

Estudio de Series de Tiempo para el apoyo a la Gestión del Recursos Hídrico en la Cuenca Alta del Río Suquía

Reyna, Teresa; Álvarez, Javier; Eder, Matías; Guillén Nicolás

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. U.N.C

Av. Vélez Sarsfield 1600. Ciudad Universitaria. Te 4692737.

Teresamaria.reyna@gmail.com, javieralvarez.ic@gmail.com, matiaseder2@gmail.com,
nfguillen@hotmail.com

Resumen

Históricamente se ha gestionado el agua a partir de una perspectiva de oferta y demanda con énfasis en maximizar el crecimiento económico a corto plazo en base a su utilización. Esta perspectiva del recurso ya no es aceptada por la sociedad que reclama de los gestores un uso más racional y sustentable del mismo. Actualmente los gestores del recurso hídrico están asumiendo un punto de vista más integral del recurso hídricos asumiendo el paradigma actual de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico que implica la necesidad del cuidado de los ecosistemas acuáticos y de los recursos para poder preservar el agua en calidad y cantidad no solo para el futuro inmediato sino para las futuras generaciones. Dentro de Integración de metodologías multidisciplinares en la planificación hidrológica el estudio de los datos existentes a través de series de tiempo permite avanzar en el conocimiento del recurso. Para avanzar en la evaluación de las disponibilidades del recurso hídrico de la cuenca alta del Río Suquía se analizaron series de la cuenca alta. Las series analizadas fueron San Antonio – El Cóndor, Estación: El Cajón y Estación Barrio El Canal. Los modelos de series temporales que se propusieron para el análisis de cada registro fueron modelos ARMA. Los resultados muestran que el análisis de series de tiempo es una herramienta que puede ser aplicada para este tipo de análisis y que permite obtener valiosa información de las características pluviográficas de la zona.

Palabras claves: precipitaciones cuenca Suquía, series de tiempo, series de precipitaciones

Abstract

Historically water has been managed from the perspective of supply and demand with emphasis on maximizing short-term economic growth based on its use. This view of the resource is no longer accepted by the society that demands managers a more rational and sustainable use of it. Currently water resource managers are taking a more holistic view of water resource assuming the current paradigm of Integrated Water Resource Management which implies the need for care of aquatic ecosystems and resources in order to preserve water quality and amount not only for the immediate future but for future generations. In Integration of multidisciplinary methodologies in water planning study of existing time series analysis allows advance knowledge resource. To advance the assessment of available water resources of the Upper Rio Suquía series of the upper basin were analyzed. The series analyzed were San Antonio - El Condor, Season: El Cajon and El Barrio Station Canal. The time series models that were proposed for the analysis of each record were ARMA models. The results show that the time series analysis is a tool that can be applied to this type of analysis and offers valuable information on the characteristics pluviographics.

Keywords: basin rainfall Suquía, time series, series of rainfall

Introducción

El estudio de las fuentes de agua es una base para avanzar en la protección y la gestión correcta de los mismos. Abordar las necesidades hídricas de ecosistemas acuáticos

implica a menudo disminuir el empleo de agua por parte de uno o más sectores. La creciente demanda de agua y la pérdida de calidad del recurso, hacen, sin embargo, que se preste especial atención a su uso óptimo, y por lo tanto, que se estudien también cuidadosamente los caudales mínimos. Una adecuada planificación del uso y manejo del agua requiere principalmente la toma de conciencia de que el agua es un recurso natural limitado, condicionante del desarrollo e íntimamente ligado a la calidad de vida de una sociedad y su ecosistema. Esta planificación es considerada imprescindible en todo el mundo desarrollado, donde la sociedad ya ha adquirido un grado de conciencia sobre el medio ambiente y la conservación de los recursos no renovables. (Reyna, et al, 2012.).

La región donde se asienta la Provincia de Córdoba está sometida a fuertes variaciones en sus ciclos hidrológicos. Esto implica que se trata de una región que está expuesta a riesgos tanto por exceso como por falta de agua.

Metodología

En la actualidad se requieren conocer el comportamiento futuro de ciertos fenómenos con el fin de planificar, gestionar, prevenir, es decir, se utilizan para estimar o predecir lo que ocurrirá con una variable en el futuro a partir del comportamiento de esa variable en el pasado. Para el estudio de los períodos de precipitaciones mínimas se planteó la necesidad de conocer y evaluar los registros disponibles en la cuenca a través del análisis de series temporales. Los registros de precipitación se obtuvieron de la SSRH de la nación.

