

ESTABILIZACIÓN DE PROCESOS EROSIVOS EN CÁRCAVAS SOBRE SUELOS LOÉSSICOS DE CÓRDOBA, ARGENTINA. CASO ARROYO “EL GATO”

Andrés Rodríguez¹, Hector Daniel Farias², Edgar Castelló¹, Fabián López^{1,3}, Gonzalo Moya¹ y Gustavo Vanoli¹

Resumen:

En el sur de la provincia de Córdoba (región central de Argentina) se encuentran numerosos arroyos afectados por procesos erosivos de cárcavamiento. En particular, el arroyo El Gato (que cruza la Ruta Nacional N° 8 cerca de Sampacho) muestra 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, desde el lecho del curso aguas arriba hasta el fondo de la fosa de socavación generada por la caída del agua. El impacto de este proceso es altamente significativo, ya que afecta al entorno de su área de influencia, cercenando las unidades de producción agropecuaria y dañando las obras de infraestructura existentes (caminos, vías férreas, poliductos, etc.). 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 clave: FALTA

INTRODUCCIÓN

La zona Sur de la provincia de Córdoba se encuentra surcada por numerosos arroyos y cursos fluviales afectados por importantes procesos erosivos retrogradantes o cárcavamiento (e.g. en los arroyos El Gato, Las Lajas, Suco, Corralito, etc). Estos fenómenos, típicos de estos suelos finos (limos loésicos) con las 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 de producir 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 (ver localización en Figura 3) y sus obras asociadas se ilustran en las figuras siguientes.



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

¹ Universidad Nac. Córdoba, FCEfYn - ISRH, Av. Hipólito Irigoyen 162, Córdoba, CP 5000, R. Argentina;

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

³ DiPAS, Humberto Iro. 607, CP 5000, Córdoba, R. Argentina.

E-mail: arodrig@com.uncor.edu

Artículo recibido el 3 de octubre de 2003, recibido en forma revisada el 26 de noviembre de 2004 y aceptado para su publicación el 14 de diciembre de 2004. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

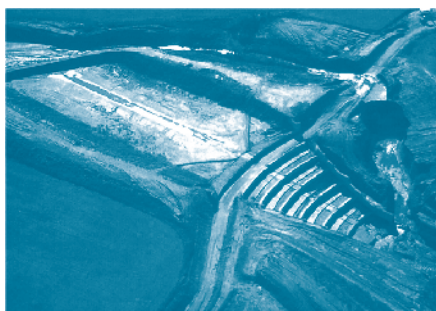


Figura 1b: Vista aérea de la obra de protección de la cárcava "La Carolina" en el arroyo Las Lajas, tramo superior, 2003 (Fuente: DiPAS). Nótese el desvío en cárcava sobre margen derecha.

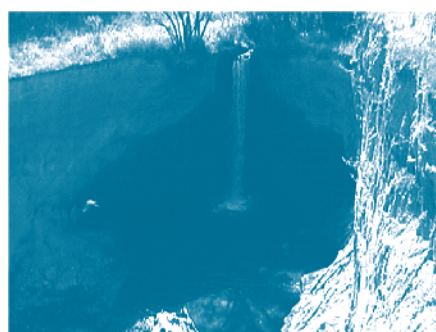


Figura 2a: Vista desde aguas abajo Cárcava El Gato. Los escalones tienen aproximadamente 2,5 m y 10,5 m, 2001.

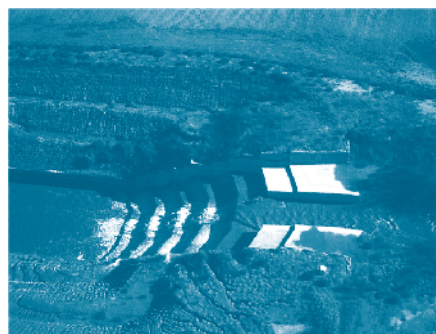


Figura 2b: Vista aérea de estabilización de la cárcava El Gato, 2003. Notar la concentración de flujo en el centro para caudales intermedios. (Fuente: DiPAS)



Figura 2c: Vista de la cabecera Cárcava Corralito, aproximadamente 12 m de altura, 2005.



Figura 2d: Vista de la Cárcava Corralito, 15 Km aguas debajo de la cabecera, 2005.

