

Cuantificación de tasa de sedimentos en cuenca río San Juan, evaluación previa de impactos y escenarios en función del cambio climático.

Ulises Pablo Daniel Gonzalez¹.

¹ Universidad Nacional de Tres de Febrero.

E-mail: upablogonzalez@gmail.com

RESUMEN

En el presente trabajo, la tasa de sedimentos generada por la cuenca del río San Juan se estimó aplicando el método Gavrilovic-Zemljic y el método de Distribución Lognormal para la producción y el transporte, respectivamente. El objetivo es evaluar el impacto causado por los sedimentos en la cuenca, considerando los diferentes escenarios elaborados en la Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la CMNUCC. En el contexto actual de cambio climático, resulta esencial evaluar variables como precipitación, temperatura, caudal de agua y las características geofísicas del río, para poder dimensionar su grado de afectación. La variación de estos parámetros establece nuevas condiciones en la generación y transporte de sedimentos, creando diferentes escenarios e impactos ambientales. El incremento en los sedimentos de la cuenca produce las siguientes consecuencias: disminución en la vida útil de las presas establecidas en su cauce, por el aumento de los depósitos de sedimentos en la presa (volumen muerto). En efecto, una menor generación de energía hidroeléctrica. Además, el incremento de sedimentos genera una mayor conductividad eléctrica y contribuye al aumento de la salinidad en el agua de riego, derivada para el desarrollo de los oasis frutihortícolas en la provincia de San Juan.

INTRODUCCIÓN

La erosión en las cuencas de drenaje es uno de los problemas ambientales de mayor impacto a nivel internacional. El Coordinador Regional de UNESCO América Latina y el Caribe, Dr. Roberto Pizarro Tapia, expuso que en “las próximas décadas más del 50% de la capacidad de almacenamiento de los reservorios de agua del mundo, puede verse reducida como producto de los procesos de sedimentación y, por tanto, las prácticas de gestión de los sedimentos deberían ser mejoradas”. (UNESCO,2010).

En el caso de la Cuenca del Río San Juan, ubicada en la región de Cuyo, en el oeste de la República Argentina, los procesos de erosión superficial y remoción de sedimentos en masa generan fenómenos como el incremento de sedimentos en los embalses, condicionan el regular funcionamiento de las obras de toma, influye negativamente en la fauna acuática, promueve procesos de metamorfosis fluvial, es decir, tienden a adquirir las dimensiones de un desastre real para las áreas montañosas como para las zonas pedemontanas y de llanura, debido a la degradación del relieve que implica. (Simons y Sentürk, 1992).

La complejidad para determinar, cuantificar, describir y establecer la capacidad de un río para transportar sedimentos ha sido un obstáculo para tener la última palabra con una fórmula única, capaz de mitigar todos los problemas o situaciones, dada la particularidad y variedad de cada sistema fluvial.

El objeto de esta investigación fue estimar la producción global de sedimentos, en forma de un modelo agregado, en la cuenca del río San Juan, basado en ecuaciones cuyas variables controlan los procesos físicos e hidrológicos dominantes a escala de cuenca. Entre las variables consideradas, la temperatura y precipitación son forzantes del modelo, que generan por su variabilidad en los escenarios de cambio climático, impactos ambientales de relevancia para el área de estudio.

En la provincia de San Juan, diversas obras hidráulicas para control y gestión del recurso hídrico brindaron la posibilidad de desarrollar oasis frutihortícolas, que dependen exclusivamente del agua proveniente del río San Juan y sus subcuencas. A partir de esta infraestructura, el territorio provincial supera las 116.000 hectáreas cultivables (INTA, 2014), y a su vez aporta a partir de sus aprovechamientos hidroeléctricos unos 887 GWh/año al Sistema Interconectado Nacional. (Balance Energético Nacional, 2016). La provincia tiene un potencial hidroeléctrico que está en desarrollo, donde se prevé la construcción de El Tambolar y El Horcajo en la próxima década.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la investigación, en una primera etapa se realizó la recopilación de documentación e información estadística de interés en diversas cuencas hidrográficas de la República Argentina, consultando a diversos organismos públicos provinciales y nacionales.

Luego del análisis de la información recopilada, se seleccionó la cuenca del río San Juan. Esta elección se fundamenta en la cantidad de datos obtenidos, caudales medios mensuales del periodo 1910-2000 por un total $n= 1080$, aportado por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación y datos de temperatura y precipitación mensuales con un total de $n= 19.440$, para periodos de análisis que permitan establecer escenarios futuros en función del cambio climático para la cuenca, información obtenida en la base de datos de la Tercera Comunicación Nacional del Gobierno de la República Argentina a las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

Se trabajó con 2 Modelos Climáticos Regionales (RCP), correspondientes a los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 planteados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en el Acuerdo de París, año 2015, con el fin de analizar los efectos del cambio climático en los campos de precipitaciones y temperatura para la cuenca. El análisis se realizó para un periodo de base establecido entre 1980-2010, y luego para las proyecciones de escenarios para los periodos 2015-2039 (futuro cercano) y 2075-2099 (futuro lejano).

Conforme a los datos mencionados ut supra, se aplicó la metodología desarrollada por Gavrilovic- Zemljic ya que tiene validez para cuencas similares a la del río San Juan y ha sido utilizada por el Instituto Nacional del Agua (INA) en el marco de trabajo para la Formulación del Programa Estratégico de Acción de la Cuenca del Río Bermejo (PEA), financiado por Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y del Fondo para el Medio Ambiente Mundial.

En una segunda etapa se desarrolló la evaluación estadística de los datos recopilados, mediante la herramienta Microsoft Excel, Python, QGIS y Google Earth, tanto para el cálculo de la producción de sedimentos mediante Gavrilovic- Zemljic y el análisis de frecuencia Lognormal para la caracterización hidrológica. A continuación, se describen los métodos utilizados.

Método de Gavrilovic - Zemljic

Esta metodología permite un cálculo de la producción anual de sedimentos en una cuenca a través de una modelación distribuida, expresada en función de dos relaciones diferentes: el volumen promedio anual erosionado de sedimento (W) y el coeficiente de retención de sedimentos (R).

Este método empírico permite cuantificar el proceso erosivo en función de las características morfológicas, geo-litológicas, vegetación y uso de suelo, distribución de precipitaciones y temperatura (forzantes del modelo). Se define mediante la siguiente ecuación (1):

$$G = W * R \left[\frac{m^3}{año} \right] \quad (1)$$

Donde:

G = descarga media anual de material erosionado (m³/año).

W = el volumen promedio anual erosionado de sedimento (m³/año).

R = coeficiente de retención de sedimentos.

Para determinar el volumen promedio anual erosionado de sedimentos, se emplea la ecuación (2):

$$W = T * h * \pi * Z^{\frac{3}{2}} * F \left[\frac{m^3}{año} \right] \quad (2)$$

Donde:

T = coeficiente de temperatura, que se obtiene a partir de (3):

$$T = \left[\left(\frac{t}{10} \right) + 0,1 \right]^{1/2} \quad (3)$$

t = Temperatura media anual. (°C)

h= precipitación media anual. (mm/año)

F= superficie de la cuenca (km²)

Z=coeficiente de erosión, que se obtiene de la siguiente ecuación (4):

$$Z = X * Y * (\varphi + I^{1/2}) \quad (4)$$

donde:

x= Coeficiente de uso del suelo

ϕ = Coeficiente correspondiente al tipo de proceso erosivo.

y = Coeficiente de resistencia.

i = Pendiente superficial del terreno [%]

Luego para la obtención del coeficiente R, se deben considerar las variables de la ecuación (5) que precede.

$$R = \frac{[(O*D)]^{1/2}*(L+L_i)}{(L+10)*F} \quad (5)$$

donde:

O= perímetro de la cuenca [km]

D= Diferencia media de nivel [km]

F= Superficie de la cuenca [km^2]

L_i = Longitud total de afluentes laterales [km]

L= Longitud del Talweg [km]

Para el desarrollo de la metodología se trabajó sobre cinco coordenadas geográficas (Tabla 1), en las cuales se contaba con información de las variables consideradas en el modelo. Por tanto, se subdividió a la cuenca del río San Juan en cinco subcuencas representativas, con afluentes principales y características geolíticas diferentes. Sobre los puntos de la tabla que precede, se realizó un tratamiento estadístico de las variables y su interrelación con la geología del sitio de análisis.

Tabla 1.- Coordenadas de análisis puntos de análisis.

Subcuenca	Denominación	Latitud	Longitud
Río San Juan Superior	Confluencia	31° 25' 00" S	69° 25' 00" O
Río Los Patos Inferior	Central	31° 25' 00" S	68° 75' 00" O
Río Castaño	Norte	30° 25' 00" S	69° 25' 00" O
Río Blanco	Oeste	31° 25' 00" S	70° 25' 00" O
Río Los Patos Superior	Sur	32° 25' 00" S	69° 75' 00" O



Figura 1.- Puntos de análisis Método de Gavrilovic (Fuente: Elaboración propia)

Para el cálculo de la producción de sedimentos utilizaron tablas de valores de coeficientes (tabla 2, 3 y 4), desarrollados por Zemljic en 1989 y que fueron utilizadas en trabajos recientes en ríos argentinos (Brea et al. 1999; Olmos et al. 2008; COBINABE, 2010; Brea y Spalletti, 2010).

Tabla 2.- Coeficiente de uso de suelo “X”. Fuente: Spalletti y Brea (1997).

