

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO DEL CAUDAL AMBIENTAL EN LA CUENCA DEL RÍO ATUEL,
ARGENTINA**

Por:

Luis Bernardo Bastidas Mejía

www.bdigital.ula.ve

Trabajo para optar al grado de Magister Scientiae en Desarrollo de los Recursos Aguas y
Tierras, Mención: Planificación y Desarrollo de los Recursos Hidráulicos

CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO E INVESTIGACIÓN
AMBIENTAL Y TERRITORIAL (CIDIAT)
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
MÉRIDA, VENEZUELA
OCTUBRE, 2025

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores, profesores Alberto y Ángela, por su constante e imprescindible acompañamiento académico.

A mis familiares y allegados, por su permanente presencia, alentando la culminación de este proceso.

A la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación Argentina (SIPHN) por la provisión de los datos hidrológicos abiertos para la consecución de esta tesis de investigación.

www.bdigital.ula.ve

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
INDICE DE ECUACIONES.....	xviii
LISTA DE SÍMBOLOS O VARIABLES	xxi
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	26
1.1. Introducción	26
1.2. Planteamiento del problema y justificación	31
1.3. Objetivos.....	34
1.4. Importancia y justificación del estudio.....	34
1.5. Alcances	36
1.6. Limitaciones.....	37
1.7. Hipótesis de trabajo	37
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	39
2.1. Antecedentes de la investigación	39
2.2. Bases teóricas	42
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	50
3.1. Eje de la investigación	50
3.2. Descripción de la zona de estudio	50
3.3. Técnicas, procesamiento y análisis de datos	61
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DEL ESTADO, CALIDAD Y CONSISTENCIA DE LA INFORMACIÓN HIDROLÓGICA DISPONIBLE	67
4.1. Estaciones hidrométricas.....	67
4.2. Análisis exploratorio de datos	72
4.3. Cálculo de datos faltantes	72

4.4.	Definición de variables a partir de las series temporales empleadas.....	77
4.5.	Verificación de supuestos estadísticos subyacentes y análisis de tendencia y cambios abruptos	79
CAPÍTULO 5. CAPITULO 5. CAUDALES AMBIENTALES EN EL MARCO DE LA OFERTA HÍDRICA ECOLÓGICA.....		134
5.1.	Indicadores de alteración hidrológica (IHA).....	134
5.2.	Caudales ambientales en el río Atuel bajo un enfoque hidrológico.....	141
5.3.	Métodos que establecen un único valor de caudal ambiental.....	142
5.4.	Métodos que establecen un valor de caudales ambientales para cada mes del año 152	
CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS CAUDALES AMBIENTALES.....		160
6.1.	Acciones dentro de la Declaración de Brisbane (2018)	160
6.2.	Acciones y recomendaciones dentro de la planificación de los recursos hídricos.....	161
6.3.	El nexa con el Cambio Climático	162
CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		165
7.1.	Análisis exploratorio de datos.....	165
7.2.	Caudales ambientales en el marco de la oferta hídrica ecológica	167
7.3.	Recomendaciones para la implementación de los caudales ambientales.....	170
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		173
8.1.	Recomendaciones derivadas de la investigación	174
REFERENCIAS CITADAS		178
APÉNDICES		192

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
Tabla 3.1. Distribución estimada del agua superficial del río Atuel. Temporada 2019/2020, ajustado a diciembre de 2019 (DGI, 2020).....	54
Tabla 3.2. Análisis del estado, calidad y consistencia de la información hidrológica disponible	64
Tabla 3.3. Caudales ambientales en el marco de la oferta hídrica ecológica	64
Tabla 3.4. Recomendaciones para la implementación de los caudales ambientales	65
Tabla 3.5. Resultados-discusión, y conclusiones-recomendaciones	65
Tabla 4.1. Características de registros, superficie y altitud de las estaciones hidrométricas de la cuenca del río Atuel (Figura 4.4).	69
Tabla 4.2. Valores absolutos y relativos de datos faltantes en las estaciones hidrométricas de la cuenca del río Atuel.	76
Tabla 4.3. Variables mensuales y anual calculadas para la estación La Angostura.	78
Tabla 4.4. Estaciones climáticas y cuantiles de la curva de duración de caudales y extremos mínimos y máximos calculados en la estación La Angostura (LAN).....	79
Tabla 4.5. Salidas de la prueba de normalidad (asimetría y curtosis) para la estación La Angostura (LAN).	86
Tabla 4.6. Salidas de la prueba de aleatoriedad (Rachas y Kendall) para la estación La Angostura (LAN).	87
Tabla 4.7. Salidas de la prueba de independencia (Bartlett y Von Neumann) para la estación La Angostura (LAN).	88
Tabla 4.8. Presencia y ausencia de normalidad, aleatoriedad e independencia para las 25 variables consideradas.	89
Tabla 4.9. Porcentaje de variables con y sin presencia de Normalidad, Aleatoriedad e independencia.	89
Tabla 4.10. Salidas de la prueba de valores atípicos (Grubbs) para la estación La Angostura (LAN).	98
Tabla 4.11. Salidas de la prueba de valores atípicos (WRC) para la estación La Angostura (LAN).	99

Tabla 4.12. Salidas de la prueba de valores atípicos (Rosner) para la estación La Angostura (LAN).....	100
Tabla 4.13. Salidas de la prueba de tendencia lineal no paramétrica para la estación La Angostura (LAN).....	109
Tabla 4.14. Salidas de la prueba de tendencia paramétrica t de Student para la estación La Angostura (LAN).....	110
Tabla 4.15. Salidas de la prueba de Spearman Rank Order Correlation Test (SROC) (tendencia) para alfa=0.05 y n-2 grados de libertad	111
Tabla 4.16. Salidas de la prueba de Mann-Kendall – Corrección de Varianza (tendencia).	112
Tabla 4.17. Principales años de saltos, arrojados por las pruebas consideradas.	120
Tabla 4.18. Salidas de la prueba de t de Student secuencial - detección de cambios bruscos (Estación La Angostura).	125
Tabla 4.19. Salidas de la prueba de Rank Suma Test - detección de cambios bruscos (Estación La Angostura).	126
Tabla 4.20. Salidas de la prueba de Pettitt - detección de cambios bruscos (Estación La Angostura).....	127
Tabla 4.21. Salidas de la prueba de Buishand - detección de cambios bruscos (Estación La Angostura).....	128
Tabla 4.22. Salidas de la prueba de Worsley - detección de cambios bruscos (Estación La Angostura).....	129
Tabla 5.1. Resumen de parámetros IHA y sus influencias sobre los ecosistemas (The Nature Conservancy, 2012).	135
Tabla 5.2. Requerimientos de caudales de acuerdo con el método de Tennant (Modificado de Arthington y Zalucki, 1998).	144
Tabla 5.3. Requerimientos de caudales de acuerdo con el método de Hoppe (Díez, 2000).	148
Tabla 5.4. Caudales mínimos según el método de Tennant (1976, modificado de Arthington y Zalucki, 1998).	153

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
Figura 1.1. Área de estudio. Cuenca del río Atuel. Las imágenes insertadas (derivadas del mapa base de Google <i>Satellite</i>) denotan la ausencia general de agua hacia la cuenca baja (límite con la Provincia de La Pampa).	29
Figura 1.2. Mapas históricos de las provincias de La Pampa y Mendoza (IGN, 2025) versus índices diferenciados de humedad (NDMI) para la zona de confluencia interprovincial (2025), evidenciando la pérdida de continuidad fluvial del río Atuel.	33
Figura 3.1. Secciones de la cuenca del río Atuel dentro de la provincia de Mendoza. Modificado de DGI (2017).	52
Figura 3.2. Diagonal árida (1) y principales cuencas de América del Sur (2). Cuencas y regiones hidrográficas de Argentina (3). Sistema Hidrológico del río Colorado. Modificado de DGI (2017).	53
Figura 3.3. La cuenca del río Atuel y su ubicación en los departamentos de las provincias de Mendoza y La Pampa.	56
Figura 3.4. Distribución de hectáreas cultivadas en la cuenca del río Atuel. Tomado de DGI (2017).	57
Figura 3.5. Dique de El Nihuil (A) y el río Atuel aguas abajo de éste (B). Fotografías tomadas por el autor (junio 2025).	61
Figura 3.6. Esquema metodológico general. Elaboración propia.	62
Figura 4.1. Nacientes del río Atuel (A). Campo de glaciares circundantes al nacimiento del río Atuel (B). Tomado de DGI (2017).	68
Figura 4.2. Dique de Valle Grande (río Atuel). Fotografía tomada por el autor (junio 2025)..	70
Figura 4.3. Complejo hidroeléctrico Los Nihuales (DGI, 2017).	70
Figura 4.4. Estaciones hidrométricas e hidrografía. Cuenca del río Atuel.	71
Figura 4.5. Valores fuera de rango de acuerdo con caudales mínimos y máximos.	94
Figura 4.6. Valores fuera de rango por mes y estación hidrométrica	95
Figura 4.7. Valores fuera de rango por estaciones climáticas - media anual y estación hidrométrica.	96
Figura 4.8. Valores significativos mensuales de tendencia lineal no paramétrica de Kendall.	106

Figura 4.9. Valores significativos estacionales, de percentiles y extremos de tendencia lineal no paramétrica de Kendall.	107
Figura 4.10. Porcentaje de disminución del segundo período respecto al primer período en los años de salto de la Tabla 4.17.....	120
Figura 4.11. Porcentaje de disminución del segundo período respecto al primer período en los años de salto mostrados en la Tabla 4.17, para A) estaciones climáticas, B) caudal mínimo, C) caudal máximo.	121
Figura 4.12. Rango (%) entre los saltos mínimos y máximos para los años 2007, 2008 y 2009.	122
Figura 4.13. Cambios abruptos para los caudales mínimos en las estaciones de la cuenca del río Atuel.	124
Figura 4.14. Valores de ENSO para el período 2006 – 2010. Fuente de datos: Climate Prediction Center CPC (2019). Fuente de categorización de ENSO: McKee <i>et al.</i> (1993). .	130
Figura 4.15. Valores del SOI para el período 2006 – 2010. Fuente de datos: CPC (2019).	131
Figura 5.1. Caudales medios mensuales del río Atuel en La Angostura (LAN) (1931 – 2019) y del río Atuel en Carmensa (CAR) (1997 – 2017).....	137
Figura 5.2. Caudales mínimos (Figura superior) y máximos (Figura inferior) anuales de 1, 3, 7, 30 y 90 días.	138
Figura 5.3. Día juliano medio de ocurrencia de caudales máximos y mínimos.....	139
Figura 5.4. Cantidad de pulsos bajos y altos en cada año hidrológico.	139
Figura 5.5. Tasas de ascenso y descenso hidrológicas.	140
Figura 5.6. Caudales ambientales como fracción de una medida de tendencia central (La Angostura) versus el hidrograma de la estación Carmensa. a) Ley de Aguas de Francia – Dirección de Obras Hidráulicas de España; b) Colombia (IDEAM-2004); c) US Wild Fish and Wildlife; d) ABF; e): Montana (Las diferentes categorías aplicadas a LAN (La Angostura) ya fueron afectadas por el 25 % de pérdidas por infiltración y evaporación).....	145
Figura 5.7. Caudales ambientales asociados a una probabilidad (Método de 7Q10).	147
Figura 5.8. Caudales ambientales asociados a un cuantil de la curva de duración de caudales. Métodos de Matthey (a) y Suiza-Asturias (b).	150
Figura 5.9. Caudales ambientales asociados a un cuantil de la curva de duración de caudales. Método de Hoppe: limpieza (a), mantenimiento (b) y hábitat (c).	150
Figura 5.10. Caudales ambientales asociados a un cuantil de la curva de duración de	

caudales. Métodos de: Colombia, 2005 (a), Colombia-IDEAM 2008 (b), Colombia-IDEAM 2010 (c), y Chile (Ayala y Cabrera) (d).	151
Figura 5.11. Métodos que establecen un valor de caudales ambientales para cada mes del año: Método de Tennant. Las diferentes categorías fueron aplicadas a LAN (La Angostura), cuyos cálculos ya fueron afectados por el 25 % de pérdidas por infiltración y evaporación. 156	
Figura 5.12. Métodos que establecen un valor de caudales ambientales para cada mes del año: Métodos de: Texas (a), Utah (b), Tessman (c) y NGPRP (d).	156
Figura 5.13. Métodos que establecen un valor de caudales ambientales para cada mes del año: Métodos de: Brasil-Santa María (a), Argentina-Río Grande (b) y Caudal de Mantenimiento (c).	157

www.bdigital.ula.ve

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación	Pág.
Ec. 4.1 Polinomio Interpolador de Lagrange	72
Ec. 4.2 Modelo autoregresivo de primer orden con corrección	73
Ec. 4.3 Diferencia entre el valor predicho (Lagrange) y observado al final del vacío de información.....	73
Ec. 4.4 Mantenimiento de la extensión de la varianza (MOVE)	74
Ec. 4.5 Transformación de MOVE mediante logaritmos	74
Ec. 4.6 Definición de caudal mensual.....	77
Ec. 4.7 Definición de caudal estacional	77
Ec. 4.8 Definición de caudal anual	77
Ec. 4.9 Asimetría.....	80
Ec. 4.10 Curtosis	80
Ec. 4.11 Estadístico Z de asimetría	80
Ec. 4.12 Estadístico Z de curtosis	80
Ec. 4.13 Prueba de rachas (aleatoriedad)	81
Ec. 4.14 Estadístico Z de rachas	82
Ec. 4.15 Cálculo del número de puntos de inflexión (rachas)	82
Ec. 4.16 Estadístico de contraste de rachas.....	82
Ec. 4.17 Coeficiente r_1 de independencia	84
Ec. 4.18 Estadístico de contraste (independencia).....	84
Ec. 4.19 Grados de libertad (independencia).....	84
Ec. 4.20 Estadístico de prueba R (independencia).....	84
Ec. 4.21 Estadístico de prueba estandarizado C (independencia).....	84
Ec. 4.22 Estadístico de contraste de Grubbs (datos atípicos).....	90
Ec. 4.23 Detección de datos atípicos del Interagency Advisory Committee on Water Data ..	91
Ec. 4.24 Prueba de Rosner (datos atípicos)	91
Ec. 4.25 Desviación media (MAD-score - datos atípicos)	92
Ec. 4.26 MAD-score (datos atípicos)	92
Ec. 4.27 Prueba de tendencia t de Student	102

Ec. 4.28 Estadístico de contraste t de Student (tendencia)	102
Ec. 4.29 Coeficiente de correlación de la serie de rangos (tendencia)	103
Ec. 4.30 Estadístico de contraste de serie de rangos (tendencia)	103
Ec. 4.31 Estadístico S de Mann-Kendall (tendencia)	104
Ec. 4.32 Distribución S de Mann-Kendall (tendencia)	104
Ec. 4.33 Estadístico de contraste Z de Mann-Kendall (tendencia)	104
Ec. 4.34 Estimador de pendiente estacional de Kendall (tendencia)	105
Ec. 4.35 Prueba paramétrica de t de Student (cambios abruptos)	113
Ec. 4.36 Media teórica y desvío de S de t de Student (cambios abruptos)	114
Ec. 4.37 Forma estandarizada del estadístico Zrs de t de Student (cambios abruptos)	114
Ec. 4.38 Prueba no paramétrica de Pettitt (cambios abruptos)	115
Ec. 4.39 Estadístico U de Pettitt (cambios abruptos)	115
Ec. 4.40 Criterio de rechazo de Pettitt (cambios abruptos)	116
Ec. 4.41 Punto de cambio estimado en el tiempo t (Pettitt - cambios abruptos)	116
Ec. 4.42 Sumas parciales de Pettitt (cambios abruptos)	116
Ec. 4.43 Estadístico de contraste Q (Pettitt - cambios abruptos)	117
Ec. 4.44 Estadístico TS de Buishand (cambios abruptos)	117
Ec. 4.45 Factor CSk de Buishand (cambios abruptos)	117
Ec. 4.46 Estadístico Sk de Worsley (cambios abruptos)	118
Ec. 4.47 Estadístico de contraste W de Worsley (cambios abruptos)	118
Ec. 4.48 Factor V de Worsley (cambios abruptos)	118
Ec. 5.1 Método de Matthey	147
Ec. 5.2 Método de la normativa asturiana 1	148
Ec. 5.3 Método de la normativa asturiana 2	148
Ec. 5.4 Método de la normativa asturiana 3	148
Ec. 5.5 Método de Tessman	153
Ec. 5.6 Método del caudal base	155

LISTA DE SÍMBOLOS O VARIABLES

Símbolo o variable	Definición	Unidad de medida
7Q10	Caudal mínimo de 7 días y 10 años de período de retorno	m ³ /s
AED	Análisis exploratorio de datos	-
CAN	Estación hidrométrica Salado – Cañada Ancha	m ³ /s
CAR	Estación hidrométrica Atuel - Carmensa	m ³ /s
ENSO	El Niño Oscilación del Sur	°C
ESO	Estación hidrométrica Atuel – El Sosneado	m ³ /s
IHA	Indicadores de Alteración Hidrológica	-
LAN	Estación hidrométrica Atuel – La Angostura	m ³ /s
LNE	Estación hidrométrica Atuel – Loma Negra	m ³ /s
MAD-Score	Desviación absoluta media	-
MK	Mann-Kendall	m ³ /s/año
MOVE	Mantenimiento de la extensión de la varianza	
NDMI	Índice diferencial y normalizado de humedad	Adimensional
NEFM	Método de caudal de Nueva Inglaterra	m ³ /s
NGPRP	Método de las grandes llanuras septentrionales de Estados Unidos	m ³ /s
ONI	Índice Oceánico de El Niño	°C
Q10	Caudal igualado o superado en 10 días al año	m ³ /s
Q17	Caudal igualado o superado en 17 días al año	m ³ /s
Q30	Caudal igualado o superado en 30 días al año	m ³ /s
Q40	Caudal igualado o superado en 40 días al año	m ³ /s
Q80	Caudal igualado o superado en 80 días al año	m ³ /s
Q90	Caudal igualado o superado en 90 días al año	m ³ /s
Q180	Caudal igualado o superado en 180 días al año	m ³ /s
Q270	Caudal igualado o superado en 270 días al año	m ³ /s

Q347	Caudal igualado o superado en 347 días al año	m ³ /s
Q355	Caudal igualado o superado en 355 días al año	m ³ /s
QAM	Caudal anual medio	m ³ /s
Qamb	Caudal ambiental	m ³ /s
QBM	Método del caudal base	m ³ /s
Qmax	Caudal máximo	m ³ /s
Qmin	Caudal mínimo	m ³ /s
QMM	Caudal medio mensual	m ³ /s
QMH	Caudal mínimo hidrológico de Chile	m ³ /s
SOI	Índice de Oscilación del Sur	Adimensional
SROC	Correlación de orden de rango de Spearman	m ³ /s/año
INV	Estación climática de invierno	-
PRI	Estación climática de primavera	-
VER	Estación climática de verano	-
OTO	Estación climática de otoño	-
J	Junio	-
J	Julio	-
A	Agosto	-
S	Septiembre	-
O	Octubre	-
N	Noviembre	-
D	Diciembre	-
E	Enero	-
F	Febrero	-
M	Marzo	-
A	Abril	-
M	Mayo	-

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO E INVESTIGACIÓN AMBIENTAL Y
TERRITORIAL (CIDIAT)

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO DEL CAUDAL AMBIENTAL EN LA CUENCA DEL RÍO ATUEL,
ARGENTINA**

Autor:
Luis Bernardo Bastidas Mejía
Tutor:
Prof. MC. Alberto I.J. Vich
Cotutora:
Prof. Dra. Ángela M. Henao
Fecha: Octubre, 2025

Resumen

El caudal ambiental define la porción del régimen hidrológico natural que debe conservarse para mantener el equilibrio social y ecológico de los sistemas acuáticos y terrestres. En la cuenca del río Atuel, localizada en la región árida de Cuyo (Argentina), la presión combinada de la variabilidad climática y de los usos consuntivos del agua (principalmente destinados a la agricultura irrigada), ha reducido los aportes hídricos hacia los humedales y oasis naturales, ocasionando degradación ambiental y conflictos interprovinciales. Frente a este escenario, la investigación tuvo como objetivo analizar hidrológicamente los caudales ambientales, a partir de un enfoque metodológico que incluyó un análisis exploratorio y estadístico de series hidrométricas. Posteriormente, se aplicaron metodologías hidrológicas de estimación de caudales ambientales, incorporando además la influencia de pérdidas por infiltración y evaporación a lo largo del cauce. Los resultados demostraron que el régimen del río Atuel se encuentra fuertemente alterado en la estación Carmensa (aguas abajo), con evidencias claras de la presión antrópica sobre el sistema. Adicionalmente, las metodologías aplicadas mostraron capacidad para aproximarse a los caudales mínimos necesarios para sostener funciones ecológicas en los humedales bajos, confirmando la hipótesis de trabajo. Estos hallazgos resaltan la necesidad de integrar lineamientos internacionales, como la Declaración de Brisbane sobre caudales ambientales (2018) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible en la gestión del recurso hídrico, reforzando el hecho de que la restitución y planificación de los caudales ambientales constituyen una vía esencial para restaurar ecosistemas degradados, fortalecer la relación entre sociedad y naturaleza, mitigar los impactos del cambio climático y garantizar la sostenibilidad ecológica, social y económica de la región.

Descriptores: análisis hidrológico, caudales ambientales, demandas ecológicas de agua, conservación del recurso hídrico, río Atuel.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

La Declaración de Brisbane surgió en 2007 durante el 10º Simposio Internacional de Ríos y la Conferencia Internacional de caudales ambientales, celebrados en Australia, como un acuerdo internacional que reunió a más de 750 especialistas de distintas disciplinas y regiones del mundo para establecer un marco común en la protección y restauración de los caudales ambientales. Estos se definieron como la cantidad, frecuencia y calidad de los flujos hídricos necesarios para mantener ecosistemas de agua dulce y estuarios, así como el sustento y bienestar humano que dependen de ellos. En 2017, en el marco del 20º Simposio Internacional de Ríos, la declaración fue revisada y ampliada, y un año después Arthington *et al.* (2018) publicaron una actualización que recogía el avance desde 2007, subrayando la urgencia de implementar acciones para la conservación de ecosistemas acuáticos frente a amenazas como el riego intensivo, la contaminación y la construcción de represas, especialmente en cuencas ecológicamente sensibles.

Esta versión de 2018 incorporó una Agenda de Acción Global alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que propuso medidas legislativas, regulatorias, de manejo, investigación y vinculación con actores clave, con un enfoque participativo y equitativo que considerara a los caudales ambientales como un bien común. Entre las recomendaciones se incluyó el seguimiento de indicadores como el estrés hídrico, los cambios en la extensión de ecosistemas vinculados al agua, la reducción de la pobreza, la salud, el bienestar y el manejo sostenible de los recursos. Asimismo, se reforzó el carácter socioecológico de los ríos, destacando el papel de las culturas y comunidades en su cuidado, a la vez que señalaron desafíos persistentes para su implementación, como la ausencia de marcos legales sólidos, la gobernanza fragmentada en cuencas transfronterizas, la variabilidad creciente en la disponibilidad de agua bajo el cambio climático y la escasa consideración de aspectos sociales y económicos.

En línea con estos retos, se argumenta en la necesidad de generar confianza pública y mantener la legitimidad de las políticas de caudales ambientales, mostrando resultados

concretos que demuestren beneficios. La declaración también puso énfasis en los impactos del cambio climático sobre los ecosistemas hidrodépendientes y advirtió que su degradación se intensificará si no se actúa con rapidez. Aunque el VI Informe del IPCC (2021) no menciona explícitamente a los caudales ambientales, sus conclusiones sobre vulnerabilidad de ecosistemas y escenarios futuros refuerzan las prioridades de la declaración, sobre todo en la conservación de humedales, cuya pérdida global podría superar el 50 % hacia finales de siglo (Xi *et al.*, 2020).

La vulnerabilidad hídrica de la cuenca del río Atuel la ubica como una región de especial prioridad para la planificación de los recursos hídricos (más por un problema de planificación que de ausencia del recurso). El agua, como recurso finito, es utilizada intensivamente en la entidad político-administrativa donde se ubica su cuenca alta y media (Mendoza), sin embargo, las sociedades y ecosistemas de la cuenca baja, al ubicarse en otra entidad (provincia de La Pampa), registran la ausencia de flujos desde hace años. Lo anterior representa una realidad de esta y muchas otras regiones en el mundo, donde la franja entre la oferta y demanda de agua es muy estrecha, siempre para detrimento del mantenimiento de los ecosistemas.

Si bien en este estudio no se consideró la calidad de agua como parámetro, es importante que sea tomado en cuenta dentro de la implementación de los caudales ambientales, los cuales no solo son importantes respecto a su cantidad. En la zona de estudio, los escurrimientos remanentes desde el oasis sur (registrados en Carmensa) podrían no tener óptima calidad, posiblemente debido al uso de agroquímicos en los cultivos.

De esta forma, para esta y otras cuencas en condiciones similares, es imprescindible la implementación de políticas que permitan el flujo de caudales ambientales adecuados, no sólo para mantener las actividades socioeconómicas y ambientales de las cuencas alta y media, sino también hacia la cuenca baja, reconociendo a estos espacios como un “todo-continuo”, sin la interacción negativa de los límites político-administrativos.

En este estudio se plantea un análisis integral de la cuenca del río Atuel, poniendo especial atención en su sector de cuenca baja, con el fin de evaluar tanto su situación

actual, perspectivas futuras y las recomendaciones para su posible remediación y conservación. El enfoque se sustenta en los principios y lineamientos establecidos por la Declaración de Brisbane (2018), los aportes científicos y escenarios presentados en el VI Informe del IPCC (2021) respecto al Cambio Climático, así como el papel que desempeñan los bañados y humedales en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Estos últimos, destacados y promovidos en la propia Declaración de Brisbane (Arthington *et al.*, 2018), representan un marco clave para comprender la relevancia ecológica, social y económica de estos ecosistemas en la planificación y gestión sostenible de la cuenca.

Un buen ejemplo de una región donde se consigue esta situación se corresponde con la cuenca del río Atuel (centro-oeste de la República Argentina), donde, dadas las escasas precipitaciones (Sarafian, 2006), el abastecimiento hídrico agrícola y urbano proviene casi en su totalidad de los caudales del río homónimo (cuyas aguas escurren principalmente desde los deshielos glaciares y néveos de los Andes).

Como consecuencia de la elevada demanda hídrica en la cuenca del mencionado río, durante mediados del siglo XX el mismo fue embalsado en cuatro diques, los cuales tienen el propósito de regular los caudales, proveer del recurso hídrico a las comunidades y oasis aguas abajo y producir hidroelectricidad, alterando de esta forma el régimen natural de escurrimiento de este, y, por ende, de los ecosistemas de las cuencas bajas.

Cercano al cierre de la cuenca y entre los límites de las provincias argentinas de Mendoza y La Pampa, existe una serie de bañados y zonas bajas inundables, donde la biodiversidad contrasta con la aridez de la pampa circunvecina. Dichos bañados se abastecen principalmente de los caudales del río Atuel, estando alterados actualmente por uso consuntivo aguas arriba. Adicionalmente, la magnitud de uso del caudal del río es motivo de litigio entre las mencionadas provincias, cuyo reclamo principal por parte de La Pampa exige mayores niveles de agua en el río, tanto para recomposición del ecosistema, como para el aprovechamiento agrícola aguas abajo (Figura 1.1).

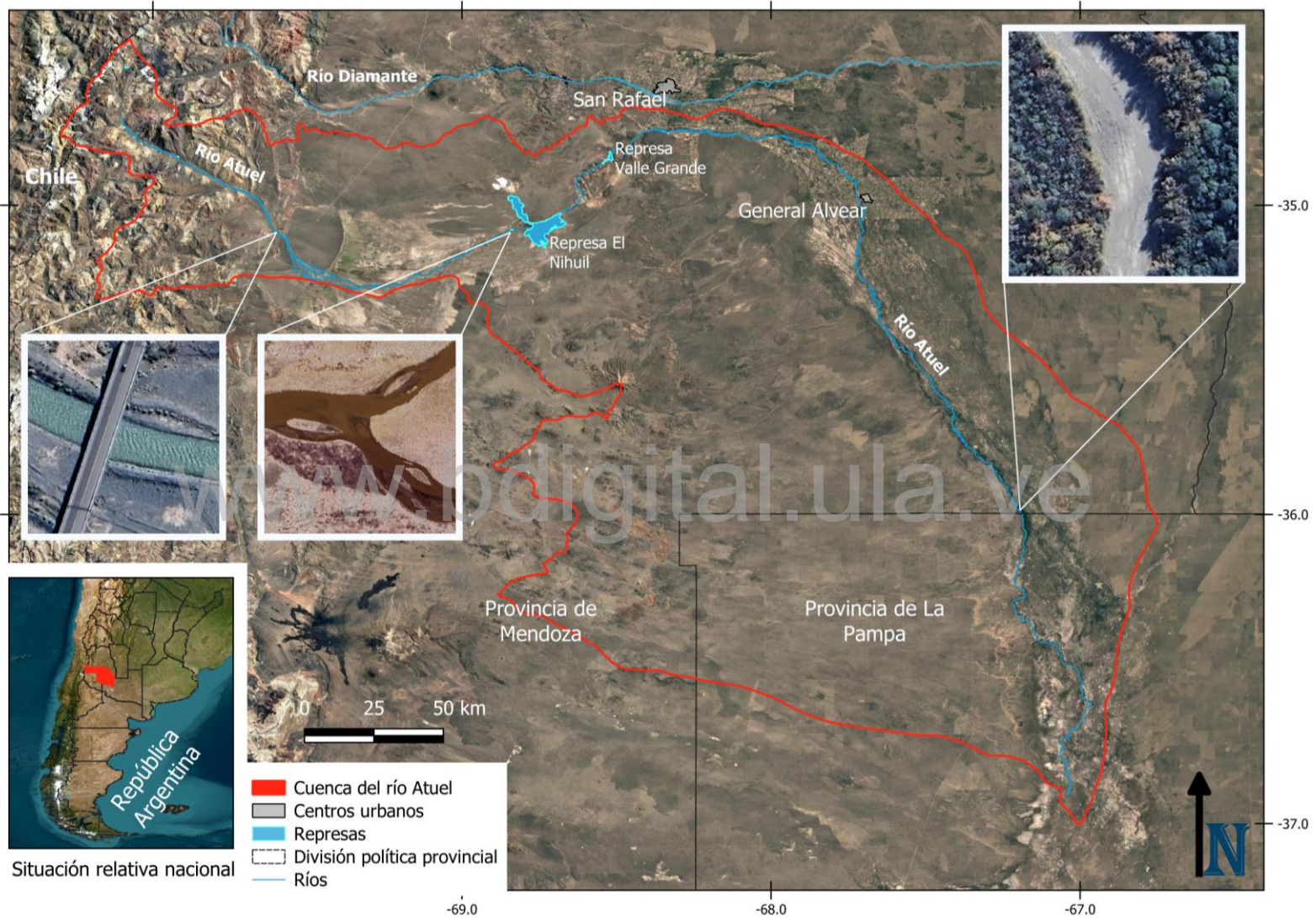


Figura 1.1. Área de estudio. Cuenca del río Atuel. Las imágenes insertadas (derivadas del mapa base de Google *Satellite*) denotan la ausencia general de agua hacia la cuenca baja (límite con la Provincia de La Pampa).

Dadas las premisas anteriores y a través del enfoque mixto (cuali – cuantitativo), la investigación se orientará a analizar los caudales ambientales con metodologías hidrológicas del río Atuel, haciendo énfasis en los caudales que deberían estar disponibles para la región de bañados de la cuenca baja, principal elemento natural demandante del caudal ambiental de la zona en cuestión.

El interés para abordar la investigación radica en la necesidad de encontrar resultados eficientes en cuanto a la forma de estudiar los caudales ambientales, cuya importancia para las sociedades (como objetivo a alcanzar en la preservación del recurso) y en especial en lo concerniente a los ámbitos naturales, se centra en el llamado internacional actual para su identificación, cálculo y conservación.

La investigación se estructura en 8 capítulos principales. En este primer Capítulo introductorio se plantea el problema central, la justificación, los objetivos, la hipótesis, y los alcances y limitaciones. En el segundo se presentan los antecedentes y marco teórico. Para el tercer capítulo se establece el marco metodológico seguido y la descripción del área de estudio, haciendo especial énfasis en el conflicto por el agua entre las provincias de Mendoza y La Pampa.

Posteriormente, el Capítulo 4 aborda la base de información hidrológica disponible, evaluando su estado, calidad y consistencia a través de un análisis exploratorio, análisis de datos faltantes y verificación de supuestos estadísticos. El Capítulo 5 aplica esta información en el cálculo de caudales ambientales bajo un enfoque hidrológico, utilizando indicadores de alteración hidrológica (IHA) y presentando resultados específicos para el río Atuel.

Finalmente, el Capítulo 6 discute acciones y recomendaciones para implementar caudales ambientales, alineándolos con marcos internacionales como la Declaración de Brisbane, integrándolos en la planificación hídrica y vinculándolos con los desafíos del cambio climático. El trabajo cierra con el séptimo y octavo capítulo, con los resultados y discusiones, y las conclusiones que sintetizan los hallazgos y aportes más relevantes, respectivamente.

1.2. Planteamiento del problema y justificación

El régimen hidrológico del río Atuel responde a los ciclos de acumulación y fusión de hielo y nieve en los Andes, presentando los picos más elevados de su hidrograma anual durante la fase cálida de primavera-verano, y los menores caudales durante el otoño-invierno (Sarafian, 2006; Cazevane, 2015). Evolutivamente, los ecosistemas fluviales se adaptaron a esta variabilidad, dependiendo más del agua proveniente de los ríos en cuestión que de las escasas precipitaciones anuales en el llano.

Las condiciones climáticas añaden dos características principales a los ríos de la zona, los cuales pasan de ser simples colectores de agua a convertirse en un elemento esencial para el establecimiento humano, así como las condiciones de limitada perennidad en sus regímenes cuando sus caudales son alterados (Cazevane, 2015).

Con la colonización, las zonas bajas de la cuenca media del río Atuel se poblaron y alrededor de estos se formaron oasis irrigados, conformando así sistemas urbanos y agrícolas cada vez más grandes, teniendo que abastecer en la actualidad cerca de 130.000 ha de cultivos dispuestos en el oasis irrigado (Departamento General de Irrigación DGI, 2020), y más de 60.000 habitantes entre las partes de los departamentos mendocinos y pampeanos que lo conforman (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos INDEC, 2020). Es importante resaltar que el impacto del control de caudales por parte de los diques mencionados, producen, entre otros efectos, la atenuación de pulsos de inundación, vitales para los ecosistemas de humedales aguas abajo (Sosa, 2012).

Si bien los asentamientos humanos y la irrigación permitieron crear colonias agrícolas artificiales en las planicies aluviales, los emplazamientos de oasis naturales se ubican sobre las planicies de confluencia entre el río Atuel y el río Desaguadero. La disminución de la pendiente hace que el río afluya en patrón anastomosado, formando los esteros y bañados correspondientes (Cazevane, 2015).

Teniendo en cuenta la gran demanda de agua por los datos anteriores, y la enorme presión humana sobre el entorno, los ecosistemas de humedales en la cuenca baja del río Atuel fueron secándose progresivamente con el tiempo, estando reducidos en la actualidad a pequeñas lagunas desconectadas entre sí y a un entorno cada vez más

degradado por la escasez de agua, aunque raras veces alimentados por pulsos extraordinarios de inundación como parte de crecidas excepcionales (Magnani, 2016), trayendo como consecuencia la invasión de especies arbóreas y animales oportunistas y la salinización de las tierras circundantes.

Si bien la zona de humedales no está intervenida de forma espacial, la intervención antrópica del recurso hídrico aguas arriba (represamiento del río, agricultura y abastecimiento urbano principalmente), ocasiona su degradación, así como también la de los ecosistemas ribereños que acompañan al Desaguadero hasta su desembocadura sobre el Colorado.

Cabe destacar que con la última declaración de Brisbane sobre caudales ambientales (Arthington *et al.*, 2018), el término fue ampliado de caudales “ecológicos” a “ambientales”. Dicho cambio obedece a la incorporación de factores antrópicos (sobre todo en ambientes rurales), como beneficiarios de los caudales mínimos que deben circular por un cauce para no generar un detrimento de la calidad de vida y el bienestar.

En este sentido, y dado el desmejoramiento de las condiciones de hábitat de los lugareños, la disminución paulatina de los caudales del río Atuel generó que desaparecieran numerosos brazos del río en la zona de sus bañados (Figura 1.2). De acuerdo con Cazevane (2015), el último ramal del río Atuel se extinguió en 1947 con la construcción del complejo hidroeléctrico El Nihuil (hoy Nihuil 1) en la cuenca media. Esto generó el abandono de miles de hectáreas de cultivos (del lado pampeano) y pasturas, así como también el detrimento de actividades como la ganadería y el desplazamiento de al menos la mitad de la población de la cuenca baja hacia otros sectores con mayores oportunidades.

Dado que no existe una reglamentación legal para normar o fijar un valor mínimo de caudales que deben circular por los ríos para satisfacer las demandas ambientales de los ecosistemas, es necesario conocer inicialmente y desde el punto de vista hidrológico qué cantidad de agua debe ser destinada a los consumos ambientales de agua y, por ende, qué porción del recurso debe dejar de ser utilizada como parte de los usos consuntivos de agua en las ciudades y oasis circundantes.

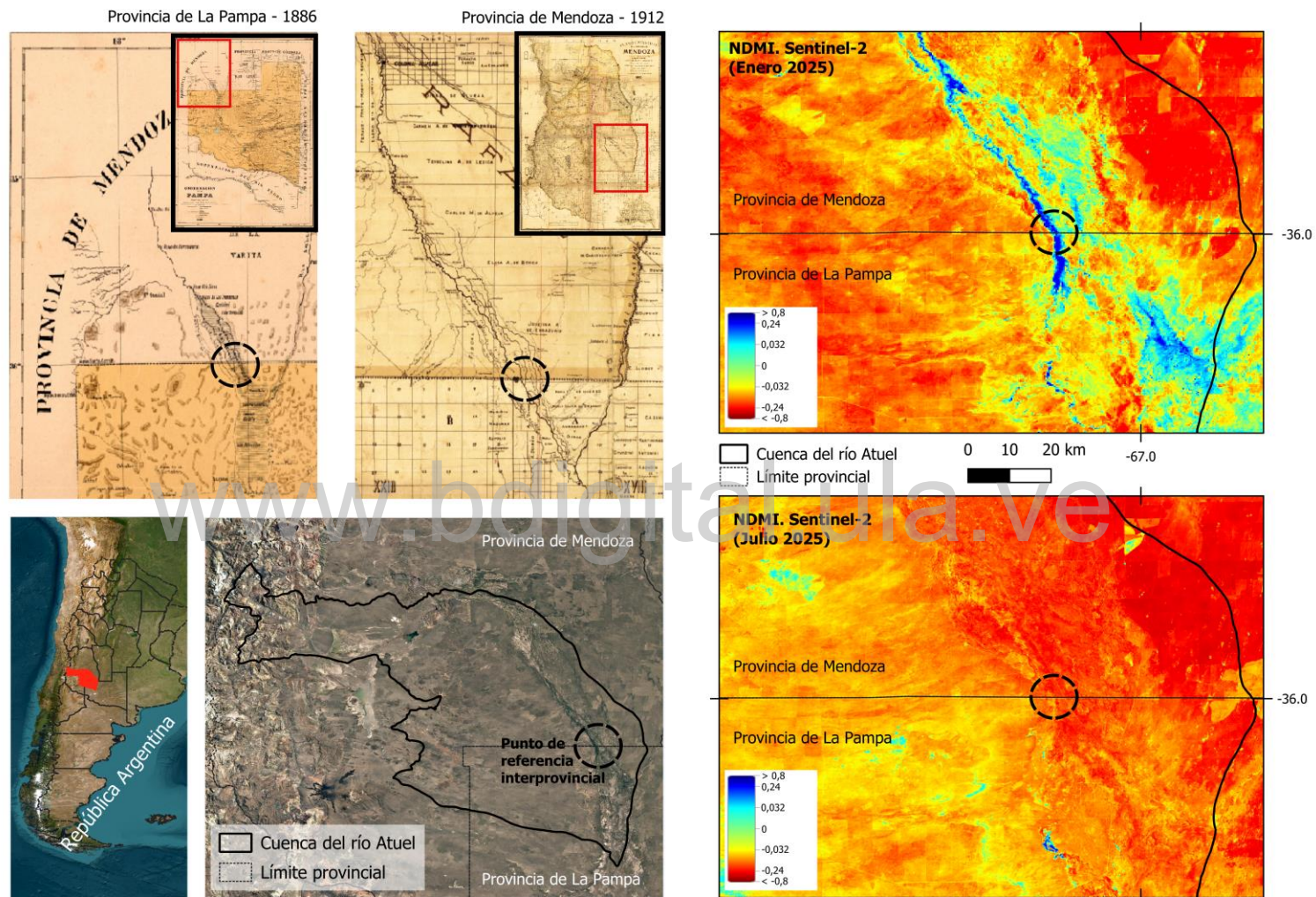


Figura 1.2. Mapas históricos de las provincias de La Pampa y Mendoza (IGN, 2025) versus índices diferenciados de humedad (NDMI) para la zona de confluencia interprovincial (2025), evidenciando la pérdida de continuidad fluvial del río Atuel.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Establecer la oferta hídrica ambiental del río Atuel, a partir de la estimación de los caudales ambientales empleando metodologías hidrológicas, con énfasis en la región de bañados de la cuenca baja.

1.3.2. Objetivos específicos

Analizar el estado, calidad y consistencia de la información hidrológica disponible para la evaluación de los aspectos estadísticos relacionados con su estructura y homogeneidad.

Comparar los caudales ambientales del río Atuel por distintas metodologías hidrológicas en el marco de la determinación de la oferta hídrica ambiental.

Proponer acciones a tomar en función de las potencialidades y retos sobre la oferta hídrica ambiental de la cuenca del río Atuel, en cuanto a sus aportes de caudal ambiental a los ecosistemas de bañados de las zonas bajas.

1.4. Importancia y justificación del estudio

La justificación de lo anterior viene dada por el valor de la biodiversidad de los bañados de las zonas bajas, los cuales poseen alta variedad de especies vegetales y animales de valor patrimonial estratégico (Cazevane, 2004), además de la necesidad de preservar el estilo de vida de los que aún sean moradores de dichas zonas afectadas.

Chaves *et al.* (2017) exponen que los caudales ambientales se determinan en función de un objetivo a lograr (generalmente: mantener la integridad del ecosistema y asegurar los servicios ecosistémicos), sin representar un objetivo en sí mismo, por tanto, estos serán variables de acuerdo con la situación ambiental sobre la que se aplicarán

Adicionalmente y desde el punto de vista de la importancia temática, la declaración de

Brisbane sobre caudales ambientales (Arthington *et al.*, 2018) establece los lineamientos y las acciones de investigación que se deben desarrollar sobre cada uno, siendo notable (para la presente investigación) el primero de ellos como:

“Los caudales ambientales son esenciales para proteger y restaurar la biodiversidad, ecosistemas acuáticos y los servicios ecosistémicos que proveen a la sociedad:

Todos los ecosistemas acuáticos necesitan un flujo ambiental dinámico o régimen de agua para mantener su biodiversidad y servicios ecológicos. Los caudales varían con el clima, factores del paisaje e influencias humanas a través del tiempo. Los patrones hidrológicos gobiernan el hábitat, biodiversidad, productividad y la resiliencia de ecosistemas acuáticos. Hábitats acuáticos, de humedales y ribereños saludables a menudo se expanden durante las fases húmedas naturales, pero pueden fragmentarse o disminuirse en tamaño, en función de los procesos naturales de las fases secas, y como resultado de la extracción y desviación de agua por acción humana. Muchos ríos funcionalmente intactos se conectan a vastas planicies aluviales y aportan la entrada de agua dulce y sedimentos a las zonas costeras. Estos procesos dinámicos sostienen servicios ecológicos importantes y de gran alcance que, a su vez, mantienen culturas, economías, medios de vida sostenibles y bienestar”.

Para lo anterior, los autores citados, así como Barchiesi *et al.* (2018), recomiendan profundizar las investigaciones sobre la cuantificación de los caudales ambientales y sus relaciones con los servicios ecosistémicos, así como también reconocerlos como un componente central de la planificación de los recursos hídricos y como una prioridad para la protección de los ecosistemas y la consecución de los objetivos ecológicos, para lo cual, en primera instancia, la presente investigación se centrará en el análisis hidrológico de dichos flujos, pudiendo servir como base *a posteriori* para futuras investigaciones de índole ecológica o de hábitat.

Por su parte, en la Figura 1.2 posterior (porción superior izquierda), se evidencia la existencia de canales continuos del río Atuel en las cercanías con el límite provincial

entre Mendoza y La Pampa. Los mapas en cuestión (1886-1912) representan la zona de bañados (humedales) en un momento previo a la construcción de los sistemas de represas aguas arriba (década de 1940). Esto representa un sistema hidrográfico con bajo impacto antrópico, cuyos flujos del río ingresaban al territorio pampeano.

Para el 2025 (mapas temáticos de la porción derecha), se observa la diferencia entre enero (arriba) y julio (abajo) del índice normalizado diferencial de humedad (*Normalized Difference Moisture Index* – NDMI, Sentinel-2), cuyos tonos azulados denotan mayor presencia de humedad (y viceversa para tonos rojizos). Durante el verano austral, los pulsos de crecida y los escurrimientos desde el oasis irrigado imprimen humedad (no inundable) a los ecosistemas ribereños. Sin embargo, con el NDMI para julio (invierno austral), se observa la interrupción de la humedad en la zona de bañados, lo que en parte puede ser explicado por la merma natural de los caudales en dicho período, pero principalmente, por el efecto regulador de las represas aguas arriba.

Esta caracterización del problema principal será abordada a través los objetivos planteados, la hipótesis de trabajo, y la metodología propuesta, con el fin de caracterizar el régimen hidrológico del río Atuel, realizar los cálculos de caudales ambientales (método hidrológico), y recomendar medidas de planificación en el manejo del agua en la cuenca de estudio y sus implicaciones para las provincias que comparten sus aguas (Mendoza y La Pampa).

1.5. Alcances

Con el desarrollo de la investigación se pretende obtener un panorama claro acerca de las metodologías hidrológicas que se pueden utilizar para el cálculo de los caudales ambientales en la cuenca de estudio, así como también el estado de este recurso y su importancia en la región, pudiendo finalizar con algunas recomendaciones acerca de las pautas que podrían seguirse en la zona para satisfacer y mantener en los cauces las demandas ambientales de agua.

