



Análisis Diagnóstico Transfronterizo (ADT) y Programa de Acciones Estratégicas (PAE) para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Plata, RECURSOS HIDRICOS: Componente Sedimentos

Haroldo Juan Hopwood

6 de abril de 2015

1. Resumen

Sedimentación de los cuerpos y cursos de agua de la Cuenca: *que limita la capacidad de las vías navegables y de los puertos, genera importantes costos de mantenimiento, colmata los embalses de las presas y modifica la calidad de sus aguas. Estos problemas derivan de la creciente erosión y la degradación de la tierra, que se han incrementado por los cambios en el uso del suelo y la pérdida de cobertura vegetal.*

Como aportes para la actualización se dispone de: (1) los informes nacionales de diagnóstico con información existente sobre uso y degradación de la tierra, proyectos, cartografía y publicaciones existentes (con similar desarrollo para los 5 países de la cuenca); (2) un documento integrado con identificación de áreas degradadas críticas; (3) mapas de uso actual de la tierra y tipos de suelo, así como un mapa estimativo de producción de sedimentos (erodabilidad); (4) un diagnóstico de la degradación de la tierra en la Selva Misionera Paranaense y propuesta de proyecto para el PAE; y (5) un inventario de buenas prácticas y tecnologías de uso y manejo sustentable de suelos. Con especial énfasis se considera este tema en el Proyecto Piloto Demostrativo “Control de Contaminación y Erosión en el Río Pilcomayo”.

Entre los principales resultados de los trabajos realizados se destacan los siguientes:

- La mayor producción específica de sedimentos proviene del sector andino de la cuenca que abarca un sector Este del altiplano de Bolivia y puna de Argentina y las Sierras Subandinas. Las fuentes de sedimento más destacables son las Altas Cuencas de los Ríos Bermejo y Pilcomayo.
- El río Bermejo descarga un caudal medio anual de 446 m³/s y 100 millones de toneladas/año de sedimentos en suspensión en el río Paraguay. Los sedimentos de este río son la causa principal de la necesidad de clarificación de agua para consumo de las ciudades hasta el río de la Plata y es el origen de la sedimentación de canales transversales en el valle del río Paraná y de los canales navegables y accesos a puertos en el río de la Plata.
- El río Pilcomayo tiene un caudal medio anual de 203 m³/s y un aporte anual de sedimentos del mismo orden de magnitud que el Bermejo, pero no dispone de suficiente energía para transportar su carga sólida hasta el río Paraguay.
- La concentración media anual de sedimentos de la cuenca del Plata (150 mg/L) es moderada para un río de una cuenca en zona tropical pero es un parámetro decisivo para la potabilización del agua de los ríos y en la sedimentación de canales de navegación con velocidades muy bajas (debajo de 30 cm/s)
- En los afluentes del Pantanal de río Paraguay son registrados valores máximos de la Concentración Media Anual “CMA” de 500 mg/litro, lo que corresponde a una erosión media de 146 tn/km²/año en cuencas de un área media de 17000 km².



- En la Zona Sudoeste próximo a la frontera con Argentina, que abarca los tramos medios e inferiores de los afluentes de margen izquierda del río Paraná desde el Paranapanema hacia aguas abajo y una parte sustancial de la cuenca del río Uruguay, la CMA se encuentra en el entorno de 100 mg/l y la producción específica de sedimentos es del orden de 95 tn/km²/año.
- El material sólido de la cuenca del río Bermejo ha sido medido en 6030 kg/m³ como valor medio anual mientras los mayores arrastres registrados correspondientes a los meses de máximos caudales, diciembre a febrero, alcanzaron un pico de 39200 kg/m³ en el Alto Bermejo.
- La carga sólida del río Bermejo alcanza en su mayor parte, los ríos Paraguay y Paraná y es el responsable de los sedimentos depositados en los canales navegables del curso. Es asimismo, una de las principales causantes del progresivo avance del delta del río Paraná en el Río de la Plata.
- Los cambios en la temperatura y precipitación se manifestarán en variaciones en las tasas de producción y transporte de sedimentos de las cuencas de los ríos Bermejo y Pilcomayo. Hay una tendencia a mantener las tasas actuales para los próximos 30 años, y un decrecimiento para el período 2041-2070 en ambas cuencas, con mayor importancia en la cuenca del río Pilcomayo. Para el Futuro Lejano, hay una leve tendencia a aumentar las tasas en el caso de la cuenca del río Bermejo y sin tendencia clara en la cuenca del río Pilcomayo.
- El aumento de la producción de sedimentos pronosticado implica un aumento del riesgo de cambios morfológicos en el cauce del río Bermejo inferior y un aumento en los costos de clarificación del agua en las plantas de agua potable en todo el recorrido fluvial hasta el río de la Plata, y un aumento de los volúmenes de dragado en canales transversales del Paraná, canales del río de la Plata y en los puertos y accesos a puerto.

Análisis Diagnóstico por Subcuenca.

Se realizó un diagnóstico individual de las 7 subcuencas más destacables con respecto a las fuentes de sedimento en la Cuenca del Plata. El análisis se enfocó en la identificación de los principales temas críticos ligados a la producción y el transporte de sedimentos. Sobre la base de este análisis, las principales subcuencas que requieren de atención serían las siguientes:

- Subcuenca del río Pilcomayo: la producción de sedimentos de la alta cuenca del río Pilcomayo (ACRP) es algo mayor que la del río Bermejo, mas esta carga es depositada en bañados del cono aluvial del Pilcomayo en la planicie chaqueña y consecuentemente no llegan a descargar en el río Paraguay - Paraná. Ha sido identificados procesos fluviales transfronterizos conflictivos vinculados a la temática hídrica: a) uso del agua en una zona con déficit hídrico, b). la morfología cambiante del cauce debido a la erosión y transporte de sedimentos, c) pesca y fauna ictícola particularmente la migración de sábalo desde la cuenca baja hacia la cuenca alta; y d) riesgo de contaminación debido a la minería en la alta cuenca proveniente de pasivos ambientales y actividades contemporáneas. La sedimentación total del cauce hasta niveles superiores a la planicie de inundación es uno problema morfológico que afecta la gestión de la cuenca. Consecuentemente los caudales del río desbordan sobre la planicie formando nuevos bañados con periodicidad anual.
- Subcuenca del río Parapetí: nace en la cordillera oriental de las sierras subandinas y forma un abanico aluvial de varias decenas de kilómetros cuadrados en Bolivia y Paraguay. Su cauce permanente actual se derrama en el bañado de Izozog, que desagua al Mamoré, un tributario del Amazonas. Pero durante la temporada de lluvias se produce una importante transfluencia que forma el río Timané, que corre hacia el Este y desemboca en el río Paraguay. En años



excepcionalmente húmedos, los bañados rebalsan y alimentan las nacientes del río San Julián, que aguas abajo se transforma en el río San Pablo, para finalmente desembocar en el río Iténez en la frontera con el Brasil.

- Subcuenca del río Bermejo: El aporte sólido del Bermejo al Paraná constituye cerca del 75 % del total de dicho río, porcentaje que crece si se consideran las últimas décadas, debido a la ejecución de presas en Brasil. El aporte de limos y arcillas constituyen el 90% de los finos transportados al Paraná, los que sedimentan predominantemente en el Río de la Plata. La zona de mayor actividad fluviomorfológica es el Río de la Plata Superior, contiguo al Delta, y el monto anual de limos y arcillas dragados en los canales de navegación en el Río de la Plata equivalen al 23% del aporte total del Río Bermejo. Se identifican medidas de manejo en la Alta Cuenca del Bermejo que afecten sustantivamente la cantidad de los sedimentos generados para el conjunto de la cuenca. Las zonas más productoras de sedimentos de la Alta Cuenca del Bermejo no están afectadas significativamente por acciones antrópicas actuales, pero problemas puntuales de producción de sedimentos en la cuenca podrían resolverse mediante medidas estructurales y/ o no estructurales.

Principales Recomendaciones:

En términos generales, las principales recomendaciones que surgen del análisis desarrollado son los siguientes:

- Revisión y extensión del mapa de producción específica de sedimentos a la totalidad de la cuenca del plata
- Mantener y reforzar las comisiones técnicas para el monitoreo y estudio permanente de la producción y el transporte de sedimentos
- Mantener y reforzar las comisiones técnicas para el monitoreo y realización de mediciones de campo de las alteraciones de cauce en planimetría y altimetría
- Se recomienda investigar con mayor detalle las posibilidades técnicas y económicas de intervenciones estructurales y no estructurales en la red de drenaje de las cuencas afluentes al río Bermejo, así como posibles técnicas de mitigación de la erosión de carácter difuso.

2. Agradecimientos

Se agradece la paciente y abnegada labor de revisión desarrollada por Diogo Buarque y sus valiosos aportes al trabajo desarrollado. También se agradece a los autores de las excelentes referencias sin las cuales no hubiera sido posible la realización del presente trabajo.

3. Introducción

El estudio y la comprensión del componente sedimentos dentro del contexto del ciclo hidrológico de una cuenca es un dato para la gestión del uso sustentable de los recursos naturales. La componente sedimentos aborda la producción, transporte y deposición de los sedimentos. Consecuentemente interviene en forma relevante en la dinámica morfológica de los cauces en la provisión de agua potable, agua para riego, en la navegación y el mantenimiento de las vías navegables o hidrovías, obras de cruce



de los ríos, y en la vida útil de los embalses de presas hidroeléctricas. La escala de estos procesos es continental o subcontinental como puede observarse en la figura S01, de modo que al tener en cuenta los límites entre los países inevitablemente se pueden producir situaciones donde la componente sedimentos puede incidir en los problemas transfronterizos. Adicionalmente en el caso de los ríos aluviales son los formadores de su propio cauce. Asumiendo que en las eras geológicas antecedentes los cauces han alcanzado un estado de equilibrio, frente a cambios naturales o por acción antrópica de caudales líquidos y sólidos es dable esperar cambios fluvio-morfológicos, como consecuencia de los desbalances en el transporte de sedimentos. Si bien es obvio que general los cambios morfológicos ocurren en una escala de tiempo milenaria o geológica que imperceptible a simple vista. En las Refs 30 S.A.Schumm, 1977, The Fluvial System y Ref 31 L.B.Leopold, M.G.Wolman,y J.P.Miller, 1964 Fluvial Processes in Geomorphology se describen los procesos evolutivos de la geomorfología fluvial con una gran calidad conceptual y una gran abundancia de ejemplos. En la cuenca del Plata la mayor producción específica de sedimentos proviene del sector andino de la cuenca que abarca un sector Este del altiplano de Bolivia y puna de Argentina y las Sierras Subandinas. Esta región aporta sedimentos finos mayormente limo cuarzoso e illita que son transportados a la planicie chaqueña por los ríos Bermejo , Pilcomayo, Parapetí (Figura S01) y otros ríos menores como el río Caraparí/Iruya, Tartagal y Seco. [Ref 33 : UNL 2000 Cap 1 Iriondo et al] . Los ríos Caraparí/Iruya, Tartagal y Seco son subcuencas endorreicas, dado que tienen valores bajos de caudal medio anual y consecuentemente descargan en la planicie chaqueña en general sin conexión con la red de drenaje de los ríos principales de la cuenca.

Es bastante frecuente que se haga referencia a los ríos como accidente geográfico permanente en los tratados de límites entre los países, ver por ejemplo la Ref Dr.A.Becerra, 1997 “Acuerdos de Límites” Instituto de Historia del Parlamento, Argentina, donde se han recopilado tratados que hacen referencia a los ríos Paraná, Paraguay, Pilcomayo, Uruguay y de la Plata entre otros. Una hipótesis implícita en la mayoría de los acuerdos de límites es que los ríos serían accidentes geográficos fijos en el espacio, o sea permanentes en el tiempo. Un ejemplo de un río que presenta variaciones anuales significativas es el río Pilcomayo que en la actualidad recorre parte de la frontera entre Argentina y Paraguay. La zona fronteriza entre Argentina y Paraguay coincide con un abanico fluvial de deposición que se indica en la siguiente figura entre el río Pilcomayo y Puerto Pilcomayo. Esta configuración del sistema fluvial es una fuente potencial de temas conflictivos en la administración de usos del agua y del territorio. Esta situación ha sido contenida mediante la creación de comisiones con actividad permanente.

