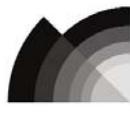


Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



ASAGAI
ASOCIACIÓN ARGENTINA
DE GEOLOGÍA APLICADA
A LA INGENIERÍA

Córdoba - Argentina



Visión crítica por introducción de obras en márgenes y cauce del río Dulce entre las ciudades de Santiago del Estero y La Banda

A critical view on works allocated along the banks and bed of Dulce river between the cities of Santiago del Estero and La Banda

Castellano, Juan ¹ ✉ - Ávila, Edgardo ¹ - Zerda, Hugo ²

Recibido: 15 de marzo de 2015 • Aceptado: 06 de julio de 2015

Resumen

En los emplazamientos indicados se introdujeron obras en ambas márgenes o dentro del lecho fluvial, que han generado modificaciones a los procesos geomorfológicos del río. Los mismos se tradujeron en comportamientos imprevisibles y en algunos casos ocasionaron daños importantes a las construcciones o bien impactaron en los sectores más vulnerables de la sociedad asentada en las proximidades del cauce. Aunque los fines de las obras no está en consideración, sí los efectos actuales sobre las mismas y los posibles que llegasen a producirse. Particularmente cuando esto se analizan en el contexto de principios generales que gobiernan la dinámica de un río sobre la superficie terrestre. Prolíferos ejemplos que modificaron su accionar generaron críticas situaciones adjudicada a la inadecuada intervención del hombre. Aquí se consideran conceptos de erosión, transporte, deposición concernientes al comportamiento hidráulico del río y como pueden modificarse por la introducción de obras en el lecho y en la llanura de inundación. Se reconstruyó la geometría del cauce con imágenes satelitales temporales, analizando emplazamientos de obras, cuya presencia se contraponen al comportamiento del río. Asimismo se menciona peligros potenciales del mismo y los riesgos que pueden afectar a poblaciones ribereñas, establecimientos industriales y construcciones civiles en general.

Palabras clave: Geomorfología, hidráulica fluvial, riesgos.

Abstract

The several works that were emplaced along the banks and bed of Dulce river had influenced its behavior. The influence over its geomorphological processes brought unpredictable consequences that involve not only severe damages on the works themselves but also on the most vulnerable sectors of adjacent settlements. Even though the aims of the construction of these

1. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE), Av. Gral. Manuel Belgrano (Sur) Nº 1912 (4200) Santiago del Estero, Argentina

✉ juancast@unse.edu.ar

2. Facultad de Ciencias Forestales Ing. René Ledesma, Laboratorio SIG. Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE), Av. Gral. Manuel Belgrano (Sur) Nº 1912 (4200) Santiago del Estero, Argentina

works are out of question, it is important to consider the present and potential future effects especially when the analysis is made out of the general principles governing river dynamics on the Earth surface. Many and varied are the examples of works that modified the flow of the river and generated critical situations as a consequence of inappropriate human interventions. In this paper, concepts such as erosion, transportation, and settling related to the hydraulic behavior of the river that can be modified when works are emplaced in its bed and flooding plain are taken into account. The river-bed geometry was reconstructed using time satellite images and the emplacement of those works set up against the natural, logic and expected behavior of the river analyzed. Likewise potential risks and threats over river populations, factories and civil constructions in general are mentioned.

Keywords: geomorphology, hydraulic fluvial, risks.

INTRODUCCIÓN

Se presentan observaciones de la dinámica del río Dulce en el sector de estudio comprendido entre las ciudades de Santiago del Estero y La Banda (Figura 1), particularmente referidas a los procesos de erosión, transporte y sedimentación fluvial y, que pueden constituirse en un riesgo cuando se introducen obras que alteran su natural funcionamiento.

Las acciones estructurales, como la construcción de diques, reducción de la sección del cauce, ocupación de la línea de ribera o del lecho ordinario del río, etc., suelen contribuir localmente al aumento significativo de la velocidad del agua y, consecuentemente, generar un aumento en la capacidad de carga del río y de su competencia para erosionar el fondo y márgenes.

Los cambios que se presentan son la migración acelerada del cauce por erosión de las márgenes, para diferentes caudales recurrentes (Fariás et al. 2007), y la excavación del lecho natural. A esto se le suma la socavación que sufren pilas y cabezales de fundación de los puentes construidos en el lecho, como ya ocurrió en el puente de la autopista San Francisco Solano (Figura 1), y que hoy una vez reforzados los mismos, sus diseños no resisten principios de la hidrodinámica fluvial. A dichos condicionamientos se les agrega otro que agravará aún más los problemas mencionados como es la construcción de nuevas costaneras que pasarán por debajo de la anterior obra y del puente Carretero. Las mismas al ocupar el lecho ordinario del río anulan vanos de cada una de esas obras incluso en algunas partes de las

mismas, se anteponen escombros entre el cauce y las costaneras para evitar la erosión del río durante las crecientes. También entre esos restos de la construcción se observan residuos urbanos que son potenciales focos de contaminación del río.

Las medidas no estructurales están dirigidas principalmente a atender los problemas sociales que se desencadenan en una inundación y la respuesta estructural es la construcción de bordos de defensa. Soluciones tendientes a resolver los problemas de erosión del río Dulce entre Santiago del Estero y La Banda parecen no ser considerados o bien incorrectamente aplicados, pese a la existencia de estudios hidrológicos (Fariás et al. 2007) de gran valor. El uso actual de la zona de ribera del río se visualiza más como un recurso paisajístico, aunque sin una planificación urbanística que contemple la problemática hídrica. Por ejemplo, existen medidas estructurales para conducir eventualmente el agua de una precipitación pluvial de la ciudad de Santiago del Estero al río, conociendo la coincidencia de la lluvia extraordinaria con el período hidrológico de máxima del río Dulce, atentos que ambos períodos, de lluvias y crecientes, coexisten.

El estudio de esta corriente fluvial desde un enfoque integral, sistémico y temporal permitirá realizar un mejor análisis de los impactos que las obras pueden generar en toda la extensión de este ambiente y que seguramente repercutirá en una mejor y mayor vida útil de las mismas. Así en ese contexto, se podrán evaluar localmente las consecuencias directas o indirectas que pueden modificar la acción geológica del río.