1.6. Limitaciones

En cuanto a las limitaciones, es notable resaltar que, en la zona, la cantidad y calidad de los datos hidrométricos no tienen amplia cobertura espacial o temporal, sobre todo a lo largo de los ríos considerados y con especial énfasis en los bañados de la cuenca baja. Si bien, el río Atuel cuenta con una estación hidrométrica de amplia longitud temporal de registros (situándose pocos kilómetros aguas arriba de sus principales represas), sería deseable e importante poder contar con estaciones de larga medición aguas abajo de las mismas y a lo largo de su trayecto, con el fin de tener un panorama más claro acerca del comportamiento de este hecho. Al estar denegada esta posibilidad, se opta por trabajar con las estaciones disponibles de mayores registros y aclarar pertinentemente acerca de la incertidumbre que pueda generarse por los resultados hallados, a fin de priorizar la elección de un período de trabajo común a las estaciones disponibles sobre la longitud óptima de las series temporales a utilizar.

1.7. Hipótesis de trabajo

Las metodologías hidrológicas para determinar caudales ambientales permiten discernir objetivamente y de forma preliminar (sin incluir los requerimientos de hábitat), la cantidad mínima de agua que debe circular por un río o canal para asegurar las funciones bióticas y abióticas del mismo con relación a su entorno (natural o antropizado).

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Para abordar la problemática del uso irracional de los recursos hídricos y el deterioro de los ecosistemas acuáticos, se utilizan los caudales ambientales como herramienta de la gestión integrada de los mismos (Dyson *et al.*, 2003). Actualmente, se reconocen a los caudales ambientales como esenciales para la salud de los ecosistemas y el bienestar humano, lo que ha sido mundialmente reconocido a través de la Conferencia de Brisbane, realizada en Australia en 2007 y su modificación del 2018 (Arthington *et al.*, 2018). La aplicación de caudales ambientales requiere de un involucramiento social y un marco institucional y normativo, así como de políticas claras y efectivas (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura UNESCO, 2014). Tharme (2003) explica que el reconocimiento en las alteraciones hidrológicas de los ríos y cuerpos de agua a escala global, resultante en la degradación del ambiente, dan paso a una ciencia relacionada al estudio de los caudales ambientales, término relacionado a la cantidad y calidad de agua requerido para la conservación del ecosistema y que mejor imite el régimen de caudales naturales (Confederación Hidrológica del Duero CHD, 2007).

Con la Declaración de Brisbane (2007) se incrementaron los trabajos y consensos alrededor de la importancia de los caudales ambientales sobre el mantenimiento y conservación de los regímenes hídricos naturales. De esta forma y con los años, la ciencia de los caudales ambientales se ha robustecido en trabajos específicos sobre el terreno (Poff *et al.*, 2017) y a diferentes escalas de trabajo (King y Brown, 2010; O'Brien *et al.*, 2017). Asimismo, el concepto ha cobrado importancia en estudios de países desarrollados y en vías de desarrollo (Kennen *et al.*, 2018), con esfuerzos para promover el manejo desde la gobernanza y la transdisciplinariedad entre grupos científicos y sociedad (Pahl-Wostl *et al.*, 2013; Conallin *et al.*, 2017).

En Latinoamérica resalta la experiencia de Colombia, desde cuyo gobierno nacional se ha propuesto la Guía Metodológica para la Estimación del Caudal Ambiental, la cual pretende orientar un uso sostenible del recurso hídrico, con miras a atender las

necesidades humanas y los requerimientos de los ecosistemas. A través de dicha propuesta, se recopilaron y analizaron diversas metodologías nacionales e internacionales para la estimación de caudales ambientales, identificando fortalezas y limitaciones en cada una de ellas, consolidando finalmente una metodología integral que involucra aspectos geomorfológicos, hidráulicos, de calidad del agua, ecológicos y que reconoce la importancia de todo el régimen de caudales en el sostenimiento de los ecosistemas y los servicios ecosistémicos (Minambiente, 2018).

Jurídicamente para la Argentina y en el marco del Seminario Internacional de Cambio Climático, Política Fiscal Ambiental y Caudales Ambientales (COHIFE, 2015), se estableció el significado del Artículo 1° de la Ley 26.688 del Régimen de Gestión Ambiental de Aguas, insistiendo en que el caudal ambiental *“es aquel concertado o regulado en una clausura a los fines de garantizar la existencia del río como tal”*. Por su parte, la Asociación de Inspecciones de Cauces (ASIC, s/f) establece que, para la provincia de Mendoza (donde se localiza la cuenca), la legislación provincial concerniente a las aguas, no consideran tópicos tales como los servicios ecológicos, las necesidades de conservación de los ecosistemas (caudales ecológicos) y principios que satisfagan los requerimientos de las transformaciones estratégicas del siglo XXI.

Dada la importancia en la determinación y consideración de los caudales ambientales en el manejo de los recursos hídricos de cualquier zona, es vital establecer criterios de planificación y gestión integral del recurso hídrico y en especial de los caudales ambientales a través de una serie de metodologías creadas según las características morfológicas, hidrológicas, hidráulicas, físicas y biológicas de cada región (Lozano *et al.*, 2010; Del Pilar y Corradine, 2014).

“La ausencia de estudios de caudales ambientales pone en verdadero riesgo la existencia de ecosistemas, personas y economías” (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources IUCN, 2003), situación que puede ser aún más severa si una zona como el centro – oeste argentino posee un clima árido, lo cual lo hace propenso a recurrentes y severas sequías que pueden poner en riesgo el equilibrio hídrico y ecológico de los humedales y la región (Sosa *et al.*, 1999).

La convención RAMSAR, de la cual Argentina es parte con más de 20 sitios, insta a las partes contratantes a impedir las progresivas degradaciones de los humedales (Ramsar, 2015), mientras que en las últimas Conferencias de Partes Contratantes de Ramsar (COP 10, 11, 12 y 13) se reafirmó el compromiso de las partes de evitar los impactos negativos en las características ecológicas de los sitios Ramsar como primer paso de las estrategias para impedir la pérdida de los mismos (Ramsar, 2015a; Ramsar, 2015b; Ramsar, 2015c; Ramsar, 2015d) mediante cuatro objetivos estratégicos en su Plan Estratégico de Ramsar para 2016- 2024: (i) hacer frente a los factores que impulsan la pérdida y degradación de los humedales, (ii) llevar a cabo una conservación y un manejo eficaz de la red de sitios Ramsar, (iii) realizar un uso racional de todos los humedales y (iv) mejorar la aplicación de los objetivos en función de las necesidades de cada país (Ramsar, 2016).

Dentro de las metodologías y herramientas que la modernidad desarrolla en la actualidad se encuentran los sistemas de información geográficos (SIG), que en concordancia con Lowry (2007), pueden llegar a ser una herramienta valiosa para las aplicaciones de inventario, evaluación y monitoreo de humedales, así como también de los eventos climáticos que potencian su degradación (como las sequías), existiendo para su estudio un gran número de metodologías y técnicas especializadas, basadas principalmente en estadísticas de sus datos y técnicas avanzadas (OMM, 2006).

Si bien los Bañados del río Atuel no son parte de la convención internacional Ramsar, desde la provincia de La Pampa han propuesto designar a la zona bajo una figura de protección, con el nombre de Ñochilei Co. Adicionalmente, la solicitud ante dicha convención se realizó mediante 25.000 firmantes, solicitando que el lugar sea incluido como un humedal de protección e importancia internacional. Si bien el estatus no ha sido otorgado y la zona tiene un nivel de degradación avanzado, la restitución de los caudales ambientales propiciaría inicialmente la restitución de algunas condiciones bióticas actualmente perdidas, además del restablecimiento paulatino de las actividades económicas y del bienestar a los pobladores de dichas zonas (D'Atri, 2016).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Análisis exploratorio de datos

La aplicación del análisis exploratorio de datos desempeña un papel fundamental en el ámbito de la investigación, ya que permite obtener información valiosa y significativa a partir de conjuntos de datos. Este enfoque analítico se utiliza para examinar y comprender la estructura, las relaciones y las características clave de los datos, sin partir de suposiciones previas o hipótesis establecidas. De esta forma, se logra finalmente descubrir patrones, tendencias y datos atípicos que pueden conducir a nuevas ideas y preguntas de investigación.

El análisis exploratorio de datos puede brindar adicionalmente una visión inicial y profunda del conjunto de datos, lo que les permite tener una comprensión más sólida y contextualizada del estudio.

En resumen, una de las ventajas clave del análisis exploratorio de datos es identificar patrones o relaciones que pueden haber pasado desapercibidos en un enfoque más estructurado o teórico. Esto proporciona una base sólida para formular nuevas hipótesis o plantear nuevas líneas de investigación. Además, este proceso también es útil para validar o refutar las hipótesis existentes, proporcionando una evaluación objetiva de la evidencia disponible.

Otra importancia del análisis exploratorio de datos radica en su capacidad para detectar errores, inconsistencias o datos faltantes en el conjunto de datos. Esto permite realizar correcciones y mejoras antes de realizar análisis más avanzados o modelado estadístico, evitando así conclusiones incorrectas o sesgadas basadas en datos problemáticos.

A través de los datos de cinco estaciones hidrométricas, la aplicación del análisis exploratorio de datos proporciona una visión en profundidad de los registros, revelando patrones y tendencias, y facilitando la detección de anomalías y errores.

La metodología y resultados de este capítulo sentaron la base para la publicación del artículo "Hydrological alterations in semi-arid river systems: an exploratory approach to

natural and anthropogenic drivers” desarrollado por Bastidas et al. (2024).

2.2.2. Los caudales ambientales en el marco de la oferta hídrica ecológica

Los factores que determinan la producción biótica en un ecosistema fluvial son: el régimen de caudales, el hábitat, la calidad del agua, y los flujos de energía. Estos factores se interrelacionan entre sí para formar el contexto natural del río, así como el equilibrio respecto a los servicios ecosistémicos que provee. Bajo este contexto, el caudal (principalmente entendido desde su cantidad), es considerado como uno de los factores organizadores de los procesos físicos y ecológicos, cuyos cambios en su régimen pueden repercutir sobre el estado y conservación de sus características ecológicas (Tharme, 2003).

De esta forma, es fundamental comprender que la variabilidad propia del flujo, asociada a las características concretas de cada territorio y demandas y reservas impuestas por gestores y usuarios, definen cual es el modelo de manejo de cuencas a adoptar. Para evaluar la variabilidad de la corriente y su impacto, se han desarrollado un amplio número de indicadores relacionados con la determinación de caudales ambientales y parámetros de la alteración hidrológica (Tharme, 2003).

Los caudales ambientales son la cantidad mínima de agua necesaria para mantener los ecosistemas sin causar daño a su condición original (Arthington *et al.*, 2018). En regiones con abundante agua, los conflictos entre el uso humano y los usos ecológicos son mínimos, permitiendo que los ecosistemas sigan funcionando correctamente (excepto por los problemas de contaminación derivados de la acción antrópica). Sin embargo, en áreas con escasez de agua, la biota se encuentra constantemente al límite de su supervivencia. Además, factores como la presión humana por el consumo de agua y la variabilidad climática natural pueden reducir los caudales ambientales por debajo de su límite natural, lo que afecta negativamente la salud de los ecosistemas y su capacidad para proporcionar servicios ecosistémicos (Lozano *et al.*, 2010).

La significativa alteración del régimen de caudales y el escaso o nulo caudal circulante en el cauce aguas abajo de su aprovechamiento, constituye el principal problema para la conservación de los ecosistemas de humedales en la región y de dificultad para una posterior compatibilización de los usos actuales y futuros con el buen estado de los ríos.

La Declaración de Brisbane y la Agenda de Acción Global sobre los Caudales Ambientales establecen los estándares actuales para la protección y restauración de los caudales ambientales. Estas iniciativas describen la cantidad, duración y calidad del agua necesaria para mantener los ecosistemas acuáticos, los cuales a su vez sustentan las culturas humanas, economías y estilos de vida sostenibles. La declaración enfatiza la importancia de proteger y restaurar los valores sociales asociados con la salud, resiliencia, biodiversidad acuática y los servicios ecológicos, económicos y culturales que los ecosistemas proporcionan (Arthington *et al.*, 2018).

En el centro-oeste argentino, donde las precipitaciones son escasas, el suministro de agua para la agricultura y las áreas urbanas depende principalmente de las escorrentías andinas provenientes de los deshielos glaciares y nieve de la alta montaña. Como resultado de la elevada demanda hídrica en las cuencas de la región, los humedales de las zonas bajas del Atuel han experimentado procesos de desecación desde hace décadas. Esto ha llevado a la pérdida de un valioso patrimonio natural y ha afectado el modo de vida de las comunidades humanas que se asientan en sus márgenes de lado mendocino y pampeano.

Ante esta situación, es fundamental determinar los caudales ambientales necesarios para restaurar y mantener las condiciones ecológicas y sociales de los humedales. El enfoque del estudio se basa en el cálculo y análisis de caudales ambientales utilizando metodologías hidrológicas, como el análisis de registros históricos de caudal. La protección y restauración de los caudales ambientales en esta región se considera de gran importancia para preservar el patrimonio natural, la cultura local y garantizar el bienestar de las personas.

De esta forma, y haciendo énfasis sobre los caudales ambientales, se realizó una caracterización hidrológica del régimen fluvial sobre las cuatro estaciones hidrométricas

consideradas (Puente Sosneado, Loma Negra, La Angostura y Cañada Ancha). Posteriormente, y con base en metodologías hidrológicas sobre la estación La Angostura (la cual se ubica sobre el río Atuel antes de ser represado en El Nihuil), se estimaron los flujos de agua que deben circular por el río Atuel a su paso por la zona de humedales y hacia la provincia de La Pampa con fines ecológicos y socioeconómicos (caudal ambiental).

Estas metodologías hidrológicas suponen implícitamente que los objetivos ambientales (por ejemplo, para conservación de humedales y bañados) se encuentran próximos a la estación hidrométrica sobre las que los caudales ambientales fueron calculados. De esta forma, no hay consideración directa de las distancias que los separan, sobre las cuales pueden ser significativas las pérdidas de agua a través de la infiltración y evaporación en cauce (Gu y Deutschman, 2001; Healy, 2010).

Vinculado a los volúmenes de agua evaporados o infiltrados, Costa *et al.* (2012) exponen que las pérdidas en cauce resultan en importantes aportes en los intercambios con el subsuelo y los ecosistemas riparios. De esta forma, no pueden reconocerse como pérdidas en sí mismas, sino como parte del ciclo hidrológico natural. Sin embargo, el término “pérdidas” se expone debido a que los volúmenes infiltrados o evaporados en cauce no son considerados dentro del cálculo de caudales ambientales.

Si bien en la cuenca del río Atuel no existen estudios detallados acerca de las pérdidas por infiltración y evaporación, algunas estimaciones de entes oficiales entre la cuenca alta-media y baja las sitúan entre 25 y 30 % (Prensa Gobierno de Mendoza, 2015; DGI, 2019). Estos volúmenes de agua son significativos dada la distancia entre La Angostura (cuenca media) y Carmensa (cuenca baja).

Estas pérdidas de agua implican que los caudales ambientales tendrían que ser incrementados en dichos porcentajes, de modo que los valores calculados por las metodologías hidrológicas transiten por el cauce y puedan llegar al objetivo ecológico de destino (Bañados del Atuel – estación Carmensa).

Como medida de comparación, los resultados hallados fueron contrastados con los caudales remanentes registrados en la estación Carmensa (al comienzo del sistema de

humedales o bañados). Asimismo, el contraste también se realizó en función de los valores de caudal que expusieron las provincias en litigio por el río Atuel (provincias de Mendoza y La Pampa) luego del fallo de la Corte Suprema de Justicia de la Nación Argentina (Julio de 2020), con el fin de establecer las similitudes o diferencias en cuanto al caudal del controvertido río.

2.2.3. Recomendaciones para la implementación de los caudales ambientales

La Declaración de Brisbane surgió en 2007 durante el 10º Simposio Internacional de Ríos y la Conferencia Internacional de caudales ambientales, celebrados en Australia, como un acuerdo internacional que reunió a más de 750 especialistas de distintas disciplinas y regiones del mundo para establecer un marco común en la protección y restauración de los caudales ambientales. Estos se definieron como la cantidad, frecuencia y calidad de los flujos hídricos necesarios para mantener ecosistemas de agua dulce y estuarios, así como el sustento y bienestar humano que dependen de ellos. En 2017, en el marco del 20º Simposio Internacional de Ríos, la declaración fue revisada y ampliada, y un año después Arthington *et al.* (2018) publicaron una actualización que recogía el avance desde 2007, subrayando la urgencia de implementar acciones para la conservación de ecosistemas acuáticos frente a amenazas como el riego intensivo, la contaminación y la construcción de represas, especialmente en cuencas ecológicamente sensibles.

Esta versión de 2018 incorporó una Agenda de Acción Global alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que propuso medidas legislativas, regulatorias, de manejo, investigación y vinculación con actores clave, con un enfoque participativo y equitativo que considerara a los caudales ambientales como un bien común. Entre las recomendaciones se incluyó el seguimiento de indicadores como el estrés hídrico, los cambios en la extensión de ecosistemas vinculados al agua, la reducción de la pobreza, la salud, el bienestar y el manejo sostenible de los recursos. Asimismo, se reforzó el carácter socioecológico de los ríos, destacando el papel de las culturas y comunidades en su cuidado, a la vez que señalaron desafíos persistentes para su implementación, como la ausencia de marcos legales sólidos, la gobernanza fragmentada en cuencas

transfronterizas, la variabilidad creciente en la disponibilidad de agua bajo el cambio climático y la escasa consideración de aspectos sociales y económicos.

En línea con estos retos, se argumenta en la necesidad de generar confianza pública y mantener la legitimidad de las políticas de caudales ambientales, mostrando resultados concretos que demuestren beneficios. La declaración también puso énfasis en los impactos del cambio climático sobre los ecosistemas hidrodependientes y advirtió que su degradación se intensificará si no se actúa con rapidez. Aunque el VI Informe del IPCC (2021) no menciona explícitamente a los caudales ambientales, sus conclusiones sobre vulnerabilidad de ecosistemas y escenarios futuros refuerzan las prioridades de la declaración, sobre todo en la conservación de humedales, cuya pérdida global podría superar el 50 % hacia finales de siglo (Xi *et al.*, 2020).

La vulnerabilidad hídrica de la cuenca del río Atuel la ubica como una región de especial prioridad para la planificación de los recursos hídricos (más por un problema de planificación que de ausencia del recurso). El agua, como recurso finito, es utilizada intensivamente en la entidad político-administrativa donde se ubica su cuenca alta y media (Mendoza), sin embargo, las sociedades y ecosistemas de la cuenca baja, al ubicarse en otra entidad (provincia de La Pampa), registran la ausencia de flujos desde hace años. Lo anterior representa una realidad de esta y muchas otras regiones en el mundo, donde la franja entre la oferta y demanda de agua es muy estrecha, siempre para detrimento del mantenimiento de los ecosistemas.

Si bien en este estudio no se consideró la calidad de agua como parámetro, es importante que sea tomado en cuenta dentro de la implementación de los caudales ambientales, los cuales no solo son importantes respecto a su cantidad. En la zona de estudio, los escurrimientos remanentes desde el oasis sur (registrados en Carmensa) podrían no tener óptima calidad, posiblemente debido al uso de agroquímicos en los cultivos.

De esta forma, para esta y otras cuencas en condiciones similares, es imprescindible la implementación de políticas que permitan el flujo de caudales ambientales adecuados, no sólo para mantener las actividades socioeconómicas y ambientales de las cuencas

alta y media, sino también hacia la cuenca baja, reconociendo a estos espacios como un “todo-continuo”, sin la interacción negativa de los límites político-administrativos.

En este capítulo se plantea un análisis integral de la cuenca del río Atuel, poniendo especial atención en su sector de cuenca baja, con el fin de evaluar tanto su situación actual, perspectivas futuras y las recomendaciones para su posible remediación y conservación. El enfoque se sustenta en los principios y lineamientos establecidos por la Declaración de Brisbane (2018), los aportes científicos y escenarios presentados en el VI Informe del IPCC (2021) respecto al Cambio Climático, así como el papel que desempeñan los bañados y humedales en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Estos últimos, destacados y promovidos en la propia Declaración de Brisbane (Arthington *et al.*, 2018), representan un marco clave para comprender la relevancia ecológica, social y económica de estos ecosistemas en la planificación y gestión sostenible de la cuenca.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Eje de la investigación

El interés para abordar la investigación radica en la necesidad de encontrar resultados eficientes en cuanto a la forma de estudiar los caudales ambientales, cuya importancia para las sociedades (como objetivo a alcanzar en la preservación del recurso) y en especial en lo concerniente a los ámbitos naturales, se centra en el llamado internacional actual para su identificación, cálculo y conservación.

3.2. Descripción de la zona de estudio

La cuenca del río Atuel forma parte del sistema hidrográfico del río Colorado, que discurre desde parte de la provincia de La Rioja (norte), pasando por las provincias de San Juan, Mendoza y parte de San Luis, Neuquén, La Pampa, Río Negro y Buenos Aires, hasta desembocar en el océano Atlántico, en una franja desértica de más de 1.000 km de longitud y cerca de 360.000 km². Al estar ubicada al este de la cordillera andina, las aguas escurren de oeste a este, orientando de esta forma las actividades agrícolas y los asentamientos urbanos a lo largo del eje del río Atuel, cuya longitud ronda los 417 km en el lado mendocino y los 220 km del lado pampeano.

La zona de estudio se ubica hacia el centro-occidente de la República Argentina, específicamente entre el sur de la provincia de Mendoza y el noroeste de la provincia de La Pampa. Se localiza entre las coordenadas 34°27'42" S y 37°00'02" S y los 70°04'26" O y 66°45'04" O.

El río Atuel (Figura 3.1), nace sobre ambientes de origen glaciar en la cordillera andina, a cerca de 4.000 msnm. Desde su nacimiento, el río tiene características de un drenaje de montaña, con cauces delineados por depósitos glaciarios pasando luego al valle fluvial, con elevadas pendientes y profundas barrancas. En la cuenca alta recibe las aguas de su principal afluente, el río Salado, con una cuenca más pequeña pero similar a su par tributado. Aguas abajo de dicha confluencia, la cuenca media se expande en una planicie de depresión, antes de adentrarse en un cañón de 45 km de longitud, con

un desnivel altitudinal de aproximadamente 580 msnm entre el inicio y final del cañón, y cerca de 360 metros en promedio entre la cima de este y el cauce del río, donde se ubican los embalses de El Nihuil y Valle Grande.

Aguas abajo del final del embalse de Valle Grande, el río entra en una zona de llanuras ininterrumpidas por cerca de 100 km, hasta entrar a una región de humedales denominados “Bañados del Atuel” (no pertenecientes a la convención internacional de humedales Ramsar), con patrón anastomosado y difuso entre cerca de los 4.000 km² que comprenden, uniéndose posteriormente a las aguas del río Desaguadero - Salado, ya sobre la provincia de La Pampa.

En cuanto a las características climáticas, la posición geográfica de la cuenca, en la región intertropical y septentrional del planeta, a sotavento de la cordillera andina y sobre la diagonal árida suramericana (Figura 3.2), hace que la disponibilidad de los recursos hídricos esté condicionada por efectos externos a la misma, como el efecto Föhn (a la sombra de los Andes), anticiclones del Atlántico y Pacífico y los vientos húmedos provenientes del primero (DGI, 2017). Siendo la cordillera andina la barrera natural donde los vientos del Pacífico descargan lluvias en el lado de barlovento, también funciona como un elemento de retención y acumulación de nieve durante la época invernal, alimentando los ríos de régimen nival permanente y representando la principal fuente de recarga de las aguas subterráneas.

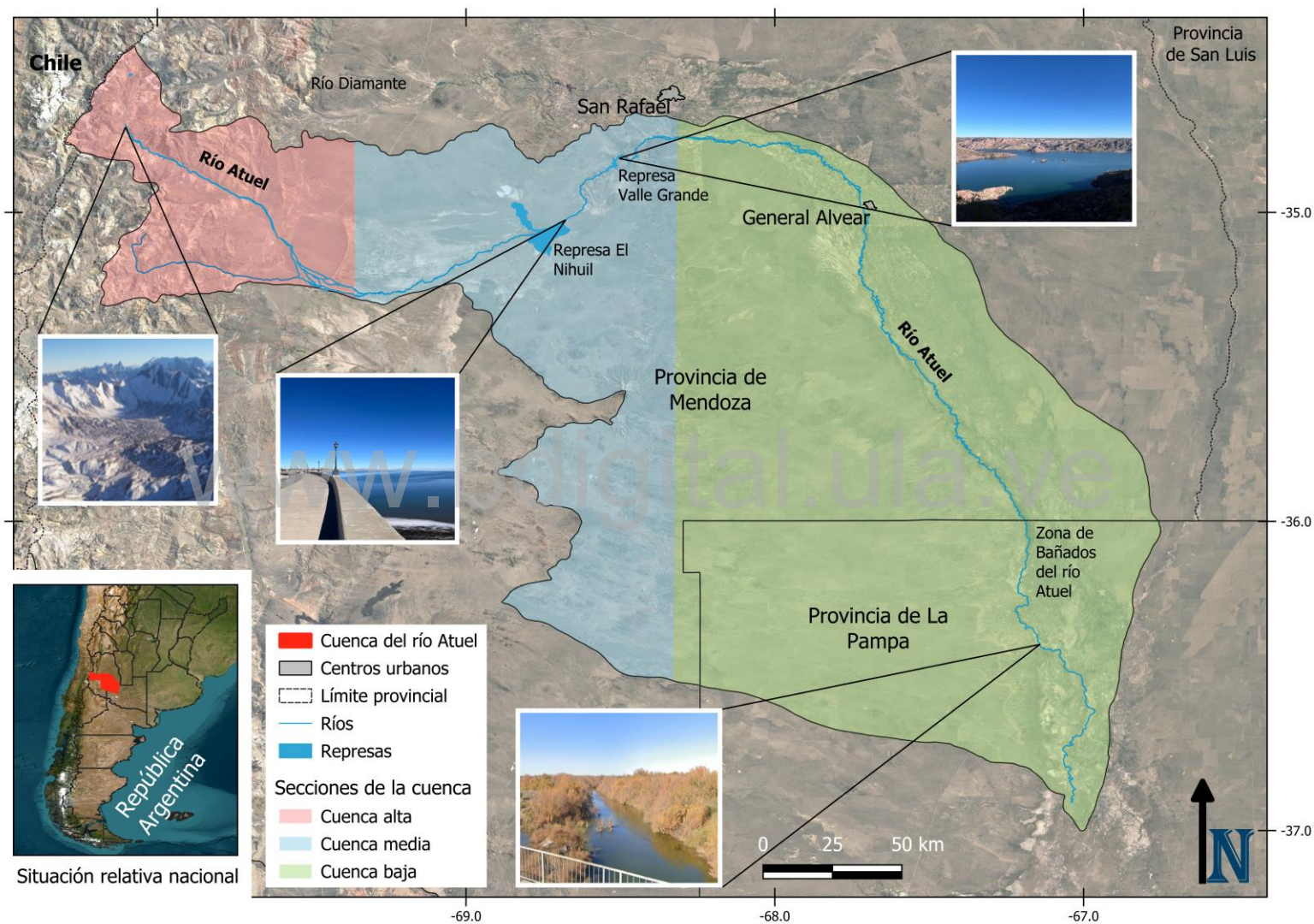


Figura 3.1. Secciones de la cuenca del río Atuel dentro de la provincia de Mendoza. Modificado de DGI (2017).

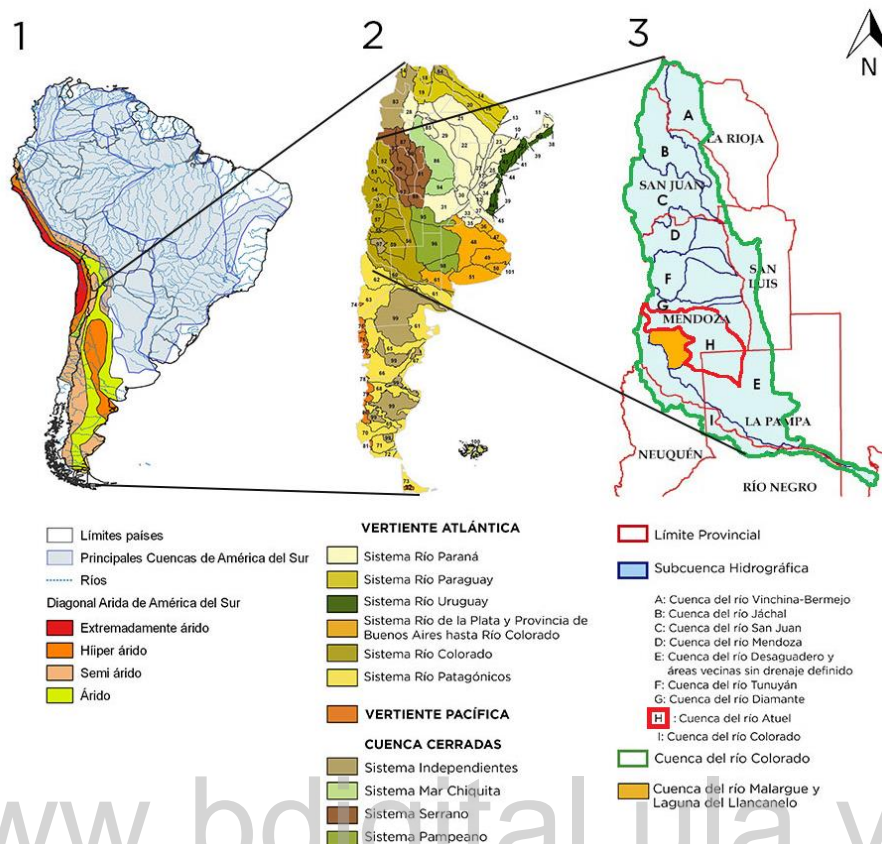


Figura 3.2. Diagonal árida (1) y principales cuencas de América del Sur (2). Cuencas y regiones hidrográficas de Argentina (3). Sistema Hidrológico del río Colorado. Modificado de DGI (2017).

Dadas las diferencias altitudinales, desde la zona montañosa a la planicie aluvial, Daniele y Natenzon (1994) diferencian tres eco-regiones, comprendidas entre: estepas altoandinas, estepas arbustivas patagónicas áridas y monte y cardonales de prepuna. De oeste a este, la primera se ubica sobre la zona cordillerana, con temperaturas bajo cero en al menos ocho meses al año y precipitaciones entre 100 y 200 mm anuales. En la porción meridional de la cuenca, domina el bosque andino patagónico, con formaciones de origen glaciario, clima templado y gradiente de humedad positivo de oeste a este. Para la zona de llanura, las variaciones climáticas presentan baja variación, dada la homogeneidad del relieve. En esta zona, las temperaturas oscilan entre 12 °C y 16 °C, con pluviosidad cercana a los 200 mm, generalmente presentes en la estación de verano.

Con referencia a otras características antrópicas y dada la baja pluviosidad, el potencial económico de la cuenca se desarrolla a lo largo del eje del río Atuel, con mayor énfasis aguas abajo del complejo hidroeléctrico de Los Nihuiles. En esta zona, se desarrollan las actividades agrícolas en el denominado oasis sur, que, aunque se encuentra compartido con la vecina cuenca del río Diamante (que también aporta agua para la demanda del oasis), es regado por el río Atuel en cerca de 137.290 hectáreas, mediante una red de riego de alrededor de 2.500 km (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Distribución estimada del agua superficial del río Atuel. Temporada 2019/2020, ajustado a diciembre de 2019 (DGI, 2020).

Actividad	Volumen (hm ³)	Volumen relativo (%)
Total a distribuir	415,4	100
Abastecimiento de población	5,3	1,3
Agrícola	406,4	97,8
Industrial	0,3	0,1
Minería y petróleo	0,0	0,0
<i>Fracking</i>	0,0	0,0
Recreativo / ambiental	2,3	0,6
Uso público	1,0	0,3

En cuanto a las características socioeconómicas, el turismo se desarrolla sobre todo en ámbitos nivales en la cuenca alta, especialmente sobre la subcuenca del río Salado, donde se localiza uno de los principales centros de atracciones de nieve del país (Las Leñas). Adicionalmente, los deportes acuáticos sobre el tramo de los diques (cuenca media), representan una de las principales actividades turísticas de la zona. Por otra parte, la producción de bienes de origen agrícola se centra en cultivos hortícolas, vitivinícolas y olivícolas, principalmente sobre la cuenca media y baja (Figura 3.4).

Los oasis mendocinos, como el sur (dominado por el río Atuel y Diamante), representan la proeza del poblador ante las condiciones desérticas naturales de la región. Estos sitios, al estar ubicados sobre grandes depósitos aluviales, presentan suelos fértiles, cuya limitación histórica siempre fue la presencia de agua para su irrigación. A través de la construcción de los oasis de riego, las tierras áridas se convirtieron en espacios agrícolas y urbanos, los cuales, mediante el aprovechamiento hídrico y la

sistematización del riego, generan vastas unidades productivas, dinamizando la economía del sur de la provincia.

La presencia humana en la cuenca se estima, para el 2019 y de acuerdo con proyecciones del INDEC (2020), en cerca de 60.000 habitantes, abarcando la totalidad de las poblaciones de General Alvear – 50.387 hab (capital del departamento homónimo – Pcia. De Mendoza), Algarrobo de Águila – 1.520 hab (capital del departamento de Chical Co – Pcia de La Pampa) y Santa Isabel – 3.616 hab (capital del departamento de Chalileo – Pcia de La Pampa). Si bien la cuenca abarca también parte de otros departamentos pampeanos, como Limay Mahuida y Puelín, además de porciones de otros mendocinos, como San Rafael y Malargüe, sólo incluye las partes más pobladas de los departamentos cuyas capitales se mencionaron con anterioridad, sin tomar en cuenta el resto de secciones departamentales citados, cuya población rural y dispersa es significativamente menor que las zonas urbanas indicadas. Adicionalmente, dada las características de concentración de población alrededor de los oasis, la población de la cuenca resulta ser considerablemente menor a su contigua cuenca del norte (río Diamante), que incluye a San Rafael, la ciudad más grande y dinámica del sur mendocino, con más de 110.000 habitantes (Figura 3.3).

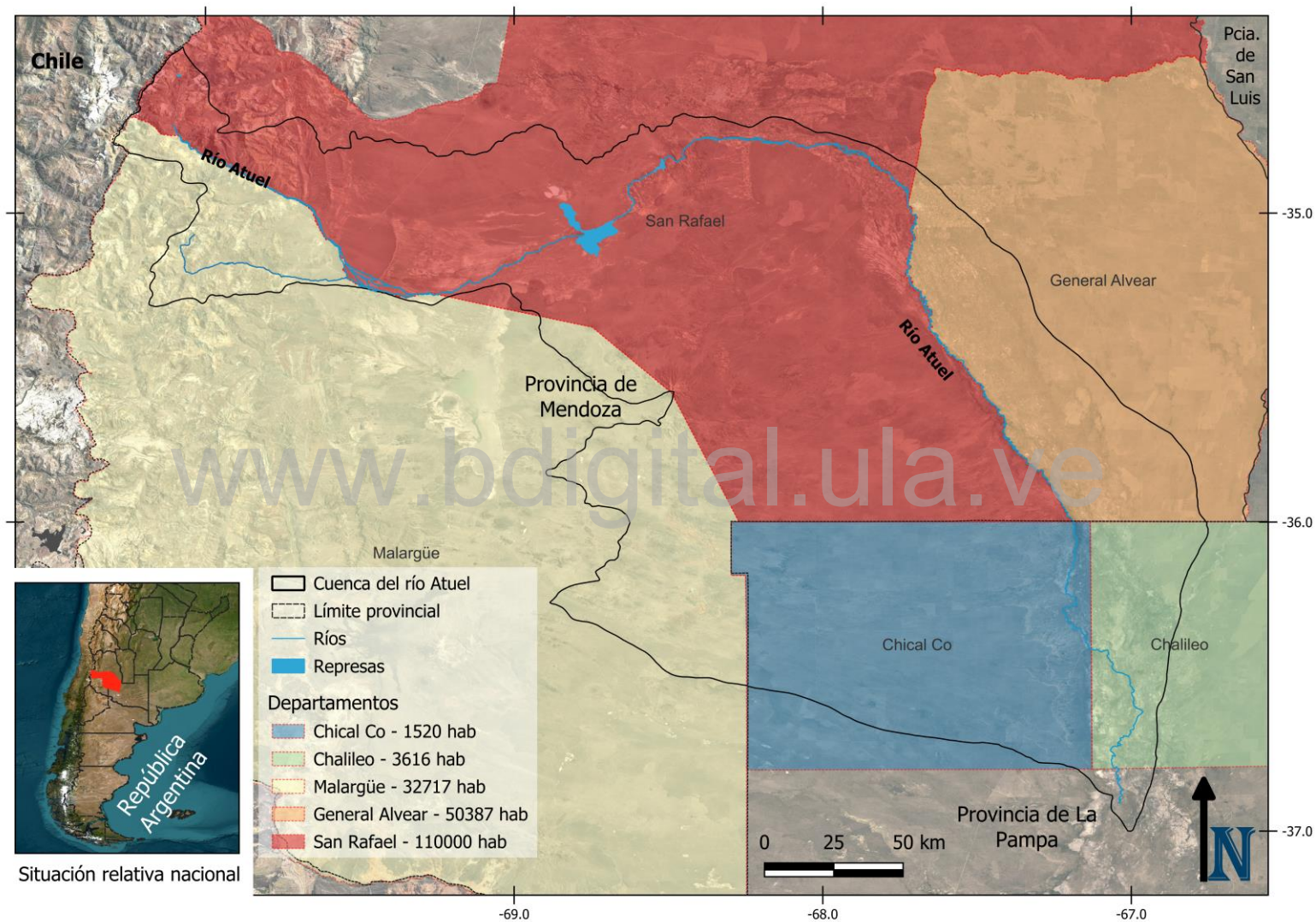


Figura 3.3. La cuenca del río Atuel y su ubicación en los departamentos de las provincias de Mendoza y La Pampa.

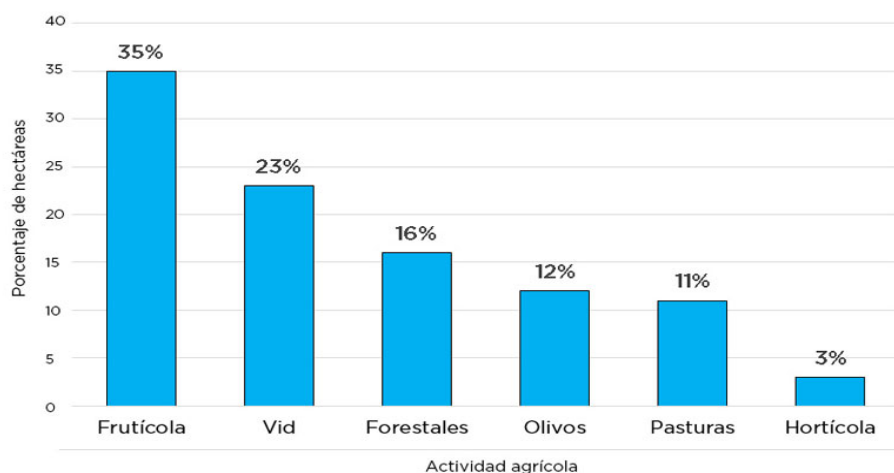


Figura 3.4. Distribución de hectáreas cultivadas en la cuenca del río Atuel. Tomado de DGI (2017).

3.2.1. El conflicto por el agua entre las provincias de Mendoza y La Pampa

Si bien la mayor parte de la cuenca del río Atuel se ubica sobre la provincia de Mendoza, la porción pampeana es regada por el final del sistema, luego que el río Atuel haya sido represado cuatro veces y sido aprovechado por los miles de hectáreas de riego en el oasis sur. Esta situación recrea uno de los conflictos por el agua más importantes y antiguos del país. Desde que se intensificó el aprovechamiento del recurso hídrico del río Atuel por parte de la provincia de Mendoza, los caudales que llegaban a territorio pampeano resultaron ser mínimos o nulos. Esto ha provocado por décadas el detrimento de calidad ambiental en territorio pampeano, así como también la contracción de las actividades económicas en los departamentos bañados por el otrora río Atuel permanente (Infocampo, 2017).

Si bien el conflicto tiene décadas activo, con marcadas consecuencias para los ecosistemas y poblaciones, la provincia de Mendoza ha continuado con la explotación del recurso, limitando el volumen suficiente para su aprovechamiento en territorio pampeano, además de restringir la circulación del caudal ambiental para mantenimiento estricto de las funciones naturales de los ecosistemas.

La situación inicialmente se remonta al año 1809, donde el entonces virrey Sobremonte dio orden a su jefe zonal Miguel Telles Meneses, de desviar el río Diamante (entonces afluente del río Atuel cercano a la ciudad de San Rafael) hacia el este, de modo de regar las desérticas zonas que atravesaría hasta su desembocadura en el Desaguadero. Si bien el agua del Diamante siguió permaneciendo dentro del mismo sistema, el trasvase ocasionó que el río Atuel se quedara con cerca de la mitad de su caudal, causando un posible detrimento importante hacia los ecosistemas y desolados parajes aguas abajo (Vich y Barroso, 2003; Magnani, 2016; s/n, 2018).

Posteriormente, el conflicto inició en 1947, cuando el gobierno nacional inició la construcción de la represa El Nihuil, provocando el corte del río y el éxodo de cientos de pobladores del oeste (hasta un 40 % de los pobladores de Santa Isabel y Algarrobo de Águila) y noroeste pampeano (límitrofe con la provincia de Mendoza), perdiéndose miles de hectáreas de humedales y bañados (Lauragaray, 2017; Lauragaray, 2018). Cabe destacar que, para dicho año, la actual provincia de La Pampa, al ser Territorio Nacional, no poseía el estatus de autonomía de las demás provincias, por lo que su administración dependía del Estado Nacional (el cual fue el promotor de los desarrollos de represas en la cuenca media del río Atuel en la provincia de Mendoza).

Luego de décadas de agravios y detrimentos ambientales en la zona, en 1987 y ante la negativa de la Provincia de Mendoza por ceder ante los reclamos pampeanos, la Corte Suprema de Justicia de la Nación estableció la interprovincialidad del río Atuel, sin que se lograra establecer la erogación de un caudal mínimo constante hacia aguas abajo. A pesar de ello, la provincia de Mendoza sigue utilizando al río Atuel como fuente de energía eléctrica, consumo humano e irrigación de decenas de miles de hectáreas, mientras que cerca de 400.000 hectáreas del lado pampeano y miles de sus habitantes son afectados por la escasez de agua y el proceso de desertificación (Magnani, 2016).

Dadas las condiciones naturales de aridez, las riberas del río Atuel y la zona de bañados representaban un oasis natural, ideal para el desarrollo de la biodiversidad local y para mantener las condiciones de vida de los pobladores. De acuerdo con Magnani (2016), siendo investigador de la Universidad Nacional de La Pampa, el río fue alterado

drásticamente, produciéndose escurrimientos sólo durante el invierno (por la disminución del riego en esta temporada en la provincia de Mendoza), lo cual, de mantenerse en el tiempo, dada la reticencia de Mendoza para ceder, implicaría la pérdida de valiosos ecosistemas de humedales del desierto pampeano y el detrimento de la calidad de vida de sus habitantes.

Luego de varios juicios, el último, propiciado por el fallo de la Corte Suprema de Justicia de la Nación en Julio de 2020, dictaminó que la provincia de Mendoza debe asegurar un caudal en el río Atuel para cesar el daño ambiental. Adicionalmente, ambas provincias determinaron la cifra de caudal ambiental que debe llegar a territorio pampeano. Mendoza ofrece 1,3 m³/s, mientras que La Pampa lo estimó en 4,5 m³/s. Por su parte, ante dicho tribunal, la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación instó a alcanzar en lo inmediato un caudal inicial mínimo de 2,2 m³/s en tres meses, para luego avanzar hacia los 3,2 m³/s al año. Dicho valor se encuentra por encima de lo ofrecido por Mendoza y lejos de lo exigido por La Pampa. Sin existir un acuerdo entre las partes, ni un consenso por parte de la Corte, el conflicto continúa en la actualidad.

Desde el tribunal nacional, se recordó que el punto de partida de este conflicto “deviene de la disminución de la oferta y, a su vez, del aumento de la demanda de agua del río Atuel”. Adicionalmente, añaden que “ese recurso debía también ser destinado a la conservación del ecosistema interprovincial, para que mantenga su sustentabilidad, todo ello sin perder de vista el interés de las generaciones futuras, cuyo derecho a gozar del ambiente está protegido por el derecho vigente” (Prensa Gobierno de Mendoza, 2024).

Desde la demanda pampeana, denunciaron el despojo del río Atuel ante la Comisión Interamericana de Derechos Humanos, según documento elaborado por el constitucionalista Andrés Gil Domínguez e impulsada por dos organizaciones no gubernamentales. Basado en una entrevista recopilada por Tiempoar (2024), y haciendo alusión al contexto histórico, el abogado indicó:

“...desde que el río Atuel existió, bajaba desde la cordillera, pasaba por Mendoza y llegaba hasta La Pampa. Pero un día a Mendoza se le ocurrió quedarse con todo el río. Así floreció el sur mendocino mientras que el oeste pampeano se desertificó,

provocando la diáspora y el empobrecimiento de toda la zona. Ellos allá tienen el río a pleno; nosotros acá podemos jugar un partido de fútbol donde debería haber agua”.

Asimismo, Gil Domínguez resalta que el problema comenzó desde la construcción del primer dique o represa (El Nihuil, con vocación de riego y generación hidroeléctrica) en 1947, a partir del cual

“...bajaron las compuertas para llenar la represa y es ahí donde La Pampa se quedó sin agua. Desde entonces que venimos reclamando. Así secaron la cuenca más extensa del interior del país. Desde el punto de vista ambiental es una locura lo que hicieron. Encima es tanta el agua que ellos tienen que la capacidad de embalse de la represa a veces no les alcanza y nos usan como caño de desagote”.

De esta forma, mientras la provincia de Mendoza continúe embalsando el río (y haciendo uso consuntivo intenso del mismo), el flujo continuará interrumpido a su paso por la provincia de La Pampa, por lo que no se prevé que el conflicto tenga una resolución inmediata, cuya consecuencia más evidente es la degradación de los ecosistemas ribereños aguas abajo y el perjuicio a las sociedades que los circundan (Figura 3.5).