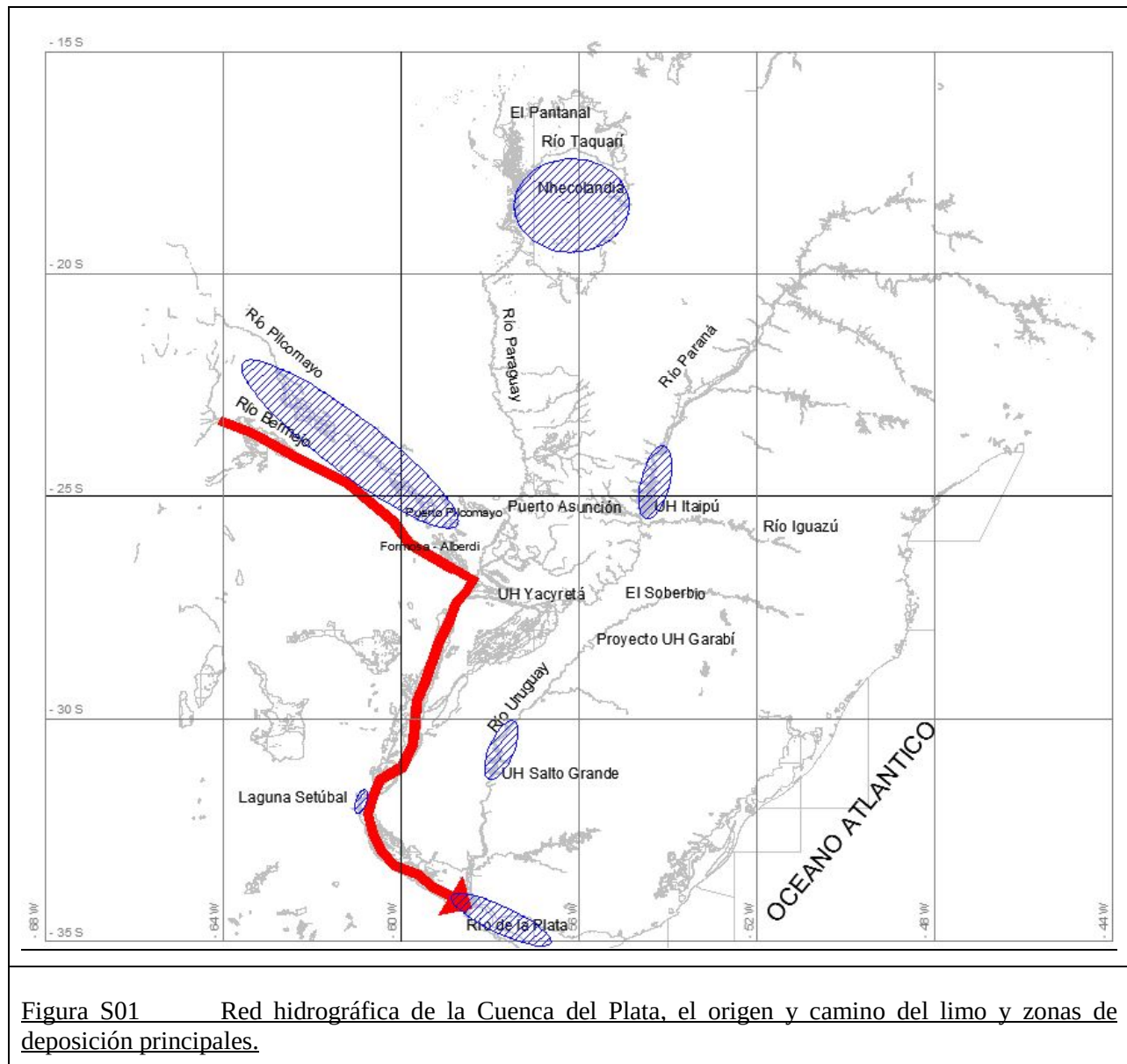
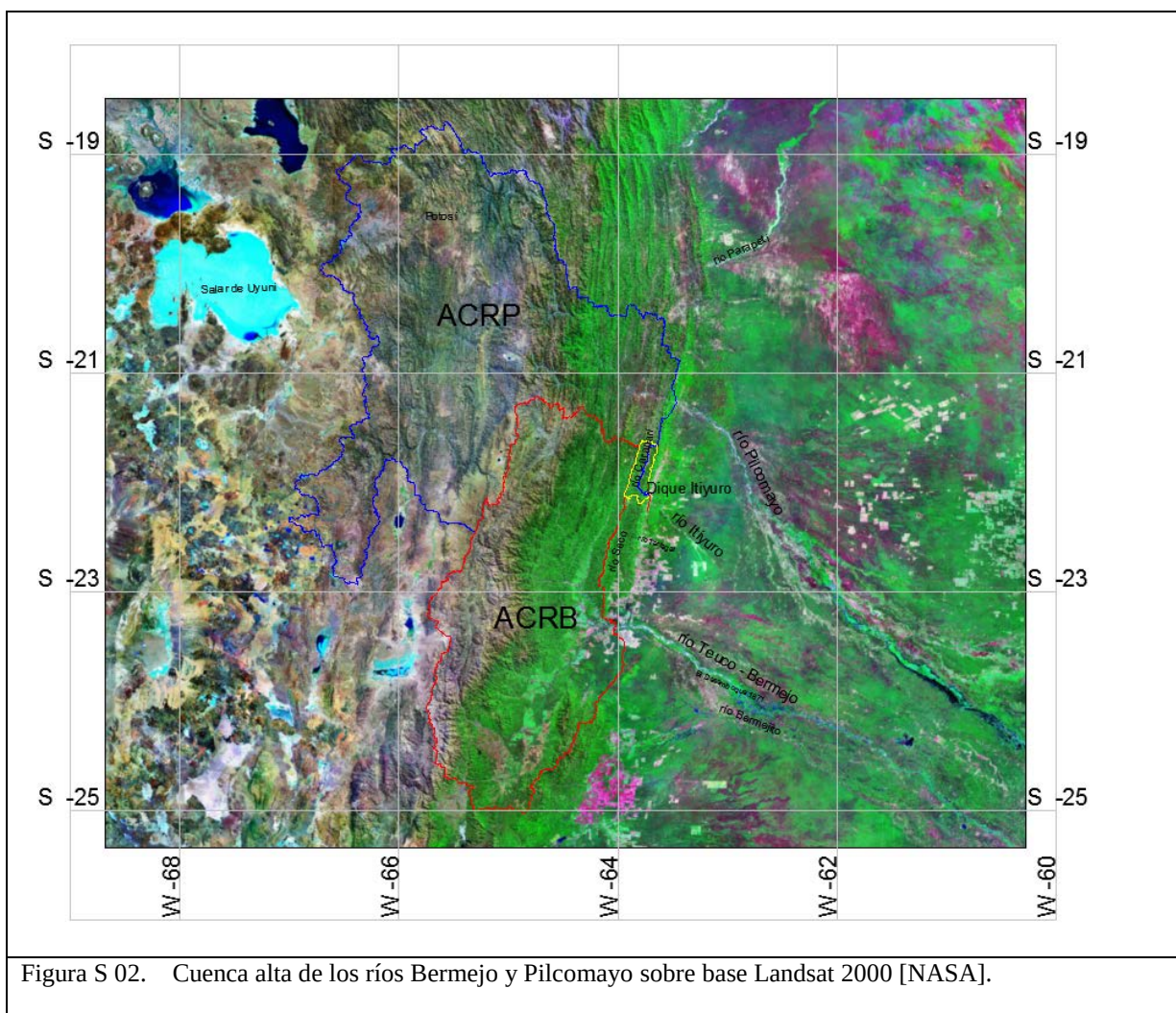


Figura S01 Red hidrográfica de la Cuenca del Plata, el origen y camino del limo y zonas de deposición principales.

En la cuenca del Plata las fuentes de sedimento mas destacables son las Altas Cuencas de los Ríos Bermejo y Pilcomayo. Ello se debe a que este sector comprende las sierras subandinas que se encuentran entre la puna a 4000 metros de altura y el borde de la planicie chaqueña que se encuentra a unos 400 metros sobre el nivel del mar. Cabe destacar que la alta cuenca del Pilcomayo se encuentra en el altiplano en su mayor parte mientras que en el caso del Bermejo la mayor parte de la cuenca corresponde a las sierras subandinas. Ello explica la diferencia entre los caudales medios anuales de ambas cuencas.



Se observa que los ríos que bajan del altiplano y las sierras subandinas no siempre logran descargar sus caudales líquidos y sólidos en la red de los cauces principales de la cuenca del Plata. El río Bermejo com um caudal medio anual de 400 m³/s y 100 millones de toneladas/año de transporte de sedimentos logra descargar caudales líquidos y sólidos en el río Paraguay pero com incidentes como el cambio de cauce de 1871. En es evento Soldano Ref 01 informa que el Bermejo abandono su viejo cauce que en la actualidad se denomina Bermejito y adopta un nuevo cauce el Teuco que se conecta al viejo cauce en las proximidades de Fortín Lavalle donde en la actualidad se encuentra el puente de la Ruta Nacional 5.

Los sedimentos del río Bermejo son la causa principal de la necesidad de clarificación de agua para consumo de las ciudades hasta el río de la Plata. Tambien es el origen de la sedimentación de canales transversales en el valle del río Paraná y de los canales navegables y accesos a puertos en el río de la Plata.



En el caso del río Pilcomayo con un caudal medio anual de $210 \text{ m}^3/\text{s}$ y un aporte anual de sedimentos del mismo orden de magnitud que el Bermejo, no dispone de suficiente energía para transportar su carga sólida hasta el río Paraguay. Esta situación se resuelve mediante el depósito de los sedimentos en los bañados de la planicie chaqueña en las proximidades de la frontera entre Argentina y Paraguay. Evidentemente el aporte sólido anual de aproximadamente $110 \times 10^6 \text{ tn/año}$ necesariamente implica cambios morfológicos en los cauces, cuerpos de agua y en la altimetría de la planicie de inundación a escala anual.

En el caso del río Parapetí com um caudal medio anual evaluado em $63 \text{ m}^3/\text{s}$ solamente descarga caudales líquidos a la cuenca del Amazonas en años lluviosos y alcanzaría a desbordar hacia el río Paraguay en ciclos muy ricos.

4. Un punto de partida en 1733

En 1733 Pedro Lozano publicó un mapa del cartógrafo Petroschi Sculp que se reproduce en la figura S02. El mapa se presenta en coordenadas geográficas con latitudes en grados respecto del ecuador y longitudes en grados con respecto a una referencia que no se indica. Se muestran los ríos Bermejo, Pilcomayo y Parapetí y en general un sector de los ríos Paraguay y Paraná entre el río de la Plata y la región de Chiquitos. Es de interés notar que en el mapa y en el texto de la Ref 34 hace referencia a la desembocadura del Bermejo en una posición que coincide aproximadamente con el río de Oro o Gaycurú actual. En el tramo inferior del río Pilcomayo muestra una bifurcación en la latitud 23° . El brazo Norte desemboca frente a Asunción y el brazo Sur en latitud aproximadamente Sur 25.7° . La bifurcación es el indicio de un río que está formando un delta o cono de deyección, o sea una geoforma asociada a la deposición de sedimentos que en general es poco común en el interior de una cuenca.

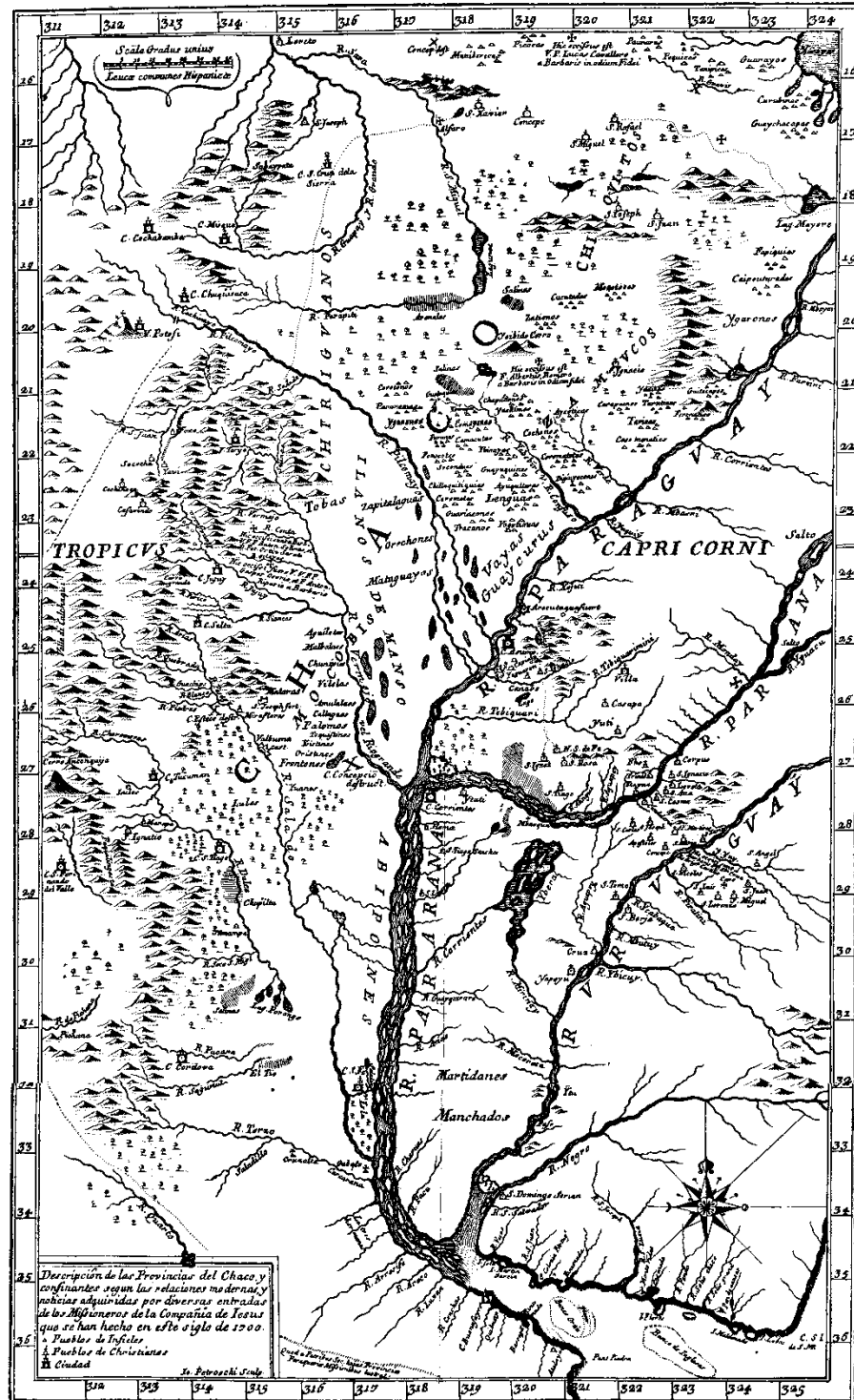


Figura S 03. Mapa de Sculp publicado por el padre jesuita Pedro Lozano en 1733.



5. Tamaños de partículas

En la cuenca del Plata el universo de sedimentos erosionados se encuentran diámetros o tamaños variables desde rodados grandes con diámetros de varios metros en las serranías a miles de metros sobre el nivel del mar (msnm), pasando por rodados, gravas, arenas hasta limos y arcillas en el Río de la Plata. Se considera que las arcillas son partículas de diámetros menores de cuatro micrones (cuatro milésimas de milímetro). Se considera que las arcillas tienen diámetros equivalentes en el rango de 1 a 4 micrones. En estado granular en la práctica estas partículas son un talco en polvo que se puede remover con un leve soplido de aire sobre una muestra seca. En realidad este polvillo es tan fino que en un ambiente húmedo absorbe humedad con tanta rapidez que cambia significativamente el peso de una muestra.



Figura S04 Rodado de aproximadamente cuatro a cinco metros de diámetro en el río San Andrés en las serranías del Zenta en la cuenca alta del río Bermejo a 3500 msnm, Salta, Argentina.

