

ANÁLISIS HIDRODINÁMICO DEL DESVÍO DEL ARROYO CORRALES, RIVERA, URUGUAY

Luis Teixeira, Raúl López Pairet, Christian Chreties y Guillermo López

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay
Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay. CP 11300

E-mail: ralonso@fing.edu.uy, chreties@fing.edu.uy, glopez@fing.edu.uy, luistei@fing.edu.uy

Asesor de la empresa Loryser S. A. Avda. Alfredo Navarro 3196, Montevideo, Uruguay.

E-mail: raul.lopezpairet@gmail.com

RESUMEN

La empresa Loryser S.A., explota desde el año 2003 la mina aurífera "El Arenal", sita en el departamento de Rivera (Uruguay). Con el objetivo de extender la explotación de dicha mina, en el año 2005 fue proyectada una obra de desvío y canalización de un tramo del arroyo Corrales. Dicho proyecto de desvío incluyó la construcción de dos diques de protección, situados al comienzo y final del desvío del arroyo. A los efectos de analizar la viabilidad desde el punto de vista de la ingeniería hidráulica del proyecto de desvío, se realiza un estudio basado en la modelación numérica hidrológica hidráulica de un tramo del arroyo Corrales. A partir de dicha modelación, se observa que desde el punto de vista hidrodinámico, la nueva traza del desvío no genera consecuencias importantes. Es de destacar que la traza original fue modificada, con el objetivo de mejorar las condiciones hidráulicas del desvío y su zona de influencia. Se concluye entonces que de acuerdo a la información disponible y a los elementos técnicos manejados no existen elementos que muestren impactos significativos, desde el punto de vista de la ingeniería hidráulica, como consecuencia de la implantación del desvío del arroyo Corrales propuesto.

ABSTRACT

Since 2003, the Loryser SA Company operates a gold mine called "El Arenal" located in Rivera (Uruguay). In 2005 a diversion work of a stream of Corrales river was projected, in order to extend the mine operation. The diversion project included the construction of two levees located at the beginning and the end of the stream diversion. A study based on a numerical hydrological and hydraulic model from a stream of Corrales river was developed, in order to analyse the feasibility of the diversion project from the viewpoint of hydraulic engineering. The results show that the diversion works does not generate significant consequences. The original design was amended with the aim of improving the hydraulic conditions of the diversion and its zone of influence. It is concluded, that according to available information and the results of these studies there is no elements that show significant impacts, from the standpoint of hydraulic engineering, as a result of implementing the proposed diversion.

INTRODUCCIÓN

Minera San Gregorio (LORYSER S.A., empresa perteneciente al Grupo UME), comenzó a explotar la mina Arenal en Fase 1, en el mes de octubre de 2004, con un horizonte de explotación hasta fines del año 2007. La mina se encuentra localizada en la margen izquierda del arroyo Corrales, en la 5ta. Sección Judicial del departamento de Rivera (Uruguay). En la Figura 1 se presenta un croquis de ubicación de la mina Arenal en su Fase 1. Las nuevas exploraciones geológicas, permitieron detectar un cuerpo de mineral explotable que requiere la ampliación de la mina Arenal (Fase 2), lo que permitirá operar hasta el año 2010. A los efectos de extender la explotación actual de la mina se propone una obra de desvío y canalización de un tramo del arroyo Corrales al oeste de dicha cantera, como lo indica la Figura 2. Para ello la empresa ha proyectado dos diques de protección, situados al comienzo y final del desvío del arroyo, de sección heterogénea: núcleo de suelo arcilloso compactado y faldones de material granular estéril (sin mineral). La excavación del nuevo cauce se realiza en roca, con una longitud aproximada de 1250 m, sección trapezoidal de 40 m de ancho de fondo y una pendiente de 0.19 %; previéndose trayectos curvos en varios sitios.

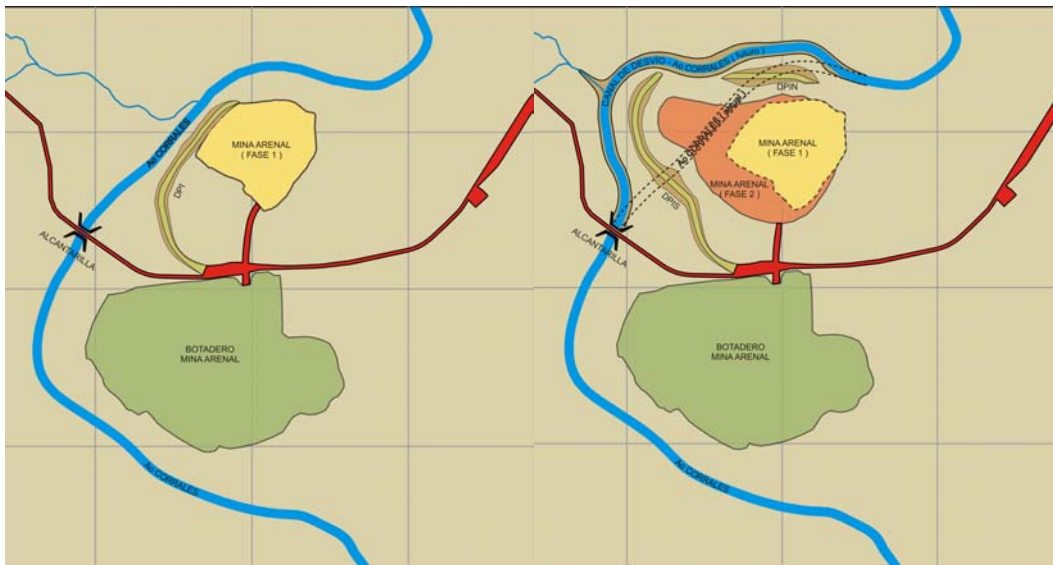


Figura 1.- Esquema de la cantera previo al desvío.

Figura 2.- Esquema del desvío propuesto.

A solicitud de la empresa se realizó un estudio orientado al análisis de la viabilidad desde el punto de vista de la ingeniería hidráulica del proyecto del desvío y a la identificación de las acciones requeridas para asegurar la estabilidad del nuevo cauce.

En este artículo se presentan la metodología y resultados del análisis realizado en cuanto a la hidrodinámica del arroyo y la obra del desvío. Entre los resultados se destaca la caracterización hidrodinámica de las situaciones con obras y sin obras y las modificaciones realizadas al proyecto original, a partir del desarrollo del estudio, para minimizar las diferencias entre ambas situaciones.

METODOLOGÍA

La metodología de estudio se basa en la modelación numérica hidrológica e hidrodinámica de un tramo del arroyo Corrales.

En primer lugar se realizó la recopilación y sistematización de información necesaria para la implementación de los modelos. De esta manera se obtuvo: información cartográfica, información pluviométrica e hidrométrica e información de suelos de la cuenca. Complementariamente se desarrolló un relevamiento plani-altimétrico para representar adecuadamente la geometría del curso fluvial. Luego se realizó una modelación hidrológica semi-distribuida de la cuenca de aporte del arroyo Corrales con cierre en la ruta 28 (4000 metros aguas arriba del tramo a desviar), la que ocupa aproximadamente 1013 Km²; para así determinar los hidrogramas de aporte al arroyo en la zona del desvío para eventos extremos. Para ello, se consideró una discretización en 7 sub-cuencas, como se indica en la Figura 3, en las cuales se modeló el proceso de infiltración (método de curva número) y el proceso de transformación Precipitación Efectiva- Caudal a través del hidrograma unitario triangular del S.C.S. Las características de las 7 sub-cuencas se presentan en la Tabla 1. El tránsito por el arroyo Corrales dentro de la cuenca se realizó utilizando el modelo de Onda Cinemática. Esta modelación hidrológica se llevó a cabo sobre la base del software HEC-HMS (US Army Corps of Engineers) en su versión de mayo de 2003.

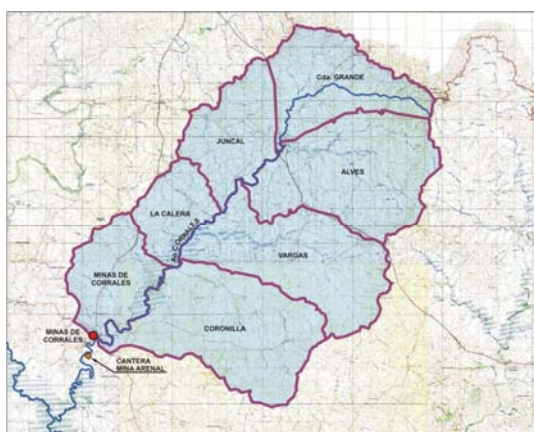


Figura 3.- Sub-cuencas del Arroyo Corrales.

Sub-cuenca	Área (km ²)	Longitud (m)	Desnivel (m)	S (%)	tc Kirpich horas
Coronilla	223.4	29762	155	0.52	7.01
Vargas	196.6	30440	125	0.41	7.82
Alvez	210.6	24356	70	0.29	7.55
Cañada Gde	136.3	26346	105	0.40	7.08
Juncal	106.7	15575	65	0.42	4.64
La Calera	69.2	12987	45	0.35	4.33
M. de Corrales	98.1	16296	45	0.28	5.63

Tabla 1.- Características de las sub-cuencas.

Paralelamente se realizó una modelación hidrodinámica del tramo del arroyo Corrales 900 metros aguas arriba del puente de ruta 28 (5 kilómetros aguas arriba del tramo a desviar) hasta la confluencia con el arroyo Cuñapirú (25 kilómetros aguas abajo del tramo a desviar), para lo cual se utilizó el software HEC-RAS 3.1.3 (U.S. Army Corps of Engineering) en su versión de mayo de 2005. Este software, permite resolver numéricamente las ecuaciones de flujo transitorio unidireccional a superficie libre (ecuaciones de Saint-Venant), sobre un dominio de cálculo representado por la topografía del cauce y planicie de inundación del arroyo.

Se realizó una calibración primaria del modelo hidrodinámico, utilizando la información de aforos de caudal bajos existente en el puente de ruta 28. Luego se realizó una calibración conjunta definitiva de los modelos hidrológico e hidrodinámico para el evento extremo de septiembre de 1961. Se ajustaron así los parámetros hidrológicos de cada subcuenca: número de curva, impermeabilidad, abstracción inicial; los parámetros del tránsito hidrológico: rugosidad y pendiente de energía y los coeficientes de rugosidad de las secciones del modelo hidrodinámico.

Posteriormente, se realizó la validación de los modelos para el evento de abril del 2002 (máximo registrado) donde también se contaba con información pluviométrica diaria en las 3

estaciones consideradas en la cuenca, y los niveles máximos en el puente de ruta 28 y puente Bailey (Alcantarilla en embocadura del desvío proyectado).

Previo a la etapa de análisis del comportamiento de la traza del desvío, se realizó un análisis estadístico de caudales máximos extremos del arroyo Corrales en la sección del puente de ruta 28, con el objetivo de determinar los caudales máximos para diferentes recurrencias.

A partir del modelo hidrodinámico calibrado y validado se analizó la incidencia de las obras en el flujo del arroyo en las secciones de interés y para diferentes eventos.

Se estudió el impacto de las obras de desvío del cauce, dique de protección y alcantarilla sobre los niveles de distintas secciones del tramo del arroyo modelado, frente a los eventos extremos de abril de 2002 y septiembre de 1961. Para cuantificar los posibles efectos en el flujo, debido a las obras proyectadas, se compararon los limnigramas simulados antes y después de las obras, en las siguientes secciones

También se realizó un análisis incluyendo el efecto de la pérdida de carga introducida por las curvas de la traza del desvío proyectada. Como consecuencia de que la modelación hidrodinámica es unidimensional y no es capaz de reproducir el efecto bidimensional de la sobreelevación dada en las curvas, se incorporó este efecto incrementando la rugosidad en el desvío de tal manera que en la primera sección del desvío se tenga una sobreelevación igual al total de las pérdidas de carga causadas por todas las curvas.

Otro elemento de importancia a los efectos de analizar las consecuencias de la realización del desvío proyectado del arroyo, fue la posible variación de la duración del corte de paso del puente de ruta 28 (ubicado 3,5 km aguas arriba). En este sentido, se obtuvieron los limnigramas para ambas situaciones, y se determinó el tiempo durante el cual, el nivel permanece sobre la cota de la rasante del puente.

Por último, se buscó determinar hidrogramas de caudal tales que generen niveles en la zona de desvío que superen la contención del dique de protección en la zona más comprometida (inicio del DPIN), de manera de determinar la recurrencia de los eventos que producirían el colapso de los diques y así evaluar el riesgo asociado.

RESULTADOS

Calibración y verificación del modelo hidrológico - hidráulico

La calibración y verificación del modelo hidrológico-hidrodinámico se realizó en forma acoplada utilizando los datos de precipitación de distintos eventos y los niveles en el puente de Ruta 28 y puente Bailey (sección del desvío), como secciones de verificación de niveles.

Para la etapa de calibración se consideró en primer lugar el período Septiembre 2004-Septiembre 2005 donde se dispone de datos diarios de nivel tanto en el puente de Ruta 28 como en el puente Bailey. Además se consideró también para la etapa de calibración los puntos de aforo en el puente de ruta 28 tomados por DNH durante el año 2004. Sin embargo, estos niveles no corresponden a eventos extremos significativos. Finalmente analizando el conjunto de los datos de precipitación y nivel disponibles en el puente de Ruta 28, se seleccionó el evento de septiembre de 1961 como evento de calibración conjunta y el evento

de abril de 2002 como evento de validación conjunta (para este último, la información de niveles corresponde al máximo nivel registrado).

En primer término, se realiza una pre-calibración mediante un ajuste de los coeficientes de rugosidad de Manning para el modelo hidrodinámico a partir de la información de niveles en los puentes de ruta 28 y Bailey durante el año 2005, de manera de representar de la mejor manera los picos registrados en ese período y los puntos de aforo tomados por DNH durante el año 2004. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4 y Figura 5.

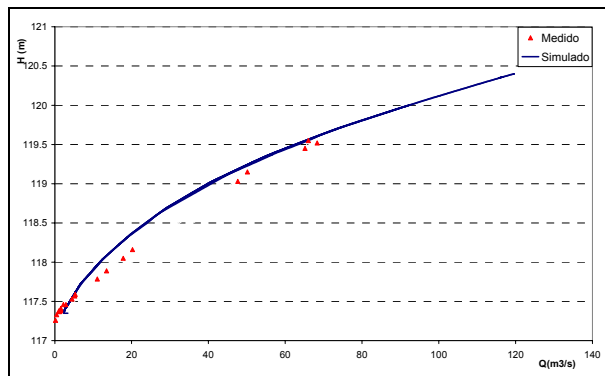


Figura 4.- Calibración del modelo .Curva de aforo (Ruta 28)

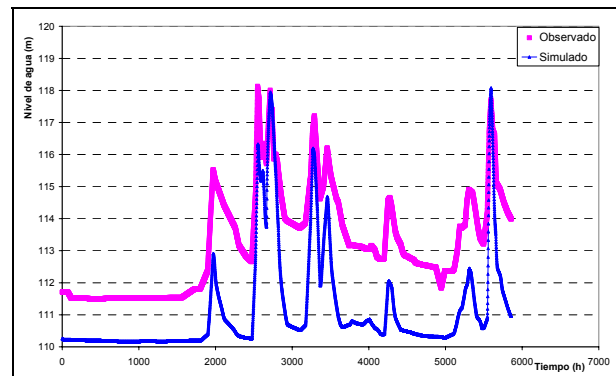


Figura 5.- Calibración del modelo hidrodinámico. Año 2005

Es de destacar que si bien en el 2005 se dieron eventos de cierta importancia, estos están muy por debajo de los niveles máximos alcanzados en una crecida.

Por esto se incorpora una calibración acoplada de los modelos hidrológicos e hidrodinámicos en base al evento de septiembre de 1961 a partir de la información pluviométrica del mismo. Se utiliza como sección de calibración, los niveles registrados en el puente de Ruta 28.

La calibración del modelo hidrológico se realizó ajustando los parámetros de la infiltración (Número de Curva, Abstracción Inicial y % de impermeabilidad) en cada sub-cuenca y número de Manning y pendiente de la línea de energía en cada tramo del curso, de manera de representar, a partir de la precipitación diaria del evento de septiembre de 1961, un hidrograma del evento que luego transitado en el modelo hidrodinámico represente los niveles medidos en el puente de Ruta 28.

Los resultados, presentados en la Figura 6, muestran un comportamiento muy satisfactorio de los niveles simulados respecto a los observados.

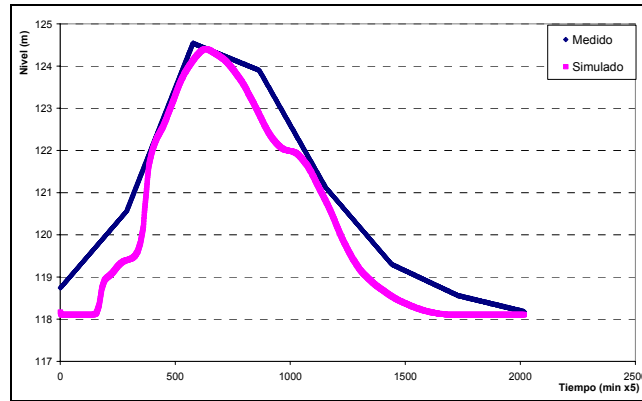


Figura 6.- Limnigrama medido y simulado del evento de 1961 en puente de ruta 28.

La etapa de verificación se realiza para el evento de abril de 2002, que constituye el mayor nivel alcanzado por el arroyo Corrales que se haya registrado. El nivel máximo simulado en el puente de la Ruta 28 recavado fue +126.15m que se encuentra 0.43m por encima del observado (+125.72m), en tanto que el simulado para el puente Bailey es +122.60m cuya diferencia con el observado (+121.5m) es de 1.10m. Se entiende que este resultado es aceptable considerando el objetivo de la modelación y a la confiabilidad de la información, especialmente en el caso del nivel máximo en el puente Bailey.

Influencia de las obras a realizar, a partir del modelo hidrodinámico.

Se estudió el impacto de las obras de desvío del cauce, dique de protección y alcantarilla sobre los niveles de distintas secciones del tramo del arroyo modelado, frente a los eventos extremos de abril de 2002 y septiembre de 1961. Para cuantificar los posibles efectos en el flujo, debido a las obras proyectadas, se compararon los limnigramas simulados antes y después de las obras, en las siguientes secciones

- puente en ruta 28
- sección inmediatamente aguas arriba de la alcantarilla (ex puente Bailey)
- 300 m aguas arriba de la alcantarilla

A modo de ejemplo, en las Figuras 7 y 8, se presentan los limnigramas resultante de la modelación con obras y son obras para la sección 300 m aguas arriba de la alcantarilla para el evento de 1961 y 2002 respectivamente.

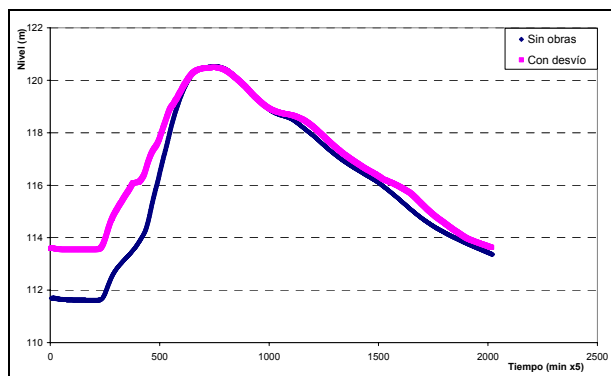


Figura 6.- Limnigrama medido y simulado del evento de 1961, 300 metros aguas arriba de alcantarilla

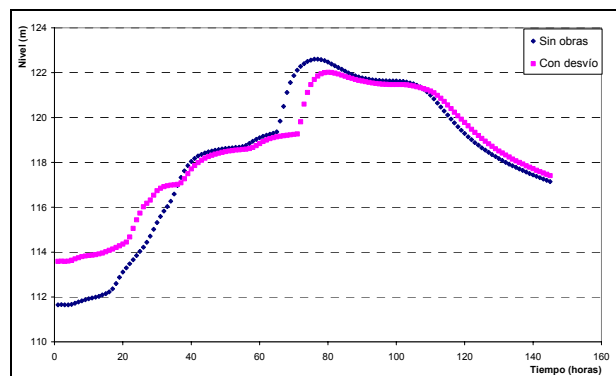


Figura 7.- Limnigrama medido y simulado del evento de 2002, 300 metros aguas arriba de alcantarilla

De los resultados se desprende que:

- para los 2 eventos en el puente sobre la Ruta 28 no existe prácticamente afectación. Para caudales del entorno del máximo registrado (creciente de abril 2002: 1376 m³/s) la influencia en el puente de ruta 28 es inferior a 10 cm.
- para las secciones de la alcantarilla y 300 m aguas arriba de la misma, para niveles altos (caudales altos), prácticamente no existe diferencia. Existe alguna diferencia para los niveles menores, pero en ese caso los problemas que implica no son significativos.

Influencia de las obras a realizar, incorporando el cálculo de las pérdidas de carga introducida por las curvas.

Si bien de acuerdo a lo indicado en el punto anterior, la afectación de las obras en el puente de ruta 28 no es significativa, en dicho análisis no se ha tenido en cuenta la pérdida de carga introducida por las curvas de la traza del desvío proyectada, como consecuencia de que la modelación hidrodinámica es unidimensional.

El diseño del trazado proyectado, incluye 7 curvas hasta la desembocadura en la entrada de la sección del puente Bailey. En la Tabla 2, se presenta la pérdida de carga de cada una de las curvas y la total el desvío correspondiente a la suma de cada curva.

Caudal (m ³ /s)	Tr (años)	Obs.	Pérdida de carga por efecto de las curvas (m)						
			Curva 2 PD200	Curva 3 PD450	Curva 4 PD550	Curva 5 PD750	Curva 6 PD1100	Curva 7 PD1250	Total
2200	753		0.15	0.11	0.14	0.13	0.15	0.06	0.74
1376	30	Crecida 2002	0.1	0.08	0.08	0.07	0.09	0.05	0.47
1000	7		0.07	0.05	0.05	0.05	0.06	0.03	0.31
500	1.5	Corte ruta 28	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.13
60	1	Corte alcant.	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.01

Tabla 2.- Pérdida de carga por efecto de las curvas de la traza del desvío

Para establecer la sobreelevación aguas arriba del desvío debido a las pérdidas de carga introducidas en las curvas, se simuló el efecto aumentando la rugosidad en el desvío. En este sentido, para la pérdida de carga dada se calculó cuanto aumentar la rugosidad, de modo que en la primera sección del desvío se tenga una sobreelevación igual al total de las pérdidas de carga causadas por todas las curvas.

Con la nueva rugosidad en el desvío del arroyo Corrales y aplicando el modelo hidrodinámico se obtuvieron los niveles máximos en secciones de interés aguas arriba en la situación sin desvío y con desvío, para diferentes períodos de recurrencia. Este análisis incorpora al efecto hidrodinámico unidimensional, el efecto de las curvas. En la Tabla 3 se presenta, a modo de ejemplo, los resultados para la sección ubicada 3000 metros aguas arriba de la alcantarilla. La columna “Diferencia de niveles (m)” corresponde al efecto final de las obras del desvío; mientras que la columna “Efecto curva (cm)” indica la sobreelevación debida exclusivamente al flujo en curva introducido por el desvío.

Recurrencia (años)	Caudal (m ³ /s)	Nivel (m)			Diferencia de niveles (m)		Efecto curva (m)
		Situación s/ obras	Situación Actual	Situación c/ obras	c/obras-s/obras	c/obras-actual	
500	2096	126.06	126.22	127.11	1.05	0.89	0.66
250	1920	125.57	125.72	126.53	0.96	0.81	0.57
100	1687	124.90	125.04	125.76	0.86	0.72	0.47
50	1510	124.36	124.50	125.13	0.77	0.63	0.41
25	1331	123.78	123.92	124.46	0.68	0.54	0.34
10	1090	122.96	123.08	123.49	0.53	0.41	0.25
5	900	122.26	122.37	122.68	0.42	0.31	0.19
2	615	121.07	121.14	121.31	0.24	0.17	0.10

Tabla 3.- Influencia de las obras 3000m aguas arriba de la alcantarilla, incluido el efecto de las curvas del desvío.

Análisis del efecto del desvío en la duración del corte del puente de Ruta 28.

Otro elemento de importancia a los efectos de analizar las consecuencias de la realización del desvío proyectado del arroyo, es la posible variación de la duración del corte de paso del puente de ruta 28.

En efecto, a la luz de los resultados anteriores, donde se muestra un leve aumento de nivel máximo en el puente, como consecuencia del desvío, se simula para diferentes caudales las situaciones con y sin obras en el modelo hidrodinámico completo (incluyendo las pérdidas por curvas).

En este sentido, se obtienen los limnigramas para ambas situaciones, y se determina el tiempo durante el cual, el nivel permanece sobre la cota de la rasante del puente: 122.80 m. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4.- Variación del tiempo de corte de paso del puente de ruta 28 como consecuencia del desvío proyectado, para diferentes caudales. El caudal de 1376 m³/s es el máximo correspondiente a la crecida de abril de 2002.

Caudal (m ³ /s)	Tiempo del puente fuera de servicio (hs.)		Aumento del tiempo de corte del puente (min)
	Sin obras	Con obras	
2200	81.83	82.67	40
1376	55.67	56.25	35
1000	45.58	45.75	10

Se observa que si bien se registra un aumento en el tiempo de corte del paso del puente de ruta 28 para eventos de crecida, este no es significativo (1 %) incluso para caudales mayores a la crecida de abril de 2002.

Análisis de sobrepasamiento del dique proyectado.

Por último, se buscó determinar hidrogramas de caudal tales que generen niveles en la zona de desvío que superen la contención del dique de protección en la zona más comprometida. Para ello, se utilizó el modelo hidrodinámico calibrado y la estimación de las pérdidas de carga en las curvas del desvío. Se realizaron diferentes simulaciones para caudales entre 2 y 500 años de período de retorno.

Luego de este análisis general de los diferentes caudales extremos, se estudia la recurrencia para los niveles de excedencia del DPIN en su zona más comprometida. El nivel crítico de sobrepasamiento es de 125.50 m lo que corresponde a un caudal de 1808 m³/s, calculado a partir del modelo hidrodinámico. Utilizando la estadística de extremos, este caudal tiene una recurrencia de 161 años.

CONCLUSIONES

A los efectos de analizar la viabilidad desde el punto de vista de la ingeniería hidráulica del proyecto de desvío, se realiza el presente estudio, basado en la modelación numérica hidrológica-hidrodinámica del tramo del arroyo Corrales. A partir de dicha modelación, se observa que desde el punto de vista hidrodinámico, la nueva traza del desvío no genera consecuencias importantes.

El modelo hidrodinámico permitió analizar la incidencia de las obras en el flujo del arroyo en las secciones de interés y para diferentes eventos. También ha permitido el análisis del efecto de las pérdidas de carga, introducidas en el flujo, por la presencia de curvas en el desarrollo en planta del canal de desvío proyectado.

Inicialmente se preveía un diseño del desvío que consideraba ocho curvas, de las cuales dos tenían un radio de curvatura de 80 m, tres un radio de 100 m y las 3 restantes 170 m de radio. Luego de analizar la pérdida de carga y la sobreelevación lateral provocada en las curvas diseñadas, para el evento extremo de abril de 2002, se concluyó que sería conveniente modificar levemente la sección del canal. En este sentido, el proyecto original fue corregido considerando las recomendaciones que surgen de este estudio, tendientes a disminuir el efecto de las curvas del desvío. En el trazado definitivo, se eliminó una curva de 100 m de radio, y se modificaron los radios de las curvas de 80 m pasando a 170 m.

Complementariamente, los resultados muestran que si bien se registra un aumento en el tiempo de corte del paso del puente de ruta 28 para eventos de crecida, este no es significativo (1 %) incluso para caudales mayores a la crecida de abril de 2002.

El nivel crítico de sobrepasamiento del dique proyectado, es de 125.50 m lo que corresponde a un caudal de 1808 m³/s, calculado a partir del modelo hidrodinámico. Utilizando la estadística de extremos, este caudal tiene una recurrencia de 161 años.

En resumen, se observa que desde el punto de vista hidrodinámico, la nueva traza del desvío no genera consecuencias importantes. Por ejemplo, la sobreelevación provocada en el puente de ruta 28 para una recurrencia de 100 años ($Q=1687$ m³/s) es de 0.33 m por encima de la correspondiente a la situación sin obras (tirante de 10.42 m). Esta provoca un aumento del tirante del orden del 3 % (pasando de 10.42 m a 10.75 m) y del 1 % en la duración del corte del puente por la crecida.

Se concluye entonces que de acuerdo a la información disponible y a los elementos técnicos manejados en este documento, no existen elementos que muestren impactos significativos, desde el punto de vista de la ingeniería hidráulica, como consecuencia de la implantación del desvío del arroyo Corrales propuesto por la empresa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Genta, J.L. Charbonnier F. & Rodríguez A. (1998). “Precipitaciones máximas en el Uruguay”, Congreso Nacional de Vialidad.

IMFIA (2008). “Estudio de las Actuaciones de Ingeniería Propuestas para el Desvío del Arroyo Corrales”, Convenio: LORYSER S.A. – IMFIA (UdelaR-FI), Informe final.

Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, Dirección de Recursos Naturales, División Suelos y Aguas (2001). “Compendio Actualizado de Información de Suelos del Uruguay” (CAISU), escala 1/1000.000, publicado por el, versión digital.

Molfino J.H.; Califra A. (2001) “Agua Disponible de las Tierras del Uruguay”, División de Suelos y Aguas, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca.

Soil Conservation Service (1985). “National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology.(NEH-4)”. United States Department of Agriculture (USDA).