

COLAPSO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN DE UNA ALCANTARILLA FERROVIARIA DURANTE UNA TORMENTA DE DISEÑO¹

J.J. Clariá², M. Pagot³, D. Hünicken⁴, M. Ruiz⁵ y F.M. Francisca⁶

Resumen: Este trabajo documenta la falla de una estructura hidráulica de mediana escala, como consecuencia de la crecida del Arroyo Los Horcones. El sitio en estudio se emplaza en la Provincia de Salta al noroeste de Argentina, en el km 950,20 de la Línea C del ex Ferrocarril General Belgrano. El sistema de protección de la alcantarilla colapsó luego de una tormenta de corta duración y alta intensidad ocurrida durante el 17 de diciembre de 2009 sobre la cabecera de la cuenca. Si bien esta tormenta fue prevista en el diseño de la obra de arte, el sistema de protección falló como consecuencia de la obstrucción parcial de la sección de paso debido a la acumulación de troncos provenientes de la tala de árboles. Esta situación elevó el tirante aguas arriba de la alcantarilla, provocando la erosión detrás del sistema de protección. La pérdida de suelo lateral a la alcantarilla generó un nuevo paso del flujo a través del terraplén ferroviario. Esto permitió la evacuación del agua acumulada y liberó la estructura de hormigón de empujes mayores a los considerados en el diseño, evitando la falla global del sistema.

Palabras clave: colapso, erosión, gaviones, suelos, terraplenes.

COLAPSE OF THE PROTECTION SYSTEM OF A RAILROAD CULVERT DURING A DESIGN STORM

Abstract: This work reports the failure of a medium size hydraulic structure occurred as a consequence of the flooding of the “Los Horcones” river. The study site is located in the province of Salta, in the northwest region of Argentina, at km 950.20 of Line C of the “General Belgrano” railway. The protection system of the culvert collapsed on December 17th, 2009, during a storm of short duration and high intensity on the header basin. Although the storm and flow were considered in the design of the structure, the protection system failed due to the accumulation of tree trunks at the entrance of the culvert which partially obstructed the culvert free section. This raised the water level upstream of the culvert, causing erosion behind the protection system, and its subsequent collapse. Soil loss lateral to the culvert, generated a new flow path through the railway embankment. This allowed the removal of accumulated water and freed the concrete structure of thrust greater than those considered in the design, thus avoiding the overall system failure.

Keywords: collapse, embankments, erosion, gabions, soils.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se describen y analizan los efectos provocados por la crecida del Arroyo Los Horcones, al sur de la provincia de Salta (en el noroeste de Argentina) sobre una alcantarilla ferroviaria de hormigón armado. Esta alcantarilla

¹ Artículo recibido el 3 de enero de 2011 y aceptado en forma final el 16 de mayo de 2011.

² Dr. Ing. Civil, Profesor Adjunto, Laboratorio de Geotecnia, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. E-mail: jclaria@com.uncor.edu

³ Msc. Ing. Civil, Profesor Adjunto, Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. E-mail: marianna.pagot@gmail.com

⁴ Ing. Civil, Profesor Adjunto, Laboratorio de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. E-mail: drhunicken@gmx.net

⁵ Msc. Ing. Civil, Profesor Adjunto, Laboratorio de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. E-mail: mruiz@efn.uncor.edu

⁶ Dr. Ing. Civil, Profesor Adjunto, Grupo de Investigación en Medios Porosos y Agua Subterránea, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba y CONICET. E-mail: ffrancis@efn.uncor.edu

ferroviaria se encuentra emplazada en el km 950,2 de la Línea C-Salta, ex Línea General Belgrano, a $25^{\circ} 43' 33''$ de latitud Sur y $64^{\circ} 54' 24''$ de longitud Oeste (véase la Figura 1).

Políticamente, el sitio se encuentra dentro del Departamento de Rosario de la Frontera, aproximadamente a 12 km de la ciudad homónima y a 2 km del paraje Los Horcones.