El rodado de la figura S01 tiene un diámetro de orden de 4 metros y un peso en aire superior a 100 toneladas, dado que el peso es $P = \rho_s \cdot \pi/6 \cdot d^3$ con densidad normal, correspondiente a rocas graníticas y areniscas, del orden de $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$. En el caso de las rocas basálticas del escudo brasileño subyacente en el Río de la Plata y en las provincias de Entre Ríos, Corrientes y Misiones, Uruguay y Sur de Brasil corresponde usar $\rho_s = 2800 \text{ kg/m}^3$. En Salta estos rodados son transportados en ríos con pendientes superiores a 5% m/m con flujos densos; por ejemplo $\rho_d = 1300 \text{ kg/m}^3$ en cuyo caso el peso del rodado se reduce significativamente (50%) por el principio de flotación de Arquímedes.

$$P_A = (\rho_s - \rho_d) \cdot \pi/6 \cdot d^3.$$

En el caso de los sedimentos finos, o sea limos y arcillas, la densidad de los depósitos bajo agua y en aire también presenta un alta gama de variabilidad. Ello se debe al volumen de vacíos en los depósitos en el lecho de los cauces, que además puede resultar variable en la función del tiempo.

En relación al estudio y aprovechamiento de los recursos hídricos se distinguen las siguientes etapas conceptuales en el ciclo del sedimento : producción, transporte y depósito de sedimento. Esta secuencia de procesos puede acontecer varias veces en una misma cuenca dando lugar a los procesos morfológicos característicos de los ríos que afectan a la infraestructura en general y el uso del agua para suministro de agua a poblaciones y para riego o irrigación.



6. Producción de sedimentos

Las primeras fórmulas de producción de sedimentos fueron desarrolladas con vistas a cuantificar la pérdida de suelo (y consecuentemente de productividad) en zonas agro ganaderas con vistas a cuantificar los impactos de la erosión sobre la producción del sector agrícola.. Nos referimos aquí al USDA Winschmeir y Morton [Ref] y a la fórmula universal de pérdida (o producción) de sedimentos USLE y modificaciones posteriores descriptas por S. Rafaelli en la Ref [] . Los procesos físicos que los autores consideraron fueron la erosión superficial por impacto de las gotas de lluvia, y en situaciones más graves coalescencia de las corrientes de escorrentía produce la erosión por surcos y finalmente la erosión por cárcavas.

	
Figura S05 Erosión por cárcavas en Aguará, Salta. ACRB.	Figura S06 Erosión retrógrada en un arroyo de la serranía de Tartagal, Salta.

En las cuencas de montaña resulta necesario reconocer una clase adicional de producción de sedimentos que se denomina erosión en masa, aluviones o deslizamientos de taludes. Estos procesos erosivos alcanzan de mayor intensidad que la erosión por cárcavas. El producto de los deslizamientos de laderas en eventos de lluvias intensas suele ser colectado en la red de drenaje y forman crecidas de rodados lodos naturales y agua que en las provincias de Salta y Jujuy se denomina un “volcán”, en ocasiones se usa el término flujo de barro o flujo de detritos.

	
Figura S07 Zona de producción de sedimentos río San Andrés ACRB.	Figura S08 Zona de transporte de sedimentos río San Andrés ACRB.



La literatura internacional reconoce estos fenómenos como un “lahar”, se hace referencia a los flujos de detritos la publicación de Galay, Schreier y Brestbier 2001 [Ref 36] sobre los sedimentos de las Himalayas. En la Argentina la metodología y fórmula de Gavrilovic fue aplicado en la Cuenca del Plata por Brea, Spalletti et al Ref [] a las cuencas del Bermejo y Pilcomayo. Los procesos de erosión en masa en la cuenca Alta de río Pilcomayo ha sido presentado en muy buen detalle por E.Malagnino Refs [], [].

En las figuras S06 y S07 se observan casos típicos de erosión en masa de las Sierras de Tartagal y Aguara Güe en Salta.



Figura S09 Zona de producción de sedimentos río San Andrés ACRB.



Figura S10 Zona de producción de sedimentos río San Andrés ACRB.

La erosión en masa produce aportes de tal magnitud que da lugar a los escurrimientos de detritos o flujos de barro, y en algunos casos al taponamiento o endicamiento transitorio de los cauces. Ver por ejemplo O.Zevallos, M.A.Fernandez, G.P.Nieto y S.K.Sojos Reporte sobre el desastre de la Josefina – Ecuador, 1993.

7. Escalas de la erosión y transporte de sedimentos en la Cuenca del Plata

Desde el punto de vista de su escala la cuenca del Plata se encuentra entre las diez o veinte cuencas más grandes del mundo, como se desprende puede observarse en la siguiente tabla adaptada de la Ref 18, Jansen, van Bendegom, van den Berg, de Vries, Zanen, 1979. Según este ordenamiento la cuenca del Plata figura en un destacable cuarto lugar, luego de los ríos/cuencas del Amazonas, Mississippi y Congo. La concentración media anual de sedimentos (CMA) informada es moderada para un río de una cuenca en zona tropical pero indudablemente es un parámetro decisivo para la potabilización del agua de los ríos y en la sedimentación de canales de navegación con velocidades muy bajas (debajo de 30 cm/s).



Orden #	Río	Area 10 ⁶ Km ²	Caudal (1) m ³ /s	Escorrentía mm/año	Transporte sedimento (2) 10 ⁶ ton/año	Erosión media 10 ⁻³ mm/año	CMA (3) mg/l
1	Amazonas	7.0	100000	450	900	90	290
2	Mississippi	3.9	18000	150	300	55	530
3	Congo	3.7	44000	370	70	15	50
4	La Plata/Paraná	3.0	19000	200	90	20	150
4	La Plata/Paraná (actualizado Ref 8)	3.1	18000	183	123	25	217
5	Ob	3.0	12000	130	16	4	40
6	Nilo	2.9	3000	30	80	15	630
7	Yenissei	2.6	17000	210	11	3	20
8	Lena	2.4	16000	210	12	4	25
9	Amur	2.1	11000	160	52	15	150
10	Yangtse Kiang	1.8	22000	390	500	200	1400
11	Volga	1.5	8400	180	25	10	100
12	Missouri	1.4	2000	50	200	100	3200
13	Zambesi	1.3	16000	390	100	50	200
14	San Lorenzo	1.3	14000	340	3	2	7
15	Niger	1.1	5700	160	40	25	220
16	Murray-Darling	1.1	400	10	30	20	2500
17	Ganges	1.0	14000	440	1500	1000	3600
18	Indus	0.96	6400	210	400	300	2000
19	Orinoco	0.95	25000	830	90	65	110
20	Orange	0.83	2900	110	150	130	1600
21	Danubio	0.82	6400	250	67	60	330
22	Mekong	0.80	15000	590	80	70	170
23	Hwang Ho	0.77	4000	160	1900	1750	15000
24	Brahmaputra	0.64	19000	940	730	800	1200
25	Dnjepi	0.46	1600	110	1.2	2	25
26	Irrawaddi	0.41	13000	1000	300	500	750
27	Rhin	0.36	2200	190	0.72	1	10
28	Magdalena (Colombia)	0.28	7000	790	220	550	1000
29	Vistula (Polonia)	0.19	1000	160	1.5	5	50
30	Kura (Rusia)	0.18	580	100	37	150	2000
31	Chao Phya (Tailandia)	0.16	960	190	11	50	350
32	Oder (Alemania /Polonia)	0.11	530	150	0.13	1	10
33	Rhone (Francia)	0.096	1700	560	10	75	200
34	Po (Italia)	0.070	1500	670	15	150	300
35	Tiber (Italia)	0.016	230	450	6	270	850
36	Ishikari (Japón)	0.013	420	1000	1.8	100	140
37	Tone (Japón)	0.012	480	1250	3	180	200
38	Waipapa (Nueva-Zelandia)	0.0016	46	900	11	5000	7500
Nota (1) Caudal medio anual Nota (2) Transporte medio anual Nota (3) Concentración media anual (CMA) Jansen, van Bendegom, van den Berg, de Vries, Zanen, 1979							
Tabla S 01 Listado de grandes ríos, adaptado de [Ref 17]							

Con relación a la escala de producción de sedimentos resulta ilustrativo hacer referencia a los valores considerados representativos por erosión superficial por surcos y cárcavas, la, para el sector Argentino de la cuenca del Plata. Se distinguen clases de erosión ligera (0 a 30 tn/ha/año) hasta erosión muy alta (mayor de 360 tn/ha/año), que se transcriben a continuación [Ref 27] FAO 1993 :

“... Zonas del sector argentino de la cuenca del plata agrupadas según su erosión potencial máxima teórica expresada en tn/ha/año

CLASE A - Erosión nula a ligera (0-30 tn/ha/año)

Cuenca del río Corrientes, esteros del Iberá.
Sector húmedo de la cuenca inferior del río Pilcomayo.
Sector semiárido de la cuenca inferior del río Pilcomayo
Zona de bañados del Chaco.
Zona de canales, ríos y arroyos al SE de la Provincia de Buenos Aires.
Cuenca de los ríos Salado y Samborombón.



*Interfluvio Bermejo- Pilcomayo al E de Salta y O. de Formosa.
Bajos submeridionales
Delta del Paraná
Sector húmedo de la cuenca inferior del río Bermejo.
Zona de bañados y afluentes al río Paraguay*

CLASE B - Erosión baja (31 - 60 tn/ha/año)

*Sector semiárido de la cuenca inferior del río Bermejo.
Cuenca inferior del río Salado, sector semiárido.
Albardón ribereño y antigua terraza del río Paraná.
Interfluvio Bermejo - Salado, región chaqueña occidental
Cuenca del río Santa Lucía, Corrientes.
Cuenca de los ríos Guayquiraró y Feliciano.
Terraza de río Uruguay.
Llanura Santafesino - Chaqueña
Zona pedemontana Tandilense*

CLASE C - Erosión moderada (61-120 tn/ha/año)

*Domo chaqueño occidental.
Llanura aluvial del río Uruguay
Domo oriental
Pampa llana Santafesina
Cuenca inferior del río Carcarañá
Cuenca de ríos y arroyos de la "Pampa Ondulada".
Cuencas de los ríos Gualeguay, Gualaguachú y afluentes
Cuenca de río Aguapey y sector E del río Miriñay
Cuencas de los ríos Mocoretá, Miriñay y afluentes del Uruguay.
Cuenca del río Nogoyá y centro-este de Entre Ríos.*

CLASE D - Erosión alta (121-360 tn/ha/año)

*Alta cuenca del río Pilcomayo
Cuenca superior del río Carcarañá
Región de campos correntina, arroyo Chimiray, Garabí y Yohazá
Zona intermedia pedemontana Chaco – Salteña*

CLASE E - Erosión muy alta (mayor de 360 tn/año)

*Cuenca superior del río Bermejo
Cuenca superior del río Juramento
Región selvática Misionera
..."*

La escala de la producción hídrica de sedimentos en el sector brasilero de la cuenca del plata se obtiene del mapa de producción específica de sedimentos de la Ref 14 IPH, Eletrobrás, Ministerio de Minas e Energía, 1992, Diagnóstico das condições sedimentológicas dos principais rios brasileiros a la totalidad de la cuenca del Plata.



En la región “oo” de las nacientes o “columna vertebral” del mapa de cuencas de producción de sedimentos la Ref 14 hace mención que los valores máximos de la Concentración Media Anual “CMA” de 500 mg/litro son registrados en los afluentes del Pantanal de río Paraguay. Este valor corresponde a una erosión media de 146 tn/km²/año en cuencas de un área media de 17000 km².

En la región S2 la CMA es del orden de 165 mg/l.

En la región S3, el Pantanal, que es una zona de deposición de sedimentos, se observa 143 tn/km²/año en el río Cuiabá, 12 tn/km²/año para el río Paraguay en Porto Esperanca valor que la Ref [14] considera representativo para el Pantanal en su conjunto. Las CMA observadas son del orden de 180 mg/l.

En la región S4, Zona Sudoeste próximo a la frontera con Argentina la cuenca abarca, los tramos medios e inferiores de los afluentes de margen izquierda del río Paraná desde el Paranapanema hacia aguas abajo y una parte sustancial de la cuenca del río Uruguay. La CMA se encuentra en el entorno de 100 mg/l y la producción específica de sedimentos es del orden de 95 tn/km²/año.

En resumen de las referencias 14 y 27 obtenemos producciones específicas entre 0 y 400 tn/km²/año pero cabe notar que los valores presentados en la [Ref 28] se refieren implícitamente a la erosión hídrica laminar por efecto erosivo de la lluvia y en la erosión en surcos y cárcavas. En el presente informe se hace referencia a producciones de sedimentos significativamente mayores a la “Clase E”. Dichos casos se deben a procesos de erosión en masa y se presentan en la Alta Cuenca del Río Bermejo, Alta Cuenca del Río Pilcomayo y Alta Cuenca del Río Iruya-Caraparí. Los casos Bermejo/Pilcomayo/Caraparí superan asimismo el rango de tasas de producción de sedimento “Q_s” de la Ref 24: Marcelo H.García, 2008, Sedimentation Engineering, Cap 12, Reservoir Sedimentation. Manual N° 110 ASCE. Los valores típicos resultan en el rango de 100 a 1000 m³/km²/año y el peso de la unidad de volumen en el rango de 1 a 1.6 tn/m³. En particular se hace referencia a Strand y Pemberton 1987 cuya correlación de datos para el Oeste de EEUU es :



$$Q_s = 1098 A^{-0.24} \quad \text{donde } Q_s \left[\frac{m^3}{km^2} / \text{año} \right] \quad A : [km^2]$$

8. Escala de tiempo de los cambios fluviomorfológicos

En general los parámetros fundamentales de las ecuaciones que representan los cambios fluviomorfológicos del perfil longitudinal de un río en una dimensión aumentan linealmente con la tasa de transporte. Consecuentemente los procesos morfológicos ocurren con mayor velocidad cuanto mayor es la tasa de transporte s . La celeridad de onda cinemática c_3 y el coeficiente de difusión equivalente “ K ” de la ecuación difusiva aumenta con el transporte s . Las demostraciones completas se encuentran en la Ref 18: Jansen, van Bendegom, van den Berg, de Vries, Zanen, 1979.

La celeridad característica de la onda morfológica depende linealmente de la intensidad de transporte.

$$c_3 = b \frac{s}{q(1 - F_r^2)}$$

El coeficiente de difusión K de los modelos difusivos también depende linealmente de la tasa de transporte.

$$K = \frac{1}{3} \frac{b s}{i_b}$$

donde :

- s : Tasa de transporte en volumen del lecho [m³/s]
- q : caudal específico [m²/s]
- b : exponente adimensional $b = 5$ para arena mediana
- F_r : número de Froude de la corriente.
- i_b : pendiente de fondo [m/m]

Como consecuencia de lo expuesto resulta que cuanto mayor es la producción de sedimentos, mayor es la velocidad de los cambios fluvio morfológicos.