USO DE SUELO	X
Zona desprovista de vegetación o con vegetación o con vegetación exigua	1
Vegetación herbácea de cobertura rala	0,6
Vegetación herbácea de cobertura semidensa a densa	0,4
Vegetación predominantemente arbustiva.	0,7
Vegetación arbustiva y boscosa mezclada.	0,6
Bosque de alta montaña – alta densidad	0,2
Bosque de alta montaña – media densidad	0,4
Bosque de alta montaña – baja densidad	0,6
Bosque de montaña – porte achaparrado	0,6
Área de actividad agropecuaria	0,8

Tabla 3.- Resistencia a la erosión del suelo “Y”. Fuente: Spalletti y Brea (1997).

RESISTENCIA A EROSIÓN – TIPO LITOLÓGICO	Y
Cuartario – cubierta de acarreo indiferenciados	1,8
Terciario – areniscas y conglomerados rosados	0,25
Cretácico – areniscas, conglomerados y pelitas rojas- calizas amarillas.	0,9
Ordovícico – lutitas, areniscas verdosas, granito	1,1
Cámbrico – areniscas cuacíticas grises y moradas	0,5
Precámbrico - Granito	0,5
Precámbrico- pizarras y filitas	1,1

Tabla 4.- Coeficientes procesos erosivos observados “ ϕ ”. Fuente: Spalletti y Brea (1997).

TIPO DE PROCESO EROSIVO OBSERVADO	ϕ
Regolito – Manto derribial de cumbres	0,6
Suelo sobre sustratos rocos	0,7
Suelo del área boscosa	0,4
Erosión por carcavamiento moderado a severo	0,9
Erosion energética – Afloramiento de roca	1
Remoción en masa menos reptación de escombros de talud	0,8
Reptación de escombros de talud	0,8
Morenas Glaciares y acumulaciones derribales	0,6
Abanicos aluviales	0,7
Terrazas bajas – Abanicos aluviales aterrazados	0,7
Terrazas altas	0,7
Lechos fluviales	0,2
Áreas de uso humano	0,6

Para asignar los valores de coeficientes X, Y, ϕ a utilizar en cada sub cuenca, se trabajó con un mapa geológico provisto por SEGEMAR y archivos SIG obtenidos de la Secretaria de Energía y el Instituto Geografico Nacional. El resultado del procesamiento de los archivos en QGIS y Python, permitieron discretizar los valores y ponderar una media representativa en cada subcuenca para los valores de X,Y, ϕ . En la Tabla 6 que precede se presentan los valores asignados, en función del análisis de información geográfica y los fenómenos observados en cada una de las subcuenas (Figura 2).

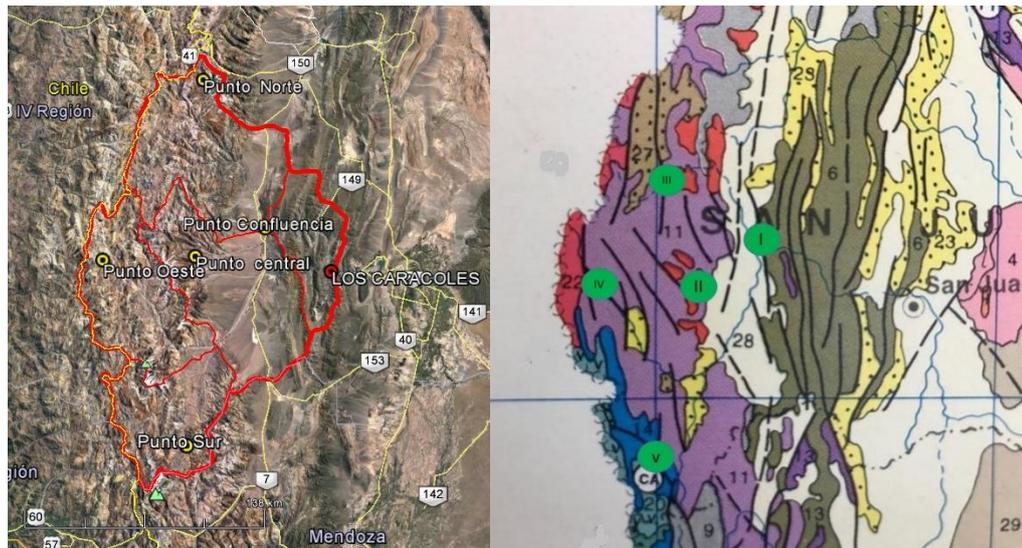


Figura 2.- Unidades morfoestructurales de los Andes Centrales, en recuadro área de estudio (Fuente: Elaboración propia a partir de mapa geológico)

Tabla 5.- Clasificación por ambiente geológico, unidad litológica, edad, para cada subcuenca. Con >> se determina la unidad predominante.

Información utilizada para definir coeficientes Gavrilovic -Zemljic					
Subcuenca	Punto	Ambiente geológico	Referencia	Unidad litológica	Edad
Rio San Juan Superior	Confluencia	Precordillera	>> 6	Sedimentitas marinas	Paleozoico Inferior
			13	Sedimentitas Continentales	Triásico
			23	Sedimentitas Continentales	Terciario
Rio Los Patos Inferior	Central	Precordillera	>> 6	Sedimentitas marinas	Paleozoico Inferior
			>> 28	Sedimentos aluviales y coluviales	Cuaternario
			23	Sedimentitas Continentales	Terciario
			11	Riolitas, andesitas, tobas	Paleozoico superior
Rio Castaño	Norte	Cordillera Frontal	12	Granitos,granodiorita, porfidos	Paleozoico superior
			>> 11	Riolitas, andesitas, tobas	Paleozoico superior
			28	Sedimentos aluviales y coluviales	Cuaternario
			27	Piroclastitas	Terciario Superior
Rio Blanco	Oeste	Cordillera Frontal	>> 11	Riolitas, andesitas, tobas	Paleozoico superior
			>> 14	sedimentitas marinas	Jurásico
			22	Tonalitas, granodioritas y granitos	Terciario
			23	Sedimentitas Continentales	Terciario
Rio Los Patos Superior	Sur	Cordillera Principal	>> 11	Riolitas, andesitas, tobas	Paleozoico superior
			>> 14	sedimentitas marinas	Jurásico
			27	Piroclastitas	Terciario Superior
			23	Sedimentitas Continentales	Terciario

Tabla 6.- Coeficientes aplicados a cada subcuenca, de acuerdo al valor predominante en cada una de ellas.

SUBCUENCA	PUNTO	LATTUD	LONGITUD	X	Y	ϕ	I	Z
Rio San Juan Superior	Confluencia	31°25'00" Sur.	69°25'00" Oeste.	1	1,8	0,8	25	23,94
Rio Los Patos Inferior	Central	31°25'00" Sur.	69°50'00" Oeste.	1	1,8	0,8	25	23,94
Rio Castaño	Norte	30°25'00" Sur.	69°50'00" Oeste.	0,6	1,1	0,9	34	11,18
Rio Blanco	Oeste	31°25'00" Sur.	69°75'00" Oeste.	0,6	1,1	0,9	40	13,79
Rio Los Patos Superior	Sur	32°25'00" Sur.	69°75'00" Oeste.	0,6	1,1	0,7	64	21,58

Para obtener el gradiente de la pendiente superficial, valor de I, se obtuvo con Modelos Digitales de Elevación SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) y se efectuó un promedio para cada subcuenca, asociada a los puntos geográficos descritos arriba. Mientras que el parámetro R se obtuvo mediante Google Earth, validado luego con QGIS y el Instituto de Geografía Aplicada de San Juan.

Método de Dsitribución de Probabilidades Lognormal

El análisis de frecuencia es una herramienta utilizada para predecir el comportamiento futuro de los caudales en un sitio de interés, a partir de la información histórica. Es un método basado en procedimientos estadísticos, que permiten calcular la magnitud del caudal asociado a un período de retorno. Su confiabilidad depende de la longitud y calidad de la serie histórica, además de la incertidumbre propia de la distribución de probabilidades seleccionada.

La distribución de frecuencia se basa en que dada una variable aleatoria "x", si la función $y = \ln x$ tiene una distribución normal, se dice que los valores de "x" presentan una distribución del tipo logarítmico - normal o simplemente lognormal. Es una probabilidad utilizada para expresar el comportamiento de observaciones con asimetría positiva, en donde la mayoría de los valores ocurren en las proximidades de un valor mínimo.

Para estimar el efecto de transporte de en la cuenca, se analizó las características hidrológicas del río. Para determinar los caudales máximos probables y los hidrogramas de crecientes del río San Juan, correspondientes a diferentes períodos de retorno, se trabajó sobre una base de datos hidrométricos del periodo 1909/10 - 1998/99 obtenidos en las estaciones de aforos denominadas "Km. 47,3" y "La Puntilla" - "Derivador José Ignacio de la Roza".

La ecuación 6 es la expresión que define la distribución lognormal de los eventos de la muestra de datos es la siguiente:

$$f_{masa}(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} * e^{\left[\frac{1}{2 \cdot \sigma^2} * (x - \mu)^2\right]} \quad (6)$$

A su vez la expresión que determina la función de probabilidad acumulada lognormal, se obtiene de la integración de la anterior en el rango de interés:

$$f_{acum}(x_i) = \int_0^{x_i} f_{masa}(x) dx = \int_0^{x_i} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} * e^{\left[\frac{1}{2 \cdot \sigma^2} * (x - \mu)^2\right]} \quad (7)$$

donde:

$f_{masa}(x)$ = función masa o de densidad de la distribución lognormal de los eventos de la muestra.

$f_{acum}(x_i)$ = función de distribución de probabilidad acumulada lognormal para el evento x_i .

x = logaritmo natural del caudal diario máximo anual = $\ln(y)$.

μ = promedio de los logaritmos naturales de la serie de caudales diarios máximos anuales.

σ = desviación estándar de los logaritmos naturales de la serie de caudales diarios máximos anuales.

e = base de los logaritmos naturales o neperianos ($e = 2.7182818$).