Hidrográficamente, el área en estudio forma parte de la cuenca del arroyo Horcones, en la denominada región Umbral al Chaco, donde se presenta un paisaje de llanura y pie de monte marcado hacia el oeste por las Sierras Subandinas. La precipitación media anual en el área de trabajo se encuentra entre los 800 y 1200 mm, según estimaciones del INTA – Salta (Instituto Nacional de Tecnología del Agua, www.inta.gov.ar) siendo la superficie de la cuenca de aporte a la alcantarilla de aproximadamente 18 km^2 .

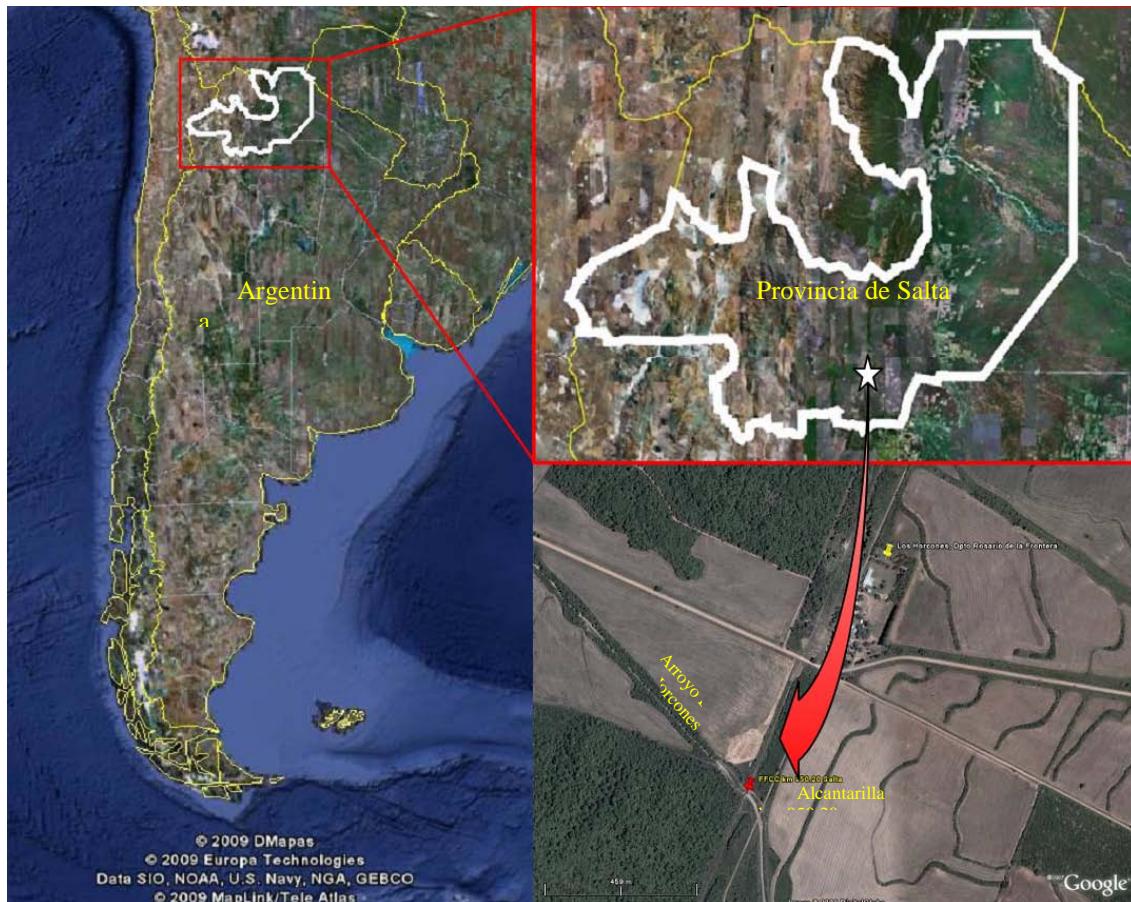


Figura 1: Ubicación de la obra hidráulica en estudio.