A



B



Figura 3.5. Dique de El Nihuil (A) y el río Atuel aguas abajo de éste (B). Fotografías tomadas por el autor (junio 2025).

www.bdigital.ula.ve

3.3. Técnicas, procesamiento y análisis de datos

La obtención, procesamiento e interpretación de los datos necesarios para alcanzar los objetivos de esta investigación se desarrolló en seis fases, conforme al esquema metodológico general presentado en la Figura 3.6. Cada fase integró un conjunto de actividades específicas orientadas al cumplimiento de los objetivos planteados. A continuación, se describen en detalle a través de la Tabla 3.2, Tabla 3.3, Tabla 3.4 y Tabla 3.5

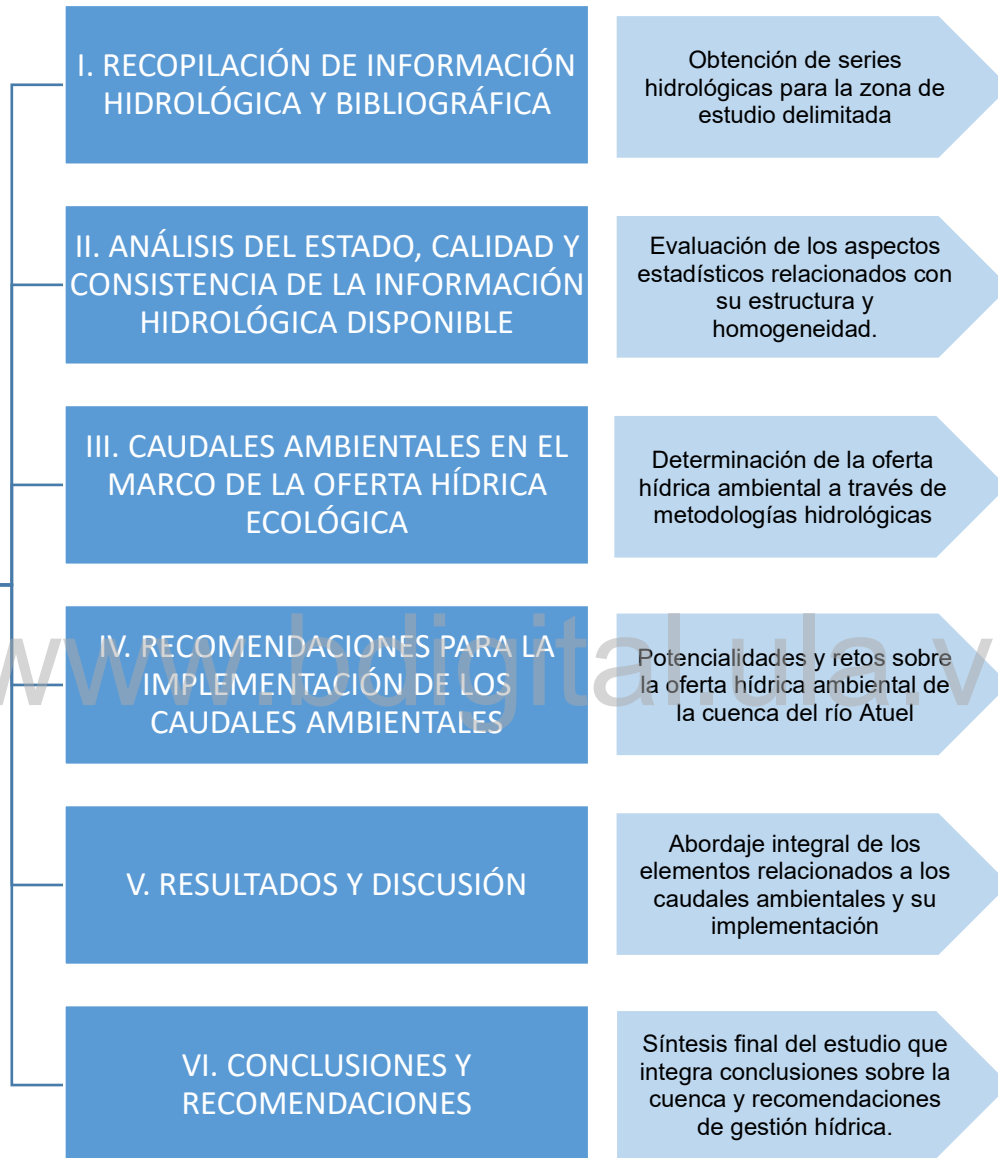


Figura 3.6. Esquema metodológico general. Elaboración propia.

3.3.1. Recopilación de información y consistencia de la información hidrológica disponible

A través de esta fase se recopiló la información teórica base sobre los caudales ambientales y sus mecanismos de implementación e investigación a escala global, continental y regional. Las diversas fuentes consultadas provinieron principalmente de artículos científicos, tesis de grado y posgrado y documentos técnicos internacionales y locales. Sobre la base de esta información, se construyó el marco teórico que sustentó a la presente investigación.

Asimismo, la consulta bibliográfica permitió reconocer las diferentes metodologías para el desarrollo del análisis exploratorio de datos, así como aquellas para el cálculo de los caudales ambientales. Los detalles de estos métodos son presentados en los capítulos 4 y 5, respectivamente.

Adicionalmente, a través del portal web de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación Argentina (2019) se obtuvieron las series de datos diarias de las estaciones hidrométricas ubicadas dentro de la cuenca del río Atuel: Puente el Sosneado, Loma Negra, La Angostura, Carmensa y Cañada Ancha (este último sobre el río Salado, afluente del Atuel). La ubicación y disponibilidad de los datos hidrométricos se presentan en el Capítulo 4.

Finalmente, la delimitación de la cuenca del río Atuel se obtuvo a través del repositorio de cuencas de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación Argentina, la cual fue corroborada a través de su cálculo mediante un modelo digital de elevación (MDE) del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM 30 m) (Farr et al., 2007).

3.3.2. Análisis del estado, calidad y consistencia de la información hidrológica disponible

Tabla 3.2. Análisis del estado, calidad y consistencia de la información hidrológica disponible

Estaciones hidrométricas	Caracterización y obtención de las series de datos hidrométricas diarias provenientes de las estaciones disponibles.
	Localización espacial de las estaciones
	Determinación de los datos faltantes.
Análisis exploratorio de datos	Cálculo de datos faltantes
	Definición de variables a partir de las series temporales empleadas
	Verificación de supuestos estadísticos subyacentes y análisis de tendencia y cambios abruptos (normalidad, aleatoriedad, independencia, detección de valores atípicos, tendencia y cambios abruptos).
Definición de variables a partir de las series temporales	Caudal mensual
	Caudal estacional
	Caudal anual
	Percentiles de la curva de duración de caudales
	Definición de extremos mínimo y máximo.

3.3.3. Caudales ambientales en el marco de la oferta hídrica ecológica

Tabla 3.3. Caudales ambientales en el marco de la oferta hídrica ecológica

Indicadores de alteración hidrológica	Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales
	Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales
	Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales.
	Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos
	Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas
Análisis exploratorio de datos	Cálculo de datos faltantes
	Definición de variables a partir de las series temporales empleadas
	Verificación de supuestos estadísticos subyacentes y análisis de tendencia y cambios abruptos (normalidad, aleatoriedad, independencia, detección de valores atípicos, tendencia y cambios abruptos).
Definición de variables a partir de las series temporales	Caudal mensual
	Caudal estacional
	Caudal anual
	Percentiles de la curva de duración de caudales
	Definición de extremos mínimo y máximo.

3.3.4. Recomendaciones para la implementación de los caudales ambientales

Tabla 3.4. Recomendaciones para la implementación de los caudales ambientales

Acciones dentro de la declaración de Brisbane (2018)	Establecer el marco conceptual ampliado de caudales ambientales para definir los criterios que guiarán la evaluación hidrológica y ecológica del caso de estudio.
Acciones y recomendaciones dentro de la planificación de los recursos hídricos	Considerar las directrices de gobernanza, mantenimiento e investigación como estructura metodológica para organizar la planificación y análisis de caudales en la cuenca del Atuel.
El nexo con el cambio climático	Integrar las recomendaciones del IPCC como insumo metodológico para evaluar riesgos, proyectar disponibilidad hídrica y definir criterios de asignación de caudales ambientales.

3.3.5. Resultados-discusión, y conclusiones-recomendaciones.

Tabla 3.5. Resultados-discusión, y conclusiones-recomendaciones

Análisis exploratorio de datos	Presentación y discusión de la estructura y comportamiento de las series hidrológicas, mostrando patrones, tendencias, estacionalidad, inconsistencias o vacíos, y explicando cómo estas características condicionan la interpretación posterior de los caudales ambientales.
Caudales ambientales en el marco de la oferta hídrica ecológica	Exposición de los caudales estimados con distintas metodologías, su comparación entre estaciones y su interpretación en términos de alteración hidrológica, evaluando cuánta agua ecológica disponible existe realmente y qué implicancias tiene para los ecosistemas dependientes.
Recomendaciones para la implementación de los caudales ambientales	Discusión de lineamientos aplicables a la gestión, basados en los resultados obtenidos y cómo integrarlos en decisiones institucionales acorde a la declaración de Brisbane y a la realidad del río Atuel.
Recomendaciones generales derivadas de la investigación	Síntesis interpretativa, conectando los hallazgos hidrológicos con aspectos ecológicos, sociales, institucionales y climáticos, y planteando orientaciones de gestión o investigación futura.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DEL ESTADO, CALIDAD Y CONSISTENCIA DE LA INFORMACIÓN HIDROLÓGICA DISPONIBLE

Se analizaron los caudales medios diarios de las estaciones: La Angostura, Puente El Sosneado, Loma Negra, Carmensa (río Atuel), y Cañada Ancha (río Salado), en el período de 34 años, comprendido entre 1985 - 2019 (salvo la estación Carmensa, con 23 años, entre los años 1996 – 2019). Los anteriores (Figura 4.4), forman parte de la Base de Datos Hidrológica Integrada, perteneciente a la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación Argentina (2019). La elección del período de análisis escogido responde a la máxima longitud de datos en común entre las estaciones consideradas y con menor porcentaje de datos faltantes (Tabla 4.1). Para el cálculo del análisis exploratorio de datos se empleó un programa de computación en lenguaje Fortran, desarrollado por el MC. Alberto I. J. Vich (inédito).

En Argentina, el año hidrológico se define desde el 01 de julio hasta el 30 de junio. De esta forma, para el caso de estudio, los registros del año hidrológico parten desde el 01 de julio de 1985 hasta el 30 de junio de 2019.

A modo de ejemplo, en este capítulo serán dispuestos los resultados de la estación Carmensa. Los resultados relacionados a las demás estaciones se ubicarán en los anexos correspondientes.

El programa utilizado incorpora como datos de entrada a los registros diarios de caudales, a partir de los cuales calcula los datos faltantes y realiza las subsiguientes pruebas del análisis exploratorio de datos.

4.1. Estaciones hidrométricas

La cuenca posee cinco estaciones hidrométricas, cuatro sobre el río Atuel (Puente El Sosneado, Loma Negra, La Angostura y Carmensa) y una (Cañada Ancha) sobre el principal afluente de este (río Salado) (Figura 4.4). Del total de estaciones, cuatro se encuentran sobre el tercio superior de la cuenca. Cabe destacar que dicha porción es la menos afectada desde el punto de vista del aprovechamiento económico y de

asentamientos (Figura 4.1). A su vez, las cuatro estaciones que posee presentan la mayor longitud de datos, cuyo período en común se situó en 34 años (a escala diaria), entre 1985 y 2019.

La delimitación de la cuenca se definió por su punto de cierre al sur de los Bañados del Atuel. La no definición de subcuencas respecto a las estaciones hidrométricas responde al tipo de análisis, realizado sobre la totalidad de la cuenca del río Atuel.

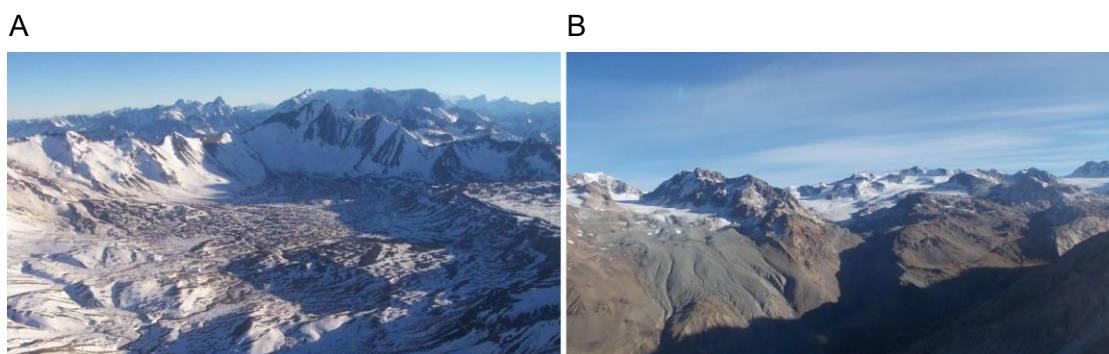


Figura 4.1. Nacientes del río Atuel (A). Campo de glaciares circundantes al nacimiento del río Atuel (B). Tomado de DGI (2017).

En cuanto a las estaciones en las dos terceras partes restantes de la cuenca, el caudal sólo es registrado por la estación Carmensa, que resultó ser la que presentaba mayores inconsistencias de registros. Con 23 años de datos de caudal medio diario desde 1996 al 2019, es la estación responsable de registrar los caudales remanentes del río Atuel luego de su paso por el oasis. A 100 km aguas abajo de Carmensa se localiza la estación Puesto Ugalde, ubicada sobre la frontera interprovincial. Si bien tiene una importancia estratégica por ubicarse sobre la zona de bañados, no se encuentra operativa en la actualidad, presentando además múltiples períodos faltantes en su longitud de registros. En la Tabla 4.1 se presentan las longitudes de registros, porcentaje de datos faltantes, superficie y altitud referente a las cinco estaciones hidrométricas consideradas.

Tabla 4.1. Características de registros, superficie y altitud de las estaciones hidrométricas de la cuenca del río Atuel (Figura 4.4).

Río	Estación	Sigla	Período	Datos faltantes (%)	Área (km ²)	Cota (msnm)
Atuel	Pte. El Sosneado	ESO	1985-2019	1,3	2.270,6	1603
Atuel	Loma Negra	LNE	1985-2019	0	3.607,1	1363
Atuel	La Angostura	LAN	1985-2019	1	6.191,9	1313
Salado	Cañada Ancha	CAN	1985-2019	1,7	682,8	1693
Atuel	Carmensa	CAR	1996-2019	0,04	15.477,9	444
Atuel	Cierre de cuenca	-	-	-	48.539,2	273

Dadas las características orográficas de la cuenca media, el potencial hidroeléctrico se manifestó desde mediados de la década de 1940 con la construcción de represas. Siendo orientadas con fines multipropósito (contención de avenidas de deshielos, regulación de caudales, generación hidroeléctrica y almacenamiento para riego), el complejo de Los Nihules consta de cuatro diques (Figura 4.2 y Figura 4.3), cuyos volúmenes de almacenamiento (de aguas arriba a aguas abajo) son en hm³: 263,13; 0,7; 0,885 y 167 respectivamente (DGI, 2017).



Figura 4.2. Dique de Valle Grande (río Atuel). Fotografía tomada por el autor (junio 2025).

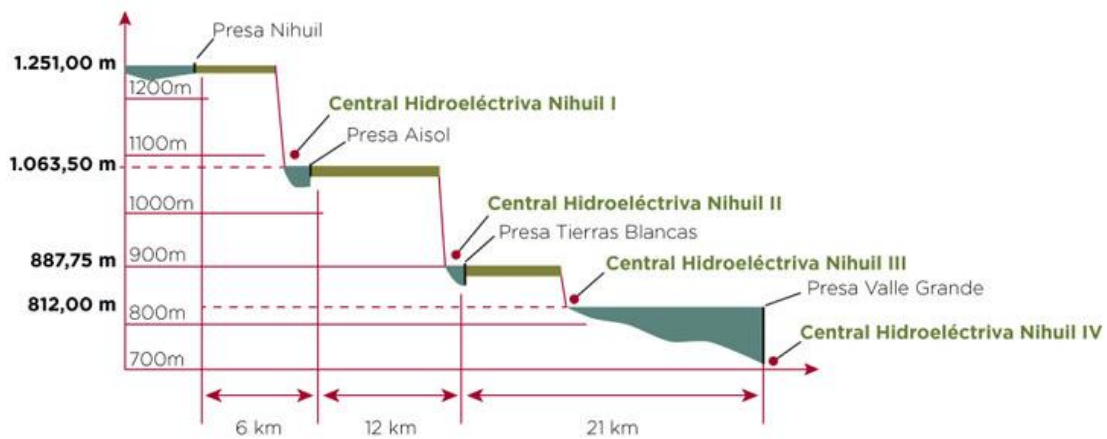


Figura 4.3. Complejo hidroeléctrico Los Nihules (DGI, 2017).

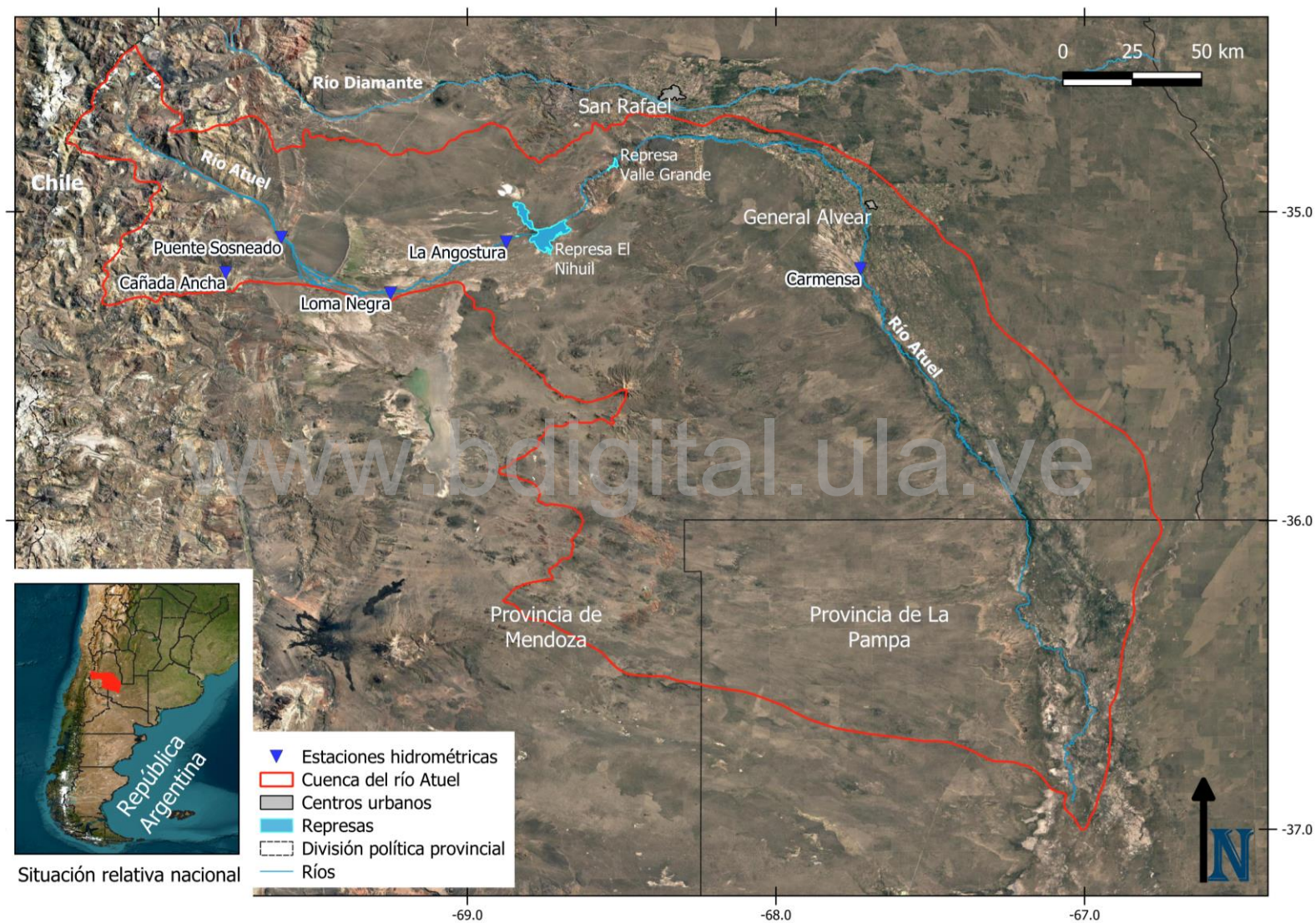


Figura 4.4. Estaciones hidrométricas e hidrografía. Cuenca del río Atuel.

4.2. Análisis exploratorio de datos

Los datos de caudales fueron tratados mediante un Análisis Exploratorio de Datos (AED), cuya finalidad fue examinarlos previamente a la aplicación de cualquier técnica estadística refinada (Hirsch *et al.*, 1982). Lo anterior, además de verificar las propiedades y características básicas de las series a utilizar, permite vincular los resultados con algunos procesos que pueden estar asociados a la naturaleza de estos.

4.3. Cálculo de datos faltantes

En primera instancia, se calcularon los datos faltantes empleando distintos procedimientos sobre la base de la extensión del vacío de información.

Para una longitud de tres datos perdidos, se empleó el polinomio interpolador de tercer grado de Lagrange (Gyau-boakye y Schultz, 1994).

Se emplea como función de interpolación al polinomio de Lagrange de forma $N = 3$.

Para su aplicación, se utilizan dos valores de la variable antes y después del vacío de información. La Ec. 4.1, dada por Nakamura (1993) es:

$$Q_t = \frac{(t - t_2)(t - t_N)(t - t_{N+1})}{(t_1 - t_2)(t_1 - t_N)(t_N - t_{N+1})} Q_1 + \frac{(t - t_1)(t - t_N)(t - t_{N+1})}{(t_2 - t_1)(t_2 - t_N)(t_2 - t_{N+1})} Q_2 + \frac{(t - t_1)(t - t_2)(t - t_{N+1})}{(t_N - t_1)(t_N - t_2)(t_N - t_{N+1})} Q_N + \frac{(t - t_1)(t - t_2)(t - t_N)}{(t_{N+1} - t_1)(t_{N+1} - t_2)(t_{N+1} - t_N)} Q_{N+1} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Dónde, Q_t : caudal diario medio a interpolar en el tiempo t ; Q_1 y Q_2 : caudal medio diario en los días t_1 y t_2 , inmediatamente antes del vacío de información; Q_N y Q_{N+1} : caudal medio diario en los días t_N y t_{N+1} , inmediatamente después del dato faltante.

Si la extensión de los datos faltantes se situó entre cuatro y 20 días, se usó un modelo autoregresivo de primer orden con corrección (Gyau-Boakye, 1993). Esta metodología se aplica solo si existe información precedente al vacío de datos, cuya extensión debe tener entre dos y tres veces la longitud de la interrupción. El modelo (Ec. 4.2) está dado por:

$$Q_{t+1} = a + bQ_t \quad \text{Ec. 4.2}$$

Una vez calculados los datos faltantes, se computó la diferencia (Ec. 4.3) entre el valor predicho y observado al final del vacío de información.

$$Q_t^* = Q_t + \frac{t}{N} \Delta Q_N \quad \text{Ec. 4.3}$$

Dónde, N : número de datos perdidos + 1; Q_t y Q_{t+1} : caudal medio diario en el tiempo t y $t + 1$, respectivamente; Q_t^* : caudal medio diario a calcular (corregido); a y b : parámetros del modelo autoregresivo de primer orden; ΔQ_N : diferencia entre el caudal observado y calculado en el tiempo N ; R_t caudal diario medio corregido a rellenar en el tiempo t .

Para datos faltantes de más de 20 días, se utilizó el método MOVE (Maintenance of Variance Extension) o mantenimiento de la extensión de la varianza (Hirsch *et al.*, 1982). Su uso se emplea cuando existe información de otra estación con características similares al sitio base, teniendo entre ambas un registro común que incluya la interrupción. Este método preserva mejor las características estadísticas de la serie, que los métodos tradicionales de regresión. Los valores de caudal de la serie base se denotan con $x(I)$ y los del sitio a rellenar con $y(I)$, donde I es un índice de tiempo. La notación que identifica a las diferentes partes de las dos series es:

$$x = x(1), \dots, x(N_1), x(N_{1+1}), \dots, x(N_1 + N_2) \quad \text{Ec. 4.4}$$

$$x_1 = x(1), \dots, x(N_1)$$

$$x_2 = x(N_1 + 1), \dots, x(N_1 + N_2)$$

$$y_1 = y(1), \dots, y(N_1)$$

Dónde, x es un vector que contiene la información de la serie base (serie larga); x_1 : vector que contiene los datos de la serie base común con la serie a rellenar, la cual no incluye los datos faltantes; y_1 : serie a rellenar, común con los datos de la serie base para el período a completar. Adicionalmente, los datos deben ser transformados mediante logaritmos, dado que generalmente los datos hidrológicos son asimétricos. El procedimiento para rellenar los datos faltantes mediante MOVE (Ec. 4.5) es:

$$a = \sqrt{\frac{N_2(N_1 - 4)(N_1 - 1)}{(N_2 - 1)(N_1 - 3)(N_1 - 2)}} \quad \text{Ec. 4.5}$$

$$S^2(y) = \frac{1}{N_1 + N_2 - 1} \left[(N_1 - 1)S^2(y_1) + (N_2 - 1)r^2 \frac{S^2(y_1)}{S^2(x_1)} S^2(x_2) \right. \\ \left. + (N_2 - 1)a^2(1 - r^2)S^2(y_1) \right. \\ \left. + \frac{N_1 N_2}{N_1 + N_2} r^2 \frac{S^2(y_1)}{S^2(x_1)} S^2(x_2)(m(x_2) - m(x_1))^2 \right]$$

$$m(y) = \frac{N_2}{N_1 + N_2} r^2 \frac{S(y_1)}{S(x_2)} (m(x_2) - m(x_1))$$

$$y_t = m(y) + \frac{S(y)}{S(x)} (x_t - m(x))$$

Dónde, $S^2()$ y $m()$ denotan la varianza y la media de las series señaladas entre paréntesis; r^2 : coeficiente de correlación entre las series x_1 e y_1 ; y_t es el dato para calcular en base a x_t conocido de la serie considerada como base.

La escogencia del sitio base depende de los objetivos del análisis. Por lo general, deben poseer cierta similitud referida a la variable de estudio, al área de drenaje, y con

significativa cercanía geográfica. Además, deben considerarse las estadísticas de la regresión y examinar visualmente la relación entre las mediciones simultáneas, asegurándose que la relación es lineal y que los residuos cumplen con el supuesto de homocedasticidad y normalidad (Hirsch *et al.*, 1982).

Dado que raramente los sitios son similares en todas las características físicas consideradas, pueden utilizarse varias estaciones base para completar una serie. El objetivo resulta en mejorar las estimaciones individuales y compensar las limitaciones percibidas en la similitud hidrológica o la relativa proximidad del sitio de base con la mejor relación de regresión.

Para el uso de regresión, el supuesto subyacente para extender o aumentar el registro de caudales, es que la población en los dos sitios posea propiedades similares en cuanto a las formas de las distribuciones, las correlaciones de serie, y las variaciones estacionales (Hirsch *et al.*, 1982; Vogel y Stedinger, 1985).

Los requisitos que debe cumplir una estación para establecerse como base, radica en que no sea un río regulado, posea una porción de registro coincidente con la serie a completar, y posea un período de registro sustancialmente más largo que el sitio a calcular. Además, ambos sitios deben tener una relación lineal y estar altamente correlacionados.

Se puede usar una combinación de sitios base para rellenar un sitio de interés. Si se utilizan varios sitios de base, aquel que se elige es el que tiene menor error en la estimación. Además, se puede considerar el coeficiente de correlación entre las series. Si bien no existen estudios sobre la magnitud adecuada del coeficiente de correlación, en la literatura aparecen valores entre 0,70 (Stedinger y Thomas, 1985) a 0,80 (Ries, 1994).

Los sitios base a emplear con el método MOVE se eligieron siguiendo el criterio de proximidad geográfica entre los sitios a calcular. En los casos que fueron necesarios, se probaron varios sitios bases y se eligió el de mayor coeficiente de correlación y menor error cuadrático medio. Los valores estimados se compararon con los datos para un año en particular y se calculó el error cuadrático medio.

La potencia del método se basa en el hecho que la media y varianza de la estación base se calcula para todas las observaciones ($N_1 + N_2$), estimándose en base a la información histórica existente y la transferida de la estación base.

El programa de Fortran utilizado recibe los datos de caudales en archivo .dat a escala diaria, para el que rellena los vacíos dependiendo de su longitud.

4.3.1. Aplicación de las metodologías de cálculo de datos faltantes

Dados los caudales medios diarios de las estaciones La Angostura, Puente El Sosneado, Loma Negra, Cañada Ancha (1985 – 2019) y Carmensa (1996 – 2019), se calcularon los datos faltantes (Tabla 4.2) de acuerdo con la longitud de los vacíos de información por los métodos de Lagrange de tercer orden, autoregresivo de primer orden y MOVE.

Tabla 4.2. Valores absolutos y relativos de datos faltantes en las estaciones hidrométricas de la cuenca del río Atuel.

Estación	Periodo	Datos faltantes	
		días	%
Puente El Sosneado	1985 - 2019	173	1,3
Loma Negra	1985 - 2019	0	0
La Angostura	1985 - 2019	136	1
Cañada Ancha	1985 - 2019	191	1,7
Carmensa	1996 - 2019	3	0,04

Posterior al relleno de los datos faltantes, se definieron las variables para cada una de las series temporales empleadas, las cuales constaron en 25, definidas como: 12 meses del año, cuatro estaciones climáticas, un valor anual, seis percentiles de la curva de duración de caudales y dos valores extremos (mínimo y máximo).

4.4. Definición de variables a partir de las series temporales empleadas

Una vez completadas las series diarias de caudal a partir del método descrito anteriormente, se definieron 25 variables, entre estas: 12 meses del año; cuatro estaciones climáticas anuales; 1 valor anual; 6 percentiles de la curva de duración de caudales y 2 valores extremos (mínimo y máximo).

La definición de estos se basa en las Ec. 4.6, 4.7 y 4.8:

$$Q_{mensual} = \frac{\sum_{i=1}^n Qd}{nd} \quad \text{Ec. 4.6}$$

$$Q_{estacional} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{mes1} + Q_{mes2} + Q_{mes3}}{nd_i + nd_{i+1} + nd_{i+2}} \quad \text{Ec. 4.7}$$

$$Q_{anual} = \frac{\sum Qd}{365} \quad \text{Ec. 4.8}$$

Q_{10} ; Q_{30} ; Q_{90} ; Q_{180} ; Q_{270} ; Q_{355} : caudales rebasados en 10, 30, 90, 180, 270 y 355 días al año.

Q_{min} ; Q_{max} : caudal medio diario mínimo y máximo registrado, respectivamente.

Dónde, Qd : caudal diario; nd : número de días del mes i .

A continuación, se presentan los datos mensuales, estacionales y anuales (Tabla 4.3), así como los cuantiles de la curva de duración de caudales y extremos mínimos y máximos (Tabla 4.4) calculados en la estación La Angostura (LAN). Los resultados de esta sección para las demás estaciones están dispuestos en los anexos correspondientes.

Tabla 4.3. Variables mensuales y anual calculadas para la estación La Angostura (m³/s)

AÑO	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	ANUAL
1985	29.03	23.68	23.73	24.98	40.28	60.1	55.24	53.04	34.5	27.27	27	34.08	35.99
1986	22.97	24.45	28.64	37.93	49.98	95.06	92.85	63.44	54.62	32.62	28.91	26.12	46.46
1987	29.17	25.79	27.21	38.84	72.92	92.98	87.7	66.66	48.38	36.31	29.72	25.01	48.33
1988	25.15	24.8	22.56	27.19	45.14	49.81	61.59	56.25	35.97	23.58	22.83	20.82	34.54
1989	17.16	20.44	22.51	28.58	47.17	48.19	49.5	48.32	32.43	26.21	22.61	21.06	31.91
1990	19.64	19.21	20.05	19.98	33.69	36.74	41.86	39.67	31.89	24.22	24.77	23.32	27.85
1991	23.38	21.03	25.59	27.83	42.69	44.23	57.09	44.33	37.79	23.94	26.67	24.56	33.21
1992	20.49	21.41	25.14	32.87	56.38	63.28	69.32	54.09	36.99	29.29	29.34	26.51	38.68
1993	26.08	24.35	27.12	34.09	44.23	57.27	73.7	50.06	39.98	26.57	25.89	23.89	37.75
1994	23.66	23.35	26.51	33.06	54.1	75.73	57.07	43.91	33.23	25.83	24.14	26.8	37.27
1995	23.08	21.83	25.34	29.17	47.65	68.77	49.8	39.93	36.04	27.06	22.76	22.12	34.46
1996	20.39	18.92	20.51	19.76	24.84	30.41	39.41	34.22	29.98	21.02	19.76	21.29	25
1997	22.8	24.28	30.12	29.84	48.27	69.08	83.77	59.52	38.73	33.33	25.29	23.39	40.62
1998	21.16	17.57	18.87	18.99	22.84	33.25	40.72	36.29	25.86	19.22	18.47	18.35	24.25
1999	18.01	17.5	18.64	26.29	38.11	46.6	41.36	32.16	26.98	22.78	20.95	22.06	27.61
2000	22.56	21.81	24.27	36.45	50.89	85.68	78.65	64.6	40.89	32.57	33.52	31.16	43.51
2001	27.65	30.42	31.38	42.25	51.06	95.53	73.87	59.43	44.12	29.81	27.56	27.08	45.01
2002	25.01	36.9	33.42	44.05	65.06	91.67	101.25	71.29	54.64	33.9	31.19	31.35	51.6
2003	26.54	26.96	27.75	30.91	42.86	49.9	57.43	52.39	39.16	37.1	29.37	27.77	37.26
2004	25.66	24.82	29.68	32.42	34.04	43.42	49.7	39.72	31.13	22.77	26.46	29.01	32.38
2005	24.11	34.24	30.43	41.73	66.21	96.4	119.75	93.04	51.91	40.59	34.24	37.53	55.68
2006	37.58	33.54	33.02	41.69	61.18	85.78	103.03	59.1	46.59	37.95	30.45	29.46	49.98
2007	27.18	25.26	26.52	29.74	39.26	45.58	51.22	48.02	31.16	26.21	30.6	26.5	33.87
2008	25.78	25.68	27.74	35.1	56.41	65.78	55.85	42.79	37.08	34.67	29.68	19.74	38.02
2009	19.75	19.88	22.75	24.83	34.12	50.5	54.59	39.74	32.85	27.21	26.08	24.82	31.4
2010	23.67	23.22	23.65	25.46	26.66	29.21	33.91	31.65	27.98	21.47	18.1	17.32	25.17
2011	16.78	15.75	15.86	19.8	29.82	38.21	37.43	30.52	25.19	17.53	15.88	17.73	23.35
2012	19.51	18.39	22.33	22.72	35.86	38.04	50.61	38.37	25.58	20.42	18.43	18.93	27.38
2013	16.46	17.46	18.23	19.67	31.11	37.68	35.82	32.17	20.06	16.56	18.91	16.74	23.36
2014	16.16	17.86	17.15	21.52	31.73	33.6	37.36	32.27	26.99	18.9	16.54	18.92	24.04
2015	16.89	17.78	18.59	19.28	30.46	57.84	61.37	37.52	24.32	27.28	26.77	24.26	30.19
2016	22.94	21.89	23.9	28.22	39.27	49.72	50.01	41.14	30	24.07	23.92	20.54	31.27
2017	18.61	17.74	19.82	23.77	32.17	40.81	35.09	31.9	22.15	16.79	15	14.54	24
2018	15.52	14.25	13.96	16.4	28.13	40.19	36.19	33.16	21.8	17.33	17.48	14.56	22.37

Tabla 4.4. Estaciones climáticas y cuantiles de la curva de duración de caudales y extremos mínimos y máximos calculados en la estación La Angostura (LAN) (m³/s)

AÑO	INV	PRI	VER	OTO	Q10	Q30	Q90	Q80	Q270	Q355	QMIN	QMAX
1985	25.5	41.8	47.41	29.42	71.03	60.04	47.5	28.5	25	22.5	18.5	131.5
1986	25.32	61.11	70.53	29.21	118.03	90.25	60.29	34.25	27.33	22.5	19.5	146.48
1987	27.39	68.2	67.61	30.34	105.92	92.04	66.83	36.69	27.29	24.25	20.58	137.54
1988	24.19	40.66	51.1	22.42	64.55	59.38	48.3	26.3	23.51	20.11	17.93	68.85
1989	20.01	41.25	43.26	23.29	59.48	54.28	41.63	26.84	21.87	16.65	10.89	94.85
1990	19.63	30.1	37.75	24.11	48.14	43.58	35.35	24.25	20.21	16.29	14.85	53.2
1991	23.31	38.2	46.47	25.08	62.15	52.52	41.53	27.36	23.93	20.52	20.22	67
1992	22.32	50.79	53.45	28.39	76.53	68.18	53.43	31.19	24.97	19.91	18.94	83.99
1993	25.84	45.21	54.73	25.46	77.43	69.76	47.24	29.05	25.38	22.79	19.79	87
1994	24.48	54.3	44.77	25.57	88.42	69.76	44.93	30.76	24.06	20.96	20.03	95.74
1995	23.4	48.54	41.99	23.96	72.7	58.76	42.11	28	23.29	21.19	16.05	98.99
1996	19.93	25.01	34.55	20.68	42.51	38.59	31.05	21.28	19.71	17.77	13.75	48.28
1997	25.68	49.07	60.71	27.31	88.56	75.77	56.72	32.61	24.92	21.15	19.69	99.9
1998	19.2	25.05	34.22	18.68	43.53	38.87	29.15	20.64	18.59	17.28	15.31	50.13
1999	18.05	36.99	33.54	21.92	49.98	44.76	35.22	23.13	20.33	17	12.71	55.81
2000	22.87	57.75	61.27	32.43	95.06	81.25	60.27	34.01	27.09	21.05	20.34	112.09
2001	29.8	63.08	59.13	28.14	105.79	76.81	57.12	34.69	28.28	25.05	24.04	132.96
2002	31.76	66.95	75.87	32.14	113.71	97.7	68.74	40.48	31.2	24.74	23.78	129.07
2003	27.07	41.21	49.57	31.39	60.25	56.07	45.87	32.57	27.52	25.81	24.53	96.53
2004	26.68	36.65	40.2	26.08	52.25	47.3	38.78	29.68	25.67	21.73	17.35	55.46
2005	29.59	68.14	88.07	37.42	127.64	112.02	74.22	42.19	33.85	22.21	20.92	136.51
2006	34.73	62.9	69.92	32.6	116.55	90.88	62.93	39.91	33.12	28.97	27.69	127.62
2007	26.32	38.18	43.31	27.8	55.56	51.88	43.38	28.13	26	24.11	22.87	77.44
2008	26.39	52.38	45.32	28.05	67.92	64.26	46.05	35.3	26.02	18.45	16.47	77.71
2009	20.77	36.51	42.48	26.04	58.5	53.63	36.44	26.54	22.59	19.08	18.31	69.5
2010	23.51	27.11	31.16	18.95	35.75	33.75	28.25	23.98	22.54	16.23	15.35	39.63
2011	16.13	29.27	31.06	17.04	42.57	37.45	30.69	20.05	16.05	13.18	12.25	44.95
2012	20.05	32.17	38.18	19.25	59.97	42.98	34.61	23.03	19	17.8	12.1	72.18
2013	17.37	29.47	29.25	17.42	40.79	37.91	31.08	19.25	17.12	15.66	9.23	45.09
2014	17.06	28.92	32.2	18.1	41.23	37.85	30.46	19.92	17.46	15.41	15.19	47.91
2015	17.74	35.92	41.19	26.11	75.33	59.32	34.27	24.73	18.19	16.64	13.75	86.33
2016	22.9	39.07	40.36	22.85	54.7	49.78	40.66	26.21	22.89	20.13	16	62.89
2017	18.71	32.25	29.64	15.44	42.13	40.52	30.02	20.27	17.32	13.82	11.4	46.43
2018	14.59	28.24	30.29	16.47	41.87	39.69	29.66	17.98	14.82	13.22	12.79	51.24

4.5. Verificación de supuestos estadísticos subyacentes y análisis de tendencia y cambios abruptos

Para garantizar la validez de los análisis estadísticos aplicados a las series de caudales, se verificaron previamente los supuestos subyacentes de normalidad, aleatoriedad, independencia y presencia de valores atípicos. Posteriormente, se aplicaron pruebas paramétricas y no paramétricas para evaluar la existencia de tendencias y la ocurrencia de cambios abruptos en las series temporales, lo cual permite identificar patrones hidrológicos relevantes y posibles alteraciones en el régimen fluvial.

4.5.1. Normalidad

Para verificar si una serie de datos está ligada a una distribución de la población normal estándar, se aplicaron las pruebas de asimetría y curtosis, cuyos estadísticos (Snedecor y Cochran, 1962, cit. Salas, 1992) están dados por las Ec. 4.9 y 4.10:

$$Asimetría = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{NS^3} \quad \text{Ec. 4.9}$$

$$Curtosis = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{NS^4} \quad \text{Ec. 4.10}$$

Adicionalmente, sus estadísticos (Ec. 4.11 y 4.12) de contraste se identifican como:

$$Z_{asimetría} = \frac{asimetría}{\sqrt{\frac{6}{N}}} \quad \text{Ec. 4.11}$$

$$Z_{curtosis} = \frac{curtosis}{\sqrt{\frac{24}{N}}} \quad \text{Ec. 4.12}$$

Dónde: S es el desvío estándar y N el tamaño de la muestra.

El estadístico calculado se compara con el cuantil $Z_1 - \alpha/2$ de la distribución normal estándar; si el estadístico de contraste entra dentro de los límites del intervalo $[-Z_1 - \alpha/2, Z_1 - \alpha/2]$, la hipótesis de normalidad es aceptada, siendo α el nivel de significancia de 0,05.

En cuanto a la normalidad, aleatoriedad e independencia, la aplicación de las pruebas arroja la aceptación o rechazo de la hipótesis nula. La decisión sobre la aceptación de la H_0 se da si ambas pruebas lo aceptan. Si al menos una de ellas no lo hace, se decide rechazar el supuesto para la variable en cuestión.

Las estaciones Puente El Sosneado, Loma Negra y La Angostura, presentan normalidad significativa en el 70 % de las variables consideradas. Esta situación disminuye al 40 % para la estación Cañada Ancha (río Salado), y al 24 % en la estación Carmensa (a la salida del oasis de riego) (Tabla 4.8). Para este caso, la falta de normalidad en la mayoría de las variables de la estación Carmensa, puede deberse al nivel de aprovechamiento de agua del río Atuel, el cual es máximo para el punto de aforo de dicha estación (final del oasis irrigado). Asimismo, evidencia un patrón no regular de caudales, distinto de estaciones aguas arriba del mismo río, posiblemente debido a acciones antrópicas. Por otra parte, la situación presentada en Cañada Ancha puede ser asociado a los regímenes torrentosos propios de un río de montaña (río Salado) y a la variabilidad hidrológica que conlleva.

4.5.2. Aleatoriedad

Para esta prueba, se aplicaron las pruebas no paramétricas de Rachas y Kendall (McGhee, 1985, citado por Adeloze y Montaseri, 2002).

La prueba de Rachas se relaciona con el hecho que las observaciones pueden presentar una de dos características al extraer secuencialmente los elementos muestrales. Una, de manera puramente aleatoria o formando una racha larga (secuencia de valores sucesivos iguales). Ambas características se alternan de forma impredecible y el número de rachas proporciona evidencia de la aleatoriedad de la muestra.

A la observación de la muestra se le asigna un indicador según esté por encima o por debajo de la mediana muestral. De esta forma, se establece el número de rachas y el número de datos que reúne cada indicador, siendo su estadístico (Ec. 4.13):

$$Z_{\text{rachas}} = \frac{NR - \frac{2N_1N_2}{N_1 + N_2} + 1}{\sqrt{\frac{2N_1N_2(2N_1N_2 - (N_1 + N_2))}{(N_1 + N_2)^2(N_1 + N_2 - 1)}}} \quad \text{Ec. 4.13}$$

Dónde: NR número de rachas; N_1 número de datos de la componente E ; N_2 número de datos de la componente D .

En cuanto al criterio de rechazo, el estadístico calculado se compara con el valor cuantil $Z_{1-\alpha}$ de la distribución normal estándar. Si $|Z_{rachas}| \leq Z_{(1-\alpha)}$, las observaciones disponibles proceden de una población aleatoria (H_0), frente a la alternativa de que hay cierto determinismo en ellas (H_1).

Como parte de la prueba de Kendall, este permite comprobar la presencia de aleatoriedad de una muestra, basado en el rango de una serie de puntos de inflexión, conocidos como picos y valles que deberían distribuirse al azar. Los picos son aquellas observaciones superiores a las adyacentes y los valles representan observaciones menores a las contiguas.

El estadístico de contraste consiste en calcular el número de puntos de inflexión en una serie, mediante la definición de una nueva serie I (Ec. 4.14):

$$I_i = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i > x_{i-1} \text{ y } x_i > x_{i+1} \\ -1 & \text{si } x_i < x_{i-1} \text{ y } x_i < x_{i+1} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad \forall i = 2 \dots N-1 \quad \text{Ec. 4.14}$$

En consecuencia, el número de puntos de inflexión resulta como (Ec. 4.15):

$$Q = \sum_{i=2}^{N-2} |I_i| \quad \text{Ec. 4.15}$$

Mientras que el estadístico de contraste se presenta como (Ec. 4.16):

$$C = \frac{Q - \frac{2N-4}{3}}{\sqrt{\frac{(16N-29)}{90}}} \quad \text{Ec. 4.16}$$

Dónde: x_i es la observación en el rango i , y Q el número de puntos de inflexión.

Criterio de rechazo: C tiene distribución aproximadamente normal $N(0,1)$, por lo que el criterio de rechazo es similar a la prueba de Rachas.