Series de Tiempo

Los modelos estocásticos se fundamentan principalmente en el máximo aprovechamiento de la información de la serie histórica de una variable determinada, es decir reproducir las estadísticas históricas de las series de tiempo (Box y Jenkins, 1970). El concepto clave en este tipo de modelos es la dependencia entre los datos, su aplicación presenta algunas ventajas, por ejemplo tiene mucha flexibilidad para trabajar en diferentes escalas.

Un modelo que describe la estructura probabilística de una secuencia de observaciones es un proceso estocástico. Una serie de tiempo de N observaciones sucesivas $Z' = (z_1, z_2, \dots, z_N)$ se toma como una muestra o realización extraída de una población infinita de tales muestras, que podrían haber sido generadas por el proceso. Un gran objetivo de la investigación estadística es inferir las propiedades de la población a partir de las propiedades de la muestra. Para hacer esto se precisa de los conocimientos necesarios para describir los procesos estocásticos y las series de tiempo, y también disponer de las clases de modelos estocásticos capaces de describir las situaciones que ocurren en la práctica.

Modelos Autorregresivos

Un modelo estocástico que puede ser extremadamente útil en la representación de series de tiempo es el llamado modelo autorregresivo. En este modelo el valor actual del proceso se expresa como una suma finita y lineal de valores previos del proceso, más un shock aleatorio a_t . Notemos a los valores del proceso muestreado a intervalos equiespaciados de tiempo $t, t-1, \dots$, como $Z_t, Z_{t-1}, Z_{t-2}, \dots$. También notemos a las desviaciones a partir de la media (μ) con $\tilde{Z}_t, \tilde{Z}_{t-1}, \tilde{Z}_{t-2}, \dots$, es decir, $\tilde{Z}_t = Z_t - \mu$ (Salas et al. , 1985).

Luego:
$$\tilde{Z}_t = \phi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \phi_2 \tilde{Z}_{t-2} + \dots + \phi_p \tilde{Z}_{t-p} + a_t$$

es un modelo autorregresivo de orden p, AR(p). La razón para este nombre es que un modelo lineal de la forma

$$\tilde{Z} = \phi_1 \cdot \tilde{X}_1 + \phi_2 \cdot \tilde{X}_2 + \dots + \phi_p \cdot \tilde{X}_p + a$$

que relacione una variable “dependiente” Z con un conjunto de variables “independientes” $X_1, X_2, X_3, \dots, X_p$ más un término de error a , es llamado modelo de regresión, y se dice que Z está “regresada” sobre X_1, X_2, \dots, X_p . En la primera ecuación la variable z está regresada sobre valores previos de sí misma; por lo tanto el modelo es *auto – regresivo*. Este modelo contiene p+2 parámetros desconocidos: $\mu, \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p, \sigma_a^2$, los cuales, en la práctica, deben ser estimados a partir de los datos. El parámetro adicional, σ_a^2 , es la varianza del ruido blanco a_t .

Modelos de Promedio Móviles

El modelo autorregresivo expresa al desvío \tilde{Z}_t del proceso como la suma finita ponderada de los desvíos del proceso, más un shock aleatorio a . De manera equivalente, expresa a \tilde{Z}_t como una suma ponderada infinita de los a . Otro tipo de modelos de gran importancia en la representación de series de tiempo es el llamado proceso finito de medias o promedios móviles. Aquí hacemos a \tilde{Z}_t linealmente dependiente de un número finito de shock previos. Luego el proceso:

$$\tilde{Z}_t = a_t - \theta_1 \cdot a_{t-1} - \theta_2 \cdot a_{t-2} - \dots - \theta_q \cdot a_{t-q}$$

es llamado un proceso de promedios móviles de orden q, MA(q). Este modelo contiene q+2 parámetros desconocidos, los cuales, en la práctica, serán estimados a partir de los datos

Series analizadas

Como se mencionó en el siguiente trabajo se planteó el estudio de las precipitaciones de la zona de la cuenca alta del Río Suquía para ello se extrajeron las series de precipitación de la SSRH de la Nación (http://www.hidricosargentina.gov.ar/sistema_sistema.php). Las series consideradas fueron Estación San Antonio – El Cóndor, Estación El Cajón y Estación Barrio El Canal.