9. Análisis Diagnóstico Transfronterizo (ADT) de sedimentos en la Cuenca del Plata

El transporte transfronterizo de sedimento existe dado que los límites entre los países fueron trazados por razones históricas y no por un criterio de cuencas hídricas. Consecuentemente los ríos que cruzan fronteras o tienen tramos compartidos presentan la oportunidad y el desafío de aplicar criterios de administración y en su caso uso equitativo del recurso entre países vecinos.



Es un hecho público y notorio que la cuenca del río Bermejo es la fuente de los sedimentos que brinda su color o turbidez característica a las aguas del río Paraná y Río de la Plata.

La turbidez de las aguas que se mide en unidades nefelométricas [NTU] (ver <http://es.wikipedia.org/wiki/Nefel%C3%B3metro>) es un buen índice del contenido de sedimentos en suspensión medido en miligramos cada litro [mg/l] o lo que es lo mismo partes por millón [ppm]. En la figura S 02 se presenta un ejemplo de correlación típica entre turbidez y concentración de sedimentos suspendidos en el río Paraná en el Km 601 de la vía navegable.

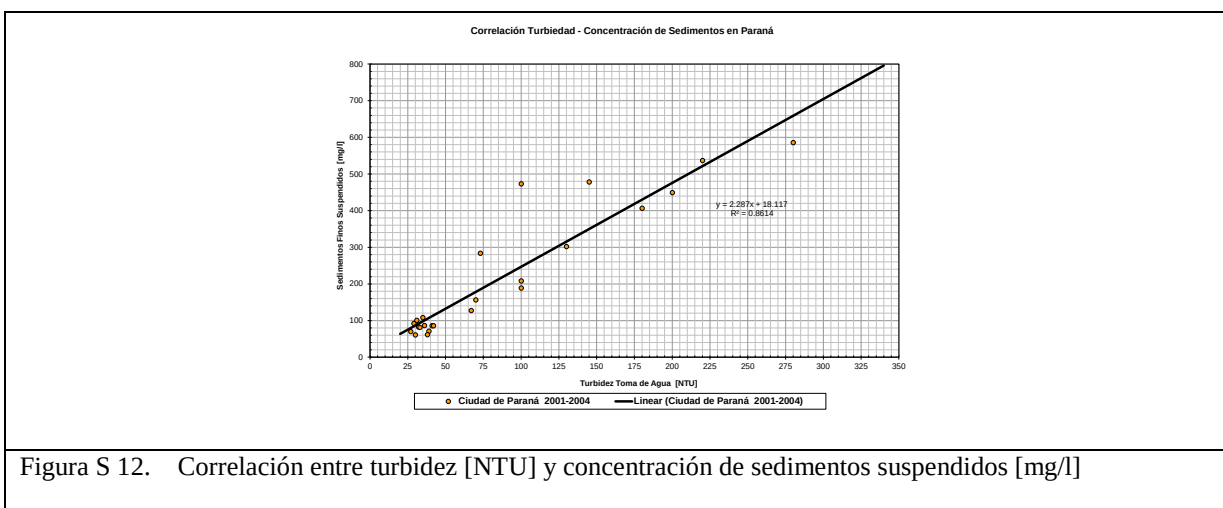


Figura S 12. Correlación entre turbidez [NTU] y concentración de sedimentos suspendidos [mg/l]

Ferruccio A. Soldano (1947) [Ref 01] en su libro “fundacional” de la ingeniería fluvial en Argentina, hace una referencia cuantitativa a la carga de sedimentos del Bermejo. Al respecto dice que “... ese material sólido ha sido medido en 6030 kg/m^3 como valor medio anual ... Los mayores arrastres registrados correspondientes a los meses de máximos caudales, diciembre a febrero, alcanzaron un pico de 39200 kg/m^3 en el Alto Bermejo...”. A la luz de las mediciones disponibles en la actualidad los valores que publicó Soldano son correctos en cuanto a su orden de magnitud.

Sobre el origen de los sedimentos ya Soldano (1947) y todas las publicaciones posteriores lo sitúan correctamente en la Alta Cuenca del Río Bermejo (ACRB). Sobre el destino final de dichos sedimentos la [Ref 03] OEA, 1974, dice acertadamente que “... Esta carga sólida alcanza en su mayor parte, los ríos Paraguay y Paraná. Es el responsable, en consecuencia, de los sedimentos depositados en los canales navegables del curso, que obligan a una continua labor de dragado. Es asimismo, una de las principales causantes del progresivo avance del delta del río Paraná en el Río de la Plata. ...”. Cuando se refiere a canales navegables esto se refiere a casos con velocidades muy bajas en el Río de la Plata y canales transversales en el valle de inundación del río Paraná. Dentro de la categoría de canales transversales se encuentran el riacho Barranqueras y el canal de acceso al puerto de Santa Fe. Resulta destacable que la producción de sedimentos por ejemplo de la cuenca del río Grande de Tarija y del río Iruya/Pescado, sea transportado aproximadamente dos mil kilómetros



para constituir el aporte principal del crecimiento del delta del río Paraná y el forzante de la sedimentación de los canales navegables del Río de la Plata.

10. ADT Río Paraguay

El Alto Paraguay comprende una zona de bañados y esteros denominados El Pantanal que una superficie del orden de 200000 Km² aguas arriba de Ladario (estación ANA # 668250000). Un sector importante del Pantanal es ocupado por conos aluviales que se origina en la Serra de São Lourenço, El cono aluvial del río Taquarí es el mayor, ver Ref 44 Gradella et al , 2011, Geomorfología de Nhecolandia.

En las cuencas afluentes del Pantanal en Nhecolandia se observan tasas de erosión muy elevadas. En la Ref 27 : N de Oliveira Carvalho, N. Pantoja Fitizola Júnior, P.M. Coutinho dos Santos y J.E. Furquim Werneck Lima 2000 Agência Nacional de Energia Elétrica, “Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios”, informan para la UH Itiquira la sedimentación del embalse a una tasa de 990775 tn/año y una vida útil de solamente 14 años.

Los elevados aportes de los referidos conos aluviales son retenidos totalmente en el Pantanal. Ello puede inferirse si se analizan las mediciones de Puerto Pilcomayo (fig S01) en el tramo inferior del río Paraguay, donde se observa una concentración media de sedimentos finos de aproximadamente 35 mg/l que es exigua para un río de una zona tropical. Las mediciones corresponden a un período de veinte años y a un amplio rango de caudales como puede observarse en la siguiente figura.

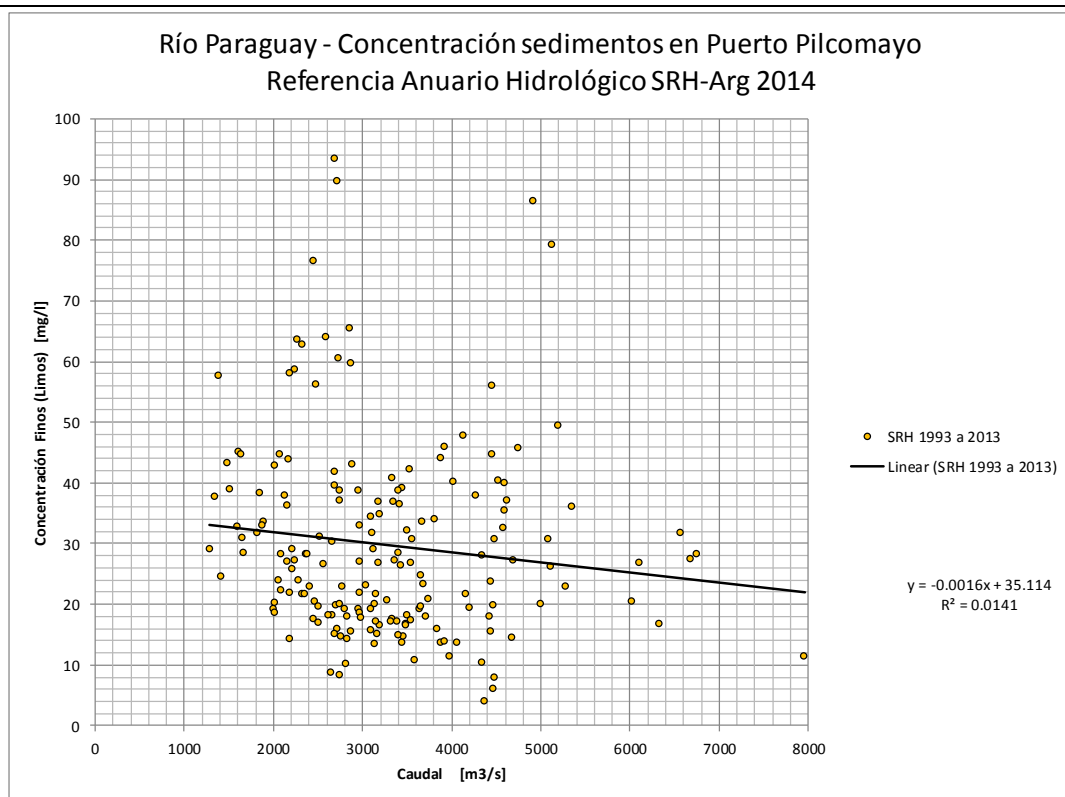


Figura S13 Concentración de sedimentos en Puerto Pilcomayo – río Paraguay

11. ADT Río Uruguay

El transporte sólido del río Uruguay ha sido evaluado en base a estudios y mediciones Garabí – Garruchos y ha sido comprobado mediante el funcionamiento del embalse de la presa de Salto Grande. Se hace referencia a la referencia “ Estudios de sedimentación en el embalse de Salto Grande. Caracterización del funcionamiento hidrosedimentológico. Héctor Prendes, José Huespe, Silvina Mangini, Ismael Piedra Cueva, Manuel Irigoyen, Douglas Simonet y Eduardo Zamanillo, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), Universidad Nacional del Litoral (UNL, Argentina), Instituto de Mecánica de Fluidos y Ingeniería Ambiental (IMFIA), Universidad de la República, Uruguay. primera Etapa 2003 y segunda Etapa 2005.

Los cálculos realizados permiten estimar una tasa de depositación de $21 \text{ Hm}^3/\text{año}$. Esta cifra significaría aproximadamente el doble de la estimada en 1998, y seis veces superior a la prevista por el proyecto antes de la ejecución de la obra. La densidad de los depósitos finos (limos finos) sobre cuatro muestras resultó 545 kg/m^3 . La densidad de los depósitos de sedimentos finos es muy baja, a tal punto que los depósitos sobre las márgenes aguas arriba de Monte Caseros no soportan el tránsito de una persona de peso normal. Se recuerda que la densidad normal para arenas es de 1550 kg/m^3 (C.T. Yang 1996).



En el río Uruguay en su tramo alto se ha observado que el transporte de arenas medido (Ref 48) es substancialmente inferior al transporte de saturación calculado con la ecuación de transporte de Engelund Hansen cuya aplicabilidad a cauces con fondo de arena está fuera de discusión. Esto indicaría que el suministro de arena de la cuenca es insuficiente para cubrir el lecho fluvial. De hecho en zonas se observa el fondo rochoso de basalto. Se entiende que esta es una circunstancia natural debido a la geomorfología de la cuenca, pero de todos modos es un aviso sobre la necesidad de contar con redes hidrométricas y la necesidad de realización de mediciones de control de campo.

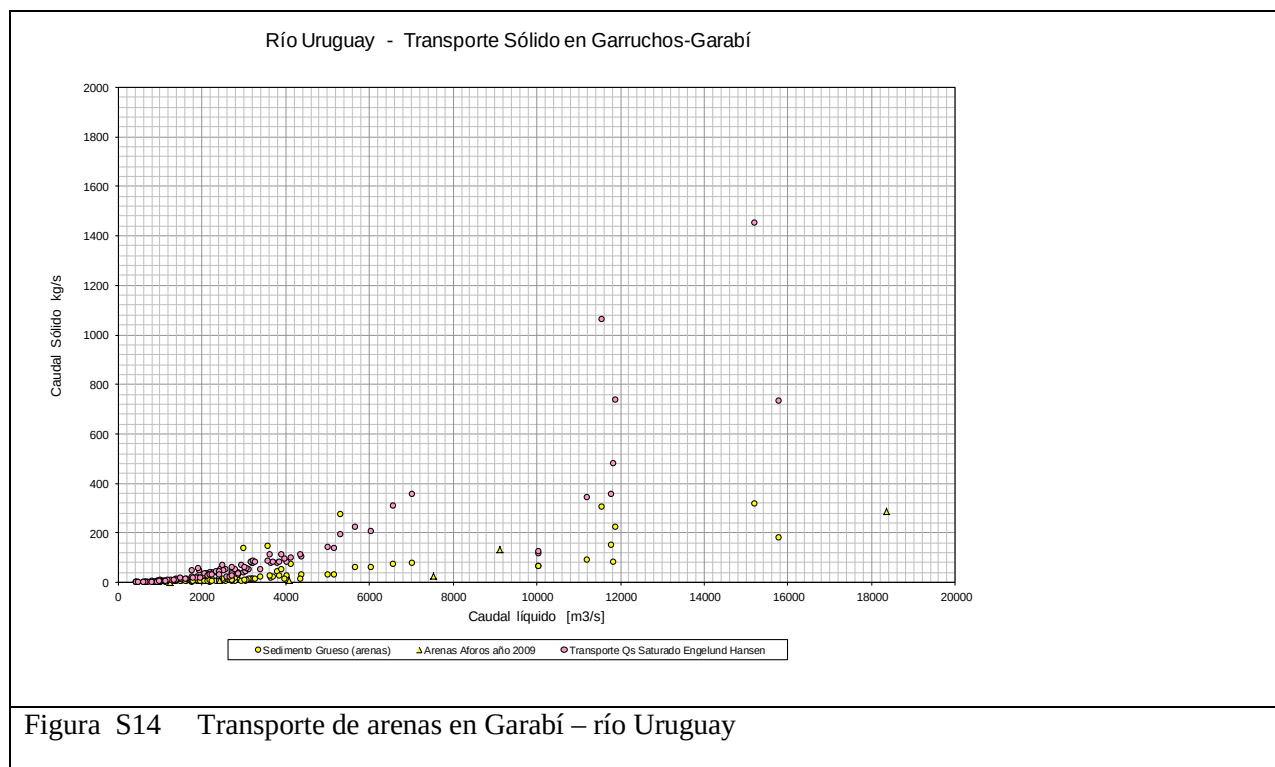


Figura S14 Transporte de arenas en Garabí – río Uruguay

12. ADT Alto Paraná

En la Ref 27 : N de Oliveira Carvalho, N. Pantoja Fitizola Júnior, P.M. Coutinho dos Santos y J.E. Furquim Werneck Lima 2000 Agência Nacional de Energia Elétrica, “Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios”, informan para la UH Itaipú un transporte sólido afluente de 30.788.845 tn/año de sedimentos en suspensión que es la producción de una cuenca de 812645 Km². Los sedimentos finos limo arcillosos constituyen el 80% y el 20% restante es de arena media. La vida útil informada para el nivel mínimo normal del embalse es 430 años.