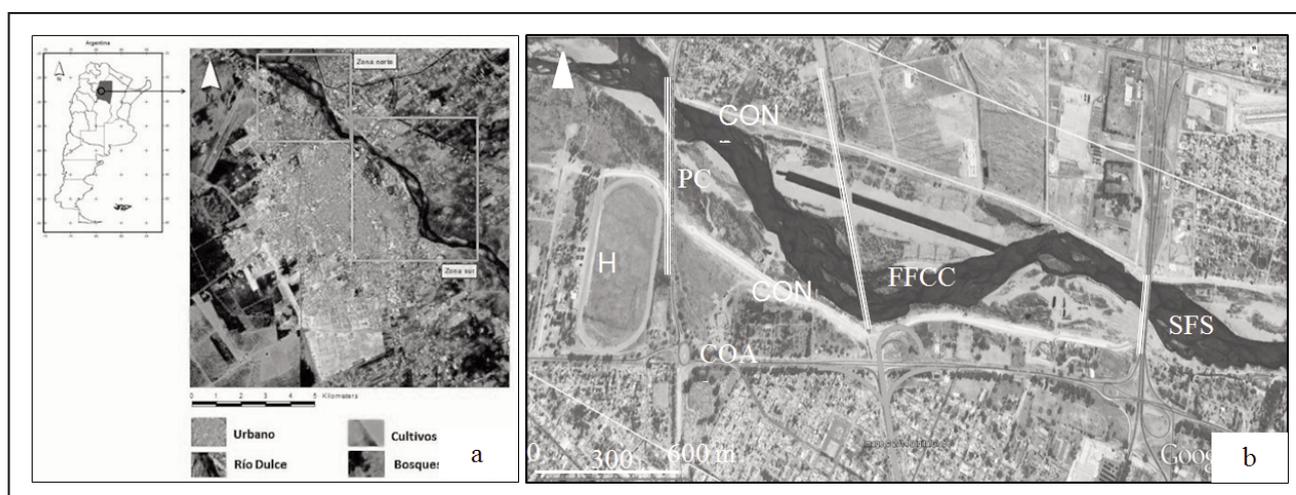


Figura 1. Área de estudio. a: Ubicación General. b: Obras principales. Puentes: PC, Carretero. FFCC: Ferroviario actual. SFS: San Francisco Solano. Costaneras: COA, antigua, CON, Nuevas. H: Hipódromo. Imagen Geoeye, en Google Earth, 24/09/2013.

También permitirá que toda medida no estructural de la autoridad de aplicación tenga, probablemente, un menor impacto en sus costos para afrontar la dinámica fluvial del río Dulce, al momento de ocurrir una creciente.

Dichas consideraciones, de carácter general, tendrían como principio de solución admitir que decisiones tomadas u obras realizadas tuvieron relación con resolver la contingencia más que ser producto de la aplicación de políticas hídricas. Por ejemplo, minimizar riesgos a personas y actividades que se realizan en la zona de ribera del río Dulce, ya sea advirtiendo o prohibiendo construir en el lecho, ocupar áreas de riberas inundables, márgenes sujetas a erosión permanente, etc. Considerando que el máximo caudal que puede derivar el Dique Termas de río Hondo es de 2.409 m³/s, con un máximo volumen embalsado de 1.500 hm³ (Martínez, 1999), podría significar un potencial peligro, si este último valor ocurriera. También se debería considerar la necesidad de preservar y controlar de posible contaminación en la zona de recarga del acuífero que el río Dulce alimenta, reserva subterránea que provee de agua potable a más del 65% de la población provincial.

METODOLOGÍA

Para identificar algunas de las situaciones problemas identificadas anteriormente se efectuaron actividades en gabinete, campo y laboratorio, reconociéndose con ellas características geológicas estructurales, ambientes litológicos y rasgos geomorfológicos del río Dulce. Se recorrieron las obras ubicadas en las márgenes y en el lecho y se hicieron también observaciones referidas al estado general de las mismas y de los impactos que sobre ellas ejerce la acción geológica del río. En particular las construcciones recientes o en ejecución, ubicadas en el lecho ordinario y que provocan su contracción de modo significativo, pudiendo afectarlas y / o generar riesgos aún mayores en otros sectores urbanizados, asentamientos poblacionales, industriales, recreación, etc., ubicados en la ribera del río Dulce.

Actividades de gabinete

Comprendió la búsqueda y recopilación de antecedentes, y su análisis y discusión de la misma en el marco de los criterios que llevaron a la elaboración del presente. La obtención de una serie temporal de imágenes satelitales desde el año 1975 hasta el año 2009 permitió constatar la migración del cauce con la aplicación de técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), medir desplazamientos, determinar pendientes y construir perfiles transversales al mismo. La identificación de sinuosidades del río, el cauce de estiaje, lecho ordinario, los depósitos en barras longitudinales o en puntas, albardones, etc., aportaron al marco de referencia para una mejor comprensión de la acción geológica del río.

También se realizaron reuniones entre los autores de este trabajo y profesionales del medio relacionados a esta temática, aportaron puntos de vista que contribuyeron a priorizar los resultados obtenidos y que aquí se vierten y fundamentan. El análisis en general de datos hidrológicos e información obtenidas y / o textos consultados son citados en la bibliografía de referencia. Finalmente las tareas de elaboración del informe con gráficos y figuras como el armado del mismo, se encuentran entre las actividades correspondientes a este punto.

Actividades de campo

Se recorrió el ambiente del río Dulce para observar y comprender los procesos de erosión, transporte y sedimentación en

las obras ubicadas en ambas márgenes del mismo, en especial entre las ciudades de Santiago del Estero y La Banda (Figura 1). También aguas arriba y aguas abajo de ambos ejidos urbanos se apreciaron las condiciones del escurrimiento natural del río, sin las alteraciones producidas por dichos asentamientos.

Actividades en el laboratorio

Comprendieron la selección de imágenes satelitales históricas y recientes y su posterior procesamiento de los datos espaciales mediante SIG. Ello permitió realizar: i) transformaciones geométricas y estandarización de las imágenes, al efecto de una correcta comparación de la geometría del río, ii) observar los cambios en la geometría del Río Dulce, iii) digitalización del cauce en las diferentes fechas y generación de las líneas centrales correspondientes, iv) producción de un modelo de sombras del terreno a partir de un Modelo Digital del terreno (SRTM NASA), v) mediciones sobre las imágenes y polígonos, vi) elaboración de cartografía. Los procedimientos utilizados son los básicos para trabajos que buscan generar una base de datos terrestres y también su posterior procesamiento mediante SIG (Jensen 2007, Eastman 2006).

Los datos satelitales utilizados fueron: i) LANDSAT MSS 246-79 del 28.02.1975 (Servicio Geológico de los EEUU-USGS), ii) LANDSAT TM 230-79 del 10.01.1987 (USGS), iii) CBERS-2B HRC 171-B-131-3 del 28.03.2009 del catálogo de imágenes de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales-CONAE. Se analizaron otras imágenes de diferentes fechas, decidiéndose por las indicadas anteriormente ya que permiten detectar variaciones del río hasta la actualidad. También se emplearon imágenes Geoeye de la aplicación libre Google Earth, y utilizando sus posibilidades de visualización se identificaron elementos geomorfológicos y estructurales del lugar en estudio, coordenadas, altitud de puntos y perfiles transversales del terreno.

CONTEXTO GENERAL. HIDROGRAFÍA E HIDROLOGÍA

La cuenca hidrográfica del río Salí - Dulce, ubicada en su mayor parte en las provincias de Tucumán y Santiago del Estero, nace en el macizo del Aconquija desde donde desciende a través de una extensa red de afluentes que formarán el río Salí, y se desarrolla hasta el Embalse de Río Hondo con su cuenca alta de 20.400 km² a lo largo de 225 km. Desde el dique homónimo, el Río Dulce, o Mishky Mayu, por su topónimo quechua, escurre atravesando una zona de lomadas con cambiantes direcciones. Al Este de la ciudad de Santiago del Estero tiene una dirección general NO - SE y posteriormente N-S, para retomar el primer rumbo hasta su desembocadura. Atraviesa diagonalmente la extensa llanura de Santiago del Estero y en crecientes sus aguas inundan ambos lados de su cauce formando bañados, ocupando bajos, creando lagunas temporarias y finalmente desemboca en la Laguna de Mar Chiquita al SE provincial. El recorrido de este tramo es de 454 km, y es donde desarrolla su cuenca inferior de 37.000 km², que junto con la parte superior integran un total de 57.400 km² (Martínez 1999).

