

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales

Tesis Doctoral



Sequías Hidrológicas en la República Argentina y su
relación con Variables Macroclimáticas.

Autor: Mg. Inga. Erica Betiana Díaz

Director: Dr. Ing. Oscar Dölling

Marzo de 2016

Sequías Hidrológicas en la República Argentina y su relación con Variables Macroclimáticas.

por

MSc. Inga. Erica Betiana Díaz

Dr. Ing. Oscar Dölling

Director

COMISIÓN ASESORA:

Dr. Ing. Andrés Rodríguez

FCEFyN - UNC

Dr. Ing. Juan Carlos Bertoni

FCEFyN - UNC

Dr. Ing. Oscar Dölling

Facultad de Ingeniería - UNSJ

Esta Tesis fue enviada a la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba para cumplimentar los requerimientos de obtención del grado académico de Doctor en Ciencias de la Ingeniería.

Córdoba, Argentina
Marzo de 2016



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Facultad de Cs. Exactas, Físicas y Naturales

ACTA DE EXAMENES

Libro: 00001

Acta: 03426

Hoja: 01/01

LLAMADO: 1

29/03/2016

CATEDRA - MESA:

DI002 TESIS DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA

NUMERO	APELLIDO Y NOMBRE	DOCUMENTO	INGRESO	COND	NOTA	FIRMA
29848491	DIAZ, Erica Betiana	DNI: 29848491	2010		Aprobada	

GARCÍA RODRÍGUEZ, Carlos Marcelo - SERRA, Juan - RAVELO, Andrés C. - SMREKAR, Marcelo R. -

Observaciones:

Carlos MARCELO GARCIA

Córdoba, ____/____/____

Certifico que la/s firma/s que ha/n sido puesta/s en la presente Acta pertenece/n a: _____

Inscriptos
 Ausentes
 Examinados
 Reprobados
 Aprobados
 21/03/2016 10:08:05

Libro/Acta: 0000103426 Hoja: 01/01

Resumen

Una adecuada planificación y gestión requiere un conocimiento de la distribución temporal y espacial de los recursos hídricos. Una amenaza que afecta al desarrollo y aprovechamiento de los recursos hídricos, y para las cuales la ingeniería debe dar soluciones, son las situaciones de extremos hidrológicos como inundaciones o sequías. Siendo estas últimas un fenómeno hidrológico extremo de gran complejidad del cual aún se conoce poco. Con el objetivo de identificar y caracterizar temporal y espacialmente las sequías hidrológicas en Argentina, esta tesis abordó en primera instancia, la identificación y caracterización de sequías desde el punto de vista hidrológico, abarcando el mayor período de tiempo y espacio, en función de los datos de caudales disponibles. Con el fin de predecir eventos plurianuales de sequías hidrológicas en el mediano y largo plazo se generaron, a través del análisis espectral y armónico de las series históricas de caudales observados, series sintéticas que reproducen las componentes periódicas plurianuales más significativas de las series observadas. Además, para lograr un avance en el conocimiento de los fenómenos climáticos que conducen a las sequías hidrológicas, se identificaron las variables macroclimáticas que tienen una mayor correlación con los caudales escurridos en las distintas cuencas. Esta tesis comprende el estudio de 14 cuencas hidrográficas argentinas, pertenecientes a los ríos Colorado, Mendoza, San Juan, Atuel, Ctalamochita, Anizacate, Xanaes, Suquía, Dulce, Juramento, Salado, Paraná, Bermejo y Pilcomayo. Los resultados a los que se abordaron en esta tesis son de relevancia para la gestión de los recursos hídricos ya que usos tales como el abastecimiento humano, el riego y la producción energética, entre otros, pueden ser seriamente afectados por la ocurrencia de manera simultánea de sequías severas en cuencas que aportan a una región y zonas vecinas.

Abstract

An adequate planning and management requires an understanding of temporal and spatial distribution of water resources. A threat to the development and use of water resources, for which engineering must provide solutions, are situations of hydrological extremes such as floods or droughts, the latter being a hydrological phenomenon of high complexity, which still is little-known. In order to identify and characterize temporal and spatial hydrological drought in Argentina, this thesis presents in the first instance, the identification and characterization of drought from an hydrological perspective, covering the longest period of time and space, depending on the availability of discharge data. In order to predict multiannual events of hydrological drought in the medium and long term, synthetic series that reproduce the most significant multiannual periodic components of the observed series were generated, through spectral and harmonic analysis of observed discharges time series. In addition, to achieve an advance in the understanding of climate phenomena that leads to hydrological drought, macroclimatic variables that have a higher correlation with the flow drained in different basins were identified. This thesis includes the study of 14 river basins in Argentina, belonging to Colorado, Mendoza, San Juan, Atuel, Ctalamochita, Anizacate, Xanaes, Suquía, Dulce, Juramento, Salado, Paraná, Bermejo and Pilcomayo rivers. The results presented in this thesis are relevant to the management of water resources, since uses such as human water supply, irrigation and energy production, among others, may be seriously affected simultaneously by the occurrence severe drought in basins that contribute to a region and neighboring areas.

Resumo

Planejamento e gestão adequada requer uma compreensão da distribuição temporal e espacial dos recursos hídricos. Uma ameaça que afeta o desenvolvimento e utilização dos recursos hídricos, e para os quais engenharia deve fornecer soluções, são as situações de extremos hidrológicos, como inundações ou secas, sendo este último um fim fenômeno hidrológico de grande complexidade que ainda pouco se sabe. A fim de identificar e caracterizar a seca hidrológica temporal e espacial em Argentina, esta tese dirigida, em primeira instância, a identificação e caracterização de seca a partir do ponto de vista hidrológico, cobrindo o período mais longo de tempo e espaço, dependendo dos dados de vazão disponíveis. A fim de prever eventos plurianuais de seca hidrológica, a médio e longo prazo que foram geradas através de análise espectral e harmônica de séries temporais da vazão observados, séries sintéticas que reproduzem o mais significativo dos componentes periódicas de vários anos da série observada. Além disso, para alcançar um avanço na compreensão dos fenômenos climáticos que levam à seca hidrológica, variáveis macroclimáticas que têm maior correlação com o fluxo drenado em diferentes bacias foram identificadas. Esta tese inclui o estudo de 14 bacias hidrográficas na Argentina, pertencentes aos rios Colorado, Mendoza, San Juan, Atuel, Ctalamochita, Anizacate, Xanaes, Suquía, Dulce, Juramento, Salado, Paraná, Bermejo e Pilcomayo. Os resultados que foram abordados nesta tese são relevantes para a gestão dos recursos hídricos e que usa, como o abastecimento humano, irrigação e produção de energia, entre outros, podem ser seriamente afetada pela ocorrência de forma simultânea seca severa em bacias hidrográficas que contribuem para uma região e áreas vizinhas.

AGRADECIMIENTOS

“Bienaventurados los que dan sin recordar, y los que reciben sin olvidar”

(Beata Teresa de Calcuta)

Por empezar quiero dar gracias a Dios por permitirme llegar a esta instancia y regalarme a tantas personas maravillosas, que generosamente han contribuido a mi formación y a este trabajo.

A mis padres y abuelos por enseñarme el valor del esfuerzo y a mis hermanos por acompañarme.

A Horacio, que con tanto amor me ayudo y alentó siempre.

A mis directores y comisión asesora: Andrés, Oscar y Juan Carlos por su gran paciencia, guiarme e incentivar me en este camino.

A Marce García por su valioso aporte en el análisis espectral y armónico de las series, el tiempo dedicado y su amistad.

A cada uno de mis amigos y compañeros de trabajo – estudio. En especial: a Eli, Maty R., Antoine y Alejo, Guada y Mariana por el tiempo compartido, su escucha a diario y su valiosa amistad.

A cada uno de los integrantes del LH-CETA. Paolo, Leti, Mariana, Gera, Gonza, Mariano, Polo, Ricardo, Pipa, Anita, Maty E., Tomi, Nico, Cristian y Rosa.

A mis profesores y cada uno de los investigadores que transmiten su conocimiento con tanta pasión. En especial a L. Minetti y Patricia López por sus aportes a la tesis.

E. Castello y L. Toselli por su ayuda desde la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia.

A Laura Colladon desde el CIRSA que me brindó datos.

A la comisión evaluadora de este trabajo, Dr. M. García, Dr. Ravelo y Dr. Serra por sus observaciones y contribuciones.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por la beca otorgada en este período.

Y a cada una de las personas que me acompañaron con sus oraciones y buena onda siempre.

Sin duda concretar esta tesis sólo fue posible con la ayuda de personas como ustedes. Muchas gracias!

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ESTADO DEL ARTE.....	4
1.1.1. <i>Revisión de conceptos en sequías.....</i>	<i>4</i>
1.1.2. <i>Metodologías para el análisis de las sequías</i>	<i>5</i>
1.1.2.1. Índices de sequías	5
1.1.2.2. Métodos de análisis	8
1.1.3. <i>Resumen de estudios anteriores</i>	<i>8</i>
1.1.4. <i>Variabilidad de caudales y su relación con índices macroclimáticos.....</i>	<i>11</i>
1.2. OBJETIVOS.....	13
1.2.1. <i>Objetivo Principal</i>	<i>13</i>
1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i>	<i>13</i>
2. CUENCAS DE ESTUDIO Y FUENTE DE DATOS.....	14
2.1. CUENCA DEL RÍO CTALAMOCHITA	15
2.2. CUENCA DEL RÍO XANAES.....	18
2.3. CUENCA DEL RÍO ANIZACATE	19
2.4. CUENCA DEL RÍO SUQUÍA.....	21
2.5. CUENCA DEL RÍO DULCE	22
2.6. CUENCA DEL RÍO JURAMENTO.....	23
2.7. CUENCA DEL RÍO BERMEJO.....	24
2.8. CUENCA DEL RÍO PILCOMAYO	25
2.9. CUENCA DEL RÍO COLORADO	26
2.10. CUENCA DEL RÍO PARANÁ	27
2.11. CUENCA DEL RÍO MENDOZA	29
2.12. CUENCA DEL RÍO SAN JUAN.....	29
2.13. CUENCA DEL RÍO SALADO.....	30
2.14. CUENCA DEL RÍO ATUEL.....	31
2.15. FUENTES DE DATOS	33
3. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS HIDROLÓGICAS	40
3.1. METODOLOGÍA.....	40
3.1.1. <i>Análisis espacial y temporal de las sequías hidrológicas.....</i>	<i>42</i>
3.1.2. <i>Definición de oferta y demanda</i>	<i>43</i>
3.1.3. <i>Procesamiento de la información.....</i>	<i>43</i>
3.1.3.1. Análisis de Homogeneidad y Consistencia	44

3.1.3.2.	Pruebas de Homogeneidad	45
3.1.3.3.	Prueba de Estacionalidad (Kendall)	49
3.1.3.4.	Prueba de Datos Atípicos	50
3.1.3.5.	Análisis complementarios de las series temporales.....	51
3.2.	ANÁLISIS DE DATOS	53
3.3.	RESULTADOS PARA LAS CUENCAS EN ESTUDIO	56
3.3.1.	<i>Río Ctalamochita</i>	57
3.3.2.	<i>Río Xanaes</i>	59
3.3.3.	<i>Río Anizacate</i>	61
3.3.4.	<i>Río Suquía</i>	63
3.3.5.	<i>Río Dulce</i>	65
3.3.6.	<i>Río Juramento</i>	66
3.3.7.	<i>Río Bermejo</i>	68
3.3.8.	<i>Río Pilcomayo</i>	70
3.3.9.	<i>Río Paraná</i>	71
3.3.10.	<i>Río Colorado</i>	73
3.3.11.	<i>Río Atuel</i>	75
3.3.12.	<i>Río San Juan</i>	76
3.3.13.	<i>Río Mendoza</i>	78
3.3.14.	<i>Río Salado</i>	79
3.4.	ANÁLISIS DE LAS SEQUÍAS EN LAS CUENCAS ESTUDIADAS	82
3.4.1.	<i>Análisis de parámetros críticos en las sequías históricas</i>	82
3.4.2.	<i>Análisis de simultaneidad de extremos hídricos</i>	84
3.4.3.	<i>Análisis Espacial y Temporal de las Sequías</i>	87
3.5.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	89
4.	IDENTIFICACIÓN DE PERIODICIDADES PLURIANUALES EN CAUDALES PARA PREDICCIÓN DE SEQUÍAS A LARGO PLAZO.	92
4.1.	DETERMINACIÓN DE FRECUENCIAS DOMINANTES CON ANÁLISIS ESPECTRAL	92
4.1.1.	<i>Análisis de frecuencias dominantes en caudales</i>	94
4.1.1.1.	Análisis del aporte de los distintos procesos en las series de caudales.....	110
4.1.1.2.	Análisis de Varianza	110
4.2.	GENERACIÓN DE SERIES SINTÉTICAS PARA PREDICCIÓN DE SEQUÍAS	112
4.2.1.	<i>Análisis armónico (Fourier)</i>	112
4.2.2.	<i>Resultados</i>	113
4.3.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	121
5.	RELACIONES ENTRE SEQUÍAS HIDROLÓGICAS Y VARIABLES MACROCLIMÁTICAS.	122

5.1.	INDICADORES MACROCLIMÁTICOS Y ASTRONÓMICOS ANALIZADOS	122
5.2.	ANÁLISIS DE FRECUENCIAS DOMINANTES EN INDICADORES MACROCLIMÁTICOS	125
5.2.1.1.	Espectros de energía de las fluctuaciones obtenidos.....	125
5.3.	ANÁLISIS DE CORRELACIONES ENTRE INDICADORES Y SERIES DE CAUDALES.....	133
5.3.1.	<i>Río Dulce</i>	134
5.3.2.	<i>Río Suquía</i>	137
5.3.3.	<i>Río Paraná</i>	140
5.3.4.	<i>Río Atuel</i>	143
5.3.5.	<i>Río San Juan</i>	145
5.3.6.	<i>Discusión de Resultados</i>	147
6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	149
	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	151
7.	REFERENCIAS	153
8.	ANEXO	158

1. INTRODUCCIÓN

Una adecuada planificación del uso y manejo del recurso hídrico requiere principalmente, la toma de conciencia de que “el agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente” (Dublin, 1992).

En las etapas de planificación y gestión de los recursos hídricos se debe tener en cuenta la incertidumbre asociada a la demanda y oferta de los mismos disponibles en una región. En este aspecto es clave conocer y predecir el comportamiento de los recursos hídricos disponibles en el tiempo y espacio para la toma de decisiones e identificación de la fragilidad de los sistemas de una misma región.

Las situaciones de extremos hidrológicos, con periodos de excesos (inundaciones) o con escasez de agua (sequías) representan una amenaza, para la cual la ingeniería debe dar soluciones.

Las sequías tienen la problemática de que son fenómenos de relativa complejidad que afectan de manera importante el desarrollo y aprovechamiento de los recursos hídricos en una región (Fernández Larrañaga, 1997). Por ello, se debe avanzar en el conocimiento de sus características a escala espacial y temporal, como así también de los fenómenos macroclimáticos que intervienen en su generación. Estos aspectos son esenciales para la predicción a mediano y largo plazo de las sequías, elaborar planes de mitigación y aumentar la resiliencia de la región, de manera tal de establecer una adecuada gestión integral de los recursos hídricos.

El análisis temporal permite conocer las características (intensidad y magnitud) de las sequías que ocurrieron en el pasado, y tomar las medidas necesarias para el manejo adecuado de los recursos hídricos (demanda) en el futuro. Por su parte, el análisis espacial permite conocer las áreas más afectadas y establecer la fragilidad de los sistemas que abastecen a una misma región. Los indicadores macroclimáticos, son valores conformados a partir de datos de presión, temperaturas oceánicas, etc. y pueden ser usados para describir el estado y los cambios en el sistema climático. Encontrar correlaciones entre estos indicadores y las sequías, contribuiría a avanzar en el conocimiento de la formación de las sequías y a predecir su ocurrencia.

En esta tesis se presenta una identificación y caracterización de sequías desde una concepción hidrológica, como así también la identificación de las variables macroclimáticas que mayor correlación tienen con las sequías, a fin de avanzar en el conocimiento de los fenómenos físicos que las generan.

Las cuencas seleccionadas para el estudio son las correspondientes a los siguientes ríos: Ctlamochita, Xanaes, Suquía, Dulce y Juramento (analizadas a través de los aportes a los

Embalses: Río Tercero, Los Molinos, San Roque, Río Hondo y Cabra Corral, respectivamente); Colorado, Paraná, Anizacate, Bermejo, Pilcomayo, Salado, San Juan, Atuel y Mendoza.

Las series de caudales de cada una de las cuencas se caracterizaron a través de las frecuencias dominantes que intervienen en su composición temporal, con el fin de generar series de caudales futuros que reproduzcan las periodicidades más significativas, de manera de predecir sequías plurianuales en el mediano y largo plazo.

El conocimiento de las frecuencias de tiempo dominantes en las series de caudales permite establecer la escala de procesos que intervienen en los ciclos hidrológicos y así avanzar en la generación de modelos conceptuales que expliquen estos procesos. Asimismo, es posible realizar pronósticos que ayuden a identificar los años de déficit hídricos y así planificar y gestionar eficientemente los recursos hídricos.

Además, con el fin de avanzar en el conocimiento de las variables ambientales y fenómenos climáticos que conducen a las sequías, se identificaron las variables macroclimáticas que tienen una mayor correlación con los caudales escurridos en las distintas cuencas. Los indicadores macroclimáticos pueden tener vinculación con las sequías en las distintas escalas de tiempo, y constituir una herramienta en el pronóstico del fenómeno climático.

Los indicadores seleccionados son: ONI (Oceanic Niño Index); AMM (Atlantic Meridional Mode); TSA (Tropical Southern Atlantic Index); AMO (Atlantic multidecadal Oscillation); SOI (Southern Oscillation Index); PDO (Pacific Multidecadal Oscillation); Manchas solares; Niño 1+2; Niño 3.4 y TNA (Tropical Northern Atlantic).

El documento de la tesis se organizó de la siguiente manera:

En el CAPITULO 1 se presenta el estado del arte en la temática estudiada, considerando estudios de sequías, sus metodologías e indicadores. Se citan los trabajos de investigación más recientes de Argentina y otros países. En una segunda etapa se presenta el estado del arte de los estudios que existen a nivel indicadores macroclimáticos y las metodologías analizadas.

En el CAPITULO 2 se presentan y describen las cuencas que han sido objeto de estudio y los datos utilizados.

En el CAPITULO 3 se desarrolla la metodología para la identificación y caracterización de las sequías, los tratamientos estadísticos realizados sobre las series de datos, y los resultados logrados.

En el CAPITULO 4 se presenta la metodología del análisis espectral aplicado sobre las series de caudales y los análisis realizados. Además, se presenta la generación de series sintéticas de caudales llevada a cabo a través del análisis de Fourier para predecir eventos de sequías

plurianuales en el mediano y largo plazo, manteniendo como hipótesis que las periodicidades plurianuales más significativas serán válidas en el futuro.

En el CAPITULO 5 se analizan las correlaciones entre los indicadores macroclimáticos y los caudales para distintos anchos de bandas.

Finalmente, en el CAPITULO 6 se presentan la discusión de los resultados, conclusiones y posibles trabajos futuros.

1.1. Estado del arte

En este apartado se expondrá en primer lugar una descripción de los estudios previos relacionados a la temática de la “sequía” a nivel mundial, regional y local. La finalidad es presentar un resumen del conocimiento sobre la problemática, las metodologías disponibles para identificar sequías y los estudios en la región que justifican la línea de estudio y el aporte que se pretende realizar con las investigaciones realizadas en el marco de esta tesis.

En segundo lugar, se analizan los estudios realizados en el tema de variabilidad de caudales y su relación con indicadores macroclimáticos.

1.1.1. Revisión de conceptos en sequías

Existen numerosas definiciones de sequías, entre ellas se pueden citar:

- Las sequías son reconocidas como un desastre ambiental, que se origina por la reducción en la cantidad de precipitación recibida durante un período de tiempo prolongado, y que repercute primero en la vegetación y agricultura, por la reducción en la humedad del suelo, luego en la disminución en los caudales naturales en ríos, disminución de los almacenamientos en lagos y embalses, descenso de los niveles en acuíferos, etc. Esto con el tiempo afecta los suministros de agua potable, industrial, sistemas de producción energéticos, etc. (Mishra y Singh, 2010).
- La Organización Meteorológica Internacional, en su Vocabulario Internacional, (OMM, 1992) define a la sequía como:
 - Ausencia prolongada o deficiencia marcada de la precipitación.
 - Periodo anormal de tiempo seco, suficientemente prolongado, en el que la falta de precipitación causa un grave desequilibrio hidrológico.
- La UNESCO en el Glosario Internacional de Hidrología la define a la sequía como “Ausencia prolongada o escasez acusada de precipitación” (UNESCO, 1992).

Existen muchas definiciones de sequías, y todas tienen en común que el indicador de sequía es específico para cada lugar. Por ejemplo, en un clima húmedo, se puede considerar sequía a un período de varios días consecutivos sin producirse precipitación, mientras que en un clima semiárido el período sin precipitaciones deberá de ser de meses o años.

Este concepto es diferente a la aridez, que es una característica permanente del clima y se limita a las zonas de baja precipitación (Wilhite, 1992). Además, la sequía puede estar asociada a un determinado uso o función del agua. Esto es, definiciones que están orientadas hacia el efecto o la manifestación de la sequía (González Pérez, 2005). Es así que podemos encontrar

distintas clasificaciones, entre ellas la de la Sociedad Meteorológica Americana (AMS, 2004) que incluye cuatro categorías:

- Sequía meteorológica: se define como una falta de precipitación en una región durante un período de tiempo.
- Sequía agrícola: se define como una falta de humedad en el suelo que impide el normal desarrollo de un determinado cultivo. En muchos casos valorada de acuerdo con los daños que provoca sobre las producciones agrícolas.
- Sequía hidrológica que gira en torno a los efectos de la sequía de agua superficial y subterráneas (Panu y Sharma, 2002). Linsley et. al (1975) consideran a la sequía hidrológica como "período durante el cual los caudales son insuficientes para abastecer los usos establecidos en virtud de un sistema de gestión del agua dado".
- Sequía Socio-económica: déficit en los recursos hídricos hasta el punto de producir daños económicos a la población. Para que se genere este tipo de sequía basta con que algún sector económico se vea afectado por la escasez de agua.

Además se puede definir una quinta categoría, que es la sequía hidráulica, la cual se genera cuando la disponibilidad de agua almacenada no permite garantizar los aportes considerados en el balance hidrológico anual de las fuentes superficiales y subterráneas de todo un territorio y/o sistema hidráulico. (Silveira Coffigny, 2010)

1.1.2. Metodologías para el análisis de las sequías

Para la identificación y análisis de las sequías es importante definir primero el tipo de sequía que se quiere analizar, ya que esto definirá la variable a utilizar, ya sean caudales, precipitaciones, humedad del suelo, etc.

Entre las metodologías disponibles para la identificación de las sequías se tienen índices y métodos que utilizan análisis de series de tiempo de distintas variables (precipitaciones, caudales, niveles de agua subterránea, humedad del suelo) en distintas escalas de tiempo.

1.1.2.1. Índices de sequías

Los índices pueden ser función de una o más variables, y éstas a su vez pueden ser hidroclimáticas (precipitación, temperatura, caudales, humedad del suelo, etc.) u obtenidas por teledetección.

Entre los índices de variables hidroclimáticas encontramos de dos tipos: meteorológicos e hidrológicos.

Meteorológicos: se resumen en la Tabla 1.1 los principales índices de sequías meteorológicas.

Tabla 1.1. Resumen de los principales índices de sequías meteorológicas. Fuente: (Tsakiris, et al., 2007)

Índice	Descripción y Uso	Fortaleza	Debilidad
Deciles Gibbs y Maher (1967)	Agrupar las precipitaciones en deciles. Fue usado por el sistema de vigilancia de sequías en Australia	Medida estadística precisa. Simple de calcular. Proporciona uniformidad en la clasificación de sequías	La precisión de los cálculos requiere un registro de datos climáticos extenso.
Índice de Precipitación Estándar (SPI) McKee et al (1993)	Sobre la base de la probabilidad de precipitación para varias escalas de tiempo.	Usado para diferentes escalas de tiempo. proporciona alerta temprana de la sequía y ayudar a evaluar la gravedad de la sequía	La precipitación es el único parámetro usado
Índice de severidad de sequía de Palmer. (PDSI) Palmer (1965) Alley (1984)	Algoritmo de humedad del suelo calibrado por regiones relativamente homogéneas. Utilizado en EE.UU. para activar programas de alivio de la sequía y planes de contingencia	Efectivo para sequías meteorológicas, e incluye la humedad del suelo	El PDSI puede retrasar la identificación de la aparición de sequías. Es poco adecuado para zonas montañosas de extremos climáticos frecuentes. Las categorías no son necesariamente consistentes espacial o temporalmente, en términos de probabilidad de ocurrencia.
Índice de humedad de cultivo (CMI) Palmer (1968)	Es una derivación del PDSI. Estima la cantidad de humedad en el corto plazo	Identifica sequías agrícolas sólo durante el ciclo del cultivo.	No es adecuado para el monitoreo de sequias a largo plazo
Índice de reconocimiento de sequía (RDI) Tsakiris (2004)	Similar al SPI	Se calcula con datos de precipitación y evaporación potencial. Apropiado para escenarios de cambio climático.	

Hidrológicos: Los índices hidrológicos más reconocidos son el SWSI (Surface Water Supply Index), el PHDI (Palmer Hydrological Drought Index) y el SDI (Streamflow Drought Index). A continuación se describirán los mismos.

Índice de disponibilidad de agua superficial SWSI (Surface Water Supply Index)

Este índice fue desarrollado por Shafer y Dezman (1982). Se calcula a escala mensual y utiliza registros históricos disponibles de niveles de embalses, caudales, manto de nieve y precipitaciones. El propósito de SWSI es principalmente para supervisar las anomalías en las fuentes de suministro de agua de superficie. Por lo tanto, es una buena medida para

controlar el impacto de las sequías hidrológicas en los abastecimientos urbanos e industriales, riego y generación de energía hidroeléctrica. El cómputo del índice depende de la estación del año. Así durante el invierno el índice depende de la nieve acumulada, las aportaciones y el almacenamiento en lagos y embalses; mientras que en el resto del año la nieve acumulada se sustituye en el cómputo por las caudales. De forma similar al PDSI, el SWSI está centrado en el cero, y varía en el rango entre -4.2 a 4.2.

Es un índice ideal para zonas montañosas donde la nieve contribuye a la escorrentía anual. Y su limitante es que no permite la comparación entre diferentes cuencas o regiones ya que la ecuación difiere para cada zona.

Índice de severidad de sequía hidrológica de Palmer (PHDI)

Es una derivación simplificada del PDSI (Karl y Knight, 1985). Caracteriza la situación de sequía a partir de los flujos y almacenamiento en el modelo hidrológico conceptual, pero sin tener en cuenta la tendencia pasada. Este índice considera que un episodio de sequía ha finaliza cuando no hay déficit de humedad, mientras que el PDSI indica que finaliza la sequía cuando el gradiente de humedad se invierte, que no significa que ceso el déficit. Este retraso es apropiado para la evaluación de la sequía hidrológica, que es un fenómeno más lento de desarrollo que la sequía meteorológica (Tsakiris, et al., 2007).

Índice de sequía de caudales (SDI)

Ha sido propuesto por Nalbantis (2008). En el cálculo se utilizan volúmenes de aportes acumulados por períodos escalonados de tres, seis, nueve y doce meses dentro de cada año hidrológico. Estos volúmenes se comparan con el índice sequía de caudales (SDI) que se define, para cada período de referencia del año hidrológico, como el volumen de aporte normalizado. Es un índice fácil de calcular, pero requiere que la serie de caudales utilizada sea de buena calidad y extensa para estimar con precisión la frecuencia de los fenómenos de sequía (Nalbantis, 2008).

Índices derivados de información satelital

Entre ellos se encuentra el índice de diferencia normalizada de aguas (NDWI). Este índice detecta cambios tanto en el contenido de agua y el mesófilo esponjoso en el dosel de la vegetación. Se calcula a partir de la banda SWIR (*Short Wave Infrared*) de MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*). Se ha utilizado recientemente para detectar y vigilar la condición de humedad del dosel de la vegetación en áreas grandes (Mishra y Singh, 2010). El

NDWI está influenciado tanto por la desecación como por la marchitez de dosel vegetal, por lo cual es un indicador más sensible que el índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para el monitoreo de sequías.

1.1.2.2. Métodos de análisis

Los métodos de análisis de series además de ser una herramienta disponible para detectar sequías son de gran utilidad para la caracterización de las propiedades de las mismas. Entre ellos encontramos:

- Métodos probabilísticos: Consiste en analizar las series de flujos o aportes mínimos en un determinado periodo de tiempo. El objetivo es relacionar la magnitud de los eventos de sequías con su frecuencia de ocurrencia y la duración mediante el uso de distribución de probabilidades. (Dalezios et. al, 2000)
- Métodos de regresión: Los análisis de regresión se han utilizado para relacionar las sequías con parámetros geomorfológicos, factores climáticos, de rendimiento de los cultivos, etc. Con el fin de predecir la duración y gravedad de las sequías. (Panu, y Sharma, 2002)
- Método de sucesiones: La teoría de las sucesiones es usada para definir a las sequías como una secuencia de intervalos consecutivos, donde un umbral de demanda supera a la oferta de recursos disponibles (Cancelliere y Salas, 2010, Fernández Larrañaga, 1997).
- Métodos de programas grupales: Las características de la sequía en términos de su duración se puede expresar como grupos. A su vez, dichos conjuntos de datos pueden ser analizados para desarrollar predicción de sequías y técnicas de previsión que utilizan los conceptos de reconocimiento, como redes neuronales (Shin y Salas, 2000). Es una metodología que se encuentra en etapas iniciales de desarrollo.
- Se puede citar el uso de la Paleoclimatología, que es el estudio de las características climáticas consideradas a lo largo de la historia de la tierra. Utiliza registros de las capas de hielo, anillos de árboles, sedimentos y rocas para determinar el estado histórico del sistema climático de la Tierra. Los datos paleoclimáticos ofrecen una forma de evaluar la severidad, duración y extensión de las sequías. (Mishra y Singh, 2010).

1.1.3. Resumen de estudios anteriores

En los últimos años se ha avanzado considerablemente en relación al estudio de las sequías a nivel mundial, y existen numerosos trabajos de investigación sobre sequías en distintas escalas de tiempo y en varias regiones. A continuación se exponen los trabajos antecedentes

encontrados sobre sequías que han servido de línea de base para el desarrollo de la presente tesis. En la Tabla 1.2 se citan los estudios que involucran a sequías a nivel mundial, y más específicamente en Argentina. De esta manera es posible ofrecer una apreciación de los avances hasta la actualidad en el conocimiento sobre la temática.

En la tabla se citan el tipo de sequía, escala de tiempo de análisis (A: anual; T: Trimestral; M: mensual y D: Diaria) lugar de aplicación y periodo de tiempo en que se analizó.

Se resalta que en Argentina desde el año 1999 se ha avanzado sobre el conocimiento de sequías a nivel meteorológico, pero sobre sequías hidrológicas no se identificaron trabajos hasta la fecha.

A nivel mundial se encontraron estudios de aplicación con distintas metodologías. Sin embargo, se han presentado solo las hidrológicas. Se resalta que en varios estudios se utilizó la técnica de análisis de sucesiones, ya que demuestra ser una herramienta flexible para un amplio rango de caudales (Fleig, et al., 2005).

Tabla 1.2. Estado del Arte sobre Sequías en Argentina y sequías Hidrológicas a nivel mundial.

Autor	Año	Título	Lugar	Tipo de Sequía	Escala de Tiempo	Periodo	Metodología
Florentino Ameghino	1884	Las sequías y las Inundaciones en la Prov. Bs. As	Argentina				
Clausen y Pearson	1995	"Regional frequency analysis of annual maximum streamflow drought." Análisis de frecuencia regional de sequías máximas anuales de caudales.	Nueva Zelanda	Hidrológicas	A		Análisis sucesiones
Fernández Larrañaga	1997	Caracterización de sequías hidrológicas en Chile Central	Chile	Hidrológicas	A-M	1950-1994	Análisis sucesiones
Ravelo y Pascale	1997	Identificación de la Ocurrencia de Sequías mediante imágenes del satélite NOAA e información terrestre	Argentina	Meteorológica	M	1982-83 y 1988-89	NDVI y PDI
Tallaksen et. al	1997	On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume Sobre la definición y modelación del déficit y duración de una sequía	Dinamarca	Hidrológicas	D	1926-1993	Análisis sucesiones
Ravelo et. al	1999	Evaluación de sequías extremas en Región Pampeana de Argentina	Argentina	Meteorológica	M	1930-1999	PDI
Fernández et. al	2000	Sequías meteorológicas anuales en el cono sur de América	Arg-Chile-Uru-Par-Bra	Meteorológica	A	1930-1990	Análisis sucesiones
Fernández et. al	2002	Influencia de ENOS en el régimen de precipitación en el cono sur América	Arg-Chile-Uru-Par-Bra	Meteorológica	M	1930-1988	SPI
Salas et. al	2005	"Characterizing the severity and risk of drought in the Poudre River, Colorado" Caracterización del riesgo y severidad de las sequías en el río Poudre, Colorado	USA	Hidrológicas	A	1880-2002	Análisis sucesiones
Fleig et. al	2005	"A global evaluation of streamflow drought characteristics" Evaluación Global de las características de sequías de caudales.	A nivel Mundial	Hidrológicas	D		
Coronel et. al	2006	Climatología de Eventos Secos y Húmedos en el Sur Santafeño	Argentina	Agrícolas	T	1972-2002	SPI
Vicario	2008	Sequías Hidro-Meteorológicas en cuenca del Dique San Roque	Argentina	Meteorológica	M	1943-1999	SPI
Catalini et. al	2008	Análisis Estadístico descriptivo sobre series hidrológicas Históricas del Embalse San Roque	Argentina	Hidrológicas	M	1947-2009	Análisis Estadístico
Minetti et. al	2010	Sequías regionales en América del Sur	Argentina-Chile	Meteorológica	A-M	1901-2001	Déficit de precipitaciones
Ravelo et. al	2011	Monitoreo y evaluación de sequías en Argentina	Argentina	Agrícolas	M	1970-1999	SPI-NDVI
Vicario	2013	Identificación y Evaluación de zonas hidrometeorológicamente homogéneas en la región central de la Argentina.	Argentina	Meteorológica	M	1980-2009	SPI

1.1.4. Variabilidad de caudales y su relación con índices macroclimáticos.

Actualmente existe un importante debate sobre la variabilidad climática y el cambio climático en el cual se encuentran involucradas diversas áreas del conocimiento (Climatología, Geología, Astronomía, Hidrología, entre otras). Se estudian el comportamiento de distintas variables climática como lo son las series de caudales (por ser un indicador climático ya que en ausencia de fuerzas antropogénicas su variabilidad es principalmente asociada a cambios en la precipitación y la temperatura sobre las cuencas. (Compagnucci et al., 2014; Mauas et al., 2008) e indicadores macroclimáticos.

Desde el punto de la Hidrología aplicada a la Ingeniería Civil, es fundamental avanzar en el conocimiento de las variables relacionadas con las sequías, para obtener de esta manera una herramienta que permita su pronóstico y así poder realizar una gestión eficiente de los recursos hídricos. A tal efecto, se realizó una recopilación de los distintos estudios que existen a nivel nacional e internacional sobre las relaciones entre caudales e indicadores macroclimáticos. En la Tabla 1.3 se citan los mismos.

Tabla 1.3. Estudios entre caudales e indicadores macroclimáticos

Autor	Año	Metodología utilizada	Cuencas	Indicadores	Resultados obtenidos
Maus, P.; Buccino, A.; Flamenco E	2008	Realizó un filtrado de series de caudales e indicadores, conservando frecuencias menores a 1/50 años, y las contrastó entre sí. Luego aplicó una media móvil de 11 años y normalizó las series. Finalmente, la serie original, restado este último valor, la correlacionó con el indicador Niño 1+2.	Paraná	Manchas solares; Reconstrucción de la irradiación; Niño 1+2	El caudal del río Paraná tiene 3 componentes temporales: 1) Escala secular vinculado a cambios climáticos globales. 2) Correlación entre escala multidecadal con la actividad solar ($r = 0,78$) 3) Correlación entre escala interanual con Niño 1+2. ($r = 0,65$).
Maus, P.; Buccino, A.; Flamenco E	2011	Realizó un filtrado de series de caudales e indicadores para varios períodos, para luego contrastarlos entre sí. Luego, aplicó una media móvil de 11 años y normalizó las series. Finalmente, la serie original, restado este último valor, la correlacionó con el indicador Niño 1+2.	Atuel; San Juan y Colorado	Manchas solares Enso	Correlación multidecadal positiva, debido a que alta actividad solar se corresponde con gran precipitación no sólo en el Paraná, sino también con ríos Andinos. Correlaciones: Colorado ($r:0,59$); San Juan ($r:0,67$); Atuel ($r:0,69$).
Compagnucci, R.; Berman, A.; Herrera, V.; Silvestri, G.	2014	Método Wavelet: Es utilizada esta metodología para describir las relaciones en el dominio tiempo-frecuencia.	Atuel y Paraná	Número de Manchas Solares (SSN)	La conexión entre el indicador SSN y el caudal del río Paraná es estadísticamente débil con periodo de 11 años aproximadamente. Se encontró una periodicidad de 30 años altamente significativa. Dos mecanismos físicos potenciales que afectan el desempeño Paraná podrían estar relacionados con: la irradiancia de la energía solar en la Zona Tropical Inter Convergencia (ZCIT), y la otra es la influencia solar sobre el Pacífico. Variabilidad a largo plazo. La conexión SSN-ATU es más robusta y convincente con ciclos de 11 años. Altos caudales (o bajos) ocurren después de máximos (o mínimos) de los ciclos de 11 años del sol con desfases de hasta aproximadamente 2 años. Estudios anteriores han demostrado una estrecha relación entre ríos Andinos y El Niño, así como una influencia solar sobre la variabilidad ENOS.
Dölling, O.	2014	A lo largo de una serie histórica de manchas solares e índice ONI, elige períodos de 6 años que hayan tenido comportamientos similares, vinculando esos períodos elegidos con las series de caudales de los ríos en estudio. Estas correlaciones le permite al autor establecer tendencias a futuro.	Neuquen, Limay, Paraná, Collon Cura, Pilcomayo, San Juna, Mendoza, Uruguay	Manchas solares ONI	Una vez encontrados estos candidatos establece si el año 2015 será rico o pobre en cuanto a caudales medios anuales.
Correa N. y Guevara Pérez E.	1992	Análisis de periodicidades plurianuales en caudales. Se sintetiza la serie de caudales. Mediante análisis mediante análisis espectral de autocovarianza se investigan las frecuencias de las componentes periódicas de las serie. Las amplitudes y angulos de fase de las periodicidades se calculan por análisis de Fourier. Finalmente se seleccionan las frecuencias estadísticamente significativas por análisis de varianza.	Río San Juan		Se encontraron periodos significativos de 12.3; 7.4; 5.7; y 3.8 años
Stager, Ruzmaikin, Conway, Verburg, Mason	2007	Se estudia la relación entre los niveles del lago Victoria y las manchas solares.	Niveles Lago Victoria	Manchas Solares	Se observa que luego de picos de máxima en las manchas solares, se registran máximos en los niveles del lago debido a la ocurrencia de precipitaciones máximas
Özger, Mishra, Singh	2009	Utilizan la transformada de wavellet, correlación cruzada y Kriging. Se analizan las oscilaciones dominantes de las sequías y los indicadores macro-climáticos.	Sequías meteorológicas en Texas.	ENSO-PDO	Se encuentra una alta correlación entre los indicadores y la ocurrencia de las sequías interanuales e interdecadales.
Vargas, M. Minetti, L. Poblete, A	2002	Analizó correlogramas de series de caudales en el río Paraná, precipitación de mes de diciembre en Tucumán y aire húmedo advectado a través de subtrópicos en Argentina.	Región NEA y NOA		Encontró fluctuaciones cuasiperiódicas de baja frecuencias de 22- 26 años en las series hidro meteorológicas analizadas

ONI = (Oceanic Niño Index)

ENSO = El Niño-Oscilación Sur

PDO = Oscilación Decadal del Pacífico

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Principal

El objetivo principal de esta Tesis es identificar y caracterizar sequías hidrológicas en zonas áridas y semiáridas de Argentina y su relación con indicadores macroclimáticos, para contribuir a una mejor gestión integrada de los recursos hídricos superficiales.

1.2.2. Objetivos Específicos

A partir del objetivo principal, surgen los siguientes objetivos particulares:

- Construir y actualizar una base de datos con información hidrológica y meteorológica de las cuencas seleccionadas a estudiar.
- Identificar e implementar una metodología de análisis de sequías hidrológicas.
- Identificar y caracterizar sequías hidrológicas en las cuencas seleccionadas.
- Identificar periodicidades plurianuales en las series de caudales para predicción de sequías a largo plazo.
- Identificar y analizar los vínculos entre sequías hidrológicas y variables macroclimáticas.

2. CUENCAS DE ESTUDIO Y FUENTE DE DATOS

Uno de los objetivos de esta tesis es determinar la extensión espacial de las sequías. Por tal, se analizaron en primera instancia cuencas de la provincia de Córdoba y luego se extendió a las principales cuencas ubicadas al norte, este, oeste y sur de esta región, que contaran con series caudales lo suficientemente largas.

Las series de aportes analizadas corresponden a cuencas de la región Centro, Norte y Cuyo y norte de la República Argentina que se indican en la Figura 2.1. Las cuencas analizadas presentan características diferentes en cuanto a su localización, módulo, área de aporte hasta la estación de medición, y volumen de aporte anual. Estas se resumen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Resumen de las características hidrológicas y geográficas de las cuencas analizadas.

Cuenca del Río	Estación			Altitud [msnm]	Área de Aporte [Km ²]	Módulo [m ³ /s]	Período
	Denominación de la estación de aforo	Latitud Sur	Longitud Oeste				
Colorado	Buta Ranquil	37°04'34"	69°44'48"	850	15300	148	1940-2013
Mendoza	Guido	32°54'55"	69°14'16"	1408	8180	45,6	1956-2013
San Juan	San Juan - Km 47,3	31°30'59"	68°56'25"	934	25660	65	1909-2013
Ctalamochita	Embalse	32°10'00"	64°23'00"	650	3300	27,1	1913-1984
Xanaes	Los Molinos	31°05'00"	64°30'00"	770	980	9,5	1936-2007
Anizacate	Santa Ana	31°40'00"	64°34'00"	900	465	4,83	1925-1980
Suquía	San Roque	31°22'00"	64°27'00"	650	1350	10	1926-2010
Dulce	La Escuela	27°30' 00"	64°51' 00"	265	19700	82,2	1925-2013
Salado	Ruta Provincial 70	31°29'28"	60°46'50"	17	29700	137	1954-2013
Juramento	Cabra Corral	25°16'19"	65°19'47"	945	32885	29,5	1934-2012
Bermejo	Pozo Sarmiento	23°13'00"	64°12'00"	296	25000	446	1952-2013
Pilcomayo	La Paz	22°22'41"	62°31'21"	230	96000	237	1941-2013
Paraná	Corrientes	27°28'30"	58°49'60"	52	1950000	17189	1906-2013
Atuel	La Angostura	35°05'57"	68° 52'26"	1302	3800	35,4	1905-2013

Cómo se observa en la tabla anterior son cuencas muy distintas una de otra. A continuación se describirán las principales características de las cuencas en cuanto a hidrografía, hidrometría, geología y principales obras hidráulicas que ayuden al entendimiento de la zona analizada y contribuyan a comprender las metodologías de cálculo adoptadas en los siguientes capítulos.

En la Figura 2.1 se indica con un punto la localización de las estaciones de aforo seleccionadas, definidas como puntos de cierre de cada cuenca.

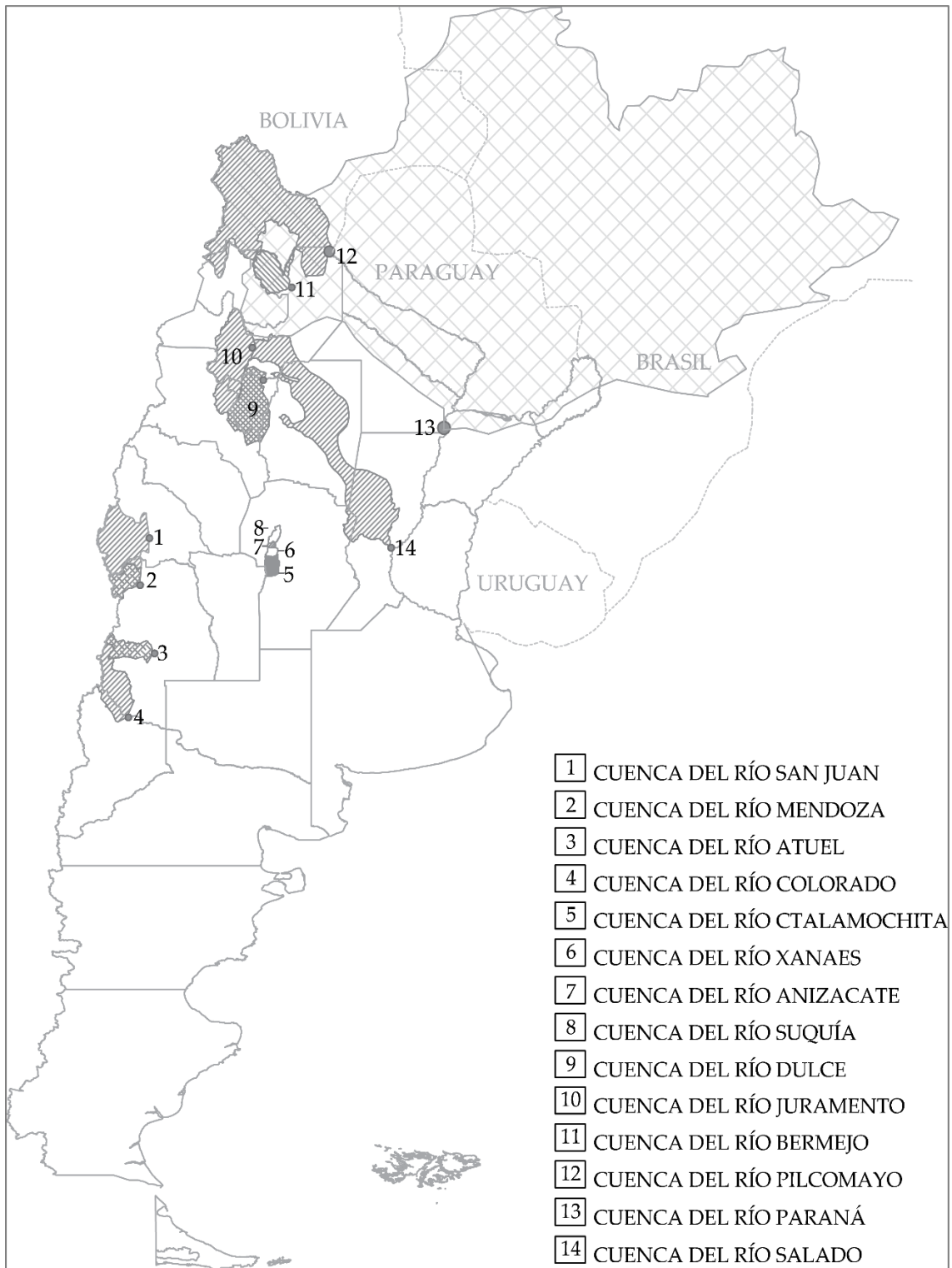


Figura 2.1. Ubicación de las cuencas analizadas en este estudio.

2.1. Cuenca del río Ctalamochita

La cuenca del río Ctalamochita (Figura 2.2), forma parte de la cuenca del río Carcarañá, que a su vez pertenece a la cuenca del Plata, por lo tanto es una cuenca exorreica. Comienza en las

laderas orientales de las Sierras Grandes, en la provincia de Córdoba, y tiene una superficie aproximada de 3.300 Km². Su módulo es de 27 m³/seg. (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2011), el cual representa casi tres veces los módulos de los ríos Suquía o Xanaes, siendo estos dos últimos utilizados para abastecimiento de agua en la ciudad de Córdoba.

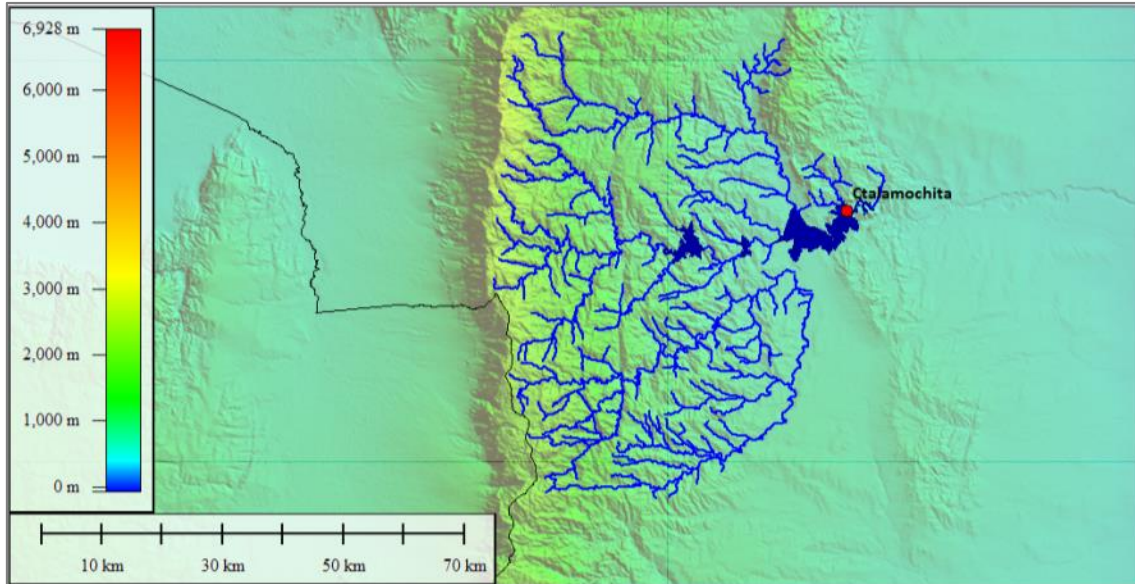


Figura 2.2. Cuenca del río Ctalamochita.

La cuenca se encuentra limitada al oeste por las altas cumbres de las Sierras Grandes en una extensión de 75 km desde el Cerro Champaquí hasta el cerro de Los Cocos, y al este por la Sierra de los Cóndores y La Cumbrecita, formada por cerros deprimidos hacia el norte.

En general, los cursos de esta cuenca adoptan una disposición radial. Los principales cursos de la cuenca alta de norte a sur son los ríos Tabaquillo, San Miguel y Santa Rosa; arroyo Amboy; ríos El Durazno, Grande, de Las Letanías, Quillinzo, y río de La Cruz. Los de mayor recorrido son los ríos Santa Rosa, Grande y de la Cruz, cuya confluencia ocurre en el sitio hoy ocupado por el lago artificial del Embalse Río Tercero (Secretaría de Turismo de la provincia de Córdoba, 2000).

En la actualidad, el río Ctalamochita se encuentra regulado por una cadena de reservorios artificiales (Figura 2.3). Desde aguas arriba se encuentra primero el “Complejo de Río Grande” formado por el Embalse Cerro Pelado, Contraembalse Arroyo Corto; y luego el sistema formado por el Embalse N°1 Río Tercero, Embalse N°2 Ingeniero Cassaffousth, Embalse N°3 Benjamín Reolín y, finalmente, Embalse Compensador de Piedras Moras (Lenarduzzi, 2012).

La serie de caudales para realizar la caracterización corresponde a los medidos en la actual sección de cierre del Embalse N° 2, y se ha elegido por ser ésta la serie más extensa en datos.



Figura 2.3. Sistema Río Tercero (Ctalamochita). Fuente: Lenarduzzi, (2012). (Modificada)

Los embalses actualmente localizados aguas arriba del punto de medición son los siguientes:

- El embalse Río Tercero, inaugurado en el año 1936 y que tiene un área de 54,3 km². La central hidroeléctrica Fitz Simon, ubicada al pie de esta presa, fue puesta en marcha en el año 1943 y cuenta con turbinas tipo Francis de eje vertical (potencia de la turbina: 4.200 HP, velocidad: 375 RPM, caudal: 10 m³/seg), una potencia instalada de 10,5 MW, un salto bruto de 40 m y tres grupos de generadores.
- El complejo hidroeléctrico de Río Grande, construido entre los años 1974 y 1986. Está conformado por los embalses Arroyo Corto y Cerro Pelado. Arroyo Corto posee una altura 44 metros, 1600 metros de longitud y cota de coronamiento de 701 msnm. La superficie cubierta es de embalse es 357 Ha. y su capacidad de almacenamiento es 35 Hm³. Cerro Pelado es un sistema de 3 presas cuyas cotas de coronamiento son para los tres casos de 880 msnm. El espejo de agua abarca una superficie de 1240 Ha., con una capacidad de almacenamiento de 370 Hm³. Fue puesta en marcha en 1986/88.

Se resalta que la serie de estudio incluye datos hasta el año 1982, es decir que no posee influencia por este último complejo hidroeléctrico, pero sí por el embalse Río Tercero. Sin embargo, a nivel anual, el efecto de la operación del embalse es despreciable.

En la zona de influencia del río Ctalamochita, el clima es semi-seco con tendencia a semi-húmedo en las planicies. La temperatura media es muy regular y alcanza su valor máximo en enero (24,6 °C) y el mínimo en julio (9,6 °C). Hacia el Este, las temperaturas máximas, medias y mínimas, disminuyen en menos de 1 °C.

Los vientos predominantes son del sector norte, seguidos luego por los del sector sur. Pero hacia el este, se hacen predominantes los vientos del sector noreste y sudeste. La frecuencia

de caída de granizo es muy baja y puede registrarse en cualquier época del año. Las heladas son frecuentes entre los meses de abril y agosto.

Los meses más lluviosos son diciembre, enero y marzo, y los más secos son junio, julio y agosto. La precipitación anual acumulada en la cuenca oscila entre los 650 y 900mm, produciéndose el incremento de precipitaciones hacia la zona Este de la cuenca. (Lenarduzzi, 2012).

2.2. Cuenca del río Xanaes

La confluencia de los ríos Anizacate y de Los Molinos da inicio al río Xanaes, aproximadamente a cinco kilómetros al noroeste de la localidad de Despeñaderos. En este estudio se considera la cuenca del río Los Molinos denominándola Xanaes, ya que este tributario representa el mayor porcentaje de aporte de la cuenca. De manera separada, se analiza la cuenca del río Anizacate. A la cuenca del río Los Molinos aportan los ríos San Pedro, Espinillos, Del Medio y Los Reartes. El río San Pedro es el menos caudaloso de los cuatro tiene su nacimiento en el borde oriental de la Cumbre de Achala, al sur de la Cuesta del Ángel. Entre los numerosos arroyos y torrentes que contribuyen a su formación, pueden mencionarse el Ángel del Sur, el Tabaquillos y el Pantanillo. También capta afluentes por el norte, como el arroyo del Sauce y el de Santa María y por el sur solo el del Doradilla. Y antes de verter sus aguas al Embalse Los Molinos recibe aguas del arroyo Potrerillo.

El río Los Espinillos reúne las aguas de los ríos Corralejo y Yatán. El primero avana la Cumbre de Achala en el área de la Pampa del Agua Turbia, colecta el arroyo de la Cuesta del Moro. El río Yatán recibe el aporte del río Paso de Garay y confluye con el Corralejo.

El río Del Medio tiene cabecera en la Cumbre de Achala, comprendido entre el Alto Grande y el Alto del Chicharrón. Los afluentes del río Del Medio son numerosos, sobre todo los que provienen de la margen septentrional, como el arroyo del Peñón Liso y el Riachuelo. En general son de escasa importancia y disminuyen en cantidad y caudal de oeste a este. Por el sur los de mayor significación son el arroyo Áspero y el Orco Molle. (Subsecretaría de Recursos Hídricos, 2010).

El río de Los Reartes es el más caudaloso de los integrantes de la cuenca de Los Molinos. Las aguas que bajan de las cimas de la Cumbre de Achala, entre los cerros de La Ventana y Negro, dan nacimiento a varios arroyos que contribuyen a la formación de dicho río. Recoge las aguas del arroyo la Puente, Los Chorros, Del Molle, del Burro Muerto, el Athos Pampa, el Pantanitos. Se incorpora por la margen izquierda el río Del Medio, en el lugar denominado La Juntura, cubierto hoy por el extremo sur del Embalse Los Molinos.

La cuenca del río Los Molinos (ver Figura 2.4) se desarrolla en un paisaje ríspido, con pendientes muy fuertes, que han permitido a sus afluentes un intenso trabajo erosivo, cortando los escalones orientales de la Pampa de Achala hasta alcanzar el fondo del valle. La estructura y la litología favorecen notablemente el carácter torrencial de los mismos (Moya, 2004).

La superficie de la cuenca activa del río Los Molinos comprende unos 980 Km², con un módulo de 9,8 m³/s en Estación “Los Molinos” (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2011). La precipitación media anual en la cuenca es de 750 mm (Subsecretaría de Recursos Hídricos, 2010). Las variaciones estacionales son muy semejantes a las del río Suquía, con período de crecidas entre octubre y marzo con el pico en el mes de enero), mientras que los estiajes abarcan el período junio/setiembre.

El subsistema Xanaes tiene por reservorio de agua al producido por el *Embalse los Molinos* generado por el cierre del dique homónimo

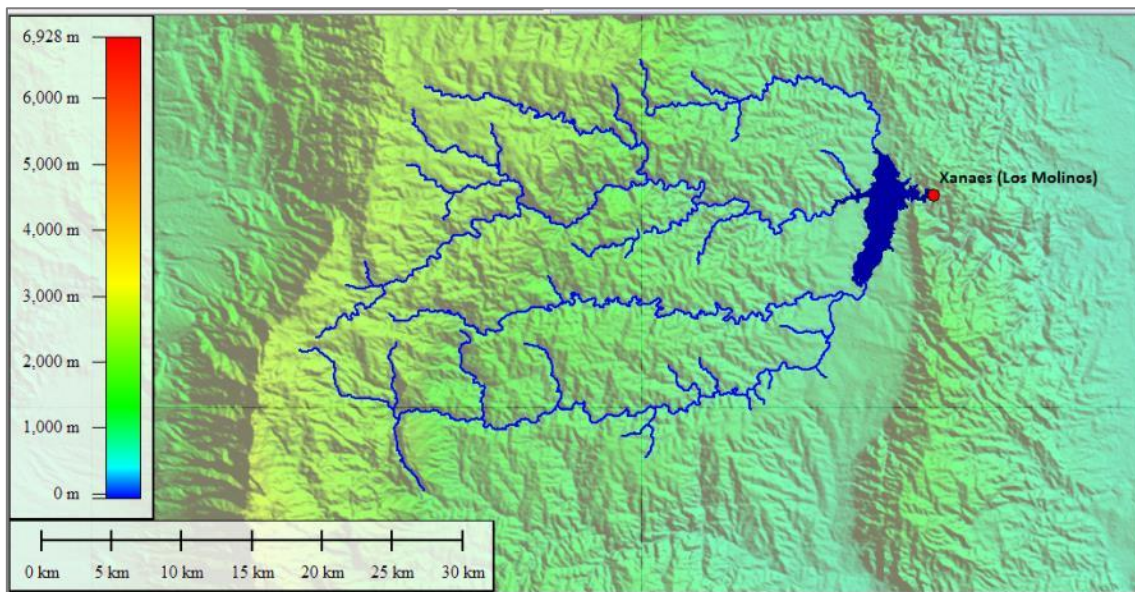


Figura 2.4. Cuenca del río Los Molinos.

2.3. Cuenca del río Anizacate

El río Anizacate resulta de la unión de los ríos de La Suela y el San José. Atraviesa la Sierra Chica en una garganta estrecha como río retrogradante. Sigue con rumbo general al sudeste. Entre los tributarios más conocidos se encuentra: el arroyo del Bonete (que ingresa por la margen izquierda a la altura del Cerro Simbolar), el arroyito Los Quebrachos (que ingresa por la derecha frente a la Isla La Bolsa) y siete kilómetros más adelante el arroyo de Alta Gracia (constituido por el de la Buena Esperanza y el de Los Paredones). Desde aquí sigue por el Valle

de Anizacate y antes de los quince kilómetros se une con el río Los Molinos (Moya, 2004). La cuenca activa del río Anizacate presenta características parecidas a la de los Molinos. La superficie de la cuenca en la Estación Santa Ana es de 465 km² con un módulo 4,7 m³/s. (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2011). Recibe una precipitación media de 832 mm (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2010). Las variaciones estacionales se caracterizan por aguas altas durante octubre - marzo, con valores por arriba del módulo. Presenta un pico en noviembre y luego un descenso en diciembre para lograr un máximo en enero (Moya, 2004).

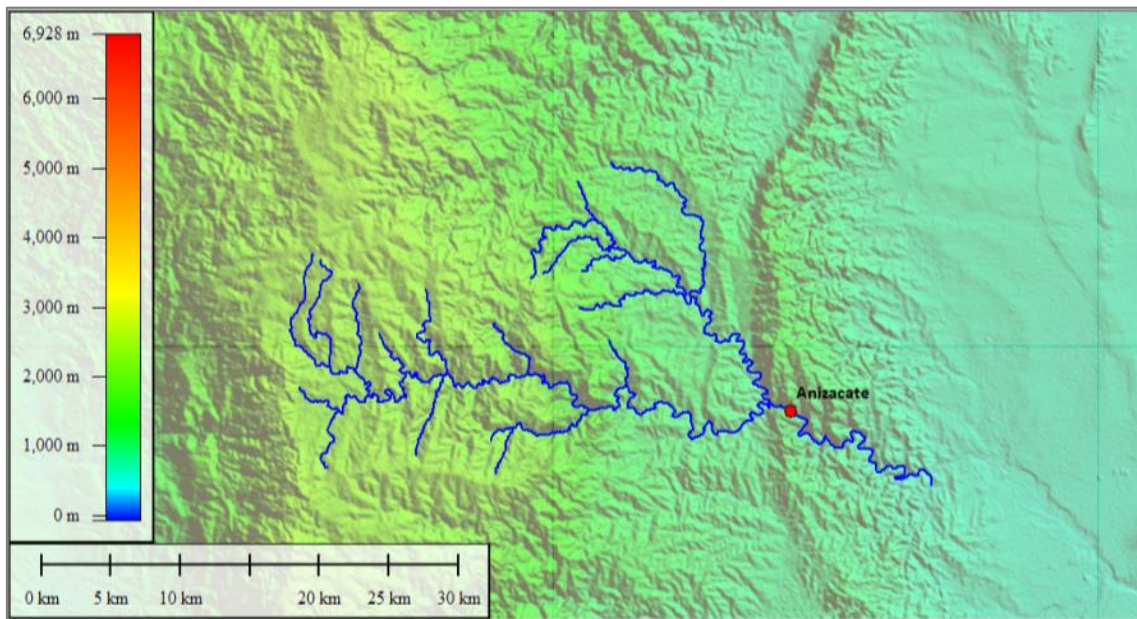


Figura 2.5. Cuenca del río Anizacate.

La cuenca del río Anizacate presenta por condición natural, una fuerte tendencia a la generación de crecientes repentinas en respuesta a las características topográficas y geológicas. La alta predominancia de rocas cristalinas poco permeables, conjuntamente con la fuerte energía del relieve, el moderado grado de protección hidrológica que ofrece la vegetación natural y la ocurrencia de tormentas intensas por efecto orográfico, constituyen factores concurrentes (Barbeito et. al, 2011).

2.4. Cuenca del río Suquía

El río Suquía posee una cuenca de aproximadamente 6.000 Km². En el punto de estudio, localizado en el embalse San Roque, el área de la cuenca es de 1350 Km² (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2011). Su cuenca activa está limitada al norte por el dorso de La Cumbre; al sur, por la cresta de la Sierrita o Cordón de Santiago, que la separa de la cuenca del río Anizacate; al oeste, por las divisorias de las aguas del río Pintos, de la Pampa de San Luis y de la Sierra Grande.

El río Suquía se originaba por la confluencia de los ríos Cosquín y San Antonio, a los que se les unía el arroyo Los Chorrillos y el arroyo Las Mojarras. En la actualidad, se confluyen en el lago San Roque, cuyas aguas cubren parte del valle donde se encontraba la estancia homónima.

En el lago San Roque es el punto donde se localiza la estación de aforo que se utilizó para el presente estudio. El motivo de la elección se debe a que es la única estación que cuenta con datos de aportes desde 1926 a la fecha y no se ve influenciada por la operación del embalse San Roque.

El río Cosquín (principal tributario) está formado por la unión de los ríos Grande y Yuspe. El primero nace de la unión de los arroyuelos que descienden hacia el sur de la dorsal de la Cumbre y los que bajan por la cuenca oriental de la Cumbre del Perchel y del Mogote de Flor. El río Yuspe extiende su cabecera por las pendientes septentrionales de Los Gigantes, a partir de la confluencia de los arroyos Las Vacas Muertas y La Esquina. Recibe un importante caudal proveniente del río Negro, se une con el río Carnerío (o Carnerillo).

El río San Antonio nace del encuentro de los ríos Icho Cruz y Malambo. El río Icho Cruz tiene sus orígenes en las vertientes orientales de la Pampa de Achala, en el sector comprendido entre La Ventana y Las Ensenadas. Recoge las aguas del río De Los Sauces, variando desde entonces su curso hacia el oriente, para posteriormente unirse al Malambo, quien transporta las caudales desde la pendiente oriental de Los Gigantes, sumando a estos los recogidos por algunos pequeños cursos, para luego por la unión del río Icho Cruz con el río El Cajón formar al río San Antonio. Desde allí recibe las aguas de los arroyos de Las Achiras, Cuesta Blanca (Moya, 2004).

La precipitación media anual en la cuenca del río Suquía es de unos 700 mm (Subsecretaría de Recursos Hídricos, 2010). Las variaciones estacionales están definidas por un período de crecidas entre los meses de octubre a marzo, y un valor pico de caudal en diciembre. Las aguas bajas (estiajes) corresponden al invierno. Las variaciones de caudal se adaptan fielmente a las variaciones de las precipitaciones en la cuenca: frecuencia veraniega y escasez invernal.

