Tabla: 2.1)

Tabla 2.1: Métricas usadas para evaluar las fluctuaciones intradiarias basadas en datos horario. Fuente: modificado de Zimmerman et al. [2010]

Métrica	Descripción	Referencia
Richard-Baker flashiness index (RBF)	$\text{R-B Index} = \frac{\sum_{i=1}^n 0,5 (q_{i+1} - q_i)}{\sum_{i=1}^n q_i},$ <p>Donde q corresponde al caudal horario y n es el número de mediciones en el periodo de análisis (24 h).</p>	(Baker <i>et al.</i> , 2004)
Inversiones (NREVS)	Cuenta el número de cambios entre periodos de subida y bajada del hidrograma en un periodo de 24 h.	(The Nature Conservancy, 2007)
% del caudal total	Razón entre el rango de descarga y la descarga total en el periodo de análisis (24 h)	(Lundquist and Cayan, 2002)
Coefficient of diel variation (CDV)	Desviación estándar del caudal horario, dividida por el caudal medio en un periodo de 24 horas.	(McKinnet <i>et al.</i> , 2001)

2.3. Estudios en el río Biobío

Para establecer a qué escala se produce el problema, García et al. [2011], García et al. [2015] analizan ocho especies de peces nativos en un tramo representativo del río Biobío y se estudian sus preferencias de hábitat. Se implementó un modelo hidrodinámico, el cual se relacionó con el modelo de simulación de hábitat de peces CASiMiR, para así simular como las condiciones de hábitat físico varían debido al flujo. Como principal resultado, se presenta que tanto la calidad del hábitat y la idoneidad del hábitat hidráulico varían debido a la operación y el *hydropeaking* que influencia la calidad, cantidad y locación de los diferentes hábitats.

Fernández [2012] en su trabajo de título analiza el grado de alteración hidrológica intradiaria debido a las operaciones de las centrales Ralco y Pangué del SIC. En este estudio se analizan los impactos del *hydropeaking* en el ecosistema fluvial, en base a cuatro indicadores de alteración hidrológica intradiarios [Zimmerman et al., 2010]. Posteriormente, se analiza para distintas restricciones a la operación de las centrales Ralco y Pangué con el objetivo de mejorar los indicadores previamente mencionados. Se determinó que las restricciones ambientales no producen un aumento excesivo de costos sobre la operación del sistema.

En esta misma línea, debido a la incorporación de nuevas fuentes de energías fluctuantes al sistema interconectado central, existe un aumento del *hydropeaking*, ya que se debe balancear la producción de energía del sistema con tal de satisfacer la demanda. Dadas a las consecuencias sobre el ecosistema fluvial que provoca el *hydropeaking*, Olivares et al. [2015] plantean una metodología con tal de mejorar el estado del ecosistema fluvial, incorporando mejoras en las restricciones de operación de las centrales analizadas (Ralco, Pangué), una simplificación del SIC y distintos escenarios hidrológicos. Para evaluar las restricciones ambientales analizadas (caudales mínimos y rampas máximas), se consideraron índices de alteración hidrológica intradiarios (SDHA), de los cuales destaca el *Richard-Baker flashiness index* [Baker et al.,

2004]. Se concluye que existen configuraciones Pareto-eficientes que poseen un bajo costo de implementación para el sistema de un 2 %, mientras que la mejora de los SDHA se encuentra entre 28 % y 90 %.

Hasta el momento se ha analizado la influencia de la operación de las centrales hidroeléctricas en el río Bío-bío sin considerar posibles efectos del cambio climático en la cuenca, es por ello que, bajo este contexto, es de suma importancia establecer como este impacta la disponibilidad de recursos para así sofisticar las reglas de operación existentes. Yevenes et al. [2018], analiza los efectos de la sequía registrada en Chile (2010-2015) en la calidad hídrica del río Bío-bío, a través de un análisis multivariado y una tendencia estacional de Mann-Kendall. Como resultado se obtuvo que existe un declive en la calidad hídrica del río Bío-bío durante un periodo de sequía, es por ello que se concluye que la calidad de agua es vulnerable a reducciones de caudal.

Estudios recientes como Elgueta et al. [2019] en el cual se analiza como se relaciona la ecología del río con sus características morfológicas, a través de la definición de zonas de proceso funcional y comunidades de peces endémicas.

Por último, Habit et al. [2019] presenta el problema entre el desarrollo hidroeléctrico y las comunidades de peces para tres casos de estudios, esto a partir de los estudios anteriores previamente mencionados [García et al. [2011], García et al. [2015], Habit et al. [2007]]. Por lo que resume los conocimientos hasta la fecha y se enfatiza en la importancia de adoptar una generación o desarrollo hidroeléctrico sustentable.

Capítulo 3

Antecedentes

3.1. Zona de estudio

La cuenca del Bío Bío forma parte de la VIII Región y está comprendida entre los paralelos $36^{\circ}42'$ - $38^{\circ}49'$ Latitud Sur y los meridianos 71° - $73^{\circ}20'$ Longitud Oeste. Es una de las cuencas de mayor superficie (24.264 Km^2) y caudal del país. Comprende parte de los territorios de las Provincias de Ñuble, Concepción, Bío Bío y Arauco. Además, abarca parte de las provincias de Malleco y Cautín pertenecientes a la IX Región.

La cuenca representa, a nivel nacional, un importante centro de desarrollo económico. Los sectores productivos más dinámicos están ligados al sector al sector forestal, sector agropecuario (localizado principalmente en las provincias de Ñuble y Bío Bío), sector industrial (representando fundamentalmente por las industrias metalúrgicas, químicas, refinerías de petróleo, industrias textiles, industrias de la celulosa, entre otras) y sector hidroeléctrico que constituye la principal fuente de suministro de energía eléctrica a nivel nacional [Dirección General de Aguas, 2004].

En el área de estudio se encuentran operando las centrales hidroeléctricas, Angostura, Pangue y Ralco, las cuales están emplazadas entre las comunas de Santa Bárbara y Quilaco (Angostura), Alto Bío Bío (Pangue y Ralco) respectivamente. Las principales características de las hidroeléctricas estudiadas se resumen en la tabla 3.1.

Para cuantificar la alteración hidrológica producto de la operación de las centrales hidroeléctricas previamente mencionadas, se estudian los caudales registrados en la estación fluviométrica aguas abajo de cada central (ver Figura: 3.1). Adicionalmente, se utilizan registros de la operación horaria de cada central y para cuantificar los efectos de operar en punta (*hydropeaking*).

Tabla 3.1: Características centrales hidroeléctricas ubicadas en la zona de estudio

	Angostura	Pangue	Ralco
<i>Ubicación Norte - Este (UTM)</i>	5.822.312 - 251.705	5.800.863 - 270.454	5.791.377 - 278.937
<i>Potencia Máxima (MW)</i>	323,8	467	690
<i>Turbinas</i>	3 Francis	2 Francis	2 Francis
<i>Año puesta en marcha</i>	2014	1996	2004

CUENCA DEL RÍO BIOBIO
Delimitación del Area de Estudio Según Aster DEM y SRTM
Región del Biobío - Chile

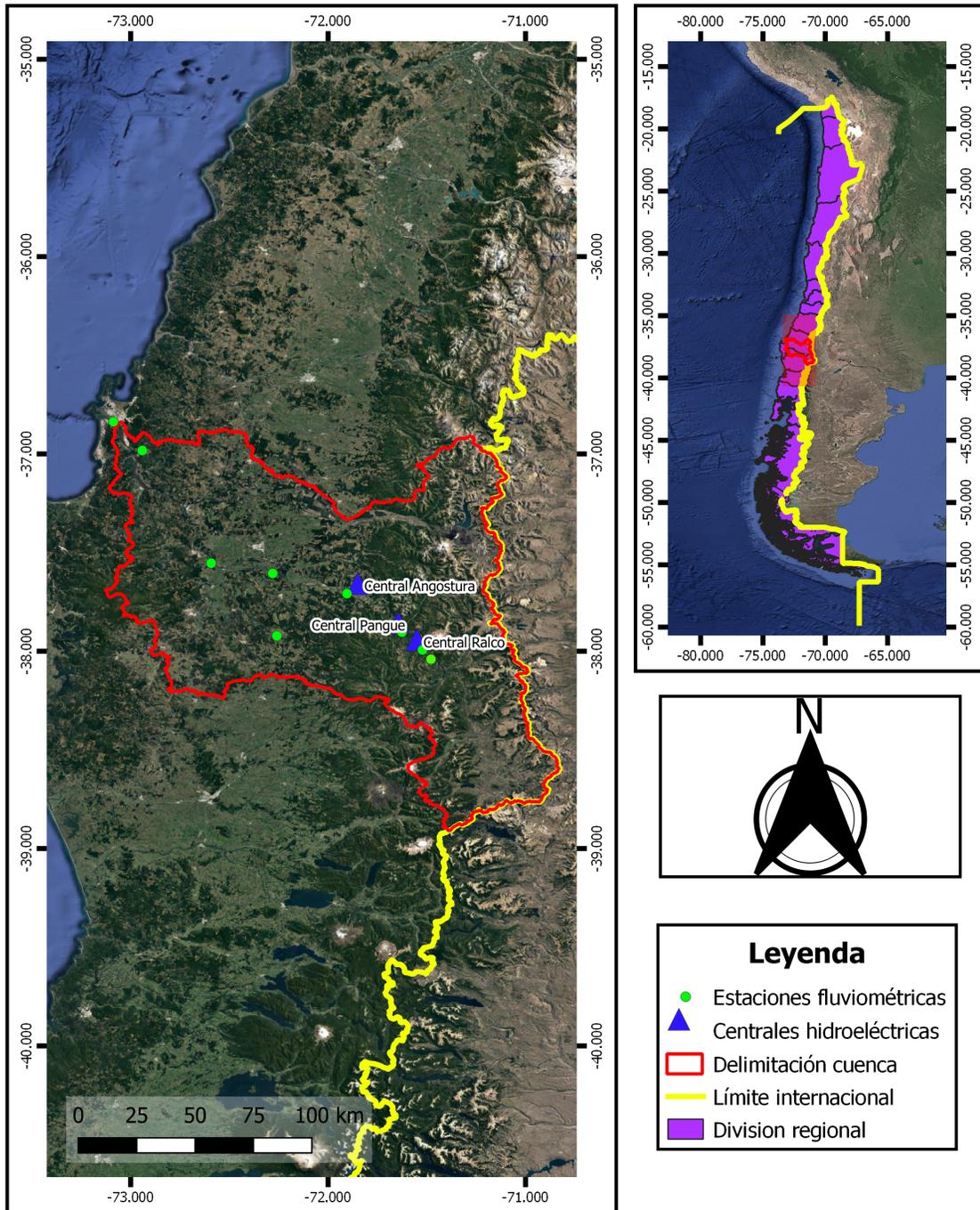


Figura 3.1: Cuenca del río Biobío, centrales hidroeléctricas Angostura, Pangué y Ralco, y estaciones fluviométricas.

3.2. Información sobre peces

Para abordar el objetivo de conservación del ecosistema fluvial en la zona estudiada, se seleccionan 8 especies de especies ícticas endémicas (ver Tabla 3.2), a partir de estudios en la zona (García et al. [2011], García et al. [2015],Habit et al. [2019])

Tabla 3.2: Peces endémicos seleccionados como objeto de conservación. Fuente: modificado de García et al. [2015].

Espece	Nombre Común	Familia	Hábitat	Distribución
<i>Basilichthys australis</i>	Pejerrey chileno	Atherinopsidae	Mediana Profundidad	Hiporitrón
<i>Bullockia maldonadoi</i>	Bagre Pintado	Trichomycteridae	Béntica	Hiporitrón, Potamon
<i>Trichomycterus areolatus</i>	Bagrecito	Trichomycteridae	Béntica	Ritron a Potamon
<i>Percilia irwini</i>	Carmelita de Concepción	Perciliidae	Mediana Profundidad - Béntica	Ritron a Potamon
<i>Percichthys trucha</i>	Perca trucha	Percichthyidae	Mediana Profundidad	Ritron a Potamon
<i>Galaxias maculatus</i>	Puye	Galaxiidae	Mediana Profundidad	Hiporitrón, Potamon
<i>Geotria australis</i>	Petromyzontidae	Lamprea de Bolsa	Béntica	Hiporitrón, Potamon
<i>Cheirodon galusdae</i>	Pocha de los lagos	Characidae	Mediana Profundidad - Béntica	Hiporitrón, Potamon

La información utilizada corresponde a la base de datos proporcionada por el ministerio del medio ambiente (MMA), la cual fue construida a partir de una recopilación de antecedentes de estudios realizados en la cuenca del río Biobío por múltiples autores, dentro de los cuales se destaca la participación de, el centro de ciencias ambientales EULA, Evelyn Hábit, Analysa Elgueta, entre otros. Esta base de datos posee mediciones de diferentes periodos entre los años 1970 y 2014. Además, dentro de los atributos que posee cada medición, están, el punto de muestreo (ver Figura 3.2), número de individuos, instante medición, etc. En la figura 3.2 se presenta la distribución espacial de los distintos puntos de muestreo realizados para las especies de interés de conservación.

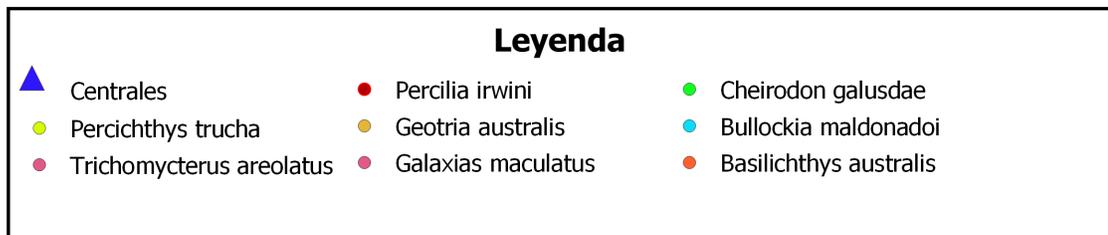
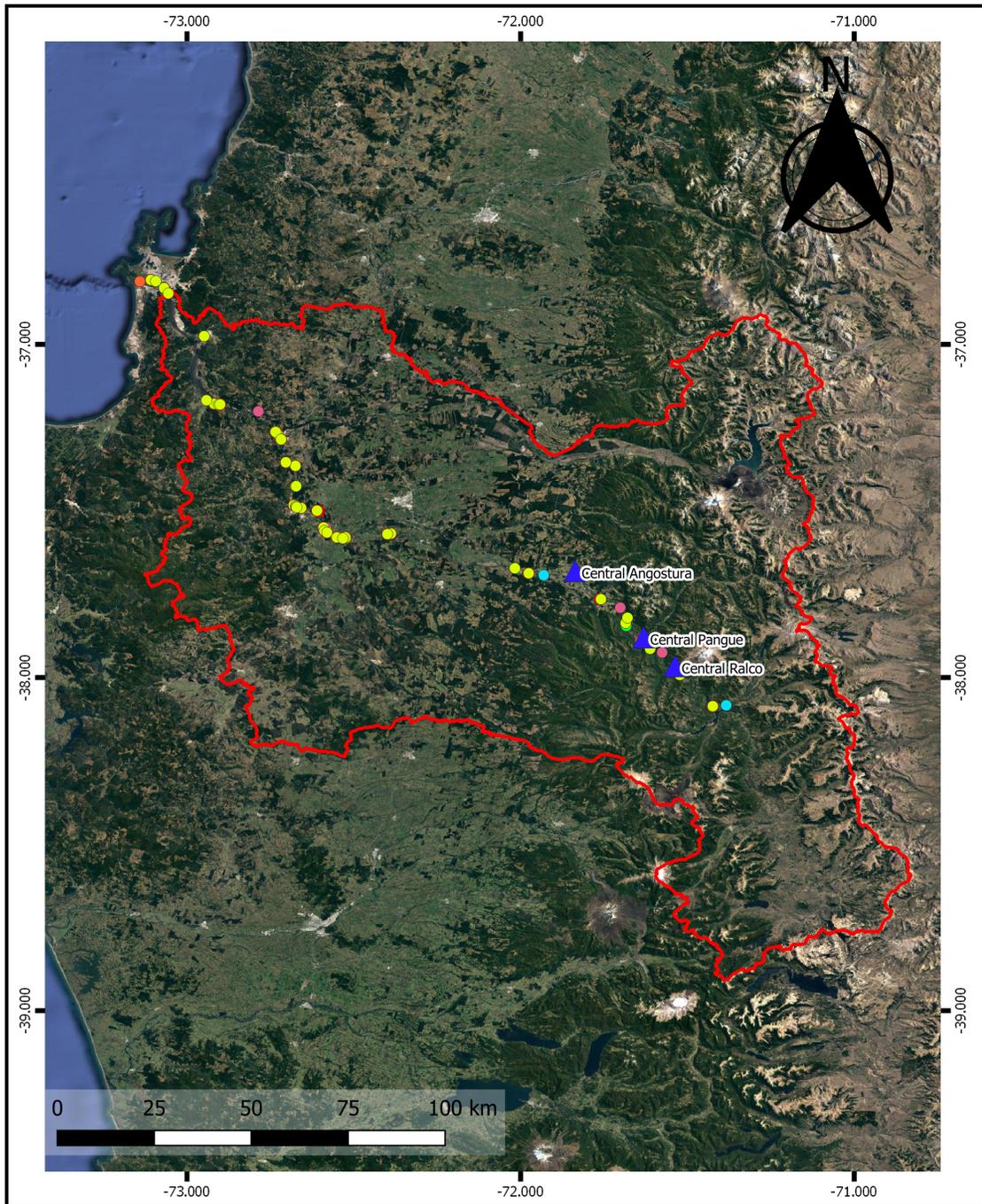
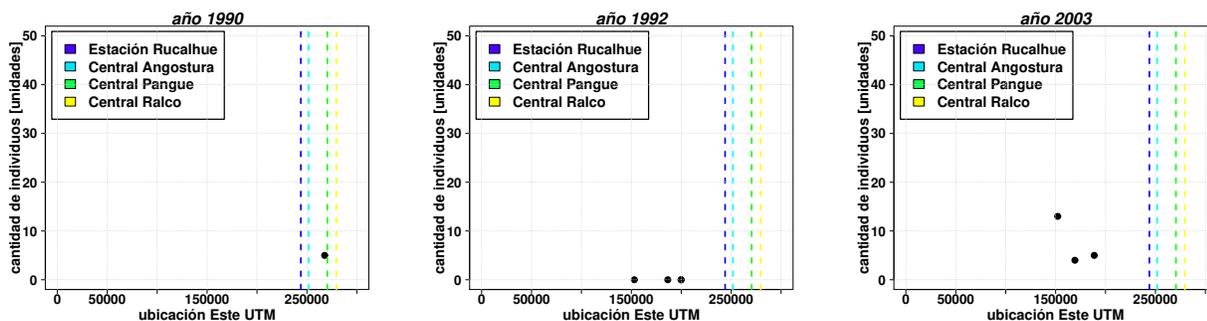
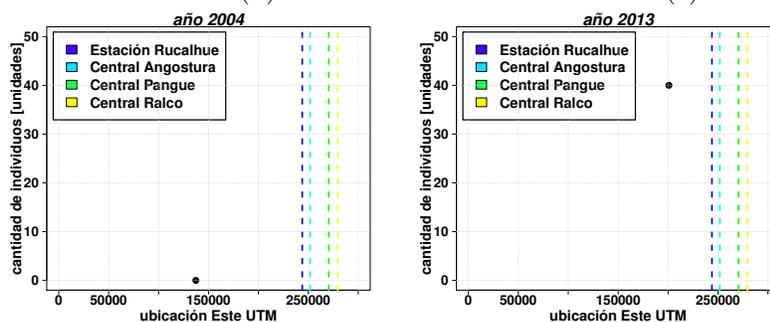


Figura 3.2: Puntos de muestreo de peces en área de estudio.

Se realiza un preprocesamiento de los datos, el cual está enfocado en cuantificar de manera gráfica la cantidad de individuos de las especies de interés a lo largo del río Biobío.

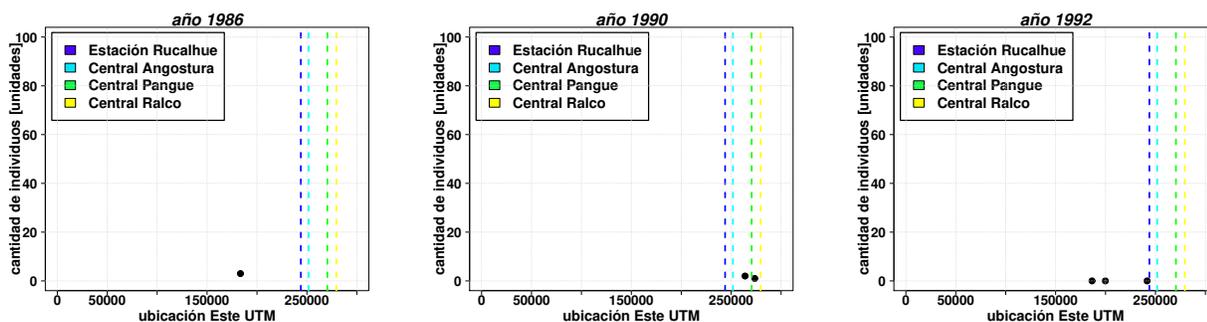


(a) Muestras año 1990. (b) Muestras año 1992. (c) Muestras año 2003.

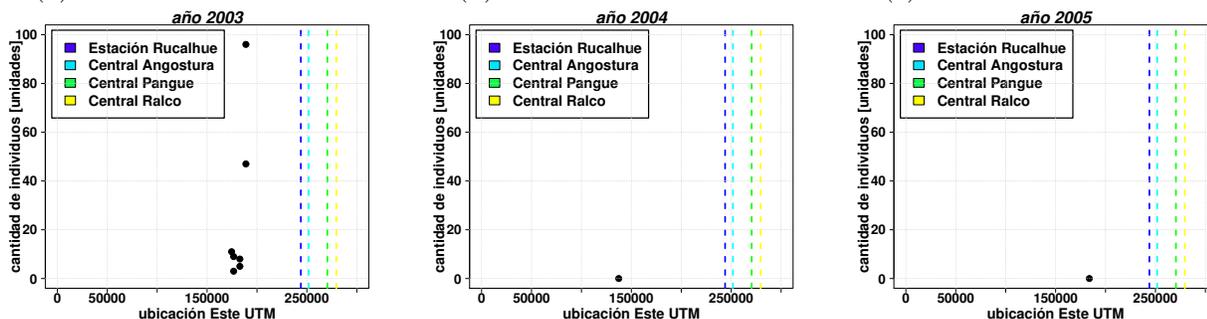


(d) Muestras año 2004. (e) Muestras año 2013.

Figura 3.3: Distribución de *Basichthys australis* a lo largo del río Biobío

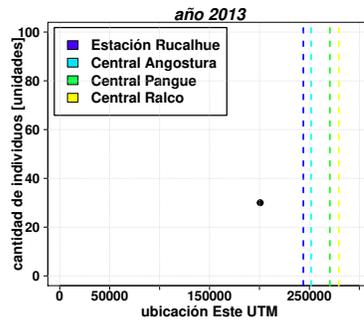


(a) Muestras año 1986. (b) Muestras año 1990. (c) Muestras año 1992.



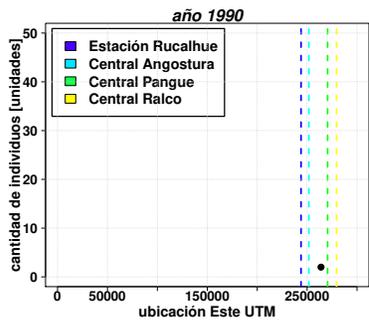
(d) Muestras año 2003. (e) Muestras año 2004. (f) Muestras año 2005.

Figura 3.4: Distribución de *Bullockia Maldonadoi* a lo largo del río Biobío

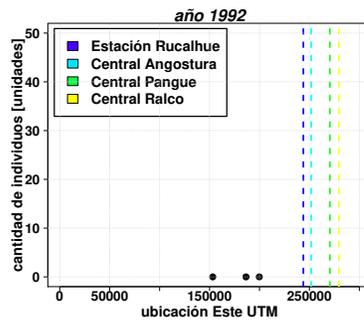


(g) Muestreos año 2013.

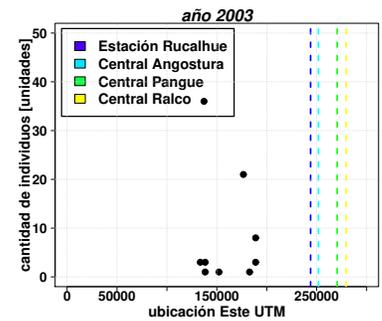
Figura 3.4: Distribución de *Bullockia Maldonadoi* a lo largo del río Biobío (cont.)



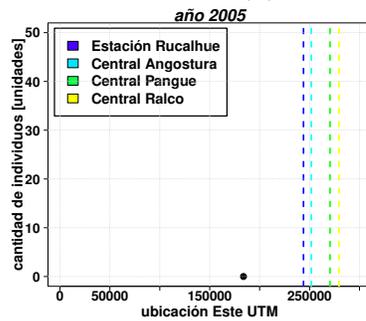
(a) Muestreos año 1990.



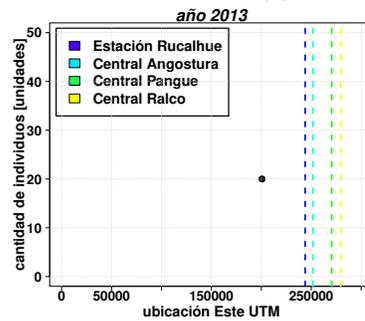
(b) Muestreos año 1992.



(c) Muestreos año 2003.

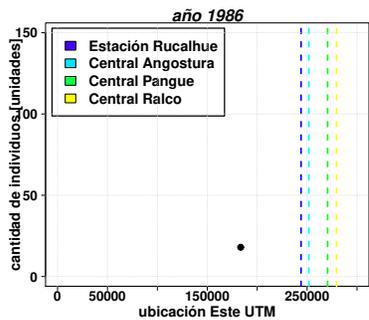


(d) Muestreos año 2005.

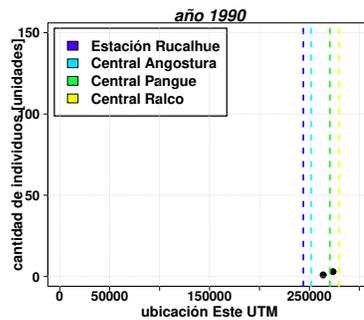


(e) Muestreos año 2013.

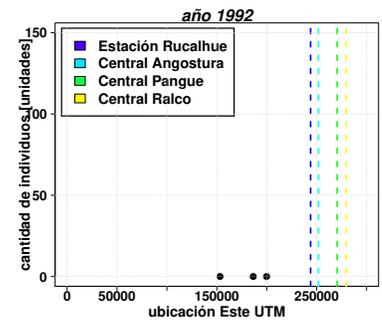
Figura 3.5: Distribución de *Cheirodon Galusdae* a lo largo del río Biobío



(a) Muestreos año 1986.

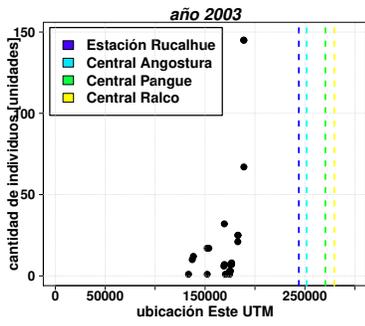


(b) Muestreos año 1990.

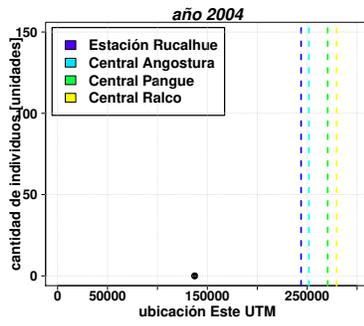


(c) Muestreos año 1992.

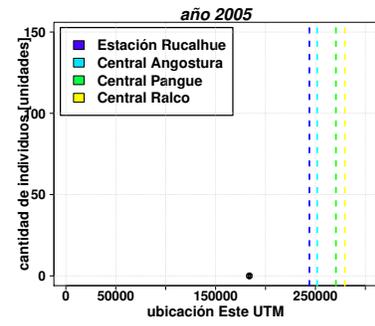
Figura 3.6: Distribución de *Trichomycterus Areolatus* a lo largo del río Biobío



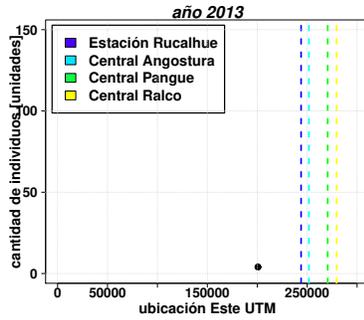
(d) Muestreos año 2003.



(e) Muestreos año 2004.

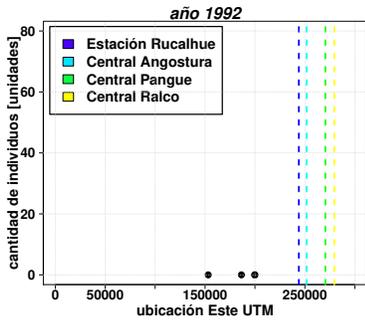


(f) Muestreos año 2005.

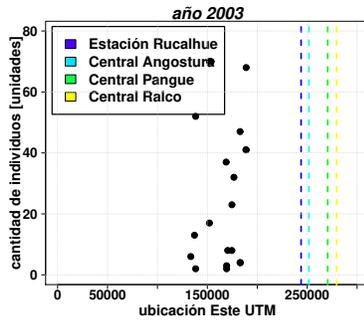


(g) Muestreos año 2013.

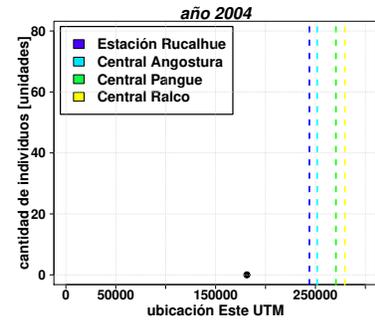
Figura 3.6: Distribución de *Trichomycterus Areolatus* a lo largo del río Biobío (cont.)



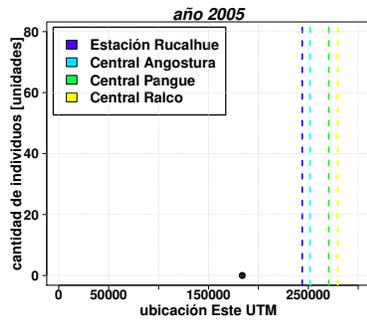
(a) Muestreos año 1992.



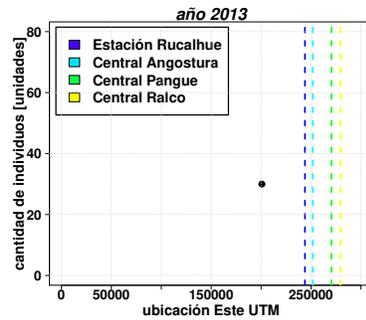
(b) Muestreos año 2003.



(c) Muestreos año 2004.

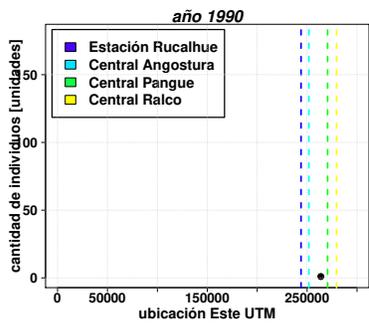


(d) Muestreos año 2005.

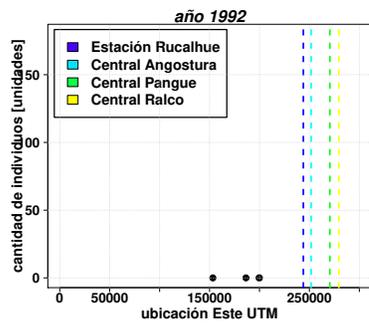


(e) Muestreos año 2013.

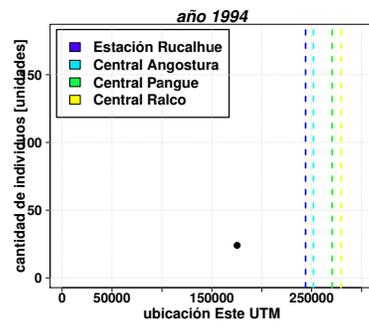
Figura 3.7: Distribución de *Percilia Irwini* a lo largo del río Biobío



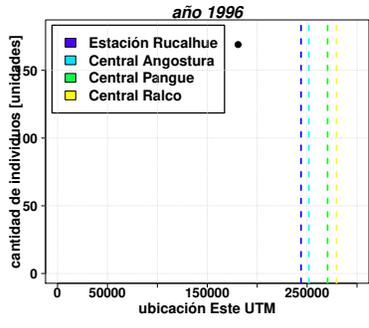
(a) Muestras año 1990.



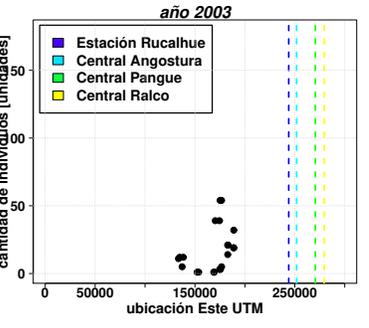
(b) Muestras año 1992.



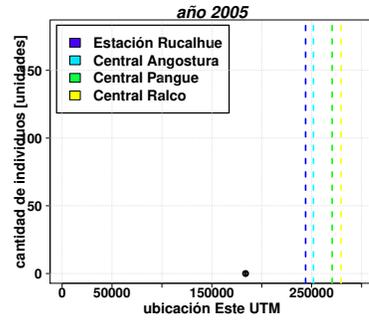
(c) Muestras año 1994.



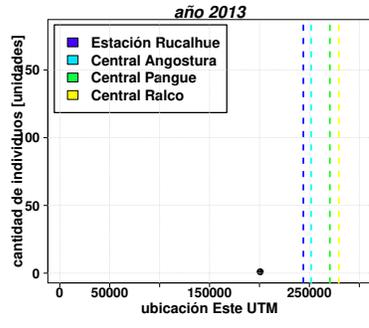
(d) Muestras año 1996.



(e) Muestras año 2003.

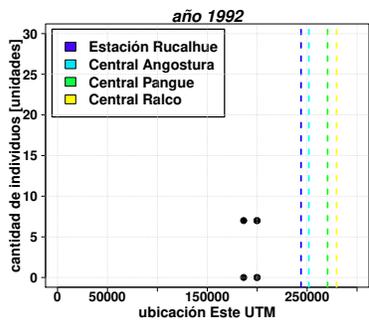


(f) Muestras año 2005.

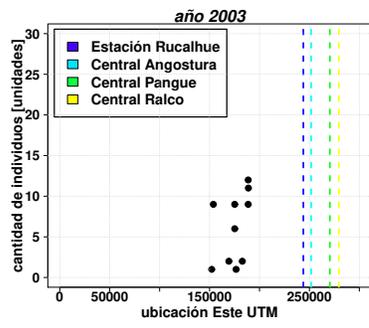


(g) Muestras año 2013.

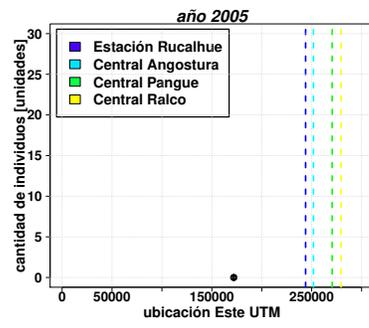
Figura 3.8: Distribución de Percichthys Trucha a lo largo del río Biobío



(a) Muestras año 1992.



(b) Muestras año 2003.



(c) Muestras año 2005.

Figura 3.9: Distribución de Geotria Australis a lo largo del río Biobío

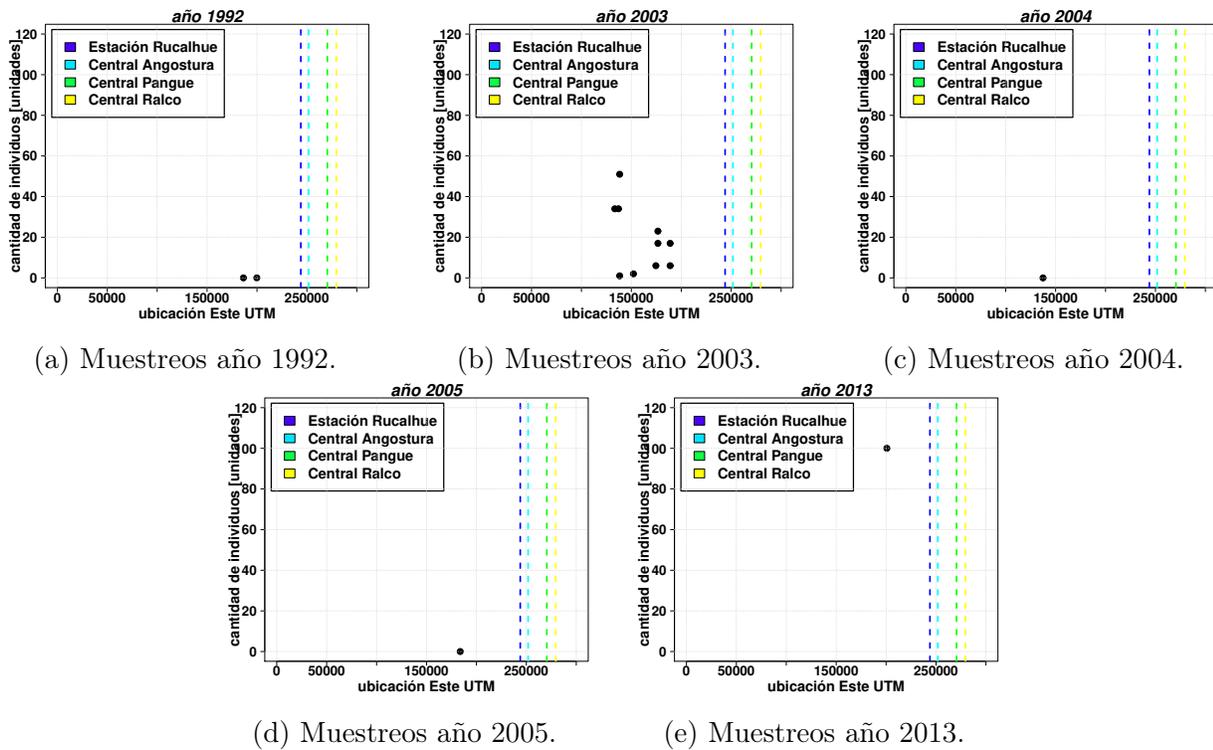


Figura 3.10: Distribución de Galaxias Maculatus a lo largo del río Biobío

Finalmente a partir de los muestreos no es posible detectar el efecto directo que tiene la operación de las centrales hidroeléctricas, debido a la diferencia entre el número de muestreos por año y al desfase temporal entre el último muestreo y le fecha actual.