De acuerdo con la OMM (2011), desde el punto de vista hidrológico, la aleatoriedad implica que las fluctuaciones de la variable se deben a causas naturales y no a efectos de origen antrópico. Sin embargo, es notorio que la estación con mayor aleatoriedad en sus variables (68 %), sea Carmensa. Si bien esta estación registra los desagües de zonas irrigadas más los remanentes de caudales que son aliviados desde los diques aguas arriba, la aleatoriedad observada puede estar referida a la inconsistencia estadística que le propicia dicha situación (Tabla 4.8 y Tabla 4.9).

Por otra parte, las demás estaciones del río Atuel (aguas arriba), presentan más del 60 % de ausencia de aleatoriedad en sus variables, pudiéndose destacar el énfasis de este en los meses con mayor demanda hídrica de los oasis irrigados (verano y primavera). Por otra parte, es notorio resaltar que todas las estaciones presentan falta de aleatoriedad en la variable invierno y anual, lo cual hace evidente el impacto antrópico del uso del agua en la zona (embalses e irrigación).

4.5.3. Independencia

El supuesto de independencia se evaluó mediante las pruebas de Bartlett y Von Neumann. El primero de ellos, se trata de una prueba paramétrica que asume que las observaciones de la muestra siguen una distribución normal (Kundzewicz y Robson, 2000).

Estadístico de contraste: la independencia de las observaciones en la serie se comprueba mediante el coeficiente de autocorrelación con $lag = 1$. La hipótesis nula enuncia que la autocorrelación sea cero, lo que significa que los datos posteriores en la muestra son independientes. El coeficiente se calcula como (Ec. 4.17):

$$r_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (x_i - \bar{X})(x_{i+1} - \bar{X})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2} \quad \text{Ec. 4.17}$$

El estadístico de contraste (Ec. 4.18) está dado por:

$$S = \frac{r_1 \sqrt{df}}{\sqrt{(1 - r_1^2)}} \quad \text{Ec. 4.18}$$

Dónde: df son los grados de libertad, que se estiman como (Ec. 4.19):

$$df = (N - 3) \frac{1 - r_1^2}{1 + r_1^2} \quad \text{Ec. 4.19}$$

El estadístico de prueba S sigue una distribución t de Student con $N - 3$ grados de libertad y se lo compara con el valor crítico de dicha distribución. Esto significa que la hipótesis de la independencia es rechazada si $|S| > t_{(1-\alpha/2)}$. Se trata de una prueba sensible a la ausencia de normalidad.

Adicionalmente, la prueba de Von Neumann es una prueba de proporciones, no paramétrica, utilizada para comprobar la independencia de las observaciones en una serie temporal.

El estadístico de prueba o contraste es R , que se calcula como (Ec. 4.20):

$$R = \frac{N \sum_{i=1}^{N-1} (x_{i+1} - x_i)^2}{(N - 1) \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2} \quad \text{Ec. 4.20}$$

El estadístico de prueba estandarizado C se calcula mediante (Ec. 4.21):

$$C = \frac{R - \frac{N-1}{4}}{\sqrt{\frac{(N-1)^2}{4(N-2)}}} \quad \text{Ec. 4.21}$$

En cuanto al criterio de rechazo, el estadístico de contraste C tiene una distribución normal $N(0,1)$. Así, si $|S| > z_{(1-\alpha/2)}$, siendo z el cuantil de la distribución normal estándar, entonces la hipótesis de que la serie consta de observaciones independientes se rechaza.

Con relación a la independencia, las estaciones Puente El Sosneado, Loma Negra y La Angostura, rechazan la hipótesis nula (presencia de independencia) en más del 80 % de las 25 variables consideradas (Tabla 4.8). Esta situación puede ocurrir debido a que dichas estaciones aforan un mismo río, que, además, tiene una extensa cuenca alta con reservorios glaciarios importantes (Falaschi *et al.*, 2018). Por su parte, la estación Carmensa, presenta independencia en un 92 % de las variables. Si bien se localiza sobre el río Atuel, por estar a la salida de la región de aprovechamiento agrícola, el flujo de caudales (alterado por acción antrópica) no depende estadísticamente de la escorrentía natural, como sí lo demuestran las demás estaciones del río Atuel aguas arriba. Como situación particular de esta estación, se resalta la falta de independencia para la variable invierno, probablemente debido a que es la estación climática con menor producción agrícola, de menor aprovechamiento de aguas, y por ende, de mayor dependencia de los caudales naturales provenientes del río Atuel.

Adicionalmente, la estación Cañada Ancha (río Salado) presenta un 44 % de independencia en sus variables. Si bien la estación se localiza aguas arriba del sistema irrigado, su cuenca es casi tres veces inferior a la del río Atuel en Puente El Sosneado, por lo que la dependencia de caudales es inferior que la mostrada en las tres primeras estaciones del río Atuel.

A continuación, se presentan las salidas de las pruebas de normalidad, aleatoriedad e independencia para la Estación La Angostura (LAN), dispuestas en las tablas Tabla 4.5, Tabla 4.6 y Tabla 4.7, respectivamente.

El criterio de decisión se basó en que la hipótesis nula se aceptaba cuando ambos test (o, en su defecto, uno de ellos si el otro no podía aplicarse) la aprobaban. Por el contrario, si uno o ambos test la rechazaban, se procedía a rechazar la hipótesis nula.

Tabla 4.5. Salidas de la prueba de normalidad (asimetría y curtosis) para la estación La Angostura (LAN).

TEST DE ASIMETRÍA (NORMALIDAD, ALFA=0,05) - MENSUAL

MES	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
Asimetría	0.80	0.96	-0.07	0.32	0.54	0.65	1.06	1.18	0.63	0.36	-0.18	0.45
Z. Asim.	1.91	2.29	-0.15	0.76	1.29	1.56	2.52	2.80	1.49	0.86	-0.44	1.06
p-nivel:	0.06	0.02	0.87	0.44	0.19	0.11	0.01	0.01	0.14	0.39	0.66	0.29
	A	R	A	A	A	A	R	R	A	A	A	A

TEST DE ASIMETRÍA (NORMALIDAD, ALFA=0,05) – ESTACIONES CLIMÁTICAS, CUANTILES Y EXTREMOS

MES	INV	PRI	VER	OTO	ANUAL	Q10	Q30	Q90	Q180	Q270	Q355	QMIN	QMAX
Asimetría	0.32	0.56	0.98	0.06	0.61	0.77	0.85	0.70	0.40	0.22	0.19	0.23	0.50
Z. Asim.	0.75	1.32	2.34	0.15	1.45	1.83	2.02	1.66	0.95	0.52	0.45	0.54	1.18
p-nivel:	0.45	0.19	0.02	0.88	0.15	0.07	0.04	0.10	0.34	0.61	0.65	0.59	0.24
	A	A	R	A	A	A	R	A	A	A	A	A	A

TEST DE CURTOSIS (NORMALIDAD, ALFA=0,05) - MENSUAL

MES	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
Curtosis	1.64	0.91	-0.64	-0.82	-0.34	-0.85	0.53	1.75	-0.15	-0.68	-0.93	0.11
Z. Curt.	1.96	1.08	-0.76	-0.98	-0.40	-1.01	0.63	2.08	-0.18	-0.81	-1.11	0.13
p-nivel	0.05	0.28	0.44	0.33	0.69	0.31	0.53	0.04	0.86	0.42	0.27	0.90
	A	A	A	A	A	A	A	R	A	A	A	A

TEST DE CURTOSIS (NORMALIDAD, ALFA=0,05) – ESTACIONES CLIMÁTICAS, CUANTILES Y EXTREMOS

MES	INV	PRI	VER	OTO	ANUAL	Q10	Q30	Q90	Q180	Q270	Q355	QMIN	QMAX
Curtosis	-0.16	-0.85	0.49	-0.53	-0.39	-0.48	0.01	-0.45	-0.56	-0.25	-0.36	-0.40	-1.00
Z. Curt.	-0.19	-1.01	0.59	-0.63	-0.47	-0.57	0.01	-0.53	-0.67	-0.29	-0.43	-0.48	-1.19
p-nivel	0.85	0.31	0.56	0.53	0.64	0.57	0.99	0.59	0.51	0.77	0.67	0.63	0.23
	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Tabla 4.6. Salidas de la prueba de aleatoriedad (Rachas y Kendall) para la estación La Angostura (LAN) (m³/s)

TEST DE RACHAS (ALEATORIEDAD, ALFA=0,05) - MENSUAL

MES	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
Mediana	22.95	21.86	24.08	28.40	41.49	49.86	54.92	43.35	33.04	26.21	25.59	23.64
Rachas	10.00	12.00	9.00	11.00	13.00	14.00	14.00	10.00	12.00	16.00	8.00	10.00
Est. Z	-2.79	-2.09	-3.13	-2.44	-1.74	-1.39	-1.39	-2.79	-2.09	-0.36	-3.48	-2.79
p-nivel	0.01	0.04	0.00	0.01	0.08	0.16	0.16	0.01	0.04	0.72	0.00	0.01
	R	R	R	R	A	A	A	R	R	A	R	R

TEST DE RACHAS (ALEATORIEDAD, ALFA=0,05) – ESTACIONES CLIMÁTICAS, CUANTILES Y EXTREMOS

MES	INV	PRI	VER	OTO	ANUAL	Q10	Q30	Q90	Q180	Q270	Q355	QMIN	QMAX
Mediana	23.35	39.86	43.28	25.51	33.54	61.20	55.17	41.87	27.68	23.72	20.12	17.64	77.57
Rachas	10.00	12.00	10.00	12.00	10.00	14.00	14.00	10.00	8.00	8.00	12.00	12.00	16.00
Est. Z	-2.79	-2.09	-2.79	-2.09	-2.79	-1.39	-1.39	-2.79	-3.48	-3.48	-2.09	-2.09	-0.70
p-nivel	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01	0.16	0.16	0.01	0.00	0.00	0.04	0.04	0.49
	R	R	R	R	R	A	A	R	R	R	R	R	A

TEST DE KENDALL (ALEATORIEDAD, ALFA=0,05) - MENSUAL

MES	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
Q	20.00	19.00	19.00	21.00	21.00	17.00	18.00	16.00	21.00	22.00	18.00	19.00
E (Q)	21.33	21.33	21.33	21.33	21.33	21.33	21.33	21.33	21.33	21.33	21.33	21.33
EST. C	-0.56	-0.98	-0.98	-0.14	-0.14	-1.81	-1.39	-2.23	-0.14	0.28	-1.39	-0.98
p-nivel	0.58	0.33	0.33	0.89	0.89	0.07	0.16	0.03	0.89	0.78	0.16	0.33
	A	A	A	A	A	A	A	R	A	A	A	A

TEST DE KENDALL (ALEATORIEDAD, ALFA=0,05) – ESTACIONES CLIMÁTICAS, CUANTILES Y EXTREMOS

MES	INV	PRI	VER	OTO	ANUAL	Q10	Q30	Q90	Q180	Q270	Q355	QMIN	QMAX
Q	20.00	19.00	18.00	21.00	15.00	15.00	16.00	17.00	19.00	15.00	21.00	20.00	18.00
E (Q)	21.33	21.33	21.33	21.33	21.33	21.33	21.33	21.33	21.33	21.33	21.33	21.33	21.33
EST. C	-0.56	-0.98	-1.39	-0.14	-2.65	-2.65	-2.23	-1.81	-0.98	-2.65	-0.14	-0.56	-1.39
p-nivel	0.58	0.33	0.16	0.89	0.01	0.01	0.03	0.07	0.33	0.01	0.89	0.58	0.16
	A	A	A	A	R	R	R	A	A	R	A	A	A

Tabla
4.7.

Salidas de la prueba de independencia (Bartlett y Von Neumann) para la estación La Angostura (LAN) (m³/s)

TEST DE BATLETT (INDEPENDENCIA, ALFA=0,05) - MENSUAL

MES	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
Media	22.66	22.72	24.21	28.98	42.78	57.27	59.53	47.08	34.62	26.54	24.68	23.75
r1	0.40	0.59	0.48	0.51	0.26	0.37	0.33	0.38	0.51	0.34	0.55	0.55
df	22.60	14.94	19.35	18.29	27.14	23.45	24.86	23.04	18.24	24.63	16.53	16.61
p-nivel	0.05	0.01	0.02	0.02	0.17	0.06	0.09	0.05	0.02	0.08	0.01	0.01
	R	R	R	R	A	A	A	A	R	A	R	R

TEST DE BARTLETT (INDEPENDENCIA, ALFA=0,05) – ESTACIONES CLIMÁTICAS, CUANTILES Y EXTREMOS

MES	INV	PRI	VER	OTO	ANUAL	Q10	Q30	Q90	Q180	Q270	Q355	QMIN	QMAX
Media	23.19	43.01	47.08	24.99	34.52	69.31	59.63	44.26	28.23	23.44	19.83	17.44	83.26
r1	0.58	0.38	0.41	0.55	0.49	0.36	0.36	0.43	0.50	0.64	0.58	0.56	0.44
df	15.56	23.03	22.17	16.67	19.02	23.82	24.02	21.23	18.76	12.88	15.30	16.12	21.09
p-nivel	0.01	0.05	0.04	0.01	0.02	0.07	0.07	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03
	R	A	R	R	R	A	A	R	R	R	R	R	R

TEST DE VON NEUMANN (INDEPENDENCIA, ALFA=0,05) - MENSUAL

MES	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
R	1.11	0.76	0.94	0.92	1.49	1.27	1.34	1.23	0.95	1.30	0.86	0.72
Est. C	-2.41	-3.24	-2.21	-3.51	-3.91	-3.79	-2.42	-2.57	-3.58	-3.11	-2.28	-2.23
p-nivel	0.02	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02	0.03
	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R

TEST DE VON NEUMANN (INDEPENDENCIA, ALFA=0,05) – ESTACIONES CLIMÁTICAS, CUANTILES Y EXTREMOS

MES	INV	PRI	VER	OTO	ANUAL	Q10	Q30	Q90	Q180	Q270	Q355	QMIN	QMAX
R	0.76	1.23	1.18	0.83	1.00	1.28	1.30	1.13	0.96	0.63	0.75	0.87	1.06
Est. C	-2.72	-3.21	-4.18	-3.82	-3.49	-2.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
p-nivel	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	R	R	R	R	R	R	A	A	A	A	A	A	A

Tabla 4.8. Presencia y ausencia de normalidad, aleatoriedad e independencia para las 25 variables consideradas.

Normalidad	Río	Estac.	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	Inv	Pri	Ver	Oto	Anual	Q ₁₀	Q ₃₀	Q ₉₀	Q ₁₈₀	Q ₂₇₀	Q ₃₅₅	Q _{min}	Q _{máx}
	Atuel	ESO																									
	Atuel	LNE																									
	Atuel	LAN																									
	Salado	CAN																									
	Atuel	CAR																									

Aleatoriedad	Río	Estac.	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	Inv	Pri	Ver	Oto	Anual	Q ₁₀	Q ₃₀	Q ₉₀	Q ₁₈₀	Q ₂₇₀	Q ₃₅₅	Q _{min}	Q _{máx}
	Atuel	ESO																									
	Atuel	LNE																									
	Atuel	LAN																									
	Salado	CAN																									
	Atuel	CAR																									

Independencia	Río	Estac.	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	Inv	Pri	Ver	Oto	Anual	Q ₁₀	Q ₃₀	Q ₉₀	Q ₁₈₀	Q ₂₇₀	Q ₃₅₅	Q _{mín}	Q _{máx}
	Atuel	ESO																									
	Atuel	LNE																									
	Atuel	LAN																									
	Salado	CAN																									
	Atuel	CAR																									

Estación	Normalidad		Aleatoriedad		Independencia	
	%	%	%	%	%	%
ESO	76	24	16	84	20	80
LNE	68	32	44	56	0	100
LAN	80	20	20	80	4	96
CAN	36	64	44	56	28	72
CAR	24	76	68	32	92	8

Leyenda	Ho
Tabla 4.9	
Acepta	
Rechaza	

Tabla 4.9. Porcentaje de variables con y sin presencia de Normalidad, Aleatoriedad e independencia.

4.5.4. Detección de valores atípicos

Cuando se examina una muestra, a veces se presentan datos atípicos o dudosos producto de errores instrumentales, tipográficos, cambios de métodos de medición, entre otros. Su importancia radica en el hecho de que se trata de datos que pueden ser no representativos de la población y pueden distorsionar los contrastes estadísticos.

En general, los métodos de detección son sencillos y directos, pero el tratamiento de cada uno de ellos requiere de la incorporación de condiciones no solo matemáticas, sino también, de consideraciones hidrológicas.

De existir valores dudosos altos, éstos deben ser comparados con la información histórica en sitios cercanos, a fin de excluirlos o no del análisis. El tratamiento de este tipo de información siempre contiene una cuota de subjetividad y prácticamente no existe una metodología de aceptación universal. A continuación, se describen los métodos empleados para la identificación de valores atípicos u *outliers*.

Las pruebas empleadas fueron: Grubbs (EPA, 2000), Interagency Advisory Committee on Water Data (1982) (antiguamente WCR), Rosner (EPA, 2000) y MAD-score (median absolute deviation) (Leys *et al.*, 2013; Bae y Ji, 2019).

La prueba de Grubbs requiere que los datos se aproximen razonablemente a una distribución normal. Esta prueba detecta un valor atípico a la vez, donde luego este valor es eliminado de la muestra y la prueba se repite hasta que no se detectan valores atípicos. El estadístico de contraste para Grubbs es (Ec. 4.22):

$$G = \max \left| \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right| \quad \text{Ec. 4.22}$$

Dónde: x_i es la medida de la variable hidrológica; $\bar{x}$ la media o momento de primer orden; s desvío estándar de la muestra.

Si se obtiene un valor de G mayor que el valor crítico dado por la distribución de t de

Student con $N - 2$ grados de libertad y un nivel de significancia dado, se supone que existe un dato atípico.

El Interagency Advisory Committee on Water Data (1982), emplea ecuaciones de frecuencia para detectar los datos altos y bajos considerados dudosos, asumiendo que la distribución estadística subyacente es Log-Pearson III. Las ecuaciones (Ec. 4.23) que permiten el cálculo del umbral superior e inferior, a partir del cual las observaciones que lo superen o sean menores se consideran valores dudosos, son:

$$\begin{aligned} y_H &= \bar{y} + K_n S_y \\ y_L &= \bar{y} - K_n S_y \end{aligned} \quad \text{Ec. 4.23}$$

Dónde, y_H es el umbral de dato dudoso alto, y_L es el umbral de datos dudosos bajo, ambos en unidades logarítmicas; K_n es un factor de la distribución normal para detectar observaciones dudosas para un nivel de significancia $\alpha = 5\%$; S_y es la desviación estándar.

La prueba de Rosner (Environmental Protection Agency EPA, 2000), permite verificar si los valores extremos (mínimos y máximos hasta un número de 10) de una muestra ordenada de menor a mayor, pueden ser considerados valores dudosos o atípicos. En primer lugar, se calculan la media ($\bar{X}^{(0)}$) y desvío ($s^{(0)}$) de la serie y se identifica el valor más alejado de la media ($y^{(0)}$), que se encuentra en uno de los extremos. Posteriormente se elimina el valor $y^{(0)}$, se recalculan la media ($\bar{X}^{(1)}$), el desvío ($s^{(1)}$) y reiteradamente se busca el nuevo valor más alejado ($y^{(1)}$) de la nueva media de la muestra. Este procedimiento se repite hasta 10 veces como máximo, o un número de veces equivalente a la cantidad de valores que se sospechan estén fuera de rango.

Luego se calculan todos los estadísticos $R_{(i+1)}$ con la expresión (Ec. 4.24):

$$R_{(i+1)} = \left| \frac{y^i - \bar{x}^{(i)}}{s^{(i)}} \right| \quad \text{Ec. 4.24}$$

Se comienza con Rn ; si este es mayor que el valor crítico calculado con base al nivel de significación, longitud de la muestra y posición del estadístico, la observación $y^{(i)}$ es considerada un valor atípico que requiere de una investigación particular. Al igual que el anterior, la prueba requiere que los valores muestrales se distribuyan normalmente y es aplicable para una longitud de muestra mayor o igual a 25.

De existir valores dudosos, éstos deben ser comparados con la información histórica de sequías y crecientes en sitios cercanos, a fin de excluirlos o no del análisis. El tratamiento de este tipo de información siempre contiene una cuota de subjetividad.

Se consideró para cada supuesto que, si al menos una de las pruebas rechazaba la hipótesis nula, se concluía que había evidencia suficiente para aceptar la hipótesis alternativa. El nivel de significancia empleado fue de 0,05.

Adicional a los métodos anteriores, Leys *et al.* (2013) y Bae y Ji (2019) sugieren utilizar el método MAD-score (*median absolute deviation* – desviación absoluta de la mediana) como estimador robusto de la dispersión de la data desde la mediana muestral. Luego de su popularización en 1974 y con atributos de ideas de Gauss (s.XVIII – XIX), se convirtió en una alternativa para detectar valores atípicos (*outliers*) o fuera de rango. Con el uso de la mediana en vez de la media, se obtienen ventajas ante la sensibilidad de la primera en presencia de *outliers*, resultando tener más ventajas para su uso que otras metodologías, como el rango intercuartílico.

Derivado de Leys *et al.* (2013) y Bae y Ji (2019), la metodología se expresa como (Ec. 4.25 y 4.26):

$$\sigma_{med} = |x_i - med[X_j]| \quad \text{Ec. 4.25}$$

$$MAD = \frac{med(\sigma_{med})}{0,6745} \quad \text{Ec. 4.26}$$

Criterio: $\{med[X_j] - (2,5 * MAD)\} < x_i < \{med[X_j] + (2,5 * MAD)\}$

Dónde:

σ_{med} : desviación de cada valor de la serie x_i ($i = 1, \dots, n$) con respecto a la mediana (med) de la serie de datos $[X_j]$.

MAD : desviación absoluta de la mediana; 0,6745: constante referido al cuantil 75 de la distribución normal estándar.

En el criterio de decisión, la constante 2,5 expresa la medida de robustez del método. Miller (1991) los categoriza en tres partes, 2: poco conservador; 2,5: moderadamente conservador y 3: muy conservador. Por su parte, Leys *et al.* (2013) recomiendan el criterio de 2,5, aunque el mismo pueda variar de acuerdo con las necesidades de investigación. Luego de la identificación de los posibles *outliers* encontrados, cada uno debe analizarse en el contexto espacial y temporal entre las estaciones consideradas, así como también por el momento de ocurrencia de cada valor atípico. De esta forma, si un *outlier* coincide con otros valores atípicos en el mismo período o en su defecto, con aumentos o disminuciones importantes de la magnitud de la variable en el mismo período, el mismo podrá ser verificado, de lo contrario, el mismo puede eliminarse de la serie (Bastidas et al., 2024).

Para casos excepcionales donde la primera condición anterior no se cumpla, se puede recurrir a registros históricos (principalmente de tipo hemerográficos) para intentar constatar la veracidad de estos.

Similar a las metodologías de WRC, Grubbs y Rosner (que detectan hasta cinco valores atípicos por variable), la prueba de MAD-score discrimina en tres grupos de resultados de acuerdo con el nivel de precisión de este: poco conservador, moderadamente conservador y muy conservador. Cada uno de estos grupos puede detectar hasta cinco datos atípicos o fuera de rango, pudiendo catalogarse como *outliers* en caso de ser verificados.

Dado que todas las estaciones se encuentran dentro de una cuenca en común, en teoría todas las series temporales comparten las mismas características en cuanto a la magnitud y ocurrencia de los eventos extremos mínimos y máximos. Si para una

estación, en un año determinado, el valor de la variable indicó estar fuera de rango, su comprobación se determinó comparando dicho *outlier* con las demás estaciones en la misma variable. Si bien no es necesario que todas las variables presenten datos atípicos en el mismo momento cronológico, por tratarse de una cuenca en común, los puntos de inflexión ocurren en simultáneo para todas las estaciones. Por tanto, si un valor atípico es detectado y en el resto de las estaciones vecinas no existe un punto de inflexión similar, sería razón para sospechar del mismo y compararlo con otras fuentes de información (históricas) para validar o refutar su existencia.

Adicional al objetivo de detectar los valores fuera de rango (para comprobar si su existencia es producto de un error humano, de medición, instrumental o es producto de un proceso natural extraordinario), la identificación de estos puede ser valiosa para evidenciar los momentos de ocurrencia de mínimos o máximos que normalmente no se encuentran dentro del rango usual de una determinada serie temporal.

En la Figura 4.5, Figura 4.6 y Figura 4.7, se presentan las series temporales por caudales máximos y mínimos, meses y por cada estación climática, incluyendo aquellos años que fueron identificados como valores fuera de rango por las pruebas utilizados.

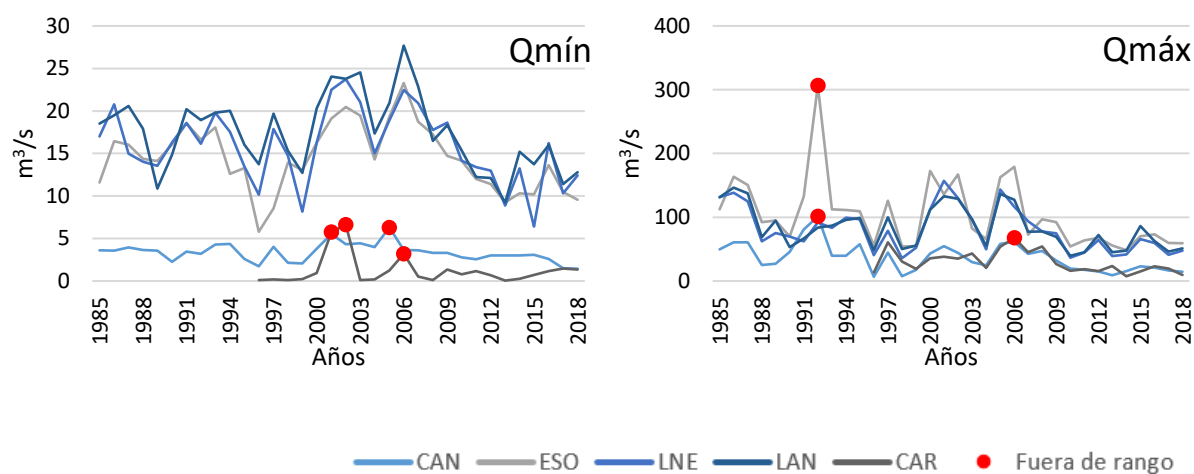


Figura 4.5. Valores fuera de rango de acuerdo con caudales mínimos y máximos

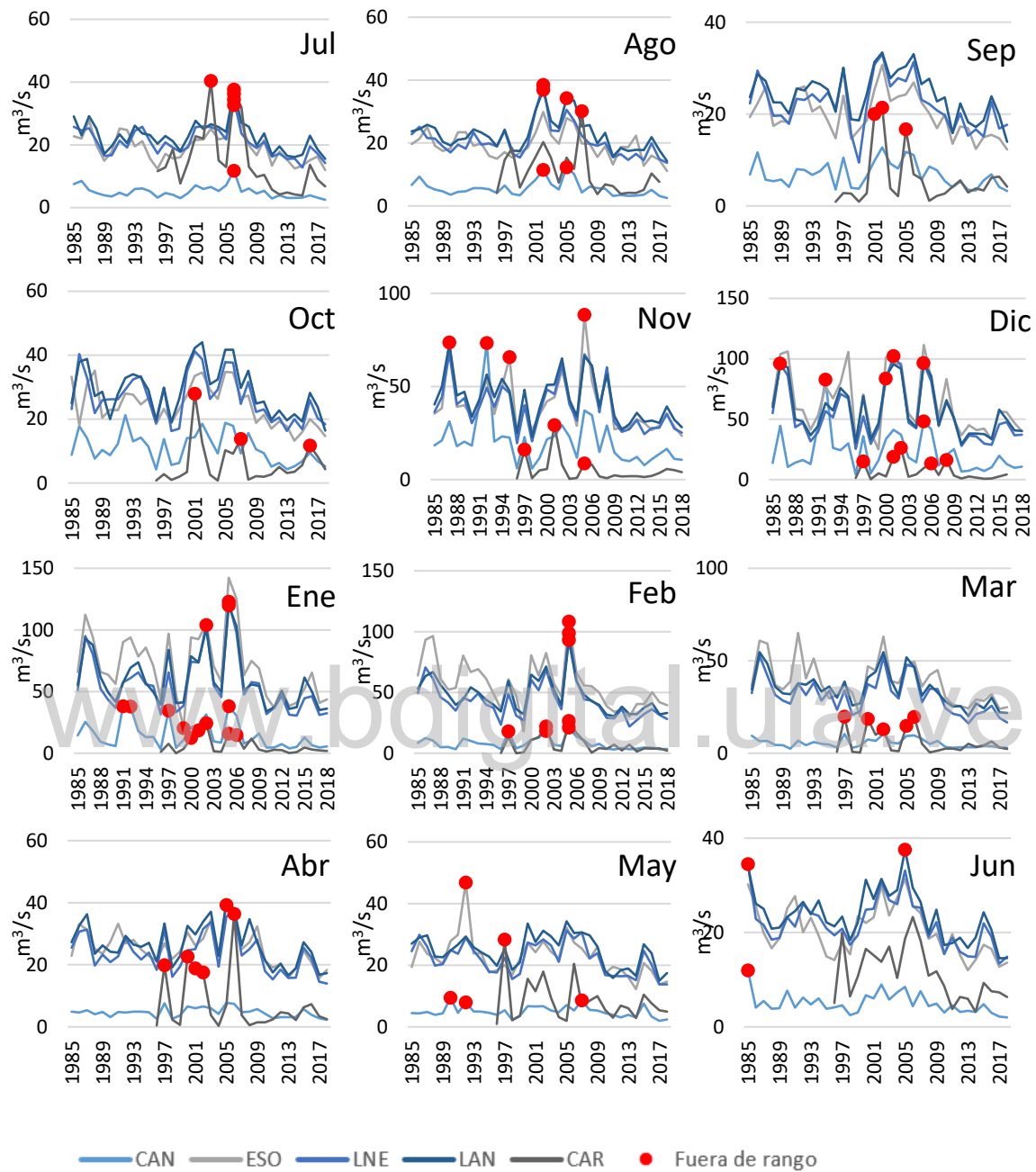


Figura 4.6. Valores fuera de rango por mes y estación hidrométrica

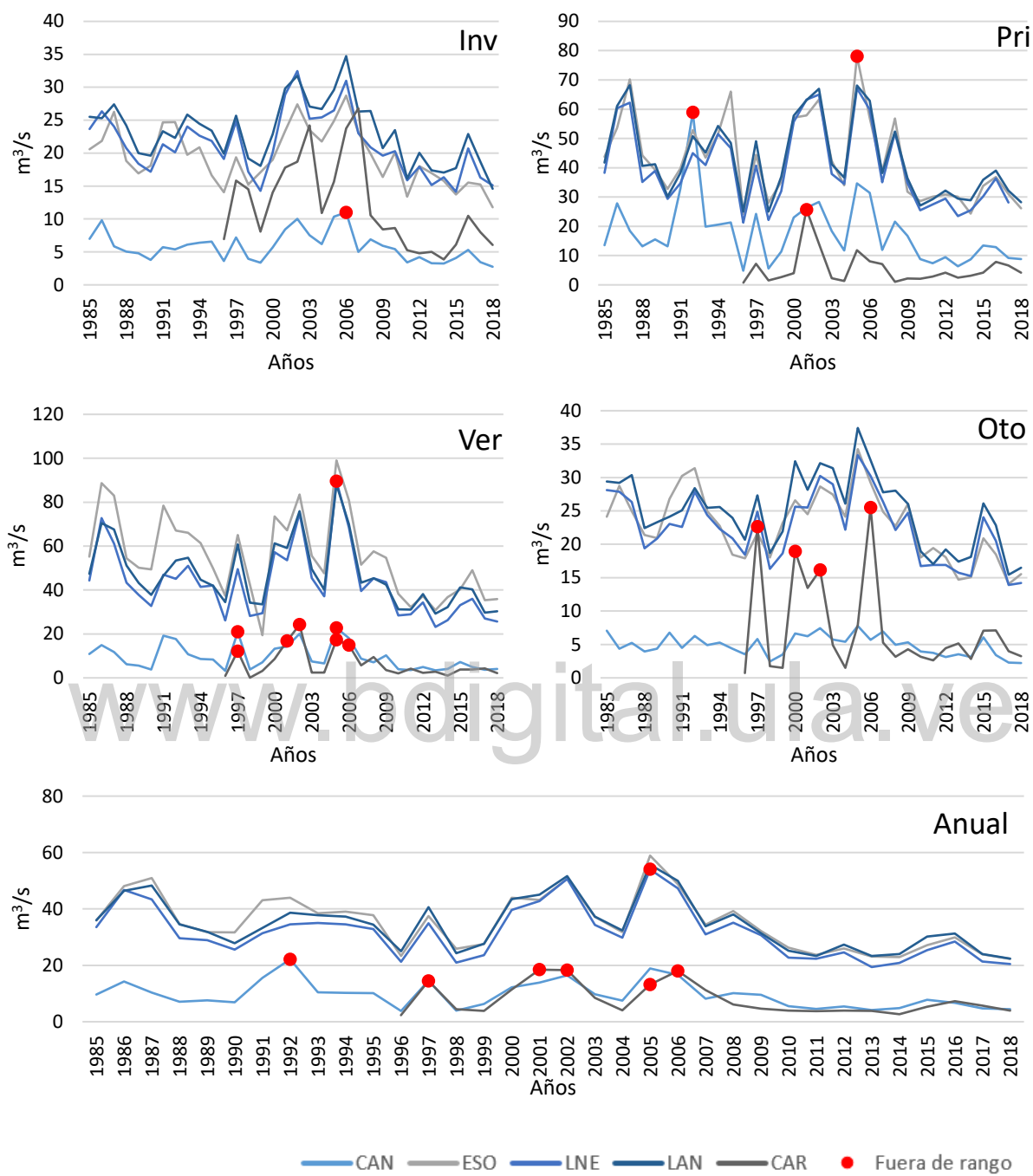


Figura 4.7. Valores fuera de rango por estaciones climáticas - media anual y estación hidrométrica.

Cabe destacar que las pruebas empleadas solo detectaron valores atípicos por encima de la media de las series, los cuales tienen importancia para evidenciar la respuesta de los ríos ante eventos climáticos externos (como ENSO). En cuanto a los datos atípicos inferiores a la media, no son detectados por cuanto no existen valores de caudales negativos. En este caso, la identificación de dichos “*outliers*” pueden ser reemplazados por un análisis de sequías hidrológicas, en donde las anomalías tengan mayores referencias temporales y espaciales que de magnitud (para el caso de las estaciones y valores con registros nulos de caudales).

Sin embargo, el análisis de valores atípicos para ecosistemas como la zona de estudio pueden ser valiosas, ya que podrían evidenciar la existencia de pulsos periódicos de inundación, esenciales para mantener saludables los ambientes ribereños y de humedales, con la provisión periódica extraordinaria de agua para, entre otros aspectos, controlar la salinización de dichos ambientes (Magnani, 2016).

Si bien todas las estaciones presentaron valores atípicos altos, su verificación se ejecutó comparando todas las estaciones durante los mismos períodos de referencia, es decir, que si una estación presentaba un dato atípico, las demás debían mostrar otro *outlier* o al menos (en este caso) una elevación de los caudales para el mismo momento considerado. De esa forma, no hubo necesidad de buscar otro tipo de fuentes de información para su verificación, o en otros casos, de eliminar de las series ningún dato considerado.

A continuación, se presentan las salidas de las pruebas de valores atípicos para la Estación La Angostura (LAN), dispuestas en las tablas Tabla 4.10, Tabla 4.11 y Tabla 4.12, respectivamente.

El criterio de decisión se basó en la concordancia media entre los valores atípicos arrojados por los diferentes test.

Tabla 4.10. Salidas de la prueba de valores atípicos (Grubbs) para la estación La Angostura (LAN) (m³/s)

TEST DE GRUBBS (VALORES ATÍPICOS – MENSUAL)

MES	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
MEDIA	22.66	22.72	24.21	28.98	42.78	57.27	59.53	47.08	34.62	26.54	24.68	23.75
DES. EST	4.67	5.26	4.95	7.67	12.65	21.24	22	14.2	9.19	6.55	5.27	5.38
ATIPICO 1	2006	0	0	0	0	0	0	2005	0	0	0	0
ATIPICO 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ATIPICO 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ATIPICO 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ATIPICO 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

MES	INV	PRI	VER	OTO	ANUAL	Q10	Q30	Q90	Q180	Q270	Q355	QMIN	QMAX
MEDIA	23.19	43.01	47.08	24.99	34.52	69.31	59.63	44.26	28.23	23.44	19.83	17.44	83.26
DES. EST	4.67	13.33	14.75	5.39	9.03	26.12	20.17	12.81	6.45	4.69	3.81	4.38	32.55
ATIPICO 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ATIPICO 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ATIPICO 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ATIPICO 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ATIPICO 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 4.11. Salidas de la prueba de valores atípicos (WRC) para la estación La Angostura (LAN) (m³/s)

TEST DE WATER RESOURCES COUNCIL - WCR (VALORES ATÍPICOS – MENSUAL)

MES	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
LOG10 MED	1.35	1.35	1.37	1.45	1.61	1.73	1.75	1.66	1.52	1.41	1.38	1.36
LOG10 DS	0.09	0.10	0.09	0.12	0.13	0.16	0.15	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10
AÑO MAX	37.58	36.90	33.42	44.05	72.92	96.40	119.75	93.04	54.64	40.59	34.24	37.53
AÑO MIN	15.52	14.25	13.96	16.40	22.84	29.21	33.91	30.52	20.06	16.56	15.00	14.54
LS	39.42	41.57	43.59	60.15	95.11	150.50	149.43	100.58	70.51	52.33	45.82	44.34
LI	12.52	11.83	12.88	13.03	17.69	19.16	21.04	20.35	15.90	12.68	12.68	12.10
ATIPICO 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ATIPICO 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ATIPICO 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ATIPICO 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ATIPICO 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TEST DE WATER RESOURCES COUNCIL - WCR (VALORES ATÍPICOS – ESTACIONES CLIMÁTICAS, CUANTILES Y EXTREMOS)

MES	INV	PRI	VER	OTO	ANUAL	Q10	Q30	Q90	Q180	Q270	Q355	QMIN	QMAX
LOG10													
MED	1.36	1.61	1.65	1.39	1.52	1.81	1.75	1.63	1.44	1.36	1.29	1.23	1.89
LOG10 DS	0.09	0.13	0.13	0.10	0.11	0.16	0.14	0.12	0.10	0.09	0.09	0.11	0.17
AÑO MAX	34.73	68.20	88.07	37.42	55.68	127.64	112.02	74.22	42.19	33.85	28.97	27.69	146.48
AÑO MIN	14.59	25.01	29.25	15.44	22.37	35.75	33.75	28.25	17.98	14.82	13.18	9.23	39.63
LS	40.56	98.02	104.40	46.14	69.37	182.58	142.11	94.49	52.78	41.08	34.00	35.36	237.45
LI	12.74	17.23	19.45	12.91	16.11	23.09	22.55	19.18	14.35	12.86	11.15	8.08	25.14
ATIPICO 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ATIPICO 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ATIPICO 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ATIPICO 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ATIPICO 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 4.12. Salidas de la prueba de valores atípicos (Rosner) para la estación La Angostura (LAN) (m³/s)

PRUEBA DE VALORES ATÍPICOS – TEST DE ROSNER. VALORES CRÍTICOS: 2.97; 2.95; 2.94; 2.92; 2.91

	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
XM	22.66	22.72	24.21	28.98	42.78	57.27	59.53	47.08	34.62	26.54	24.68	23.75
SM	4.67	5.26	4.95	7.67	12.65	21.24	22	14.2	9.19	6.55	5.27	5.38
MAX.DES.	37.58	36.9	13.96	44.05	72.92	96.4	119.75	93.04	54.64	40.59	15	37.53
AÑO	2006	2002	2018	2002	1987	2005	2005	2005	2002	2005	2017	2005
ATIPICO 1	2006	0	0	0	0	0	0	2005	0	0	0	0
XM	22.21	22.29	24.52	28.53	41.87	56.08	57.71	45.69	34.01	26.11	24.98	23.33
SM	3.92	4.69	4.68	7.31	11.65	20.39	19.55	11.83	8.61	6.16	5.06	4.88
MAX.DES.	29.17	34.24	33.42	42.25	66.21	95.53	103.03	71.29	54.62	37.95	34.24	34.08
AÑO	1987	2005	2002	2001	2005	2001	2006	2002	1986	2006	2005	1985
ATIPICO 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XM	21.99	21.92	24.24	28.1	41.11	54.85	56.29	44.89	33.37	25.75	24.69	22.99
SM	3.77	4.24	4.46	6.99	10.97	19.43	18.07	11.07	7.9	5.87	4.85	4.55
MAX.DES.	29.03	33.54	33.02	41.73	65.06	95.06	101.25	66.66	51.91	37.1	33.52	14.54
AÑO	1985	2006	2006	2005	2002	1986	2002	1987	2005	2003	2000	2017
ATIPICO 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XM	21.77	21.54	23.95	27.66	40.34	53.55	54.84	44.18	32.77	25.38	24.4	23.26
SM	3.61	3.73	4.24	6.64	10.23	18.29	16.36	10.5	7.25	5.58	4.65	4.35
MAX.DES.	15.52	30.42	15.86	41.69	61.18	92.98	92.85	64.6	48.38	36.31	15.88	14.56
AÑO	2018	2001	2011	2006	2006	1987	1986	2000	1987	1987	2011	2018
ATIPICO 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XM	21.97	21.25	24.22	27.19	39.64	52.24	53.57	43.5	32.25	25.01	24.69	23.55
SM	3.47	3.4	4.03	6.21	9.63	17.05	15.01	9.96	6.76	5.29	4.45	4.11
MAX.DES.	16.16	14.25	31.38	38.84	22.84	91.67	87.7	63.44	46.59	34.67	16.54	31.35
AÑO	2014	2018	2001	1987	1998	2002	1987	1986	2006	2008	2014	2002
ATIPICO 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

PRUEBA DE VALORES ATÍPICOS – TEST DE ROSNER. VALORES CRÍTICOS: 2.97; 2.95; 2.94; 2.92; 2.91

	INV	PRI	VER	OTO	ANUAL	Q10	Q30	Q90	Q180	Q270	Q355	QMIN	QMAX
XM	23.19	43.01	47.08	24.99	34.52	69.31	59.63	44.26	28.23	23.44	19.83	17.44	83.26
SM	4.67	13.33	14.75	5.39	9.03	26.12	20.17	12.81	6.45	4.69	3.81	4.38	32.55
MAX.DES.	34.73	68.2	88.07	37.42	55.68	127.64	112.02	74.22	42.19	33.85	28.97	27.69	146.48
AÑO	2006	1987	2005	2005	2005	2005	2005	2005	2005	2005	2006	2006	1986
ATIPICO 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XM	22.84	42.25	45.83	24.61	33.88	67.54	58.05	43.35	27.81	23.13	19.55	17.13	81.34
SM	4.27	12.76	13.04	5	8.35	24.37	18.19	11.85	6.05	4.38	3.51	4.04	31.05
MAX.DES.	31.76	68.14	75.87	15.44	51.6	118.03	97.7	68.74	40.48	33.12	13.18	9.23	137.54
AÑO	2002	2005	2002	2017	2002	1986	2002	2002	2002	2006	2011	2013	1987
ATIPICO 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XM	22.56	41.44	44.89	24.9	33.33	65.96	56.81	42.56	27.41	22.82	19.75	17.38	79.59
SM	4.02	12.07	12.07	4.8	7.85	22.98	17.01	11.11	5.7	4.06	3.37	3.85	29.83
MAX.DES.	14.59	66.95	70.53	16.47	49.98	116.55	92.04	66.83	39.91	31.2	13.22	24.53	136.51
AÑO	2018	2002	1986	2018	2006	2006	1987	1987	2006	2002	2018	2003	2005
ATIPICO 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XM	22.81	40.62	44.07	25.17	32.79	64.33	55.67	41.77	27.01	22.55	19.96	17.15	77.75
SM	3.81	11.32	11.31	4.62	7.35	21.4	16.01	10.36	5.31	3.83	3.2	3.68	28.43
MAX.DES.	29.8	63.08	69.92	17.04	48.33	113.71	90.88	62.93	36.69	14.82	13.82	24.04	132.96
AÑO	2001	2001	2006	2011	1987	2002	2006	2006	1987	2018	2017	2001	2001
ATIPICO 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XM	22.58	39.87	43.21	25.44	32.27	62.69	54.5	41.07	26.68	22.8	20.17	16.92	75.91
SM	3.64	10.71	10.41	4.44	6.88	19.66	14.87	9.75	5.08	3.61	3.05	3.51	26.97
MAX.DES.	29.59	62.9	67.61	17.42	46.46	105.92	90.25	60.29	17.98	16.05	25.81	23.78	131.5
AÑO	2005	2006	1987	2013	1986	1987	1986	1986	2018	2011	2003	2002	1985
ATIPICO 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4.5.5. Pruebas de tendencia y cambios abruptos

4.5.5.1. Tendencia

Para la detección de tendencia lineal se aplicaron pruebas paramétricas y no paramétricas. Las pruebas aplicadas fueron: t de Student (Remington y Schork, 1974), Spearman Rank Order Correlation (Kundzewicz y Robson, 2000) y Mann-Kendall (Hirsch *et al.*, 1982; Westmacott y Burn, 1997). En todas las pruebas se trabajó con un $\alpha = 0,05$.

Se entiende a la tendencia como un cambio gradual monótono y continuo en la serie. Para su detección pueden utilizarse modelos lineales o no lineales. El modelo más simple es la prueba t de Student (Remington y Schork, 1974; Hameed *et al.*, 1997), el cual es una prueba paramétrica, cuya hipótesis nula se basa en que la pendiente de la recta de regresión lineal entre los valores de la variable y los años hidrológicos es nula. Requiere que las observaciones sean independientes con distribución normal, de lo contrario la prueba pierde potencia.

El gradiente de la recta de regresión se estima como (Ec. 4.27):

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})(y(t_i) - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2} \quad \text{Ec. 4.27}$$

Siendo su estadístico de contraste (Ec. 4.28):

$$T = \frac{\hat{b} s_x \sqrt{(N-1)}}{s_{xy}} \quad \text{Ec. 4.28}$$

Dónde: $\hat{b}$ es la pendiente de la recta de regresión; s_x el desvío estándar de la variable independiente; N el número de datos; y s_{xy} el error típico.