La mayor parte de los sedimentos provenientes de la cuenca de Brasil aguas arriba de la UH Yacyretá son atrapados por la UH Itaipú y por las presas del río Iguazú. En este caso se ha evaluado que la vida útil total es 2800 años.

13. ADT Río Pilcomayo

Si bien la producción de sedimentos de la alta cuenca del río Pilcomayo (ACRP) es algo mayor que la del río Bermejo, esta carga es depositada en bañados del cono aluvial del Pilcomayo en la planicie chaqueña y consecuentemente no llegan a descargar en el río Paraguay - Paraná. En la siguiente figura se presenta el perfil longitudinal del río Pilcomayo entre el pie de las sierras Subandinas (Villamontes) hasta el río Paraguay.

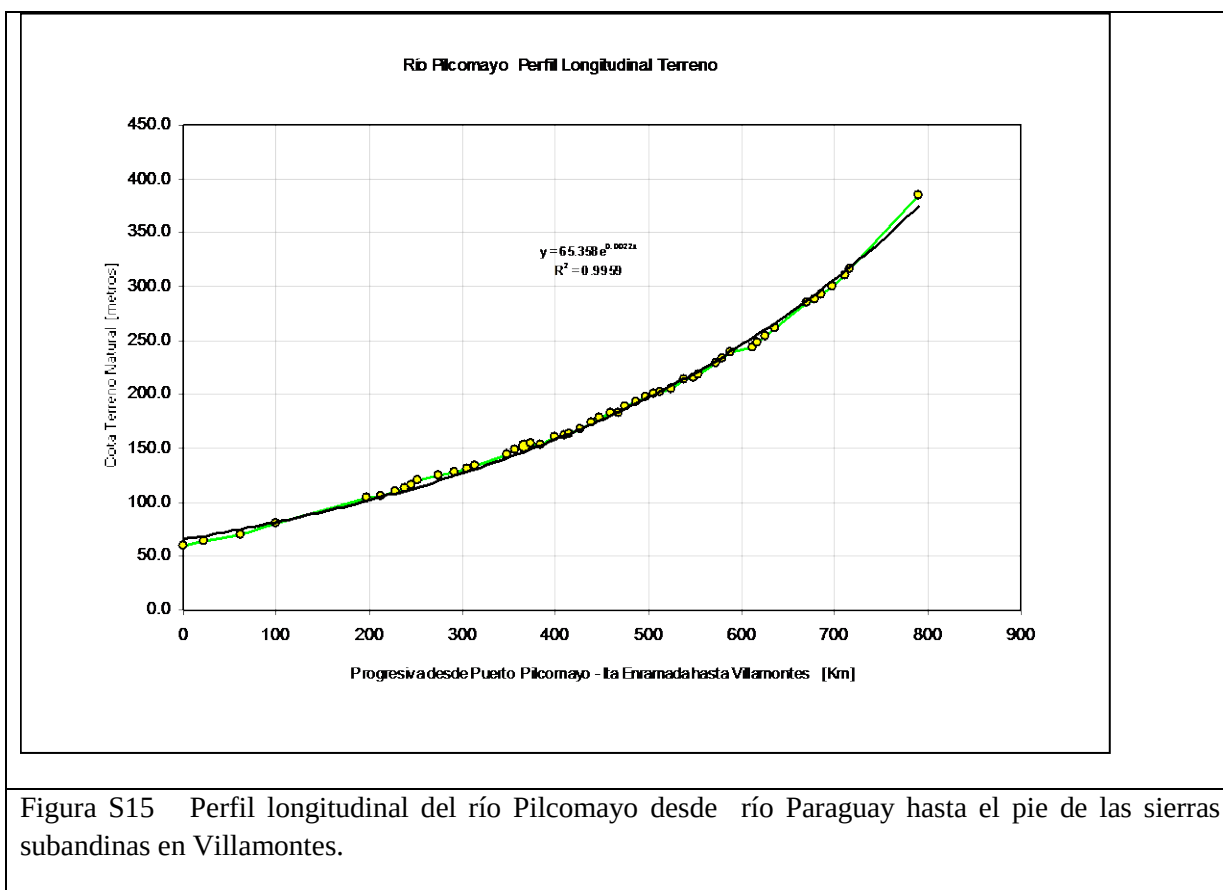


Figura S15 Perfil longitudinal del río Pilcomayo desde río Paraguay hasta el pie de las sierras subandinas en Villamontes.

El río Pilcomayo presenta una exhibición casi perfecta de procesos fluviales transfronterizos conflictivos vinculados a la temática hídrica. Los más destacados son 4.1) Uso del agua en una zona con déficit hídrico, 4.2). La morfología cambiante del cauce debido a la erosión y transporte de sedimentos, 4.3) Pesca y fauna ictícola particularmente la migración de sábalo desde la cuenca baja hacia la cuenca alta, 4.4). Riesgo de contaminación debido a la minería en la alta cuenca proveniente de pasivos ambientales y actividades contemporáneas.



La alta cuenca del Pilcomayo tiene fuertes pendientes la ausencia de cuerpos de agua reguladores naturales implica un hidrograma de caudales muy variable con una patrón estacional como puede observarse en la siguiente figura S13. Los caudales máximos en Misión La Paz alcanzan 5000 m³/s y en las bajantes de invierno – primavera los caudales mínimos descienden dramáticamente a valores que pueden llegar al del orden de 10 m³/s.

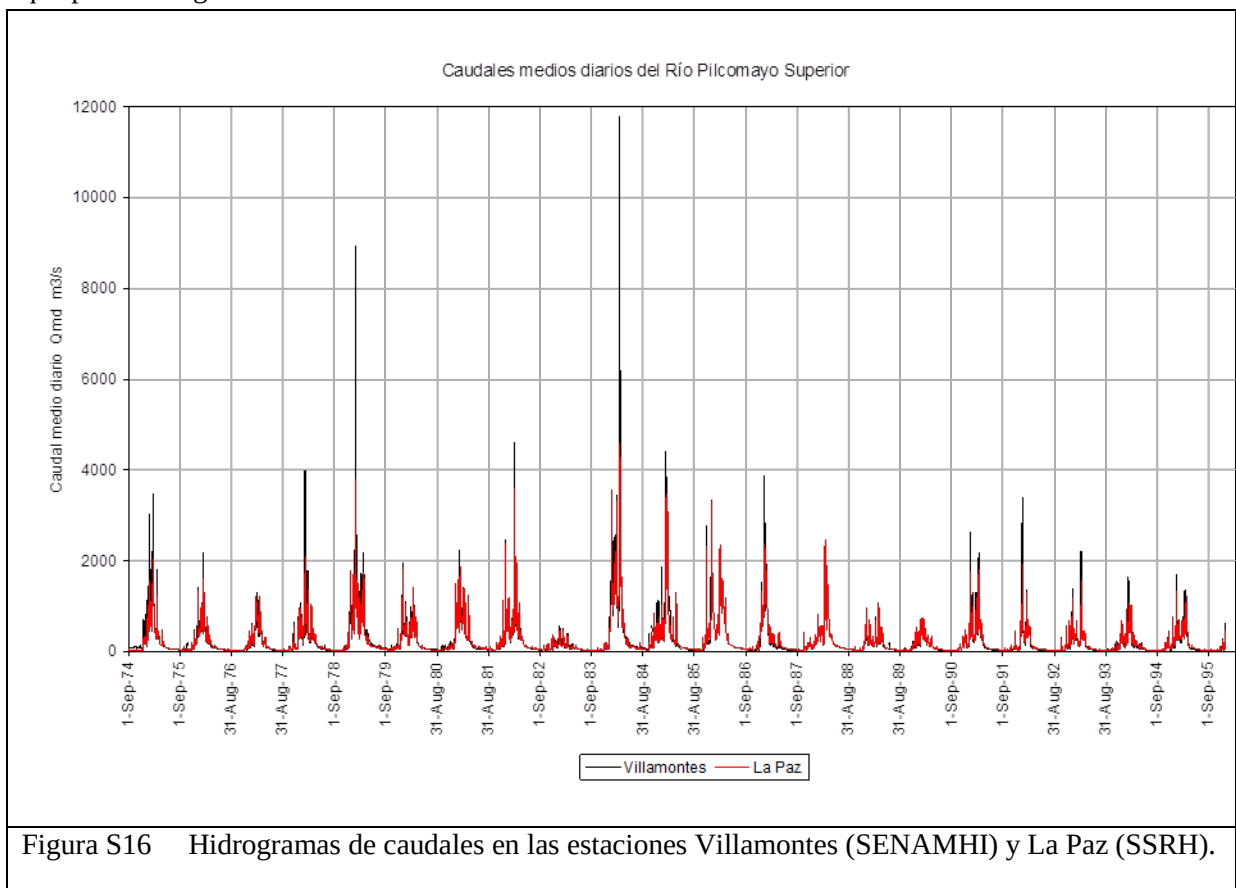


Figura S16 Hidrogramas de caudales en las estaciones Villamontes (SENAMHI) y La Paz (SSRH).

Si se hace una revisión del problema morfológico vinculado al tema del aporte de sedimentos de la alta cuenca del Pilcomayo, se plantea una situación desconcertante en la gestión de la cuenca, que consiste en la sedimentación total del cauce hasta niveles superiores a la planicie de inundación. Consecuentemente los caudales del río desbordan sobre la planicie formando nuevos bañados con periodicidad anual. Para ilustrar este proceso se presenta una lista cronológica resumida de los retrocesos del cauce desde el año 1900 :

- a. 1900 – 1933 : El Río Pilcomayo Superior, llegaba hasta el poblado de Navagán (unos 100 km aguas abajo de Fortín Nuevo Pilcomayo). En la época de desbordes, la mayor parte del agua alimentaba la Laguna Paratina donde tenía sus nacientes el Río Confuso el cual luego de recorrer unos 400 Km, desembocaba al Río Paraguay. Otra parte de los desbordes pero mucho menor, alimentaba al estero Patiño, el cual a su vez desaguaba en las nacientes de los Brazos Norte y Sur del Río Pilcomayo Inferior.



- b. 1933 – 1945 : En el año 1933 el río Pilcomayo abandona su cauce en el lugar denominado Horqueta 1933 y se traslada más al Norte, bifurcándose a su vez en dos brazos : El Estero Brazo Norte que pasaba por Tinfunque y el Estero Brazo Sur, que cruzando el paralelo 24° pasaba por Fortín Sorpresa y Salazar. Ambos esteros se continuaban hacia el este y se unían a la altura de Fortín Chañar y Fortín Caracoles, de donde se dirigían hacia el río Confuso. O sea que se repite el esquema anterior. (año 1900/1933).
- c. Año 1945 : Se produce un nuevo e importante cambio de rumbo del Río Pilcomayo en el lugar llamado Horqueta 1945 u Horqueta Yackoleff, llegando las aguas del desborde hasta el gran Bañado de Tinfunque (unos 50 km, aguas abajo del Fortín Nuevo Pilcomayo).
- d. Año 1968 : Por sucesivos taponamientos cambios de rumbo y retrocesos, el Río Pilcomayo deja ‘en seco’ la estación de aforo que Agua y Energía Eléctrica de la Nación tenía instalada en sus orillas, en Fortín Nuevo Pilcomayo.
- e. Año 1975 : Igual fenómeno causa el taponamiento del Río Pilcomayo a la altura del poblado de Sombrero Negro (aproximadamente 100 km aguas arriba de Fortín Pilcomayo) provocando la inundación y destrucción del mismo. Las aguas de desborde, se encauzaban por unos pocos kilómetros para luego dar origen a un desplazamiento en manto, sufriendo el mismo grandes pérdidas por evaporación e infiltración, no llegando hasta el Estero Patiño, seco desde el año 1972, pero sí a la Laguna La Salada, alimentando a los ríos Porteño, Pavao y Tatú Piré.
- f. Año 1976 : Se repite el mismo fenómeno, a unos 12 km aguas arriba de Sombrero Negro. En esta oportunidad, todo el agua de desborde se canaliza por territorio de Paraguay, alimentando los ríos Montelindo y posiblemente el Negro, registrándose entrada de agua en territorio de Argentina en baja proporción.

A partir del mes de octubre del año 1991 se construyeron canales dentro del marco de una acción consensuada entre Argentina y Paraguay en el año 1987. En el mes de octubre de 1991 se construyó el canal Argentino y posteriormente antes del fin del mismo año se construyó el canal de Paraguay. De este modo se derivaron los caudales líquidos y sólidos a la planicie de inundación con la consiguiente desaceleración del proceso de colmatación del cauce.