DESCRIPCIÓN DE LA OBRA DE ARTE

La alcantarilla en estudio consta de un tramo metálico de 6 m de luz, sobre estribos cerrados de hormigón armado con muros de ala a 45° , fundados mediante cuatro pilotes pre-excavados y hormigonados in situ de 1,10 m de diámetro y 13 m de profundidad. Presenta una sección rectangular libre de 2,6 m de altura y 4,9 m de ancho.

Para evitar el riesgo de socavación generado por el caudal de proyecto sobre las márgenes del arroyo Los Horcones, se construyó una obra de protección consistente en revestimiento del cauce entre estribos mediante platea de hormigón armado, y fuera del área de estribos mediante colchonetas y gaviones, complementado mediante el empleo de geotextiles y de suelo estabilizado con cemento al 5%, tal como se ilustra en la Figura 2.

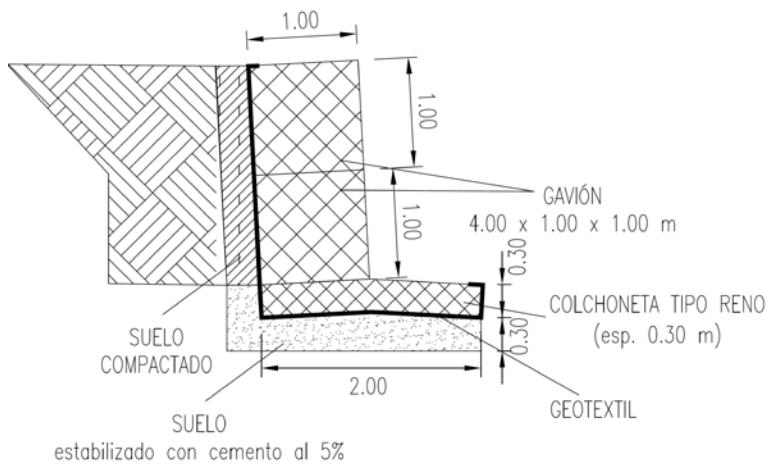


Figura 2: Esquema del sistema de protección de las márgenes del arroyo.

Se ejecutaron dos líneas de protección sobre ambas márgenes del cauce que alcanzan una longitud de 25 m aproximadamente hacia ambos lados del eje de la alcantarilla. En la Figura 3 se presenta un plano de la alcantarilla con el sistema de gaviones para protección de márgenes. En la Figura 4 se presenta una fotografía de la alcantarilla construida.

ESTUDIOS PRELIMINARES PARA EL PROYECTO DE LA OBRA DE ARTE

El proyecto ejecutivo de la alcantarilla se basó en una serie de estudios que cubrieron los siguientes aspectos:

- Estudio geotécnico.
- Estudio hidrológico.
- Diseño y verificación hidráulica.
- Proyecto y cálculo estructural.
- Estudio de impacto ambiental.

A continuación se describen brevemente cada una de las tareas desarrolladas como parte del proyecto para el diseño de esta alcantarilla.

Estudio Geotécnico

Se ejecutaron dos sondeos geotécnicos (uno por estribo) en el sitio de implantación de la obra de arte. En cada sondeo se realizaron ensayos de penetración estándar (SPT) con extracción de muestras en cada metro de profundidad. Las perforaciones alcanzaron una profundidad total de 14,0 m medidos desde la superficie natural del terreno. Aproximadamente a los 12 m de profundidad se obtuvo rechazo en los ensayos SPT (más de 70 golpes para 30 cm) siendo necesario para proseguir con el avance de los sondeos acudir al empleo de máquinas rotativas y percusión con trícono para alcanzar las profundidades finales especificadas en cada sondeo. Adicionalmente a las muestras obtenidas con el sacamuestras bipartido de Terzaghi, de cada perforación se extrajeron muestras inalteradas con un sacamuestras de pared delgada tipo "Shelby" de 80 mm de diámetro. Con las muestras obtenidas en las perforaciones se ejecutaron ensayos en laboratorio con el objetivo de identificar y caracterizar mecánicamente a los suelos presentes en el perfil estratigráfico del lugar.

