

Análisis del decrecimiento de los derrames de los ríos Limay y Chubut

Analysis of the decrease in spills from the Limay and Chubut rivers

Poblete, Arnobio Germán, (agpoblete@gmail.com); Albeiro Castro María Agustina (magustina.albeiro@gmail.com)

Instituto de Geografía Aplicada – Facultad de Filosofía, Humanidades y Artes – Universidad Nacional del San Juan
San Juan – Departamento Capital – San Juan – Argentina

Recibido: 09/09/2022. Aceptado: 15/02/2023

RESUMEN

Teniendo en cuenta los reportes emitidos por los modelos de pronósticos de largo plazo de los grandes centros internacionales sobre la región del Comahue y Patagonia, que coinciden en proyectar para el período 2080–2100 una importante disminución de las precipitaciones invernales en la misma, en este trabajo se verifica si el comportamiento actual de sus principales ríos es compatible con dichos pronósticos.

Sin embargo, una de las mayores dificultades que presenta el estudio del cambio climático en dichas regiones, es la escasez de series climatológicas e hidrológicas lo suficientemente largas en el período instrumental como para aplicarles test estadísticos de detección de tendencias y saltos en la media.

Siendo el río Limay el más representativo de la primera región y el Chubut de la segunda, dado que cuentan con mediciones regulares de caudales incompletas y/o con datos faltantes, se los seleccionó para extender y optimizar sus series temporales obteniendo valores estimados de periodos anteriores/posteriores desde el inicio de sus respectivas mediciones y así hacer posible la detección aludida, entre otros propósitos.

La reconstrucción de los datos de los derrames anuales (volumen de agua aportado en una temporada) de dichos ríos se realizó mediante modelos estadísticos empíricos no lineales. Se logró uno que muestra una muy buena performance estadística y retrotrae las estimaciones del derrame de sendos ríos.

Se dispone, en la actualidad, para el río Limay de una serie medida de 115 años, mientras que el Chubut, tiene una incompleta. De ahí que se hará uso de las mediciones del primero para reconstruirlo. A su vez, a éste último, se lo emplea para actualizar la serie del primero desde 2011 hasta 2017.

Una vez lograda la reconstrucción de sus series, resultó viable un análisis de tendencia y detección de cambios abruptos con el objeto de describir estadísticamente la estructura del decrecimiento de sus derrames que se verifica hasta el presente.

Palabras claves: ríos; comahue; Patagonia; decrecimiento; largo plazo; cambios-abruptos



ABSTRACT

Taking into account, reports issued by the long-term forecast models of the major international climate centers, and IPCC, which coincide in projecting a significant decrease in winter rainfall in the Comahue and Patagonia regions for the period 2080–2100, The current behavior of its main rivers is analyzed.

However, one of the greatest difficulties presented by the study of Climate Change in these regions is the shortage of climatological and hydrological series long enough in the instrumental period to apply statistical tests to detect trends and jumps in the average.

The Limay River being the most representative of the first region and the Chubut of the second; and given that they have systematic measurements of incomplete and / or discontinuous flows, they are selected to extend and optimize their time series, obtaining estimated values from previous / subsequent periods from the start of their respective measurements and thus make possible the aforementioned detection, among others purposes

The reconstruction of the data of the annual z of these rivers is carried out by means of non-linear empirical statistical models. One is achieved that shows a very good statistical performance and goes back to estimate the spillage of two rivers.

A measured series of 115 years is currently available for the Limay River, while Chubut has an incomplete series. Hence, the first measurements will be used to reconstruct it. In turn, the latter is used to update the first series from 2011 to 2017.

Once the reconstruction of its series was achieved, a trend analysis and detection of Change Points was feasible in order to statistically describe the structure of the decrease in its spills that is verified until now.

Keyword: rio Limay; Chubut; decrease; changes; long term; abrupts

INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta, las proyecciones realizadas por los modelos de pronóstico de largo plazo de los grandes centros internacionales del clima, tales como El Centro Hadley de Inglaterra, NOAA y NASA de Estados Unidos, Bureau of Climatology de Australia; basados en los escenarios de emisión del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) -SRES (Special Reports on Emission Scenarios) (ML Parry, C Rosenzweig, A Iglesias, 2004) confirmados para la Argentina, coinciden en proyectar para el período 2080–2100 una importante disminución de las precipitaciones invernales en las regiones de Comahue y su entorno (Fig. N°1).

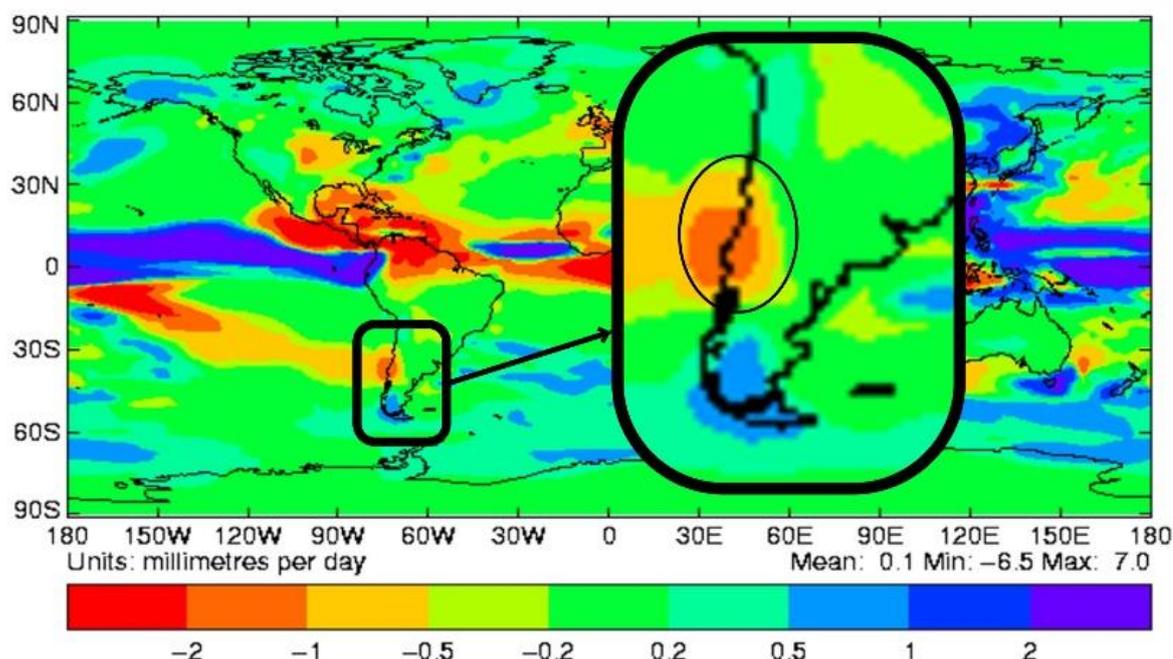
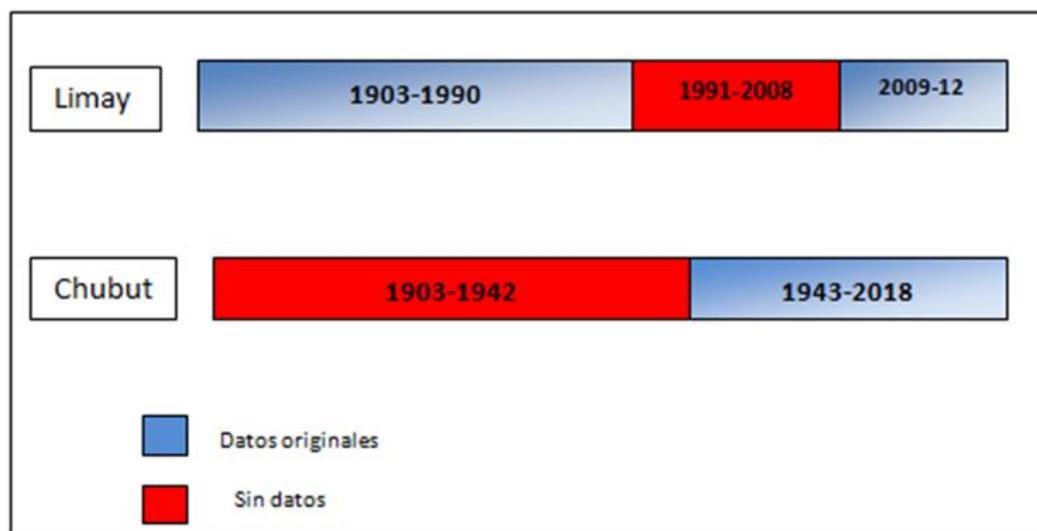


Figura N° 1: Cambio en las precipitaciones de Junio – Julio – Agosto desde los períodos de 1960-1990 hasta 2070-2100; según el modelo Hadley CM3 IS92 a. Fuente: <http://www.metoffice.gov.uk/climatechange/science/hadleycentre/>

Para verificar si esas previsiones son compatibles con lo que está ocurriendo, se investiga el comportamiento de los principales ríos de dichas regiones.

Sin embargo, una de las mayores dificultades que presenta el estudio de series extensas (long term), en el escenario del cambio climático (CC) en sendas regiones, es la escasez de datos climatológicos e hidrológicos completos y de al menos 100 años de registros, que posibilite la aplicación de test estadísticos de evaluación de tendencias y detección de cambios abruptos en sus ríos más representativos.



Cuadro N° 1. Disponibilidad de datos de los derrames anuales de los ríos Limay y Chubut.

Para hacer factible el estudio aludido, se seleccionan los ríos Limay y Chubut que como se muestra en el cuadro 1, tienen series incompletas y/o discontinuas, debido a esto, se implementan modelos estadísticos específicos para salvar dichas falencias.

Teniendo en cuenta, un análisis de permanencia del promedio (medianas consecutivas) propuesto por Fisher (1932), los ríos de dichas regiones estabilizan su descarga media anual con una serie de longitud de 55 años (o al menos de 33) en el marco de un error del 5%.

Este resultado muestra que para realizar estudios de CC, deben emplearse en las series temporales de los citados ríos, subseries de por lo menos, esa longitud (55), lo que significa que se requieren más de 110 años para hacer viable la aplicación de dichos test.

Se dispone, en la actualidad, para el río Limay de una serie medida de 115 años, por lo que supera el límite de aplicabilidad de dichos test, sin embargo, el Chubut tiene una serie incompleta, de ahí que se hace uso de las mediciones del primero para reconstruirlo.

A su vez, a éste último, se lo emplea para actualizar la serie del primero desde 2011 hasta 2017. Las mediciones sistemáticas de los caudales y derrames del río Limay se inician en el período 1903-04 a 2010-11. Como se describe en el párrafo anterior, su relleno se realizará hasta 2017-18 mediante un modelo estadístico empírico no-lineal, basado en las mediciones del río Chubut. Por otra parte, los registros de éste último que datan desde 1943-44 a 2017-18, se completan desde 1903-04 hasta 1942-43 basados en los registros del Limay.

Una vez lograda la reconstrucción de ambas series que abarque el período 1903-04 a 2017-18, se obtienen en ambos 115 datos, que resultan viables para un análisis de tendencia y detección de Cambios Abruptos (CA), con el objeto de describir estadísticamente la estructura del decrecimiento de sus derrames, hecho ampliamente conocido por la comunidad científica.

Diversos autores, han mostrado en el pasado al CC como tendencias en el largo plazo de las principales variables climáticas e hídricas, y otros como saltos o discontinuidades abruptas (Kalnicky, 1974; Yamamoto, 1987; Vargas, 1995; Minetti y Vargas, 1998, entre otros).

Es importante advertir que el grado de impacto que pudieran tener estas últimas formas de inconstancias climáticas (saltos) en la sociedad, son de un grado superlativo frente a las otras formas de cambio, que advierten a la misma gradualmente haciendo la adaptación o mitigación más viables desde el punto de vista de las decisiones políticas.

Estas elucubraciones avalan el interés y propósito de este trabajo, para contribuir a encontrar el patrón de funcionamiento a largo plazo del escurrimiento superficial de sendos ríos, fundamentales para el riego y la generación de la hidroelectricidad.

Otro objetivo de esta investigación, es mostrar a la comunidad geográfica la versatilidad y precisión de modelos estadísticos sofisticados, para ser aplicados en cualquier tipo de investigación, ya sea en el ámbito físico o humano.

DATOS Y MÉTODOS

Datos

Para realizar este estudio, se tomó como base de datos a los registros aportados por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación,

(<https://snih.hidricosargentina.gov.ar/Filtros.aspx#>), que se encuentran actualizados hasta el periodo 2017-18.



Figura N° 2. Ubicación de las cuencas de los ríos Limay y Chubut en las respectivas provincias donde se encuentran. (www.aic.gov.ar, 2010).

El río Limay es un afluente del río Negro cuya cuenca drena unos 116.000 km², cubriendo casi todo el territorio de la provincia de Neuquén (figura N° 2).

Tiene un módulo de aproximadamente 650 m³/seg con una cuenca imbrífera de unos 56.000 km², tanto su curso superior como el de su principal afluente, el río Collón Curá, tienen un régimen hidrológico de origen pluvionival atenuado por la presencia de lagos naturales ubicados en las nacientes de casi todos sus tributarios importantes.

El régimen hidrológico natural se caracteriza por tener una doble onda de crecida. La primera durante el invierno, época en que se producen las principales lluvias sobre la cuenca. Las precipitaciones níveas se acumulan hasta fines de la primavera, cuando se origina el deshielo provocando la segunda onda de crecida. Los estiajes, habituales hacia fines del verano, se extienden hasta el comienzo de las lluvias otoñales (www.aic.gov.ar, 2010).

El Río Chubut le da nombre a la provincia por ser su principal curso de agua (figura N° 2) ya que tiene una amplia cuenca (que cubre el 60% de la superficie provincial total) abarcando unos 29.400 km² desembocando en el Océano Atlántico, en Bahía Engaño. Su régimen de precipitaciones es alrededor de 800 mm en sus nacientes en el Oeste, descendiendo a unos 200 mm aproximadamente 50 km al Este, siendo prácticamente insignificante en el resto de la cuenca (<http://institutodelagua.chubut.gov.ar/es/13/cuenca-del-rio-chubut>). Su caudal medio es de 47 m³/seg. y alimenta el embalse Florentino Ameghino, que tiene una superficie de 71 km². Existen tres sectores bien diferenciados de la cuenca: el curso superior, el medio y el inferior. Luego del Dique Florentino Ameghino, el curso inferior del río se ha aprovechado con la

creación de dos canales principales de riego (el Norte y el Sur) que permiten alimentar la agricultura formando un oasis, además cuenta con una central generadora de electricidad, denominada Hidroeléctrica Ameghino S.A.

Ello ha permitido el afincamiento de población, contribuyendo a la formación de las ciudades de Rawson, Trelew, Gaiman, Dolavon y 28 de Julio. El aprovechamiento integral de la cuenca hace que además se abastezca de agua potable para la población, y para uso industrial de la planta de aluminio de la ciudad de Puerto Madryn (https://es.wikipedia.org/wiki/R%C3%ADo_Chubut).

Metodología

El derrame anual de un río puede ser considerado como una variable aleatoria continua e ilimitada, por lo cual se puede determinar su distribución estadística ajustada a una de las funciones de probabilidad teóricas.

Considerando lo anterior, la metodología básica empleada se detalla someramente a continuación:

Un modelo estadístico requiere la especificación de la forma de la relación: lineal o no-lineal. Normalmente se asume, que las relaciones estructurales son lineales, pero también se han propuesto modelos no-lineales, cuando aquellas no resultan satisfactorias (Hammond, R. y Mc Cullagh, P., 1974).

Para elaborar los modelos reconstructivos buscados, se emplean metodologías de estimación no-lineal, tales como el algoritmo de Marquardt (1963), que se detalla a continuación:

De manera similar a la regresión lineal, la meta de la no-lineal es determinar los parámetros de mejor ajuste para un modelo minimizando una función de mérito previamente escogida. La regresión no-lineal difiere de la lineal, porque el modelo tiene una dependencia no-lineal en los parámetros desconocidos, y el proceso de minimización de la función de mérito es una aproximación iterativa.

La que comienza con alguna estimación inicial e incorpora los algoritmos para mejorar dicha iteratividad de las estimaciones. Estas entonces vuelven a un punto de partida para la próxima iteración. Las que continúan procesándose hasta que la función de mérito deja de disminuir significativamente.

El modelo no-lineal que se va a ajustar, puede representarse por:

$$y = y(x; a) \quad (1)$$

Siendo y la variable dependiente, x la independiente y a un parámetro de ajuste.

La función de mérito a minimizar (χ^2) realizando la regresión no-lineal es la siguiente:

$$y = y(x; a) \quad (2)$$

Donde σ_i es el error de la medida, o desviación normal del punto de datos del i -ésimo elemento. (Levenberg, K. 1944), (Marquardt, D. 1963).

Para validar la performance del modelo construido, es decir cuando se evalúa la conformidad de las estimaciones (E_i) con las medidas (M_i) se usa la diferencia $E_i - M_i$, luego se especifican tres clases de índices:

- ✓ Cuadrado de las diferencias (es decir, distancia Euclideana).
- ✓ Las diferencias simples (distancias aritméticas).
- ✓ Las diferencias absolutas (distancia de Manhattan).

Una descripción más detallada de los mismos se puede consultar en Willmott A. (1981) o Poblete y Minetti (2006).

De los diversos índices más relevantes para evaluar la performance del modelo en este trabajo se emplea el siguiente índice:

- **d de Willmott**: Un índice más sofisticado para evaluar la performance de un modelo es el llamado Índice de acuerdo (Willmott y Wicks, 1980), cuya fórmula es:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)^2} \quad (3)$$

Dónde: E_i = Estimación del Modelo M_i = Datos medidos. \bar{M} = Media de las mediciones.

Con: $0 \leq d \leq 1$

Stöckle et al. (1998), sugieren a $d > 0,95$ para un muy buen modelo, y pobre con valores menores que $d = 0.90$.

- El coeficiente de determinación:

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{M})^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (4)$$

El índice (Loague y Green, 1991) de acuerdo (d) oscila en: $0 \leq d \leq 1$. Mientras que CD es la proporción de variación del total de las medidas explicada por las estimaciones, pero no es lo mismo que el r^2 , puesto que son posibles valores de CD mayores que 1 (Cuando $CD = 1$ el modelo es el mejor).

Contrastación estadística de la tendencia

Se realiza mediante los siguientes test:

1.- Test de Spearman.

Cuya ecuación es:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{N^3 - N} \quad r_s \approx N \left(0, \frac{1}{n-1}\right) \quad (5)$$

Dónde: d_i = $rg(x) - rg(y)$.

Es un test que no utiliza variables, sino los rangos de las mismas.

2.- Test de Kendall.

Para la evaluación de tendencia se ha utilizado el test no paramétrico de Mann- Kendall. Este test ha sido ampliamente aplicado en estudios de identificación de tendencias en series hidrometeorológicas y otras series ambientales.

Su desarrollo se resume como:

Para cada elemento x_i el número de n_i elementos x_j que lo preceden ($i > j$) es calculado

$$t = \sum_i n_i \quad (6a)$$

El estadístico se calcula:

La función de distribución de t se asume asintótica a la distribución gaussiana, con:

$$E(r_s) = \mu = \frac{n(n-1)}{4}; \quad \text{var}(t) = \sigma^2 = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (6b)$$

En un test de dos colas la H_0 es rechazada para altos valores de $|u(t)|$, con:

$$u(t) = [t - E(t)] / \sqrt{\text{var}(t)} \quad (6c)$$

Este test no paramétrico es conveniente para identificar el intervalo en el cual la tendencia es más pronunciada. (Wasserman, L. 2006).

- **Prueba de Pettitt.**

No paramétrica, desarrollada por Pettitt (1979). Es útil para evaluar la aparición de cambios abruptos en los registros climáticos (Sneyers 1990; Tarhule y Woo 1998; Smadi y Zghoul 2006). Una de las razones para usarla es que es más sensible a las rupturas en la mitad de la serie temporal (Wijngaard et al. 2003). Las estadísticas utilizadas para la prueba de Pettitt han sido explicadas por Kang y Yusof (2012); Dhorde y Zarenistanak (2013) y otros.

Se obtiene de la siguiente manera:

El primer paso es calcular el estadístico U_k utilizando la siguiente fórmula:

$$U_k = 2 \sum_{i=0}^n m_i - k(n+1) \quad (7)$$

Donde m_i es el rango de la observación i cuando los valores x_1, x_2, \dots, x_n , en la serie están organizados en orden ascendente y k toma valores de $1, 2, \dots, n$.

El siguiente paso es definir la prueba del punto de cambio estadístico (SCP) de la siguiente manera:

$$K = \max_{1 \leq k \leq n} |U_k| \quad (8)$$

Cuando U_k alcanza el valor máximo de k en una serie, entonces se detecta un punto de cambio en la misma.

El valor crítico se obtiene mediante:

$$K_\alpha = \left[-\ln \alpha (n^3 + n^2) / 6 \right]^{1/2} \quad (9)$$

Donde n es el número de observaciones y α es el nivel de significación estadística que determina el valor crítico.

- **Criterio de información de Akaike (AIC).**

Para elegir un modelo estadístico entre varios construidos, se aplica el criterio de información de Akaike (AIC) que compara la calidad de los mismos. El AIC los evaluará y clasificará de “mejor a peor”, no tendrá en cuenta la calidad absoluta, determinada por los test estadísticos corrientes.

El criterio de información de Akaike (AIC) se define como:

$$AIC = -2 (\text{probabilidad de registro}) + 2K \quad (10)$$

Dónde K es el número de parámetros del modelo (el número de variables en el modelo más la intersección).

La probabilidad de registro es una medida del ajuste del modelo.

Cuanto mayor sea el número de parámetro, mejor será el ajuste. Esto generalmente se obtiene de la evaluación estadística, mediante el método de Máxima Verosimilitud (Akaike, 1974).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se considera conveniente aclarar que, previo a la elaboración los modelos para extender las series de ambos ríos, se realiza el siguiente análisis exploratorio sobre la estructura estadística de las variables involucradas.

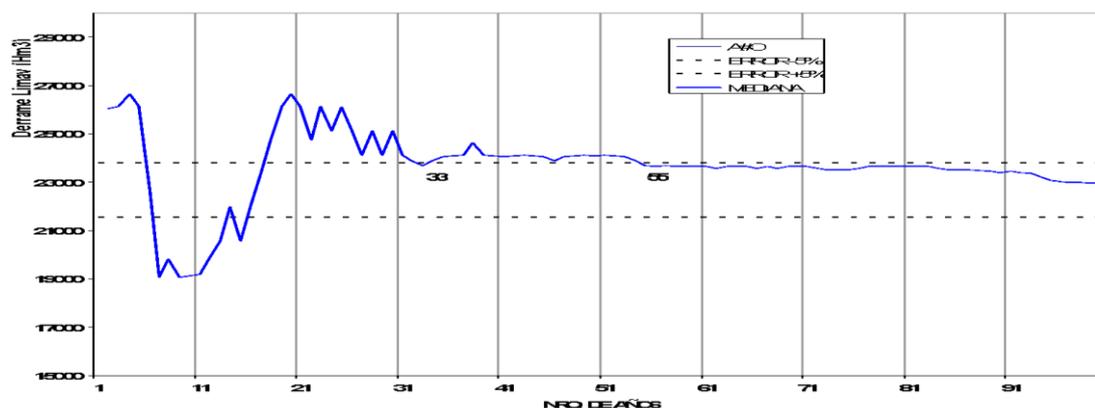


Figura N° 3. Análisis de permanencia del promedio (medianas consecutivas –MEDIANA-) para los derrames anuales del río Limay puesto que tiene los registros medidos más extensos, donde la variable ERROR +/-5% son los límites de error y año. (Fisher, 1932).

La figura N° 3, muestra los años requeridos para estabilizar el promedio, es decir, los que se necesitan para considerar que el mismo es representativo en los análisis de tendencia y cambios abruptos. Se observa que se requieren 55 años para lograrlo o al menos 33.

Río	Estadísticos descriptivos									
	N° de datos	Media	Mediana	Mínima	Máxima	1° cuartil	3° cuartil	Percentil del 10%	Percentil del 90%	Desviación estándar
LIMAY	115	22.803,87	23.205,2	11.628,06	39.525,83	18.450,76	27.067,58	15.022,71	29.800,68	5.770,412
CHUBUT	115	1.558,59	1.568,13	540,69	3.039,62	1.170,13	1.920,25	870,97	29.800,68	526,687

Cuadro N° 2. Estadísticos de los ríos en estudio.

Los estadísticos descriptivos de ambos ríos se muestran en el cuadro N° 2. Se observa que, el río Limay, tiene un derrame medio ($22.803,9 \text{ Hm}^3$) considerablemente superior al de Chubut ($1.558,59 \text{ Hm}^3$). En ambos casos sus medidas de tendencia central son semejantes de lo que se infiere, que su distribución es normal, como se confirma en las figuras 4 y 5.

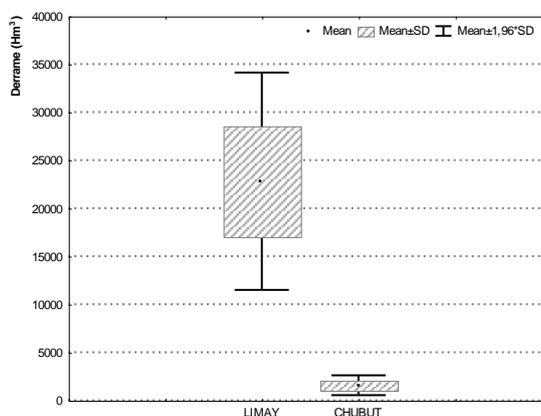


Figura N° 4: Estructura estadística de los ríos en estudio, representada con el grafo caja-bigote.

En la figura N°4, se observa la estructura estadística de ambos ríos representada por un grafo caja-bigote. En los mismos se aprecia una simetría respecto de la media que confirma su normalidad. Para construir los modelos específicos que permitan la reconstrucción aludida primero se analiza la asociación lineal entre ambos.

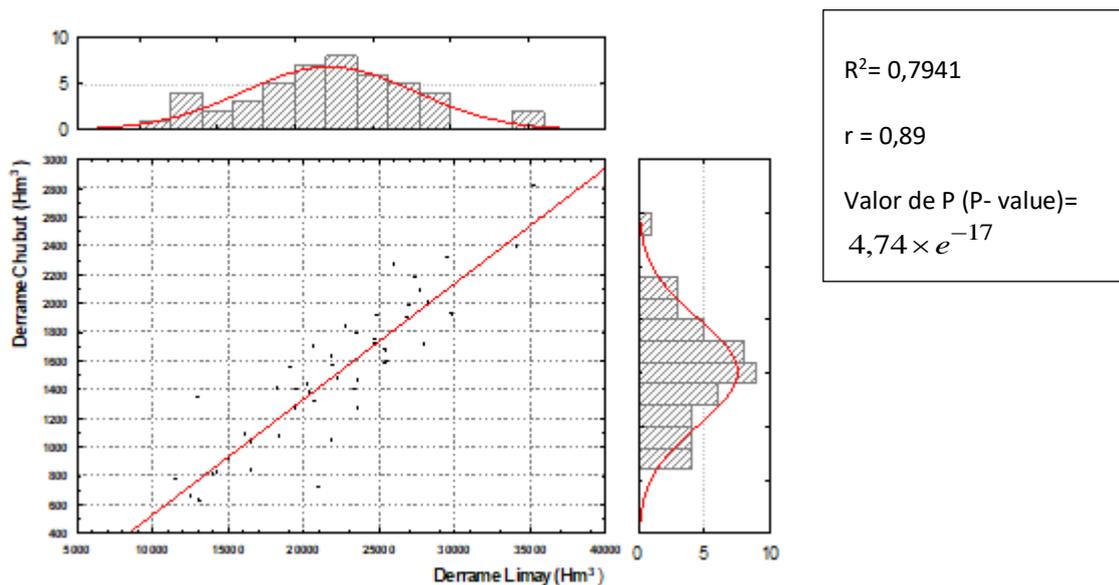


Figura N° 5: Correlación lineal entre los derrames del río Limay y Chubut.

En la figura N° 5 se observa una significativa regresión lineal (valor de $p = 4,74 \times e^{-17}$) entre ambos ríos, con un coeficiente de determinación ($R^2 = 0,7941$) y de correlación ($r = 0,89$) muy significativos.

Dada la muy satisfactoria correlación, se decide elaborar modelos más sofisticados para extender/completar las series de ambos ríos que abarquen el período 1903-04 al 2017-18. Teniendo en cuenta lo anterior los pasos metodológicos a implementar son:

- 1.- Encontrar un modelo que complete los derrames de sendos ríos.
- 2.- Validarlo con los test objetivos descriptos en datos y métodos.
- 3.- Analizar la estructura estadística (detección de tendencias y cambios abruptos) de las series obtenidas.

ELABORACIÓN DE LOS MODELOS.

De acuerdo a lo obtenido del análisis estadístico, se aplican modelos no lineales con el objeto de optimizar la reconstrucción. Para su elaboración se implementa el algoritmo de Marquardt (Eq. 2) y para su selección el criterio de Akaike.

- ***Relleno de los Derrames Anuales del Río Limay.***

Para la reconstrucción de sus derrames, se implementaron los siguientes modelos no lineales, en función de los del Chubut:

RANKING	MODELO	ECUACIÓN	AKAIKE
1	Hill	$Limay = \frac{9142,8 + (2,1125 - 9142,8)}{1 + \left(\frac{13124}{Chubut}\right)^{1,2397}}$	2,8701
2	Gompert z	$Limay = \left[(71992 \times e)^{(-2,11 \times e)^{(-0,00038344 \times Chubut)}} \right]$	2,8705

3	Logistic	$Limay = \frac{50726}{1 + (4,4419 \times e)^{(0,00081399 \times Chubut)}}$	2,8732
4	Gaussian	$Limay = \left[42777 \times e^{-\frac{(Chubut - 4400,6)^2}{(2 \times 2311,2)^2}} \right]$	2,8733
5	Von Bertalanffy	$Limay = 5,124 \left(1 - 0,98621 \times e^{-2,0122 \times Chubut} \right)$	2,8761
6	Michaelis	$Limay = \frac{68058 \times Chubut}{3025 + Chubut}$	3,1473

Cuadro N° 3: Ranking de modelos aplicando el criterio de Akaike.

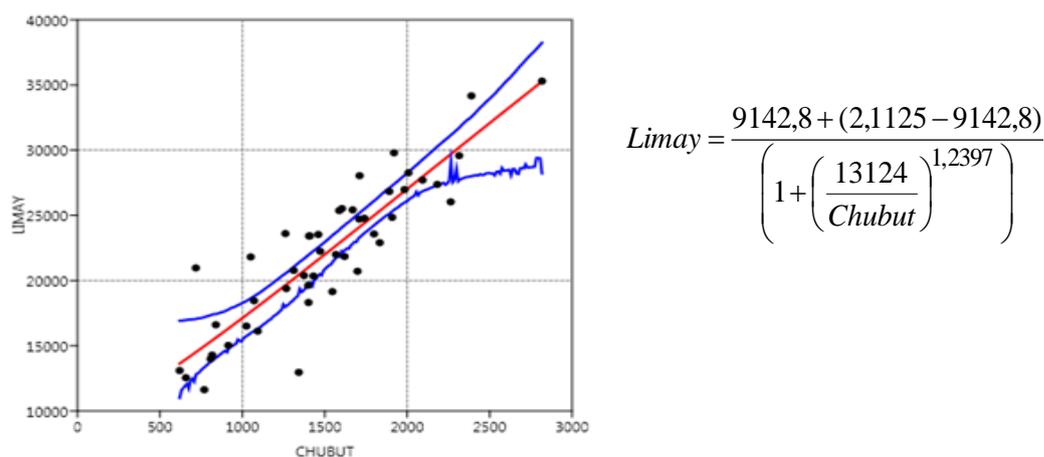


Figura N° 6: Grafo del modelo de Hill seleccionado según Akaike, con la línea de regresión (rojo) y sus intervalos de confianza del 95% (azul).

Como se muestra en el cuadro N° 3, el modelo de Hill, es el que tiene el menor valor de AIC, por lo tanto se lo elige para la estimación.

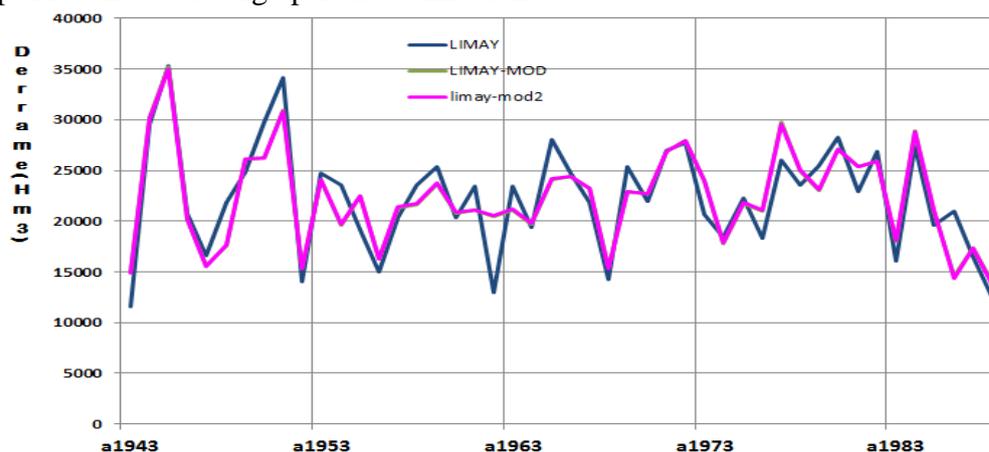


Figura N° 7: Contrastación de los valores reales (azul) del Río Limay con los estimados (fucsia) por el modelo de Hill.

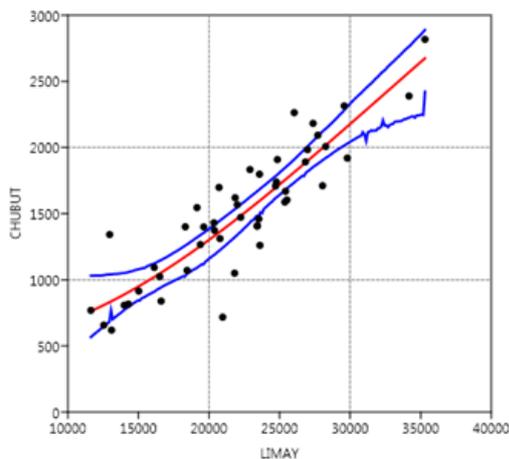
La verificación gráfica de la performance del modelo se realiza mediante la figura N°7, en la que se observa un ajuste óptimo, salvo en dos puntos (1961 y 1985).

● **Reconstrucción de los Derrames Anuales del Río Chubut.**

Para la reconstrucción de sus derrames, se implementaron los siguientes modelos no lineales, en función de los del Limay:

RANKING	MODELO	ECUACIÓN	AKAIKE
1	Hill	$Chubut = \frac{494,67 + (7565,9 - 494,67)}{\left(1 + \left(\frac{51119}{Limay}\right)^{2,1833}\right)}$	2,2769
2	Logistic	$Chubut = \frac{44496,5}{1 + (13,051 \times e)^{(8,3596 \times Limay)}}$	2,2775
3	Gaussian	$Chubut = \left[3927,8 \times e^{-\frac{(Limay - 57278)^2}{(2 \times 25109)^2}} \right]$	2,2778
4	Gompertz	$Chubut = \left[(9047,4 \times e)^{(-3,5548 \times e)^{(-3,0432 \times Limay)}} \right]$	2,2785
5	Michaelis	$Chubut = \frac{-7442,8 \times Limay}{-1,3317 + Limay}$	2,286
6	Linear	$Chubut = 2,3469 \times Limay + (-2276,35)$	2,3469
7	Von Bertalanffy	$Chubut = 1,013 \left(1 - 1,0029 \times e^{-8,0626 \times Limay} \right)$	2,3514

Cuadro N° 4. Ranking de modelos aplicando el criterio de Akaike.



$$Chubut = \frac{494,67 + (7565,9 - 494,67)}{\left(1 + \left(\frac{51119}{Limay}\right)^{2,1833}\right)}$$

Figura N° 8: Grafo del modelo de Hill seleccionado según Akaike, con la línea de regresión (rojo) y sus intervalos de confianza del 95% (azul).

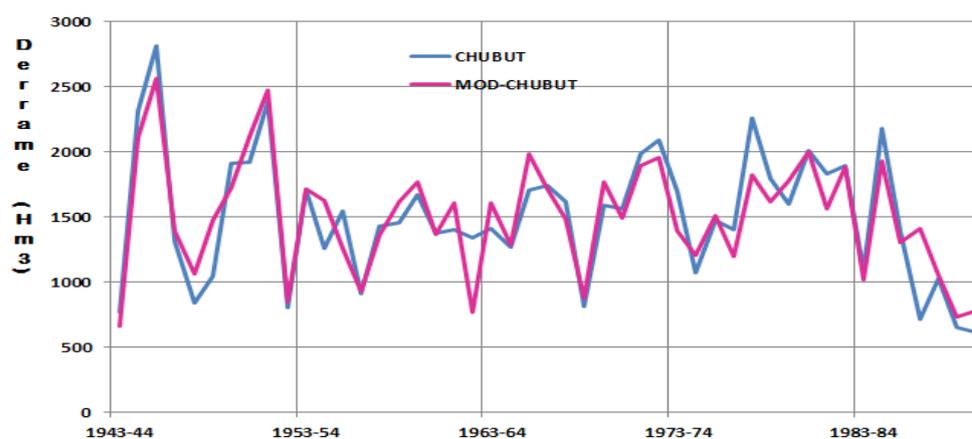


Figura N° 9: Contrastación de los valores reales (azul) del Río Chubut con los estimados (fucsia) por el modelo de Hill.

La verificación gráfica del ajuste del modelo se visualiza en la figura N° 9, en la que se aprecia un ajuste óptimo, salvo en dos puntos (1962 y 1985), coincidentes con los encontrados en la figura N° 7, de lo que se colige, que dichos datos presentan un error sistemático o del operador que los registró.

ANÁLISIS DE TENDENCIA Y DE PUNTOS DE CAMBIOS ABRUPTOS DEL RÉGIMEN EN LA SERIE RECONSTRUIDA.

Análisis de tendencia del río Limay.

Con la serie obtenida que se adapta a los requerimientos de análisis de Cambio Climático según el criterio de Fisher, se decide realizarle un análisis objetivo de tendencia.

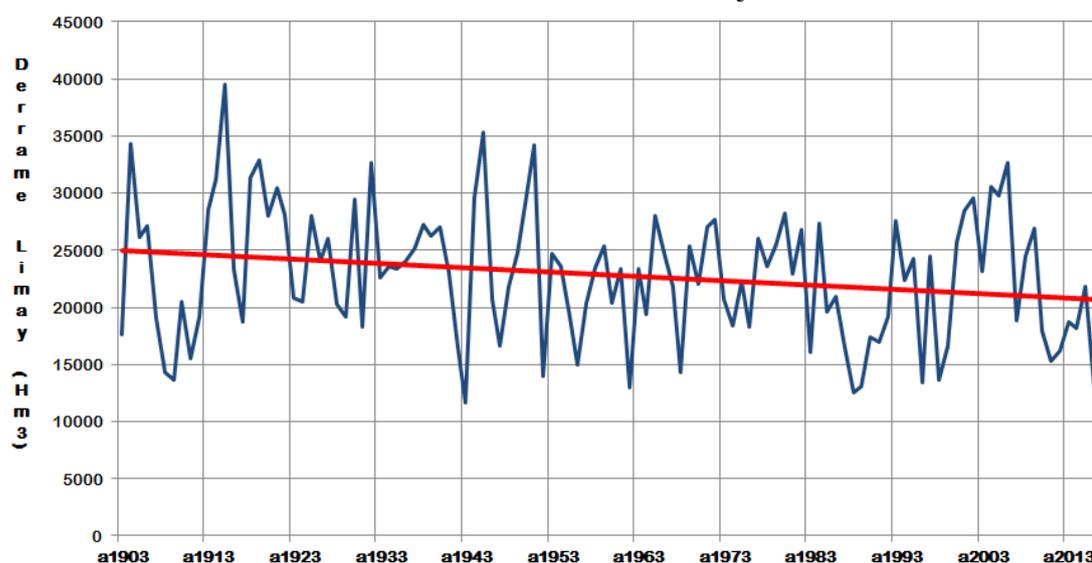


Figura N° 10: Serie temporal (azul) reconstruida del derrame anual del río Limay en el período 1903-04 a 2017-18 con su tendencia (rojo).

La figura N° 10 muestra que el río Limay tiene una tendencia lineal decreciente estadísticamente significativa al 5% ($r_s = -0,2037$, $T = -0,1347$).

Detección de cambios abruptos.

Habiendo demostrado que el río Limay decrece significativamente, se analiza y detecta en su serie temporal la existencia de cambios abruptos (“climatic jump”, “change point” o “shift point”) aplicando la metodología de Pettit, para explicitar la estructura de esa disminución y como un aporte al entendimiento de un posible cambio de régimen climático en la región del Comahue para identificar la coherencia con las previsiones a largo plazo de los modelos citados anteriormente (fig. 1).

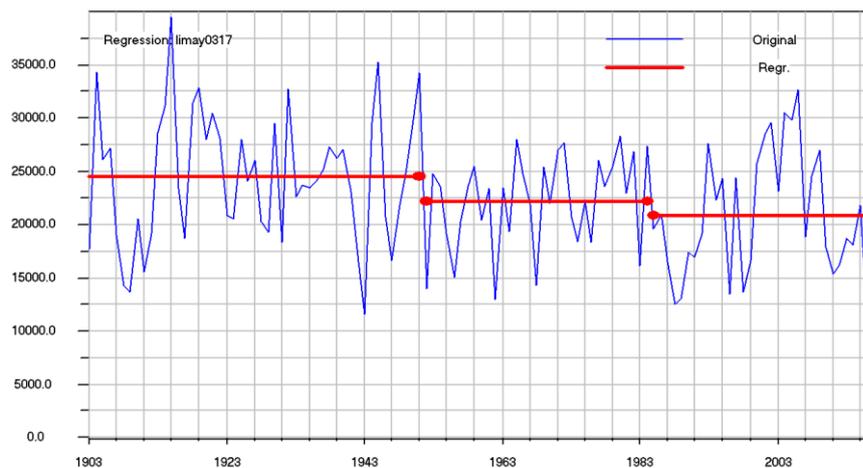


Figura N° 11. Detección de cambios abruptos en el derrame anual del río Limay aplicando el método de Pettit.

La figura N° 11, muestra los cambios abruptos detectados en el derrame anual del río Limay. Se verifica que, existen dos, que dividen la serie en tres períodos:

- 1).- 1903-1951: con una media de 24.541,53 Hm³.
- 2).- 1952-1984: con una media de 22.205,83 Hm³ lo que significa una disminución de 2.335,7 Hm³.
- 3).- 1985-2017: con una media de 20.821,74 Hm³ lo que significa una disminución de 1.384,09 Hm³.

Es decir, que la media del primer período disminuyó 3.719,79 Hm³ en el período actual (16,31% de la media total).

Análisis de tendencia del río Chubut.

De la misma manera que lo implementado para el río Limay, se realiza un análisis objetivo de tendencia a la serie temporal del derrame del río Chubut.

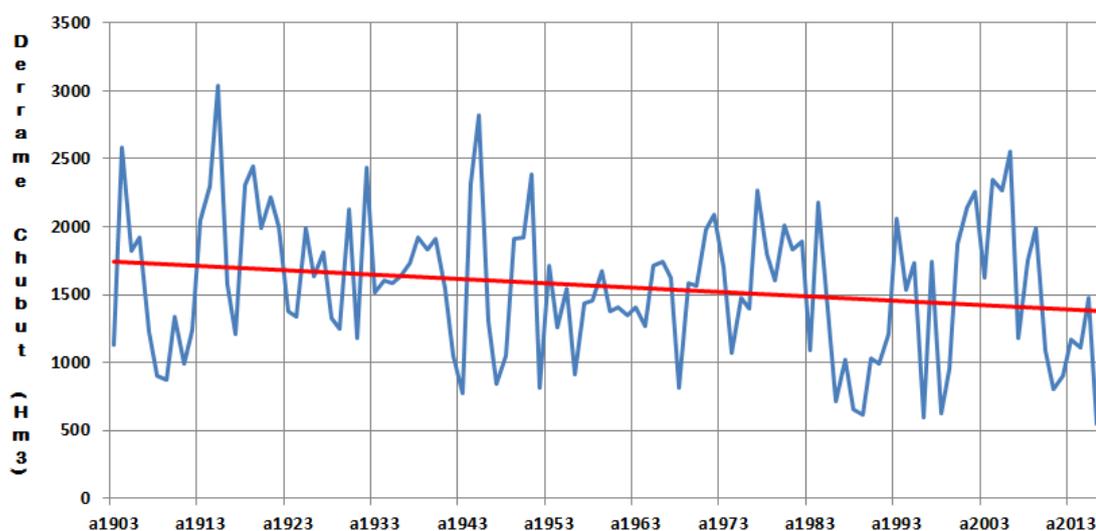


Figura N° 12. Serie temporal (azul) reconstruida del derrame anual del río Chubut en el período 1903-04 a 2017-18 con su tendencia (rojo).

En la fig. N° 12 se visualiza que el río Chubut tiene una tendencia lineal decreciente estadísticamente significativa al 5% ($r_s = -0,1829$, $T = -0,1170$).

Detección de cambios abruptos.

Como también el río Chubut decrece significativamente, se aplica el método de Pettit, para identificar la existencia de cambios abruptos y así explicitar la estructura de esa disminución y como un aporte al entendimiento de un posible cambio de régimen climático en la región de la Patagonia para verificar la coherencia con las previsiones a largo plazo de los modelos descriptos. fig. 1).

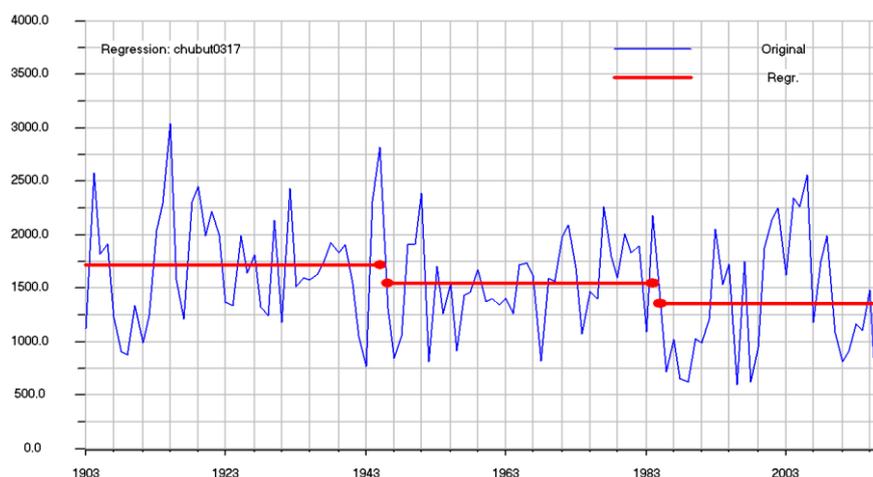


Figura N° 13. Detección de cambios abruptos en el derrame anual del río Chubut aplicando el método de Pettit.

La figura N° 13, muestra los cambios abruptos detectados en el derrame anual del río Limay. Se verifica que, existen dos, que dividen la serie en tres períodos:

- 1).- 1903-1945: con una media de $1.717,36 \text{ Hm}^3$.
- 2).- 1946-1984: con una media de $1.550,14 \text{ Hm}^3$, lo que significa una disminución de $167,22 \text{ Hm}^3$.

3).- 1985-2017: con una media de 1.361,68 Hm³, lo que significa una disminución de 188,46 Hm³.

Es decir, que la media del primer período disminuyó 355,68 Hm³, en el período actual (22,8% de la media total).

CONCLUSIONES

Se reconstruyeron/rellenaron los ríos Limay y Chubut mediante técnicas de análisis estadístico, en ambos casos las series obtenidas se inician en 1903-04 y finalizan en 2017-18.

En ambos ríos se probaron varios modelos y el criterio de Akaike seleccionó el de Hill.

Se verificó que ambos ríos tienen una tendencia lineal decreciente estadísticamente significativa al 5%. Aplicando la metodología de Pettit para la detección de cambios abruptos se identifican los siguientes periodos:

-Para el Limay:

1).- 1903-1951: con una en la media de 24.541,53 Hm³.

2).- 1952-1984: con una media de 22.205,83 Hm³, lo que significa una disminución de 2.335,7 Hm³.

3).- 1985-2017: con una media de 20.821,74 Hm³, lo que significa una disminución de 1.384,09 Hm³.

Es decir, que la media del primer período disminuyó 3.719,79 Hm³, en el período actual (16,31% de la media total).

-Para el río Chubut:

1).- 1903-1945: con una en la media de 1.717,36 Hm³.

2).- 1946-1984: con una media de 1.550,14 Hm³, lo que significa una disminución de 167,22 Hm³.

3).- 1985-2017: con una media de 1.361,68 Hm³, lo que significa una disminución de 188,46 Hm³.

Es decir, que la media del primer período disminuyó 355,68 Hm³ en el período actual (22,8% de la media total).

De acuerdo a estos resultados, se deduce que el estado actual de los principales ríos de Comahue y Patagonia, es compatible con las previsiones de los modelos de pronóstico de largo plazo, de los grandes centros internacionales del clima y el IPCC, que pronostican una disminución significativa en las precipitaciones andinas de ambas regiones para para el período 2080–2100.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Nacional de San Juan, por los aportes económicos realizados a través del proyecto: “Análisis estadístico-dinámico de los eventos extremos térmicos, hídricos, eólicos y extemporáneos de la región de cuyo en el escenario del cambio climático global”.

BIBLIOGRAFÍA

- AUTORIDAD INTERJURISDICCIONAL DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS LIMAY, NEUQUÉN Y NEGRO. Sitio web: <http://www.aic.gob.ar/sitio/home>
- DRAPER N.R. AND SMITH H. (1966): "Applied Regression Analysis". Wiley.. New York.
- FISHER, R.A., (1932): Statistical Methods for Research Workers. Oliver & Boyd. Edimburg.
- GREENWOOD, D.J., J.J. NEETESON, AND A. DRAYCOTT. (1985). Response of potatoes to N fertilizer: dynamic model. Plant Soil, 85:185-203. <https://doi.org/10.1007/BF02139623>
- HAMMOND, R.; Mc Cullagh, P. (1974): "Técnicas Cuantitativas en Geografía". Editorial Saltes. Madrid.
- KALNICKY,R., (1974): Climate Change Since 1950. Ann. Ass. Am. Geo. Vol. 64, N° 1. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1974.tb00957.x>
- LEVENBERG, K. (1944). "A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares". The Quarterly of Applied Mathematics 2: 164-168. <https://doi.org/10.1090/qam/10666>
- LOAGUE, K., AND R.E. GREEN. (1991). Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. J. Contam. Hydrol., 7:51-73. [https://doi.org/10.1016/0169-7722\(91\)90038-3](https://doi.org/10.1016/0169-7722(91)90038-3)
- MARQUARDT, D. (1963). "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters". <https://doi.org/10.1137/0111030>
- MINETTI,J.L. AND W.M.VARGAS, (1998): Trends and jumps in the annual precipitation in South America, south of the 15°S. Atmósfera 11, 205-222.
- ML PARRY, C ROSENZWEIG, A IGLESIAS, (2004): Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2003.10.008>
- POBLETE, A. G., MINETTI, J. L. (2006). "Propuesta de modelos empíricos predictivos del derrame anual de río San Juan". Revista de Geografía, Vol.:10 año 6, ISSN 1544-1942. pg.: 11-20.-
- SIAM Journal on Applied Mathematics 11: 431-441. Paul Davis (1993). Métodos de Levenberg-Marquart y estimación no lineal archivados el 25 de enero de 2009 en Wayback Machine , SIAM News, vol. 26, número 6, octubre de 1993.
- SMILLIE K.W.: (1966). An Introduction of Regression and Correlation. Imp.Acad.Inc.Ltd.. Londres.
- TAYLOR, W, (2000). Change-Point Analysis: A Powerful New Tool For Detecting Changes. Libertyville, Illinois USA.
- VARGAS,W.M., J.L.MINETTI AND A.G.POBLETE, (1995): Statistical study of climate jumps in the regional zonal circulation over South America. J.Met.Soc. of Japan 73, 849-856. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.73.5_849
- WASSERMAN, L. (1998) alof Nonparametric Statistic (2006) Ed: Springer. Pisstsburgh- USA
- WILLMOTT, C.J. (1981). On the validation of models. Phys. Geogr., 2:184-194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>
- WILLMOTT, C.J., AND D.E. WICKS. (1980). An empirical method for the spatial

interpolation of monthly precipitation within California. *Phys. Geogr.*, 1:59-73.
<https://doi.org/10.1080/02723646.1980.10642189>

YAMAMOTO, R.T., (1987): Climatic Jumps. Evidence and Possibility. Workshop on Climate Change and Water Resources. Beijing. China.