Uno de los casos más importantes de este fenómeno de erosión fluvial retrógrada es que se presentó en el arroyo El Gato. El mismo atraviesa la Ruta Provincial N° 8 entre Río Cuarto y Sampacho (ver Figura 3). 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 (Farias 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 fue 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, fue prevista 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 fue diseñado un cuenco amortiguador, cuya finalidad es la de disipar la energía de la corriente para restituir el flujo al cauce del arroyo con niveles de turbulencia y velocidades medias menores.

También se incluyen en el presente trabajo 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 la reparación y rectificación del mismo con inversiones mínimas.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO 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, la disminución de tiempos de concentración, o alguna combinación de los mismos.

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 de los mismos. 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 (Farias, 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).

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 (Figura 3), 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.

El control de esta cárcava resultó de vital importancia para impedir el corte de la Ruta Nacional N°8,



Figura 3. Ubicación del área de estudio: Arroyo El Gato, al sur oeste de la Provincia de Córdoba (1: corresponde al Arroyo Las Lajas, 2: corresponde al Arroyo El Gato y 3: Correspondiente a la cárcava El Corralito).

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 de 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 atinentes 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 (situación lamentablemente frecuente en Latinoamérica) 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, coleccionar y estimar datos de campo que ayudaran a la toma de decisiones y la definición de criterios y cálculos hidrológicos e hidráulicos.



Figura 4. Vista del cauce hacia aguas abajo desde la cabecera de cárcava (Febrero de 2001).

La Figura 4 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 las márgenes por desplome vertical, acusados por la acumulación de suelo en la base, con un importante desarrollo de vegetación.

ESTUDIOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS

En virtud de las características geotécnicas de los suelos típicos de la región (limos loéssicos), 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 con la finalidad de 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, fue considerado 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.

Esta simulación fue realizada mediante la aplicación del modelo HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center, EEUU). Este análisis se llevó a cabo con la finalidad de establecer los niveles característicos alcanzados por las aguas, para cada escenario de caudales simulado, 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 $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$, compatible con la importancia de la obra a realizar y las vías de comunicación a proteger. En la Figura 5 se muestra la curva de descarga h-Q obtenida de la simulación con HEC-RAS, mientras que en la Figura 6 se presenta la sección transversal que exhibe el cauce natural del arroyo inmediatamente aguas arriba de la cabecera de la cárcava.

OBRA DE PROTECCIÓN

Dadas las características singulares del proceso erosivo analizado, se estableció 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 de 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

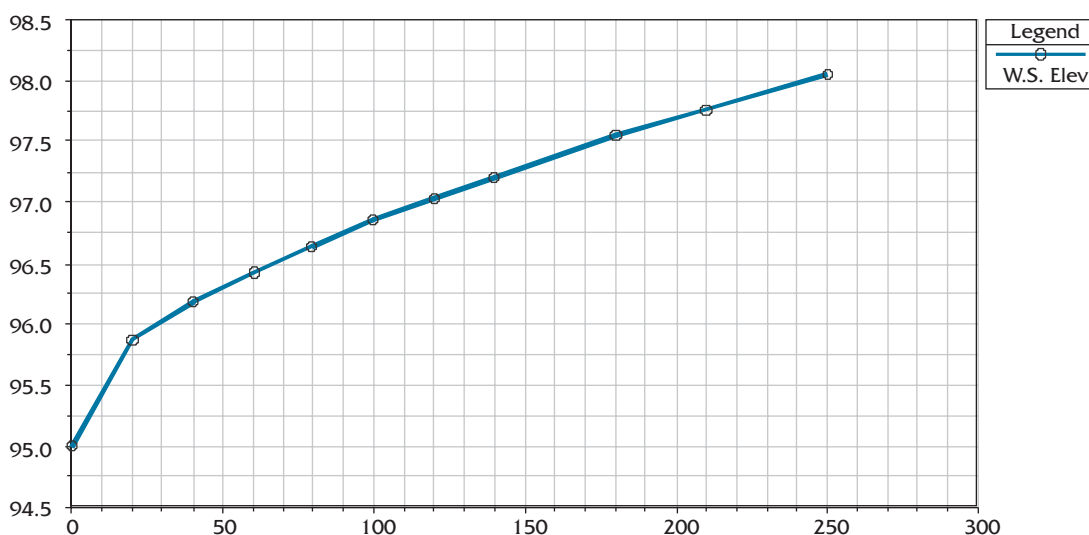


Figura 5. Curva de descarga [h-Q] en la sección inmediatamente aguas arriba de la cárcava.