Con la información obtenida en las perforaciones y los ensayos de laboratorio se describió el perfil geotécnico existente en la zona de implantación de la obra de arte y se diseñó el sistema de fundación de las obras proyectadas.

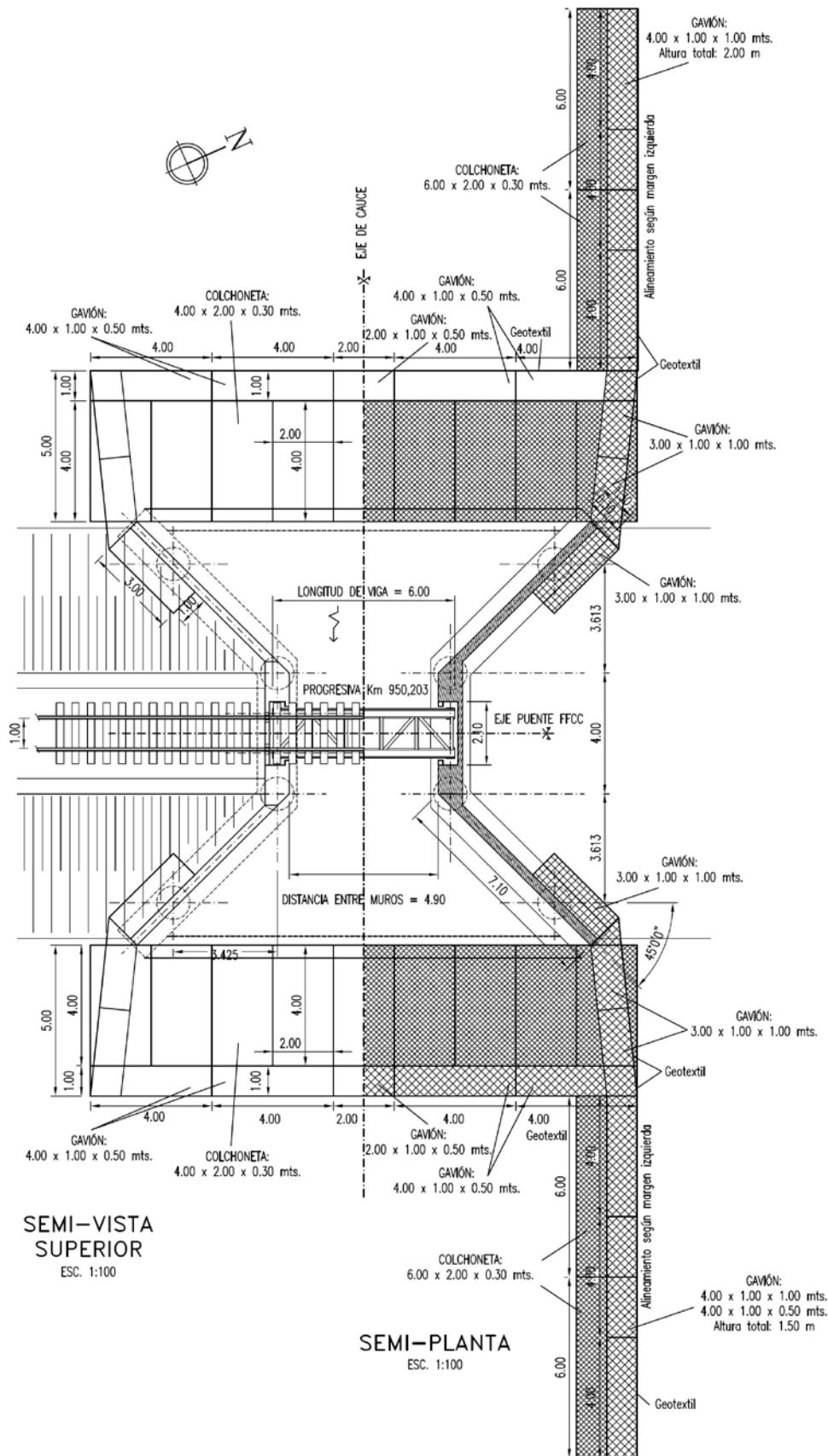


Figura 3: Planta de la alcantarilla construida.



