

OBRAS DE ESTABILIZACIÓN DE PROCESOS EROSIVOS EN SUELOS LOÉSSICOS (CÁRCAVAS)

A. Rodríguez¹, G. Moya¹, E. Castelló¹, G. Vanoli¹, H. D. Farías² y F. López^{1,3}

Resumen: En el sur de la provincia de Córdoba (región central de Argentina) se encuentran numerosos arroyos afectados por procesos erosivos de cárcavamiento. En este artículo en particular se presenta en caso de estudio del arroyo “El Gato”, el cual cruza la Ruta Nacional N° 8 cerca del pueblo de Sampacho. Allí se observa un severo proceso de incisión de su cauce como consecuencia del fenómeno de erosión en cárcava al que se encuentra sometido. Este fenómeno se materializa mediante la formación de un escalón en el lecho fluvial sobre el cual se desarrolla una cascada de aproximadamente 13 m de altura; presentando una fosa de socavación debido al impacto del agua. El impacto de este proceso es altamente significativo, ya que afecta negativamente su área cercana, reduciendo áreas de uso agrícola y dañando las obras de infraestructura existentes (caminos, ferrocarriles, puentes y poliductos). Asimismo, el impacto ambiental es altamente negativo, fundamentalmente por las consecuencias asociadas a la incisión del cauce, el descenso del nivel freático y el incremento del transporte de sedimentos hacia aguas abajo. En este trabajo se presentan los estudios básicos realizados para caracterizar el fenómeno y se describe la solución adoptada para estabilizar el cauce de este arroyo. Además, se presentan las modificaciones realizadas en la etapa de obra y los detalles del seguimiento durante la operación y mantenimiento de la misma.

Palabras Claves: daño estructural, erosión en cárcava, estructuras hidráulicas, loess.

INFRASTRUCTURE FOR STABILIZATION OF GULLY EROSION IN LOESS

Abstract: In the southern area of Córdoba province (central region of Argentina) there are several natural channels affected by erosion processes of gully type. In this paper the case study of the “El Gato creek” is presented. The creek crosses National road N° 8 near the town of Sampacho where a severe gully process and incised channel can be observed. This phenomenon is characterized by an abrupt step in the fluvial bed, with a fall of 13 m height and an erosion basin due to the water action. The impact of this process is important for several reasons. It has adverse effects in the neighboring lands, leading to reduction of the areas for agricultural use, and damaging the infrastructure works (such as roads, railways, bridges and pipes). Other negative environmental impacts are related to channel erosion, water table drop, and the increase of sediment production and transport downstream. This paper presents the basic studies done to characterize the phenomenon as well as a description of the solution selected to stabilize the river-bed. In addition, the paper describes the modifications carried out during the construction stage and the follow-up during the operation and maintenance of the work.

Keywords: gully erosion, hydraulic structures, loess, structural damages.

INTRODUCCIÓN

La zona sur de la provincia de Córdoba se encuentra surcada por numerosos arroyos y cursos fluviales afectados por

¹ Universidad Nacional de Córdoba, FCEFYN e ISRH, Av. Hipólito Irigoyen 162, Córdoba, CP 5000, Argentina. E-mail: arodrig@com.uncor.edu.

² Instituto de Recursos Hídricos, UNSE, Av. Belgrano (S) 1912, CP 4200, Santiago del Estero, Argentina.

³ DiPAS Cba., Humberto Primero. 607, CP 5000, Córdoba, Argentina.

importantes procesos erosivos retrogradantes o de carcavamiento (como los arroyos El Gato, Las Lajas, Suco, Corralito, El Basura y otros). Estos fenómenos, típicos de suelos finos (limos loésicos) con bajas pendientes, ocasionan un gran número de inconvenientes a las actividades productivas de la región. Los mismos afectan directamente a las actividades agropecuarias en los campos y a las obras de infraestructura vial, ferroviaria e hidráulica, a la vez que producen impactos ambientales negativos indirectos sobre el área de influencia, como por ejemplo ocasionando el descenso del nivel freático.

Algunos ejemplos de cárcavas en el sur de Córdoba y sus obras asociadas se ilustran en la Figura 1 a la Figura 6. La localización del área se muestra en la Figura 7.

Uno de los casos más importantes de este fenómeno de erosión fluvial retrogradante es el que se presentó previamente en el arroyo El Gato (Figuras 3 y 4). El mismo atraviesa la Ruta Provincial N° 8 entre la ciudad de Río Cuarto y el pueblo de Sampacho. Este arroyo exhibe un severo proceso de incisión de su cauce como consecuencia del fenómeno de erosión en cárcava al que se encuentra sometido.

En el presente trabajo se presenta la extensión y actualización de estudios previos (Farías et al., 2002; Castelló et al., 2003) de análisis hidrológicos, hidráulicos y morfológicos, realizados para caracterizar el fenómeno y se describe la solución técnica estructural adoptada para estabilizar el cauce del arroyo.

La obra estuvo compuesta por un dique de gaviones para salvar el desnivel ocasionado por el proceso de carcavamiento, conformado en su cuerpo principal por una serie de traviesas vertedoras escalonadas longitudinalmente. Aguas arriba del dique propiamente dicho, se previó una dársena de aducción de planta curvilínea para estabilizar el escurrimiento y guiar los filetes líquidos de forma paralela entre sí y perpendiculares al alineamiento del vertedero. Aguas abajo del tramo escalonado se diseñó un cuenco amortiguador, cuya finalidad es la de disipar la energía de la corriente y para restituir el flujo al cauce del arroyo con niveles de turbulencia y velocidades medias menores, evitando así la erosión y la socavación aguas abajo.

Se incluye aquí los detalles más relevantes del seguimiento de la obra durante las etapas de construcción, operación y mantenimiento. Esta última tarea resulta indispensable para este tipo de obras, ya que la localización y detección a tiempo de cualquier inconveniente, permite su reparación y rectificación con inversiones mínimas.

DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE EROSIÓN EN CÁRCAVA

El fenómeno de erosión retrogradante en cárcava se materializa mediante la formación, crecimiento y desplazamiento aguas arriba de un "escalón" en el lecho fluvial debido a diversas causas, como por ejemplo: un descenso del nivel de base en el curso inferior del arroyo, un cambio en el uso de suelo en la cuenca aguas arriba, un incremento en las precipitaciones y caudales, una disminución del tiempo de concentración o alguna combinación de los anteriores.

En el cauce se desarrolla una especie de "cascada" (Figura 3) cuya envergadura es proporcional a la magnitud de los caudales conducidos por el arroyo. La energía del chorro líquido impulsado casi verticalmente desde el extremo de la cabecera de la cárcava hacia el lecho fluvial aguas abajo genera una fosa de socavación de magnitud considerable, la cual a su vez genera inestabilidad en los taludes constitutivos de las márgenes fluviales hasta que se produce una falla. Todo ello se traduce en un súbito desplazamiento de ese escalón hacia aguas arriba, con un gran incremento de la carga sólida transportada por la corriente hacia aguas abajo, en virtud de las grandes masas de suelo removidas por la mecánica del proceso (Farías, 1988, 1998; Stein et al., 1997).

El impacto negativo de este proceso sobre las obras de infraestructura es altamente significativo, ya que afecta o destruye las estructuras de puentes, obras de toma y todo tipo de elemento ingenieril emplazado en el área de influencia del cauce fluvial. Asimismo, el impacto ambiental negativo también puede ser apreciable, fundamentalmente por las consecuencias asociadas a la incisión del cauce, el descenso del nivel freático, y el incremento de la producción y transporte de sedimentos hacia aguas abajo colmatando reservorios naturales (lagunas y esteros) o artificiales y disminuyendo su vida útil y efecto regulador de crecidas y atenuación de inundaciones (Goldman et al., 1986; Thorne et al., 1986).



Figura 1: Vista de la Cárcava del Arroyo Las Lajas, tramo medio (2001). El salto inferior está retenido por un manto de tosca consolidada.

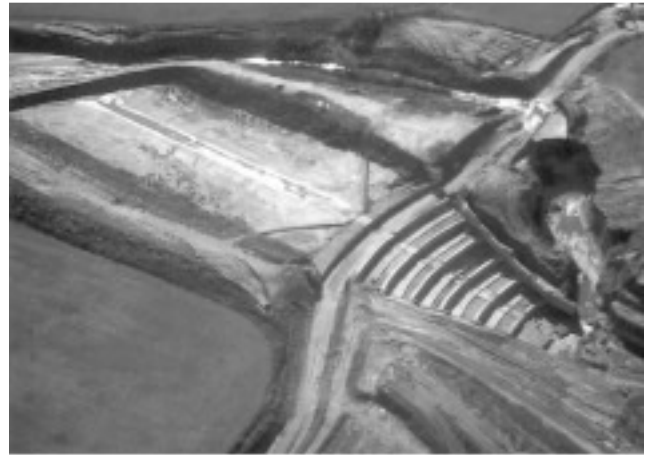


Figura 2: Vista de la obra de protección de la Cárcava La Carolina en el arroyo Las Lajas, tramo superior (2003). Notar el desvío en cárcava sobre margen derecha.



Figura 3: Vista desde aguas abajo Cárcava El Gato. El escalón tiene aproximadamente 10.5 m (2001).



Figura 4: Vista del sistema de estabilización de la cárcava El Gato (2003). Notar la concentración de flujo en el centro para caudales intermedios.



Figura 5. Vista de la cabecera Cárcava Corralito, de aproximadamente 12 m de altura (2005).



Figura 6. Vista de la Cárcava Corralito, 15 km aguas abajo de la cabecera (2005).

En el caso particular del arroyo El Gato, la cabecera de la cárcava se encontraba emplazada (a principios del mes de febrero del año 2001) aproximadamente 800 metros aguas abajo del cruce del arroyo con la Ruta Nacional N° 8. Esta cárcava, cuya cabecera posee más de 12 m de altura, ha demostrado una intensa actividad en los últimos años, avanzando importantes tramos como respuesta a eventos hidrológicos de gran intensidad. Al momento del proyecto la cabecera se hallaba detenida en un manto de tosca.

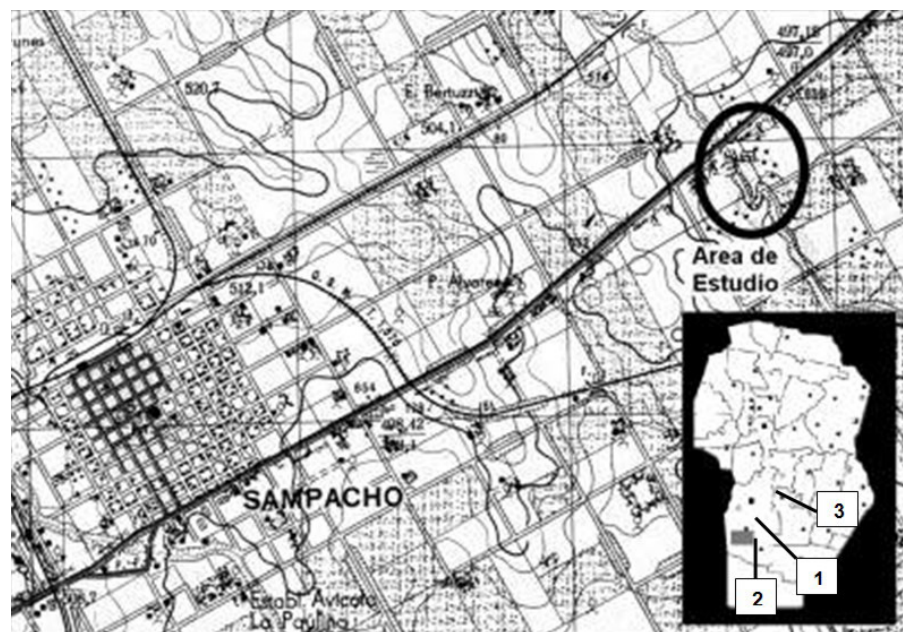


Figura 7: Ubicación del área de estudio al sur de la provincia de Córdoba: 1) Arroyo Las Lajas, 2) Arroyo El Gato y 3) Cárcava Corralito.