Tabla 7.- Resumen de datos y operaciones realizadas para el análisis hidrológico.

AÑO	CAUDALES DIARIOS MÁXIMOS (m ³ /seg)	AÑO ORDEN S/ Qmáx	CAUDALES DIARIOS MÁXIMOS ORDENADOS (m ³ /seg)	DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD LOGNORMAL (NO OCURRENCIA)	PERÍODO DE RETORNO Tr (años)	Ln (Qmáx)
1909/10	76	1919/20	1097	99,53%	213,18	7,0003
1910/11	46	1914/15	842	98,83%	85,23	6,7358
1911/12	150	1941/42	681	97,72%	43,89	6,5236
1912/13	190	1987/88	603,2	96,76%	30,9	6,4023
1913/14	45	1982/83	540	95,62%	22,83	6,2916
1914/15	842	1926/27	511	94,94%	19,76	6,2364
1915/16	364	1972/73	474	93,88%	16,33	6,1612
1916/17	115	1953/54	462	93,48%	15,33	6,1356
1917/18	156	1984/85	458,3	93,35%	15,03	6,1275
1918/19	158	1997/98	444,2	92,83%	13,94	6,0963
1919/20	1097	1963/64	424	91,99%	12,49	6,0497
1920/21	145	1930/31	376	89,50%	9,53	5,9296
1921/22	308	1915/16	364	88,75%	8,88	5,8972
1922/23	225	1986/87	336,4	86,74%	7,54	5,8183
1923/24	120	1978/79	322	85,52%	6,91	5,7746
1924/25	69	1921/22	308	84,22%	6,34	5,7301
1925/26	200	1965/66	305	83,92%	6,22	5,7203
1926/27	511	1977/78	254	77,68%	4,48	5,5373
1927/28	202	1942/43	247	76,62%	4,28	5,5094
1928/29	174	1931/32	245	76,30%	4,22	5,5013
1929/30	157	1980/81	233,5	74,40%	3,91	5,4532

AÑO	CAUDALES DIARIOS MÁXIMOS (m ³ /seg)	AÑO ORDEN S/ Qmáx	CAUDALES DIARIOS MÁXIMOS ORDENADOS (m ³ /seg)	DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD LOGNORMAL (NO OCURRENCIA)	PERÍODO DE RETORNO Tr (años)	Ln (Qmáx)
1931/32	245	1922/23	225	72,88%	3,69	5,4161
1932/33	128	1983/84	224,9	72,86%	3,69	5,4157
1933/34	174	1940/41	220	71,94%	3,56	5,3936
1934/35	232	1944/45	216	71,16%	3,47	5,3753
1935/36	112	1927/28	202	68,22%	3,15	5,3083
1936/37	78	1925/26	200	67,77%	3,1	5,2983
1937/38	188	1957/58	199	67,55%	3,08	5,2933
1938/39	82	1992/93	196,8	67,05%	3,03	5,2822
1939/40	96	1991/92	195,9	66,84%	3,02	5,2776
1940/41	220	1912/13	190	65,43%	2,89	5,2470
1942/43	247	1937/38	188	64,94%	2,85	5,2364
1943/44	189	1948/49	182	63,42%	2,73	5,2040
1944/45	216	1928/29	174	61,28%	2,58	5,1591
1945/46	63	1933/34	174	61,28%	2,58	5,1591
1946/47	60	1918/19	158	56,57%	2,3	5,0626
1947/48	79	1929/30	157	56,26%	2,29	5,0563
1948/49	182	1917/18	156	55,94%	2,27	5,0499
1949/50	57	1961/62	152	54,65%	2,21	5,0239
1950/51	94	1911/12	150	53,99%	2,17	5,0106
1951/52	52	1920/21	145	52,30%	2,1	4,9767
1952/53	118	1974/75	140	50,55%	2,02	4,9416
1953/54	462	1989/90	130,5	47,03%	1,89	4,8714
1954/55	117	1932/33	128	46,07%	1,85	4,8520
1955/56	95	1960/61	126	45,28%	1,83	4,8363
1956/57	44	1923/24	120	42,87%	1,75	4,7875
1957/58	199	1952/53	118	42,04%	1,73	4,7707
1958/59	93	1954/55	117	41,62%	1,71	4,7622
1959/60	77	1916/17	115	40,78%	1,69	4,7449
1960/61	126	1935/36	112	39,50%	1,65	4,7185
1961/62	152	1973/74	109	38,19%	1,62	4,6914
1962/63	73	1966/67	107	37,31%	1,6	4,6728
1963/64	424	1993/94	106,5	37,08%	1,59	4,6681
1964/65	45	1994/95	100,2	34,23%	1,52	4,6072
1965/66	305	1939/40	96	32,28%	1,48	4,5644
1966/67	107	1955/56	95	31,81%	1,47	4,5539
1967/68	45	1950/51	94	31,34%	1,46	4,5433
1968/69	44	1958/59	93	30,86%	1,45	4,5326
1969/70	69	1985/86	84,8	26,91%	1,37	4,4403
1971/72	39	1947/48	79	24,05%	1,32	4,3695
1972/73	474	1936/37	78	23,56%	1,31	4,3567
1973/74	109	1959/60	77	23,06%	1,3	4,3438
1974/75	140	1990/91	76,7	22,92%	1,3	4,3399
1975/76	68	1909/10	76	22,57%	1,29	4,3307
1976/77	58,1	1962/63	73	21,08%	1,27	4,2905
1977/78	254	1998/99	70,6	19,89%	1,25	4,2570
1978/79	322	1979/80	70	19,59%	1,24	4,2485
1979/80	70	1988/89	69,1	19,14%	1,24	4,2356

AÑO	CAUDALES DIARIOS MÁXIMOS (m ³ /seg)	AÑO ORDEN S/ Q _{máx}	CAUDALES DIARIOS MÁXIMOS ORDENADOS (m ³ /seg)	DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD LOGNORMAL (NO OCURRENCIA)	PERÍODO DE RETORNO Tr (años)	Ln (Q _{máx})
1981/82	42,7	1969/70	69	19,09%	1,24	4,2341
1982/83	540	1975/76	68	18,60%	1,23	4,2195
1983/84	224,9	1945/46	63	16,14%	1,19	4,1431
1984/85	458,3	1946/47	60	14,69%	1,17	4,0943
1985/86	84,8	1995/96	58,3	13,88%	1,16	4,0656
1986/87	336,4	1976/77	58,1	13,78%	1,16	4,0622
1987/88	603,2	1949/50	57	13,26%	1,15	4,0431
1988/89	69,1	1951/52	52	10,94%	1,12	3,9512
1989/90	130,5	1910/11	46	8,33%	1,09	3,8286
1990/91	76,7	1913/14	45	7,91%	1,09	3,8067
1991/92	195,9	1964/65	45	7,91%	1,09	3,8067
1992/93	196,8	1967/68	45	7,91%	1,09	3,8067
1993/94	106,5	1956/57	44	7,51%	1,08	3,7842
1994/95	100,2	1968/69	44	7,51%	1,08	3,7842
1995/96	58,3	1981/82	42,7	6,99%	1,08	3,7542
1996/97	35,5	1971/72	39	5,59%	1,06	3,6636
1997/98	444,2	1970/71	37	4,88%	1,05	3,6109
1998/99	70,6	1996/97	35,5	4,38%	1,05	3,5695

NÚMERO DE DATOS	90
CAUDAL MAXIMO MEDIO (m³/s)	193,1
MEDIANA	4,93073
DES VÍO ESTÁNDAR	0,79667

Respecto al fenómeno de transporte en el río San Juan, la aplicación del método lognormal descripto permitió determinar los caudales máximos probables, los períodos de retorno correspondiente a cada valor y logaritmo natural de los diferentes gastos máximos del registro (tabla 7). Se consignaron el número total de datos $n = 90$, con los siguientes resultados: el caudal máximo promedio $Q_{max} = 193.1$ m³/seg, la media (4.93073) y desviación estándar (0.79667) de la transformación logarítmica realizada.

En la Figura 3 se representan gráficamente las distribuciones lognormal de los caudales diarios máximos probables determinados, de los caudales instantáneos máximos probables calculados y de los caudales diarios máximos anuales de la base de datos; el gráfico es doble logarítmico, figurando los períodos de retorno en el eje de las abscisas y sus gastos correspondientes en el de las ordenadas.