Figura 4: Fotografía de la alcantarilla en estudio tomada al concluir su construcción. Vista desde aguas abajo.

Estudio Hidrológico

El estudio hidrológico previo al diseño hidráulico de la alcantarilla se realizó en base a las normativas vigentes de la Comisión Nacional de Regulación del Transporte (2004).

Los estudios hidrológicos realizados comprendieron, en un principio, la determinación de las principales características hidromorfológicas de la región de aporte a la alcantarilla analizada, desarrollando en forma complementaria un modelo digital de elevaciones a base de datos de la Misión SRTM (USGS, 2004), con el que se definieron curvas de nivel con 1 m de equidistancia y posteriormente se delimitó la cuenca de aporte a la sección de interés.

La cuantificación de los parámetros hidrológicos necesarios para determinar la tormenta de diseño se estableció en función de técnicas indirectas, basadas en criterios de regionalización (Rafaelli y Moyano, 2002; Farías et al., 2008). El caudal resultante estimado para 100 años de recurrencia se asumió como caudal de diseño.

Diseño Hidráulico

En una primera instancia se procedió a relevar topográficamente una serie de perfiles transversales del cauce del arroyo Los Horcones, tanto aguas arriba como aguas abajo de la alcantarilla. Con esta información se modeló el comportamiento hidráulico de un tramo del cauce de 300 m de longitud, comprendiendo 200 m aguas arriba de la sección de la alcantarilla proyectada y 100 m aguas abajo de la misma. Para la modelación se utilizó el programa computacional HEC-RAS 3.1 (USACE, 2002), en el que se ingresaron datos geométricos correspondientes al relevamiento de perfiles transversales.

Los resultados de la modelación para el escenario de diseño determinaron los rasgos de mayor interés desde el punto de vista hidráulico, como el perfil hidráulico general y niveles de agua alcanzados tanto en la sección transversal del cruce, donde se emplaza la alcantarilla, como en los perfiles aguas arriba y aguas debajo de la misma.

En los sectores donde la velocidad resultó superior a la admisible se ha previsto la protección con gaviones y colchonetas, según el criterio de diseño propuesto en Maccaferri (1981). Básicamente este sistema de protección intervino en las proximidades de los estribos hacia ambas márgenes del cauce y a ambos lados de la vía.

Adicionalmente se proyectó una solera de hormigón armado entre los estribos, debido a la socavación local en estribos estimada según el criterio de Frohlich (Martínez y Fernández, 2000), donde la profundidad de erosión es función de la profundidad del agua en la sección donde se encuentra el estribo, del número de Froude basado en la velocidad y profundidad adyacente al estribo de aguas arriba, y de la forma y el ángulo del estribo.

Proyecto y Cálculo Estructural

La estructura de la alcantarilla se resolvió con un tramo metálico de 6 m de luz, apoyado sobre dos estribos cerrados de hormigón armado con muros de ala a 45°. En función de las cargas transmitidas por la estructura y del estudio de suelos realizado, la fundación de los estribos se diseñó mediante pilotes de hormigón armado excavados y colados in situ de 1,10 m de diámetro y apoyados a 13 m de profundidad sobre una arcilla rojiza altamente preconsolidada y compacta (SPT mayo a 45 golpes).

Para el diseño y cálculo de los estribos de la alcantarilla se construyó un modelo computacional de elementos finitos en el programa SAP2000 que combina elementos tipo barra para los pilotes, cabezales, columnas y viga dintel, y elementos tipo placa para modelar las pantallas frontal y laterales.