Estación: San Antonio – El Cóndor: La estación pluviométrica San Antonio – El Cóndor, ubicada en coordenadas 31°34'50" Latitud Sur y 64°47'20" Longitud Oeste, nos brinda información de precipitaciones diarias en una serie histórica que comienza el 13/02/1992 y finaliza el 30/12/2013. Esta serie cuenta con un total de 7719 datos medidos y tiene un faltante de 273 valores (3.42% del total de los valores de la serie). Los intervalos más extensos sin valores medidos en forma consecutiva corresponden a los siguientes periodos 01/04/1999 - 30/04/1999 y al 01/04/2006 – 30/04/2006 ambos con un total de 30 valores.

Estación: El Cajón: La estación pluviométrica El Cajón, ubicada en coordenadas 31°34'50" Latitud Sur y 64°47'20" Longitud Oeste, nos brinda información de precipitaciones diarias en una serie histórica que comienza el 01/12/1992 y finaliza el 30/08/2010. Esta serie cuenta con un total de 5988 datos medidos y tiene un faltante de 314 valores (4.98% del total de los valores de la serie). El intervalo más extensos sin valores medidos en forma consecutiva corresponde al período 01/04/1996 - 31/05/1996 con un total de 61 valores.

Estación: Barrio El Canal – Suquía: La estación pluviométrica Barrio El Canal – Suquía, ubicada en coordenadas 31.45° Latitud Sur y 64.49° Longitud Oeste, nos brinda

información de precipitaciones diarias en una serie histórica que comienza el 01/01/1992 y finaliza el 25/08/2010. Esta serie cuenta con un total de 6599 datos medidos y no tiene valores faltantes.

Luego de procesar las series seleccionadas se obtuvieron los valores de Precipitaciones Totales de cada Año Hidrológico (01/07/año–31/06/año), Precipitaciones Medias Mensuales y Precipitaciones Totales Mensuales. Finalmente se ajustan diferentes modelos de predicción: ARMA (1,0), ARMA (2,0), ARMA (0,1), ARMA (0,2) y ARMA (1,1) y se muestran los resultados. Con respecto a las series de las estaciones “El Cajón” y “El Cóndor”, que tenían periodos sin datos, estos periodos se completaron con las estaciones más cercanas en los meses que faltaban.

Tabla 1.- Precipitaciones totales anuales. * Registro incompleto

Año	PTA hidrológico [mm]		
	El Cajón	El Canal	SA El Cóndor
1992-93		760	736
1993-94	769	477	910
1994-95	498	705	824
1995-96	665	540	1051
1996-97	631	872	784
1997-98	729	711	910
1998-99	706	439	648
1999-00	909	921	914
2000-01	747	664	878
2001-02	672	699	1154
2002-03	946	716	851
2003-04	914	642	790
2004-05	868	542	932
2005-06	791	478	843
2006-07	863	450	773
2007-08	934	542	830
2008-09	872	700	854
2009-10	455*	238*	817
2010-11			734
2011-12			892
2012-13			819
MEDIA	762.88	616.44	854.48
DESvíO	146.97614	168.03824	108.96145