Progresiva general desde Puerto Pilcomayo Km	Fecha	Progresiva Local desde Lagunas de Lange 2005 Km	Tasa Retroceso Km/año	Dt Años	Longitud Real Cauce Km	Sinuosidad
293	Nov-05	0.0				
317	Dec-43	24.0	0.6	38.1		
373	Dec-68	80.0	2.2	25.0	70.60	1.26
447	Nov-75	154.0	10.7	6.9	121.00	1.64
454	Mar-76	161.0	21.1	0.3	12.00	1.71
490	Dec-84	197.0	4.1	8.8	63.60	1.77
502.5	Dec-85	209.5	12.5	1.0	17.50	1.40
515	Dec-86	222.0	12.5	1.0	19.90	1.59
525	Dec-87	232.0	10.0	1.0	12.00	1.20
541	Dec-88	248.0	16.0	1.0	26.50	1.66
542	Dec-89	249.0	1.0	1.0	4.00	4.00
563	Oct-91	270.0	11.5	1.8		
563	Aug-06	270.0				

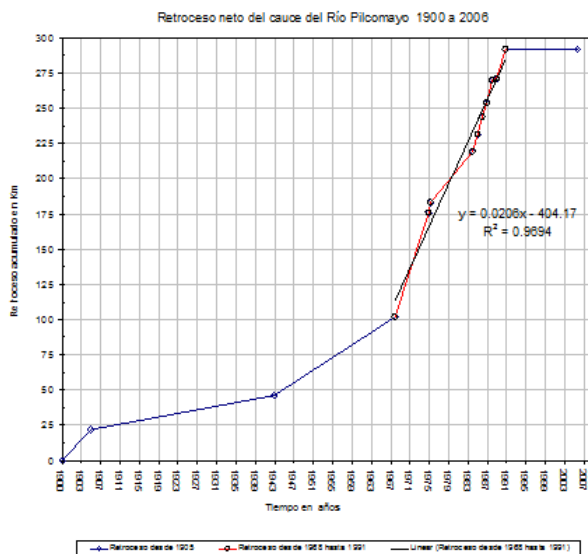


Figura S17 Retroceso del cauce del río Pilcomayo desde el año 1900 hasta 2000.

El estudio de base ambiental y socioeconómico de la cuenca del Pilcomayo realizado por la UTE Halcrow – Serman se encuentra disponible en la biblioteca de la Comisión Trinacional para el desarrollo de la cuenca <http://www.pilcomayo.net/>.

Los caudales medios diarios del Río Pilcomayo en Misión La Paz se obtiene de los datos publicados en el anuario hidrológico de la Secretaría de Recursos Hídricos (SSRH de Argentina). El período de registro abarca desde 1960 hasta el presente. La relación altura caudal es muy variable dado que el lecho se profundiza en función del caudal. Consecuentemente la relación altura caudal es actualizada repetidamente en cada año para obtener el registro de caudales diarios.



Figura S18 Erosión de ribera en la estación de aforo Misión La Paz



Figura S19 Nueva sección de aforo por cable en la estación de aforo Misión La Paz.



El peligro geológico de la erosión en masa que existe en las cuencas Pilcomayo, Caraparí y Bermejo, se describe detalladamente en el informe del E.C.Malagnino que se encuentra en el Estudio de base Ambiental y Socioeconómico de la cuenca del río Pilcomayo Parte III.

El mecanismo complementario de la sedimentación de las planicies es la formación de nuevos cauces por erosiones retrogradas desde el nivel de base hacia las cabeceras de la cuenca Tapia 1935 Ref 42. El nivel de base del Pilcomayo es el río Paraguay. Tapia ubica el límite Oeste de las erosiones retrógradas de los afluentes menores del río Paraguay entre las Longitudes Oeste - 60 ° y - 61°. La erosión retrógrada más importante del Pilcomayo es el denominado Salto Palmar pero por razones geológicas y debido al carácter efímero de los caudales del Pilcomayo este salto no ha logrado regenerar un nuevo cauce del río. En la figura siguiente se observa una erosión retrógrada local en la zona de taponamiento (latitud Sur - 22 °). Estos procesos son observables con posterioridad a la crecida anual debido al cambio de niveles de agua entre el nivel máximo de crecida y los niveles normales de la bajante.



Figura S22 Erosión retrógrada en el enlame de una crecida del río Pilcomayo, enero 1998.

14. Río Caraparí - Itiyuro

La historia reciente del dique Itiyuro resulta de interés para ilustrar los efectos prácticos de la producción de sedimentos sobre una obra de almacenamiento y provisión de agua potable. Este caso brinda una cuantificación concreta de la elevada producción de sedimentos en la zona transfronteriza del paralelo Sur 22° entre Argentina y Bolivia. En la figura S01 se puede observar la ubicación de la cuenca.

El río Caraparí con un caudal medio anual del orden de 3 m³/s tiene una cuenca endorreica dentro de la cuenca general atribuida a los ríos Pilcomayo y Bermejo. La parte superior de la cuenca de 567 Km² se encuentra en territorio de Bolivia y el tramo inferior de la cuenca se encuentra en la Argentina. La construcción del Dique Itiyuro finalizado en el año 1972 puso en evidencia un caso singular de los efectos de la producción de sedimentos se ha observado en la colmatación embalse de la Presa Itiyuro sobre el río Caraparí. El uso principal del reservorio es para agua potable en la zona desde Salvador Masa hasta Tartagal.

En la siguiente Tabla 4.01 y Figura 4.01 se pueden apreciar las características de la obra.



Figura S23 Dique y embalse Itiyuro en el año 1982. Fuente E.Malagnino 1990.

Obra :	Dique de embalse Itiyuro	
Río	Carapari	
Año de construcción		1972
Tipo de cuenca	Transfronteriza : 1/3 Argentina ; 2/3 Bolivia	
Caudal medio anual (1)		3.26 m³/s
Tipo de dique	escollera	
Altura		56 m
Longitud vertedero		110 m
Caudal diseño vertedero		2300 m³/s
Cota cresta vertedero		576 msnm
Volumen de embalse proyecto		80 Hm³
Volumen de embalse 2007		1.5 Hm³
Superficie del embalse		390 Ha
Area cuenca en Argentina		283 Km²
Area cuenca en Bolivia		567 Km²
Area cuenca		850 Km²
Uso primario	Reserva de agua potable para Tartagal, Gral. Mosconi, Aguaray y Salvador Mazza	
Otros Usos	Turismo y pesca deportiva	
Nota (1)		Se levantó la estación de aforo en agosto 1961

Tabla 4.01 Características de la presa de Itiyuro.

Tabla 4.01 Características de la presa de Itiyuro.

La obra inicialmente proyectada como obra de propósitos múltiples entre los que se enunciaron: generación de energía hidroeléctrica, riego de aproximadamente 6.000 ha, atenuación de crecidas y provisión de agua industrial a la Destilería de Campo Durán y agua potable a unos 100.000 habitantes de distintas poblaciones del área de influencia (Prof. Salvador Mazza, Aguaray, Tartagal, Gral. Mosconi y localidades intermedias). Efectivamente la obra fue utilizada para la provisión de agua, para lo cual se construyeron una torre de toma, una Planta Potabilizadora y un Acueducto.



Figura S24 Torre de toma embalse Itiyuro en 2005.

El embalse cuya capacidad original era de 80 hm³, experimentó una reducción del 68 % en los primeros 14 años de operación por el depósito de los sedimentos transportados por arrastre y suspensión y se encuentra hoy prácticamente colmado.

El proceso de colmatación del vaso se inició en el año 1984. Existen estudios realizados por la Ex – AGAS en 1986, que permiten concluir que existen procesos de remoción de masas en áreas de las sierras de la cuenca de aporte. Esta mide 850 km² pero solo un tercio pertenece a la Argentina (dos tercios están en territorio boliviano). A pesar de la cobertura vegetal, las precipitaciones intensas provocan aluviones, desestabilizaciones de laderas y desmoronamientos que arrastran árboles y detritos vegetales además del transporte de sedimentos del río. La afectación del volumen útil del embalse se observa en la siguiente figura 4.04 elaborado en base a datos oficiales de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Salta.

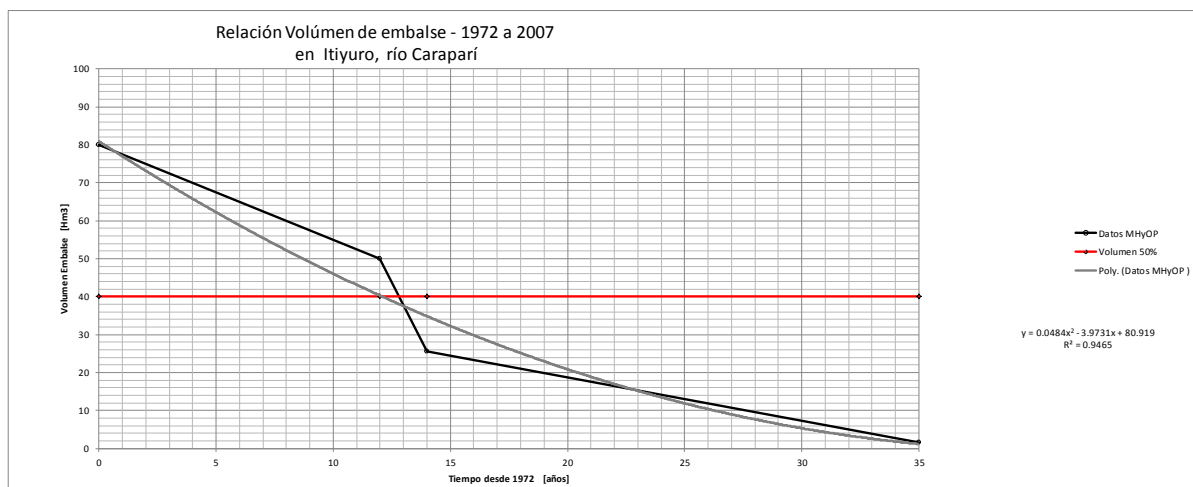


Figura S25 Colmatación del 50% embalse Itiyuro en 13 años.



El modelo primario para la erosión o producción de sedimentos de una cuenca respondió a la erosión hídrica superficial de suelos por acción de lluvias. Este tipo de EPS está representado por el modelo “universal” de Meyer y Wischmeyer (1969) los creadores de la ecuación universal de pérdida de suelo (Universal Soil Loss Equation) USLE y sus perfeccionamientos posteriores MUSLE y RUSLE. La base conceptual de estas fórmulas es la acción erosiva sobre un talud de suelo. Una metodología alternativa basada en la experiencia de erosión aluvional en los montes Balcanes en el Este de Europa. La metodología de Gavrilovic (1959, 1988) que ha sido aplicada con resultados satisfactorios en las cuencas de los ríos Bermejo y Pilcomayo por Brea , Spalletti et al 2010.



Figura S26 Aliviador y embalse Itiyuro en 2005



Figura S27 Embalse Itiyuro en 2005



Figura S28 El río Caraparí cruza el embalse de Itiyuro y descarga directamente sobre la cresta de la obra de alivio en 2006. Fuente Ing P.García Bess 2006.



15. Río Parapetí

La cuenca del río Parapetí nace en la cordillera oriental de las sierras subandinas a la altura de la localidad de Azurduy en el departamento de Chuquisaca. De la Ref 33 [Iriondo 2000] podemos saber que “... el río Parapetí ha formado un abanico aluvial de varias decenas de kilómetros cuadrados en Bolivia y Paraguay... el cauce permanente actual se derrama en el bañado de Izozog, que desagua al Mamoré, un tributario del Amazonas. Pero durante la temporada de lluvias se produce una importante transfluencia que forma el río Timané, que corre hacia el Este y desemboca en el río Paraguay...” . En años excepcionalmente húmedos, los bañados rebalsan y alimentan las nacientes del río San Julián, que aguas abajo se transforma en el río San Pablo, para finalmente desembocar en el río Iténez en la frontera con el Brasil. Fuente : comunicación personal del Ing Juan Carlos Sauma Haddad, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.

En el sector Sur del abanico fluvial de la figura S07 se destacan grandes planicies de arena con formación de dunas significativas por acción eólica.

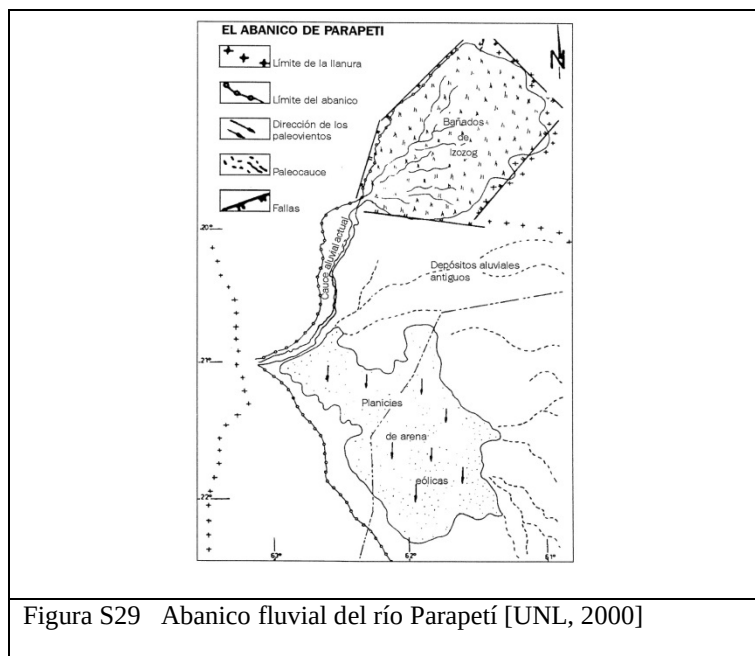


Figura S29 Abanico fluvial del río Parapetí [UNL, 2000]

Sobre la base de mediciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI de Bolivia en la estación de aforo San Antonio del Parapetí y cálculos de relleno de datos el caudal medio anual es evaluado en $63 \text{ m}^3/\text{s}$.

16. ADT Río Bermejo

El caudal líquido medio anual, aguas abajo de la unión del Bermejo con el San Francisco, es de $446 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que representa el 2.5 % del módulo del río Paraná en Corrientes. En contraste, tiene mucho peso el aporte de caudal sólido; considerando la serie completa de aforos sólidos en



suspensión, el aporte sólido del Bermejo al Paraná constituye cerca del 75 % del total de dicho río, porcentaje que crece si se consideran las últimas décadas, debido a la ejecución de presas en Brasil. La alta producción de sedimentos finos en su Cuenca ACRB resulta ser el rasgo característico del río Bermejo, que aporta aproximadamente 100 millones de toneladas anuales de sedimentos al sistema Paraguay-Paraná-Delta y río de la Plata. Los sedimentos finos son transportados hasta encontrar zonas de aguas muy tranquilas, caso Laguna Setúbal en la provincia de Santa Fé y el Río de la Plata, ver figura S01.

Se hace referencia al Diagnóstico ambiental transfronterizo de la cuenca del río Bermejo [Ref 05] GEF, UNEP, OEA, 2000 donde las conclusiones del ADT respecto al tema sedimentos es el siguiente :

“... El Instituto Nacional del Agua y el Ambiente y otros especialistas analizaron la incidencia de los sedimentos aportados por el Bermejo en la conformación del Delta del Paraná y Río de la Plata. Los estudios señalan que el aporte de arenas del Bermejo a los ríos Paraguay - Paraná no es significativo. No ocurre lo mismo con los limos y arcillas que constituyen el 90% de los finos transportados al Paraná, los que sedimentan predominantemente en el Río de la Plata. En base a los análisis efectuados sobre la sedimentación en el estuario del Río de la Plata, se concluyó que la zona de mayor actividad fluviomorfológica es el Río de la Plata Superior, contiguo al Delta. Los estudios indican que el monto anual de materiales finos (solo limos y arcillas) dragados en los canales de navegación en el Río de la Plata equivalen al 23% del aporte total del Río Bermejo. Una conclusión general que se desprende de los estudios efectuados, es que no se identifican medidas de manejo en la Alta Cuenca del Bermejo que afecten sustantivamente a la cantidad de los sedimentos generados para el conjunto de la cuenca. Desde este punto de vista, puede decirse que las zonas más productoras de sedimentos de la Alta Cuenca del Bermejo no están afectadas significativamente por acciones antrópicas actuales. Sin embargo, problemas puntuales, de alcance local, relacionados con procesos de producción de sedimentos en la cuenca, podrían resolverse mediante medidas estructurales y/ o no estructurales factibles desde todo punto de vista, que cumplan su objetivo local específico. En ese sentido, se recomienda investigar con mayor detalle las posibilidades técnicas y económicas de intervenciones estructurales y no estructurales en la red de drenaje de las cuencas afluentes al río Bermejo, así como posibles técnicas de mitigación de la erosión de carácter difuso. ...”

El Análisis Diagnóstico Transfronterizo ADT y el PAE de la cuenca alta del río Bermejo ya fue presentado de forma completa y definitiva por los ingenieros José Daniel Brea y Pablo Spalletti del Instituto nacional del Agua en la Ref 08 2010, Generación y Transporte de Sedimentos en la Cuenca del Río Bermejo, Programa Estratégico de Acción para la Cuenca Binacional del Río Bermejo, COBINABE. Con referencia a la producción de sedimentos se establece claramente que :

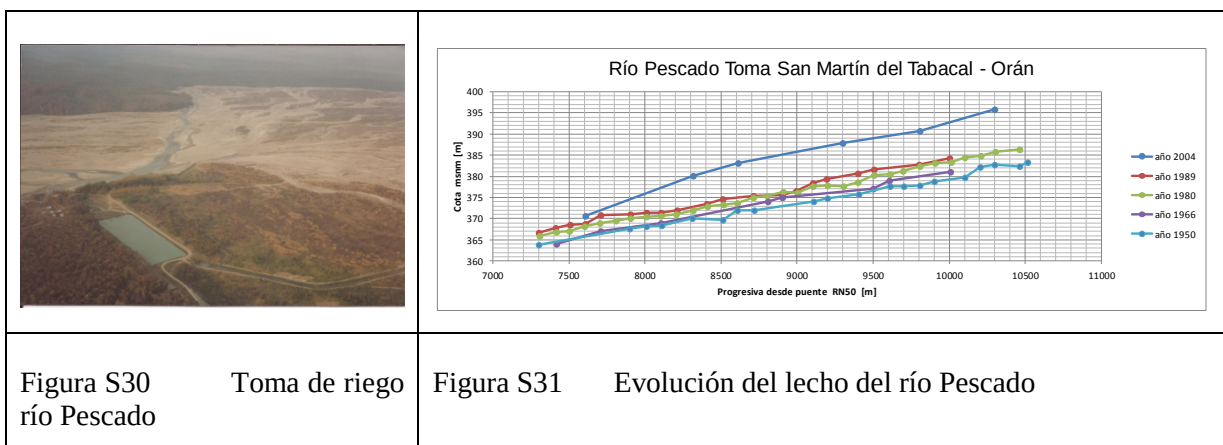
“... La producción de sedimentos en cuencas de zonas de montaña o con pendientes pronunciadas se puede dividir básicamente en dos fuentes, asociadas a distintos fenómenos: a) la erosión superficial generalizada del suelo; y b) los procesos de remoción en masa en sitios puntuales. Estos procesos influyen en los problemas de inundaciones, en los fenómenos de colmatación de



embalses y pueden promover cambios en la morfología fluvial que, a su vez, afecten los aspectos ambientales.

Los sedimentos producidos por erosión superficial están asociados principalmente al fenómeno de destrucción del suelo por el impacto directo de las gotas de lluvia y el posterior transporte por escurrimiento superficial. Se trata de un proceso que presenta una cierta continuidad temporal asociada a eventos hidrológicos ordinarios característicos de la Cuenca, pudiendo relacionarse con el régimen de lluvias. En cambio, los sedimentos producidos por remoción en masa como los deslizamientos de laderas, colapso de márgenes, flujos de barro, flujos de detritos, etc., están relacionados con la inestabilidad hidrogeológica de la Cuenca, y se vinculan con eventos hidrológicos extremos y por lo tanto, no presentan la continuidad temporal que muestran los primeros. La cantidad de sedimentos generados en una determinada cuenca hídrica y, consecuentemente, el grado de deterioro o grado de erosión de la misma puede ser evaluada en forma indirecta a través de relevamientos topo-batimétricos de los vasos de lagos y embalses o mediante la utilización de mediciones sistemáticas de caudales sólidos en los cursos de agua. Ambos métodos contemplan en forma agregada la influencia de los distintos tipos de producción de sedimentos. ...”.

No se han encontrado motivos para perfeccionar el análisis diagnóstico ya publicado, pero cabe agregar que los rodados y gravas se depositan en conos de deyección en las abras de las sierras subandinas. La deposición de estos sedimentos granulares es la causa de la elevación progresiva del lecho del cauce. Se ilustra este proceso con la evolución del lecho del río Pescado entre los años 1950 y 2004, Ref 47: J.Serra, 2012. Este caso particular ilustra el hecho que hay mayor permanencia del proceso de transformación del cauce pero las cotas del lecho son cambiantes.



Los sedimentos finos del Río Bermejo (figura S01) son los responsables principales del crecimiento del Delta de río Paraná en el Río de la Plata como se indica en la figura siguiente Ref 08: A.Sarubbi, 2007, Análisis del Avance del Frente del Delta del Río Paraná, Tesis de grado en Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

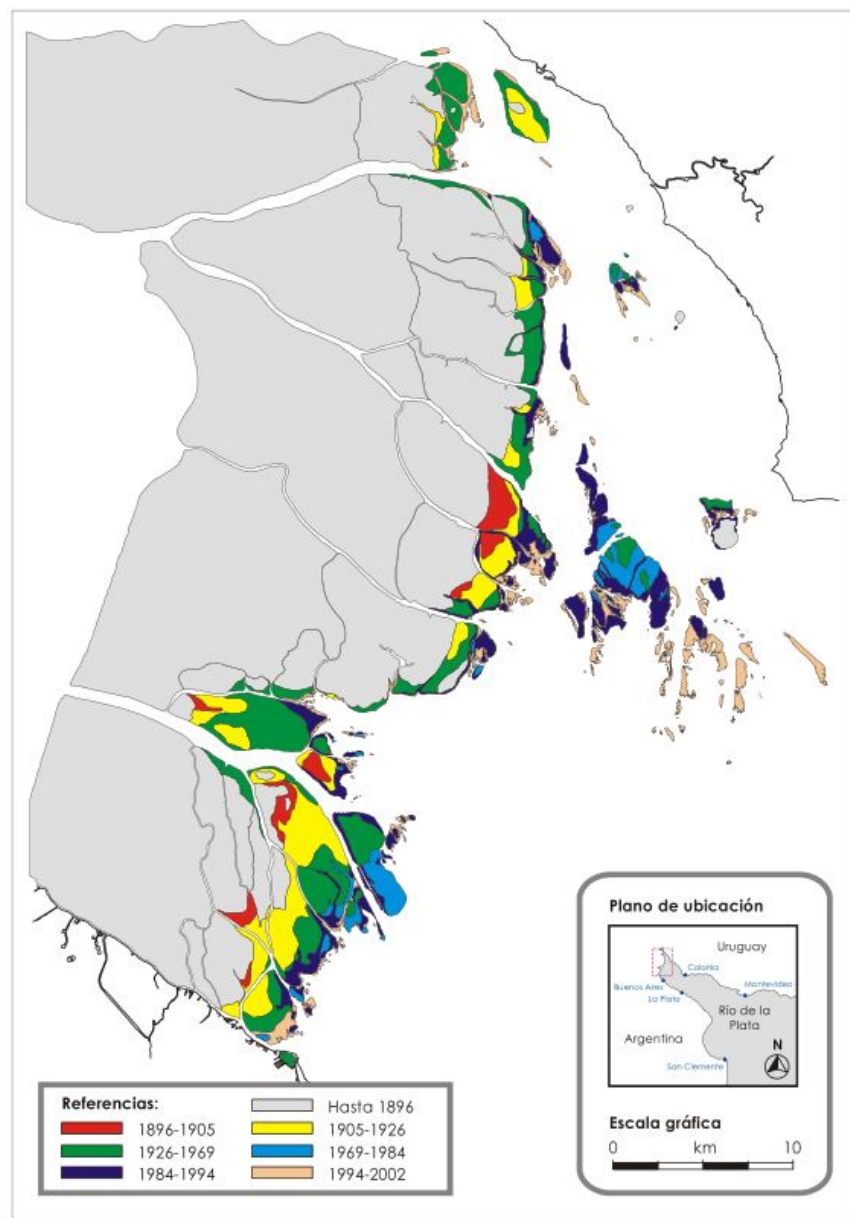


Figura S32 Avance del Frente del Delta del Río Paraná. Fuente : Ref 08.



17. Plan de Acción Estratégica Sedimentos

Se recomienda la revisión y extensión del mapa de producción específica de sedimentos a la totalidad de la cuenca del plata, tomando como ejemplo guía la Ref 14 “ Diagnóstico das condições sedimentológicas dos principais ríos brasileiros a la totalidad de la cuenca del Plata, 1992 ” .

Se recomienda el mantenimiento y refuerzo redes de medición hidrométrica de las comisiones técnicas para el monitoreo y estudio permanente, para el monitoreo y realización de mediciones de campo de las alteraciones de cauce en planimetría y altimetría. Se recomienda realizar la medición de diámetros de sedimento transportado realizando la discriminación entre sedimento fino (limos y arcillas) sedimentos gruesos (arenas) y muy gruesos (gravas y rodados).

En relación con los dragados de mantenimiento de los canales de navegación en esta zona cabe indicar que en su estado al año 1999, con una profundidad de 9.75 metros al cero de las cartas náuticas y con anchos de solera del orden de 100 metros. Ref 09.

Los materiales dragados son casi exclusivamente limos. Para la transformación a peso se ha considerado una densidad de 1.350 kg/m³. En consecuencia, el monto total de sedimentos depositados en los canales navegables principales de este sector del río de la Plata resulta del orden de 17.550.000 toneladas anuales.

La retención de finos generada por las presas del Bermejo se reflejaría en una reducción del dragado de unos 3 millones de toneladas de sedimento en los canales navegables del río de la Plata. Este valor fue calculado teniendo en cuenta que la proporción de los depósitos de finos en el Delta del Paraná y en el río de la Plata se mantendría como en la actualidad. Ref 09.

18. Cambio climático en las cuencas Bermejo y Pilcomayo

En el Programa para la Gestión Sostenible de los recursos Hídricos de la Cuenca del Plata, en relación con los efectos de la variabilidad y el cambio climático, CIC 2011, se destaca que “... la Cuenca del Plata tiene una ... tasa de transporte de sólidos en suspensión (aproximadamente 100 millones de toneladas por año en el río Paraná, en Corrientes), asociadas a problemáticas tales como pérdida de suelos, dificultades para la navegación, deterioro de la calidad del agua y problemas de mantenimiento de las obras de infraestructura, entre otras. Los mayores aportes sólidos provienen de la cuenca del río Bermejo, afluente del río Paraguay, para lo cual se están impulsando medidas de control incremental de la erosión. También en el Alto Paraguay-Pantanal se presentan significativos problemas de conservación del humedal relacionados con el incremento de los sedimentos. Otra zona crítica es el Gran Chaco, donde la degradación del suelo es el eje principal del análisis para la gestión integrada del recurso natural. ...”.

El objetivo del presente informe en relación con la gestión sostenible de los sedimentos es el Análisis Diagnóstico Transfronterizo (ADT) y Programa de Acciones Estratégicas (PAE) en la Cuenca del Plata, y la evaluación preliminar de los efectos de la variabilidad y el cambio climático sobre este aspecto del recurso. En el Macro-ADT de la Cuenca del Plata, elaborado en el 2005 sobre la base del proceso de “Visión de la Cuenca”, identificó la relevancia de la sedimentación de los cuerpos y cursos de agua de la Cuenca y la afectación de la capacidad de las vías navegables y de los puertos, con importantes costos de mantenimiento; la colmatación de embalses de las presas y modificación de la calidad de sus aguas.

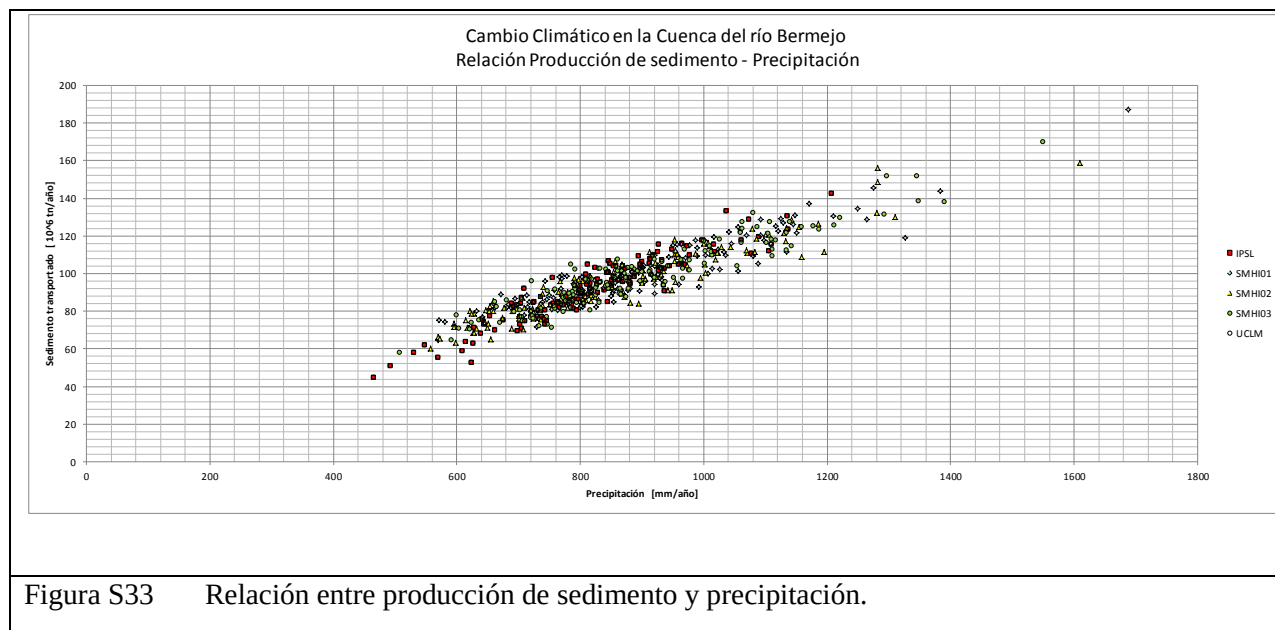


El desarrollo del análisis abarca los siguientes puntos ; a). el análisis del conjunto de la cuenca, enfocado en lo que influya en los tramos transfronterizos de la cuenca, b). las fuentes de producción de sedimentos, los impactos en los tramos mencionados, c). potenciales mecanismos de gestión, y d). priorización de potenciales proyectos para el Plan de Acción Estratégica.

El efecto del cambio climático en las cuencas altas de los ríos Bermejo y Pilcomayo fue presentado en la Ref [] “Impacto del Cambio Climático en la Producción de Sedimentos en las Cuencas de los Ríos Bermejo y Pilcomayo” por los autores Leandro David Kazimierski, Martín Irigoyen, José Daniel Brea, Pablo Spalletti, Ángel Nicolás Menéndez.

Se utilizaron 4 Modelos Climáticos Regionales (RCM) con condiciones de borde de tres Modelos Climáticos Globales (GCM) para analizar los efectos del Cambio Climático en los campos de precipitaciones y temperatura. El RCM PROMES versión 2.4 (Sanchez et al., 2007, Dominguez et al., 2010) de la Universidad Castilla-La Mancha con condiciones de borde del GCM HadCM3-Q0. El RCM LMDZ versión 4 en su configuración sudamericana (Hourdin et al., 2006; Li, 1999) del Instituto Pierre-Simon Laplace con condiciones de borde del GCM ECHAM5 y el LMDZ en su versión global. El RCM del Centro Rossby (RCA) versión 2.4 (Kjellström et al., 2005; Samuelsson et al., 2006) con condiciones de borde del GCM ECHAM5. El RCM RegCM2 versión 3 (Pal et al., 2007; da Rocha et al., 2009) de la Universidad de San Pablo con condiciones de borde del GCM HadCM3-Q0.

Todos los modelos se corrieron bajo el escenario futuro A1B definido por el IPCC donde se asumen considerables aumentos en la temperatura y en el nivel medio del mar. La discretización horizontal de todos los modelos regionales es de 0.5°.



Se observa que la correlación entre la precipitación anual en la ACRB y la producción de sedimento es alta ($R^2 = 0.87$). La actividad morfológica del río depende del volumen anual de transporte de sedimento y consecuentemente es esperable a largo plazo un aumento de los problemas vinculados a



esta fuente de sedimentos. La hipótesis implícita es razonable y es que la disponibilidad de sedimentos erosionables es muy grande frente al volumen de las precipitaciones.

Las conclusiones de la Ref [17] fueron : “... Los cambios en los forzantes meteorológicos, temperatura y precipitación, que resulten consecuencia del Cambio Climático se manifestarán en variaciones en las tasas de producción y transporte de sedimentos de las cuencas de los ríos Bermejo y Pilcomayo. Los resultados obtenidos por los modelos muestran una tendencia a mantener las tasas actuales para los próximos 30 años, y un decrecimiento para el período 2041-2070 en ambas cuencas, aunque de mayor importancia en la cuenca del río Pilcomayo. Para el Futuro Lejano, la dispersión en los resultados aumenta significativamente con una leve tendencia a aumentar en el caso de la cuenca del río Bermejo y sin tendencia clara en la cuenca del río Pilcomayo. ...”.

El aumento de la producción de sedimentos pronosticado implica un aumento del riesgo de cambios morfológicos en el cauce del río Bermejo inferior y un aumento en los costos de clarificación del agua en las plantas de agua potable en todo el recorrido fluvial hasta el río de la Plata, y un aumento de los volúmenes de dragado en canales transversales del Paraná, canales del río de la Plata y en los puertos y accesos a puerto.



Referencias

Ref 01 Feruccio.A.Soldano,1947, Régimen y Aprovechamiento de la Red Fluvial Argentina, Editorial Cimeria, Buenos Aires.

Ref 02 : Roberto D. Cotta, 1963, “Influencia sobre el río Paraná del material sólido transportado por el río Bermejo”, Comisión Nacional del río Bermejo” Pub. N° 92 EH.

Ref 03: OEA, 1974, Cuenca del Plata, Estudio para su planificación y Desarrollo.

Ref 04 : Mario L.Amsler, E.C.Drago, 1984, Estudios limnológicos en una sección transversal del tramo medio del Río Paraná. Rev. Asoc. Cienc. Nat. Litoral, Vol 15 pp. 7 – 21, y 1988 IAHS Publ. no 174.

Ref 05: J.D.Brea, P.D.Spalletti, 1996, Estudio sedimentológico preliminar de la cuenca inferior del río Bermejo, INA, COREBE.

Ref 06: GEF, UNEP, OEA, 2000, Diagnóstico ambiental Transfronterizo de la cuenca del río Bermejo, PAE para la cuenca binacional del río Bermejo, COBINABE, FMAM – GEF , PNUMA – UNEP, OEA – OAS.

Ref 07: S.Rafaeli, 2003, Paisaje erosivo en cuencas de montaña, Tesis, Universidad Nacional de Córdoba.

Ref 08 A.Sarubbi, 2007, Análisis del Avance del Frente del Delta del Río Paraná, Tesis de grado en Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

Ref 09 José Daniel Brea, Pablo Spalletti, 2010, Generación y Transporte de Sedimentos en la Cuenca del Río Bermejo, Programa Estratégico de Acción para la Cuenca Binacional del Río Bermejo, COBINABE.

Ref 10 W.H.Wischmeier, D.D.Smith, 1965, Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains, Agric. Handbook No. 282, USDA....

Ref 11 Gavrilovic Z., 1959; Methode de la classification des bassins torrentiels et equations nouvelles pour le calcul des hautes eaux et du debit solide. Vadoprivreda, Belgrado

Ref 12 Gavrilovic Z., 1988; The use of an empirical method (Erosion Potential Method) for calculating sediment production and transportation in unstudied or torrential streams. Wallingford.

Ref 13 Serman y Asociados, Halcrow, 2007, Estudio de base ambiental y socioeconómica de la cuenca del río Pilcomayo.

Ref 14 IPH, Eletrobrás, Ministerio de Minas e Energía ,1992, Diagnóstico das condições sedimentológicas dos principais ríos brasileiros.

Ref 15 M.P.Bordas, A.E.Lanna, J.C.Leprun, F.R.Semmelmann, 1987, Diagnostico preliminar dos riscos de assoreamento no Brasil, VII Simposio Brasileiro de Hidrologia e recursos Hídricos (ABRH), Salvador, Brasil, vol 3, H-223235.



- Ref 16 E.F.Gonzalez Díaz, E.C.Malagnino, 1990, El Proceso de la Remoción en Masa : su incidencia como Riesgo geológico natural en el fenómeno del 29-3-1984 en el sureste de la sierra de Aguarague, Salta (República Argentina). Actas Asoc. Arg. Geol. Apl. Ing. Vol V, 7-18.
- Ref 17 : L. D. Kazimierski, M. Irigoyen, J.D.Brea, P.Spalletti, Á.N.Menéndez, Impacto del Cambio Climático en la Producción de Sedimentos en las Cuencas de los Ríos Bermejo y Pilcomayo
- Ref 18: Jansen, van Bendegom, van den Berg, de Vries, Zanen, 1979, Principles of River Engineering, Pitman.
- Ref 19: J.Schmidt, 2000, Soil Erosion, Springer.
- Ref 20: C.Paoli, M. Schreider, 2000, El río Paraná en su tramo medio, Centro de Publicaciones UNL.
- Ref 21: A. Raudkivi, 1979, Hydrology, Pergamon.
- Ref 22 Simons, Li , 1982, Engineering analysis of Fluvial Systems, Fort Collins, Colorado.
- Ref 23: Zhaohui Wan, Zhaoyin Wang, 1994, Hyperconcentrated Flow, IAHR, Balkema.
- Ref 24: USBR 1960, Design of Small Dams, Water Resources.
- Ref 25: ASCE , Vito A.Vanoni Ed., 1962, Sedimentation Manual, Cap V, Sediment control methods. Manual N° 54.
- Ref 26: ASCE , Marcelo H.García Ed., 2008, Sedimentation Engineering, Cap 12, Reservoir Sedimentation. Manual N° 110.
- Ref 27: N. Oliveira Carvalho, N.P. Filizola, P.M.Coutinho dos Santos, J.E.F.Werneck Lima, 2000, Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios, ANEE, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas.
- Ref 28: Pierre Y.Julien, 2002, River Mechanics, Cap 3. River basins. Cambridge.
- Ref 29: FAO, 1993, Erosión de suelos en América Latina, Taller sobre la Utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG) en la Evaluación de la Erosión Actual de Suelos y la Predicción del Riesgo de Erosión Potencial Santiago, Chile, 27 de julio al 1° de agosto de 1992.
- Ref 30: S.A.Schumm, 1977, The Fluvial System, CSU – Blackburn Press.
- Ref 31: L.B.Leopold, M.G.Wolman, J.P.Miller, 1964, Fluvial Processes in Geomorphology, Freeman.
- Ref 32: J.D.Brea, F.Balocchi, 2010, Procesos de erosión – sedimentación en cauces y cuencas, Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe (PHI-LAC).
- Ref 33 : UNL, C.Paoli, M.Schreider, 2000, El Río Paraná em su tramo médio, Cap 1 Características de las cuencas de aporte M.Iriondo, C.Paoli, N.García.



- Ref 34: J.C.Sauma Haddad, 2009, Estudio de preinversión Proyecto de Riego Parapetí, Tomo VI Hidrología e Hidráulica Fluvial, KFW, SIRIC, Ingeniería del Agua Srl, Cipca.
- Ref 35: P.Lozano S.J. 1733, Descripción Chorographica del Gran Chaco Gualamba. Redición 1989 Universidad Nacional de Tucuman.
- Ref 36: Lange Gunardo, 1906 : Río Pilcomayo desde la Desembocadura en el Río Paraguay hasta el Paralelo 22° Sud.
- Ref 37: Volpi, Carlos aprox 1950: El Aprovechamiento del Río Pilcomayo Internacional.
- Ref 38: OEA, Febrero 1981: Programación para una investigación de la Fluviomorfología y Sedimentología del Río Pilcomayo y Priorización de Obras Hidráulicas.
- Ref 39: José S. Gandolfo, 1962, Consideraciones acerca de los Conos de Deyección, Boletín de la academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Año 22, Tomo 22, N° 60, Venezuela.
- Ref 40: V.Galay, H.Schreier, R.Bestbier, 2001, Himalayan Sediments Issues and Guidelines, Canadian International Development Agency.
- Ref 41: A.B.Klaven, Z.D.Kopaliani, 2011, Experimental Studies and Hydraulic Modelling of River Flows and Channel Processes, Instituto de Hidrología SHI, San Petersburgo, Rusia.
- Ref 42: A.Tapia, 1935, Pilcomayo. Contribución al conocimiento de las llanuras Argentinas. Boletín N° 40 Dirección de Minas y Geología, Buenos Aires.
- Ref 43: H.Preundes, J.Huespe, S.Mangini, I.Piedra Cueva, M.Irigoyen, D.Simonet y E. Zamanillo, 2003 Y 2005, Estudios de sedimentacion en el embalse de Salto Grande. Caracterización del funcionamiento hidrosedimentológico. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), Universidad Nacional del Litoral (UNL, Argentina), Instituto de Mecánica de Fluidos y Ingeniería Ambiental (IMFIA), Universidad de la República, Uruguay. primera Etapa 2003 y segunda Etapa 2005.
- Ref 44: Geografia, Rio Claro, v. 36, Número Especial, p. 107-117, jun. 2011. Geomorphology and deposition events in Nhecolandia pantanal wetland, F. dos Santos Gradella, H. Zani, A. Silva, S.Kuerten, F.A. Corradini, A.Y.Sakamoto.
- Ref 45: Northwest Hydraulic Consultants (NHC), Evarsa, G.L.Morris & Asoc, 2002, Estudios de Sedimentación para actualizar la definición de la vida útil del embalse del complejo Hidroeléctrico Yacyretá.
- Ref 46: C.E.M.Tucci, F.Genz, 1996 Hidrossedimentologia do Alto Rio Paraguay, Instituto de Pesquisas Hidraulicas, UFRGS, FEMA/MT Fundação do Meio Ambiente do Mato Grosso, SEMA, Secretaria do Meio Ambiente do Mato Grosso do Sul, Ministério do Meio Ambiente
- Ref 47: J.Serra, 2012, Alternativas de protecciones sustentables en el río Pescado, Salta, Trabajo Final FI Universidad Nacional de La Plata.



PROGRAMA MARCO PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE
LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL PLATA,
EN RELACIÓN CON LOS EFECTOS DE LA VARIABILIDAD Y
EL CAMBIO CLIMÁTICO

PROGRAMA MARCO PARA GESTÃO SUSTENTÁVEL DOS
RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO PRATA,
CONSIDERANDO OS EFEITOS DECORRENTES DA
VARIABILIDADE E MUDANÇAS DO CLIMA

Ref 48: Secretaría de Recursos Hídricos, 2013, Anuario de la Red Hidrológica Nacional (Arg.)
Edición 2014.

Ref 49: G.E. Garcia, 1992, Implementação de modelo numérico para avaliação do transporte de
sedimentos no reservatório de Itaipu. Trabalho de maestria, Curitiba, Universidad Federal de Paraná.