El embalse Río Hondo, a cota de umbral de vertedero (272 msnm) tiene una capacidad de almacenamiento de 1.155 hm³ y de 1.500 hm³ a cota de compuerta de vertedero (274 msnm). El módulo del Río Dulce, actualizado al año 1.997 es de 104 m³/s (Martínez, 1999), y desde su puesta en funcionamiento en el año 1967, los picos de crecidas máximas se produjeron en los años 1984, 2000 y 2007 con 1.446 m³/s, 1.395 m³/s y 1.183 m³/s, respectivamente (Fariás et al. 2007).

Se aprecia que estos valores están por debajo de la capacidad de evacuación por vertedero de 2.409 m³/s (Martínez 1999), crecida máxima esta, que podría presentar a la salida del embalse.

El régimen de escurrimiento principal del río Salí - Dulce está comprendido entre los meses de diciembre a abril, dentro de su correspondiente año hidrológico y con sucesos de crecientes de envergadura entre enero a marzo (Martínez 1.999). El caudal instantáneo mayor conocido, aportado por su cuenca al embalse de Termas de Río Hondo, fue de 4.100 m³/s el 18 de marzo de 1994 y antes de la construcción de esa obra el mínimo fue de 0,00 m³/s, en noviembre del año 1937. Dicho valor fue registrado aguas abajo del dique mencionado en la estación de aforo El Sauzal, operada por la ex Agua y Energía de la Nación (Martínez, 1999).

ASPECTOS DE LA GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGÍA

La información se obtuvo del estudio Geología del río Dulce entre Termas de Río Hondo y el Dique Los Quiroga (Collantes 1983), de la Carta Geológica Santiago del Estero (Martin et al. 2000), a lo cual se suman observaciones recogidas en el campo.

Litología del lecho

Entre las ciudades de Santiago del Estero y La Banda el lecho está formado por arenas finas micáceas grisáceas con gravas finas y sueltas. La figura 2 incluye la curva granulométrica y fotografías de los sitios de muestreo (Fariás et al. 2007) en la cual se observa el carácter homogéneo del material. Estos sedimentos superficiales del Holoceno recubren a un antiguo cono aluvial que formó el río Dulce (Martin et al. 2000), cuyo ápice se inicia a menos de 5km al NO del puente Carretero (Figura 1). Los depósitos del cauce, jóvenes, recientes y homométricos tienen la predisposición a ser erosionados generando un fondo móvil. Este comportamiento también ocurre en los márgenes durante tiempos relativamente cortos y observables a simple vista. Al Oeste de la zona de estudio, aguas abajo del Dique Los Quiroga, el ambiente del lecho ordinario del río se diferencia del anterior por estar conformado de limonitas y arcillitas rojizas laminadas y /o masivas del Plioceno Superior, descrita en un perfil litológico tipo (Collantes, 1983) y también observadas en el campo (Figura 2).

Estructuras geológicas

Las diferentes litologías del lecho rocoso están íntimamente relacionadas con la presencia de fallas, una de ella es la

de Huyamampa (Martin et al. 2000) que pasa por la ciudad de Santiago del Estero y que produjo el ascenso del bloque Oeste del área de estudio. Al Este de la misma se formó un cono aluvial, formado por arenas y gravas y que constituye la principal reserva de agua subterránea de Santiago del Estero y La Banda entre otras ciudades de importancia de la provincia. Desde el dique de Termas de Río Hondo hacia el Este y hasta un poco antes de ambos núcleos urbanos, el río circula entre fallas de direcciones cambiantes (Figura 3). Aquí, el lecho formado de limonitas y areniscas rojizas poseen diaclasas, y es por donde el río excava y modela su cauce (Figura 2) poniendo en evidencia el control estructural existente (Martin et al. 2000).

En secciones topográficas transversales al curso de agua, obtenidas de las imágenes Geoeye (Google Earth), se aprecian desniveles entre el talweg y las divisorias de 20 m, y que unos 6 km antes del puente Carretero se reducen a 12 m y permiten identificar distintos elementos geomorfológicos del Río Dulce (Figuras 3 y 4).

Elementos geomorfológicos y estructurales.

La acción geológica para modelar la superficie mediante procesos de erosión, transporte y sedimentación (Tarbuck y Lutgens 2005), no escapa a nuestro río que elaboró su ambiente fluvial donde se pueden observar las formas típicas (Bloom 1973). Entre los diferentes elementos geomorfológicos identificados, pueden mencionarse los erosivos como el lecho mayor, menor, canal de estiaje, terrazas erosión, márgenes cóncavas del cauce y faja de divagación del mismo, mientras los depósitos aluviales están integrados por islas en el lecho ordinario, barras de punta, depósitos en márgenes y terrazas aluviales (Figuras 4 y 5).

Se consideran como elementos estructurales (Tarbuck y Lutgens 2005) a las obras que se ejecutaron para controlar inundaciones, concepto que fue ampliado a las estructuras realizadas para sortear el lecho del río. Todas ellas tienen incidencia y modifican los elementos geomorfológicos anteriormente mencionados. Las obras se las designa conforme a la terminología local, así tenemos los puentes, Carretero, originalmente ferroviario, hoy remodelada como vial; el Negro, ferroviario y la autopista San Francisco Solano. Todas ellas permiten la comunicación entre las ciudades de Santiago del Estero y La Banda. Otras obras son: el Canal Matriz y el que conduce sus excedentes al río; costaneras, el hipódromo provincial; parque industrial y sectores urbanizados (Figura 5).

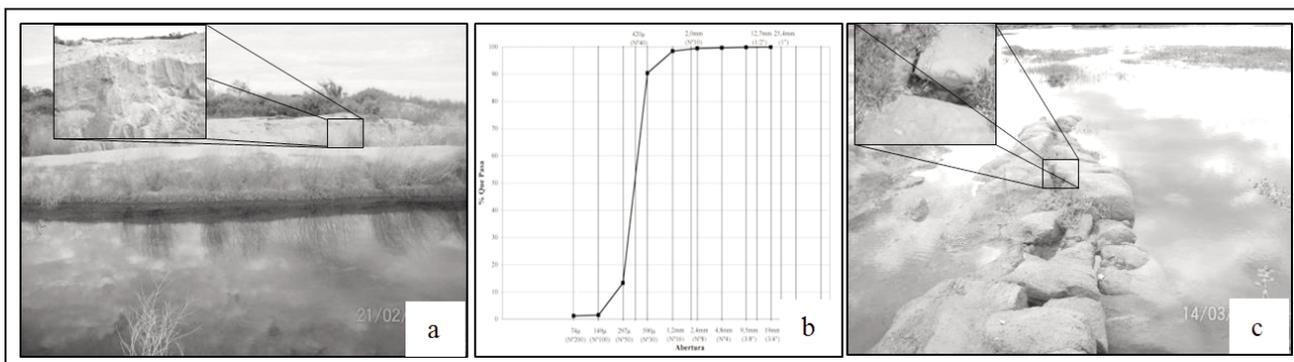


Figura 2. Litologías del río Dulce. a: Arenas micáceas grisáceas con gravas recientes. b: Curva granulométrica. c: Limonitas y arcillitas rojizas con diaclasas. Detalles en recuadros.