A partir de este modelo se determinaron las solicitudes que se utilizaron para el dimensionamiento de elementos y armaduras, tal como figura en los planos de proyecto.

Estudio de Impacto Ambiental

En el estudio de impacto se realizó un análisis basado en matrices de tipo Leopold, considerando los factores ambientales susceptibles de ser afectados por el proyecto y analizando cada una de las acciones impactantes generadas por el mismo. En este aspecto se consideraron como etapas de estudio la construcción de la obra de alcantarilla y defensa y la operación de la misma, estados que fueron contrastados con el estado actual sin la obra en estudio.

DESCRIPCIÓN DEL COLAPSO DE LA ALCANTARILLA

Fenómeno hidrológico registrado el 17 de diciembre de 2009

Los datos de lluvia disponibles asociados a la tormenta ocurrida el día 17 de diciembre de 2009 (INTA – Salta, 2009 – comunicación telefónica), indicaron una precipitación entre 70 a 80 mm en las cercanías a Rosario de la Frontera con una duración aproximada entre 30 a 45 minutos. Se destaca que la lluvia caída alcanzó un valor de recurrencia similar al utilizado en la verificación de la estructura.

En la Figura 5 se observa una vista panorámica desde aguas abajo de la sección donde se emplaza la alcantarilla ferroviaria registrada aún durante el evento de referencia.



Figura 5: Vista de la alcantarilla desde aguas abajo. Fotografía tomada aproximadamente 12 horas después de la precipitación del 17 de diciembre.

Como consecuencia de esta crecida del Arroyo Los Horcones, se produjo el colapso del terraplén ferroviario sobre la margen izquierda de la alcantarilla en estudio y del sistema de protecciones colocadas en las márgenes del cauce.

Secuencia de la falla del sistema de protección

El proceso que desencadenó la falla del sistema de protección, se describe y evalúa a partir de una secuencia fotográfica que registra el avance del deterioro de la obra de arte durante y posterior al evento hidrológico de referencia.

Al alcanzarse el primer pico de la creciente sobre el arroyo Los Horcones (véase la Figura 5), se produjo una disminución de aproximadamente el 50% de la sección libre de la alcantarilla ferroviaria como consecuencia de la acumulación de material de arrastre y una elevación del fondo del cauce aguas arriba de la misma, lo cual redujo drásticamente la capacidad de evacuación hidráulica de la obra de arte. Esta disminución de la superficie de paso libre generó una aceleración del flujo en la sección media de la estructura que produjo un resalto hidráulico aguas abajo, tal como se aprecia en la Figura 5.

A raíz de esta situación crítica se produjo un embalse aguas arriba de la sección de la alcantarilla, generando una condición de flujo subcrítico (con disminución de la velocidad del flujo), que favoreció el depósito de los sedimentos transportados por el torrente. Esta condición se refleja en la Figura 6, donde se observa que la elevación final del lecho del cauce sobre la margen derecha del mismo, aguas arriba de la alcantarilla, alcanzó una altura de 1,7 m, al tomar como referencia la altura de proyecto igual a 2,0 m de los gaviones colocados en la obra.

Al elevarse el fondo del cauce y continuar parcialmente obstruida la sección de paso de la alcantarilla, el nivel del agua superó la altura de los gaviones colocados (2 meses antes) sobre las márgenes aguas arriba generando un proceso de erosión del material del talud de los mismos (suelo desnudo al momento de la creciente) y luego del terraplén de suelo compactado de la vía.

En la Figura 6 se observa sobre la margen derecha, la presencia de resaca dejada por aplastamiento de la vegetación natural y rastros de la erosión del terraplén de la vía.



Figura 6: Defensas sobre margen derecha aguas arriba de la alcantarilla luego del evento hidrológico de referencia.

En la Figura 7 se presenta una vista panorámica desde aguas arriba y hacia la sección de emplazamiento de la alcantarilla, donde se observa la apertura que generó el paso de la creciente sobre la margen izquierda de la estructura de hormigón a través del terraplén de la vía ferroviaria.