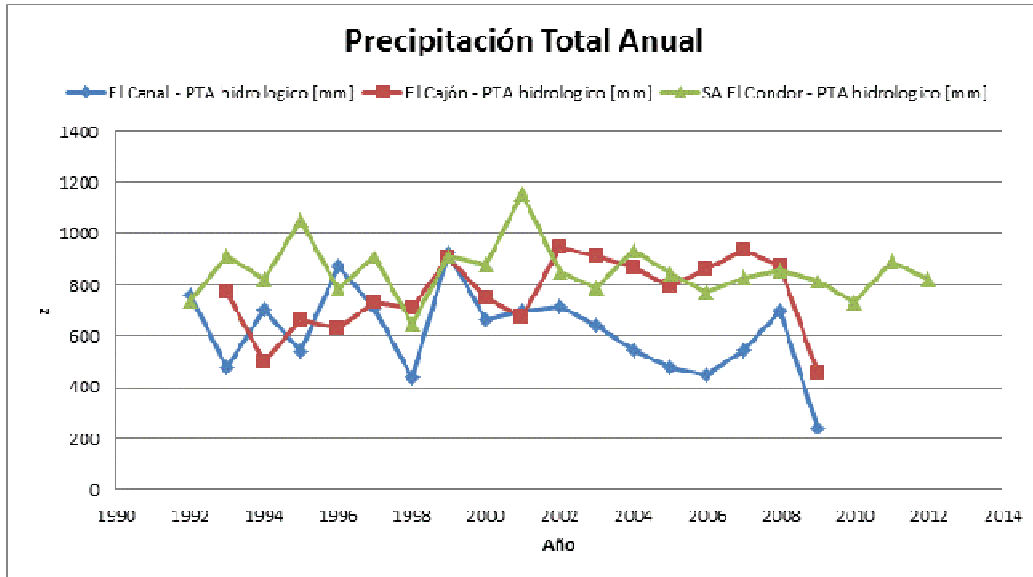


Figura 1.- Precipitaciones Totales Anuales, láminas expresadas en mm.

Tabla 2.- Precipitaciones medidas mensuales – Estación Barrio El Canal – Suquía.

mes	Media Mensual (mm)		
	El Cajón	El Canal	SA El Cóndor
Julio	6.50	6.27	7.41
Agosto	5.00	5.27	8.86
Septiembre	24.06	22.77	28.59
Octubre	58.06	53.61	62.91
Noviembre	109.76	79.83	140.86
Diciembre	145.56	102.94	151.68
Enero	136.28	110.83	144.32
Febrero	102.33	82.61	118.32
Marzo	101.17	82.33	120.59
Abril	37.61	43.61	46.27
Mayo	19.33	15.44	22.27
Junio	20.94	3.33	5.09

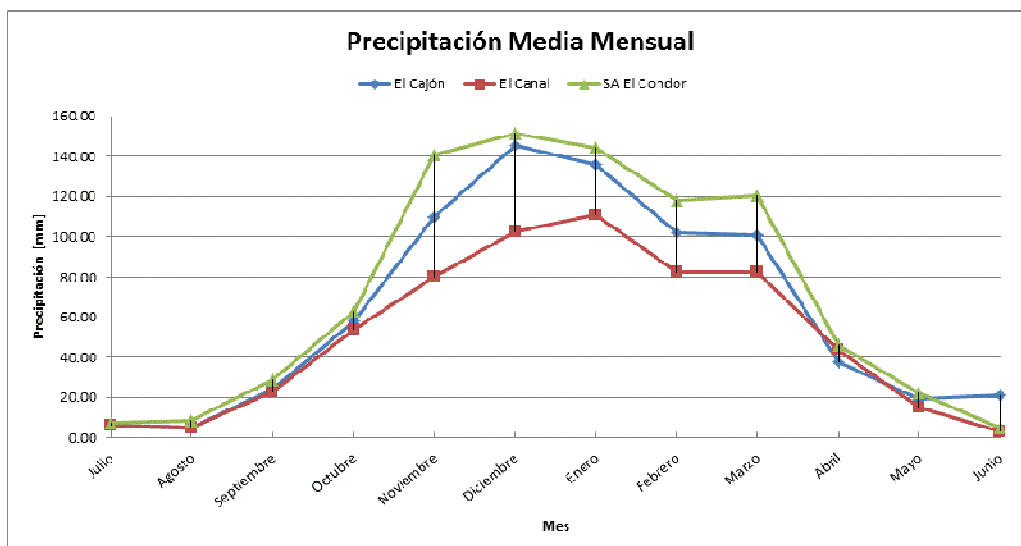


Figura 2.- Precipitaciones medidas mensuales.

Estación El Canal:

Número de observaciones = 18 Índice Inicial = 1.0 Intervalo de Muestra = 1.0 año

Tabla 3. Resultados del análisis de la serie Estación El Canal

Modelo	RMSE	MAE	MAPE	ME	MPE
(A)	1.02045	0.761473		-0.00336066	
(B)	0.983875	0.68633		-0.046537	
(C)	1.02531	0.76452		-0.00357977	
(D)	1.02596	0.709471		-0.014086	
(E)	1.00684	0.735599		-0.0758973	

Modelo	RMSE	RUNS	RUNM	AUTO	MEDIA	VAR
(A)	1.02045	OK	OK	OK	*	OK
(B)	0.983875	OK	OK	OK	*	OK
(C)	1.02531	OK	OK	OK	*	OK
(D)	1.02596	OK	OK	OK	*	OK
(E)	1.00684	OK	OK	OK	OK	OK

Referencias tabla:

RMSE = Root Mean Squared Error (Raíz del Cuadrado Medio del Error). RUNS = Prueba corridas excesivas arriba y abajo. RUNM = Prueba corridas excesivas arriba y abajo de la mediana. AUTO = Prueba de Box-Pierce para autocorrelación excesiva. MEDIA = Prueba para diferencia en medias entre la 1ª mitad y la 2ª mitad. VAR = Prueba para diferencia en varianza entre la 1ª mitad y la 2ª mitad. OK = no significativo ($p \geq 0.05$). * = marginalmente significativo ($0.01 < p \leq 0.05$). ** = significativo ($0.001 < p \leq 0.01$). *** = altamente significativo ($p \leq 0.001$)

En la tabla 3 se compara los resultados de cinco diferentes modelos de pronósticos. De acuerdo a los resultados de las estadísticas del error, el modelo con la menor raíz cuadrada del error cuadrado medio (RMSE) durante el periodo de estimación del modelo es el modelo B. A su vez, éste modelo resulta ser el que posee menor error medio absoluto (MAE) es el modelo B. La tabla también resume los resultados de cinco pruebas para determinar si cada modelo es adecuado para los datos. Un OK significa que el modelo pasa la prueba. Un * significa que no pasa la prueba al nivel de confianza del 95%. ** significa que no pasa la prueba al nivel de confianza del 99%. *** significa que no pasa la prueba al nivel de confianza del 99,9%. El modelo A, pasa 5 pruebas. Puesto que ninguna prueba es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95% o más, el modelo actual probablemente es adecuado para los datos.

Se puede apreciar que el modelo que mejor describe la serie de precipitaciones de la estación El Canal es un ARMA (1,1).

Estación El Cajón:

Número de observaciones = 17 Índice Inicial = 1993 Intervalo de Muestra = 1,0 año(s)

Tabla 4. Resultados del análisis de la serie Estación El Cajón

Modelo	RMSE	MAE	MAPE	ME	MPE
(A)	147,44	104,56	15,7517	-0,69869	-4,29333
(B)	151,641	104,994	15,7589	-2,16767	-4,42052
(C)	146,738	105,05	15,7947	-1,61399	-4,36986
(D)	151,9	104,866	15,7727	-1,59488	-4,36702
(E)	151,976	104,475	15,7248	-1,38036	-4,34058

Modelo	RMSE	RUNS	RUNM	AUTO	MEDIA	VAR
(A)	147,44	OK	OK	OK	OK	OK

Modelo	RMSE	RUNS	RUNM	AUTO	MEDIA	VAR
(B)	151,641	OK	OK	OK	OK	OK
(C)	146,738	OK	OK	OK	OK	OK
(D)	151,9	OK	OK	OK	OK	OK
(E)	151,976	OK	OK	OK	OK	OK

Viendo las estadísticas del error, el modelo con la menor raíz cuadrada del error cuadrado medio (RMSE) durante el periodo de estimación del modelo es el modelo C. Por otro lado el modelo E es el que tiene el menor error medio absoluto (MAE) presenta el menor porcentaje del error medio absoluto (MAPE). La tabla también resume los resultados de cinco pruebas para determinar si cada modelo es adecuado para los datos. Un OK significa que el modelo pasa la prueba. Un * significa que no pasa la prueba al nivel de confianza del 95%. ** significa que no pasa la prueba al nivel de confianza del 99%. *** significa que no pasa la prueba al nivel de confianza del 99,9%. Todos los modelos describen adecuadamente la serie. Por el principio de parsimonia los mejores resultan el AR (1) y el MA (1), ya que presentan la menor cantidad de parámetros. Los modelos AR son los más utilizados en el estado del arte para describir series de datos de precipitaciones, por lo tanto se adoptó para la estación El cajón un modelo AR (1).

Estación El Cóndor:

Número de observaciones = 21 Índice Inicial = 1992 Intervalo de Muestra = 1.0 año(s)

Tabla 5. Resultados del análisis de la serie Estación El Cóndor

Modelo	RMSE	MAE	MAPE	ME	MPE
(A)	0.997115	0.654617		-0.00395687	
(B)	1.01568	0.650132		-0.0013704	
(C)	1.00025	0.65949		-0.00452277	
(D)	1.02784	0.660567		-0.00892614	
(E)	1.0266	0.657082		-0.0106884	

Modelo	RMSE	RUNS	RUNM	AUTO	MEDIA	VAR
(A)	0.997115	OK	OK	OK	OK	*
(B)	1.01568	OK	OK	OK	OK	*
(C)	1.00025	OK	OK	OK	OK	*
(D)	1.02784	OK	OK	OK	OK	**
(E)	1.0266	OK	OK	OK	OK	*

Esta tabla compara los resultados de cinco diferentes modelos de pronósticos. Viendo las estadísticas del error, el modelo con la menor raíz cuadrada del error cuadrado medio (RMSE) durante el periodo de estimación del modelo es el modelo A. El modelo con el menor error medio absoluto (MAE) es el modelo B. La tabla también resume los resultados de cinco pruebas para determinar si cada modelo es adecuado para los datos. Un OK significa que el modelo pasa la prueba. Un * significa que no pasa la prueba al nivel de confianza del 95%. Dos **s significa que no pasa la prueba al nivel de confianza del 99%. Tres *s significa que no pasa la prueba al nivel de confianza del 99,9%. Note que el modelo A pasa 4 pruebas. Puesto que ninguna prueba es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95% o más, el modelo AR (1) es el que mejor representa los datos.

A continuación se presentan los gráficos del análisis de serie de cada uno de los registros considerados.

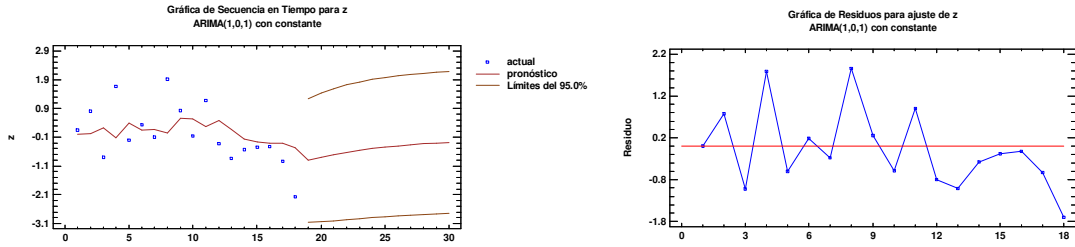


Figura 3. Gráfico de la serie original y de la serie de residuos de la Estación Barrio El Canal – Suquía. . Modelo Seleccionado ARMA (1,1).

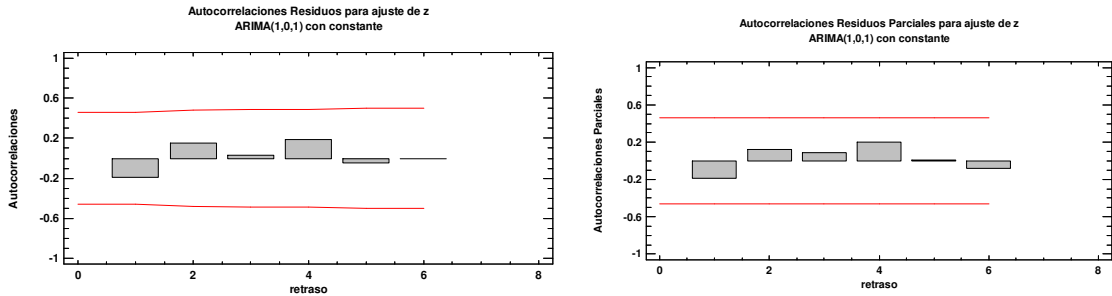


Figura 4. Gráficos de la función de Autocorrelación y Autocorrelación parcial de la serie de residuos de la Estación Barrio El Canal – Suquía. Modelo seleccionado ARMA (1,1)

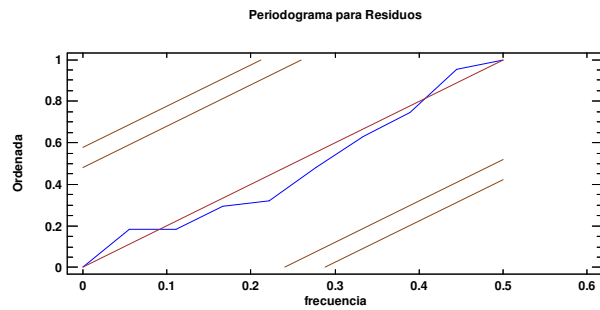


Figura 5. Periodograma Acumulado de la serie de residuos del Modelo AR (1) para la Estación Barrio El Canal – Suquía. Modelo seleccionado ARMA (1,1)