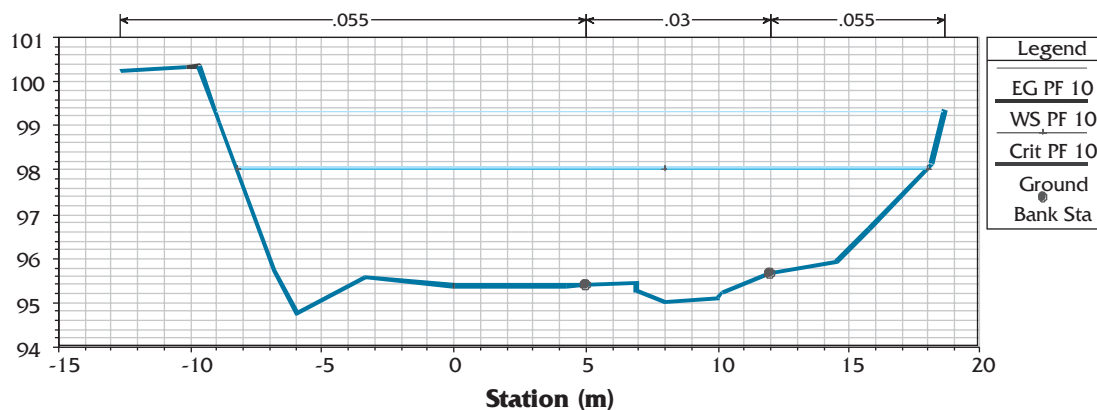


Figura 6. Sección transversal inmediatamente aguas arriba de la cárcava para $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$

de 7 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.

Agua arriba de la obra propiamente dicha, fueron previstos muros de encauzamiento a los fines de generar la transición entre el cauce aguas arriba y la serie de saltos. Agua abajo del último salto fue dispuesto 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.

En la Figura 7 se presenta una planimetría general de la obra, en la que se puede apreciarse 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, fue previsto un albardón o terraplén de protección de manera que se evite el ingreso lateral de las escorrentías a la zona de obra.

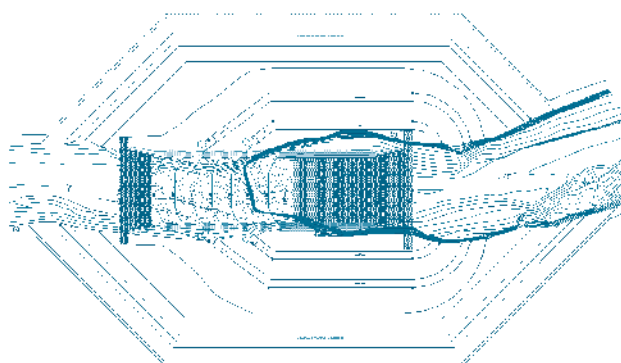


Figura 7. Planimetría general de la obra (flujo desde la izquierda).

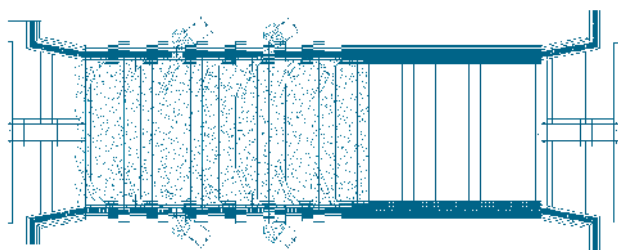


Figura 8. Planta de la obra de control.

La Figura 8 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 la protección del impacto del chorro de agua para evitar el desacomodamiento de las piedras de las colchonetas. En la Figura 9 se indica un perfil longitudinal de la estructura, en la que pueden observarse todos los saltos de la misma y la ubicación del cuenco de amortiguación.

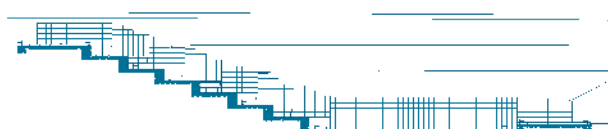


Figura 9. Perfil longitudinal de la obra.

En la Figura 10 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 fue previsto la colocación de membranas geotextiles.



Figura 10. Sección transversal típica de la obra.

EJECUCIÓN DE LA OBRA Modificación del Proyecto

Durante las tareas de replanteo para la ejecución de la obra realizado por la empresa, fueron advertidas diferencias importantes en los niveles de terreno, respecto de 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 obra manteniendo el nivel de base aguas abajo y sobrelevando o rellenando el ingreso como se muestra en la Figura 11.



Figura 11. 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 zona de margen izquierda como obra de desvío, y la derivación al mismo era realizada mediante la colocación de tablestacas 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 tablestacas 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 fueron construidos el cuenco de disipación y los escalones de la margen izquierda, desviando el arroyo por la margen derecha. La Figura 12 muestra dos fotografías de esta etapa de construcción de la obra.



Figura 12. fotografías del desvío del arroyo por zona de obra (Diciembre de 2002).

En la Figura 13 se presenta una fotografía de la obra concluida desde aguas abajo, sobre 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 13. Obra concluida, Junio de 2003, cada salto vertical es de 2,3 m (notar en la margen derecha del cuenco de disipación 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 algunas fallas que si bien no fueron de importancia podrían poner en riesgo la estabilidad de algunos componentes de la obra en caso permitir la evolución de los procesos erosivos generados. La Figura 14 muestra la obra en funcionamiento durante el periodo de bajante de la crecida mencionada.



Figura 14. 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, dimensiones, etc.), 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 dissipador de unos siete metros de largo por casi toda la huella del escalón, y el tercer sector ubicado en el segundo escalón dissipador, sobre el mismo lateral derecho, con una superficie menor, de unos veinte metros cuadrados (20 m^2).

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 los cincuenta centímetros (ver Figura 15).



Figura 15. Deformaciones de los muros de gaviones.

La Figura 16 muestra las deformaciones sufridas por la obra, en el sector superior derecho, a escasas horas después de la crecida, aun se observa el embalse de las aguas debido al recrecimiento o relleno de la zona de ingreso.



Figura 16. Zona de falla.

La ubicación planimétrica de las fallas puede observarse en la Figura 16, 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 (ver Figura 18).

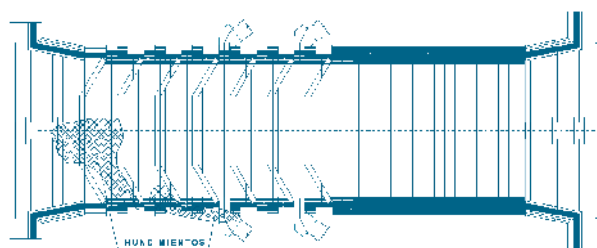


Figura 17. Ubicación planimétrica de los hundimientos.

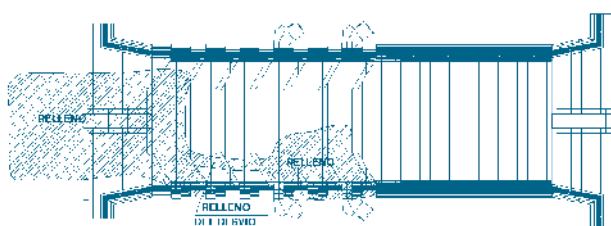


Figura 18. Ubicación planimétrica de los rellenos realizados.

De 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. 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 apoyo parte de los muros de gaviones y del revestimiento de colchonetas, provocando las fallas mencionadas.

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 19):

- 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 sobrelevación de la zona de ingreso. Fue proyectado en este sector 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.

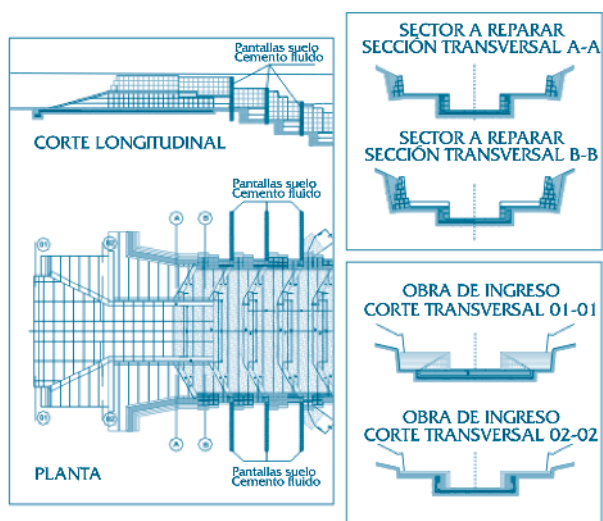


Figura 19: Propuesta de reparaciones.

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 deben garantizar 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.

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 20.



Figura 20. 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 de planicies con suelos loésicos son fenómenos de una gran complejidad. Aún no se dispone de suficiente experiencia y herramientas en el campo de la hidráulica fluvial que resulten adecuadas como para lograr una completa descripción y caracterización general de los mecanismos involucrados en la génesis y evolución de este tipo de procesos erosivos.

En este trabajo se ha presentado el seguimiento de un caso particular considerado representativo, en el que fue necesario resolver en muy poco tiempo el problema 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 de las fallas mencionadas y su posterior solución, los autores recomiendan continuar la profundización del estudio del proceso de acarcavamiento y la búsqueda de técnicas de solución (e.g. modelos físicos 3D para optimizar el diseño de estructuras de disipación eficientes y compatibles con las condiciones geotécnicas).

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 destaca: 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 que le confieren al proyecto ciertos aspectos particulares, de los que se pueden citar:

- 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, en el momento de realizar la obra, su cabecera. 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 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 considera pertinente remarcar 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 se están realizando estudios en modelos físicos para optimizar las estructuras de disipación.

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

- Bertoni, J.C., Dellavedova, J.C., Díaz, A. y Vanoli, G. (1997). *Metodología para la evaluación económica de proyectos de ordenamiento de una cuenca hídrica*. Programa de Evaluación y Control de la Erosión Hídrica. Secretaría de Ciencia y Técnica. Universidad Nacional de Córdoba.
- Borsellino, M. , Schiava, R. y Paz, M. (1998). "Un Modelo para evaluar la Tasa de Erosión en Cárcavas sobre Suelos Cohesivos". *XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, IAHR, Oaxaca, México.
- Bhowmik, N. G. (1985). "Erosion". in D.D. Houghton (Editor): *Handbook of Applied Meteorology*, J. Wiley & Sons, N.Y., U.S.A., pg. 575-583.

- Casalí, J. (1997). *Caracterización y Control de la Erosión por Cárcavas*, Tesis Doctoral, Univ. Públ. de Navarra, Pamplona, España.
- Castelló, E., Vanoli, G., Rodríguez, A. y Farias H.D. (2003). "Estudios, proyecto, ejecución y seguimiento de estabilización de cárcavas en cauces sobre suelos loésicos". *Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*, Bs.As., Argentina.
- Darby, S.E. and Simon A. (1999). *Incised River Channels*. J. Wiley & Sons, N.Y., U.S.A.
- Farias, H. D. (1988). "Consideraciones Preliminares para el Análisis de Procesos de Erosión en Cárcava en Cauces y Bañados". *2as. Jornadas de Hidrología*, Santiago del Estero, Argentina.
- Farias, H. D. (1998). "Algunos Aspectos Hidráulicos y Morfológicos del Proceso de Erosión en Cárcava en Cauces y Planicies". *XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Oaxaca, México.
- Farias 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, Argentina.
- Goldman, S. J., Jackson, K. and Bursztynsky, T. A. (1986). *Erosion and Sediment Control Handbook*. McGraw Hill Book Co., N.Y., USA.
- Hanson, G. J., Robinson, K. M. & Cook, K. R. (1997) "Experimental Flume Study of Headcut Migration", *Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision*, Ed. by S. Wang, E. Langendoen & F. Shields, Oxford, MS, USA, pp. 503-509.
- Little, W. C., Piest, R. F. and Robinson, A. R. (1980). "SEA Research Program for Channel Stability and Gully Control", *Transactions of the ASAE*, Vol.23, No.2, pp. 362-365.
- Piest, R. F., Bradford, J. M. and Wyatt, G. M. (1975). "Soil Erosion and Sediment Transport from Gullies", *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 101, No. HY1, pp. 65-80.
- Piest, R. F. and Bowie, A. J. (1974). "Gully and Streambank Erosion". *Proc. of 29th Annual Meeting of the Soil Conservation Society of America*, Siracuse, N.Y., U.S.A., pp. 188-196.
- Stein, O. R., Julien, P. and Alonso, C. V. (1997). "Headward Advancement of Incised Channels". *Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision*, Ed. by S. Wang, E. Langendoen & F. Shields, Oxford, MS, USA, pp. 497-502.
- Thorne, C. R., Zevenbergen, L. W., Grissinger, E. H. and Murphey, J. B. (1986). "Ephemeral Gullies as Sources of Sediment". *Proc. of 4th Federal Interagency Sedimentation Conference*, Las Vegas, Nevada, U.S.A., pp. 3/152-3/161.
- Vanoli, G., Díaz, A., Meneguzzi, M. y Dellavedova, J.C. (1994). *Evaluación del comportamiento de obras de control del escurrimiento para la definición de soluciones tipo características*. Programa de Evaluación y Control de la Erosión Hídrica. Secretaria de Ciencia y Técnica. Universidad Nacional de Córdoba.