Figura 7: Margen izquierda de la alcantarilla vista desde aguas arriba luego del paso de la creciente.

En la Figura 8 se muestra el estado de las defensas de gaviones, sobre la margen izquierda del arroyo aguas arriba de la alcantarilla, luego del paso de la creciente. Se aprecia la ausencia del talud de apoyo de los gaviones y el material depositado en la zona del cauce, producto del proceso erosivo. En esta figura se destaca nuevamente la resaca depositada sobre los gaviones y las ramas acumuladas por retención del estribo de la alcantarilla.



Figura 8: Defensas sobre margen izquierda aguas arriba de la alcantarilla.

Al erosionar el talud por detrás de los gaviones de la margen izquierda aguas arriba y el talud de la vía en esta sección, se produce el encauzamiento del agua acumulada aguas arriba. En la Figura 9 se observa el vuelco de los gaviones de margen izquierda aguas abajo de la alcantarilla, hacia el centro del cauce. Esto se debe al empuje recibido desde la margen izquierda por el escurrimiento del agua al erosionarse completamente el terraplén de la vía. En la misma figura es posible apreciar la capacidad de transporte del río, destacando la presencia de un tronco de dimensiones considerables (9 m de largo por 0.70 m de diámetro aproximadamente) pasando por debajo de la alcantarilla. La presencia de troncos de estas dimensiones constituyó la causa fundamental de la obstrucción de la alcantarilla forzando el paso por debajo de la vía.



Figura 9: Defensas sobre margen izquierda. Vista desde aguas abajo de la alcantarilla. Arrastre de troncos en el torrente.

Causas y mecanismo de colapso de la alcantarilla

A partir del análisis de las fotografías presentadas es posible concluir en la siguiente reconstrucción del proceso de falla de la obra de arte:

- La circulación de troncos de árboles de gran tamaño (algunos alcanzaron a medir aproximadamente 70 cm de diámetro y hasta 9 m de longitud) provocó una obstrucción en la sección libre de la alcantarilla.
- Una vez obstruida la alcantarilla se produce un efecto dique, embalsando el agua del arroyo aguas arriba de la misma, elevando el nivel e impidiendo el paso de agua, ramas y sedimentos. La deposición de materiales finos es un indicador del endicamiento referido generado a causa de una disminución abrupta de la velocidad del flujo hacia aguas arriba. Esta condición hizo que la obra en conjunto resultara sometida a empujes y esfuerzos adicionales a los previstos en el proyecto.

El aumento del tirante aguas arriba de la alcantarilla prosiguió hasta que se superó la cota superior del nivel de gaviones. En este momento el agua comenzó a erosionar detrás de los mismos socavando el suelo de apoyo, con lo cual alcanzó en forma directa al terraplén de la vía, erosionándolo y abriendo paso a través del mismo, con lo cual se liberó el agua acumulada como se aprecia en la Figura 10.

Al abrirse el terraplén de la vía y permitir la circulación de agua, se produjo un aumento de la velocidad del flujo en dirección a la margen izquierda, arrastrando el material acumulado.

Del análisis precedente, se concluye que el terraplén de la vía fue removido a causa de la erosión de la margen izquierda del arroyo debido a la elevación del nivel de agua por encima de las protecciones, situación a la que se llegó como consecuencia de la obstrucción de la alcantarilla con material de arrastre (troncos de grandes dimensiones, arbustos, etc.).



Figura 10: Análisis del colapso del terraplén lateral.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se describen y analizan los daños sufridos por una alcantarilla ferroviaria de grandes dimensiones (encuadrando también en la categoría de pequeño puente) como consecuencia de una tormenta de corta duración igual a la tormenta de diseño prevista en el proyecto de la obra pero con la adición de material de arrastre, preferentemente desechos de la actividad humana no considerados en el diseño.