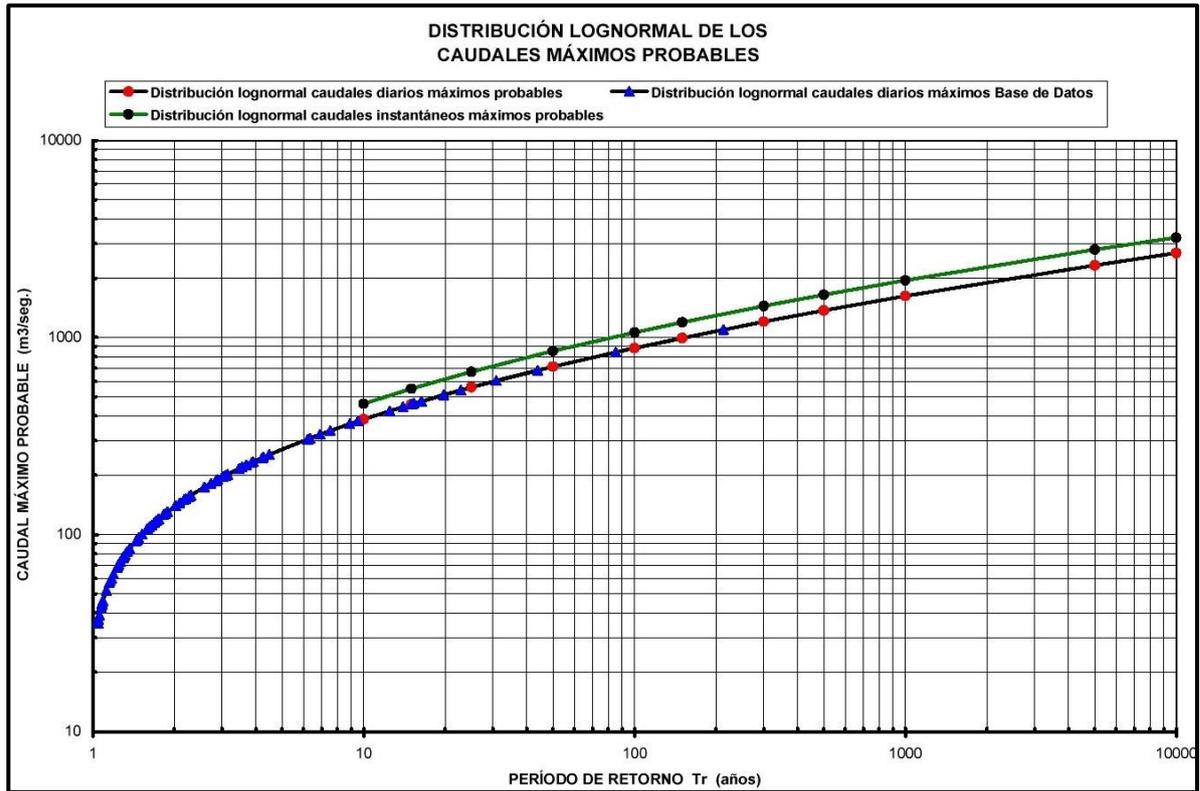


Figura 3.- Distribución Lognormal caudales máximos probables. (Fuente: Elaboración propia).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación de los forzantes de la metodología de Gavrilovic – Zemljic, temperatura y precipitación, se realizó mediante la herramienta Microsoft Excel, en los cinco puntos geográficos de la cuenca del Rio San Juan para los periodos 1980-2010, 2015-2039, 2075-2099; considerando un análisis de la media climática a partir de un cálculo de las condiciones durante un período de 30 años, se analizó estadísticamente un total de datos $n= 19.440$, provistos por la Base de Datos Climáticos de la 3ra. Comunicación Nacional sobre Cambio Climático y el Servicio Meteorológico Nacional, considerando los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

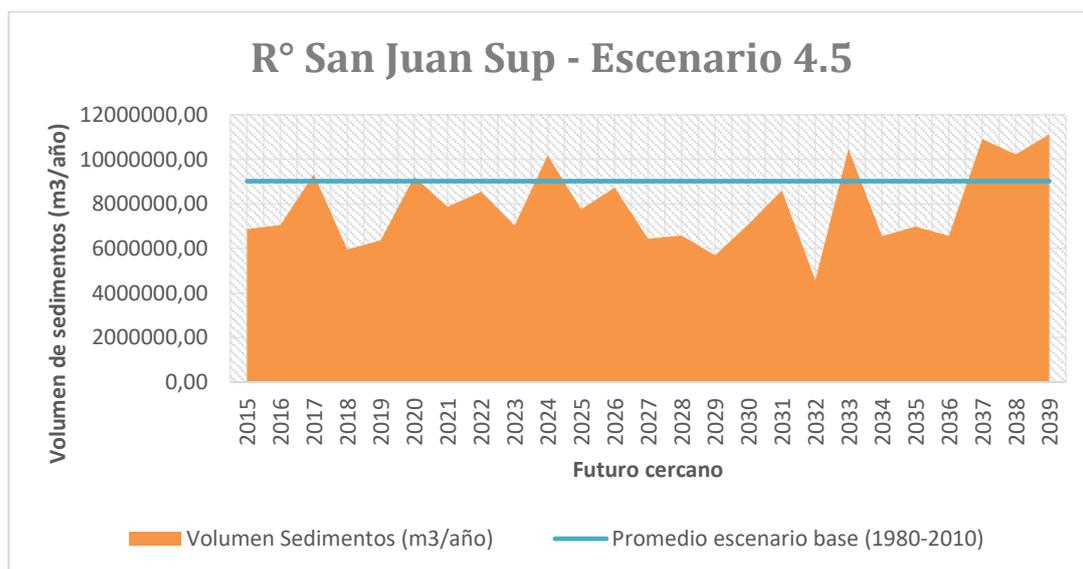
A raíz del análisis estadístico, se observó una variabilidad de los valores promedios de los diferentes puntos de trabajo, conforme a los periodos de análisis y las subcuenas mencionadas ut supra. Respecto a las precipitaciones se observan diferencias significativas en los valores máximos y mínimos. En cuenca del rio San Juan este hecho es notorio, donde el registro de precipitación media anual llegó a 2,5 mm/año en el año 2006, sobre la cuenca del rio Castaño, punto norte de análisis de este trabajo. Otro ejemplo es en el punto oeste, asociado a la cuenca del Rio Blanco, donde se

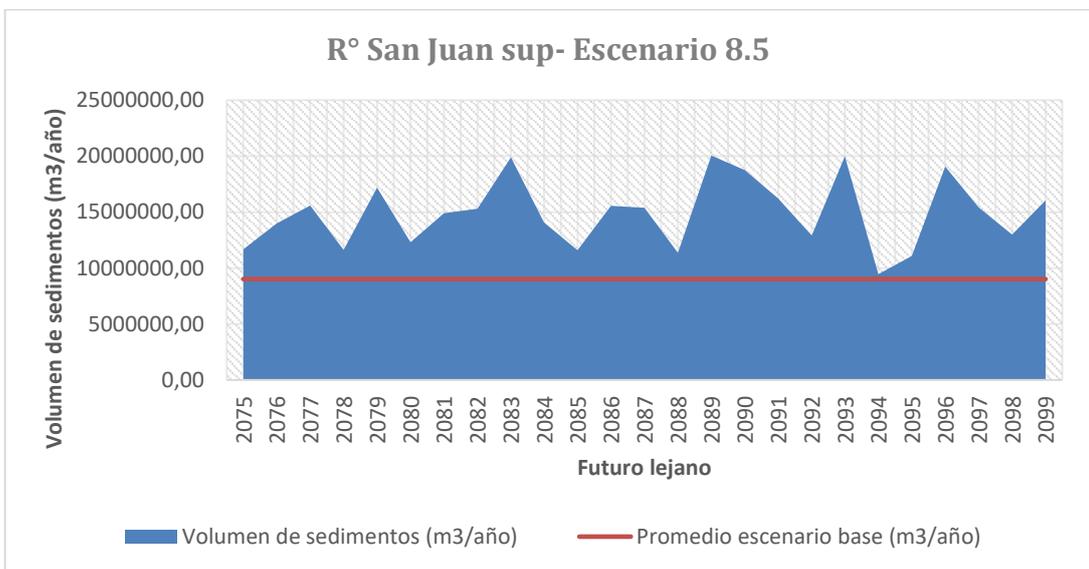
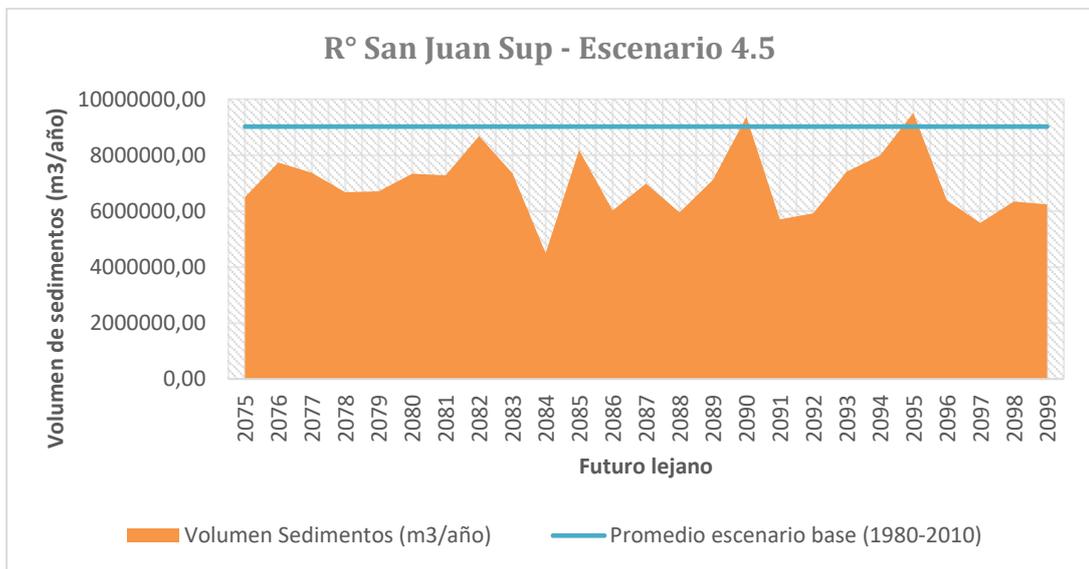
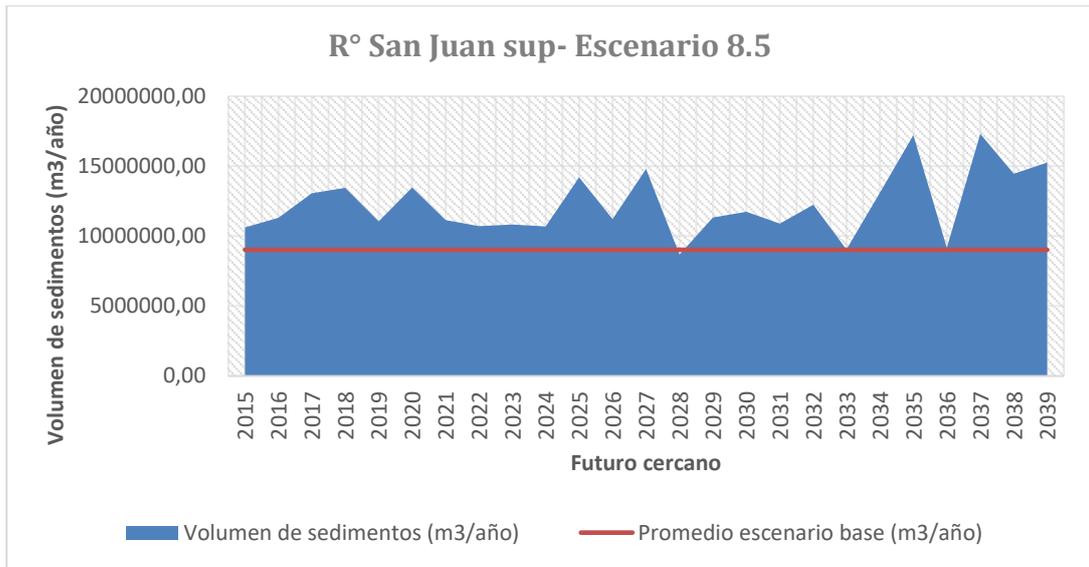
predice un incremento en las precipitaciones en los escenarios futuro cercano y lejano, con periodos de años de sequía con mínimas promedio de 4.13 [mm/año]. Si la tendencia mencionada continúa, se restringiría la disponibilidad de agua de riego necesaria para mantener los niveles actuales de la actividad vitivinícola y frutihortícola en sus oasis de riego que dependen del régimen de los ríos y sus aprovechamientos hidráulicos, como el valle de Tullum.