Criterio de rechazo: el estadístico de prueba T sigue una distribución t de Student con $N - 2$ grados de libertad (Remington y Schork, 1974) y se lo compara con el valor crítico de la distribución t de Student. Esto significa que la hipótesis es rechazada si $|T| > t(1 - \alpha/2)$.

La Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1988), sugiere la utilización de la prueba del coeficiente de correlación por rangos de Spearman (Sperman Rank Order Correlation, SROC) para la detección de tendencias en el caudal. Es una prueba no paramétrica que evalúa el grado de asociación lineal entre dos variables independientes. Es similar al coeficiente de correlación de Pearson, salvo que opera en rangos de datos y no en datos individuales. Las ventajas frente el coeficiente de correlación es que, al ser no paramétrico, no es afectado por la distribución subyacente de la población. Al trabajar en rangos no es afectado por valores extremos y no requiere que los datos sean recogidos a intervalos regulares de tiempo. Además, puede usarse con muestras pequeñas, resultando ser una prueba de fácil aplicación.

Se basa en la asignación de un valor R a cada observación, igual a 1 para la mayor observación y N para la menor. Posteriormente, se calcula la diferencia entre el valor asignado R_i y la posición relativa de la observación i , definida como rango. Luego el coeficiente de correlación de la serie de rangos es (Ec. 4.29):

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N (R_i - i)^2}{N(N^2 - 1)} \quad \text{Ec. 4.29}$$

Por su parte, el estadístico de contraste (Ec. 4.30) se basa en:

$$T = r_s \sqrt{\frac{N - 2}{1 - r_s^2}} \quad \text{Ec. 4.30}$$

El estadístico T posee distribución t de Student con $N - 2$ grados de libertad. En cuanto al criterio de rechazo, la hipótesis nula H_0 es rechazada cuando $T > t_{\alpha/2}$ o $T < -t_{\alpha/2}$.

No existe un consenso en la comunidad científica de preferencia de una prueba a otra, sin embargo, de la revisión de bibliografías surge que la prueba utilizada con mayor frecuencia para la detección de tendencia en variables hidrometeorológicas del oeste argentino es Mann-Kendall (Maza *et al.*, 1997; Vich *et al.*, 2005, 2007; Pasquini y Depetris, 2007; Masiokas *et al.*, 2010; Seoane 2015) y para la detección de saltos la

prueba de Mann-Whitney o Pettitt (Flamenco y Villalba, 2006; Seoane, 2015).

La prueba de Mann-Kendall (MK) se deriva de una prueba de correlación por rangos para dos grupos de observaciones propuestas por Kendall (1955). En la prueba, se considera la correlación entre el orden del rango de datos observados y el orden en el que ocurren. La hipótesis nula es que los datos son independientes y aleatorios, es decir, no existe una tendencia o estructura de correlación serial entre las observaciones.

El estadístico de contraste S está definido con (Ec. 4.31):

$$S = \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{j=k+1}^N \text{signo}(x - x_k) \quad \text{Ec. 4.31}$$

Donde la función signo toma valores 1, 0 y -1 , si su argumento es mayor, igual o menor que cero, respectivamente.

Se demuestra (Hirsch *et al.*, 1982) que bajo H_0 la distribución de S es asintóticamente normal con media cero y varianza igual a (Ec. 4.32):

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} \left[N(N-1)(2N-5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad \text{Ec. 4.32}$$

Dónde: q es el número de grupos de datos repetidos y t_p representa el número de repeticiones en un grupo. El signo del estadístico S indica la dirección de la tendencia, positivo si es creciente y negativo si es decreciente.

El estadístico de contraste (Ec. 4.33) se da por:

$$\begin{aligned} Z &= \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & \text{si } S > 0 \\ Z &= 0 & \text{si } S = 0 \\ Z &= \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & \text{si } S < 0 \end{aligned} \quad \text{Ec. 4.33}$$

Dado que S posee distribución $N(0, VAR(S))$, se puede asociar el valor del estadístico al de la variable normal estandarizada Z . La hipótesis nula es rechazada para un determinado nivel de significancia α si $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$.

Adicionalmente, se aplicó el estimador de pendiente estacional de Kendall (Hirsch *et al.*, 1982), el cual exhibe la magnitud de la pendiente de la variable considerada, expresada en cambios por unidad de tiempo, sin significar que la pendiente toma una forma lineal en dichos cambios.

La definición del estimador de pendiente de Kendall (Ec. 4.34), es expresado por:

$$d_{ijk} = \frac{(x_{ij} - x_{ik})}{(j - k)} \quad \forall \quad (x_{ij}, x_{ik}) \text{ pares } i = 1, 2, \dots, 12; \quad 1 \leq k < j \leq n_i \quad \text{Ec. 4.34}$$

Usando la mediana de dichos valores de pendiente d_{ijk} , la estimación de B resulta ser resistente al efecto de valores extremos en la data, así como también a la estacionalidad de esta.

Las pruebas de tendencia aplicadas a las estaciones indican valores negativos para Puente El Sosneado, Loma Negra y La Angostura en más del 96 % de sus variables. Para la estación Carmensa, se presenta ausencia de tendencia en hasta el 72 % de sus variables, mientras que, en Cañada Ancha, su ausencia significativa se presenta en el 48 % de sus variables.

Es importante resaltar las similitudes que se presentan entre las estaciones, con tendencias negativas máximas en los meses de verano (coincidente con el período de mayor demanda evaporativa y consuntiva de agua por parte de la naturaleza y producción agrícola), y mínima para los meses invernales (Figura 4.8). En todo caso, no se registran tendencias positivas significativas para ninguna variable o estación.

Adicionalmente, en cuanto a la magnitud de la tendencia, las estaciones Puente El Sosneado, Loma Negra y La Angostura, comparten los mismos patrones estructurales, con máximos y mínimos generalmente en los mismos períodos. Situación similar sucede

en Cañada Ancha, la cual, ubicándose sobre el río Salado (afluente del río Atuel), presenta las tendencias de menor magnitud en los meses coincidentes con las demás estaciones, presentando además valores de tendencia negativa significativa en los meses de verano.

Por otra parte, es esperable que la estación Carmensa, por ubicarse sobre el río Atuel, presente el mismo patrón de comportamiento de las tendencias (referente a sus estaciones vecinas aguas arriba), sin embargo, ostenta ausencia de tendencia en los momentos del año donde las demás estaciones registran tendencias negativas. Esta situación puede deberse a las características del río Atuel en Carmensa, con escorrentías de desagüe de zonas irrigadas y de los remanentes de caudales de aguas arriba.

También es notorio destacar la tendencia negativa de todas las estaciones para el Q_{10} y Q_{30} , así como también para el Q_{max} . En cuanto al caudal mínimo, Carmensa no posee tendencia significativa, mientras que sus estaciones vecinas sí (Figura 4.9).

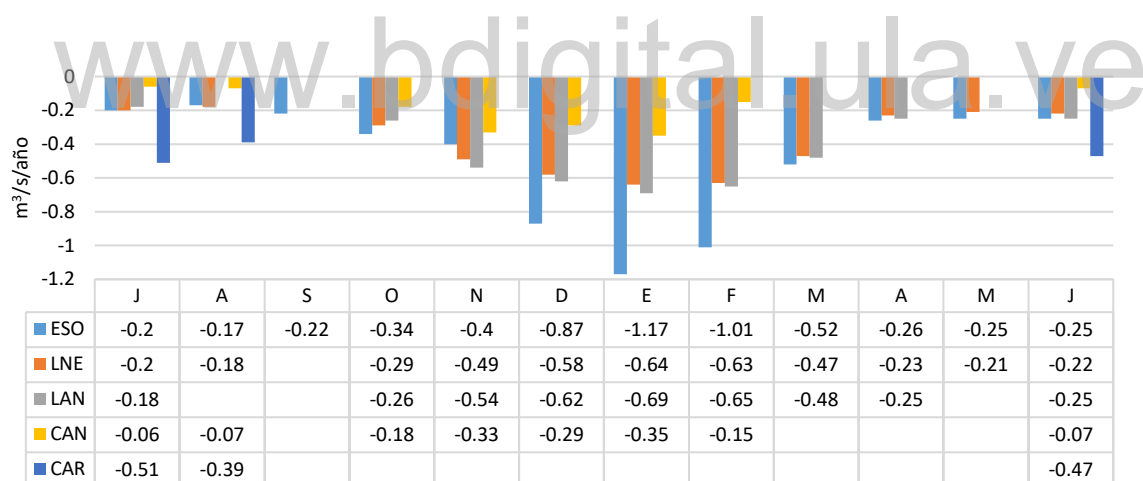


Figura 4.8. Valores significativos mensuales de tendencia lineal no paramétrica de Kendall.

En las Figura 4.8 y Figura 4.9 siguiente, se muestran los valores de pendiente, expresadas en $m^3/s/año$ de las variables mensuales, estacionales, percentiles y de caudales extremos considerados. La determinación de la significancia de los datos se dio a partir de los contrastes de las pruebas de Mann-Kendall y SROC mencionadas en

la metodología. A partir del rechazo de la hipótesis nula (series sin tendencia) de ambas pruebas, se seleccionaron sólo aquellos valores de pendiente de Kendall que coincidieran cronológicamente con los resultados de las dos pruebas anteriores.

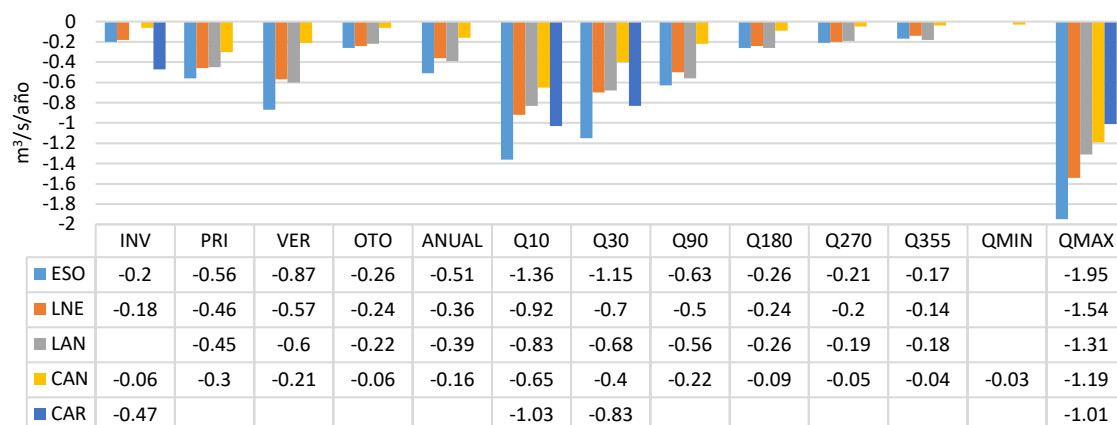


Figura 4.9. Valores significativos estacionales, de percentiles y extremos de tendencia lineal no paramétrica de Kendall.

En este sentido, en la Figura 4.8 se observa que los valores de cambio ($\text{m}^3/\text{s}/\text{año}$) se agrupan con mayor prominencia hacia los meses de verano, con mínima en enero y con preponderancia en la estación El Sosneado, con casi $-1,2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{año}$ de cambio negativo en el período 1985 – 2019.

La razón del por qué los valores en verano de la estación El Sosneado sobresalen por encima de las demás, aun cuando se encuentra aguas arriba de estas, indica la misma situación explicada para el ítem de valores fuera de rango anterior, la cual puede deberse a tasa de infiltración ($\approx 25 \%$) a la que se somete el río Atuel en la zona posterior a El Sosneado (Depresión de los Huarpes), cuya parte de las aguas infiltradas alimentan la cuenca endorréica de la vecina Laguna de Llanquanelo (Figura 4.4).

Adicionalmente y para las estaciones climáticas, en la Figura 4.9 se observa que las pendientes menores se registran hacia la temporada de verano, con máximos negativos en El Sosneado. También, es importante resaltar el valor indicado para Carmensa, que presenta el máximo negativo para invierno. Dicha situación puede deberse a que normalmente el río presenta sus mínimos caudales hacia los meses invernales, siendo

retenido en buena parte en el complejo de cuatro represas que se ubican en la cuenca media; también, por tratarse de los meses más fríos, el oasis agrícola se encuentra en el período de menor actividad, erogando los menores caudales de excedencia de escurrimiento de vuelta hacia el río Atuel. Por dicha razón y dada la naturaleza del río a su paso por Carmensa, registra una disminución significativa de casi $-0,5 \text{ m}^3/\text{s/año}$.

Evidentemente, que Carmensa registre la mayor pendiente negativa para la época invernal, indica el nivel de afectación que generan las actividades antrópicas en la cuenca del río Atuel sobre el río homónimo.

En cuanto a los percentiles, se tienen los mínimos en el Q_{10} , representando los caudales más afectados por cambios negativos, con cerca de $-1,4 \text{ m}^3/\text{s/año}$ en El Sosneado. Cabe destacar, que la disparidad entre El Sosneado y Loma Negra y La Angostura puede deberse también a la elevada tasa de infiltración en la cuenca alta del río Atuel.

Finalmente, para el caudal máximo (Figura 4.8), El Sosneado presenta casi $-2 \text{ m}^3/\text{s/año}$ de pendiente negativa, la cual disminuye en las estaciones aguas abajo, hasta llegar a un mínimo de $-1 \text{ m}^3/\text{s/año}$ en Carmensa (por el efecto regulador de las represas). Si bien no pueden asegurarse con certeza las causas de dichas disminuciones en los caudales máximos, podría atribuirse en parte a las deficiencias de acumulación de nieve en la cordillera (Rivera, 2018). Adicionalmente y sumado al nivel de afectación antrópica sobre el río Atuel, dichas disminuciones en los caudales máximos pueden representar un detrimento para las necesidades hídricas de los ecosistemas aguas abajo (bañados del Atuel), los cuales, además de verse afectados por el control del río en los diques y la extracción de agua para irrigación, también lo pueden estar con la disminución de los pulsos de caudales máximos en las épocas de mayores escurrimientos.

A continuación, se presentan las salidas de las pruebas de valores atípicos para la Estación La Angostura (LAN), dispuestas en las tablas Tabla 4.13, Tabla 4.14, Tabla 4.15 y Tabla 4.16, respectivamente. El criterio de decisión se basó en que la hipótesis nula se aceptaba cuando ambos test (o, en su defecto, uno de ellos si el otro no podía aplicarse) la aprobaban. Por el contrario, si uno o ambos test la rechazaban, se procedía a rechazar la hipótesis nula.

Tabla 4.13. Salidas de la prueba de tendencia lineal no paramétrica para la estación La Angostura (LAN) (m³/s)

CALCULO DE LA TENDENCIA LINEAL NOPARAMETRICA (m³/s/año) (MENSUAL)

MES	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
PENDIENTE	-0.18	-0.16	-0.18	-0.26	-0.54	-0.62	-0.69	-0.65	-0.48	-0.25	-0.2	-0.25
ORD.												
ORIGEN	382.93	338.61	381.14	549.37	1133.2	1305.12	1430.56	1348.05	987.96	519.05	423.45	515.78

CALCULO DE LA TENDENCIA LINEAL NOPARAMETRICA (m³/s/año) (ESTACIONES CLIMÁTICAS, CUANTILES Y EXTREMOS)

MES	INV	PRI	VER	OTO	ANUAL	Q10	Q30	Q90	Q180	Q270	Q355	QMIN	QMAX
PEND.	-0.17	-0.45	-0.6	-0.22	-0.39	-0.83	-0.68	-0.56	-0.26	-0.19	-0.18	-0.15	-1.31
ORD.													
ORIGEN	373.45	945.5	1254.6	457.31	813.29	1726.5	1424.8	1174.6	542.99	406.4	372.27	317.67	2703

www.bdigital.ula.ve

Tabla 4.14. Salidas de la prueba de tendencia paramétrica t de Student para la estación La Angostura (LAN) (m³/s)

TENDENCIA PARAMETRICA - TEST T STUDENT (ALFA = 0.05) (MENSUAL)

MES	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
PEND	-0.16	-0.12	-0.16	-0.24	-0.51	-0.70	-0.68	-0.58	-0.47	-0.22	-0.19	-0.22
ERR. TIPICO	4.41	5.12	4.68	7.28	11.57	20.06	20.92	12.96	7.91	6.18	4.92	4.93
T CAL	-2.03	-1.34	-1.99	-1.90	-2.53	-2.00	-1.87	-2.57	-3.39	-2.02	-2.21	-2.53
p-nivel	0.05	0.19	0.06	0.07	0.02	0.05	0.07	0.02	0.00	0.05	0.03	0.02
	A	A	A	A	R	A	A	R	R	A	R	R

TENDENCIA PARAMETRICA - TEST T STUDENT (ALFA = 0.05) (ESTACIONES CLIMÁTICAS, CUANTILES Y EXTREMOS)

MES	INV	PRI	VER	OTO	ANUAL	Q10	Q30	Q90	Q180	Q270	Q355	QMIN	QMAX
PEND	-0.15	-0.49	-0.58	-0.21	-0.35	-0.94	-0.73	-0.54	-0.22	-0.17	-0.15	-0.13	-1.50
ERR.													
TIPICO	4.44	12.42	13.58	4.97	8.32	24.39	18.80	11.63	6.07	4.37	3.51	4.18	28.94
T CAL	-1.88	-2.23	-2.44	-2.40	-2.43	-2.20	-2.23	-2.65	-2.08	-2.25	-2.45	-1.79	-2.96
p-nivel	0.07	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01	0.05	0.03	0.02	0.08	0.01
	A	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	A	R

Tabla 4.15. Salidas de la prueba de Spearman Rank Order Correlation Test (SROC) (tendencia) para alfa=0.05 y n-2 grados de libertad (m³/s)

SROC - TENDENCIA (ALFA = 0.05) (MENSUAL)

MES	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
D2acu	3950	4444	4396	4250	3674	4326	3822	3032	2872	4197	4462	3766
RS	0.40	0.32	0.33	0.35	0.44	0.34	0.42	0.54	0.56	0.36	0.32	0.42
TS	2.44	1.92	1.97	2.12	2.76	2.04	2.59	3.60	3.84	2.17	1.90	2.65
p-nivel	0.02	0.06	0.06	0.04	0.01	0.05	0.01	0.00	0.00	0.04	0.07	0.01
	R	A	A	R	R	R	R	R	R	R	A	R

SROC - TENDENCIA (ALFA = 0.05) (ESTACIONES CLIMÁTICAS, CUANTILES Y EXTREMOS)

MES	INV	PRI	VER	OTO	ANUAL	Q10	Q30	Q90	Q180	Q270	Q355	QMIN	QMAX
D2acu	4370	3692	3118	4074	3332	3540	3559	3184	3822	3938	3753	4369	3366
RS	0.33	0.44	0.52	0.38	0.49	0.46	0.46	0.51	0.42	0.40	0.43	0.33	0.49
TS	1.99	2.74	3.48	2.31	3.19	2.92	2.90	3.39	2.59	2.46	2.67	1.99	3.14
p-nivel	0.05	0.01	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.05	0.00
	A	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	A	R

Tabla 4.16. Salidas de la prueba de Mann-Kendall – Corrección de Varianza (tendencia) (m³/s)

MANN-KENDALL – CORRECCIÓN DE VARIANZA - TENDENCIA (ALFA = 0.05) (MENSUAL)

MES	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
S	-151	-125	-125	-135	-153	-125	-159	-213	-219	-130	-123	-155
VAR	4550.30	4550.30	4550.30	4550.30	4550.30	4550.30	4550.30	4550.30	4550.30	4549.30	4550.30	4550.30
Z	-1.50	-1.10	-1.10	-1.20	-2.25	-1.42	-1.85	-2.02	-1.88	-1.16	-1.11	-1.36
N/NS	2.18	2.78	2.81	2.74	1.00	1.68	1.60	2.43	2.96	2.70	2.65	2.82
p-nivel	0.13	0.27	0.27	0.23	0.02	0.16	0.06	0.04	0.06	0.24	0.27	0.17
	A	A	A	A	R	A	A	R	A	A	A	A

MANN-KENDALL – CORRECCIÓN DE VARIANZA - TENDENCIA (ALFA = 0.05) (MENSUAL)

MES	INV	PRI	VER	OTO	ANUAL	Q10	Q30	Q90	Q180	Q270	Q355	QMIN	QMAX
S	-129	-157	-209	-141	-187	-157	-160	-199	-149	-147	-156	-120	-171
VAR	4550.3	4550.3	4550.3	4550.3	4550.3	4550.3	4549.3	4550.3	4550.3	4550.3	4549.3	4549.3	4550.3
Z	-1.13	-1.77	-2.08	-1.21	-1.66	-1.80	-2.36	-1.79	-1.31	-1.19	-1.36	-1.08	-1.71
N/NS	2.84	1.70	2.20	2.94	2.75	1.66	1.00	2.69	2.82	3.30	2.86	2.68	2.16
p-nivel	0.26	0.08	0.04	0.23	0.10	0.07	0.02	0.07	0.19	0.23	0.17	0.28	0.09
	A	A	R	A	A	A	R	A	A	A	A	A	A

4.5.5.2. Cambios abruptos

Para detectar la presencia de cambios abruptos en las series de caudales se aplicaron las pruebas paramétricas *t* de Student y diversas pruebas no paramétricas, como la prueba de suma de rangos (*Rank sum test*) o Mann Whitney (1947), Pettitt (1979), Buishand (1982), y la prueba de Cusum y Worsley (1979). Estas pruebas detectan un solo punto de cambio y en algunos casos debe eliminarse previamente la tendencia. Para la aplicación de estas pruebas, las series deben presentar distribución normal. Nuevamente se trabajó con un $\alpha = 0,05$.

La prueba paramétrica básica es la *t* Student. Se basa en la verificación de la igualdad estadística de dos medias muestrales, lo que significa que ambas muestras pertenecen a la misma población y, por lo tanto, no hay cambios abruptos en el régimen hidrológico. El estadístico de contraste (Ec. 4.35) es:

$$T = \frac{(\text{media A} - \text{media B})}{\sqrt{\frac{(L-1)\text{varA} + (M-1)\text{varB}}{L+M-2} \sqrt{\frac{1}{L} + \frac{1}{M}}}} \quad \text{Ec. 4.35}$$

Dónde: la serie *A* es: $x_1, x_2, \dots, x_L$, con *L* observaciones; la serie *B* es: $x_{L+1}, x_{L+2} + \dots, x_{L+M}$, con *M* observaciones, de manera tal que $L + M = N$.

Al ser aplicado secuencialmente, el punto de ruptura o cambio corresponde al mayor valor del estadístico *T* que exceda el valor crítico, aunque ello no indica la existencia de un único punto de quiebre. Si $|t| > t_{\alpha/2}$, se rechaza la hipótesis de igualdad de medias, siendo probable que se esté frente a un cambio abrupto en la serie para un nivel de significancia dado. Cabe destacar que la prueba requiere que los datos se distribuyan normalmente. Si es aplicado en datos con falta de normalidad, la prueba pierde potencia, es decir, que es menos probable que se detecten diferencias que realmente están presentes que en una prueba no paramétrica (Helsel y Hirsch, 2002). Otro hecho que se asume es que la media es una buena medida de tendencia central.

Entre las pruebas no paramétricas, se puede mencionar a la prueba de Wilcoxon (1945), o la equivalente prueba de Mann-Whitney (1947), también conocidos como pruebas de suma de rangos (Robson, *et al.*, 2000). Se basan en utilizar rangos para encontrar diferencias entre dos grupos de muestras independientes (Siegel y Castellan, 1988; WMO, 1988; Helsel y Hirsch, 2002). Se utiliza el estadístico de prueba de Mann-Kendall y es calculado para subgrupos de series para detectar el punto de cambio en la media. Esta prueba asume que el punto de cambio es conocido (Chiew y McMahon, 1993). Por su parte, Robson *et al.* (2000) recomiendan la utilización de la prueba de Mann-Whitney cuando no se conoce el momento del cambio. En este caso puede utilizarse la mediana.

La hipótesis nula es que las medianas de los dos grupos son iguales, bajo el supuesto de que ambos grupos tienen idénticas distribuciones poblacionales.

Los rangos y el estadístico de contraste se computan como (Hirsch *et al.*, 1992):

- (a) Asignar rangos a todos los datos, desde 1 a N . En caso de que el número de rango sea igual, se usa el promedio de los rangos.
- (b) Separar los datos en dos grupos de tamaño m y n . Computar el estadístico S como la suma de los rangos de las n observaciones en el grupo más chico.
- (c) Computar la media teórica y el desvío de S para toda la muestra (Ec. 4.36):

$$\begin{aligned}\mu &= n(N + 1)/2 \\ \sigma &= [n m(N + 1)/12]^{1/2}\end{aligned}\quad \text{Ec. 4.36}$$

La forma estandarizada del estadístico Z_{rs} se obtiene mediante (Ec. 4.37):

$$Z_{rs} = \begin{cases} (S - 0,5 - \mu)/\sigma & \text{si } S > \mu \\ 0 & \text{si } S = \mu \\ (S + 0,5 - \mu)/\sigma & \text{si } S < \mu \end{cases} \quad \text{Ec. 4.37}$$

Criterio de rechazo: la distribución de Z_{rs} se aproxima a la normal, por lo que los niveles de significancia pueden obtenerse de las Tablas de probabilidad normal. Entonces para

un nivel de significancia α , la hipótesis nula se rechaza si $|Z_{rs}| > Z_{1-\alpha/2}$, donde $Z_{1-\alpha/2}$ es el punto $1 - \alpha/2$ de la distribución de probabilidad normal estándar.

La prueba no paramétrica de Pettitt (1979) es una prueba para detectar cambios en la mediana o media de la serie, sin conocer el punto exacto de cambio. Es una prueba robusta a cambios en la distribución, basado en la prueba Wilcoxon-Mann-Whitney. Es bueno para detectar el salto cuando se encuentra en el punto central de la serie (Hawkins, 1977; Mallakpour y Villarini, 2015). Si la serie presenta autocorrelación, la probabilidad de detección es afectada y la prueba pierde robustez, por lo tanto, es preferible eliminar la tendencia de la serie antes de su aplicación (Serinaldi y Kilsby, 2016). Kundzewicz y Robson (2004) lo consideran como una de las pruebas más robustas para la identificación de cambios en series cronológicas. Mallakpour y Villarini (2015) encontraron que la sensibilidad de la prueba para detectar cambios aumenta cuando la magnitud del cambio y la longitud de la serie aumentan. Además, el número de detecciones se eleva cuando la serie de tiempo representa la parte central de la distribución (como cambios en la mediana), mientras que disminuye cuando se trata de extremos (e.g. series de máximos). La H_0 expresa que los datos son independientes, aleatorios e idénticamente distribuidos, mientras que la H_1 es que la media de la serie presenta un salto.

El estadístico de contraste se expresa como (Ec. 4.38):

$$T_s = \max_{1 \leq t \leq N} |U_{t,N}| \quad \text{Ec. 4.38}$$

U se define como (Ec. 4.39):

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N \text{signo}(x_i - x_j) \quad \text{Ec. 4.39}$$

La función signo toma valor 1 para datos positivos, 0 para valor cero y -1 para valores negativos.

El criterio de rechazo (Ec. 4.40) es denotado mediante la ausencia de cambios abruptos o verificación de hipótesis nula, la cual es rechazada si el nivel de significancia α es:

$$\alpha > \exp\left(\frac{-6K_T^2}{(N^2 + N^3)}\right) \quad \text{Ec. 4.40}$$

El punto de cambio es estimado como el tiempo t , cuando el máximo K_T ocurre, el cual representa una forma alternativa del cálculo del estadístico utilizando métodos de remuestreo (Ec. 4.41):

$$K_T = \max \left| \frac{U_{t,N}}{\sqrt{Nt - t^2}} \right| \quad t = 1 \dots N \quad \text{Ec. 4.41}$$

La prueba de desviaciones acumuladas o Buishand (1982) se basa en la suma acumulada de desviaciones de la media. Se aplica a series de sumas parciales acumuladas de desviaciones de la media. Aunque es una prueba simple y de fácil aplicación, requiere que los datos se encuentren normalizados y sean independientes. Es relativamente sensible a cambios en el centro de la serie (Kundzewicz y Robson, 2004); además, es afectado por la presencia de *outliers*, ya que pueden producir valores altos (aparentemente significativos) que no corresponden a un verdadero cambio. Mientras que la H_0 reza que los datos son independientes y normalmente distribuidos, la H_1 asume la presencia de un salto en la media. Las sumas parciales (Ec. 4.42) se definen como:

$$CS_k^* = \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \text{media})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \text{media})^2}} \quad \forall k = 0, \dots, N \quad \text{Ec. 4.42}$$

Por su parte, el estadístico de contraste (Ec. 4.43) se expresa como:

$$Q = \max |CS_k^*| \quad \forall k = 0, \dots, N \quad \text{Ec. 4.43}$$

En cuanto al criterio de decisión, se rechaza la hipótesis nula si Q es mayor que el valor crítico tabulado dado por Buishand (1982).

La prueba basada en rangos, donde observaciones sucesivas son comparadas con la mediana (Z_m) de la serie, se denomina prueba de CUSUM.

El estadístico es la suma acumulada máxima de los signos de la diferencia con la mediana, comenzando por el principio de la serie (Ec. 4.44):

$$TS = \frac{2}{N} \max |CS_k| \quad k = 1, \dots, N \quad \text{Ec. 4.44}$$

Donde (Ec. 4.45):

$$CS_k = \sum_{i=1}^k \text{sgn}(Z_i - Z_m) \quad \text{Ec. 4.45}$$

El criterio de rechazo expresa que el estadístico es equivalente a la prueba de Kolmogorov-Smirnov para igualdad de distribuciones en las siguientes variables aleatorias:

- (a) Veces que ocurren observaciones mayores a la mediana.
- (b) Veces que ocurren observaciones menores a la mediana.

Los algoritmos estándar para la prueba Kolmogorov-Smirnov pueden usarse para la

determinación del porcentaje de puntos del estadístico.

La prueba de Worsley (1979) asume que la serie es independiente y se encuentra normalmente distribuida (donde el punto de cambio es desconocido). El programa utilizado no aplica la prueba si el número de años en la serie es mayor a 50, probablemente debido a que el autor (Worsley) en su trabajo original, calculó el estadístico de contraste hasta un tamaño muestral igual a 50. Emplea sumas parciales acumuladas de desviaciones de la media (Ec. 4.46) como:

$$S_k^* = \frac{\sqrt{k(N-k)}CS_k^*}{\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N(x_i - \text{media})^2}} \quad \forall k = 0, \dots, N \quad \text{Ec. 4.46}$$

Siendo el estadístico de contraste (Ec. 4.47):

$$W = \frac{V\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-V^2}} \quad \text{Ec. 4.47}$$

Donde (Ec. 4.48):

$$V = \max|S_k^*| \quad \forall k = 1, \dots, N \quad \text{Ec. 4.48}$$

Para esta prueba, se rechaza la hipótesis nula si W es mayor que el valor crítico tabulado para diferentes niveles de significación, obtenidos por Worsley (1979).

Dado que se aplicaron varias pruebas tanto para la detección de tendencias como de saltos, se consideró el siguiente criterio a la hora de presentar los resultados: si al menos una de las pruebas rechaza la hipótesis nula, se considera que existe evidencia suficiente para aceptar la hipótesis alternativa para el nivel de significancia de 95 %.

En cuanto a los cambios abruptos, la aplicación de las pruebas para determinar saltos fue realizado mediante las pruebas mencionadas en la metodología, con especial

énfasis en la prueba de t de Student secuencial. Esto permitió obtener los principales saltos o cambios abruptos en las series consideradas. De esta forma, los saltos significativos resultaron tener signo negativo, es decir con cambios negativos en las medias entre los bloques de años 1985-2008 y 2008-2019. El punto de corte se situó en promedio durante el año 2008, sin embargo, el período de cambio, para todas las estaciones y variables estuvo entre los años 2007 y 2009 (Tabla 4.17).

Como se puede observar en la Figura 4.10, las diferencias anuales se encuentran entre el 24 % y el 74 %, manteniéndose en el resto de las estaciones más o menos constante, exceptuando la estación Cañada Ancha por ubicarse sobre el río Salado y la estación Carmensa. Esta última posee las mayores diferencias entre los dos bloques, cuyo rango oscila entre los 37,8 % y los 74,6 %. Para todas las estaciones, los valores máximos se ubicaron en el trimestre diciembre, enero y febrero, y con mínimas hacia los meses invernales.

En las Figura 4.11 y Figura 4.12, se muestran los rangos de cambio de los saltos respectivos y en las variables estacionales y extremas, así como también el rango entre los saltos mínimos y máximos, respectivamente.

Tabla 4.17. Principales años de saltos, arrojados por las pruebas consideradas.

Tabla 4.17: Principales años de saltos, arrojados por las pruebas consideradas.																									Año		
																									2007	2008	2009
Saltos	Río	Estac.	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	Inv	Pri	Ver	Oto	Anual	Q ₁₀	Q ₃₀	Q ₉₀	Q ₁₈₀	Q ₂₇₀	Q ₃₅₅	Q _{min}	Q _{máx}
	Salado	CAN																									
	Atuel	ESO																									
	Atuel	LNE																									
	Atuel	LAN																									
	Atuel	CAR																									

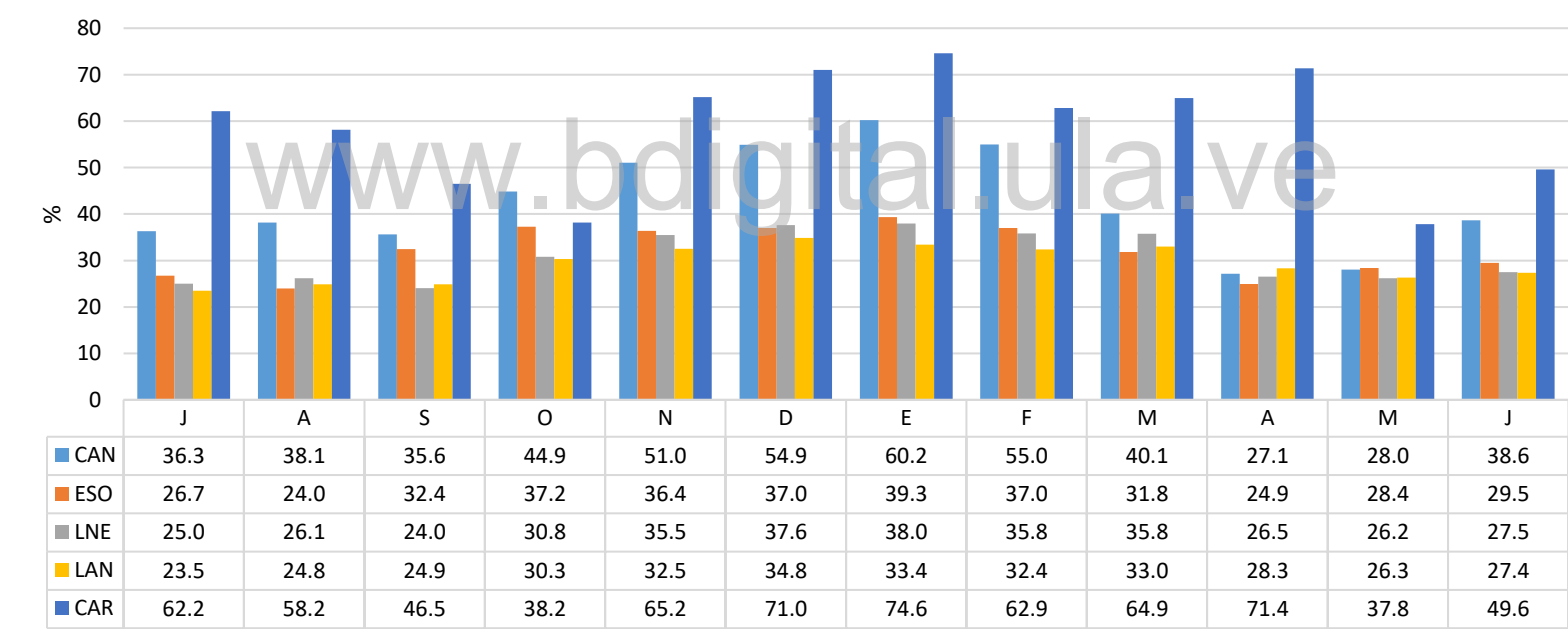


Figura 4.10. Porcentaje de disminución del segundo período respecto al primer período en los años de salto de la Tabla 4.17.

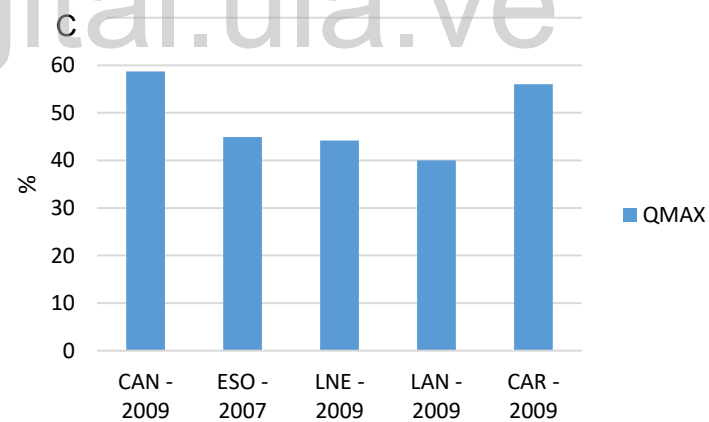
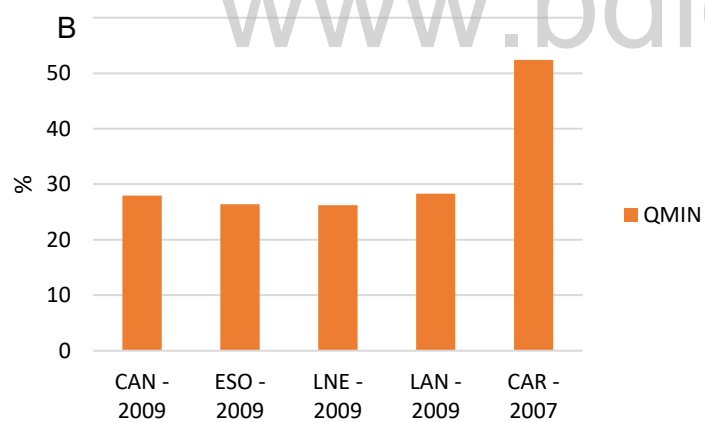
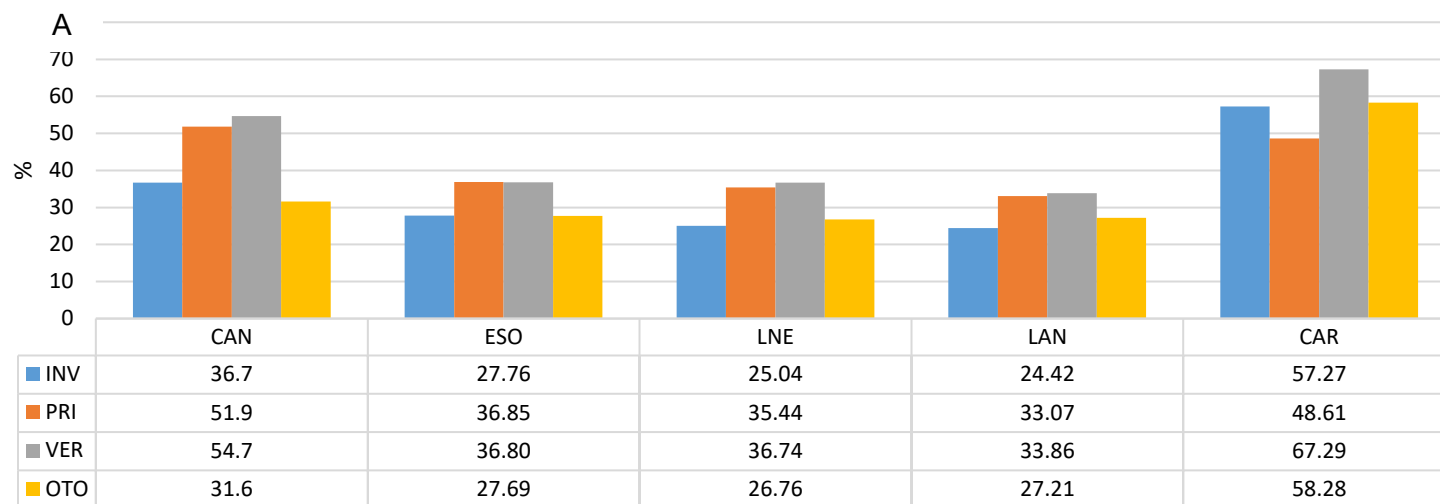


Figura 4.11. Porcentaje de disminución del segundo período respecto al primer período en los años de salto mostrados en la Tabla 4.17, para A) estaciones climáticas, B) caudal mínimo, C) caudal máximo.

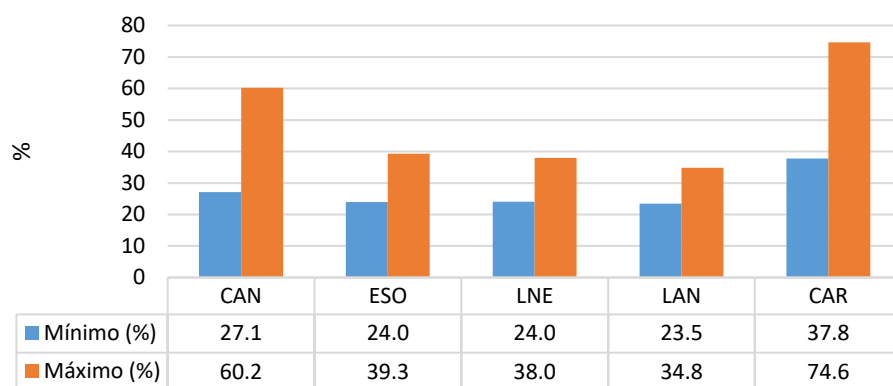


Figura 4.12. Rango (%) entre los saltos mínimos y máximos para los años 2007, 2008 y 2009.

Dado que no se construyeron represas en la zona para dicho período, los saltos mencionados pueden estar asociados a eventos de índole climática. De acuerdo con la ley provincial de Mendoza N° 8.318, el Estado Provincial decretó la emergencia hídrica, alegando que "el Departamento General de Irrigación ha informado sobre los escurrimientos esperables para el período hidrológico 2010-2011, como consecuencia del escaso nivel de precipitaciones nevadas ocurrido durante el período invernal 2010".

Por su parte, Rivera (2018) explica que la provincia de Mendoza comenzó su última fase de sequía hidrológica desde el año 2009, coincidiendo con la aparición del fenómeno de La Niña, la cual genera una disminución significativa de nevadas en la alta montaña, produciendo un impacto directo en el caudal de agua de los ríos. Asimismo, el investigador reitera que "la sequía hidrológica se produce por un cambio en la condición climática relacionado a La Niña, que consiste en un enfriamiento de las aguas del Océano Pacífico tropical, generando anomalías que se propagan y afectan distintas regiones en el mundo. En esta fase de menores temperaturas, en la superficie del océano, aparece esta condición de déficit de nevadas en alta montaña".

Si bien las metodologías detectaron el salto principal alrededor del año 2008 - 2009, no desestima que hayan existido otros saltos anteriores o posteriores a la fecha. Cabe destacar que los métodos empleados necesitan un margen de 10 años entre el fin de las series temporales empleadas y el último salto que pudiese ser detectado. Sin embargo, dado que los registros utilizados culminan en 2019, las metodologías pudieron

detectar el salto y comienzo del período de sequías en el año 2009. En la Figura 4.13, se presentan porcentajes de diferencia del salto entre las medias del último bloque de años (2009 - 2019) y el anterior (1985 - 2008). Las estaciones (de izquierda a derecha), están ordenadas desde aguas arriba a aguas abajo sobre el río Atuel, comenzando con Puente El Sosneado (ESO), y culminando con la estación Carmensa. Como se puede observar, el porcentaje de diferencias aumenta a medida que las estaciones van a aguas abajo del río, sobrepasando el 70 % en Carmensa. Esta situación, debida principalmente a la aparición del fenómeno de La Niña, puede haber sido exacerbada por acción antrópica, lo que implica menores caudales en el río Atuel a su paso por Carmensa y luego de atravesar el oasis irrigado.

A continuación, en las tablas Tabla 4.18, Tabla 4.19, Tabla 4.20, Tabla 4.21 y Tabla 4.22 se presentan los resultados parciales de la estación La Angostura (LAN) para las pruebas de t de Student secuencial, Rank Suma Test, Pettitt, Buishand y Worsley, respectivamente (cambios abruptos). Los resultados para las demás estaciones se presentan en los anexos correspondientes.

El criterio de decisión se basó en la concordancia de todo los test respecto a los años de saltos arrojados.

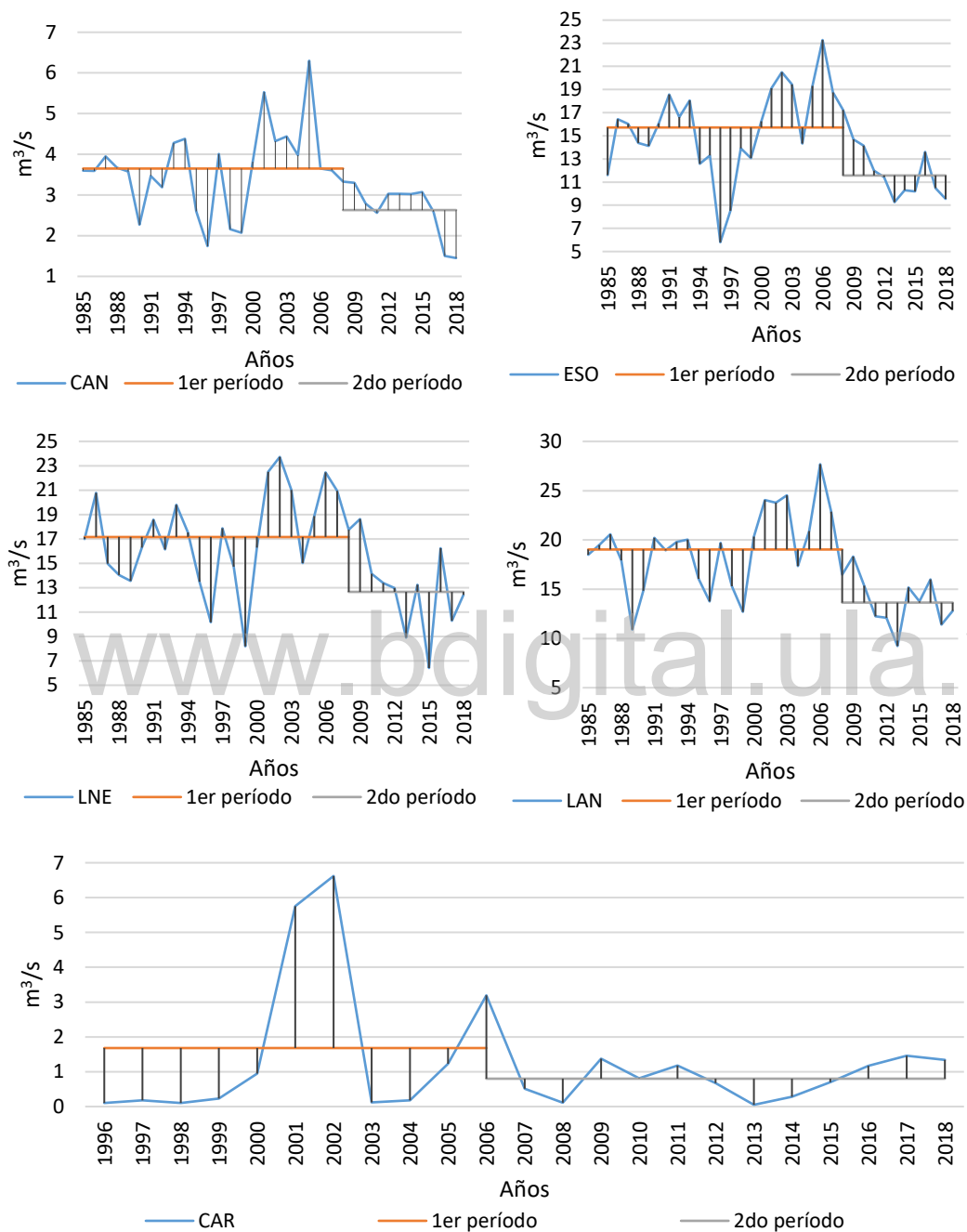


Figura 4.13. Cambios abruptos para los caudales mínimos en las estaciones de la cuenca del río Atuel.

Tabla 4.18. Salidas de la prueba de t de Student secuencial - detección de cambios bruscos (Estación La Angostura) (m³/s)

T DE STUDENT SECUENCIAL - DETECCIÓN DE CAMBIOS BRUSCOS (MENSUAL)

MES	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
N1	24	24	24	24	24	24	22	23	24	24	24	23
N2	10	10	10	10	10	10	12	11	10	10	10	11
MEDIA 1	24.34	24.51	26.11	31.82	47.3	63.8	67.48	52.59	38.34	28.95	26.76	26.05
MEDIA 2	18.63	18.42	19.62	22.17	31.93	41.58	44.95	35.57	25.69	20.76	19.71	18.92
VARIANZA 1	17.4	24.4	16.8	48.9	145.3	447.1	498.1	187	63.2	32.8	16.7	20.2
VARIANZA 2	7.3	6.4	10.7	11.1	12.4	66.9	89.3	17.7	13.8	15.5	16.5	10.3
DESVIO P	3.81	4.4	3.88	6.18	10.39	18.44	18.91	11.58	7.02	5.29	4.08	4.13
T	3.9811	3.6778	4.4388	4.1482	3.9314	3.201	3.32	4.0091	4.7826	4.1185	4.5939	4.7081
AÑO SALTO	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2006	2007	2008	2008	2008	2007
p-nivel	0.00037	0.00086	0.0001	0.00023	0.00042	0.00309	0.00226	0.00034	0.00004	0.00025	0.00006	0.00005
	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
NO. SALTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
AÑO SALTO	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2006	2007	2008	2008	2008	2007

T DE STUDENT SECUENCIAL - DETECCIÓN DE CAMBIOS BRUSCOS - (ESTACIONES CLIMÁTICAS, CUANTILES Y EXTREMOS)

MES	INV	PRI	VER	OTO	ANUAL	Q10	Q30	Q90	Q180	Q270	Q355	QMIN	QMAX
N1	24	24	24	24	24	22	24	24	24	24	23	24	24
N2	10	10	10	10	10	12	10	10	10	10	11	10	10
MEDIA 1	24.98	47.65	52.28	27.16	37.97	79.1	66.45	49.11	30.74	25.38	21.5	19.03	94.36
MEDIA 2	18.88	31.89	34.58	19.77	26.25	51.36	43.29	32.61	22.2	18.8	16.33	13.64	56.62
VAR. 1	15.9	165.2	196.3	18.2	67.2	673.7	376	140.2	32.2	14.4	9.8	15.2	950.4
VAR. 2	7.5	14.7	25.3	13.5	11.1	142.8	61	13.1	8.5	7.6	5.1	6.2	209.6
DESVIO P	3.68	11.08	12.17	4.11	7.17	22.16	16.95	10.22	5.05	3.53	2.88	3.56	27.24
T	4.3973	3.7762	3.8631	4.7772	4.339	3.4878	3.6293	4.2886	4.4919	4.9557	4.8946	4.0281	3.6814
SALTO	2008	2008	2008	2008	2008	2006	2008	2008	2008	2008	2007	2008	2008
p-value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
NO. SALTO	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
AÑO SALTO	2008	2008	2008	2008	2008	2006	2008	2003-2008	2008	2008	2007	2008	2008

Tabla 4.19. Salidas de la prueba de Rank Suma Test - detección de cambios bruscos (Estación La Angostura) (m³/s)

RANK SUMA TEST - DETECCIÓN DE CAMBIOS BRUSCOS (MENSUAL)

MES	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	11
M	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	23
S	82	85	80	82	83	101	90	75	69	89	84	89
MEDIA	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	192.5
DESVIO	26.46	26.46	26.46	26.46	26.46	26.46	26.46	26.46	26.46	26.46	26.46	27.16
Z	-3.4962	-3.3828	-3.5718	-3.4962	-3.4584	-2.778	-3.1938	-3.7607	-3.9875	-3.2316	-3.4206	-3.7917
AÑO SALTO	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2007
p-nivel	0.00047	0.00072	0.00035	0.00047	0.00054	0.00547	0.0014	0.00017	0.00007	0.00123	0.00062	0.00015
	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
No. SALTOS	1	1	1	1	3	1	2	2	1	1	1	1
AÑO SALTO	2008	2008	2008	2008	1995	2008	2003	1984	2008	2008	2008	2007
AÑO SALTO	0	0	0	0	2003	0	2008	2008	0	0	0	0
AÑO SALTO	0	0	0	0	2008	0	0	0	0	0	0	0

RANK SUMA TEST - DETECCIÓN DE CAMBIOS BRUSCOS (ESTACIONES CLIMÁTICAS, CUANTILES Y EXTREMOS)

MES	INV	PRI	VER	OTO	ANUAL	Q10	Q30	Q90	Q180	Q270	Q355	QMIN	QMAX
N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	11	10	10
M	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	23	24	24
S	82	84	75	82	71	87	83	74	73	71	89	86	86
MEDIA	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	192.5	175	175
DESVIO	26.46	26.46	26.46	26.46	26.46	26.46	26.46	26.46	26.46	26.46	27.16	26.46	26.46
Z	-3.49	-3.4206	-3.7607	-3.4962	-3.9119	-3.3072	-3.4584	-3.7985	-3.8363	-3.9119	-3.7917	-3.3639	-3.345
AÑO SALTO	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2007	2008	2008
p-nivel	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
No. SALTOS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
AÑO SALTO	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2007	2008	2008
AÑO SALTO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AÑO SALTO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 4.20. Salidas de la prueba de Pettitt - detección de cambios bruscos (Estación La Angostura) (m³/s)

PETTITT - DETECCIÓN DE CAMBIOS BRUSCOS (MENSUAL)

MES	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
BETA	-0.18	-0.158	-0.178	-0.26	-0.545	-0.623	-0.685	-0.65	-0.476	-0.246	-0.199	-0.246
KT	117	132	111	103	76	88	89	130	116	105	124	137
EST.	0.1313	0.0755	0.1609	0.2074	0.4246	0.3171	0.3089	0.0816	0.136	0.195	0.1023	0.0618
AÑO SALTO	1999	1999	2000	1999	2008	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999
	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

PETTITT - DETECCIÓN DE CAMBIOS BRUSCOS (ESTACIONES CLIMÁTICAS, CUANTILES Y EXTREMOS)

MES	INV	PRI	VER	OTO	ANUAL	Q10	Q30	Q90	Q180	Q270	Q355	QMIN	QMAX
BETA	-0.175	-0.451	-0.603	-0.216	-0.389	-0.828	-0.682	-0.565	-0.257	-0.191	-0.176	-0.15	-1.309
KT	130	85	108	123	116	84	84	106	121	128	117	107	110
EST.	0.0816	0.3425	0.1773	0.1061	0.136	0.3512	0.3512	0.189	0.114	0.0881	0.1313	0.1831	0.1662
AÑO SALTO	1999	2008	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	2009	1999
	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Tabla 4.21. Salidas de la prueba de Buishand - detección de cambios bruscos (Estación La Angostura) (m³/s)

BUISHAND - DETECCIÓN DE CAMBIOS BRUSCOS (MENSUAL)

MES	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
MEDIA:	22.66	22.72	24.21	28.98	42.78	57.27	59.53	47.08	34.62	26.54	24.68	23.75
DESV. EST:	4.6	5.18	4.87	7.56	12.46	20.92	21.67	13.99	9.05	6.45	5.19	5.3
EST. Q	1.5	1.42	1.61	1.55	1.49	1.31	1.38	1.55	1.71	1.55	1.69	1.72
AÑO SALTO	2008	2008	2008	2008	2008	2006	2006	2007	2006	2009	2009	2007
	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R

BUISHAND - DETECCIÓN DE CAMBIOS BRUSCOS (ESTACIONES CLIMÁTICAS, CUANTILES Y EXTREMOS)

MES	INV	PRI	VER	OTO	ANUAL	QC010	QC030	QC090	QC180	QC270	QC355	QMIN	QMAX
MEDIA:	23.19	43.01	47.08	24.99	34.52	69.31	59.63	44.26	28.23	23.44	19.83	17.44	83.26
DESV. EST:	4.6	13.13	14.53	5.31	8.9	25.73	19.87	12.62	6.36	4.62	3.76	4.31	32.07
EST. Q	1.6	1.45	1.54	1.72	1.59	1.44	1.44	1.58	1.63	1.72	1.76	1.55	1.49
AÑO SALTO	2008	2008	2006	2009	2008	2006	2006	2008	2008	2008	2007	2007	2006
	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R

Tabla 4.22. Salidas de la prueba de Worsley - detección de cambios bruscos (Estación La Angostura) (m³/s)

WORSLEY - DETECCIÓN DE CAMBIOS BRUSCOS (MENSUAL)

MES	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
EST. W	4.02	3.67	4.51	4.05	3.84	3.13	3.24	3.92	4.77	4.29	4.93	4.6
AÑO SALTO	2010	2010	2010	2008	2008	2008	2006	2007	2009	2009	2009	2009
	R	R	R	R	R	A	R	R	R	R	R	R

WORSLEY - DETECCIÓN DE CAMBIOS BRUSCOS (ESTACIONES CLIMÁTICAS, CUANTILES Y EXTREMOS)

MES	INV	PRI	VER	OTO	ANUAL	QC010	QC030	QC090	QC180	QC270	QC355	QMIN	QMAX
EST. W	4.43	3.69	3.78	5.08	4.24	3.4	3.55	4.19	4.41	5.11	4.78	4.27	3.59
AÑO SALTO	2010	2008	2008	2009	2008	2006	2008	2008	2009	2010	2009	2009	2008
	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R

www.bdigital.ula.ve

A continuación, en la Figura 4.14 y Figura 4.15 respectivamente, se presenta la curva del índice ONI (*Oceanic Niño Index*), la cual es una medida del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur (ENSO), para la región Niño 3.4 (5° N-5° S, 120° O – 170° O) y la curva del SOI (*Southern Oscillation Index*), siendo una medida para la oscilación del sur (diferencias estandarizadas de presión entre Tahití y Darwin, Australia).

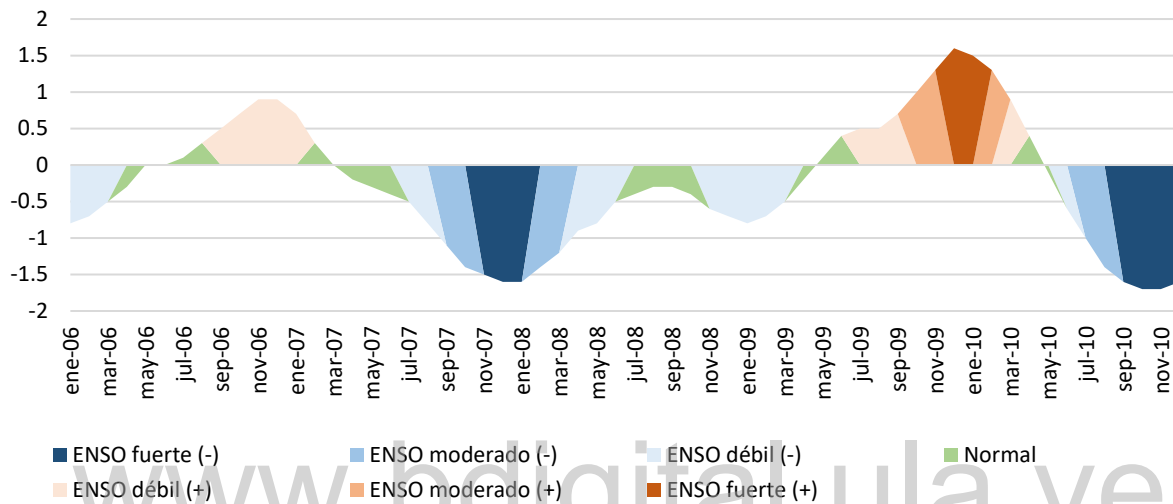


Figura 4.14. Valores de ENSO para el período 2006 – 2010. Fuente de datos: Climate Prediction Center CPC (2019). Fuente de categorización de ENSO: McKee *et al.* (1993).

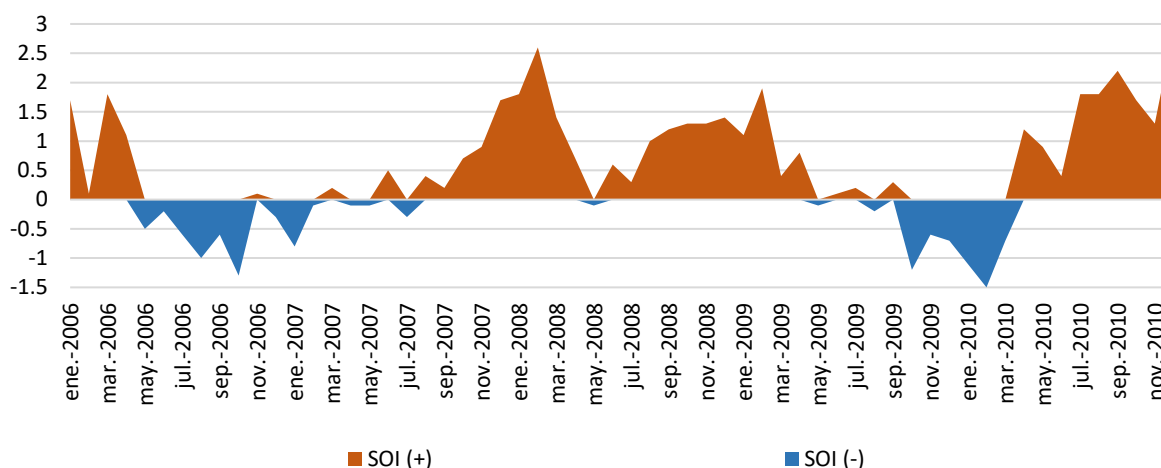


Figura 4.15. Valores del SOI para el período 2006 – 2010. Fuente de datos: CPC (2019).

Es notable el período ENSO fuerte negativo (fenómeno de La Niña), cuyo inicio de fase fría comenzó desde mediados de 2007 y se prolongó hasta inicios del 2009, con pico máximo negativo hacia finales de 2007 e inicios de 2008. Evocando los resultados de las pruebas aplicados con anterioridad para evaluar cambios abruptos, dicho evento ENSO puede ser relacionado con los principales saltos negativos encontrados para las estaciones consideradas (Figura 4.13), ya que en todas las estaciones ocurrieron entre el 2007 y 2009.

Adicionalmente y en concordancia con Rivera (2018), el fenómeno La Niña de 2009 (Figura 4.14) se relaciona directamente con la última fase de sequía hidrológica en la región, incluso prolongándose hasta el 2019.

Adicionalmente, de acuerdo con la Figura 4.15, donde se muestra la curva del índice de oscilación del sur (SOI), reafirma la vinculación de los eventos ENSO con las fluctuaciones de caudales del río Atuel. Para el SOI, la fase positiva corresponde con aguas oceánicas anormalmente frías, indicativas de episodios de La Niña (ENSO -). Dicho fenómeno, al igual que con la curva de ENSO, coincide con los saltos y tendencias negativos encontradas en el río Atuel desde mediados del año 2007 y hasta el 2009, coincidiendo con el inicio de la sequía hidrológica evidenciada por Rivera (2018).

Si bien la variabilidad climática ejerce su influencia natural sobre los caudales, y éstos sobre los ecosistemas que riegan, los efectos antrópicos en el uso de las aguas imponen consecuencias en los regímenes fluviales de los ríos. Adicional a las tendencias negativas encontradas en los caudales del río Atuel y Salado, el efecto del fenómeno ENSO negativo (SOI +) sobre las sequías hidrológicas de la zona y las características propias del sistema hidrológico en estos ambientes áridos, es notable la influencia del uso del recurso hídrico aguas abajo del complejo de represas y de las vastas zonas irrigada.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO 5. CAPITULO 5. CAUDALES AMBIENTALES EN EL MARCO DE LA OFERTA HÍDRICA ECOLÓGICA

Esta sección se enfoca principalmente en dos metodologías principales, los indicadores de alteración hidrológica (IHA), con el fin de describir la hidrología y posible alteración de los ríos involucrados, y la definición y cálculo de los caudales ambientales en el río Atuel bajo un enfoque hidrológico. Los cálculos de esta sección fueron obtenidos a partir de un programa escrito en lenguaje Fortran (inédito), desarrollado por el MC. Alberto I. J. Vich.

El programa utilizado incorpora como datos de entrada a los registros diarios de caudales de la Estación La Angostura (ya filtrados por el Análisis Exploratorio de Datos del Capítulo 4), ya que representa la estación con mayor longitud de datos y la última antes de los aprovechamientos hidráulicos del río Atuel. El contraste se realizó respecto a los datos de caudales medios mensuales registrados en la estación Carmensa.

Para una mayor comprensión, los resultados se disponen en formato gráfico, cuyos datos tabulares insumo se presentan en la sección de anexos correspondientes.

5.1. Indicadores de alteración hidrológica (IHA)

Previo a la obtención de los caudales ambientales, y con el fin de obtener una descripción hidrológica de los datos considerados, éstos se caracterizaron a partir de medidas e indicadores propios de las series. A través de estas medidas, se describió la hidrología del río Atuel, principalmente en términos de la oferta de agua disponible (con énfasis en caudales bajos, dado su vínculo con los caudales ambientales) (Tabla 5.1). La metodología e indicadores de esta sección se derivan del análisis de alteración hidrológica (IHA, *Indicators of Hydrologic Alteration*, The Nature Conservancy, 2012).

Estas metodologías tienen como objetivo principal la evaluación de los cambios que se generan sobre los elementos del régimen de caudales con mayor trascendencia ambiental, influenciados por los aprovechamientos de los recursos hídricos. Asimismo,

permiten valorar la alteración que sobre este régimen producirían distintos escenarios de uso y gestión de los recursos hídricos, interpretar las consecuencias ambientales de la alteración del régimen de caudales en la integridad ecológica del río, identificar los aspectos del régimen de caudales que en mayor medida condicionan la rehabilitación o recuperación de un tramo regulado, y fijar criterios objetivos con el fin de establecer medidas de planificación a mediano y largo plazo.

Una de las formas de mantener el equilibrio hidrológico de los ríos es replicando los patrones del régimen natural (representados por la magnitud, frecuencia, duración, estacionalidad y tasa de cambio de determinados eventos hidrológicos), los cuales se relacionan directa e indirectamente con el desarrollo de los procesos ecosistémicos circundantes.

Los parámetros de IHA comprenden 33 indicadores hidrológicos de acuerdo con sus influencias características sobre los ecosistemas, asociados en cinco grupos fundamentales (The Nature Conservancy, 2012).

Tabla 5.1. Resumen de parámetros IHA y sus influencias sobre los ecosistemas (The Nature Conservancy, 2012).

Grupo	Parámetros hidrológicos	Número de parámetros	Influencia sobre ecosistemas
1. Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales	Promedios o medianas para cada mes calendario.	12	Disponibilidad del hábitat para organismos acuáticos, disponibilidad de humedad del suelo para las plantas, disponibilidad de agua para animales terrestres, disponibilidad de alimentos/cobertura para mamíferos lanudos, confiabilidad del abastecimiento de agua para animales terrestres, acceso de los depredadores a los sitios de anidación, influencia sobre la temperatura del agua, niveles de oxígeno y fotosíntesis en la columna de agua.
2. Magnitud y duración de las condiciones	Mínimos y máximos anuales de 1, 3, 7, 30, 90 días,	12	Equilibrio de organismos competitivos, creación de sitios para la colonización de plantas, estructuración de los ecosistemas acuáticos, estructuración

hidrológicas extremas anuales	número de días con caudal nulo.		de la morfología del canal del río y condiciones físicas del hábitat, estrés hídrico en plantas, deshidratación animal, estrés anaeróbico en plantas, volumen de intercambio de nutrientes entre ríos y planicies de inundación, duración de las condiciones de presión (e.g. bajos niveles de O ₂ , concentración de químicos en ambientes acuáticos), distribución de comunidades de plantas en lagos, estanques y planicies de inundación, duración de los caudales altos para la eliminación de residuos y remoción de sedimentos.
3. Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales.	Día juliano de ocurrencia de caudales máximos y mínimos.	2	Compatibilidad con los ciclos de vida de los organismos, predictibilidad/evitabilidad del estrés en los organismos, acceso a hábitats especiales durante la reproducción o para evitar la depredación, indicios para el desove de los peces migratorios, evolución de las estrategias de los ciclos biológicos.
4. Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos	Cantidad de pulsos bajos y altos en cada año hidrológico.	4	Frecuencia y magnitud del estrés anaeróbico y de la humedad del suelo en las plantas, disponibilidad de hábitats en las planicies de inundación para organismos acuáticos, intercambios de nutrientes y de materia orgánica entre el río y las planicies de inundación, disponibilidad de minerales del suelo, acceso a sitios de alimentación y hábitat de aves acuáticas, influencia en el transporte de cargas de fondo, textura de sedimentos y duración de perturbaciones del sustrato (pulsos altos).
5. Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas	Tasas de ascenso y descenso y cantidad de inversiones hidrológicas.	3	Estrés de la sequía en las plantas (niveles decrecientes), aislamiento de los organismos en las islas fluviales, planicies de inundación (niveles crecientes), estrés por la desecación de los organismos de baja movilidad en el borde de la corriente.

Con el fin de contrastar las alteraciones producidas en el río Atuel por parte de actividades humanas en su cuenca media (represamientos, uso urbano y agricultura intensiva), los datos insumo para esta caracterización de alteración hidrológica provienen de las estaciones hidrométricas La Angostura (ubicada aguas arriba de los aprovechamientos antrópicos), y la estación Carmensa (la cual mide los caudales remanentes del río Atuel a su salida del oasis irrigado, ubicada a unos 80 kilómetros antes de su entrada a la provincia de La Pampa).

A continuación se presenta el resumen de parámetros IHA (Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3, Figura 5.4 y Figura 5.5) y sus influencias sobre los ecosistemas, así como los contrastes sobre el río Atuel entre las estaciones hidrométricas La Angostura (aguas arriba de las represas) y Carmensa (aguas abajo).

5.1.1.1. Grupo 1. Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales

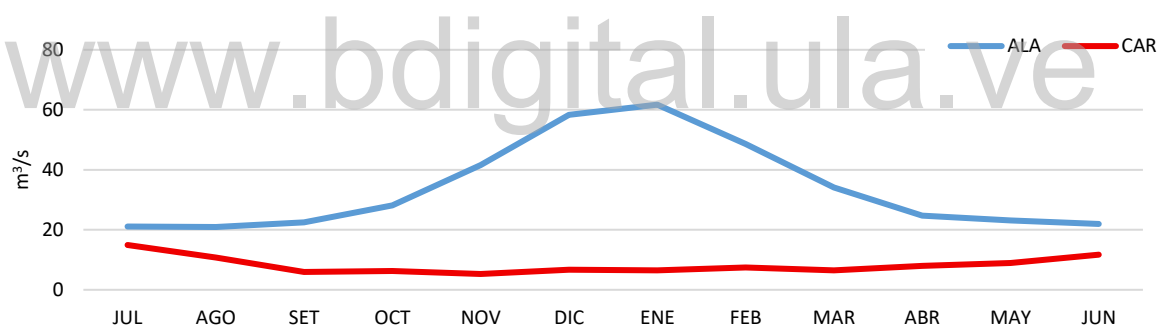


Figura 5.1. Caudales medios mensuales del río Atuel en La Angostura (LAN) (1931 – 2019) y del río Atuel en Carmensa (CAR) (1997 – 2017).

El hidrograma del río Atuel en La Angostura muestra el comportamiento natural del río, cuyos registros no se encuentran afectados significativamente por actividades antrópicas. Esta estación hidrométrica se ubica aguas arriba de la primera represa de la región y de los aprovechamientos agrícolas intensivos. Su curva muestra máximos durante el verano y mínimos en los meses invernales, con un rango que oscila entre los 62 m³/s y los 21 m³/s. El aporte por fusión nival, glaciario y de permafrost en la cordillera permiten mantener el caudal base durante los meses invernales, produciendo

abundantes caudales hacia la época estival, representando así la riqueza hidrológica de la cuenca.

Por otra parte, la curva del río Atuel en Carmensa (estación ubicada aguas abajo de los aprovechamientos hidroeléctricos y agrícolas) muestra un hidrograma completamente alterado, con caudales similares en época invernal (dada la disminución del uso del agua en el oasis) y mínimos durante el verano. De esta forma, no sólo se muestra una curva de menor magnitud en todos los meses, sino también aplanada en cuanto a su morfología, dado el efecto amortiguador de las represas aguas arriba).

5.1.1.2. Grupo 2. Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales

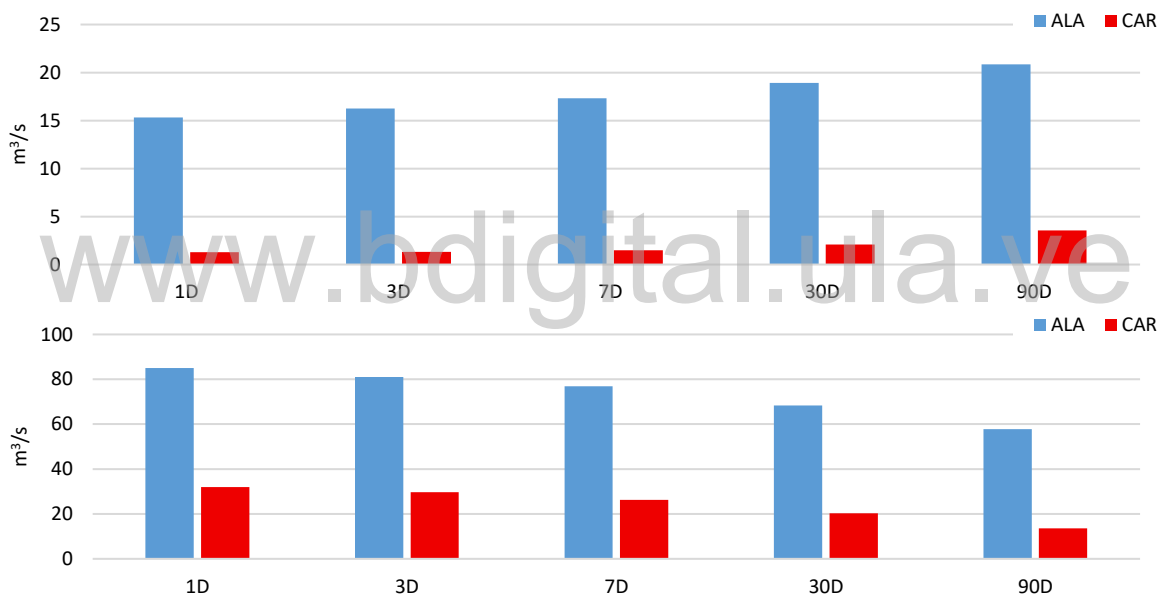


Figura 5.2. Caudales mínimos (Figura superior) y máximos (Figura inferior) anuales de 1, 3, 7, 30 y 90 días.

La comparación entre los registros de La Angostura (no alterado) y Carmensa (alterado) muestra que, en el tramo regulado, los caudales mínimos anuales de 1, 3, 7, 30 y 90 días son significativamente menores, mientras que los máximos anuales para esos mismos periodos también presentan magnitudes reducidas. Lo anterior indica que la regulación o derivación aguas abajo atenúa tanto los picos de crecida como los caudales bajos, reduciendo la variabilidad natural del régimen hidrológico. Como resultado, el río

pierde la amplitud entre máximos y mínimos, limitando la ocurrencia de eventos extremos necesarios para el mantenimiento de procesos ecológicos dependientes del río.

5.1.1.3. Grupo 3. Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales.

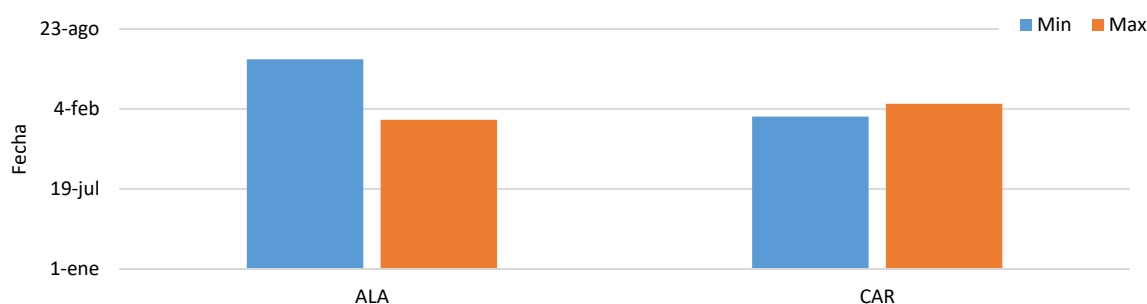


Figura 5.3. Día juliano medio de ocurrencia de caudales máximos y mínimos.

Similar a los resultados del grupo 1, en promedio, la fecha de ocurrencia de los máximos y mínimos en La Angostura coinciden con los ciclos estacionales anuales, con el 8 de enero y el 8 de junio, respectivamente. Por su parte, la atenuación del hidrograma en Carmensa principalmente por parte de las represas produce que las fechas de máximos y mínimos ocurran entre el 16 de enero y el 17 de febrero, es decir, sin ningún tipo de respuesta natural ante los ciclos hidrológicos del río.

5.1.1.4. Grupo 4. Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos

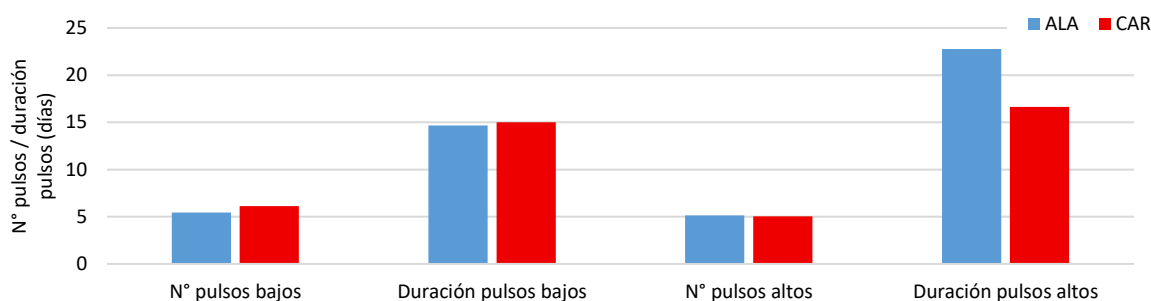


Figura 5.4. Cantidad de pulsos bajos y altos en cada año hidrológico.

Respecto al número de pulsos, en promedio, tanto los bajos como los altos son homogéneos (cerca de 5) en ambas estaciones. Estadísticamente, los eventos de pulsos altos son similares en cuanto a su ocurrencia, más no en magnitud, de esta forma, es posible que un evento de crecida sea atenuado en gran medida, pero no completamente por parte de las represas, llegando a ser registrado aguas abajo.

Por otra parte, si bien la duración de los pulsos bajos es similar en ambos casos, la diferencia más tangible se observa en los pulsos altos, alcanzando los 23 días para La Angostura y los 16 para Carmensa, siendo consecuencia del efecto amortiguador de los complejos de diques.

5.1.1.5. Grupo 5. Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas



Figura 5.5. Tasas de ascenso y descenso hidrológicas.

Las tasas de ascenso y descenso más pronunciadas en el tramo no alterado (La Angostura) reflejan una mayor variabilidad natural en las fluctuaciones diarias del caudal, con incrementos y disminuciones más rápidos asociados a eventos hidrológicos como tormentas o deshielos. En contraste, las menores tasas observadas en el tramo alterado (Carmensa) indican que la regulación aguas abajo amortigua las variaciones diarias, suavizando los cambios abruptos tanto en crecidas como en descensos. Para esta zona del oasis, sugiere la presencia de un régimen hídrico más estable y predecible, pero también una pérdida de la dinámica natural del río, con implicaciones para los procesos ecológicos dependientes de dichas fluctuaciones.

5.2. Caudales ambientales en el río Atuel bajo un enfoque hidrológico

Las metodologías hidrológicas se caracterizan por su simpleza, menor costo y mayor utilización a nivel mundial. Asimismo, representan el abordaje introductorio hacia el análisis de caudales ambientales de mayor complejidad (utilizando parámetros biológicos e hidráulicos). Estos métodos se dividen en dos grandes grupos: los que establecen un único valor de caudal ambiental para todo el año o mes, y los que establecen un régimen completo de caudales ambientales. Éstos últimos proporcionan valores para cinco componentes del régimen hidrológico (magnitud, frecuencia, duración, momento y tasas de cambio de los diferentes caudales), los cuales son reconocidos como determinantes para la integridad ecológica de los sistemas fluviales (Lytle y Poff, 2004).

El enfoque de trabajo se orienta en examinar y analizar los parámetros y características hidrológicas de la estación hidrométrica La Angostura. Su consideración se basa en que presenta la mayor longitud de datos entre las cinco estaciones consideradas, además de ubicarse inmediatamente aguas arriba del oasis irrigado y del primer embalse de aprovechamiento hidroeléctrico en la zona (represa Los Nihuales). Esta característica permite estimar valores únicos de caudales ambientales antes de que los flujos naturales del río sean alterados (por uso consuntivo o no consuntivo).

Es importante destacar que los métodos utilizados se centraron únicamente en aspectos relacionados con el régimen hidrológico y no incluyeron aspectos biológicos (métodos holísticos) ni hidráulicos. Estas metodologías representan el primer paso para determinar los flujos ambientales asociados a los ecosistemas.

Dadas las distancias entre La Angostura y Carmensa (240 km aproximadamente, Figura 4.4) se consideraron las pérdidas estimadas (por infiltración y evaporación) por entes oficiales (Gobierno de Mendoza y Departamento General de Irrigación) en 25 %, las cuales compensarían los cálculos de caudales ambientales en La Angostura. Para estudios de mayor detalle, este procedimiento podría tomarse con mayor rigurosidad, con el fin de obtener las pérdidas para cada momento del año (las cuales en términos de evaporación son mayores en verano y menores en invierno).

Por otra parte, la estación Carmensa, ubicada al final del sistema irrigado y cercana a la zona de bañados o humedales, registra los caudales remanentes del río Atuel y de escurrimiento desde el oasis (también abastecido por el río Diamante). Es decir, los flujos alterados por parte de la acción humana aguas arriba. Adicionalmente, es la estación con la menor longitud de datos (1996-2019), por lo que fue utilizada como sitio de contraste (caudales alterados) versus los caudales ambientales calculados en La Angostura (no alterados).

Dada la longitud de registros en Carmensa (posterior a la construcción de las represas), no es posible obtener un análisis de alteración previa y posterior a los impactos de la construcción de los diques en el sistema de los Nihuiles.

En función de los dos grupos principales (métodos de caudales ambientales fijos y variables), los resultados (barras azul claro) se incrementaron en un 25 % por pérdidas debido a la infiltración y evaporación (barras azul oscuro). El contraste se observa a través de la curva roja, la cual hacen alusión a la estación Carmensa, cuyos caudales se tomaron directamente de los registros (debido a su condición de alteración por causas antrópicas).

5.3. Métodos que establecen un único valor de caudal ambiental

Consisten en determinar el caudal ambiental como un porcentaje fijo de valores promedio interanual (caudal mensual o anual, mínimos, índices, entre otros), obtenido de una serie suficientemente extensa y de caudales característicos de la curva de duración de caudales.

Estos procedimientos deducen el caudal ambiental a partir de diversos tratamientos estadísticos de la serie de caudales naturales representativos (análisis de series temporales, caudales clasificados, medias móviles, entre otros). Esta descarga única se expresa generalmente como un porcentaje de un estadístico de tendencia central, como un percentil de la curva de duración, o bien asociado a un periodo de retorno.

A continuación, se presentan los resultados referentes a los caudales ambientales como

fracción de una medida de tendencia central (Figura 5.6), caudales ambientales asociados a una probabilidad (Figura 5.7), y caudales ambientales asociados a un cuantil de la curva de duración de caudales (Figura 5.8, Figura 5.9 y Figura 5.10).

Esta familia de cálculos se caracteriza por presentar un único valor anual para La Angostura (repetido todos los meses) y ajustado con el 25 % por pérdidas de evaporación e infiltración.

5.3.1. Caudales ambientales como fracción de una medida de tendencia central

Ley N° 2006-1772m de Francia: establece como caudal mínimo el 10 % del caudal medio interanual, calculado para un período mínimo de 5 años, con la salvedad que, si este es mayor a 80,0 m³/s, la alícuota es del 5 % (Heredia *et al.*, 2006).

Dirección General de Obras Hidráulicas de España: fija un caudal constante, equivalente al 10 % del caudal anual medio (Heredia *et al.*, 2006).

Colombia (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM, 2004): se estableció que el caudal ambiental corresponde al 25 % del caudal mensual promedio más bajo.

United States Fish & Wildlife Service (1981): para series con registros de más de 25 años, determina el caudal ambiental como la mediana de los caudales medios mensuales para el mes más seco (Consuegra, 2013).

Método de Tennant o Montana (1976): establece los requerimientos (Tabla 5.2) de caudal con base en el porcentaje del caudal medio que mantendría los atributos biológicos de un río. Es una metodología ampliamente usada y recomendada para ríos sin obras hidráulicas que alteren sus regímenes hídricos (e.g. represas) (Arthington y Zalucki, 1998, citado por Pantoja, 2017). Dada esta recomendación y aún con presencia de represas en el área, se decidió igualmente observar sus resultados mediante aplicación previa.

Tabla 5.2. Requerimientos de caudales de acuerdo con el método de Tennant (Modificado de Arthington y Zalucki, 1998).

Tipos cualitativos de caudales	Caudales sugeridos (% del Q_{med})
Mínimo	10 – 30
Bueno	20 – 40
Excelente	30 – 50

Método ABF (Aquatic Base Flow) (1981): también conocido como método NEFM (New England Flow Method) es muy utilizado en EE. UU. por el Servicio de Pesca y Fauna. Posiblemente es el método más aplicado en los proyectos hidroeléctricos de EE. UU. Define el caudal ambiental como la media aritmética interanual de los valores de la mediana de los caudales medios diarios del mes más seco para cada año, con un registro mayor a 25 años. En cursos de aguas naturales en los que se verifican derivaciones importantes con récord inferior a 25 años, el caudal ambiental se calcula en función de la extensión de la cuenca (Loar y Sale, 1981; Consuegra, 2013).

www.bdigital.ula.ve

Caudales ambientales como fracción de una medida de tendencia central

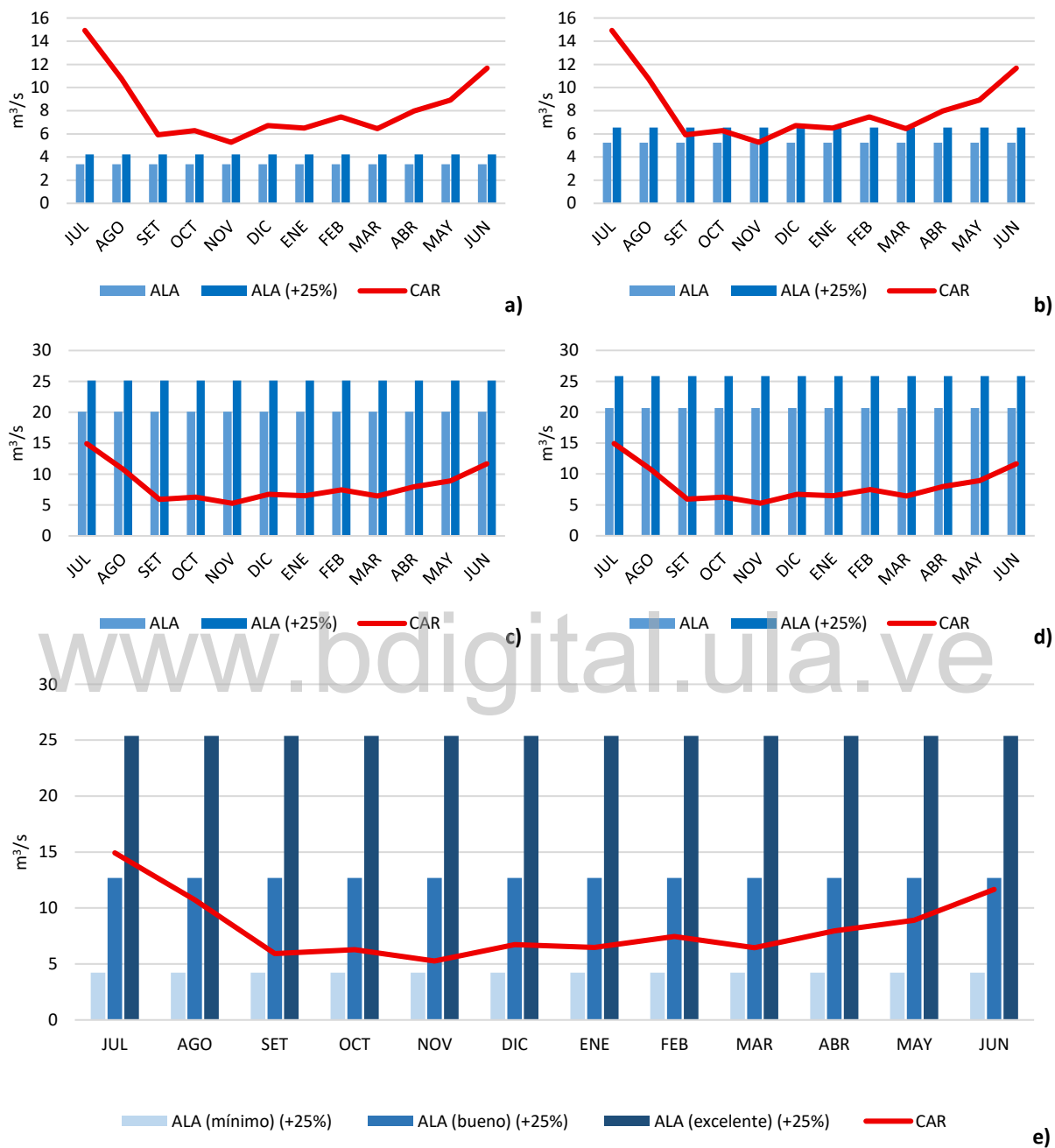


Figura 5.6. Caudales ambientales como fracción de una medida de tendencia central (La Angostura) versus el hidrograma de la estación Carmensa. a) Ley de Aguas de Francia – Dirección de Obras Hidráulicas de España; b) Colombia (IDEAM-2004); c) US Wild Fish and Wildlife; d) ABF; e) Montana (Las diferentes categorías aplicadas a LAN (La Angostura) ya fueron afectadas por el 25 % de pérdidas por infiltración y evaporación).

Partiendo desde el caudal anual medio, el valor en La Angostura es mayor a cuatro veces respecto a lo registrado en Carmensa. Tratándose del mismo río (Atuel), es evidente que la diferencia de magnitud registrada sucede por usos consuntivos en la zona intermedia entre ambas estaciones (oasis irrigado). Si bien los métodos de Francia, España, IDEAM (Colombia) y Montana (mínimo) son conservadoras, las metodologías del US Wild Fish and Wildfire, Montana (criterio excelente) y ABF casi triplican a lo registrado en Carmensa. De esta forma, de las ocho metodologías (excluyendo el caudal anual medio), cuatro calcularon un mayor caudal ambiental en La Angostura que en Carmensa.

Es notorio resaltar que estas metodologías no exponen la variabilidad hidrológica estacional, por lo que podrían tender a subestimar los recursos suficientes para suplir las necesidades ecológicas aguas abajo.

5.3.2. Caudales ambientales asociados a una probabilidad

Método 7Q10 (Chiang y Johnson, 1976; Pantoja, 2017): determina el caudal ambiental a partir de la serie de caudales mínimos anuales calculados sobre períodos móviles de 7 días y con un tiempo de retorno de 10 años. La metodología obtiene el caudal mínimo anual correspondiente a siete días consecutivos de sequía, valor que, en promedio, se presenta cada 10 años. Para ello se utilizan series de caudal medio diario, sobre las cuales se aplica un promedio móvil de 7 días y se extrae, para cada año hidrológico, el valor mínimo resultante. Con esta serie anual de mínimos se realiza un análisis de frecuencias y se selecciona el caudal asociado al período de retorno de 10 años, equivalente al caudal Q90.

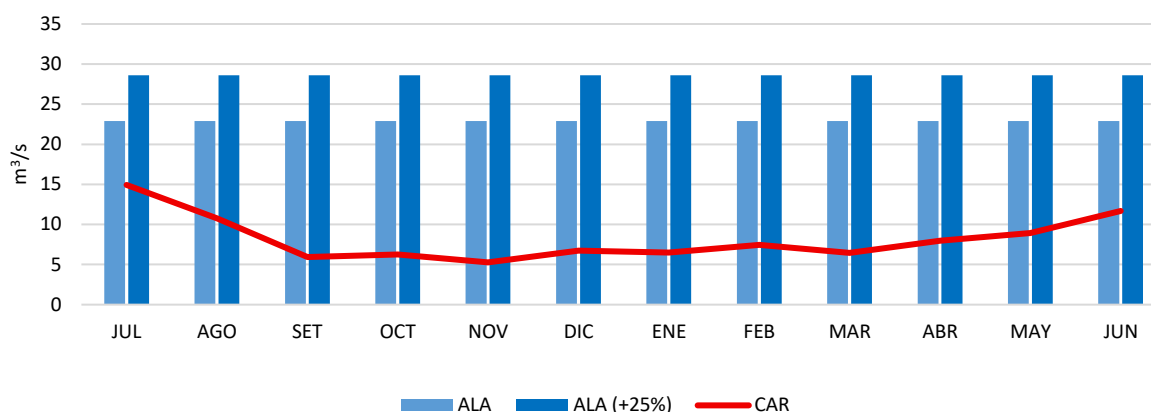


Figura 5.7. Caudales ambientales asociados a una probabilidad (Método de 7Q10).

Para este método, se observa que el caudal mínimo estadístico (igual o menor que el caudal medio en cualquier evento de 7 días y en promedio cada 10 años) sobrepasa el 50 % para todos los meses respecto a Carmensa. Las diferencias entre ambas estaciones reflejan influencias de extracciones, regulación o pérdidas en el tramo, que reducen y modulan el caudal ambiental disponible a lo largo del año.

5.3.3. Caudales ambientales asociados a un cuantil de la curva de duración de caudales

Método de Matthey (Lozano *et al.*, 2010): permite calcular el caudal mínimo necesario para el mantenimiento del hábitat, a partir de aquel caudal que circula al menos durante trescientos días al año (Q_{300}), es decir, el caudal superado en 300 días del año obtenido a partir de la curva de duración de caudales (Ec. 5.1).

$$Q_{amb} = \frac{15 * Q_{300}}{\ln(Q_{300})} \quad \text{Ec. 5.1}$$

El valor empleado y calculado se expresa en litros por segundo (l.s^{-1}). Como Q_{amb} (caudal ambiental) se emplea el valor máximo de los resultados encontrados con las ecuaciones anteriores.

Método de la Legislación Suiza: establece como caudal ambiental el 35 % de Q_{347} , pero

solo de manera cualitativa, ya que el Q_{amb} debe permitir: el mantenimiento de la calidad de las aguas superficiales (con los vertidos de aguas utilizadas actuales y futuras), y mantener los niveles de los acuíferos, los lugares de esparcimiento y la estética ambiental (dependiente de la cantidad de agua circulante). Para esta legislación, el caudal mínimo debe ser superior a 50 l.s^{-1} , mantener una profundidad de al menos 20 cm de tirante en el cauce y una serie de consideraciones biológicas locales (Heredia *et al.*, 2006).

Método de la Normativa Asturiana (Heredia *et al.*, 2006): establece tres niveles de protección de los cauces, basando el cálculo del caudal ambiental en forma similar a las fórmulas de Matthey, a partir del Q_{347} , empleándose el mayor de los valores obtenidos de las siguientes fórmulas (Ec. 5.2, 5.3 y 5.4):

$$Q_{amb} = \frac{15 * Q_{347}}{\ln(Q_{347})} \quad \text{Ec. 5.2}$$

$$Q_{amb} = 0,25 * Q_{347} + 75 \quad \text{Ec. 5.3}$$

$$Q_{amb} = 0,35 * Q_{347} \quad \text{Ec. 5.4}$$

Los valores de Q_{347} y Q_{amb} son expresados en litros por segundo (l.s^{-1}). Si $Q_{amb} < 50 \text{ l.s}^{-1}$, el valor umbral se debe incrementar en $4 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ de cuenca aprovechada. El valor de Q_{amb} es solo de referencia, ya que, en aquellas corrientes de especial interés por su riqueza piscícola, la normativa advierte que el caudal debe ser aumentado por la autoridad competente en la cantidad que garantice la vida de la fauna piscícola.

Método de Hoppe (1975): establece relaciones entre algunos percentiles de la curva de duración de caudales diarios medios y las condiciones para el desarrollo de la biota. Define tres caudales ambientales asociados a diferentes estadios de mantenimiento de servicios ecológicos: limpieza, mantenimiento y mínimo de hábitat (Tabla 5.3) (Gordon *et al.*, 1992; Díez, 2000). Su principal desventaja es el hecho que fue aplicado en el río Frying Pan de Colorado, cuya hidrología es propia de la región donde se desarrolla.

Tabla 5.3. Requerimientos de caudales de acuerdo con el método de Hoppe (Díez, 2000).

Tipo de caudales	Q de excedencia	Q _{días} de excedencia
Limpieza	Q ₁₇	62
Mantenimiento	Q ₄₀	146
Mínimo de Hábitat	Q ₈₀	292

Método de la Ley de Aguas de Colombia (Ministerio del Ambiente, 2005): dicta que los caudales ambientales para cada cuerpo de agua o tramo de este serán fijados por las autoridades ambientales competentes, de acuerdo con los criterios que establezca el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Para esta instancia, se requerirá la realización de estudios técnicos que sostengan la decisión de las autoridades ambientales. Mientras no se señale el caudal para una cuenca o tramo de esta, se considerará como caudal ambiental al caudal de permanencia en la fuente durante el 95 % del año, asumiendo que este puede ser subvalorado o sobrevalorado, de acuerdo con los requerimientos reales del ecosistema acuático (Consuegra, 2013).

Método del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM, 2008, citado por Consuegra, 2013): establece el Q_{amb} como el promedio del caudal de excedencia del 97,5 % ($Q_{97,5}$), obtenido a partir de la curva de duración de caudales para cada año.

En 2010, el IDEAM (Colombia), propuso una nueva forma de determinación del Q_{amb} . Se basa en el Índice de Retención y Regulación Hídrica, IRH. Si $IRH < 0,7$, entonces el Q_{amb} es igual al caudal que excede el 75 % de las veces en las series de caudales diarios (Q_{75}); en caso contrario, $Q_{amb} = Q_{85}$ (Ocampo *et al.*, 2014).

Método del Caudal Mínimo Hidrológico en Chile (QMH): propone un valor necesario para mantener en condiciones aceptables a la calidad del agua, así como proporcionar un hábitat adecuado para la biodiversidad de la corriente (Q_{amb}). En un estudio realizado en las regiones IX y X (Ayala y Cabrera, 1996), para cuantificar el QMH se compararon los caudales con probabilidad de excedencia de 99 %, 98 %, 95 % y el promedio de los caudales diarios mínimos de cada mes. Cabe destacar que en este estudio se observó que los caudales de 98 % de probabilidad de excedencia son más representativos o se asemejan más a los mínimos históricos, por lo cual se recomienda estimar un Q_{amb} como el máximo entre el Q_{98} y el promedio de los caudales diarios mínimos medios de cada mes.

La base de aplicación de los distintos métodos que establecen un único valor consiste en que, si no se sobrepasan los mínimos alcanzados naturalmente en el estiaje, el

conjunto de organismos del ecosistema original puede mantenerse. Este es un aspecto discutible, ya que las distintas poblaciones podrían tolerar condiciones de sequía durante un cierto tiempo, pero no de forma continuada. Un estiaje estacional y temporal se traduce en unas condiciones de profundidad, velocidad y temperatura de las aguas más o menos desfavorables para algunas especies. Ello produciría reajustes en el ecosistema, que durarán tanto como dure el estiaje, pero si este es mantenido de forma artificial, los reajustes seguirán hasta que se alcance un nuevo equilibrio, dando lugar a un ecosistema totalmente diferente al de partida.

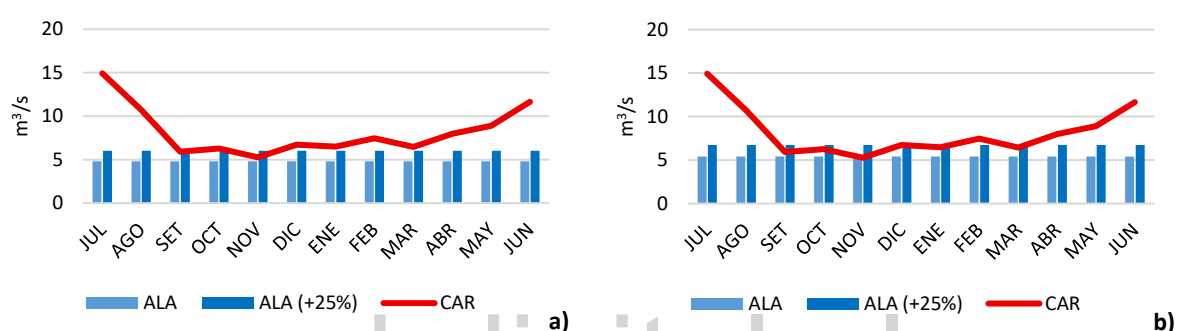


Figura 5.8. Caudales ambientales asociados a un cuantil de la curva de duración de caudales. Métodos de Matthey (a) y Suiza-Asturias (b).

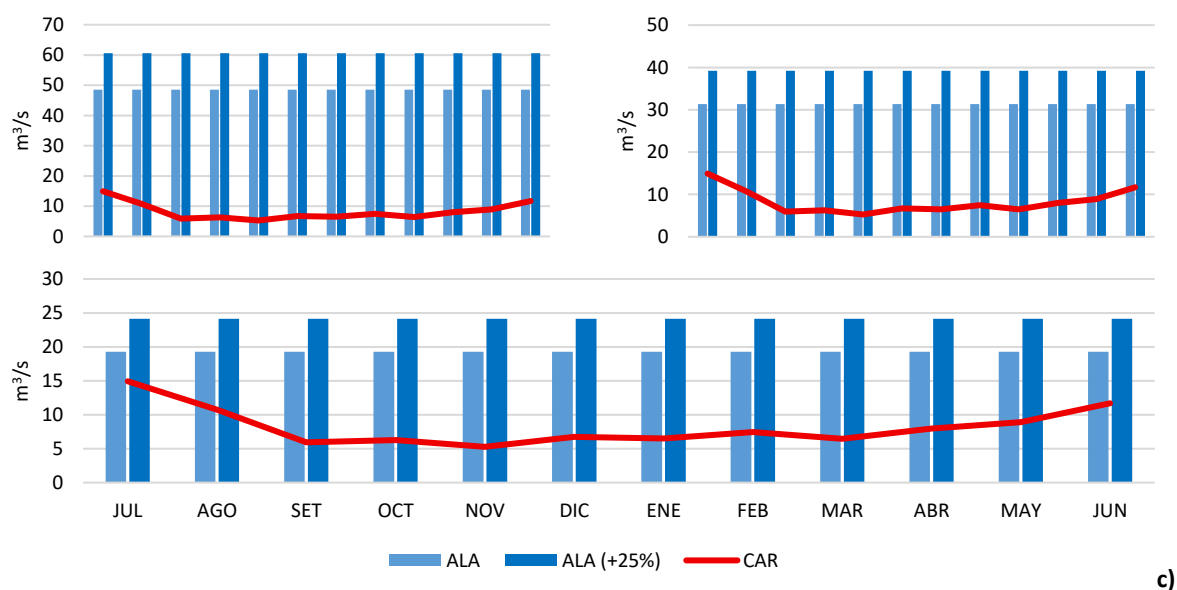


Figura 5.9. Caudales ambientales asociados a un cuantil de la curva de duración de caudales. Método de Hoppe: limpieza (a), mantenimiento (b) y hábitat (c).

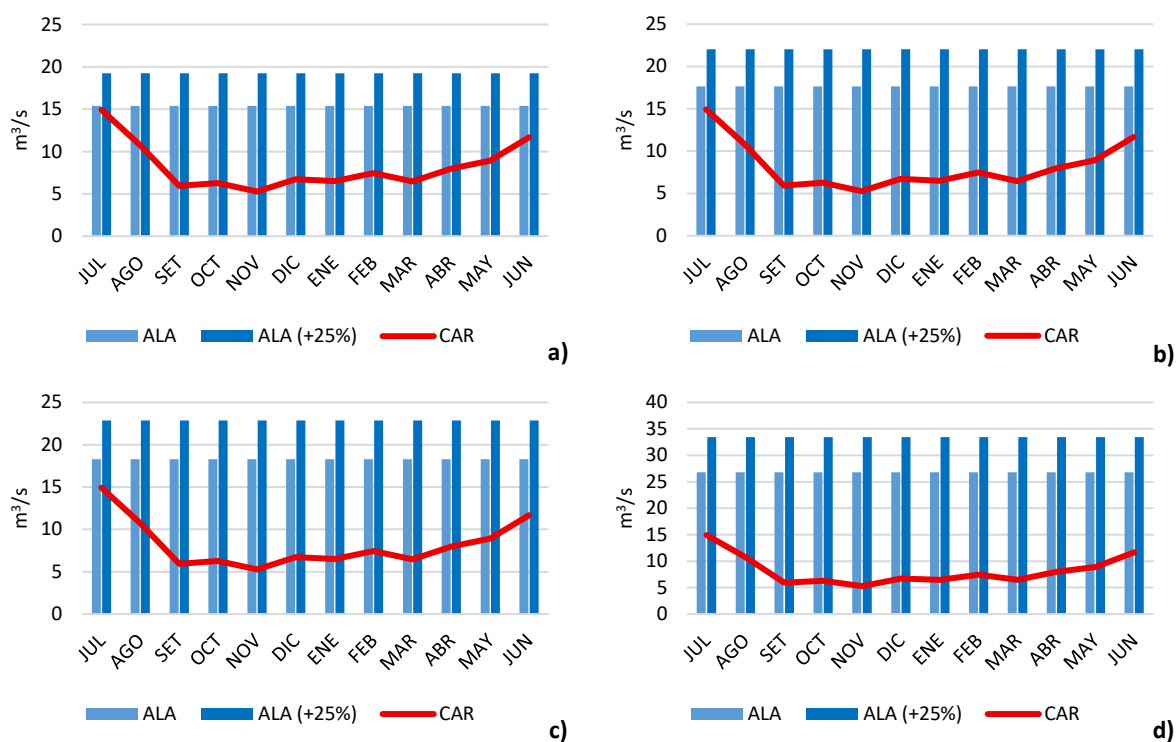


Figura 5.10. Caudales ambientales asociados a un cuantil de la curva de duración de caudales. Métodos de: Colombia, 2005 (a), Colombia-IDEAM 2008 (b), Colombia-IDEAM 2010 (c), y Chile (Ayala y Cabrera) (d).

Respecto a los métodos de Matthey y Suiza-Asturias, los cuantiles de caudal ambiental oscilan entre 6 y 8 m³/s, situándose casi siempre por debajo del hidrograma en Carmensa, lo cual no alcanza para satisfacer los ya alterados caudales aguas abajo. Con relación al método de Hoppe, los tres escenarios sobreestiman lo registrado en Carmensa, al igual que el resto de las metodologías, llegando incluso a triplicar en algunos meses los caudales (e.g. Colombia-IDEAM 2010). En todo caso, los métodos mencionados en este apartado homogeneizan la oferta ambiental de agua, no considerando así la variabilidad estacional, por lo que pueden subestimar o sobreestimar los caudales aportados (con los costos económicos que esto implicaría). Es importante mencionar que las metodologías utilizadas han sido desarrolladas en distintas condiciones climáticas que en la cuenca del río Atuel.

5.4. Métodos que establecen un valor de caudales ambientales para cada mes del año

Los métodos anteriores establecen un valor prácticamente constante a lo largo del año, lo que constituye una fuerte simplificación de un proceso complejo. Sobre la base de la variabilidad hidrológica natural de los ríos, se asume la limitación de criterios como el uso de caudales ambientales fijos, establecidos de manera arbitraria a partir de estadísticos, o la extrapolación de valores procedentes de estudios realizados en regiones con características ecohidrológicas notablemente diferentes. De todas formas, el uso de estos métodos, en ausencia de estudios ambientales locales, constituyen una primera aproximación y un valor de referencia, que posteriormente debe ser evaluado y validado por estudios específicos.

Caudal mensual medio: promedio de los flujos mensuales.

Método de Tennant (1976): establece distintos porcentajes del caudal anual medio (QAM) a lo largo del año. El régimen de caudales mensuales medios es dividido en dos periodos de 6 meses consecutivos de aguas altas y bajas, como representativos de una fase seca y una fase lluviosa, donde se establecen distintas fracciones del QAM, relacionándolos con diferentes grados de conservación. De esta forma, se establece un rango de flujos que, en alguna medida, contempla la variabilidad intranual del régimen de escurrimiento y sirven para la protección de los ecosistemas acuáticos y riparios. En esta sección se resalta que el 10 % del QAM es un mínimo para respetar, con el fin de evitar una fuerte degradación del medio. Por su parte, el caudal ambiental se obtiene utilizando los criterios expuestos en la Tabla 5.4 siguiente que, de una manera general, sirven para la protección de los ecosistemas de la mayoría de los cursos de agua.

Tabla 5.4. Caudales mínimos según el método de Tennant (1976, modificado de Arthington y Zalucki, 1998).

% del QAM		Calificación	Efectos
Aguas bajas	Aguas altas		
10 %	10 %	Muy insuficiente	Severa degradación de la mayor parte de los elementos del entorno
10 %	20 %	Débil	Mínimo. Permite salvaguardar algunos hábitats para la vida acuática
10 %	30 %	Aceptable	Caudal recomendado para mantener los hábitats y la vida
20 %	40 %	Bueno	Escenario ideal
30 %	50 %	Excelente	Escenario ideal
40 %	60 %	Excepcional	Para los primeros períodos de crecimiento de la mayor parte de las formas de vida.

Adicionalmente, existe un último criterio, denominado óptimo, que establece un rango de variación de 60 y 100 % del QAM (para aguas bajas y altas respectivamente, donde prácticamente prohíbe cualquier uso.

Método de Texas (Trans-Texas Method, 1974): desarrollado por el Departamento de Parques y Vida Silvestre de Texas (EE. UU.), divide al año en dos épocas: húmeda y seca; es decir, como un semestre de aguas altas y el resto de aguas bajas. El caudal ambiental corresponde al 40 y 60 % del caudal mensual medio, para el ciclo húmedo y seco, respectivamente (Matthews y Bao, 1991).

Método de Utah: divide el año en dos periodos (húmedo y seco) y utiliza como caudal ambiental la media aritmética de los valores más bajos de los caudales mensuales para cada mes dentro de la serie bajo análisis (Gordon *et al.*, 1992).

Método de Tessman (Sahoo *et al.* 2016): como modificación del método de Tennant, el caudal ambiental se establece con base en la comparación de un porcentaje del caudal anual medio (QAM) y el caudal mensual medio (QMM), resultando de (Ec. 5.5):

$$\begin{aligned} \text{Si } 0,4 * QAM > QMM &\rightarrow Q_{amb} = QMM \\ \text{Si } 0,4 * QAM \leq 0,4 * QMM &\rightarrow Q_{amb} = 0,4 QMM \end{aligned} \quad \text{Ec. 5.5}$$

Método del Programa de Recursos de las Grandes Llanuras del Norte de EE. UU (*Northern Great Plains Resources Program*, NGPRP, 1974): utiliza registros históricos de caudales mensuales medios y define tres grupos, en función de ciertas probabilidades de excedencia: caudales bajos, caudales normales y caudales altos. La serie de caudales diarios normales es la que está comprendida entre los percentiles Q_{15} y Q_{85} obtenidos de la curva de duración de caudales para la serie completa. Este criterio se debe a que los componentes biológicos más representativos de un sistema acuático son esencialmente mantenidos por las condiciones hidrológicas que se verifican en años normales y no para eventos extremos que ocurren durante periodos de corta duración (Wesche y Rechard, 1980; Consuegra, 2013, citado por Pantoja, 2017).

Posteriormente, con la nueva serie de caudales diarios normales de cada mes, se realiza un nuevo análisis de frecuencias, determinándose que el cuantil de excedencia Q_{90} es el caudal ambiental correspondiente al mes bajo análisis. La longitud de la serie debe ser superior a 20 años.

Método de la Universidad Federal de Santa María (Brasil) para el río Santa María (Silveira *et al.*, 2001): establece un caudal ambiental de forma similar al determinado en el método NGPRP. En su metodología, calcula las curvas de duración de caudales de la serie completa para cada mes; luego instaura que el 30 % del caudal de permanencia Q_{90} es el caudal ambiental calculado de cada mes del año, considerando así la estacionalidad del régimen fluvial.

Metodología aplicada al Río Grande (Argentina) (Infante *et. al*, 2018): derivado de la serie completa de caudales mensuales medios, este método identifica el valor mínimo de la serie y el mes, fijándolo como el caudal ambiental correspondiente al mes en cuestión. Para calcularlo en el resto de los meses, se afectan los caudales medios por coeficiente, que se obtiene del cociente entre el caudal mínimo de la serie y el promedio de los caudales mensuales de dicha serie (correspondiente al mes en el que se produce el mínimo).

Caudal base (Q_b): QBM por sus siglas en inglés, considera la variabilidad natural del régimen hídrico, el cual consiste en establecer un régimen de caudales a partir de un

caudal básico obtenido a partir de series de caudales medios diarios tratados con medias móviles de intervalos crecientes (Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental de Chile SEIA, 2016). El procedimiento puede seguirse detalladamente de acuerdo con la metodología propuesta por Palau (1994).

En resumen, para este método se establecen las medias móviles anuales mínimas (i) para todos los años (con n en rango 1 – 100). De la matriz generada, se obtienen incrementos

$(i - [i - 1]) / (i - 1)$, de cuyo valor mayor respecto a i se obtiene el caudal base Q_b . Posteriormente, se aplica la Ec. 5.6:

$$Q_{BM} = Q_b \sqrt{Q_{mes} / Q_{min}} \quad \text{Ec. 5.6}$$

Este método fue desarrollado para ríos regulados, pero su aplicación a cauces sin alteración puede constituir un punto de partida para establecer un régimen anual de caudales ambientales. Al igual que existe una variabilidad estacional en el patrón de caudales, es necesario contemplar la variabilidad hidráulica de la corriente (composición granulométrica de márgenes y fondo, morfología del cauce, entre otros). Por lo tanto, es necesario proveer de caudales suficientemente elevados que ocupen el cauce ordinario de la corriente. A esto se denomina caudal generador y se corresponde a una crecida con una recurrencia de 2 años.

Finalmente, estas metodologías ajustan sus valores a cada mes, representando de una forma más precisa la variabilidad hidrológica anual del río. Las diferencias en magnitud radican en los diferentes métodos considerados. Al igual que con el ítem anterior, el contraste se realiza frente a la curva del hidrograma medio anual del río Atuel en Carmensa (Figura 5.11, Figura 5.12 y Figura 5.13).

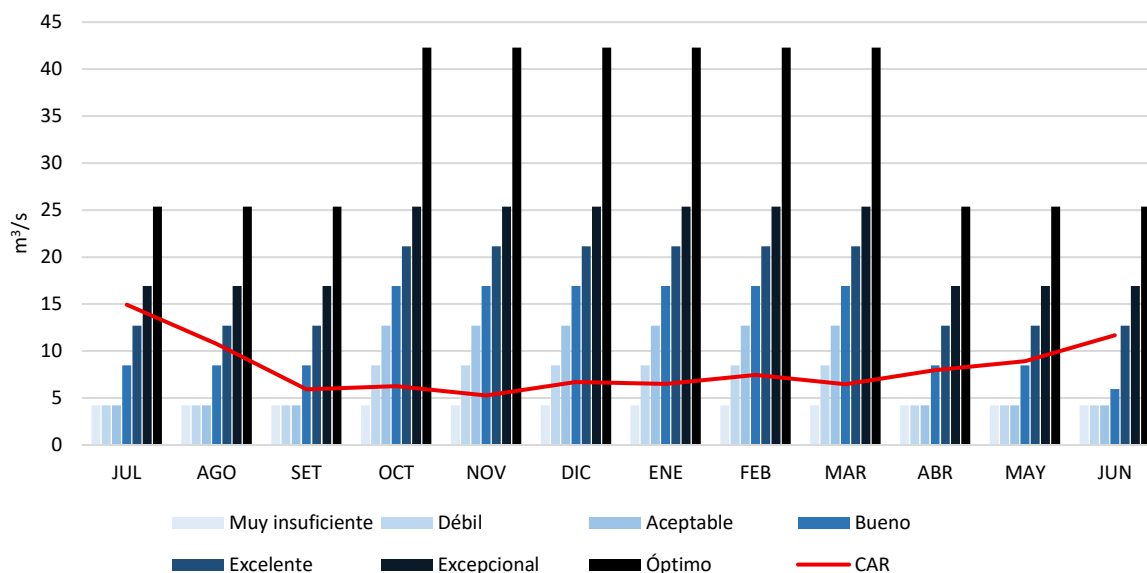


Figura 5.11. Métodos que establecen un valor de caudales ambientales para cada mes del año: Método de Tennant. Las diferentes categorías fueron aplicadas a LAN (La Angostura), cuyos cálculos ya fueron afectados por el 25 % de pérdidas por infiltración y evaporación.

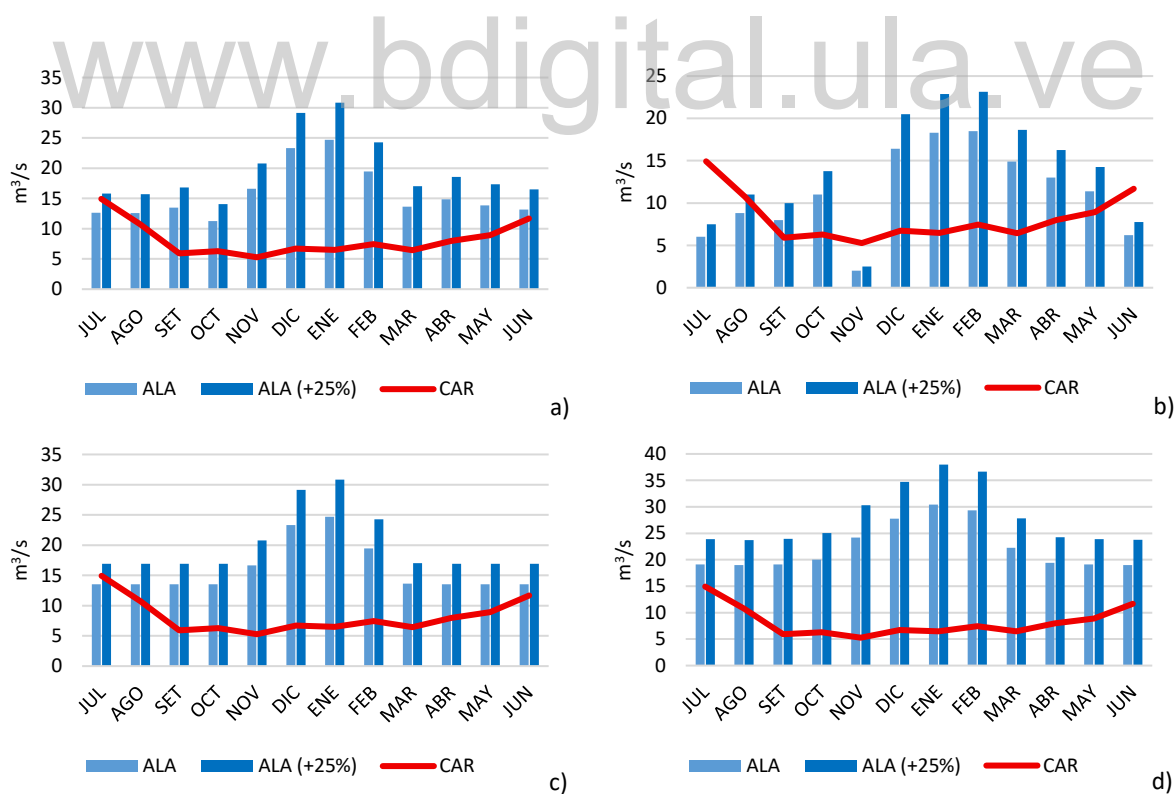


Figura 5.12. Métodos que establecen un valor de caudales ambientales para cada mes del año: Métodos de: Texas (a), Utah (b), Tessman (c) y NGPRP (d).

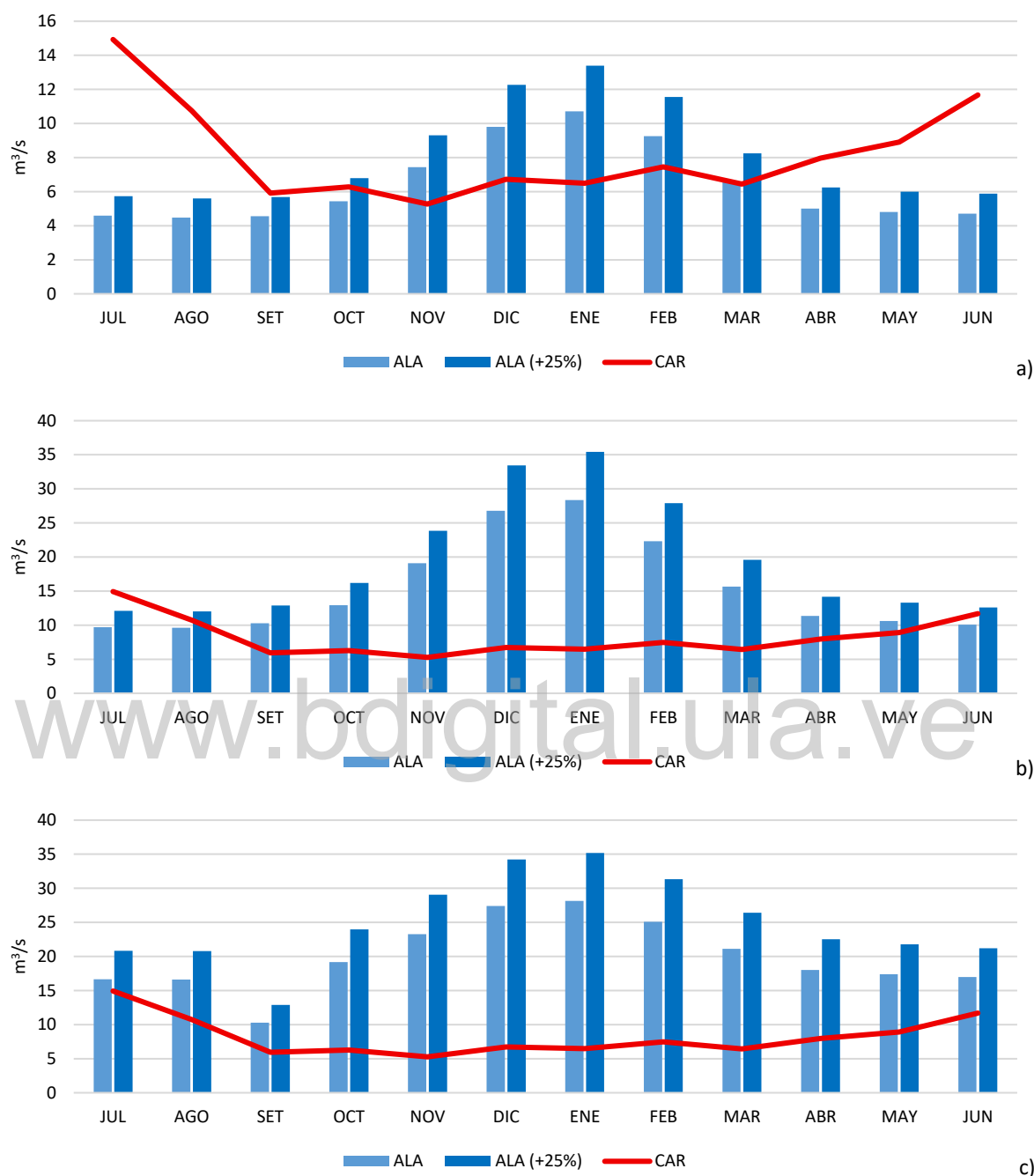


Figura 5.13. Métodos que establecen un valor de caudales ambientales para cada mes del año: Métodos de: Brasil-Santa María (a), Argentina-Río Grande (b) y Caudal de Mantenimiento (c).

Respecto a Tennant (Figura 5.11) (ya afectado por el 25 % de pérdidas por infiltración y evaporación), sólo las categorías de caudales excelentes, excepcionales y óptimos

alcanzan la curva de Carmensa en los meses invernales. Sin embargo, durante los meses estivales, salvo los caudales muy insuficientes o débiles, llegan a cuatuplicar lo registrado aguas abajo. Para este método, las categorías más adecuadas serían la “excepcional” y óptimo”.

Con relación a Texas y Tessman (Figura 5.12), los mínimos calculados coinciden con la curva de Carmensa durante los meses invernales, donde la actividad biológica demanda menos el recurso hídrico. Los máximos alcanzan los 30 m³/s durante el verano, siendo casi seis veces mayor a lo registrado aguas abajo. Por otra parte, Utah subestima los caudales de invierno, ubicándose por debajo de la curva de Carmensa, con máximos que cuatuplican la curva registrada en febrero. Finalmente, el método del Programa de Recursos de las Grandes Llanuras Septentrionales (NGPRP) supera en un 40 % los caudales de invierno, alcanzando casi los 40 m³/s en verano (casi ocho veces más que en Carmensa).

La consideración del 25 % de incremento por las pérdidas de evaporación e infiltración implica que, en metodologías como Texas, Utah y Tessmann, los caudales ambientales estimados superen el hidrograma de Carmensa durante algunos meses invernales principalmente, o que, sumando a NGPRP éstos estén holgadamente por encima de la curva registrada en todos los meses del año.

Finalmente, y considerando la Figura 5.13, el método de Brasil-Santa María subestima los caudales durante el invierno, sobrepasando con un margen poco holgado a Carmensa desde octubre a marzo. La situación mejora con el método de Argentina-Río Grande, aunque con poco margen sobre la curva registrada en los meses invernales. Respecto al Caudal de Mantenimiento, los flujos calculados superan holgadamente a la curva de Carmensa en todos los meses del año, alcanzando los 35 m³/s en enero.

Para las metodologías consideradas, la brecha se acentúa durante los meses estivales, cuya magnitud (en el menor de los casos) duplica a lo registrado en Carmensa. Esto es indicador del nivel de alteración de los flujos medidos aguas abajo, y de la necesidad de utilizar metodologías que simulen la variabilidad hidrológica del río, con el fin de mantener la salud de los ecosistemas aguas abajo.

CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS CAUDALES AMBIENTALES

6.1. Acciones dentro de la Declaración de Brisbane (2018)

La Declaración de Brisbane (2018) y su Agenda de Acción Global redefinieron el concepto de caudales ambientales, ampliando su alcance respecto a la versión de 2007. Según Arthington *et al.* (2018), estos se entienden como la cantidad, frecuencia, calidad y niveles de agua necesarios para sostener ecosistemas acuáticos que, a su vez, sustentan culturas, economías, formas de vida sostenibles y bienestar social.

Esta nueva formulación incluyó a todos los sistemas acuáticos (como ríos y sus zonas ribereñas, manantiales, llanuras de inundación, humedales, lagos, aguas costeras y ecosistemas dependientes de flujos subterráneos) y reconoció de manera más explícita la interdependencia entre la salud de los ecosistemas y la sostenibilidad de las sociedades y sus economías.

En las discusiones de 2018, algunos investigadores propusieron reemplazar el término “caudales ambientales” por expresiones como “agua ambiental” o “agua para el ambiente”, para resaltar la noción de volumen más que de caudal, una visión que se ajusta mejor a contextos donde muchas veces no existen aportes continuos de agua superficial.

Para el caso de estudio, los caudales no fluyen regularmente hacia la zona de bañados, donde solo se reciben pulsos esporádicos, insuficientes en cantidad y frecuencia para mantener sus funciones ecológicas. Esta carencia es una de las principales causas de su degradación y repercute directamente en la calidad de vida y modos de subsistencia de las comunidades locales, lo que convierte al concepto en un objetivo por alcanzar más que en una medida operativa para prevenir daños futuros.

Las demandas hídricas del oasis irrigado, la aridez natural de esta porción de la región cuyana y la fragilidad de los humedales aguas abajo hacen que la implementación de los caudales ambientales represente un desafío urgente, cuyo costo depende de la disposición de las instituciones para ceder parte de los recursos destinados a otros usos.

Su puesta en marcha permitiría restaurar ecosistemas y mejorar las condiciones de vida, aunque con posibles impactos sobre la economía regional. No obstante, la crisis climática y las limitaciones económicas dificultan alcanzar estos objetivos, a pesar de que organizaciones no gubernamentales y sectores sociales continúan reclamando su implementación.

Si bien la tecnificación y el uso más eficiente del agua de riego podrían aportar soluciones, no hay garantías de que el agua ahorrada se destine a fines ambientales antes que a la expansión agrícola. Sobre este panorama se basa la actual demanda de la provincia de La Pampa contra la provincia de Mendoza, exigiendo los flujos adecuados del río Atuel sobre su territorio.

Si la provincia de Mendoza accede a reivindicar los derechos pampeanos sin una adecuada planificación, podría repercutir negativamente sobre su economía. Aún bajo este escenario, metodologías planteadas anteriormente como el Caudal de Mantenimiento o NGPRP sobrepasan ampliamente los 3,2 m³/s solicitados por La Pampa (que además es un valor fijo y no representativo de las demandas ambientales estacionales).

De esta forma, más allá de la complejidad del caso, el manejo planificado de esta cuenca bi-provincial es crucial, la cual puede satisfacer las necesidades de sus habitantes y de los ecosistemas circundantes y ubicados aguas abajo, siempre y cuando las demandas consuntivas por parte de la sociedad no superen a la oferta natural del río.

6.2. Acciones y recomendaciones dentro de la planificación de los recursos hídricos

Según Arthington *et al.* (2018), la Declaración de Brisbane establece seis grandes grupos de recomendaciones para implementar caudales ambientales, los cuales se consideran esenciales para proteger y restaurar ecosistemas acuáticos y con ello, sostener culturas, economías, modos de vida y bienestar social. Estas recomendaciones se agrupan en tres categorías clave: liderazgo y gobernanza, que abarca desde niveles

supranacionales hasta comunitarios; mantenimiento, que implica planificar, implementar, monitorear y adaptar la gestión de caudales, e investigación, que enfatiza la necesidad de ampliar el conocimiento sobre las relaciones entre caudales ambientales, ecosistemas y sociedad.

La Agenda de Acción Global de 2018 traduce estas categorías en seis declaraciones que subrayan el valor de los caudales para la biodiversidad, el patrimonio natural y cultural, la urgencia de acción frente a su degradación, la necesidad de marcos normativos y financieros sólidos, la integración del conocimiento local y la prioridad de respuesta ante los impactos del cambio climático.

En el contexto de la cuenca del río Atuel, estas directrices no solo se alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (objetivos 4: educación de calidad; 6: agua limpia y saneamiento; 9: industria, innovación e infraestructura; 10: reducción de las desigualdades; 11: ciudades y comunidades sostenibles; 13: acción por el clima; 15: vida de ecosistemas terrestres), sino que ofrecen una hoja de ruta concreta para revertir el deterioro de los humedales.

La disminución y ausencia de caudales ambientales ha sido uno de los factores centrales de la degradación de estos espacios y del conflicto interprovincial generado; sin embargo, su restablecimiento podría marcar la diferencia entre el colapso definitivo y la recuperación socioambiental. Ante este panorama base, y adicional a los objetivos de la Declaración de Brisbane, el cambio climático actúa como un factor multiplicador de riesgos, reforzando la urgencia de profundizar en la investigación y diseñar estrategias que integren lo ecológico, lo hidrológico y lo social para asegurar caudales ambientales adecuados y sostenibles en el tiempo.

6.3. El nexa con el Cambio Climático

El nexa entre los caudales ambientales y los escenarios climáticos proyectados por el VI Informe del IPCC (2021) revela una interacción directa entre la disponibilidad hídrica futura y los impactos del cambio climático. El análisis climático-hidrológico evidencia que las variaciones en precipitación, temperatura y escorrentía están condicionadas tanto

por la variabilidad climática natural como por forzantes externas, incluidas las de origen antrópico.

Según el IPCC, el incremento global de la temperatura (vinculado a diferentes trayectorias de emisiones) provocará un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos como sequías agrícolas, ecológicas e hidrológicas, así como cambios en la disponibilidad de agua. Para la cuenca del río Atuel en estudio, se proyecta una disminución de las escorrentías andinas por pérdida de nieve, hielo y permafrost en la cordillera, junto con un incremento de la evapotranspiración debido a temperaturas más altas. Esto implicaría una mayor presión sobre el recurso hídrico, dado el aumento de la demanda agrícola, doméstica e industrial en el oasis irrigado aguas arriba.

En zonas de bañados o humedales áridos como el de la cuenca baja del río Atuel, cuyo mantenimiento depende de aportes externos y de un frágil balance hídrico, la combinación de menor aporte de agua y mayor evaporación incrementa su vulnerabilidad y riesgo de degradación. El informe enfatiza que, bajo estos escenarios, la única vía posible para mantener los caudales ambientales será a través de una gestión rigurosa de la demanda hídrica, priorizando usos que aseguren la integridad ecológica de estos espacios y su papel como sumidero de carbono, tal como reconoce la Convención Ramsar y el Acuerdo de París. Sin voluntad política y acción coordinada entre los gobiernos provinciales, comunidades y sectores productivos implicados, el deterioro podría ser irreversible, afectando no solo a los ecosistemas sino también a las comunidades que dependen de ellos.

CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo expone los principales resultados obtenidos a partir del análisis hidrológico del río Atuel, abordando tanto los aspectos estadísticos de las series temporales como la estimación y evaluación de los caudales ambientales. En primer término, se presenta un análisis exploratorio de datos orientado a caracterizar la estructura, consistencia y comportamiento de las series hidrológicas empleadas. Posteriormente, se presentan los resultados del cálculo de caudales ambientales y su contraste entre distintas metodologías y estaciones, con el propósito de evaluar la magnitud de la alteración hidrológica y sus implicancias sobre la oferta hídrica ecológica. Finalmente, se incluyen recomendaciones para la implementación de caudales ambientales, enmarcadas en los principios de la Declaración de Brisbane y la Agenda Global para la Sostenibilidad Hídrica, con el fin de aportar lineamientos hacia una gestión más equilibrada y resiliente del sistema fluvial.

7.1. Análisis exploratorio de datos

Posterior al cálculo de los datos faltantes (métodos de Lagrange de tercer orden, autoregresivo de primer orden y MOVE), se definieron las variables para cada una de las series temporales empleadas, con el fin de establecer la verificación de supuestos estadísticos subyacentes y análisis de tendencia y cambios abruptos.

Respecto a la normalidad, su ausencia en la mayoría de las variables de la estación Carmensa, puede deberse al nivel de aprovechamiento de agua del río Atuel, el cual es máximo para el punto de aforo de dicha estación (final del oasis irrigado). Asimismo, evidencia un patrón no regular de caudales, distinto de estaciones aguas arriba del mismo río, posiblemente debido a acciones antrópicas.

Con relación a la aleatoriedad, es notorio que la estación con datos más aleatorios sea Carmensa, dada su posición al final del sistema irrigado. Por otra parte, las demás estaciones del río Atuel (aguas arriba), presentaron más del 60 % de ausencia de

aleatoriedad en sus variables, pudiéndose destacar el énfasis de este en los meses con mayor demanda hídrica de los oasis irrigados (verano y primavera).

En cuanto a la independencia, nuevamente la estación Carmensa se diferencia de sus pares aguas arriba, presentando independencia en más del 20 % de las 25 variables consideradas. Esto puede explicarse dada la desconexión estadística de los registros en esta estación con los caudales naturales del río Atuel.

Respecto a los datos atípicos, si bien su ocurrencia en las series temporales fue verificada en todos los casos, evidencian la existencia de pulsos periódicos de inundación, esenciales para mantener saludables los ambientes ribereños y de humedales, con la provisión periódica extraordinaria de agua para, entre otros aspectos, controlar la salinización de dichos ambientes.

A través de las pruebas de tendencia y cambios abruptos, se destaca el hecho que Carmensa registre la mayor pendiente negativa para la época invernal, indicando de esta forma el nivel de afectación que generan las actividades antrópicas en la cuenca del río Atuel sobre el río homónimo.

Mediante el análisis de cambios abruptos, los saltos negativos y significativos encontrados (1985-2008 y 2008-2019) se destaca su posible relación con eventos de índole climática (dada la ausencia de construcción de represas durante dichos períodos). Esta relación podría vincularse con el decreto de emergencia hídrica en la región desde 2010, o la relación de sequía hidrológica coincidente con la ocurrencia del fenómeno de La Niña y exacerbado por acción antrópica.

En resumen, el régimen hidrológico del río Atuel, observado en Carmensa, no presenta las mismas características del río aguas arriba de los aprovechamientos antrópicos. Si bien el río Atuel en Carmensa se ubica casi al extremo sureste de la provincia de Mendoza, aún el río debe recorrer un largo camino a través de la provincia de La Pampa (donde existe una importante demanda de riego para la agricultura), antes de desembocar en el Desaguadero-Salado.

Adicionalmente, se encuentran las demandas hídricas ambientales, que próximas a

Carmensa se tratan del humedal Bañados del río Atuel, y aguas abajo, la alimentación a varios sistemas de lagunas y salitrales antes de desembocar al Colorado. En este sentido, mediante la metodología seguida, se evidenció preliminar y exploratoriamente las características naturales de los ríos estudiados, sus condiciones hidrológicas y también los impactos humanos sobre este. Esto demuestra que la aridez propia de la región, sumado a las características naturales de los ríos y de los impactos humanos sobre sus regímenes hidrológicos, marcan una situación de vulnerabilidad sobre los ecosistemas, situación que puede evidenciarse actualmente y desde hace décadas bajo la realidad de degradación de estos.

7.2. Caudales ambientales en el marco de la oferta hídrica ecológica

El análisis comparativo entre las estaciones hidrométricas de La Angostura y Carmensa en el río Atuel permite evidenciar con claridad el grado de alteración respecto a la regulación hidrológica y los usos consuntivos en el oasis irrigado. Mientras que en La Angostura el régimen conserva un comportamiento natural de tipo nivo-glaciar, con máximos estivales y mínimos invernales, en Carmensa se observa un hidrograma aplanado y de menor magnitud, donde la regulación por embalses y las derivaciones para riego interrumpen el ciclo natural del río. Esta modificación repercute directamente en la oferta hídrica ecológica, en tanto la variabilidad natural (fundamental para los procesos ecológicos dependientes del río) se ve drásticamente reducida.

La disminución de los caudales mínimos y máximos anuales en Carmensa respecto a La Angostura, así como la reducción en la amplitud entre ambos extremos, confirman que la regulación atenúa los eventos extremos. Esto limita la ocurrencia de crecidas necesarias para la conectividad fluvial y la renovación y mantenimiento de ecosistemas.

Las diferencias en la fecha de ocurrencia de máximos y mínimos también revelan los contrastes entre el ciclo hidrológico natural y el regulado. Mientras que en La Angostura los extremos coinciden con la estacionalidad climática y los aportes de fusión nival y glaciar, en Carmensa se observa un desplazamiento temporal producto de la operación de las represas, sin sincronía con los pulsos naturales. Lo anterior implica que las

señales ambientales que regulan los ciclos biológicos de los ecosistemas pueden verse interrumpidas o atenuadas, con efectos sobre la estructura y funcionamiento de los ambientes fluviales.

Respecto a las métricas de pulsos, si bien el número de eventos bajos y altos resulta similar en ambas estaciones, la magnitud y duración de los pulsos altos en Carmensa es menor, reflejando nuevamente el efecto amortiguador de las represas. A ello se suma la reducción en las tasas de ascenso y descenso, lo cual elimina las transiciones abruptas que en condiciones naturales actúan como detonantes de respuestas biológicas. En consecuencia, el régimen regulado presenta una mayor estabilidad hidrológica, pero a expensas de la pérdida de funciones ecológicas claves.

El análisis de metodologías de cálculo de caudales ambientales bajo un enfoque hidrológico aporta evidencia adicional sobre la magnitud del impacto antrópico. En términos generales, todas las metodologías aplicadas (fijas y variables) arrojan valores de caudal significativamente superiores a lo efectivamente registrado en Carmensa, lo cual denota la insuficiencia de los flujos disponibles para sostener los requerimientos ecológicos del río. Los métodos de carácter fijo, como los aplicados en Francia, España, IDEAM o Montana (mínimo), tienden a ofrecer estimaciones conservadoras, mientras que metodologías más exigentes (US Wild Fish and Wildlife, Montana criterio excelente, ABF) llegan a triplicar lo observado en Carmensa. Sin embargo, una limitación de estos enfoques es que no capturan la variabilidad estacional del régimen, homogeneizando la oferta ambiental de agua y, por ende, subestimando las necesidades ecológicas durante periodos críticos.

Los métodos basados en cuantiles (Matthey, Suiza–Asturias y Hoppe) presentan caudales que en algunos casos quedan por debajo de la curva de Carmensa, lo que pone en evidencia su falta de ajuste a las condiciones hidrológicas locales. Además, la sobreestimación o subestimación alternada de caudales conlleva implicaciones económicas y de gestión, ya que definir un caudal ambiental inapropiado puede generar conflictos entre usos hídricos.

Por otro lado, los métodos que asignan caudales mensuales (Tennant, Texas,

Tessmann, Utah, NGPRP, Brasil–Santa María, Argentina–Río Grande, y el Caudal de Mantenimiento) representan de manera más realista la variabilidad anual. En particular, Tennant, Texas y Tessmann muestran que, durante el verano, los caudales ambientales calculados pueden llegar a cuadruplicar o sextuplicar los valores registrados en Carmensa, lo que constituye una clara señal del déficit ecológico generado por las derivaciones aguas arriba. Asimismo, el NGPRP y el Caudal de Mantenimiento estiman valores holgadamente superiores en todo el año, destacando la magnitud del impacto de la regulación en la cuenca baja.

La incorporación de un 25 % adicional para considerar pérdidas por evaporación e infiltración resulta clave para ajustar las estimaciones a las condiciones semiáridas de la región. Sin embargo, aun con esta corrección, la brecha entre las necesidades ambientales estimadas y los caudales disponibles persiste en todos los métodos, especialmente durante los meses estivales, cuando la competencia entre usos agrícolas y ecosistémicos es mayor.

La comparación entre los registros de La Angostura y Carmensa confirma que el río Atuel experimenta un grado de alteración significativo a lo largo de su curso medio. Mientras en La Angostura se conserva un régimen natural de origen nival–glaciar, caracterizado por máximos estivales y mínimos invernales, en Carmensa el hidrograma aparece aplanado y con caudales reducidos, reflejando la influencia de la regulación por represas y de las extracciones consuntivas en el oasis irrigado. Esta pérdida de variabilidad, evidenciada en los parámetros IHA, implica un debilitamiento de las funciones ecológicas asociadas a los pulsos hidrológicos y un desajuste en la continuidad de los ciclos naturales del río.

En este contexto, la consideración de un 25 % adicional por pérdidas de infiltración y evaporación se vuelve esencial para estimar la disponibilidad real de caudal ambiental. No obstante, este porcentaje podría ser incluso mayor, ya que el río continúa perdiendo agua aguas abajo de Carmensa antes de alcanzar la antigua zona de bañados. La magnitud de la brecha observada entre los caudales registrados y los valores estimados mediante las distintas metodologías confirma la insuficiencia de los flujos actuales para garantizar la oferta hídrica ecológica.

De las metodologías aplicadas, aquellas que incorporan la variabilidad estacional (como el NGPRP o el Caudal de Mantenimiento) resultan más adecuadas para simular el comportamiento natural del río. Estos métodos superan ampliamente los caudales observados en Carmensa en todos los meses del año y se presentan como herramientas útiles para restituir, al menos parcialmente, la dinámica hidrológica necesaria para el mantenimiento de los ecosistemas dependientes del río Atuel. En contraste, los enfoques que asignan un caudal fijo tienden a homogeneizar la oferta de agua y, en consecuencia, pueden subestimar las necesidades ecológicas en periodos críticos.

Finalmente, los resultados obtenidos permiten concluir que la definición de caudales ambientales en el río Atuel debe basarse en metodologías que reflejen la dinámica natural del sistema y que contemplen tanto las pérdidas físicas como las presiones antrópicas. Avanzar en esta dirección no sólo permitiría reducir el déficit ecológico generado por la regulación, sino también sentar las bases para una gestión hídrica más sostenible e integrada, capaz de equilibrar las demandas productivas con la conservación de los ecosistemas fluviales.

www.bdigital.ula.ve

7.3. Recomendaciones para la implementación de los caudales ambientales

Desde 2007 se ha avanzado hacia un marco regulatorio que reconoce la importancia de los caudales ambientales, pero fue a partir de la Declaración de Brisbane y la Agenda de Acción Global (2018) cuando se consolidó una visión común que los concibe como un elemento central de la sostenibilidad hídrica. Estas directrices, en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, no sólo enuncian principios, sino que proponen acciones concretas basadas en liderazgo, gobernanza, investigación y participación comunitaria. Su finalidad es doble: garantizar la continuidad de los procesos ecológicos dependientes del agua y, a la vez, generar beneficios sociales y económicos que refuercen la resiliencia de los territorios.

La evidencia obtenida en el río Atuel demuestra que la alteración hidrológica es profunda, con un régimen aplanado en Carmensa respecto de La Angostura y caudales que no alcanzan a sostener la dinámica ecológica natural. Esto pone de relieve la

urgencia de traducir los marcos internacionales en medidas locales adaptadas, capaces de restaurar, al menos parcialmente, los flujos de agua que estructuran el ecosistema. La aplicación de metodologías como el NGPRP y el Caudal de Mantenimiento, que reproducen la variabilidad natural, aparece como una alternativa viable para reducir el déficit ecológico. Sin embargo, la eficacia de estas herramientas dependerá de su inserción en una estrategia de gestión integral que combine criterios técnicos con voluntad política e institucional.

El desafío de la cuenca baja del río Atuel no se limita a una cuestión hidrológica, sino que se inscribe en un entramado socioeconómico complejo. La ineficiencia histórica en el uso del agua en los oasis irrigados, sumada a la presión de un clima semiárido y altamente variable, ha generado un territorio degradado y socialmente vulnerable. En este sentido, los caudales ambientales no deben entenderse como una restricción productiva, sino como una oportunidad para diversificar la matriz económica regional, mejorar la equidad en el acceso al agua y revalorizar un espacio hoy considerado marginal.

Las proyecciones climáticas del IPCC (2021) advierten sobre un futuro marcado por el aumento de temperaturas, la reducción de glaciares y permafrost y la intensificación de sequías. Frente a este escenario, el cumplimiento de los objetivos de caudales ambientales requiere acciones inmediatas orientadas a la eficiencia, la innovación tecnológica y la educación ambiental. Sólo con un marco legal robusto y una fuerte concienciación social será posible revertir la percepción de la cuenca baja del río Atuel como un “espacio olvidado” y consolidarla como un territorio productivo, resiliente y valioso, cuyo patrimonio natural y social debe ser restaurado y protegido en el tiempo.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La zona baja de la cuenca del río Atuel en estudio representa un oasis natural en medio de una región árida, conformado por confluencias aluviales, humedales y bañados, cuya importancia ecológica ha sido reconocida ampliamente por quienes han habitado sus riberas a lo largo del tiempo. Sin embargo, el desarrollo de oasis artificiales y la sobreexplotación del agua para la agricultura irrigada han reducido drásticamente los aportes hídricos al oasis original, generando su degradación y la aparición de conflictos interprovinciales. Esta situación ha afectado tanto a los ecosistemas como a las sociedades locales y sus tradiciones, evidenciando un desequilibrio entre naturaleza y actividad humana.

El análisis exploratorio demostró que el régimen del río Atuel está fuertemente alterado en la estación Carmensa, con pérdida de normalidad, menor aleatoriedad e independencia de los caudales, tendencias negativas y cambios abruptos que reflejan la presión antrópica sobre el sistema. Las escorrentías cordilleranas, principales fuentes de agua, se ven condicionadas por la variabilidad climática y por la acción humana aguas arriba, afectando la provisión hídrica ambiental hacia humedales y oasis aguas abajo.

Las metodologías hidrológicas aplicadas para estimar caudales ambientales, incluyendo el Caudal de Mantenimiento y NGPRP (Programa de los Recursos de las Grandes Llanuras Septentrionales), demostraron su capacidad de aproximarse a la variabilidad natural del río y de superar las deficiencias observadas en Carmensa, considerando también pérdidas por infiltración y evaporación a lo largo del cauce. Estas estimaciones confirman la hipótesis de trabajo, mostrando que es posible determinar objetivamente, de forma preliminar, los caudales mínimos necesarios para sostener funciones ecológicas en sistemas acuáticos, aun sin incluir requerimientos específicos de hábitat.

En este marco, los lineamientos internacionales como la Declaración de Brisbane (2018), la Agenda de Acción Global y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, ofrecen un enfoque integral para la restitución, protección y mantenimiento de los caudales ambientales. Su aplicación podría permitir restaurar ecosistemas degradados, mejorar

las condiciones de vida de los habitantes y fortalecer los lazos sociales con los espacios naturales. Para la cuenca del río Atuel, dichas acciones deben considerar escenarios de cambio climático, las cuales proyectan mayores temperaturas, sequías más severas y reducción de glaciares y nieves acumuladas, implicando menor disponibilidad de escorrentías y mayor presión sobre los ecosistemas de humedales.

Estos argumentos confirman que el río Atuel presenta un marcado contraste entre un régimen natural altamente variable (La Angostura) y un régimen regulado y empobrecido en términos de oferta hídrica ecológica (Carmensa). Asimismo, se evidencia que las metodologías de cálculo de caudales ambientales requieren ser adaptadas a las particularidades climáticas, hidrológicas y socioeconómicas de la cuenca. La subestimación o sobreestimación de caudales puede derivar tanto en la degradación ecológica como en conflictos por el agua, por lo cual resulta indispensable avanzar hacia enfoques integradores que combinen el análisis hidrológico con consideraciones ecológicas y de gestión.

Finalmente, la conservación y gestión efectiva de esta cuenca no sólo responde a necesidades locales, sino que tiene implicaciones globales, ya que los humedales actúan como sumideros de carbono y contribuyen a mitigar el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la desertificación. La combinación de caudales ambientales bien gestionados, uso eficiente del recurso hídrico y concienciación ciudadana constituye la vía para revertir la degradación hídrica, restaurar la relación sociedad-naturaleza de los habitantes implicados y garantizar la sostenibilidad ecológica, social y económica de la región.

8.1. Recomendaciones derivadas de la investigación

El conflicto interprovincial no es más que una respuesta a una problemática que lleva décadas en actividad. La finitud de los recursos hídricos naturalmente condiciona a la naturaleza a adaptarse a su presencia y distribución en tiempo y espacio. La adición de las demandas hídricas humanas a este sistema implica una alteración, la cual comienza a interferir negativamente cuando sobrepasa la capacidad de oferta de la cuenca.

La situación actual de la cuenca del río Atuel es de extrema vulnerabilidad. La cuenca, usualmente rica en producción de agua, recorre cientos de kilómetros, desde su nacimiento en la cordillera hasta su natural desembocadura en el río Colorado. A lo largo de su extensión, dota de agua a los ecosistemas ribereños y de humedales, dependientes de su flujo dada la semiaridez de la región, por cuya importancia es imprescindible la restauración de sus caudales continuos a lo largo del sistema.

Con el establecimiento de las actividades humanas y agrícolas en la cuenca, el balance entre la oferta y demanda de agua limita su provisión hacia la naturaleza, es decir, el río deja de fluir lo suficiente como para satisfacer las demandas naturales, para detrimento de los ecosistemas aguas abajo y las sociedades de la vecina provincia de La Pampa. Ante este panorama y dada la imposibilidad de aumentar la oferta de agua, la recomendación es tanto simple como improbable: disminuir la demanda hídrica. Bajo las condiciones actuales, implicaría un colapso económico para la provincia de Mendoza, sin embargo, la respuesta se basa en la eficiencia de la demanda y en la sensatez del uso del recurso hídrico respecto a la naturaleza.

Con el incremento en la eficiencia del riego y una adecuada provisión de caudales ambientales, la matriz agrícola mendocina podría mantenerse (e incluso incrementarse), resolviendo el conflicto con la provincia de La Pampa al proveer del recurso a esa región, además de restituir los ecosistemas degradados y mitigar el proceso de desecación de riberas y humedales.

Por supuesto, lograr dicho objetivo implicaría fuertes inversiones sobre el sector agrícola, el cual ya enfrenta retos importantes para su mantenimiento, como las fluctuaciones económicas nacionales e internacionales, y la variabilidad sobre la provisión de agua.

Por encima de los retos económicos, se sitúan aquellos relacionados a la voluntad política para su implementación, así como de concienciación ciudadana en general. El reconocimiento de que los humanos no son los únicos que necesitan agua para subsistir, ya implica una voluntad social para utilizar los recursos hídricos de una manera sostenible. De esta forma, el establecimiento de medidas políticas y legales permitiría

asegurar su mantenimiento en el tiempo, y con ello, las ventajas del equilibrio entre la oferta y demanda de agua en la cuenca.

Dadas estas circunstancias, la necesidad urgente de implementación de los caudales ambientales se suma a la emergencia global por el cambio climático y a la sobreexplotación de recursos para el abastecimiento de las sociedades en constante crecimiento. Sólo a través de una eficiente planificación de los recursos hídricos, es posible asegurar la armonía entre la sociedad y la naturaleza con relación al agua y su disponibilidad.

www.bdigital.ula.ve

REFERENCIAS CITADAS

- Adeloye, A., & Montaseri, M. (2002). Preliminary streamflow data analyses prior to water resources planning study. *Journal of Hydrological Science*, 47(5), 679-692.
- Arthington, A., Bhaduri, A., Bunn, S., Jackson, S., Tharme, R., Tickner, D., Young, B., Acreman, M., Baker, N., Capon, S., Horne, A., Kendy, E., McClain, M., Poff, N., Richter, B., & Ward, S. (2018). The Brisbane Declaration and Global Action Agenda on Environmental Flows. *Front. Environ. Sci.*, 6, 45 . doi: 10.3389/fenvs.201800045.
- Arthington, A., & Zalucki, J. (1998). Comparative Evaluation of Environmental Flow Assessment Techniques: Review of Methods. Land and Water Resources Research and Development Corporation. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/228701645>.
- Asociación de Inspecciones de Cauces ASIC. (s/f). Requerimiento hídrico de los humedales en la cuenca inferior del río Mendoza, demanda ambiental y acciones, en el marco del cambio climático. Recuperado de http://www.asicprimerazona.com.ar/asic/publicaciones/descentralizacion_administraci%F3n_agua.pdf.
- Ayala y Cabrera. (1996). Caudales Ecológicos. Caracterización Hidroambiental Etapa I. Informe Final (235 p.) . Encomendado por: Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. Dirección General de Aguas.
- Bae, I., & Ji, U. (2019). Outlier Detection and Smoothing Process for Water Level Data Measured by Ultrasonic Sensor in Stream Flows. *Water*, 11, 951 . doi:10.3390/w11050951.
- Barchiesi, S., Davies, P., Kulindwa, K., Lei, G., & Martinez Ríos del Río, L. (2018). Aplicación de los caudales ecológicos con beneficios para la sociedad y distintos ecosistemas de humedales en los sistemas fluviales. Nota sobre Políticas de Ramsar nº 4. Secretaría de la Convención de Ramsar.
- Bastidas, L., Vich, A., & Henao, A. (2024). Hydrological alterations in semi-arid river systems: an exploratory approach to natural and anthropogenic drivers. *Investigaciones Geográficas*, 116-2024 . doi: <https://doi.org/10.14350/rig.60952>.
- Buishand, T. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, 58, 11-17.

- Cazevane, H. (2004). La Desaparición de los Bañados del Río Atuel. Un caso de acción antrópica negativa. 2º Conferencia Regional Humedales, Villa Mercedes, Argentina.
- Cazevane, H. (2015). La cuenca del río Desaguadero: un caso de desertificación por acción antrópica. *Interespaco, revista de Geografía e Interdisciplinaridade*, 1(2), 225-236. DOI: 10.18766/2446-6549/interespaco.v1n2p225-236.
- Chaves, A., Fallas, J., Rojas, K., & Quesada, F. (2017). Caja de herramientas para la determinación de caudal ambiental. Programa Hidrológico Internacional. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura UNESCO.
- Chiang, S., & Johnson, F. (1976). Low flow criteria for diversions and impoundments. *Journal of Water Resources Planning and Management Division*, 102, 227-238.
- Chiew, F., & McMahon, T. (1993). Detection of trend or change in anual flow of Australian rivers. *Int. J. of Climatology*, 13, 643-653.
- Climate Prediction Center, CPC. (2019). Monitoring & Data Index. Repositorio web de datos climáticos. National Weather Service. National Oceanic and Atmospheric Administration. Recuperado de <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/>.
- Conallin, J., Dickens, C., Hearne, D., & Allan, C. (2017). Stakeholder engagement in environmental water management. En A. C. Horne, J. A. Webb, M. J. Stewardson, B. Richter, & M. Acreman (Eds.), *Water for the Environment: Policy, Science, and Integrated Management* (pp. 129–150). Cambridge, MA: Elsevier.
- Confederación Hidrológica del Duero CHD. (2007). Caracterización de los caudales ambientales. Ministerio de Medio Ambiente. Recuperado de http://www.chduero.es/Portals/0/OficinaPlani/Sequias/Documentos/070313Ane04Caudales%20_ambientales-V04.pdf.
- Consejo Hídrico Federal COHIFE. (2015). Seminario Internacional de Cambio Climático, Política Fiscal Ambiental y Caudales Ambientales: Desafíos y oportunidades para las energías Sostenibles en América Latina. Prensa COHIFE. Recuperado de <http://www.cohife.org/noticias/s38/seminario-internacional-cambio-climatico-politica-fiscal-ambiental-y-caudales-ambientales>.
- Consuegra, M. (2013). Síntesis metodológica para la obtención de caudales ecológicos (qe), resultados y posibles consecuencias [Tesis de Posgrado]. Escuela de

Ingeniería de Posgrado Julio Garavito. Recuperado de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/entities/publication/239cb56e-f74b-4054-8883-955e881d02e0>.

Costa, A., Bronsert, A., & Araújo, J. (2012). A channel transmission losses model for different dryland rivers. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 1111–1135 . doi: <https://doi.org/10.5194/hess-16-1111-2012>.

D'Atri, A. (2016). Ñochilei Co Reserva Pampeana, en los humedales de la cuenca del Atuel. Fundación Chadileuvú. Recuperado de <http://www.chadileuvu.org.ar/fuchad/index.php/novedades/329-nochilei-co-reserva-pampeana-en-los-humedales-de-la-cuenca-del-atuel>.

Daniele, C., & Natenzon, O. (1994). Las regiones naturales de la Argentina: caracterización y diagnóstico. En *El Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas de la Argentina. Diagnóstico de su patrimonio natural y subdesarrollo institucional* (pp. 1-34). APN.

Del Pilar, A., & Corradine, M. (2014). Estimación del caudal ecológico por los métodos 7Q10, Q95% y los factores de reducción del 25 % en el río Ocoa, a partir de la generación de caudales diarios utilizando el modelo agregado de tanques [Especialización en Recursos Hídricos]. Universidad Católica de Colombia. Recuperado de http://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2100/1/Estimaci%C3%B3n_de_caudal%20ecol%C3%B3gico.pdf.

Departamento General de Irrigación DGI. (2020). Distribución estimada de agua superficial de los ríos. Temporada 19/20, ajustado a diciembre /19. Recuperado de <https://www.irrigacion.gov.ar/web/2020/02/05/estos-son-los-usos-del-agua-en-mendoza/>.

Departamento General de Irrigación, DGI. (2017). Aquabook. Software de información hídrica didáctica asociada al Departamento General de Irrigación, Gobierno de la Provincia de Mendoza.

Departamento General de Irrigación, DGI. (2019). El pronóstico en detalle. Gobierno de la provincia de Mendoza. Recuperado de <https://www.irrigacion.gov.ar/web/2019/10/08/el-pronostico-en-detalle/>.

Díez, J. (2000). Metodologías para la estimación de caudales ecológicos. Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias.

- Dyson, M., Bergkamp, G., & Scanlon, J. (2003). Caudal. Elementos esenciales de los caudales ambientales. UICN-ORMA.
- Environmental Protection Agency, EPA. (2000). Guidance for data quality assessment. Practical methods for data analysis. EPA QA/G-9. QA00 Update.
- Falaschi, D., Lenzano, M., Tadono, T., Vich, A., & Lenzano, L. (2018). Balance de masa geodésico 2000-2011 de los glaciares de la cuenca del río Atuel, Andes Centrales de Mendoza (Argentina). *Geoacta*, 42(2), 7-22.
- Flamenco, E., & Villalba, R. (2006). Relationships between sea surface temperatures and streamflows across the Cordillera de los Andes. *Proceedings of 8 ICSHMO*, Foz do Iguaçu, Brazil, April 24-28, 2006 (pp. 1259-1263). INPE.
- Farr, T., Rosen, P., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), RG2004 . <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>.
- Gordon, N., McMahon, T., & Finlayson, B. (1992). *Stream Hydrology. An introduction for ecologists*. John Wiley & Sons.
- Gu, R., & Deutschman, M. (2001). Hydrologic Assessment of Water Losses in River. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(1), 6-12 . doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2001\)127:1\(6\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2001)127:1(6)).
- Gyau-Boakye, P. (1993). Filling gaps in hydrological runoff data series in West Africa (Ergänzung lückenhafter Abflussreihen in West Afrika) [Tesis doctoral]. Ruhr-University Bochum.
- Gyau-boakye, P., & Schultz, G. (1994). Filling gaps in runoff time series in West Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 39(6), 621-636 . doi: 10.1080/02626669409492784.
- Hameed, T., Marino, M., Devries, J., & Tracy, J. (1997). Method for trend detection in climatological variables. *J. of Hydrologic Engineering, ASCE*, 2(4), 157–160.
- Hawkins, D. (1977). Testing a Sequence of Observations for a Shift in Location. *Journal of the American Statistical Association*, 72(357), 180-186.
- Healy, R. (2010). Water-budget methods. USGS publication . doi:

<https://doi.org/10.1017/CBO9780511780745.003>.

Helsel, D., & Hirsch, R. (2002). Statistical Methods in Water Resources Techniques of Water Resources Investigations, Book 4, chapter A3 (522 p.) . U.S. Geological Survey.

Heredia, L., Carvajal, Y., & Monsalve, E. (2006). Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental. Ingeniería y Universidad, 10(2).

Hirsch, R., Helsel, D., Cohn, T., & Gilroy, E. (1992). Statistical analysis of hydrologic data. En D.R. Maidment (Ed.), Handbook of Hydrology (Cap. 17). McGraw-Hill.

Hirsch, R., Slack, J., & Smith, R. (1982). Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality data. Water Resources Research, 18(1), 107-121.

Hoppe, R. (1975). Minimum Streamflow for Fish (35 pp.) . Paper Distributed at Soils-Hydrology Workshop, USFS, Montana State University.

Infante, P., Mario Salomón, L., Rodríguez, S., & Delgado, J. (2018). Caudales ecológicos en el río Grande. I Jornada de Divulgación de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo.

Infocampo. (2017). La Pampa asegura que perdió hasta 14.284 millones en 25 años por el corte del río Atuel. Recuperado de <https://www.infocampo.com.ar/la-pampa-asegura-que-perdio-hasta-14-284-millones-en-25-anos-por-el-corte-del-rio-atuel/>.

Instituto Nacional de Estadística y Censos INDEC. (2020). Proyecciones 2010-2025 elaboradas en base a resultados del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010. Recuperado de https://sitioanterior.indec.gob.ar/nivel4_default.asp?id_tema_1=2&id_tema_2=24&id_tema_3=119.

Interagency Advisory Committee on Water Data. (1982). Guidelines for Determining Flood Flow Frequency, Bulletin 17 B. U.S. Department of Interior, Geological Survey. Office of Water Data Coordination.

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

- International Union for Conservation of Nature and Natural Resources IUCN. (2003). Flow. The essentials of environmental flows. IUCN Publications Services Unit. Recuperado de http://www.ecosystemeconomics.com/Resources_files/FLOW.pdf.
- Kendall, M. (1955). Rank Correlation Methods. Charles Griffin.
- Kennen, J., Stein, E., & Webb, J. (2018). Evaluating and managing environmental water regimes in a water-scarce and uncertain future. *Freshw. Biol.* . doi: <https://doi.org/10.1111/fwb.13104>.
- King, J., & Brown, C. (2010). Integrated basin flow assessments: concepts and method development in Africa and South-east Asia. *Freshw. Biol.*, 55, 127–146 . doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02316.x>.
- Kundzewicz, Z., & Robson, A. (2000). Detecting Trend and Other Changes in Hydrological Data. World Climate Program Data and Monitoring. WMO/TD-No. 1013.
- Kundzewicz, Z., & Robson, A. (2004). Change detection in hydrological records—a review of the methodology / Revue méthodologique de la détection de changements dans les chroniques hydrologiques. *Hydrological Sciences Journal*, 49(1), 7-19.
- Laurnagaray, G. (2017, 7 de diciembre). Una pelea por el agua que lleva décadas; En un fallo histórico, la Corte ordenó que vuelva a correr el río Atuel en La Pampa. *Diario Clarín*. Recuperado de https://www.clarin.com/sociedad/fallo-historico-corte-ordeno-vuelva-correr-rio-atuel-pampa_0_Sko8rNvWf.html.
- Laurnagaray, G. (2018, 27 de diciembre). Décadas de litigio; El conflicto sin fin: La Pampa denuncia que Mendoza no respeta el fallo de la Corte por el río Atuel. *Diario Clarín*. Recuperado de https://www.clarin.com/sociedad/conflicto-fin-pampa-denuncia-mendoza-respeta-fallo-corte-rio-atuel_0_1B7T50B1c.html.
- Leys, C., Ley, C., Klein, O., Bernard, P., & Licata, L. (2013). Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *Journal of Experimental Social Psychology*, 49, 764–766 . <http://dx.doi.org/10.1080/14640749108400962>.
- Loar, J., & Sale, M. (1981). Analysis of Environmental Issues Related to Small-Scale Hydroelectric Development. V. Instream Flow Needs for Fisheries Resources. Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy.

- Lowry, J. (2007). La utilización de programas de SIG de bajo costo para el inventario, la evaluación y el monitoreo de humedales. Informes Técnicos Ramsar. Secretaría de la Convención de Ramsar. Recuperado de http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/lib_rtr02_s.pdf.
- Lozano, G., Gómez, J., Triviño, H., Rodríguez, C., Monsalve, E., & García, P. (2010). Estimación de caudales ecológicos mediante métodos hidrológicos e hidráulicos para la UMC río Quindío. Universidad del Quindío – Grupo de Investigación CIDERA. Recuperado de https://www.crq.gov.co/Documentos/Estimacion_Caudales_Ecologicos_UMC_Rio_Quindio.pdf.
- Lythle, D., & Poff, L. (2004). Adaptation no natural flow regime. *Trends Ecology Evolution*, 19(2), 94-100.
- Magnani, R. (2016). Una visita a los desiertos del río Atuel. Fundación Chadileuvú. Recuperado de <http://www.chadileuvu.org.ar/fuchad/index.php/justicia-por-el-atuel/actualidad/153-una-visita-a-los-desiertos-del-rio-atuel>.
- Mallakpour, I., & Villarini, G. (2015). A simulation study to examine the sensitivity of the Pettitt test to detect abrupt changes in mean. *Hydrological Sciences Journal*, 61(2), 245-254. DOI:10.1080/02626667.2015.1008482.
- Mann, H. (1945). Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245–259.
- Mann, H., & Whitney, D. (1947). On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *The Annals of Mathematical Statistics*, 18(1), 50-60.
- Masiokas, M., Iba, R., Luckman, B., & Mauget, S. (2010). Intra-to Multidecadal Variations of Snowpack and Streamflow Records in the Andes of Chile and Argentina between 30o and 37oS. *J. of Hydrometeorology*, 11, 822-831.
- Matthews, R., & Bao, Y. (1991). The Texas Method of Preliminary Instream Flow Determination. *Rivers*, 2(4), 295-310.
- Maza, J., Fornero, L., López, P., Vargas, A., Zuluaga A., & Toledo, M. (1997). Simulación matemática de la fusión nival con distintos escenarios climáticos en la cuenca del río Tupungato (46 p.). Informe Interno, PICT 97 N° 07-00000-0725. Instituto nacional del Agua. Centro Regional Andino.

- McKee, T., Doesken, N., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, California.
- Miller, J. (1991). Reaction time analysis with outlier exclusion: Bias varies with sample size. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 43(4), 907–912. <http://dx.doi.org/10.1080/14640749108400962>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Minambiente. (2018). Colombia cuenta con una nueva propuesta de estimación de caudales ambientales. Gobierno de la República de Colombia. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/colombia-cuenta-con-una-nueva-propuesta-de-estimacion-de-caudales-ambientales/>.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial De Colombia, Minambiente. (2005). Proyecto de Ley del Agua (borrador) . [http:// www.miniambiente.gov.co](http://www.miniambiente.gov.co).
- Nakamura, S. (1993). *Applied Numerical Methods in C*. Prentice-Hall international editions.
- O'Brien, G., Dickens, C., Wepener, V., Stassen, R., & Quayle, L. (2017). A regional-scale ecological risk framework for environmental flow evaluations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 957–975. doi: <https://doi.org/10.5194/hess-22-957-2018>.
- Ocampo, O., Vélez, J., Giraldo, D., & Sánchez, E. (2014). Caudales ecológicos y ambientales en cuencas andinas colombianas. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
- Organización de las Naciones Unidas para Educación, la Ciencia y la Cultura UNESCO. (2014). Qué son los Caudales Ambientales y cuál es la perspectiva de su aplicación en Uruguay (29 pp.). PHI-VIII / Documento Técnico N° 34.
- Organización Meteorológica Mundial OMM. (2006). Vigilancia y alerta temprana de la sequía: conceptos, progresos y desafíos futuros. OMM N°-1006. Recuperado de http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_drought_monitoring_early_warning_es_2006.pdf.
- Organización Meteorológica Mundial OMM. (2011). Guía de prácticas hidrológicas. Volumen II, Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas. OMM-N° 168. Sexta edición. Recuperado de http://www.wmo.int/pages/prog/hwrr/publications/guide/spanish/168_Vol_II_es.pdf

- Pahl-Wostl, C., Arthington, A., Bogardi, J., Bunn, S., Hoff, H., & Lebel, L. (2013). Environmental flows and water governance: managing sustainable water uses. *Curr. Opin. Env. Sust.*, 5, 341–351. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.06.009>.
- Palau, A., & Alcázar, J. (1996). The basic flow: an alternative approach to calculate minimum environmental instream flows. *Proceedings of 2° International Symposium on Habitat Hydraulics*, A, 547-558.
- Pantoja, N. (2017). Estimación de caudales ecológicos mediante métodos hidrológicos, hidráulicos y ecológicos en la quebrada El Conejo (Mocoa Putumayo). Universidad Pontificia Javeriana. Recuperado de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/21157/PantojaValenciaNatalia2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Pasquini, A., & Depetris, P. (2007). Discharge trends and flow dynamics of South American rivers draining the southern Atlantic seaboard: An overview. *J. Hydrology*, 333, 385–399.
- Pettitt, A. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28, 126-135.
- Poff, N. (2018). Beyond the Natural Flow Regime? Broadening the hydroecological foundation to meet environmental flow challenges in a nonstationary world. *Freshw. Biol.* doi: <https://doi.org/10.1111/fwb.13038>.
- Prensa Gobierno de Mendoza. (2015). Restauración Ambiental de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero. Gobierno de la Provincia de Mendoza. Recuperado de <https://www.mendoza.gov.ar/prensa/restauracion-ambiental-de-guanacache-desaguadero-y-del-bebedero/>.
- Prensa Gobierno de Mendoza. (2024, 3 de junio). Río Atuel: autoridades provinciales, municipales y empresarios se reunieron para fortalecer la postura de Mendoza. Recuperado de <https://www.mendoza.gov.ar/prensa/rio-atuel-autoridades-provinciales-municipales-y-empresarios-se-reunieron-para-fortalecer-la-postura-de-mendoza/>.
- Ramsar. (2015). 12ª Reunión de la Conferencia de las Partes en la Convención sobre los Humedales, Punta del Este, Uruguay, 1 a 9 de junio de 2015. Resolución XII.12: Llamado a la acción para asegurar y proteger las necesidades hídricas de los humedales para el presente y el futuro. Recuperado de <https://www.ramsar.org/document/resolution-xii12-call-to-action-to-ensure->

and protect the water requirements of wetlands.

Ramsar. (2015a). Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas: una recopilación de análisis recientes. Nota Informativa Ramsar 7. Secretaría de la Convención de Ramsar. Recuperado de <http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/bn7s.pdf>.

Ramsar. (2015b). Humedales: fuente de medios de vida sostenibles. Nota Informativa Ramsar 7. Secretaría de la Convención de Ramsar. Recuperado de http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/fs_7_livelihoods_esp_v1-1.pdf.

Ramsar. (2015c). Mantener las turberas húmedas para un futuro mejor. Nota Informativa Ramsar 8. Secretaría de la Convención de Ramsar. Recuperado de http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/fs_8_peatlands_es_v1.pdf.

Ramsar. (2015d). Humedales: una protección natural frente a los desastres. Nota Informativa Ramsar 9. Secretaría de la Convención de Ramsar. Recuperado de http://www.ramsar.org/sites/default/files/fs_9_drr_esp_30j.pdf.

Ramsar. (2016). Introducción a la convención sobre los humedales. Manual de la convención de Ramsar (5ta ed.). Subserie I: Manual 1 Cooperación internacional sobre los humedales. Recuperado de http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/handbook1_5ed_introductiontoconvention_s_final.pdf.

Remington, R., & Schork, M. (1974). Estadística Biométrica y Sanitaria. Editorial Prentice/Hall International.

Ries, K. (1994). Estimation of low-flow duration discharges in Massachusetts (Water-Supply Paper 2418) (50 p.). U.S. Geological Survey.

Rivera, J. (2018, 27 de septiembre). La sequía provocada por “La Niña” en las montañas de Mendoza podría terminar. CONICET. Recuperado de <https://www.conicet.gov.ar/cientificos-advierten-que-la-sequia-provocada-por-la-nina-en-las-montanas-de-mendoza-podria-terminar/>.

Robson, A., Bardossy, A., Jones, D., & Kundzewicz, W. (2000). Statistical methods for testing for change. En Z. W. Kundzewicz & A. Robson (Eds.), Detecting Trend and Other Changes in Hydrological Data (pp. 89-92). World Climate Programme– Water.

- s/n. (2018, 21 de mayo). El Virrey desvió el Diamante y le quitó caudal al Atuel. El Diario. Recuperado de <http://www.chadileuvu.org.ar/fuchad/index.php/novedades/1234-el-virrey-desvio-el-diamante-y-le-quito-caudal-al-atuel>.
- Sahoo, S., Khare, D., Mishra, P., Behera, S., & Krishan, R. (2016). A Comparative Study on Environmental Flows Assessment Methods in Lower Reach of Mahanadi River. *Journal of Environment and Earth Science*, 6(2). Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/16e5/532bd3b3978b69296475c6686d2eaf0074ce.pdf>.
- Salas, J. (1992). Analysis and modelling of hydrologic time series. En D. Maidment (Ed.), *Handbook of Hydrology*. MacGraw-Hill.
- Sarafian, P. (2006). Cuenca del Atuel. Recuperado de <http://www.hidricosargentina.gov.ar/59.pdf>.
- Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación SIPHN. (2019). Base de datos hidrológica integrada. Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda. República Argentina.
- Seoane, R. (2015). Modelos probabilísticos y estimación de la incertidumbre en procesos hidrológicos [Tesis doctoral]. Universidade da Coruña.
- Serinaldi, F., & Kilsby, C. (2016). The importance of prewhitening in change point analysis under persistence. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 30, 763–777. DOI 10.1007/s00477-015-1041-5.
- Siegel, S., & Castellan, N. (1988). *Nonparametric statistics for the Behavioural Sciences* (399 pp.). McGraw-Hill.
- Silveira A., & Silveira, G. (2001). Vazoes mínimas. En J.B. Paiva & E.M. Paiva (Orgs.), *Hydrología aplicada a gestao de pequenas vacias hidrograficas*. UFRGS.
- Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, SEIA. (2016). Guía metodológica para determinar el caudal ambiental para centrales hidroeléctricas en el SEIA. Gobierno de Chile. Recuperado de https://sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2016/guia_caudal_ambiental.pdf
- Sosa, H. (2012). Restauración y conservación del Sitio Ramsar Lagunas de Guanacache, Desaguadero y del Bebedero. Fundación para la Conservación y el Uso Sustentable de los Humedales. Wetlands International.

- Sosa, H., Vaquer, G., Vallvé, S., & Márquez, J. (1999). Ficha Técnica Lagunas de Guanacache. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar. Recuperado de http://www.geocities.ws/guanacaches/sitio_ramsar_guanacache.html.
- Stedinger, J., & Thomas, W. (1985). Low-flow frequency estimation using base-flow measurements (Open-File Report 85-95) (p. 21). U.S. Geological Survey.
- Tharme, R. (2003). A global perspective on environmental flow assessment; emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research Applications*, 19, 397–441.
- The Nature Conservancy. (2012). Indicadores de Alteración Hidrológica. Versión 7.1. Recuperado de <https://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/Freshwater/EnvironmentalFlows/MethodsandTools/IndicatorsofHydrologicAlteration/Pages/IHA-Software-Download.aspx>.
- Tiempoar. (2024, 15 de diciembre). Conflicto por el río Atuel entre Mendoza y La Pampa: “El Estado debe responder si está violando Derechos Humanos”. Recuperado de <https://www.tiempoar.com.ar/informacion-general/conflicto-por-el-rio-atuel-entre-mendoza-y-la-pampa-el-estado-debe-responder-si-esta-violando-derechos-humanos/>.
- Vich, A., López P., & Villegas, L. (2005). Detección de tendencias en el régimen hídrico de los principales ríos de la provincia de Mendoza (Argentina). En CONAGUA2005. XX Congreso Nacional del Agua. III Simposio de Recursos Hídricos del Conos Sur (p. 343). Mendoza.
- Vich, A., López P., & Schumacher, M. (2007). Trend detection in the water regime of the main rivers of the province of Mendoza, Argentina. *Geojournal*, 70, 233-243. DOI: 10.1007/s10708-0089136-x.
- Vich, A., & Barroso, S. (2003). Oasis Sur. Mapas de Mendoza, sus departamentos, sus oasis y su gente. Colección de 37 mapas del Diario Los Andes.
- Vogel, R., & Stedinger, J. (1985). Minimum variance streamflow record augmentation procedures. *Water Resources Research*, 21(5), 715–723.
- Westmacott, J., & Burn, D. (1997). Climate change effects on the hydrologic regime within the Churchill-Nelson river basin. *Journal of Hydrology*, 202(1-4), 263-279.

- Wilcoxon, F. (1945). Individual comparisons by ranking methods. *Biom. Bull.*, 1, 80–83.
- WMO. (1988). Analysing long time series of hydrological data with respect to climate variability. WCAP-3, WMO/TD n° 224. World Meteorological Organization.
- Worsley, K. (1979). On the likelihood ratio test for a shift in location of normal populations. *Journal of American Statistic Associations*, 74, 365-367.
- Xi, Y., Peng, S., Ciais, P., & Chen, Y. (2020). Future impacts of climate change on inland Ramsar wetlands. *Nature Climate Change*, 11, 45–51 (2021). doi: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00942-2>.

www.bdigital.ula.ve

APÉNDICES

A.	Parámetros de Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA)	193
B.	Caudales Ambientales (estación La Angostura)	196

www.bdigital.ula.ve

www.bdigital.ula.ve

A. Parámetros de Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA)

IHA Grupo 1: medias mensuales (m³/s)

	ALA	CAR
JUL	21.09	14.93
AGO	20.93	10.75
SET	22.43	5.92
OCT	28.18	6.27
NOV	41.57	5.27
DIC	58.29	6.72
ENE	61.71	6.49
FEB	48.61	7.46
MAR	34.09	6.45
ABR	24.73	7.97
MAY	23.14	8.91
JUN	21.97	11.67

IHA Grupo 2: mínimos y máximos anuales de 1, 3, 7, 30, 90 días (m³/s).

MIN	ALA	CAR	MAX	ALA	CAR
1D	15.31	1.27	1D	85.05	31.91
3D	16.25	1.32	3D	81.07	29.68
7D	17.32	1.47	7D	76.85	26.24
30D	18.93	2.08	30D	68.3	20.27
90D	20.84	3.54	90D	57.73	13.56

IHA Grupo 3: día Juliano de ocurrencia media de mínimos y máximos.

	ALA	CAR
Min	8-jun	16-ene
Max	8-ene	17-feb

IHA Grupo 4: número (frecuencia) y duración (días) de pulsos bajos y altos

VAR	ALA	CAR
N° pulsos bajos	5.44	6.14
Duración pulsos bajos	14.67	14.99
N° pulsos altos	5.14	5.05
Duración pulsos altos	22.77	16.64

IHA Grupo 5: tasa de ascenso y descenso

	ALA	CAR
Tasa de ascenso	2.22	1.03
Tasa de descenso	-2.08	-0.7

www.bdigital.ula.ve

B. Caudales Ambientales (estación La Angostura)

www.bdigital.ula.ve

Métodos que establecen un único valor de caudal ambiental (m³/s)

Caudales ambientales como fracción de una medida de tendencia central

Caudal anual medio	33.84
Ley de Aguas (Francia)	3.38
Dirección General de Obras Hidráulicas de España	3.38
Colombia (IDEAM)	5.23
US Wild Fish and Wildlife	20.12
Montana (mínimo)	3.38
Montana (bueno)	10.15
Montana (excelente)	20.3
ABF	20.68

Caudales ambientales asociados a una probabilidad

7Q10	22.88
------	-------

Caudales ambientales asociados a un cuantil de la curva de duración de caudales

Matthey	4.82
Suiza	5.39
Asturiana	5.39
Hoppe (limpieza)	48.48
Hoppe (mantenimiento)	31.36
Hoppe (hábitat)	19.3
Colombiana 2005	15.4
Colombia IDEAM 2008	17.63
Colombia IDEAM 2010	18.29
Chile (Ayala y Cabrera)	26.77
La Higuera (criterio 1)	14.4
La Higuera (criterio 2)	15.45
La Higuera (criterio 3)	12.18
La Higuera (criterio 4)	13.23
La Higuera (criterio 5)	15.57

Métodos que establecen un valor de caudales ambientales para cada mes del año (m³/s).

	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
Caudal mensual medio	21.09	20.93	22.43	28.18	41.57	58.29	61.71	48.61	34.09	24.73	23.14	21.97
Tennant (muy insuficiente)	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38	3.38
Tennant (débil)	3.38	3.38	3.38	6.77	6.77	6.77	6.77	6.77	6.77	3.38	3.38	3.38
Tennant (aceptable)	3.38	3.38	3.38	10.15	10.15	10.15	10.15	10.15	10.15	3.38	3.38	3.38
Tennant (bueno)	6.77	6.77	6.77	13.54	13.54	13.54	13.54	13.54	13.54	6.77	6.77	4.77
Tennant (excelente)	10.15	10.15	10.15	16.92	16.92	16.92	16.92	16.92	16.92	10.15	10.15	10.15
Tennant (excepcional)	13.54	13.54	13.54	20.30	20.30	20.30	20.30	20.30	20.30	13.54	13.54	13.54
Tennant (óptimo)	20.30	20.30	20.30	33.84	33.84	33.84	33.84	33.84	33.84	20.30	20.30	20.30
Texas	12.65	12.56	13.46	11.27	16.63	23.31	24.68	19.44	13.64	14.84	13.88	13.18
Utah	6.00	8.80	8.00	11.00	2.00	16.40	18.30	18.50	14.90	13.00	11.40	6.20
Tessman	13.54	13.54	13.54	13.54	16.63	23.31	24.68	19.44	13.64	13.54	13.54	13.54
NGPRP	19.10	18.99	19.14	20.04	24.22	27.79	30.41	29.31	22.27	19.41	19.09	19.01
Brasil (Santa María)	4.59	4.48	4.55	5.43	7.44	9.81	10.71	9.25	6.60	5.00	4.80	4.70
Argentina (Río Grande)	9.68	9.61	10.30	12.94	19.09	26.77	28.34	22.32	15.66	11.35	10.63	10.09
Caudal de Mantenimiento	16.67	16.62	10.30	19.17	23.26	27.40	28.16	25.08	21.13	18.02	17.41	16.97