El control de esta cárcava resultó de vital importancia para impedir el corte de la Ruta Nacional N°8, la destrucción del puente carretero sobre el Arroyo El Gato y el corte del ramal ferroviario GSM en la conexión a la provincia de Mendoza, y para la disminución del aporte de material sólido a las lagunas naturales y artificiales aguas abajo.

Evidentemente la medida preventiva de control de la erosión retrogradante es una inversión necesaria y de costo significativamente inferior a los daños estructurales y sociales que ocasionaría el corte de las vías de comunicación mencionadas, además de los perjuicios ambientales que se podrían generar en caso de no actuar con medidas tendientes a su estabilización.

En virtud de las características fuertemente dinámicas de este tipo de proceso erosivo, y ante la cercanía de la cabecera en relación a los puentes localizados sobre las vías de comunicación terrestre, se consideró imprescindible disponer de medidas estructurales de control del avance de la erosión retrógrada en el corto plazo.

Para decidir acerca de los aspectos concernientes a las características técnicas de las obras a proyectar, fue necesario realizar una recopilación de antecedentes hidrológicos de las cuencas de aporte y una caracterización morfológica del área de influencia directa e indirecta del sistema fluvial afectado por el proceso de incisión. En ese sentido la información básica documental disponible resultó escasa por lo que para obtener los parámetros de diseño, fue necesario aplicar técnicas hidrológicas simplificadas y realizar numerosos reconocimientos “in situ” a fin de verificar aspectos geotécnicos, recolectar y estimar datos de campo que ayudaran a la toma de decisiones y la definición de criterios y cálculos hidrológicos e hidráulicos.

La Figura 8 muestra el cauce del arroyo El Gato, vista hacia aguas abajo desde la cabecera de la cárcava, en la cual puede observarse el acentuado proceso de incisión del cauce, advirtiéndose además los mecanismos de falla de los márgenes por desplome vertical, acusados por la acumulación de suelo en la base, con un importante desarrollo de vegetación.

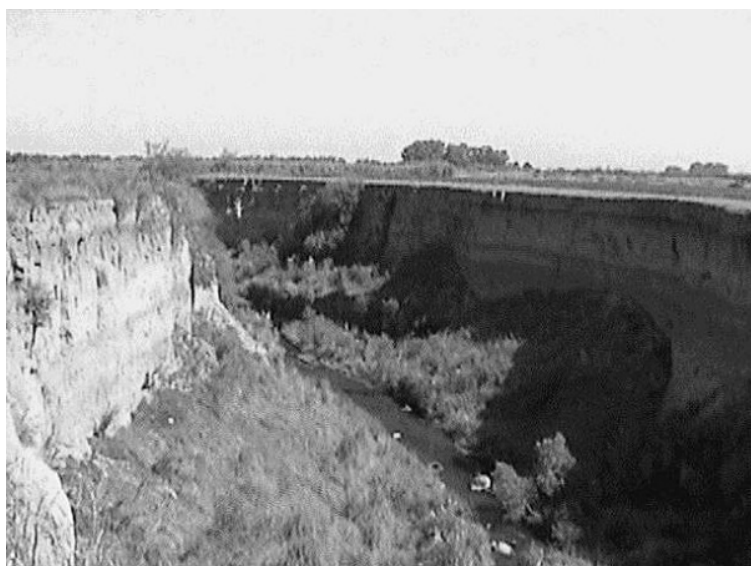


Figura 8: Vista del cauce hacia aguas abajo desde la cabecera de cárcava El Gato (febrero de 2001).

ESTUDIOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS

En virtud de las características geotécnicas de los suelos típicos de la región (limos loésicos), y considerando la hidrología de las cuencas y subcuencas que aportan escorrentía superficial al tramo del arroyo en cuestión, se consideró como medida adecuada la construcción de una obra de protección de gaviones para contener el avance del proceso de carcavamiento hacia aguas arriba. Este tipo de estructura tiene la flexibilidad suficiente como para experimentar considerables deformaciones (generadas por asentamientos y/o socavaciones menores) sin comprometer la estabilidad global de la obra.

Para la selección del caudal de diseño de la obra se tuvieron en cuenta las características hidrológicas de la cuenca y la capacidad actual de conducción hidráulica del tramo aguas arriba en función de la pendiente longitudinal media, la geometría transversal y la rugosidad del cauce menor y las márgenes vegetadas. También se consideraron otros aspectos atinentes al comportamiento morfodinámico y fluvial del tramo de arroyo afectado por el proceso erosivo, y las propiedades mecánicas y geotécnicas de los suelos presentes.

El principal objetivo del análisis hidrológico e hidráulico fue el de establecer los caudales de diseño para la obra de protección. Como antecedente más importante referido a los aspectos hidrológicos, se consideró un estudio realizado en el año 2000 mediante técnicas de simulación hidrológica con modelos matemáticos de transformación lluvia - caudal y el análisis de frecuencias, presentando una serie de caudales líquidos asociados a distintos períodos de retorno.

Posteriormente a la evaluación de los estudios hidrológicos disponibles, se llevó a cabo un análisis hidráulico-fluvial del segmento de cauce considerado, consistente en la simulación de los perfiles de flujo en un tramo de unos 500 metros de longitud situado inmediatamente aguas arriba de la cabecera. Se asumió un control hidráulico en la profundidad crítica en la proximidad de la cabecera de la obra de control.

Esta simulación se realizó usando el modelo HEC-RAS del Hydrologic Engineering Center de Estados Unidos, (HEC, 2001). Este análisis se llevó a cabo con la finalidad de establecer los niveles característicos alcanzados por las aguas, para cada escenario de los caudales simulados, y evaluar su consistencia con las observaciones realizadas durante las visitas de campo y observaciones directas en el sector afectado.