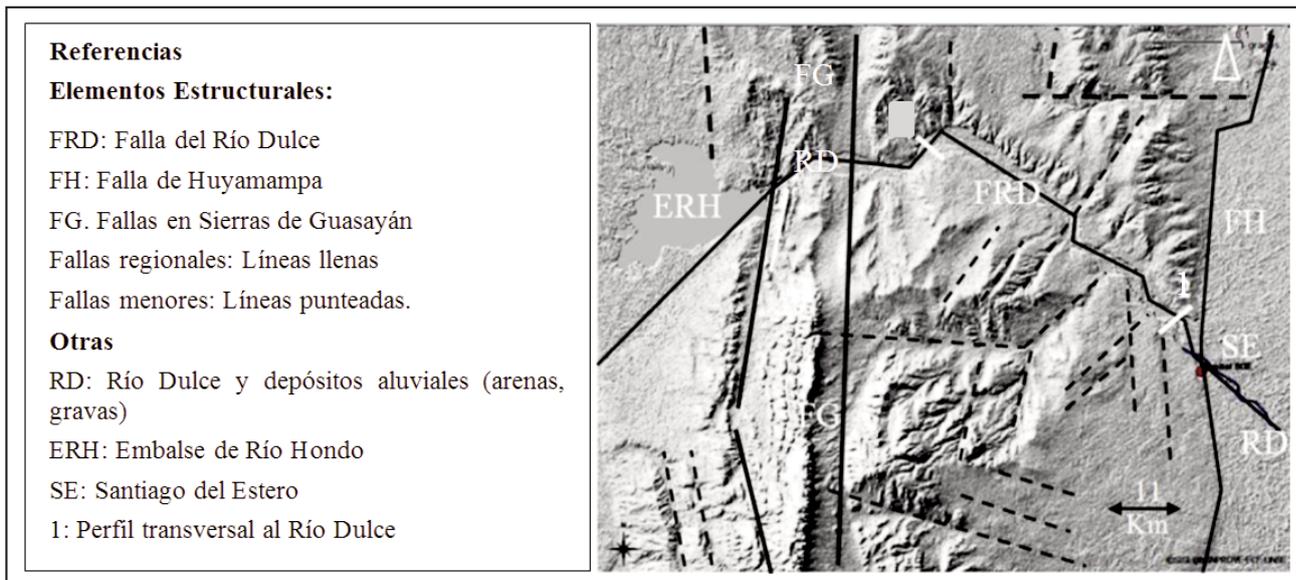


Figura 3. Fallas regionales, estructuras menores. Ubicación del perfil 1.

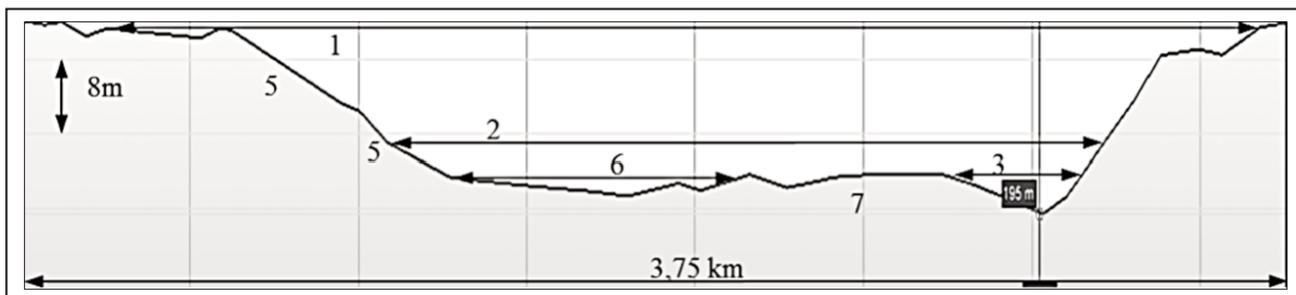


Figura 4. Perfil 1: (1): Antiguo valle del río Dulce (2) Llanura de inundación actual y (3) Lecho actual y canal de estiaje (4) Terrazas abandonadas, (5) zonas de canteras y (6) Cauces abandonados pasibles de activarse con crecientes (7) Depósitos actuales en forma de barras o islas.

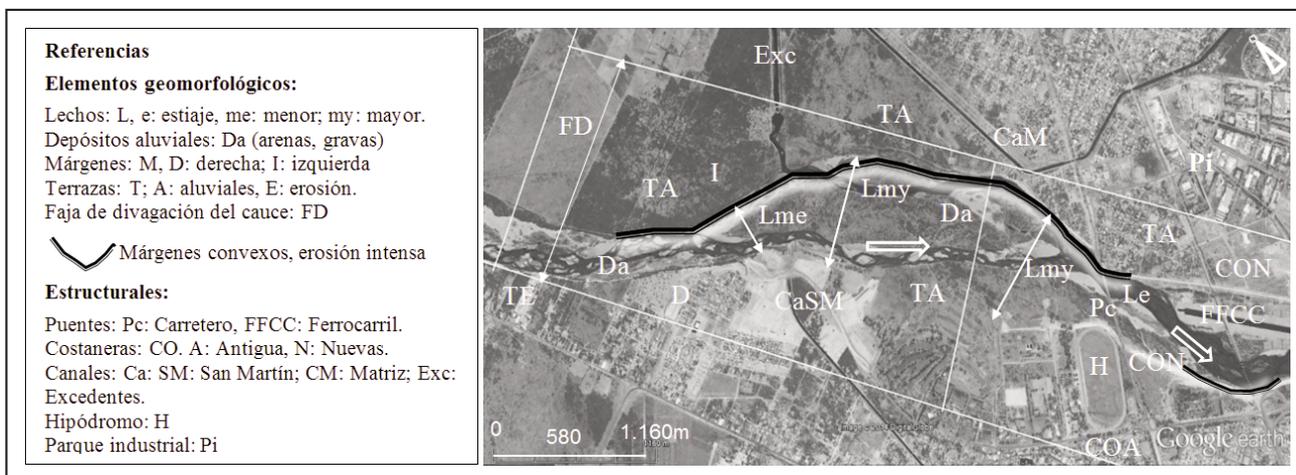


Figura 5. Elementos geomorfológicos y estructurales. 1: Imagen Geoeye, Google Earth 24/09/2013.

Migración del cauce

Mediante el análisis temporal de imágenes satelitales entre los años 1973 al 2009, aguas arribas del puente Carretero, se constata el desplazamiento y ensanchamiento del cauce del río Dulce (Figura 6) cuando los escurrimientos comenzaron a desviarse al realizar el hipódromo. Se anularon 4 vanos (*Farías et al. 2007*), contados desde el estribo derecho. El proceso natural de divagación del cauce habría sido acelerado hacia la margen izquierda, aunque también facilitado por el vuelco de excedentes provenientes del denominado Canal Matriz. El río fue erosionado lateralmente al lecho ordinario, provocando su ensanchamiento, en la dirección NE - E y poniendo en riesgo a los elementos estructurales próximos a la orilla izquierda (Figuras 5 y 6).

Erosión

La serie temporal mencionada permitió estimar que la margen izquierda cóncava se desplazó aproximadamente 750m hacia el Este con 22m anuales de promedio, por lo que el río erosionará para diferentes caudales que no necesariamente deben ser excepcionales (Figura 7). Si continúa su acción, y no hay nada que lo impida ya que es una terraza aluvial, pondría en riesgo al Canal Matriz para riego. Con el empleo de la imagen Geoeeye (Google Earth) se comprueba también la distancia

que lo separa del cauce actual, es de 93m, y el desnivel con el fondo del valle más de 8m (Figuras 4 y 7). Si el río captura a esa obra provocaría en principio, su rotura y podría avanzar a zonas urbanizadas, parque industrial, centros comerciales e incluso sedes de la UNSE (Figura 5 y 6).

La construcción de la costanera sobre margen izquierda del río, pasando por debajo de uno de los vanos del Puente Carretero, no llega a proteger dicho sector y si hubiese sido construida sería muy susceptible de ser erosionada como la que recientemente presentó deterioros en la base del talud después de una inundación. Se considera que ello ocurrió por estar realizada muy próximas al lado cóncavo del cauce, (Figura 4), aunque sin descartar cuestiones técnicas - constructivas.

En el sector de margen derecha se inició la construcción de la nueva costanera también pasando por debajo del puente Carretero, provocando una nueva reducción del lecho ordinario. Este agravante junto con el hipódromo y la costanera de margen izquierda, inutilizan 6 de los 12 tramos, disminuyendo el 50 % de los vanos útiles, para el paso de los grandes caudales. Es decir quedan 420m libres de los 840 m originales, (Figura 5). Esta situación lleva a que en la sección de paso del puente se agudicen procesos de erosión en el lecho menor y también de socavación de las pilas y cabezales. (*Farías, et al 2007*)

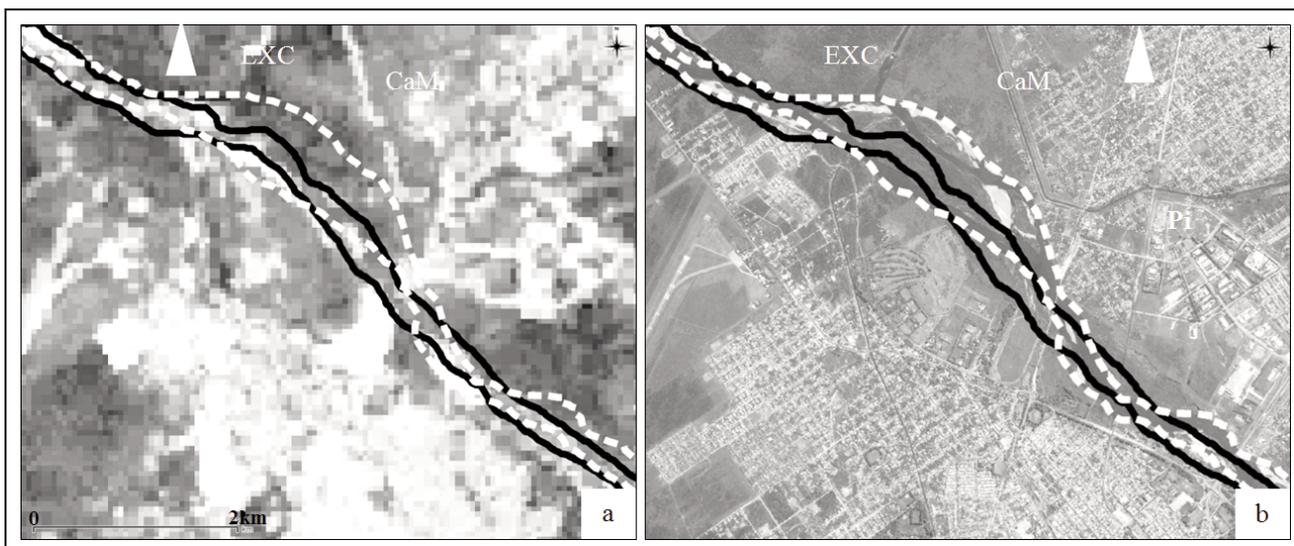


Figura 6. Evolución de la margen izquierda del río Dulce año 1973al 2009. (a): Imagen Landsat; (b): Imagen Geoeeye, Google Earth 28/03/2009. Línea negra: lechos del año 1973, blanca: año 2009.

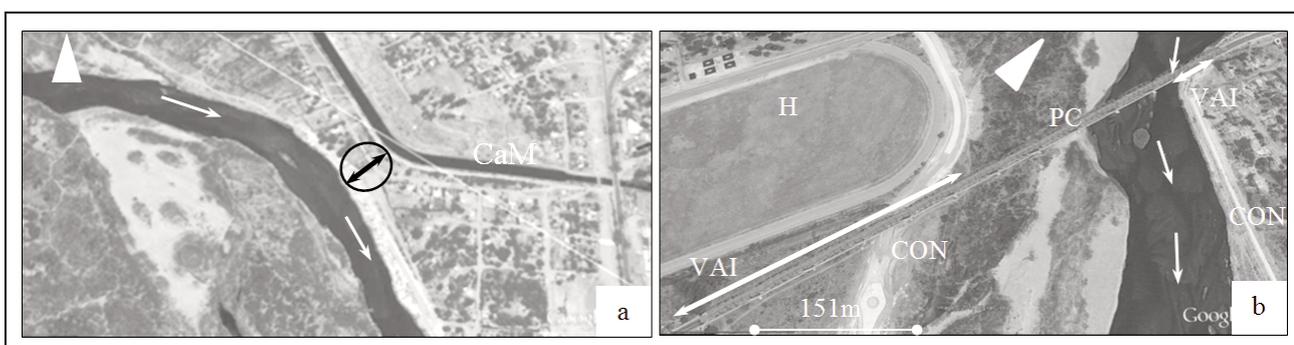


Figura 7. (a): Distancia entre el Río Dulce y el Canal Matriz (CaM) de 93m; (b): Vista en planta: estrangulamiento del lecho ordinario en el Puente Carretero: Pc. H: Hipódromo. CON: Costaneras nuevas. VAI: Vanos inutilizados: 420m de 840 m = 50%.

Una posible lectura es que dichas costaneras se comportan relativamente resistentes a la erosión, al ser compactadas y protegidas durante su construcción. En época de crecientes los caudales traen aparejado aumento de la velocidad y generan el incremento de flujos turbulentos, por lo que el fondo del lecho, al no estar densificadas sus partículas, será proclive a ser removido con mayor facilidad que las márgenes artificiales delimitadas con la costanera. Es decir se profundiza el lecho arenoso y los torbellinos que afectan la zona de cabezales y pilas del puente se harán más frecuentes socavándolos y exponiéndolos al riesgo de su eventual colapso y poniendo en peligro al Puente Carretero, (Figura 8).

Si bien estos procesos locales se producen al colocar obras en el lecho, la tendencia general de erosión del fondo del cauce, también se vio acelerada cuando se construyeron aguas arriba el azud Los Quiroga y posteriormente el Dique de Termas de río Hondo. Ambos embalses constituyen niveles de base locales, que contribuyen a la formación de depósitos de deltas en sus colas y aguas abajo a acelerar la erosión. Esta concatenación puede ser significativa si no se le presta la debida atención, ya que el Puente Carretero, obra emblemática del patrimonio santiaguense, podría verse amenazada seriamente por dicho proceso y también porque hay deterioros propios de la antigüedad de la obra tanto en sus pilas como cabezales de fundación expuestos a la intemperie. (Figura 8)

Sinuosidades menores

Entre los puentes Carretero, Negro y San Francisco Solano el río formó en su lecho arenoso (Figura 9) un cauce sinuoso donde las amplitudes y longitudes son menores, respecto a las que se desarrollan aguas arriba y aguas abajo de la primera y última de las mencionadas obras. Dicho desarrollo se interpreta como una adaptación del flujo del río a la ocupación por el uso urbano de ambas márgenes, particularmente la derecha más consolidada ya que se asienta la ciudad de Santiago del Estero. También se debe mencionar la presencia de las pilas y cabezales de los puentes indicados, que en el lecho ordinario del río modifican el escurrimiento del agua (Figuras 1, 5 y 8).

En un análisis expeditivo del terreno se obtuvieron gradientes a partir de imágenes Geoeye (Google Earth), en tres tramos del río: 1) aguas arriba del puente Carretero, con valores entre 6 y 6,7⁻⁴; 2) desde el anterior y hasta el puente San Francisco, de 2⁻³; 3) aguas abajo de este último, de 8,9⁻⁴. Es decir un valor, en orden de magnitud, similar al de aguas arriba del puente Carretero pero menores al tramo intermedio (Figura 8). Esos cambios de la pendiente, comprobable con estudios de detalle del lecho que exceden al presente trabajo, podría ser el motivo que en épocas de crecientes, produzca localmente la rotura del equilibrio erosión / velocidad, induciendo a la remoción de

partículas del mismo. Respecto a la canalización en la imagen, todavía no funcionó y al no registrarse una creciente importante su comportamiento tampoco se pudo evaluar. En principio propiciaría también el aumento de la velocidad del flujo, si por ella se encauza todo el caudal del río (Figura 9). Los hechos parecen corroborarlo, ya que graves problemas de socavación ocurrieron en los tres puentes (Figuras 8 y 10).

El Puente Negro, ferroviario, también posee daños significativos en cabezales y pilas por corrosión química y empujes mecánicos sobre tablas estacas con que fueron protegidas. Originalmente poseía una extensión de 1283 m y tiene hoy, entre ambas costaneras 780 m útiles. Es decir que supera a los dos puentes viales, aproximadamente en más del 46% al puente Carretero y un 60% al puente San Francisco Solano. Esta última obra en el año 2007 tenía una sección de 250m (Fariás, et al 2007) y actualmente es de 240m. Esta disparidad de largos en las medidas de los puentes permite, en base a las observaciones realizadas, fijar prioridades para actuar con el fin de evitar riegos por mayor socavación de dichas estructuras atento al costo que significa restituirlos e incluso rehacerlos, si son destruidas. En este sentido lo más conveniente sería construir pilas y cabezales más separadas en el lecho del cauce, o en el mejor de los casos evitarlas realizando estructuras seguras apoyadas sobre márgenes estables, o con cierta estabilidad relativa de los mismos en el tiempo, o bien estructuras que mejor se adapten a la dinámica fluvial del Dulce. En este contexto, la limpieza del lecho, acortar los cauces sinuosos menores, remover depósitos del mismo (Figura 5 y 8) podría facilitar el escurrimiento. Hacerlo en las actuales circunstancias y contenido de problemas, aceleraría la velocidad y con ello la capacidad de erosión del lecho y por ende de la socavación de las pilas. (Figura 9).

Aguas abajo del puente San Francisco Solano

Después de atravesar la mencionada obra, el río se dirige a la margen derecha y escurre de modo paralelo a ella. Esta protegida con espigones de escombros para evitar su erosión y posteriormente se dirige a la margen izquierda. Esta última está constituida por antiguos depósitos fluviales y es fácilmente removida por la acción erosiva del río excavándola sin dificultades. Este proceso pone en riesgo asentamientos poblacionales, que sin ninguna planificación fueron ocupando el lugar (Figura 11). Una interpretación de cómo llega a este lugar la acción erosiva del río tiene que ver con la protección de la margen derecha, la cual direccionó las corrientes de flujo hacia la izquierda ese lado de la ribera. Esta margen forma la parte de un cauce de mayor amplitud, sin defensas que la protejan como en el sector ubicado entre los puentes descriptos (Figura 11).

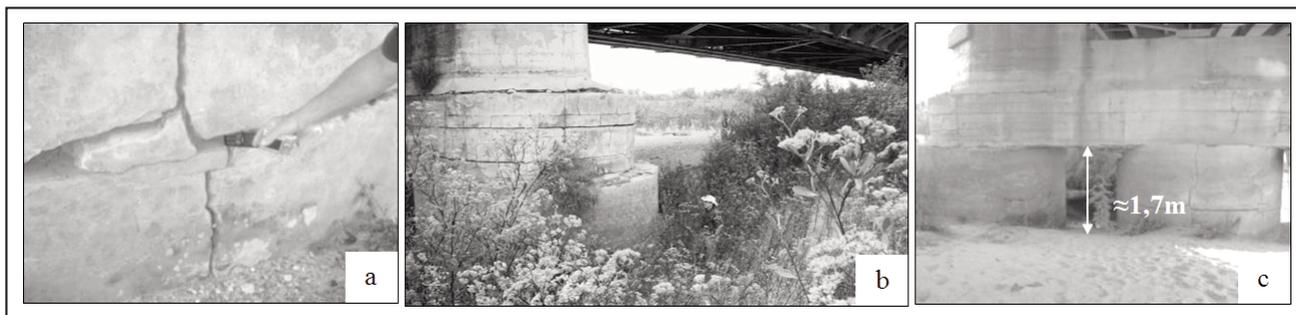


Figura 8. (a). Deterioros importantes en pilas (b).Socavación de las pilas y cabezales descubiertos, ver la persona de referencia. (c). Profundidad de la socavación de la pila. Febrero 2014.

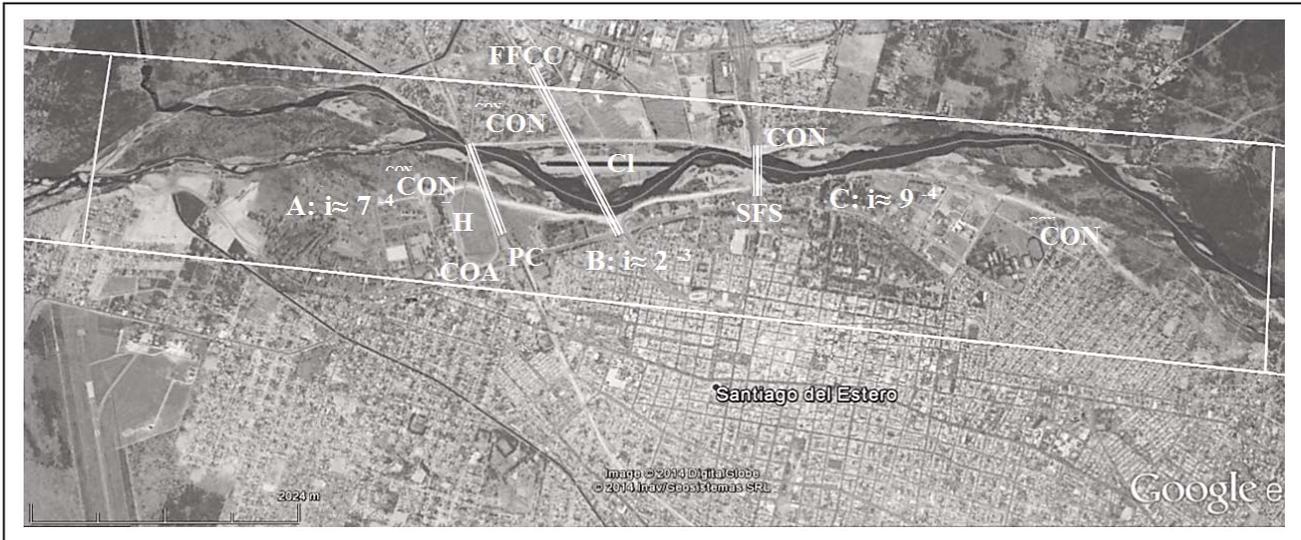


Figura 9. Tramos del río con diferentes pendientes: A: Aguas arriba del Puente Carretero (PC); B: Intermedio; C: Aguas abajo del Puente San Francisco Solano. CI: Canalización. H: Hipódromo. CO: Costaneras: A. Antigua. N: Nuevas.

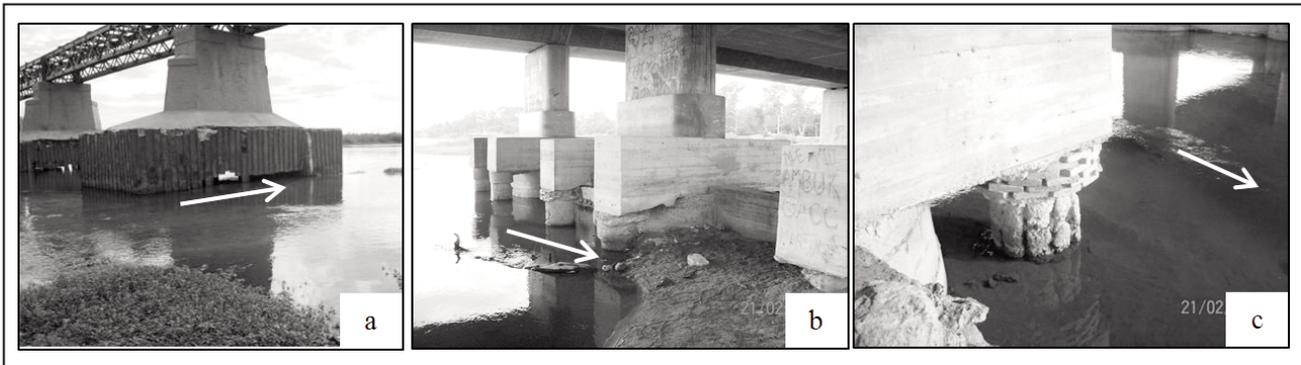


Figura 10. Socavación de pilas y cabezales. (a): Puente Ferrocarril, con procesos de corrosión de las tablestacas de protección de pilas. (b y c): Puente San Francisco Solano, observar el eje mayor de los cabezales transversales a la corriente.

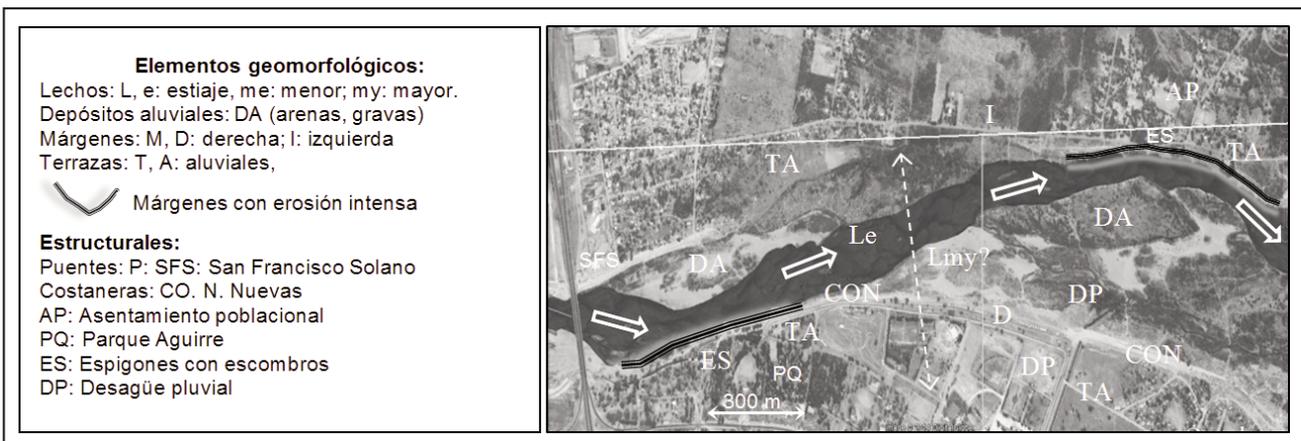


Figura 11. El flujo del río va de margen derecha a izquierda, poniendo en riesgo el asentamiento.

El análisis de la serie temporal de imágenes entre 1975 y 2009 también mostró la tendencia de la línea central del río a desplazarse a la izquierda, lo que acentuó en esa margen la erosión de la curva cóncava del cauce existente. En el año 2010,

durante la creciente registrada del río Dulce, se intervino construyendo espigones para su defensa cada 50m y 100 m de separación (Figura 10).

Una situación especial se observa en la margen derecha, donde existe uno de los desagües principales de la zona céntrica de la ciudad de Santiago del Estero. Este atraviesa la costanera, todavía en construcción, mediante una alcantarilla que lleva sus aguas al río, dentro de su llanura de inundación ordinaria. Si bien resulta una solución lógica para evacuar aguas de precipitación, no lo es si se analiza la posibilidad que el agua del río se introduzca por el canal de desagüe en épocas de creciente. Esto ya ocurrió en el año 2010 (Figura 11), por lo que dicho canal es una potencial vía de entrada de agua e inunda las zonas que pretende defender esa nueva costanera. En este contexto hipotético, ¿qué ocurriría si el desagüe pluvial no pudiera evacuar el agua de una lluvia de significativa intensidad en la ciudad? Se estará en la situación que el agua pluvial, impedida en su circulación, se desplace afectando a otros sectores urbanizados de la ciudad poniéndolos en peligro con posibilidad de riesgos evitables a los mismos.

Consideraciones generales

Los problemas analizados individualmente en este trabajo tienen su propia complejidad, pero que durante las crecientes del río se pueden concatenar, interrelacionar y potenciar, haciendo aún más laborioso su estudio, y por ende la búsqueda de soluciones. Particularmente cuando en un ambiente fluvial se supera el umbral geomorfológico (Pitts, 1984), los procesos que actúan se tornan inmanejables, y en este contexto pueden también generar consecuencias sociales no deseadas. El río Dulce o Mishki Mayu, no está exento de ellos, por lo que la migración acelerada del cauce, erosión, contaminación potencial del río, colmatación de embalses, inundaciones, cambios de los sitios y volúmenes de depósitos del lecho, etc., van a continuar y en la medida que se intervenga inadecuadamente tenderán a agravarse.

CONCLUSIONES

En el marco de todo lo expresado precedentemente los resultados presentados de este trabajo tienen el objetivo de aportar conocimientos que permitan la solución de los problemas identificados.

1. El tramo comprendido entre ambas ciudades del Río Dulce está siendo limitado en su divagación natural. El emplazamiento de la Santiago del Estero desde su fundación tuvo inundaciones que incluso obligó su traslado al actual sitio (Fariás et al, 2007); así que proteger y consolidar la margen derecha fue una constante en la historia de la ciudad. Las diversas acciones en ese sentido llevaron al Río Dulce a erosionar y avanzar hacia su margen izquierda para poder conducir los caudales de sus aguas. Por el contrario, la expansión de la ciudad de la Banda hacia el río, trajo como consecuencia que se tenga que hacer la costanera sobre margen izquierda y realizar acciones diversas de defensa (Figuras 5, y 7).

2. La amplia sinuosidad del cauce aguas arriba del puente Carretero en el río Dulce afecta la margen izquierda y pone en riesgo al canal matriz, ya que está solo a 93 m de los 800m originales que los separaba del río. Esta situación generada con la construcción del hipódromo, en parte del lecho ordinario, provocó la migración acelerada del cauce hacia la margen izquierda. También se ensanchó facilitado por los excedentes del canal matriz derivados al río Dulce, por lo que si el proceso continúa sin la adecuada protección de la margen se pondría en riesgo el azud construido para conducir los excedentes de aguas (Figura 7).
3. La construcción del Dique Los Quiroga y el Embalse de Termas de río Hondo, llevó que los procesos de erosión del fondo del lecho aumentaran aguas abajo manifestándose en la zona de estudio. A esto se agrega que durante crecientes importantes se produce la socavación de las pilas y cabezales de los puentes construidos sobre el río Dulce, por la anulación de vanos debido a la construcción del hipódromo, y las costaneras de defensa en ambas márgenes del río. (Figura 7).
4. En el puente San Francisco Solano, la colocación de escombros para protección del estribo de margen izquierda direccionaron el flujo del río hacia las pilas y cabezales, cuyo diseño original es inadecuado, por lo que fueron más socavadas y cedieron. Su reparación presenta también una inapropiada disposición al colocársela transversal al escurrimiento. (Figura 8)
5. Otra potencial causa que incidiría en el aumento de la socavación de las estructuras es el aumento de la velocidad en el tramo de sinuosidades menores del río, aunque para su comprobación se requerirá realizar estudios de detalles del cauce. Se estima a futuro que las obras más comprometidas son los puentes y las costaneras en contacto con el lecho del río. (Figura 9).
6. Aguas abajo del puente San Francisco Solano, la margen derecha del cauce se encuentra protegida relativamente mediante la nueva costanera; aunque es conveniente aclarar que al ser atravesada por el desagüe pluvial a cielo abierto de la ciudad de Santiago del Estero esta obra puede permitir la entrada de agua del río, al área que pretende proteger de las inundaciones. Será necesario evitar la erosión del margen izquierdo, ya que a tan solo 70 m se encuentra un asentamiento poblacional (Figura 11).
7. Finalmente si se quiere corregir y mejor actuar en los problemas planteados, se considera que sobre la base del conocimiento de todos los actores involucrados, directamente o indirectamente, se deben articular acciones estructurales, como el camino que permita arribar a las soluciones pertinentes. Transitarlo tendrá el objetivo de lograr el mejor y seguro desarrollo de la ribera del Mishki Mayu, o río Dulce, para el presente y futuro de la población de las ciudades de Santiago del Estero y La Banda.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

BLOOM, A. 1973

La superficie de La Tierra.

4 (53 - 69) Ediciones Omega S.A.

COLLANTES M. 1983

Geología de la cuenca del río Dulce entre Termas de Río Hondo y Los Quiroga con énfasis en Geomorfoloía. Facultad de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Tucumán. IIB2 C (17-48); IIB3 (59-60).

- EASTMAN, J. R. 2006.
Idrisi Andes Guide to GIS and Image Porcessing.
Clark Labs, Clark University, Worcester, MA, USA.
- FARÍAS, ET AL. 2007.
Estudios hidráulicos y fluviales del Rio Dulce para la determinación de línea de ribera e impacto de obras Provincia de Santiago del Estero,
Consejo Federal de Inversiones, Universidad Nacional de Santiago del Estero. I: (2 - 8).I.5: (13 - 21).
- JENSEN, J. R., 2007.
Remote sensing of the environment: an earth resource perspective.
2nd Ed. Prentice Hall, USA.
- MARTÍN ET AL 2000
Carta geológica de Santiago del Estero 2763-III.
Servicio Geológico Minero Argentino - Universidad Nacional de Santiago del Estero.
- MARTÍNEZ N, 1999
Aprovechamiento del rio Dulce, Proyecto Ejecutivo del Dique Derivador Tuhama.
Provincia de Santiago del Estero, Consejo Federal de Inversiones. I: (2 - 4).
- PITTS, J. 1984.
A Manual of Geology for Civil Engineers.
1: (6 -9). Word Scientific Publishing Co.
- TARBUCK E. J. Y LUTGENS F. K. 2005.
Ciencias de La Tierra. Una introducción a la Geología Física.
5: (111- 121); 10: (213 - 234). Prentice Hill.



ASAGAI

ASOCIACIÓN ARGENTINA
DE GEOLOGÍA APLICADA
A LA INGENIERÍA

Metodología para la delimitación de las áreas de riesgo hídrico en la Provincia de Santa Fe

Mastaglia, María Inés - Pusineri, Graciela - Arbuat, Alejandra - Pilatti, Miguel Ángel

Modelo de redes funcionales orientado a pronóstico de crecidas en cursos de llanura del Gran Rosario, Santa Fe, Argentina

Scuderi, Carlos M. - Riccardi, Gerardo A. - Zimmermann, Erik D. .

Nota Técnica. Estabilización de las subrasantes loésicas utilizando el descarte de piedras ornamentales

Cruz, María P. - Martin Schmädke, Italo F. - Arnaudo, Carlos E. - Higa, José J.

Construcción de vínculos interdisciplinarios e intersectoriales desde las ciencias sociales para el abordaje del riesgo hídrico. Ciudad de Santa Fe

Córdoba, Anabella - Chialvo, Patricia - Morresi, María del Valle

Estimación de la lluvia de diseño mediante información multi-satélite de libre disponibilidad

Catalini, Carlos G. - García, Carlos M. - García, Cesar - Jovanovic, Nebo Z. - Bagan, Richard DH

Modelo de flujo de agua subterránea en el sector industrial planificado (Tornquist, provincia de Buenos Aires)

Albouy, René - Lafont, Daniela - Lexow, Claudio - Carrica, Jorge

Cartografía de susceptibilidad hídrica en el delta del río Paraná

Sepulcri, M.G. - Flamenco, E.A. - Pizarro, M.J. - Herrera, M.G. - Borus, J. - Giordano L.

Procesos modeladores en los acantilados de Las Grutas, provincia de Río Negro

Fucks, Enrique Eduardo - Schnack, Enrique Jorge - Scalise, Armando - Ahrendt, Kai - Vafeidis, Nassos - Sterr, Horst

Visión crítica por introducción de obras en márgenes y cauce del río Dulce entre las ciudades de Santiago del Estero y La Banda

Castellano, Juan - Ávila, Edgardo - Zerda, Hugo

Portada: Vista de las características geomorfológicas del valle en el que se localiza Junín de los Andes, en segundo plano volcán Lanín.

Fotografía: F.X. Pereyra

**Revista de Geología
Aplicada a la Ingeniería
y al Ambiente**