Con respecto a la variable temperatura, en el futuro cercano (2015-2039) se predicen condiciones climáticas ampliamente variables; en los puntos norte y oeste la temperatura mínima desciende, principalmente asociado al aumento de precipitaciones en forma de nieve durante el periodo invernal. Las condiciones climáticas en la cuenca, para el futuro lejano (2075-2099) sufren modificaciones considerables, tanto en precipitaciones, como en la temperatura, con un incremento en las mínimas y máximas anuales, lo que afectará significativamente la hidrología y comportamiento nival del río San Juan. Se observa en toda la cuenca un decrecimiento en la amplitud térmica diaria o rangos de temperaturas, dado principalmente por el incremento en la temperatura mínima diaria.

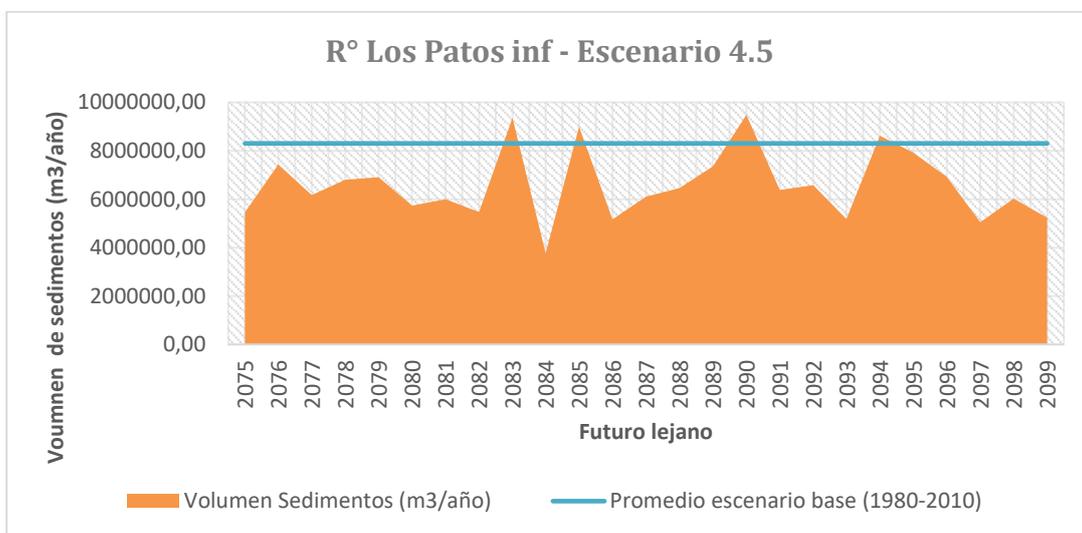
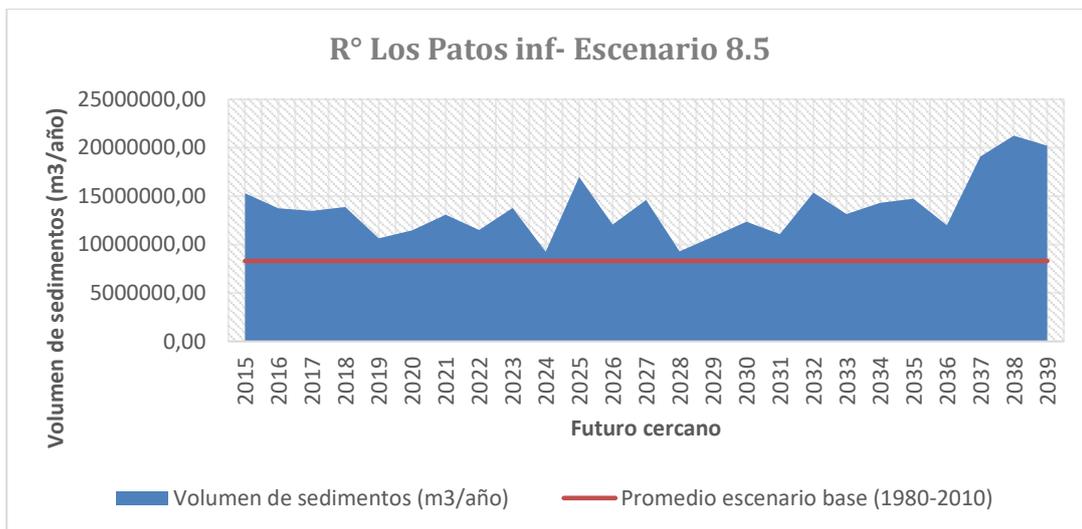
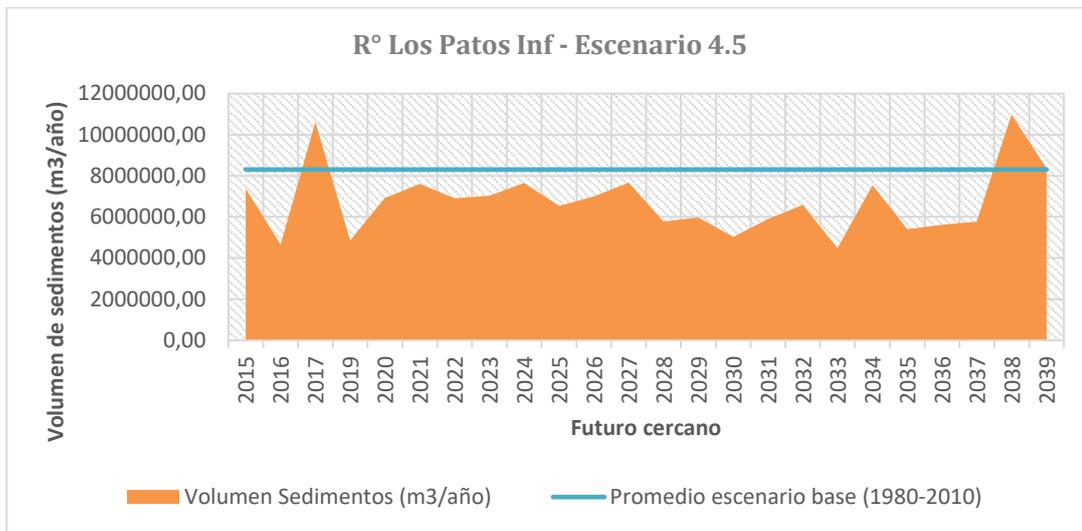
Los gráficos a continuación presentan para las diferentes subcuencas y periodos de análisis, los resultados obtenidos en la modelización para diferentes escenarios. Se denota el área naranja la producción media anual de sedimentos para RCP 4.5 y el promedio de escenario base (1980-2010) en línea azul, Mientras que el escenario RCP 8.5, se presenta la producción media anual de sedimentos en azul y el promedio de escenario base (1980-2010) en línea roja.