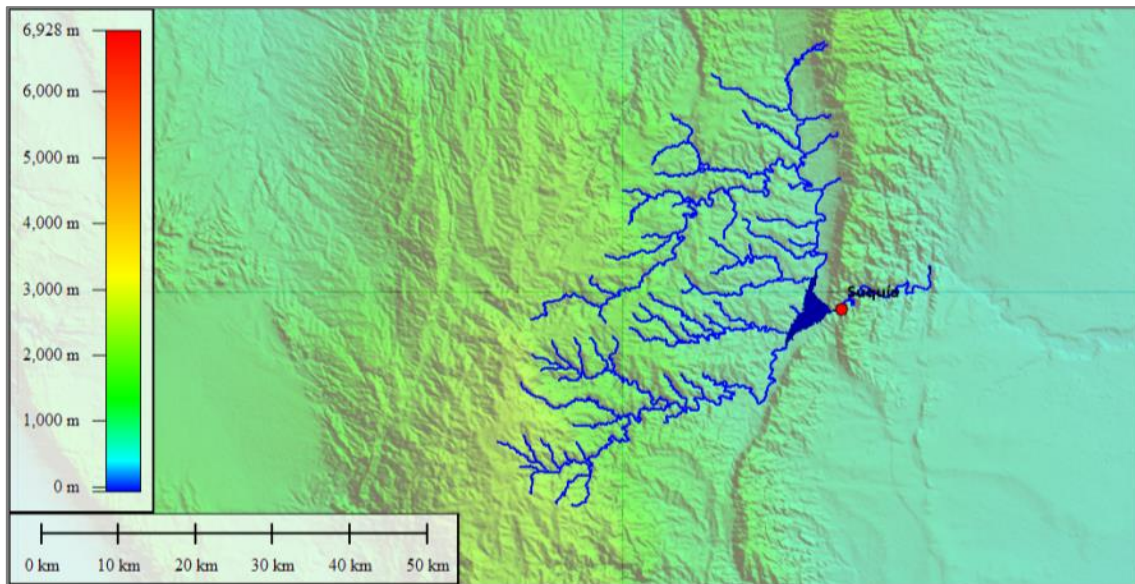


Figura 2.6. Cuenca del río Suquia.

2.5. Cuenca del río Dulce

La cuenca de aporte del río Dulce comprende dos regiones. La primera es la Región Superior con aproximadamente 50.000 km² y abarca las Provincias de Tucumán, Salta y Catamarca. Aquí, el río recibe el nombre Salí, y sus principales afluentes bajan por las sierras Calchaquíes y del Aconquija desembocando en el río Salí por la margen derecha. Luego, la Región Inferior comprende un área de casi 22.000 km², a partir de la entrada del río a la provincia de Santiago del Estero a través del Embalse Río Hondo. La subcuenca del río Salí hasta el Embalse Río Hondo está limitada: al Oeste (de Norte a Sur) por las Sierras de Carahuasi; cumbres Calchaquíes, cumbres del Aconquija (Muñoz, Ánimas, El Nevado y Las Lajas), Sierras de La Carreta, Humaya, Las Higueritas y del Potrerillo; al Norte: por la divisoria de aguas de los afluentes del río Tala y Lomas de San Esteban; al Este: por las cumbres de las Sierras de La Candelaria, del Nogalito y de la Ramada y los cauces de los arroyos Muerto, Mista y Los Gómez; al Sur: por las lomadas que limitan hacia Catamarca al río Huacra o San Francisco y el curso seco de este último hasta el río Graneros o Marapa, el cual, con el Medina, forman el río Hondo, cuya desembocadura en el Embalse río Hondo determina su cambio de nombre por el de río Dulce, con el que ingresa a la provincia de Santiago del Estero.

La subcuenca del río Salí (Región Superior) presenta una precipitación media anual de 800 mm, y su clima es considerado húmedo. Por su parte, la región inferior (desde río Hondo hacia el Sur) presenta una precipitación media anual de 550 mm (actualizada al año 2004 en base a 25 estaciones pluviométricas) y se define como clima semiárido. (Subsecretaría de Recursos

Hídricos de la Nación, 2010). La estación donde se registraron los datos correspondientes a la serie de caudales, pertenece a la cuenca alta del río Dulce, o sea del río Salí.

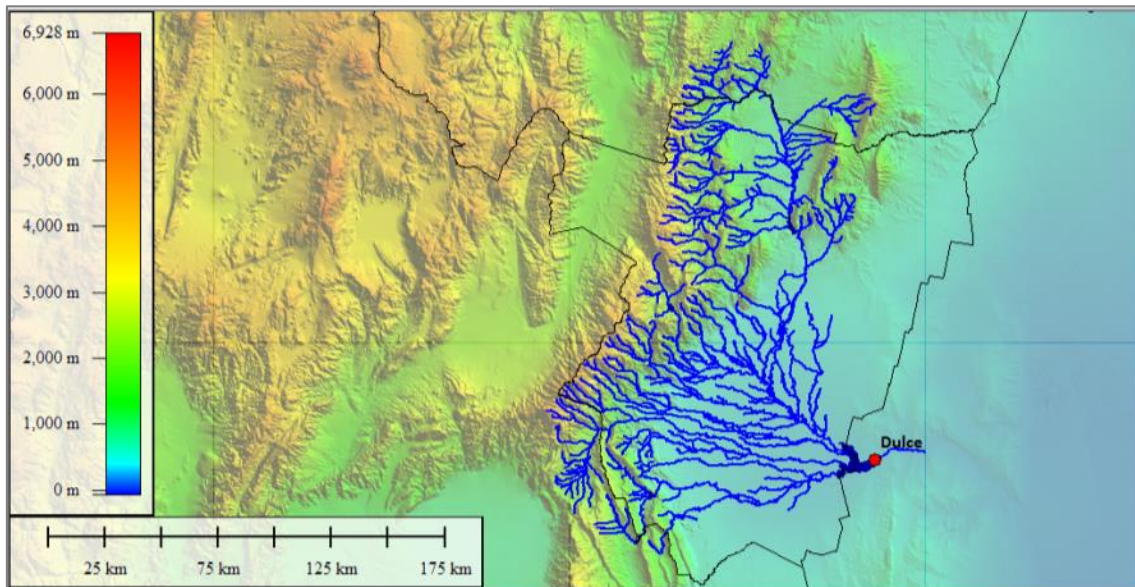


Figura 2.7. Cuenca superior del río Salí-Dulce. Fuente: Hillman (2002) (Modificada)

2.6. Cuenca del río Juramento

La cuenca del río Pasaje Juramento (Figura 2.8) tiene sus nacientes en las cumbres de los nevados de Cachi y Acay (4.895msnm) en la cordillera oriental. La cuenca alta y media se desarrolla en la provincia de Salta. Posteriormente, al ingresar en la provincia de Santiago del Estero, el curso principal cambia de nombre por el de río Salado, identificación que mantiene hasta su desembocadura, luego de recorrer una distancia de 1.500 Km, en el río Paraná a la altura de la localidad de Santo Tomé (Santa Fe).

Desde sus nacientes hasta el dique Cabra Corral, la cuenca abarca una superficie de 32.806 Km². Los sistemas hídricos de la cuenca del río Juramento se presentan en la Tabla 2.2.

El río Juramento está regulado a través del Dique Embalse General Belgrano (Cabra Corral), de propósito múltiple (generación de energía, provisión de agua para riego, agua potable y almacenamiento de crecidas temporarias). Se construyó entre 1966 -1972, posee una superficie del espejo de agua de 13.160 Ha y un volumen de la presa de 2.880 Hm³.

Tabla 2.2. Red Fluvial de la cuenca alta del río Juramento.

Fuente: (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2010)

SUBCUENCA	ÁREA [Km ²]	PERÍMETRO [Km]
Calchaquí Superior	4.391	448
Arias -Arenales	1.226	248
Chicoana	1.063	283

SUBCUENCA	ÁREA [Km ²]	PERÍMETRO [Km]
Luracatao	1.418	309
Blanco –Tacuil-Humanao	1.351	252
Calchaquí Medio	654	167
Santa María Oeste	4.098	544
Rosario -Toro	4.779	532
Guasamayo-Angastaco	2.833	357
Calchaquí Inferior	2.291	370
Las Conchas -Guachipas	3.147	421
Santa María Este	5.549	577

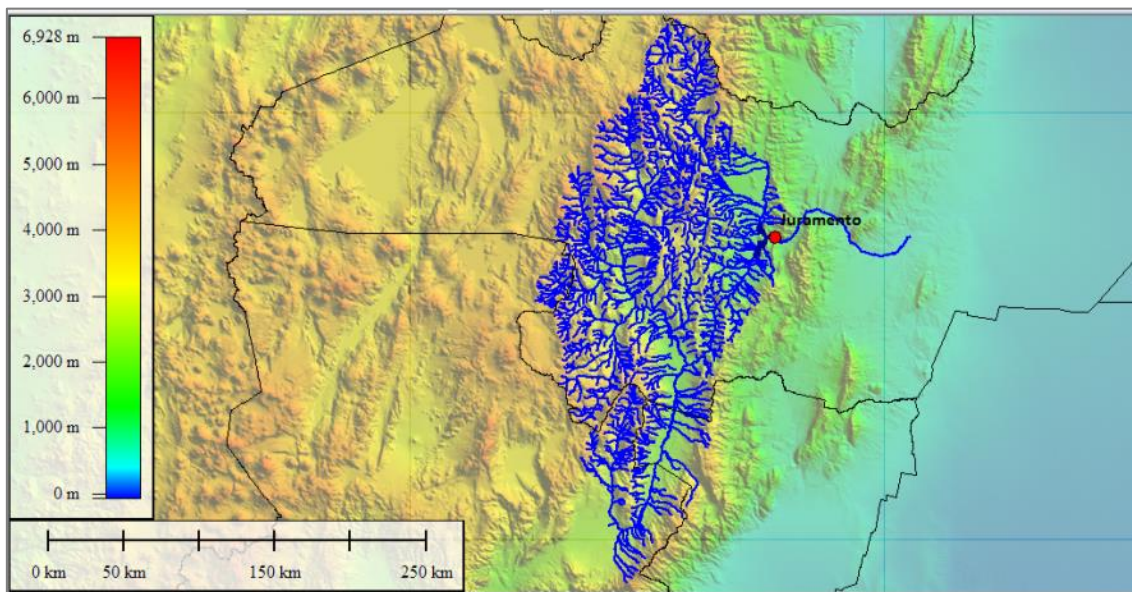


Figura 2.8. Cuenca del río Juramento. Fuente: (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2010) (Modificada)

2.7. Cuenca del río Bermejo

La cuenca del río Bermejo forma parte de la Cuenca Hidrográfica del Plata y es, junto con el río Pilcomayo, el principal afluente del río Paraguay (Ver Figura 2.8).

La cuenca alta del río Bermejo se halla situada en el extremo NO de Argentina y extremo SSE de Bolivia. Los límites físicos de la cuenca alta del río Bermejo están claramente definidos por las divisorias de agua, las cuales forman parte de la faja sub-andina. El río Bermejo abandona la cuenca alta, en la llamada Junta de San Francisco, donde confluyen los ríos Bermejo y Tarija para ingresar en la gran llanura chaqueña, que constituye su cuenca inferior. La cuenca alta del río Bermejo se encuentra en una zona de rápida transición climática. Ya que en una corta distancia de 159 Km las características varían desde clima subtropical húmedo a las del desértico. La causa de estos grandes contrastes climáticos se atribuye a la topografía de la cuenca (con diferencias de altura mayores de 5000 m en una distancia de sólo 70 Km), a la

orientación de las sierras y valles respecto de las corrientes predominantes de la atmósfera libre, y a la exposición de las faldas respecto del sol. Importantes efectos desde mayor distancia producen el altiplano o puna y, sobre todo, la Cordillera de los Andes.

El período lluvioso se extiende entre los meses de noviembre a marzo y en él se concentra el 85% del total de la precipitación anual. La precipitación media anual varía desde 200 mm en la parte oeste hasta 1400 mm en el centro de la cuenca, presentándose los meses de enero y febrero como los más representativos del período (1941-1971).

Las temperaturas medias en esta época del año oscilan entre 16 y 28°C, con máximas extremas entre 35 y 45°C, según las zonas. La estación seca coincide con el período otoñal - invernal, en el que los meses de junio, julio y agosto tienen muy escasa o casi nula precipitación. Las temperaturas medias en este período varían entre 8 y 15°C, con mínimas extremas, según la zona, entre 0 y -13°C.

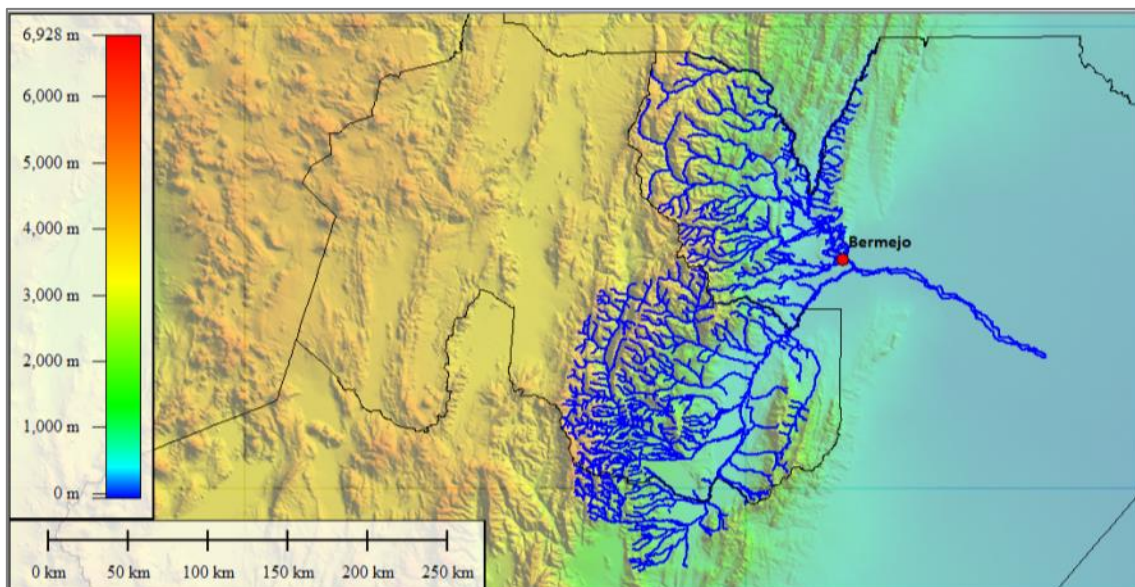


Figura 2.8. Cuenca Alta del río Bermejo.

El río Tarija tiene su origen en territorio boliviano. El río Bermejo se forma en la confluencia de los ríos Condado y Bermejo Chico, de cuya unión resulta el alto Bermejo al unirse con el río Grande de Tarija, constituyendo ambos la frontera internacional con Bolivia. La estacionalidad e intensidad de las precipitaciones (900 mm anuales) en la alta cuenca, que se concentran en verano, influyen sobre el grado de erosión (OEA, 1974).

2.8. Cuenca del río Pilcomayo

El Pilcomayo es un río de montaña que tiene sus nacientes en los Andes Bolivianos a más de 5000 msnm, pasa en dirección NO-SE por las sierras sub-andinas. En la ciudad de Villamontes, entra en la planicie del Chaco, en dirección sureste en sentido del flujo, extendiéndose unos 1.000 Km hasta el río Paraguay (de los cuales 835Km son frontera entre Argentina y Paraguay).

En este tramo se convierte en un río de llanura. A lo largo de los tiempos geológicos, el río fue depositando gran parte de los sedimentos que transporta sobre la planicie chaqueña, construyendo así un gran abanico fluvial. Dicho abanico tiene una extensión de 21000 Km² y se caracteriza por una gran variedad de cauces abandonados y con una típica forma triangular. Su ápice se encuentra en el flanco oriental de las sierras sub-andinas en Bolivia, aguas abajo de la ciudad de Villamontes y en su parte distal el abanico tiene un ancho de 700 Km.

La cuenca que se estudia en esta tesis, mostrada en la Figura 2.9, se localiza mayormente en territorio boliviano, con una superficie de 96000 Km². Hasta Villamontes el río presenta su parte más activa en cuanto a los aportes. Las pendientes son del 3% y de estructura estable.

Las características de las precipitaciones en la zona pueden resumirse como lluvias repartidas durante todo el año, con valores inferiores a 100 mm por mes entre junio y septiembre y mayores el resto del año. Los máximos se producen en general en marzo. Existe una concentración estival de las lluvias a medida que se avanza hacia el oeste, con disminución de los valores absolutos. En Villamontes la precipitación media anual es 849 mm, la temperatura varía según la altura; hay elevada frecuencia de heladas, pero con alta temperatura durante el día debido a la gran recepción de energía solar (Halcrow, 2007).

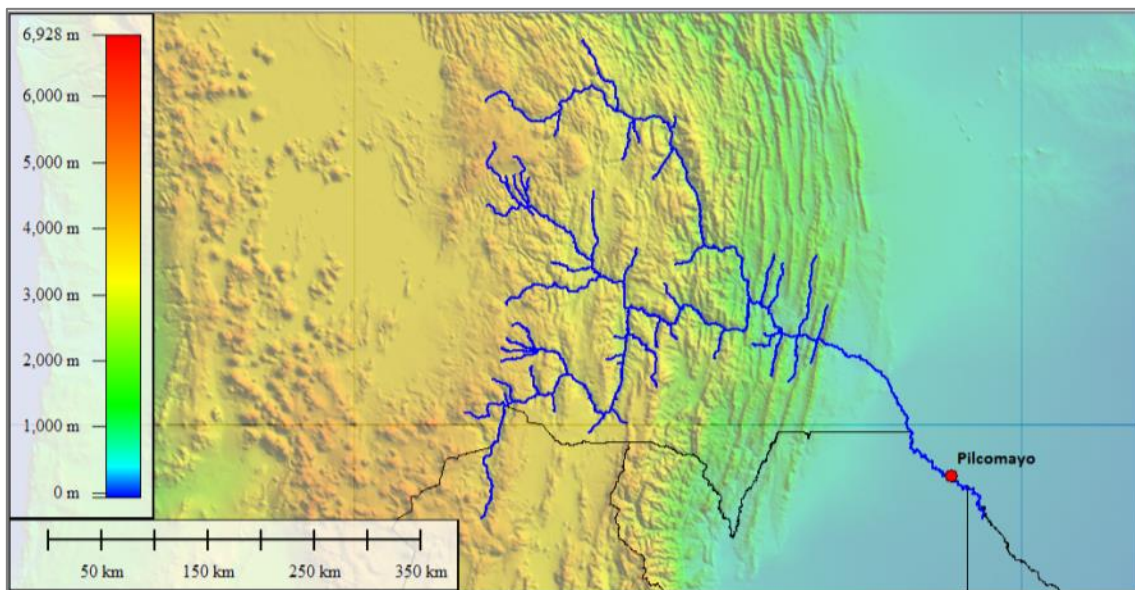


Figura 2.9. Cuenca del río Pilcomayo en la Estación La Paz.

2.9. Cuenca del río Colorado

Los principales tributarios del río Colorado son los ríos Grande y Barrancas. El río Grande aporta la cuarta quinta parte del caudal y es originado por la unión de los ríos Tordillo y Cobre. Nace en las lagunas La Fea y la Negra en las cercanías del cerro Tirquiritrón y avanza aguas abajo con el aporte de cauces y arroyos. Su orientación es norte-sudeste desde alturas de

aproximadamente 4.600 m en sus nacientes hasta 835 m en su confluencia con el río Barrancas.

El río Barrancas avanza con sentido sudeste en un trayecto lineal de 130 Km y tiene su origen en la laguna Negra (13 Km²) en la falda de la cordillera límite con Chile. Recibe de ésta los aportes de los arroyos Matancilla, Montón y Puente de Tierra arriba del cual se halla la Laguna Fea (12 Km²). Después de recibir numerosos arroyos ingresa en la laguna Carrilauquen que vierte al Colorado. La misma modera su régimen absorbiendo el producto de las precipitaciones y deshielos regulando el derrame.

La cuenca del río Colorado (ver Figura 2.10) comprende un área de 47.458 Km² (Subsecretaría de Recursos Hídricos, 2010) y está comprendida por 4 eco-regiones con relieve y régimen de precipitaciones muy variado, desde 100 a 600 mm medios anuales.

El río Grande tiene alimentación prácticamente nival exclusivamente, mientras que el Barrancas es una cuenca de transición entre las hoyas nivales al norte y pluvio-nivales del sur.

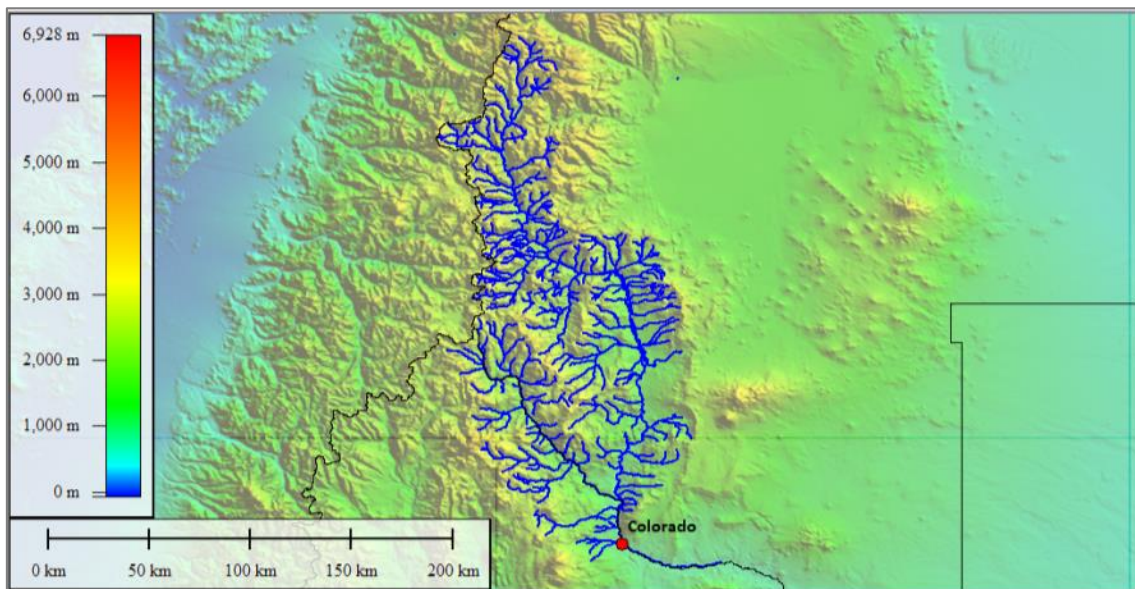


Figura 2.10. Cuenca del río Colorado.

2.10. Cuenca del río Paraná

La cuenca del río Paraná tiene un área de 1950000 Km² en la estación “Corrientes”, lugar donde se registraron los caudales de la serie analizada. Esta cuenca forma parte de la cuenca del Plata, una de los mayores del mundo, y se extiende en los territorios de Argentina, Brasil, Bolivia, Paraguay y Uruguay. Dentro del sistema del Plata cabe diferenciar tres grandes unidades hidrográficas la del Paraguay, Uruguay y Paraná. En la Figura 2.11 se muestra la cuenca completa del río Paraná.

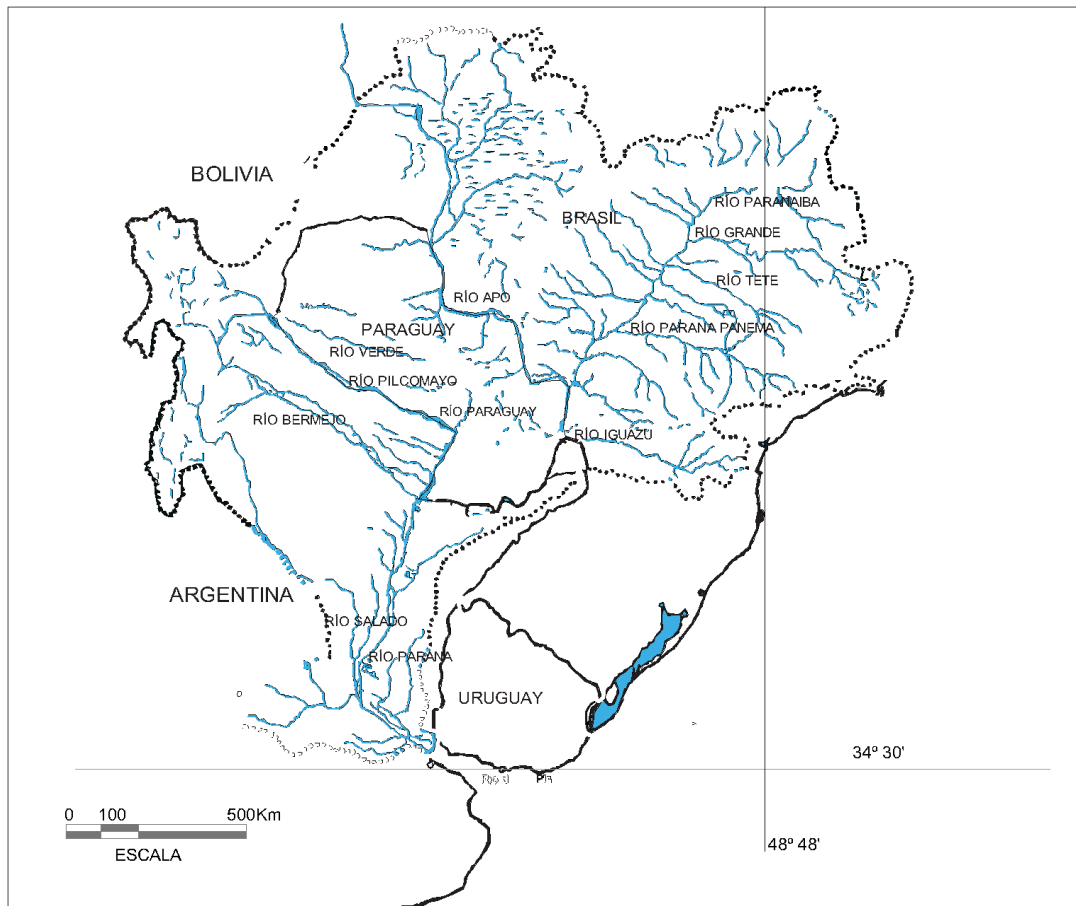


Figura 2.11. Cuenca del río Paraná. Fuente: Paoli et. al (2000). Modificado

El río Paraná, desde su origen en la confluencia con los ríos Paranaíba y Grande hasta su desembocadura en el río de la Plata, tiene una longitud de 2.570 Km, y si se le suma el Paranaíba (afluente principal) alcanza los 3.740 Km. El Paraná superior se encuentra en Brasil, lo caracteriza la presencia de altiplanos escalonados y su ancho es variable, es un río con un alto grado de regulación. Luego de unirse con el río Paraguay, el río desciende con leve pendiente hasta la desembocadura y disminuye su ancho. En el tramo medio e inferior, el cauce principal presenta numerosas islas, diseminadas a lo largo del curso. Como puede notarse, el río Paraná es un importante sistema, dentro del cual desembocan de manera indirecta, el río Ctalamochita, el Pilcomayo y Bermejo, también analizados en esta tesis.

Los patrones de precipitación en la cuenca del Plata son complejos debido a ubicación geográfica, extensión y topografía. Por esta razón los regímenes pluviométricos pueden ser analizados de una manera muy práctica si se los considera en un contexto regional, advirtiendo una escasez pluvial en invierno (junio-agosto), y lluvias intensas en verano, siendo más reducidas en el oeste y en las regiones situadas al norte del trópico de Capricornio hasta el Planalto de Brasil. Hacia el sur, la cuenca se caracteriza por abundantes precipitaciones. La precipitación media anual es de 1200 mm (1961-1990) (Paoli y Schreider, 2000).

2.11. Cuenca del río Mendoza

La cuenca del río Mendoza se ubica en el extremo noroeste de la provincia homónima y cubre una pequeña extensión del sur de la provincia de San Juan (Figura 2.12).

Esta cuenca drena 90 Km del frente de la cordillera de los Andes sobre un área aproximada a los 20.000 Km² para luego desembocar en las lagunas de Guanacache.

El frente cordillerano que drena el río Mendoza se compone de tres ríos: de las Vacas que nace al sur de la ladera oriental del Aconcagua; el río de las Cuevas que llega del oeste y el Tupungato, que llega desde el sur con aguas provenientes del cerro homónimo y de los cerros Nevados del Plomo y Juncal. En el río de las Vacas desembocan las aguas de las quebradas de Los Relinchos y Fiera mientras que el río de las Cuevas tiene como principales afluentes las aguas provenientes de la quebrada de Horcones y Santa María. Las aguas del río Tupungato, el más importante afluente del río Mendoza, confluyen primero con las aguas del río de las Cuevas para luego unirse a las del río de las Vacas y dar origen al río Mendoza.

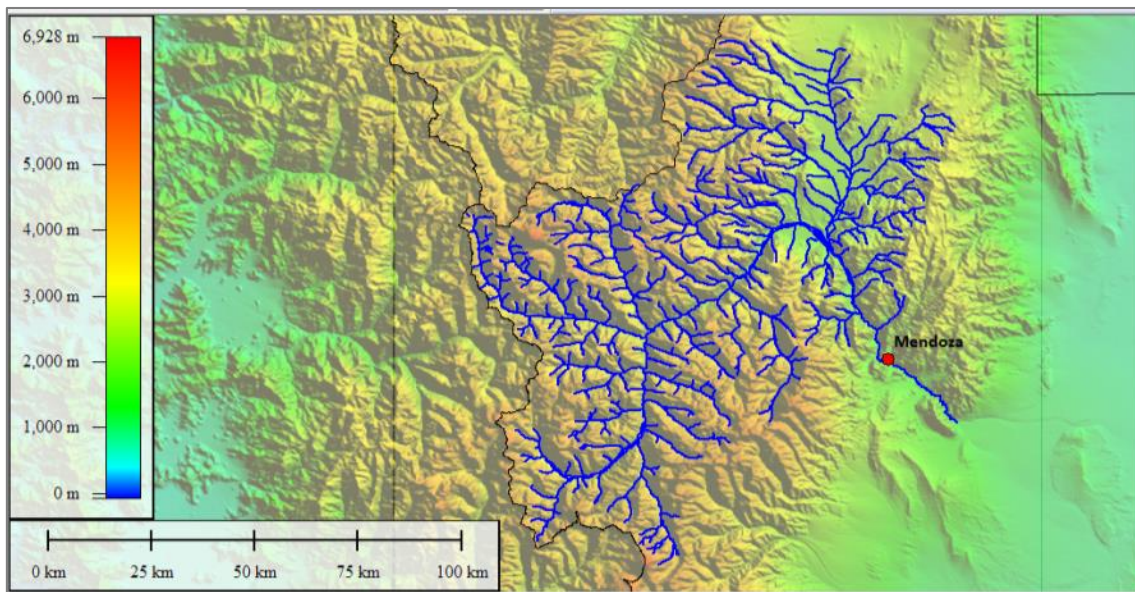


Figura 2.12. Cuenca del río Mendoza.

2.12. Cuenca del río San Juan

La cuenca del río San Juan se localiza en el sector centro-sudoccidental de la provincia de San Juan traspasando el límite interprovincial y abarcando un pequeño sector del norte de Mendoza. Con una superficie aproximada de 38.462 km², ocupa el alrededor del 45 por ciento de la superficie de la provincia de San Juan. El río San Juan es el mayor tributario del río Desaguadero, el que forma parte del Sistema Río Colorado. Escurre de oeste a este y nace en Las Juntas de la confluencia de los ríos Castaño por el norte y de Los Patos, por el sur; que a su vez son colectores de una importante red de afluentes que tiene sus cabeceras en las altas

cumbres cordilleranas. En su cuenca se identifican las eco-regiones de estepas alto-andinas y monte, y cardonales de la pre-puna (sub-región de los arbustales y bosques del monte), según la clasificación de Daniele y Natenzon (1994), revelando las condiciones de aridez dominantes. La primera corresponde a zonas de alta montaña con nieves permanentes de la cordillera andina, cuya altura sobre el nivel del mar varía según la latitud. El clima es frío con grandes amplitudes térmicas y heladas todo el año, excepto en enero y febrero. La precipitación media oscila entre los 100 y 200 mm, produciéndose en forma de nieve o granizo. La segunda, de mayor presencia en la cuenca, se desarrolla en bolsones, llanuras, laderas montañosas y pedemonte; en los territorios y valles comprendidos entre los cordones precordilleranos y las distintas secciones de las Sierras Pampeanas.

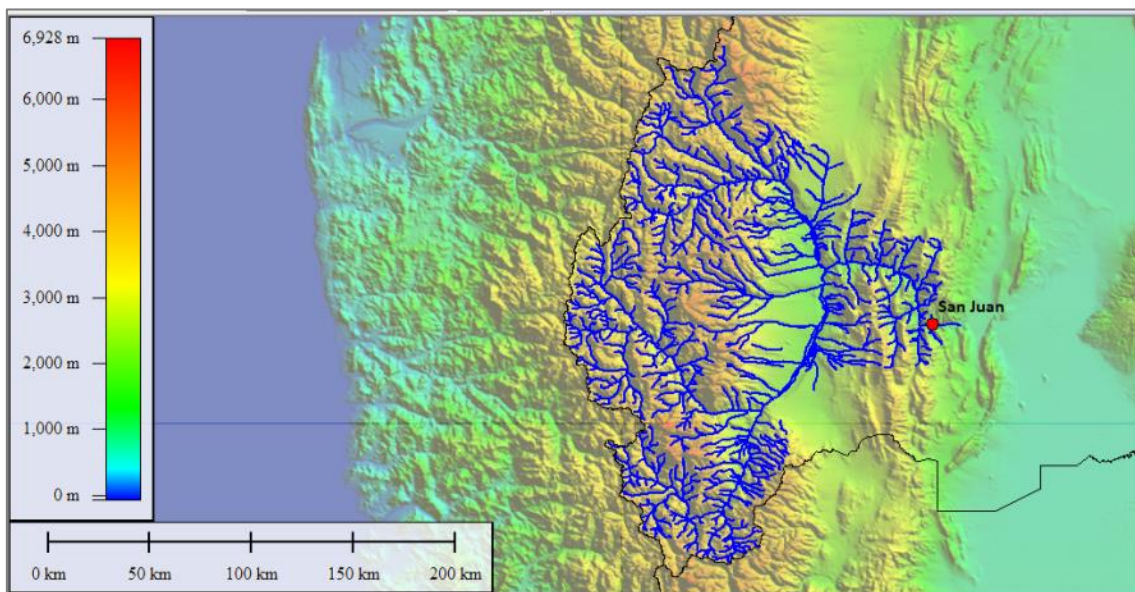


Figura 2.13. Cuenca del río San Juan.

El clima es seco y cálido. Las precipitaciones, fundamentalmente estivales, son torrenciales. El río San Juan es el más caudaloso de los integrantes de la cuenca del Desaguadero. Su régimen es nival de primavera-verano, y en los períodos de estiaje el curso queda reducido a diversos brazos que encierran pequeñas islas pedregosas que serán removidas en el período de crecida subsiguiente. En el ámbito precordillerano llegan al colector cauces secos que drenan las escasas lluvias estivales de carácter torrencial conformando torrentes.

2.13. Cuenca del río Salado

El río Salado pertenece al complejo hídrico de la Cuenca del Plata. Tiene una longitud de 2210 Km y la cuenca es de 124.199 Km².

Las fuentes del río Salado surgen en las estribaciones orientales de los Andes dentro de la provincia de Salta: su fuente principal se encuentra en la llamada sierra de los Pasos Grandes,

casi inmediatamente al sur del cerro nevado de Acay. En esa zona de encajonados valles se le llama río Calchaquí, allí discurre con dirección sur recibiendo sus principales afluentes (Luracatao, Tacuil, Angastaco o Guasamayo) desde la margen derecha. En las cercanías de la ciudad de Cafayate por el sur las aguas del río Santa María; a partir de la confluencia con este último tuerce abruptamente hacia el norte por la quebrada de las Conchas recibiendo en ésta el nombre de río Guachipas, al salir de la quebrada tuerce hacia el este y poco antes de salir de la región cordillerana, en su encuentro con el río Arias forma el lago-embalse Cabra Corral (cuya presa es llamada oficialmente General Belgrano).

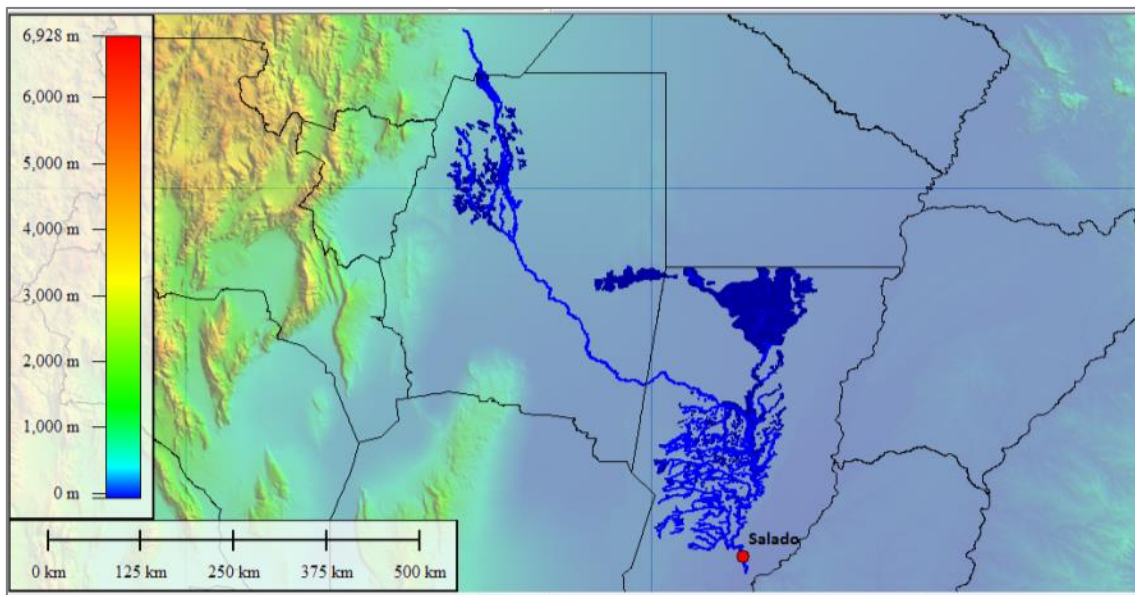


Figura 2.14. Cuenca del río Salado.

En la provincia de Santa Fe recibe desde el norte las aguas del río Calchaquí (río del Sur o Santafesino); luego ya en la región Pampeana de la provincia de Santa Fe toma una dirección SSE recibiendo por la derecha las aguas de los arroyos San Antonio y Cululú, y por la izquierda parte de las aguas de arroyo Saladillo frente a la importante ciudad de Santa Fe. Allí prácticamente desemboca en el río Paraná, aunque un canal natural (el río Coronda), es en parte su prolongación durante un tramo de unos 150 Km antes de su plena afluencia en el citado curso. Es un río de régimen pluvio-nival.

2.14. Cuenca del río Atuel

La cuenca del río Atuel se localiza en el sur de la provincia de Mendoza y comprende una porción del noroeste de La Pampa. La cuenca ocupa el sector más meridional de las que integran el sistema del Desaguadero y posee una superficie aproximada de 39404 km² (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2010).

El río Atuel es el quinto afluente del Desaguadero, es de régimen nival aunque recibe también aportes pluviales y tiene una longitud aproximada de 600 km. Su cuenca de alimentación se halla a más de 3.000 m de altura en las cercanías del volcán Overo y luego de atravesar una zona deprimida se interna en el ámbito del bloque de San Rafael donde ha labrado una estrecha garganta en la que forma los saltos que posibilitan la generación de energía hidroeléctrica (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2010).

El valle fluvial se halla muy encajonado entre abruptas barrancas que concentran la energía erosiva del agua acelerando la profundización del cauce, favorecida por la fuerte pendiente y el proceso de ascenso que rejuveneció la cuenca. Se ensancha luego su valle y recibe al arroyo Las Lágrimas que ha construido un potente abanico de acarreo. En este tramo el Atuel recibe numerosos afluentes por ambas márgenes pero el más caudaloso es el Saladillo cuyas cabeceras se hallan próximas a las del río Grande. Al este de El Sosneado se abre en dos brazos que encierran el paraje de La Isla, incorporándose el Salado a su brazo sur. Reconstituido el curso atraviesa una zona de bañados y esteros y varios arroyos, de ellos el Lechuzo desemboca en el embalse El Nihuil aguas abajo del cual el Atuel cruza el bloque de San Rafael labrando el Cajón del Atuel, en el que se ha emplazado el dique Valle Grande. Ya en el rincón del Atuel, sale a la planicie y luego de acercarse al Diamante con rumbo sureste fluye hacia La Pampa al encuentro del Salado abriéndose en varios brazos en la zona de los bañados del Atuel. El brazo norte está actualmente inactivo y el arroyo Butaló de cauce discontinuo a veces lleva agua hasta el arroyo de la Barda que puede considerarse su brazo activo (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2010).

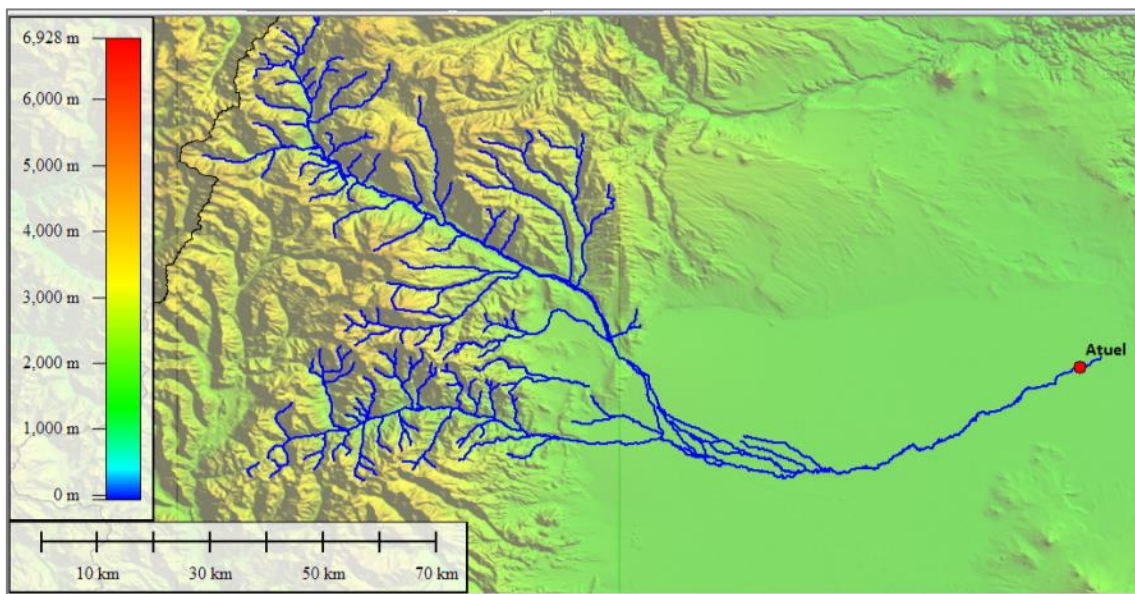


Figura 2.15. Cuenca del río Atuel.

2.15. Fuentes de datos

La obtención de datos apropiados para realizar el estudio de identificación y caracterización de sequías (en un período de tiempo que permitiera describir el comportamiento de los recursos hídricos disponibles) ha sido uno de los principales inconvenientes que se tuvo cuando se abordó esta tesis. La Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH) cuenta con una importante base de datos hidro-meteorológicos; sin embargo, en muchas regiones esta información se encuentra interrumpida por la escasez de registros de datos (meteorológicos, de aforos y/o de operación de reservorios) que contribuirían a la obtención de balances hídricos apropiados para contabilizar los volúmenes de aportes, de y en las cuencas. Por lo tanto, se realizó una exhaustiva búsqueda, recopilación y análisis de información de distintas fuentes para calcular los aportes medios anuales, y así efectuar el presente estudio de sequías. Se describirán a continuación las fuentes y los procedimientos aplicados para la obtención de las series de aportes utilizadas en esta tesis. Las series se pueden consultar a paso mensual en los anexos de Díaz, 2013. En el anexo de esta tesis se agregan las series a paso anual.

Cuenca del río Ctalamochita

Los datos de caudales corresponden a la estación Embalse ($32^{\circ}10'00''$ S – $64^{\circ}23'00''$ O). Los mismos fueron extraídos de la Red Hidrológica Nacional (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2011) y abarcan el periodo 1926-1982.

Cuenca del río Xanaes

La cuenca del río Xanaes cuenta con datos de aportes desde el año 1937 al 2008 en la estación Los Molinos ($31^{\circ}05'00''$ S - $64^{\circ}30'00''$ O). La serie fue reconstruida con información de las siguientes fuentes.

- Moya (2004) con una serie de caudales en el periodo 1936-1981.
- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH) con una serie de caudales que cubre el periodo 1952-1980.
- Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Córdoba (SRHPC), con una serie desde 1981 al año 2008 de alturas y caudales erogados para generación de energía, vertedero y válvulas.

Moya (2004) completó la serie hasta el año 1999 utilizando los datos de alturas y caudales erogados que brinda la SRHP. En esta tesis se extendió la serie de caudales hasta el año 2008 utilizando la misma metodología. Para el periodo 1981/2008 se contó con los registros de operación del embalse proporcionados por la SRHPC. Estos registros, dan información sobre

las cotas y erogaciones diarias por obra de toma. Para poder generar la serie de aportes al embalse se recurrió a la fórmula de balance de aportes y erogaciones, igual a:

$$Q_{A\Delta t} = \frac{\Delta V}{\Delta t} + Q_{E\Delta t} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

donde:

- $Q_{A\Delta t}$: Caudal Aportado al embalse en el periodo de tiempo Δt ;
- $Q_{E\Delta t}$: Caudal Erogado del embalse en el periodo de tiempo Δt ;
- ΔV : Variación de Volumen en el embalse en el periodo de tiempo Δt ;
- Δt : Periodo de Tiempo Adoptado (un día).

La variación de volumen ΔV se determina a partir de la diferencia entre los volúmenes inicial y final del embalse en el periodo de tiempo analizado, en este caso un día. Estos volúmenes se obtuvieron mediante el uso de la curva Altura-Volumen del embalse, con el dato de los niveles en el embalse. Los caudales erogados por las distintas obras de evacuación, Q_{EA} , se obtuvieron como la suma de los caudales erogados por obra de toma, vertedero y válvulas de fondo. Para las evacuaciones por obras de toma se poseen los registros de operación proporcionados por la SRHPC. En el caso de los caudales por vertedero se estimaron los caudales evacuados en función de los niveles del embalse mediante el uso de la curva Altura-Caudal. Por último para el caso de las erogaciones por válvulas, éstas se consideran iguales a cero, dado a no se cuenta con registros de las mismas. De esta manera, aplicando la (Ecuación 3.1, se obtuvieron los caudales aportados al Embalse Los Molinos para un periodo de tiempo de un día. Finalmente, realizando un promedio para el periodo analizado, se obtuvieron los caudales medios mensuales. Es necesario hacer notar que los caudales llevan implícita las distintas pérdidas por evaporación, infiltración, precipitación directa, tomas sobre los tributarios, entre los más importantes.

Cuenca del río Anizacate

La cuenca del río Anizacate cuenta con datos de aportes mensuales desde el año 1924 a 1981 en la estación Santa Ana (31°40'00" S - 64°34'00" O). La serie fue reconstruida con información de las siguientes fuentes:

- Agua y Energía del Estado (AyEE, 1986) desde 1924 a 1972
- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH) (2011) desde 1954 a 1981
- Precipitación total caída en las estaciones Bosque Alegre, San Clemente y Anizacate.

Se trabajó con fuentes de precipitación para corregir datos atípicos de caudales desde 1943 a 1951 con un modelo de redes neuronales artificiales.

La estructura del modelo consistió en elegir las variables de entrada y de salida pudiéndose decidir entre dos enfoques, según se trate de predecir un solo concepto MISO (Múltiples entradas y una unidad de Salida), o representar varios conceptos en forma simultánea con un solo modelo MIMO (Múltiples entradas y Múltiples unidades de salida). En base al análisis de la información disponible, se propuso resolver un modelo de red del tipo MISO con 12 variables de entrada y 1 variable de salida. En cuanto a las variables de entrada, se decidió utilizar las series de precipitaciones de las estaciones Anizacate, San Clemente y Bosque Alegre de 3 meses previos al mes de caudal que se deseó pronosticar. Es decir que se cuenta en definitiva con 12 variables de entradas que explican el fenómeno y una variable de salida, el caudal que se quiere pronosticar. En el período comprendido entre los años 1954 a 1972 (donde se genera superposición entre las fuentes de datos) se decidió utilizar la serie de la SSRH ya que es la serie más extensa. No obstante, las diferencias entre ambas fuentes son del orden de $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$, excepto en noviembre de 1969 donde se encuentra un error de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ (dato de AyEE igual a $2,68 \text{ m}^3/\text{s}$ y el de SSRH de $0,68 \text{ m}^3/\text{s}$). Se eligió el dato de AyEE como correcto ya que $0,68 \text{ m}^3/\text{s}$ responde ser un valor atípico y se aleja considerablemente de la media mensual registrada ($7,11 \text{ m}^3/\text{s}$ entre 1924-1968).

Cuenca del río Suquía

La cuenca del río Suquía cuenta con datos de aportes desde el año 1926 en la estación San Roque ($31^{\circ}22'00'' \text{ S} - 64^{\circ}27'00'' \text{ O}$) de las siguientes fuentes:

- Subsecretaría de Recursos hídricos de la Nación (SRHN) (2011) con una serie que cubre el periodo 1926-1980, con un intervalo sin información entre 1951 y 1961.
- Moya, (2004) con una serie de al embalse San Roque en el periodo 1926-1999.
- Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de Córdoba (SRHPC), con una serie desde 1990 al año 2011 de alturas y caudales diarios erogados para generación de energía y vertedero.

Para el periodo 1990/2011 se contó con los registros de operación del embalse proporcionados por la SRHPC. Estos registros dan información sobre las cotas y erogaciones diarias a través de la obra de toma. Para poder generar la serie de aportes al embalse se recurrió a la fórmula de balance de aportes y erogaciones (Ecuación 3.1).

Para la aplicación de la (Ecuación 3.1 los valores de volumen se obtuvieron de la curva Altura-Volumen, calibrada por el INA-CIRSA. (Moya, 2004). Los caudales erogados por el

vertedero se calcularon a partir de los niveles en el embalse, sabiendo que la cota de labio del vertedero es 164.30 msnm. Moya (2004) completó la serie de caudales desde 1980 a 1998 con datos de volúmenes mensuales aportados al embalse, brindados por la SRHPC. Para esta tesis se pudieron calcular los aportes a paso diario desde 1990 a 2010 aplicando la (Ecuación 3.1). Por lo tanto, se corrigió la serie de Moya (2004) y se completó hasta el año 2010.

Cuenca del río Dulce

Para reconstruir la serie de aportes al Embalse Río Hondo, se utilizó la serie correspondiente a la estación de aforo “La Escuela” (27°30'00" S - 64°51'00" O) desde 1927 a 1982 con caudales mensuales, obtenidos de la SSRH (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2011); de 1967 a 2006 se utilizaron datos de caudales diarios que ingresaron al embalse Río Hondo (UNC-UNSE, 2007), y para el período 2007-2010 se utilizaron los datos extraídos de (Gallego, 2012). Los datos disponibles de la estación de aforo “La Escuela” constituyen una serie de caudales medios mensuales que abarca el periodo desde septiembre de 1926 hasta agosto de 1982, pero a partir de 1967 ha sido reconstruida. Hillman (2002) realizó una comparación entre las series de la estación “La Escuela”, estación “El Sauce” y la estación de aforo del Dique Derivador Los Quiroga. El resultado de este análisis fue el siguiente:

- En el periodo que cubre desde septiembre de 1926 hasta agosto de 1959 los caudales medios mensuales incluidos en la serie son resultados de mediciones realizadas en la estación de aforo “La Escuela”.
- En el periodo que cubre desde agosto de 1959 hasta noviembre de 1967 los caudales medios mensuales registrados en la serie fueron obtenidos mediante correlaciones con la serie de “El Sauce”.
- En el periodo que cubre desde noviembre de 1967 hasta agosto de 1982, los valores obtenidos resultan de correlacionar los caudales medios mensuales erogados por Río Hondo y los aforados en el dique regulador Los Quiroga.

Es preciso aclarar que la estación de aforos “La Escuela”, estaba emplazada en las proximidades de la actual ubicación del embalse de Río Hondo, lo cual es correcto asumir que la serie de datos medidos finalizó en el año 1959, coincidiendo esta fecha con los comienzos en la construcción del mencionado dique.

Cuenca del río Juramento

Para reconstruir la serie de aportes al Embalse Cabra Corral se utilizó la serie correspondiente a la estación Cabra Corral (25°16'19" S - 65°19'47" O) desde 1935 a 1967 con caudales mensuales, obtenidos de la SSRH (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2011); de 1973 a 2012 se utilizó información de caudales medios mensuales que brindó la hidroeléctrica AES. Éstos se obtuvieron realizando un balance a nivel diario en el Embalse Cabra Corral utilizando datos de alturas, descargas por vertedero e infiltración. Obteniéndose la serie de aportes anuales desde 1935-2012.

Cuenca del río Bermejo

Los datos de caudales corresponden a la estación Pozo Sarmiento (23°13'58" S -64°12'35" O). Fueron extraídos de la Red Hidrológica Nacional (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2011) y abarcan el periodo 1941-2013. Existe un período de 2 años (1986-1987) que no posee registros.

Cuenca del río Pilcomayo

Los datos de caudales corresponden a la estación La Paz (22°22'39" S - 62°31'23" O). Fueron extraídos de la Red Hidrológica Nacional (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2011) y abarcan el periodo 1961-2013.

Cuenca del río Colorado

Los datos de caudales corresponden a la estación Buta Ranquil (37°04'34" S- 69°44'48" O). Fueron extraídos de la Red Hidrológica Nacional (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2011) y abarcan el periodo 1940-2013.

Cuenca del río Atuel

Los datos de caudales corresponden a la estación La Angostura (35°05'57" S- 68°52'26" O). Fueron extraídos de la Red Hidrológica Nacional (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2015) y abarcan el periodo 1905-2013

Cuenca del río Salado

Los datos de caudales corresponden a la estación Ruta Provincial 70 (31°29'28" S - 60°46'50" O). Fueron extraídos de la Red Hidrológica Nacional (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2015) y abarcan el periodo 1954-2013

Cuenca del río San Juan

Los datos de caudales corresponden a la estación Km 47,3 (31°30'59" S - 68°56'25" O). Fueron extraídos de la Red Hidrológica Nacional (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2015) y abarcan el periodo 1940-2013

Cuenca del río Mendoza

Los datos de caudales corresponden a la estación Guido (32°54'55" S - 69°14'16" O). Fueron extraídos de la Red Hidrológica Nacional (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2015) y abarcan el periodo 1940-2013

Cuenca del río Paraná

Los datos de caudales utilizados para el estudio de sequías corresponden a la estación Corrientes (27°27'50" S - 58°50'00" O). Fueron extraídos de la Red Hidrológica Nacional (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2011) y abarcan el periodo 1906-2013.

Esta cuenca se caracteriza por tener una regulación importante a través de embalses para producción de energía. Por tal motivo se hizo un análisis comparativo entre la serie naturalizada del río Paraná en la estación Itaipú (que publica Brasil a través del Operador Nacional del Sistema Eléctrico de Brasil - ONS) y la serie sin naturalizar de la estación Corrientes (Ver Figura 3.1).

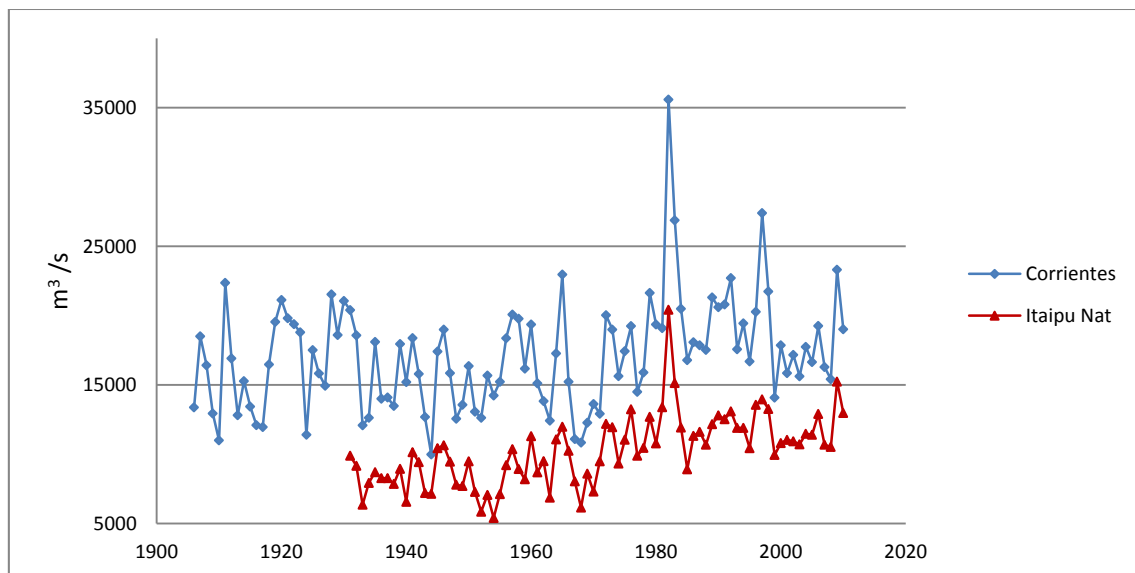


Figura 3.1. Comparación de caudales en estación Corrientes y caudales naturalizados de estación Itaipú. [m³/seg]

De este análisis se observó que a nivel anual el efecto de los embalses no afecta el comportamiento de la serie de la estación Corrientes para realizar el estudio de sequías. Se

resalta además que las diferencias encontradas entre las dos series se deben a que los caudales en la estación Corrientes están naturalmente modificados por el ingreso de los ríos Iguazú y Paraguay.

Cabe señalar que las series naturalizadas son series que se corrigen quitándole el efecto de las acciones antrópicas, es decir, son los caudales que pasarían sin acciones humanas en la cuenca tributaria (efecto de embalses, derivaciones de agua, la evaporación en los embalses) y uso consuntivo (riego, ganadería y suministros urbana, rural e industrial). El flujo natural se logra a través de un proceso de reconstitución, que considera el flujo observado en el sitio y la información relativa a las actividades humanas en la cuenca (ONS, 2013).

3. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS HIDROLÓGICAS

En la identificación y caracterización de sequías hidrológicas existen distintas metodologías (ver punto 1.1.2). Se ha elegido para este estudio el **Análisis de Sucesiones** ya que ha demostrado ser una herramienta flexible para un amplio rango de caudales (Fleig et al., 2005).

3.1. Metodología

Este estudio se enfoca en la identificación y caracterización de sequías hidrológicas en términos de déficit de aportes anuales, siguiendo una metodología de análisis de series de tiempo denominado "Análisis de Sucesiones".

El uso del análisis de sucesiones ha sido propuesto como un método para identificar los períodos de sequía y evaluar sus propiedades estadísticas. Esta metodología ha sido utilizada para el análisis y caracterización estocástica de las sequías desde que Yevjevich (1967) propusiera la definición de eventos de sequía. Según ésta *"Un evento de sequía es definido como el período durante el cual la variable indicadora de la disponibilidad de agua, X_t , (aportaciones, lluvia, humedad del suelo, etc) se encuentra por debajo de un determinado umbral, X_0 "*.

Dicho umbral puede ser un valor fijo en el caso de series de tiempo anuales o un valor periódico para el caso de series de tiempo periódicas (Salas et al., 1980). El umbral o nivel de truncamiento puede ser el valor de la media o mediana de la serie de datos hidrológicos utilizados, una fracción de la media (Clausen y Pearson, 1995); un nivel definido (como la media menos la desviación estándar) o un valor equivalente a una probabilidad de excedencia dada (Fernández Larrañaga, 1997). En cualquier caso, el umbral debe ser elegido de tal manera que sea representativo de la demanda de agua (Tsakiris et al., 2007).

El análisis de sucesiones permite obtener parámetros útiles en la cuantificación de las sequías como son: la duración (L); severidad o magnitud (M) (suma acumulada de las diferencias entre el umbral y los valores de la variable), ubicación en tiempo absoluto (inicio y fin), intensidad máxima ($I_{máx}$ definida como el valor máximo de la diferencia entre el umbral y la serie de caudales que componen el evento), e intensidad media (I_{media} , la relación entre la magnitud y la duración). Estos parámetros se observan en la Figura 3.2.

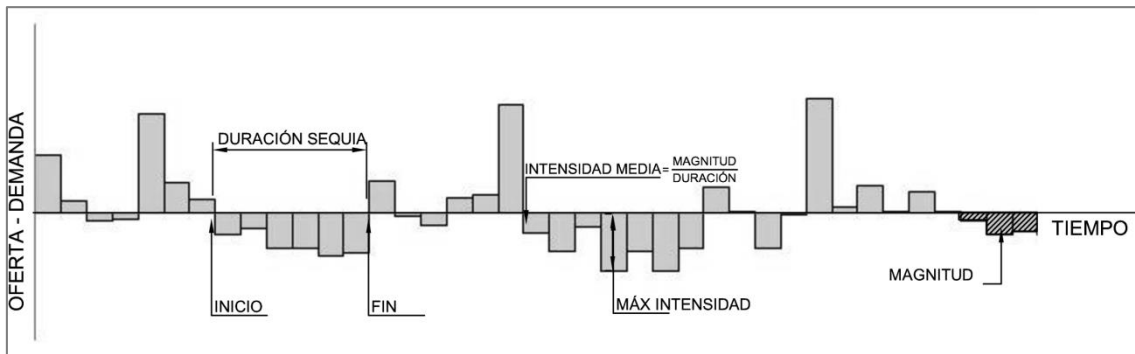


Figura 3.2. Serie cronológica de oferta menos demanda en un lugar para la identificación y caracterización de sequías según el método de sucesiones. Fuente: Fernández (1997).

En términos numéricos lo anterior se define de la siguiente manera:

Si se considera una variable hidrológica, X_t , con $t = 1, 2, \dots, n$; (n : cantidad de años de la serie hidrológica considerada); y un umbral de nivel de demanda de agua, X_0 , un evento de sequía puntual será cuando:

$$X_t < X_0 \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

La **longitud** de la sequía L es el número de intervalos de tiempo consecutivos donde $X_t < X_0$ precedido y seguido por al menos un intervalo donde $X_t \geq X_0$.

Un evento que comienza en el tiempo t_0 y termina en L pasos de tiempo puede ser definido como:

$$\{X_{t_0-1} \geq X_0, X_{t_0} < X_0, \dots, X_{t_0+k-1} < X_0, \dots, X_{t_0+L-1} < X_0, X_{t_0+L} \geq X_0\} \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Durante un periodo prolongado de sequía es común observar caudales bajos que exceden el umbral de sequía y de este modo una gran sequía es dividida en dos que son mutuamente dependientes. Por tal, Zelenhasic y Salvai (1987) introdujeron el concepto caudal “entre evento”. Este debe ser menor a un determinado umbral crítico que permita unir sequías. Este umbral crítico (u_c) se adoptó igual a un tercio de la relación entre el “caudal entre evento” y el caudal de sequía que le sigue. Es decir que el caudal entre evento menor a u_c puede ser incluido dentro de la longitud de una sequía.

El **déficit** dentro de una sequía de longitud L que comienza en t_0 es definido como:

$$S_t = X_0 - X_t \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

para $t_0 \leq t \leq t_0+L-1$

Sujeto a la (Ecuación 3.3)

Luego la **magnitud o severidad** del evento será:

$$M = \sum_{t_0}^{t+1-1} S_t = \sum_{t_0}^{t+1-1} (x_0 - x_t) \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

Sujeto a la (Ecuación 3.3)

Y la **intensidad**

$$I_{\text{media}} = \frac{M}{L} \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

$$I_{\text{max}} = \text{Max } S_t \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

3.1.1. Análisis espacial y temporal de las sequías hidrológicas

El análisis espacial y temporal de las sequías se apoya en un ordenamiento matricial, con filas correspondientes a la ubicación geográfica de las cuencas (de norte a sur), y con columnas ordenadas cronológicamente; y se identifica con una escala de colores los distintos umbrales de sequía. Los valores de cada unidad de la matriz se obtienen calculando en cada año de la serie cronológica de caudales, la probabilidad de excedencia del aporte medio anual registrado.

$$\text{Probabilidad}(X_{jt} > x_{jt}) = \alpha \quad (\text{Ecuación 3.8})$$

Siendo:

X_{jt} : Series de aportes disponibles

x_{jt} : Valor numérico del aporte anual observado en el año t en la cuenca j.

α : Umbrales de probabilidad.

De esta forma se logra una visión general de las características espacio-temporales de los recursos superficiales en relación con su disponibilidad, y por lo tanto con las sequías en cuanto a su aleatoriedad (Fernández Larrañaga, 1997).

La matriz se armó con los siguientes umbrales.

0,00 < α < 0,20	muy húmedo;
0,20 < α < 0,40	húmedo;
0,40 < α < 0,60	normal;
0,60 < α < 0,80	seco;
0,80 < α < 1,00	muy seco;

3.1.2. Definición de oferta y demanda

Para realizar la identificación y caracterización de sequías hidrológicas fue necesario definir la oferta (X_t) y la demanda (X_o) de cada cuenca que se analizó.

Oferta

Se considera oferta de agua a los aportes anuales registrados en las estaciones de aforo de las distintas cuencas de estudio " X_t ".

Demanda

El umbral de nivel de demanda " X_o " se lo define como un percentil de la curva de aportes que representa una determinada probabilidad excedencia.

Es decir que tendríamos un año seco cuando:

$$X_t < X_o$$

Y la demanda será tal que:

$$\text{Probabilidad}(X_t \geq X_o) = \alpha \quad (\text{Ecuación 3.9})$$

La selección de un valor de demanda, o truncamiento, ligado a la probabilidad de excedencia de la serie de oferta permite uniformar las condiciones de sequía en una región climatológicamente no homogénea. Ya que se incorpora el nivel de los recursos disponibles en cada zona y la variabilidad de la oferta. De esta manera, dado un nivel α existe la misma probabilidad de que se observe una sequía en cualquier punto de la región. Si se considera como nivel de truncamiento, para la definición de sequías, un porcentaje del recurso promedio habrá lugares en los cuales ocurren sequías frecuentes mientras en otros son inexistentes, dependiendo de la varianza estadística de la serie de oferta en cada lugar. Lo cual hace más complejo el análisis regional en zonas extensas no homogéneas (Fernández Larrañaga, 1997).

3.1.3. Procesamiento de la información

La oferta y la demanda dependen de los aportes anuales registrados en las distintas cuencas de estudio " X_t ". Para ello se trabajó con volúmenes aportados a las cuencas de los ríos Ctlamochita, Xanaes, Anizacate, Dulce, Juramento y Suquía. Y registros de caudales medios anuales de los ríos Pilcomayo, Bermejo, Paraná, Colorado, Atuel, San Juan, Mendoza y Salado. Ver Figura 2.1.

La mayoría de las cuencas analizadas están reguladas por embalses para usos multipropósito. El almacenamiento de agua es un factor que atenúa los procesos periódicos y casi periódicos. Lo cual implica que se genere dependencia temporal en la variación estocástica. (Salas, et. al, 1980). Para evitar este inconveniente se utilizaron estaciones ubicadas aguas arriba de los embalses (excepto río Ctalamochita y Paraná por no contar con series adecuadas) y se realizó el análisis a nivel anual, ya que al aumentar el intervalo temporal del análisis, se minimizan los errores por la intervención humana (Vicario, 2008).

Todas las series empleadas en esta tesis han sido sometidas a distintos análisis estadísticos para verificar su confiabilidad e identificar sus características. La finalidad de este capítulo no es realizar predicciones de sequías sino identificarlas y conocer las características que han tenido en la historia, por tal se busca comprender la naturaleza de los cambios que manifiesten las series analizadas.

Comprender la naturaleza y las causas de estas tendencias tiene importantes implicaciones científicas y prácticas para la predicción de la interacción de forzantes climáticos locales (basados en tierra) y remotos (mayormente oceánicos) (Barros et. al, 2006).

La naturaleza de las series de datos puede sufrir cambios importantes a través del tiempo (saltos, cambios de tendencias, etc.). Por ello es fundamental estar familiarizado con tales cambios. Además, si la naturaleza de los datos cambia, entonces es probable que los ciclos de largo plazo también. Por tal motivo, se realizó una inspección visual previa al análisis estadístico a fin de detectar datos dudosos o *outliers*, a través del análisis que propone (Chow, 1994). Luego se verificó homogeneidad y consistencia de las series. Finalmente, se realizó un análisis estadístico básico con el fin de detectar la dependencia temporal, que en general está asociada a la dinámica de los océanos, la superficie de la corteza terrestre, el almacenamiento de agua y energía, los astros (luna y sol), entre otros.

3.1.3.1. Análisis de Homogeneidad y Consistencia

Las características hidrológicas están sujetas generalmente a los cambios debidos a no homogeneidad e inconsistencia. Muchas características de las series de tiempo como la media, el desvío estándar, y la correlación pueden ser afectadas por tendencias o saltos que son producidas en las series por no homogeneidad e inconsistencia. La identificación o detección y descripción de la falta de estas tendencias son aspectos importantes del análisis de series de tiempo, y serán más representativas si los cambios están sustentados por test estadísticos y justificación de evidencias históricas y físicas.

Si una serie es homogénea significa que proviene de regímenes hidrológicos que no han sufrido alteraciones naturales o artificiales. En realidad la naturaleza está en permanente evolución, y por lo tanto no existen series estrictamente homogéneas. No obstante, lo son a los fines prácticos aquellos datos provenientes de cuencas con una baja intervención humana. La falta de homogeneidad más común que se presenta proviene de la intervención del hombre: operación de reservorios, trasvase de cuencas y alteración del uso de suelo y vegetación o de la variabilidad y cambio climático. Es decir que la NO homogeneidad en los datos es común en las series de tiempo hidrológicas.

Un especial cuidado debe tenerse con los datos si se van a realizar análisis de frecuencias. En este caso los datos deben ser consistentes, es decir libres de errores sistemáticos, para lo cual deben ser cuidadosamente contrastados.

La metodología utilizada para el procesamiento de las series temporales se efectuó con el programa estadístico comercial HYFRAN® (versión gratuita) desarrollado por el Instituto Nacional de Investigación Científica – Agua, Tierra y Medioambiente (INRS-ETE) de la Universidad de Quebec, Canadá y con la formulación de las ecuaciones desarrolladas en hojas de cálculo.

3.1.3.2. Pruebas de Homogeneidad

Las pruebas de homogeneidad evalúan si todos los valores que conforman la muestra, provienen estadísticamente de una misma población. Para ello es necesario dividir la muestra en dos o más grupos de tamaños iguales (o diferentes), y se comparan los estadísticos de la muestra: media, mediana, varianza, entre otros. La aceptación de las pruebas estará dada en función de un nivel de significancia propuesto, por lo general del 5% ó 1%.

Nivel de Significancia

En las distintas pruebas estadísticas se plantea una hipótesis nula (H_0) la cual se mantiene como verdadera a menos que en la serie de la muestra se encuentre evidencia de lo contrario. A esta hipótesis nula se la contrasta con una hipótesis alternativa (H_1). En los casos en los que no se especifica H_1 de manera explícita, se puede considerar que la misma ha quedado definida implícitamente como “ H_0 es falsa” .

Al analizar una serie de datos, los mismos pueden ser relacionados con una determinada distribución de probabilidad la cual esté relacionada con la hipótesis de estudio. Luego, pueden tomarse un conjunto o un rango de valores para el cual si un valor estadístico obtenido pertenece a él se rechaza la hipótesis nula. Dicho rango se conoce como región de rechazo, y

el mismo se puede modificar para plantear condiciones más o menos estrictas. Cuando se contrastan las hipótesis, se determina el rechazo o no de la hipótesis nula H_0 . Esta decisión puede ser errónea o no coincidir con lo que sucede en la realidad. Se pueden dar cuatro casos que se visualizan en la Tabla 3.1

Tabla 3.1 Nivel de significancia, hipótesis de contrastación.

	H_0 es cierta	H_1 es cierta
Se acepta H_0	No hay error	Error Tipo II
Se acepta H_1	Error Tipo I	No hay error

La probabilidad de cometer un error de Tipo I es conocido como nivel de significancia de la prueba y se denota con la letra griega α . Por otro lado la probabilidad de cometer un error de Tipo II se denota con la letra griega β . Se denomina potencia del contraste al valor $1-\beta$, esto es, a la probabilidad de escoger H_1 cuando esta es cierta. Considerado un nivel de significación α (error que estamos dispuestos a asumir en el caso de optar por H_1 y equivocarnos) y una muestra de tamaño n . Se pueden plantear dos alternativas representadas en la Figura 3.3.

Los valores, t_α o $t_{2\alpha}$ se encuentran tabulados para cada valor de α . Si la media de la muestra cae en la región de aceptación se acepta la hipótesis H_0 ; si cae en la región crítica, se acepta la hipótesis H_1 . En el presente trabajo, se utilizó un nivel de significancia del 5% (0.05) en la mayoría de las series. En los casos en que no se cumplía alguna de las pruebas estadísticas se procedió a analizarlas con un nivel de significancia del 1%.

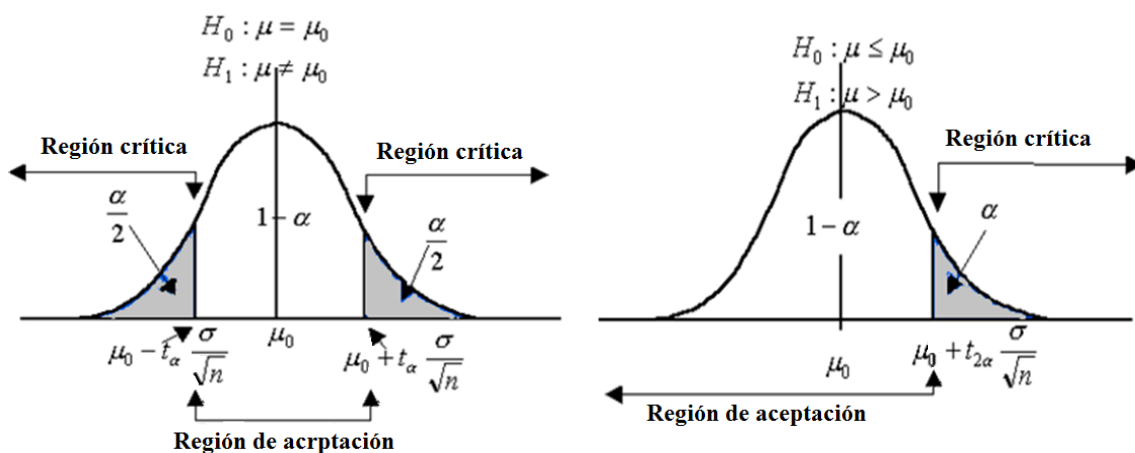


Figura 3.3. Funciones de frecuencia para la información de muestra y funciones de probabilidad para la población.

Prueba de Homogeneidad a Escala Anual (Wilcoxon)

La prueba de homogeneidad a escala anual de Wilcoxon permite comprobar si el promedio de un primer subconjunto de la muestra difiere significativamente del promedio de un segundo subconjunto de la muestra. Para efectuarla se debe sustituir las observaciones de las dos muestras de tamaños n_1 y n_2 , por sus rangos combinados. Los rangos son asignados de tal manera que el rango 1 se asigna a la más pequeña de las $n = n_1 + n_2$ observaciones combinadas, el rango 2 se le asigna a la siguiente más alta y así sucesivamente, de modo que el rango n queda asignado a la observación más grande. Si varias observaciones tienen el mismo valor, se asigna a cada una de estas el promedio de los rangos que, en otra circunstancia, se les habría asignado.

La estadística de la prueba de Wilcoxon T_1 , es simplemente la suma de los rangos asignados a las n_1 observaciones de la muestra más pequeña.

Para cualquier valor entero n , la suma de los n primeros enteros consecutivos pueden calcularse fácilmente como $n(n+1)/2$. La estadística de prueba T_1 , más la suma de los rangos asignados a los n_2 elementos de la segunda muestra, T_2 , por consiguiente, debe ser igual a este valor, es decir;

$$T_1 + T_2 = \frac{n(n+1)}{2} \quad (\text{Ecuación 3.10})$$

De modo que esta ecuación puede ser empleada como verificación del procedimiento de asignación de rangos.

La prueba de la hipótesis nula puede ser de dos extremos o de un extremo, dependiendo de si se está probando si las dos medianas de población son exclusivamente diferentes o si una es mayor que la otra.

La estadística de prueba, T_1 , está distribuida de manera aproximadamente normal. Se puede emplear la siguiente fórmula de aproximación de muestra grande para probar la hipótesis nula:

$$|Z| = \frac{T_1 - \mu_{T_1}}{\sigma_{T_1}} \quad (\text{Ecuación 3.11})$$

El valor medio de la estadística de prueba T_1 , puede calcularse con:

$$\mu_{T_1} = \frac{n_1(n+1)}{2} \quad (\text{Ecuación 3.12})$$

y la desviación estándar de la estadística de prueba T_1 , se puede calcular con:

$$\sigma_{T_1} = \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2(n+1)}{12}} \quad (\text{Ecuación 3.13})$$

Basándose en α , el nivel de significación seleccionado, la hipótesis nula puede ser rechazada si el valor Z calculado cae en la región de rechazo apropiada.

Prueba estadística de t de Student

Si se considera una serie Q_i^j , para $i = 1, 2, 3, \dots, n_j$, del sitio j , la cual se divide en dos conjuntos de tamaño $n_1 = n_2 = n_j/2$, entonces el estadístico de prueba se define con la Ecuación 3.14. En el caso de que no se cuente con muestras pares las sub-muestras no tendrán igual número de datos, difiriendo por uno, lo cual no afecta la validez de la prueba. (Escalante Sandoval y Reyes Chávez, 2005).

$$td = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \quad (\text{Ecuación 3.14})$$

Donde:

$\bar{x}_1 ; s_1^2$: son la media y la varianza de la primera parte del registro de tamaño n_1 .

$\bar{x}_2 ; s_2^2$: son la media y la varianza de la primera parte del registro de tamaño n_2 .

El valor absoluto de t_d se compara con el valor de la distribución t de Student de dos colas y con $n = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad para un nivel de significancia $\alpha = 0,05$. Si y sólo si el valor absoluto de t_d es mayor que aquel de la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia, y por lo tanto la serie Q_i^j se considera no homogénea. En caso contrario la serie es homogénea.

3.1.3.3. Prueba de Estacionalidad (Kendall)

Mediante la prueba estadística de estacionalidad de Kendall se verifica que en la serie de datos no exista una tendencia importante.

Para cada dato de la serie, la cual se encuentra ordenada cronológicamente, se calcula cuántos datos posteriores son superiores de esta forma:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} s(i) \quad \text{(Ecuación 3.15)}$$

En donde $s(i)$ es el número de los valores de $X_j > X_i$, siendo $i < j \leq n$.

Por otro lado, se determinan cuántos valores posteriores son menores de la siguiente manera:

$$T = \sum_{i=1}^{n-1} t(i) \quad \text{(Ecuación 3.16)}$$

Donde $t(i)$ es el número de valores $X_j < X_i$, siendo $i < j \leq n$.

Con los valores de S y T calculados, se define el índice $I = S - T$, que debe ser próximo a cero si la hipótesis nula es verdadera. Por lo tanto se deben verificar las siguientes condiciones:

- $I < I_{\text{cri}(\alpha)}$, o sea que el I calculado sea menor que un valor de $I_{\text{crítico}}$ tabulado en función del tamaño de la muestra y según diferentes niveles de significación.

Para tamaños de muestra mayores a 10, el valor del estadístico se aproxima a una distribución normal. Por lo que se debe utilizar una forma estandarizada del estadístico en donde se transforma el índice I en el índice K , definido como:

- $K = \frac{I-1}{\left(\frac{N*(N-1)*(2N+5)}{18}\right)^{0.5}} \quad I > 0$
- $K = 0 \quad I = 0$
- $K = \frac{I+1}{\left(\frac{N*(N-1)*(2N+5)}{18}\right)^{0.5}} \quad I < 0$ (Ecuación 3.17)

Los valores de K_{cri} son obtenidos de una distribución Normal, los cuales son presentados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Valores de K_{cri} para el Test Mann – Kendall.

α	0,01	0,05	0,1
K_{cri}	2,33	1,64	1,28

3.1.3.4. Prueba de Datos Atípicos

La prueba de datos atípicos (Chow, 1994) se emplea para detectar puntos que se alejan significativamente de la tendencia que se observa en el resto de la serie. Se supone que los datos se encuentran normalmente distribuidos. La retención o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos, especialmente en muestras pequeñas. Los procedimientos para tratar estos datos requieren un criterio que involucra consideraciones matemáticas e hidrológicas.

La siguiente ecuación de frecuencia puede utilizarse para detectar datos dudosos:

$$Y = y \pm K_n * s_y \quad \text{(Ecuación 3.18)}$$

Donde:

Y : umbral de dato atípico alto o bajo, en unidades logarítmicas.

K_n : valor que depende del tamaño de la muestra, Tabla 3.3.

y : media

s_y : desvío estándar.

Para detectar los valores atípicos de las series de datos consideradas para los estudios de sequías, se calcularon umbrales superiores e inferiores para cada serie. Si los logaritmos de los valores en una muestra son mayores que y_h entonces se consideran como datos atípicos altos, análogamente en el caso de ser menores que y_h serán tomados como datos atípicos bajos.

Cuando se evidenció presencia de un dato atípico se contrastó con datos de precipitaciones o series de caudales de cuencas que se correlacionaban similares comportamientos para determinar si era un dato atípico.

Tabla 3.3. Valores K_n para la prueba de datos atípicos.

Tamaño de muestra n	K_n	Tamaño de muestra n	K_n	Tamaño de muestra n	K_n	Tamaño de muestra n	K_n
10	2,036	24	2,467	38	2,661	60	2,837
11	2,088	25	2,486	39	2,671	65	2,866
12	2,134	26	2,502	40	2,682	70	2,893
13	2,175	27	2,519	41	2,692	75	2,917
14	2,213	28	2,534	42	2,700	80	2,940
15	2,247	29	2,549	43	2,710	85	2,961
16	2,279	30	2,563	44	2,719	90	2,981
17	2,309	31	2,577	45	2,727	95	3,000

Tamaño de muestra n	K_n	Tamaño de muestra n	K_n	Tamaño de muestra n	K_n	Tamaño de muestra n	K_n
18	2,335	32	2,591	46	2,736	100	3,017
19	2,361	33	2,604	47	2,744	110	3,049
20	2,385	34	2,616	48	2,753	120	3,078
21	2,408	35	2,628	49	2,760	130	3,104
22	2,429	36	2,639	50	2,768	140	3,129
23	2,448	37	2,650	55	2,804		

3.1.3.5. Análisis complementarios de las series temporales

Se realizaron distintos análisis complementarios a las series de aportes y caudales utilizadas en el estudio de sequías, con el objetivo de describir sus principales características y detectar si existen comportamientos a nivel regional.

Esta descripción consistió en analizar algunos estadísticos como la media, varianza, representaciones gráficas y el coeficiente de autocorrelación. Este último es un instrumento fundamental a la hora de analizar las propiedades de una serie temporal en términos de la interrelación de un año a otro.

El coeficiente de autocorrelación mide la correlación, es decir, el grado de asociación lineal que existe entre observaciones separadas k periodos. Este coeficiente proporciona información sobre cómo están relacionadas entre sí las distintas observaciones de una serie de tiempo. El coeficiente de autocorrelación entre dos variables x e y se calcula según la Ecuación 3.18.

$$\rho_{xy} = \frac{cov(x,y)}{\sqrt{S_{(x)}S_{(y)}}} \quad \text{(Ecuación 3.19)}$$

Donde:

$cov(x,y)$: es la covarianza de las variables x e y .

$$cov(x,y) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (x_t - \bar{x})(y_t - \bar{y}) \quad \text{(Ecuación 3.20)}$$

$S_{(x)}$: desvío estándar de la variable x

$$S_{(x)} = \sqrt{\frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T (x_t - \bar{x})^2} \quad \text{(Ecuación 3.21)}$$

$S_{(y)}$: desvío estándar de la variable y

$$S_{(y)} = \sqrt{\frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2} \quad (\text{Ecuación 3.22})$$

\bar{x} = media muestral de la variable x_t

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x_t \quad (\text{Ecuación 3.23})$$

\bar{y} = media muestral de la variable y_t

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T y_t \quad (\text{Ecuación 3.24})$$

T : Cantidad de datos de la muestra

Este coeficiente no tiene unidades por definición y toma valores $-1 \leq \rho_{x,y} \leq 1$.

Si $\rho_{x,y} = 0$ no existe relación lineal entre x e y

Si $\rho_{x,y} = 1$, existe relación lineal perfecta y positiva x e y

Si $\rho_{x,y} = -1$ existe relación lineal perfecta y negativa entre x e y .

Una vez que se tiene una muestra de las variables x e y , se puede estimar este coeficiente poblacional mediante su correspondiente coeficiente muestral:

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{t=1}^T (x_t - \bar{x})(y_t - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (x_t - \bar{x})^2 \sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2}} \quad (\text{Ecuación 3.25})$$

El coeficiente de correlación se puede utilizar como instrumento para analizar la estructura de correlación existente entre las observaciones de una serie temporal Y_t . Si tenemos T observaciones $Y_1 \dots Y_T$, podemos crear $(T-1)$ pares de observaciones $(Y_1, Y_2), \dots, (Y_{T-1}, Y_T)$. Si consideramos Y_1, \dots, Y_{T-1} como una variable y Y_2, \dots, Y_T como otra, podemos definir la correlación entre ambas variables Y_t, Y_{t+1} :

$$r_{Y_t, Y_{t+1}} = r_1 = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} (Y_t - \bar{Y}_{(1)})(Y_{t+1} - \bar{Y}_{(2)})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{T-1} (Y_t - \bar{Y}_{(1)})^2 \sum_{t=1}^{T-1} (Y_{t+1} - \bar{Y}_{(2)})^2}} \quad (\text{Ecuación 3.26})$$

Donde $\bar{Y}_{(1)}$ es la media muestral de las $T-1$ primeras observaciones e $\bar{Y}_{(2)}$ es la media muestral de las $T-1$ últimas observaciones. Esta fórmula se suele aproximar por (González, 2009)

$$r_1 = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} (Y_t - \bar{Y})(Y_{t+1} - \bar{Y})}{\sum_{t=1}^T (Y_t - \bar{Y})^2} \quad (\text{Ecuación 3.27})$$

El coeficiente r_1 mide la correlación, o grado de asociación lineal, entre observaciones sucesivas; se le denomina coeficiente de correlación simple o coeficiente de correlación serial, o coeficiente de autocorrelación de primer orden. En general, se puede estimar la correlación entre observaciones separadas por k intervalos, es decir, el coeficiente de autocorrelación de orden k , como sigue:

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{T-k} (Y_t - \bar{Y})(Y_{t+k} - \bar{Y})}{\sum_{t=1}^T (Y_t - \bar{Y})^2} \quad \text{Ecuación 3.28}$$

En este caso interesa el grado de autocorrelación que tienen las series a los fines de conocer la respuesta que tiene la cuenca a los procesos de sequía. Ya que los valores de correlación (de lag 1) indican que la variación total anual de una serie con respecto al promedio puede ser debida a la que ocurrió el año previo. También se ha usado la correlación entre series de distintas cuencas para evaluar el grado de comportamiento entre una y otra.

3.2. Análisis de datos

Como se comentó anteriormente, las series de datos utilizadas han sido sometidas a distintos análisis estadísticos para verificar su confiabilidad e identificar sus características. Primero se realizó una inspección visual a fin de detectar datos atípicos, a través del análisis de datos dudosos que propone (Chow et. al, 1994). Luego se verificó homogeneidad (con método Escala Anual Wilcoxon y Arch) y estacionariedad (con método de Mann-Kendall y Dickey-Fuller). El método de Arch y Dickey-Fuller se ha aplicado a las series que no verifican homogeneidad y estacionariedad con Wilcoxon y Mann-Kendall, ya que estas pruebas se basan en la independencia de los datos. Y en el caso de series de caudales anuales puede existir una dependencia temporal (Salas et. al, 1980).

Para la prueba de Wilcoxon y Arch la hipótesis H_0 : la serie es homogénea en media y varianza.

Para la prueba de Mann-Kendall la hipótesis H_0 : la serie es estacionaria.

La prueba de Dickey-Fuller la hipótesis H_0 : la serie es NO ESTACIONARIA.

Los resultados del análisis de los datos se presentan en la Tabla 3.4. Siendo p : probabilidad de rechazo del estadístico de prueba.

Se aclara que el hecho de trabajar con aportes en volúmenes totales anuales o caudales medios anuales no influye en el análisis de sequías adoptado, ya que la variable que vincula los valores de caudales medios anuales o volúmenes totales anuales es el tiempo, y éste es constante. Para el caso de datos atípicos se contrastó el dato anómalo con datos de

precipitaciones o caudales de cuencas cercanas que tuvieran similar comportamiento para revisar la veracidad del dato.

Tabla 3.4. Resumen de análisis de homogeneidad, estacionariedad y datos dudosos en la serie completa.

Cuenca	Serie	Homogeneidad		Estacionariedad		Datos Dudosos
		Wilcoxon	Arch	Kendall	Dickey-Fuller	
Suquía	1926-2010	$p = 0,000216$	$p=0,5909$	$p = 0,087$		0
Xanaes	1936-2008	$p = 0,000283$	$p=0,3206$	$p = 0,028$		1
Anizacate	1925-1979	$p = 0,561$		$p = 0,896$		1
Ctalamochita	1914-1982	$p = 0,256$		$p = 0,768$		0
Dulce	1926-2013	$p = 0,00197$	$p=0,8119$	$p = 0,011$	$p<0,0001$	1
Colorado	1940-2013	$p = 0,214$		$p = 0,815$		0
Juramento	1934-2013	$p = 0,940$		$p = 0,581$		0
Paraná	1906-2013	$p = 0,00440$	$p=0,9903$	$p = 0,010$	$p<0,0001$	0
Bermejo	1941-2013	$p = 3,36E-6$	$p=0,6261$	$p = 6,44E-7$	$p<0,0001$	0
Pilcomayo	1961-2013	$p = 0,793$		$p = 0,076$		0
Salado	1954-2013	$p = 0,0630$		$p = 0,241$		0
San Juan	1909-2013	$p = 0,499$		$p = 0,310$		0
Mendoza	1956-2013	$p = 0,0735$		$p = 0,036$		0
Atuel	1906-2013	$p = 0,441$		$p = 0,886$		0

Río Xanaes

A través del análisis de datos dudosos se encontró que la serie presenta un dato que no cumple con el test. Este dato corresponde al año 1972. Para verificar la veracidad del mismo, se recurrió a contrastarlo con lo sucedido en la cuenca del río Suquía y la precipitación total caída ese año hidrológico, y evidentemente se verifica que ha sido un año con caudales inferiores para ambas cuencas y con precipitaciones significativamente por debajo de la media. Ver Figura 3.4.

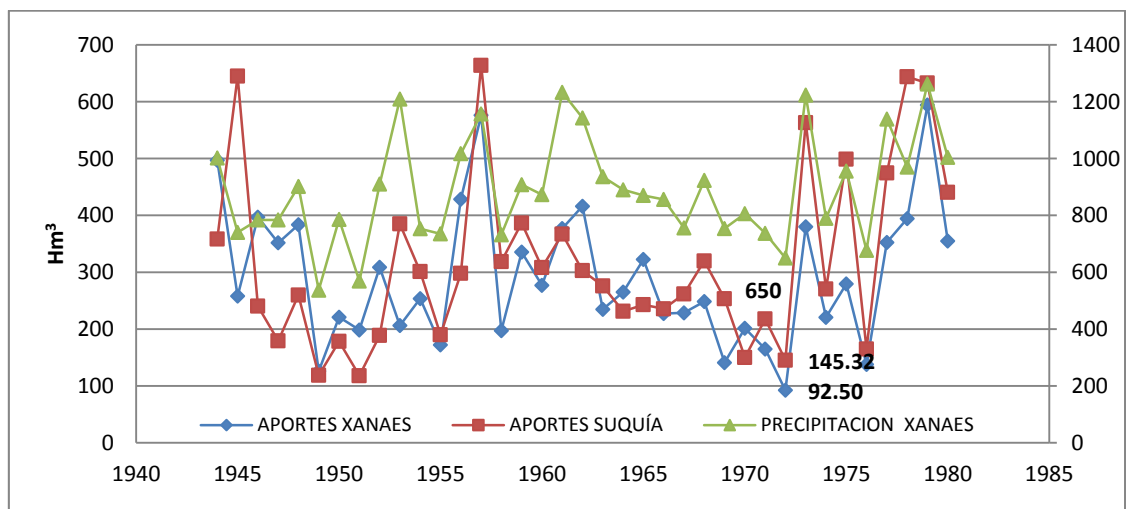


Figura 3.4. Contraste de dato atípico de la serie de aportes anuales del río Xanaes (Hm³), con serie de precipitación anual (mm) caída en la misma cuenca y aportes anuales del río Suquia (Hm³).

Río Anizacate

La serie comprendida entre los años 1925-1979 cumple con homogeneidad y estacionaridad, pero no verifica datos dudosos para el año 1975.

Se procedió a verificar con datos de precipitaciones, pero no se contó con información disponible. Por tal se contrastó con datos de aportes a la cuenca de los ríos Xanaes y Suquía (ver Figura 3.5), y se verificó que en ese año ambas cuencas presentan un mínimo. Se utilizaron estas cuencas para contrastar el dato atípico, ya que poseen mayor coeficiente de correlación cruzada.

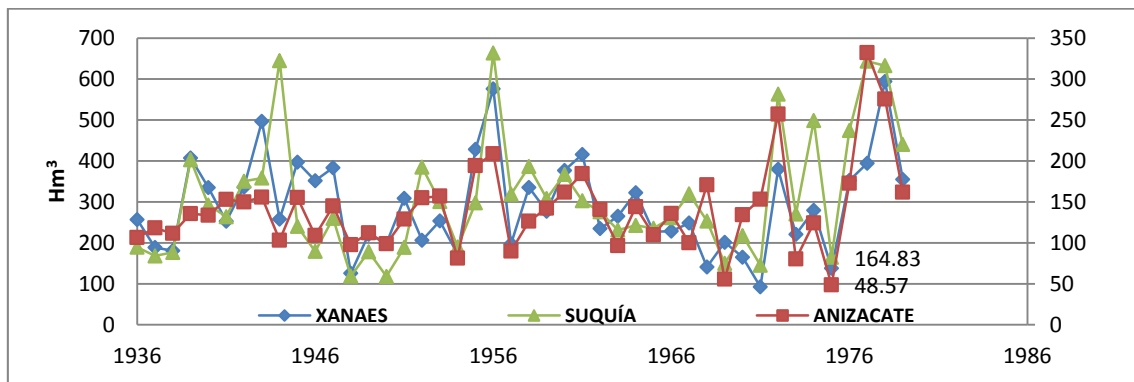


Figura 3.5. Contraste de dato atípico de la serie de aportes del río Anizacate (Hm^3) con los aportes anuales del Río Suquía (Hm^3) y Xanes (Hm^3).

Río Dulce

La serie presenta un dato dudoso correspondiente al año 1936. Este valor no se ha podido contrastar con datos de precipitaciones ya que no existen registros de esa época. Por tal motivo, se decidió quitarlo del análisis de frecuencias que se desea realizar. Con respecto a estacionaridad, verifica para el 1% de confiabilidad.

Río Bermejo

La serie del río Bermejo no cumple con los test de homogeneidad ni estacionaridad en forma completa desde 1941 a 2010. Pero analizada en partes se encuentra que desde 1957 a 2010 es homogénea (Ver Anexo II). Esto coincide con el informe presentado por la Organización de los Estados de América (OAS) (sobre Cuenca del Plata - Estudio para su Planificación y Desarrollo Cuenca del río Bermejo I - Alta Cuenca) el cual indica que desde la década del 60', el sector agropecuario de las provincias de Salta y Jujuy ha presentado fuerte dispersión en cuanto a área regada. Sin embargo al analizarla con los métodos de Dicky Fuller y Arch la serie verifica en su totalidad homogeneidad y estacionaridad.

3.3. Resultados para las cuencas en estudio

Se exponen en este punto los resultados de la identificación y caracterización de sequías obtenidos al aplicar cada paso de la metodología indicada en el punto 3.1. El análisis se desarrolló a nivel anual, considerando como variable indicadora de disponibilidad de agua (oferta), los caudales medios anuales de las cuencas estudiadas en año hidrológico (julio a junio). Y el umbral X_0 (demanda) a la probabilidad de excedencia igual a 0,6 (Probabilidad $[X_{jt} > x_{jt}] = 0,6$), siendo esta la probabilidad de que la demanda sea mayor al aporte de ese año.

Tabla 3.5. Resultados estadísticos de las series utilizadas para la identificación y caracterización de sequías [m^3/seg]

Cuencas	Media	Mediana	Min	Máx	Varianza	Desvió	Coef. Var	Coef. Asim	Umbral
Suquía	11,01	9,78	3,74	27,00	24,24	4,92	0,45	0,97	9,05
Xanaes	10,23	10,23	2,93	21,24	13,65	3,69	0,36	0,50	8,82
Anizacate	4,51	4,31	1,54	10,53	2,38	1,54	0,34	1,51	4,09
Ctalamochita	27,24	26,04	9,12	61,23	147,54	12,15	0,45	0,85	22,48
Dulce	120,06	114,92	15,24	254,33	3.182,13	56,16	0,47	0,45	89,76
Colorado	146,48	146,50	52,59	290,26	2.761,07	52,81	0,36	0,54	124,92
Juramento	28,78	26,33	7,30	65,58	138,78	11,71	0,41	1,28	24,52
Bermejo	375,27	355,49	142,97	647,51	16.803,08	128,52	0,34	0,31	316,80
Pilcomayo	214,27	194,43	93,33	453,08	6351,54	78,60	0,37	0,81	183,65
Paraná	17.162,43	17.016,45	10.637,25	37.819,08	15.585.622,21	3.898,31	0,23	1,41	16.199,56
San Juan	63,98	53,70	19,87	223,84	1458,19	37,87	0,59	1,77	46,51
Mendoza	45,35	44,08	23,42	93,96	248,24	15,61	0,34	1,06	38,27
Salado	131,93	90,24	16,20	642,61	16.218,27	124,43	0,94	2,20	74,26
Atuel	35,14	33,94	18,92	69,75	85,76	9,30	0,26	0,83	30,83

Para cada una de las cuencas en estudio se identificaron los distintos parámetros que caracterizan a las sequías como duración, magnitud y la intensidad máxima y media. La variable intensidad, puede entenderse como el máximo caudal extra que sería necesario aportar a la cuenca durante el mes de mayor déficit para satisfacer la demanda en un análisis a nivel mensual. La variable magnitud, compara el volumen total necesario para superar una condición de sequía. Se puede expresar como una proporción de los aportes anuales en cada cuenca, y refleja el volumen de agua que sería necesario tener almacenado para sobrepasar las peores condiciones de sequía observadas. La intensidad media (relación entre la magnitud y duración de la sequía) indica el grado de severidad de la sequía en esa cuenca.

En la Tabla 3.5 se exponen las características estadísticas y el umbral (Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$) = 0,6) de las series de aportes utilizadas en el presente estudio.

A continuación se expondrá el análisis temporal de las sequías para cada cuenca, que consiste en identificar los periodos en que la oferta de recursos hídricos es sobrepasada por la demanda. Para cada cuenca se resumen los principales parámetros que caracterizan a las sequías identificadas, indicando: año de inicio de las sequías identificadas, duración (en años), magnitud (sumatoria de los déficits de cada sequía), intensidad (máximo déficit de la sequía) e intensidad media (relación entre magnitud y duración). La intensidad media es el caudal medio durante el periodo de déficit hídrico que puede ser expresado en m^3/s o $Hm^3/año$.

3.3.1. Río Ctalamochita

En la Figura 3.6 se observan dos periodos de significativos de déficits de 1935 a 1952 y de 1966 a 1976. Luego, en la Tabla 3.6, se identifican cada uno de los parámetros característicos de las sequías identificadas en el periodo de 1914 a 1982.

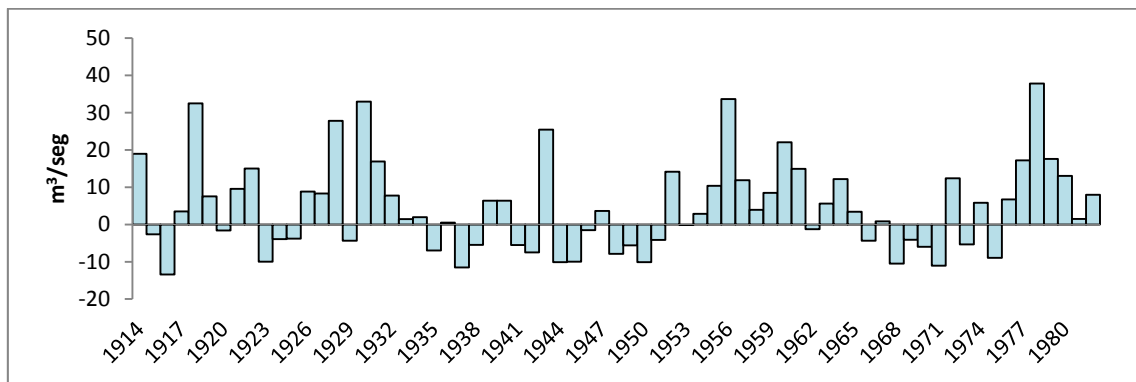


Figura 3.6. Series cronológicas de oferta menos demanda para la cuenca del río Ctalamochita. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6.

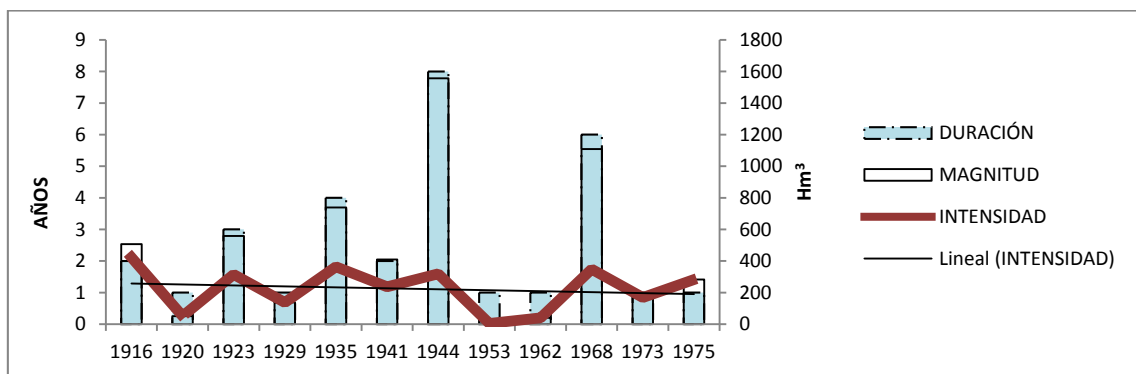


Figura 3.7. Duración, magnitud e intensidad de las principales sequías en la cuenca del río Ctalamochita. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6

Tabla 3.6. Parámetros de las sequías de la cuenca del río Ctalamochita.

AÑO	DURACIÓN [Años]	MAGNITUD [Hm ³]	INTENSIDAD [m ³ /seg]	INTENSIDAD MEDIA [m ³ /seg]
1916	2	506,15	13,41	8,03
1920	1	50,96	1,62	1,62
1923	3	558,35	9,98	5,90
1929	1	137,66	4,37	4,37
1935	4	738,58	11,53	5,86
1941	2	409,78	7,49	6,50
1944	8	1556,60	10,12	6,17
1953	1	4,09	0,13	0,13
1962	1	40,38	1,28	1,28
1968	6	1108,25	11,04	5,86
1973	1	169,01	5,36	5,36
1975	1	282,40	8,95	8,95

Las sequías de mayor duración y magnitud se identifican en la década del 30', 40' y fines del 60'. La Tabla 3.6 se refleja en la Figura 3.7. La cuenca del río Ctalamochita presenta tres sequías importantes en duración y magnitud una de cuatro años en la década del 30', otra de ocho años en la del 40' y otra de seis años en la del 60'. En cuanto a la intensidad se aprecia una leve tendencia positiva para la "Imedia" y negativa para la "Imáx" (estas se muestran en la Figura 3.8).

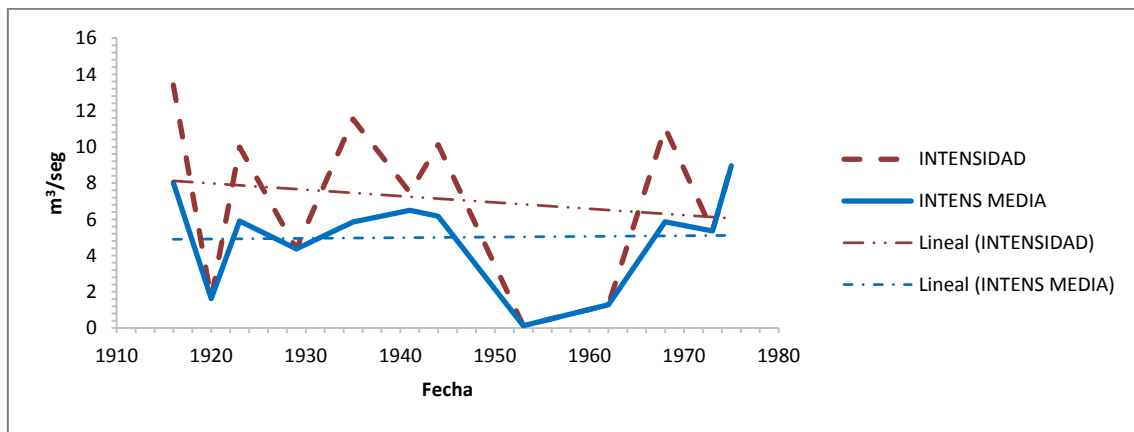


Figura 3.8. Intensidad máxima y media de las principales sequías en la cuenca del río Ctalamochita. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6

Este resultado daría indicio de que en los últimos años de registro (de la serie analizada) las sequías han sido de corta duración pero con déficits significativos. Sin embargo, a través de un análisis de regresión se demostró que la línea de tendencia nula (horizontal) se encuentra dentro del intervalo de confianza, y esto es debido a que el periodo de registro es corto. Por lo

tanto, se asume que para el período analizado, las tendencias de las intensidades media y máxima no son significativas (ver Tabla 3.20).

3.3.2. Río Xanaes

Para la cuenca del río Xanaes se reconstruyó la serie de aportes desde el año 1936 a 2007 (ver Figura 3.9).

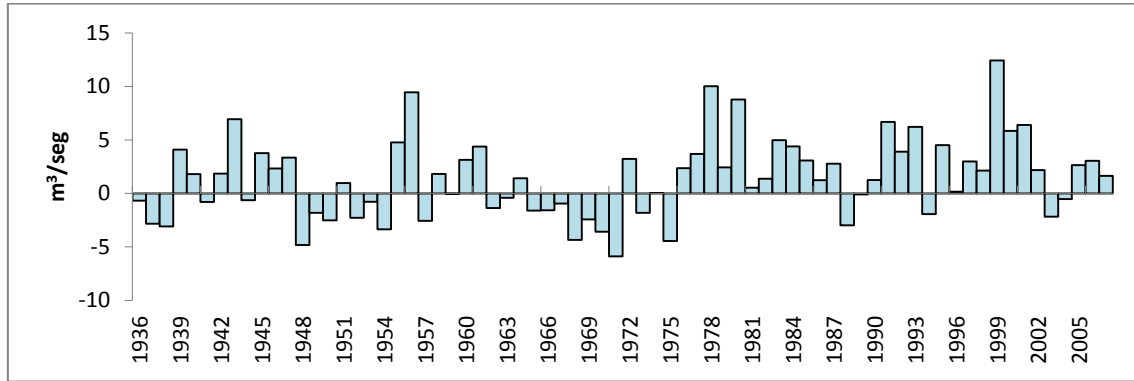


Figura 3.9. Series cronológicas de oferta menos demanda. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6.
Cuenca del río Xanaes.

En la figura se observan dos periodos: Uno desde 1936 a 1976 donde 65 % de los aportes son déficits y otro desde 1976 a 2007 donde el 77% de los aportes son excesos. La Tabla 3.7 resume los principales parámetros de las sequías registradas en la serie de aportes de la cuenca del río Xanaes. En ella se puede observar que las sequías más severas en duración y magnitud se dan en a fines de la década del 40' y 60'. Siendo estas de siete años de duración.

Tabla 3.7. Parámetros de las sequías de la cuenca del río Xanaes.

AÑO	DURACIÓN [Años]	MAGNITUD [Hm³]	INTENSIDAD [m³/seg]	INTENSIDAD MEDIA [m³/seg]
1936	3	207,83	3,08	2,20
1941	1	25,26	0,80	0,80
1944	1	20,05	0,64	0,64
1948	7	460,40	4,82	2,09
1957	1	80,67	2,56	2,56
1959	1	0,97	0,03	0,03
1962	2	56,36	1,37	0,89
1965	7	642,27	5,88	2,91
1973	3	196,12	4,45	2,07
1988	2	97,10	2,98	1,54
1994	1	61,00	1,93	1,93
2003	2	85,11	2,18	1,35

En la Figura 3.10 se grafica la duración y magnitud de las sequías.

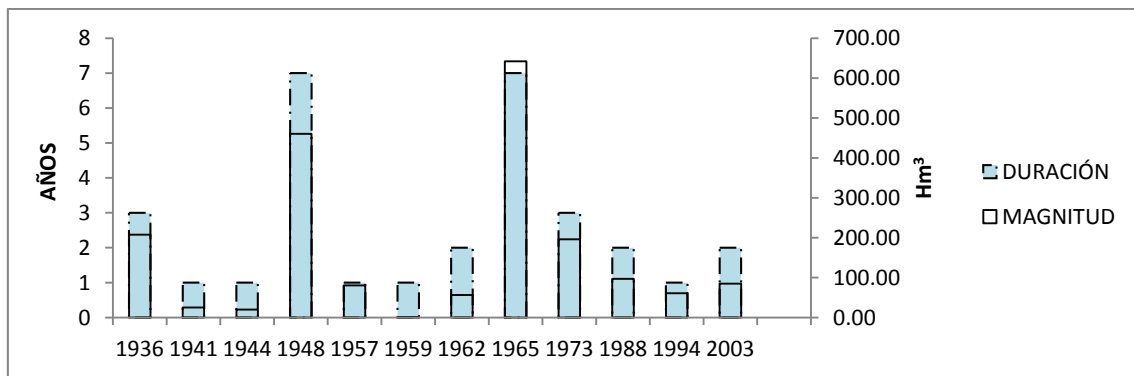


Figura 3.10. Duración y Magnitud de las principales sequías en la cuenca del río Xanaes. Demanda definida con $Probabilidad(X_{jt} > x_{jt}) = 0,6$

En la Figura 3.10 se puede notar que en las sequías de mayor duración se registraron las máximas magnitudes e intensidades. Esto demuestra una relación lineal entre los parámetros. En 1965 se registró la sequía más severa, luego la cuenca experimenta un periodo caracterizado por excesos hídricos. A partir de 1981 las sequías fueron de menor duración con una frecuencia de cinco años y medios aproximadamente. En la Figura 3.11 se observa que la “Imáx” e “Imedia” tienen una tendencia lineal decreciente, sin embargo a través de un análisis de regresión se demostró que la línea de tendencia nula (horizontal) se encuentra dentro del intervalo de confianza, y esto es debido a que el periodo de registro es corto.

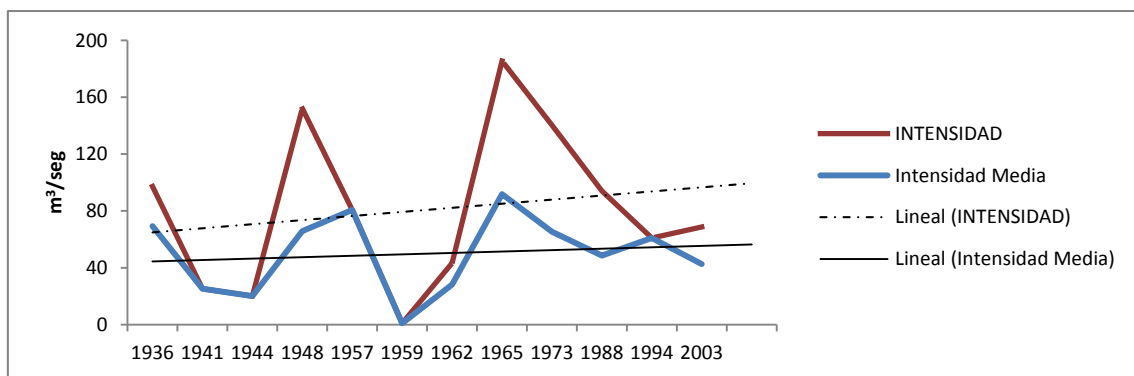


Figura 3.11. Intensidad máxima y media de las principales sequías en la cuenca del río Xanaes. Demanda definida con $Probabilidad(X_{jt} > x_{jt}) = 0,6$

Por lo tanto, se asume que para el período analizado, las tendencias de las intensidades media y máxima no son significativas (ver tabla 3.20). Con esto último se quiere resaltar que los eventos de sequías de los últimos años (que han impactado de manera apreciable a la sociedad) han sido de menor severidad a los registrados en la historia de los recursos hídricos disponibles. Por tal si se considera que las series son estacionarias se debería planificar para sequías como la ocurrida en 1965.

3.3.3. Río Anizacate

La serie de aportes del río Anizacate cuenta con datos desde 1925 a 1979 (ver Figura 3.12).

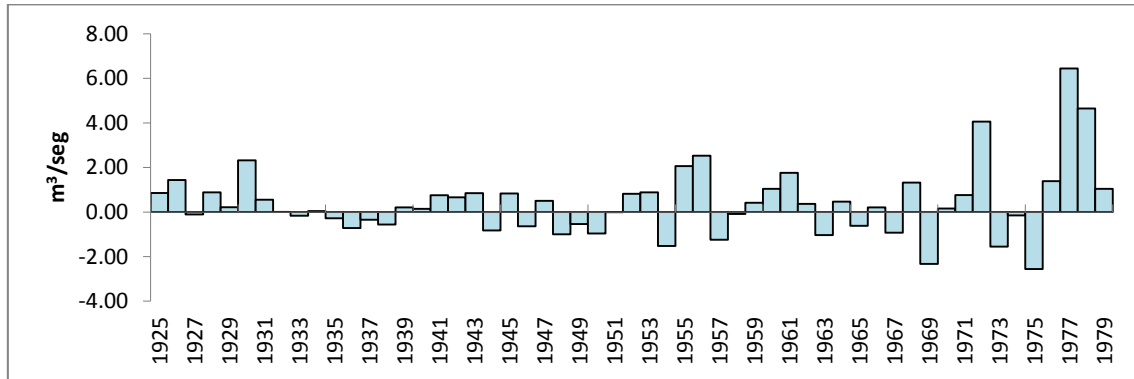


Figura 3.12. Series cronológicas de oferta menos demanda. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6.
Cuenca del río Anizacate.

Se observa que el 65% de los aportes son excesos. Sin embargo se identifican una sequía de seis años de duración en la década del 30' y otra de cuatro años a fines de la del 40'. En la década del 60 se observa que los años 63, 65, 67 y 69 son años de déficits con intensidades similares a las registradas en los años 30 y 40. En el año 1973 se identifica la sequía más severa en magnitud e intensidad. Ver Tabla 3.8 y Figura 3.13.

En la Figura 3.14 y 3.15 se observa que las intensidades tienen una tendencia creciente significativa para el período de registro.

Tabla 3.8. Parámetros de las sequías de la cuenca del río Anizacate.

AÑO	DURACIÓN [Años]	MAGNITUD [Hm³]	INTENSIDAD [m³/seg]	INTENSIDAD MEDIA [m³/seg]
1927	1	3,36	0,11	0,11
1933	6	63,83	0,72	0,34
1944	1	25,94	0,82	0,82
1946	1	20,10	0,64	0,64
1948	4	78,74	1,00	0,62
1954	1	47,94	1,52	1,52
1957	2	41,96	1,24	0,67
1963	1	32,57	1,03	1,03
1965	1	19,38	0,61	0,61
1967	1	29,18	0,93	0,93
1969	1	73,36	2,33	2,33
1973	3	134,32	2,55	1,42

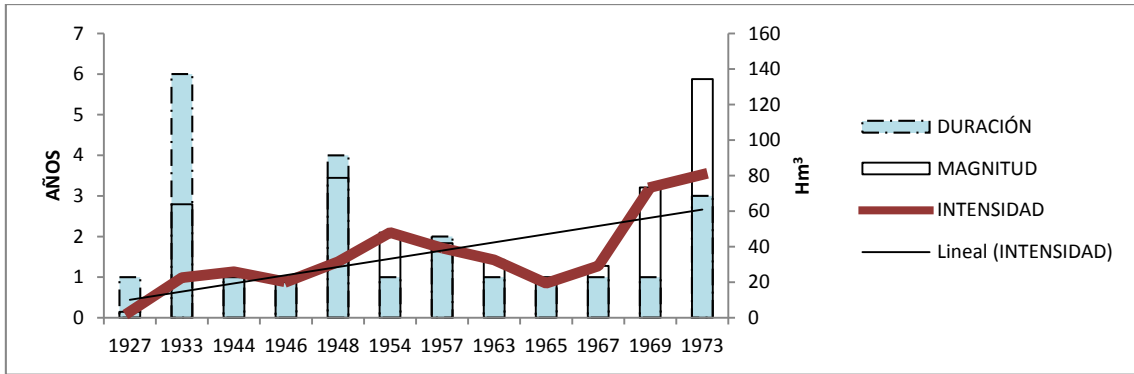


Figura 3.13. Duración, Magnitud e intensidad de las principales sequías en la cuenca del río Anizacate. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6

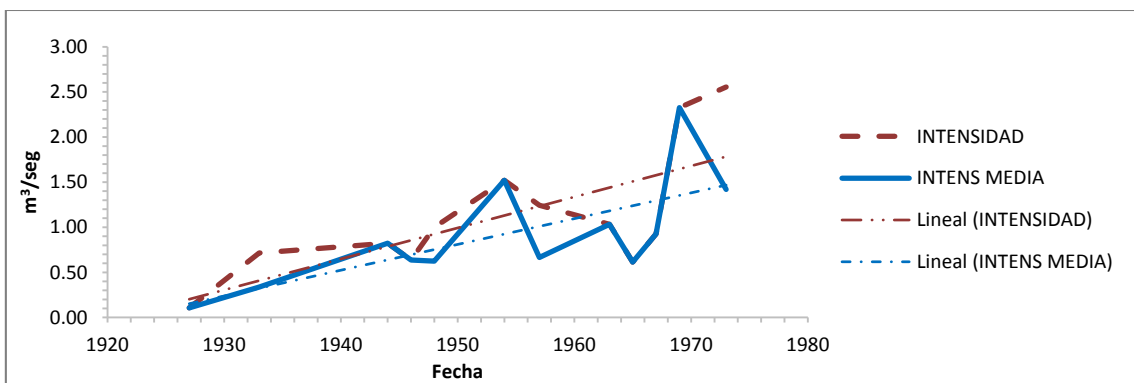


Figura 3.14. Intensidad máxima y media de las principales sequías en la cuenca del río Anizacate. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6

En la Figura 3.15 se exponen las sequías de la década del 30', 40' y la superposición de los años secos de la del 60'.

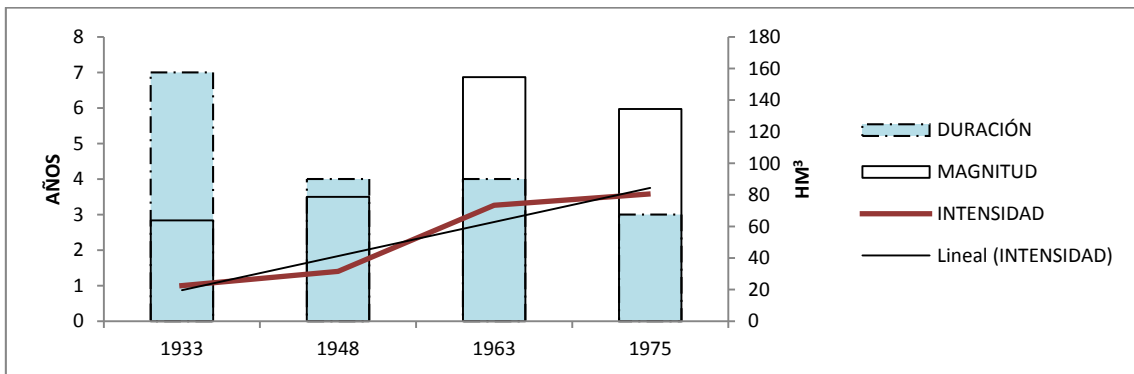


Figura 3.15. Duración, Magnitud e intensidad de las principales sequías en la cuenca del río Anizacate. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6

Se observa que esta última fue la sequía más severa en intensidad y magnitud, es decir que la cuenca no tiene un comportamiento lineal entre duración de sequía e intensidad-magnitud.

3.3.4. Río Suquía

La serie de aportes de la cuenca del río Suquía cuenta con datos desde 1926 a 2010 (ver Figura 3.16).

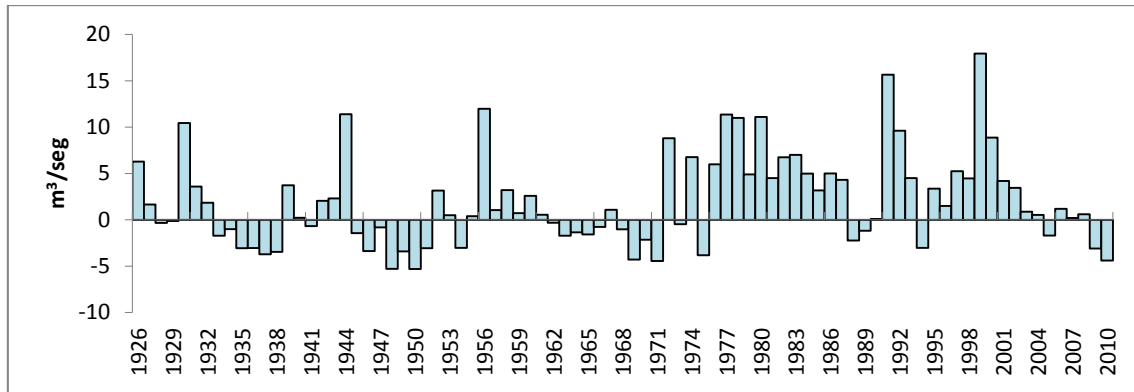


Figura 3.16. Series cronológicas de oferta menos demanda. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6. Cuenca del río Suquía.

Se distingue claramente un periodo caracterizado por déficits y otro por excesos de aportes anuales cuyo quiebre se da en 1975. En el primer periodo más del 60% de los aportes son déficits y el segundo más del 65% son excesos hídricos. En la Tabla 3.9 se exponen las características de las sequías identificadas.

Tabla 3.9. Parámetros de las sequías de la cuenca del río Suquía.

AÑO	DURACIÓN [Años]	MAGNITUD [Hm³]	INTENSIDAD [m³/seg]	INTENSIDAD MEDIA [m³/seg]
1928	2	14,61	0,34	0,23
1933	6	505,05	3,73	2,67
1941	1	21,71	0,69	0,69
1945	7	715,82	5,31	3,24
1954	1	95,73	3,04	3,04
1962	10	522,52	4,45	1,66
1973	1	15,07	0,48	0,48
1975	1	120,78	3,83	3,83
1988	2	107,81	2,23	1,71
1994	1	95,65	3,03	3,03
2005	1	53,63	1,70	1,70
2009	2	236,34	4,40	3,75

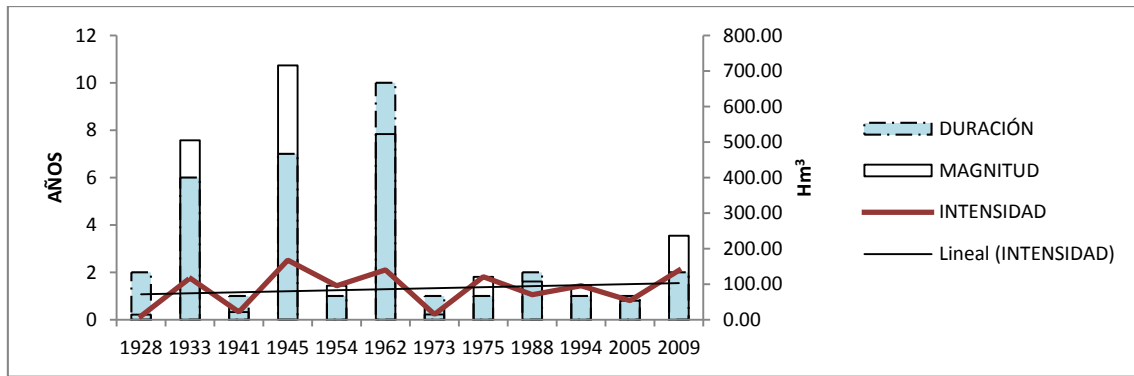


Figura 3.17. Duración, Magnitud e intensidad de las principales sequías en la cuenca del río Suquia. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6

Se identifican tres sequías de duración importante en la década del 30' (seis años), 40' (siete años) y 60' (10 años). Además se observa que los aportes anuales de la cuenca del río Suquia tuvieron un comportamiento cíclico con sequías de gran extensión temporal hasta la década del 70' y una tendencia positiva en cuanto a la duración y magnitud. Luego de esa década los periodos de sequías son más cortos en duración y magnitud, pero la intensidad se mantiene constante. Inclusive con una leve tendencia positiva, que no es significativa (ver Tabla 3.20).

La intensidad es el máximo déficit que experimenta la cuenca en un año. Y puede observarse en la Figura 3.18 que la intensidad de la sequía del año 2007 (4,40 m³/seg) es cercana a la del año 1962 (4,45 m³/seg). La intensidad máxima y media reflejan tener una tendencia positiva, que por análisis de regresión se observa que no es significativa.

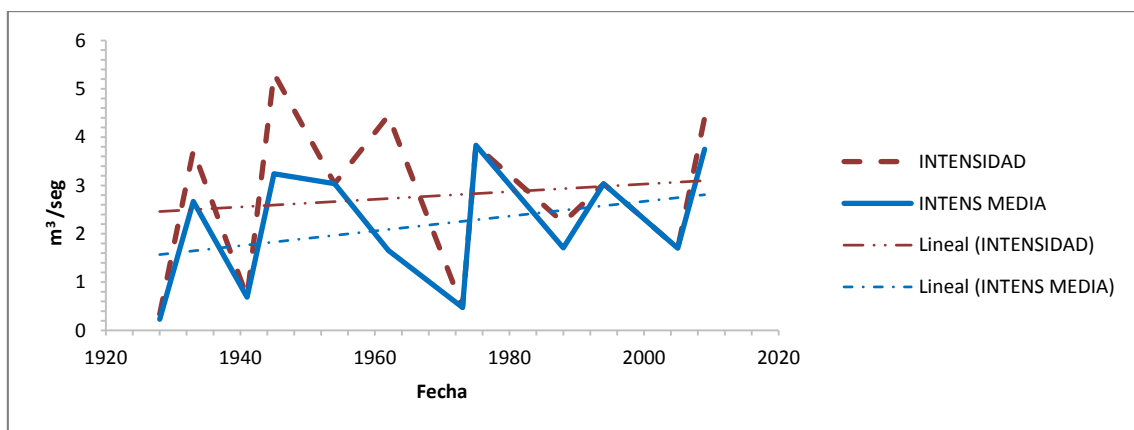


Figura 3.18. Intensidad e intensidad media de las principales sequías en la cuenca del río Suquia y línea de tendencia. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6

3.3.5. Río Dulce

La serie de aportes del río Dulce cuenta con datos desde 1926 a 2013. En la Figura 3.19 se representa el análisis de series de sucesiones.

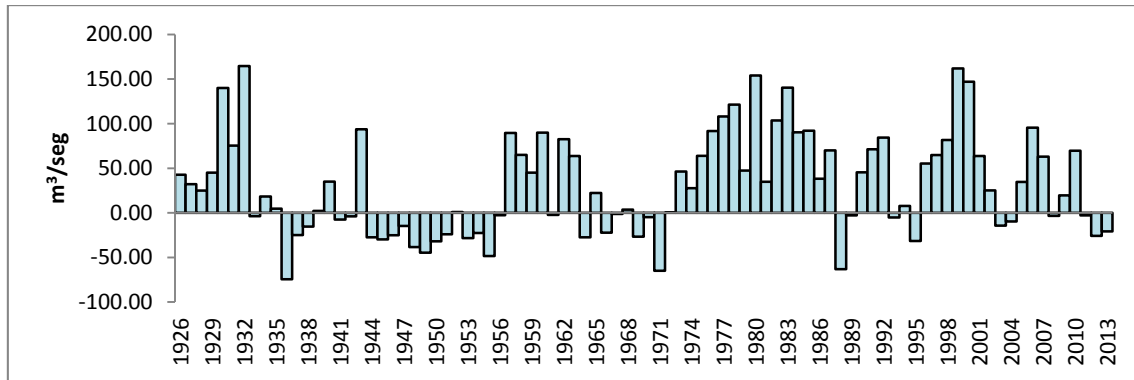


Figura 3.19. Series cronológicas de oferta menos demanda. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6.
Cuenca del río Dulce.

Se observan dos periodos, uno desde 1926 hasta 1972 con 60% de déficits y otro desde 1972 al 2013 con 75% de excesos. En el primer periodo las sequías se caracterizan por ser de gran extensión temporal y magnitud y en el segundo por ser de corta duración. En la Tabla 3.10 se reflejan los distintos parámetros que caracterizan a las sequías.

Tabla 3.10. Parámetros de las sequías de la cuenca del río Dulce.

AÑO	DURACIÓN [Años]	MAGNITUD [Hm³]	INTENSIDAD [m³/seg]	INTENSIDAD MEDIA [m³/seg]
1933	6	3734,86	74,52	19,74
1941	2	359,62	7,43	5,70
1944	13	10655,86	48,35	25,99
1964	1	866,50	27,48	27,48
1966	6	3779,06	64,91	19,97
1988	2	2079,29	63,13	32,97
1993	3	911,97	31,49	9,64
2003	2	756,06	14,26	11,99
2008	1	107,30	3,40	3,40
2011	3	1554,09	25,76	16,43

Se identifican tres períodos de sequías de extensión temporal significativa: década del 30', 40' y 60'. Con sequías que llegan hasta los 13 años. Luego en la década del 70 se observa un periodo húmedo de 15 años y sequías de menor duración pero de intensidad semejante a las observadas antes de 1970 (exceptuando la del 2008). En la Figura 3.21 se observa que las tendencias de las intensidades tienden a ser negativas, sin embargo el análisis de regresión demuestra que no son significativas las mismas (ver Tabla 3.20).

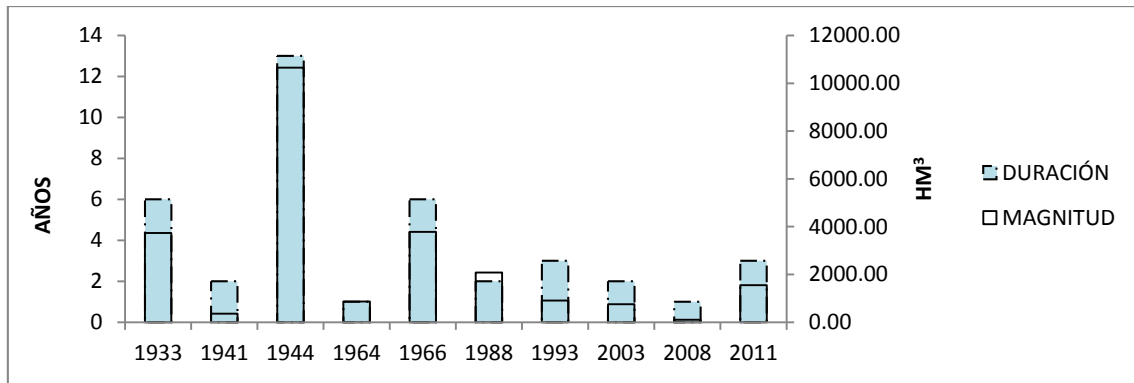


Figura 3.20. Duración, Magnitud e intensidad de las principales sequías en la cuenca del río Dulce. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6

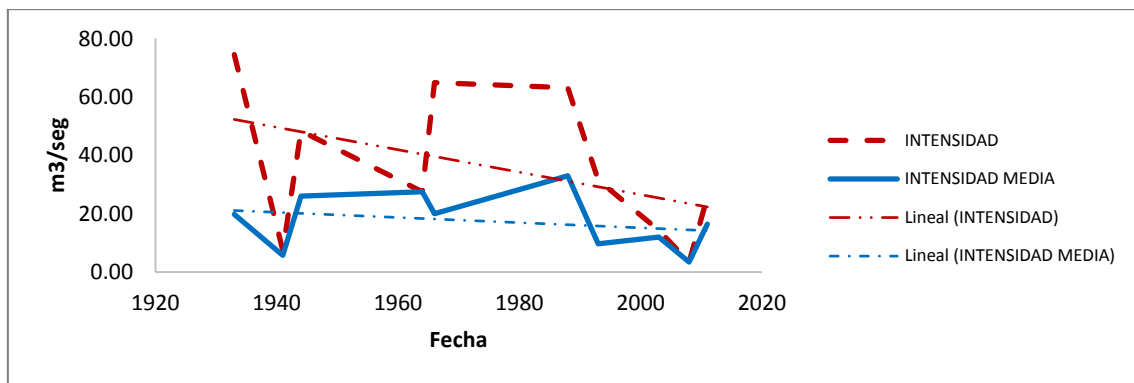


Figura 3.21. Intensidad máxima y media de las principales sequías en la cuenca del río Dulce. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6

3.3.6. Río Juramento

La serie de aportes cuenta con datos desde el año 1935 hasta 2012. Se observa en la Figura 3.22 que las sequías más largas en duración se dan a fines de la década del 40', 60' y principio de los 90'. En la Tabla 3.11 se presentan los parámetros que caracterizan las sequías en la cuenca del río Juramento.

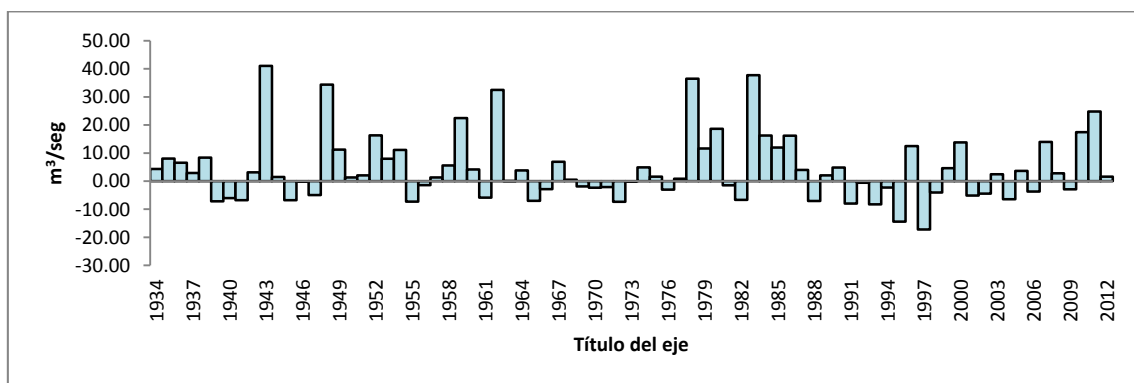


Figura 3.22. Series cronológicas de oferta menos demanda. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6. Cuenca del río Juramento.

Tabla 3.11. Parámetros de las sequías de la cuenca del río Juramento.

AÑO	DURACIÓN [Años]	MAGNITUD [Hm ³]	INTENSIDAD [m ³ /seg]	INTENSIDAD MEDIA [m ³ /seg]
1939	3	629,61	7,18	6,65
1945	3	372,12	6,77	3,93
1955	2	274,36	7,27	4,35
1961	1	184,49	5,85	5,85
1965	2	311,16	7,02	4,93
1969	5	431,52	7,36	2,74
1976	1	95,66	3,03	3,03
1981	2	46,20	1,46	0,73
1988	1	223,55	7,09	7,09
1991	5	966,45	14,41	6,13
1997	2	669,78	17,22	10,62
2001	2	301,59	5,11	4,78
2004	1	203,75	6,46	6,46
2006	1	116,68	3,70	3,70
2009	1	90,82	2,88	2,88

En cuanto a magnitud, las más severas se dan en la década del 30', 60' y 90'. En la década del 90' ocurrieron las sequías de mayor magnitud e intensidad. La tendencia de la intensidad media y máxima es constante (Ver Figura 3.23 y 3.24)

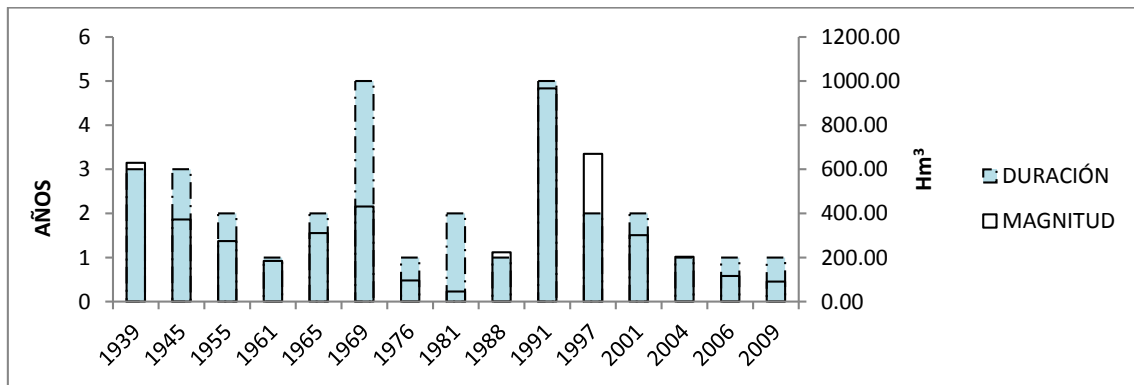


Figura 3.23. Duración, Magnitud e intensidad de las principales sequías en la cuenca del río Juramento. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6

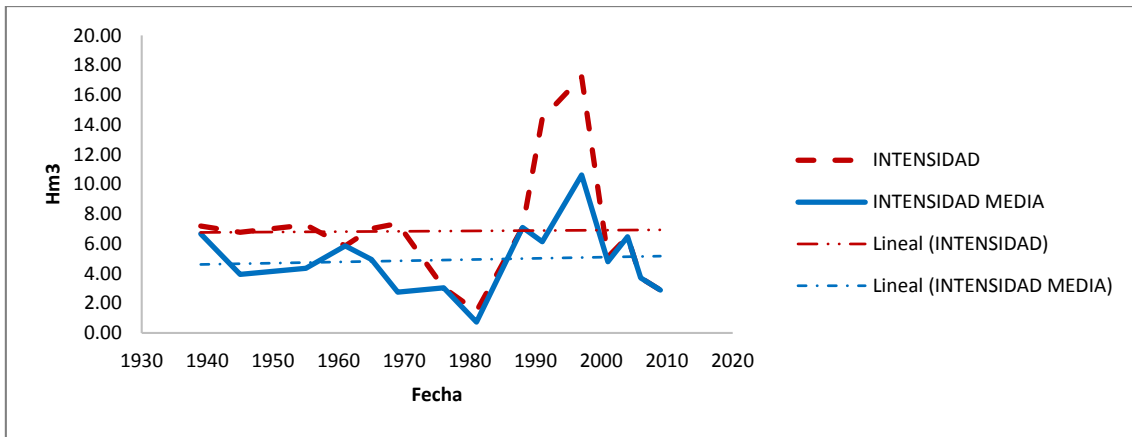


Figura 3.24. Intensidad máxima y media de las principales sequías en la cuenca del río Juramento. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)=0,6

3.3.7. Río Bermejo

La serie de aportes de la cuenca del río Bermejo cuenta con datos desde 1940 a 2013. Se observa en la Figura 3.25 dos periodos. Uno desde 1940 a 1972 donde más del 75% de los aportes son déficit y otro del 1972 a 2013 caracterizado porque más del 75% son excesos. Los parámetros de las sequías de la cuenca del río Bermejo se presentan en la Tabla 3.12

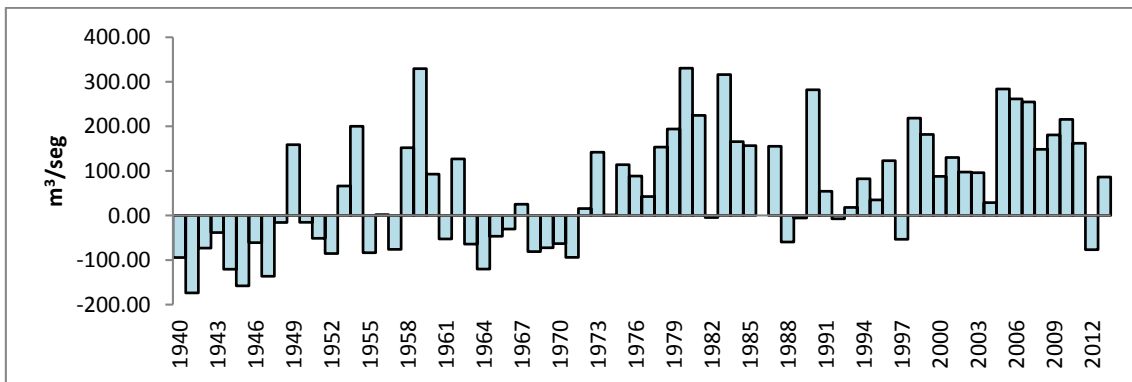


Figura 3.25. Series cronológicas de oferta menos demanda. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)=0,6. Cuenca del río Bermejo.

Tabla 3.12. Parámetros de las sequías de la cuenca del río Bermejo.

AÑO	DURACIÓN [Años]	MAGNITUD [Hm³]	INTENSIDAD [m³/seg]	INTENSIDAD MEDIA [m³/seg]
1940	9	27464,52	173,84	96,77
1950	3	4790,23	85,45	50,63
1955	3	4973,28	83,52	52,57
1961	1	1660,08	52,64	52,64
1963	9	18032,28	120,20	63,53

AÑO	DURACIÓN [Años]	MAGNITUD [Hm ³]	INTENSIDAD [m ³ /seg]	INTENSIDAD MEDIA [m ³ /seg]
1982	1	148,24	4,70	4,70
1988	2	2050,77	59,50	32,51
1992	1	229,86	7,29	7,29
1997	1	1687,87	53,52	53,52
2012	1	2419,05	76,71	76,71

Se identifican dos periodos de sequías que se corresponde con la década del 40'y 60'. La tendencia en la intensidad es decreciente y es significativa tal lo demuestra el análisis de regresión. Ver Tabla 3.20 y Figura 3.27.

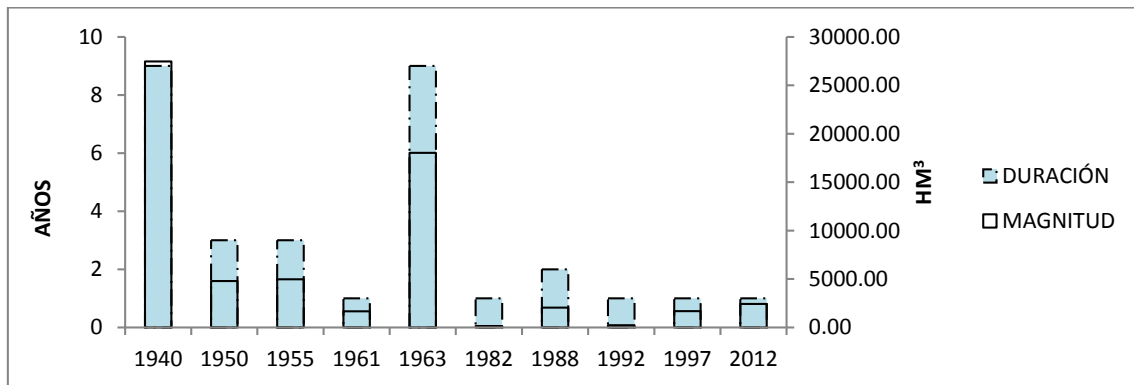


Figura 3.26. Duración y Magnitud de las principales sequías en la cuenca del río Bermejo. Demanda definida con $Probabilidad(X_{jt} > x_{jt}) = 0,6$

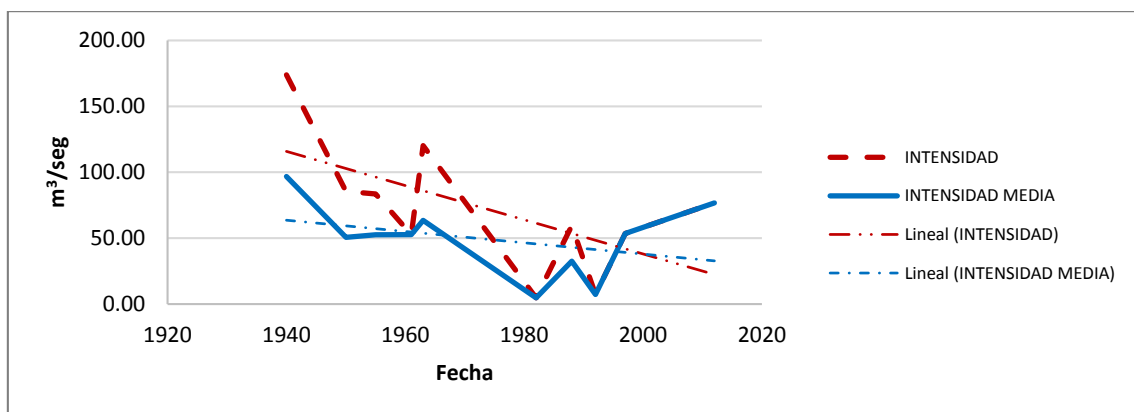


Figura 3.27. Intensidad máxima y media de las principales sequías en la cuenca del río Bermejo. Demanda definida con $Probabilidad(X_{jt} > x_{jt}) = 0,6$

3.3.8. Río Pilcomayo

La serie de aportes de la cuenca del río Pilcomayo cuenta con datos desde 1960 a 2013. Se destacan en la Figura 3.28 dos periodos de sequías importantes en las década del 60' y 90'. Los parámetros de las sequías de la cuenca del río Pilcomayo se presentan en la Tabla 3.13

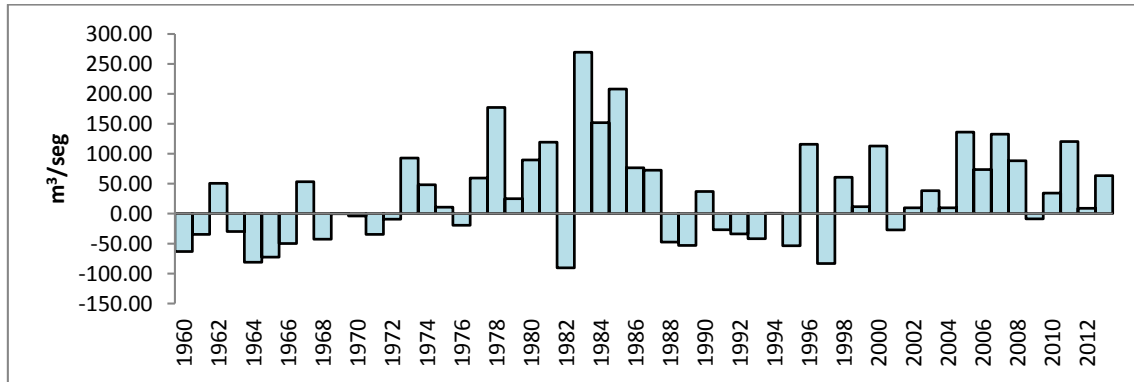


Figura 3.28. Series cronológicas de oferta menos demanda. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6.
Cuenca del río Pilcomayo.

Tabla 3.13. Parámetros de las sequías de la cuenca del río Pilcomayo.

AÑO	DURACIÓN [Años]	MAGNITUD [Hm ³]	INTENSIDAD [m ³ /seg]	INTENSIDAD MEDIA [m ³ /seg]
1960	2	3079,08	63,07	48,82
1963	4	7354,46	81,11	58,30
1968	5	2860,27	42,60	18,14
1976	1	607,80	19,27	19,27
1982	1	2848,46	90,32	90,32
1988	2	3172,57	53,06	50,30
1991	5	4924,38	53,56	31,23
1997	1	2623,23	83,18	83,18
2001	1	852,49	27,03	27,03
2009	1	273,88	8,68	8,68

Se identifica tres sequías importantes en magnitud y duración en la década del 60' y otra en la década del 90'. En cuanto a las sequías más intensas se dan en 1963, 1982 y 1997, que son de corta duración (ver Figura 3.29 y Figura 3.30).

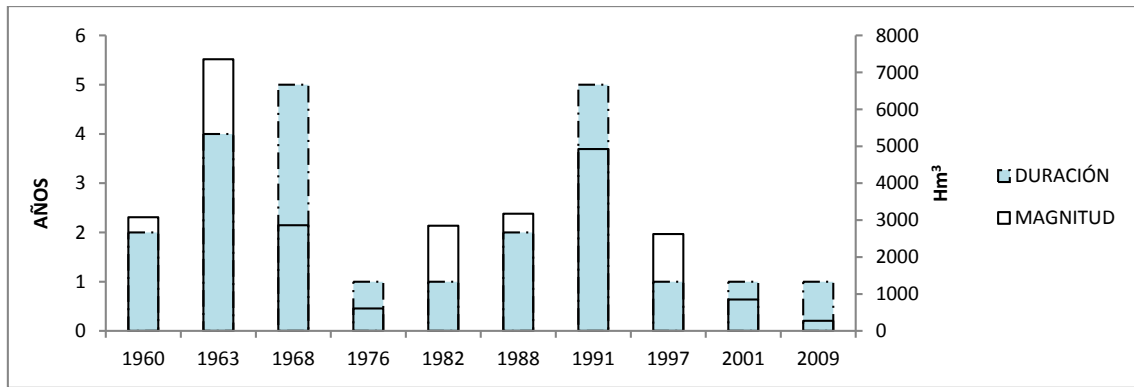


Figura 3.29. Duración y Magnitud de las principales sequías en la cuenca del río Pilcomayo. Demanda definida con $Probabilidad(X_{jt} > x_{jt}) = 0,6$

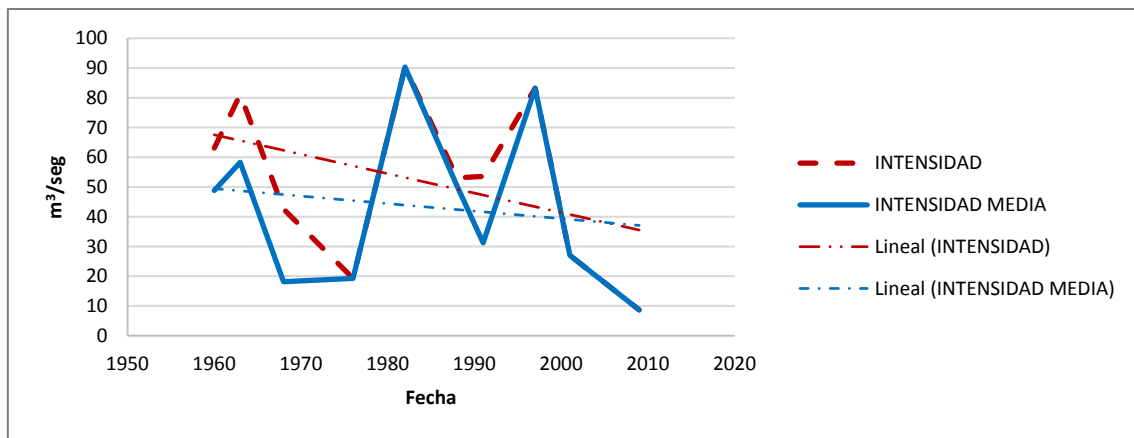


Figura 3.30. Intensidad máxima y media de las principales sequías en la cuenca del río Pilcomayo. Demanda definida con $Probabilidad(X_{jt} > x_{jt}) = 0,6$

3.3.9. Río Paraná

La serie de aportes de la cuenca del río Paraná tiene datos desde el año 1906 a 2013. En la Figura 3.31 se observa que hubo dos periodos. Uno desde 1906 a 1978 caracterizado porque el 57% de los aportes son déficits y otro desde 1972 a 2013 donde el 84% son excesos. Los parámetros de las sequías de la cuenca del río Pilcomayo se presentan en la Tabla 3.14.

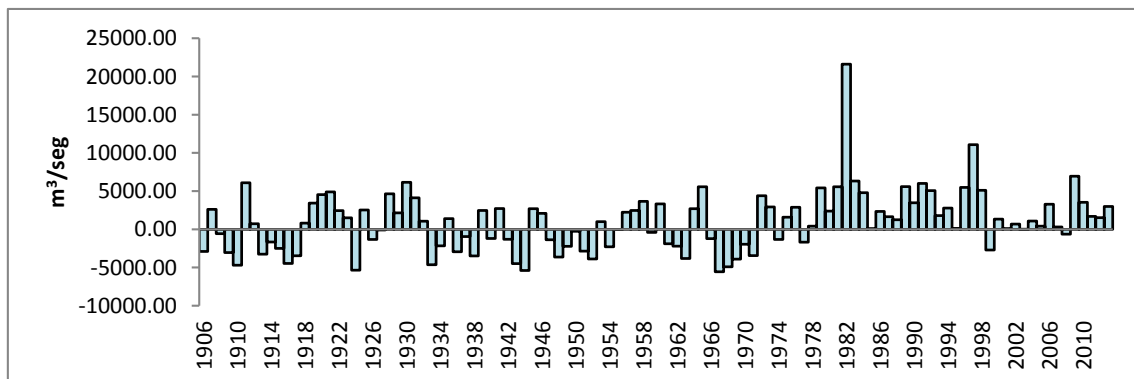


Figura 3.31. Series cronológicas de oferta menos demanda. Demanda definida con $Probabilidad(X_{jt} > x_{jt}) = 0,6$. Cuenca del río Paraná.

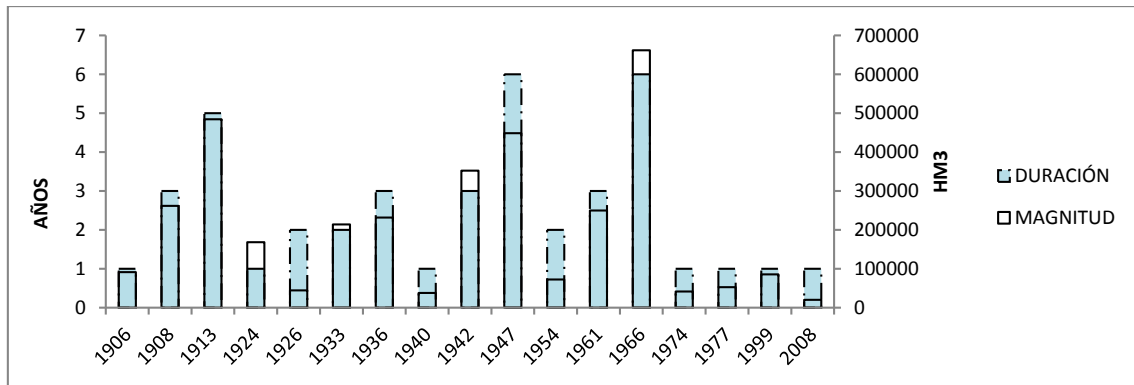


Figura 3.32. Duración y Magnitud de las principales sequías en la cuenca del río Paraná. Demanda definida con $Probabilidad(X_{jt} > x_{jt}) = 0,6$

Tabla 3.14. Parámetros de las sequías de la cuenca del río Paraná.

AÑO	DURACIÓN [Años]	MAGNITUD [Hm³]	INTENSIDAD [m³/seg]	INTENSIDAD MEDIA [m³/seg]
1906	1	91355,55	2896,87	2896,87
1908	3	261775,02	4690,20	2766,94
1913	5	484616,62	4478,58	3073,42
1924	1	168485,74	5342,65	5342,65
1926	2	41663,83	1321,15	704,17
1933	2	214339,48	4634,55	3398,33
1936	3	231997,81	3475,74	2452,20
1940	1	38042,29	1206,31	1206,31
1942	3	352591,06	5383,58	3726,86
1947	6	448802,34	3885,92	2371,90
1954	2	72625,42	2285,20	1151,47
1961	3	250102,21	3820,69	2643,56
1966	6	662105,61	5562,31	3499,21
1974	1	41566,75	1318,07	1318,07
1977	1	52860,76	1676,20	1676,20
1999	1	85700,46	2717,54	2717,54
2008	1	20105,27	637,53	637,53

Se identifican periodos de sequías temporal en las décadas del 10', 30', mediados de 40'- 50' y 60'. Se observa en la Figura 3.32 que las sequías más severas en duración, magnitud e intensidad se registran antes de 1975. Observándose sequías de hasta seis años de duración (1947 y 1966).

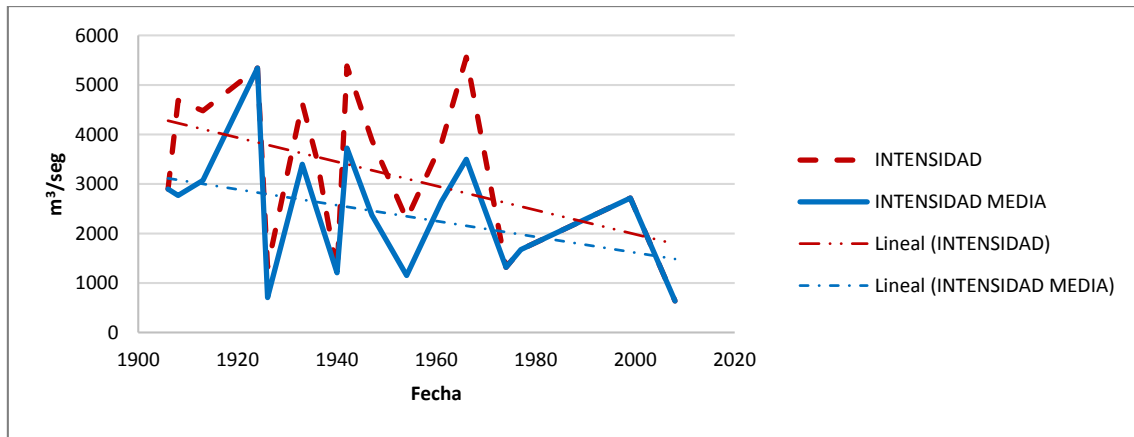


Figura 3.33. Series cronológicas de oferta menos demanda. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6. Cuenca del río Paraná.

3.3.10. Río Colorado

La serie de aportes de la cuenca del río Colorado que se muestra en la Figura 3.34 cuenta con datos desde 1940 a 2013. Luego, los parámetros de las sequías de esta cuenca se resumen en la Tabla 3.15.

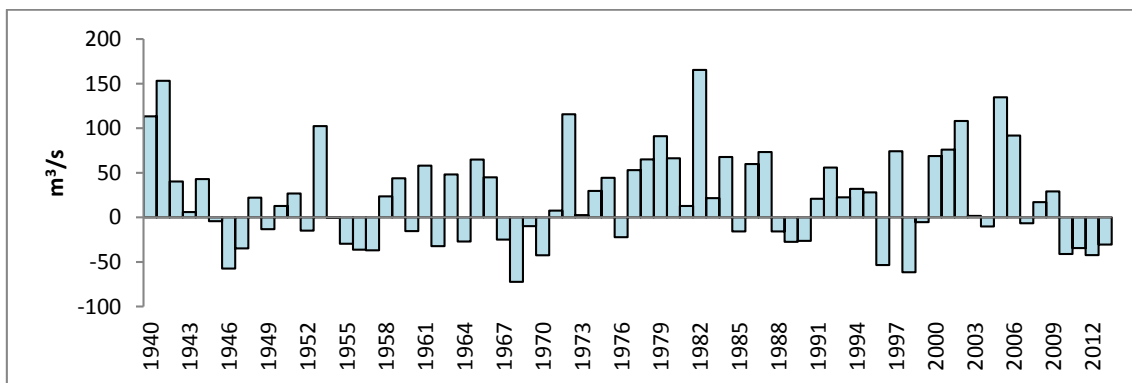


Figura 3.34. Series cronológicas de oferta menos demanda. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6. Cuenca del río Colorado.

Se observan sequías de duración mayor a cuatro años en la década del 50', 60', y fines del 2000. Notando una tendencia creciente en la intensidad máxima, media y magnitud. Se resalta que en la década del 60' y 90' hubieron sequías de corta duración, pero muy intensas. Que si se sumaran serían las más severas en magnitud de la historia (ver Figura 3.35 y Figura 3.36).

Tabla 3.15. Parámetros de las sequías de la cuenca del río Colorado.

AÑO	DURACIÓN [Años]	MAGNITUD [m³/seg]	INTENSIDAD [m³/seg]	INTENSIDAD MEDIA [m³/seg]
1945	3	3043,98	57,34	32,17
1949	1	420,64	13,34	13,34
1952	1	468,22	14,85	14,85
1955	4	3252,20	37,01	25,78
1960	1	483,82	15,34	15,34
1962	1	1017,25	32,26	32,26
1964	1	851,83	27,01	27,01
1967	4	4405,04	72,34	34,92
1976	1	699,08	22,17	22,17
1985	1	496,63	15,75	15,75
1988	3	2197,87	27,51	23,23
1996	1	1686,01	53,46	53,46
1998	2	2112,85	61,58	33,50
2004	1	321,26	10,19	10,19
2007	1	205,73	6,52	6,52
2010	4	4680,96	42,35	37,11

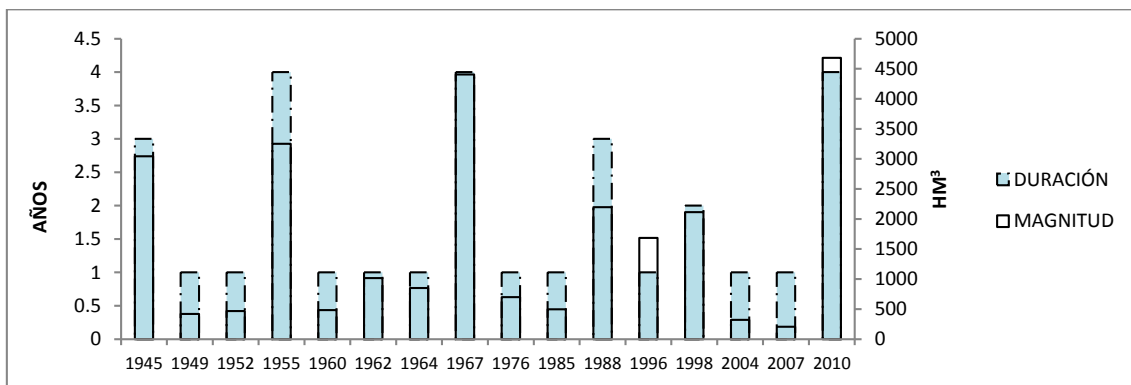


Figura 3.35. Duración y Magnitud de las principales sequías en la cuenca del río Colorado. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6

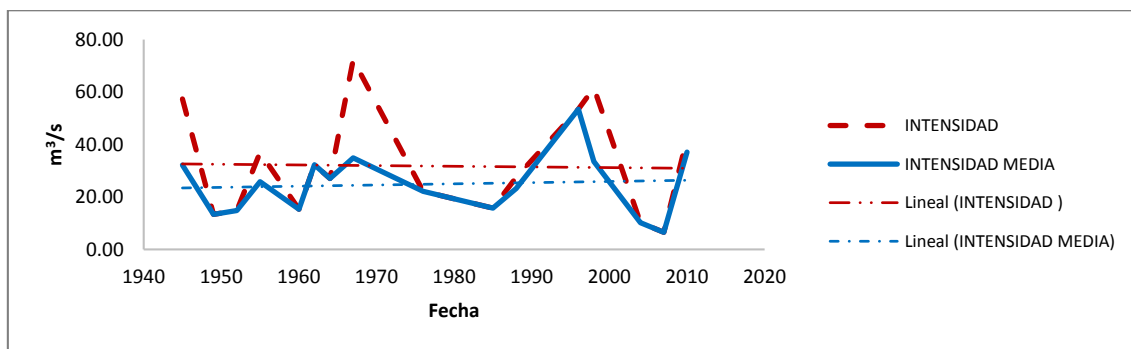


Figura 3.36. Intensidad máxima y media de las principales sequías en la cuenca del río Colorado. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6

3.3.11. Río Atuel

La serie de aportes de la cuenca del río Atuel que se muestra en la Figura 3.37, cuenta con datos desde 1906 a 2013. Luego, los parámetros de las sequías de esta cuenca se resumen en la Tabla 3.16.

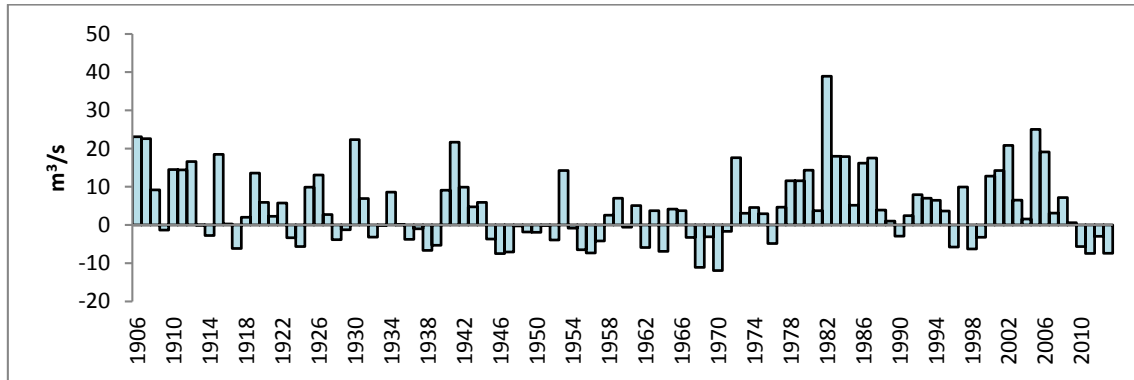


Figura 3.37. Series cronológicas de oferta menos demanda. Demanda definida con Probabilidad $(X_{jt} > x_{jt}) = 0,6$.
Cuenca del río Atuel.

Tabla 3.16. Parámetros de las sequías de la cuenca del río Atuel.

AÑO	DURACIÓN [Años]	MAGNITUD [Hm ³]	INTENSIDAD [m ³ /seg]	INTENSIDAD MEDIA [m ³ /seg]
1909	1	42,08	1,33	1,33
1913	2	86,77	2,75	1,38
1917	1	194,51	6,17	6,17
1923	2	283,86	5,67	4,50
1928	2	160,34	3,83	2,54
1932	2	102,62	3,17	1,63
1936	4	496,79	6,67	3,94
1945	8	828,06	7,50	3,28
1954	4	594,07	7,33	4,71
1960	1	18,42	0,58	0,58
1962	1	186,58	5,92	5,92
1964	1	218,12	6,92	6,92
1967	5	977,89	11,92	6,20
1976	1	152,45	4,83	4,83
1990	1	91,94	2,92	2,92
1996	1	182,69	5,79	5,79
1998	2	299,63	6,29	4,75
2010	4	741,55	7,46	5,88

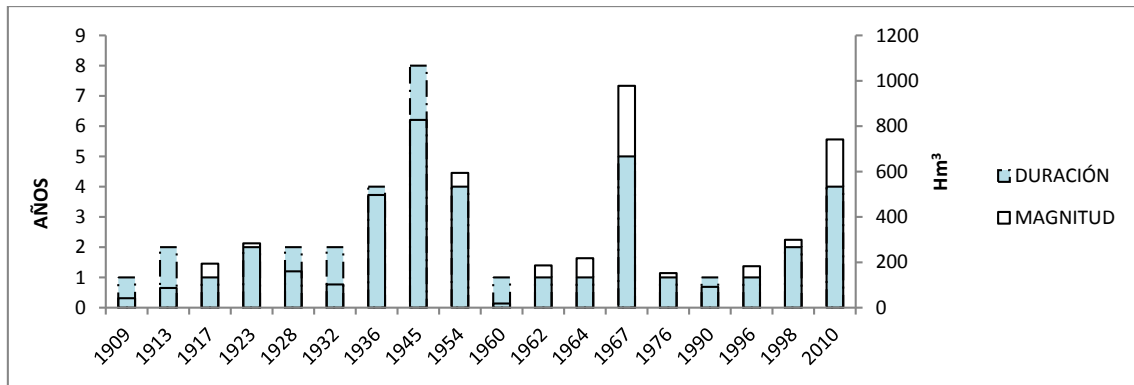


Figura 3.38. Duración y Magnitud de las principales sequías en la cuenca del río Atuel. Demanda definida con $Probabilidad(X_{jt} > x_{jt}) = 0,6$

Las sequías más severas en duración y magnitud se registraron en 1945 y 1967 respectivamente.

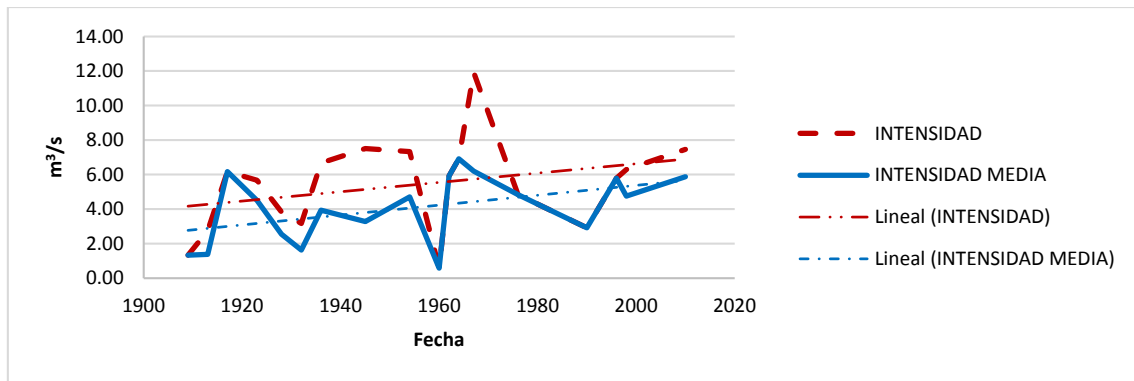


Figura 3.39. Intensidad máxima y media de las principales sequías en la cuenca del río Atuel. Demanda definida con $Probabilidad(X_{jt} > x_{jt}) = 0,6$

3.3.12. Río San Juan

La serie de aportes de la cuenca del río San Juan que se muestra en la Figura 3.4, cuenta con datos desde 1909 a 2013. Los parámetros de las sequías de esta cuenca se resumen en la Tabla 3.17

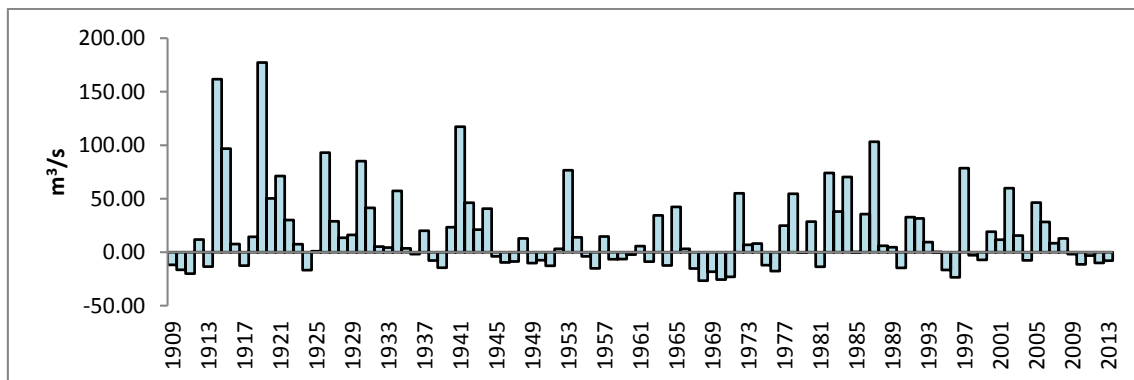


Figura 3.40. Series cronológicas de oferta menos demanda. Demanda definida con $Probabilidad(X_{jt} > x_{jt}) = 0,6$. Cuenca del río San Juan.

Tabla 3.17. Parámetros de las sequías de la cuenca del río Atuel.

AÑO	DURACIÓN [Años]	MAGNITUD [Hm ³]	INTENSIDAD [m ³ /seg]	INTENSIDAD MEDIA [m ³ /seg]
1909	3	1.529,25	20,12	16,16
1913	1	426,54	13,53	13,53
1917	1	394,92	12,52	12,52
1924	1	528,41	16,76	16,76
1938	2	707,41	14,57	11,22
1945	3	698,32	9,53	7,38
1949	3	959,07	12,67	10,14
1955	2	602,95	15,15	9,56
1958	3	485,83	6,57	5,14
1962	1	279,56	8,86	8,86
1964	1	393,15	12,47	12,47
1967	5	3.433,14	26,65	21,77
1975	2	943,69	17,74	14,96
1981	1	432,21	13,71	13,71
1990	1	465,17	14,75	14,75
1995	2	1.266,59	23,55	20,08
1998	1	317,63	7,19	10,07
2004	1	242,58	7,69	7,69
2009	5	1.084,89	11,40	6,88

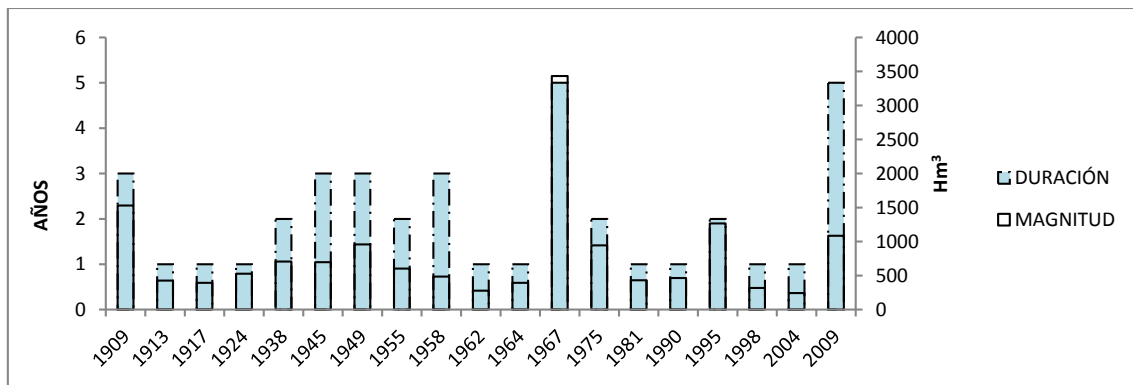


Figura 3.41. Duración y Magnitud de las principales sequías en la cuenca del río San Juan. Demanda definida con $Probabilidad(X_{jt} > x_{jt}) = 0,6$

En la Figura anterior se destaca que hasta 1975 se registraron 13 sequías, mientras que después de esa fecha solo seis. La sequía más severa en magnitud ocurrió en 1967, y las más extensa en 1967 y 2009.

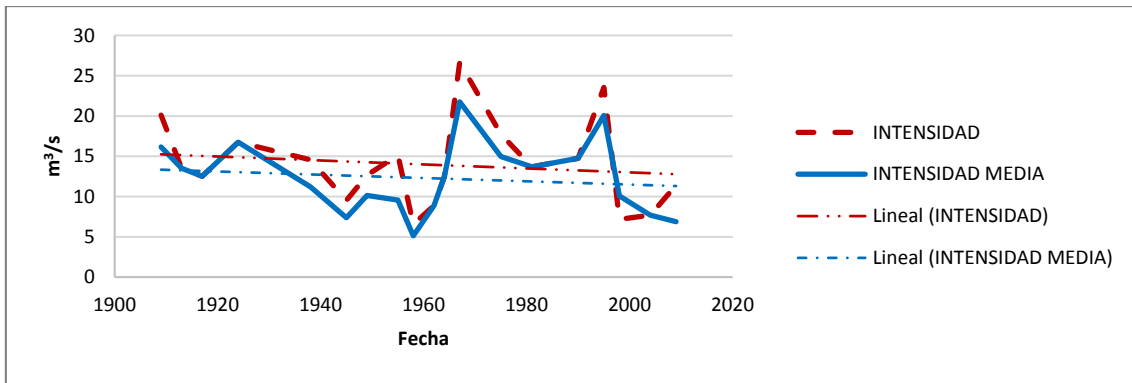


Figura 3.42. Intensidad máxima y media de las principales sequías en la cuenca del río San Juan. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6

3.3.13. Río Mendoza

La serie de aportes de la cuenca del río Mendoza que se muestra en la Figura 3.43, cuenta con datos desde 1956 a 2013. Luego, los parámetros de las sequías se resumen en la Tabla 3.18.

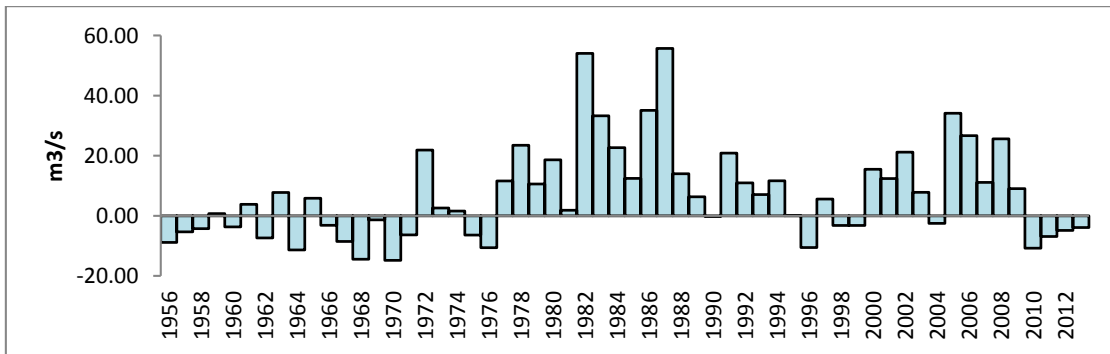


Figura 3.43. Series cronológicas de oferta menos demanda. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6. Cuenca del río Mendoza.

Tabla 3.18. Parámetros de las sequías de la cuenca del río Mendoza.

AÑO	DURACIÓN [Años]	MAGNITUD [Hm³]	INTENSIDAD [m³/seg]	INTENSIDAD MEDIA [m³/seg]
1956	3	582,35	279,12	6,16
1960	1	116,20	116,20	3,68
1962	1	231,82	231,82	7,35
1964	1	357,93	357,93	11,35
1966	6	1.434,67	468,28	7,58
1975	2	537,17	334,30	8,52
1990	1	5,26	5,26	0,17
1996	1	333,74	333,74	10,58
1998	2	202,75	101,82	3,21
2004	1	79,88	79,88	2,53
2010	4	833,82	339,94	6,61

La sequía más severa en duración y magnitud ocurrió en 1966. El segundo evento de sequía más extenso se registró en el año 2010. Las líneas de tendencias de las intensidades máximas y medias de las sequías no son significativas para el periodo considerado (Ver Tabla 3.20).

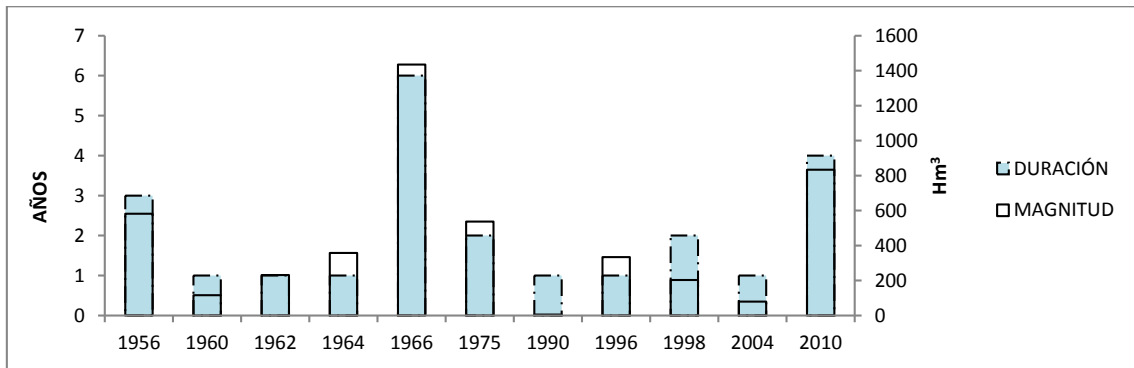


Figura 3.44. Duración y Magnitud de las principales sequías en la cuenca del río Mendoza. Demanda definida con $Probabilidad(X_{jt} > x_{jt}) = 0,6$

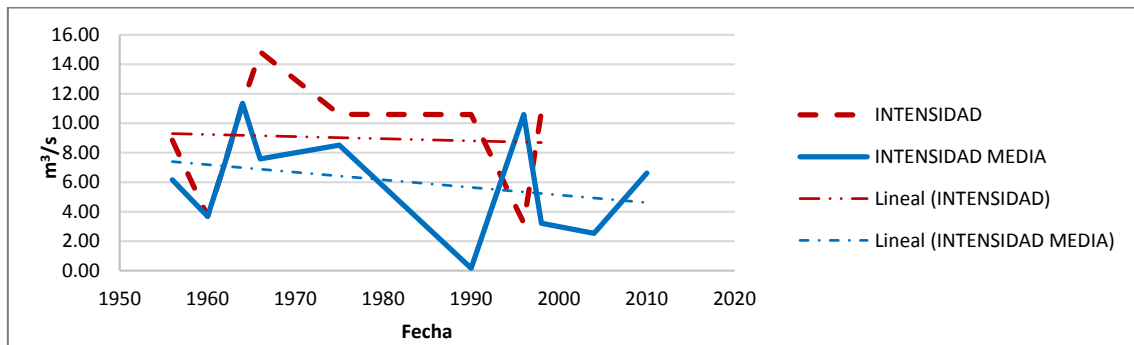


Figura 3.45. Intensidad máxima y media de las principales sequías en la cuenca del río Mendoza. Demanda definida con $Probabilidad(X_{jt} > x_{jt}) = 0,6$

3.3.14. Río Salado

La serie de aportes de la cuenca del río Salado que se muestra en la Figura 3.46, cuenta con datos desde 1954 a 2013. Los parámetros de las sequías de esta cuenca se resumen en la Tabla 3.19.

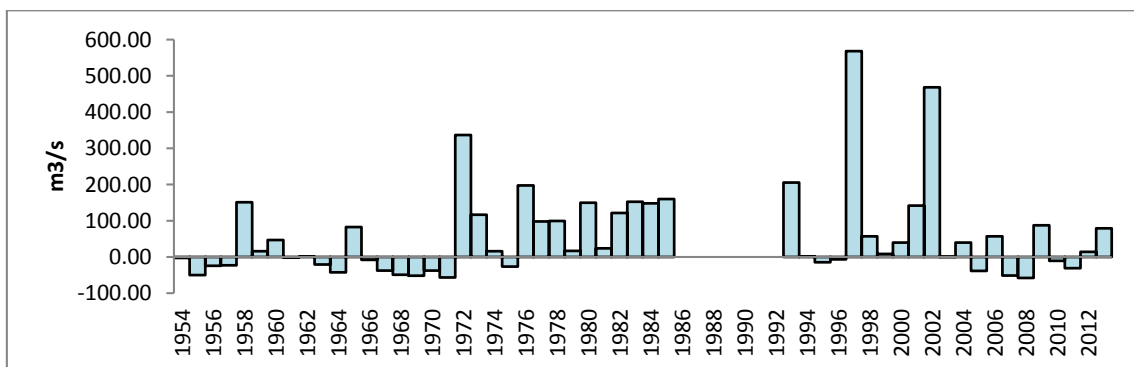


Figura 3.46. Series cronológicas de oferta menos demanda. Demanda definida con $Probabilidad(X_{jt} > x_{jt}) = 0,6$. Cuenca del río Salado.

Tabla 3.19. Parámetros de las sequías de la cuenca del río Salado.

AÑO	DURACIÓN [Años]	MAGNITUD [Hm ³]	INTENSIDAD [m ³ /seg]	INTENSIDAD MEDIA [m ³ /seg]
1954	4	3.180,17	50,23	25,21
1961	4	2.055,92	42,64	16,30
1966	6	7.591,50	56,48	40,12
1975	1	845,50	26,81	26,81
1995	2	682,78	14,82	10,83
2005	1	1.208,41	38,32	38,32
2007	2	3.454,69	58,06	54,77
2010	2	1.311,10	31,02	20,79

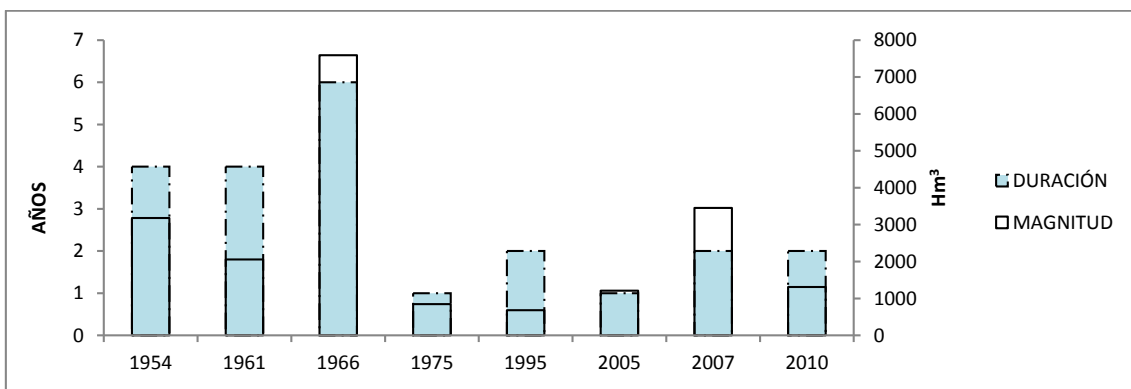


Figura 3.47. Duración y Magnitud de las principales sequías en la cuenca del río Salado. Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6

En la Figura anterior puede observarse que la sequía más severa en duración y magnitud ocurrió en 1966.

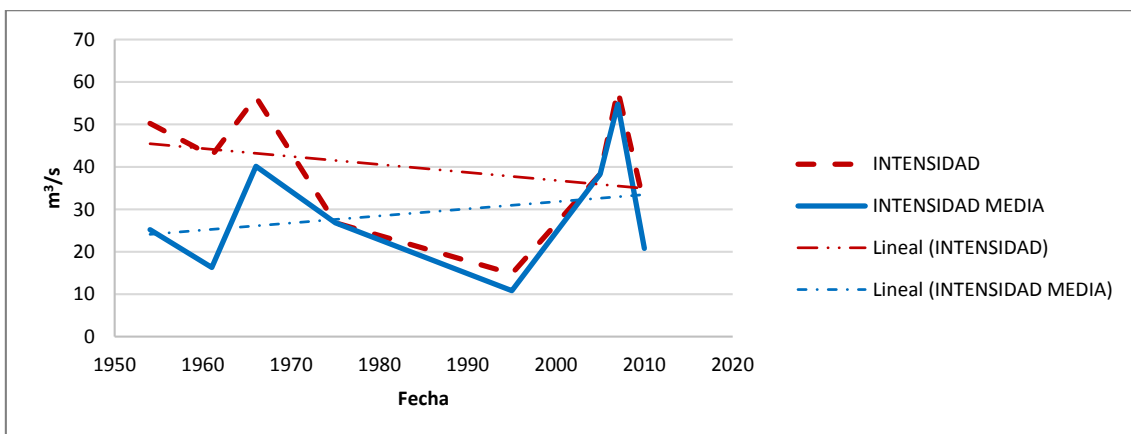


Figura 3.48. Intensidad máxima y media de las principales sequías en la cuenca del río Salado Demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,6

Tabla 3.20. Resultado de análisis de regresión de líneas de tendencia de intensidad de sequías

	I máxima				I media			
	<i>Coficie</i>	<i>Probab</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Coficie</i>	<i>Probab</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Suquía	0,50	0,47	-1,02	2,03	0,22	0,67	-0,92	1,37
Xanaes	-0,47	0,58	-2,30	1,35	-0,30	0,48	-1,21	0,60
Anizacate	1,08	0,008	0,34	1,82	0,89	0,011	0,25	1,54
Ctalamochita	0,25	0,85	-2,58	3,08	-1,53	0,59	-5,76	3,46
Dulce	-0,60	0,12	-1,44	0,22	-0,11	0,58	-0,56	0,35
Colorado	-0,025	0,92	-0,55	0,50	0,045	0,76	-0,27	0,36
Juramento	-0,008	0,84	-0,092	0,076	0,009	0,72	-0,045	0,063
Bermejo	-2,39	0,002	-3,65	-1,13	-1,50	0,003	-2,38	-0,62
Pilcomayo	-0,43	0,47	-1,74	0,88	-0,20	0,74	-1,51	1,12
Paraná	-32,33	0,006	-54,25	-10,40	-25,2	0,003	-40,45	-9,93
San Juan	-0,024	0,56	-0,11	0,06	-0,02	0,56	-0,09	0,05
Mendoza	-0,004	0,96	-0,17	0,16	-0,05	0,38	-0,18	0,07
Salado	-0,18	0,50	-0,83	0,45	0,16	0,53	-0,45	0,78
Atuel	0,85	0,20	-0,51	2,21	0,90	0,06	-0,03	1,84

3.4. Análisis de las sequías en las cuencas estudiadas

En este primer análisis se resalta el orden de magnitud que tienen los distintos parámetros que caracterizan a las sequías y la simultaneidad de los déficits y excesos hídricos que se registraron entre las distintas cuencas.

3.4.1. Análisis de parámetros críticos en las sequías históricas

En la Figura 3.49 se exponen los máximos parámetros de las sequías identificadas para las distintas cuencas analizadas. En esta etapa se considera una demanda definida con $\text{Probabilidad}(X_{jt} > x_{jt}) = 0,7$. Se utilizó este criterio a los fines de poder contrastar con las sequías hidrológicas ocurridas en Chile.

En la siguiente figura se observa que las duraciones de las sequías para las cuencas de la provincia de Córdoba van desde cuatro años para la cuenca del río Anizacate hasta siete años para las cuencas de los ríos Suquía y Xanaes. La cuenca del río Dulce presenta una sequía de hasta 13 años. Hacia el norte las cuencas de los ríos Bermejo y Pilcomayo han tenido sequías de duraciones de nueve y cuatro años, respectivamente. Hacia el oeste la cuenca del río Atuel tuvo una sequía de ocho años de duración. Esto pone en evidencia que las sequías tienen escalas temporales significativas, para lo cual los sistemas deben estar preparados.

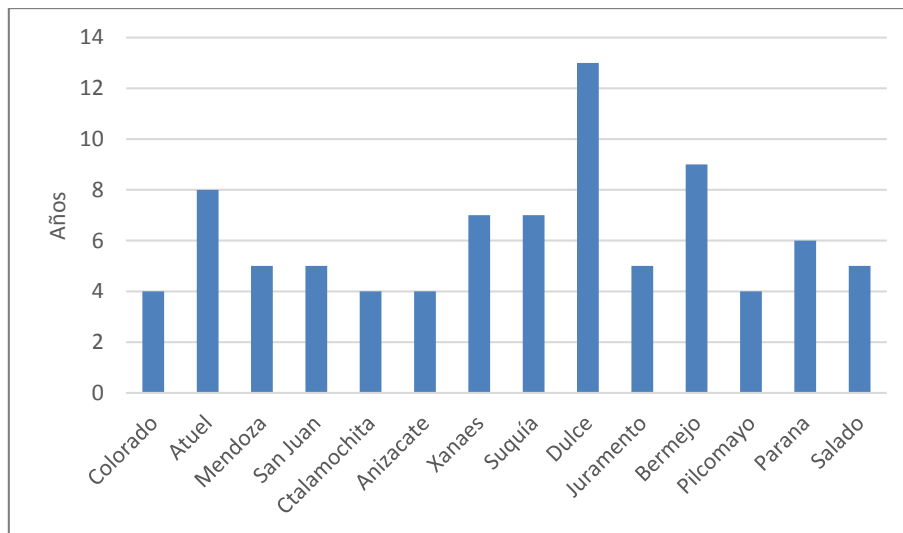


Figura 3.49. Máximas duraciones observadas en las distintas cuencas para una demanda definida con $\text{Probabilidad}(X_{jt} > x_{jt}) = 0,7$

Para el análisis de intensidad máxima y magnitud se ha dividido el valor observado por la media de los aportes anuales de cada cuenca (x) de manera de uniformizar las comparaciones. Las intensidades máximas registradas son los déficits máximos anuales observados durante una sequía. Puede observarse en la Figura 3.50 que estos son del orden de 0,25 a 0,6 veces la

media de los caudales anuales de cada cuenca. Es decir que los sistemas de aprovechamiento de aportes de las distintas cuencas deberían estar preparados para déficits que representan hasta en el 60% del valor medio de aportes anuales.

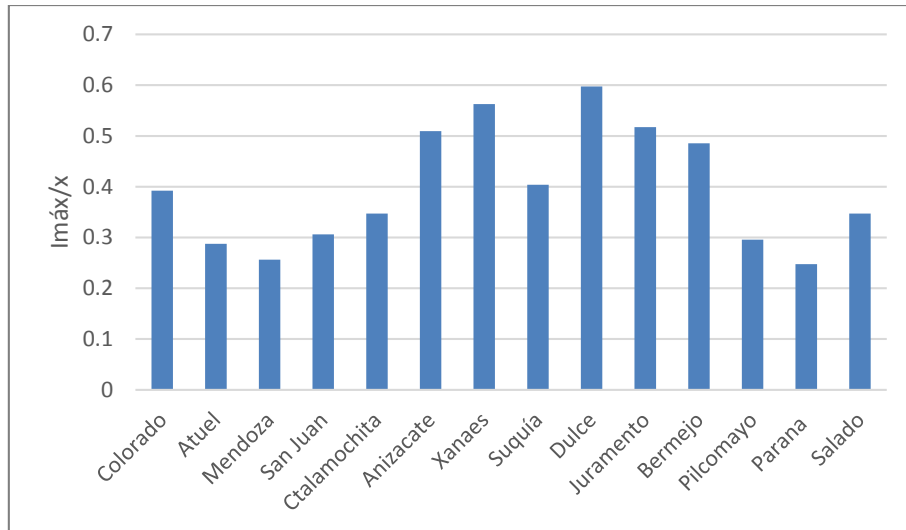


Figura 3.50. Máximas intensidades observadas de las sequías en las distintas cuencas para una demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,7

Cuando se analiza la magnitud, se está haciendo referencia a la suma de los déficits de una sequía. En la Figura 3.51 se observa que este valor oscila de 0,6 a 2,5 veces la media de aportes anuales que entran a las cuencas. Esta podría considerarse como una variable más a considerar en el diseño de los embalses para abastecimiento de agua.

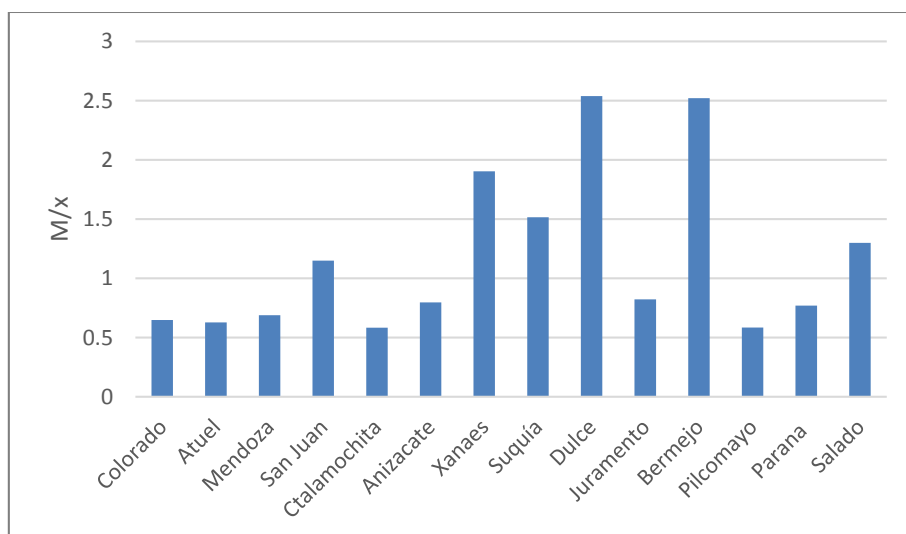


Figura 3.51. Máximas magnitudes observadas de las sequías en las distintas cuencas para una demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,7

3.4.2. Análisis de simultaneidad de extremos hídricos

Mediante el análisis de identificación y caracterización de sequías se puede destacar que en todas cuencas (excepto la de los ríos Colorado, Juramento, Anizacate, san Juan y Mendoza) se identifica un quiebre en el año 1976 que marca dos períodos. Antes de 1976 se caracteriza porque más del 60% de los derrames anuales son déficits y a partir de 1976 (de menor cantidad de años) más del 60% de los derrames son excesos.

En todas las series se identificaron periodos comunes de sequías (severas en duración y magnitud) en las décadas del 30', 40' y 60'. A partir de 1976 se observan periodos prolongados de años húmedos en todas las cuencas, (excepto la de los ríos Juramento y Colorado) y periodos de sequías de menor duración a las identificadas antes de ese año. En esta etapa se detectaron los máximos caudales históricos para todas las cuencas.

A continuación, en la Figura 3.52, Figura 3.53, y Figura 3.54 se exponen los máximos valores identificados de la caracterización de sequías dividida por el aporte anual medio $[\bar{X}]$ de cada cuenca. Esta permite distinguir los años en los que ocurrieron las sequías más severas para cada cuenca y el orden de magnitud de las mismas (con respecto a la media de aportes anuales) para un umbral con 70% de probabilidad de excedencia.

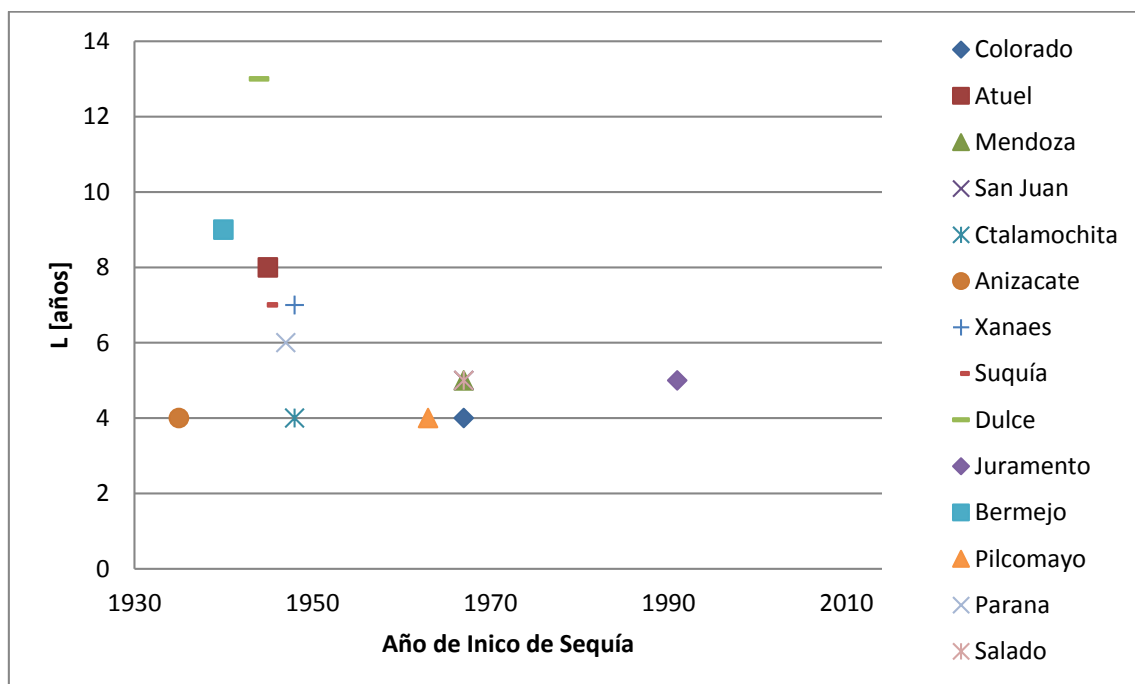


Figura 3.52. Máximas duraciones de sequías observadas en las distintas cuencas para una demanda definida con $\text{Probabilidad}(X_{jt} > x_{jt}) = 0,7$

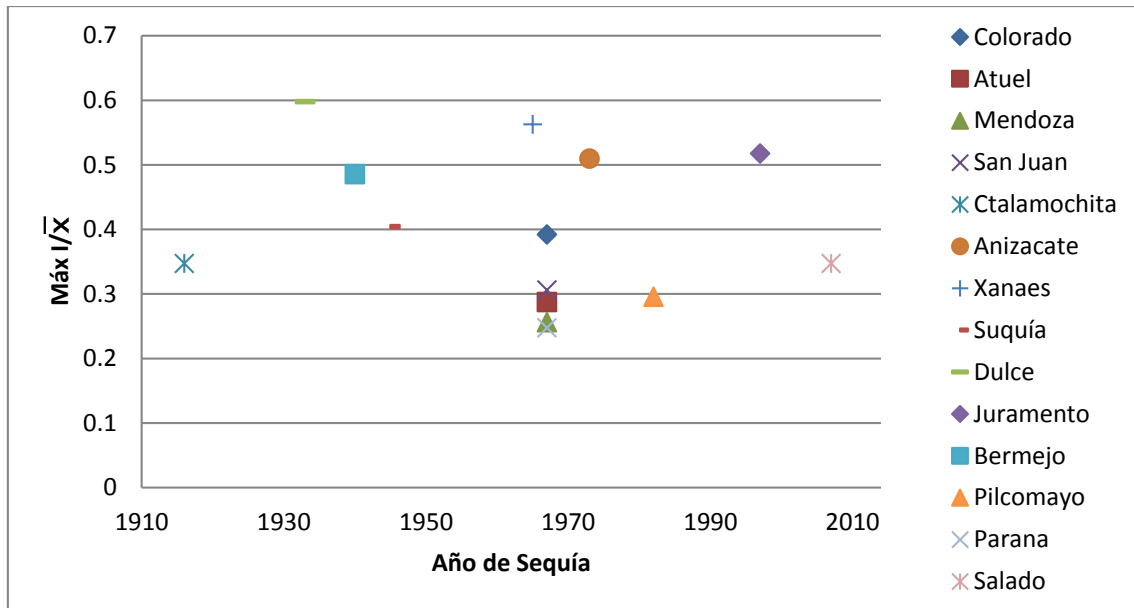


Figura 3.53. Máximas intensidades de sequías observadas en las distintas cuencas para una demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,7

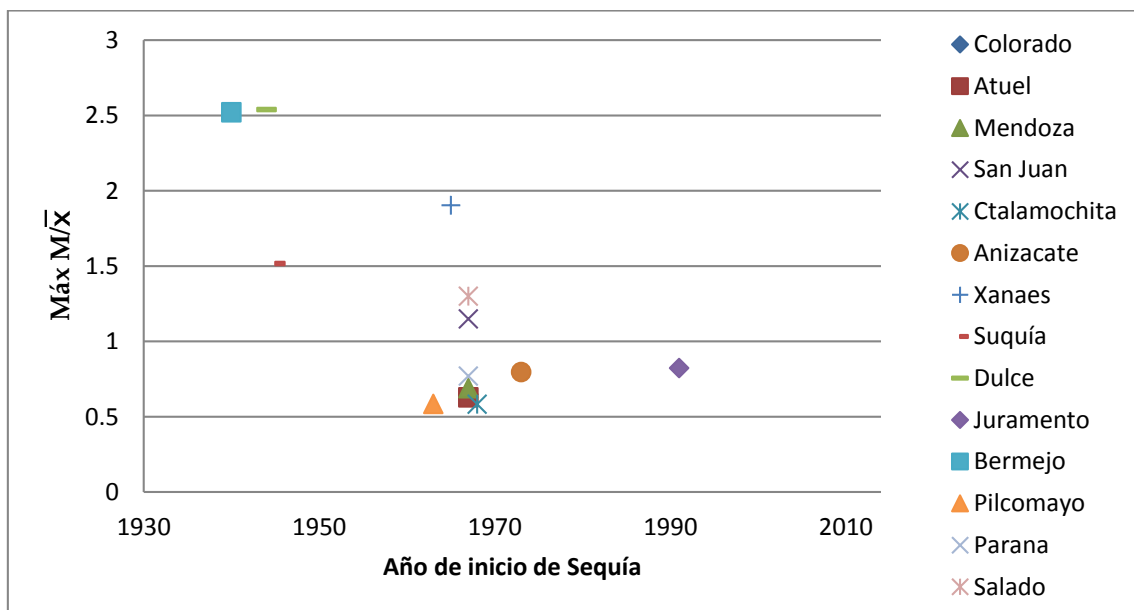


Figura 3.54. Máximas magnitudes (M) de sequías observadas en las distintas cuencas para una demanda definida con Probabilidad($X_{jt} > x_{jt}$)= 0,7

En la gráfica de duración y magnitud se observa que las sequías más críticas, de cada cuenca, se registraron a mediados de la década del 40' y del 60' (excepto la para cuenca del río Juramento que se registró en 1991). Y, en el año 1967 se inicia la sequía más severa en cuanto a magnitud en la mayoría de las cuencas (Colorado, Atuel, Mendoza, San Juan, Ctalamochita, Xanaes, Pilcomayo, Paraná y Salado). Este resultado coincide con estudios de Ravelo et. al

(1999); Mauas et al (2008); Rivera y Penalba (2013) y con la sequía más severa identificada en Chile (Fernández Larrañaga, 1997). Las sequías más largas tuvieron una duración de 4 a 13 años y la magnitud varia del orden de 0,6 a 2,5 veces la media. En cuanto a las máximas intensidades de sequías estas se registraron antes de 1970 para la mayoría de las cuencas (excepto para Juramento, Pilcomayo y Salado).

En la gráfica de intensidad media se observa que las cuencas de los ríos Colorado (1998), Juramento (1997) y Salado (2007) presentaron en las últimas décadas sequías de menor duración pero de mayor magnitud.

En la Figura 3.53 y Figura 3.54 puede observarse que la cuenca del río Colorado presenta una sequía en el año 1967 de cinco años de duración la cual coincide con las sequías hidrológicas detectadas en la zona central de Chile (Fernández, 1997). Esta sequía ha sido la más severa en cuanto a magnitud e intensidad máxima y no se han registrado eventos semejantes en la última década. Sin embargo, en el año 2009 la provincia de Río Negro (junto a las provincias de Buenos Aires, Santa Fe y Corrientes) ha tenido las mayores pérdidas económicas a causa de sequías en el sector ganadero y agrícola (InformCampo, 2009). Este evento representa la tercera parte del peor evento observado en la serie de estudio.

En 1999 Itaipú (represa hidroeléctrica ubicada sobre el río Paraná en los países limítrofes de Paraguay y Brasil) la capacidad de generación se vio reducida (Barros et. al, 2006). En la cuenca del río Paraná este evento representa la tercera parte de la máxima intensidad registrada en la cuenca en 1942.

La ciudad de Córdoba en el año 2009 declara alerta amarilla por crisis hídrica (La Voz del Interior, 2009) y en el año 2011 los productores de verduras declaran pérdida económica en 20 millones de pesos por sequía (LaVozdelInterior, 2011). Estos eventos en la cuenca del río Suquia son del orden del 60% de los máximos sucedidos en 1950.

Lo anterior pone en evidencia que en la última década los eventos de sequía han impactado en la sociedad con pérdidas económicas en la actividad productiva del suelo, energía y abastecimiento de agua potable. Se resalta que estos eventos no han sido del orden de magnitud de los máximos registrados antes de 1975.

3.4.3. Análisis Espacial y Temporal de las Sequías

Con el fin de extender los conceptos de caracterización de sequías a nivel regional se realizó un análisis espacial y temporal de las sequías. Este se apoya en un ordenamiento matricial, donde las columnas corresponden a la ubicación geográficas (de sur a norte) de las cuencas, y las filas a los años hidrológicos ordenadas cronológicamente. Los valores de cada unidad de la matriz se obtienen calculando en cada año de la serie cronológica de la oferta disponible, la probabilidad de excedencia del aporte medio anual registrado.

La probabilidad de excedencia P_{jt} de aporte anual observado en el año t de la cuenca j .

$$P_{jt} = \text{Probabilidad}(X_{jt} > x_{jt}) = \alpha \quad (\text{Ecuación 3.29})$$

Siendo:

X_{jt} : Los valores de las series de aportes disponibles

x_{jt} : Valor numérico del aporte anual observado en el año t en la cuenca j .

α : Umbrales de probabilidad.

De esta forma se da una visión general de las características espacio temporal de los recursos superficiales relacionadas con su disponibilidad, y por lo tanto con las sequías en cuanto a su aleatoriedad (Fernández Larrañaga, 1997).

0,00 < α < 0,20	muy húmedo;
0,20 < α < 0,40	húmedo;
0,40 < α < 0,60	normal;
0,60 < α < 0,80	seco;
0,80 < α < 1,00	muy seco;

Matriz de Caracterización de Sequías Hidrológicas

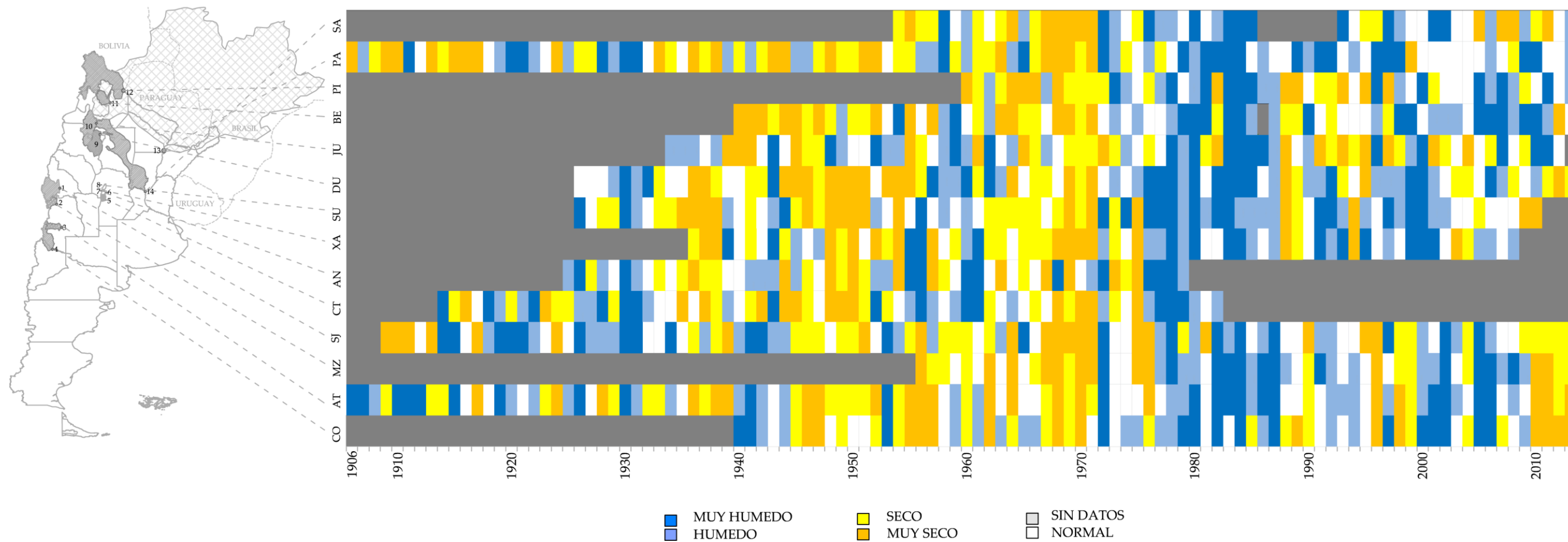


Figura 3.55 Matriz de caracterización de sequías hidrológicas

La matriz de caracterización obtenida permite identificar:

Sequías plurianuales en los periodos 1967-1971; 1945-1952 y 1936-1939 para todas las cuencas (que poseen datos). La sequía identificada en 1967-1971 coincide con la de Chile a fines de la década de 1960, (1968-1972) que tuvo una gran repercusión en las actividades agrícolas en la zona central de Chile, afectando fundamentalmente a la zona centro norte (Fernández Larrañaga, 1997).

Un marcado quiebre en 1975 entre periodos secos y húmedos.

Regiones que tienen comportamientos similares la mayor parte del tiempo. Estas regiones coinciden con las presentados en el estudio de Familias hidrológicas (Dölling et. al, 2013). Éstas regiones son:

- Ríos Colorado, Mendoza, San Juan y Atuel: presentan años comunes de sequías interanuales y plurianuales entre 1956-1976 (1956-1957/1960/1962/1964/1967-1970/1976), 1990-2014 (90/96/98-99/2004/2010-13).
- Ctlamochita, Xanaes, Anizacate y Suquía: las sequías de esta región se dan entre 1937-1938, 1948-1951,1973-1975. Las cuencas de los Ríos Xanaes y Suquía (de las cuales se disponen datos para esas fechas) presentan sequías simultáneas para los años 1988-1989 y 1994. En la última década se observa que los caudales se caracterizan por ser de normales a secos.
- Juramento, Bermejo, Pilcomayo y Dulce: las sequías ocurren entre 1962-1973 (1962/1967/1970-1973) 1989-1996 (1989/1990/1994/1996)
- Paraná, Salado: las sequías plurianuales comunes se dan entre 1954-1971 (1954-1955/1961-1963/1967-1971) y en el 2008 todas experimentan una sequía severa

3.5. Discusión de los resultados

Como se mencionó, en el planteamiento de la problemática de la tesis, las sequías son fenómenos complejos que afectan de manera significativa el desarrollo y aprovechamiento de los recursos hídricos en una región. Por lo tanto, es importante conocer la disponibilidad del recurso hídrico en el tiempo y en el espacio para garantizar una adecuada gestión y planificación.

La comprensión de las sequías históricas en una región (magnitud, intensidad, duración) así como los impactos de las mismas es de gran ayuda para la toma de decisiones, especialmente en regiones semiáridas como son las que conforman gran parte de nuestro país.

A fin de contribuir a una mejor gestión integrada de los recursos hídricos superficiales, uno de los objetivos de esta tesis ha sido identificar y caracterizar sequías hidrológicas en una región

relativamente extensa de la Argentina. La metodología utilizada permitió analizar un lapso de tiempo suficientemente largo en los registros hidrológicos del país.

Los resultados obtenidos en la identificación y caracterización de sequías hidrológicas, indicaron que en la región de estudio (14 cuencas de la región Centro, Cuyo y Norte de la Argentina) ocurrieron sequías hidrológicas plurianuales y simultáneas para todas las cuencas. Estas se registraron en los periodos 1936-1939; 1945-1952 y 1967-1971. Esto es de gran relevancia para la planificación y prevención de escenarios de déficit de energía, ya que sequías de 6 años de duración compromete cinco sistemas hidroeléctricos de Argentina como son: Yacyreta, Cabra Corral, Río Hondo, Río Grande, Salto Andersen (en las cuencas de los ríos Paraná, Juramento, Dulce, Ctalamochita y Colorado).

La sequía ocurrida entre 1967 y 1971 coincide con la de Chile a fines de la década del 60, (1968-1972) que tuvo una gran repercusión en las actividades agrícolas en la zona central de Chile, afectando fundamentalmente a la zona centro norte (Fernández Larrañaga, 1997). En este aspecto se resalta la dimensión territorial que puede tomar una sequía hidrológica como las detectadas.

Se observó que existieron períodos húmedos a partir de la década del 70 en forma simultánea en todas las cuencas estudiadas. Se evidencia un cambio en este periodo entre una época seca y otra húmeda, lo cual coincide con la década húmeda (77-87) detectada en Chile por Fernández Larrañaga (1997), con el cambio en las condiciones medias de temperatura del Pacífico ecuatorial central de 1976/77 y con la transición climática que afectó a más de 40 variables bioambientales del Pacífico y de las Américas. Estas son expresiones de la variabilidad multidecadal denominada ENOS (El Niño / Oscilación Sur), (Campagnucci, 2008).

A nivel espacial se observó un agrupamiento de cuencas que presentaron sequías simultáneas la mayor parte de tiempo analizado. Estos grupos son:

- Los ríos Colorado, Mendoza, San Juan y Atuel;
- Los ríos Ctalamochita, Xanaes, Anizacate y Suquía;
- Los ríos Juramento, Bermejo, Pilcomayo y Dulce;
- Los ríos Salado y Paraná.

Esta información es de relevancia para la gestión de los recursos hídricos ya que usos tales como el abastecimiento humano, el riego y la producción energética, entre otros, pueden ser seriamente afectados por la ocurrencia de manera simultánea de sequías severas en cuencas que aportan a una región y zonas vecinas.

De los sistemas analizados que pertenecen a la provincia de Córdoba se observa una simultaneidad de los eventos hídricos extremos, que desde el punto de vista de la gestión del recurso representa una fragilidad. Ya que ante períodos de escasez severa de agua todas las cuencas de abastecimiento del Gran Córdoba enfrentan la misma situación.

Se destaca que las sequías que de las últimas décadas no han alcanzado el orden de magnitud de las registradas antes de 1970 (que han sido las más críticas en cuanto a duración, magnitud e intensidad).

Una de las ventajas de identificar los distintos parámetros que caracterizan temporalmente las sequías es que se puede correlacionar con los daños que ocasionaron y por ende prever las medidas paliativas necesarias para tales eventos en el futuro. En la región de estudio se debe tomar en cuenta este aspecto considerando: los máximos déficits que se identificaron, la demanda actual y futura del agua y la modificación en los usos del suelo.

4. IDENTIFICACIÓN DE PERIODICIDADES PLURIANUALES EN CAUDALES PARA PREDICCIÓN DE SEQUÍAS A LARGO PLAZO.

En este capítulo de la tesis se identifican las periodicidades plurianuales en las series de caudales. Conocer las frecuencias de tiempo dominantes (caracterizando las periodicidades plurianuales) en las series de caudales permite comprender la escala temporal de evolución de los procesos que intervienen en los ciclos hidrológicos y así avanzar en la generación de modelos conceptuales que expliquen estos procesos y de pronóstico que ayuden en distintas escalas a prever los años de déficit hídricos y así a la planificación y gestión de los recursos hídricos.

4.1. Determinación de frecuencias dominantes con análisis espectral

El análisis espectral puede ser utilizado para analizar las periodicidades de la serie de tiempo en el dominio de las frecuencias ($[1/T]$); mientras el análisis de correlación permite analizar las relaciones temporales ($[T]$) en el dominio del tiempo. El análisis espectral se desarrolló a partir del espectro de energía de las fluctuaciones, mientras que el análisis de covarianza se realizó a partir de la función de autocorrelación.

Cálculo del Espectro de Energía de las fluctuaciones a través de la transformada de Fourier.

La función autoespectral de densidad de energía de las fluctuaciones observadas en la serie de caudales fue estimada a partir de la transformada finita de Fourier (Bendat y Piersol , 2000) como:

$$G_{xx}(f) = \frac{2}{T} |X(f, T)|^2 \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

Con la menor resolución posible de: $\Delta f = 1/T$. El rango finito de la transformada de Fourier $X(f, T)$ de un valor real o de un registro complejo $x(t)$ se define por la cantidad de valor complejo:

$$X(f, T) = \int_0^T x(t) \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} dt \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

Si $x(t)$ es una muestra de N puntos de una serie de tiempo, equidistantes a una distancia Δt de separación.

$$X(f, T) = \Delta t \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp[-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot n \cdot \Delta t] \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

donde

$$x_n = x(n\Delta t) \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

Son los valores de la serie de tiempo equiespaciados Δt .

La selección usual de los valores de frecuencia discretos para el cálculo de $X(f, T)$ es:

$$f_m = \frac{m}{T} = \frac{m}{N\Delta t} \quad (\text{Ecuación 4.5})$$

Donde m varía desde 1 hasta $N/2$.

$$X(f_m) = \Delta t \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp\left[-j \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot n}{N}\right] \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

La expresión:

$$X_m = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp\left[-j \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot n}{N}\right] \quad (\text{Ecuación 4.7})$$

O su equivalente

$$X_m = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \left\{ \cos\left[\frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot n}{N}\right] - i \sin\left[\frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot n}{N}\right] \right\} \quad (\text{Ecuación 4.8})$$

Hace referencia a la función discreta de la transformada de Fourier (DFT)

Entonces:

$$X(f_m) = \Delta t \cdot X_m \quad (\text{Ecuación 4.9})$$

Remplazando en la Ecuación 4.1

$$G_{xx}(f_m) = \frac{2\Delta t^2}{T} |X_m|^2 \quad (\text{Ecuación 4.10})$$

Y siendo $T = N \Delta t$, se calcula el espectro de energía de las fluctuaciones como:

$$G_{xx}(f_m) = \frac{2\Delta t}{N} |X_m|^2 \quad (\text{Ecuación 4.11})$$

El método de la transformada rápida de Fourier es usado para calcular la función discreta de la transformada de Fourier. Por tal se necesita una serie con una longitud que se múltiple de dos. Por tal se agregan ceros para completar ese requerimiento. Luego el espectro debe ser corregido por esto, ya que la varianza calculada como una integral de este espectro es menor que la real en un factor de n/N donde n = números de los valores de la señal registrada y N número de valores de la señal completada con ceros. El cálculo de $G_{xx}(f)$ se realiza en MatLab usando la función *periodograma*, y en Excel usando la herramientas de análisis de Fourier.

4.1.1. Análisis de frecuencias dominantes en caudales

En el siguiente análisis se pretende identificar las frecuencias dominantes en las series de caudales de cada cuenca a través del análisis del espectro de energía de las fluctuaciones observadas en las series de caudales.

El análisis del espectro de energía puede ser valiosa en los estudios que implican ondas u oscilaciones cuasi periódicas en una serie de datos. El espectro de energía transforma la señal (caudales) en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia mediante una transformada rápida de Fourier. A continuación se expondrán gráficas de las series de caudales medios anuales en años hidrológicos y los espectros de energía para las 14 cuencas analizadas.

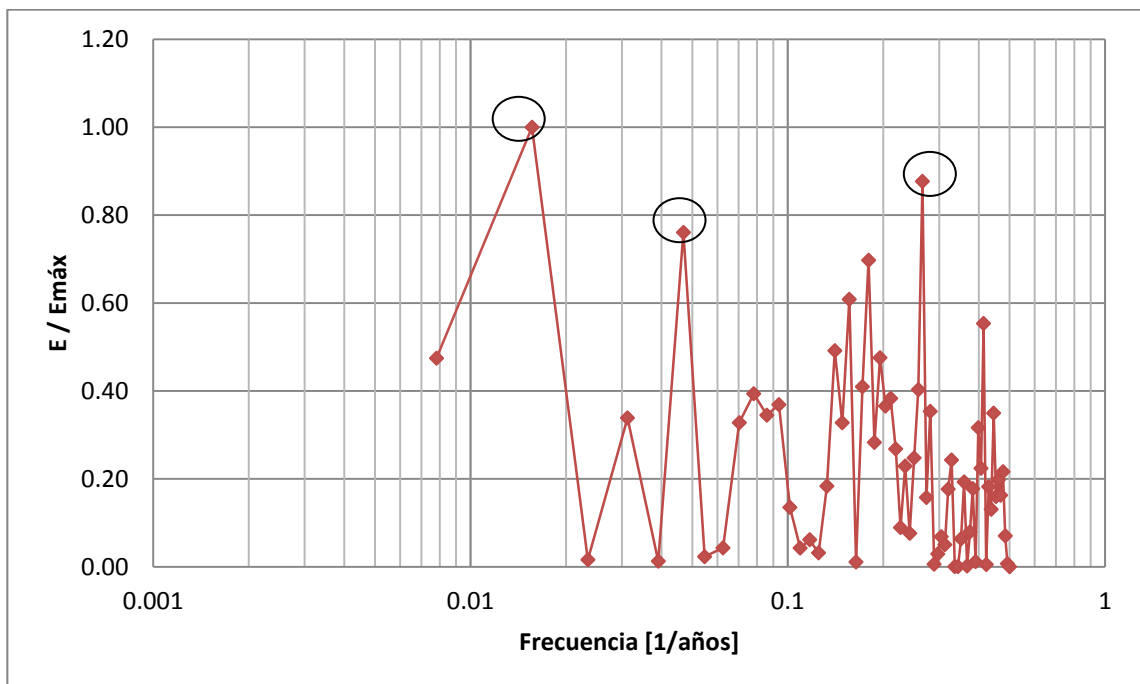
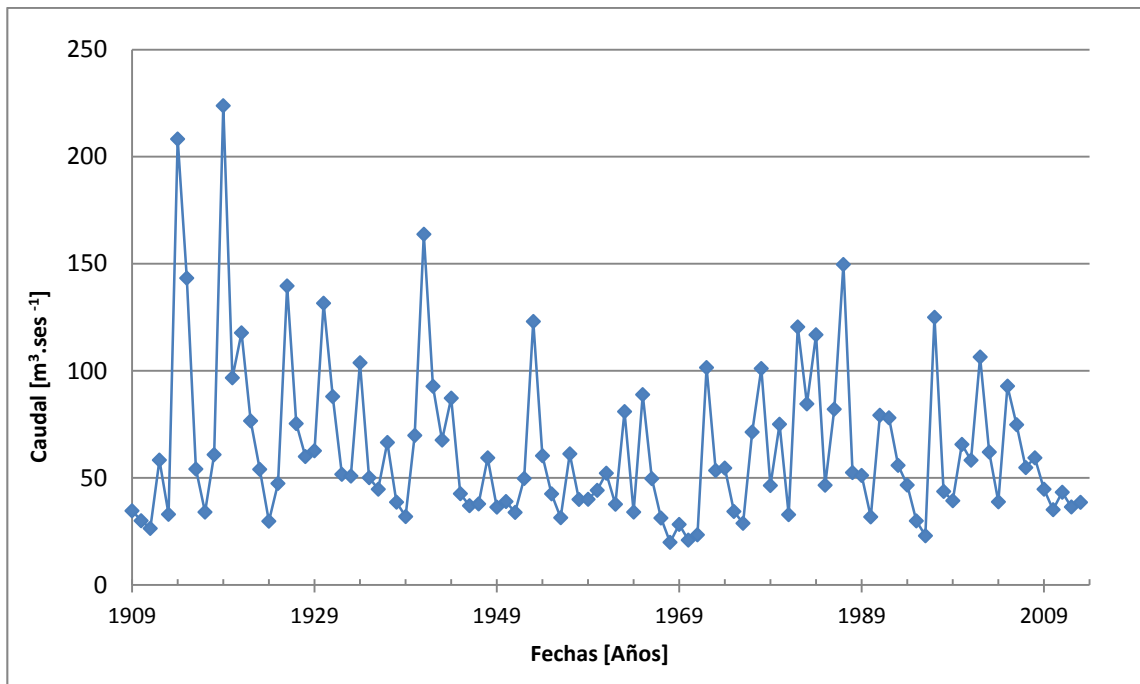


Figura 4.1. Serie de caudales del río San Juan y espectro de energía de las fluctuaciones de los caudales indicándose las tres frecuencias dominantes

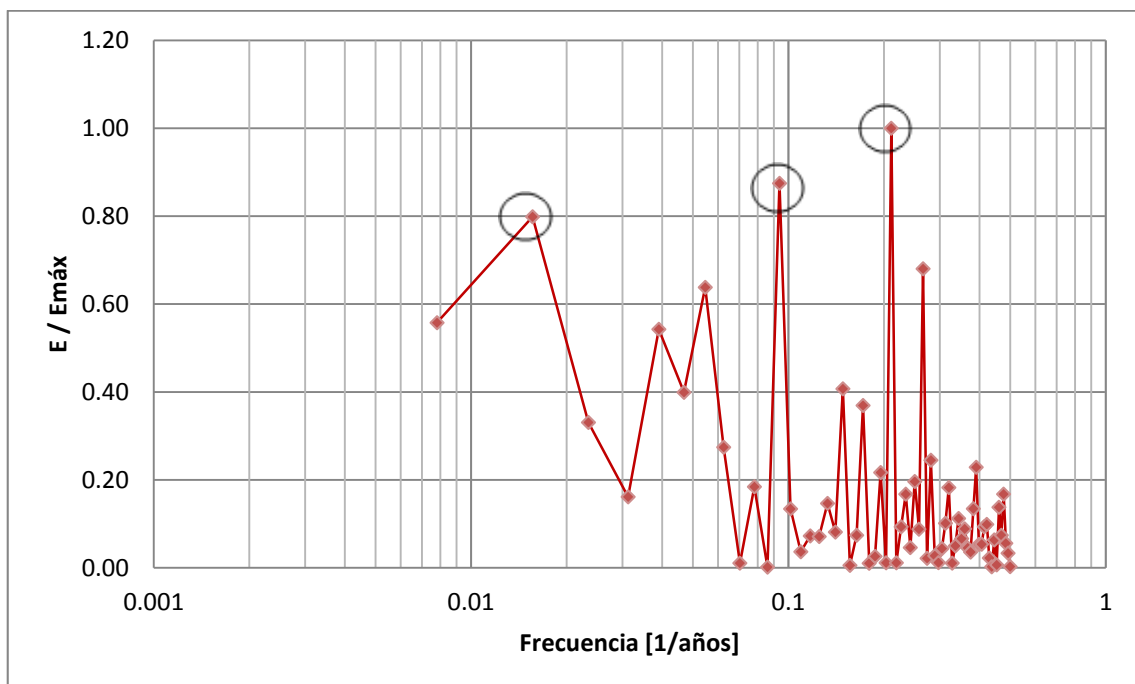
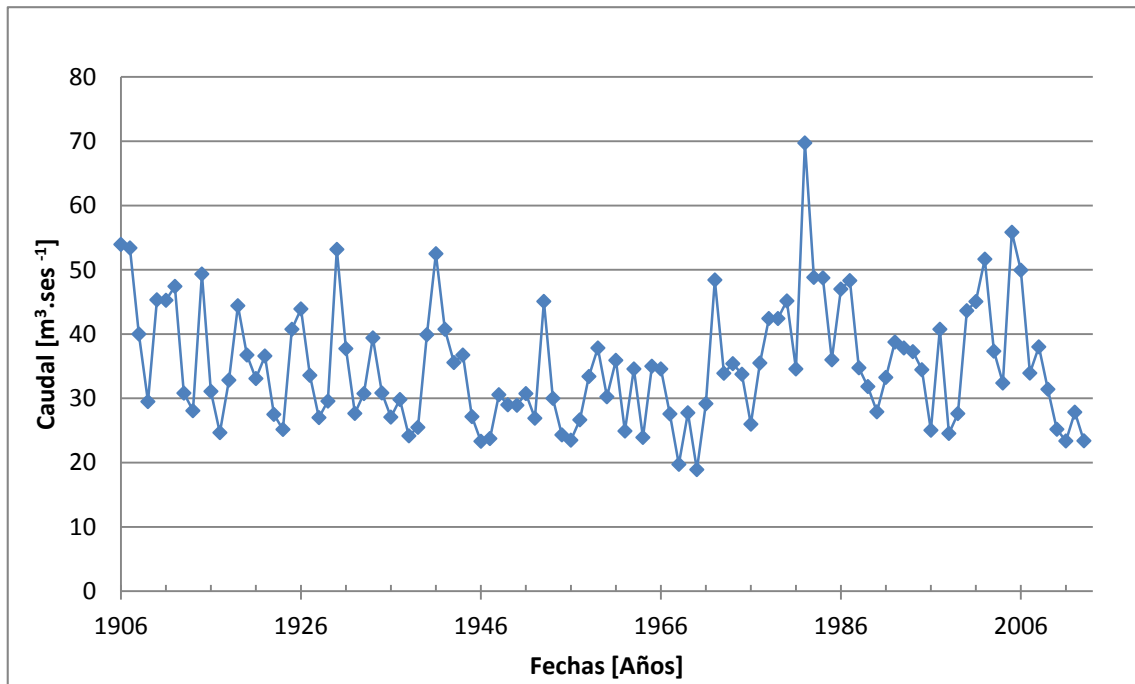


Figura 4.2. Serie de caudales del río Atuel y espectro de energía de las fluctuaciones de los caudales indicándose las tres frecuencias dominantes

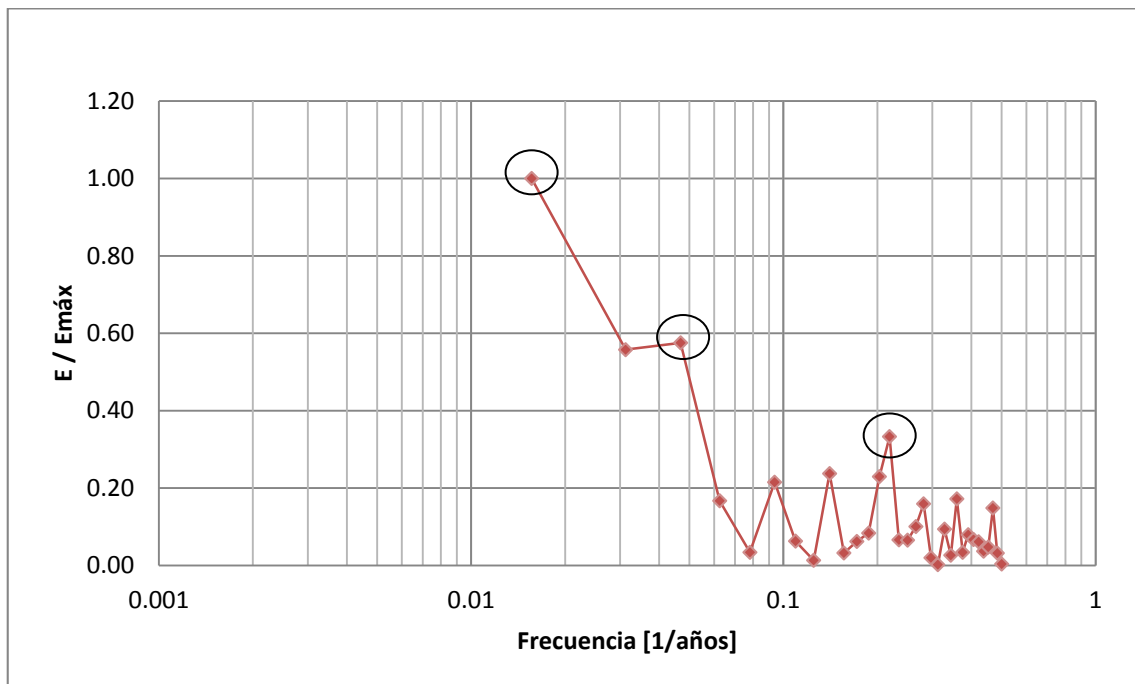
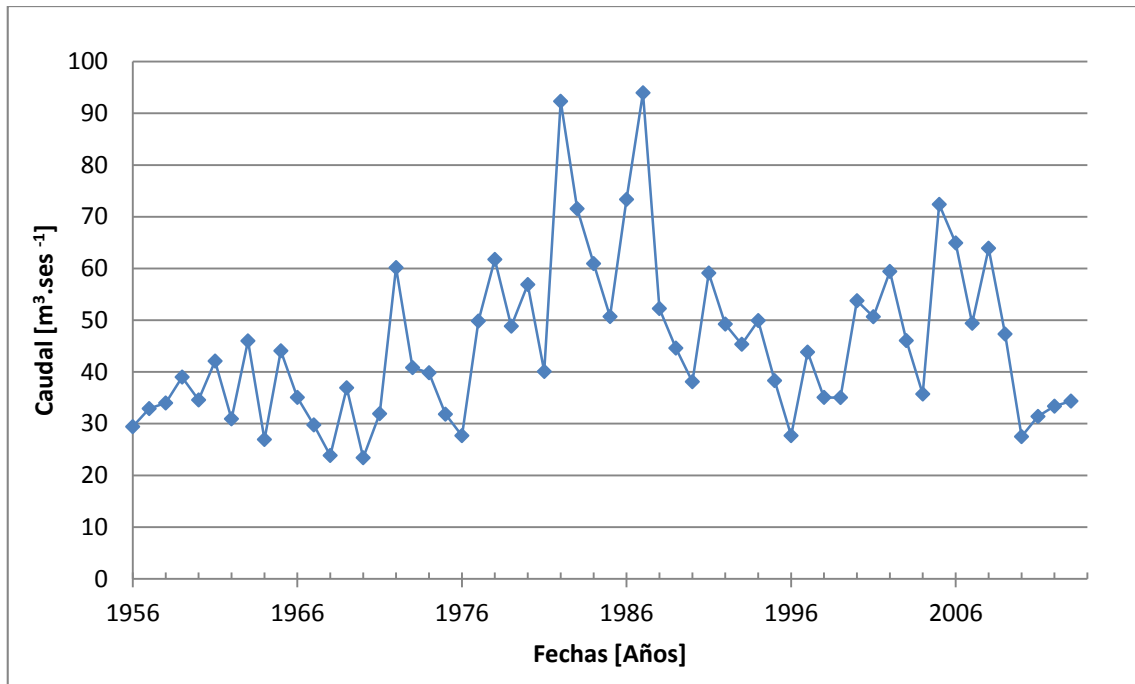


Figura 4.3. Serie de caudales del río Mendoza y espectro de energía de las fluctuaciones de los caudales indicándose las tres frecuencias dominantes

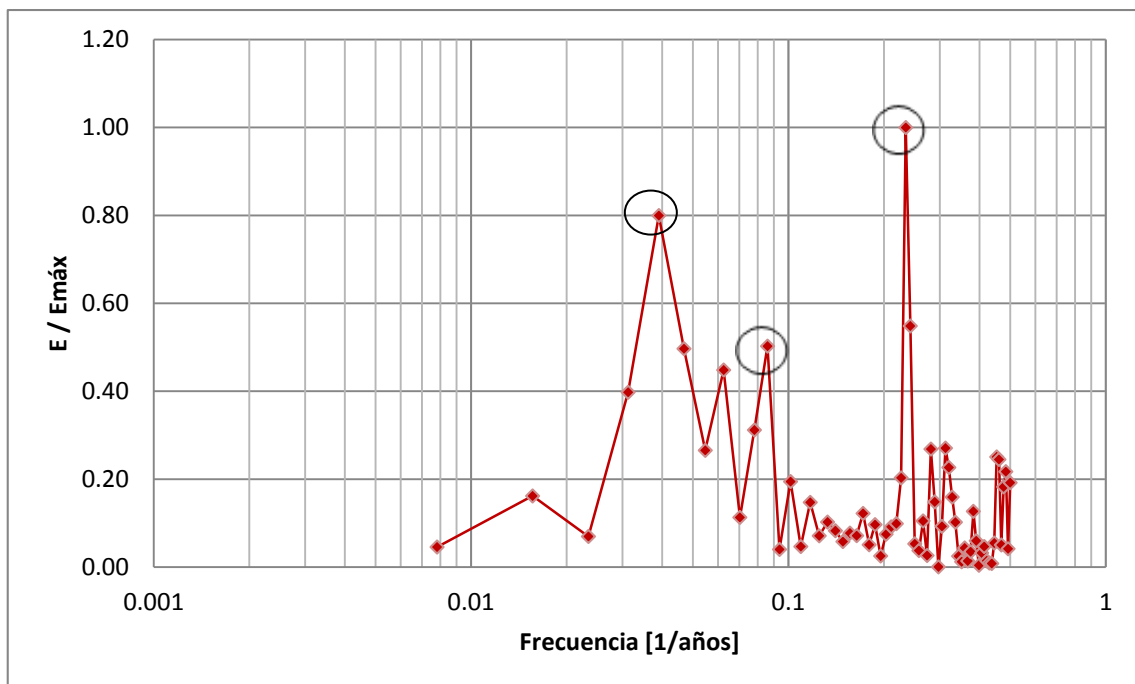
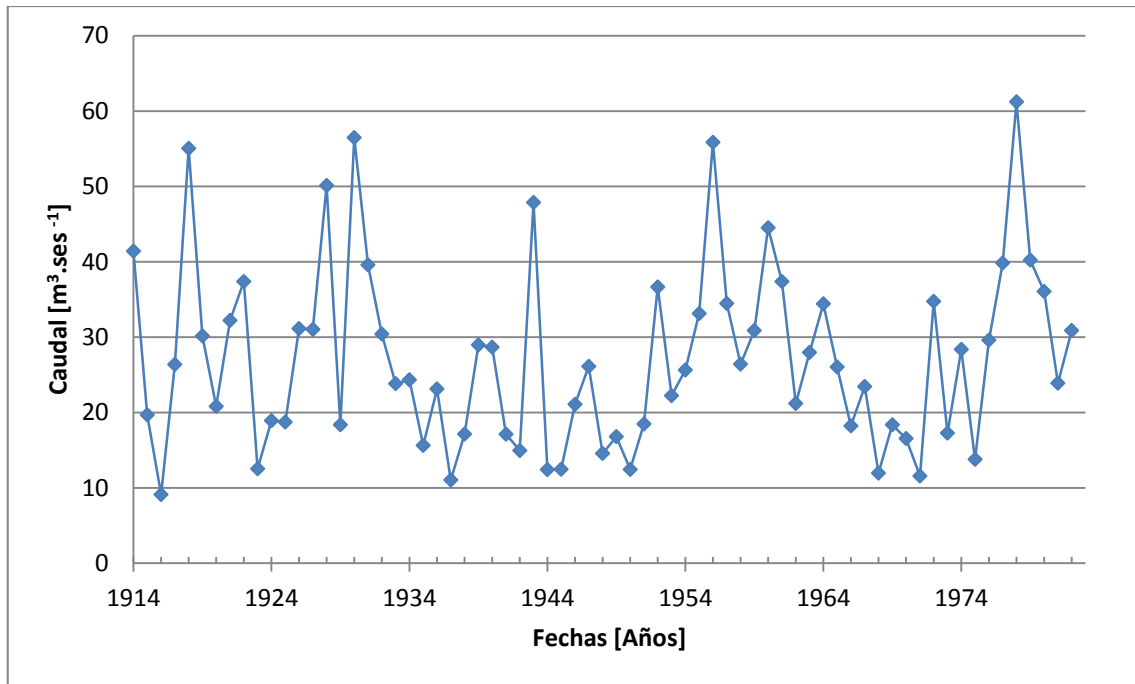


Figura 4.4. Serie de caudales del río Ctlamochita y espectro de energía de las fluctuaciones de los caudales indicándose las tres frecuencias dominantes

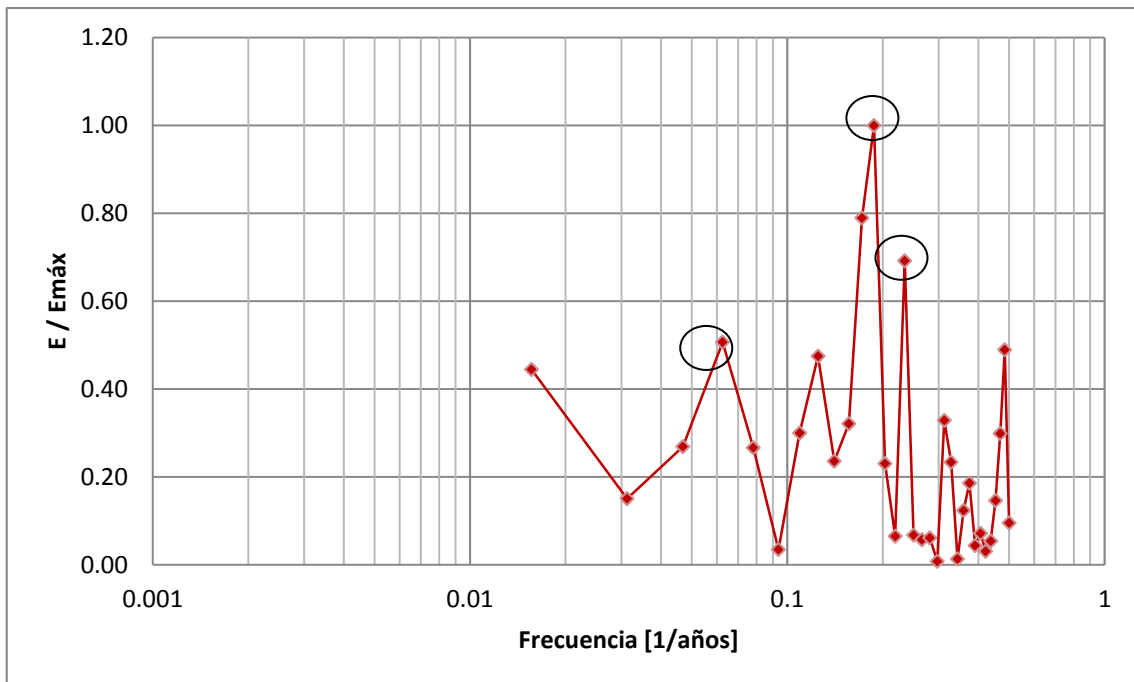
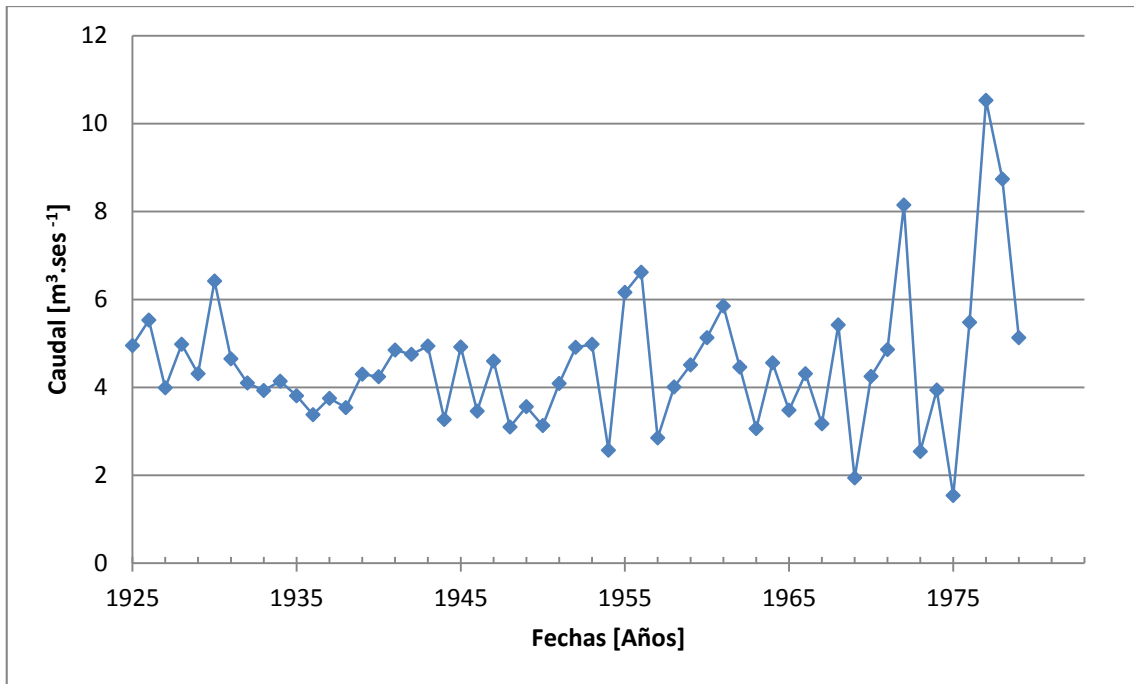


Figura 4.5. Serie de caudales del río Anizacate y espectro de energía de las fluctuaciones de los caudales indicándose las tres frecuencias dominantes

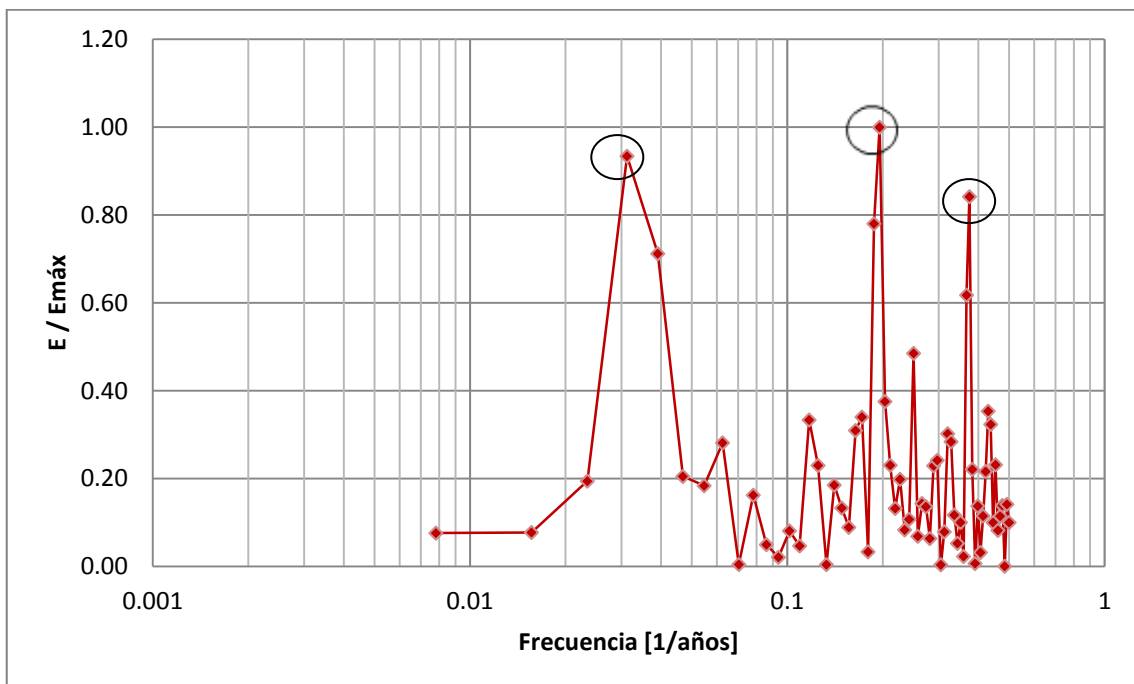
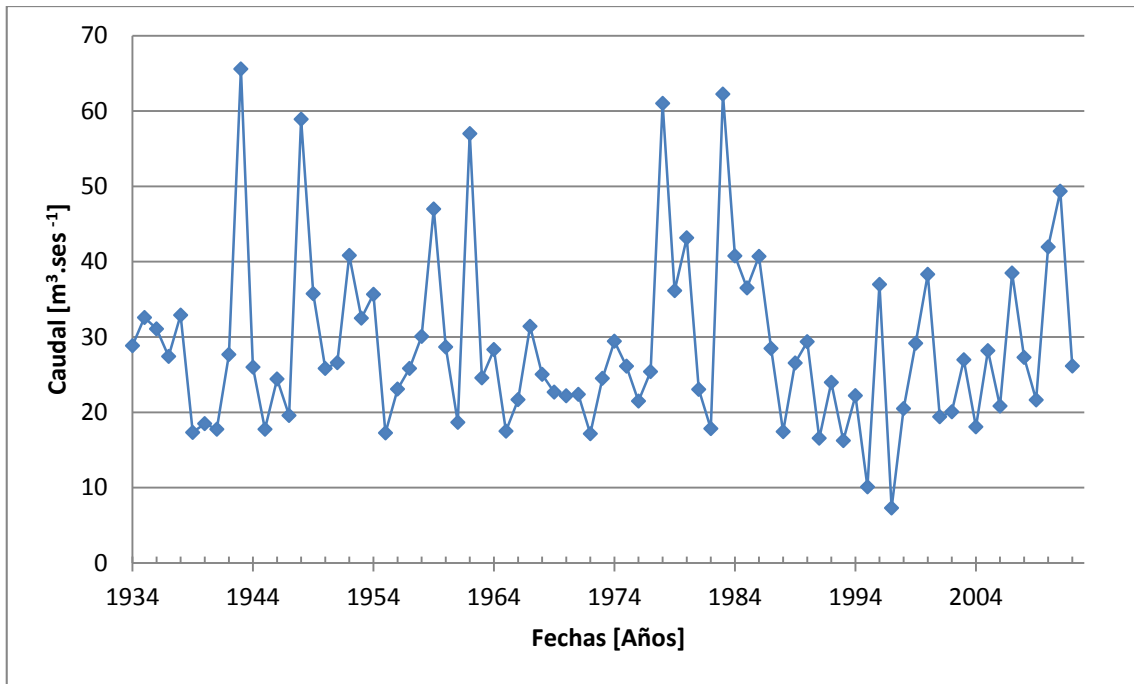


Figura 4.6. Serie de caudales del río Juramento y espectro de energía de las fluctuaciones de los caudales indicándose las tres frecuencias dominantes

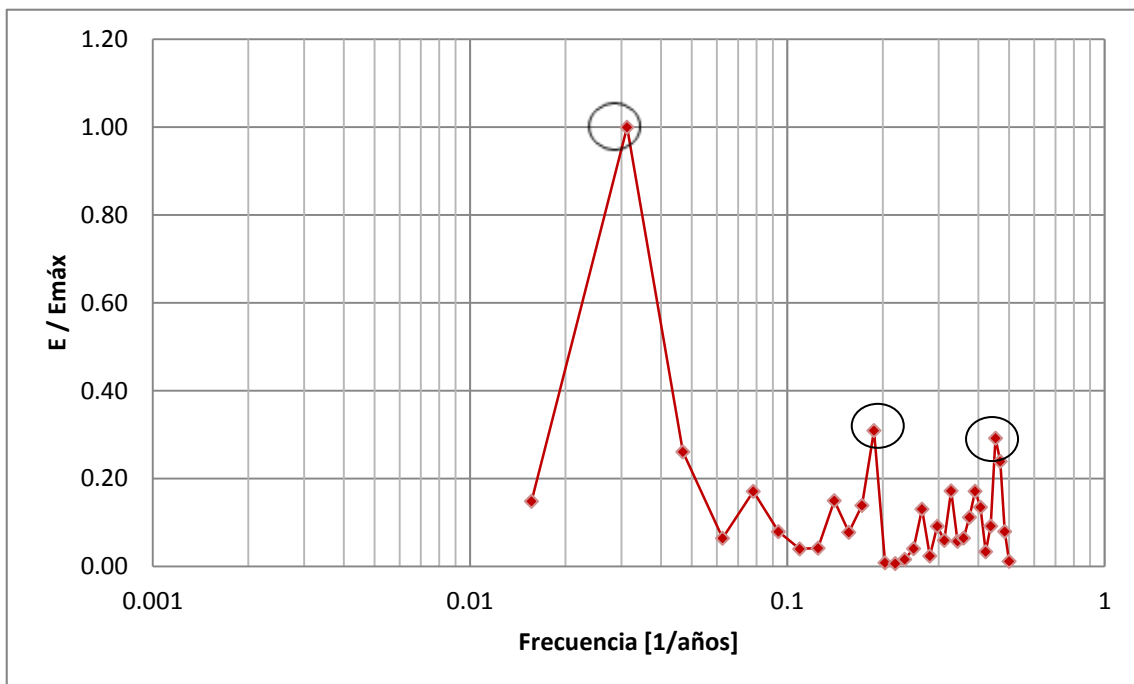
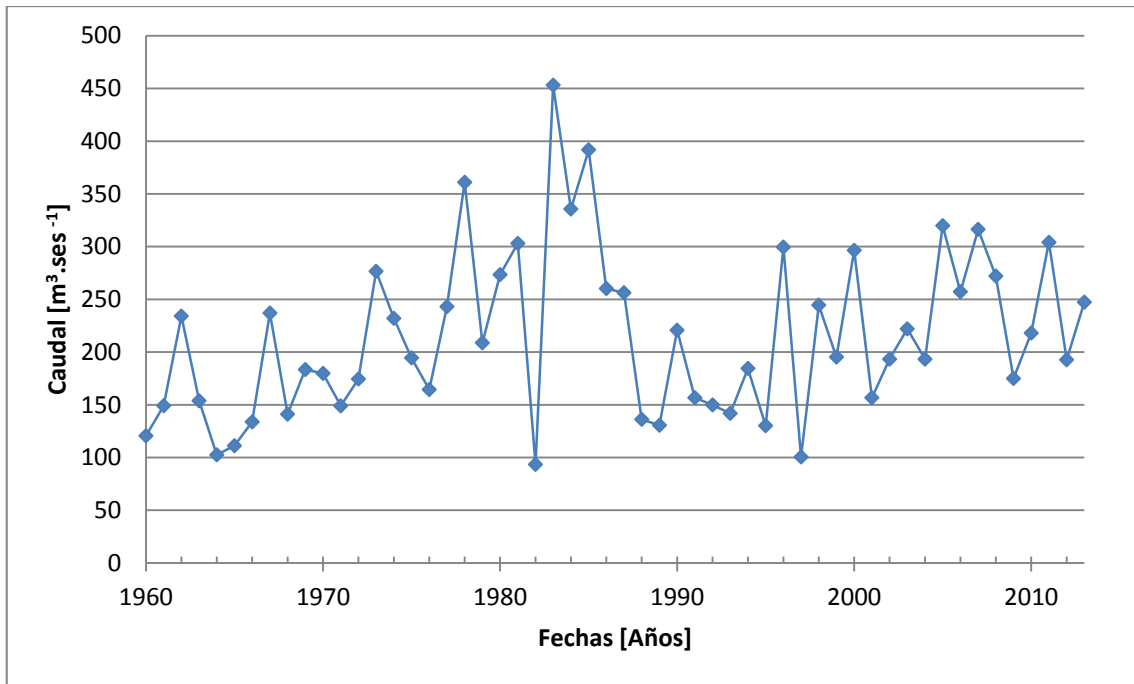


Figura 4.7. Serie de caudales del río Pilcomayo y espectro de energía de las fluctuaciones de los caudales indicándose las tres frecuencias dominantes

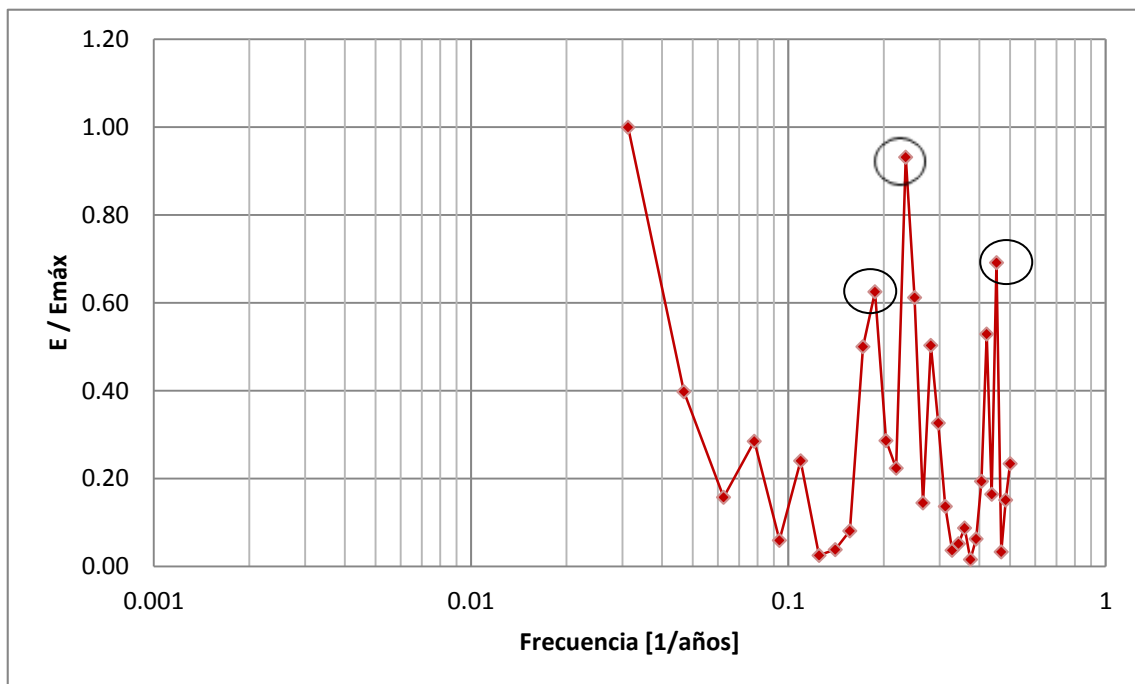
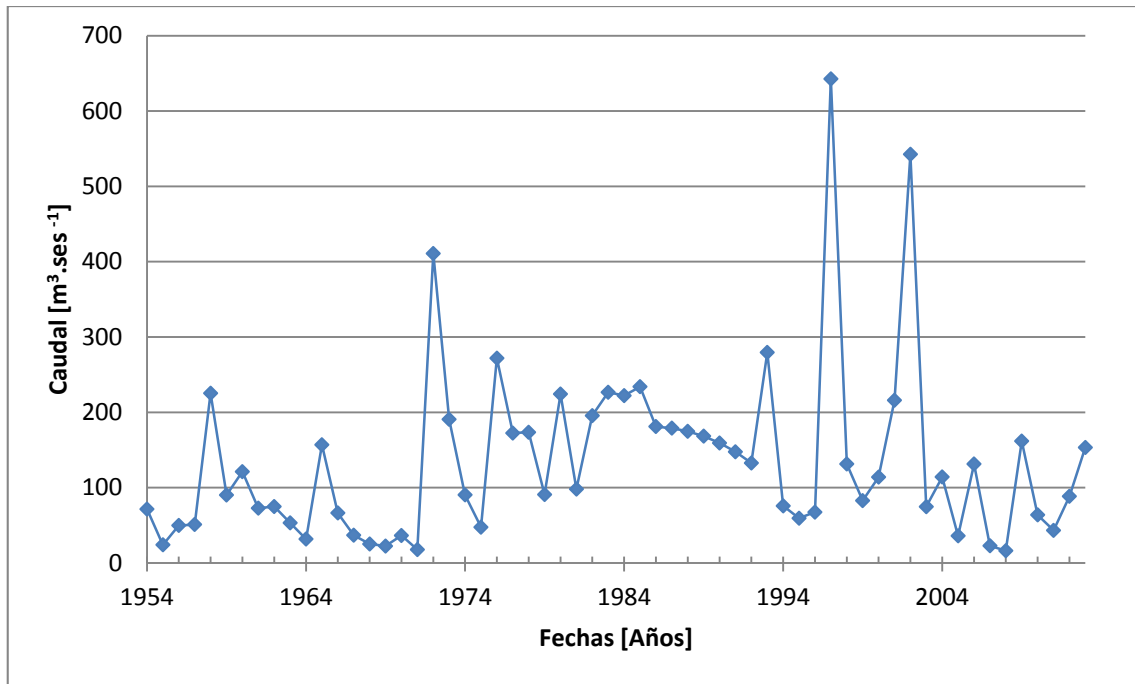


Figura 4.8. Serie de caudales del río Salado y espectro de energía de las fluctuaciones de los caudales indicándose las tres frecuencias dominantes

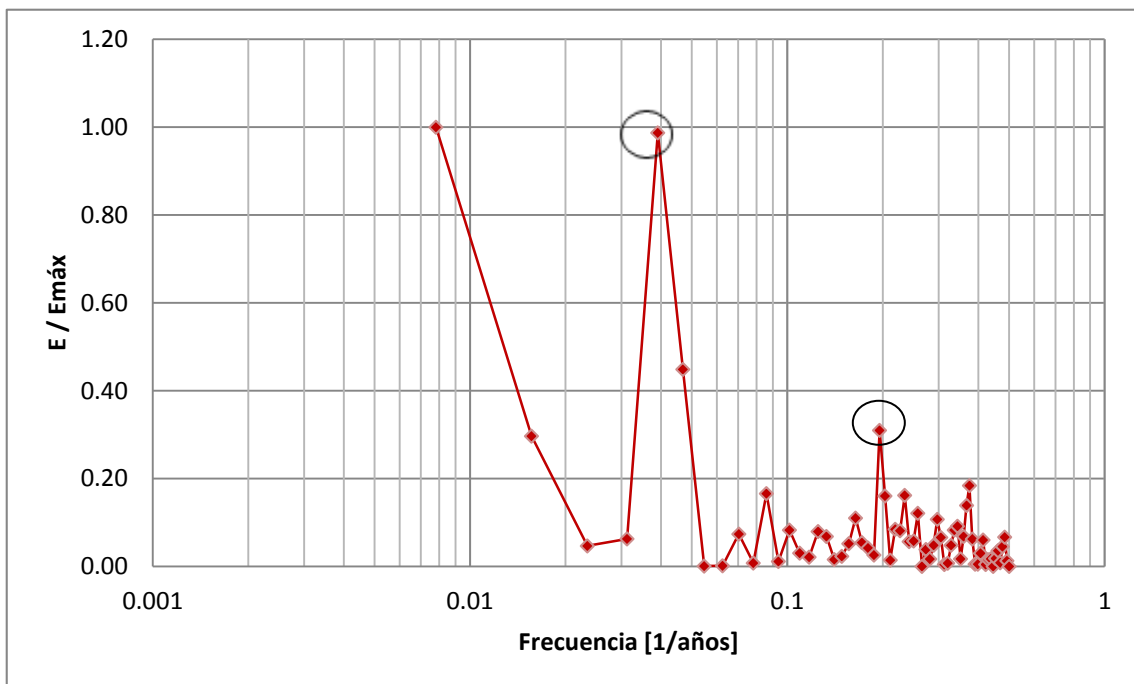
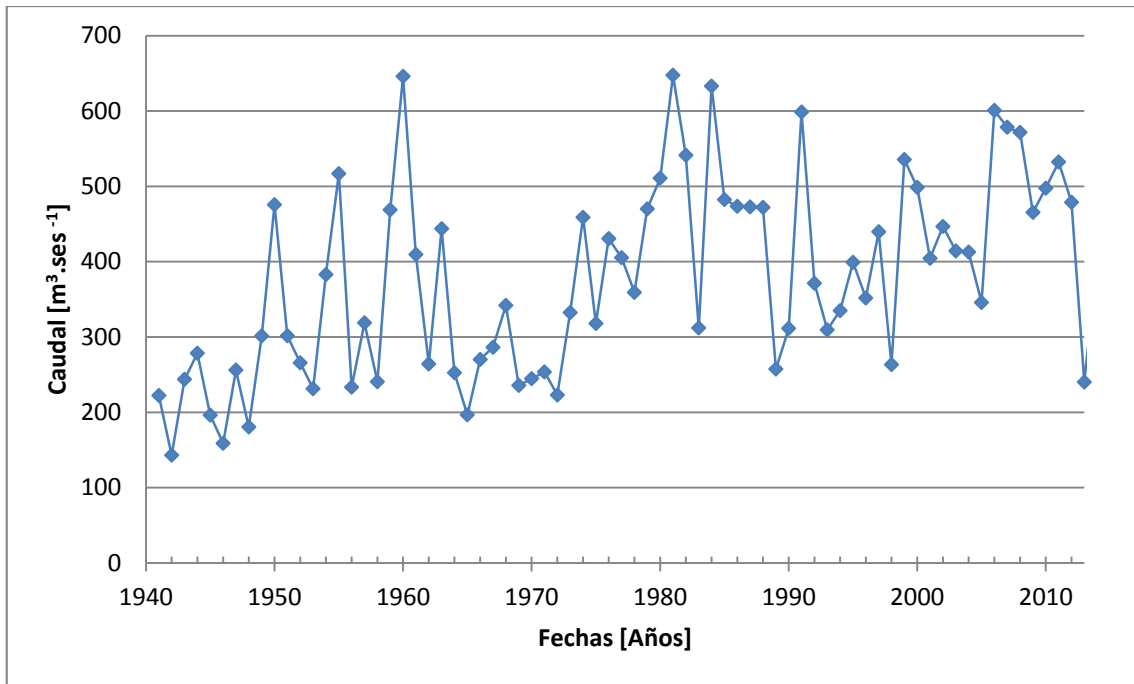


Figura 4.9. Serie de caudales del río Bermejo y espectro de energía de las fluctuaciones de los caudales indicándose las tres frecuencias dominantes

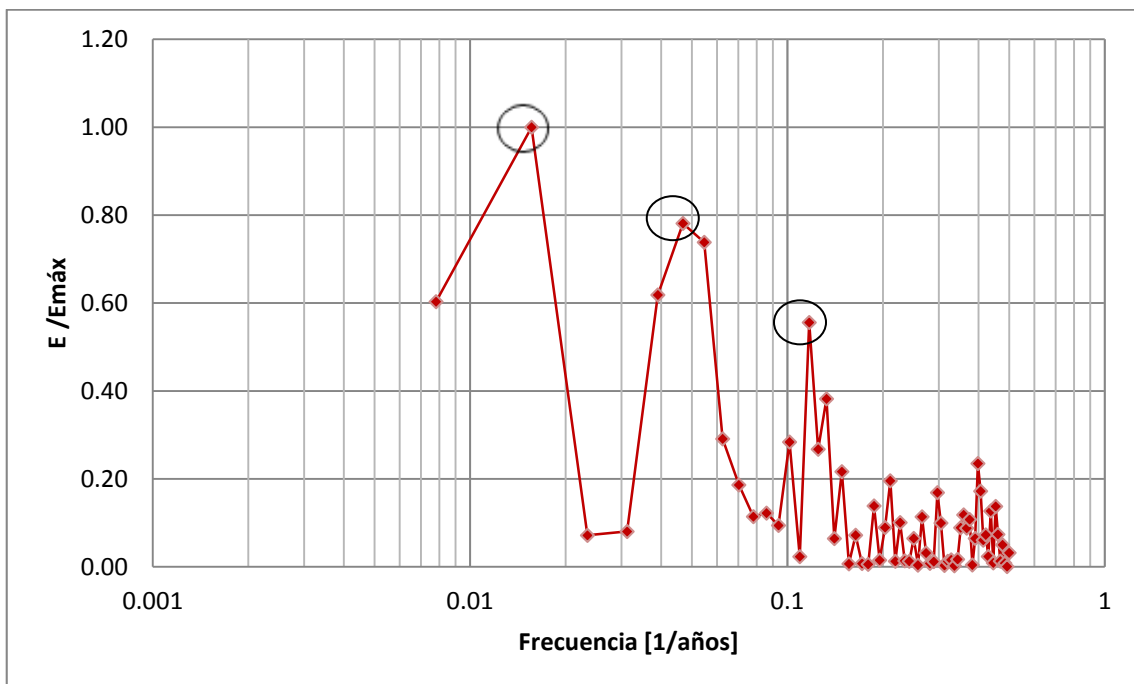
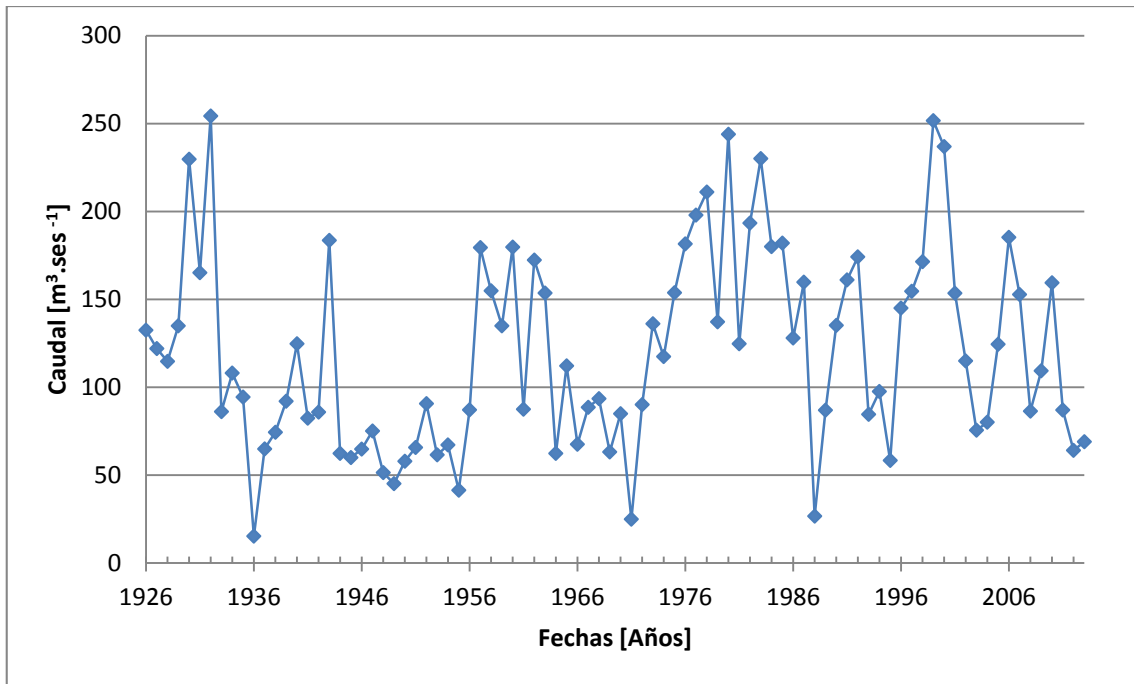


Figura 4.10. Serie de caudales del río Dulce y espectro de energía de las fluctuaciones de los caudales indicándose las tres frecuencias dominantes

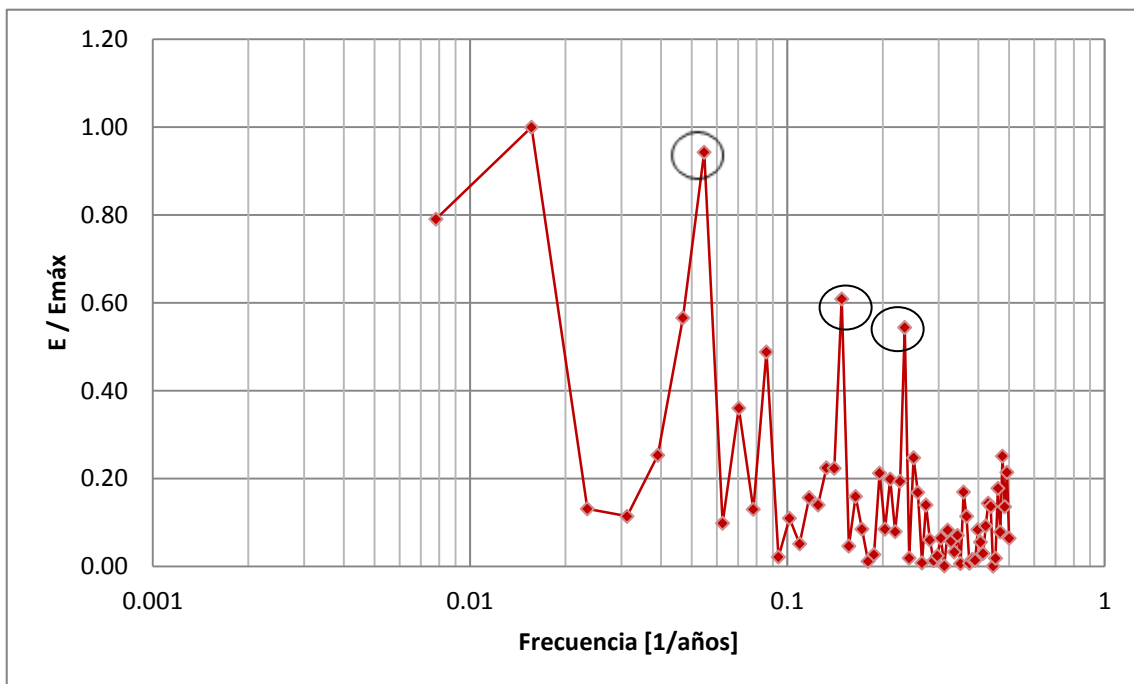
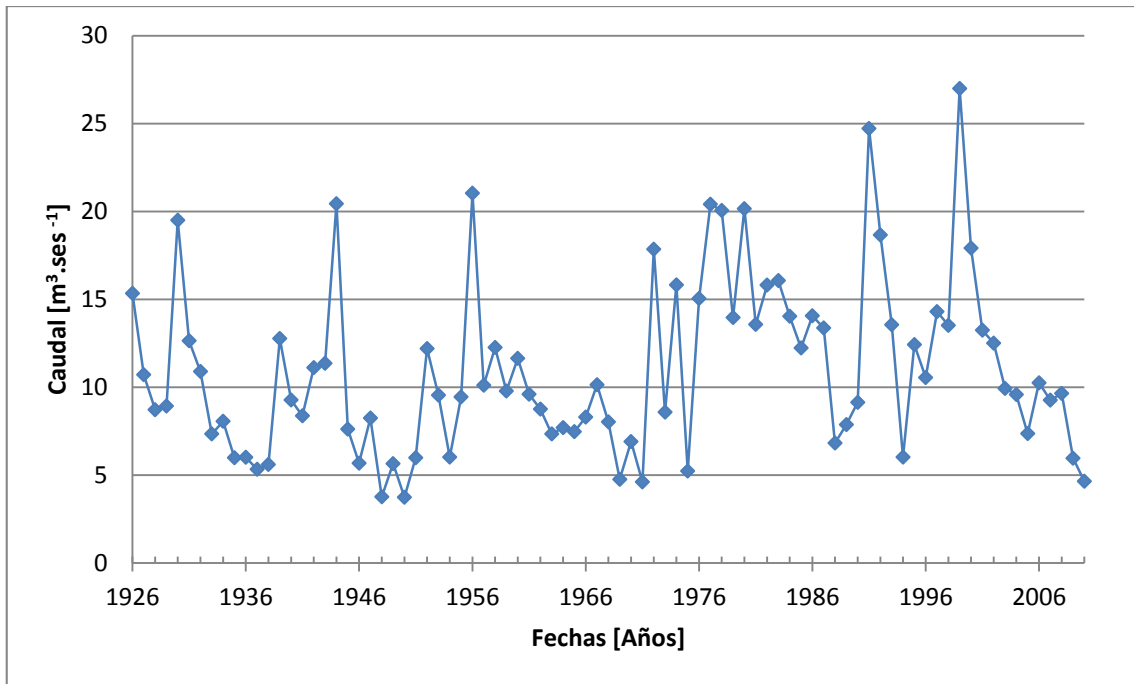


Figura 4.11. Serie de caudales del río Suquia y espectro de energía de las fluctuaciones de los caudales indicándose las tres frecuencias dominantes

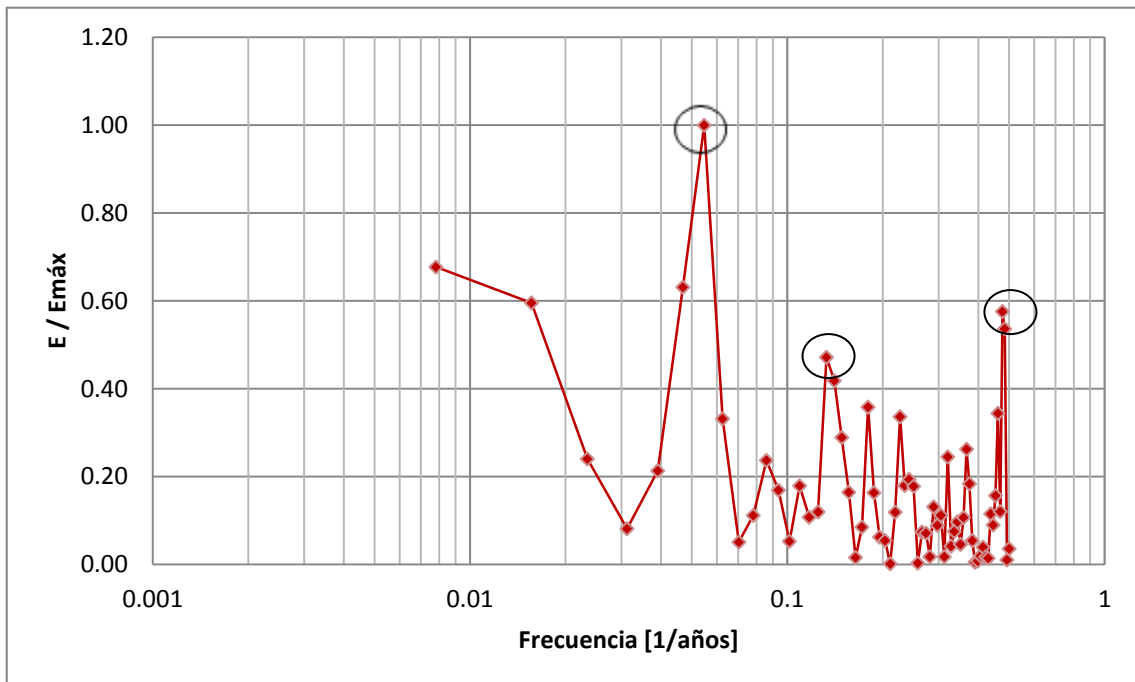
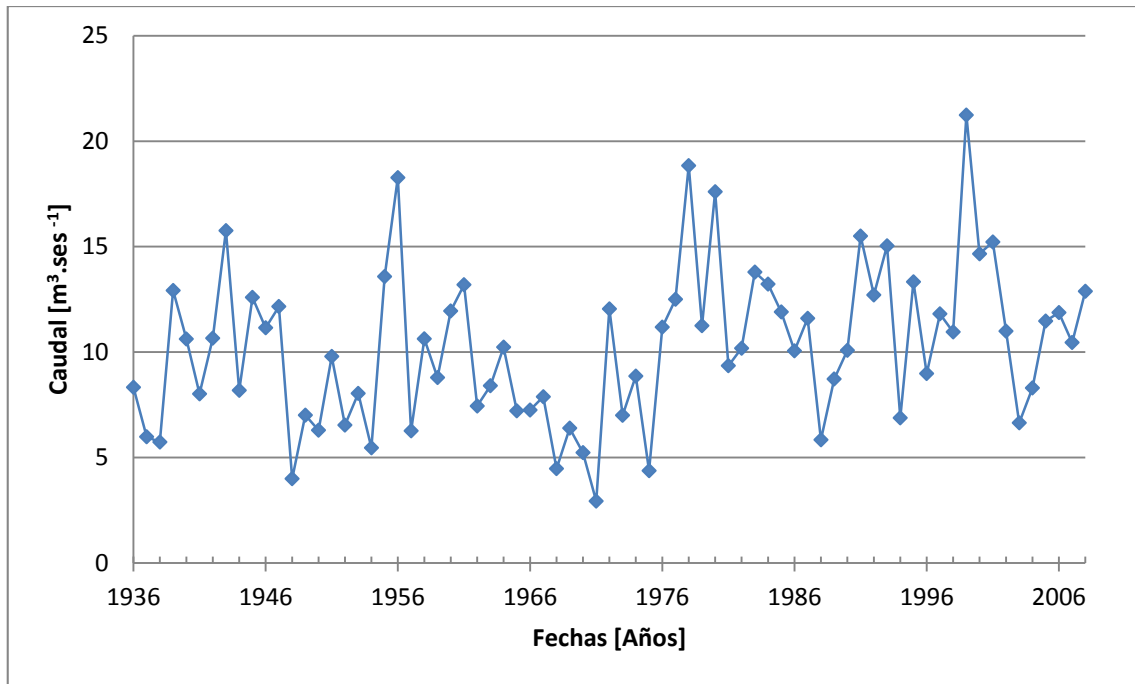


Figura 4.12. Serie de caudales del río Xanaes y espectro de energía de las fluctuaciones de los caudales indicándose las tres frecuencias dominantes

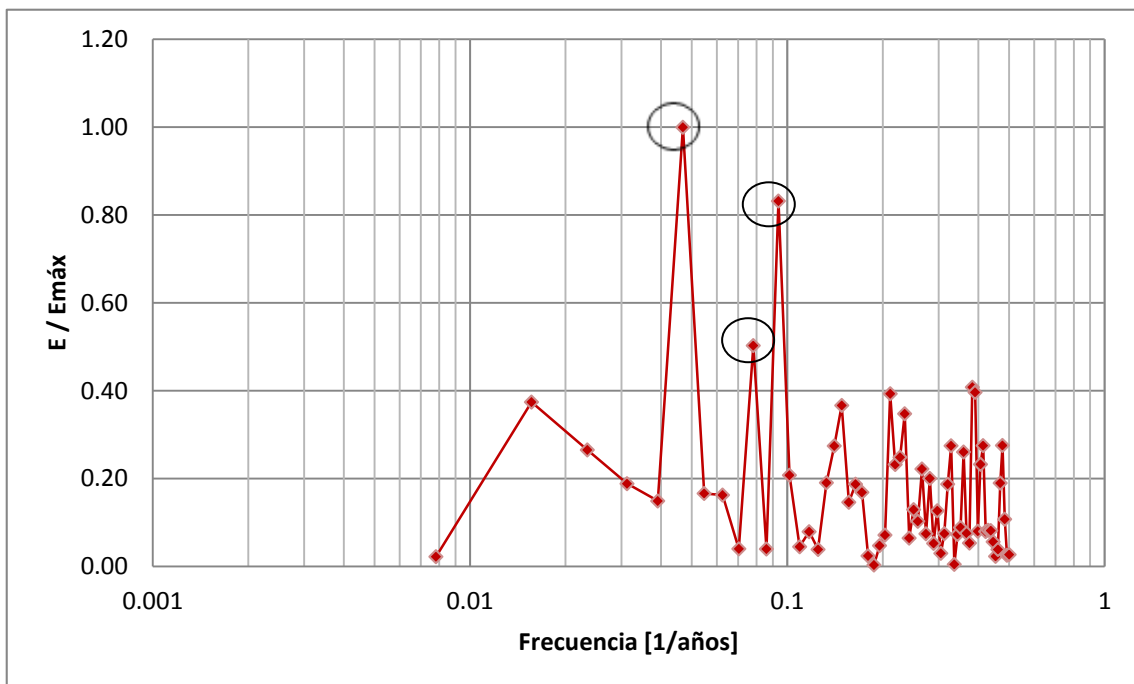
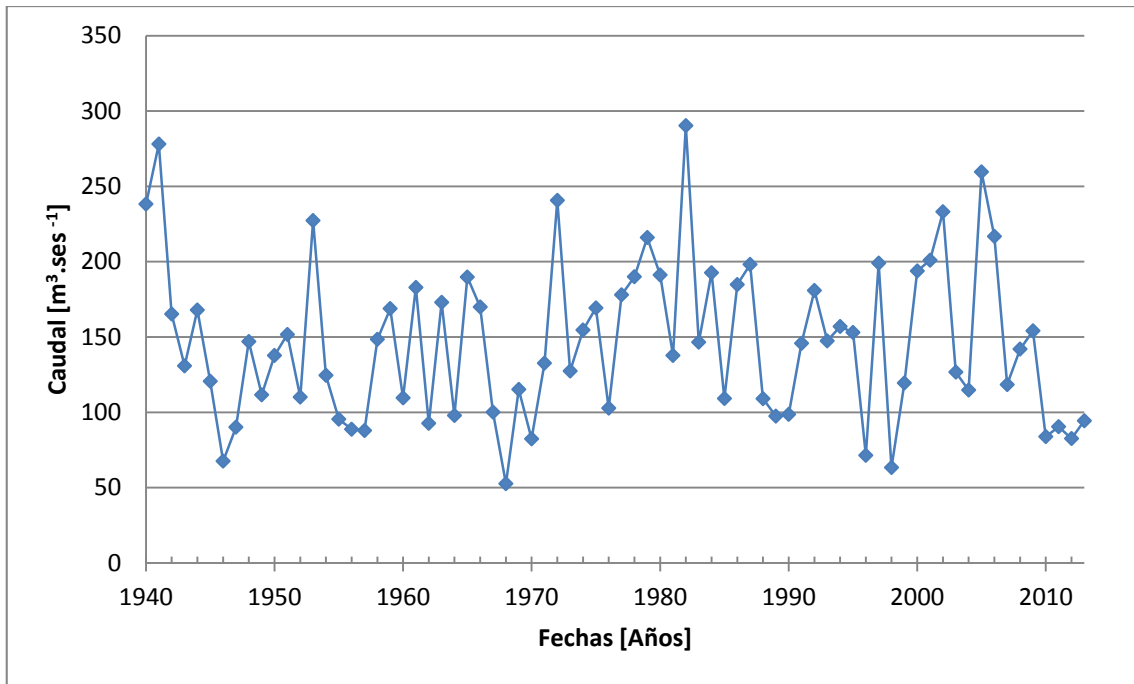


Figura 4.13. Serie de caudales del río Colorado y espectro de energía de las fluctuaciones de los caudales indicándose las tres frecuencias dominantes

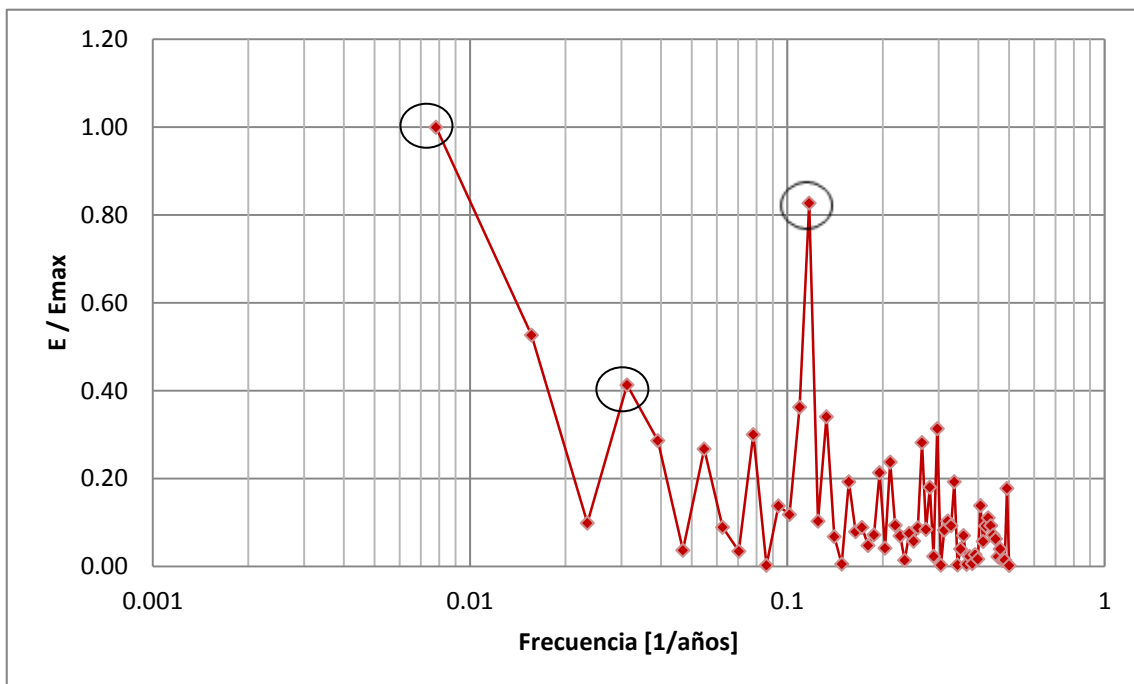
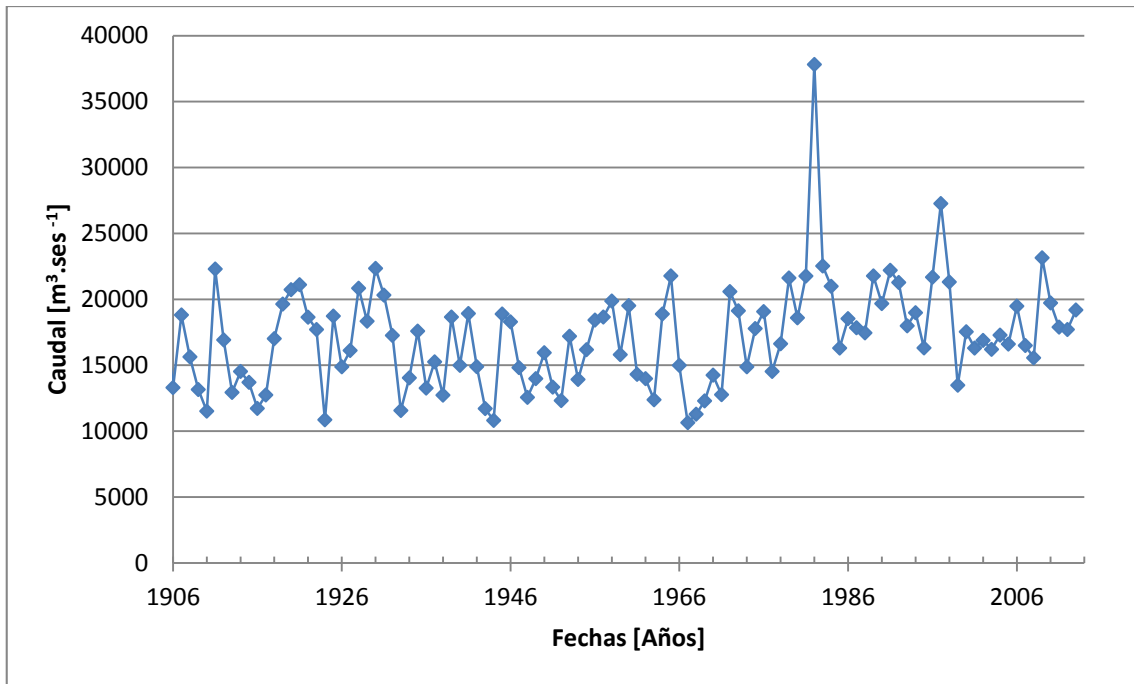


Figura 4.14. Serie de caudales del río Paraná y espectro de energía de las fluctuaciones de los caudales indicándose las tres frecuencias dominantes

Se consideraron las 3 frecuencias dominantes de cada cuenca, y se descartaron las generadas por periodicidades del orden de la longitud de la serie. En la tabla 4.1 se presenta el resumen de las frecuencias dominantes para las cuencas en estudio.

Tabla 4.1. Frecuencias dominantes y energía del espectro (adimensionalizada con su valor máximo) de cada cuenca estudiada.

	E / Emáx	Frec	Años	E / Emáx	Frec	Años
Paraná	0,83	0,12	8,5	0,41	0,03	32
Suquía	0,94	0,05	18,3	0,61	0,15	6,7
Xanaes	1,00	0,05	18,3	0,58	0,48	2,1
Ctalamochita	1,00	0,23	4,3	0,80	0,04	25,6
Anizacate	1,00	0,19	5,3	0,69	0,23	16
Dulce	0,78	0,05	21,3	0,56	0,12	8,5
Juramento	1,00	0,20	5,1	0,93	0,03	32
Bermejo	0,99	0,04	25,6	0,31	0,20	5,1
Pilcomayo	0,31	0,19	5,33	0,29	0,45	2,21
Salado	0,93	0,22	4,6	0,69	0,44	2,3
San Juan	0,88	0,27	3,8	0,76	0,05	21,3
Mendoza	0,33	0,22	21,3	0,23	0,20	4,6
Atuel	1,00	0,21	4,7	0,88	0,09	10,7
Colorado	1,00	0,05	21,3	0,83	0,09	10,7

Se puede observar que se ven frecuencias dominantes en los siguientes rangos:

- < 3,7 3 casos
- 3,7- 6,7 11 casos
- 8,5 - 10,7 5 casos
- 10,7 – 18,3 1 caso
- 18,3 – 32 10 casos

Se puede observar que la mayoría de los ríos (excepto Colorado, Paraná y Dulce) tienen una frecuencia dominante en nivel del 3 a 7 años.

Entre 7 y 11 años se observa en los ríos Colorado, Paraná, Atuel y Dulce.

Entre 13 y 35 años se ve en todos los ríos excepto (Atuel, Salado y Pilcomayo).

Resultados similares fueron encontrados por otros autores como: Vargas et. al (2002) encontraron fluctuaciones de baja frecuencia cuasi periódicas (22 a 26 años) en los caudales anuales del río Paraná; Compagnucci et. al (2014) encontraron en la serie de caudales del río Paraná periodicidades de 3,5; 9 y 30 años. Y en la serie de caudales del río Atuel encontró periodicidades de 4-5 años; 7; 11 y 22 años.

4.1.1.1. Análisis del aporte de los distintos procesos en las series de caudales

Luego de realizar el análisis de frecuencias dominantes de las distintas series de caudales y encontrar que existen rangos de frecuencias que predominan en las series, se procedió a realizar un segundo análisis. Éste consiste en calcular la varianza de la fluctuación de las series de caudales con contribuciones en el espectro de energía en los distintos rangos de frecuencias encontrados. La varianza del espectro es el área del mismo. Con esto se pretende contabilizar el aporte porcentual que tiene cada rango de frecuencia a la serie de caudales total. Para realizar esto se procedió a aplicar filtros pasa-banda entre los siguientes rangos:

N_a : menores a 2,2 años. Representa la componente aleatoria.

N_2 : 2,2 años y 3 años

N_5 : 3 y 7 años

N_{11} : 7 y 13 años

N_{bd} : 13 y 35 años

N_v : mayor a 35 años

Para realizar este trabajo se utilizó un análisis con filtros de Fourier, haciendo que la energía de las fluctuaciones sean iguales a cero para los rangos de frecuencias no incluidos en la banda del filtro "pass band". Para lo cual se verificó la herramienta con el análisis de una serie sintética.

4.1.1.2. Análisis de Varianza

Se ha efectuado un análisis de varianza del espectro a fin de determinar las frecuencias estadísticamente significativas.

Para verificar el aporte de las distintas frecuencias dominantes se calculó la varianza de los distintos espectros de la serie filtradas y se comparó con la varianza total de la serie sin filtrar.

De esta forma se obtiene el porcentaje de contribución que tiene cada rango de frecuencia a la serie de caudales sin filtrar. Como resultado se obtiene la Tabla 4.2 donde se indica el porcentaje de aporte que tiene cada rango de frecuencia.

Tabla 4.2. Aporte de la varianza en cada ancho de banda de cada serie de cuenca estudiada.

RÍO	N _a	N ₂	N ₅	N ₁₁	N _{bd}	N _{vc}
Paraná	31%	3%	16%	21%	9%	16%
Suquía	38%	0%	14%	8%	15%	15%
Xanaes	43%	0%	9%	8%	15%	9%
Ctalamochita	50%	0%	19%	8%	19%	0%
Anizacate	19%	2%	38%	12%	5%	0%
Dulce	28%	6%	4%	16%	25%	16%
Juramento	49%	12%	22%	1%	12%	0%
Bermejo	27%	4%	19%	3%	23%	20%
Pilcomayo	33%	6%	9%	4%	26%	0%
Salado	30%	5%	36%	2%	2%	2%
San Juan	45%	3%	27%	5%	4%	7%
Mendoza	40%	0%	9%	3%	20%	3%
Atuel	36%	2%	23%	9%	15%	11%
Colorado	50%	8%	12%	11%	10%	1%

En N_a se considera los procesos menores a 2,2 años y la parte aleatoria de todas las frecuencias. La varianza residual no explicada por las periodicidades significativas debe ser atribuida a la componente estocástica (Correa y Guevara Pérez, 1992).

Como se observa para muchas series de caudales representa casi el 50% de la varianza del espectro. Lo cual significa que la serie tiene una alta componente aleatoria. El resto puede explicarse en parte por distintos procesos que sean de frecuencias entre 2 y 3 años (QBO oscilación cuasi bienal), 3 y 7 años (ENSO); entre 7 y 13 años (oscilaciones de radiación solar); entre 13-35 (oscilaciones bidecadales debidas a procesos de variabilidad de baja frecuencia) y mayores a 35 años (variabilidad debida a procesos de gran escala como puede ser la variabilidad natural o el cambio climático).

Se resalta en la tabla que antecede (sin considerar los procesos N_a) que para nueve cuencas de 14 estudiadas predominan los procesos de baja frecuencia como son los N_{bd}, luego los N₅. Para dos cuencas se resalta el proceso N_v y para solo una el proceso N₁₁ (Paraná).

Con esto se observa que existe una variabilidad en las series de alta, baja y media frecuencia que aportan a la fluctuación de los caudales en distintos porcentajes.

Este resultado permite avanzar en el estudio de los procesos que se deben considerar en la explicación de fenómenos hidrológicos como son las sequías y los excesos. Teniendo en cuenta que el proceso involucra fenómenos que tienen en el tiempo un comportamiento a pequeña, media y gran escala.

En las series de caudales intervienen varios procesos periódicos (fenómeno multivariado). Por tal, considerando los resultados se debe tener en cuenta que los modelos de predicción deben considerar la totalidad de los procesos que intervienen a lo largo del tiempo en las series de caudales, y no sólo uno.

4.2. Generación de series sintéticas para predicción de sequías

La implementación de estrategias a largo plazo para el uso conjunto de las aguas superficiales y subterráneas requiere de un conocimiento detallado del comportamiento de las series históricas. Este problema es de especial relevancia en regiones donde los recursos hídricos son muy limitados, tal como zonas áridas y semiáridas, que obligan al estudio de políticas de uso óptimo de dichos recursos.

Para poder plantear estrategias de planificación en el largo plazo es necesario conocer el comportamiento de los recursos hídricos. En base al conocimiento del pasado se pretende simular el comportamiento estocástico de los datos históricos, con la finalidad de generar series sintéticas para predecir los periodos de sequías futuros, manteniendo como hipótesis que las series son estacionarias.

En este punto se utiliza el análisis espectral y armónico para la caracterización de las series plurianuales de caudales. Investigaciones similares se han realizado para otros ríos por Correa y Guevara Pérez (1992), Ántico y et. al, (2015) y Luque Espinar et. al (2005) entre otros.

A partir de las frecuencias dominantes encontradas con el análisis espectral, se seleccionan las más significativas y se extienden las series de caudales con análisis de Fourier (análisis armónico). Finalmente se caracteriza cualitativamente la serie obtenida para años futuros de manera de obtener una herramienta de gestión para el mediano y largo plazo.

4.2.1. Análisis armónico (Fourier)

Un método muy común para el análisis de procesos periódicos es el análisis armónico de Fourier (véase p.e. Bronstein et al, 1969; Godin, 1972). El análisis de Fourier está basado en asumir un modelo puramente determinístico.

Las observaciones $X(t_k)$ de $T = 2n + 1$ períodos equidistantes de tiempo t_k pueden ser sustituidas por medio de k funciones periódicas:

$$X(t) = a_0 + \sum_{k=1}^n a(k f_0) \cos(k f_0 t) + \sum_{k=1}^n b(k f_0) \text{sen}(k f_0 t) \quad (\text{Ecuación 4.12})$$

$$f_0 = \frac{1}{T}$$

a_0 : Valor medio de caudales anuales [m^3/seg]

t: tiempo [años]

T: Periodo de registro [años]

Los diagramas que representan los parámetros $a(k.f_0)$ y $b(k.f_0)$ (coeficientes de Fourier) en función de la frecuencia se denominan espectro de las observaciones:

$$a(k f_0) = \frac{2}{T} \sum_{k=1}^n X(t) \cos(k f_0 t) \quad (\text{Ecuación 4.13})$$

$$b(k f_0) = \frac{2}{T} \sum_{k=1}^n X(t) \text{sen}(k f_0 t) \quad (\text{Ecuación 4.14})$$

4.2.2. Resultados

Para cada serie analizada se utilizó primero, tres cuarto de la serie disponible para determinar los coeficientes de Fourier (esto se hizo para contrastar las predicciones de Fourier con la serie medida del cuarto de la serie restante). En ese paso se eligieron las periodicidades más significativas. Luego, se recalcularon los coeficientes utilizando la serie completa. Las frecuencias más significativas se redefinieron en función del coeficiente de correlación entre la serie simulada versus medida y la cantidad de años secos que era capaz de reproducir la serie de Fourier. Se muestra como ejemplo, en la Figura 4.15, lo realizado para la serie del río Suquía.

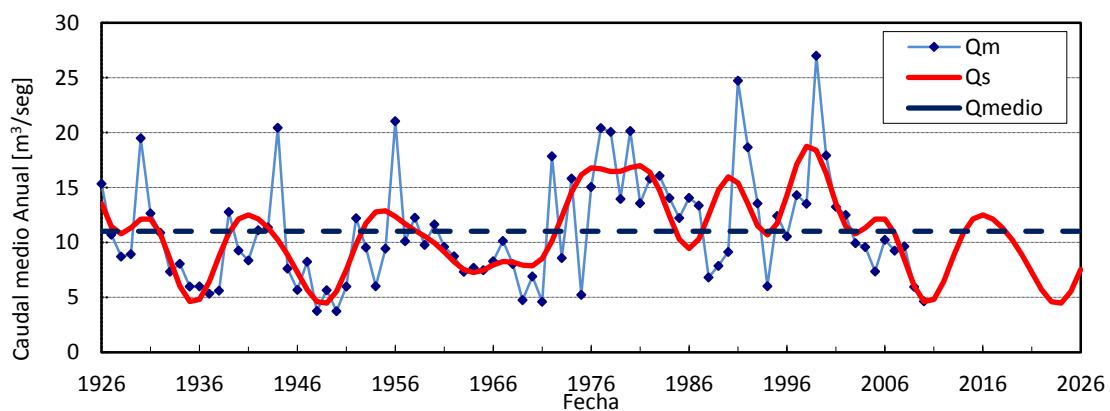


Figura 4.15. Caudales simulados y medidos en el río Suquía. Usando 75 datos (1926-2000)

Se determinaron los coeficientes de la ecuación de Fourier utilizando la serie (1926-2000), es decir 75 datos, lo cual permite utilizar un rango de frecuencias entre 0,013 (1/75 años) y 0,5 (1/2 años). Luego, se contrastaron las predicciones de Fourier con la serie medida 2000-2010. La función queda completamente descrita por sus coeficientes de Fourier y puede ser totalmente reconstruida usando los coeficientes $a(f_k)$ y $b(f_k)$.

Los escurrimientos anuales observados y simulados (mediante análisis armónico) se representan en la Figura 4.15. En dicha Figura se observa que la función periódica plurianual de escurrimientos podría reflejar las posibles secuencias futuras de años ricos y pobres en caudales. Esta función fue aproximada mediante una serie de Fourier que incluye los parámetros $a(K,f)$ y $b(K,f)$ para frecuencias entre 0,013 (1/75) y 0,13 (1/7,5) que constituye un filtro pasa bajo de la serie observada. El coeficiente de correlación entre los valores observados y sintetizados con esta aproximación es 0,66. Esta serie sintética simula adecuadamente la permanencia de años con caudales por debajo de la media. Si se acepta que las mismas periodicidades plurianuales serán válidas en el futuro, se pueden investigar estrategias de manejo a largo plazo de los recursos hídricos de la zona en estudio.

Tabla 4.3. Serie simulada con Análisis de Fourier 1926-2000

Serie	Longitud de la serie utilizada	Cantidad de Frecuencias utilizadas	Rango de frecuencias	Coef de Correlación
Río Suquía	1926-2000	10	1/75 - 1/7,5 años	0,66

Para las series de caudales que contaban con más de 70 años de datos se aplicó el análisis de Fourier y se obtuvieron series sintéticas hasta el año 2026. Se aplicó este análisis a las cuencas de los ríos: Suquía, Xanaes, Dulce, Paraná, Bermejo, Juramento, San Juan, Atuel y Colorado) y se obtienen las series sintéticas a 2026.

Finalmente, se obtiene la matriz de sequías en el periodo 2013-2026. Se presenta a continuación las gráficas resultantes de las series analizadas. En las mismas se presenta: Q_m (caudal medido), Q_s (caudal sintetizado) y Q_{medio} (Caudal medio anual de las series de datos disponibles). Se expone, también, una tabla con los datos que resumen la correlación obtenida entre la Q_m y Q_s , la cantidad de frecuencias utilizadas, el rango y el porcentaje de años secos

que determina en cada caso. (Tomándose años secos aquellos menores al percentil 0,4 de la serie de la curva de permanencia de caudales de cada río).

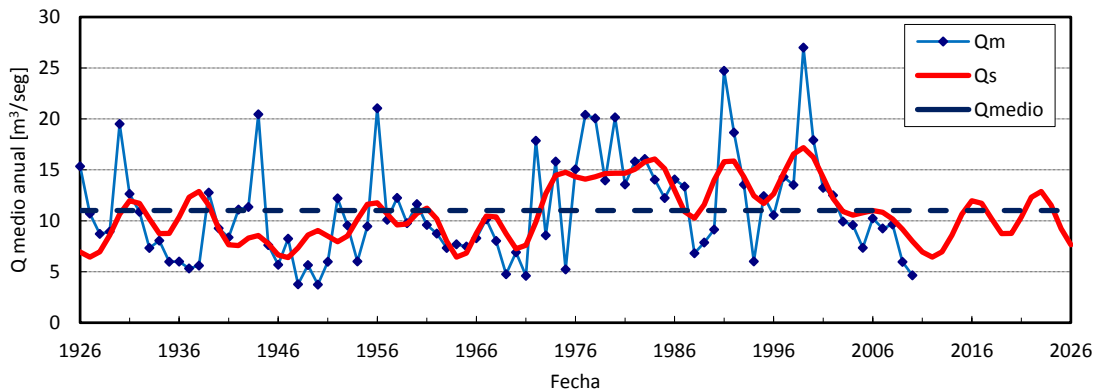


Figura 4.16: Caudales simulados y medidos en el río Suquia.

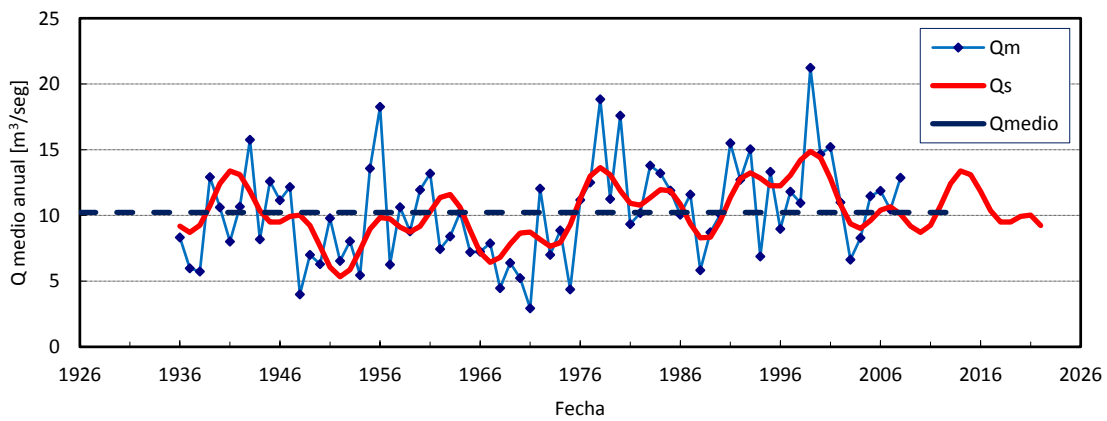


Figura 4.17: Caudales simulados y medidos en el río Xanaes.

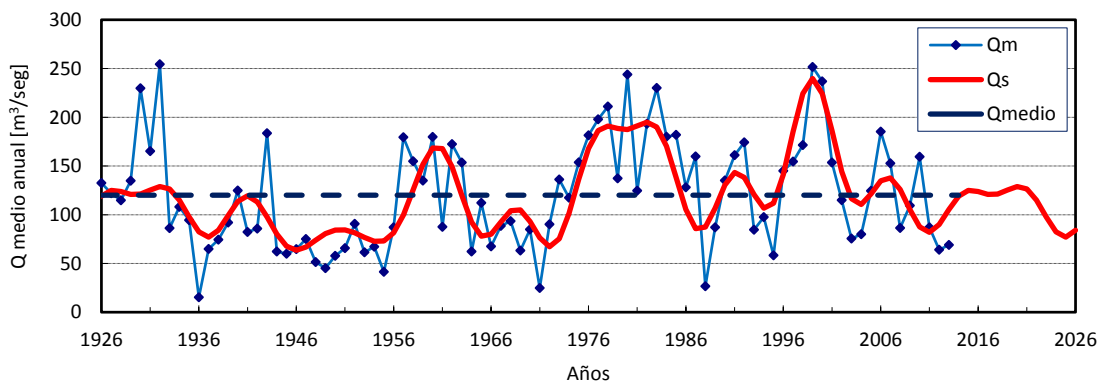


Figura 4. 18: Caudales simulados y medidos en el río Dulce

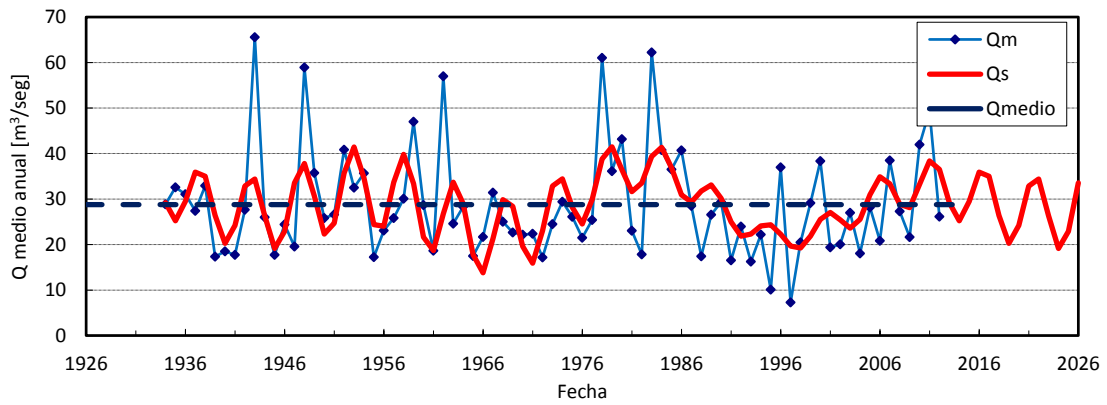


Figura 4. 19: Caudales simulados y medidos en el río Juramento

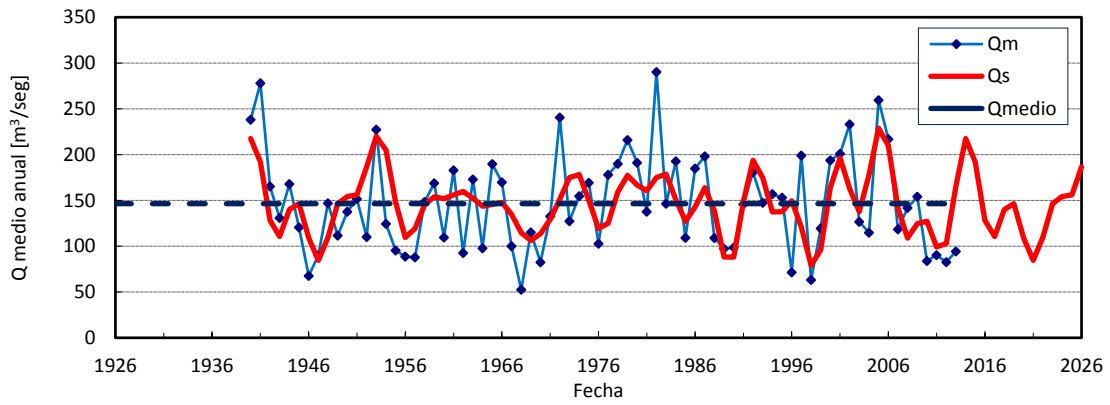


Figura 4. 20: Caudales simulados y medidos en el río Colorado

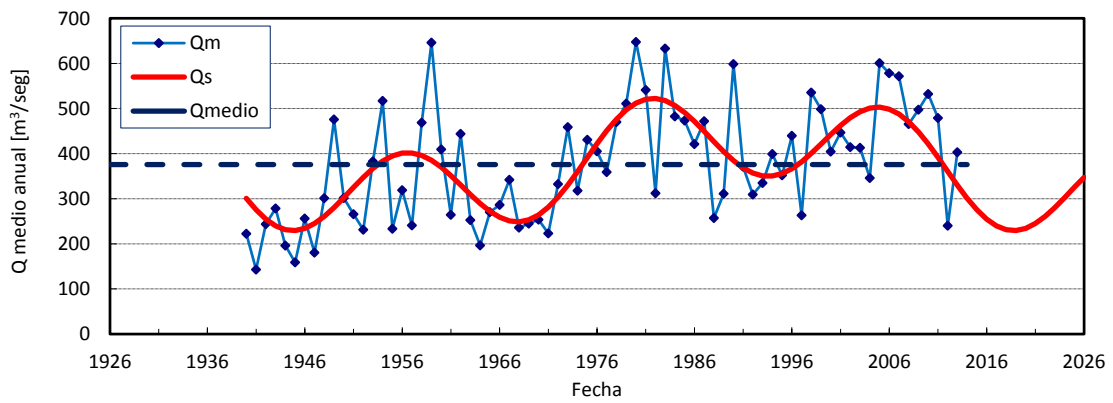


Figura 4.21: Caudales simulados y medidos en el río Bermejo

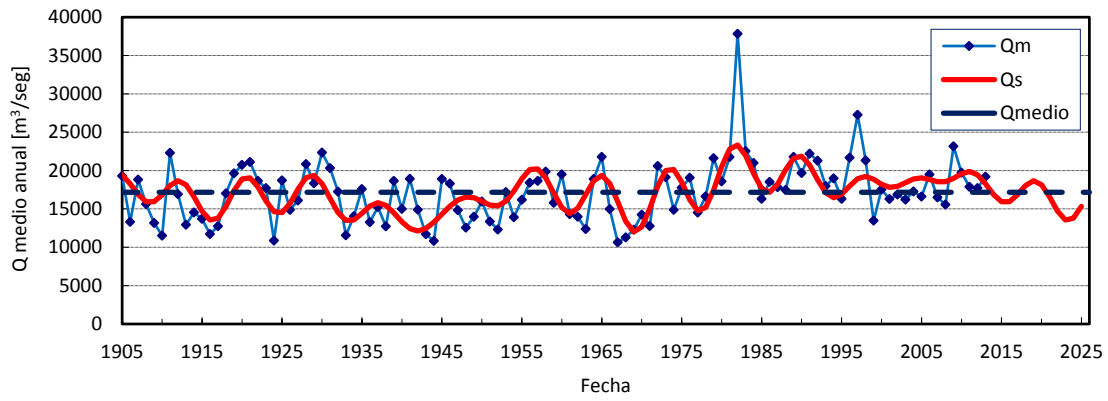


Figura 4.22: Caudales simulados y medidos en el río Paraná

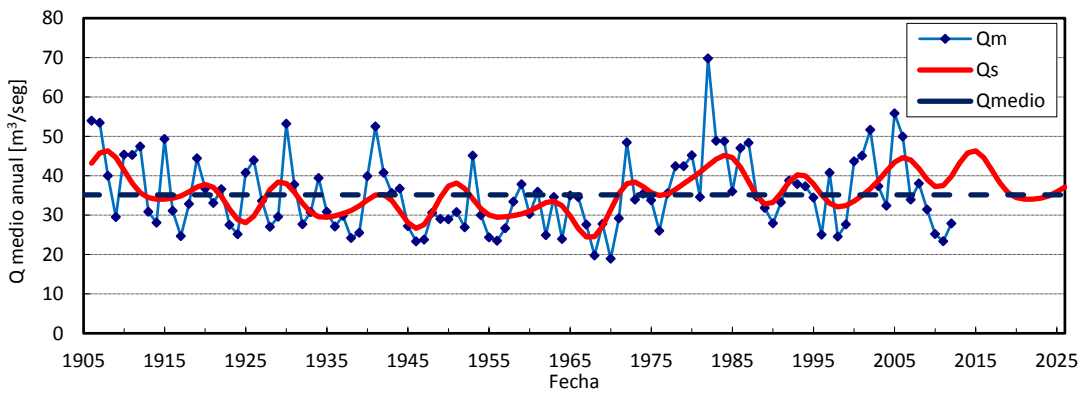


Figura 4.23: Caudales simulados y medidos en el río Atuel

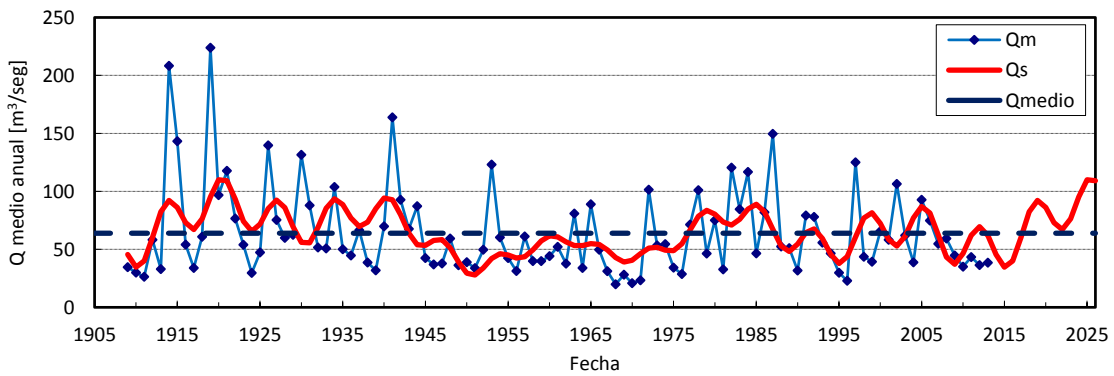


Figura 4.24: Caudales simulados y medidos en el río San Juan

Tabla 4.4. Resumen de la serie simulada con Análisis de Fourier

Río	Longitud de la serie de caudales utilizada	Período utilizado	Cantidad de frecuencias utilizadas	Frecuencias utilizadas [1/año]	Coefficiente de correlación	Porcentaje de años secos predichos correctamente
Atuel	107 años	1906 - 2012	5	1 / 107 1 / 36 1 / 27 1 / 11 1 / 7	0,53	64 %
Bermejo	74 años	1940 - 2013	2	1 / 74 1 / 25	0,68	76 %
Colorado	74 años	1940 - 2013	6	1 / 25 1 / 12 1 / 11 1 / 7 1 / 5 1 / 4	0,62	65 %
Dulce	88 años	1926 - 2013	6	1 / 88 1 / 22 1 / 18 1 / 10 1 / 8 1 / 7	0,73	84 %
Juramento	79 años	1934 - 2012	4	1 / 40 1 / 26 1 / 5,3 1 / 4,9	0,56	60 %

Río	Longitud de la serie de caudales utilizada	Período utilizado	Cantidad de frecuencias utilizadas	Frecuencias utilizadas [1/año]	Coefficiente de correlación	Porcentaje de años secos predichos correctamente
Paraná	107 años	1905 - 2011	6	1 / 107 1 / 36 1 / 27 1 / 9 1 / 8,2 1 / 7,6	0,62	77 %
San Juan	105 años	1909 - 2013	5	1 / 105 1 / 52 1 / 21 1 / 7 1 / 6	0,48	44 %
Suquía	85 años	1926 - 2010	7	1 / 85 1 / 43 1 / 21 1 / 9 1 / 8 1 / 6,1 1 / 5,7	0,59	60 %
Xanaes	73 años	1936 - 2008	3	1 / 73 1 / 18 1 / 7	0,58	75 %

Matriz de Caracterización de Sequías Hidrológicas

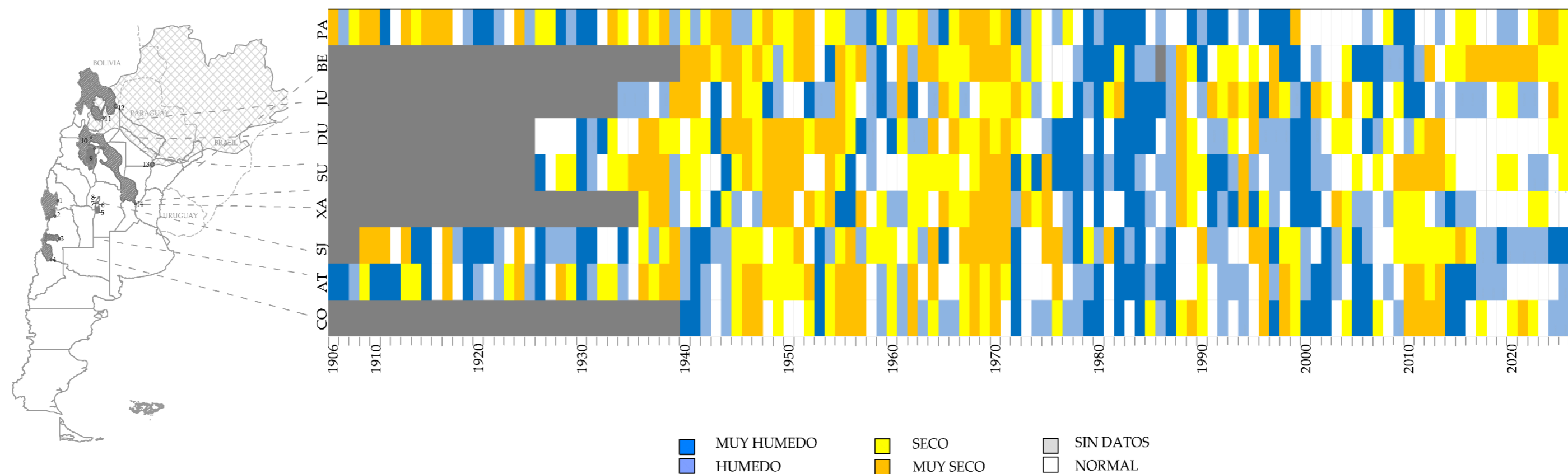


Figura 4.25: Predicción de sequías hidrológicas a partir de series sintéticas

4.3. Discusión de Resultados

En este capítulo de la tesis se generaron series sintéticas de caudales para los ríos Suquía, Xanaes, Dulce, Paraná, Bermejo, Juramento, San Juan, Atuel y Colorado con series de Fourier, utilizando las componentes de las frecuencias que más contribuyen a las fluctuaciones de caudales observados. La serie de caudales simulados reproducen en la mayoría de los casos el 60% de los años secos registrados en las series de caudales disponibles (excepto para el río San Juan que tiene una frecuencia dominante de 1/3,8 años). Las frecuencias utilizadas para generar la serie son mayores a cuatro años para todos los casos. Si se acepta que estas periodicidades se mantienen en el tiempo se pueden generar herramientas de planificación para establecer planes de mitigación y aumentar la resiliencia de la región ante eventos de sequías hidrológicas severas.

Acorde a estos resultados, la cuenca del río Suquía está atravesando un periodo de caudales normales y se pronostica que atraviese una sequía plurianual entre los años 2019-2020 y 2025-2026. Las cuencas que abastecen a la ciudad de Córdoba (ríos Suquía y Xanaes) y sus potenciales fuentes de abastecimiento (ríos Dulce y Ctalamochita) presentan sequías simultáneas. Por tal motivo, es necesario desarrollar estrategias para disminuir la demanda del recurso hídrico disminuyendo pérdidas, aumentando eficiencias, educando a la sociedad en los consumos, etc., además de incrementar la oferta con medidas complementarias (reactivación de fuentes subterráneas, mejoras de trasvases y nuevas obras de almacenamiento).

5. RELACIONES ENTRE SEQUÍAS HIDROLÓGICAS Y VARIABLES MACROCLIMÁTICAS.

Indicadores macroclimáticos y astronómicos se analizaron para conocer si existe vínculo con las sequías hidrológicas en las distintas escalas de tiempo. Ya que pueden constituir una herramienta en el pronóstico del fenómeno de sequías.

Los indicadores seleccionados son: ONI (Oceanic Niño Index); AMM (Atlantic Meridional Mode); TSA (Tropical Southern Atlantic Index); AMO (Atlantic multidecadal Oscillation); SOI (Southern Oscillation Index); PDO (Pacific Multidecadal Oscillation); Niño 1+2; Niño 3.4 y TNA (Tropical Northern Atlantic).

5.1. Indicadores macroclimáticos y astronómicos analizados

Los indicadores macroclimáticos y astronómicos analizados en esta tesis son los siguientes:

- ONI (Oceanic Niño Index): El índice ONI se calcula como la media móvil de tres meses de la anomalía de temperatura en la región Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°-170°W).
- Niño 3.4: Temperatura Promedio de la superficie del mar en las regiones NIÑO 3 y NIÑO 4
- Niño 2+1: Temperatura Promedio de la superficie del mar en las regiones 2+1

Para una mayor comprensión de cómo se desarrollan los eventos El Niño/La Niña del ciclo ENOS a lo largo del Océano Pacífico Ecuatorial, se han definido cuatro regiones de acción. De Oeste a Este estas regiones son: Regiones Niño 4, Niño 3, Niño 3.4 y Región Niño 1+2 (ver Figura 5.1).

Las regiones Niño 4 y 3 se encuentran ubicadas en el lado occidental del Pacífico y se caracterizan por presentar las máximas anomalías de temperatura superficial del mar.

La región Niño 3.4 es una subregión comprendida entre las regiones Niño 4 y 3 y representa un buen indicador de la correlación entre la temperatura superficial del mar y el Índice de Oscilación del Sur.

La región Niño 1+2 incluye las costas de Perú y Ecuador incluidas las Islas Galápagos, ésta región representa un indicador de los cambios inducidos por El Niño en los patrones de variabilidad de la costa del Pacífico de América del Sur.

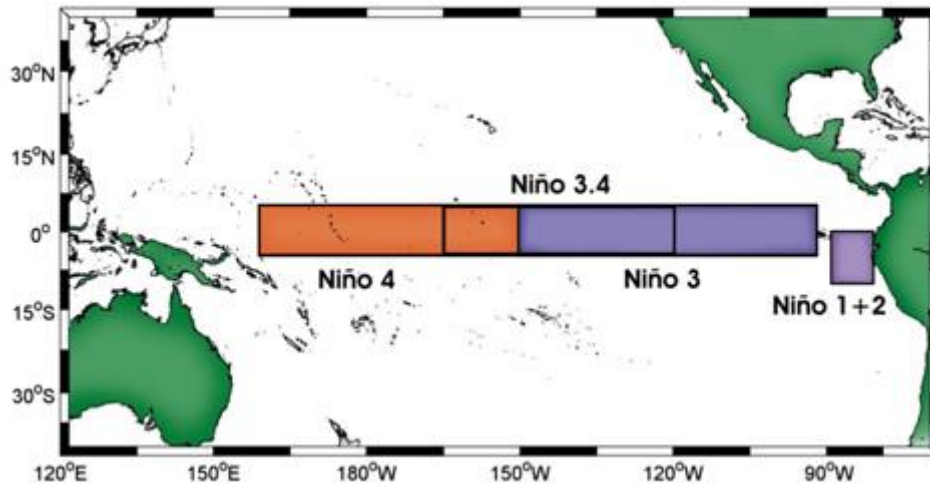


Figura 5.1. Ubicación de las regiones ENOS

Fuente: http://www.inocar.mil.ec/modelamiento/elnino/nino_generalidades.php

- PDO (Pacific Decadal Oscillation): Se calcula usando análisis de componentes principales de anomalías mensuales en la temperatura superficial del Océano Pacífico Norte. Para separar la variabilidad de dicho patrón del calentamiento global, se remueve la media mensual global de las anomalías de temperatura superficial del mar.
- SOI (South Oscillation Index): Este valor es un indicador de la diferencia de presión atmosférica en Tahití y Darwin.
- AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation): El índice AMO está asociado a las variaciones de la temperatura superficial del mar (SST) en el Atlántico Norte. Las fases frías y cálidas duran cada una de 20 a 40 años aproximadamente y los cambios entre los valores extremos son de alrededor de 1°F, (NOAA, 2015). Esta oscilación se presenta en la mayor parte del océano comprendida entre Groenlandia y el Ecuador.
- AMM (Atlantic Meridional Mode): El modo describe la variabilidad meridional en el océano Atlántico tropical (NOAA, 2015b). EL índice AMM está caracterizado por el gradiente meridional de temperatura superficial del mar (SST) y vientos en a nivel del mar, cerca de la zona de convergencia intertropical (ITCZ) (Vimont y Kossin, 2007).
- TNA (Tropical Northern Atlantic Index): se calcula como las anomalías de la temperatura superficial marina promediadas sobre un cuadrante comprendido entre las coordenadas 5,5 N a 23,5 N y 15 W a 57,5 O (ver Figura 5.2).
- TSA (Tropical Southern Atlantic Index): se calcula como las anomalías de la temperatura superficial marina promediadas sobre un cuadrante comprendido entre las coordenadas Ec-20 S y 10 E - 30 O (ver Figura 5.2).

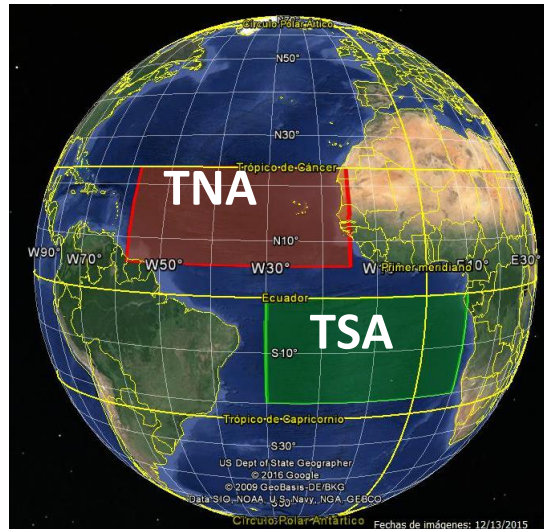


Figura 5.2. Ubicación de las regiones TNA y TSA

- **Manchas Solares:** las manchas solares (MS) son regiones del sol que presentan una temperatura más baja que su entorno. Si bien son conocidas desde la antigüedad, existe un registro preciso de ellas desde 1749. La cantidad de manchas que presenta el sol cada año no es constante; por el contrario se han establecido ciclos que dan cuenta del patrón del comportamiento dinámico de la actividad solar. En diferentes análisis se ha puesto en evidencia las interrelaciones entre la actividad solar con la hidrósfera y la atmósfera, que permite entender las causas de diferentes variables atmosféricas (Dölling et al., 2014). La irradiancia solar presenta periodicidades de 9,5; 11,5; 19 y 23,5 años debidas a precesión, 41 años debidas a oblicuidad y 100-413 años debidas a excentricidad (Wilhelm, 1997).

En la Tabla 5.1 se resumen las características de los indicadores macroclimáticos analizados.

Tabla 5.1. Periodo analizado de los Indicadores

Indicador	Periodo
TNA	1948-2013
TSA	1948-2013
AMO	1861-2008
AMM	1948-2001
SOI	1951-2013
PDO	1948-2013
Manchas Solares	1700-2013
ONI	1950-2012
Niño 3.4	1950-2013
Niño 1+2	1950-2013

5.2. Análisis de Frecuencias Dominantes en indicadores macroclimáticos

5.2.1.1. Espectros de energía de las fluctuaciones obtenidos

A continuación se exponen los distintos espectros de frecuencias obtenidos de las series anuales de indicadores disponibles.

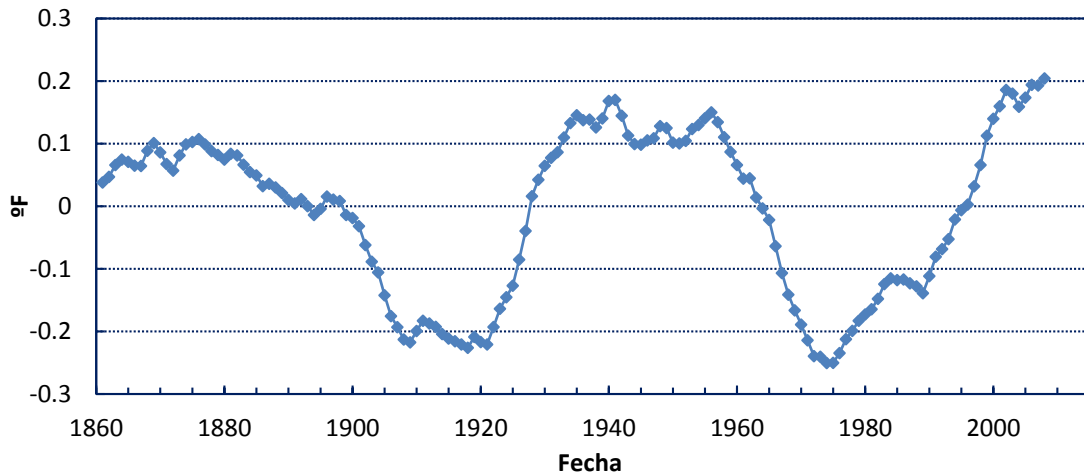


Figura 5.3. Indicador AMO

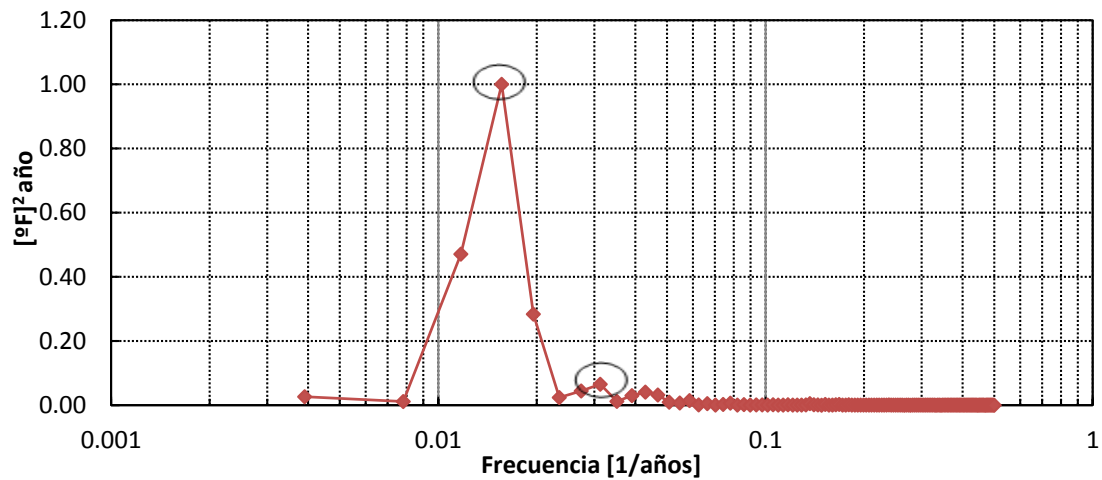


Figura 5.4. Espectro de energía de las fluctuaciones del índice AMO

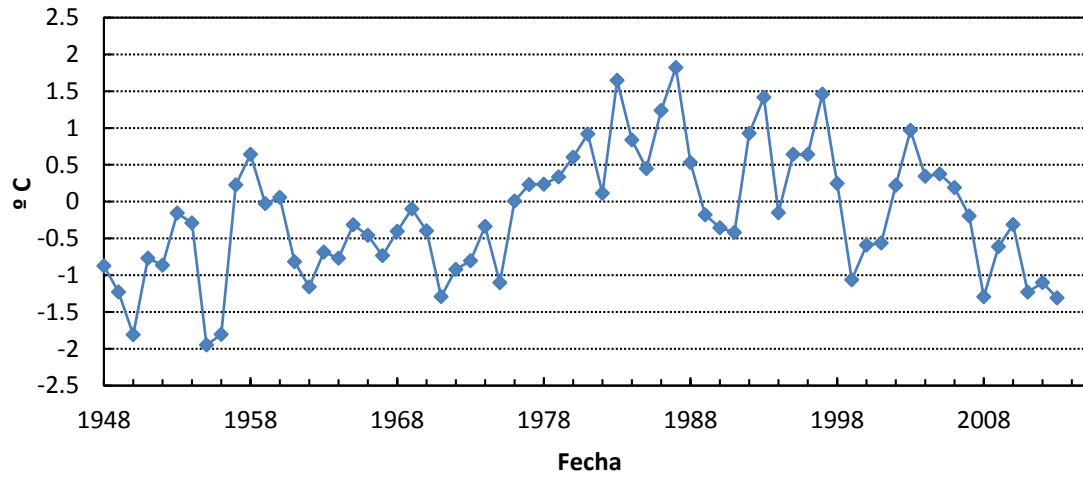


Figura 5.5. Indicador PDO

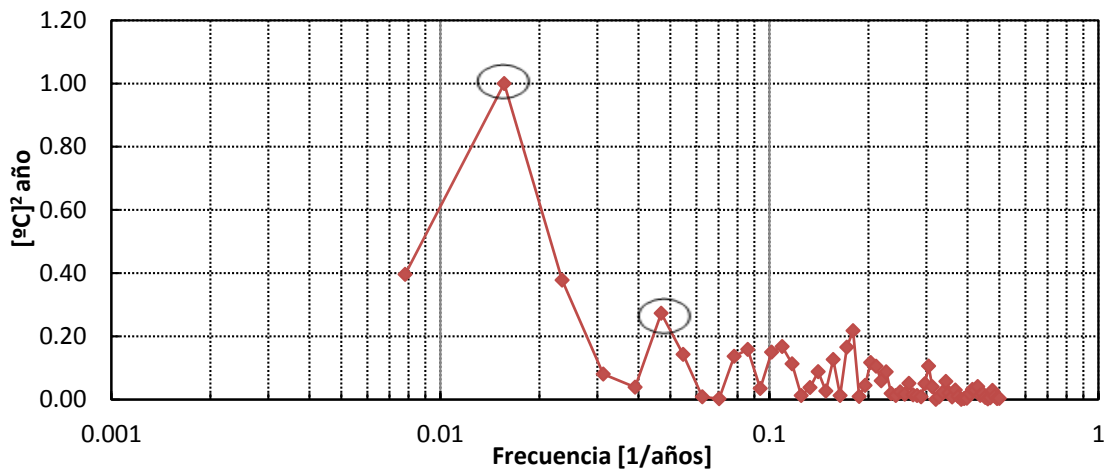


Figura 5.6. Espectro de energía de las fluctuaciones del índice PDO

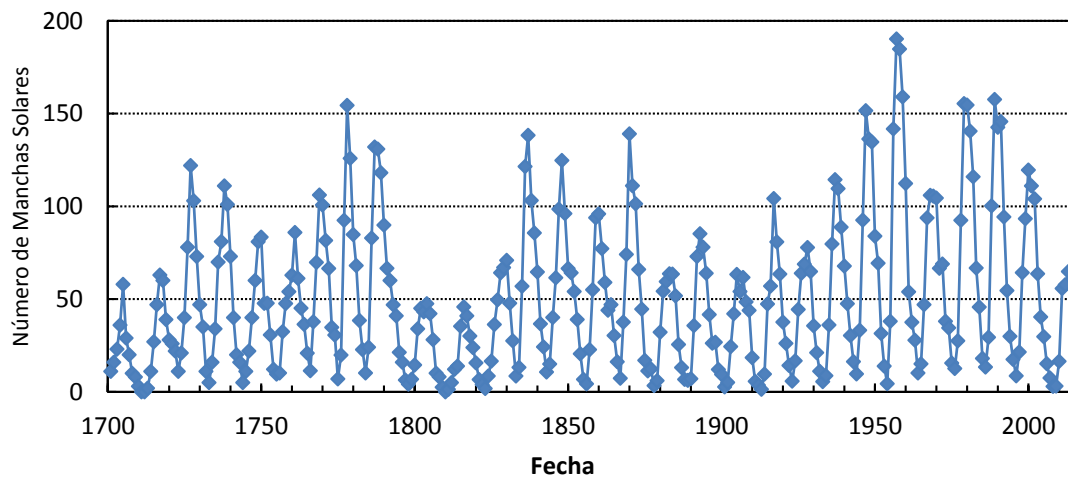


Figura 5.7. Número de Manchas Solares

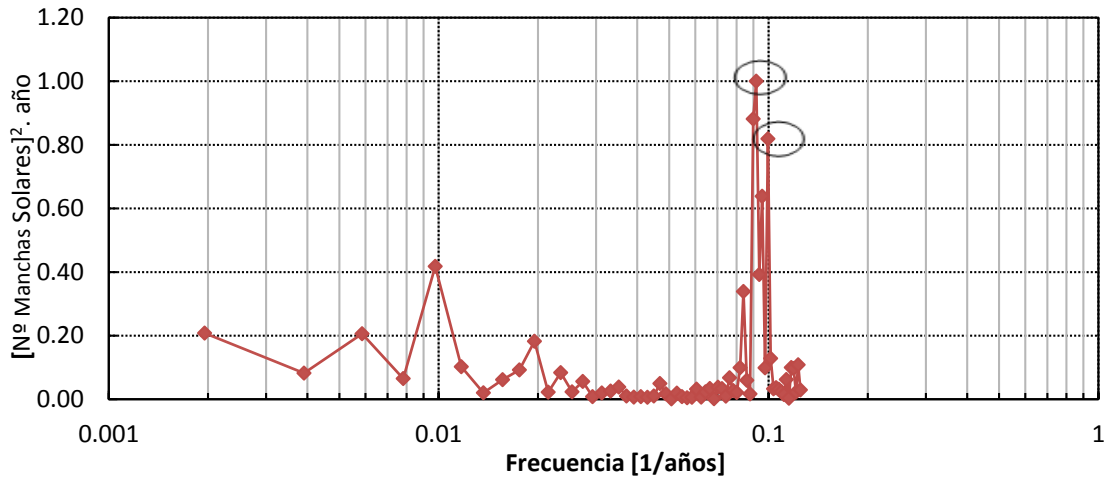


Figura 5.8. Espectro de energía de las fluctuaciones del índice Manchas Solares

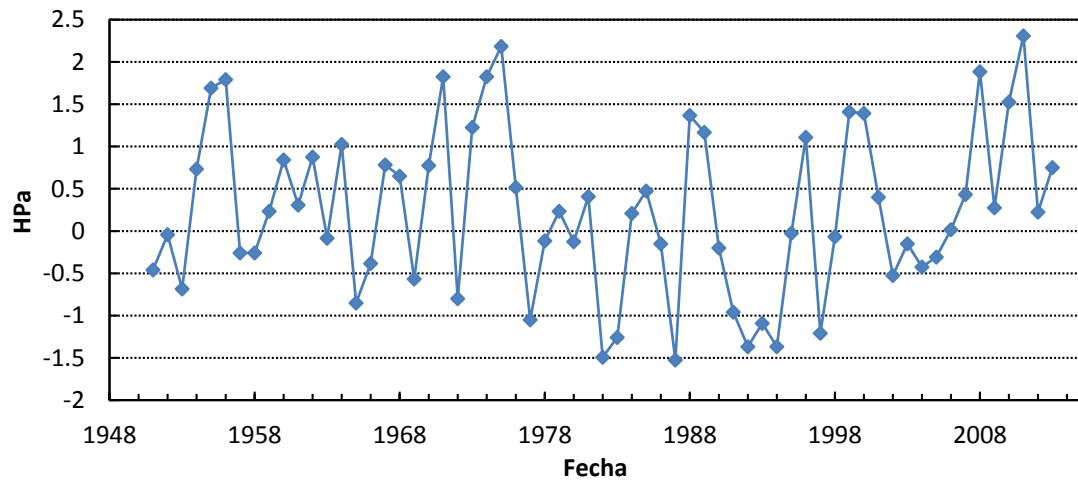


Figura 5.9. Indicador SOI

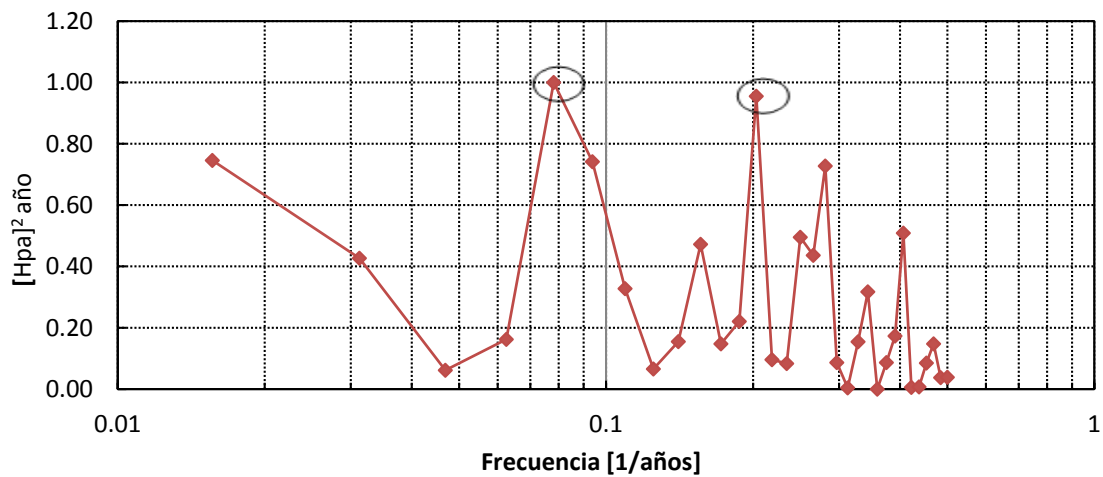


Figura 5.10. Espectro de energía de las fluctuaciones del índice SOI

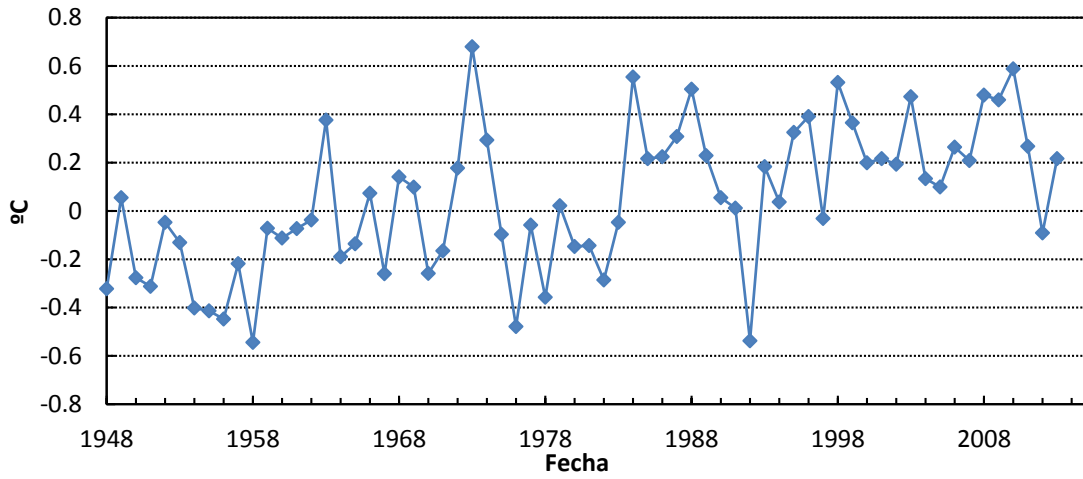


Figura 5.11. Indicador TSA

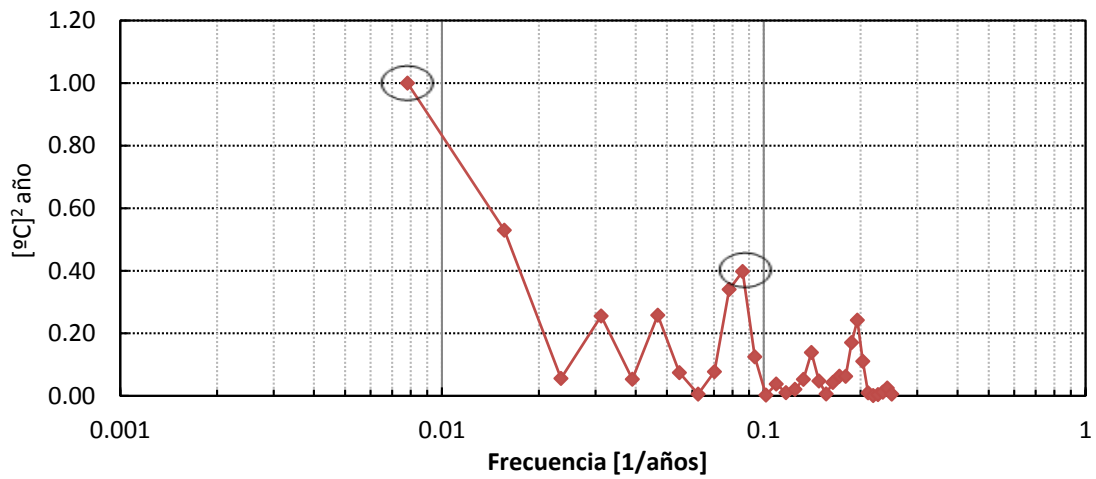


Figura 5.12. Espectro de energía de las fluctuaciones del índice TSA

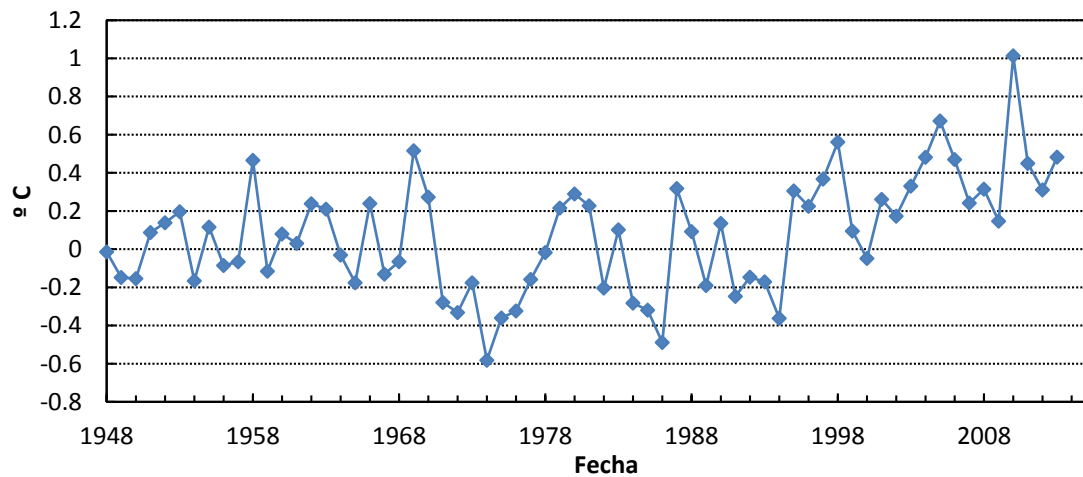


Figura 5.13. Indicador TNA

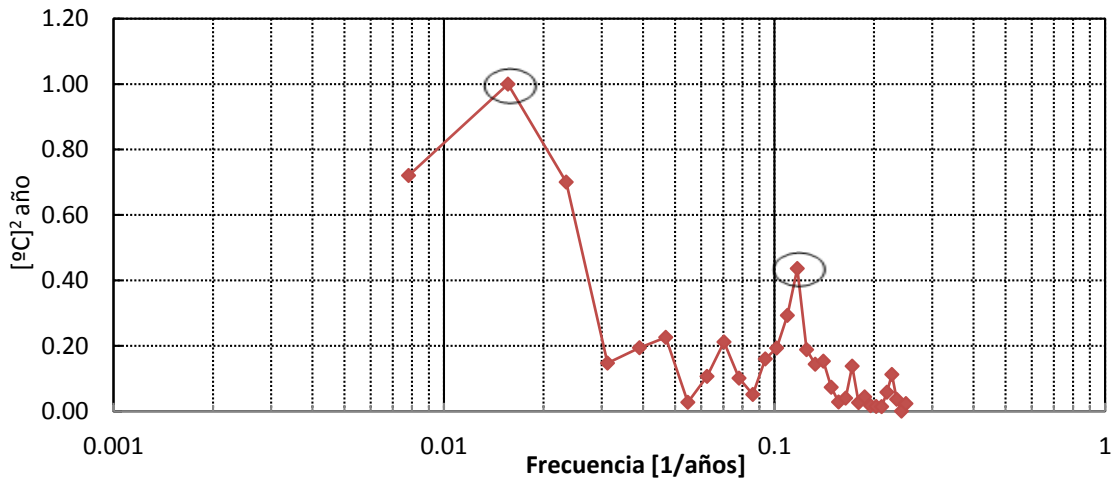


Figura 5.14. Espectro de energía de las fluctuaciones del índice TNA

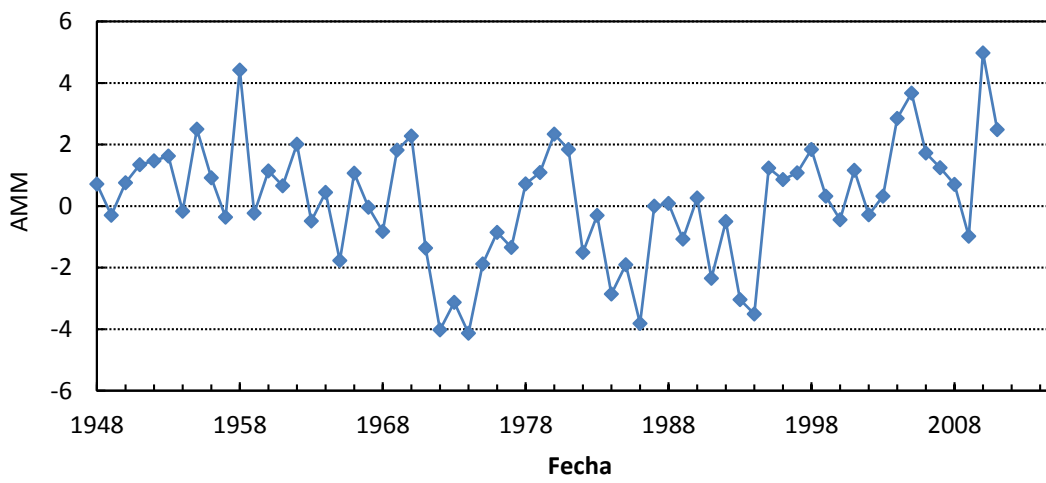


Figura 5.15. Indicador AMM

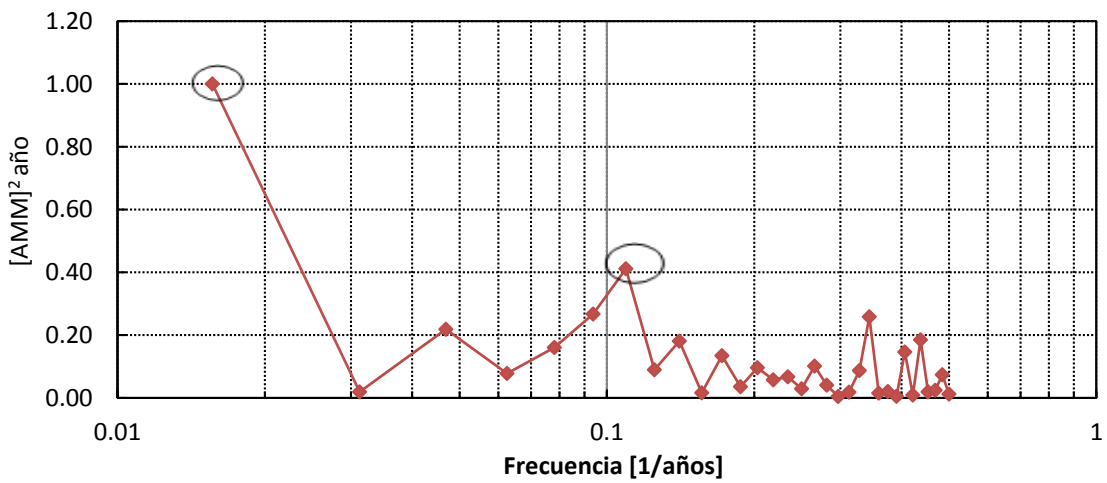


Figura 5.16. Espectro de energía de las fluctuaciones del índice AMM

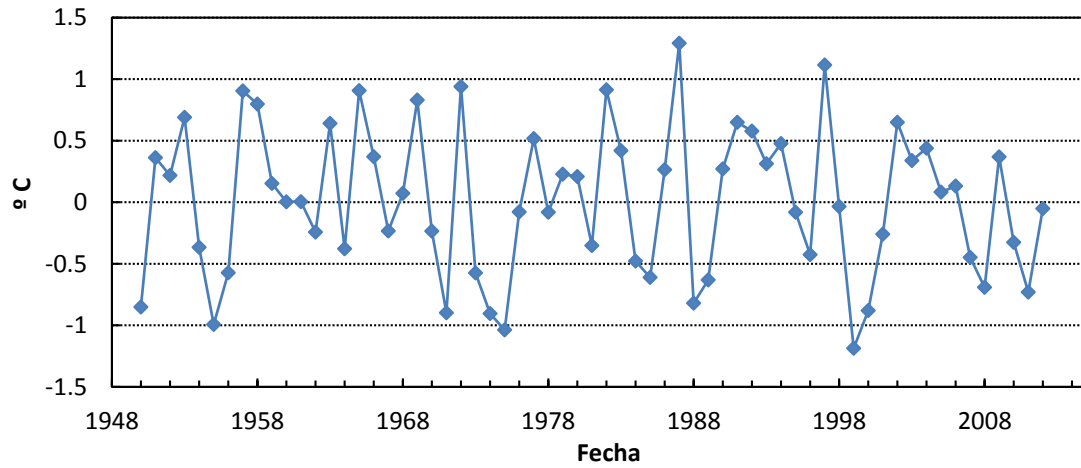


Figura 5.17. Indicador ONI

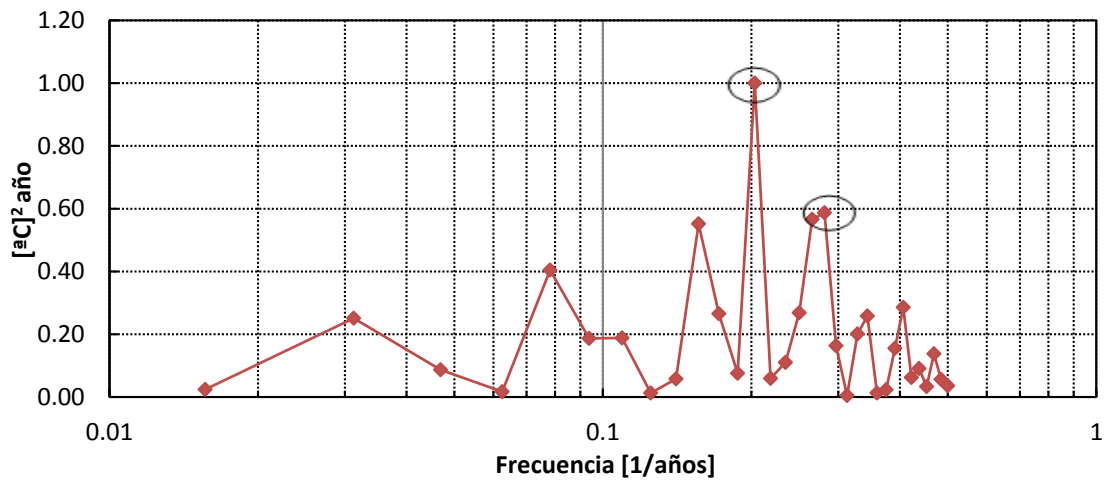


Figura 5.18. Espectro de energía de las fluctuaciones del índice ONI

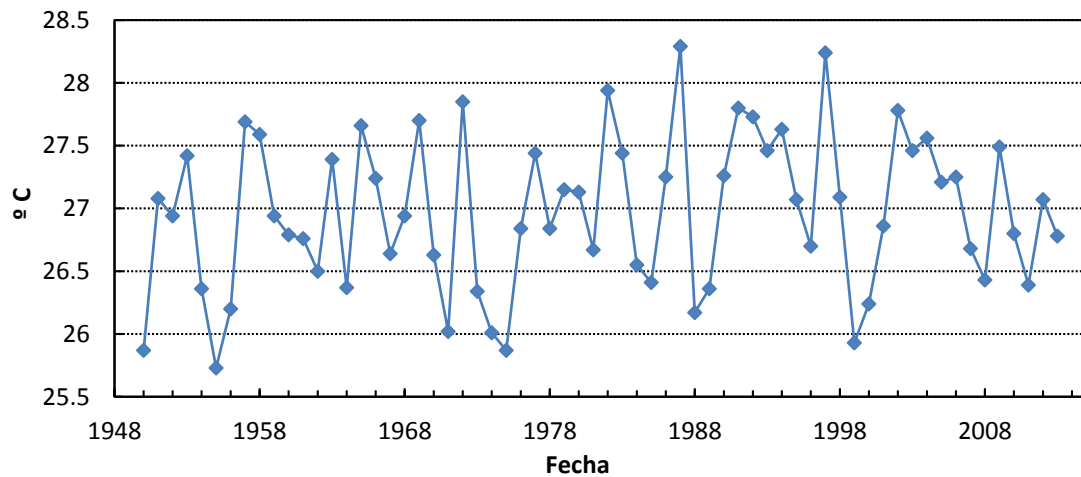


Figura 5.19. Indicador Niño 3.4

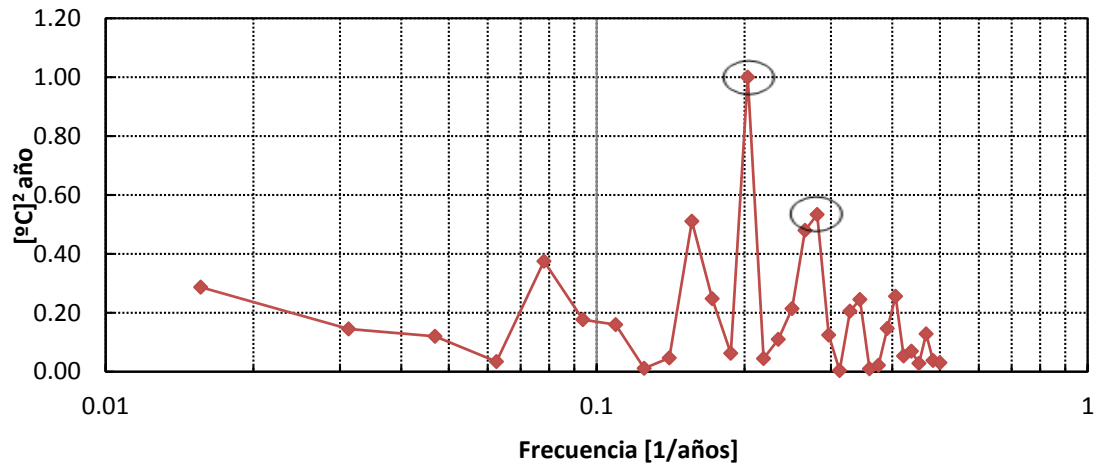


Figura 5.20. Espectro de energía de las fluctuaciones del índice Niño 3.4

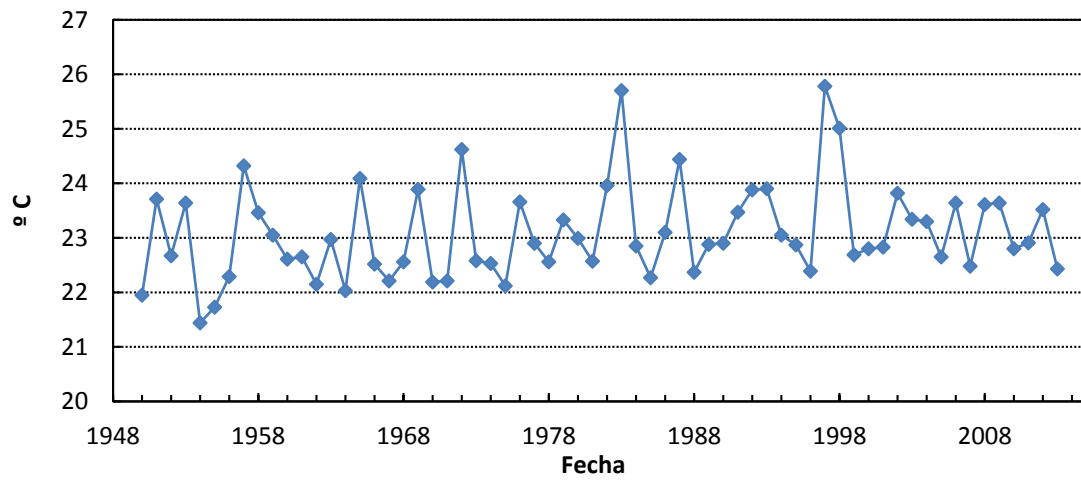


Figura 5.21. Indicador Niño 1+2

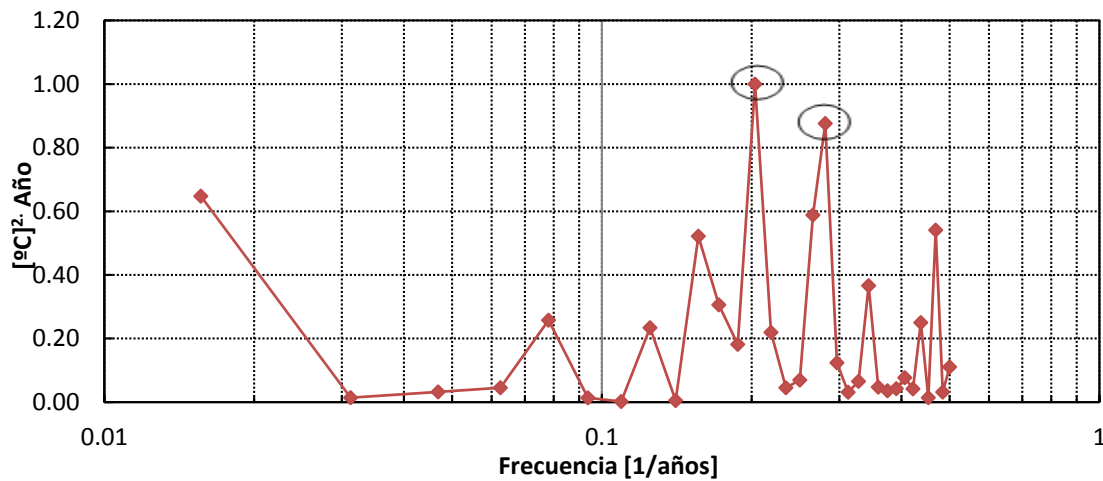


Figura 5.22. Espectro de energía de las fluctuaciones del índice 1+2

En la Tabla 5.2 se resume los periodos dominantes detectados en cada serie de indicadores analizados, y en la Tabla 5.3 se muestran los aportes de la varianza (en porcentaje) a los distintos anchos de bandas analizados.

Tabla 5.2. Periodos dominantes en cada serie de indicadores analizados

	MS	AMO	AMM	ONI	PDO	SOI	NIÑO 3.4	NIÑO 1+2	TSA	TNA
1º	10,9	64,0	9,1	4,9	21,0	12,8	4,9	4,9	11,6	8,5
2º	10,0	32,0	2,9	3,6	5,6	4,9	3,5	3,5	21,3	21,5

En los índices PDO, TNA, AMM se encuentra un periodo de frecuencia dominante de 64 años⁻¹ y en el índice TSA de 128 años⁻¹ sin embargo se descartan por presentar mucha incertidumbre, ya que las series tienen longitudes inferiores a 100 años. De este análisis podemos ver que los indicadores: Niño 1+2, Niño 3.4 y ONI tienen una frecuencia dominante del orden de 4 a 5 años. Los indicadores: Manchas Solares, AMM, SOI, TSA y TNA tienen frecuencias dominantes entre 8.5 y 13 años. Mientras que los indicadores PDO y AMO tienen una frecuencia dominante multidecadal.

Tabla 5.3. Aporte de la varianza en porcentaje a los distintos anchos de bandas analizados

	MS	AMO	AMM	ONI	PDO	SOI	NIÑO 3.4	NIÑO 1+2	TSA	TNA
n_a	2%	1%	56%	52%	21%	44%	49%	64%	43%	52%
n₅	4%	0%	0%	40%	19%	25%	38%	34%	5%	0%
n₁₁	66%	1%	18%	6%	14%	18%	6%	0%	12%	14%
n₁₃₋₃₅	5%	10%	1%	0%	9%	2%	0%	0%	7%	5%
N_v	20%	86%	3%	0%	29%	0%	0%	0%	25%	21%

En el análisis de varianza que se indica en la Tabla 5.3, se descartó el análisis de frecuencias menores a 0,5 (periodo menor a dos años) como se efectuó para los caudales, y se realizó el análisis aplicando un filtro pasa-banda que incluye frecuencias menores a 0,33 (periodo menores de tres años). Por lo tanto, n_a considera los procesos menores a tres años y la aleatoriedad de los mismos. De este análisis se observa que la mayoría de los indicadores (excepto MS, AMO, y PDO) los procesos n_a tienen aportes de alrededor del 50 % a la varianza del espectro de las fluctuaciones. Luego de este último, los procesos que predominan para ONI, SOI, Niño 3.4 y Niño 1+2 es n₅; para MS y AMM es n₁₁; y para AMO, PDO, TSA y TNA los n_v.

5.3. Análisis de correlaciones entre indicadores y series de caudales.

Conocer los indicadores macroclimáticos que puedan tener vinculación con las sequías en las distintas escalas de tiempo, es una herramienta que ayuda a la predicción de estos fenómenos. En este apartado se analizan las correlaciones entre los indicadores macroclimáticos y los caudales, para distintos anchos de bandas. Las cuencas seleccionadas para este análisis son la de los ríos Suquía, Dulce, Paraná, San Juan y Atuel, por ser las series más extensas y representativas de cada región estudiada. La metodología aplicada fue la siguiente:

- 1) Encontrar la serie de caudales filtrada que mejor ajuste con la serie normalizada de sequías.
 - La serie normalizada de sequías se calcula como la diferencia entre la serie de aportes anuales y el percentil 0,3 de la curva de permanencia de caudales de la misma serie que se corresponde con un caudal de una probabilidad de excedencia de 70%. Este criterio fue adoptado por diversos autores en el mundo (Hisdal et al., 2001; Fernández-Larrañaga, 1997; Rivera & Penalba, 2013). Así, usar criterios similares que se aplicaron a otras cuencas en otras regiones, permite la comparación de los resultados, pues utilizar una probabilidad de excedencia permite caracterizar sequías en regiones no homogéneas climatológicamente (Fernández-Larrañaga, 1997).
 - Los filtros pasa-banda de Fourier utilizados fueron los siguientes:
 - N_{bd} : filtro pasa-banda entre 13 y 35 años;
 - N_{11} : filtro pasa-banda entre 7-13 años;
 - N_5 : filtro pasa-banda entre 3 y 7 años.
- 2) Hallar la correlación entre cada serie filtrada de caudales de cada cuenca (N_{bd} , N_{11} , N_5) y las series filtradas de los índices macroclimáticos, en el mismo ancho de banda.
- 3) Graficar las series que poseen mejor correlación.

A continuación se presentan los resultados para los ríos analizados.

5.3.1. Río Dulce

En la Figura 5.23 se muestran en barras los periodos de sequías normalizados, y en línea llena se muestra la serie filtrada de caudales (N_{bd} , N_{11} y N_5) normalizados. Luego, en la Tabla 5.4 se muestran las correlaciones obtenidas.

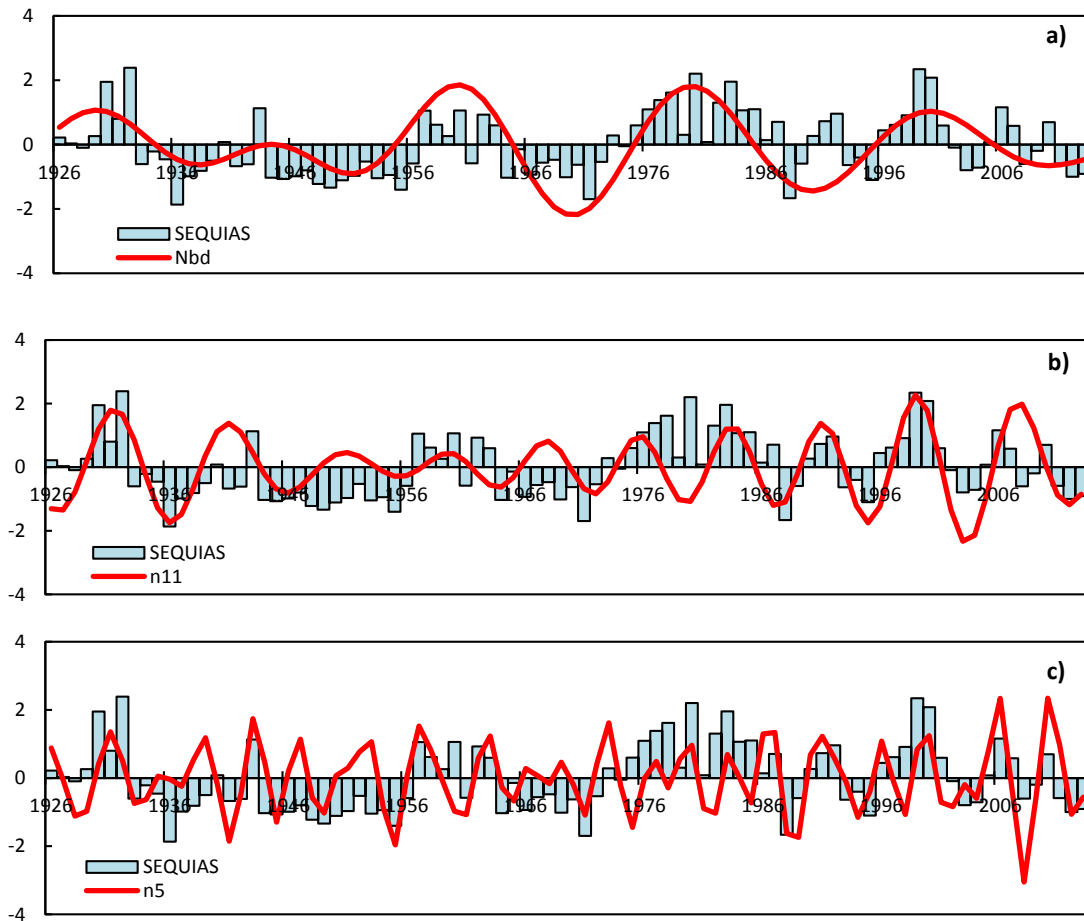


Figura 5.23. Serie de caudales anuales menos caudal con 70% de permanencia y caudales filtrados con anchos de bandas: a) 13-35; b) 7-13 y c) 3-7 años. Las series están normalizadas. Río Dulce

Tabla 5.4. Correlación entre serie de sequías y serie de caudales filtradas N_{bd} y N_{11} y N_5 para el río Dulce

Correlaciones	N_{bd}	N_{11}	N_5
Q SEQUIA	0,55	0,46	0,4

A partir de allí se contrastó la serie de caudales filtrada del río Dulce con las series filtradas de todos los indicadores (ver Tabla 5.5).

Tabla 5.5 Coeficiente de correlación entre las series de caudales del río Dulce y los indicadores

n_{bd}									
TNA	MS	AMO	ONI	PDO	SOI	AMM	NIÑO 3+4	NIÑO 1+2	TSA
0,46	0,59	0,63	0,23	0,71	-0,32	0,82	0,16	0,73	-0,51
n_{11}									
TNA	MS	AMO	ONI	PDO	SOI	AMM	NIÑO 3+4	NIÑO 1+2	TSA
-0,40	-0,08	0,28	-0,44	-0,36	0,19	-0,21	-0,42	0,42	-0,03
n_5									
TNA	MS	AMO	ONI	PDO	SOI	AMM	NIÑO 3+4	NIÑO 1+2	TSA
0,54	0,20	-0,33	0,37	0,46	-0,29	0,39	0,38	0,19	0,25

A continuación, en las siguientes figuras, se presentan los más significativos.

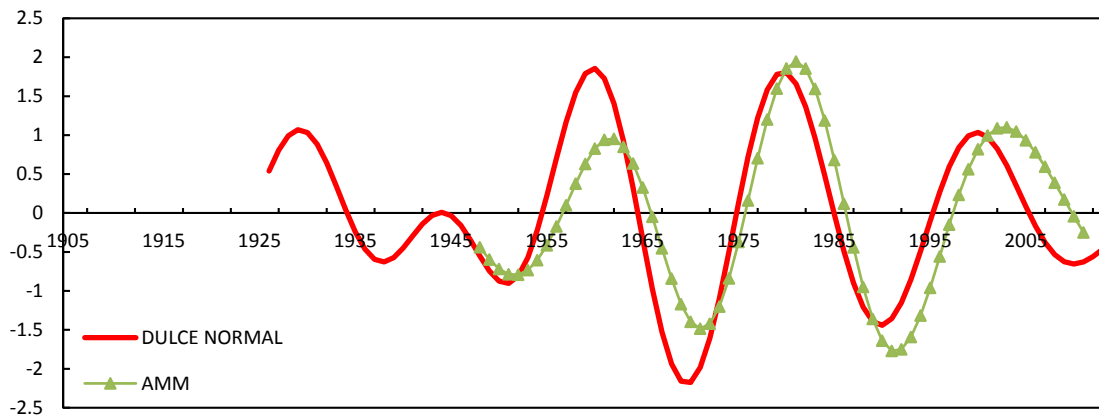


Figura 5.24. Caudales normalizados del río Dulce e indicador AMM con filtro pasa-banda entre 13-35 años.

Se observa que las fases negativas del indicador AMM coincidió con las sequías severas de la cuenca de mediados de la década de 40', 60', fines del 80' y la sequía de los años 2011-2013.

Se destaca la alta correlación encontrada entre la serie de caudales y los indicadores MS, AMO, PDO, Niño 1+2 y TSA para el ancho de banda de 13-35 años.

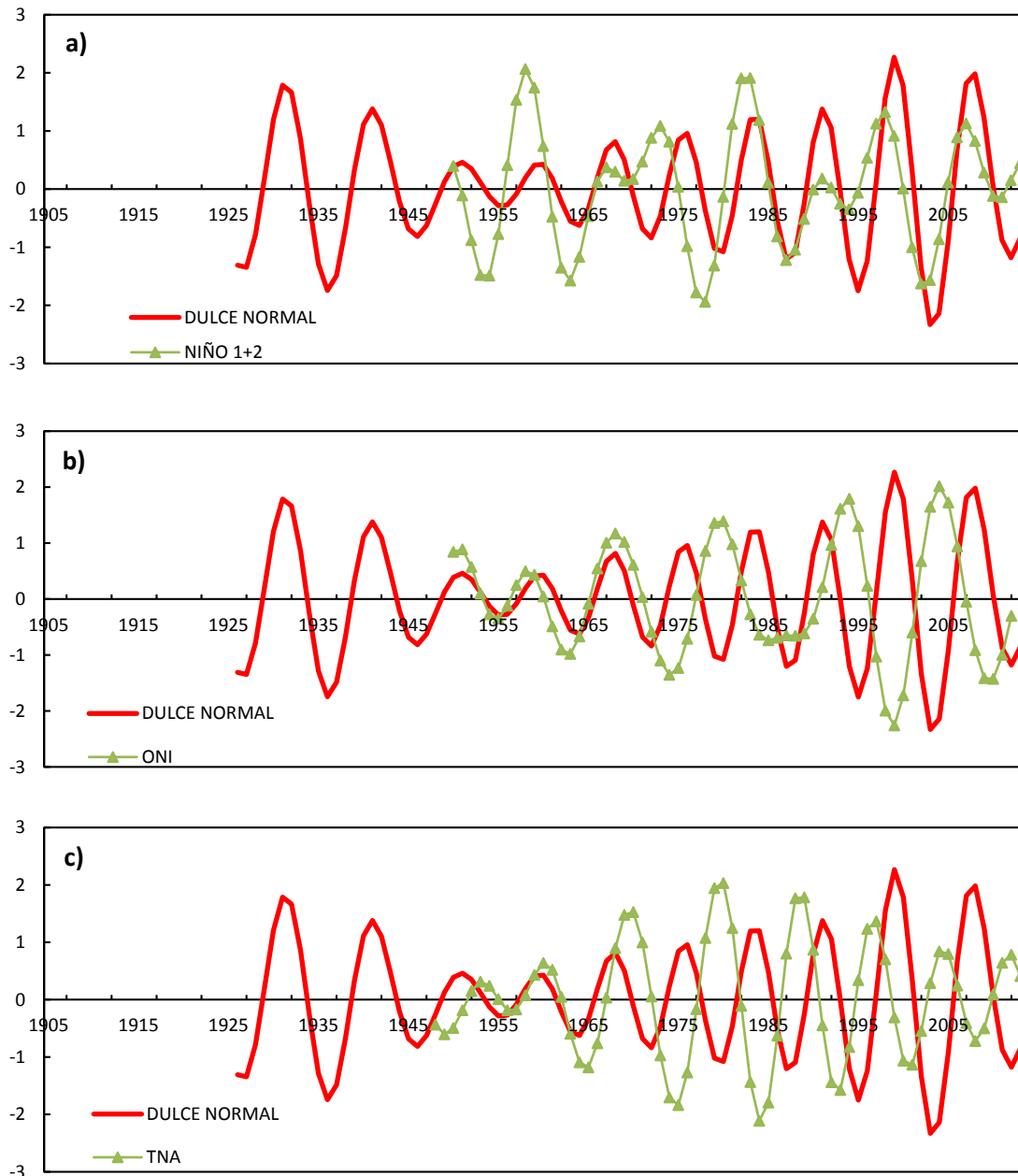


Figura 5.25. Caudales del río Dulce e indicadores Niño 1+2 a), ONI b) y TNA c) con filtro pasabanda entre 7-13 años.

Se observa que el indicador Niño 1+2 en su fase negativa es sucedido por periodos de sequías en la cuenca. Este comportamiento se observa para las sequías de mediados de la década del 50' y 60' (sequías severas por su permanencia en el tiempo); las sequías de los años 1988-1989; 1993-1995; 2002-2004 y 2011-2013.

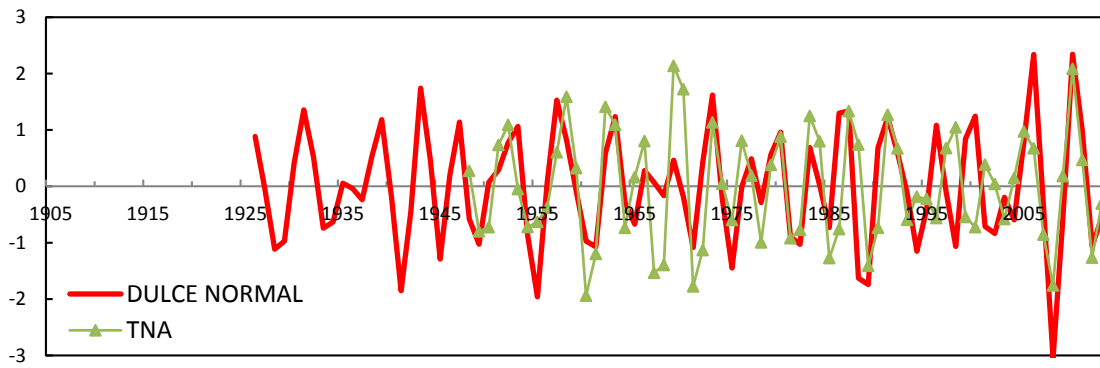


Figura 5.26. Caudales del río Dulce e indicador TNA con filtro pasabanda entre 3-7 años.

En la figura anterior se observa una correspondencia entre valles y picos para la mayoría de los ciclos observados, excepto para el periodo 1994-2004.

5.3.2. Río Suquía

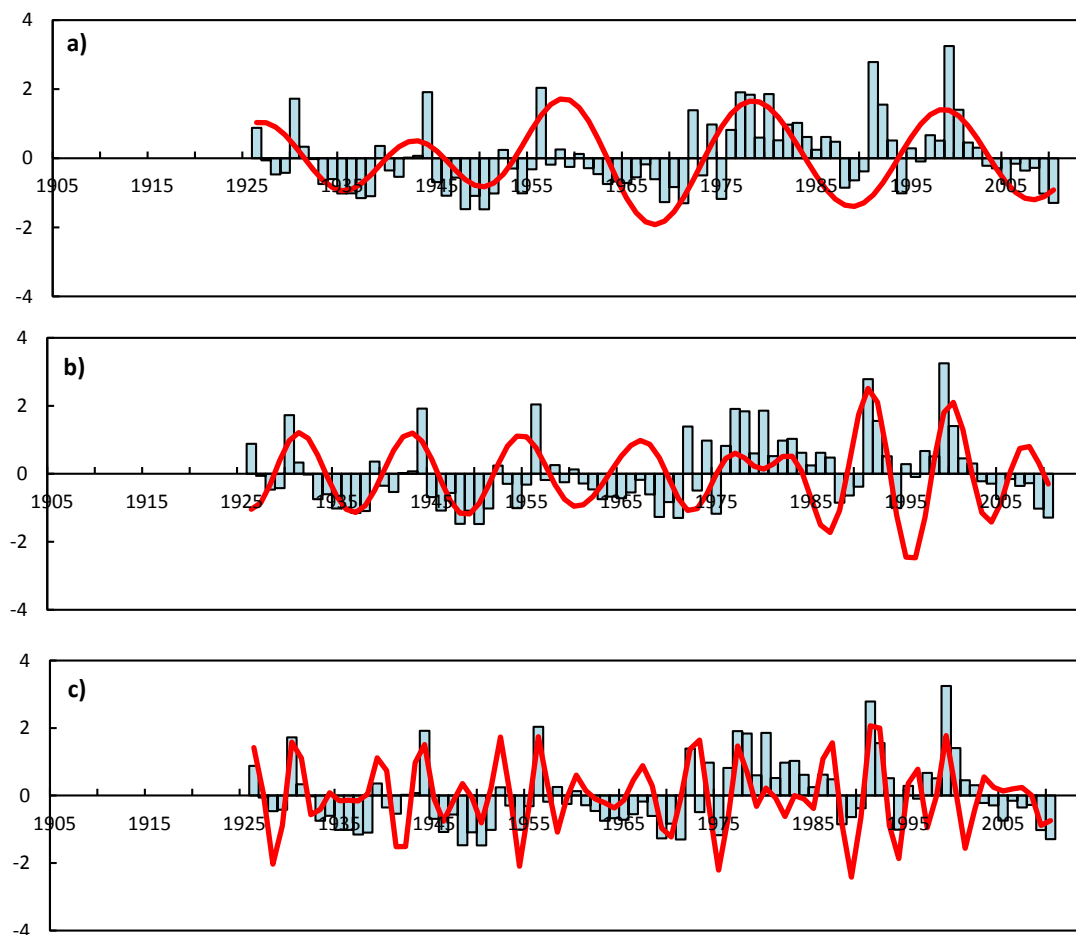


Figura 5.27 Serie de caudales anuales menos caudal con 70% de permanencia y caudales filtrados a) 13-35; b) 7-13 y c) 3-7 años. Las series están normalizadas. Río Suquía.

Tabla 5.6. Correlación entre serie de sequías y serie de caudales filtradas N_{bd} y N_{11} y N_5 para el río Suquía

Correlaciones	N_{bd}	N_{11}	N_5
Q SEQUIA	0,47	0,38	0,55

A partir de allí se contrastó la serie de caudales filtrada del río Suquía con las series filtradas de todos los indicadores (ver Tabla 5.7).

Tabla 5.7. Coeficiente de correlación entre las series de caudales del río Suquía y los indicadores

n_{bd}									
TNA	MS	AMO	ONI	PDO	SOI	AMM	NIÑO 3+4	NIÑO 1+2	TSA
0,09	0,59	0,25	-0,01	0,39	-0,15	0,51	-0,16	0,58	-0,74
n_{11}									
TNA	MS	AMO	ONI	PDO	SOI	AMM	NIÑO 3+4	NIÑO 1+2	TSA
-0,21	0,11	0,28	-0,15	-0,51	0,00	0,01	-0,13	0,01	-0,53
n_5									
TNA	MS	AMO	ONI	PDO	SOI	AMM	NIÑO 3+4	NIÑO 1+2	TSA
0,03	-0,09	-0,04	0,20	0,05	-0,15	-0,08	0,22	0,12	0,19

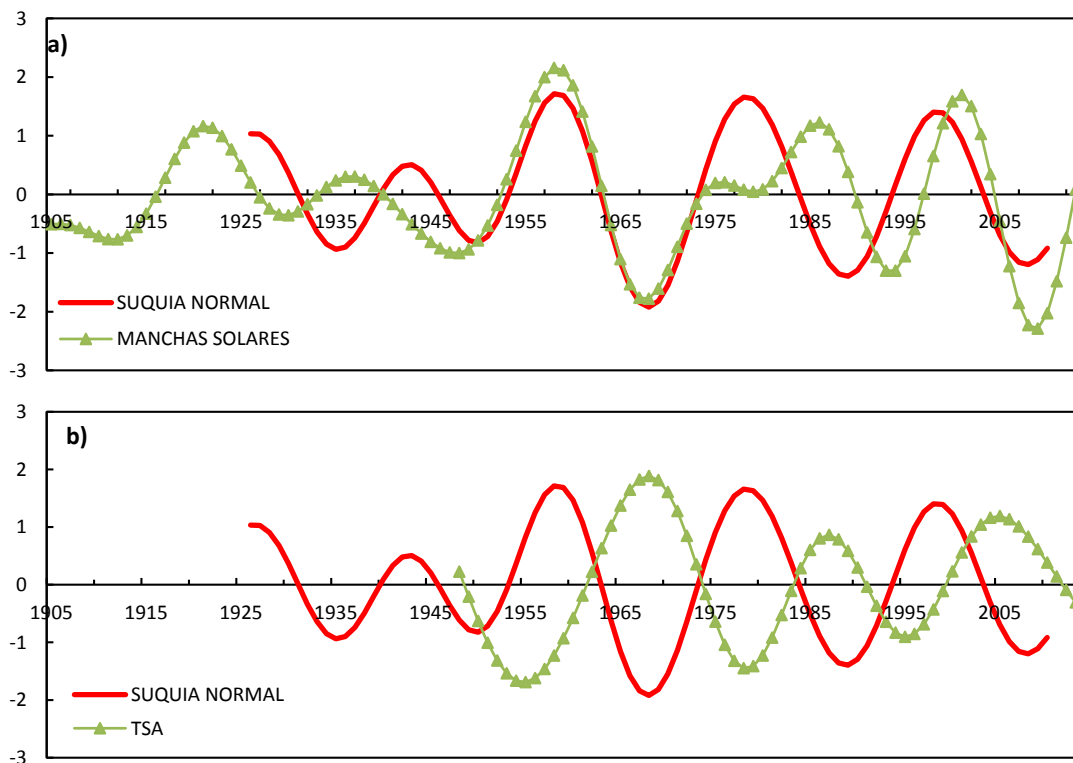


Figura 5.28. Caudales del río Suquía e indicador Manchas Solares (a) y TSA (b) con filtro pasabanda entre 13-35 años.

Se resalta que las fases positivas del TSA coinciden con la sequía de 1962-71, y anteceden las sequías 1988-90 y 2005-2010. Se destaca que desde 1950 estas sequías son las más largas que se identificaron a la fecha.

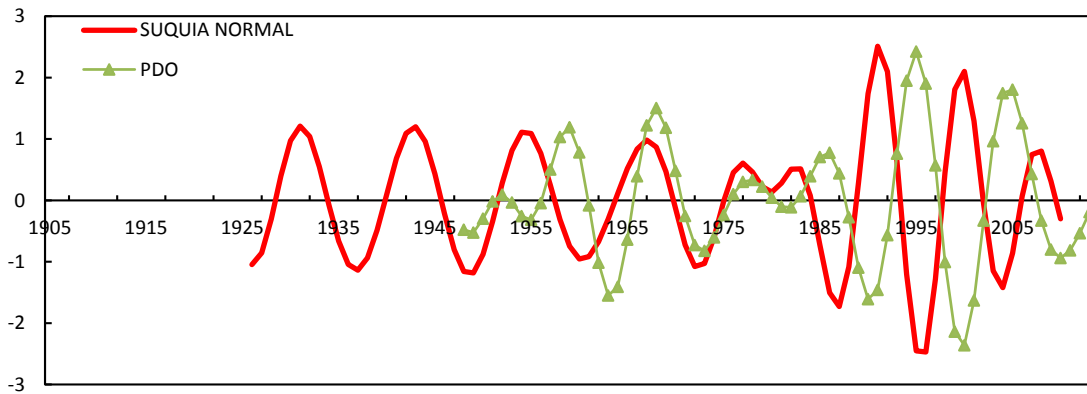
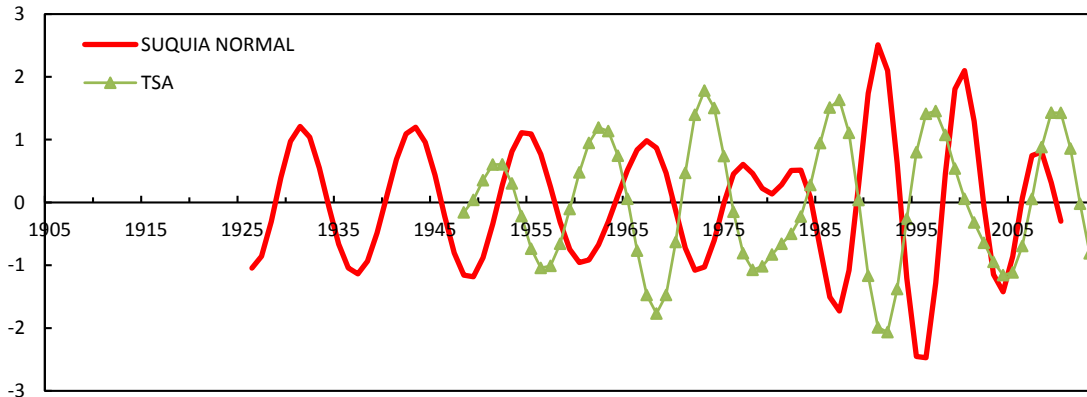


Figura 5.29. Caudales del río Suquia e indicador TSA y PDO con filtro pasabanda entre 7-13 años

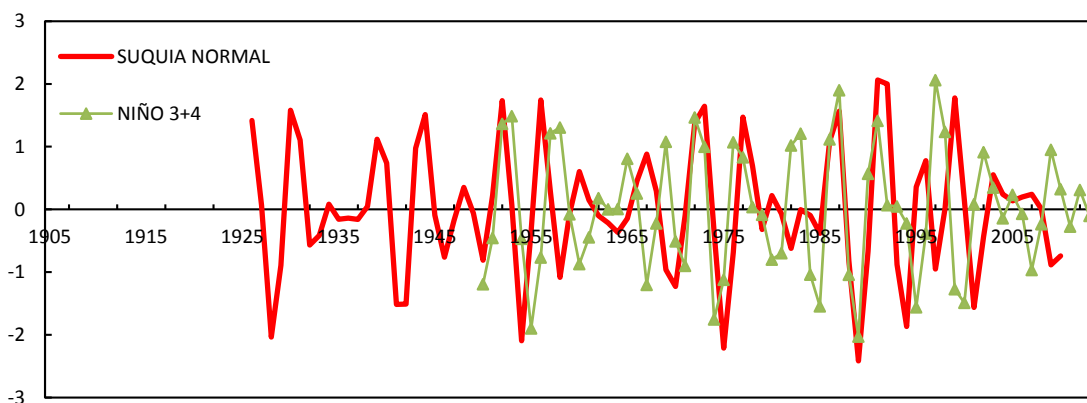


Figura 5.30 Caudales del río Suquia e indicador 3.4 con filtro pasabanda entre 3-7 años

5.3.3. Río Paraná

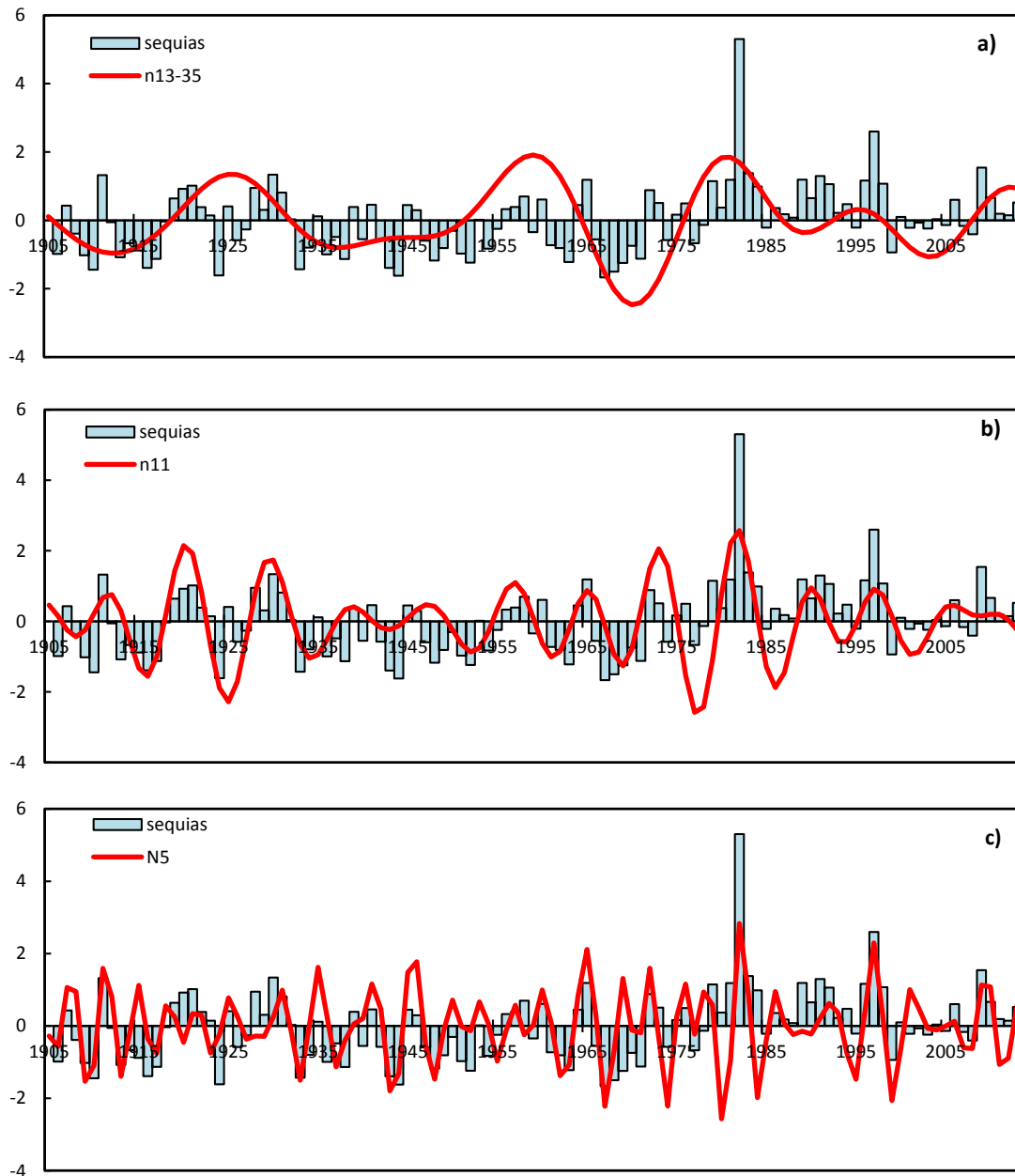


Figura 5.31. Serie de caudales anuales menos caudal con 70% de permanencia y caudales filtrados a) 13-35; b) 7-13 y c) 3-7 años. Las series están normalizadas. Río Paraná.

Tabla 5.8 Correlación entre serie de sequías y serie de caudales filtradas N_{bd} y N_{11} y N_5 para el río Paraná.

Correlaciones	N_{bd}	N_{11}	N_5
Q SEQUIA	0,36	0,51	0,54

A partir de allí se contrastó la serie de caudales filtrada del río Paraná con las series filtradas de todos los indicadores (ver Tabla 5.9).

Tabla 5.9. Coeficiente de correlación entre las series de caudales del río Paraná y los indicadores

n _{bd}									
TNA	MS	AMO	ONI	PDO	SOI	AMM	NIÑO 3+4	NIÑO 1+2	TSA
0,36	0,45	0,39	0,36	0,54	-0,53	0,53	0,13	0,27	-0,69
n ₁₁									
TNA	MS	AMO	ONI	PDO	SOI	AMM	NIÑO 3+4	NIÑO 1+2	TSA
-0,06	0,17	0,11	-0,13	-0,19	0,13	-0,09	-0,06	0,68	0,07
n ₅									
TNA	MS	AMO	ONI	PDO	SOI	AMM	NIÑO 3+4	NIÑO 1+2	TSA
0,07	-0,28	-0,03	0,60	0,34	-0,59	-0,07	0,58	0,57	-0,34

A continuación, en la siguiente figura, se presentan los más significativos.

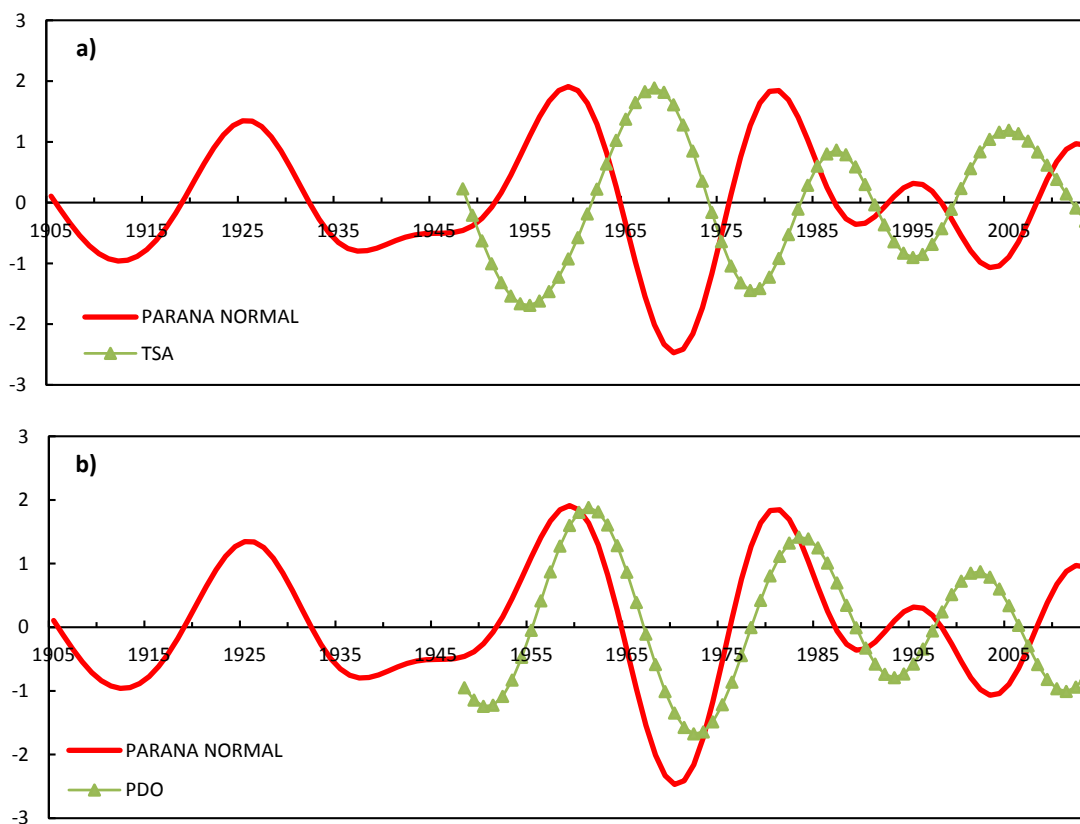


Figura 5.32. Caudales del río Paraná e indicador TSA (a) y PDO (b) con filtro pasa-banda entre 13-35 años

Se observa en la figura que la fase positiva del indicador TSA coincide con déficits hídricos (sequía 1966-1972, y periodos de caudales bajos (no identificados como sequías hidrológicas)) en los años 1985-1988 y 1999-2008.

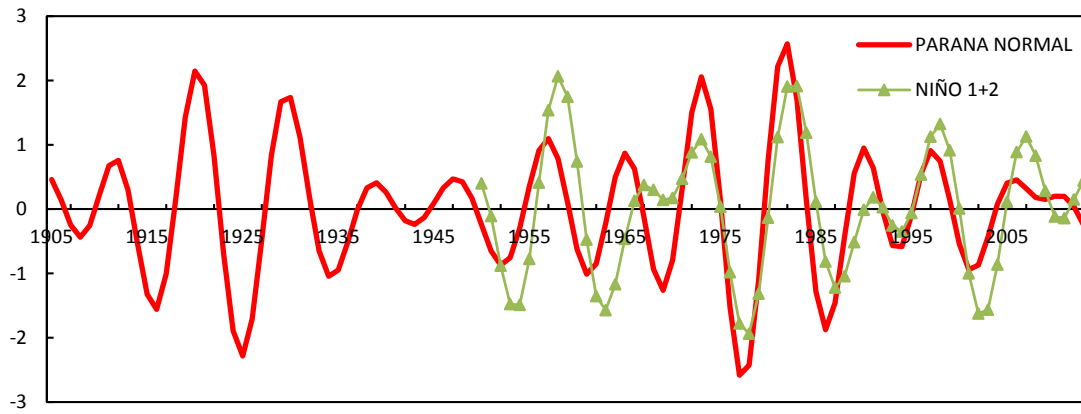


Figura 5.33. Caudales del río Paraná e indicador Niño 1+2 con filtro pasa-banda entre 7-13 años

Se observa que las fases negativas de indicador Niño 1+2 coinciden con las sequías 1947-55 (en la etapa final); 1961-63; 1977; 1995; y 2001-05. Y con la etapa de caudales bajos en 1986-1988 no identificadas como sequías hidrológicas.

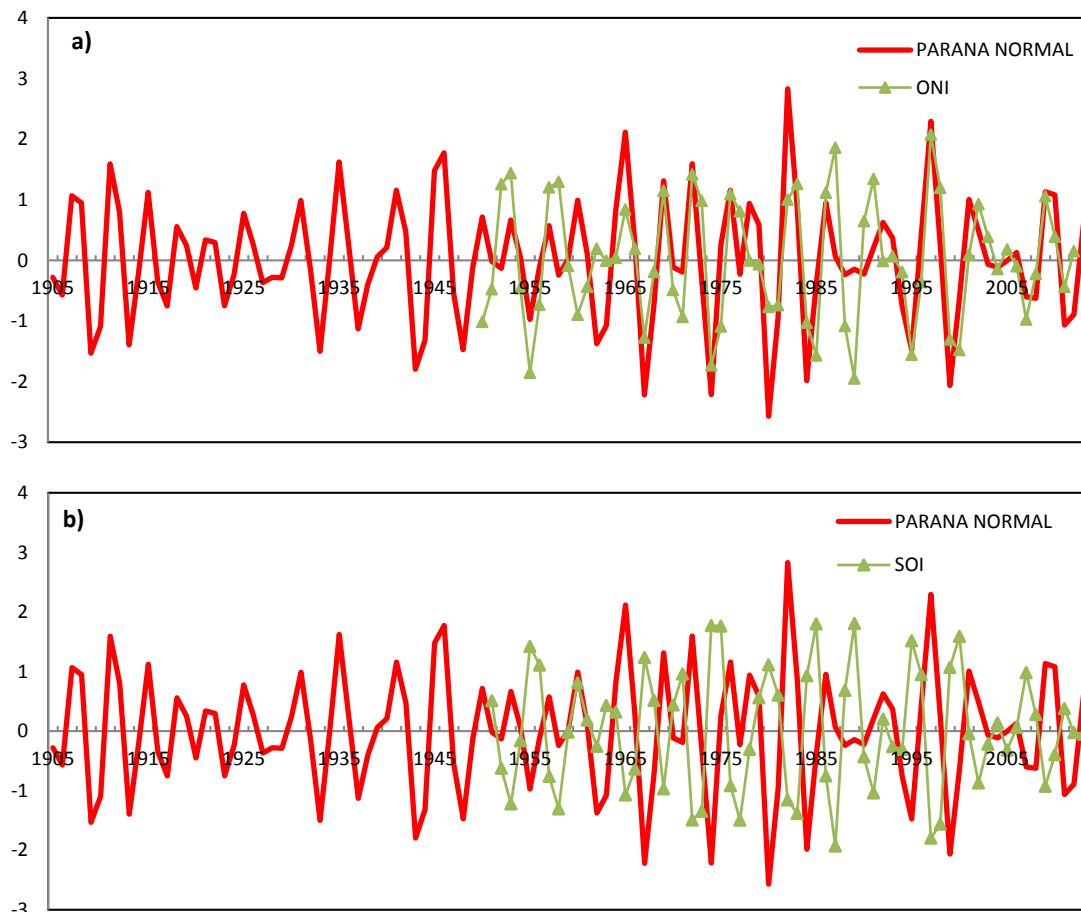


Figura 5.34. Caudales del río Paraná e indicador ONI (a) y SOI (b) con filtro pasabanda entre 3-7 años

5.3.4. Río Atuel

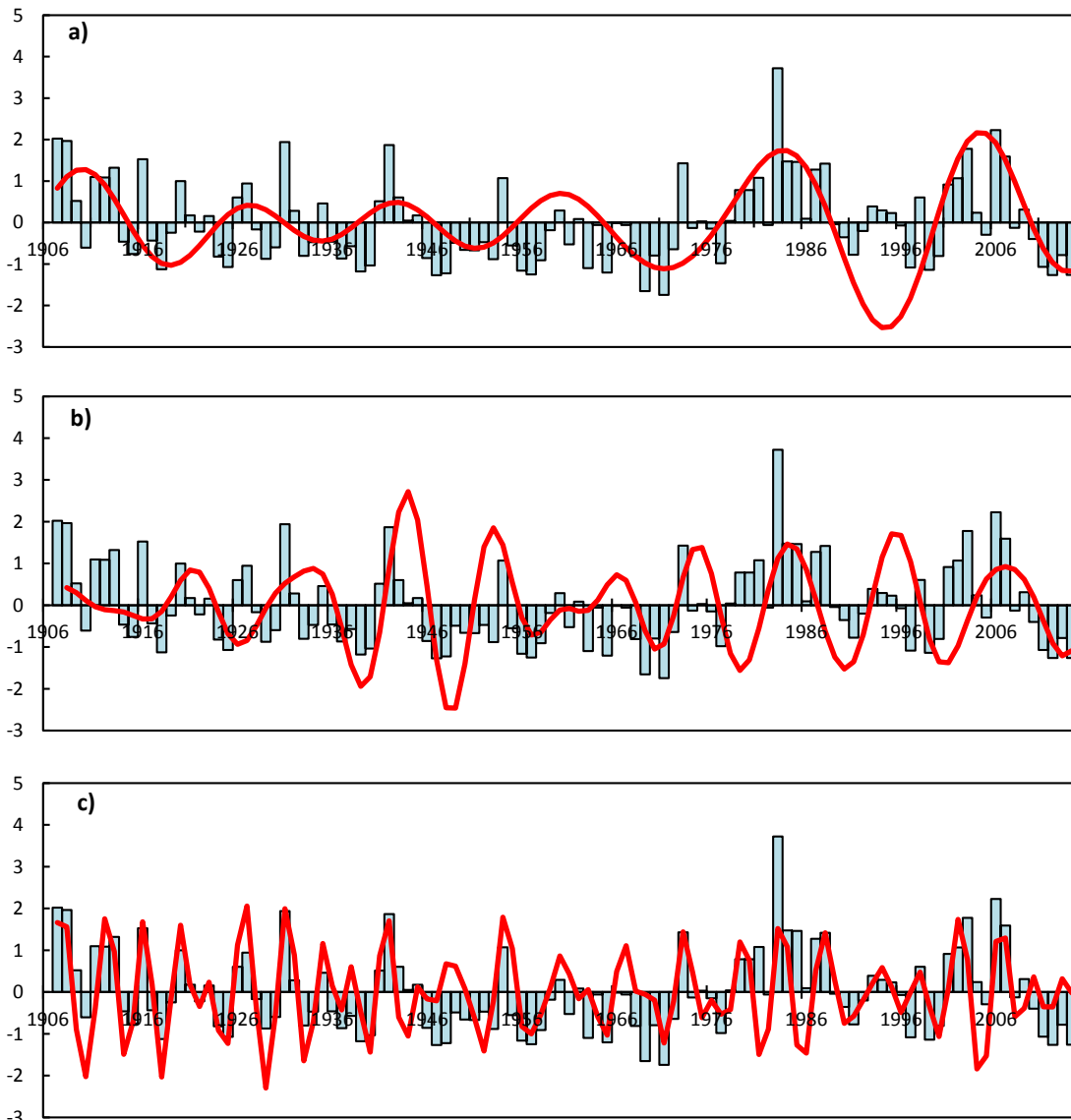


Figura 5.35 Serie de caudales anuales menos caudal con 70% de permanencia y caudales filtrados a) 13-35; b) 7-13 y c) 3-7 años. Las series están normalizadas. Río Atuel

Tabla 5.10 Correlación entre serie de sequías y serie de caudales filtradas N_{bd} y N_{11} y N_5 para el río Atuel.

Correlaciones	N_{bd}	N_{11}	N_5
Q SEQUIA	0,44	0,39	0,62

A partir de allí se contrastó la serie de caudales filtrada del río Atuel con las series filtradas de todos los indicadores (ver Tabla 5.11)

Tabla 5.11. Coeficiente de correlación entre las series de caudales del río Atuel y los indicadores

n_{bd}									
TNA	SOL	AMO	ONI	PDO	SOI	AMM	NIÑO 3+4	NIÑO 1+2	TSA
0,62	0,37	0,64	0,02	0,65	-0,02	0,87	0,08	0,42	0,06
n_{11}									
TNA	SOL	AMO	ONI	PDO	SOI	AMM	NIÑO 3+4	NIÑO 1+2	TSA
-0,34	-0,27	0,24	0,43	0,22	-0,62	-0,41	0,41	0,22	0,00
n_5									
TNA	SOL	AMO	ONI	PDO	SOI	AMM	NIÑO 3+4	NIÑO 1+2	TSA
0,05	-0,11	0,11	0,45	0,26	-0,50	-0,14	0,46	0,38	-0,14

A continuación, en las siguientes figuras se presentan los más significativos.

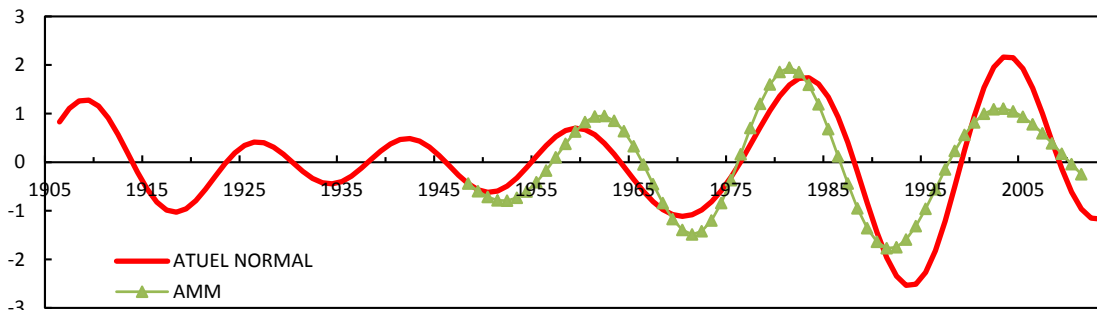


Figura 5.36 Caudales del río Atuel e indicador AMM con filtro pasa-banda entre 13-35 años

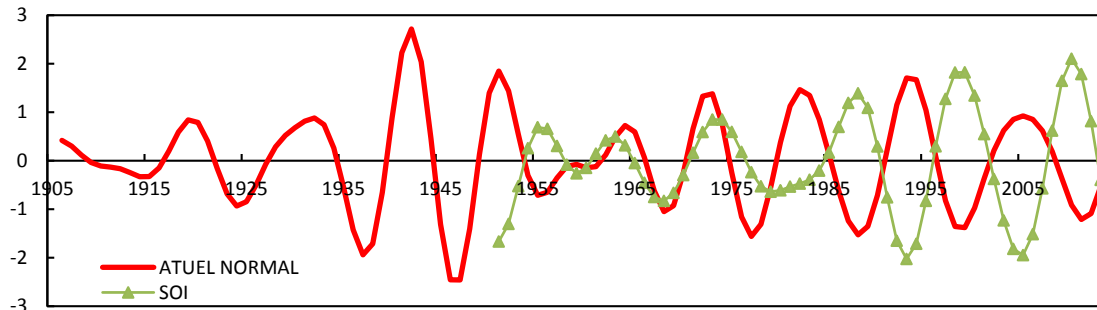


Figura 5.37. Caudales del río Atuel e indicador SOI con filtro pasabanda entre 7-13 años

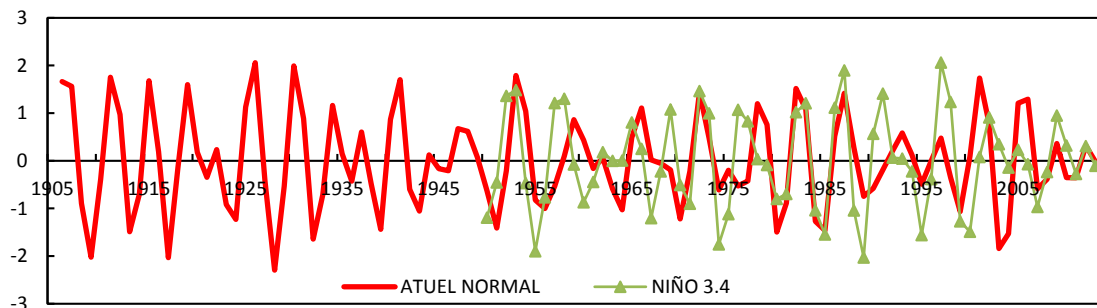


Figura 5.38. Caudales del río Atuel e indicador Niño 3.4 con filtro pasa-banda entre 3-7 años

En la figura anterior puede observarse que las fases negativas de indicador AMM coincide con los periodos de déficits hídricos en la cuenca. Coincidiendo con las sequías identificadas en 1945-1952, 1966-1971, 1988-1996 y 2009-2013. Las fases negativas del indicador Niño 3.4 coinciden con los eventos de sequía de la cuenca en los años: 1950-1951, 1960, 1962-1965, 1975, caudal bajo de 1985, 1988-1989, 1995-1996, 1999, 2004, 2007.

5.3.5. Río San Juan

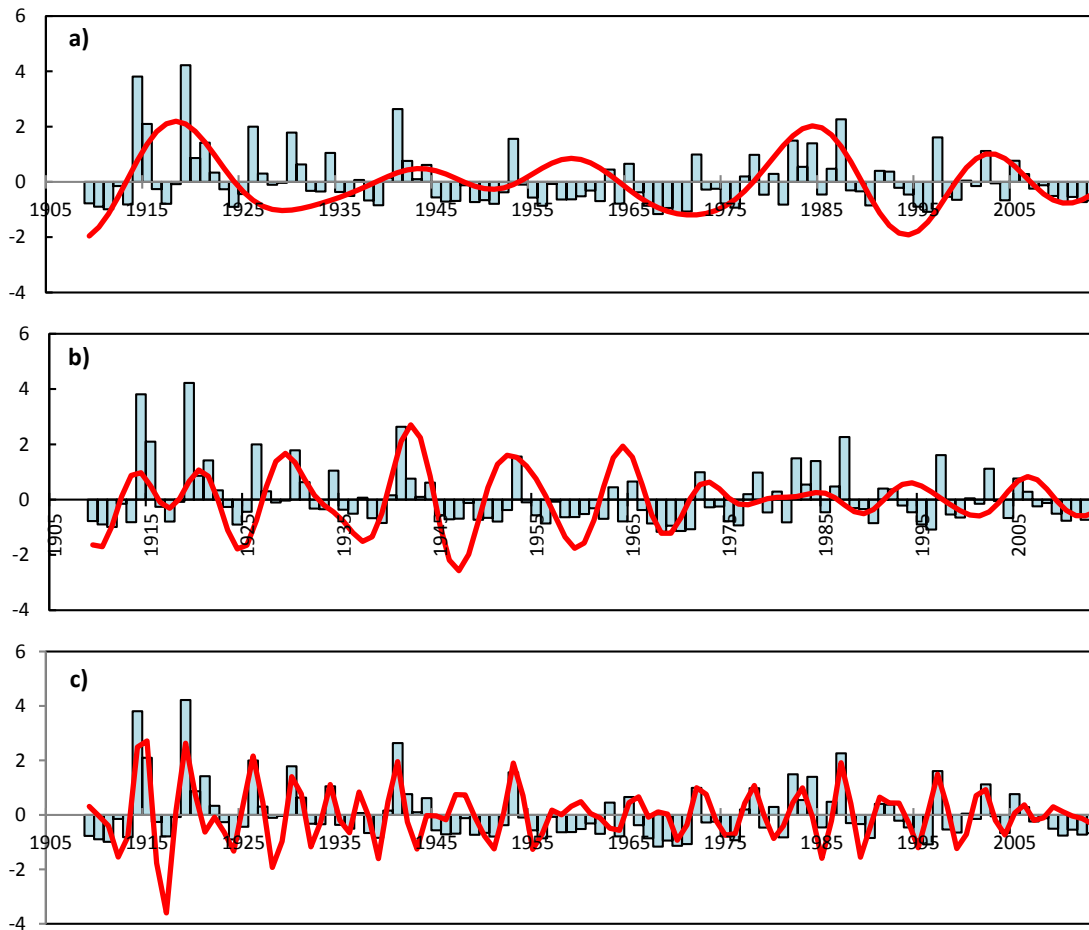


Figura 5.39. Serie de caudales anuales menos caudal con 70% de permanencia y caudales filtrados a) 13-35; b) 7-13 y c) 3-7 años. Las series están normalizadas. Río San Juan.

Tabla 5.12. Correlación entre serie de sequías y serie de caudales filtradas N_{bd} y N_{11} y N_5 para el río San Juan

Correlaciones	N_{bd}	N_{11}	N_5
Q SEQUIA	0,31	0,38	0,68

A partir de allí se contrastó la serie de caudales filtrada del río San Juan con las series filtradas de todos los indicadores (Tabla 5.13).

Tabla 5.13. Coeficiente de correlación entre las series de caudales del río San Juan y los indicadores

n_{bd}									
TNA	MS	AMO	ONI	PDO	SOI	AMM	NIÑO 3+4	NIÑO 1+2	TSA
0,39	0,49	0,30	0,19	0,63	-0,29	0,81	0,14	0,42	-0,15
n_{11}									
TNA	MS	AMO	ONI	PDO	SOI	AMM	NIÑO 3+4	NIÑO 1+2	TSA
-0,27	-0,46	0,36	0,04	-0,07	-0,22	-0,32	-0,05	-0,30	0,20
n_5									
TNA	MS	AMO	ONI	PDO	SOI	AMM	NIÑO 3+4	NIÑO 1+2	TSA
0,23	-0,23	0,07	0,69	0,60	-0,72	-0,16	0,70	0,62	0,05

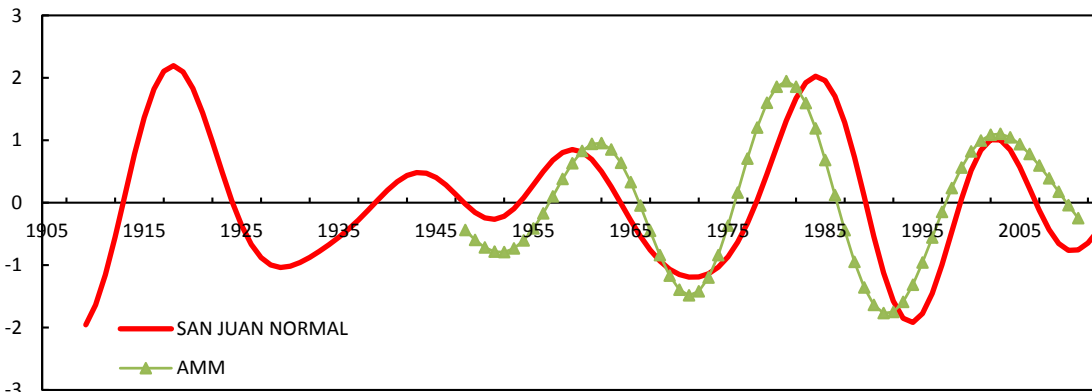


Figura 5.40. Caudales del río San Juan e indicador AMM con filtro pasabanda entre 13-35 años

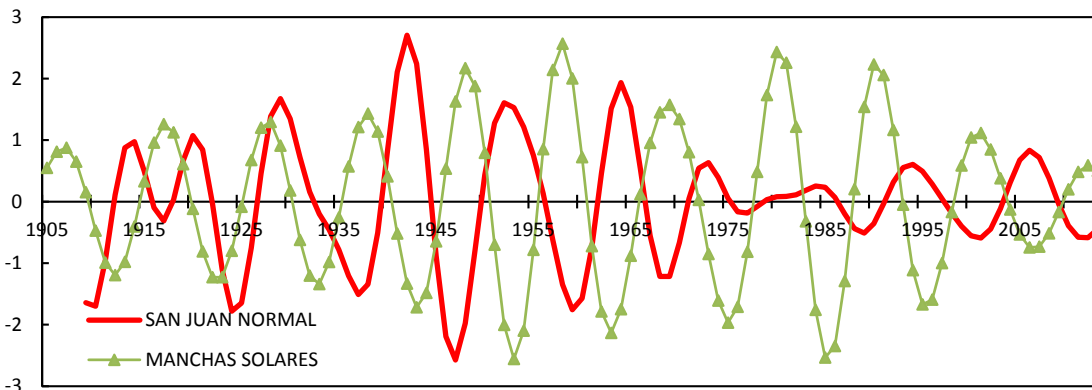


Figura 5.41 Caudales del río San Juan y Manchas Solares con filtro pasa-banda entre 7-13 años

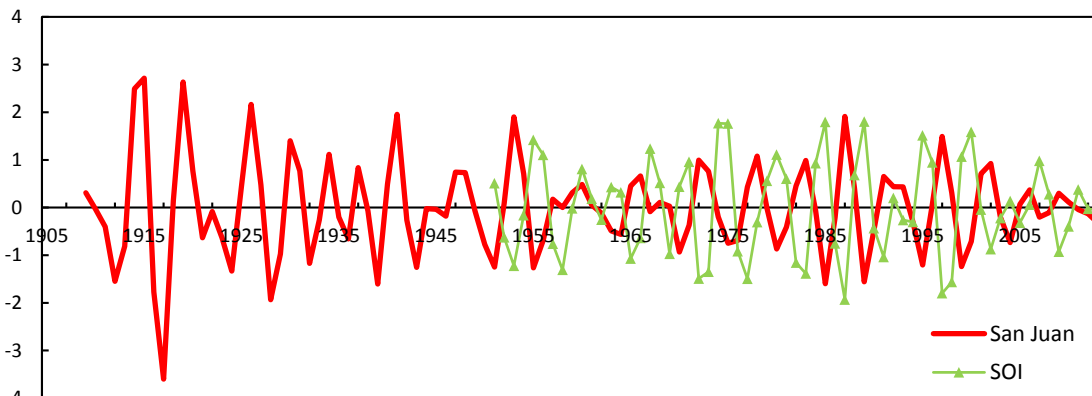


Figura 5.42. Caudales del río San Juan e indicador SOI con filtro pasabanda entre 3-7 años

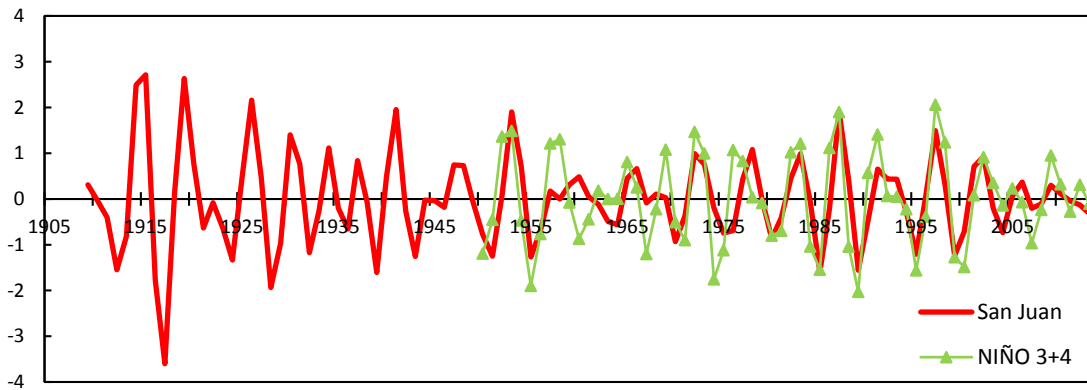


Figura 5.43. Caudales del río San Juan e indicador Niño 3.4 con filtro pasabanda entre 3-7 años

En la Figura 5.40 se observa que las fases negativas del indicador AMM coinciden con los ciclos bidecadales de caudales bajos en la cuenca del río San Juan. Dentro de estas fases negativas se identificaron las sequías de 1945-53, 1966-75, 1988-96 y 2010-13.

En la Figura 5.43 se observa que las fases negativas de indicar Niño 3.4 coinciden con la mayoría de los eventos de sequía identificados. Estos eventos son: 1954-57, 1960-62, 1964, 1974-75, 1979-81, 1985, 1988-89, 1993-96, 1999, 2007-08.

5.3.6. Discusión de Resultados

A nivel bidecadal se encontró una gran influencia del Océano Atlántico sobre las series de caudales. En las cinco cuencas analizadas se observa una alta correlación a escalas bidecadales con el índice AMM, Dulce (0,82); Paraná (0,53); Atuel (0,87); San Juan (0,81) y Suquía (0,51). Siendo la más alta correlación encontrada en casi todas las cuencas, excepto para el Paraná y Suquía que presentan tener una alta correlación negativa con el TSA Paraná (-0,69) y Suquía (-0,74). A nivel decadal se observa correlaciones significativas (mayores a 0,5) para el Paraná con el Niño 1+2 (0,68), el Atuel con el SOI (-0,62) y Suquía con TSA (-0,53).

En la escala plurianual se observa correlaciones negativas con el SOI para las cuencas de los ríos Paraná (-0,59), Atuel (-0,50) y San Juan (-0,72). Fuertes correlaciones positivas con los indicadores ONI para el Paraná (0,60); San Juan y Atuel con el Niño 3.4 (0,70; 0,46 respectivamente). Y el Dulce con el TNA (0,54).

Esto no solo confirma los resultados de trabajos anteriores (Compagnucci et al, 2014; Mauas et al, 2011; Dölling et al, 2013 y Vargas et al, 2002), además aporta nueva información respecto a vínculos con indicadores del Océano Atlántico para las distintas cuencas. Estos resultados son

importantes para el entendimiento de la dinámica macroclimática de Argentina y de su pronóstico en el espacio y en el tiempo.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la identificación y caracterización de sequías hidrológicas, indicaron que en la región de estudio (14 cuencas de las regiones Centro, Cuyo y Norte de la Argentina) ocurrieron sequías hidrológicas plurianuales y simultáneas para todas las cuencas en tres ocasiones. Éstas se registraron en los periodos 1936-1939; 1945-1952 y 1967-1971. Esto es de gran relevancia en cuanto a la planificación y prevención de escenarios de déficit de energía, ya que las sequías de seis años de duración comprometen sistemas hidroeléctricos como Yacyretá, Cabra Corral, Río Hondo, Río Grande, Salto Andersen (en las cuencas de los ríos Paraná, Juramento, Dulce, Ctalamochita y Colorado).

La sequía ocurrida entre 1967 y 1971 también afectó a Chile, con gran repercusión en las actividades agrícolas en la zona central de este país (Fernández Larrañaga, 1997). En este aspecto se resalta la extensión territorial que puede tener una sequía hidrológica como las detectadas.

En todas las cuencas se observó que existieron períodos húmedos a partir de la década del 70. En este periodo, se evidenció un cambio entre una época seca y otra húmeda, lo cual coincide con la década húmeda (77-87) detectada en Chile por Fernández Larrañaga (1997), y con el cambio en las condiciones medias de temperatura del Pacífico Ecuatorial Central de 1976/77. Estas son consecuencias de la variabilidad multidecádica tipo ENOS (El Niño / Oscilación Sur), (Campagnucci, 2008).

A nivel espacial se observó un agrupamiento de cuencas que presentaron sequías hidrológicas simultáneas durante la mayor parte de tiempo analizado. Estos grupos son:

- Los ríos Colorado, Mendoza, San Juan y Atuel;
- Los ríos Ctalamochita, Xanaes, Anizacate y Suquía;
- Los ríos Juramento, Bermejo, Pilcomayo y Dulce;
- Los ríos Salado y Paraná.

Esta información es de relevancia para la gestión de los recursos hídricos ya que usos tales como el abastecimiento humano, el riego y la producción hidroeléctrica, entre otros, pueden ser seriamente afectados por la ocurrencia simultánea de sequías severas en cuencas que aportan a una región y zonas vecinas. Este es el caso del Gran Córdoba donde los ríos Suquía y Xanaes tienen el mismo comportamiento en lo que respecta a las sequías de importancia.

En la última década, los eventos de déficits hídricos han impactado en la sociedad, con pérdidas económicas en la actividad productiva del suelo, afectación de obras de

abastecimiento de agua, y pérdidas en la capacidad de generación de centrales hidroeléctricas (al verse reducidos los niveles de los embalses). Se destaca que las sequías hidrológicas que han generado estos impactos no han alcanzado el orden de magnitud de las registradas antes de 1970 (que han sido las más críticas en cuanto a duración, magnitud e intensidad).

En el análisis de periodicidad de las series de caudales, se observa que los procesos menores a 2,2 años (parte aleatoria de todas las frecuencias) representa casi del 50% de la varianza del espectro para gran número de series, lo cual significa que las series tienen una alta componente aleatoria. El resto puede explicarse, en parte, por distintos procesos que posean frecuencias entre 2 y 3 años, 3 y 7 años; entre 7 y 13 años; entre 13-35; mayores a 35 años. Para las nueve cuencas de las 14 estudiadas, predominan los procesos de baja frecuencia como los bidecadales " N_{bd} " (1/13-1/35 años) y luego los plurianuales " N_5 " (1/7-1/3 años). Para dos cuencas predomina el proceso de variabilidad de gran escala " N_v " (mayores a 1/35 años) y sólo para una el proceso decadal " N_{11} " (1/7-1/13 años) (Paraná). Esto indica que existe una variabilidad en las series de caudales influenciados, en distintos porcentajes, por procesos de alta, baja y media frecuencia.

Este último resultado permitió avanzar en la generación de series sintéticas a través del análisis armónico para la predicción de sequías plurianuales en el mediano plazo. Además, contribuyó a la determinación de los anchos de banda de los filtros para contrastar los distintos indicadores macroclimáticos.

Se generaron series sintéticas de caudales mediante análisis de Fourier, para los ríos Suquía, Xanaes, Dulce, Paraná, Bermejo, Juramento, San Juan, Atuel y Colorado. Las series de caudales simulados reproducen, en la mayoría de los casos, el 60% de los años secos observados en la serie de caudales disponibles. En todos los casos, las frecuencias utilizadas para generar las series son mayores a cuatro años. Asumiendo que estas periodicidades se mantienen en el tiempo, existe la posibilidad de generar modelos de predicción de sequías, lo cual constituye una herramienta de planificación y gestión de cuencas.

En el análisis de correlación entre las variables macroclimáticas y los caudales se observó, a nivel bidecadal, una gran influencia del Océano Atlántico. En las cinco cuencas analizadas (ríos Suquía, Dulce, Paraná, Atuel y San Juan) se observó una alta correlación con el índice Atlantic Meridional Mode " AMM ", Dulce (0,82); Paraná (0,53); Atuel (0,87); San Juan (0,81) y Suquía (0,51). Las cuencas de los ríos Paraná y Suquía presentan una alta correlación negativa con el índice Tropical Southern Atlantic " TSA " Paraná (-0,69) y Suquía (-0,74).

A nivel decadal se observaron, para el río Paraná, correlaciones significativas (mayores a 0,5) con el Niño 1+2 (0,68), para el río Atuel con el índice de oscilación del Sur "SOI" (-0,62) y para el río Suquía con TSA (-0,53).

A escala plurianual, se observaron correlaciones negativas con el SOI para las cuencas de los ríos Paraná (-0,59), Atuel (-0,50) y San Juan (-0,72). Fuertes correlaciones positivas con los indicadores ONI para el Paraná (0,60); San Juan y Atuel con el Niño 3.4 (0,70; 0,46 respectivamente). Finalmente, para el caso del río Dulce se encontró correlación con el Tropical Northern Atlantic "TNA" (0,54).

Esto no sólo confirma los resultados de trabajos anteriores (Compagnucci et al, 2014; Mauas et al, 2011; Dölling et. al, 2013 y Vargas et al, 2002), sino que además aporta nueva información respecto a vínculos con indicadores del Océano Atlántico para las distintas cuencas. Estos resultados son importantes para el entendimiento de la dinámica macroclimática de Argentina y de su pronóstico en el espacio y en el tiempo.

Conclusiones y Trabajos Futuros

- La obtención de datos apropiados para realizar el estudio de identificación y caracterización de sequías (es decir series completas de tiempo suficientemente largas que permitiera describir el comportamiento de nuestros recursos hídricos disponibles) ha sido uno de los principales inconvenientes para el desarrollo de esta tesis. En muchas regiones esta información se encuentra interrumpida por la falta de aforos y escasez de registros (meteorológicos, de aforos y/o de operación de reservorios). Por tal motivo, se recomienda mejorar e intensificar las mediciones de datos meteorológicos, hidrológicos y de agua subterránea.
- A nivel espacial se observó un agrupamiento de cuencas que presentaron sequías simultáneas la mayor parte de tiempo analizado. Esta información es de relevancia para la gestión de los recursos hídricos ya que usos tales como el abastecimiento humano, el riego y la producción energética, entre otros, pueden ser seriamente afectados por la ocurrencia simultánea de sequías severas en cuencas que aportan a una región y zonas vecinas.
- En las series de caudales existen componentes de alta, media y baja frecuencia que aportan a la fluctuación de los caudales en distintos porcentajes. Es de destacar que se halló una gran influencia del Océano Atlántico sobre las series de caudales. Es por ello

que se recomienda continuar con el análisis de indicadores macroclimáticos y paleoclimáticos (registros en los sedimentos, anillos de árboles, corales y hielo) para avanzar en la generación de modelos conceptuales que contribuya a la mejor comprensión y posible explicación de las sequías, como así también, al pronóstico en distintas escalas, para contribuir a la planificación y gestión de nuestros recursos hídricos.

7. REFERENCIAS

- Agua y Energía Eléctrica –AYEE– (1986). Estudio de la factibilidad técnico económica de los aprovechamientos sobre los ríos San Antonio y Anizacate (Prov. de Córdoba). Convenio de Cooperación y Asistencia Técnica Financiera entre el Estado Nacional y la Provincia de Córdoba, Tomos I al III, Agua y Energía Eléctrica Sociedad del Estado, Secretaría de Energía, MOSP, Reg. III Córdoba.
- Ameghino, F. (1984). Las sequías y las inundaciones en la provincia de Buenos Aires. Subsecretaría de Recursos Hídricos de Nación. Buenos Aires. Argentina. SRHN.
- Barbeito, O., Contreras, P., Ambrosino, S., y Gonzalez, S. (2011). “Geomorfología y alerta temprana en la prevención de crecientes”. XXIII Congreso Nacional del Agua. Resistencia, Chaco, Argentina.
- Barros, V., Clarke, R. y Silva Díaz, P. (2006). El cambio climático en la cuenca del Plata. CONICET. Buenos Aires, Argentina
- Bendat, J., y Piersol, A. (2000). Random Data. Analysis and Measurement Procedures. Editorial, John Willy & Sons, Inc. Nueva York, Estados Unidos.
- Bronstein I. y K Semendjajew, 1969: Taschenbuch der Mathematik (Handbook of Mathematics). Harri Deutsch, Zurich and Frankfurt/M.
- Cancelliere, A., y Salas, J. (2010). “Drought probabilities and return period for annual streamflows series”. Journal of Hydrology Nº 391 (77-89)
- Catalini G. y García, C. (2008) “Análisis Estadístico descriptivo sobre series hidrológicas Históricas del Embalse San Roque”. [citado el 1 de Marzo 2012] http://www.ucc.edu.ar/portalucc/archivos/File/Ingenieria/Grupos_Investigacion/EHCPA/2010/analisisserieshidrologicasembalsesanroque.pdf
- Chow, V. T., Maidment, D. y Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Colombia, Bogotá: Mc Graw Hill.
- Clausen, B. y Pearson, C. P. (1995). “Regional frequency analysis of annual maximum streamflow drought” Journal of Hydrology Nº 173 (111–130).
- Compagnucci, R. H. y Agosta, E. A. (2008). "La Precipitación de Verano en el Centro-Oeste De Argentina y los fenómenos interanual El Niño/Oscilación Sur (Enos) e Interdecádico “Tipo” Enos". GEOACTA 2008 (97-103).
- Compagnucci, R. H., Berman, A. L., Velasco Herrera, V. y Silvestri, G. (2014). Are southern South American Rivers linked to the solar variability?. International Journal of Climatology, 34(5), 1706-1714.
- Coronel, A. y Sacchi, O. (2006). “Climatología de eventos secos y húmedos en el sur santafesino”. Revista de Investigación de ciencias agrarias. [citada 21 de febrero 2012] <http://www.fcagr.unr.edu.ar/Investigacion/revista/rev9/1.htm>
- Correa, N.R. y Guevara Pérez, E. (1992). Periodicidades plurianuales de una serie de escurrimientos. Revista Ingeniería UC, Vol 1-Núm 1.
- Dalezios, N. R., Loukas, A., Vasiliades, I., y Liakopoulos, E. (2000). “Severity-duration-frequency analysis of droughts and wet periods in Greece”. Hydrological Sciences Journal, 45:5 (751-769)
- Díaz, E. (2013). Identificación y Caracterización de Sequías Hidrológicas en el Centro y Norte de Argentina. Tesis de Maestría en Recursos Hídricos, FCEyN-UNC. Córdoba, Argentina.
- Dölling O., López G., Calizalla G. y Marquez L. (2013) Una herramienta para optimizar el uso del agua. Revista Hydria. Vol 50, pp. 8.
- Dölling O., (2014) “Tendencias en el escurrimiento de los ríos argentinos a partir del análisis de las manchas solares y de la temperatura del Pacífico”. Revista Hydria. Vol 51 pp 22

- Dublin. (1992). Tratado de Dublin. "Conferencia Internacional Sobre Agua y Medio Ambiente". Dublin, Irlanda.
- Escalante Sandoval, C. y Reyes Chávez, L. (2005). Técnicas Estadísticas en Hidrología (2ª Ed.). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 298p. México.
- Fernández Larrañaga, B. (1997) Identificación y Caracterización de Sequías Hidrológicas en Chile Central. Ingeniería del Agua en España. Vol 4. Pp. 37-46
- Fernández, Hugo. (2002). "Influencia de ENOS en el régimen de precipitaciones en el Cono Sur de América" Ingeniería hidráulica en México, Vol XVII, Nº 3, (5-16).
- Fernández, H. y Fernández, B. (2000) "Identificación y caracterización de sequías meteorológicas anuales en el Cono Sur de América". Memorias del XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Tomo II (51-60). Córdoba, Argentina.
- Fleig, A.K, Tallaksen, L.M, Hisdal, H. y Damuth, S (2005). "A global evaluation of streamflow drought characteristics". Hydrology and Earth System Sciences Discussions Nº2, (2427-2464).
- Gallego, A. (2012). Santiago del Estero y el Agua, crónica de una relación controvertida. Secretaría de Desarrollo, Ciencia, Tecnología y Gestión Pública. Santiago del Estero, Argentina.
- Godin G., 1972: The Analysis of Tides. Univ. Pr., Liverpool.
- González, C. (2009). Análisis de Series Temporales: Modelos ARIMA, Departamento de Economía Aplicada III (Econometría y Estadística), Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad del País Vasco (UPV-EHU).
- González Pérez, J. (2005). Caracterización estocástica de la realización espacio-temporal de eventos hidrológicos extremos de sequías. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Halcrow. (2007). Estudio de base ambiental y socioeconómica de la cuenca del río Pilcomayo. Formosa, Argentina.
- Hillman, G. (2002). Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema Mar Chiquita. Tesis de Maestría en Recursos Hídricos, FCEfYN-UNC. Córdoba, Argentina.
- Hisdal, H., Stahl, K., Tallaksen, L., & Demuth, S. (2001). Have Streamflow Droughts in Europe become More Severe or Frequent? International Journal of Climatology, 21, 317-333.
- InformCampo (2009) InformCampo. [citado 10 de Enero de 2013] <http://www.informcampo.com.ar/informe006.htm>
- Karl, T.R., y Knight, R.W. (1985). "Atlas of monthly palmer hydrological drought indices (1931—1983) for the contiguous United States". Historical climatology series 3-7. Asheville, North Carolina: National Climatic Data Center.
- La Voz del Interior, (2009). "Dos meses antes, el San Roque ya llegó al nivel crítico de 2009". [citado 21 de Mayo de 2011] [http://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/ambiente/Dos meses antes, el San Roque ya llegó al nivel crítico de 2009](http://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/ambiente/Dos%20meses%20antes,%20el%20San%20Roque%20ya%20llego%20al%20nivel%20critico%20de%202009)
- La Voz del Interior, (2011) "Preven-perdidas-escasez-verduras" [citado el 11 de junio de 2011] <http://www.lavoz.com.ar/ciudadanos/ambiente/preven-perdidas-escasez-verduras>
- Lenarduzzi, M. (2012). Caracterización hidrodinámica experimental de un tramo del río Tercero (Ctalamochita) con fines hidroambientales. PS de grado FCEfYN-UNC. Córdoba, Argentina.
- Linsley, R., Kohler, M. y Paulhus, J. (1975). Hydrology for Engineers (2ª Ed.). McGraw-Hill. New York, USA.
- Mauas, P. J., Flamenco, E., & Buccino, A. P. (2008). Solar forcing of the stream flow of a continental scale South American river. Physical review letters, 101(16), 168501.

- Mauas, P. J., Buccino, A. P., y Flamenco, E. (2011). Long-term solar activity influences on South American rivers. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73(2), 377-382.
- Minetti, J., Vargas, W., Poblete A, Zerda L. Acuña L. (2010). "Regional droughts in southern South América". *Theor Appl Climatol* N° 102 (403-425). DOI 10.1007/s00704-010-0271-1
- Mishra, A., y Singh, V. (2010). "A review of drought concepts". *Journal of Hydrology* N° 391, (202-216).
- Moya, G. (2004). *Análisis de La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de los Ríos Suquía y Xanaes*. Tesis de Maestría en Recursos Hídricos, FCFyN-UNC. Córdoba, Argentina.
- Nalbantis, I. (2008). "Evaluation of a Hydrological Drought Index". *Eur Water* N° 23/24: 67-77.
- National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA (2015). Frequently Asked Questions About the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) [citado 1 de agosto de 2015]. http://www.aoml.noaa.gov/phod/amo_faq.php
- National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA (2015b). Atlantic Meridional Mode (AMM) SST Index [citado 1 de agosto de 2015]. <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/monthly/AMM/>
- Operador Nacional del Sistema Eléctrico, (2011) –ONS Brasil- Atualização de séries históricas de vazões, período 1931 a 2011. [Citado 5 de mayo de 2013]. http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx
- Organización de los Estados de América, - OAS - (1970). Acuerdo de Asistencia Técnica para la ejecución de un estudio de los recursos hídricos de la Alta Cuenca del Río Bermejo y programación para su desarrollo. [citado 1 de agosto de 2013] <http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea23s/ch13.htm#TopOfPage>
- Organización Meteorológica Mundial, (1992). – OMM - Vocabulario Meteorológico Internacional. 182.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura-UNESCO- (1992). Glosario Internacional de Hidrología. [Citado 5 de marzo 2013]. <http://webworld.unesco.org>
- Panu, U. S., y Sharma, T. (2002). "Challenges in drought research: some perspectives and future directions". *Hydrological Sciences Journal* 47:S1 (19-30).
- Paoli, C. y Schreider, M. (2000). *El Río Paraná en su tramo medio*. Tomo II UNL. Santa Fe, Argentina.
- Ravelo, A.C. y Pascale, A.J. (1997). "Identificación de la ocurrencia de sequías mediante imágenes del satélite NOAA e información terrestre". *Rev. Facultad de Agronomía*. 7ª Reunión Argentina y 1ª Latinoamericana de Agrometeorología. Tomo 17 (1), (101-105).
- Ravelo, A. C., Da Porta, W. A. y Zanvettor E., (1999). "Evaluación de las sequías extremas en la región pampeana argentina durante el período 1930 – 1990". XI Congreso brasileiro de agrometeorología y a la II Reunión Latino-Americana de agro meteorología.
- Ravelo, A. (2011). "Monitoreo y evaluación de sequías en Argentina". Seminario Internacional sobre Sequías". Proyecto EUroClima. Santiago, Chile. http://www.cazalac.org/documentos/taller_euroclima/PP7_Monitoreo%20y%20evaluacion%20de%20las%20sequias%20en%20Argentina%202011.pdf
- Rivera, J., y Penalba, C. (2013). Identificación de los periodos de déficit en los caudales de los ríos de los andes argentinos. Análisis de sus variabilidades temporales. Actas del XXIV Congreso Nacional del Agua, San Juan, Argentina.
- Salas, J., Delleur, J., Yevjevich, V., y Lane, W. (1980). *Applied Modeling of Hidrologic Time Series*. Water Resources Publications. Littleton, Colorado U.S.A.

- Salas, J., Fu, C., Cancelliere, A., Dustin, D., Bode, D., Pineda, A., y Vincent, E. (2005). "Characterizing the severity and risk of drought in the Poudre River, Colorado". *Journal Water Resour. Plan. Manage* 131(5), (383-393).
- Secretaría de Turismo la Provincia de Córdoba (2000). "Espejos de Agua de la Provincia de Córdoba" [citado 1 de 9 de 2013] http://web2.cba.gov.ar/actual_web/estadisticas/informes_departnuevos/cordob/turismo/CordobaTurismo/turismo_general/espejos_agua/hidrografia/paginas/rioterzero.htm
- Shafer, B.A., y Dezman, L.E. (1982). "Development of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas". *Proceedings of the western snow conference*. Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Shin, H., y J., Salas. (2000). "Regional drought analysis based on neural networks". *Journal of Hydrologic Engineering* 5(2); (145-155).
- Silveira Coffigny, R. (2010). "La sequía en la acuicultura cubana". REDVET. *Revista electrónica de Veterinaria* 1695-7504 Vol 11(Número 03B). [citado 1 de 9 de 2013] http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n030310B/0310B_DN05.pdf
- Stager, JC, Ruzmaikin, A., Conway, D., Verburg, P., & Mason, PJ (2007). Las manchas solares, El Niño, y los niveles de Lago Victoria, al este de África. *Journal of Geophysical Research: Atmosferas*, 112 (D15).
- Sociedad Meteorológica Americana- A. M. S – (2004). "Declaración sobre la sequía meteorológica" Ed nº 85. (771-773).
- Subsecretaría de Recursos Hídricos Cuencas y Regiones Hídricas Superficiales de la RA.- SSRH- (2010) [CD]. ISBN978-987-1797-05-9. Buenos Aires, Argentina
- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Publicaciones Hidrometeorológicas. –SSRH- (2011) [CD]. ISBN 978-987-25894-3-1. Buenos Aires, Argentina
- Tallaksen, L, Madsen, H. y Clausen, B. (1997). "On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume". *Hydrol. Sci Journal*. 42(1), (15-33).
- Tsakiris, G., Loukas, D., Pangalou, H., Vangelis, H., Tigkas, D., Rossi, G., y Cancelliere, A. (2007). "Drought characterization". *Drought management guidelines technical*. Vols. Capitulo 7, (85-102). Zaragoza, España.
- Özger, M., Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2009). Low frequency drought variability associated with climate indices. *Journal of Hydrology*, 364(1), 152-162.
- UNC-UNSE. (2007). *Estudio Hidrológico-Ambiental del sistema Mar Chiquita-Bañados y tramo inferior del Río Dulce*. Córdoba, Argentina.
- Vargas, W. M., Minetti, J. L., y Poblete, A. G. (2002). Low-frequency oscillations in climatic and hydrological variables in southern South America's tropical-subtropical regions. *Theoretical and applied climatology*, 72(1-2), 29-40.
- Vicario, L. (2008). *Evaluación de las sequías Hidro-Meteorológicas en la cuenca del Dique San Roque- Córdoba*. Tesis de Maestría en Recursos Hídricos, FCEFyN-UNC. Córdoba, Argentina.
- Vicario L. (2013). "Identificación y evaluación de zonas hidrometeorológicamente homogéneas en la región central de la Argentina". Presentado en primer Congreso Iberoamericano de protección, gestión, eficiencia, reciclado y reúso del agua. Córdoba, Argentina.
- Vimont, D. J., & Kossin, J. P. (2007). The Atlantic meridional mode and hurricane activity. *Geophysical Research Letters*, 34(7).
- Wilhelm, H. (1997) *Long-Period Variations of Solar Irradiance*. *Lecture Notes in earth sciences* Springer. Vol 66. Pp. 252

- Wilhite, D. (1992). Preparing for drought: A guidebook for developing countries, climate unit, United Nations Environment Program. Nairobi, Kenya.
- Yevjevich, V. (1967). "An objective approach to definition and investigation of continental drought". Hydrology Paper 23. Fort Collins, USA: Colorado State University.
- Zelenhasic, E. & Salvai, A. (1987) A method of streamflow drought analysis. Wat. Resour. Res. 23(1), 156-168

8. ANEXO

Tabla 5.14. Series de caudales anuales de las cuencas utilizadas

Cuenca	Suquía m ³ /seg	Xanaes m ³ /seg	Anizacate m ³ /seg	Ctalamochita m ³ /seg	Dulce m ³ /seg	Colorado m ³ /seg	Juramento m ³ /seg	Bermejo m ³ /seg	Pilcomayo m ³ /seg	Paraná m ³ /seg	San Juan m ³ /seg	Mendoza m ³ /seg	Salado m ³ /seg	Atuel m ³ /seg
1905										19287.86				
1906										13302.69				53.94
1907										18811.16				53.42
1908										15628.83				40.00
1909										13159.65	34.64			29.50
1910										11509.36	30.02			45.33
1911										22294.20	26.40			45.25
1912										16923.40	58.30			47.42
1913										12938.11	32.99			30.83
1914				41.42						14530.78	208.26			28.08
1915				19.69						13700.21	143.34			49.34
1916				9.12						11720.98	54.14			31.08
1917				26.37						12740.61	33.99			24.67
1918				55.06						17016.45	60.89			32.84
1919				30.15						19634.96	223.84			44.42
1920				20.82						20732.20	96.77			36.75
1921				32.22						21103.32	117.77			33.08
1922				37.38						18643.41	76.65			36.59
1923				12.52						17706.40	53.97			27.50
1924				18.92						10856.91	29.76			25.17
1925			4.95	18.73						18723.25	47.37			40.75
1926	15.34		5.53	31.14	132.46					14878.41	139.63			43.91
1927	10.71		3.99	31.03	121.98					16112.36	75.39			33.58
1928	8.72		4.98	50.12	114.70					20841.70	59.97			27.00
1929	8.93		4.31	18.37	134.88					18340.55	62.62			29.58
1930	19.50		6.42	56.48	229.71					22350.13	131.60			53.17
1931	12.64		4.65	39.58	165.13					20315.27	87.99			37.75
1932	10.89		4.10	30.42	254.33					17259.50	51.69			27.67
1933	7.34		3.93	23.83	86.13					11565.01	50.87			30.75
1934	8.06		4.14	24.33	108.03		28.84			14037.45	103.77			39.42
1935	5.99		3.81	15.62	94.40		32.59			17589.87	50.08			30.83
1936	6.01	8.33	3.38	23.12	15.24		31.08			13265.48	44.74			27.08
1937	5.33	5.98	3.75	11.04	64.88		27.42			15252.77	66.58			29.83
1938	5.60	5.73	3.54	17.13	74.37		32.91			12723.82	38.65			24.17
1939	12.77	12.92	4.30	28.97	92.03		17.33			18659.44	31.95			25.50
1940	9.27	10.62	4.24	28.67	124.73	238.24	18.50	222.42		14993.24	69.85			39.92

Cuenca	Suquía m ³ /seg	Xanaes m ³ /seg	Anizacate m ³ /seg	Ctalamochita m ³ /seg	Dulce m ³ /seg	Colorado m ³ /seg	Juramento m ³ /seg	Bermejo m ³ /seg	Pilcomayo m ³ /seg	Paraná m ³ /seg	San Juan m ³ /seg	Mendoza m ³ /seg	Salado m ³ /seg	Atuel m ³ /seg
1941	8.37	8.02	4.85	17.12	82.33	278.08	17.75	142.97		18921.35	163.79			52.50
1942	11.11	10.66	4.75	14.96	85.79	165.24	27.67	243.71		14894.51	92.79			40.75
1943	11.36	15.76	4.94	47.87	183.58	130.83	65.58	278.40		11707.59	67.66			35.58
1944	20.44	8.18	3.27	12.42	62.27	167.91	26.00	196.28		10815.98	87.25			36.75
1945	7.62	12.59	4.92	12.46	59.99	120.59	17.75	158.83		18890.98	42.61			27.17
1946	5.68	11.15	3.46	21.08	64.73	67.58	24.42	256.07		18293.88	36.98			23.33
1947	8.24	12.16	4.60	26.13	75.11	90.08	19.58	180.37		14822.15	37.81			23.75
1948	3.76	3.99	3.10	14.56	51.43	147.01	58.92	301.31		12559.26	59.33			30.58
1949	5.65	7.01	3.56	16.79	45.08	111.59	35.75	475.72		13980.20	36.33			29.00
1950	3.74	6.29	3.13	12.45	57.83	137.68	25.83	301.49		15949.76	38.96			28.92
1951	5.99	9.79	4.09	18.48	65.72	151.65	26.58	265.67		13340.90	33.84			30.75
1952	12.20	6.54	4.91	36.66	90.63	110.08	40.83	231.36		12313.64	49.70			26.92
1953	9.55	8.04	4.98	22.24	61.46	227.26	32.50	383.00		17198.33	123.07			45.09
1954	6.02	5.46	2.57	25.64	67.14	124.50	35.67	516.82		13914.36	60.36		71.46	30.00
1955	9.45	13.58	6.16	33.14	41.41	95.42	17.25	233.29		16181.82	42.54		24.03	24.33
1956	21.04	18.27	6.62	55.85	87.08	88.75	23.08	318.76		18428.22	31.37	29.42	49.69	23.50
1957	10.11	6.26	2.85	34.47	179.43	87.91	25.83	240.67		18655.14	61.23	32.92	51.01	26.67
1958	12.26	10.63	4.01	26.42	154.81	148.43	30.08	468.74		19864.12	39.94	34.00	225.40	33.42
1959	9.78	8.79	4.51	30.87	134.91	168.84	47.00	646.12		15797.53	39.99	39.00	90.19	37.83
1960	11.64	11.95	5.13	44.52	179.74	109.58	28.67	409.52	120.58	19514.48	44.20	34.58	121.18	30.25
1961	9.60	13.19	5.85	37.39	87.45	182.92	18.67	264.16	149.09	14303.88	52.17	42.09	72.72	35.92
1962	8.75	7.44	4.46	21.19	172.36	92.67	57.00	443.73	234.17	13985.23	37.65	30.92	74.88	24.92
1963	7.34	8.40	3.06	27.96	153.59	173.00	24.58	252.60	153.85	12378.87	80.95	46.00	53.25	34.58
1964	7.70	10.23	4.56	34.42	62.28	97.91	28.33	196.61	102.54	18891.15	34.05	26.92	31.62	23.92
1965	7.47	7.21	3.48	26.04	112.14	189.84	17.50	270.16	111.20	21771.59	88.88	44.08	156.95	35.00
1966	8.30	7.25	4.31	18.23	67.55	169.91	21.67	286.36	133.81	14981.38	49.68	35.08	66.29	34.59
1967	10.14	7.88	3.17	23.44	88.50	100.09	31.42	342.00	236.95	10637.25	31.28	29.75	36.71	27.58
1968	8.03	4.47	5.42	11.96	93.48	52.59	25.03	235.71	141.06	11285.62	19.87	23.83	25.20	19.75
1969	4.76	6.39	1.94	18.38	63.13	115.17	22.67	244.57	183.46	12289.26	28.24	36.92	22.43	27.75
1970	6.91	5.23	4.25	16.54	84.93	82.42	22.18	253.62	179.72	14244.86	20.93	23.42	36.42	18.92
1971	4.61	2.93	4.86	11.58	24.85	132.59	22.39	223.00	148.96	12763.75	23.40	31.92	17.79	29.17
1972	17.85	12.05	8.15	34.74	90.08	240.66	17.16	332.33	174.37	20582.02	101.53	60.17	410.76	48.42
1973	8.58	7.00	2.54	17.26	136.07	127.41	24.50	458.85	276.62	19125.09	53.44	40.83	190.65	33.92
1974	15.82	8.86	3.94	28.37	117.41	154.57	29.43	317.98	231.95	14881.48	54.59	39.83	90.28	35.41
1975	5.23	4.37	1.54	13.78	153.73	169.33	26.12	430.66	194.43	17780.19	34.33	31.83	47.45	33.75
1976	15.05	11.18	5.48	29.60	181.53	102.76	21.48	405.21	164.38	19072.85	28.77	27.67	271.90	26.00
1977	20.41	12.50	10.53	39.84	197.93	178.01	25.40	359.20	243.05	14523.35	71.37	49.84	172.42	35.50
1978	20.06	18.84	8.74	61.23	211.08	190.00	61.02	470.15	361.06	16621.10	101.06	61.75	173.50	42.42
1979	13.96	11.25	5.13	40.22	137.21	216.00	36.15	510.83	208.72	21612.05	46.40	48.83	90.80	42.42
1980	20.16	17.60		36.06	243.88	191.17	43.16	647.51	273.40	18589.33	75.04	56.89	224.17	45.16

Cuenca	Suquía m ³ /seg	Xanaes m ³ /seg	Anizacate m ³ /seg	Ctalamochita m ³ /seg	Dulce m ³ /seg	Colorado m ³ /seg	Juramento m ³ /seg	Bermejo m ³ /seg	Pilcomayo m ³ /seg	Paraná m ³ /seg	San Juan m ³ /seg	Mendoza m ³ /seg	Salado m ³ /seg	Atuel m ³ /seg
1981	13.57	9.35		23.89	124.68	137.75	23.05	541.22	303.05	21761.34	32.81	40.09	98.08	34.59
1982	15.81	10.18		30.87	193.35	290.26	17.84	312.10	93.33	37819.08	120.51	92.32	195.63	69.75
1983	16.07	13.79			230.09	146.50	62.24	633.04	453.08	22526.52	84.58	71.56	226.60	48.83
1984	14.04	13.22			180.02	192.68	40.77	482.44	335.57	20987.35	116.84	60.95	222.18	48.75
1985	12.23	11.90			181.96	109.18	36.52	473.45	391.73	16303.59	46.59	50.70	234.00	36.00
1986	14.06	10.06			128.02	184.82	40.69		260.16	18532.66	82.07	73.34		47.00
1987	13.37	11.60			159.73	198.17	28.49	472.03	256.30	17840.56	149.69	93.96		48.34
1988	6.82	5.84			26.63	109.08	17.43	257.31	136.12	17452.02	52.46	52.24		34.75
1989	7.87	8.72			86.95	97.42	26.55	311.27	130.59	21775.90	51.13	44.59		31.83
1990	9.14	10.08			135.15	98.58	29.37	598.74	220.75	19676.67	31.76	38.10		27.92
1991	24.72	15.50			161.06	145.82	16.55	371.26	156.71	22196.92	79.22	59.11		33.26
1992	18.66	12.71			174.15	180.84	23.97	309.52	149.84	21271.99	78.04	49.23		38.76
1993	13.55	15.04			84.52	147.41	16.25	335.02	141.82	17991.91	55.86	45.33	279.57	37.85
1994	6.02	6.88			97.57	156.93	22.21	399.24	184.43	18984.63	46.62	49.92	75.75	37.28
1995	12.42	13.33			58.27	153.05	10.10	351.79	130.09	16313.25	29.90	38.31	59.44	34.47
1996	10.55	8.98			145.00	71.46	36.99	439.65	299.57	21676.99	22.97	27.68	67.43	25.04
1997	14.30	11.81			154.57	199.07	7.30	263.28	100.47	27266.75	125.01	43.84	642.61	40.76
1998	13.52	10.95			171.40	63.35	20.49	535.46	244.52	21313.92	43.63	35.07	131.36	24.54
1999	27.00	21.24			251.64	119.50	29.15	498.59	195.20	13482.01	39.33	35.04	82.77	27.63
2000	17.92	14.66			236.87	193.81	38.33	404.54	296.42	17533.68	65.67	53.77	113.86	43.64
2001	13.24	15.22			153.52	201.00	19.41	446.82	156.62	16300.06	58.24	50.66	216.00	45.07
2002	12.51	10.99			114.92	233.10	20.06	414.29	193.27	16884.15	106.43	59.43	542.54	51.65
2003	9.93	6.64			75.50	126.64	26.97	412.82	221.98	16203.99	62.04	46.06	74.65	37.35
2004	9.58	8.30			80.04	114.74	18.06	345.84	193.30	17280.23	38.82	35.73	114.08	32.40
2005	7.36	11.47			124.46	259.57	28.19	600.82	319.84	16607.59	92.84	72.40	35.94	55.85
2006	10.25	11.87			185.22	216.78	20.82	578.53	257.13	19482.11	74.81	64.92	131.30	49.95
2007	9.26	10.45			152.72	118.40	38.48	571.67	316.32	16498.60	54.81	49.41	22.78	33.94
2008	9.65	12.88			86.36	141.97	27.30	465.39	271.97	15562.02	59.38	63.90	16.20	38.03
2009	5.96				109.30	154.08	21.64	497.54	174.97	23152.80	44.75	47.32	161.68	31.43
2010	4.65				159.41	83.84	41.95	532.34	217.93	19726.34	35.11	27.49	63.70	25.19
2011					87.00	90.43	49.35	478.90	304.13	17888.86	43.31	31.40	43.24	23.37
2012					64.00	82.58	26.15	240.10	192.67	17713.41	36.41	33.38	88.35	27.85
2013					69.00	94.43		402.96	247.23	19183.17	38.59	34.35	153.34	23.41