Se concluye que el principal factor que ocasionó el colapso del sistema de protección de la obra de arte, con la consecuente suspensión temporal del servicio del FFCC General Belgrano, fue la obstrucción parcial de la sección de paso de la alcantarilla debido al arrastre de troncos de gran tamaño productos de la tala imprevista en la cuenca. Esta disminución de la sección de la alcantarilla produjo un incremento inesperado del nivel del agua hasta el punto tal de superar la cota de la vía, lo que generó condiciones imprevistas de empuje y erosión del terraplén, principalmente sobre el lado noreste de la vía. Esta situación produjo el colapso del sistema de protección aguas arriba y abajo de la misma.

Si bien los parámetros hidrológicos e hidráulicos de diseño de la alcantarilla fueron ratificados luego del colapso de la obra, la presencia de troncos con longitudes mayores a los 4,9 m de luz libre de la obra de arte no fueron previstos en el proyecto, evidenciando el impacto negativo que puede tener la intervención antrópica en el comportamiento de cuencas de dimensiones medianas frente a fenómenos hidrológicos de magnitudes previsibles.

Si se asumiera como condición de verificación de la alcantarilla que el material de arrastre en el flujo producirá el taponamiento del 50% de la sección impuesta, la estructura existente tendría una capacidad de evacuación para precipitaciones de muy corta recurrencia (menor a 2 años), lo que implicaría un recurrente colapso del sistema de

evacuación. Esto obligaría a frecuentes reconstrucciones de las protecciones y terraplenes, además de la limpieza del cauce.

Se concluye que para garantizar el funcionamiento de la obra de arte dentro de las condiciones de diseño previstas, es imprescindible realizar una inspección aérea periódica de la cuenca de aporte a los fines de detectar intervenciones antrópicas no autorizadas que pudieran poner en riesgo el normal funcionamiento de la alcantarilla.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los Ingenieros Juan José Iraolagoitia y Carlos Lorca de las empresas SERVYCOM S.R.L. y FERROMEL S.A. por el aporte de material fotográfico e información sobre la tormenta acaecida.

REFERENCIAS

Comisión Nacional de Regulación del Transporte (2004). “Instrucción Técnica para Estudios de Hidrología de Crecidas”. I GVO (OA) 004. Disponible en: www.cnrt.gov.ar.

Farías, H. D., Olmos, L. A. e Ibáñez, J. A. (2008). “Relaciones generalizadas para lluvias intensas. Aplicaciones en regiones de Argentina y Sudamérica”, *Memorias del XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Cartagena de Indias, Colombia, septiembre, AIHR-AIIH.

INTA – Salta (2009). Información del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria sobre la precipitación del día 17 de Diciembre de 2009, comunicación telefónica.

Maccaferri Gabioes do Brasil (1981). “Revestimientos Flexibles en los Canales y Cursos de Agua Canalizados. Manual Técnico”, S.P.A., Officine Maccaferri, Sao Paulo, Brasil (www.maccaferri.com.br).

Martínez, M. E. y Fernández, P. S. (2000). “Erosión local en estribos de puentes. Situación actual y metodología de cálculo”, *Revista de Obras Públicas*, Editorial Ciencia y Técnica de la Ingeniería Civil, No. 3396, pp. 51-57.

Rafaelli, S. y Moyano, C. (2002). “Estudio Hidrometeorológico Regional”, *Jornadas de Estudio sobre el Análisis de Riesgos Hidrogeológicos y Medidas de Prevención de los Riesgos Naturales en América Latina*, Buenos Aires, Argentina.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers (2002). “HEC-RAS River Analysis System”, Hydraulic Reference Manual, Version 3.1.

USGS - U.S. Geological Survey (2004). Shuttle Radar Topography Mission, 1 Arc Second Scene SRTM_u03_n008e004, Unfilled Unfinished 2.0, U.S. Geological Survey. Global Land Cover Facility, University of Maryland, College Park, Maryland, USA.

SAP2000, Version 8.3.5 (2006). Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA.