

"ANÁLISIS DE MODELOS PARA PRONOSTICAR EL ESCURRIMIENTO DEL RÍO SAN JUAN"

"ANALYSIS OF MODELS TO FORECAST THE RUNOFF OF THE SAN JUAN RIVER"

Vega Juan Pablo

Universidad Nacional de San Juan, Facultad de Filosofía Humanidades y Artes. Instituto de Geografía Aplicada. Proyecto de Climatología de la Provincia de San Juan.
<https://orcid.org/0009-0004-0695-1453>.
Juanpablovega456@gmail.com

Aguiar Gómez Laura Alicia

Universidad Nacional de San Juan, Facultad de Filosofía Humanidades y Artes. Instituto de Geografía Aplicada. Proyecto de Climatología de la Provincia de San Juan.
<https://orcid.org/0009-0005-4820-4314>.
aguiarlauri@gmail.com

[FECHA ENTREGA. 01/07/2025 - FECHA APROBADO 17/09/2025]

1. RESUMEN

El presente trabajo, se encuadra en la necesidad de obtener modelos que pronostiquen el derrame del río San Juan en la provincia homónima, para optimizar la gestión del agua. Los datos utilizados corresponden al Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y al Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET. Las metodologías empleadas son, correlación y regresión, error típico de la estima para evaluar la curva de mejor ajuste y para la significancia del modelo, los estadísticos "t" y "p-value".

Se detecta que, la tendencia del derrame de dicho río es decreciente, medido en hectómetros cúbico/año, a su vez, se ensayan distintos periodos temporales y funciones matemáticas. Por último, se concluyó que, el modelo de mejor ajuste para estimar el derrame de dicho río, es el polinómico, el cual arroja para el ciclo 2024-2025 un derrame de 1623,9Hm³.

Palabras clave: Derrame – río San Juan – Curvas de ajuste – Pronóstico

2. ABSTRACT

This study addresses the need to develop models for forecasting the runoff of the San Juan River in the eponymous province, aiming to optimize water management. The data used were sourced from the Hydraulics Department of the Province of San Juan and the Snow Observatory in the Andes of Argentina and Chile, under CONICET. The methodologies applied include correlation and regression analyses, the standard error of the estimate to evaluate the best-fitting curve, and the use of statistical tests such as "t" and "p-value"

for assessing model significance. The results indicate a decreasing trend in the river's runoff, measured in cubic hectometers per year. Various time periods and mathematical functions were tested. Ultimately, it was concluded that the polynomial model provides the best fit for estimating the river's runoff, predicting a runoff of 1623.9 Hm³ for the 2024–2025 cycle.

Key words: Runoff – San Juan River – Fitting curves – Forecasting

3. INTRODUCCIÓN

En una cuenca hidrográfica, el ciclo hidrológico está determinado por los procesos de recarga y escurrimiento de la misma. En el caso del río San Juan, su régimen es nival y su derrame está determinado por la fusión de nieve acumulada en la temporada invernal, en

alta montaña, mientras que su caudal alcanza el máximo, en la estival.

Se entiende por caudal, a los metros cúbicos por segundo que atraviesan un determinado punto en el cauce de un río. Mientras que, el derrame se mide en

hectómetros cúbicos acumulados en un periodo de referencia, ya sea mensual o anual.

El 97% de la población de la Provincia de San Juan, depende solamente del río homónimo y reside fundamentalmente en el Valle de Tulum y también, en los valles de Ullum-Zonda y Calingasta (Figura 1). El escurrimiento del río San Juan, tiene su recarga en el aporte nival en el área andina de la cuenca, pero luego, cuando fluye por dichos valles, el ambiente es desértico dominado por elevadas temperaturas que se corresponden con un verano térmico muy largo de noviembre a marzo (Poblete, Ruiz, 2006). Poder generar pronósticos fiables

del comportamiento de su derrame anual, permitiría realizar un mejor uso del recurso hídrico, por lo tanto, resultan de vital importancia.

Dado que no se ha hallado, en la bibliografía disponible, métodos de pronósticos para el escurrimiento del río San Juan, es que surge como objetivo del presente trabajo, diseñar modelos que pronostiquen el derrame anual de dicho río; para ello se ensayan diversas alternativas y se evalúa la certeza del ajuste de cada uno. Se tiene como premisa, que el pronóstico del derrame debe estar disponible antes de iniciar el verano térmico, esto es al 1 de noviembre de cada año.

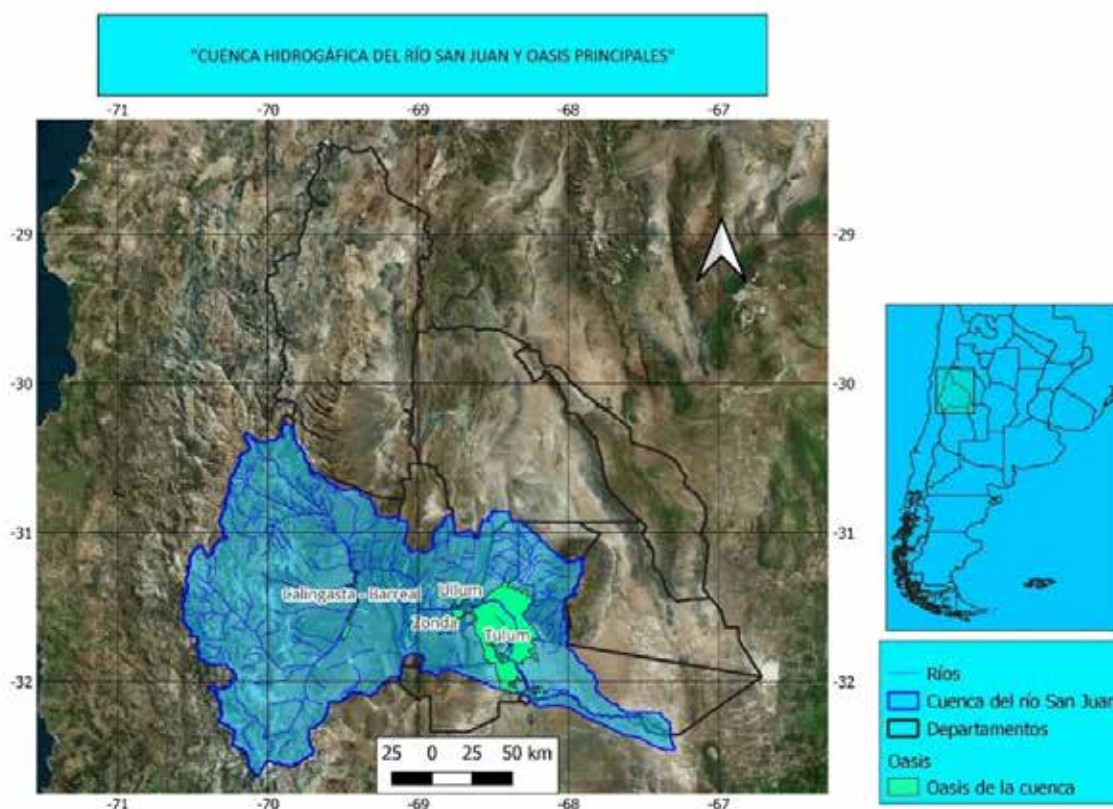


Figura 1: Cuenca del río San Juan y valles regados

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Atlas socioeconómico de la provincia de San Juan y Mapa base: "Map. data ©2015 Google"

4. DATOS Y MÉTODOS

Los datos utilizados, corresponden al caudal del río San Juan, medido en el Km 101 de la Ruta Provincial 149 y a los valores de cobertura de nieve en alta montaña de su cuenca, obtenidos, del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y del Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET que trabaja con imágenes MODIS respectivamente.

Para definir los modelos, se aplican metodologías de correlación y regresión, con las que se evalúa, si las variables se acompañan o no estadísticamente.

La regresión lineal, es el modelo más sencillo ensayado y su forma es:

$$y = ax + b \quad (1)$$

con "x" cobertura nival para el periodo de análisis, mientras que "y", es el derrame estimado.

También se ensayaron: la regresión polinómica, cuya forma general es:

$$y = \sum a_i x^i \quad (2)$$

Para distintos grados (i=2; 3; 4 y 5). Y la función exponencial, cuya fórmula es:

$$y = a \cdot e^{bx} \quad (3)$$

Siendo “e” la base de los logaritmos naturales. En todos los casos “x” e “y” asumen las mismas variables que en la regresión lineal.

Luego se evaluó cuál de los modelos anteriores presenta el mejor ajuste, que es el que deberá, minimizar el

error entre los datos reales y los datos estimados; para ello se calcula el error típico de la estima (ETE), que mide la dispersión de los datos respecto de la función de regresión (Spiegel, Murray S., 1977).

$$(ETE)^2 = S^2_{y/x} = \frac{\sum (e)^2}{N-2} = \frac{\sum (y_i - y_e)^2}{N-2} \quad (4)$$

Donde:

y_i = derrame medido

y_e =derrame estimado

N=número de periodos

Para evaluar la correlación de las variables, se utilizó el método de Correlación de Pearson (Spiegel, Murray

S., 1977) cuya fórmula es:

$$\rho = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (5)$$

Donde:

X_i = cobertura de nieve para el periodo de análisis.

Y_i =derrame aforado

μ =promedios de las respectivas variables.

σ = Desviación estándar de las respectivas variables.

Al elevar al cuadrado el resultado de la formula anterior, se obtiene el coeficiente de determinación (R^2), que expresa el porcentaje de variación de la variable de-

pendiente a partir de la independiente, donde VE es la varianza explicada y VT la varianza total (Spiegel, Murray S., 1977).

$$R = r^2 = \frac{VE}{VT} \quad (6)$$

Para determinar la significancia del modelo, es decir, la importancia de la variable independiente construida, se utiliza el “Estadístico t”, donde “r” es el coeficiente

de correlación y se espera que “t” sea grande en términos absoluto, es decir, muy positivo o muy negativo, en general mayor a 2 (Spiegel, Murray S., 1977).

$$t = r_s \sqrt{\frac{N-2}{1-r_s^2}} \quad (7)$$

Por otro lado, el cálculo del “valor-p”, que es la probabilidad de que el coeficiente sea igual a cero, indicaría que la tendencia es significativa. En general, se

pretende que sea lo más pequeño posible, específicamente menor a 0,05.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El escurrimiento de cada año del río San Juan, tiene su recarga con el aporte nival en el área andina de la cuenca. El mismo, se expresa en Hm^3 y se calcula por la suma de los derrames mensuales, desde octubre de un año a septiembre del año siguiente, en el periodo

de 2000-2024 (figura 2). Este presenta una tendencia decreciente, dada por el estadístico $t = -4,26$ y $p\text{-value} = 0,00032055$, los que serán significativos si $t \leq -2$ y $p\text{-value} < 0,05$, respectivamente (Tabla 1).

Estadístico t	Probabilidad
-4,26	0,00032055

Tabla 1: Significancia de la pendiente

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan.

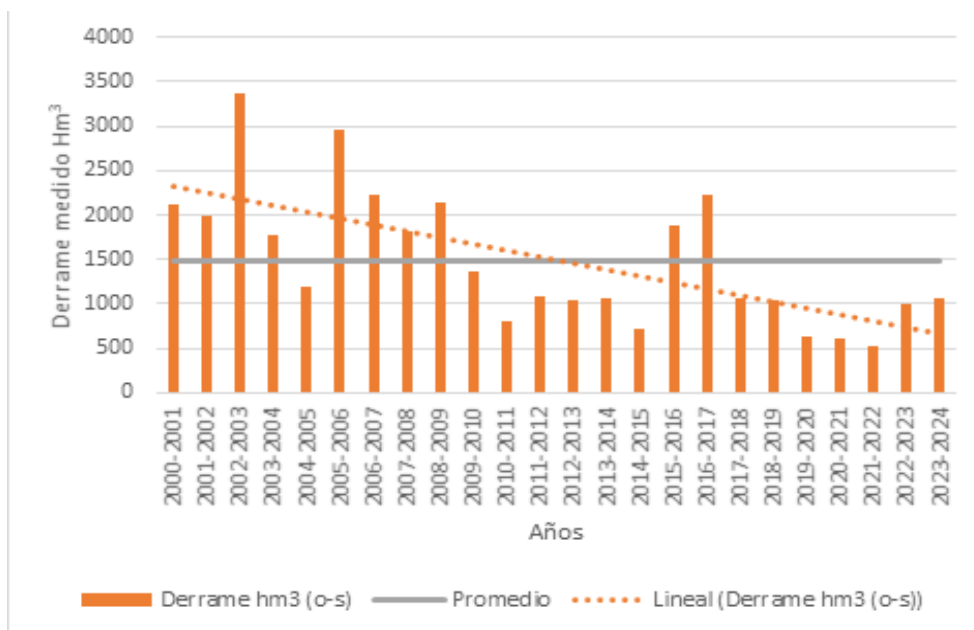


Figura 2: Derrame anual del río San Juan en el periodo 2000-2024.

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan.

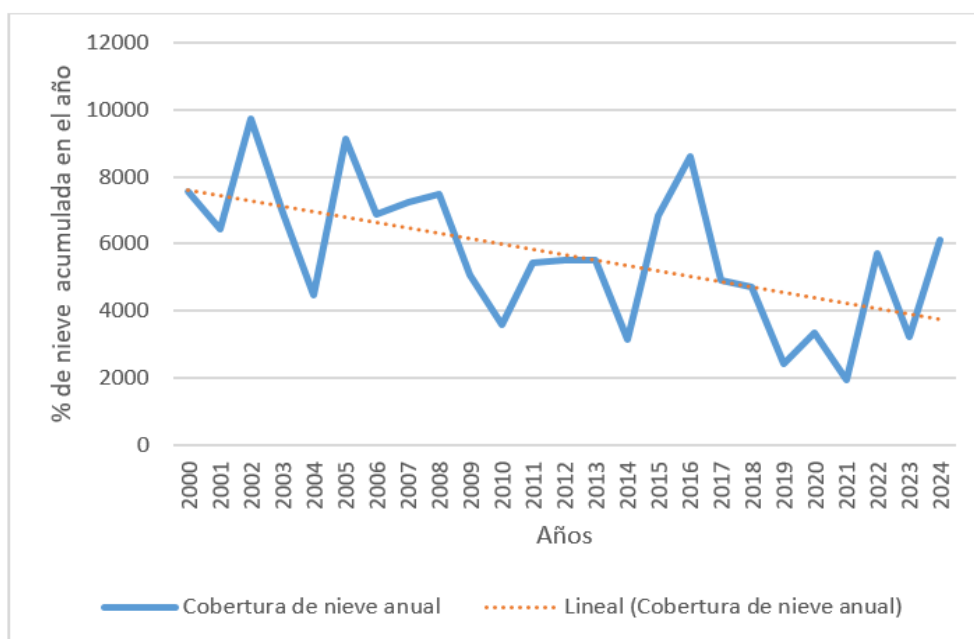


Figura 3: Porcentaje de cobertura de nieve anual, para el periodo 2000-2024 (noviembre).

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

Estadístico t	Probabilidad
-3,36	0,00268909

Tabla 2: Significancia de la pendiente.

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET

En la figura 3 y tabla 2 se observa que la cobertura de nieve tiene una tendencia decreciente significativa. Por lo tanto, el aporte nival para la recarga del río se ha

visto disminuido en el periodo analizado.

Dada las tendencias anteriores, cabe evaluar, qué meses del periodo nival, conviene considerar como los

más adecuados para pronosticar el derrame que tendrá el río San Juan, desde octubre a septiembre, que es el periodo utilizado por el Dpto. de Hidráulica de San Juan. Para la selección de dicho modelo, se ensayan distintas alternativas en la construcción de la variable independiente, es decir, se consideran diferentes cantidades de

meses en la cobertura nival. Los periodos considerados son: bimestre junio a julio, trimestre mayo a julio, cuatrimestre mayo a agosto y semestre mayo a octubre, de cada año. En todos los casos, se evalúa cómo es la correlación con el derrame. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

Análisis del modelo bimestral (junio a julio):

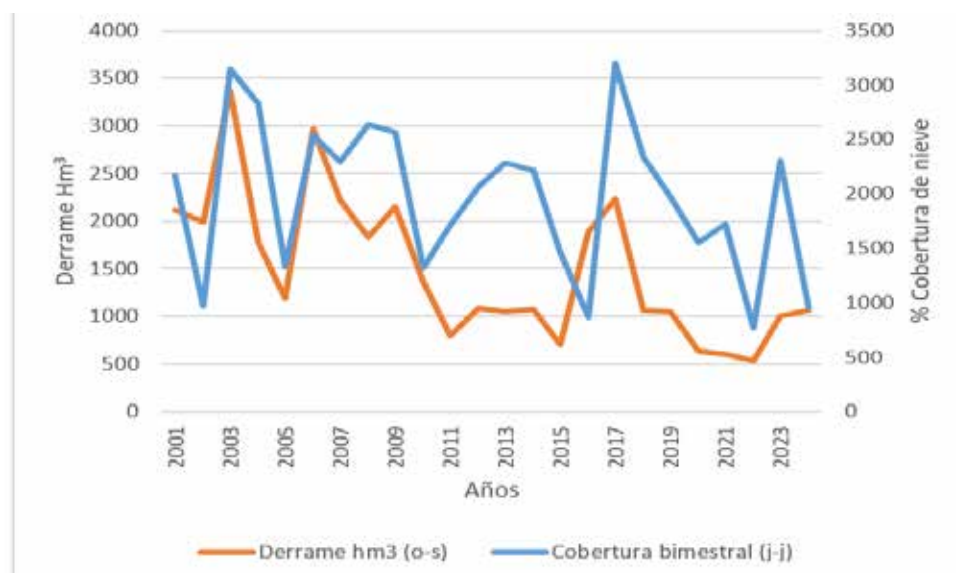


Figura 4: Variables de cobertura de nieve bimestral y derrame anual

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

	Derrame Hm ³ (o-s)	Cobertura bimestral (j-j)
Cobertura bimestral (j-j)	0,54	1

Tabla 3: Coeficiente de correlación modelo bimestral

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

Análisis del modelo trimestral (mayo a julio):

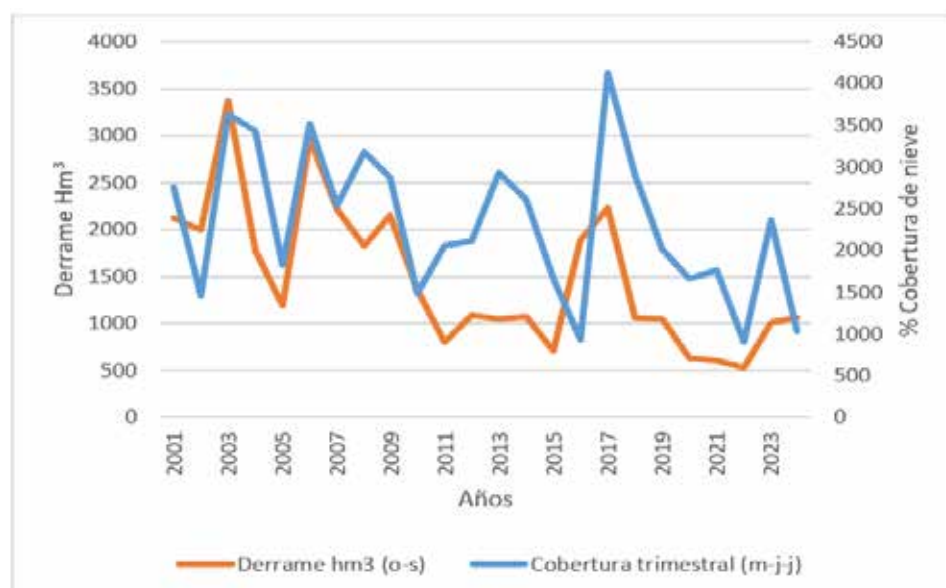


Figura 5: Variables de cobertura de nieve trimestral y derrame anual

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

	Derrame Hm^3 (o-s)	Cobertura trimestral (m-j-j)
Cobertura trimestral (m-j-j)	0,61	1

Tabla 4: Coeficiente de correlación trimestral

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

Análisis del modelo cuatrimestral (mayo a agosto):

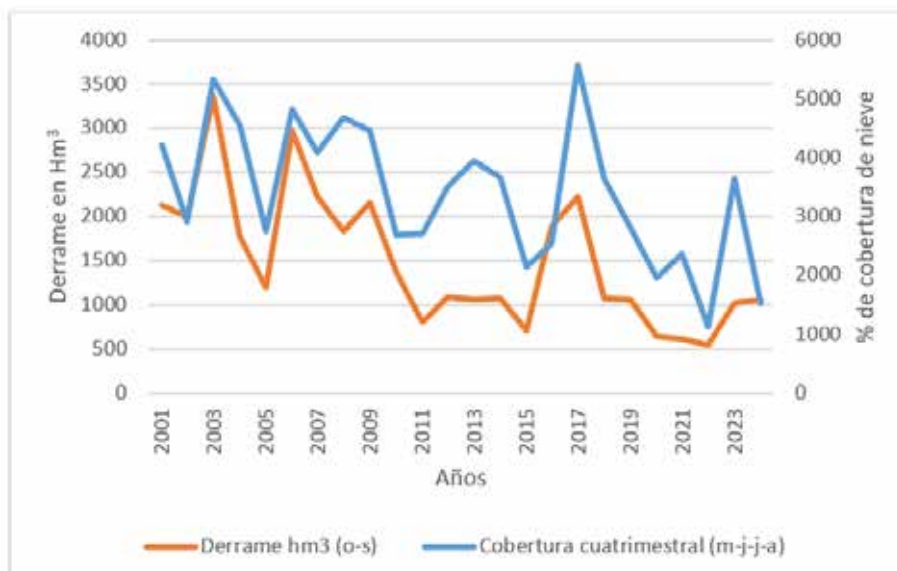


Figura 6: Variables de cobertura cuatrimestral y derrame anual

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

	Derrame Hm^3 (o-s)	Cobertura cuatrimestral (m-j-j-a)
Cobertura cuatrimestral (m-j-j-a)	0,76	1

Tabla 5: Coeficiente de correlación cuatrimestral

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

Análisis del modelo Semestral (mayo a octubre):

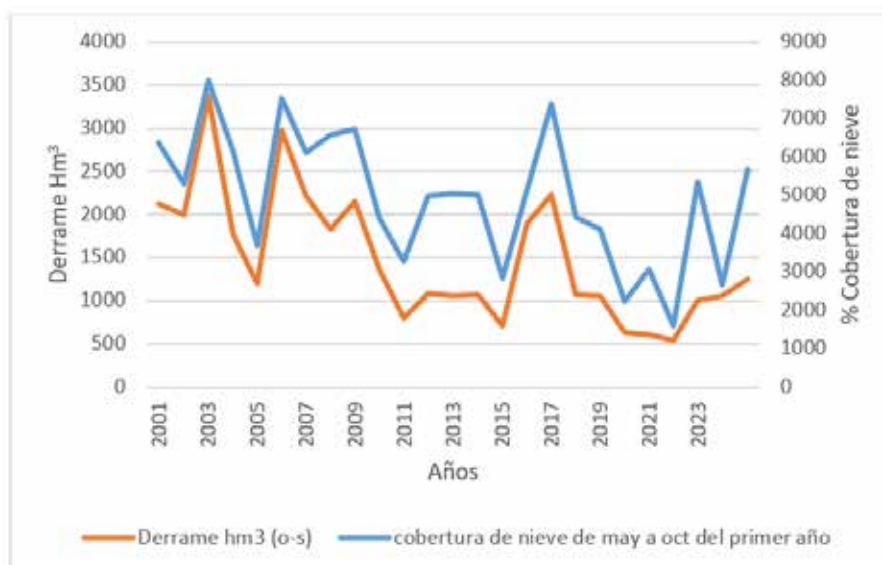


Figura 7: Variables de cobertura de nieve de mayo a octubre y derrame anual.

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

Derrame Hm ³ (o-s)	1	
Cobertura de nieve de mayo a octubre	0,89	1

Tabla 6: Coeficiente de correlación de mayo a octubre.

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

Al comparar los resultados de cada ensayo, el modelo de 6 meses, es el que arroja el mejor porcentaje de correlación con 89% (tabla 7), reflejándose en el acom-

pañamiento entre ambas variables (figura 7), por lo que, se analiza cuál es su mejor función de ajuste.

Periodo de análisis	Coeficiente de correlación entre % de nieve y derrame
Bimestral	0,54
Trimestral	0,61
Cuatrimestral	0,76
Semestral	0,89

Tabla 7: Cuadro comparativo del coeficiente de correlación simple de los distintos periodos.

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

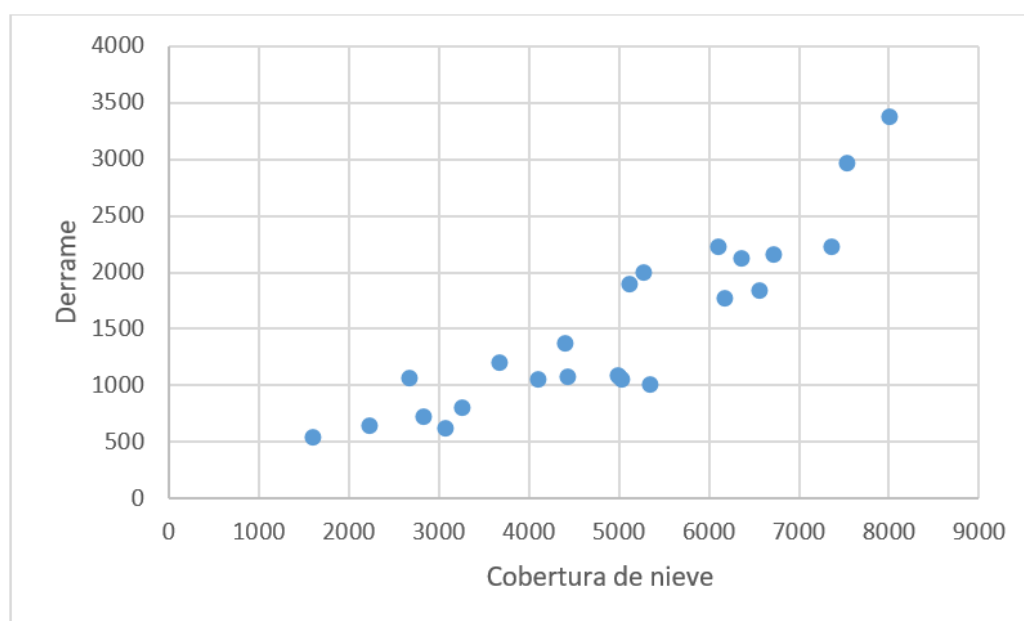


Figura 8: Derrame aforado y % de cobertura de nieve para los meses de mayo a octubre.

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

Estadístico t	Probabilidad p-value
9,2486268	4,90E-09

Tabla 8: "Estadístico t y probabilidad p-value".

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

El gráfico de dispersión de la figura 8, presenta los valores de porcentaje de cobertura de nieve, mayo a octubre, versus los derrames, octubre a septiembre, desde el año 2000 al 2024. Dado que su índice de correlación

es de 0,89, se evalúa su significancia estadística que es de: $t = 9,2486$ y $p\text{-value} = 4,9 \times 10^{-9}$ (Tabla 8) lo que confirma, que el periodo semestral de cobertura de nieve, es un buen estimador del derrame.

Análisis de la función lineal para el periodo semestral:

En la función lineal (figura 9.), el ajuste obtenido es $y = 0,386x - 407,48$ y el $R^2 = 0,79$, lo que valida que se construya un modelo a partir de su ecuación. Para esto, se considera como variable "x" la sumatoria de porcen-

tajes diarios de cobertura de nieve, de mayo a octubre, obteniéndose el "y estimado", el cual indica el derrame que se esperaría según el modelo para ese año determinado (figura 10).

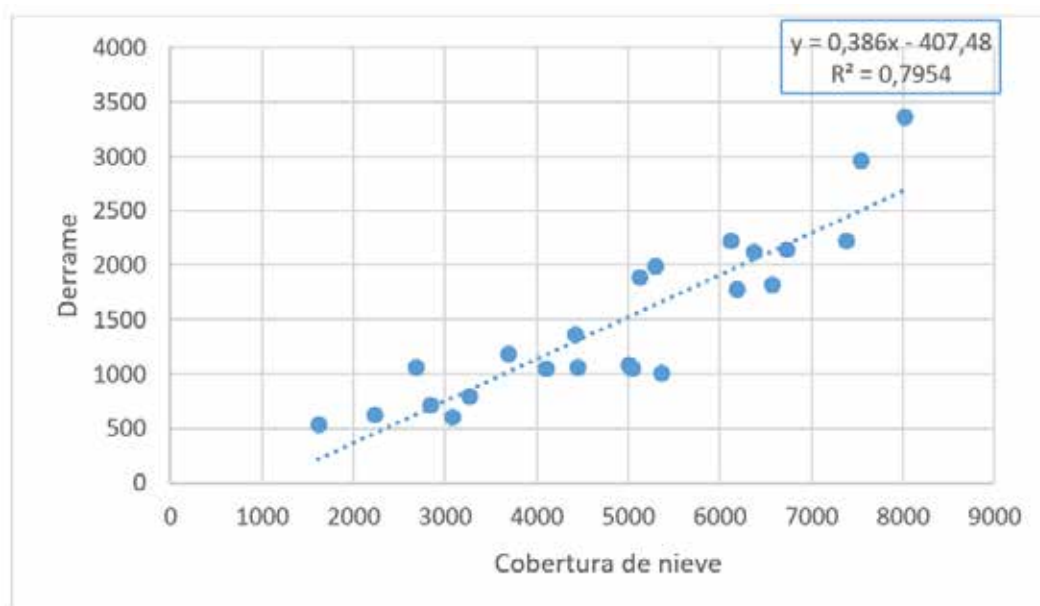


Figura 9: Derrame aforado y % de cobertura de nieve para los meses de mayo a octubre y su tendencia lineal.

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

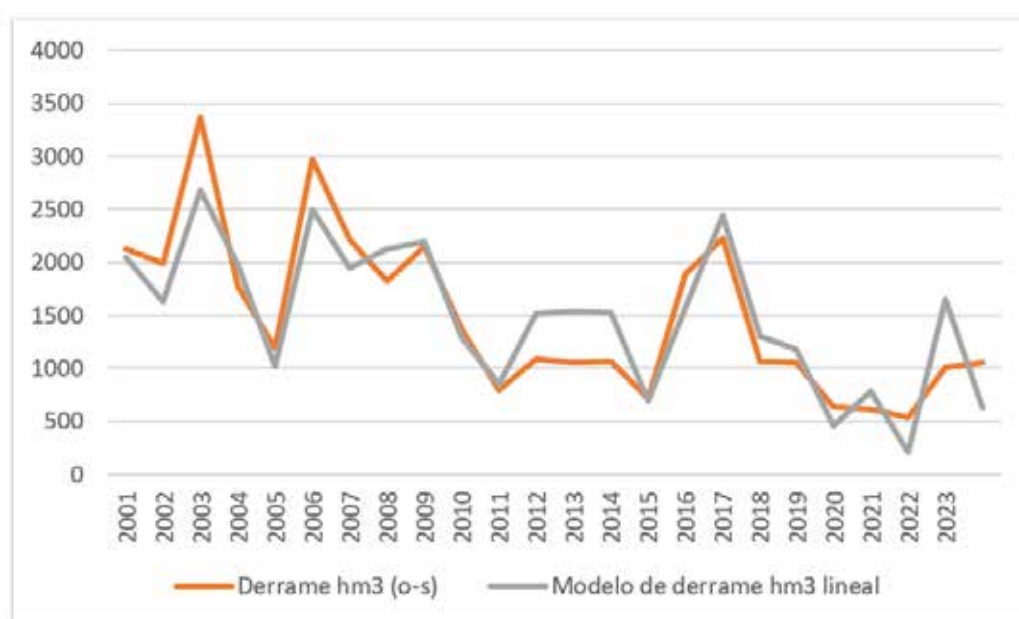


Figura 10: Derrame real aforado y modelo de derrame estimado a partir del % de cobertura de nieve, obtenido por ajuste lineal del modelo.

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

Análisis de función exponencial para el periodo semestral:

La función exponencial $y = 353,18e^{0,0003x}$, arroja un ajuste de $R^2 = 0,84$ (figura 11). Al igual que el ajuste lineal, en el exponencial, se procede a construir el modelo

respectivo, es decir, reemplazar en "x" la cobertura de nieve del semestre considerado (figura 12).

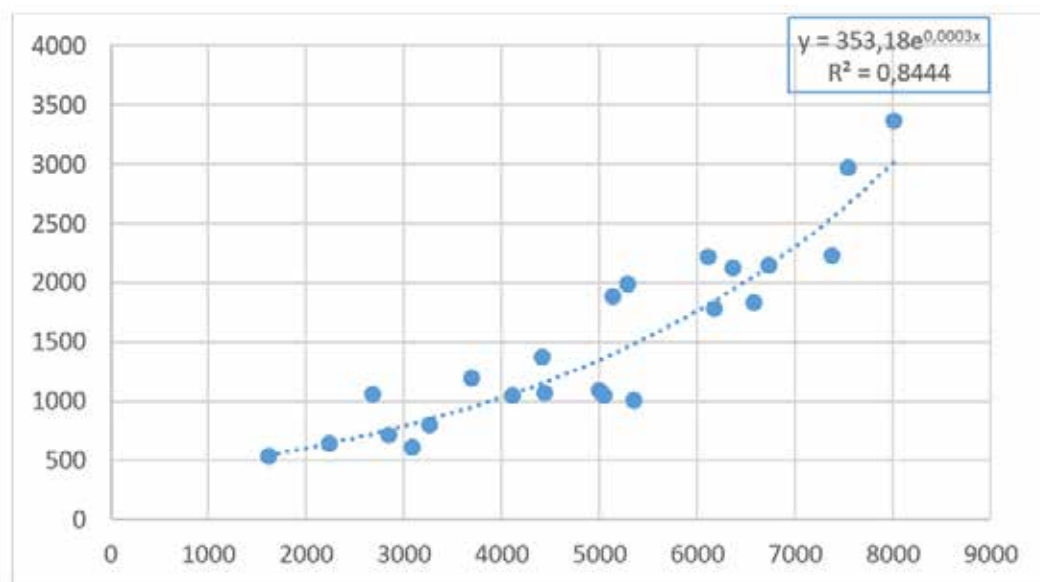


Figura 11: Derrame aforado y % de cobertura de nieve para los meses de mayo a octubre y su tendencia exponencial.

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

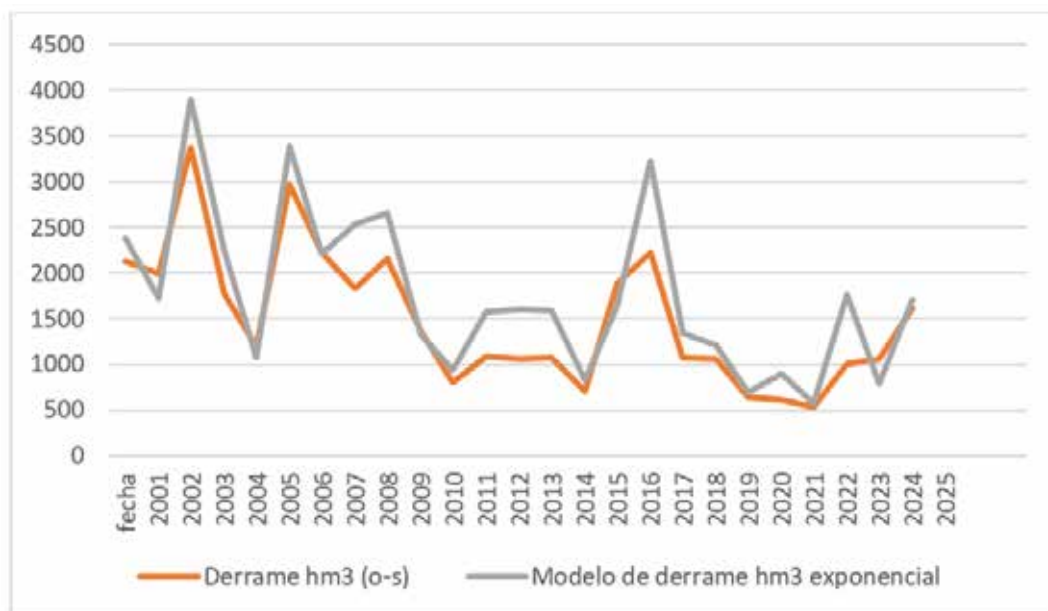


Figura 12: Derrame real aforado y modelo de derrame estimado a partir del % de cobertura de nieve, según ajuste exponencial del modelo.

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

Análisis de función polinómica de grado 2 para el periodo semestral:

Por último, el ajuste polinómico de grado 2 es, 13). El modelo construido se observa en la figura 14.
 $y = 6E-05x^2 - 0,2052x + 847,63$ y da un $R^2 = 0,86$ (figura

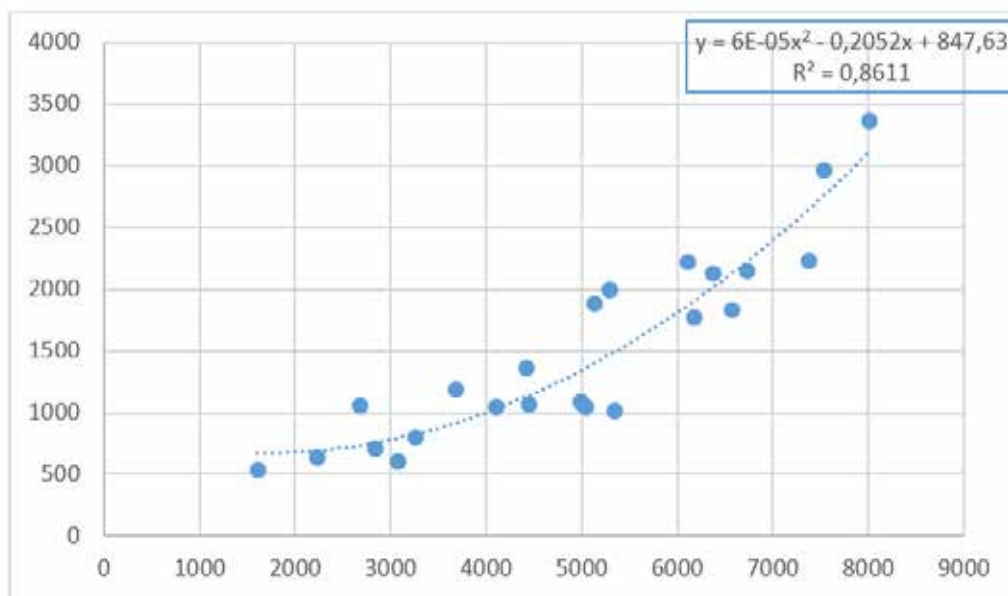


Figura 13: Derrame aforado y % de cobertura de nieve para los meses de mayo a octubre y su tendencia polinómica de grado 2.

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

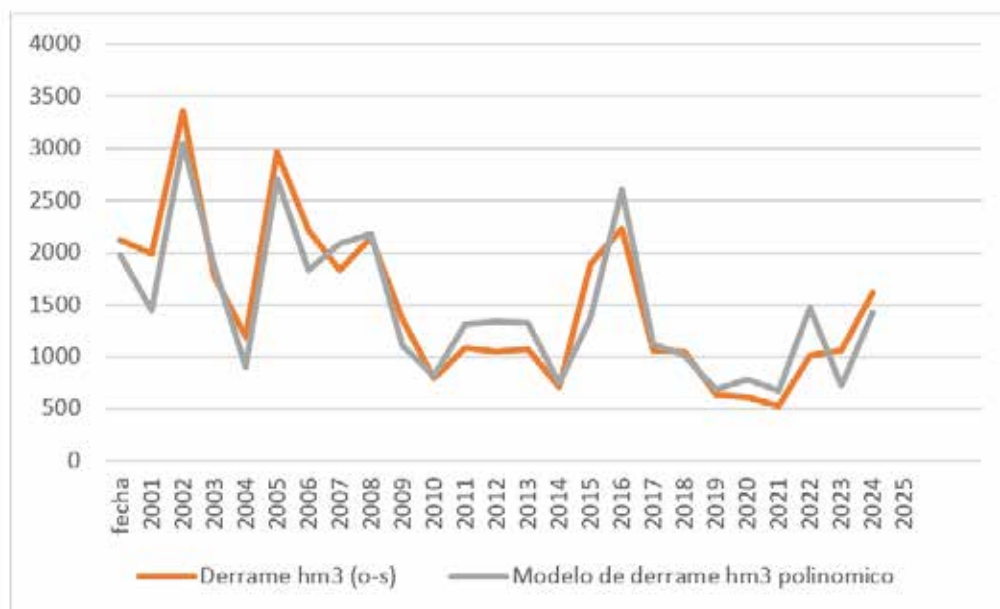


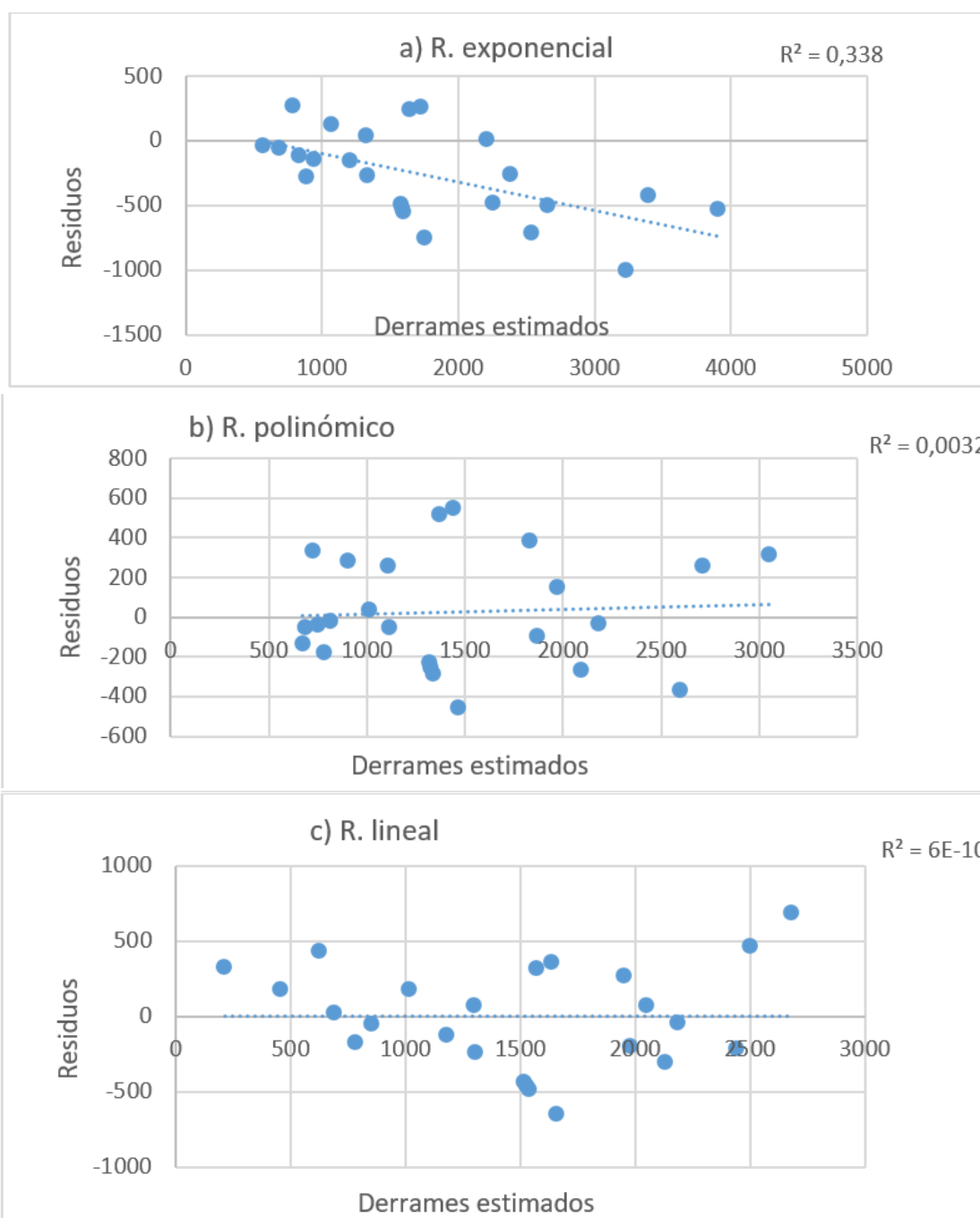
Figura 14: Derrame real aforado y modelo de derrame estimado a partir del % de cobertura de nieve, según ajuste polinómico de grado 2.

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

Modelo	Ecuación del modelo	R2 de "ye" e "y"	R2 de residuos con a "ye"
Lineal	$y=0,386x-407,48$	0,79	0, 6E-10
Exponencial	$y= 353,18e^{0,0003x}$	0,84	0,338
Polinómico de grado 2	$y=6E-05x^2 - 0,2052x + 847,63$	0,86	0,0032

Tabla 9: Valoración de los tres modelos

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

**Figura 15:** Eje "x" presenta el valor de "ye" por cada modelo y el eje "y" presenta el valor residual de cada "ye".

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

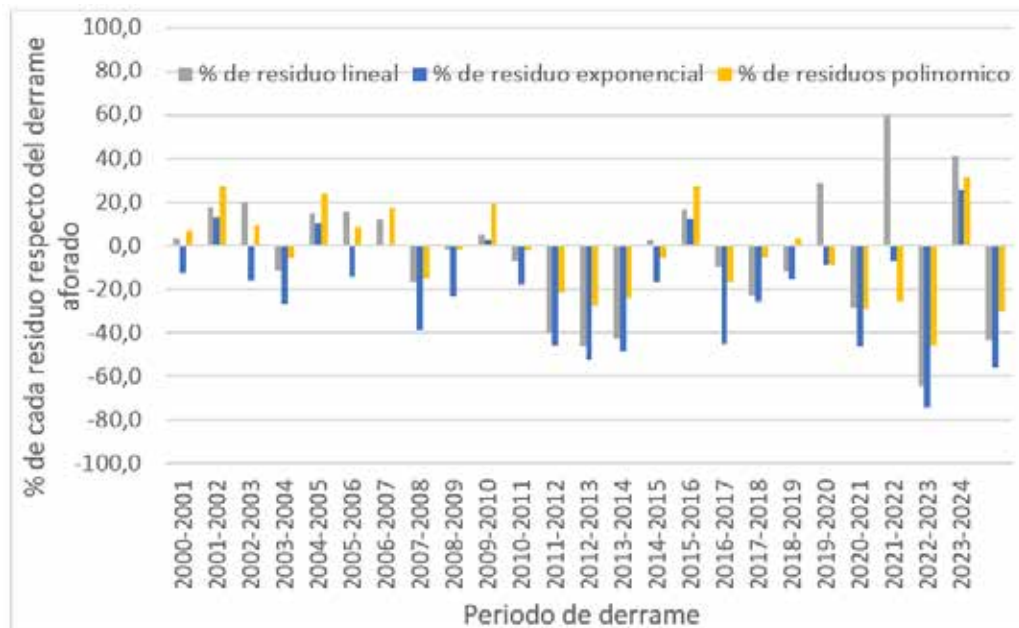


Figura 16: Diferencia entre el derrame aforado, menos el pronosticado (residuo), expresado en porcentaje, donde los valores negativos representan sobreestimación y positivos subestimación.

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

Al analizar los distintos modelos (tabla 9.) con los que se obtiene el “derrame estimado”, desde el % de nieve del periodo mayo-octubre, se observa que, en los tres hay un alto coeficiente de determinación respecto de los “derrames aforados”, siendo el mayor el polinómico.

En la tabla 15 y figura 16, se analizan los residuos de los distintos modelos respecto del derrame aforado. La correlación es casi nula entre dichos modelos y sus residuos en los casos lineal y polinómico, lo que indica, ausencia de tendencia o patrón. El exponencial, por otro

lado, si tiene correlación, lo que introduciría un sesgo en sus pronósticos o predicciones, a lo largo de los años.

Los residuos se expresan en porcentaje y se calculan con: la diferencia entre el derrame aforado menos el pronosticado (figura 16). Al evaluar dichos residuos, si se obtienen valores negativos implican sobreestimación del modelo sobre el dato real, contrariamente, los positivos indican subestimación. El modelo polinómico, es el que presenta una sobreestima menor en comparación a los otros dos modelos, mientras que el modelo lineal es el que más subestima de los tres, seguido del polinómico.

Modelo Periodo	Modelo de derrame lineal de Hm ³	Modelo de derrame exponencial de Hm ³	Modelo de derrame Hm ³ polinómico
2024-25	1789,9	1948,5	1623,9

Tabla 10: Pronósticos obtenidos para el derrame 2024-25, según los distintos modelos.

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Departamento de Hidráulica de la Provincia de San Juan y Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET.

En la tabla 10, se presentan los pronósticos para el periodo 2024-25, obtenidos por cada modelo, contruados sobre datos medidos: para el derrame, desde tem-

porada 2000-01 al 2023-24, y porcentaje de nieve desde mayo a octubre de cada año, desde el 2000 al 2024.

6. CONCLUSIÓN

De los análisis realizados, para pronosticar el derrame del río San Juan se concluye que:

Las tendencias de los derrames anuales (Hm³) son decrecientes, haciendo necesario construir modelos para su pronóstico adecuado, a fin de, asegurar una co-

recta gestión del recurso hídrico.

Hacer un pronóstico temprano, utilizando el porcentaje de cobertura de nieve como variable independiente, resulta un recurso accesible ante la falta de una densa red de estaciones nivometeorológicas en cordi-

llera.

Utilizar el porcentaje de cobertura de nieve acumulado a lo largo del año, no sería práctico ya que se superpondría con el periodo a pronosticar, para ello, fue necesario encontrar un periodo temporal menor al año.

Se analizaron los siguientes periodos: bimestral (junio-julio), trimestral (mayo, junio y julio), cuatrimestral (mayo a agosto) y semestral (mayo a octubre), encontrándose, que el mejor ajuste que pronostica el derrame de la temporada siguiente (octubre de un año a septiembre del año consecutivo), es el semestral.

A dicho periodo semestral se le aplicaron distintos modelos matemáticos y se encontró que el polinómico

es el que presenta las mejores condiciones para el pronóstico del derrame, ya que reúne tres características: primero, es el que pronostica el "derrame estimado" con la mayor correlación respecto de sus variables, segundo, presenta una correlación casi nula entre dicho modelo y sus residuos, indicando, ausencia de una tendencia o patrón. Tercero, el modelo polinómico, es el que presenta una menor sobreestima en comparación a los otros modelos.

Finalmente, se calculó el derrame para la temporada 2024-25 que, según el modelo polinómico, es: $1623,9\text{Hm}^3$.

7. AGRADECIMIENTOS

Al proyecto CICITCA-UNSJ "Evaluación de la temperatura en el Oasis de Tulum y áreas vinculadas, su variabilidad estacional e interanual, como base fundamental para la gestión del recurso hídrico", aprobado por Res. 1501/23-R (Código 21/F1219), por su finan-

ciamiento.

Al Instituto de Geografía Aplicada de la Facultad de Filosofía, Humanidades y Artes de la Universidad Nacional de San Juan, por el lugar de trabajo.

8. BIBLIOGRAFIA

Atlas socioeconómico de la provincia de San Juan.

Departamento de hidráulica de la provincia de San Juan. <https://www.hidraulica.sanjuan.gob.ar/>.

Map data ©2015 Google. Google Satellite, datos del mapa ©2015 Google. <https://www.google.at/permissions/geoguidelines/attr-guide.html>.

Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile del CONICET. <https://www.observatorioandino.com/nieve/>.

Poblete A.G, Ruiz S.B. Las estaciones térmicas en el Valle de Tulum, Revista Ciencias, Año 10, 1-2006, UNSJ-FCEFN.

Spiegel Murray R., 1977, Teoría y problemas de probabilidad y estadística Compendios SCHAUM. Ed. McGraw Hill.