De esta manera, se estableció la conveniencia de adoptar una descarga de diseño $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$, igual a la capacidad máxima de conducción del cauce natural, aguas arriba de la obra de protección, y compatible con la importancia de la obra a realizar y las vías de comunicación a proteger. En la Figura 9 se muestra la curva de descarga h - Q obtenida de la simulación con HEC-RAS (HEC, 2001), mientras que en la Figura 10 se presenta la sección transversal que exhibe el cauce natural del arroyo inmediatamente aguas arriba de la cabecera de la cárcava.

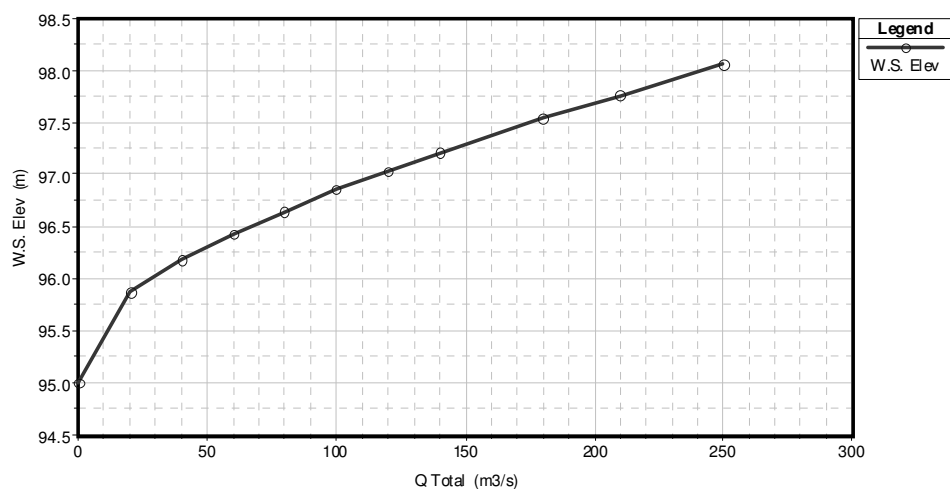


Figura 9: Curva de nivel – caudal de descarga [h-Q] en la sección inmediatamente aguas arriba de la cárcava.

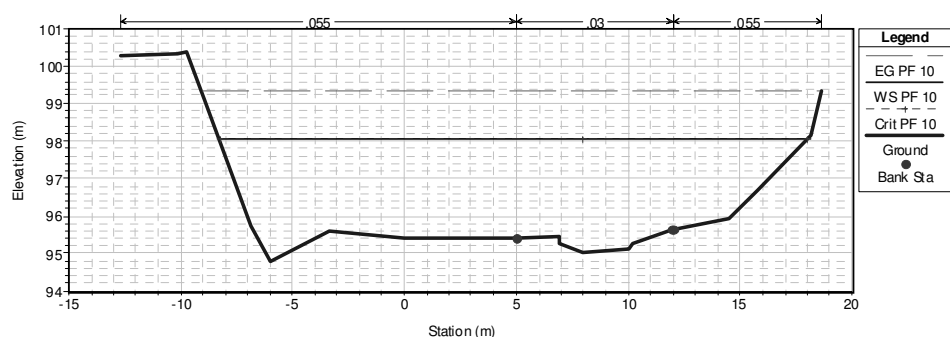


Figura 10: Sección transversal inmediatamente aguas arriba de la cárcava para $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$.

OBRA DE PROTECCIÓN

Dadas las características singulares del proceso erosivo analizado, se consideró oportunamente que la tipología de obra a adoptar debería estar condicionada al cumplimiento de una serie de requerimientos, fundamentalmente para asegurar su estabilidad estructural y un eficiente funcionamiento hidráulico. En ese sentido, se observó que una obra de control construida con materiales flexibles cumpliría con las exigencias establecidas, ya que la misma puede adecuarse a deformaciones que puedan producirse una vez puesta en funcionamiento.

La obra proyectada estaba constituida por una serie de siete saltos de gaviones para salvar el desnivel ocasionado por el proceso de carcavamiento, conformado en su cuerpo principal por una serie de siete traviesas-vertederos escalonadas longitudinalmente y de 2.30 m de altura cada una. El ancho de las traviesas resultó del orden de los 26 m, en función del ancho actual del cauce y de las dimensiones de los muros laterales. Aguas abajo del último salto se dispuso un cuenco amortiguador, cuya finalidad es la de disipar la energía de la corriente para restituir el flujo al cauce del arroyo con velocidades menores, y con un tirante normal compatible con el cauce de aguas abajo. Aguas arriba de la obra propiamente dicha, se previeron muros de encauzamiento a los fines de generar la transición entre el cauce aguas arriba y la serie de saltos. En los sectores horizontales de la obra (fondo del cuenco disipador, escalones disipadores, canal de ingreso y a la salida de la obra), se dispusieron colchonetas de gavión de 0.30 m de espesor para limitar la capacidad erosiva del flujo.

En la Figura 11 se presenta una planimetría general de la obra, en la que se puede apreciar la topografía natural del arroyo en el segmento afectado del proceso de carcavamiento, y la manera en la cual el conjunto de la obra se integra a la geometría natural. Perimetralmente a la obra y al nivel del terreno natural de los campos aledaños, se previó un albardón o terraplén de protección de manera que se evite el ingreso lateral de las escorrentías a la zona de obra.

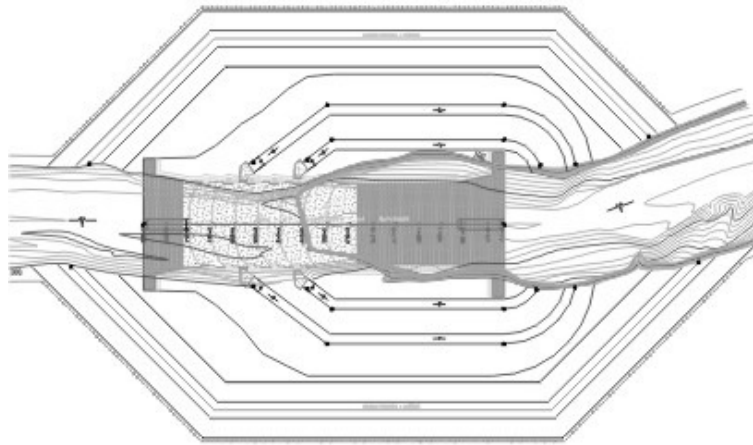


Figura 11: Planimetría general de la obra (flujo desde la izquierda).

La Figura 12 muestra una planta detallada de la obra de control, distinguiéndose la zona sombreada del revestimiento de las mallas de alambre con hormigón simple, a modo de protección del impacto del chorro de agua para evitar el desacomodamiento de las piedras de las colchonetas de gavión. En la Figura 13 se indica un perfil longitudinal de la misma, en la que pueden observarse todos los saltos de la misma y la ubicación del cuenco de amortiguación.

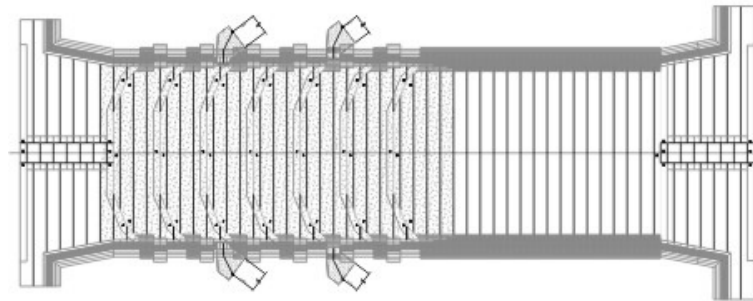


Figura 12: Planta de la obra de control.

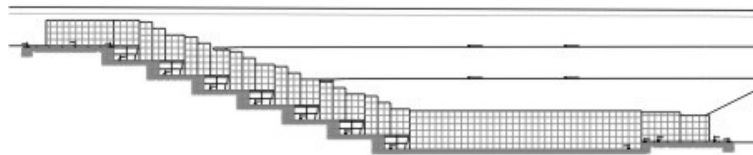


Figura 13: Perfil longitudinal de la obra.

En la Figura 14 se presenta una sección transversal característica de la misma, en la que pueden observarse los muros laterales de gaviones y los detalles de vinculación de los mismos con las colchonetas de la solera. En todo contacto suelo-terreno se colocaron membranas geotextiles para controlar la erosión detrás de las obras de gaviones o colchonetas.



Figura 14: Sección transversal típica de la obra.

EJECUCIÓN DE LA OBRA

Modificación del proyecto

Durante las tareas de replanteo para la ejecución de la obra realizada por la empresa, se advirtieron diferencias importantes en los niveles de terreno, con respecto a la topografía para el proyecto, siendo la altura del salto real inferior al contemplado en el diseño de la obra. La diferencia de desnivel entre la obra proyectada y el terreno real fue adaptada en la obra manteniendo el nivel de base aguas abajo y sobre-elevando o rellenando el ingreso, como se muestra en la Figura 15.



Figura 15: Perfil longitudinal de la obra construida – Relleno en zona de ingreso.

Proceso constructivo

Respecto del avance de obra durante las etapas constructivas, surgieron inconvenientes con el desvío de los excedentes hídricos conducidos por el arroyo. Inicialmente fue practicado un canal en la margen izquierda como obra de desvío, y la derivación al mismo era realizada mediante la colocación de tablaestacas metálicas hincadas en forma perpendicular al arroyo aguas arriba del dique de gaviones.

El comienzo de la construcción de la obra fue en septiembre de 2002, en coincidencia con el inicio de los periodos lluviosos en esta región. Al mes de diciembre de ese mismo año, las tablaestacas habían fallado en tres oportunidades debido a las crecidas del arroyo, generando la rotura de los pocos gaviones colocados en la obra.

Debido a estos inconvenientes con el alejamiento de las aguas del arroyo, fue practicada la obra de desvío sobre la misma zona de obra, construyendo la misma por sectores. En una primera etapa se construyeron el cuenco de disipación y los escalones de la margen izquierda, desviando el arroyo por la margen derecha. La Figura 16 muestra dos fotografías de esta etapa de construcción de la obra.

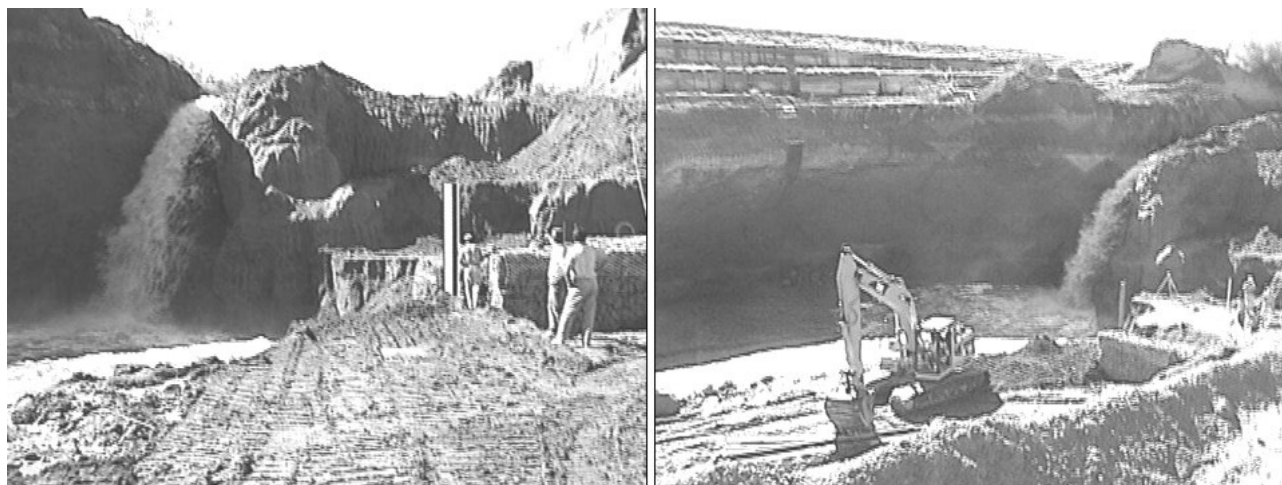


Figura 16: Fotografías del desvío del arroyo por zona de obra (diciembre de 2002).

En la Figura 17 se presenta una fotografía de la obra concluida desde aguas abajo, sobre la margen izquierda del arroyo. Aproximadamente el ángulo de toma coincide con el de la Figura 3, con la cárcava en su estado original, posibilitando su comparación.



Figura 17: Obra concluida, junio de 2003. Cada salto vertical es de 2.3 m. En la margen derecha del cuenco de disipación se observa la sedimentación por aporte lateral.

OPERACIÓN Y SEGUIMIENTO

Posterior a la finalización de la etapa de construcción, con la primer creciente de magnitud en el arroyo la obra sufrió una falla parcial, que si bien no fue de importancia podría poner en riesgo de colapso total la obra. La Figura 18 muestra la obra en funcionamiento durante el periodo de bajante de la crecida mencionada.



Figura 18: Obra en funcionamiento para caudales bajos.

A los fines de definir las propuestas de solución de la falla parcial producida en la obra, fue necesario determinar el mecanismo que le dio origen, para lo cual además de contar con el relevamiento de las fallas (tipo, ubicación y dimensiones), resulta determinante analizar los pasos realizados en cada una de las etapas de su proceso de elaboración (desde los estudios de base, proyecto, ejecución y operación).

Descripción de la falla parcial

La falla se presentó como una serie de hundimientos en varios niveles y sectores del lateral superior derecho de la obra. Estos hundimientos provocaron el colapso de algunos sectores del lecho protegido con colchonetas y la deformación de tramos de los muros de gaviones. Tanto los sectores de colchonetas como los tramos de muros de gaviones afectados por los hundimientos se localizaron en la parte superior de la obra, sobre su margen derecha.

En la obra se observaron tres sectores con hundimientos: uno de diez metros de ancho por unos quince de largo de la parte central de la zona de ingreso, otro ubicado en el lateral derecho del primer escalón disipador de unos siete metros de largo por casi toda la huella del escalón, y el tercer sector ubicado en el segundo escalón disipador, sobre el mismo lateral derecho, con una superficie menor, de unos veinte metros cuadrados (20 m²).

El sector más afectado fue el correspondiente al relleno efectuado en la obra de ingreso en donde la profundidad de los hundimientos está en el orden de 1.40 m, en tanto que en las otras dos zonas las profundidades observadas fueron de menores magnitudes.

Los muros laterales afectados fueron los ubicados en el lateral derecho del primer y segundo escalón, en coincidencia con los sectores de colchonetas colapsados. Estos muros sufrieron descensos diferenciales produciendo la deformación de los mismos en una longitud de cuatro a cinco metros con descensos del orden de medio metro (ver Figura 19).



Figura 19: Deformaciones de los muros de gaviones.

La Figura 20 muestra las deformaciones sufridas por la obra, en el sector superior derecho, a escasas horas después de la crecida. Aún se observa el embalse de las aguas debido al recrecimiento o relleno de la zona de ingreso.

La ubicación planimétrica de las fallas puede observarse en la Figura 21. Estas fallas fueron prácticamente coincidentes con los sectores de relleno, tanto del recrecimiento aguas arriba en la zona de la obra de ingreso, como de la obra de desvío por el lateral derecho de la obra (Figura 22).

La coincidencia entre la ubicación de los hundimientos y los sectores de relleno pone de manifiesto que el principal causante de esta falla parcial es la pérdida de suelo en estos sectores por “tubificación”. Dicha pérdida puede responder a una deficiente compactación sumada a la carga hidráulica adicional generada por el embalse aguas arriba.

La conjunción de factores generó una línea de escurrimiento subterráneo preferencial, por debajo y la espalda de los muros de gaviones de los primeros saltos ubicados sobre la margen derecha de la obra. Esto causó la remoción del suelo de relleno hacia aguas abajo por sobre el nivel de la primer berma, dejando sin fundación parte de los muros de gaviones y del revestimiento de colchonetas, provocando las fallas mencionadas.



Figura 20: Zona de falla.

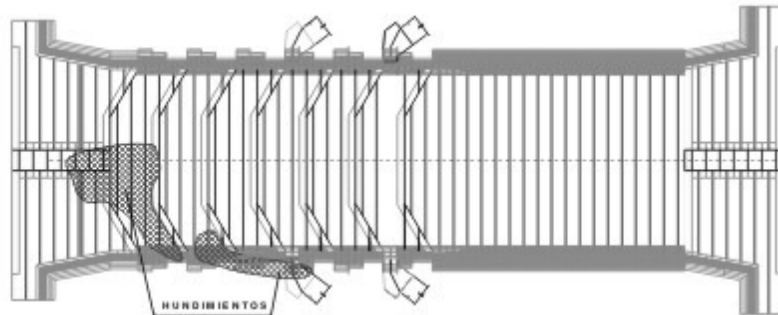


Figura 21: Ubicación planimétrica de los hundimientos.

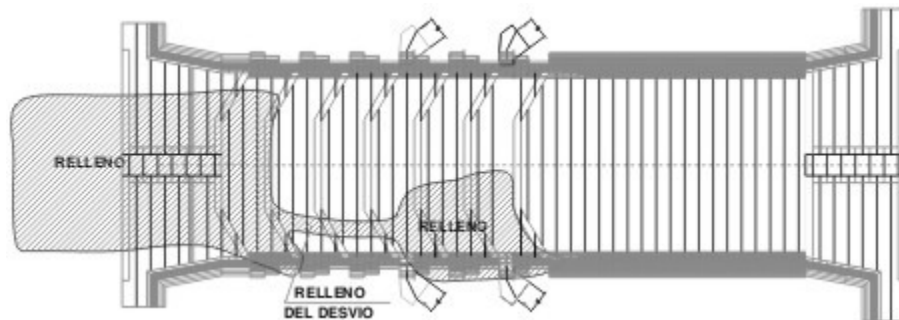


Figura 22: Ubicación planimétrica de los rellenos realizados.

Reparaciones

Como solución a la falla detectada se proyectaron una serie de intervenciones tendientes a reparar los daños y a evitar nuevos inconvenientes, destacándose las siguientes (ver Figura 23):

- Reposición del suelo de los rellenos ubicados detrás y debajo de los muros laterales de margen derecha. El relleno de los sectores ubicados debajo de los muros que sufrieron asentamientos se previó realizarlo mediante suelo-cemento fluido a los fines de garantizar el correcto llenado de los vacíos y un buen contacto entre relleno y muro.
- Reparación de las colchonetas y membranas de geotextil dañadas.
- Eliminación del relleno del recrecimiento realizado para la sobre-elevación de la zona de ingreso. En este sector se proyectó un canal de aducción revestido en colchonetas y gaviones con cota de fondo semejante al terreno natural preexistente. De esta manera se evita la sobrecarga hidráulica dada por el almacenamiento que provoca el recrecimiento.
- Obra de transición entre cauce natural y canal de aducción mediante revestimiento de colchonetas, gaviones y membrana de geotextil.

- Ejecución de pantallas de suelo-cemento fluido en ambas márgenes de la obra. Estas pantallas, tres de cada lado, están ubicadas transversales al eje de la cárcava en coincidencia con los tres primeros escalones. Sus dimensiones garantizan el corte de la red de flujo subterráneo, evitando nuevas pérdidas de suelo, por lo que se previó que se extiendan desde el paramento externo de los muros hasta encontrar suelo natural (fuera del relleno) y el fondo de las pantallas que esté por debajo de la cota del fondo del desvío o bien hasta encontrar el manto tosca.

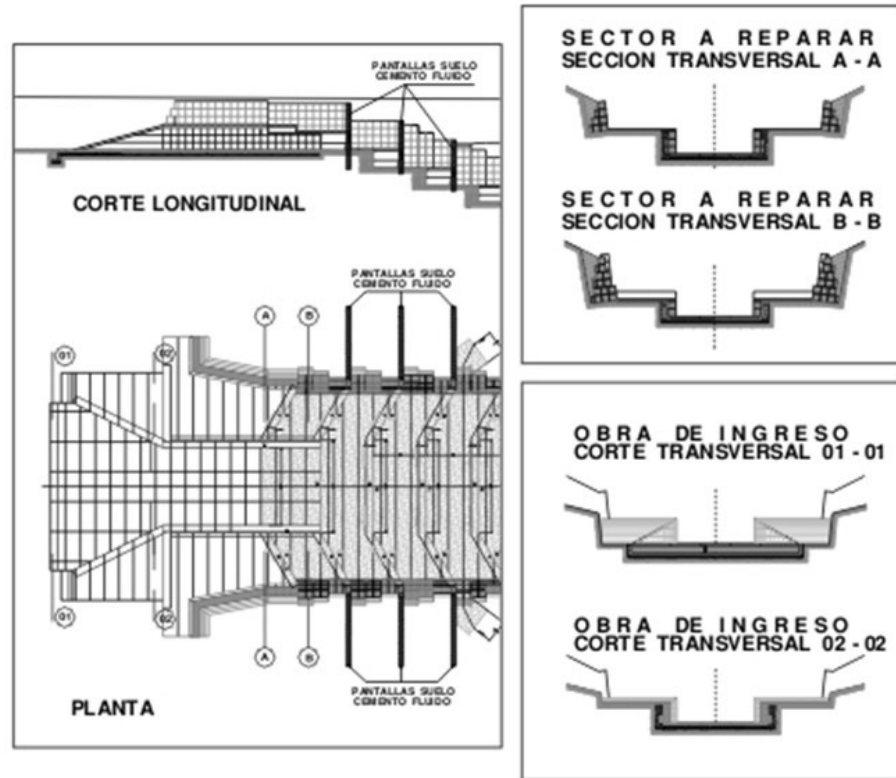


Figura 23: Propuesta de reparaciones.

Ejecución de las reparaciones

En base a la propuesta de reparaciones elaborada y consensuada con la institución responsable de la obra, la empresa llevó adelante la ejecución de las mismas con algunas modificaciones propias de obra, como por ejemplo la geometría de la transición entre cauce natural y canal de aducción, tal como se observa en la Figura 24.

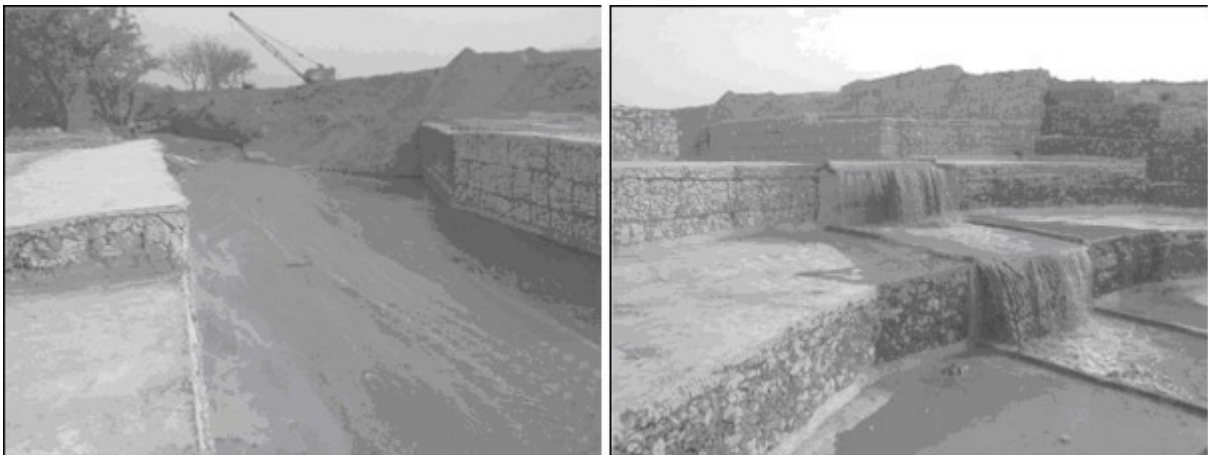


Figura 24: Reparación realizada en el canal de aducción a la obra.

CONCLUSIONES

Los procesos de erosión en cárcava que pueden afectar cursos fluviales en ambientes pedemontanos o en planicies de loess son fenómenos de una gran complejidad. El estado actual de conocimiento sobre esta problemática resulta insuficiente, ya que no existen teorías suficientemente desarrolladas y adecuadas para una caracterización general de los mecanismos involucrados en la génesis y evolución de este tipo de procesos, razón por la cual se ha presentado un enfoque ingenieril del problema a través de un estudio de caso.

Se ha presentado el seguimiento de un caso particular que se considera representativo de la región de estudio (centro de Argentina), en el que fue necesario resolver de manera expeditiva el conjunto de problemas generados por los procesos de erosión en cárcava, recurriendo a la combinación de herramientas sencillas para el cálculo hidrológico y clásicas para la aplicación de medidas estructurales de control y protección de infraestructuras bajo riesgo por el fenómeno retrogradante. En base a la experiencia adquirida y "lecciones aprendidas" durante la operación inicial de la obra proyectada, el análisis de las fallas mencionadas y su posterior solución, se considera necesario continuar con la búsqueda de técnicas de solución (e.g., modelos físicos 3D para optimizar el diseño de estructuras de disipación eficientes y compatibles con las especiales condiciones geotécnicas que posee el loess).

En ese sentido, se han mostrado los aspectos metodológicos llevados a cabo para obtener parámetros de diseño y el proyecto de una obra de diques flexibles escalonados, considerada como la estructura adecuada para el fin perseguido.

También se destacan el seguimiento realizado a la obra durante la etapa de construcción y su corto periodo de funcionamiento; la falla detectada; el análisis de las causas que la pudieron originar; las soluciones adoptadas y su implementación en obra.

Estos tipos de obra poseen características particulares, entre las que pueden mencionarse las siguientes:

- A diferencia de una obra hidráulica típica, el lugar de emplazamiento de la obra de protección de cárcava no se puede elegir: su ubicación queda totalmente limitada al lugar en donde se encuentra su cabecera en el momento de realizar la obra. En general esta ubicación coincide con la presencia de suelos de baja calidad, en cuanto a su capacidad soporte y resistencia a la erosión hídrica. Las soluciones técnicas y su construcción generalmente se deberán realizar en plazos cortos, para evitar el deterioro durante la etapa constructiva, o peor aún que la cárcava avance bordeando la obra en construcción, dejando atrás e inutilizando la obra.
- Siendo los procesos de erosión en cárcavas fenómenos altamente dinámicos, sobre todo en lo que se refiere al avance de su cabecera (retrogradante), el tiempo que se dispone, una vez tomada la decisión de realizar la obra, para los estudios básicos, los estudios de alternativas de solución, el desarrollo del proyecto ejecutivo, llevar adelante el proceso de contratación y de construcción, es escaso, limitado al periodo de estiaje de pocos meses de duración.
- Se destaca la importancia de realizar tareas de control especial durante la construcción y mantenimiento durante los primeros periodos de funcionamiento, sobre todo después de cada creciente de magnitud, con el fin de detectar las posibles fallas para su inmediata reparación. Esto permite la reducción de los costos totales de la solución de reparación adoptada y evitar el posible colapso de la obra.

Finalmente se remarca la necesidad de continuar con estudios e investigaciones tendientes a lograr un mejor entendimiento del fenómeno de erosión en cárcava, a la vez de reunir mayores estudios con una serie de diseños alternativos que permitan evaluar los resultados obtenidos con la construcción de obras de control, avanzando en la optimización de las tipologías geométricas y constructivas adecuadas para este tipo de obras. A tal fin fueron recomendados estudios en modelos físicos ad-hoc para optimizar las estructuras de disipación, los cuales están en ejecución.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección Provincial de Agua y Saneamiento (DIPAS) de la Provincia de Córdoba, Argentina, y a la Empresa Marinelli S.C.A. por facilitar una valiosa cantidad de información y experiencias, que fueron de utilidad para los estudios presentados.

REFERENCIAS

Castelló, E., Vanoli, G., Rodríguez, A. y Farías, H. (2003). "Estudios, proyecto, ejecución y seguimiento de

- estabilización de cárcavas en cauces sobre suelos loésicos”, *1^{er} Simposio Regional de Ingeniería de Ríos*. Ezeiza, Buenos Aires, Argentina.
- Farías, H. D. (1988). “Consideraciones preliminares para el análisis de procesos de erosión en cárcava en cauces y bañados”, *Segundas Jornadas de Hidrología*. Santiago del Estero, Argentina.
- Farías, H. D. (1998). “Algunos aspectos hidráulicos y morfológicos del proceso de erosión en cárcava en cauces y clancies”. *XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Oaxaca, México.
- Farías, H.D., Rodríguez, A., Castelló, E. y Vanoli, G. (2002). “Estabilización de cárcavas en cauces sobre suelos loésicos. Estudios morfológicos, hidráulicos y solución ingenieril”. *XIX Congreso Nacional del Agua*. Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- Goldman, S. J., Jackson, K. y Bursztynsky, T. A. (1986). *Erosion and Sediment Control Handbook*, McGraw Hill New York.
- HEC (2001). *Hydrologic Engineering Center: HEC-RAS*. River Analysis System (version 3.0). User’s Manual and Hydraulic Reference Manual. US Army Corps of Engineers. Davis, California, Estados Unidos.
- Stein, O. R., Julien, P. y Alonso, C. V. (1997). *Headward Advancement of Incised Channels*, Managment of Landscapes Disturbed by Channel Incision, S. Wang, E. Langendoen & F. Shields, Eds. Oxford, Mississippi, Estados Unidos.
- Thorne, C. R., Zevenbergen, L. W., Grissinger, E. H. y Murphey, J. B. (1986). “Ephemeral gullies as sources of sediment”, *Proceeding of the 4th Federal Interagency Sedimentation Conference*. Las Vegas, Nevada, Estados Unidos, p.p. 152-161.