3.3. Información fluviométrica

La información fluviométrica utilizada en el presente trabajo de título, se recopiló desde dos plataformas diferentes, en primer lugar, los datos fluviométricos hidrológicos se obtuvieron a partir de estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas, ubicadas aguas abajo del punto de restitución de las centrales hidroeléctricas. Por otro lado, los datos referidos a la operación de las centrales Ralco, Pangue y Angostura, fue recopilado de las bases de datos del coordinador eléctrico nacional (CDEC-SING).

3.3.1. Estaciones fluviométricas

Para analizar los caudales naturales de la zona en estudio, se seleccionan estaciones fluviométricas pertenecientes a la Dirección General de Aguas, ubicadas aguas abajo del punto de restitución de las centrales Ralco, Pangue y Angostura, y así cuantificar el efecto que tiene la operación de estas sobre el régimen hidrológico de la cuenca, estudiando los caudales en un horizonte temporal que contemple un periodo natural y otro considerando la intervención antrópica. Las estaciones fluviométricas escogidas y sus principales características se resumen en la tabla 3.3

Tabla 3.3: Estaciones fluviométricas seleccionadas para el análisis de los caudales naturales.

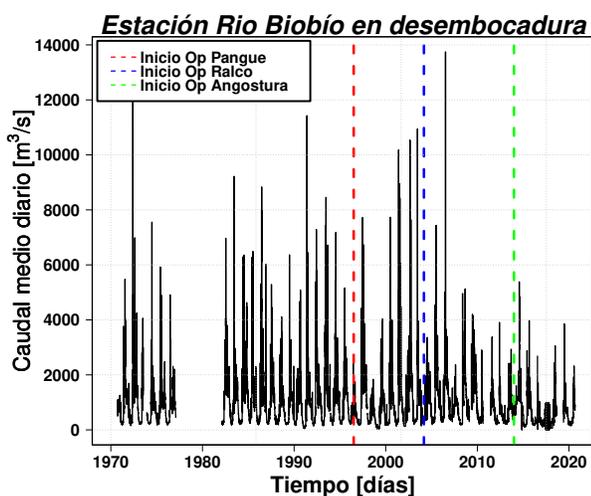
Estación	UTM Este	UTM Norte	Fecha inicio
Río Biobío en desembocadura	672.852	5.921.362	01/08/1985
Estero Hualqui en desembocadura	683.220	5.905.083	01/03/2009
Río Biobío en Coihue	712.955	5.840.299	01/01/1978
Río Biobío en Longitudinal	740.265	5.834.877	01/01/1900
Río Biobío en puente Piulo	251.104	5.822.686	19/12/2013
Río Biobío en Rucalhue	244.156	5.822.433	01/08/1985
Río Biobío ante junta Pangué	269.071	5.801.713	01/10/2002
Río Biobío antes junta Huirí Huirí	278.593	5.791.985	01/09/2002
Río Biobío en Llanquén	298.494	5.769.032	01/09/2002

Se descargan los registros fluviométricos de cada estación seleccionada para el periodo 1970 - 2020, posteriormente se divide el periodo analizado según la fecha de entrada en operación las centrales Pangué, Ralco y Angostura respectivamente (ver Tabla 3.1). Una vez particionadas las series de caudales de cada estación según los periodos definidos, se verifica la disponibilidad de los registros en cada una de ellas (ver Tabla 3.5).

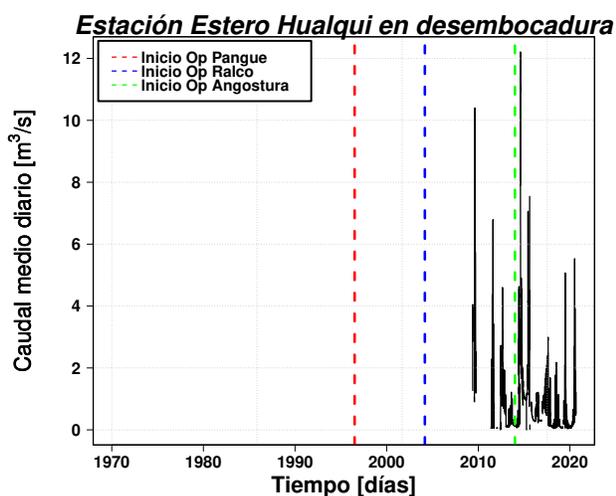
Una vez realizada la cuantificación de información disponible en cada estación, se identifican las estaciones que se encuentren en los puntos de interés (cercanas a las centrales Ralco, Pangué y Angostura), para así analizar el efecto que tiene la operación de las centrales, despreciando posibles efectos de afluentes, diferencias de régimen hidrológico, etc. Además, se requiere que dichas estaciones posean un alto porcentaje de registros en el periodo de análisis. Es por ello que las estaciones escogidas corresponden a Río Biobío en Rucalhue, Río Biobío antes Junta Huirí Huirí, Río Biobío antes Junta Pangué y Río Biobío en Llanquén (ver Tabla: 3.4).

Tabla 3.4: Información estaciones cercanas a centrales hidroeléctricas (puntos de interés).

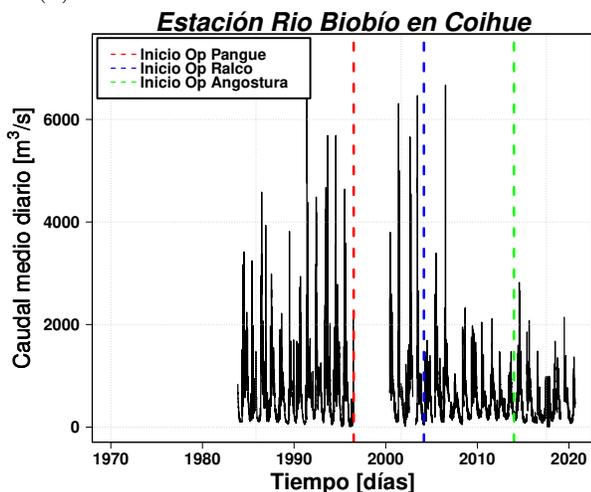
Estación	Disponibilidad de datos (%)			
	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	Área Total (km ²)	Altitud (msnm)
Río Biobío en Rucalhue	244.156	5.822.433	7252,5	1383
Río Biobío ante junta Pangué	269.071	5.801.713	5437,8	1441
Río Biobío antes junta Huirí Huirí	278.593	5.791.985	5233,1	1452
Río Biobío en Llanquén	298.494	5.769.032	3355,6	1460



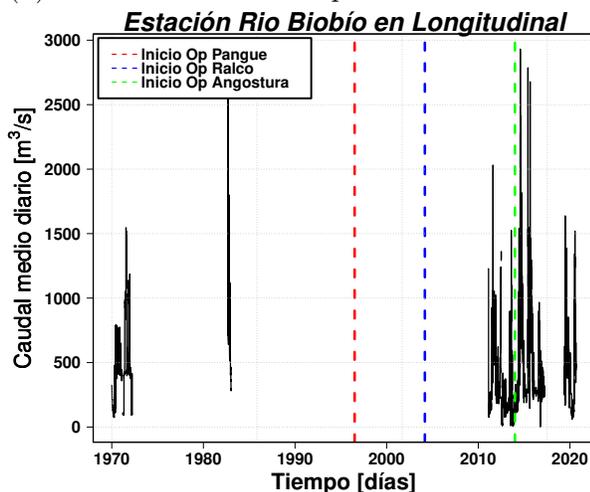
(a) Estación Río Biobío en desembocadura.



(b) Estación Estero Hualqui en desembocadura.

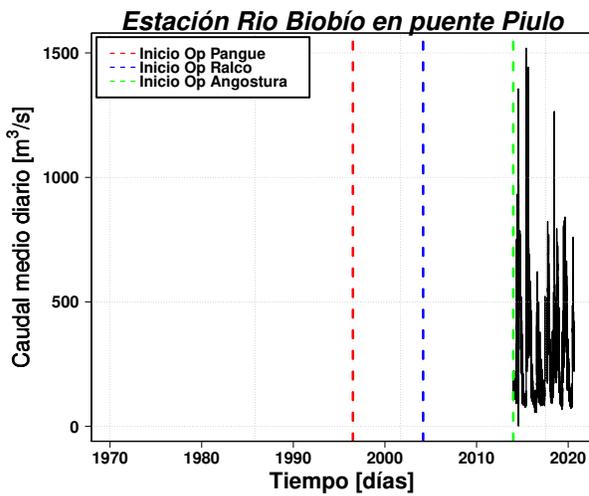


(c) Estación Río Biobío en Coihue.

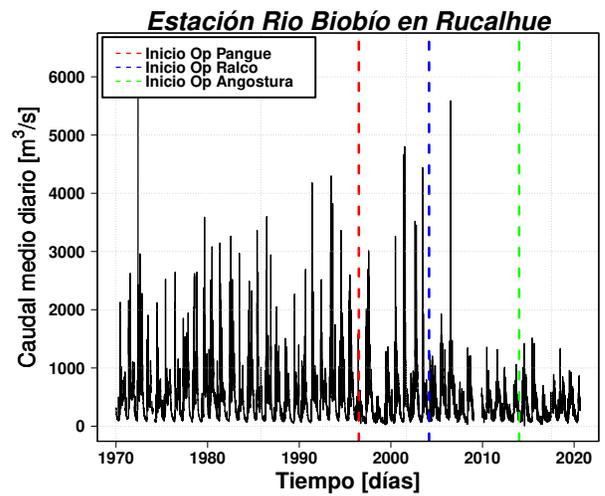


(d) Estación Río Biobío en Longitudinal.

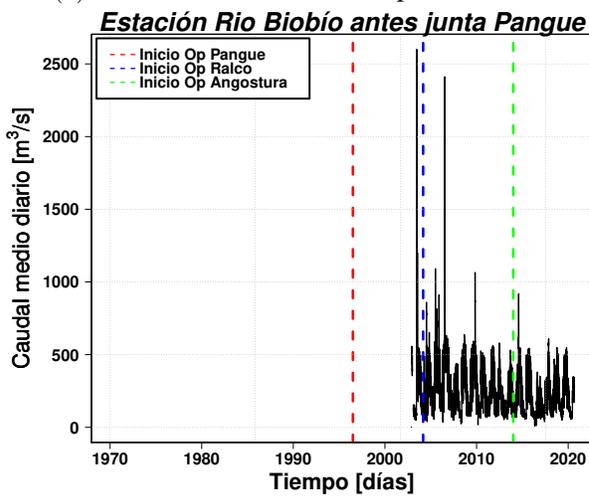
Figura 3.11: Series diarias de Caudal estaciones fluviométricas seleccionadas.



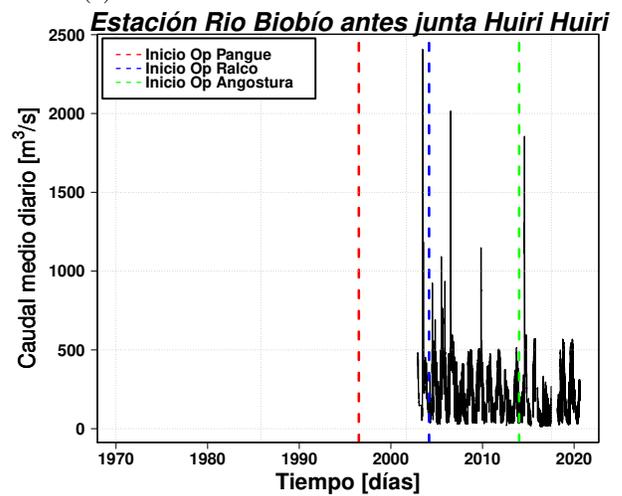
(e) Estación Río Biobío en puente Piulo.



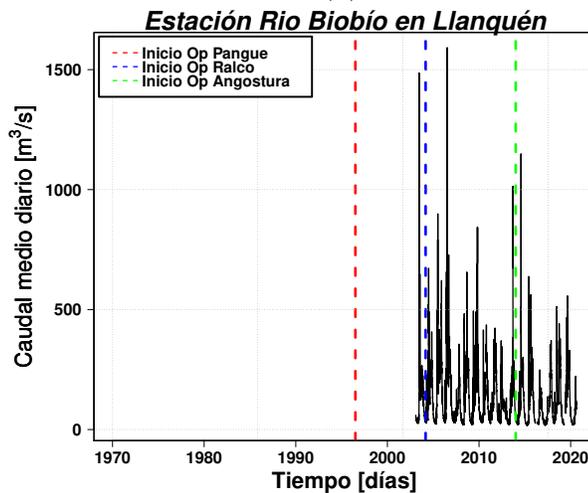
(f) Estación Río Biobío en Rucalhue.



(g) Estación Río Biobío antes junta Pangue.



(h) Estación Río Biobío antes junta Huirihuirí.



(i) Estación Río Biobío en Llanquén.

Figura 3.11: Series diarias de Caudal estaciones fluviométricas seleccionadas (cont.).

Tabla 3.5: Disponibilidad de registros en estaciones fluviométricas seleccionadas para los distintos periodos definidos.

Estación	Disponibilidad de datos (%)			
	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4
Rio Biobío en desembocadura	0,77	0,98	0,89	0,84
Estero Hualqui en desembocadura	0,00	0,00	0,23	0,87
Rio Biobío en Coihue	0,47	0,42	0,94	0,92
Rio Biobío en Longitudinal	0,09	0,00	0,28	0,62
Rio Biobío en puente Piulo	0,00	0,00	0,00	1,00
Rio Biobío en Rucalhue	0,98	1,00	0,91	0,99
Rio Biobío ante junta Pangué	0,00	0,15	1,00	0,99
Rio Biobío antes junta Huiru Huiru	0,00	0,16	0,98	0,79
Rio Biobío en Llanquén	0,00	0,14	1,00	0,95

La determinación del régimen hidrológico de cada estación, se hizo a partir de los coeficientes de Pardé [Pardé, 1933] utilizando la información disponible para los cuatro periodos de análisis (ver Figuras 3.12, 3.13, 3.14, 3.15).

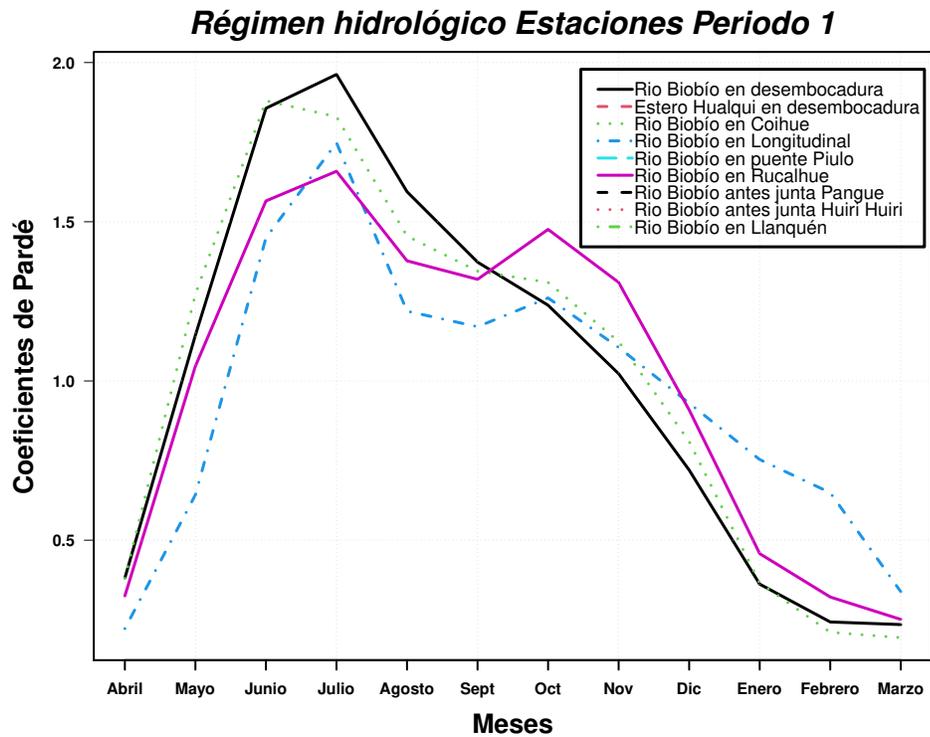


Figura 3.12: Régimen hidrológico estaciones seleccionadas, periodo previo a la intervención antrópica, periodo 1.

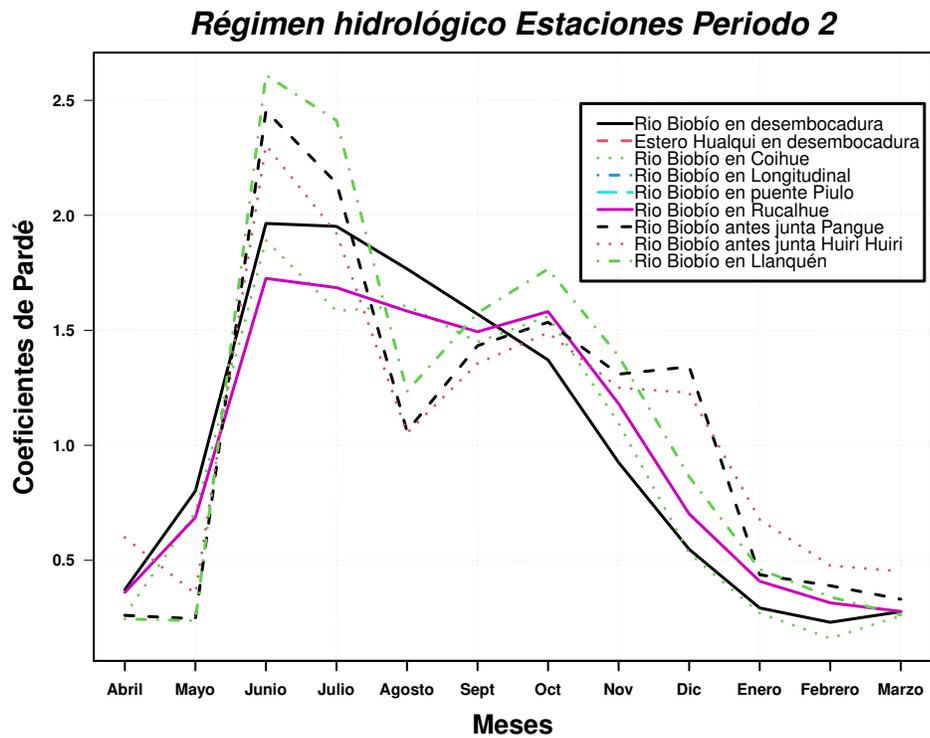


Figura 3.13: Régimen hidrológico estaciones seleccionadas, posterior a la entrada en operación de la central Pangué, periodo 2.

Régimen hidrológico Estaciones Periodo 3

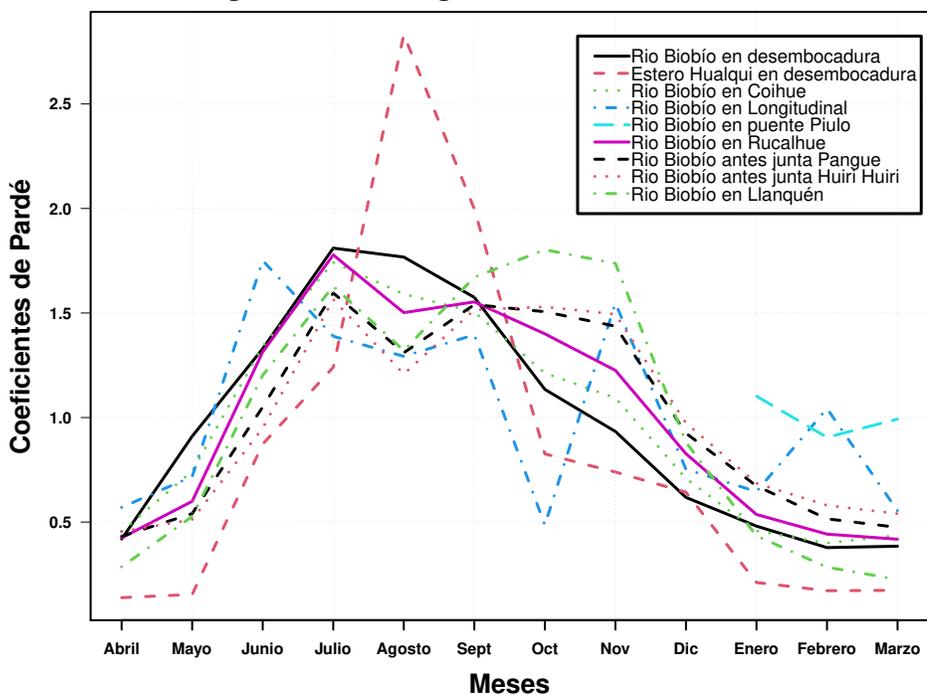


Figura 3.14: Régimen hidrológico estaciones seleccionadas, posterior a la entrada en operación de la central Ralco, periodo 3.

Régimen hidrológico Estaciones Periodo 4

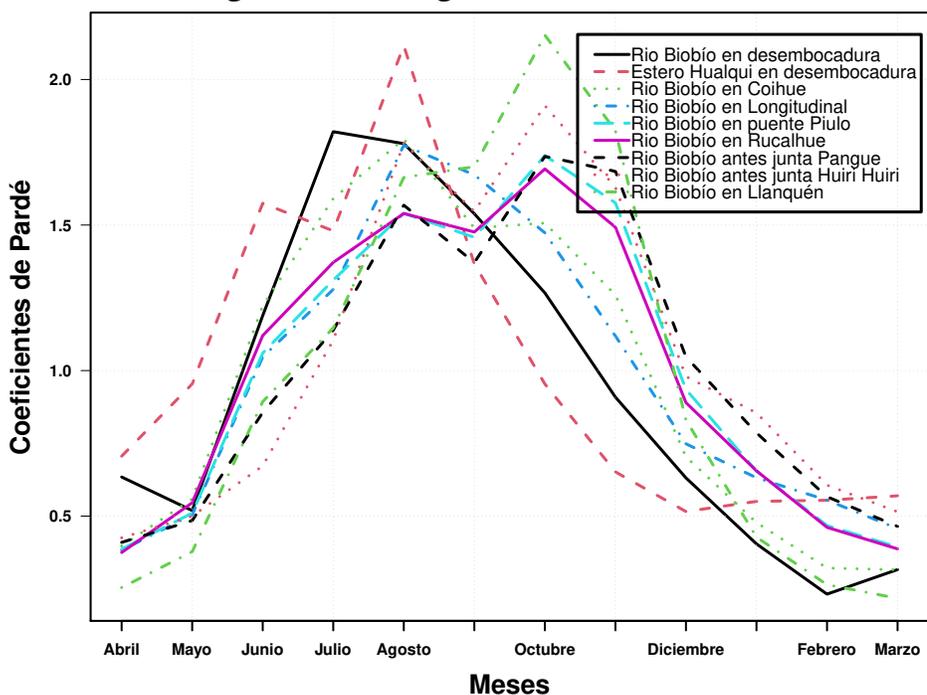


Figura 3.15: Régimen hidrológico estaciones seleccionadas, posterior a la entrada en operación de la central Angostura, periodo 4

Adicionalmente, se recopilan las series de caudales horarios medidos en las estaciones ubicadas aguas abajo de las centrales Ralco, Pangué y Angostura. Las estaciones seleccionadas para dicho análisis corresponden a Río Biobío antes junta Huirí Huirí, Río Biobío antes junta Pangué y Río Biobío en Rucalhue. Además, se extraen los caudales horarios medidos por la estación Río Biobío en Llanquén, la cual se encuentra ubicada aguas arriba de la central Ralco, por lo tanto muestra la variabilidad intradiaria natural de la zona.

3.3.2. Operación centrales

Los registros de la operación de las centrales hidroeléctricas Ralco, Pangué y Angostura, se obtienen a partir de la base de datos del coordinador eléctrico nacional, para los periodos descritos en la tabla 3.6. Estos registros corresponden a la potencia horaria entregada por cada central, la cual en función a los distintos esquemas de operación de las generadoras son convertidos a caudal horario mediante un factor de conversión.

Tabla 3.6: Período de análisis de los caudales horarios turbinados por cada central hidroeléctrica.

Central Hidroeléctrica	Período (mes/año - mes/año)
Ralco	01/2009 - 12/2020
Pangué	01/1999 - 12/2020
Angostura	01/2014 - 12/2020

Capítulo 4

Metodología

4.1. Análisis de series de tiempo

Como se identificó anteriormente, el conflicto debe ser estudiado considerando dos escalas temporales distintas, las cuales dada su naturaleza deben ser abordadas de diferente forma.

En la presente sección, se exponen los enfoques utilizados para analizar la alteración hidrológica producto de la operación de las centrales hidroeléctricas y el efecto de las fluctuaciones intradiarias consecuencias del *hydropeaking*.

4.1.1. Escala diaria

Para el análisis de los efectos que tiene la operación de las centrales sobre el régimen hidrológico en el área de estudio, se adoptan los índices IHA [Richter et al., 1996], para realizar el diagnóstico de la alteración hidrológica producto de la construcción y operación de las centrales hidroeléctricas Ralco, Pangué y Angostura. Este método requiere como entrada una serie diaria de caudales y entrega como resultado 32 índices anuales, organizados en cinco grupos, para caracterizar estadísticamente la variación hidrológica.

Sin embargo, los índices se calculan con el Software IHA 7.1, creado por *The Nature Conservancy*, el cual entrega como resultado 33 índices anuales, organizados en cinco grupo (ver Tabla 4.1). A diferencia de los índices publicados en Richter et al. [1996], se incluyen en el grupo 2 de parámetros IHA los índices “ cantidad días con caudal cero ” e “ índice de caudal base ”. También en el grupo 5 se cambia el índice “ número de subidas ” y “ número de caídas ” por el “ cantidad de inversiones ”.

Tabla 4.1: Lista de grupos de índices de alteración hidrológica y los parámetros hidrológicos que los definen. Fuente: *The Nature Conservancy (2011)* .

Grupo de parámetros IHA	Parámetros hidrológicos
<i>1. Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales</i>	Valor de la media o la mediana para cada mes calendario
	Subtotal 12 parámetros
<i>2. Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales</i>	Mínimos anuales, media de 1 día
	Mínimos anuales, medias de 3 días
	Mínimos anuales, medias de 7 días
	Mínimos anuales, medias de 30 días
	Mínimos anuales, medias de 90 días
	Máximos anuales, media de 1 día
	Máximos anuales, medias de 3 días
	Máximos anuales, medias de 7 días
	Máximos anuales, medias de 30 días
	Máximos anuales, medias de 90 días
	Cantidad de días con caudal cero
	Índice de caudal base: caudal mínimo de 7 días/caudal medio anual
Subtotal 12 parámetros	
<i>3. Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales</i>	Fecha juliana de cada máximo anual de 1 día
	Fecha juliana de cada mínimo anual de 1 día
	Subtotal 2 parámetros
<i>4. Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos</i>	Cantidad de pulsos bajos en cada año hidrológico
	Media o mediana de la duración de los pulsos bajos (días)
	Cantidad de pulsos altos en cada año hidrológico
	Media o mediana de la duración de los pulsos altos (días)
	Subtotal 4 parámetros
<i>5. Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas</i>	Tasas de ascenso: Media o mediana de todas las diferencias positivas entre valores diarios consecutivos
	Tasas de descenso: Media o mediana de todas las diferencias negativas entre valores diarios consecutivos
	Cantidad de inversiones hidrológicas
	Subtotal 3 parámetros
	Total 33 parámetros

Para el diseño del régimen hidrológico se calculan 34 índices anuales para cinco tipos diferentes del caudal ecológico, EFC, caudales bajos, caudales extremadamente bajos, pulsos de caudal alto, pequeñas inundaciones y grandes inundaciones (ver Tabla 4.2).

Tabla 4.2: Lista de componentes del caudal ecológico, definición y parámetros hidrológicos que los definen. Fuente: Richter et al. [1997] .

Componentes del Definición caudal ecológico predeterminada		Parámetros hidrológicos
<i>Caudales extremadamente bajos</i>	Percentil 10 de los caudales bajos diarios	Frecuencia de los caudales extremadamente bajos durante cada año hidrológico o estación
		Valores de la media o la mediana de eventos de caudal extremadamente bajo: · Duración (días) · Pico del caudal (caudal mínimo durante el evento) · Momento (fecha juliana del pico del caudal)
		Subtotal 4 parámetros
<i>Caudales bajos</i>	Caudales menores al percentil 75	Valores de la media o la mediana de los caudales bajos durante cada mes calendario
		Subtotal 12 parámetros
<i>Pulsos de caudal alto</i>	Caudales mayores que el bajo pero menor al nivel de cauce lleno (inundación de periodo de retorno 2 años)	Frecuencia de los pulsos de caudal alto durante cada año hidrológico o estación
		Valores de la media o la mediana de eventos de pulso de caudal alto: · Duración (días) · Pico del caudal (caudal máximo durante el evento) · Momento (fecha juliana del pico del caudal) · Tasas de crecimiento y decrecimiento
		Subtotal 6 parámetros
<i>Inundaciones pequeñas</i>	Caudales iguales o mayores que el nivel de cauce lleno pero menor que la inundación con periodo de retorno de 10 años	Frecuencia de las pequeñas inundaciones durante cada año hidrológico o estación
		Valores de la media o la mediana de eventos de pequeñas inundaciones: · Duración (días) · Pico del caudal (caudal máximo durante el evento) · Momento (fecha juliana del pico del caudal) · Tasas de crecimiento y decrecimiento
		Subtotal 6 parámetros

<i>Grandes Inundaciones</i>	Caudales iguales o mayores la inundación con periodo de retorno de 10 años	Frecuencia de las grandes inundaciones durante cada año hidrológico o estación
		Valores de la media o la mediana de eventos de grandes inundaciones:
		· Duración (días)
		· Pico del caudal (caudal máximo durante el evento)
		· Momento (fecha juliana del pico del caudal)
		· Tasas de crecimiento y decrecimiento
		<hr/> Subtotal 6 parámetros <hr/>
		Total 34 parámetros <hr/>

4.1.2. Escala intradiaria

Para analizar el conflicto entre la operación hidroeléctrica en punta y conservación del ecosistema fluvial, en primera instancia se determinan los caudales turbinados por cada central, realizando la transformación de potencia a caudal mediante el factor de rendimiento de cada central. Posteriormente se calculan las métricas definidas por Zimmerman et al. [2010] (ver Tabla: 2.1).

Por otro lado, se procesan los caudales horarios medidos en las estaciones fluviométricas de interés siguiendo el mismo procedimiento descrito previamente.

Finalmente, se comparan los indicadores determinados para ambas bases de datos.

4.2. Recopilación de datos

La recopilación de información se realiza desde 3 fuentes diferentes, las cuales pueden ser clasificadas según su propósito, datos hidrológicos, operación hidroeléctrica y muestreo de peces.

4.2.1. Datos hidrológicos

Se recopilieron series de caudales diarios para las estaciones seleccionadas (ver tabla 3.3). Las series de caudales diarios medidos se obtienen desde el sistema hidrométrico en línea perteneciente a la Dirección General de Aguas de Chile <http://www.dga.mop.gob.cl>, DGA, específicamente de las estaciones fluviométricas mencionadas en la tabla 3.3. Se descargan las mediciones para los años 1970 - 2020 (ver Figura 3.11), y posteriormente se procede a dividir el periodo analizado según la fecha de entrada en operación las centrales Pangué, Ralco y Angostura respectivamente (ver Tabla 3.1). Una vez particionadas las series de caudales de cada estación según los periodos definidos, se verifica la disponibilidad de los registros en cada una de ellas (ver Tabla 3.5).

Por otro lado, se recopila información a escala intradiaria perteneciente a las estaciones río Biobío en Rucalhue, Río Biobío antes Junta Pangué, Río Biobío antes Junta Huirí Huirí

y Río Biobío en Llanquén. Las series de caudales horarios se obtienen de manera análoga a las mediciones diarias, desde el sitio de la DGA <http://www.dga.mop.gob.cl>.

4.2.2. Operación hidroeléctrica

En primera instancia, se descargan las mediciones de potencia horaria generada por cada las centrales hidroeléctricas Angostura, Pangué y Ralco, las cuales se obtienen desde el sitio del coordinador eléctrico nacional <https://www.coordinador.cl>. Luego, se transforma la potencia de cada central a caudal turbinado ponderando por el factor de rendimiento de cada central, el cual está depende de la cota de embalse, entre otras variables. La planilla para la determinación del factor de rendimiento se obtiene desde los programas de operación del coordinador eléctrico. Finalmente, los caudales turbinados por cada central, serán el dato de entrada para la determinación de las métricas mencionadas en la tabla 2.1.

4.3. Diagnóstico con respecto al grado de alteración hidrológica del río

4.3.1. Alteración hidrológica

El cálculo de los 33 índices IHA se realizó utilizando el software IHA 7.1 creado por *The Nature Conservancy*. Este cálculo se realiza para las series de caudal alterado y naturalizado correspondientes a la estación río Biobío en Rucalhue, cabe destacar que en el análisis se realiza por los periodos descritos previamente, por lo que se determinarán los efectos desagregados de cada central hidroeléctrica sobre el régimen hidrológico de la zona de estudio.

Para estudiar como varían los índices, mencionados anteriormente, entre el caso del caudal real y natural en las estaciones Río Biobío antes Junta Huirí Huirí, Río Biobío antes Junta Pangué y Río Biobío en Rucalhue, se utiliza el método análisis de Rango de Variabilidad, RVA.

En el análisis RVA, todos los grupos de IHA calculados con la serie de caudales naturales, se divide en tres categorías diferentes. Los límites entre las categorías se basan en valores de percentiles, ya que es un análisis no paramétrico. La configuración predeterminada por el software en el análisis RVA no paramétrico ubica los límites de las categorías a 17 percentiles de la mediana, esto produce una demarcación automática de las tres categorías de igual tamaño, para cada uno de los 33 índices:

- Categoría baja: valores entre los percentiles 0-33.
- Categoría media: valores entre los percentiles 33-67.
- Categoría alta: valores entre los percentiles 67-100.

Luego se tendrán las tres categorías para cada IHA y se calcula la frecuencia esperada con la cual los valores de los índices IHA determinados con la serie de caudales alterados, deberían caer dentro de cada categoría. Esto se hace, dividiendo la cantidad de años para los que se calcularon los índices, en el número de categorías, es decir, tres (si el número es múltiplo de tres, si no, las tres frecuencias esperadas no quedan exactamente iguales, ya que

esta debe ser un número entero). Luego, el programa calcula la frecuencia con la cual los valores de los índices IHA para la serie de caudales alterados, realmente caen dentro de cada una de las tres categorías. El análisis RVA genera, para cada índice y categoría, factores de alteración hidrológica (HA, por sus siglas en inglés), que cuantifica el grado de alteración de los 33 índices IHA, los cuales se calculan como:

$$HA = \frac{(Frecuencia\ observada - Frecuencia\ esperada)}{Frecuencia\ esperada} \quad (4.1)$$

Un valor positivo de alteración hidrológica significa que la frecuencia de los valores en la categoría ha aumentado entre las series alteradas y naturales, mientras que un valor negativo significa que la frecuencia de los valores ha disminuido.

Finalmente, los resultados se presentan de manera gráfica mediante un diagrama de barras, en donde el eje horizontal corresponde a los IHA y el eje vertical está asociado a los valores de alteración hidrológica calculados según la ecuación 4.1, en donde un valor negativo revela una disminución de la frecuencia observada de un determinado IHA para la categoría en donde se presenta la mayor alteración (alta, media o baja). Por el contrario, un valor positivo revela un aumento de la frecuencia observada respecto a lo que se esperaba (régimen natural).

4.3.2. Alteración producto del *hydropeaking*

Para identificar el efecto que posee la operación en punta de las centrales hidroeléctricas sobre el ecosistema fluvial, se determinan las métricas utilizadas en Zimmerman et al. [2010] (ver Tabla 2.1) para el caudal turbinado en cada central hidroeléctrica y las estaciones fluviométricas ubicadas en su cercanía, lo cual dará origen a un índice por día. Luego, como se cuenta con un registro extenso, es posible obtener una muestra de cada indicador calculado para cada fuente de los registros (central hidroeléctrica o estación fluviométrica). Posteriormente, se ordenan las muestras de índices de modo de poder asignarles una probabilidad de excedencia utilizando la distribución empírica de Weibull. Así, se determinan las curvas de duración de cada indicador para cada una de las centrales hidroeléctricas y estaciones fluviométricas, agrupandolas a distintas resoluciones temporales (registro completo, temporada, mes). Finalmente, para cuantificar el grado de alteración producto del *hydropeaking*, se comparan las curvas de duración a diferentes escalas temporales de cada índice entre el régimen natural (estación fluviométrica sin intervención antrópica) y el régimen alterado el cual está dado por las curvas de duración de las generadoras y estaciones fluviométricas ubicadas aguas abajo de estas.

Capítulo 5

Resultados

En el presente capítulo, se presentan los principales resultados asociados a los efectos que tienen la operación de las centrales Ralco, Pangué y Angostura sobre el régimen hidrológico de la zona de estudio a escala diaria e intradiaria. Esto a partir de información fluviométrica y registros de caudales turbinados durante la operación de las centrales previamente mencionadas. Posteriormente se realizará el análisis en detalle de los resultados obtenidos en el presente capítulo.

5.1. Resultados preliminares

Para llevar a cabo los resultados principales del presente trabajo de título, es necesario realizar una serie de actividades preliminares, dentro de las cuales se destaca el procesamiento de la información fluviométrica y de los caudales turbinados de las centrales hidroeléctricas. Adicionalmente, se contempla un relleno estadístico para aquellas estaciones que no poseen información en toda la extensión de su registro.

Como la estación Río Biobío en Rucalhue no posee el 100% de registros en los periodos 3 y 4 (ver Tabla: 3.5) pero sí contiene al menos un 90% en cada uno, se realiza un relleno estadístico a partir de las estaciones que presenten un mayor coeficiente de determinación (R^2), mismo régimen hidrológico para el periodo analizado, además de poseer por lo menos 75% de información.

Una vez encontradas las estaciones que poseen un amplio registro con mediciones y mismo régimen hidrológico que la estación río Biobío en Rucalhue, se procede a correlacionar su información con las estaciones patrones, y así encontrar aquellas que posean el mayor coeficiente de determinación para efectuar el relleno. Se tiene que para el periodo natural no es posible rellenar los datos faltantes de la estación río Biobío en Rucalhue, debido a la diferencia de régimen con la estación río Biobío en desembocadura (es la única que posee extenso registro en este periodo). Por otro lado, en el periodo 2 no es necesario realizar un relleno dado que no hay datos faltantes (Ver Tabla: 3.5).

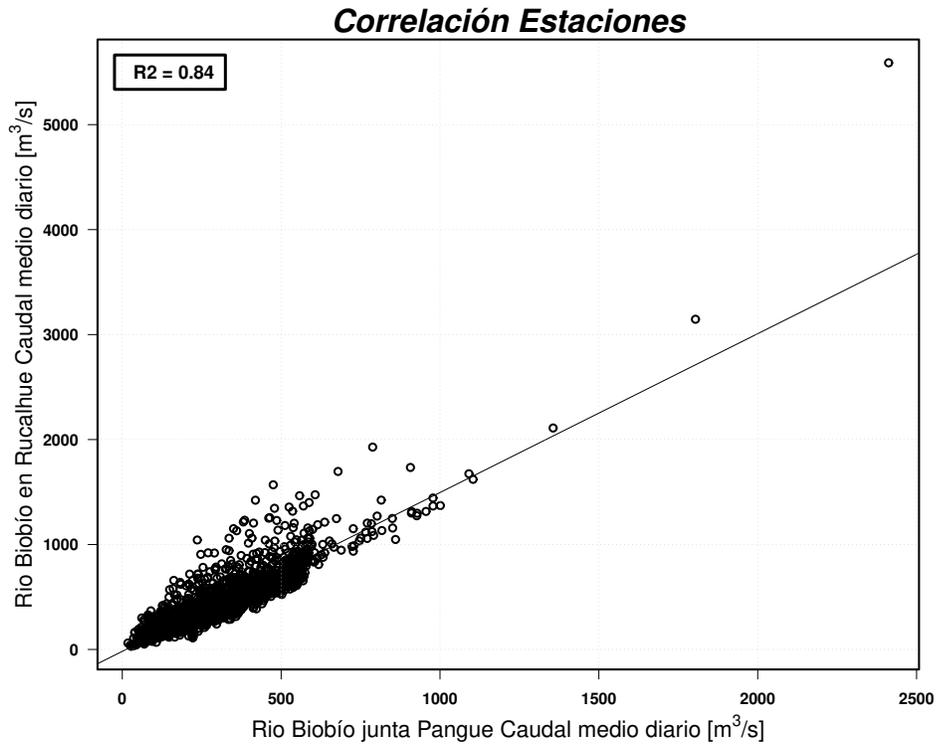


Figura 5.1: Correlación estación río Biobío en Rucalhue y río Biobío antes Junta Pangué, periodo 3

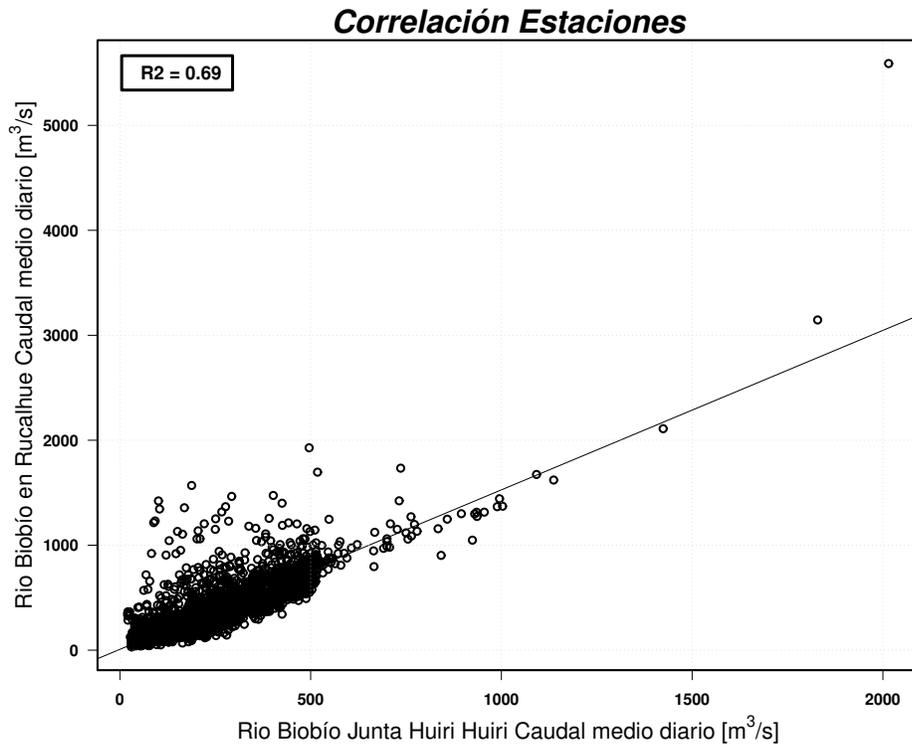


Figura 5.2: Correlación estación río Biobío en Rucalhue y río Biobío antes Junta Huirí Huirí, periodo 3

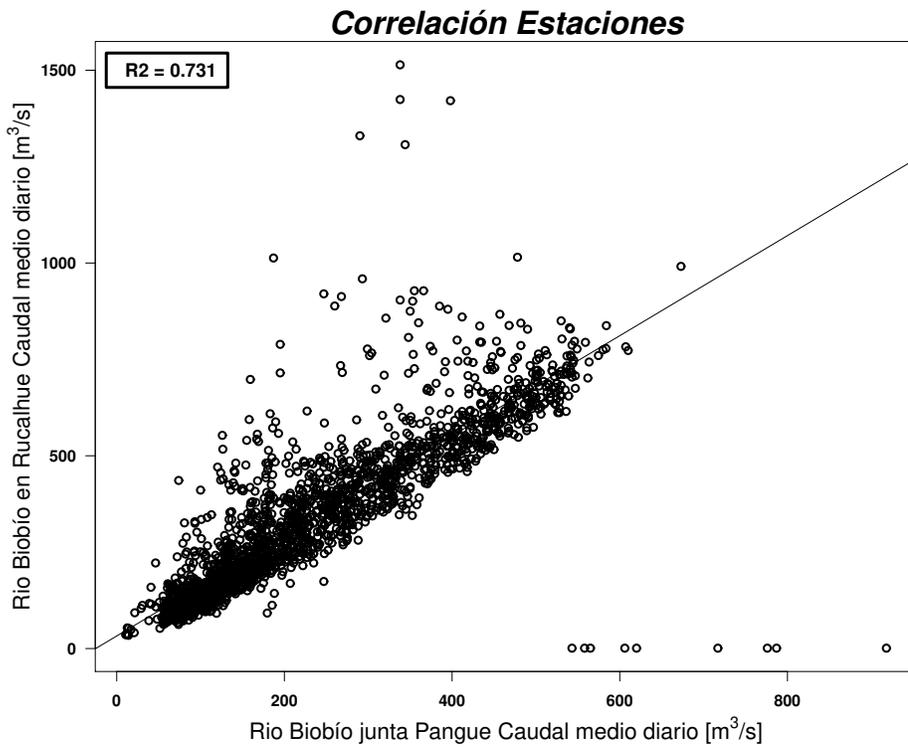


Figura 5.3: Correlación estación río Biobío en Rucalhue y río Biobío antes Junta Pangué, periodo 4

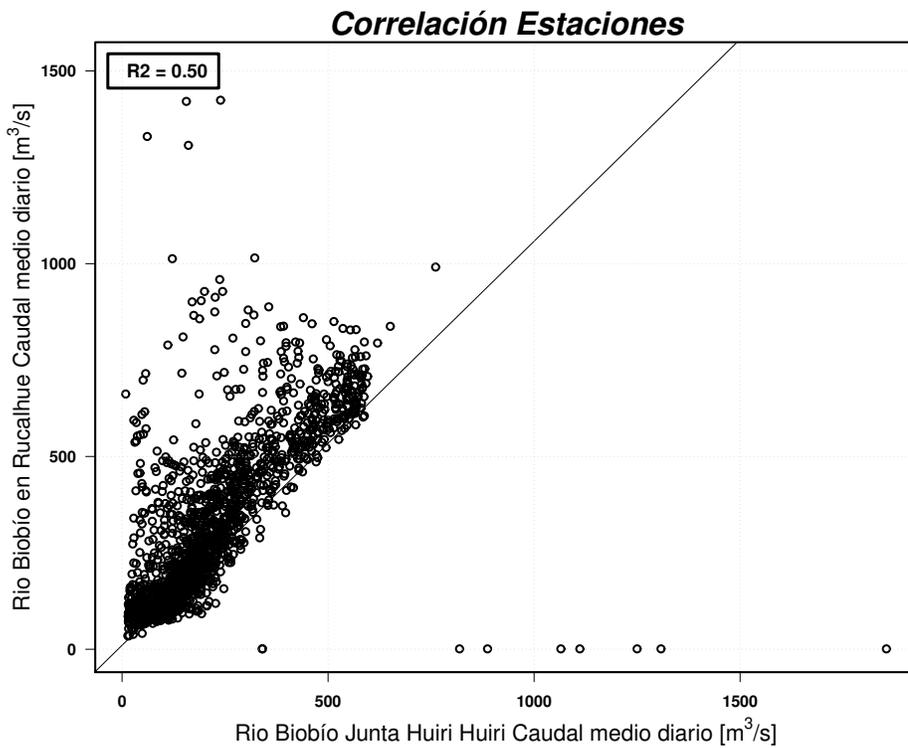


Figura 5.4: Correlación estación río Biobío en Rucalhue y río Biobío antes Junta Huiri Huiri, periodo 4

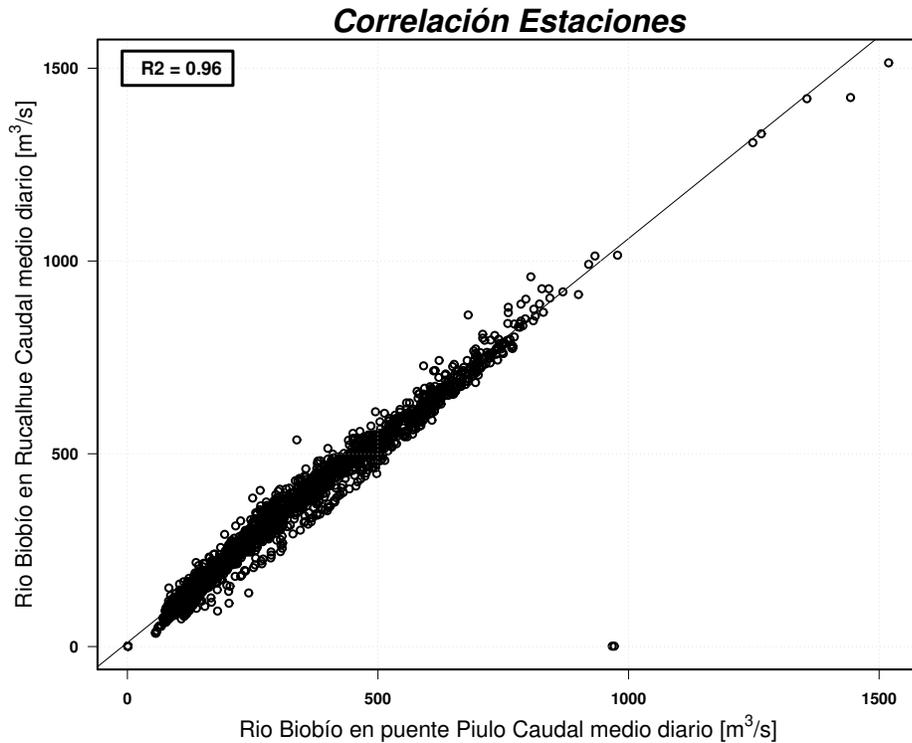


Figura 5.5: Correlación estación río Biobío en Rucalhue y río Biobío en Puente Piulo, periodo 4

El relleno se efectúa para los periodos 3 y 4, los cuales poseen como estaciones patrones, Río Biobío antes Junta Pangué (ver Figura: 5.1) y río Biobío antes Junta Huirí Huirí (ver Figura: 5.2) para el periodo 3, añadiendo a las anteriores río Biobío en Puente Piulo para el periodo 4 (ver Figuras: 5.3, 5.4, 5.5). La serie de caudales completada de la estación río Biobío en Rucalhue se presenta en la figura 5.6, la cual será de utilidad como dato de entrada para el análisis del grado de alteración hidrológica producto de la operación de la central Angostura.

Para realizar el análisis del grado de alteración hidrológica debido a la operación de las centrales Ralco y Pangué, se procede a naturalizar los caudales de las estaciones Río Biobío antes Junta Huirí Huirí y Río Biobío antes Junta Pangué, a partir de los registros de la estación Río Biobío en Llanquén, la cual posee un régimen no intervenido (ver Figura: 5.7).

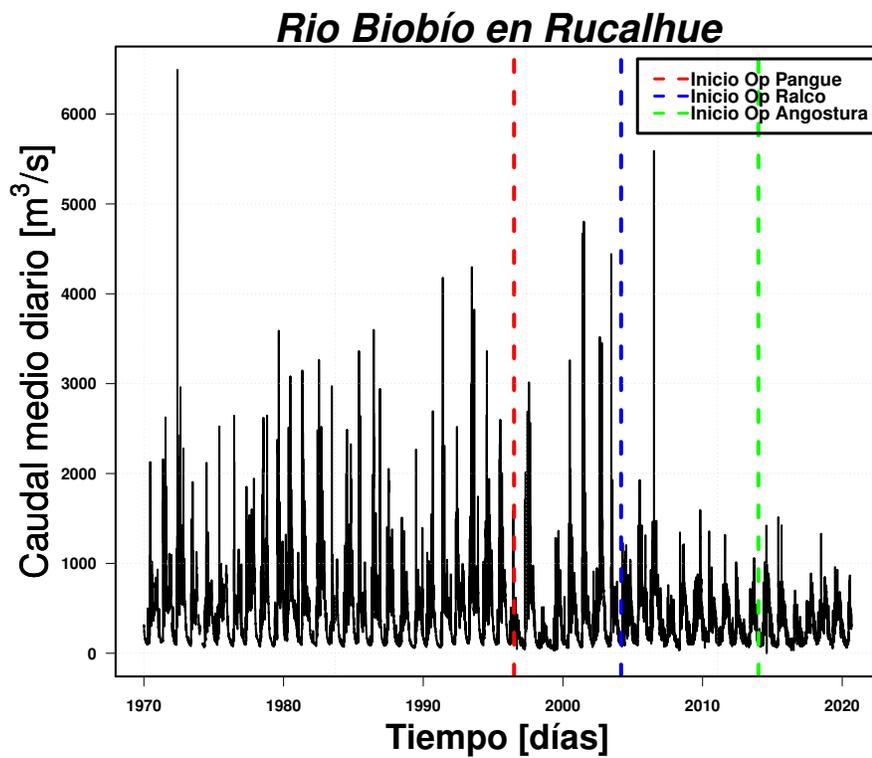


Figura 5.6: Serie de Caudales completada Estación río Biobío en Rucalhue

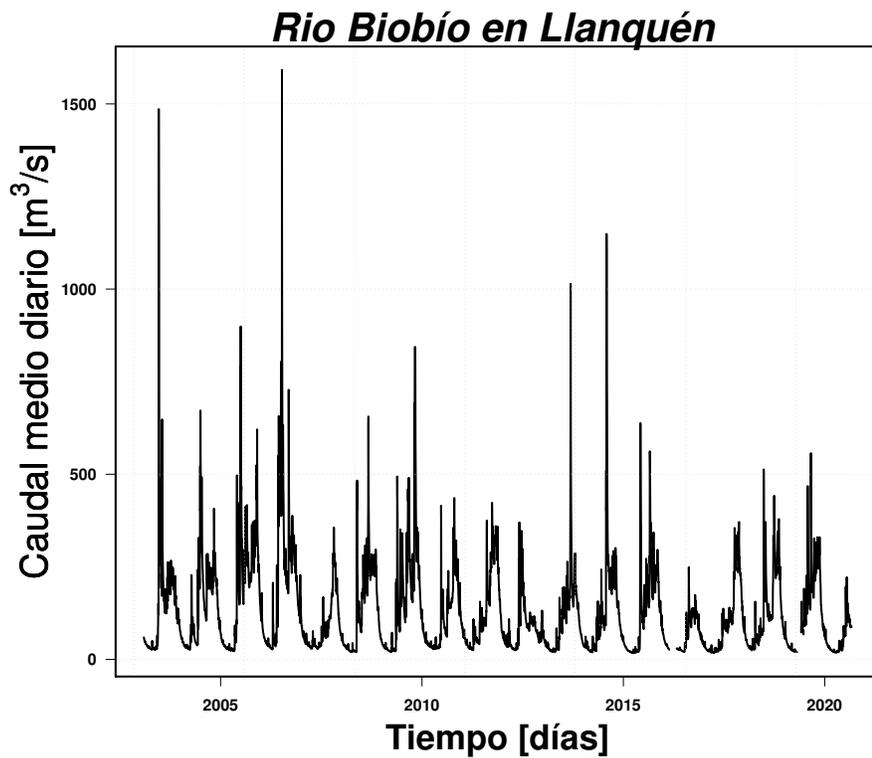


Figura 5.7: Serie de Caudales Estación río Biobío en Llanquén

Caudal Naturalizado Estación Río Biobío antes Junta Huirí Huirí

La determinación del caudal natural asociado a la estación Río Biobío antes Junta Huirí Huirí, se realiza a partir de la estación Río Biobío en Llanquén ubicada aguas arriba de la central Ralco, cuyo registro no presenta intervenciones antrópicas. Se estudia la correlación entre ambas estaciones para un periodo concurrente previo a la intervención antrópica, este periodo corresponde al año 2003 (ver Figura: 5.8). Luego, dado el alto valor del coeficiente de determinación ($R^2 = 0,97$) para la correlación entre ambas estaciones, se procede a reconstruir el caudal naturalizado de la estación Río Biobío antes Junta Huirí Huirí hasta la fecha siguiendo la ecuación del modelo lineal (5.1).

$$Q_{Huirí,Nat} = 1,594 \cdot Q_{Llanquen} + 46,816 \quad (5.1)$$

Luego, el caudal naturalizado será utilizado como dato de entrada para cuantificar el grado de alteración hidrológica producto de la operación de la central hidroeléctrica Ralco.

Finalmente, el caudal naturalizado de la estación Río Biobío antes Junta Huirí Huirí se presenta junto al caudal medido por la misma estación en la figura 5.9.

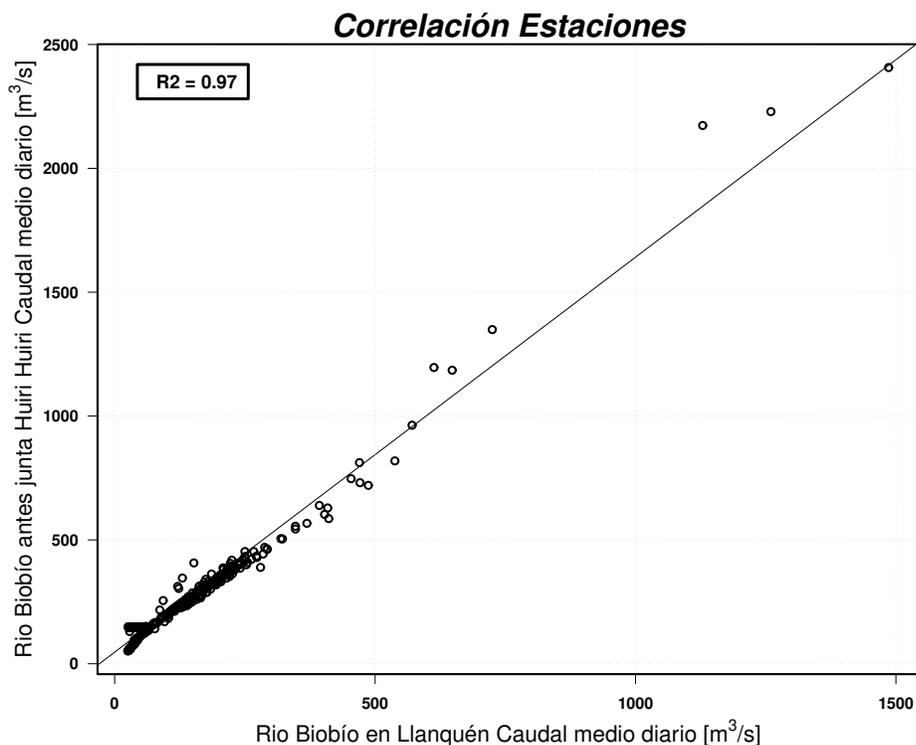


Figura 5.8: Correlación estación río Biobío antes Junta Huirí Huirí y río Biobío en Llanquén, Periodo previo operación Central Ralco, año 2003

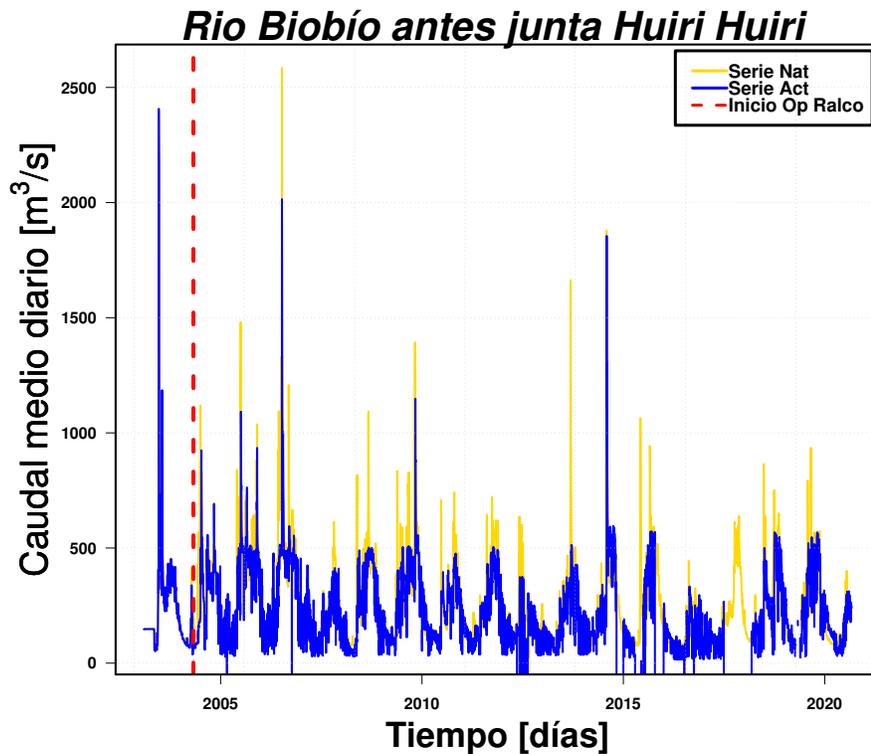


Figura 5.9: Serie de Caudales completada Estación río Biobío en Rucalhue

Caudal Naturalizado Estación Río Biobío antes Junta Pangué

El caudal naturalizado de la estación Río Biobío antes Junta Pangué, se determina mediante la transposición de los caudales naturales pertenecientes a la estación Río Biobío antes Junta Huirí Huirí. Lo anterior se realiza dado que ambas estaciones poseen el mismo régimen hidrológico, sumado a que no existen afluentes importantes en el tramo entre estaciones. La trasposición de caudales se realiza utilizando el área total de cada cuenca, y los caudales de la estación Río Biobío antes Junta Huirí Huirí, utilizando los datos de la tabla 3.4 y la ecuación (5.2).

$$\frac{Q_{Huirí,Nat}}{A_{Huirí}} = \frac{Q_{Pangué,Nat}}{A_{Pangué}} \quad (5.2)$$

Luego, el caudal naturalizado será utilizado como dato de entrada para cuantificar el grado de alteración hidrológica producto de la operación de la central hidroeléctrica Pangué.

Finalmente, el caudal naturalizado de la estación Río Biobío antes Junta Pangué se presenta junto al caudal medido por la misma estación en la figura 5.10.

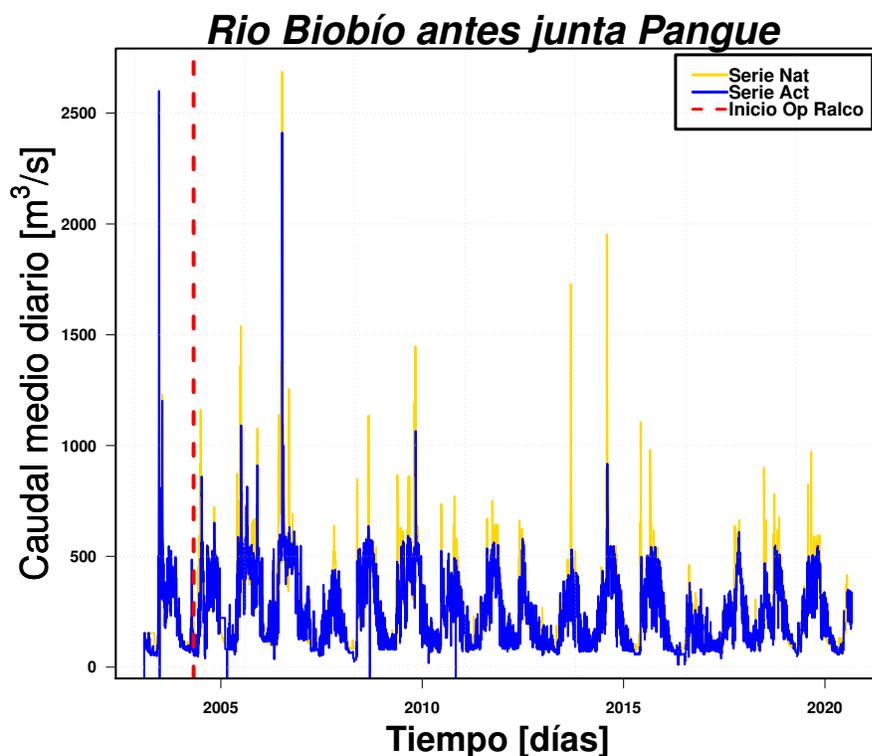


Figura 5.10: Serie de Caudales completada Estación río Biobío en Rucallhue

5.2. Alteración hidrológica escala diaria.

A continuación, se presenta el cálculo de indicadores de alteración hidrológica, con respecto al régimen natural, para cada punto de estudio, a través de los 33 índices IHA y el método RVA, el cual cuantifica el grado de alteración de los índices, mediante los factores de alteración hidrológica.

En la figura 5.14 se presentan los resultados del análisis del rango de variabilidad de cada índice de alteración hidrológica para cada una de las centrales hidroeléctricas estudiadas. De esta figura es importante destacar que las barras están coloreadas según la categoría que exhibe la mayor alteración hidrológica de las 3 (alta, media, baja) para cada IHA. Adicionalmente, el eje horizontal representa la magnitud de la alteración, la cual se determina a partir de la frecuencia esperada (régimen natural) y la que se observa realmente (régimen intervenido), según la ecuación 4.1.

5.2.1. Central hidroeléctrica Ralco

En esta sección se muestran los resultados de la alteración hidrológica producto de la operación de la central hidroeléctrica Ralco. Se estudian las series de caudales medidos y naturalizados pertenecientes a la estación fluviométrica Río Biobío antes Junta Huirí Huirí, la cual se encuentra aguas abajo del punto de restitución de la central.

En la Figura 5.14 A) se presenta gráficamente la alteración hidrológica según el rango de variabilidad de cada uno de los IHA.

Se puede observar que en la mayoría de los meses húmedos, exceptuando mayo y junio, la mayor alteración es producida porque los caudales promedio disminuyen mayormente en la categoría baja, es decir, hay más caudales entre los percentiles menores al 33 con respecto a las otras dos categorías. Por otro lado, en la gran mayoría de los meses secos (enero, febrero y marzo) la mayor alteración es producida porque los caudales promedios aumentan en la categoría alta, mientras que para octubre y noviembre disminuyen en esta misma categoría.

Respecto a los pulsos de caudal, tanto los pulsos bajos y altos aumentan su cantidad en la categoría alta, y además aumentan y disminuyen su duración respectivamente en esta misma categoría.

Se identificó que el IHA que sufre una mayor alteración respecto al régimen natural corresponde al “ conteo de pulsos bajos ”, el cual luego de la entrada en operación de la central aumenta considerablemente (ver Figura: 5.11).

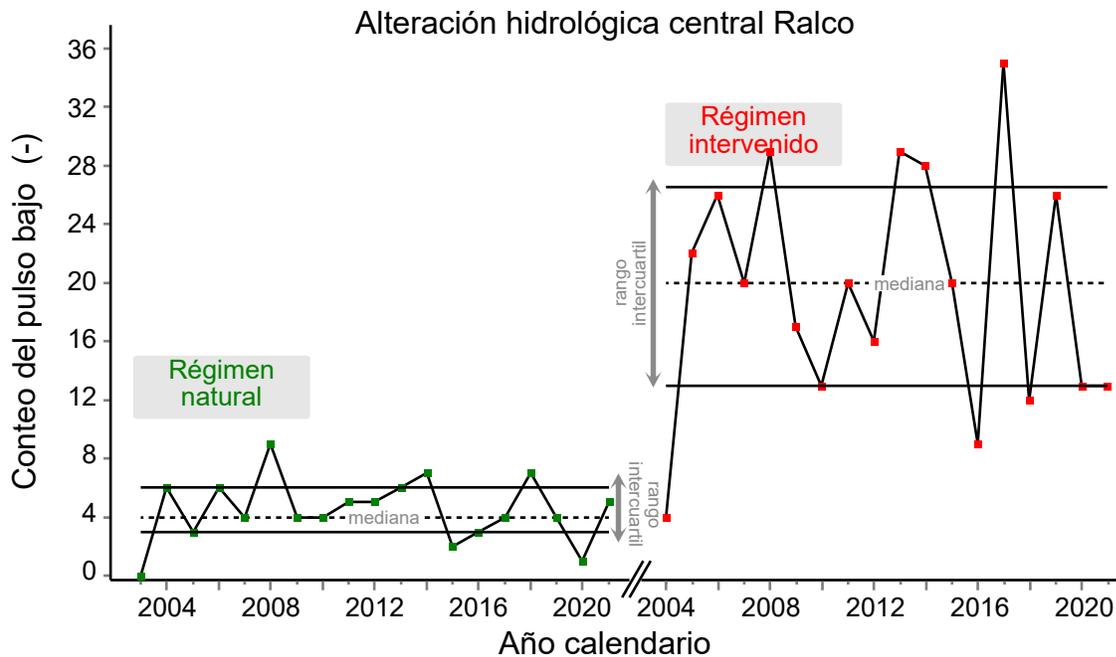


Figura 5.11: Valor del índice IHA “ conteo de pulsos bajos ”, para el periodo natural y alterado (2004 - 2020), para la central hidroeléctrica Ralco.

5.2.2. Central hidroeléctrica Pangué

En esta sección se muestran los resultados de la alteración producida por la operación de la central hidroeléctrica Pangué. Se estudian las series de caudales medidos y naturalizados pertenecientes a la estación fluviométrica Río Biobío antes Junta Pangué, la cual se encuentra aguas abajo del punto de restitución de la central.

En la Figura 5.14 B), se presenta gráficamente el mayor valor de alteración hidrológica, según categoría, para cada índice IHA.

Se puede observar que en algunos de los meses húmedos (abril y mayo) la mayor alteración

es producida porque los caudales promedio aumentan en la categoría baja, es decir, hay más caudales entre los percentiles menores al 33 y menos en las otras dos categorías. En meses secos (diciembre y enero) la mayor alteración es producida porque los caudales promedio aumentan en la categoría alta, mientras que para febrero y marzo disminuyen en la categoría baja. Por lo tanto, en los meses húmedos, el caudal promedio disminuye su magnitud.

Por otro lado con respecto a los pulsos, los bajos y altos aumentan su cantidad en la categoría alta, y además aumentan su duración en la categoría baja.

Se identificó que el IHA que sufre una mayor alteración respecto al régimen natural corresponde al “ conteo de pulsos bajos ”, el cual luego de la entrada en operación de la central aumenta considerablemente (ver Figura: 5.12).

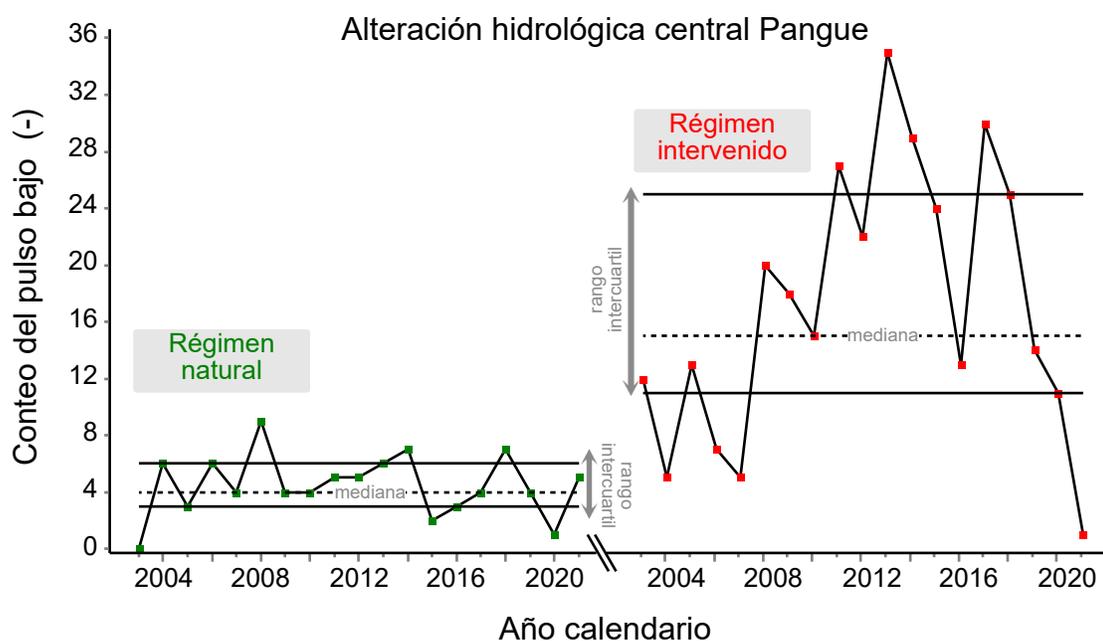


Figura 5.12: Valor del índice IHA “ conteo de pulsos bajos ”, para el periodo natural y alterado (2003 - 2020), para la central hidroeléctrica Pangué.

5.3. Central hidroeléctrica Angostura

En esta sección se muestran los resultados de la alteración producida por la operación de la central hidroeléctrica Pangué. Se estudian las series de caudales medidos previos a la operación de la central Angostura (2004 - 2013) y posteriores (2014 - 2020), pertenecientes a la estación fluviométrica Río Biobío en Rucallhue. No fue posible naturalizar el caudal en dicha estación debido a la diferencia debido a la presencia de afluentes, diferencias de régimen hidrológico, etc.

En la Figura 5.14 C) se presenta un gráfico con el mayor valor de alteración hidrológica, según categoría, para cada índice IHA.

Se puede observar que en la mayoría de los meses húmedos, exceptuando junio y agosto, la mayor alteración es producida porque los caudales promedio aumentan en la categoría baja, es decir, hay más caudales entre los percentiles menores al 33 y menos en las otras dos categorías. Por otro lado, en la gran mayoría de los meses secos (diciembre, febrero y marzo) la mayor alteración es producida porque los caudales promedio disminuyen en la categoría alta, mientras que para noviembre y enero aumentan en categoría baja y alta respectivamente.

Respecto a los pulsos de caudal, tanto los pulsos bajos y altos disminuyen su cantidad en la categoría baja y alta respectivamente. Además, por su parte los pulsos bajos disminuyen su duración mayormente en la categoría alta mientras que los pulsos altos aumentan en esta misma categoría.

Se identificó que el IHA que sufre una mayor alteración respecto al régimen natural corresponde al “ Tasa de descenso ”, el cual luego de la entrada en operación de la central aumenta considerablemente (ver Figura: 5.13).

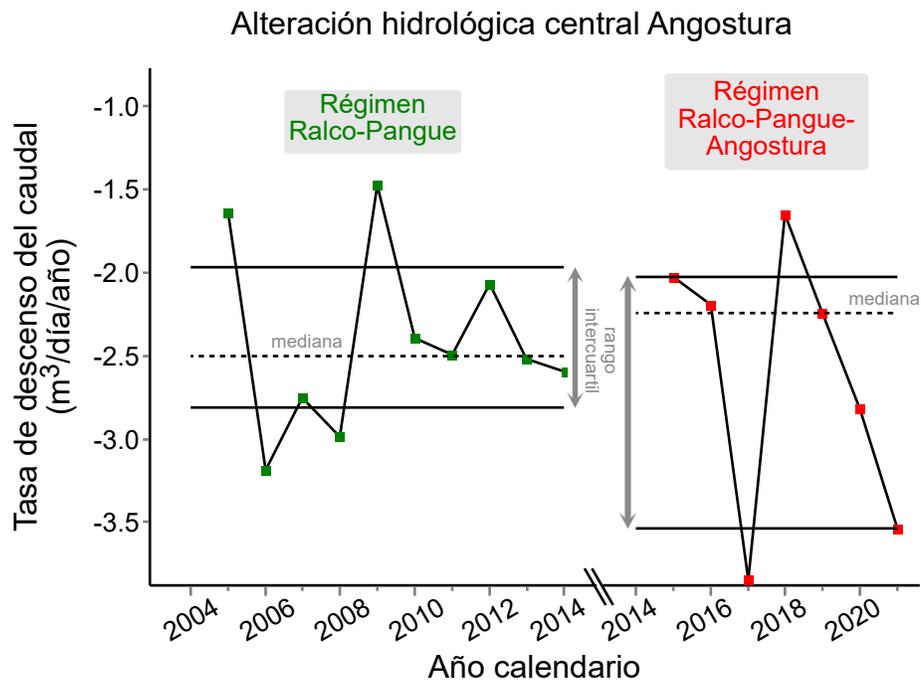


Figura 5.13: Valor del índice IHA “ Tasa de descenso ”, para el periodo natural (2004-2013) y alterado (2014-2020), para la central hidroeléctrica Angostura.

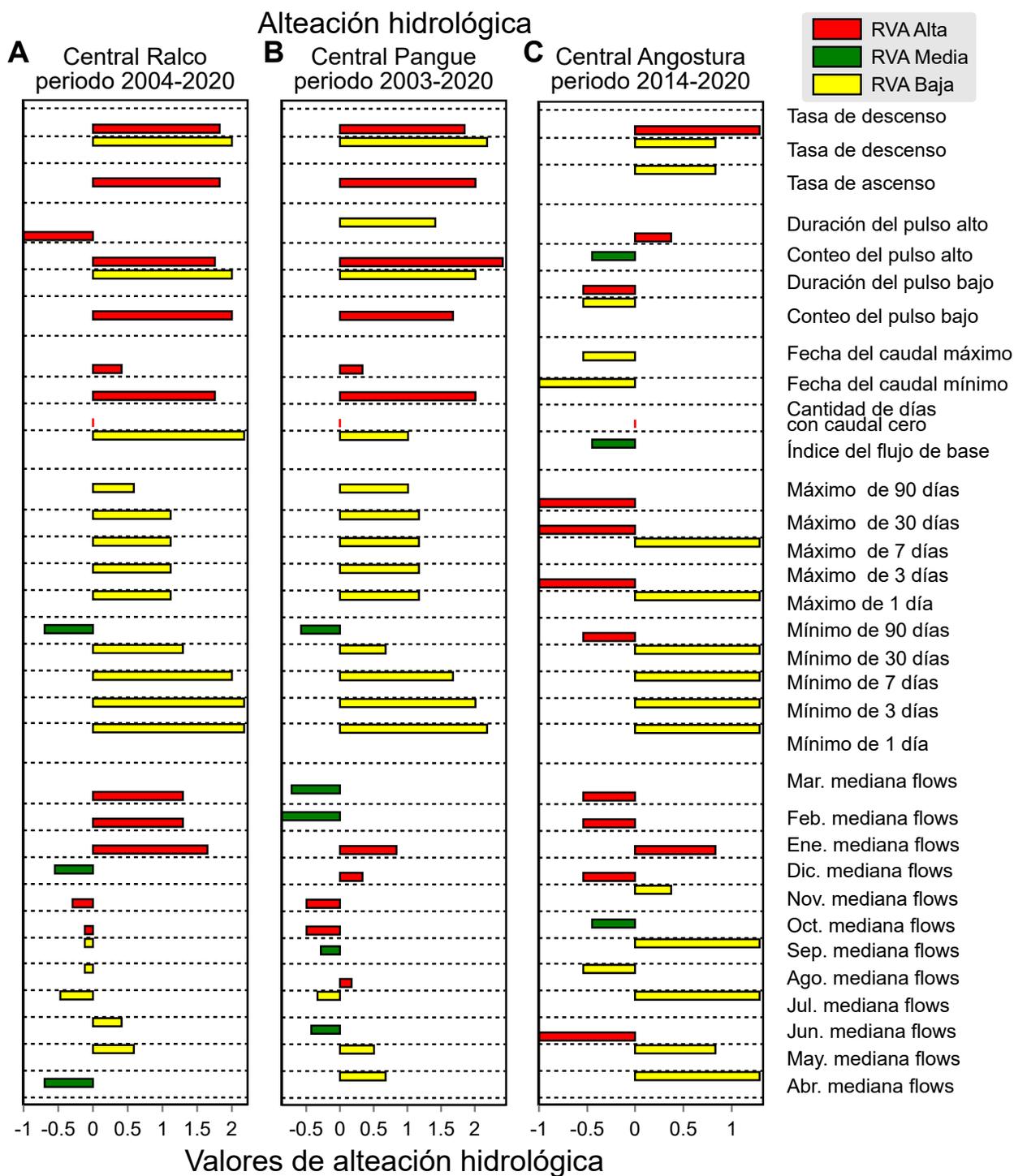


Figura 5.14: Mayor alteración hidrológica entre las tres categorías para cada índice, para la central hidroeléctrica Pangué, periodo 2003 - 2020.

5.4. Alteración hidrológica producto del *hydropeaking*

Para estudiar el efecto del *hydropeaking* sobre el hidrograma horario en la cuenca, se calculan los índices mencionados en la tabla 2.1, para los caudales horarios turbinados por cada central hidroeléctrica y los caudales horarios medidos por las estaciones fluviométricas cercanas a los puntos de interés. Cada indicador mencionado se obtiene a partir de un día completo de mediciones, es decir, para el cálculo de cada indicador se consideran 24 valores correspondientes al caudal horario medido en cada estación fluviométrica o turbinado en cada central. Por lo tanto, se obtiene 1 valor cada día, lo cual dependiendo de la extensión del registro estudiado, proporcionará series de mayor longitud y representatividad para su posterior análisis.

5.4.1. Operación centrales hidroeléctricas

En primera instancia, para el registro completo de cada central hidroeléctrica, se analizaron los 4 indicadores mencionados a través de curvas de duración de cada indicador, las cuales fueron construidas a partir de las frecuencias de valores de cada indicador en la muestra estudiada (ver Anexos, Figuras: A.1 - A.24). Las curvas de duración fueron graficadas simultáneamente para así, observar la existencia de alguna tendencia en los índices sobre que central o cuales son las que producen mayor alteración del hidrograma a escala horaria debido a su operación en punta.

A continuación, se presentan las curvas de duración de los 4 índices de alteración hidrológica horaria seleccionados para cada central hidroeléctrica, para todo el periodo del cual se cuenta con registros horarios de su operación (Figura: 5.15).

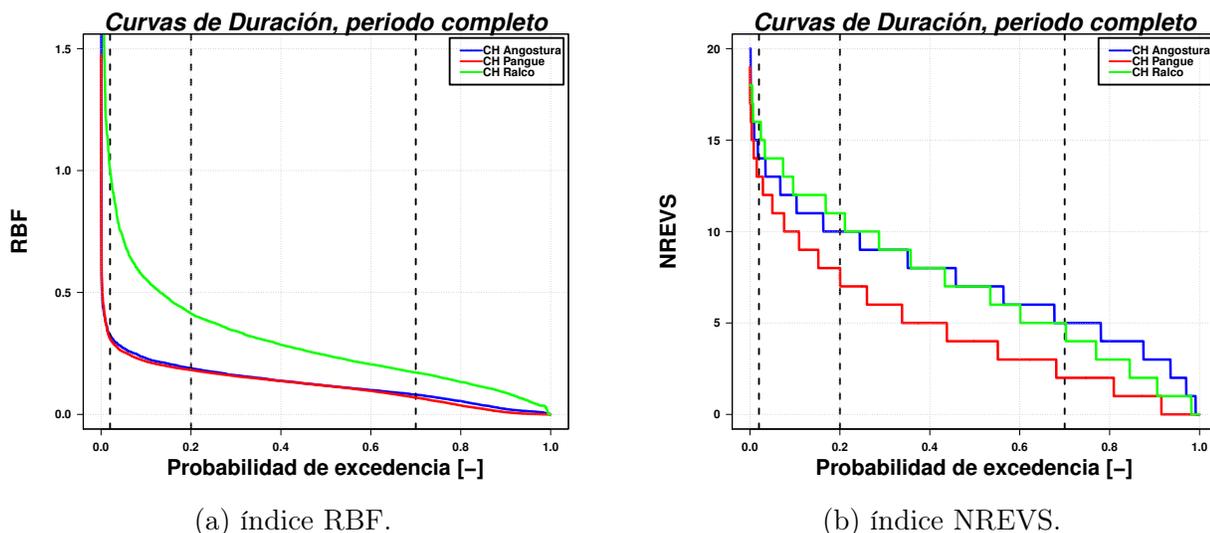
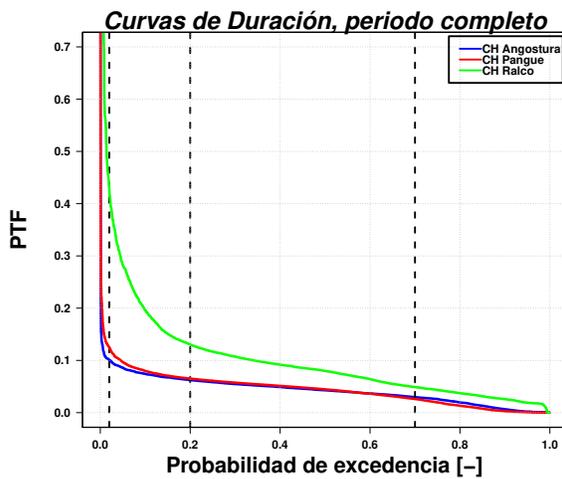
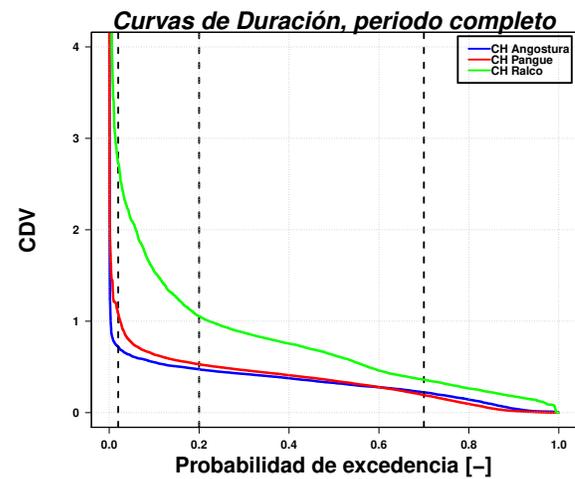


Figura 5.15: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para todas las centrales, considerando periodo completo.



(c) índice PTF.



(d) índice CDV.

Figura 5.15: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para todas las centrales, considerando periodo completo (cont.).

De la figura 5.15, la cual considera el registro completo de datos, se desprende que de las centrales hidroeléctricas analizadas, la central que genera mayor alteración hidrológica horaria producto de su operación en punta, corresponde a la central Ralco.

A modo de detectar posibles cambios en la tendencia previamente señalada, se procedió a refinar el análisis, dividiendo en un principio, los registros entre temporada húmeda (Abril - Septiembre) y temporada seca (Octubre - Marzo). De manera análoga al análisis previo, se desarrollan las curvas de duración para cada índice por temporada (Ver Figura: 5.16).

La Figura 5.16 muestra como en la temporada húmeda, la central hidroeléctrica Ralco sigue siendo la generadora que produce mayor alteración hidrológica horaria producto de su operación en punta en la zona. Además, se observa un leve aumento de la alteración hidrológica horaria producida por la central hidroeléctrica Pangué, respecto a la central hidroeléctrica Angostura. Por otro lado, se aprecia que durante la temporada seca la tendencia es similar a la encontrada en la figura 5.15, en donde la central hidroeléctrica Ralco genera mayor alteración hidrológica horaria, mientras que las centrales hidroeléctricas Pangué y Angostura exhiben un grado de alteración hidrológica horaria prácticamente análogo. Por último, es importante notar que al analizar los índices de alteración hidrológica horaria de cada generadora por estación, se obtiene que tanto la central hidroeléctrica Ralco como Pangué, aumentan el grado de alteración horaria producto de su operación en temporada húmeda, mientras que la central hidroeléctrica Angostura, presenta un comportamiento contrario, aumentando el grado de alteración en los meses de octubre - marzo.

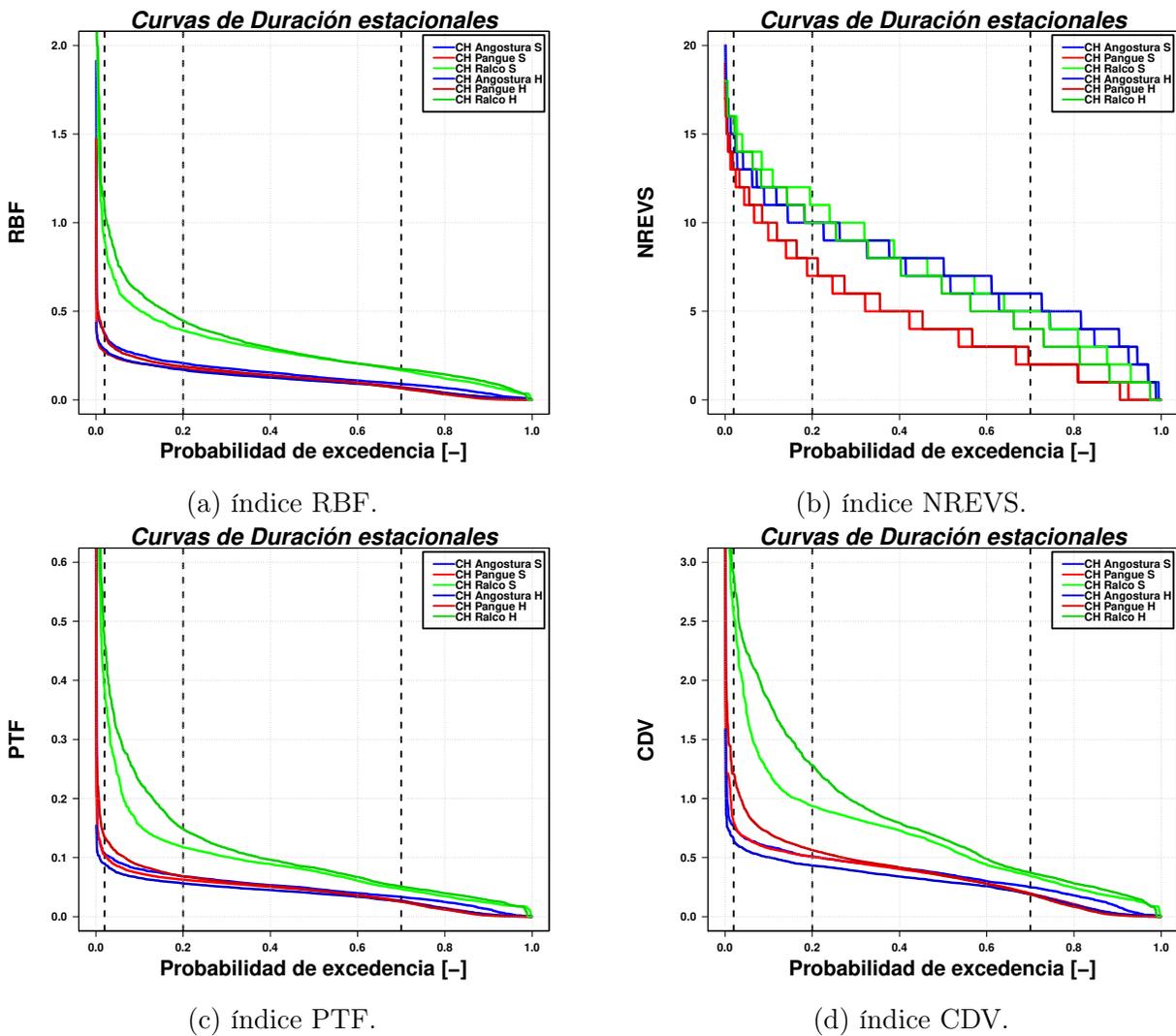
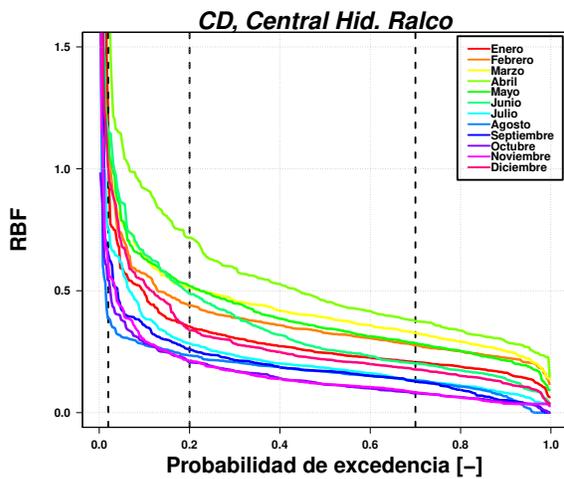


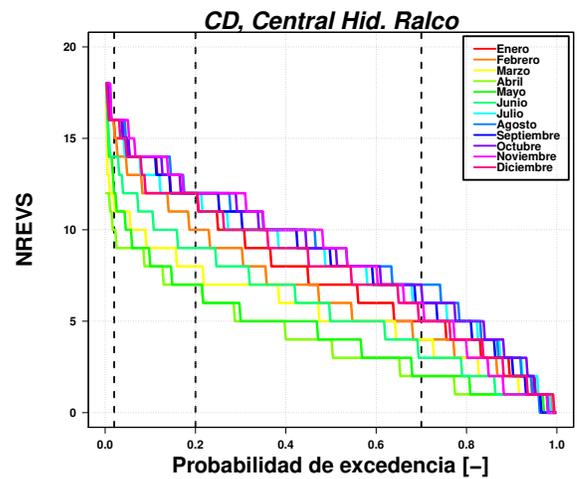
Figura 5.16: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para todas las centrales hidroeléctricas, considerando estación húmeda y seca.

Adicionalmente, se refinó aún más la resolución de los registros, clasificando los índices de alteración hidrológica horaria según mes para cada central hidroeléctrica. Una vez realizada la agrupación previamente señalada, se determinaron las curvas de duración asociadas a cada generadora para cada mes (Ver figuras: 5.17, 5.18, 5.19).

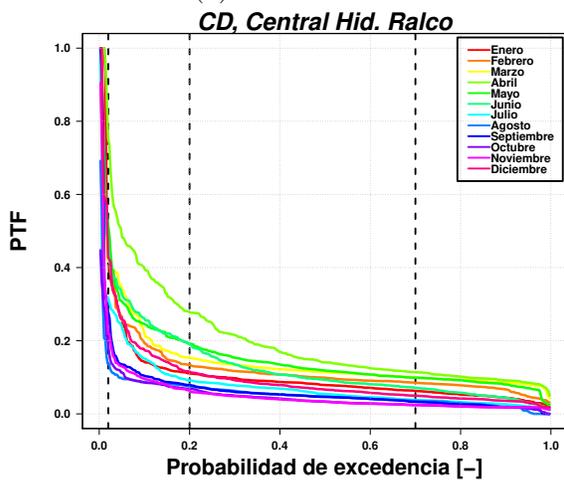
En la figura 5.17 se muestra la dispersión mensual que poseen las curvas de duración de cada índice de alteración hidrológica horaria para la central hidroeléctrica Ralco. Se aprecia que en los meses de marzo - abril se produce la mayor alteración al hidrograma horario, por otro lado, en los meses de octubre - noviembre, la alteración hidrológica horaria es menor. Lo anterior coincide con lo presentado al realizar el análisis por temporadas, en donde se mostró que para la central hidroeléctrica Ralco, la alteración hidrológica horaria producto de su operación era mayor en temporada húmeda.



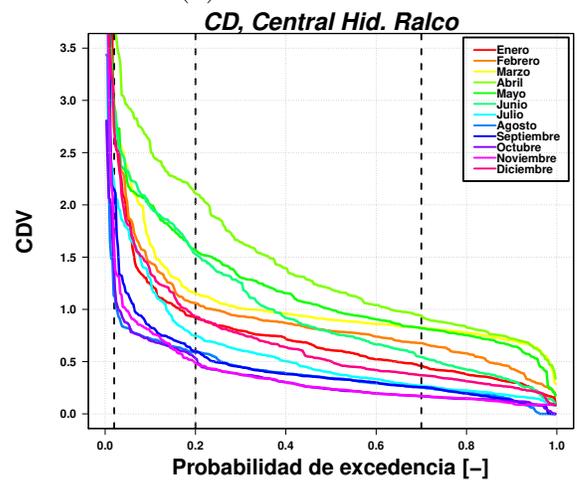
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.



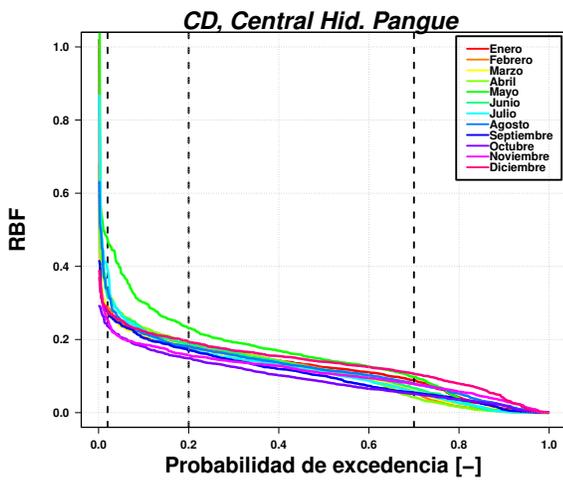
(c) índice PTF.



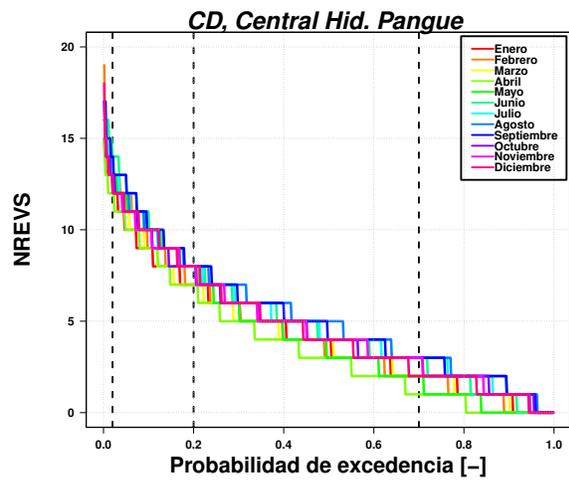
(d) índice CDV.

Figura 5.17: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada mes, central hidroeléctrica Ralco.

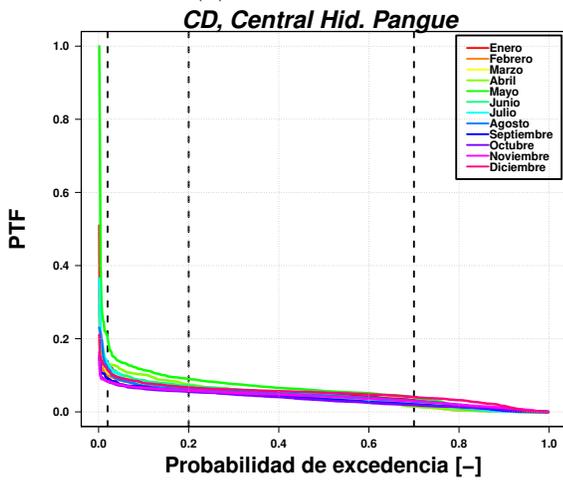
En el caso de la central hidroeléctrica Pangué (Ver figura: 5.18), se aprecia una menor dispersión mensual entre las curvas de duración de los índices de alteración hidrológica horaria, pero aún así es posible observar que en los meses húmedos (abril - mayo), la generadora produce una mayor alteración del hidrograma horario que en los meses secos (octubre - noviembre).



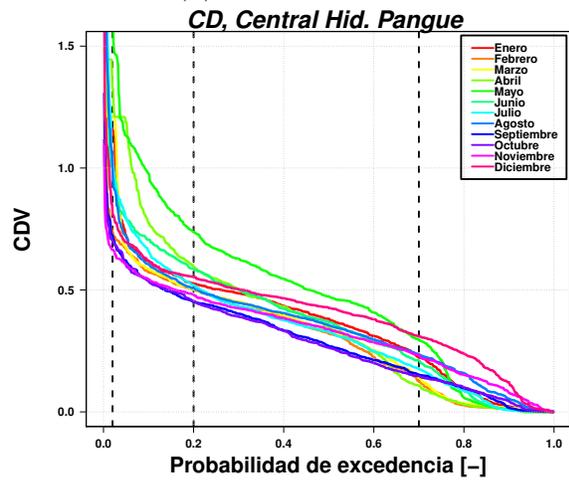
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.



(c) índice PTF.



(d) índice CDV.

Figura 5.18: Curvas de duração índices de alteração hidrológica horaria para cada mes, central hidroeléctrica Pangué.

En la figura 5.19, se muestra la dispersión mensual de las curvas de duración de cada índice de alteración hidrológica horaria producto de la operación de la central hidroeléctrica Angostura. Se observa que el mayor grado de alteración del hidrograma horario se produce en los meses de diciembre - enero, mientras que la menor se encuentra en los meses de abril - mayo, lo cual es consistente con lo obtenido del análisis por temporadas.

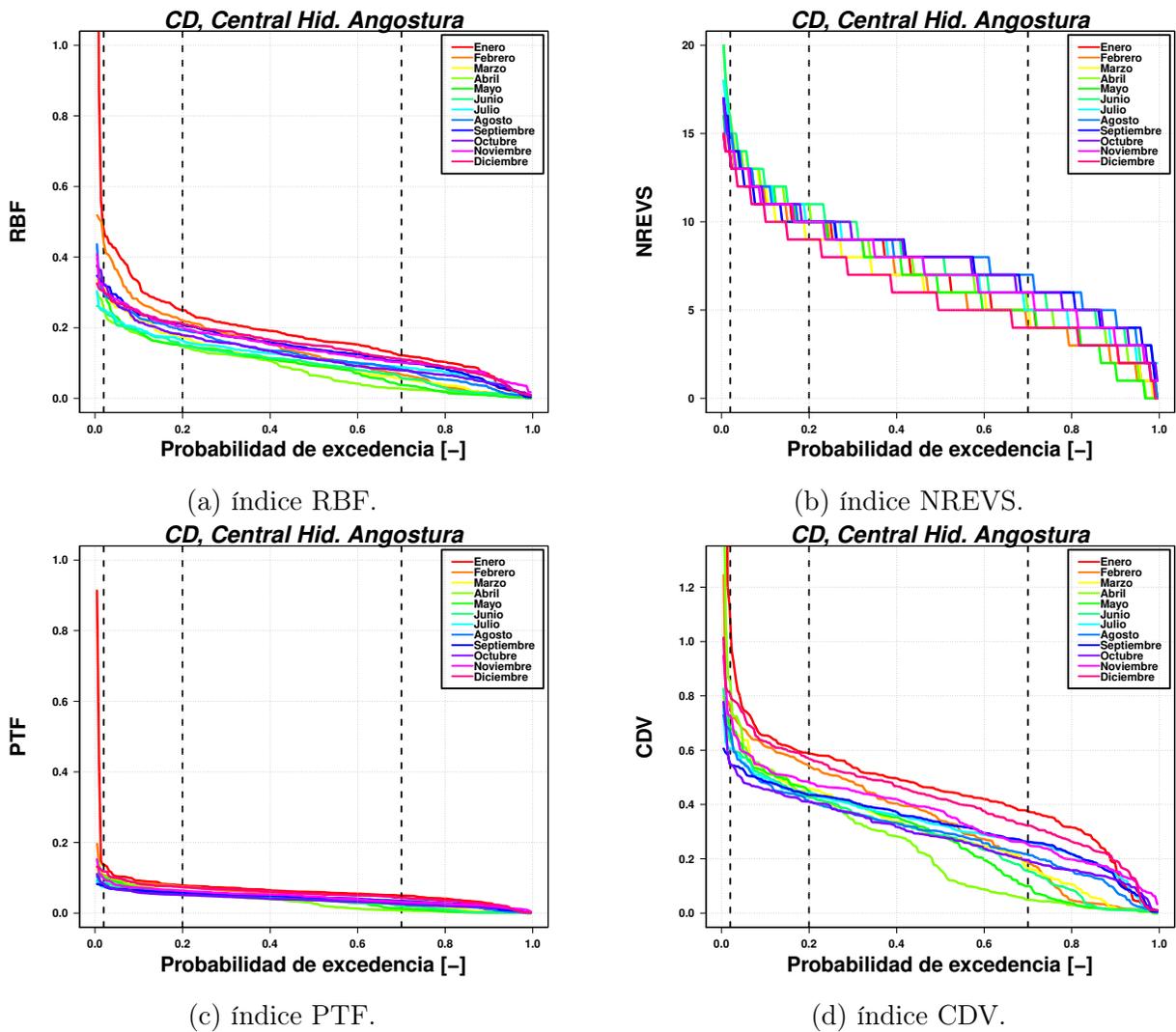


Figura 5.19: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada mes, central hidroeléctrica Angostura.

5.4.2. Estaciones fluviométricas

Para el caso de las estaciones fluviométricas cercanas a los puntos de interés (ver Tabla: 3.4), se replica el análisis realizado para la estimación de la alteración hidrológica horaria producto de la operación de las centrales hidroeléctricas Ralco, Pangue y Angostura. En primera instancia, se determinan las curvas de duración para cada estación fluviométrica considerando su registro horario completo. Posteriormente, se procede a analizar las curvas de duración de los indicadores según temporada húmeda (Abril - Septiembre) y temporada seca (Octubre - Marzo). Adicionalmente, se estudia la dispersión mensual de las curvas de duración de los índices de alteración hidrológica horaria, para cada estación fluviométrica.

Es importante destacar que la estación Río Biobío en Llanquén no posee intervención antrópica en su registro, es por ello que será utilizada para identificar la variación intradiaria natural de la zona en estudio. A continuación, se presentan las curvas de duración de los 4 índices de alteración hidrológica horaria seleccionados para cada estación fluviométrica, para

todo el periodo del cual se cuenta con registros horarios (Figura: 5.20).

De la figura 5.20, la cual considera el registro completo de datos, se desprende que de las estaciones fluviométricas analizadas, aquella que exhibe mayor alteración hidrológica horaria en sus mediciones corresponde a la estación Río Biobío antes junta Huirí Huirí, mientras que las estaciones Río Biobío antes junta Pangué y Río Biobío en Rucalhue presentan un grado de alteración hidrológica horaria similar.

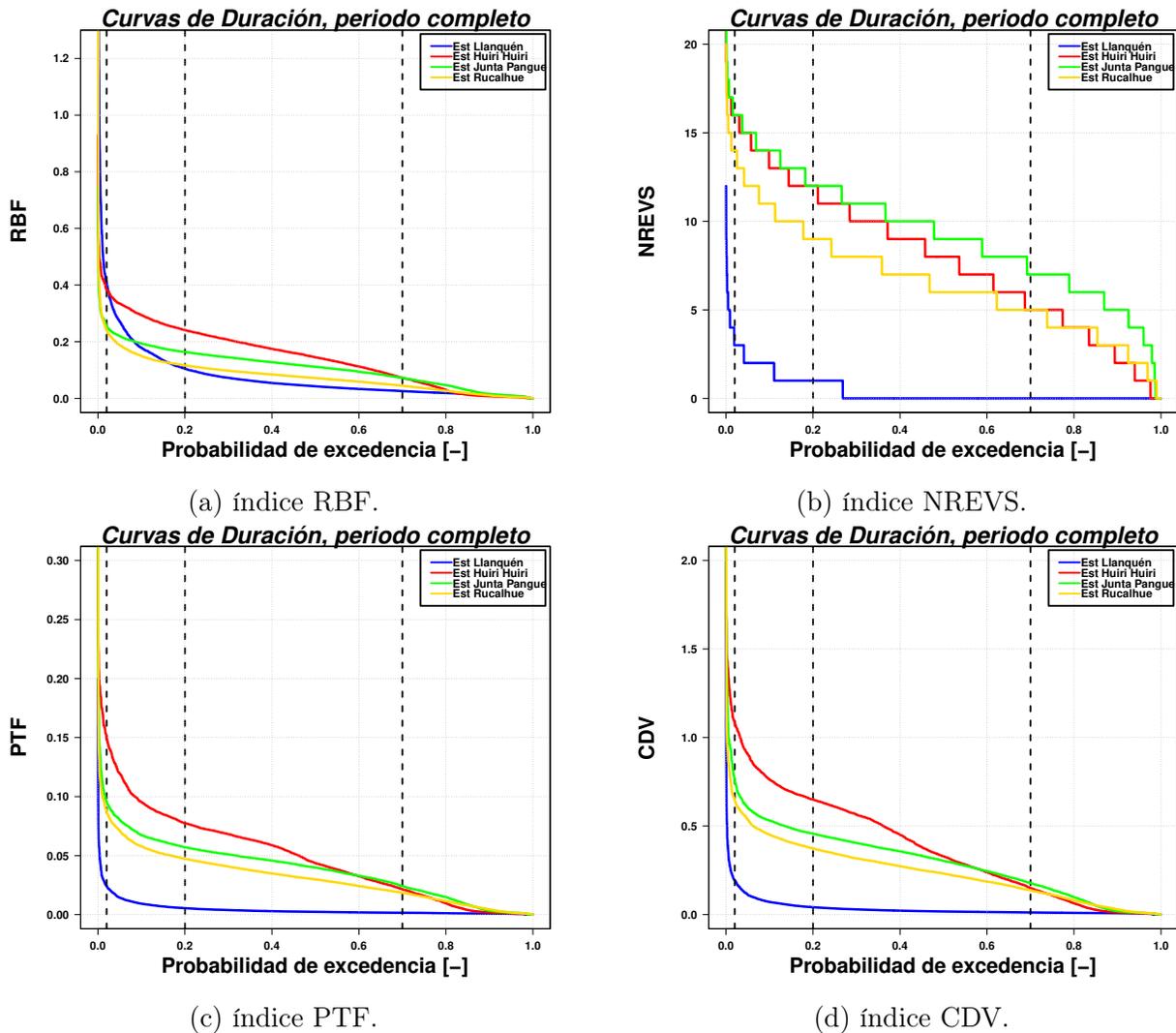


Figura 5.20: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para todas las estaciones fluviométricas, considerando periodo completo.

A modo de detectar posibles cambios en las tendencias previamente señaladas para cada estación, se procedió a refinar el análisis, dividiendo en un principio, los registros entre temporada húmeda (Abril - Septiembre) y temporada seca (Octubre - Marzo). De manera análoga al análisis previo, se desarrollan las curvas de duración para cada índice por temporada (Ver Figura: 5.21).

La Figura 5.21 muestra como en la temporada húmeda, la estación fluviométrica Río Bio-

bió antes junta Huiiri Huiiri sigue siendo la estación que observa mayor alteración hidrológica horaria producto de la operación en punta de la central Ralco en la zona. Además, se observa un leve aumento de la alteración hidrológica horaria producida medida por la estación Río Biobío antes junta Pangué, respecto a la estación Río Biobío en Rucalhue, lo cual es consistente con los resultados del grado de alteración producto de la operación de las centrales hidroeléctricas Pangué y Angostura respectivamente. Por otro lado, es importante notar que al analizar los índices de alteración hidrológica horaria de estación fluviométrica por temporada, se obtiene que tanto la estación fluviométrica Río biobío antes junta Huiiri Huiiri como Río Biobío antes junta Pangué, exhiben mayor grado de alteración horaria producto de la operación de las centrales Ralco y Pangué respectivamente en temporada húmeda, mientras que la estación Río Biobío en Rucalhue ubicada aguas abajo de la central Angostura, presenta un comportamiento contrario, mostrando un aumento del grado de alteración en los meses de octubre - marzo.

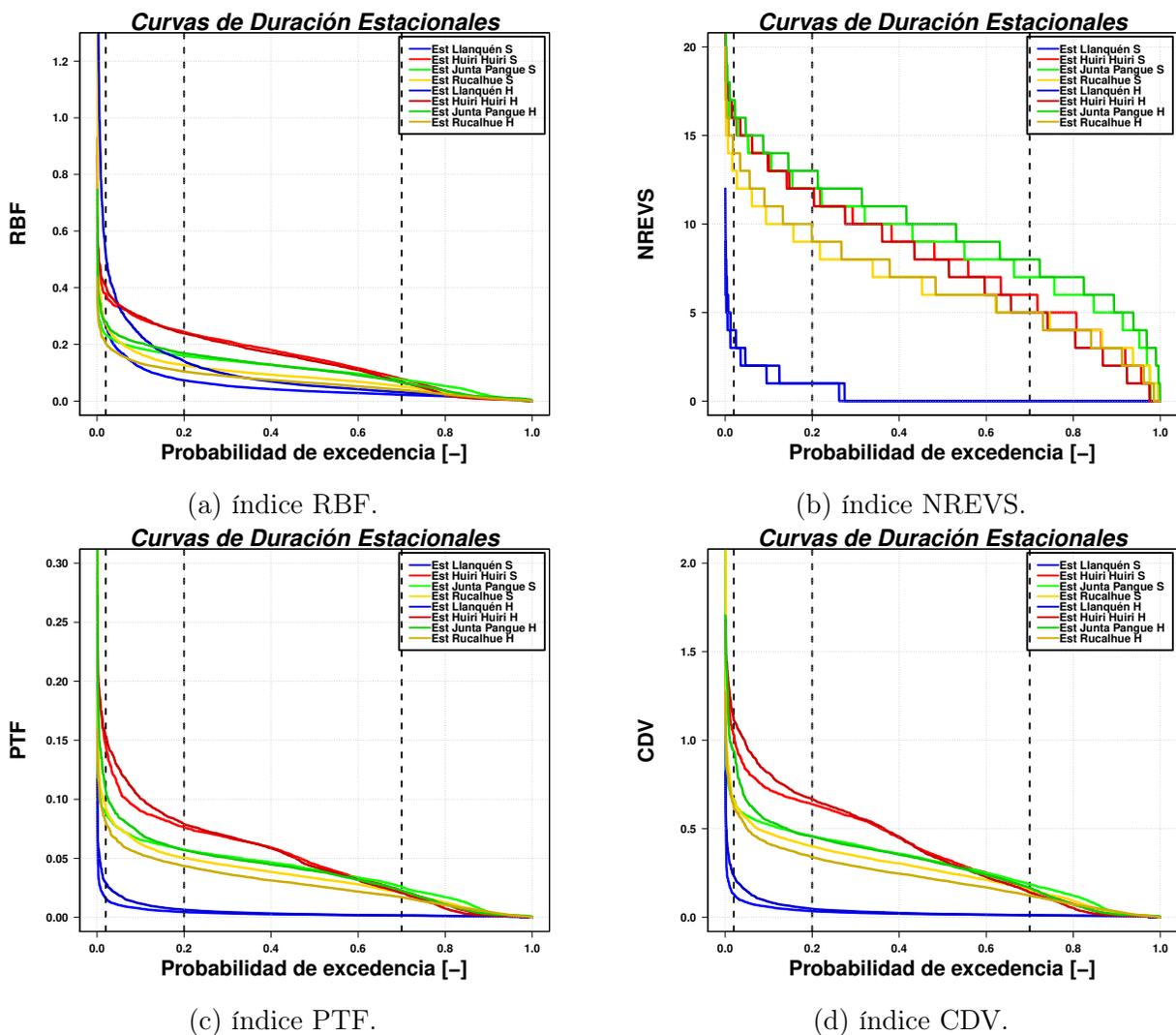


Figura 5.21: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para todas las estaciones fluviométricas, considerando estación húmeda y seca.

Adicionalmente, se refinó aún más la resolución de los registros, clasificando los índices de

alteración hidrológica horaria según mes para cada estación fluviométrica. Una vez realizada la agrupación previamente señalada, se determinaron las curvas de duración asociadas a cada generadora para cada mes (Ver figuras: 5.22, 5.23, 5.24, 5.25).

En la figura 5.22 se muestra la dispersión mensual que poseen las curvas de duración de cada índice de alteración hidrológica horaria que exhibe la estación fluviométrica Río Biobío en Llanquén, la cual reproduce la variabilidad intradiaria del régimen natural. Se aprecia que en los meses de abril - mayo se produce la mayor alteración al hidrograma horario, por otro lado, en los meses de diciembre - enero, la alteración hidrológica horaria es menor. Lo anterior coincide con lo presentado al realizar el análisis por temporadas, en donde se expuso que para la estación Río Biobío en Llanquén, la alteración hidrológica horaria observada es mayor en la temporada húmeda.

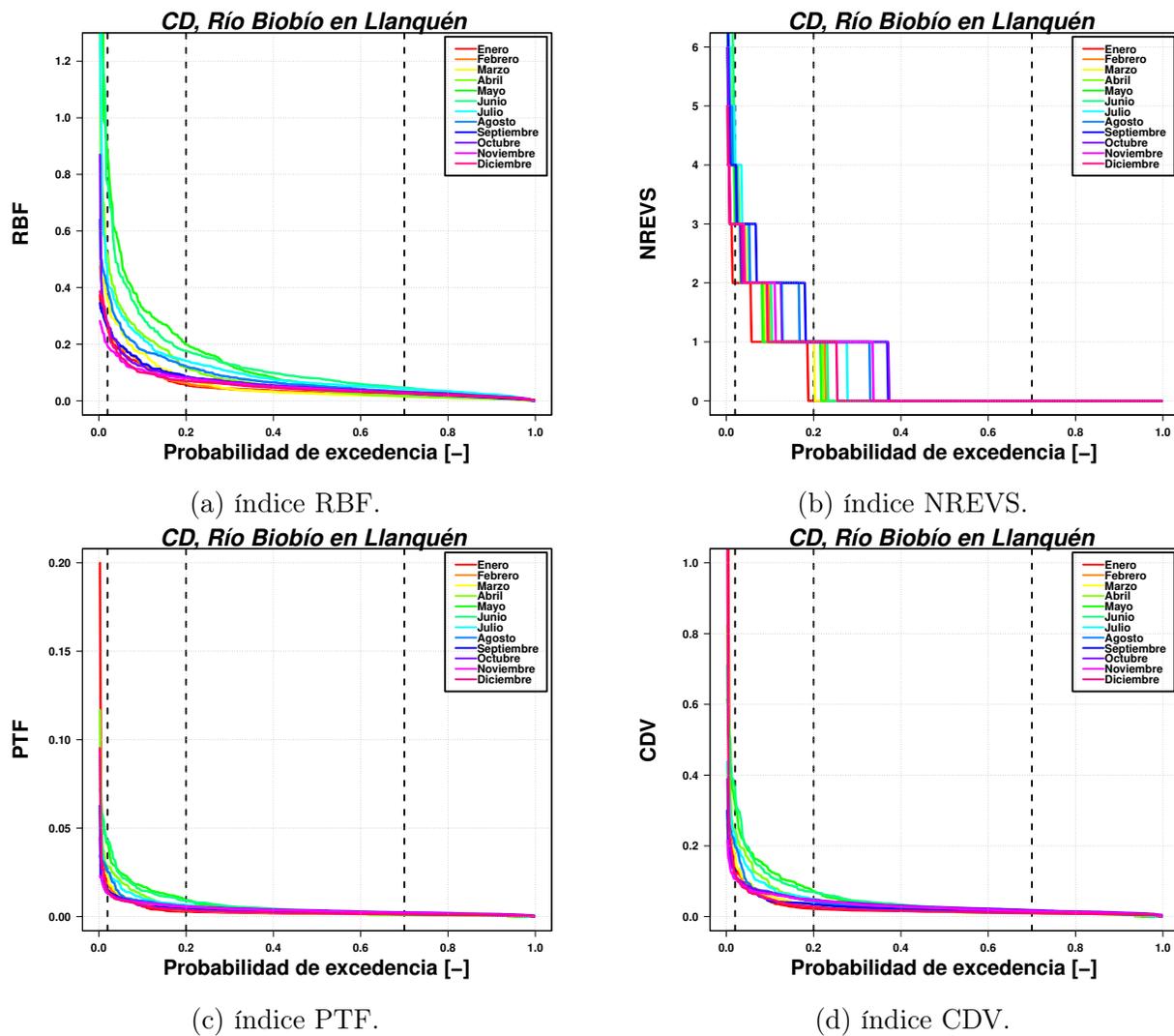


Figura 5.22: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada mes, estación fluviométrica Río Biobío en Llanquén.

Para el caso de la estación fluviométrica Río Biobío antes junta Huir Huir, la figura 5.23 presenta la dispersión mensual de los índices de alteración hidrológica horaria observada en

la estación aguas abajo de la central hidroeléctrica Ralco. de la figura se desprende que en los meses de abril - mayo se observa el mayor grado de alteración, en cambio, en los meses de octubre - noviembre se exhiben los menores valores de los índices calculados.

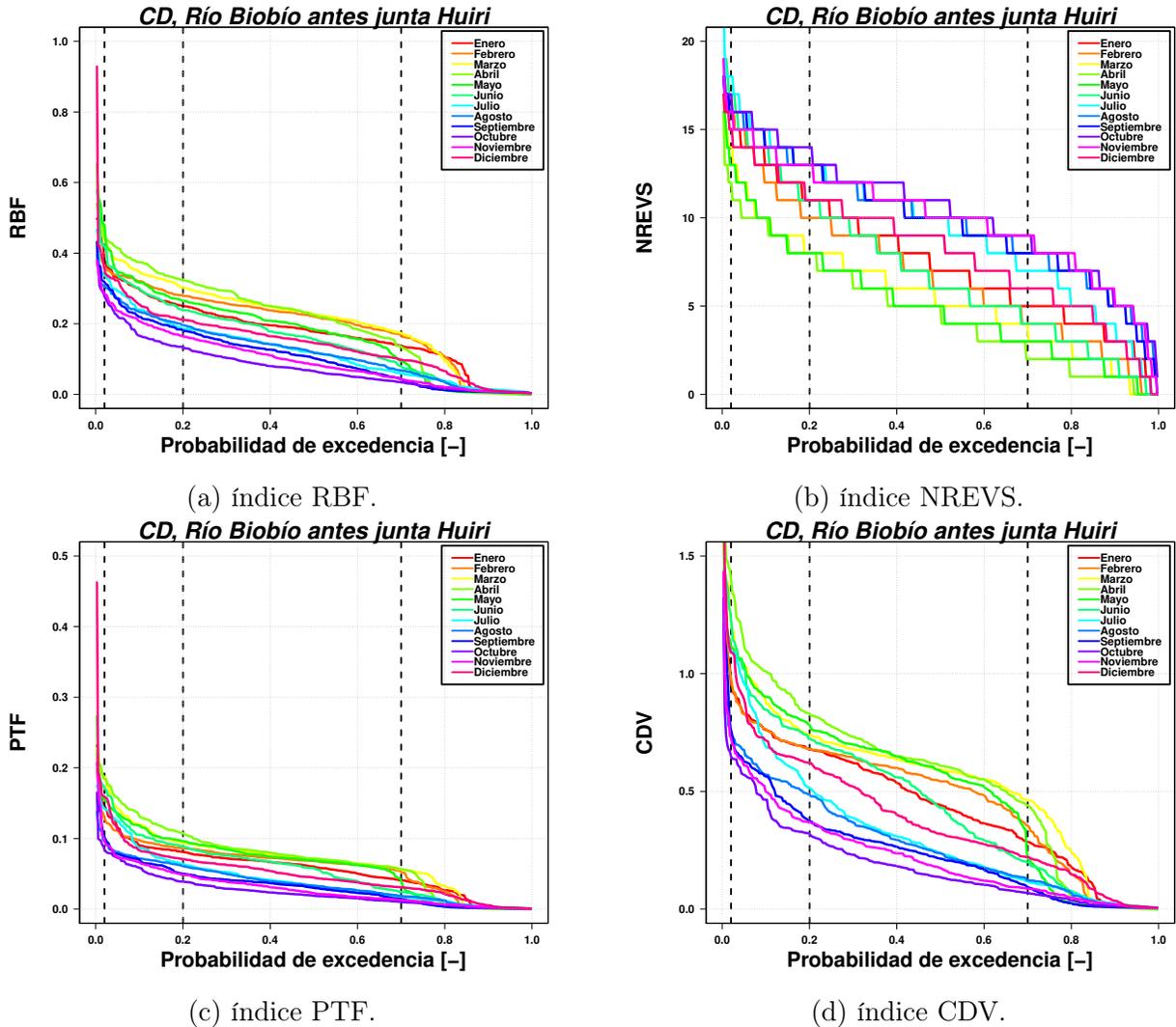
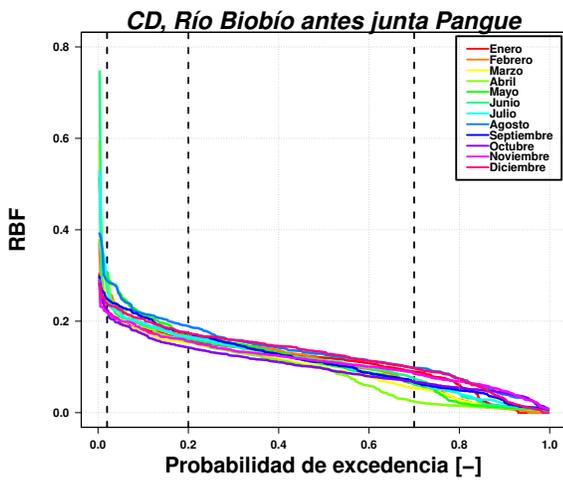
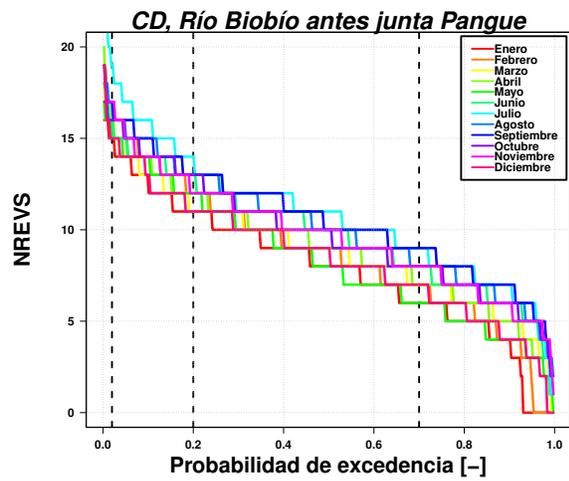


Figura 5.23: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada mes, estación fluviométrica Río Biobío antes junta Huirí Huirí

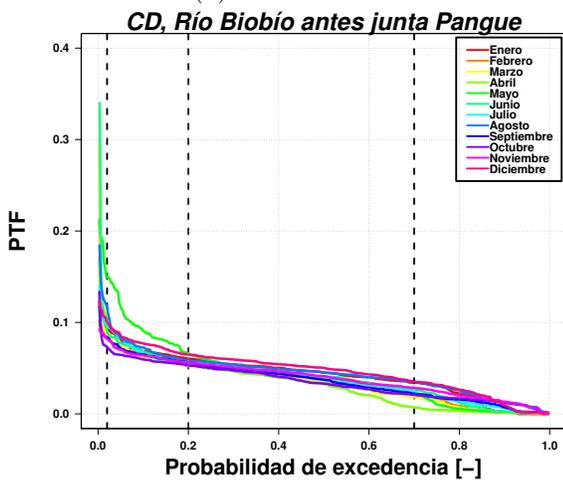
En la figura 5.24d se observa la dispersión mensual de las curvas de duración de los índices de alteración hidrológica horaria determinados a partir de los caudales horarios observados en la estación Río Biobío antes junta Pangue. De la figura se tiene que existe baja variación a nivel mensual del grado de alteración hidrológica horaria producto de la operación de las centrales hidroeléctricas Pangue y Ralco, por lo que no es posible concluir sobre en que meses la estación Río Biobío antes junta Pangue registra la mayor alteración hidrológica.



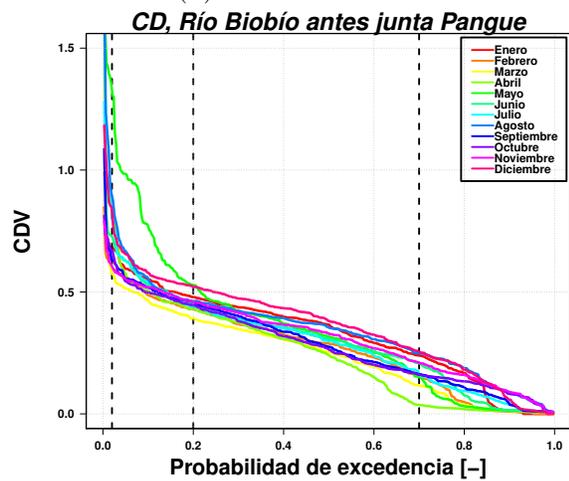
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.



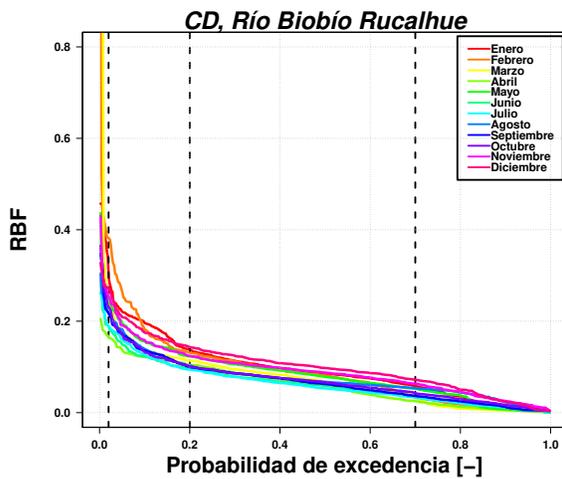
(c) índice PTF.



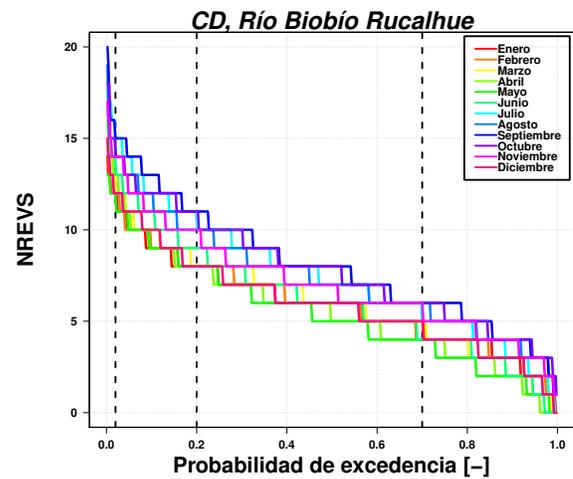
(d) índice CDV.

Figura 5.24: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada mes, estación fluviométrica Río Biobío antes junta Pangué

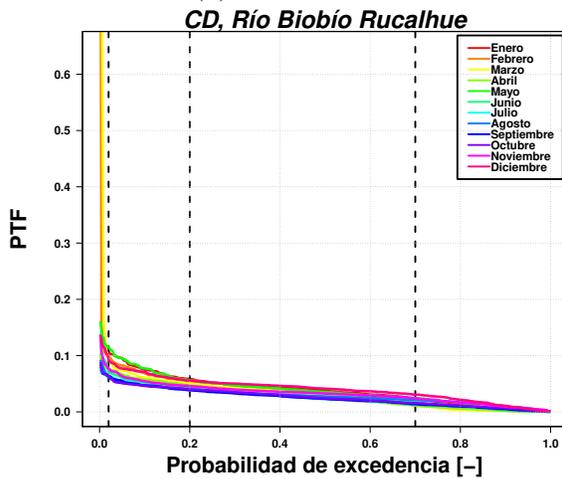
En la figura 5.25, se presenta la variación mensual de las curvas de duración de los índices de alteración hidrológica horaria, los cuales fueron determinados a partir de los caudales horarios registrados en la estación Río Biobío en Rucalhue. Si bien la dispersión entre las curvas es pequeña, se puede observar que los meses de la temporada seca (octubre - marzo) se ubican por sobre la media, presentando un mayor grado de alteración hidrológica horaria, respecto a los meses húmedos (abril - septiembre).



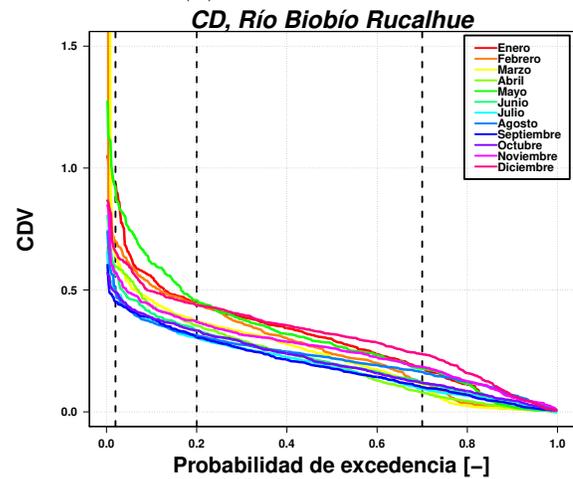
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.



(c) índice PTF.



(d) índice CDV.

Figura 5.25: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada mes, estación fluviométrica Río Biobío en Rucalhue

Finalmente, se agrupan las curvas de duración tanto de las centrales hidroeléctricas como de las estaciones fluviométricas, para tres meses en específico, en los cuales se reflejaran distintos niveles de alteración hidrológica horaria. En la figura 5.26, se presentan para los meses de abril, junio y octubre, las curvas de duración de los índices de alteración asociadas a distintos puntos en el río Biobío. Respecto al grado de alteración respecto al régimen natural, en abril se observa la mayor alteración hidrológica, en particular, se aprecia que la central hidroeléctrica Ralco (curva naranja) produce la mayor diferencia respecto al régimen natural, le sigue la central Pangue en menor medida (curva amarilla). Por otro lado, en junio se aprecia un grado de alteración intermedio, preservando la tendencia de las generadoras que más alteración exhiben respecto al régimen natural. Por último, en octubre se muestran los menores niveles de alteración, lo cual se evidencia en la coincidencia de las curvas de duración de cada central con el régimen natural.

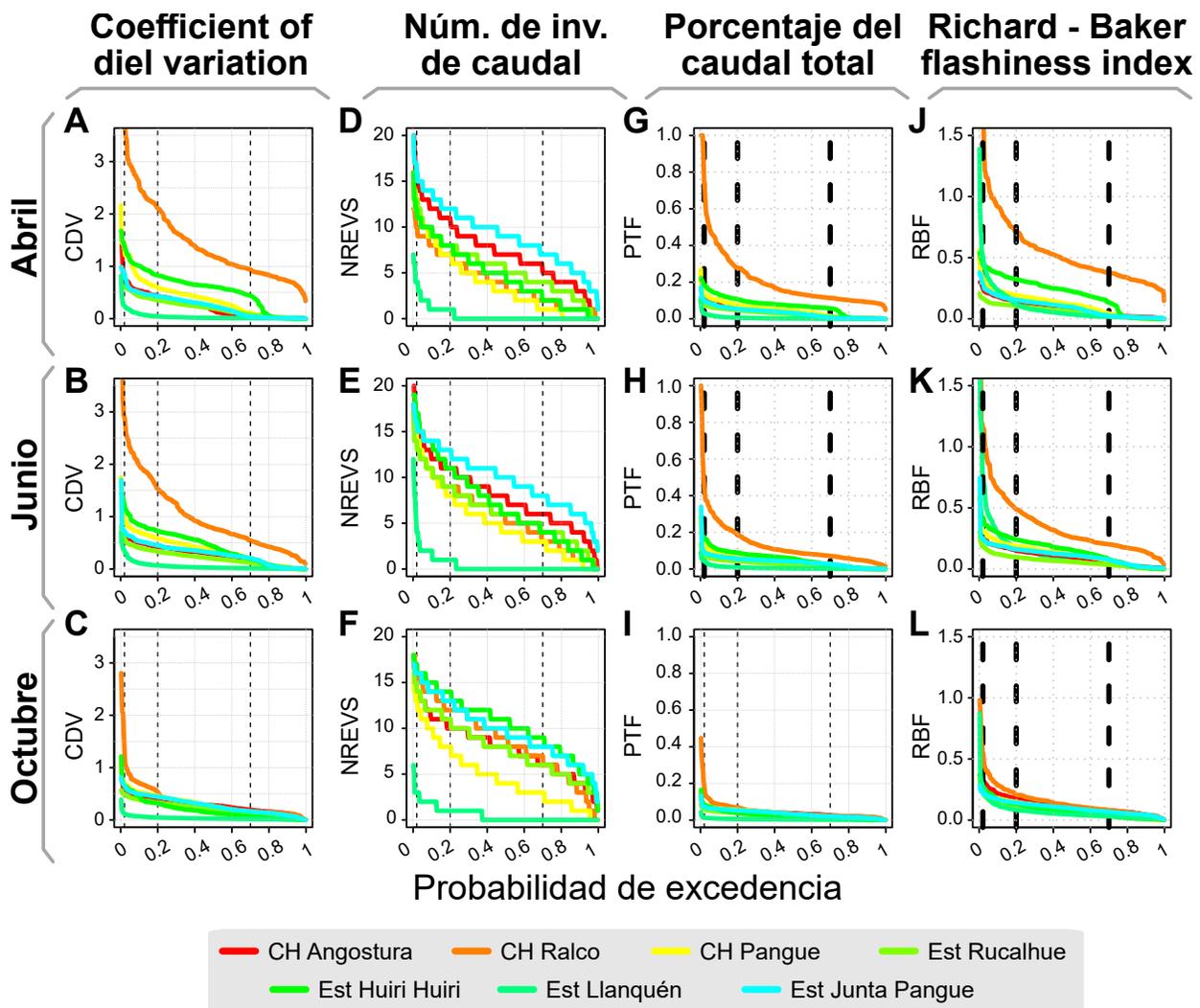


Figura 5.26: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria en distintos puntos, para los meses de abril, junio y octubre.

Capítulo 6

Análisis de Resultados

En el presente capítulo se analizan los resultados presentados en la sección anterior. En primera instancia, se estudian los resultados del análisis preliminar, caracterización de la hidrología y la alteración hidrológica, donde se compara la diferencia en la alteración producto de las tres centrales estudiadas, Ralco, Pangué y Angostura.

Luego, se discuten los resultados asociados a los efectos de la operación en punta de las centrales previamente mencionadas sobre la hidrología de la zona de estudio.

6.1. Alteración hidrológica escala diaria

A partir del análisis del rango de variabilidad de los IHA en los puntos de interés, se evidencian los efectos que posee la operación de las centrales Ralco, Pangué y Angostura sobre el régimen hidrológico y ecosistema en el área de estudio. La central Ralco, ubicada aguas arriba del resto de centrales analizadas, presenta grandes variaciones de los índices de alteración hidrológica respecto al régimen natural (ver Figura: 5.14 A)), en donde destacan el aumento del “ conteo de pulsos bajos ” (ver Figura: 5.11), Tasas de descensos y caudales medios en verano, todos asociados a la categoría alta, es decir en promedio, las magnitudes de estos índices asociados a percentiles mayores al 67 aumentan en comparación a las otras 2 categorías.

Por otro lado, la central Pangué, cuyo inicio de operaciones se remonta al año 1996, exhibe un comportamiento similar a la central Ralco, presentando un alto grado de variaciones de los IHA respecto al régimen natural (ver Figura: 5.14 B)), en donde destacan el aumento del “ conteo de pulsos bajos ” (ver Figura: 5.12), “ conteo de pulsos altos ”, “ Tasa de descensos ” y “ tasa de ascenso ”, todos asociados a la categoría alta.

Por último, la central Angostura presenta una considerable variabilidad de los IHA respecto al régimen impuesto por la operación de las centrales Ralco y Pangué. Dentro de los índices que se muestran un mayor grado de alteración están un aumento de la “ Tasa de descensos ” y “ Duración de pulsos altos ”. También exhibe una disminución en la mayoría de los caudales de verano (diciembre, febrero y marzo) en donde la mayor alteración está asociada a los caudales promedios de categoría alta.

Es importante notar que sumado a la componente antrópica asociada a la operación de las centrales hidroeléctricas, existe un factor climático que afecta principalmente a las precipitaciones y temperaturas en el país, el cual puede alterar el régimen hidrológico en la cuenca. Sin embargo, para desagregar el efecto del cambio climático del análisis, la determinación del grado de alteración hidrológica asociado a la operación de las centrales Ralco y Pangué, fue realizada utilizando registros coincidentes entre el régimen natural e intervenido. Respecto a la central Angostura, no fue posible reconstruir un régimen natural en la estación Río Biobío en Rucalhue por lo tanto se utilizó como periodo previo a la intervención antrópica, los registros considerando la operación de las centrales previas (Pangué y Ralco).

6.2. Alteración hidrológica producto del *hydropeaking*

En primera instancia, a partir de los histogramas de frecuencias de los índices para cada una de las centrales hidroeléctricas, correspondientes al registro completo, se deduce que la central que posee mayores valores en cada uno de los 4 corresponde a la central Ralco. Lo anterior se condice en su mayoría con la información proporcionada por las curvas de duración de cada indicador, en donde la central Ralco es más probable que exceda cierto umbral para los índices RBF, PTF y CDV.

Además, al analizar las curvas de duración de los indicadores por temporadas, se muestran diferencias para cada central. La central Angostura presenta para una misma probabilidad de excedencia, mayores valores de los índices RBF, PTF y CDV en temporada Seca, por su parte las centrales Ralco y Pangué poseen la misma tendencia que es contraria a la central Angostura, es decir, exhiben mayores valores de los indicadores en temporada Húmeda (ver Figura: 5.16), lo cual puede estar relacionado a su distribución espacial y por ende a una diferencia de régimen hidrológico.

Al refinar el análisis, agrupando las curvas de duración de cada índice según mes para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica seleccionada se evidencia como evoluciona la alteración hidrológica a lo largo del año de forma distinta para cada punto analizado. Por su parte en la parte alta de la cuenca, la estación Río Biobío en Llanquén que refleja la variación intradiaria natural en la zona, evidencia una mayor alteración en los meses de húmedos, lo cual puede estar asociado a tormentas, las cuales generan variaciones del hidrograma natural. Las centrales hidroeléctricas Ralco y Pangué preservan la tendencia encontrada previamente al analizar por temporadas, es decir, un alza de los niveles de alteración hidrológica horaria en los meses húmedos (Abril-Julio). Teniendo en cuenta lo anterior, la figura 5.26 evidencia la magnitud del grado de alteración hidrológica que existe respecto al régimen natural en algunos meses producto de la operación de las generadoras estudiadas. La central Ralco por lejos corresponde a la central que más alteración produce y en los meses de abril - junio sus niveles de alteración son críticos, al ubicar las curvas de duración de cada índice siempre sobre las correspondientes al régimen natural, lo cual refleja que para cierto umbral establecido para alguno de los índices, considerando la variabilidad intradiaria natural, es más probable que los valores del mismo índice determinado para la central Ralco, excedan dicho umbral. Al contrario, en los meses secos, se aprecia que las curvas de duración de los indicadores son muy similares para los distintos puntos estudiados, lo cual refleja que en dichos meses no se generan grandes alteraciones hidrológicas intradiarias producto de la operación de las centrales. Lo anterior, refleja que en los meses secos es más factible la operación en punta o mantener los

niveles de operación actuales.

Por último, las curvas de duración de las estaciones fluviométricas, evidencian en cierta manera la operación de las centrales en sus registros. La estación Río Biobío antes junta Huiriqui que corresponde a la estación ubicada aguas abajo de la central Ralco, posee los mayores valores de los índices RBF, PTF y CDV, para una cierta probabilidad de excedencia ($<50\%$), respecto a las otras estaciones fluviométricas. La estación Río Biobío en Llanquén presenta los menores valores de todos los índices calculados para cierta probabilidad de excedencia, esto se condice con la teoría, ya que, dicha estación no posee intervención antrópica, por lo tanto la variación intradiaria de un régimen natural es muy baja. Es importante notar que el régimen natural solo se tiene en un punto de la cuenca, en el presente diagnóstico, se está considerando que este es extrapolable a los diferentes puntos en donde se emplazan las centrales para así realizar la comparación entre los niveles de alteración, lo cual produce un sesgo, no tan importante debido a que en términos de frecuencia, el hidrograma natural es bastante plano.

Capítulo 7

Conclusiones

En el presente trabajo de título se cuantifica la alteración hidrológica a escala diaria e intradiaria en la parte alta de la cuenca del río Biobío, producto de la operación de las centrales hidroeléctricas Ralco, Pangué y Angostura. Esto a través de los índices de alteración hidrológica, IHA, de las series de caudales naturalizados y medidos por estaciones fluviométricas cercanas a los puntos de interés, siguiendo el método de análisis de rango de variabilidad, RVA. Adicionalmente, se analiza el impacto que genera la operación en punta (*hydropeaking*) de las centrales sobre la fauna íctica, adoptando las métricas utilizadas por Zimmerman et al. [2010], que evalúan los efectos de las fluctuaciones intradiarias de caudal.

Con respecto a los efectos sobre el régimen hidrológico, se concluye que la operación de las centrales Ralco y Pangué alteró de forma importante el régimen natural de caudales en la parte alta del río Biobío en el periodo 2004 - 2020. Los resultados presentados en las figuras 5.14 A) y B) corroboran lo anterior, exhibiendo importantes variaciones de los IHA para el régimen natural e intervenido, lo cual provoca cambios en el régimen hidrológico de la zona (ver Figuras: 3.12, 3.13, 3.14, 3.15). Adicionalmente, en la estación fluviométrica Río Biobío en Rucalhue, la cual se ubica aguas abajo de las centrales estudiadas, presenta cambios inmediatos luego de la entrada en operación de cada central hidroeléctrica (ver Figura: 5.6).

Por otro lado, la operación en punta de las centrales genera una importante alteración respecto a las fluctuaciones intradiarias del régimen natural. La central que produce mayor grado de alteración sobre el ecosistema corresponde a la central Ralco, cuyos efectos se ven acentuados en temporada húmeda (abril - septiembre), lo cual puede relacionarse con la disponibilidad hídrica en la parte alta de la cuenca, la cual posee una fuerte influencia nivoglaciar, por lo tanto existe una mayor oferta en temporada seca (octubre - marzo). La central Pangué posee la misma tendencia que Ralco, pero la magnitud de la alteración producto de su operación en punta es bastante menor y comparable con la central Angostura, la cual corresponde a la central cuya operación provoca el menor grado de alteración en la zona, y al contrario de las otras dos centrales, sus efectos se acentúan en temporada seca.

En relación a la información medida por las estaciones fluviométricas ubicadas aguas abajo de los punto de restitución de las centrales analizadas, se preserva la tendencia de los caudales turbinados por cada una de las centrales. La estación que presenta una mayor grado

de alteración hidrológica producto del *hydropeaking* corresponde a Río Biobío antes Junta Hui Hui, la cual se ubica aguas abajo de la central Ralco, la cual coincide con la central que exhibe mayores fluctuaciones intradiarias. Además, esta tendencia se ve acrecentada en los periodos húmedos al igual que la estación Río Biobío antes Junta Pangué, pero en menor magnitud, por ello se puede afirmar que la central Pangué actúa como contraembalse de Ralco, amortiguando de alguna manera las fluctuaciones producidas por la central Ralco. Por otro lado, los registros de las fluctuaciones intradiarias en la estación Río Biobío en Rucalhue coinciden con la operación de la central Angostura, los cuales se ven acrecentados en temporada seca. Por último, la estación Río Biobío en Llanquén exhibe las fluctuaciones intradiarias del régimen natural en la cuenca, por lo tanto, se concluye que todas las centrales provocan un alto grado de alteración hidrológica producto de su operación en punta, la cual debe ser manejada en y lo posible reducirla para lograr reproducir las variaciones intradiarias del régimen natural.

Del análisis de las curvas de duración de los índices para cada mes se concluye que en los meses de abril - julio la operación en punta de la central hidroeléctrica Ralco (y Pangué en menor magnitud) es sumamente perjudicial para la cuenca dado que exhibe magnitudes de los índices que exceden en al menos 3 veces los asociados al régimen natural. Es por ello que, se recomienda evitar en lo posible operar en punta en los meses húmedos, para el caso de las generadoras Ralco y Pangué ya que esto genera una mayor alteración hidrológica. Para el caso de los meses secos, no se deberían imponer restricciones en caso de mantener los niveles actuales de operación, ya que estos se asemejan bastante al régimen natural.

7.1. Trabajo futuro y Recomendaciones

El presente estudio corresponde a un diagnóstico del conflicto entre hidroelectricidad y la conservación del ecosistema fluvial en la zona y por lo mismo, presenta una serie de limitaciones. En primera instancia, se debe tener en cuenta que para el análisis de alteración hidrológica asociado a la operación de la central Angostura, no se utilizaron periodos coincidentes y por lo mismo, existen distintos factores que distorsionan el resultado, como el cambio climático y la operación de las centrales hidroeléctricas existentes Ralco y Pangué. Sumado a lo anterior, un punto de desarrollo que aumentaría la certeza de los resultados sería la elaboración de una metodología más rigurosa en cuanto a la naturalización de las series de caudales en las estaciones fluviométricas.

Por otro lado, para concluir a cerca del estado actual del ecosistema fluvial y en particular de la fauna íctica es necesario mejorar la calidad de los registros de peces, dado que los analizados en el presente trabajo de título no fueron suficientes para elaborar hipótesis sobre el estado actual de la fauna íctica. Para manejar lo anterior, se propone elaborar un plan de muestreos exhaustivos en la zona de interés, de tal manera de poder identificar patrones de comportamiento de los peces, para posteriormente ligarlos a algún atributo del régimen hidrológico.

Finalmente, es importante notar que el régimen natural horario está siendo considerado uniforme a lo largo de los puntos de interés, si bien las variaciones intradiarias del régimen natural en términos de frecuencia son bajas, sería interesante aplicar alguna metodología de extrapolar los registros horarios de la estación Río Biobío en Llanquén a los puntos en donde

se emplazan las centrales hidroeléctricas.

Bibliografía

David B. Baker, R. Peter Richards, Timothy T. Loftus, and Jack W. Kramer. A new flashiness index: Characteristics and applications to Midwestern rivers and streams. *Journal of the American Water Resources Association*, 40(2):503–522, 2004. ISSN 1093474X. 10.1111/j.1752-1688.2004.tb01046.x. URL <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01046.x>.

Dirección General de Aguas. Cuenca del río Bio Bio. page 179, 2004.

Anaysa Elgueta, Martin C. Thoms, Konrad Górski, Gustavo Díaz, and Evelyn M. Habit. Functional process zones and their fish communities in temperate Andean river networks. *River Research and Applications*, 35(10):1702–1711, 2019. ISSN 15351467. 10.1002/rra.3557. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rra.3557>.

Mauricio Fernández. *Estudio del grado de alteración hidrológica intradiaria por operaciones de las centrales hidroeléctricas de embalses Ralco y Pangue del Sistema Interconectado Central (Subdaily hydrologic alteration due to hydropower reservoirs Ralco and Pangue of Chile's)*. PhD thesis, Universidad de Chile, 2012. URL <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/111255>.

Alex García, Klaus Jorde, Evelyn Habit, Diego Caamaño, and Oscar Parra. Downstream environmental effects of dam operations: Changes in habitat quality for native fish species. *River Research and Applications*, 27(3):312–327, 2011. ISSN 15351459. 10.1002/rra.1358. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/rra.1358>.

Alex García, Alpine Convention, A.G Fallis, Jannik Haas, Marcelo A. Olivares, Rodrigo Palma-Behnke, Rapport D E Synthese, Destine A La, Rui Manuel Vitor Cortes, Maria Teresa Ferreira, Simone Varandas Oliveira, Daniel Oliveira, Marcelo A. Olivares, Jannik Haas, Rodrigo Palma-Behnke, Carlos Benavides, and Extended Abstract. *Respuesta de peces nativos a fluctuaciones de caudal producidas por la operación de centrales hidroeléctricas en el río Biobío*. PhD thesis, Universidad de Concepción, 2015. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.02.017>.

Evelyn Habit, Mark C. Belk, R. Cary Tuckfield, and Oscar Parra. Response of the fish community to human-induced changes in the Biobío River in Chile. *Freshwater Biology*, 51(1):1–11, 2006. ISSN 00465070. 10.1111/j.1365-2427.2005.01461.x. URL <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2427.2005.01461.x>.

Evelyn Habit, Mark C. Belk, and Oscar Parra. Response of the riverine fish community to

- the construction and operation of a diversion hydropower plant in central Chile. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 17(1):37–49, 2007. ISSN 10527613. 10.1002/aqc.774. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/aqc.774>.
- Evelyn Habit, Alex García, Gustavo Díaz, Pedro Arriagada, Oscar Link, Oscar Parra, and Martin Thoms. River science and management issues in Chile: Hydropower development and native fish communities. *River Research and Applications*, 35(5):489–499, 2019. ISSN 15351467. 10.1002/rra.3374. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/rra.3374>.
- Henriette I. Jager and Brennan T. Smith. Sustainable reservoir operation: Can we generate hydropower and preserve ecosystem values? *River Research and Applications*, 24(3):340–352, 2008. ISSN 15351459. 10.1002/rra.1069. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/rra.1069>.
- IG Jowett. Instream flow methods: a comparison of approaches. *Regulated Rivers: Research & Management: An International Journal Devoted to River Research and Management*, 13(2):115–127, 1997.
- Ruth Mathews and Brian D Richter. Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 43(6):1400–1413, 2007.
- Marcelo A. Olivares, Jannik Haas, Rodrigo Palma-Behnke, and Carlos Benavides. A framework to identify Pareto-efficient subdaily environmental flow constraints on hydropower reservoirs using a grid-wide power dispatch model. *Water Resources Research*, 51(5):3664–3680, 2015. ISSN 19447973. 10.1002/2014WR016215. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/2014WR016215>.
- Maurice Pardé. Fleuves et rivières. *Collection Armand Colin. Section de Géographie (France) fre no. 155*, 1933.
- Brian Richter, Jeffrey Baumgartner, Robert Wigington, and David Braun. How much water does a river need? *Freshwater biology*, 37(1):231–249, 1997.
- Brian D Richter, Jeffrey V Baumgartner, Jennifer Powell, and David P Braun. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation biology*, 10(4):1163–1174, 1996.
- Carolina Villagrán and Felipe Hinojosa. History of the forests of southern South America, II: phytogeographical analysis. *Revista Chilena de Historia Natural*, 70:241–267, 1997.
- Mariela A. Yevenes, Ricardo Figueroa, and Oscar Parra. Seasonal drought effects on the water quality of the Biobío River, Central Chile. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(14):13844–13856, 2018. ISSN 16147499. 10.1007/s11356-018-1415-6. URL <http://link.springer.com/10.1007/s11356-018-1415-6>.
- Julie K.H. Zimmerman, Benjamin H. Letcher, Keith H. Nislow, Kimberly A. Lutz, and Francis J. Magilligan. Determining the effects of dams on subdaily variation in river flows at a whole-basin scale. *River Research and Applications*, 26(10):1246–1260, 2010. ISSN

15351459. 10.1002/rra.1324. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/rra.1324>.

Apéndice A

Anexos

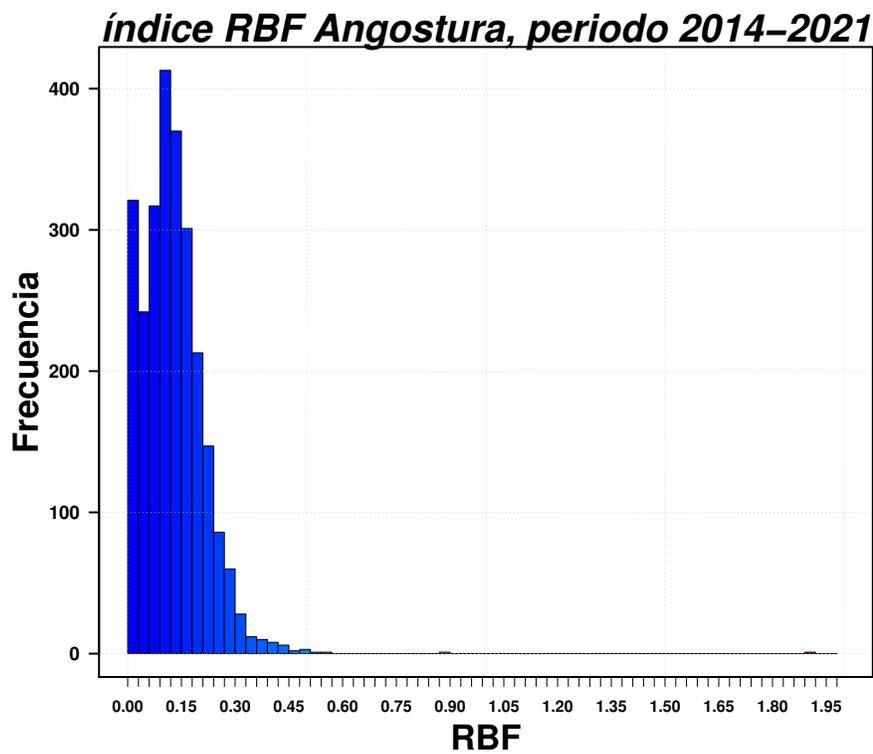


Figura A.1: histograma de frecuencias absolutas para indicador RBF de la central Angostura, considerando periodo completo.

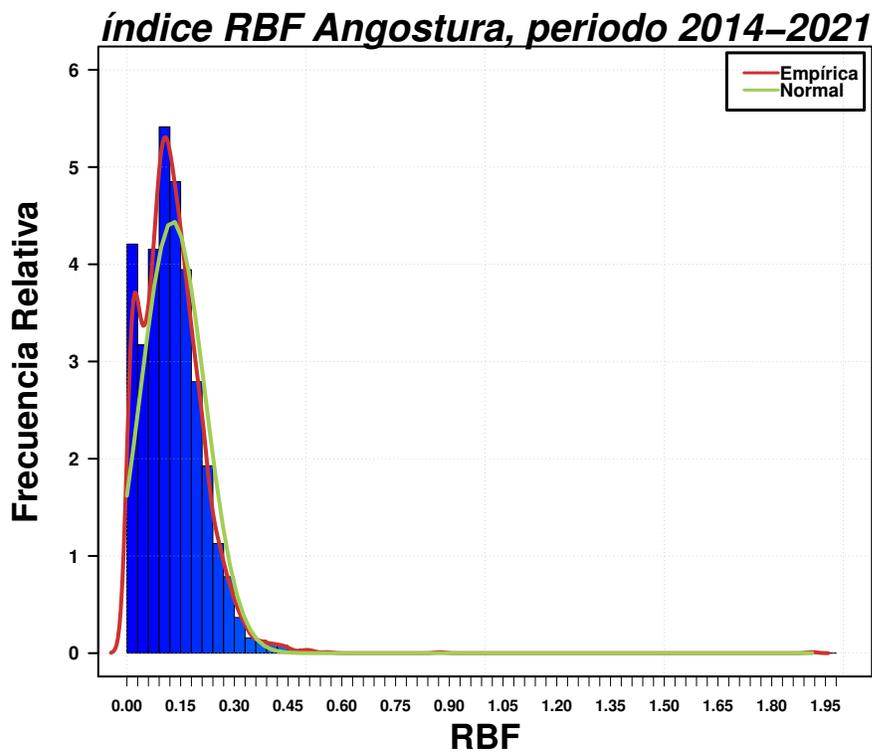


Figura A.2: histograma de frecuencias relativas para indicador RBF de la central Angostura, considerando periodo completo.

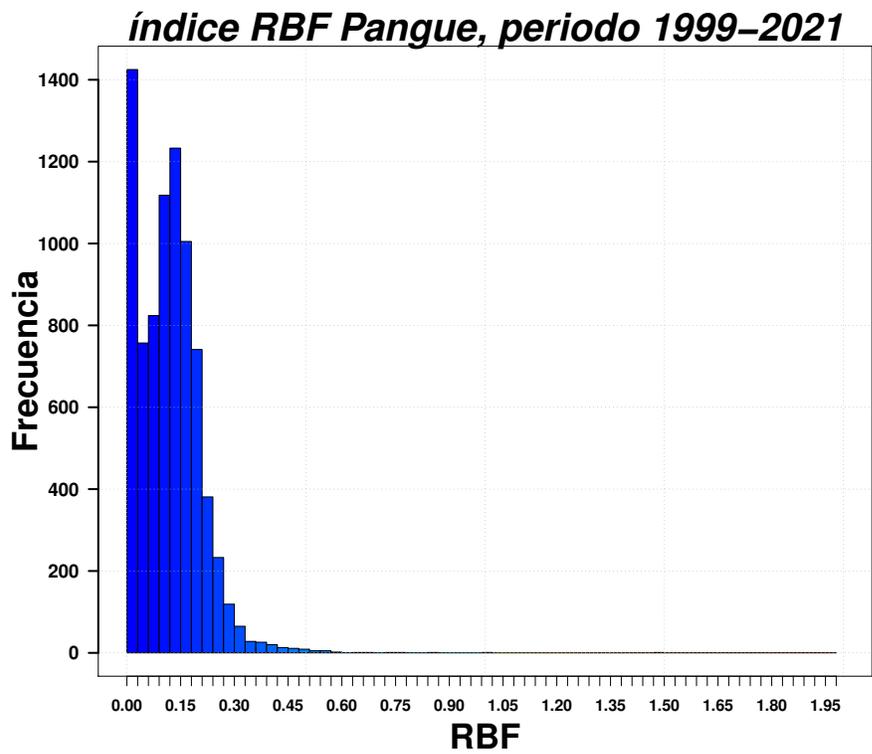


Figura A.3: histograma de frecuencias absolutas para indicador RBF de la central Pangué, considerando periodo completo.

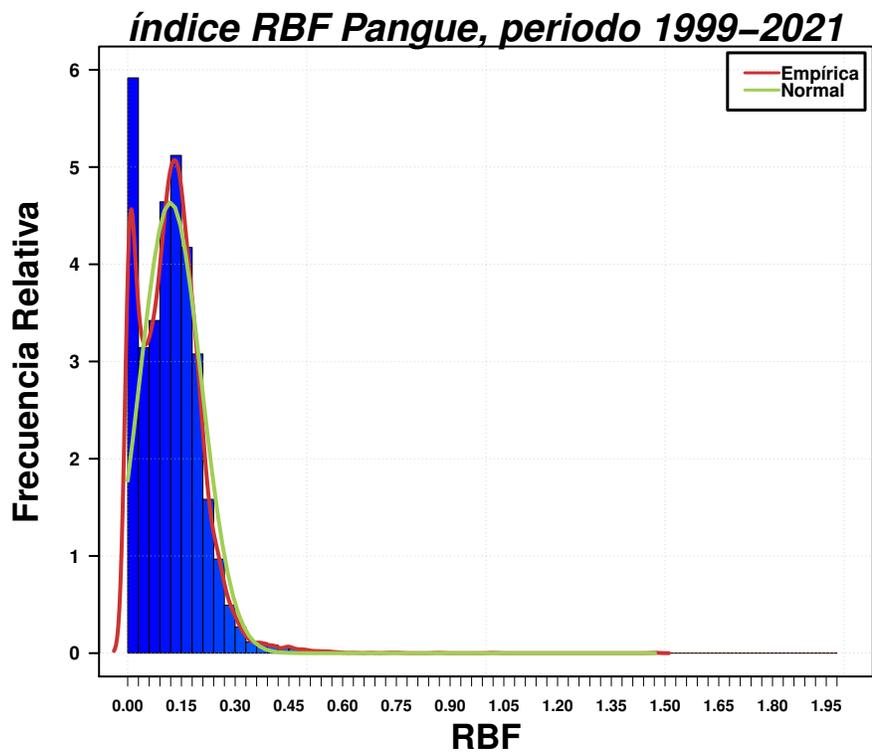


Figura A.4: histograma de frecuencias relativas para indicador RBF de la central Pangué, considerando periodo completo.

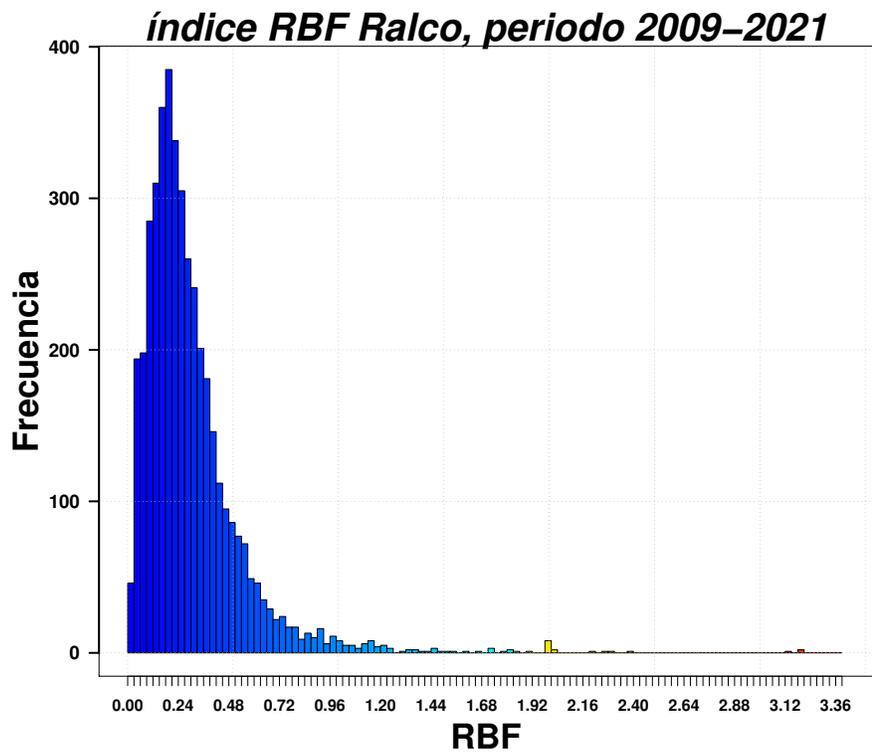


Figura A.5: histograma de frecuencias absolutas para indicador RBF de la central Ralco, considerando periodo completo.

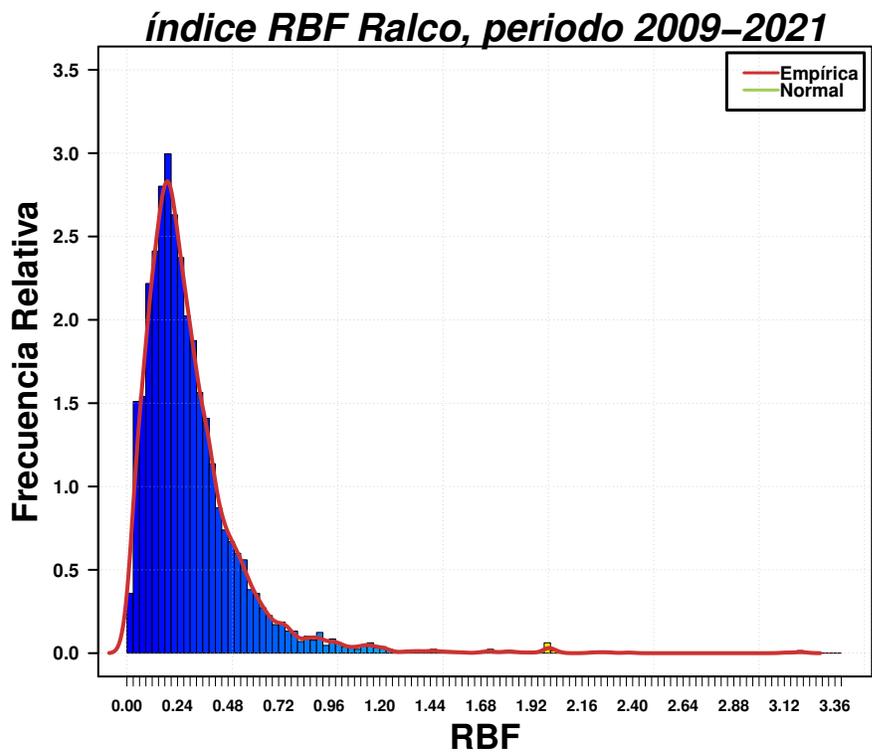


Figura A.6: histograma de frecuencias relativas para indicador RBF de la central Ralco, considerando periodo completo.

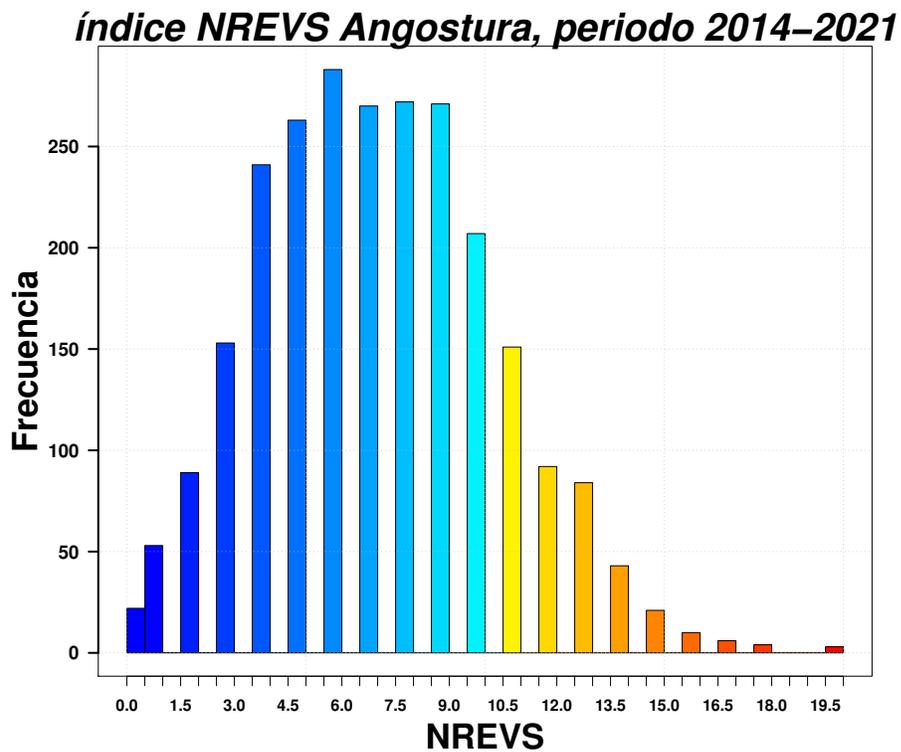


Figura A.7: histograma de frecuencias absolutas para indicador NREVS de la central Angostura, considerando periodo completo.

índice NREVS Angostura, periodo 2014–2021

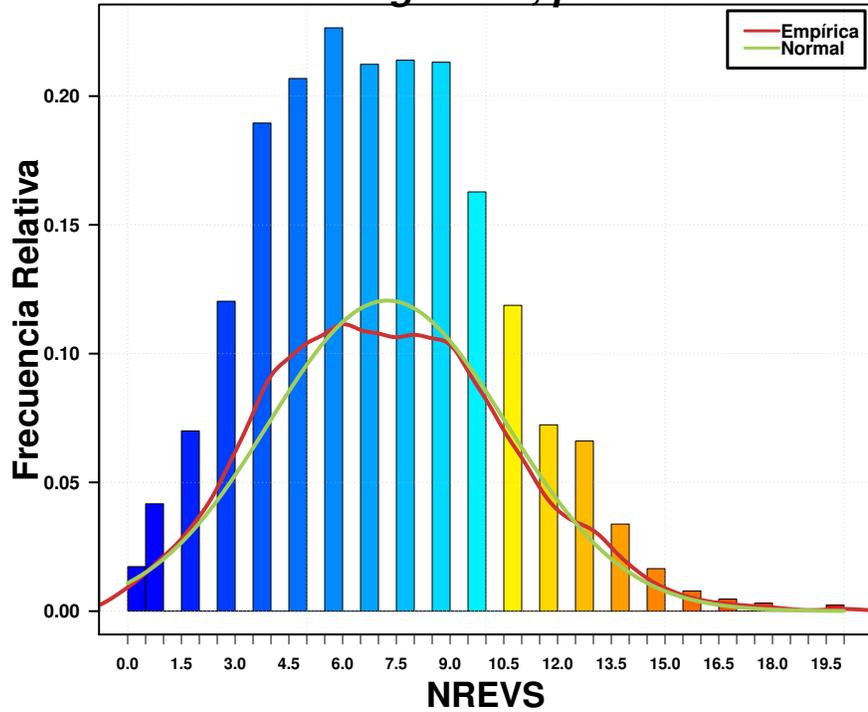


Figura A.8: histograma de frecuencias relativas para indicador NREVS de la central Angostura, considerando periodo completo.

índice NREVS Pangué, periodo 1999–2021

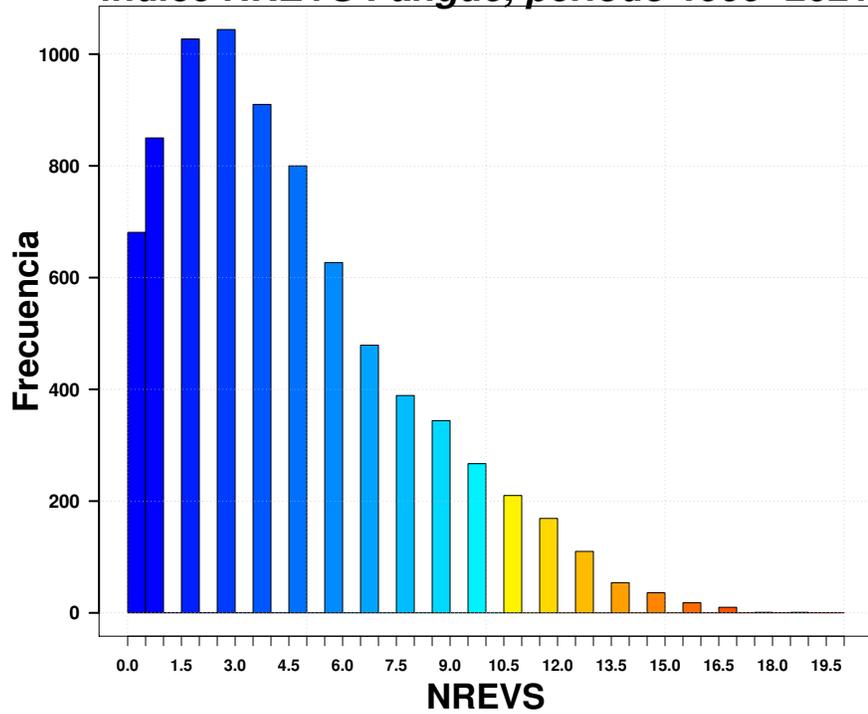


Figura A.9: histograma de frecuencias absolutas para indicador NREVS de la central Pangué, considerando periodo completo.

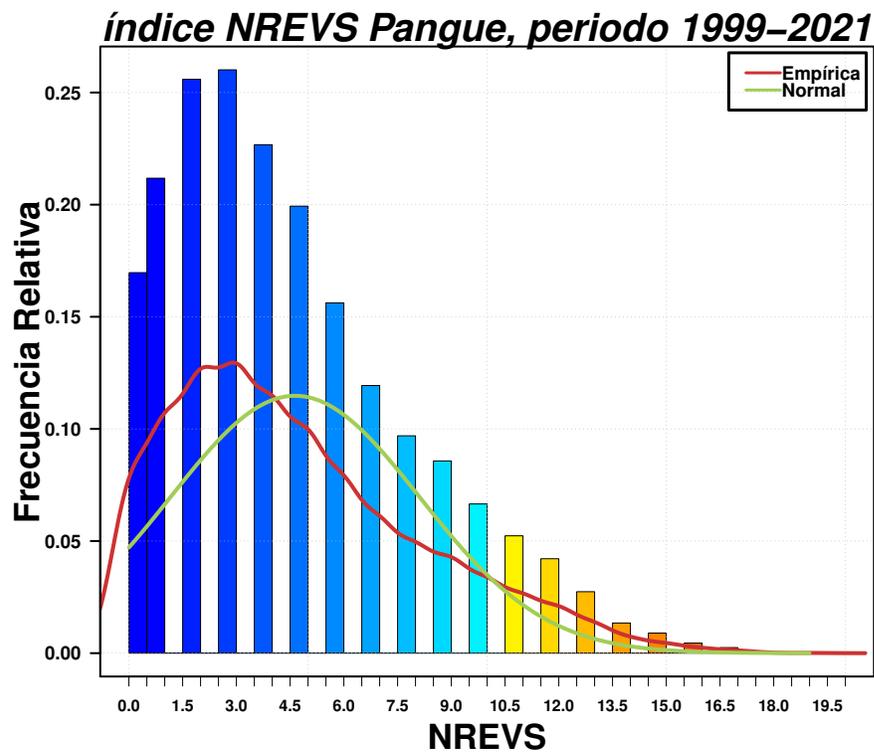


Figura A.10: histograma de frecuencias relativas para indicador NREVS de la central Pangué, considerando periodo completo.

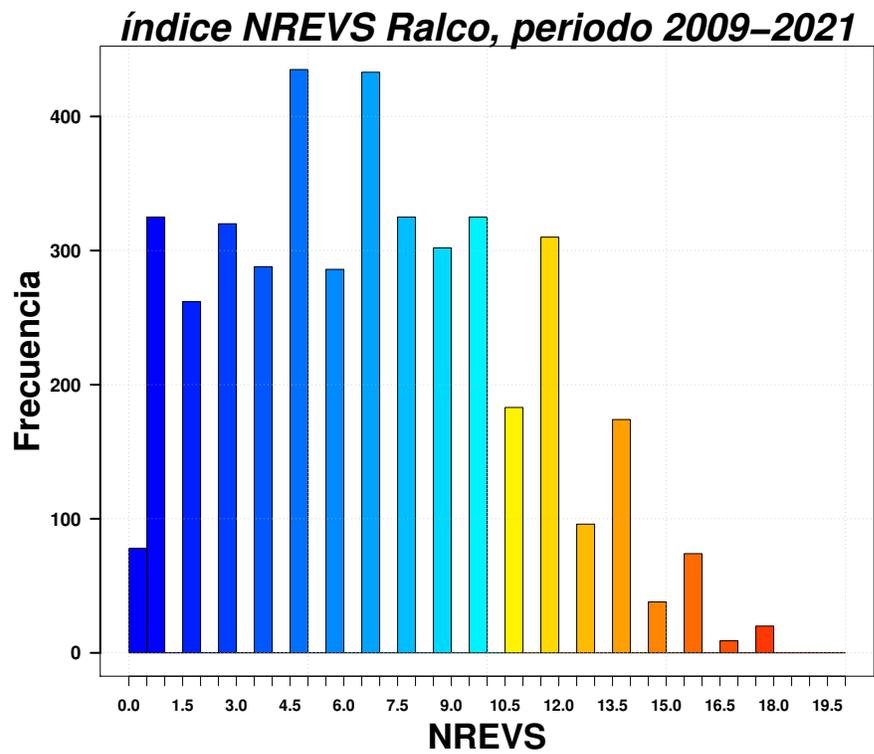


Figura A.11: histograma de frecuencias absolutas para indicador NREVS de la central Ralco, considerando periodo completo.

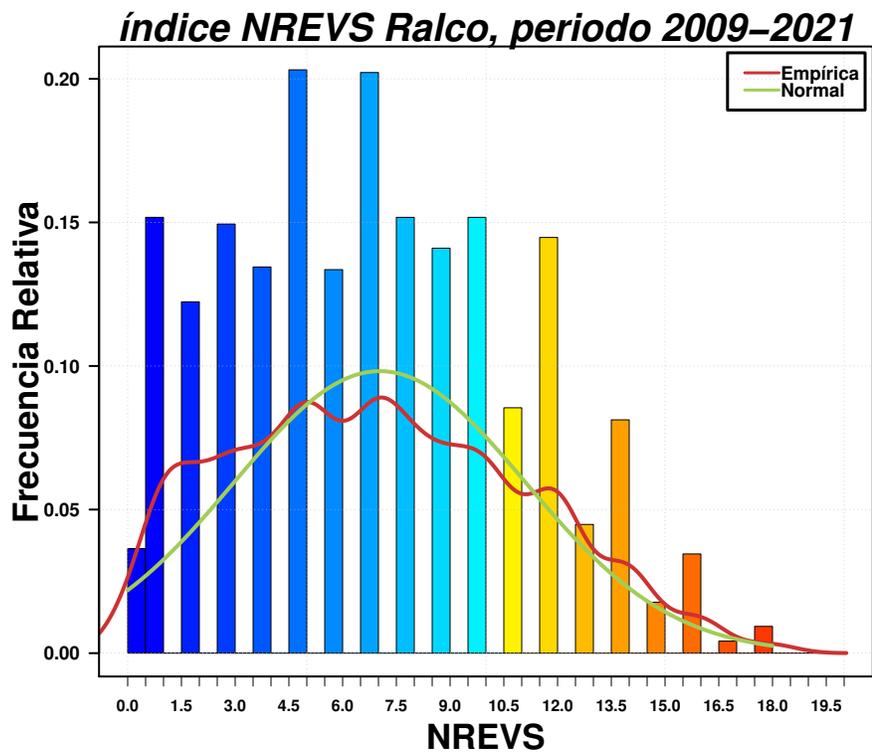


Figura A.12: histograma de frecuencias relativas para indicador NREVS de la central Ralco, considerando periodo completo.

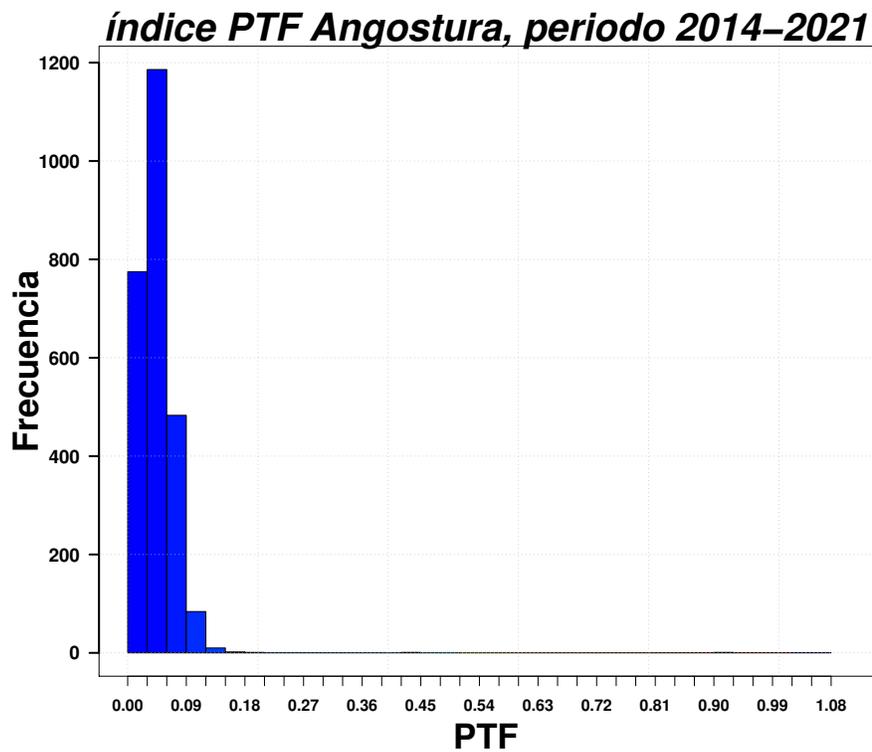


Figura A.13: histograma de frecuencias absolutas para indicador PTF de la central Angostura, considerando periodo completo.

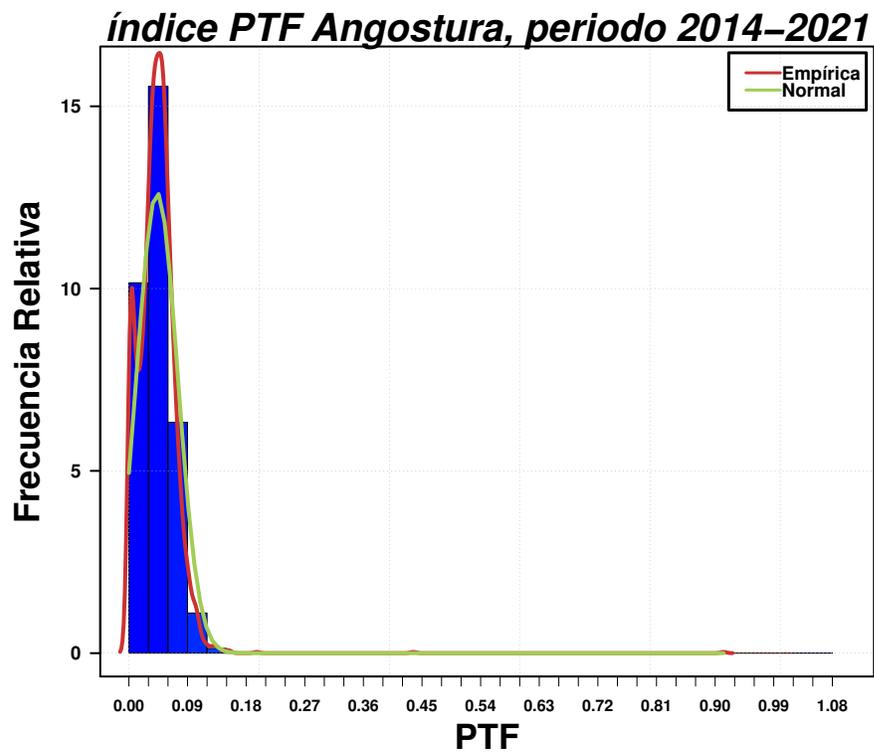


Figura A.14: histograma de frecuencias relativas para indicador PTF de la central Angostura, considerando periodo completo.

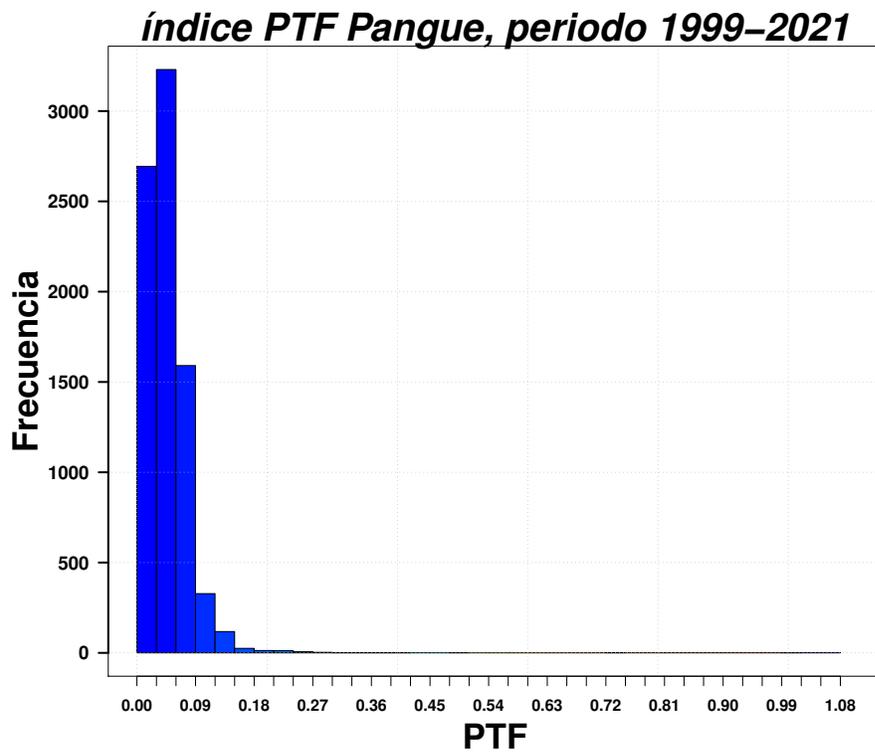


Figura A.15: histograma de frecuencias absolutas para indicador PTF de la central Pangué, considerando periodo completo.

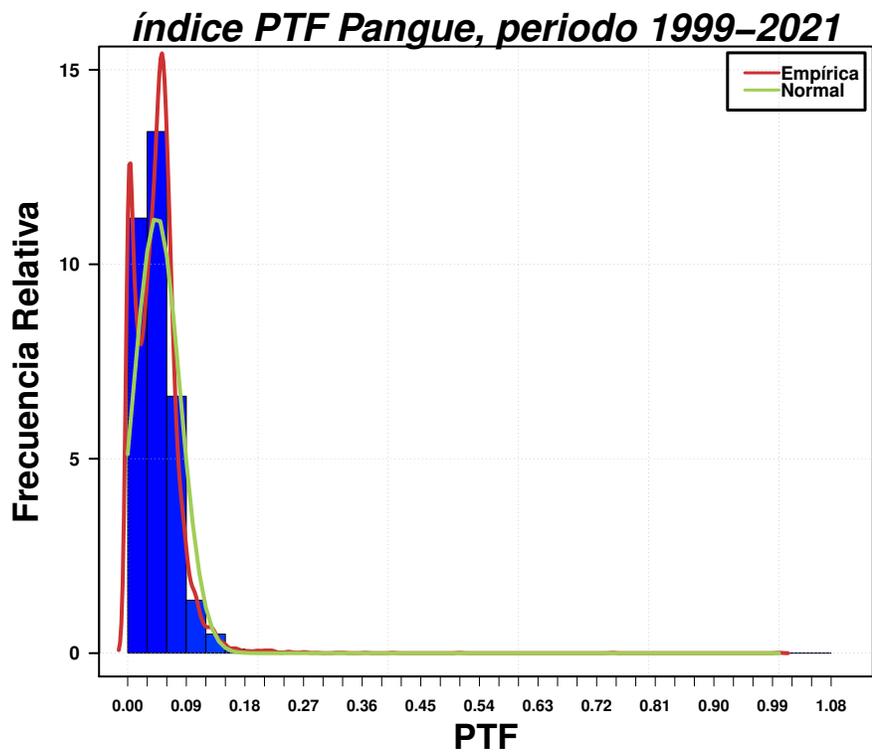


Figura A.16: histograma de frecuencias relativas para indicador PTF de la central Pangué, considerando periodo completo.

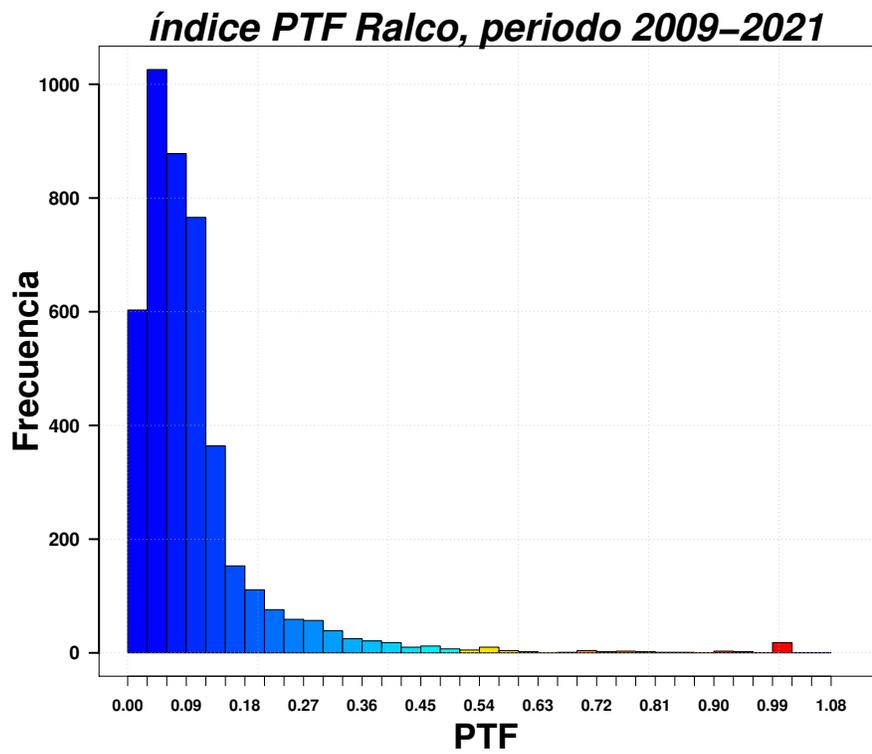


Figura A.17: histograma de frecuencias absolutas para indicador PTF de la central Ralco, considerando periodo completo.

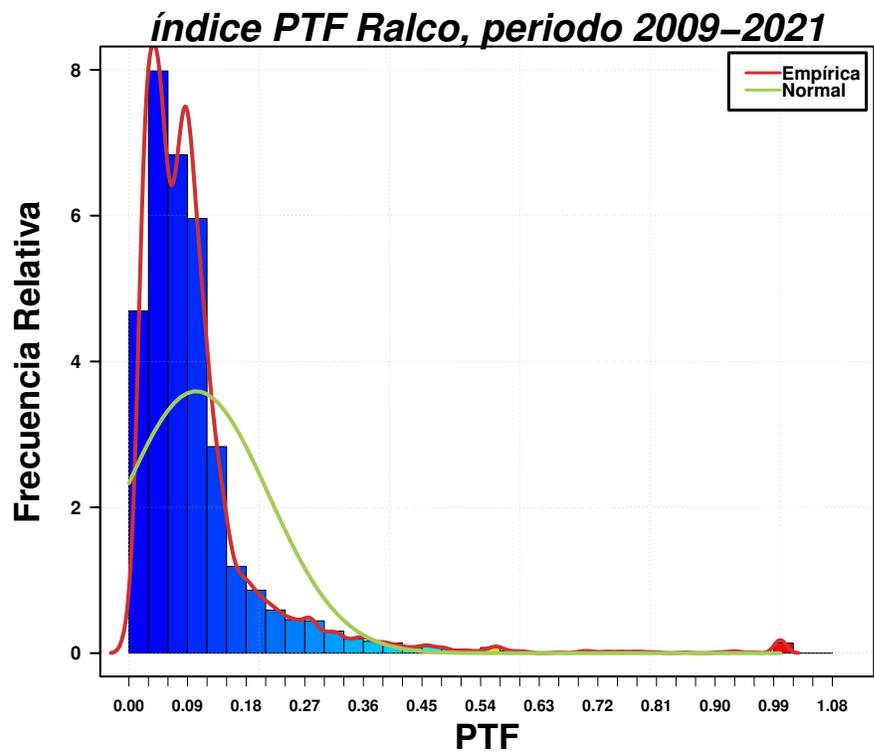


Figura A.18: histograma de frecuencias relativas para indicador PTF de la central Ralco, considerando periodo completo.

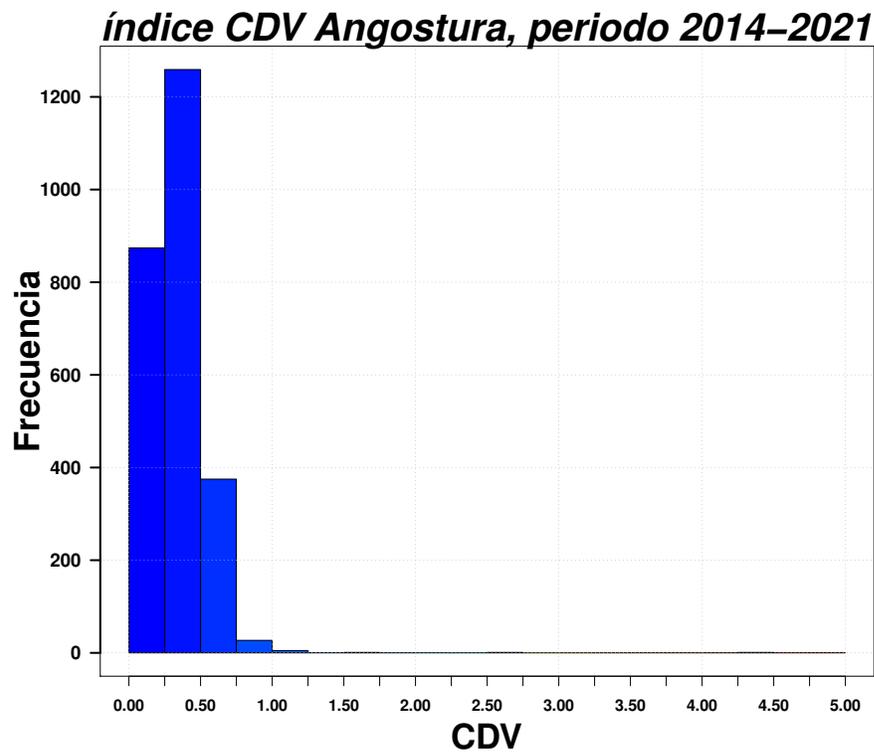


Figura A.19: histograma de frecuencias absolutas para indicador CDV de la central Angostura, considerando periodo completo.

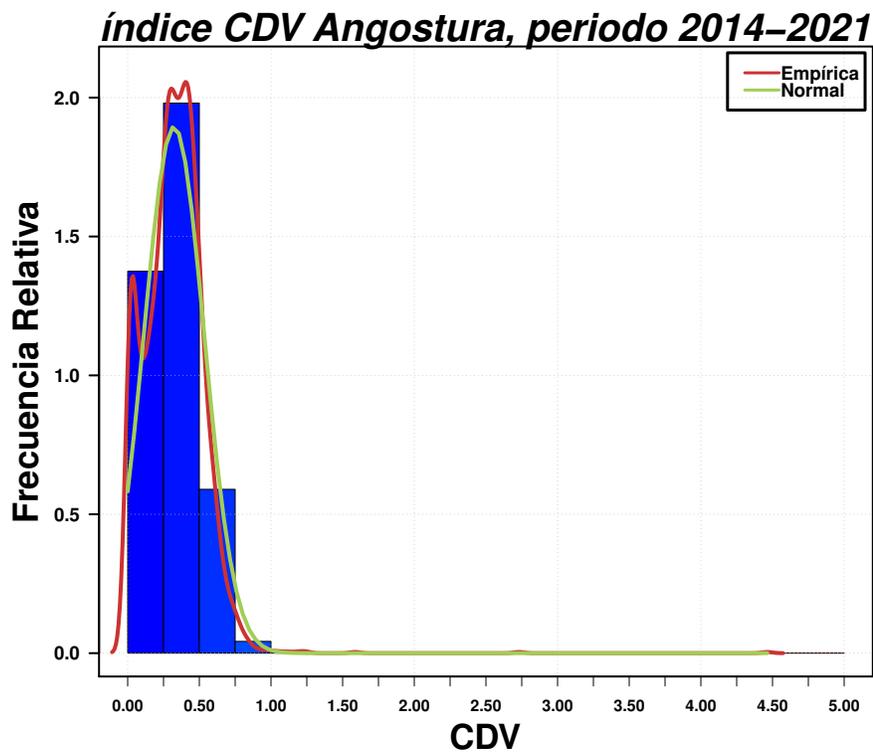


Figura A.20: histograma de frecuencias relativas para indicador CDV de la central Angostura, considerando periodo completo.

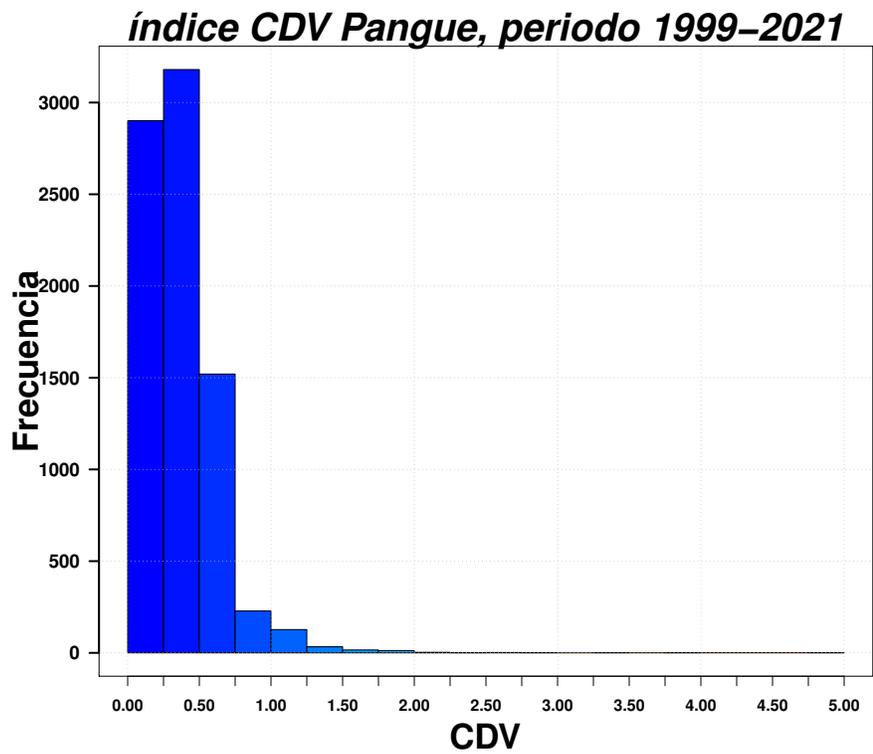


Figura A.21: histograma de frecuencias absolutas para indicador CDV de la central Pangué, considerando periodo completo.

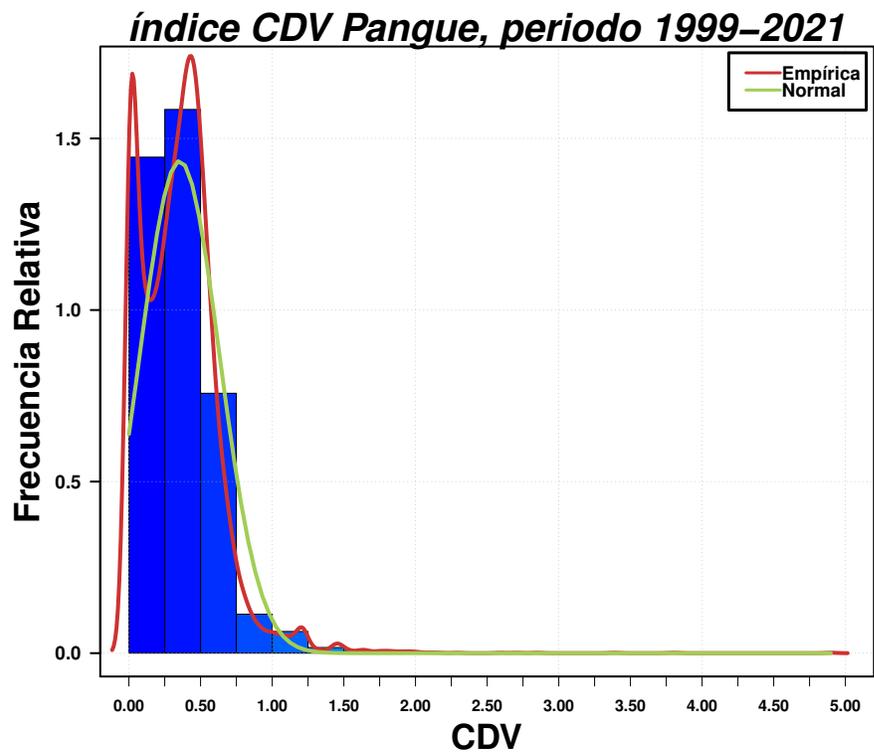


Figura A.22: histograma de frecuencias relativas para indicador CDV de la central Pangué, considerando periodo completo.

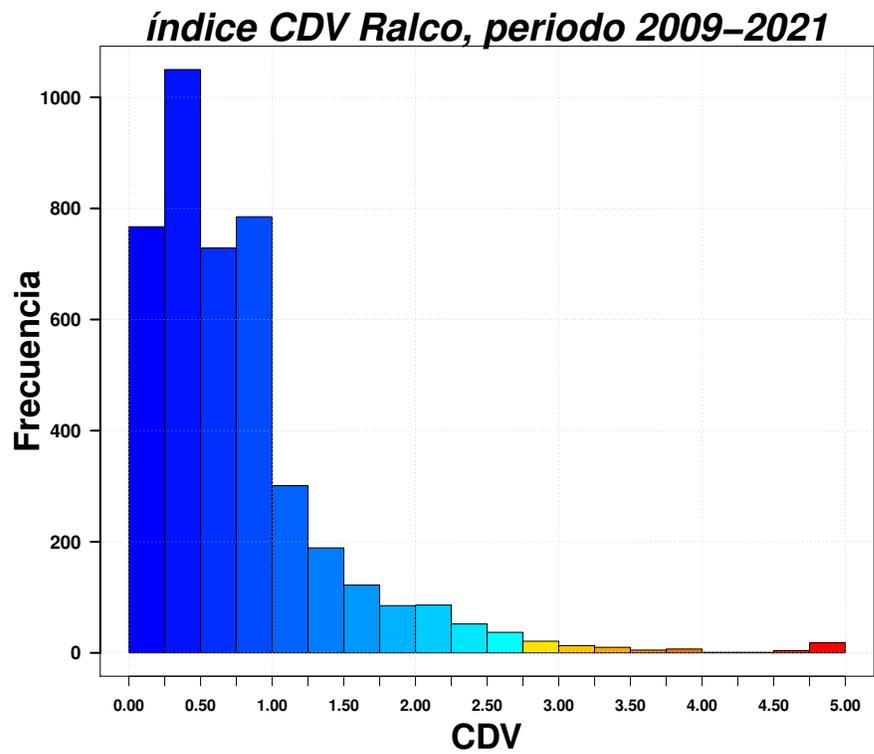


Figura A.23: histograma de frecuencias absolutas para indicador CDV de la central Ralco, considerando periodo completo.

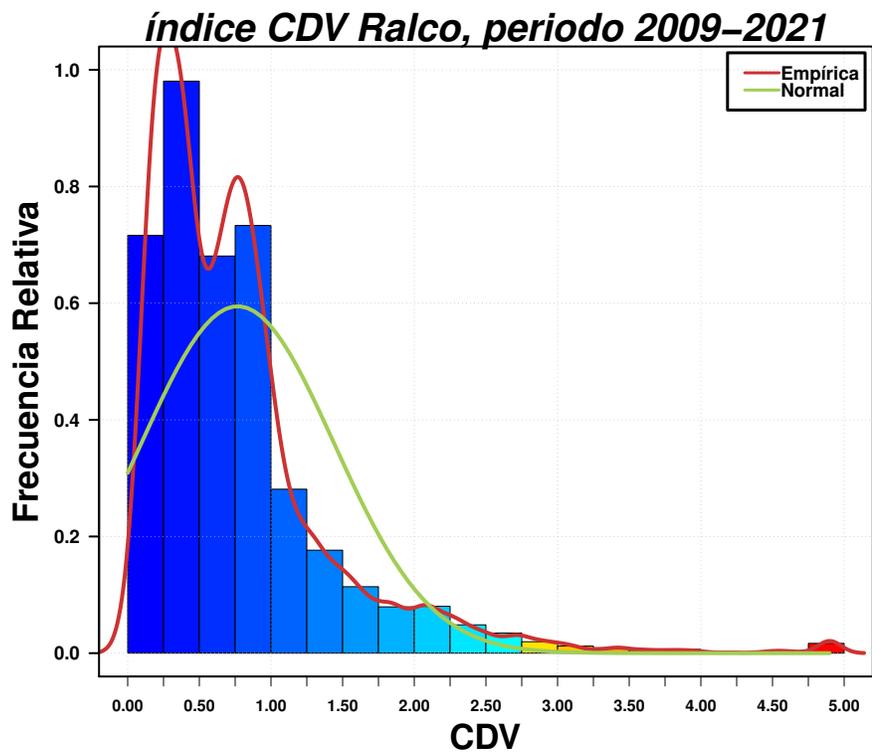
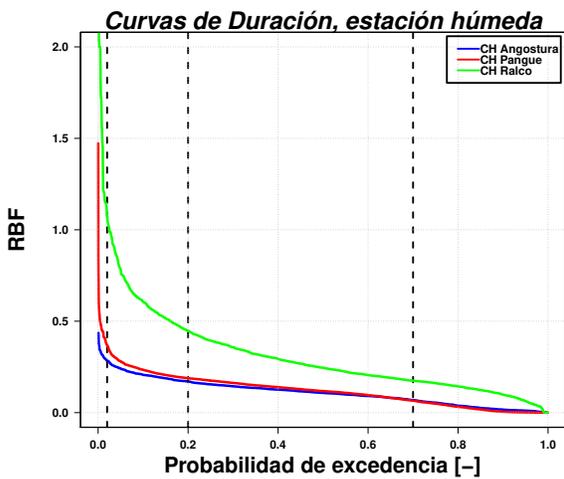
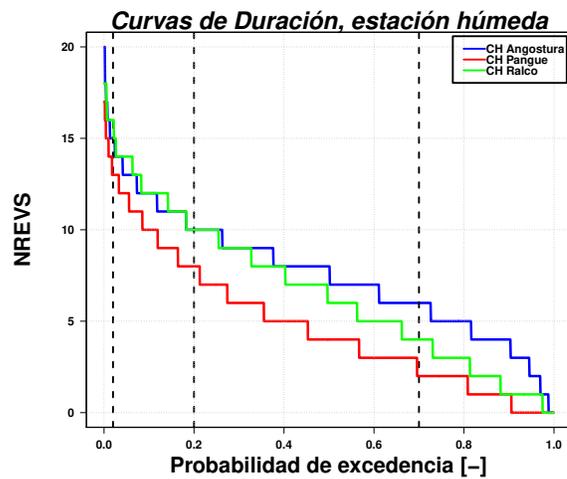


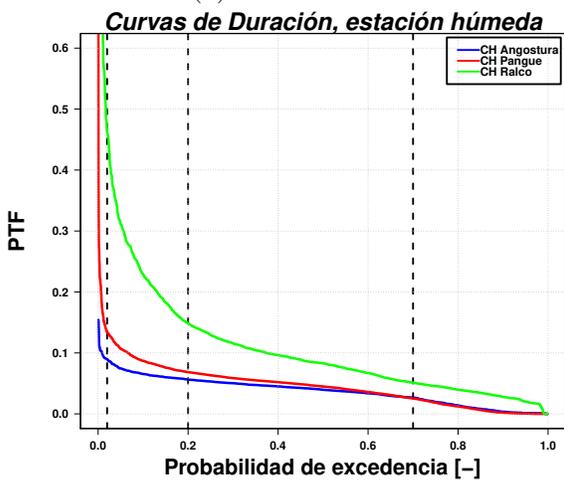
Figura A.24: histograma de frecuencias relativas para indicador PTF de la central Ralco, considerando periodo completo.



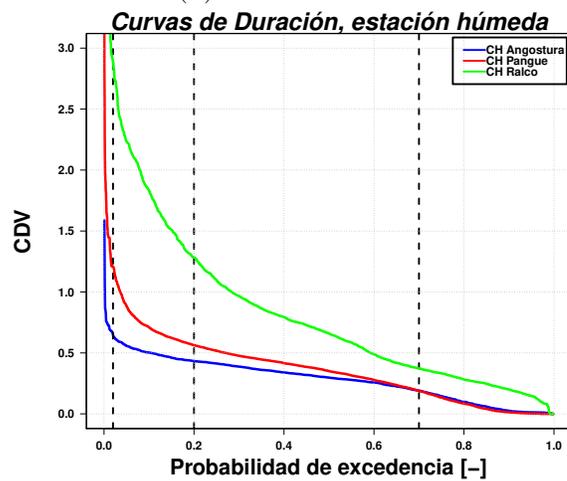
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.

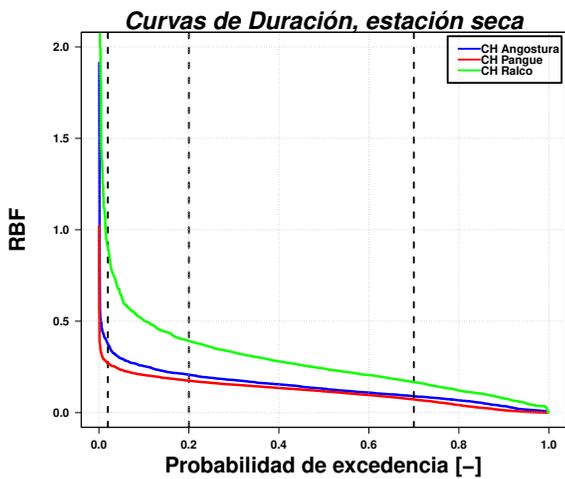


(c) índice PTF.

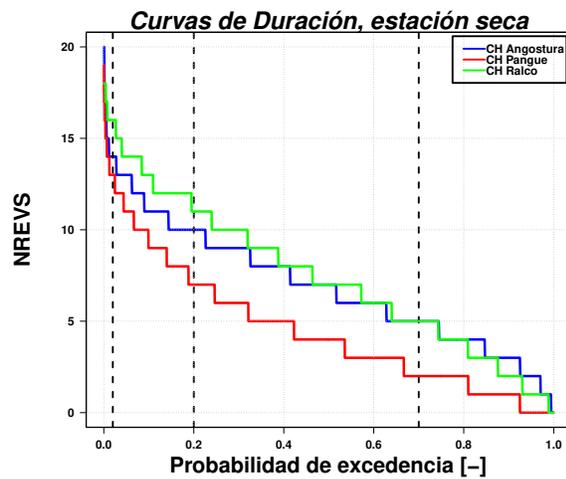


(d) índice CDV.

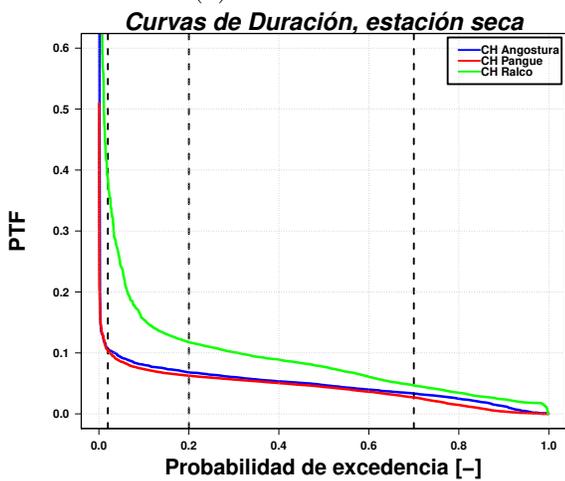
Figura A.25: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para todas las centrales, estación húmeda.



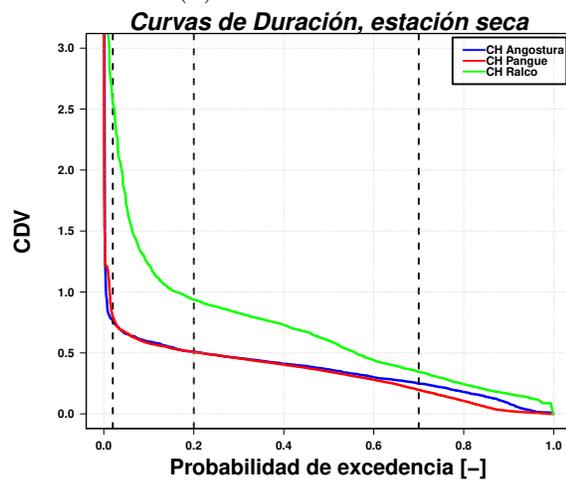
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.

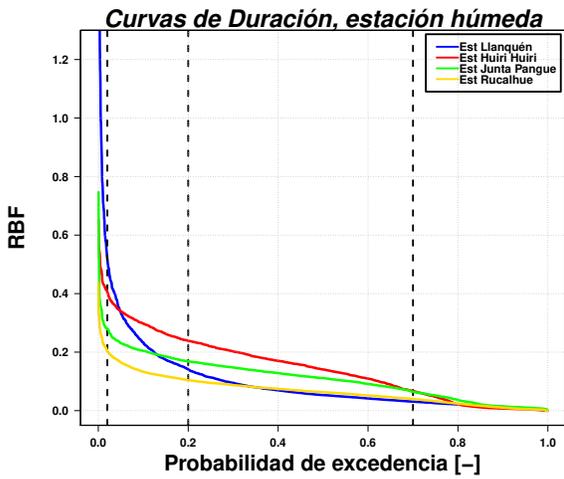


(c) índice PTF.

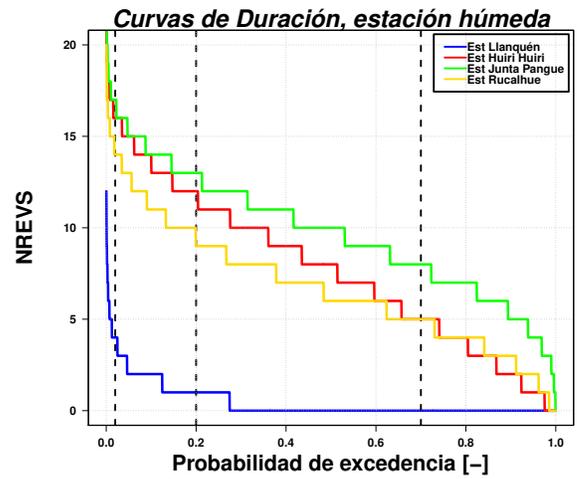


(d) índice CDV.

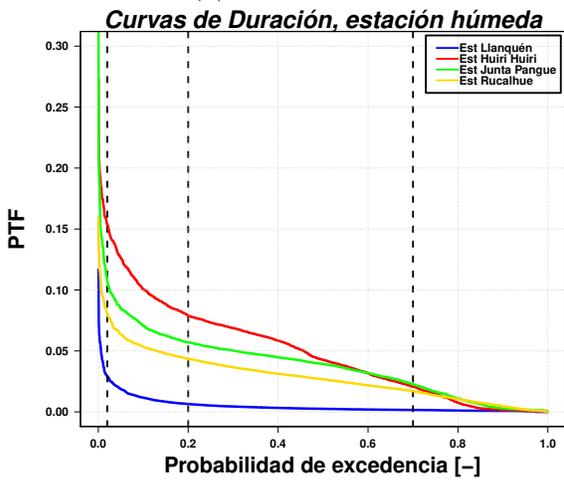
Figura A.26: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para todas las centrales, estación seca.



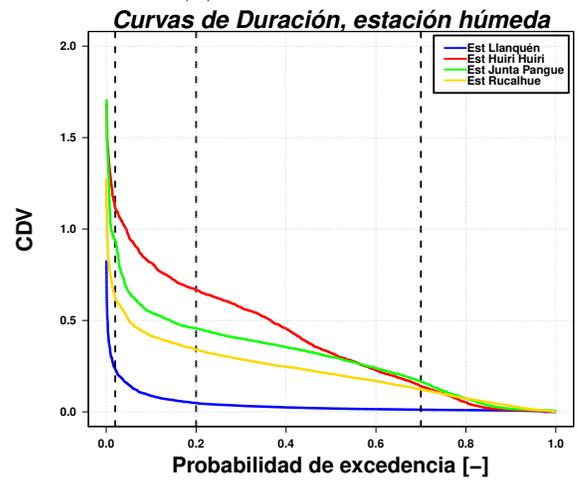
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.

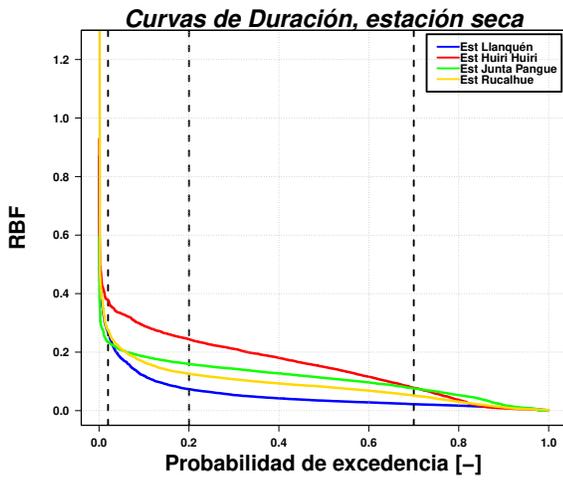


(c) índice PTF.

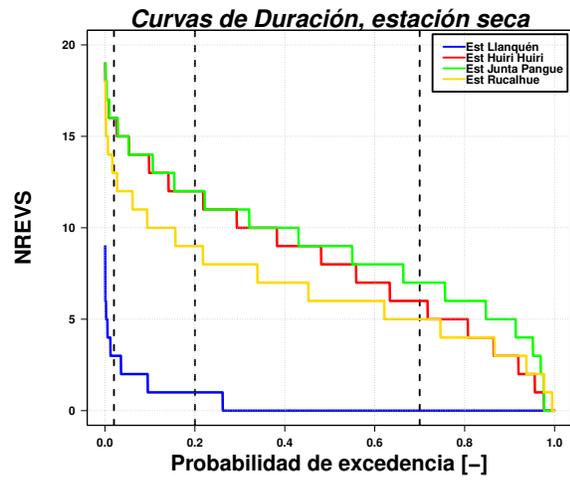


(d) índice CDV.

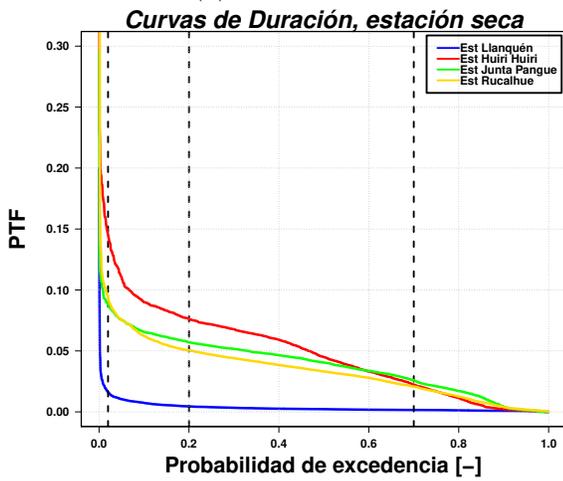
Figura A.27: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para todas las estaciones fluviométricas, estación húmeda.



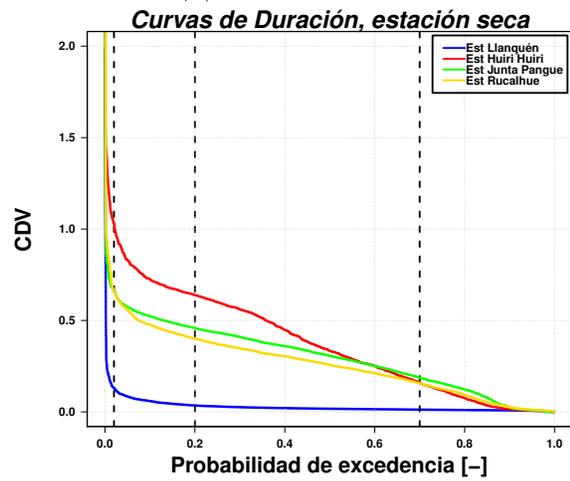
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.

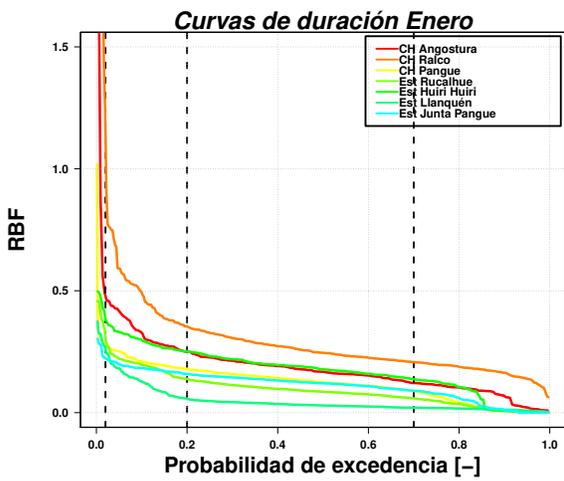


(c) índice PTF.

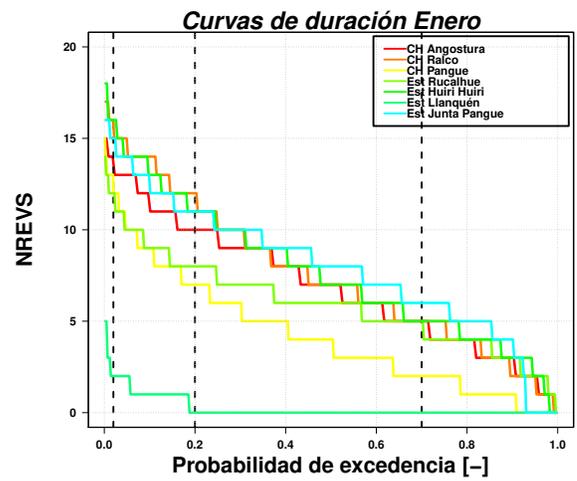


(d) índice CDV.

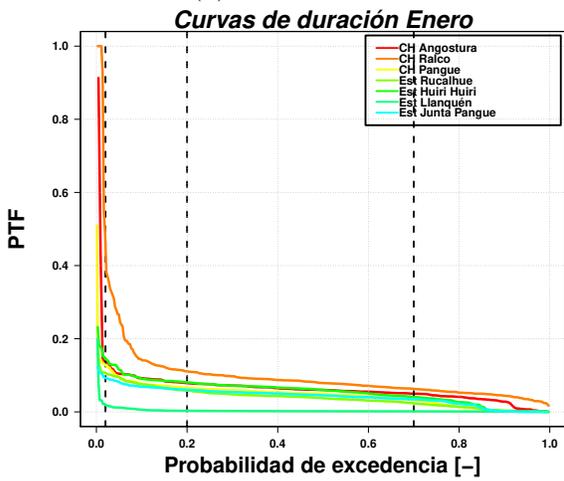
Figura A.28: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para todas las estaciones fluviométricas, estación seca.



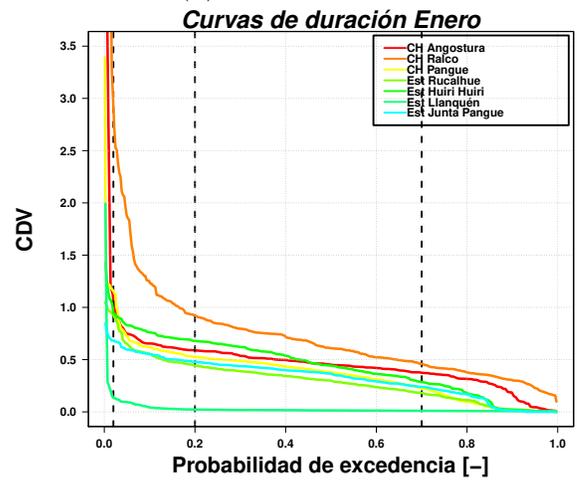
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.

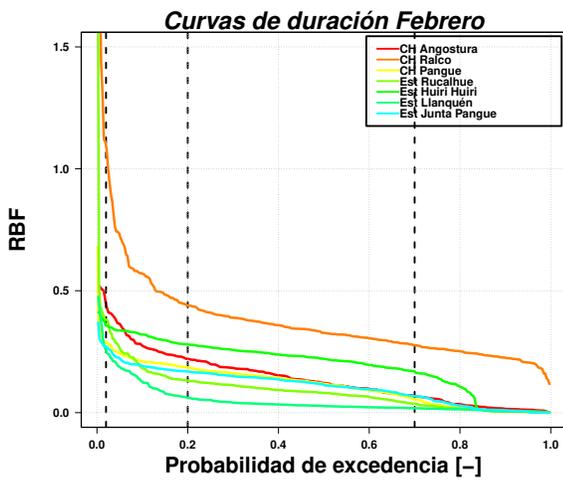


(c) índice PTF.

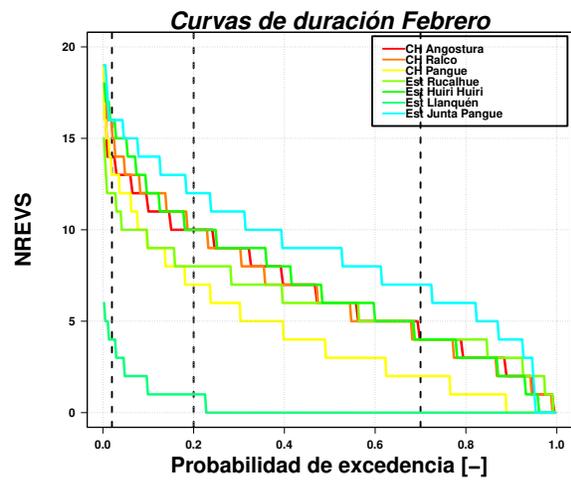


(d) índice CDV.

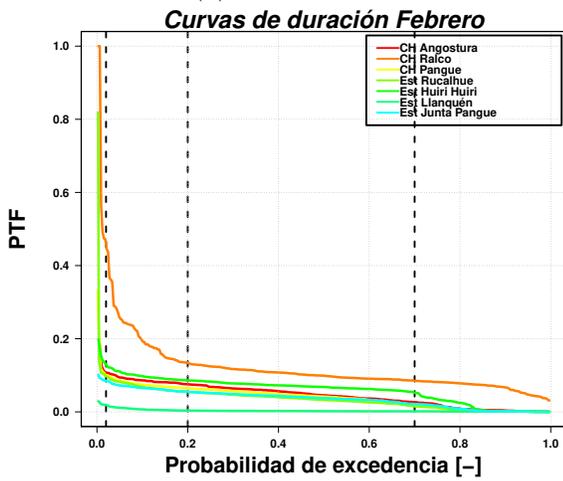
Figura A.29: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de enero.



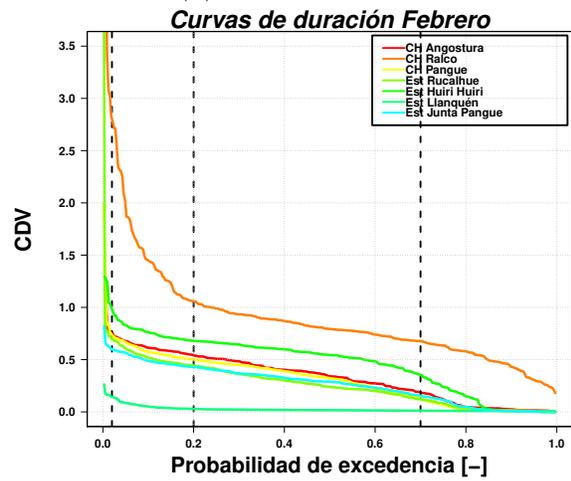
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.

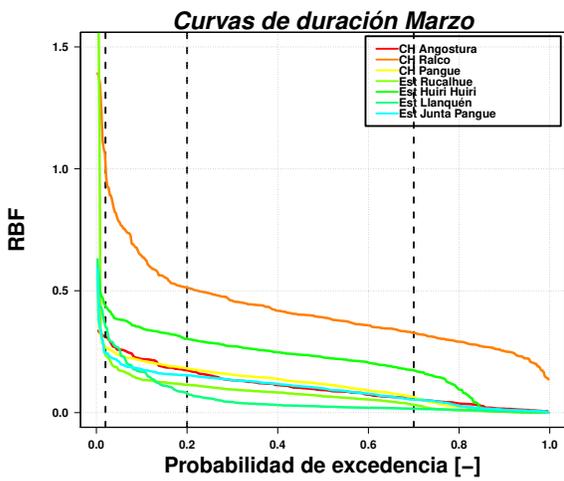


(c) índice PTF.

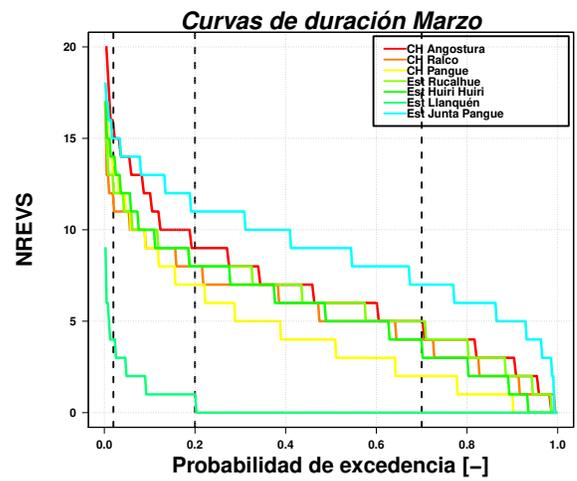


(d) índice CDV.

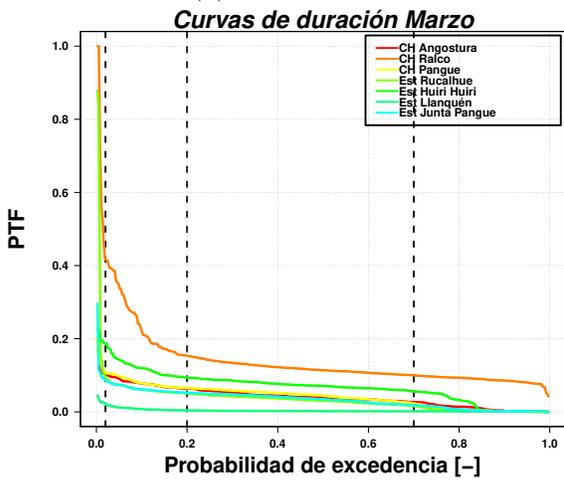
Figura A.30: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de febrero.



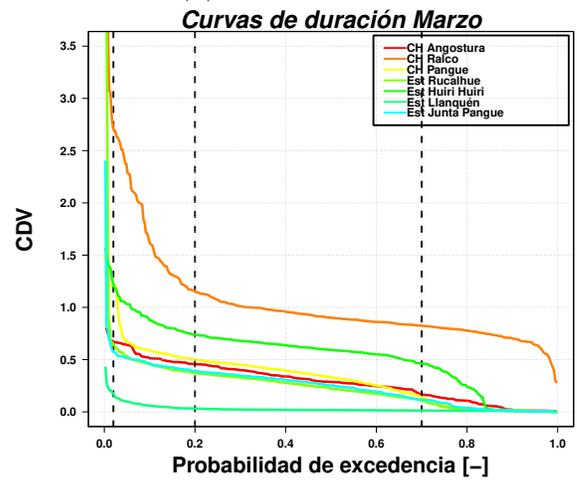
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.

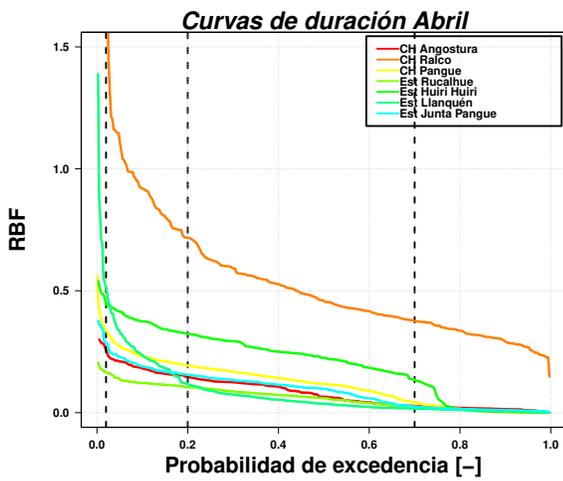


(c) índice PTF.

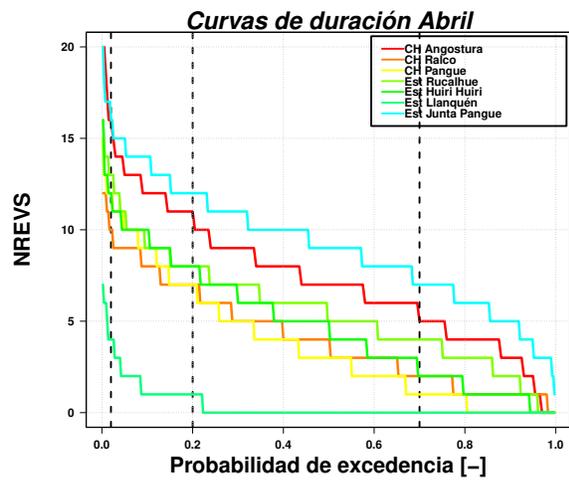


(d) índice CDV.

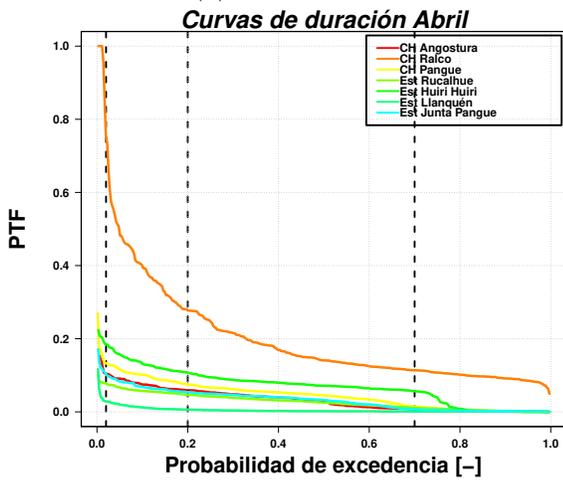
Figura A.31: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de marzo.



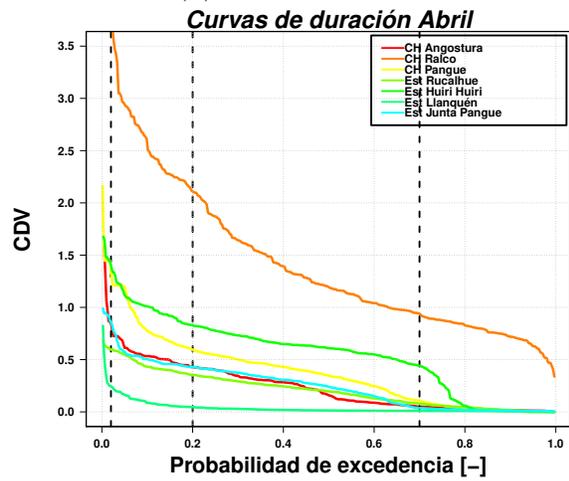
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.

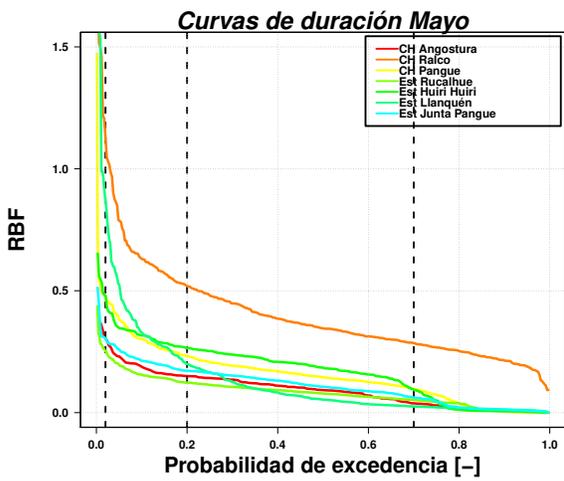


(c) índice PTF.

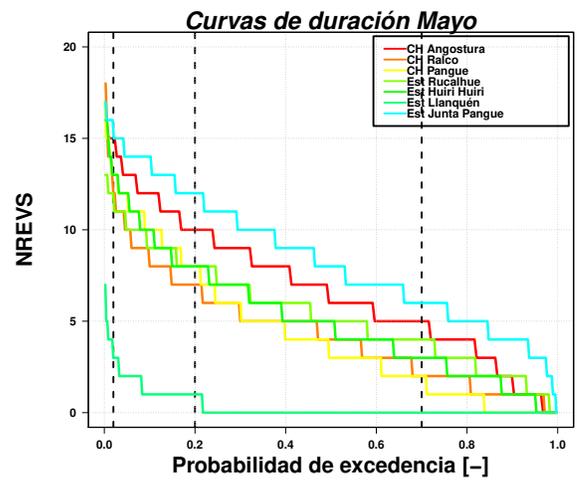


(d) índice CDV.

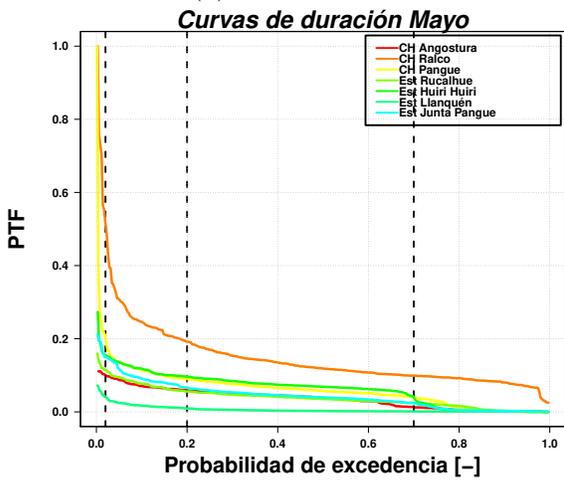
Figura A.32: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluvimétrica analizada, mes de abril.



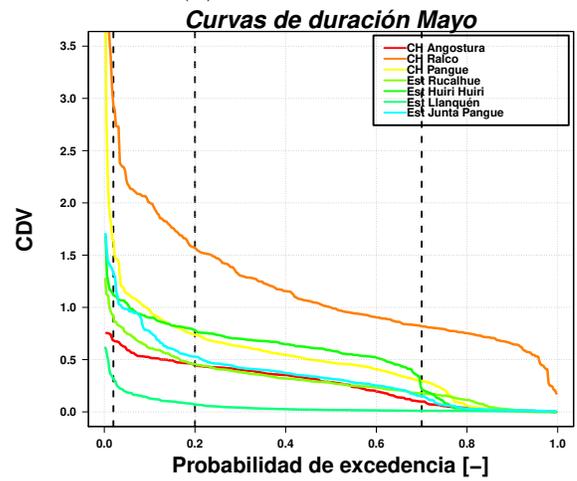
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.

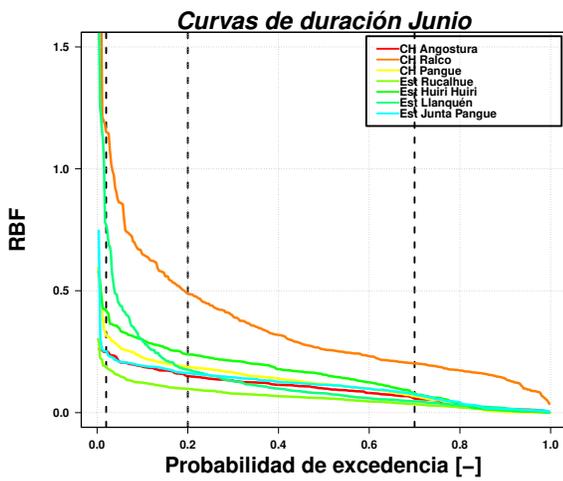


(c) índice PTF.

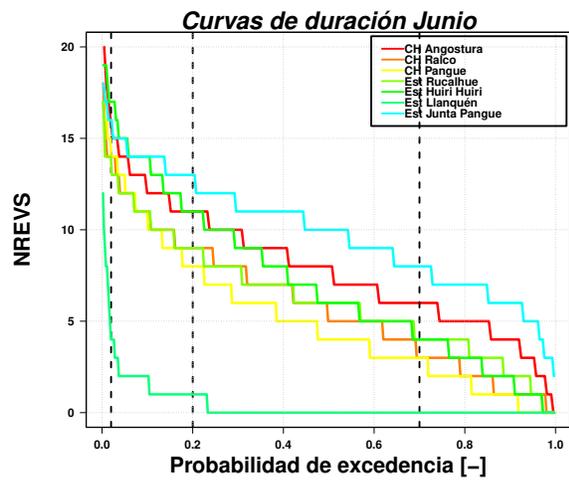


(d) índice CDV.

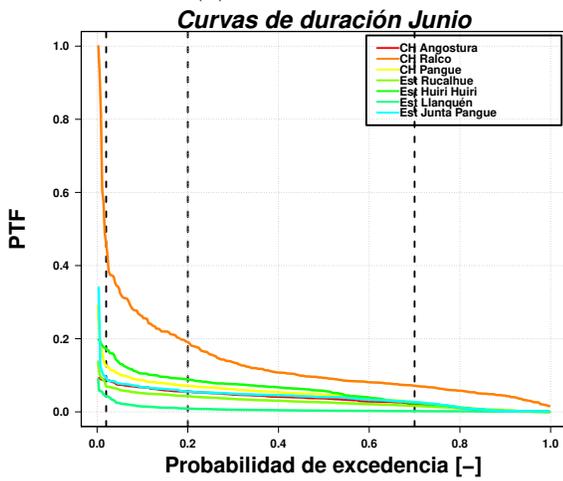
Figura A.33: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de mayo.



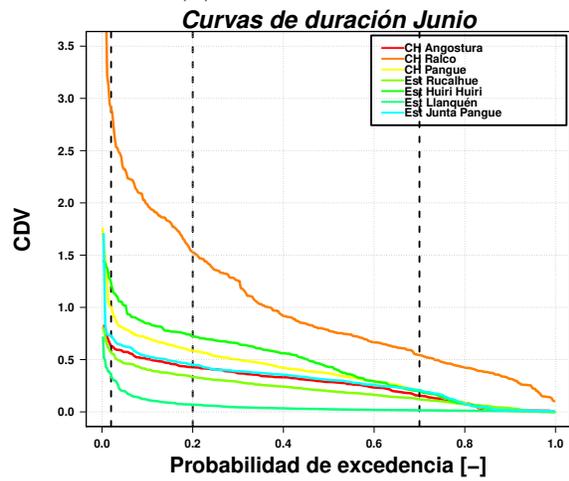
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.

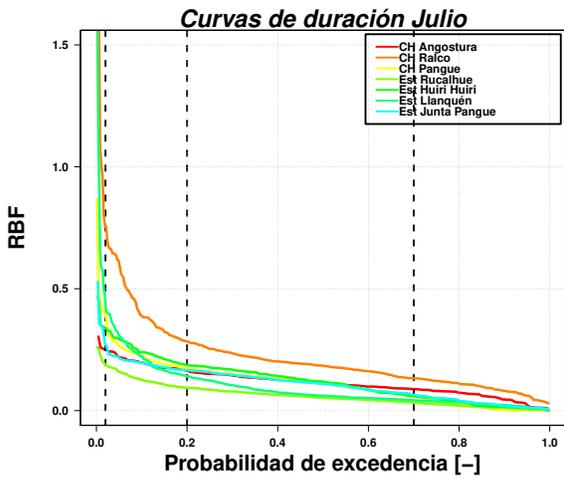


(c) índice PTF.

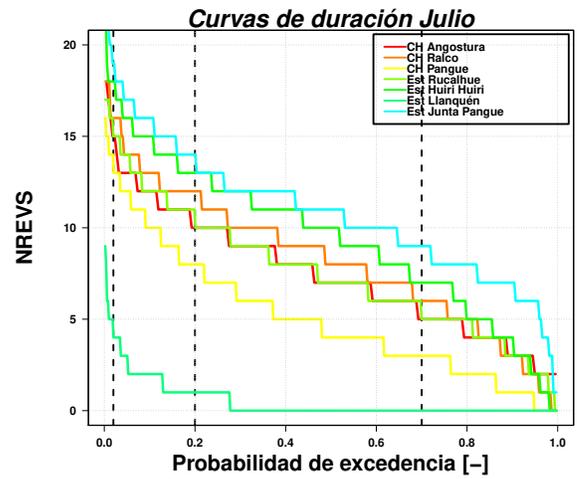


(d) índice CDV.

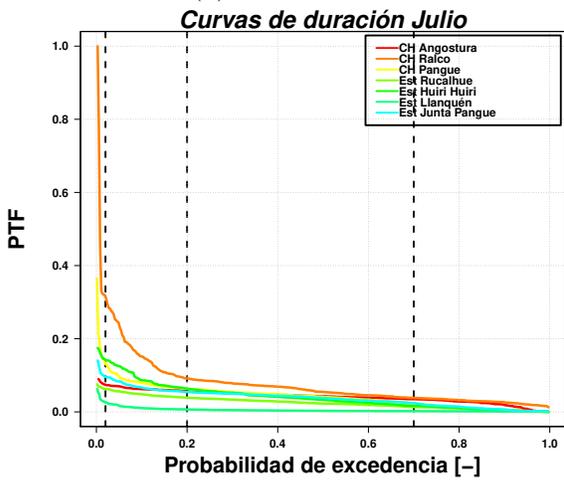
Figura A.34: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de junio.



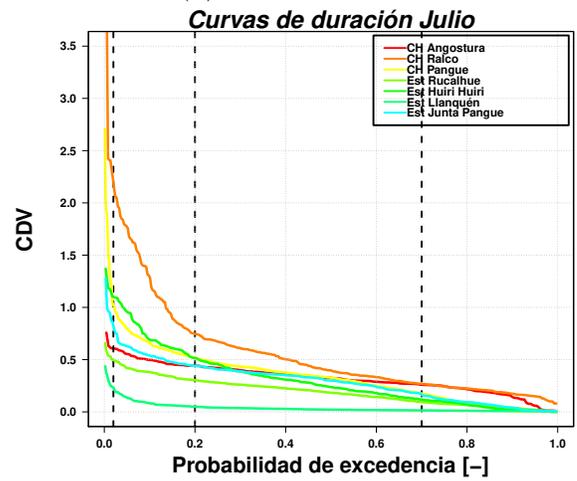
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.

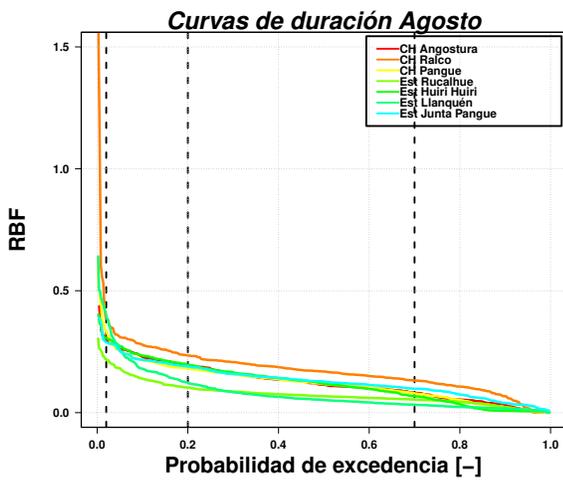


(c) índice PTF.

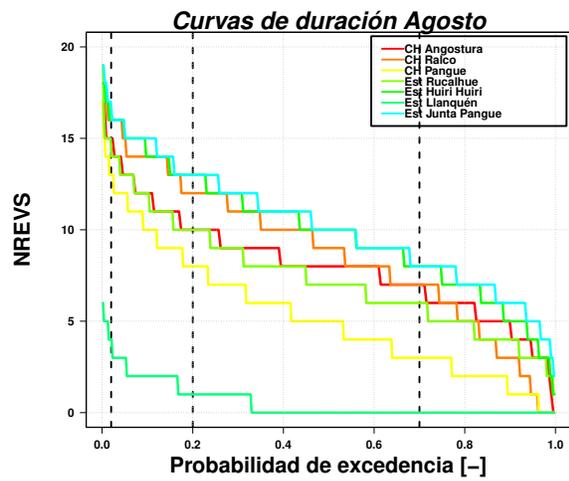


(d) índice CDV.

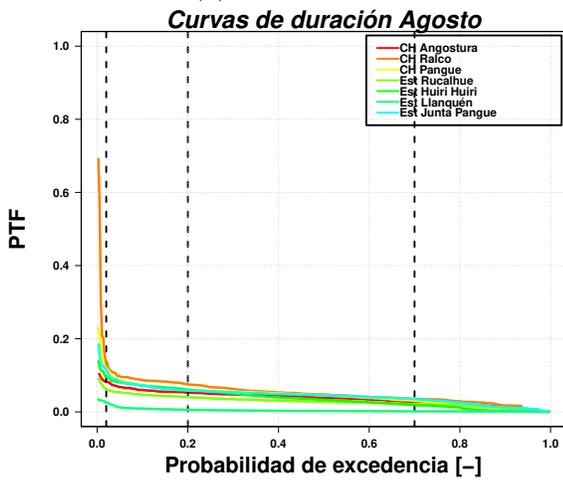
Figura A.35: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de julio.



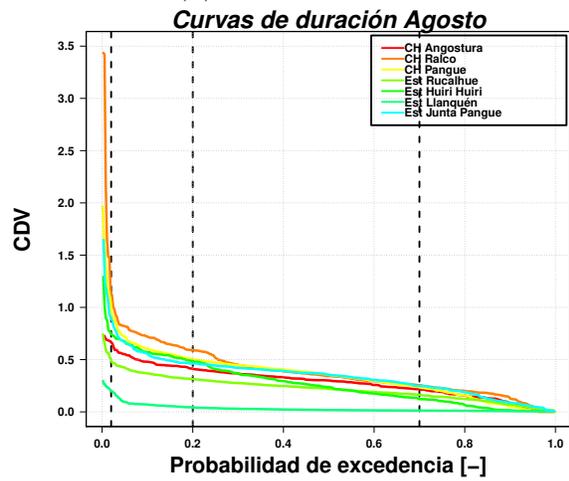
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.

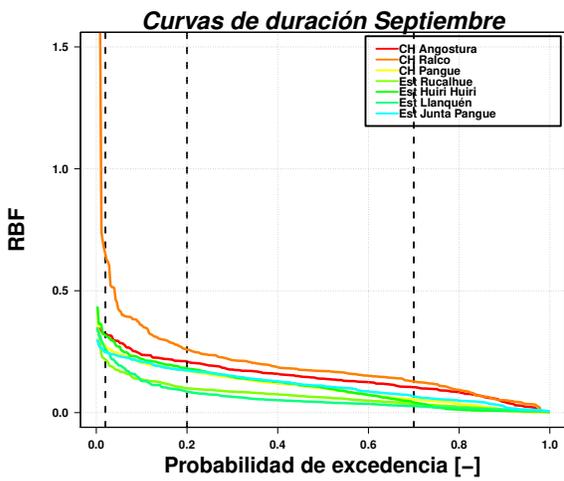


(c) índice PTF.

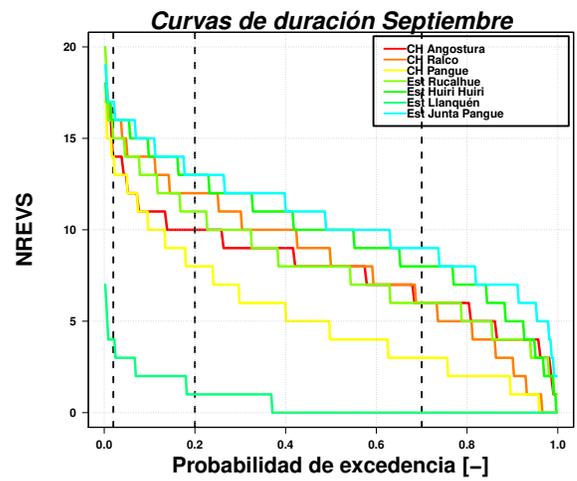


(d) índice CDV.

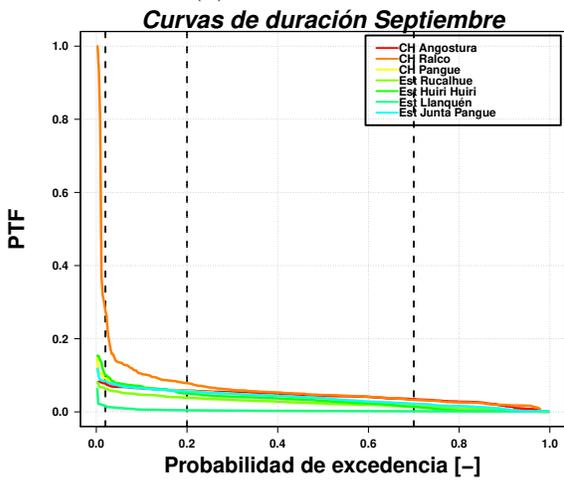
Figura A.36: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de agosto.



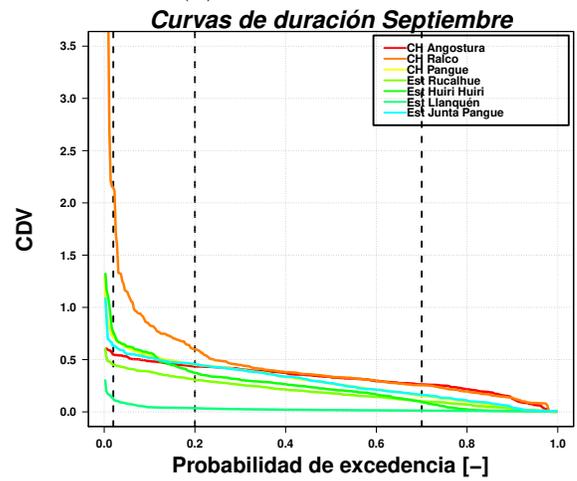
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.

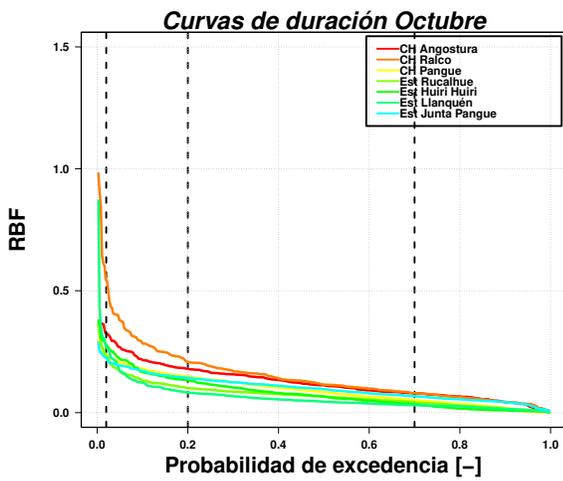


(c) índice PTF.

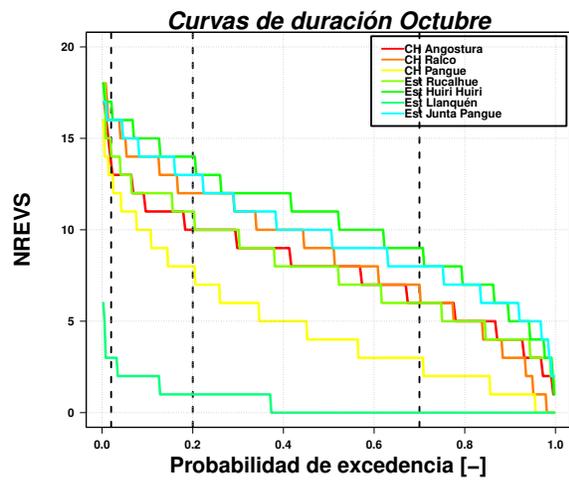


(d) índice CDV.

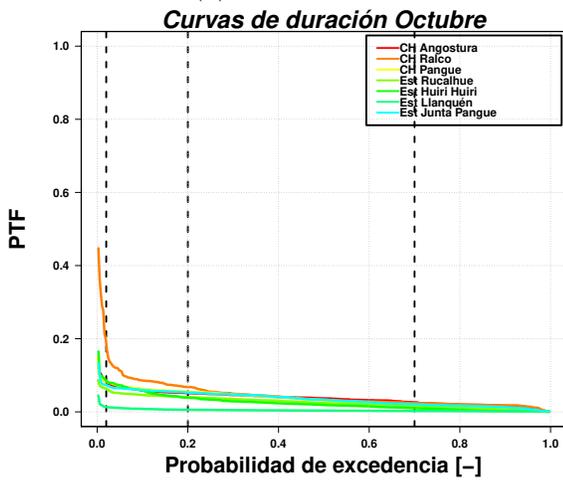
Figura A.37: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de septiembre.



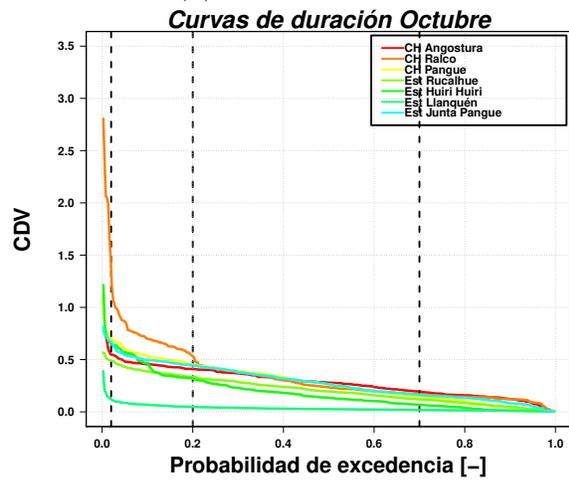
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.

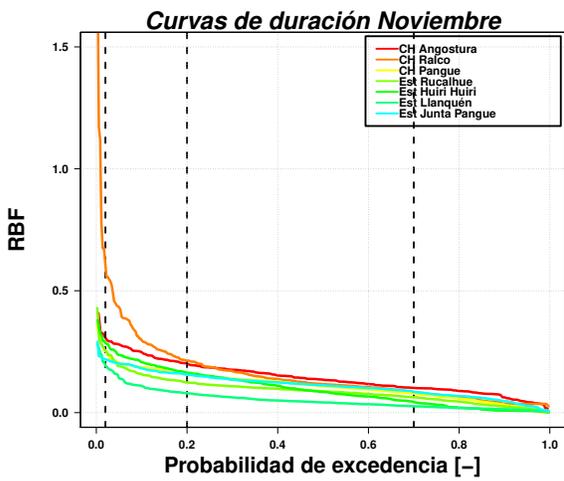


(c) índice PTF.

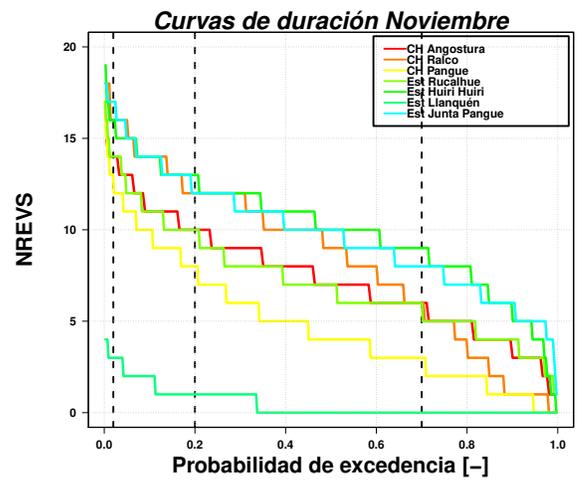


(d) índice CDV.

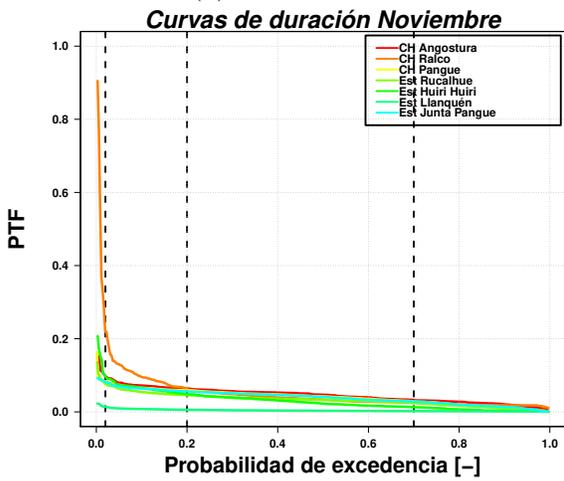
Figura A.38: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de octubre.



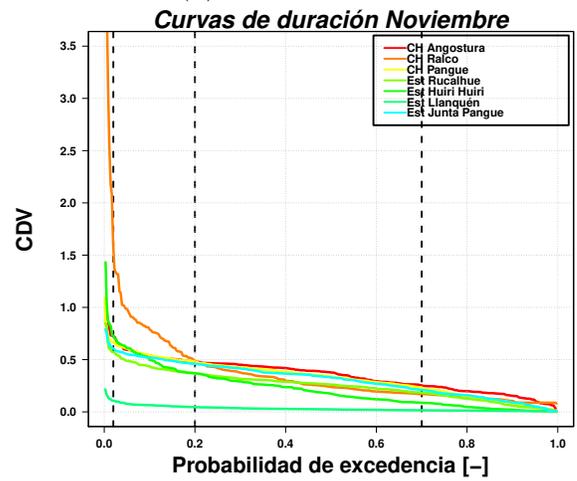
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.

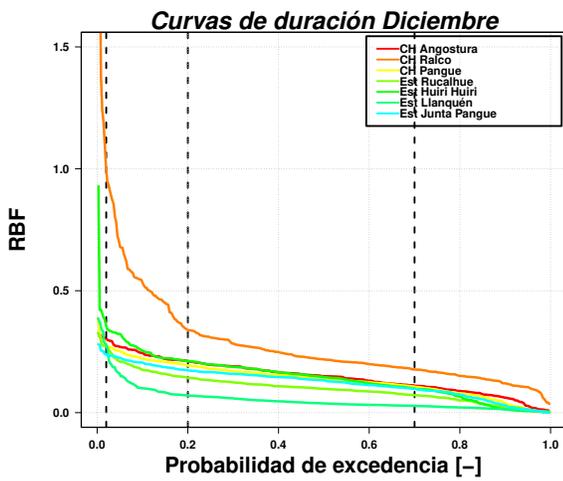


(c) índice PTF.

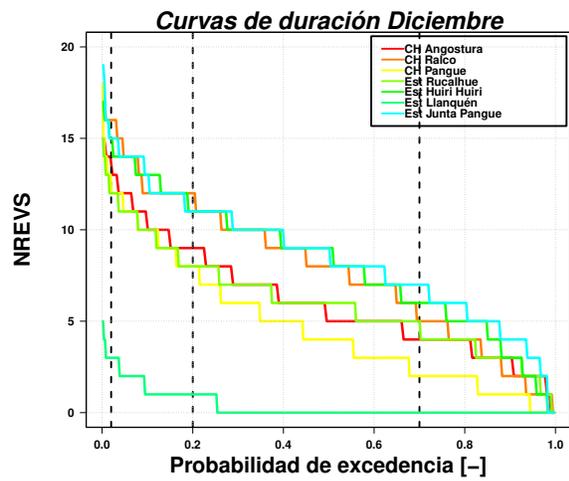


(d) índice CDV.

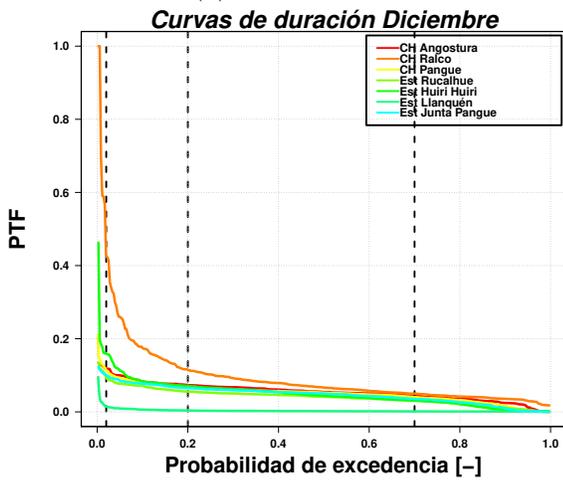
Figura A.39: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de noviembre.



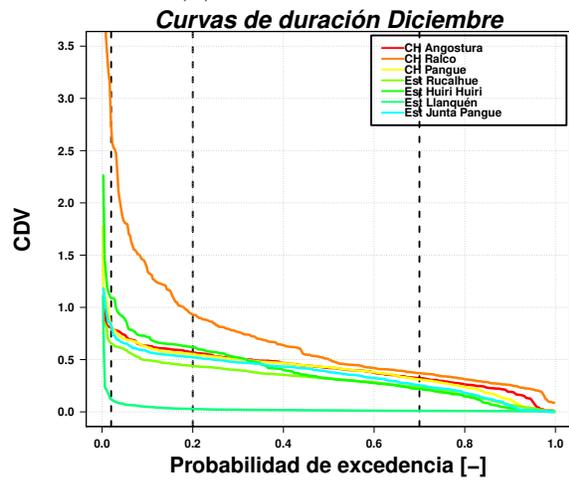
(a) índice RBF.



(b) índice NREVS.



(c) índice PTF.



(d) índice CDV.

Figura A.40: Curvas de duración índices de alteración hidrológica horaria para cada central hidroeléctrica y estación fluviométrica analizada, mes de diciembre.