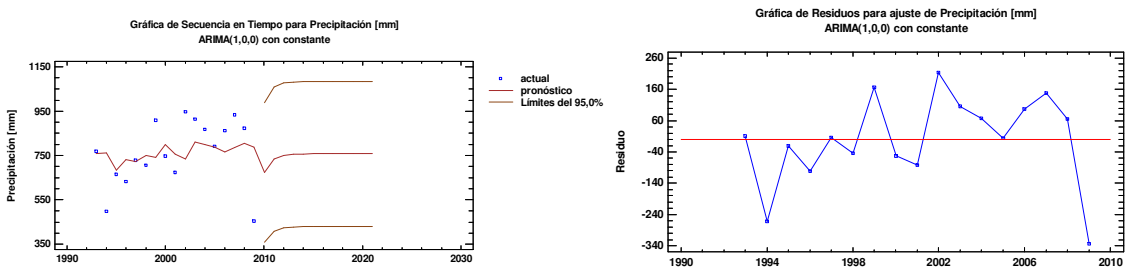


Figura 6. Gráfico de la serie original y de la serie de residuos de la Estación Barrio El Canal – Suquía. Modelo seleccionado ARMA (1,0).

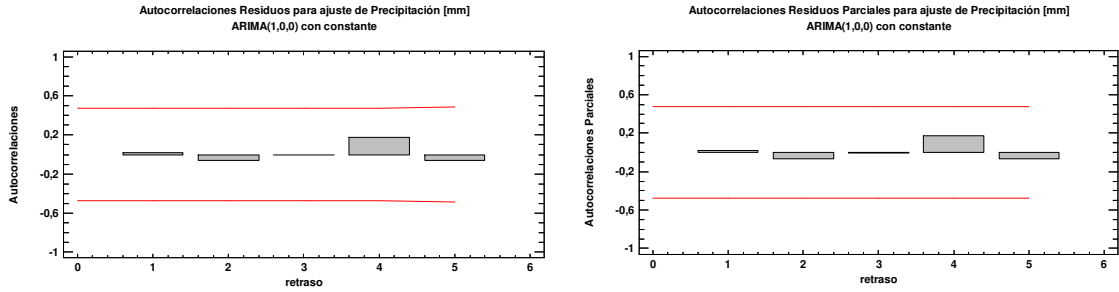


Figura 7. Gráficos de la función de Autocorrelación y Autocorrelación parcial de la serie de residuos de la Estación Barrio El Canal – Suquía. Modelo seleccionado ARMA (1,0).

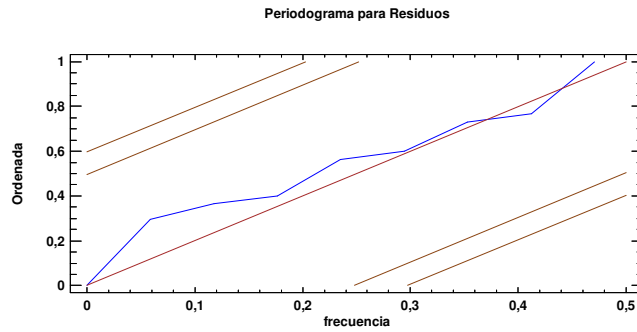


Figura 8. Periodograma Acumulado de la serie de residuos del Modelo AR (1) para la Estación Barrio El Canal – Suquía. Modelo seleccionado ARMA (1,0).

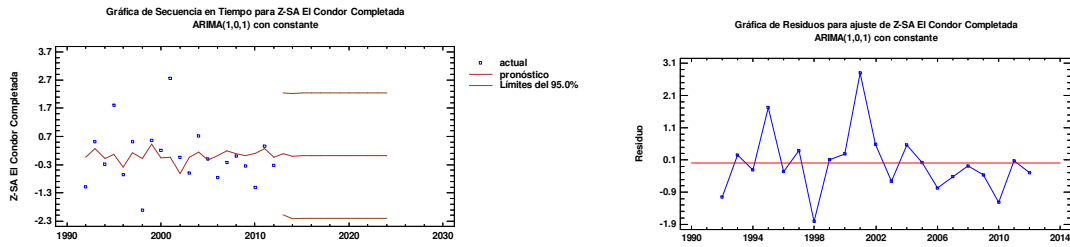


Figura 9. Gráfico de la serie original y de la serie de residuos de la Estación San Antonio El Córdor – Suquía. Modelo seleccionado ARMA (1,0).

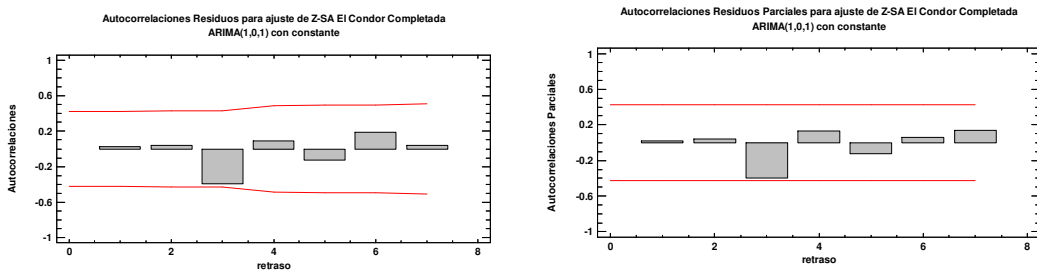


Figura 10. Gráficos de la función de Autocorrelación y Autocorrelación parcial de la serie de residuos de la Estación San Antonio El Córdor – Suquía. Modelo seleccionad ARMA (1,0).

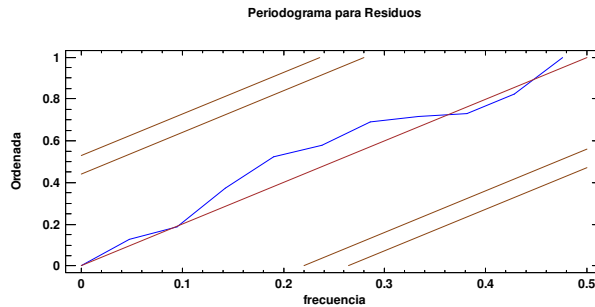


Figura 11. Gráfico Periodograma Acumulado de la serie de residuos del Modelo AR (1) para la Estación San Antonio El Cóndor – Suquía. Modelo seleccionado ARMA (1,0).

Comentarios y Discusiones

El uso de series de tiempo para el análisis hidrológico es una herramienta muy poderosa y permite realizar pronósticos especialmente a corto y medianos plazo. Las series de tiempo analizadas indican que los modelos de bajo número de parámetros representan correctamente el comportamiento de las series anuales de precipitación.

Los modelos que mejor representan a las series de precipitaciones anuales de las Estaciones El Cajón y El Cóndor fueron modelos ARMA (1,0) mientras que para la estación El Canal fue el modelo ARMA (1,1).

Los valores totales de precipitación anual de las diferentes estaciones analizadas muestran que las medias anuales de las estaciones consideradas son 763 mm para la Estación El Cajón, 616 mm para la Estación El Canal y 854 mm para la Estación El Cóndor. Con una media general de la zona de 745 mm. Por otra parte, si bien existe diferencia en los valores de las medias del gráfico de precipitaciones medias mensuales de las tres series se observa que las variaciones mensuales se mantienen con algunas pequeñas diferencias entre las diferentes series consideradas.

Con respecto a los valores mínimos de las precipitaciones anuales de las series consideradas dentro del período 92/93 hasta 2008/09, se observa que para el estación El Cajón el mínimo ocurrió durante el periodo 94/95 y la precipitación fue de 498 mm, para la Estación El Canal el periodo que presenta el mínimo al igual que para la serie de El Cóndor fue 98/99 con un precipitación de 648mm. Valores esto muy por debajo de las medias de cada estación, estos valores indican que es importante considerar los valores mínimo y los que los estudios de series que permiten realizar proyecciones configuran una herramienta que puede contribuir a la Gestión del Recurso Hídrico.

Referencias Bibliográficas

- Box, G. E. P., Jenkins, G.** (1970) Time Series Analysis, Forecasting and Control, San Francisco, Holden-Day.
- Reyna, S., Reyna, S., Lábaque, M.; Fulginiti, F.** (2012) Diagnóstico de La Provisión de Agua del Gran Córdoba. Alternativas de Solución. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. San José, Costa Rica.
- Salas, J.D., Delleur, J.W., Yevjevich, v., Lane, W.L.** (1985) Applied Modeling of Hydrologic Time Series. Water Resources. Littleton, Colorado, USA.
- http://www.hidricosargentina.gov.ar/sistema_sistema.php
- <http://www.statgraphics.com>