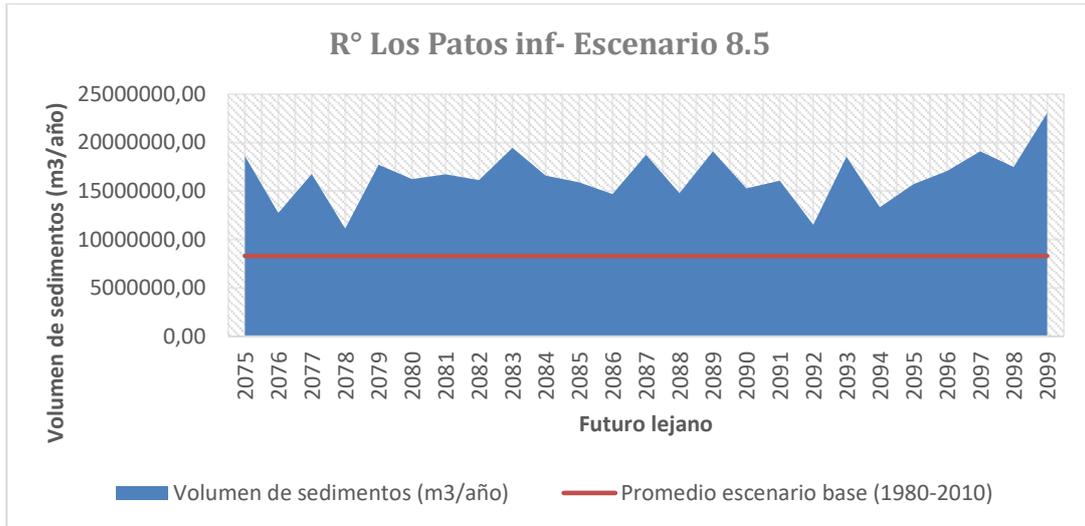
Subcuenca I : Rio San Juan superior



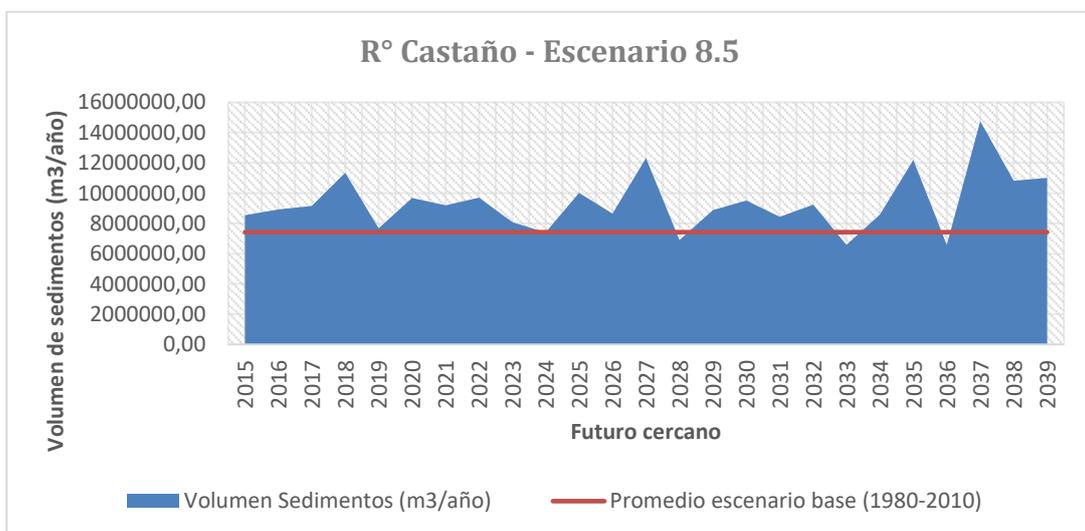
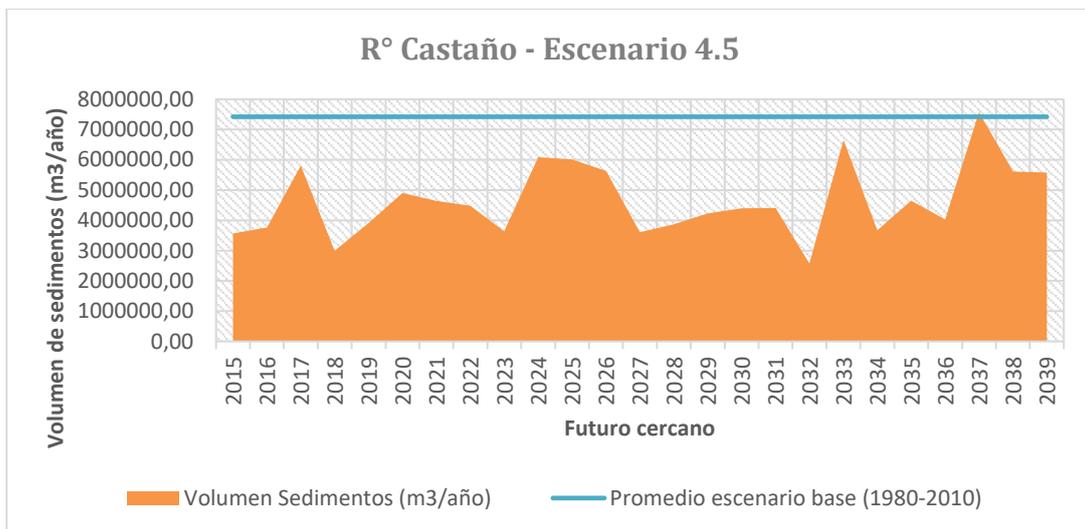


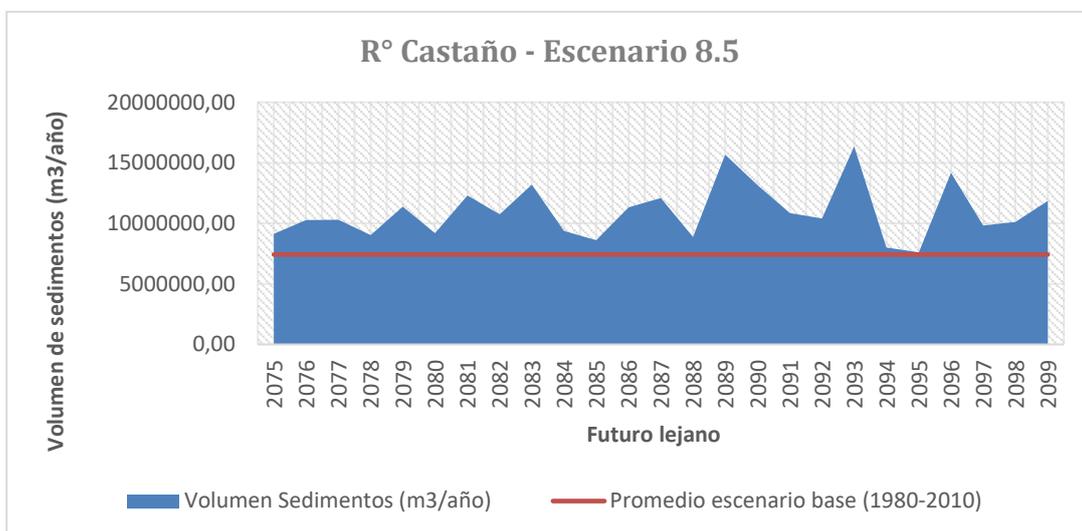
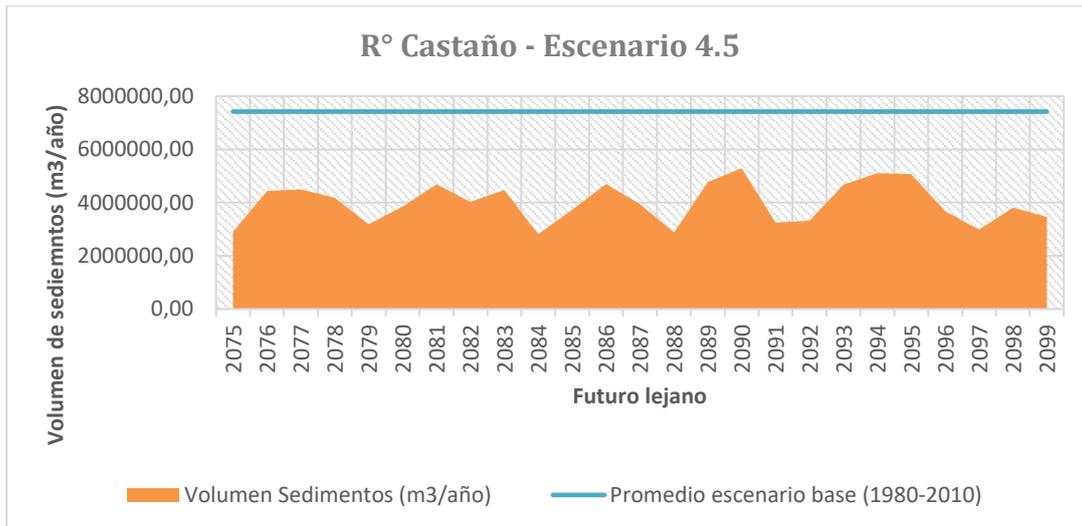
Subcuenca II – Río Los Patos inferior



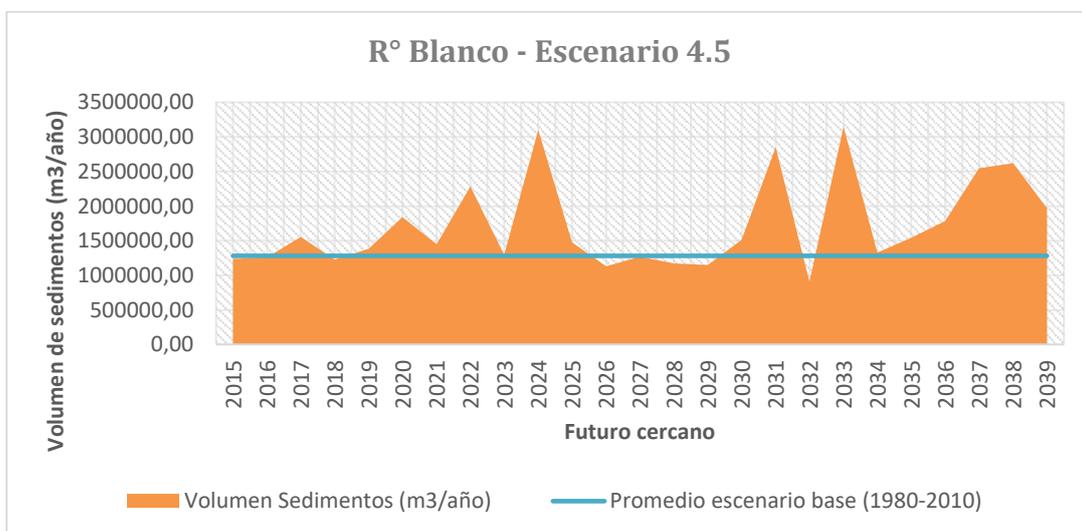


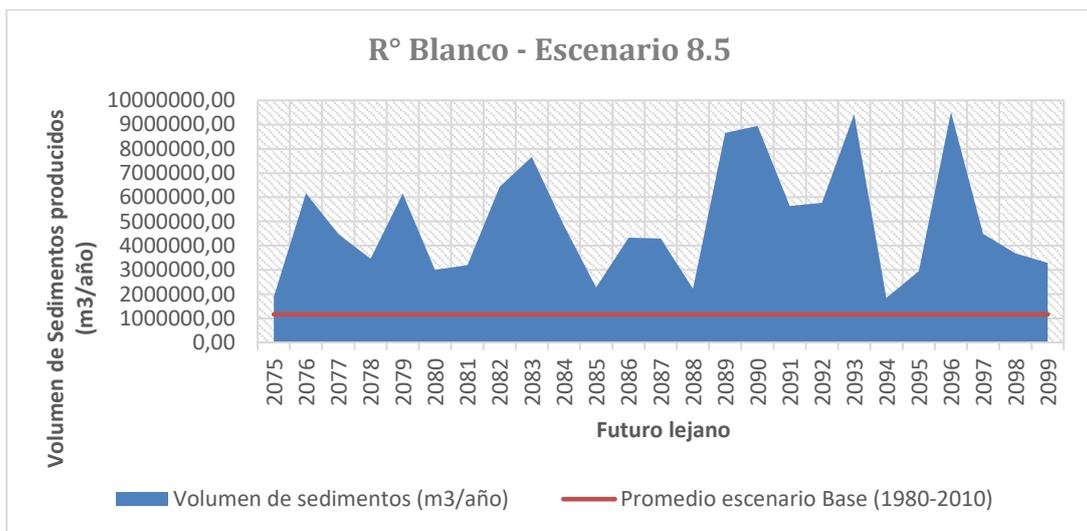
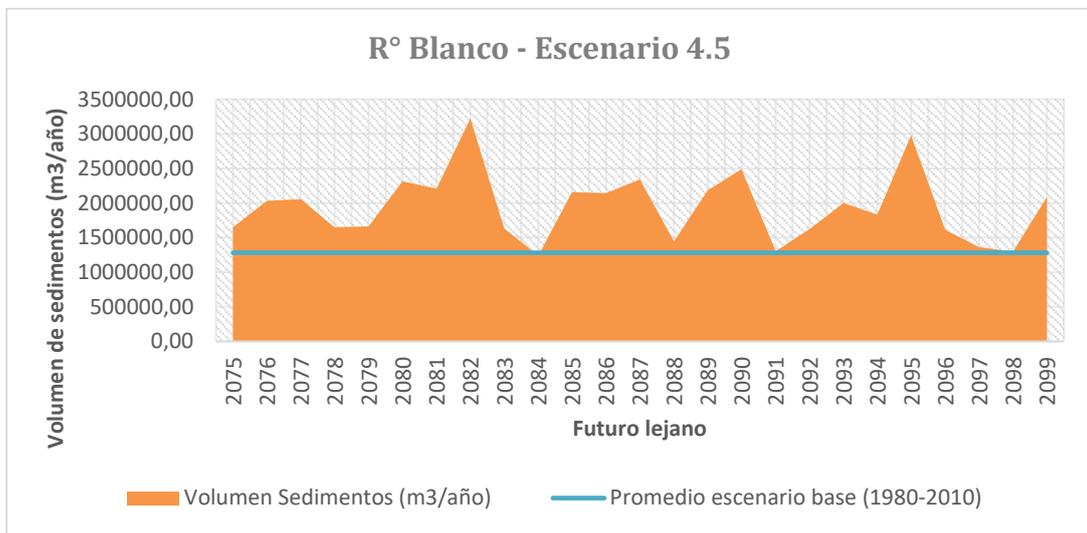
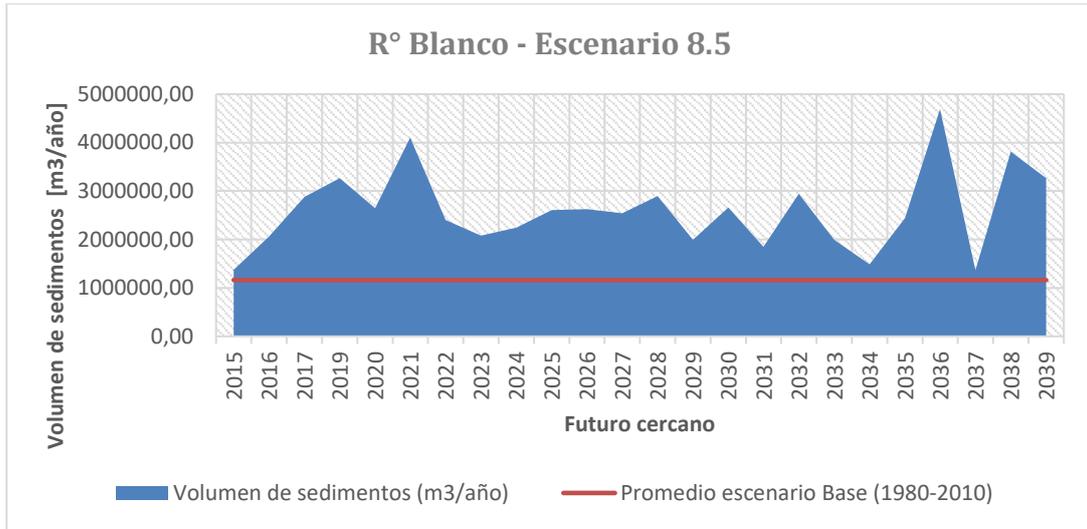
Subcuenca III – Rio Castaño



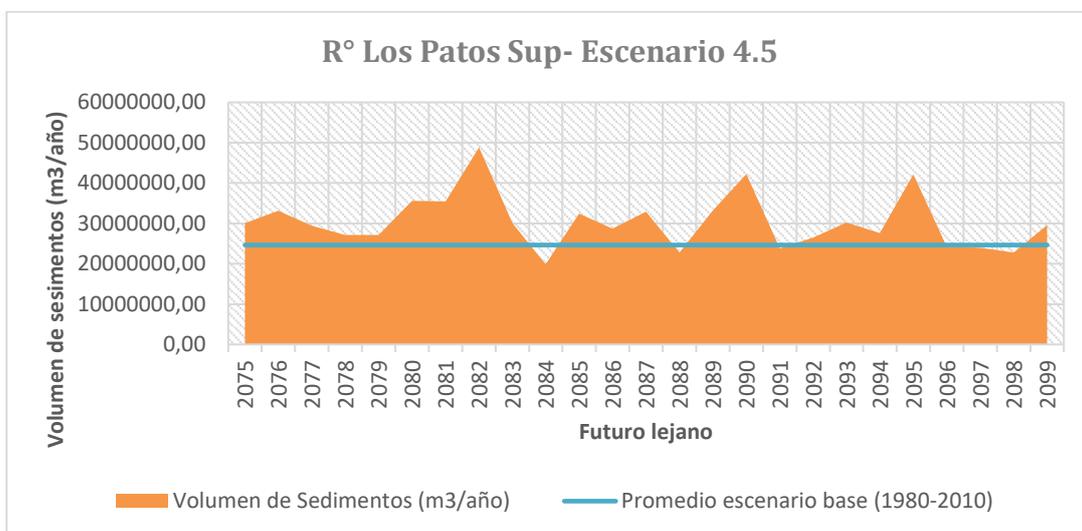
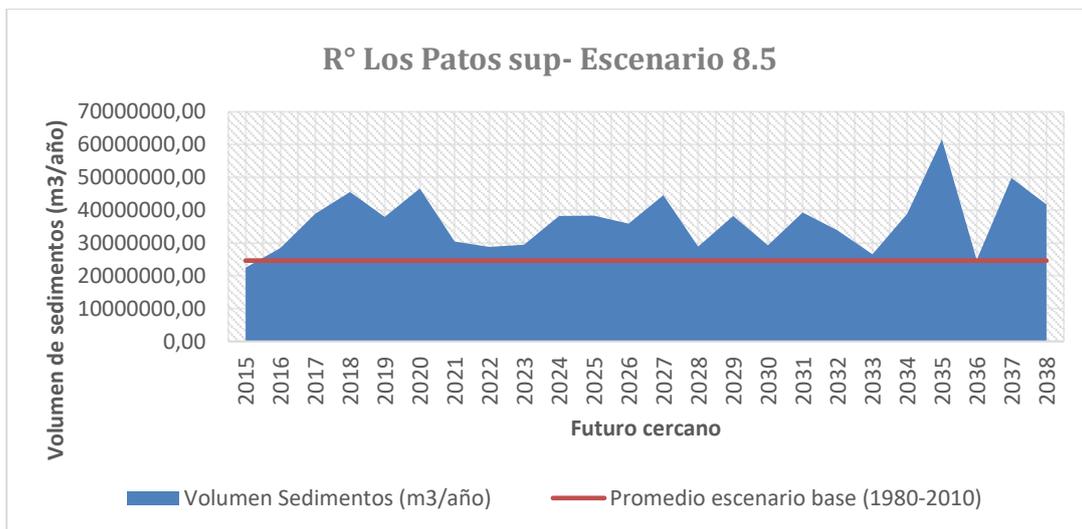
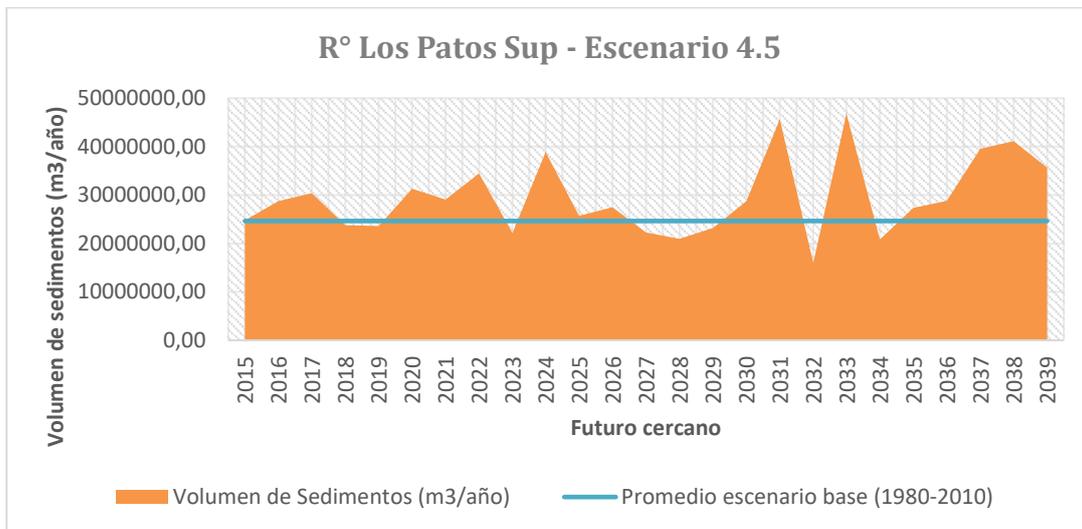


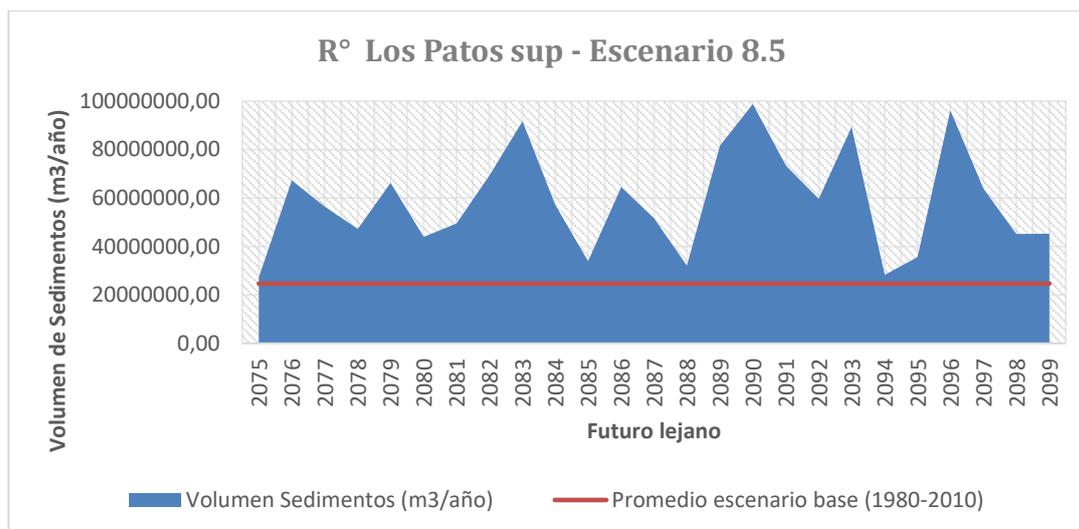
Subcuenca IV – Rio Blanco





Subcuenca V – Rio Los Patos Sup





Para comparar los cambios en la producción dentro de las distintas subcuencas, se determinaron los porcentajes de cambio, a partir de los promedios, en los escenarios futuro cercano 2015-2039, y futuro lejano 2075-2099 respecto a las condiciones históricas 1980-2010. Los valores promedio de generación de sedimentos, expresados en m³/año, evidencian que los subcuencas oeste y sur, con afluentes de mayor superficie y caudal de aporte, incrementarán la producción en un futuro cercano, periodo 2015-2039, en un 38.1% para el río Blanco y un 15.3% para el río los Patos. La producción disminuye en las otras cuencas de análisis, respecto al periodo de referencia actual 1980-2010, consecuencia de la disminución de las precipitaciones y el aumento de la temperatura.

Los resultados de la modelización realizada indican que, para las cuencas mencionadas en el párrafo anterior, en un futuro lejano (2075- 2099) la producción de sedimentos se incrementa considerablemente con un promedio del 151%, cuyas consecuencias de erosión, transporte y sedimentación afectarán de manera significativa todo uso consuntivo actual de la cuenca.

Finalmente, se denota que la modificación de los forzantes del modelo en los escenarios propuestos por el IPCC, traerá consecuencias negativas importantes en las cuencas del Río Blanco y Los Patos superior.

CONCLUSIONES

El incremento de sedimentos en la cuenca del río San Juan causará impactos ambientales tales como:

- a) Se acentúa el proceso de colmatación del embalse Los Caracoles, afectando el uso consuntivo directo e indirecto del recurso agua. Disminución de vida útil de la presa Caracoles, por aumento del volumen muerto.
- b) Menor generación de energía hidroeléctrica, debido a menor volumen de agua embalsada. (menor valor de Q). En consecuencia, se afectará la generación de energía hidroeléctrica de la provincia de San Juan, y en consecuencia a la oferta energética del país.
- c) La acumulación de sedimentos en el embalse Los Caracoles modificará la calidad del agua de riego, incrementando la conductividad eléctrica, con escenarios de salinidad media 750 a 2250 micromhos/cm a condiciones de salinidad alta 2250 a 4000 micromhos/cm.
- d) Sin una gestión integral del riego, en un futuro cercano el aumento de la conductividad eléctrica generará un proceso de salinización del suelo, con escenarios de desertificación leve a moderada.
- e) Los eventuales cambios futuros en las variables forzantes, precipitación y temperatura, alteran la producción de sedimentos por erosión hídrica superficial en la cuenca del río San Juan. Mientras que, el fenómeno de transporte de sedimentos, determinado por el método probabilístico lognormal, se mantiene con cierta regularidad. Es decir, tan solo acentuará los procesos erosivos del cauce.
- f) El tratamiento estadístico de la información disponible, junto con la evaluación de los coeficientes en la metodología de Gavrilovic aplicados a la cuenca de estudio, muestran que este análisis puede ser profundizado y de extenderlo a otras cuencas de características similares.
- g) Ante los escenarios descritos en el presente trabajo para la operación, diseño y construcción de represas (existentes y en proyecto, como ser represa El Horcajo, prevista a inaugurarse sobre el río Los Patos para el año 2018-2019), deberá preverse la modelación de sedimentos.
- h) Los proyectos de embalses deben contemplar la producción y movilización de sedimentos en las cuencas, con la finalidad de adoptar diseños adecuados para los impactos de la sedimentación, especialmente en cuencas con tasas significativas de erosión como la cuenca del río San Juan.
- i) Estos resultados preliminares permitirán adoptar medidas y/o políticas hídricas en las presas asociadas a la cuenca, donde se inauguraron los dos últimos proyectos de envergadura, Los Caracoles en 2009 y Punta Negra en 2015.

Agradezco al CIMA/CONICET-UBA por la provisión de los datos climáticos de la 3ra. Comunicación Nacional sobre Cambio Climático y a los distintos organismos de referencia que brindaron información para llevar a cabo esta investigación.

REFERENCIAS

Brea, J.D.; Busquets, M.S., 1999 (1). Generación y transporte de sedimentos en la Alta Cuenca del río Bermejo. Impacto en la Hidrovía, Delta del Paraná y Río de La Plata. Informe de Avance N° 1. Informe LHA-177-01-99. PEA-FMAM-OEA-PNUMA. INA. Ezeiza, Argentina. Brea, J.D.; Busquets, M.S., 1999 (2). Análisis de la dinámica fluviomorfológica del río Bermejo Inferior. Informe de Avance N° 1. Informe LHA-178-01-99. PEA-FMAM-OEA-PNUMA. INA. Ezeiza, Argentina.

Brea, J.D.; Busquets, M.; Spalletti, P.; Pérez Ayala, P.; 1996. Consideraciones sobre los sedimentos transportados por el río Bermejo. XVI Congreso Nacional del Agua. San Martín de los Andes.

C. A. Grassi, “Riego y Drenaje”, INTA Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 1987.

Gary Nichols, 1999. “Sedimentology and Stratigraphy”. Second edition. Wiley-Blackwell.2009.

Gavrilovic, Z.,1988. The use of an empirical method (erosion potential method) for calculating sediment production and transportation in unstudied or torrential streams. In: International conference of river regime, 18–20 May. John Wiley and Sons, Wallingford, Chichester, pp. 411–422.

Gracia, J. Capítulo 17 de Manual de Ingeniería de Ríos: Pérdida de suelo en cuencas. UNAM, Instituto de Ingeniería. Serie 587. 1997.

Jiménez Espinoza, M., 1992 – “Manual de Operación del Programa AX.EXE; (Ajuste de Funciones de Distribución de Probabilidad)”, Centro Nacional de Prevención de Desastres. Área de Riesgos Hidrometeorológicos. México.

Procesos de erosión – Sedimentación en cauces y cuencas. Prólogo, pág. N° 8. Programa Hidrológico Internacional. Año 2010. UNESCO: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). <http://sig.segemar.gov.ar/>.

Simons, D. B. y Sentürk, F. Sediment Transport Technology: Water and Sediment Dynamics. Water Resources Publications, LLC. August 20, 1992.

Zemljic M. 1971. Calcul du debit solide. Evaluation de la vegetation comme un des facteurs antierosif. International Symposium Interpreevent, Villach, Austria.