

EROSIÓN DE LECHOS NO COHESIVOS CON DATOS OBTENIDOS DE PERFILADORES DOPPLER

Carlos A. Ercole⁽¹⁾; Graciela V. Zucarelli⁽²⁾

⁽¹⁾EVARSA, Avellaneda 3180 - 3000 Santa Fe, Argentina

⁽²⁾Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, El Pozo, 3000 Santa Fe, Argentina

caercole@evarsa.com.ar zuca@fich1.unl.edu.ar

RESUMEN

Uno de los métodos más aplicados para la determinación de la erosión, en lechos no cohesivos, se basa en ensayos provenientes de laboratorio. Dichos ensayos se realizan en canales uniformes colocando en el fondo material arenoso con un tamaño de grano específico.

Para trasladar estos resultados al campo, se usan dos fórmulas, una que relaciona la sección de estudio antes y después de ser erosionada y otra que relaciona los datos experimentales con los reales. En general, el problema consiste en que la sección de estudio no posee el mismo grado de uniformidad que el canal experimental

La metodología que se expone en este trabajo aproxima las condiciones experimentales a las de campo. Para ello se vale de mediciones de velocidades realizadas con perfilador Doppler. Mediante su tratamiento en gabinete, se materializa el campo de velocidades sobre una grilla regular y luego se obtienen líneas de corriente a partir de la misma. Dichas líneas de corriente, al ser cortadas por planos verticales ortogonales al flujo, presentan, tubo a tubo de corriente, secciones similares a las del canal experimental.

Se presenta una aplicación a un caso real, sobre el Riacho Itapé, brazo del Río Uruguay, frente a la ciudad de Concepción del Uruguay en la provincia de Entre Ríos.

ABSTRACT

The most popular method applied for calculation of erosion in non cohesive bed channels is based on laboratories tests. These tests are carried out in uniform channels placing sandy material over then channel bottom, using a specific size of grain.

In order to transfer these results to the field, two formulas are used. One relates the study section before and after erosion is made. The other relates experimental data with actual data. In general terms, the problem is that the cross-section under analysis does not have the same degree of uniformity as the experimental channel has.

The methodology presented in this paper approaches experimental conditions to those found on the field. This is accomplished by means of measures of water speed carried out with Doppler profilers. Later treatments at home office materialize the velocities field over a regular plane grid and then streamlines are built based on that grid. These streamlines, when cut by vertical planes orthogonal to the flow for each current pipe, assume similar sections to those of the experimental channel.

An application is presented to an actual case, on the Riacho Itapé, branch of the River Uruguay in front of the city of Concepción del Uruguay in the province of Entre Ríos, Argentina.

INTRODUCCIÓN

Uno de los métodos más aplicados para la estimación de la erosión en lechos no cohesivos se basa en ensayos provenientes de laboratorios. Dichos ensayos se realizan en canales uniformes colocando en el fondo material arenoso con un tamaño de grano específico. Como resultado de dichos ensayos se obtiene la velocidad media en el canal cuando comienza la erosión y el tirante es de 1 m.

Para el traslado de dicha metodología a canales naturales se asume la conocida ley de distribución potencial de velocidades. Sin embargo, las condiciones del escurrimiento en los cursos naturales no siempre sigue esta distribución a lo largo de una sección transversal al flujo, ya sea por variaciones en la profundidad o porque el flujo no es unidimensional. Frecuentemente, éste último es el caso que se presenta en obras cuyo potencial de erosión se desea investigar.

Una forma de aproximar las condiciones del flujo en el campo a las condiciones de laboratorio consiste en determinar tubos de corriente con una fracción del caudal total en cada uno de ellos. Para construir estos tubos se considera que la velocidad del agua es la misma en cualquier punto de una vertical (flujo bidimensional) y es la media de las velocidades medidas sobre dicha vertical. En consecuencia, los tubos quedan materializados por líneas de corriente en su vista en planta y superficies cilíndricas de recta generatriz vertical siguiendo como directriz dichas líneas de corriente.

Si se seccionan los tubos de corriente mediante planos verticales aproximadamente perpendiculares a ambas líneas de corriente, habrá en ellos un flujo muy similar al del canal experimental, sobre todo si se fracciona de manera que se pueda considerar profundidad uniforme e igual a la media de ese tramo. Finalmente se considera una distribución potencial de la velocidad en este canal ideal para extrapolar los resultados del canal experimental.

Haciendo la hipótesis adicional de que las líneas de corriente no variarán para caudales mayores al usado para su determinación y que conservan en consecuencia la misma fracción del caudal total, se pueden extrapolar los resultados a condiciones potencialmente más erosivas, con el fin de realizar pronósticos.

En este trabajo se muestra una metodología para construir líneas de corriente con el empleo de perfiladores acústicos que usan el Efecto Doppler. Mediante los mismos se obtienen simultáneamente, para puntos que siguen la trayectoria de la nave sobre la cual se monta, la posición del punto, la velocidad media sobre la vertical y la profundidad del agua. Luego de su tratamiento, con estos datos se obtiene la red de líneas de corriente.

METODOLOGÍA

Para la determinación de las líneas de corriente

Las fórmulas usadas para calcular la erosión dividen el flujo en franjas de ancho pequeño, de manera tal que puede considerarse una velocidad y una profundidad homogéneas, con una sección de flujo rectangular y con el vector velocidad perpendicular a este rectángulo.

Una forma de obtener estas franjas consiste en trazar una red de escurrimiento bidimensional con líneas de corriente y líneas equipotenciales. Las segundas son perfiles a través de los cuales fluye el agua en forma ortogonal en cada franja y las franjas quedan delimitadas por dos líneas de corriente contiguas, separando; por definición de línea de corriente, el flujo en tubos de igual caudal.

Para el trazado de las líneas de corriente se adopta como hipótesis que la velocidad del agua es la misma en cualquier punto de una vertical cualquiera que une el fondo del cauce con el pelo de agua. Esta hipótesis es la misma que se adopta en los modelos bidimensionales.

Las velocidades del agua medidas por el perfilador están igualmente espaciadas sobre verticales de medición y su promedio sobre la vertical da la velocidad media medida sobre la vertical.

Para este caso, las velocidades medias se distribuyen sobre una grilla regular con un espaciado de 1 m. En coincidencia con la grilla de velocidades, existe otra grilla que proporciona la cota del fondo en cada vértice. Utilizando el dato de velocidad y la cota de fondo en cada punto de la grilla se pueden construir los puntos de las poligonales que conforman las líneas de corriente.

Dadas las líneas de corriente se trazan los perfiles ortogonales a las mismas sobre un plano AutoCAD. Visto en planta, cada perfil consiste en una poligonal con segmentos que unen dos líneas de corriente consecutivas formando un ángulo casi recto con ambas.

Para el cálculo del potencial de erosión - Fórmula de Rossinsky

A los efectos del cálculo del potencial de erosión se utiliza el concepto de “profundidad de comienzo de erosión”. Este concepto proviene de la observación de que, en corrientes de aguas con lecho de material no cohesivo, existe una relación de equilibrio entre la granulometría de ese material y las velocidades de la corriente.

Esto se debe a que la corriente produce un esfuerzo de corte sobre el lecho que tiene potencialidad de movilizar el material contenido en el lecho con diámetro menor al diámetro de equilibrio.

Para este caso, se adoptaron dos fórmulas que corresponden a los desarrollos propuestos por Rossinsky.

La primera de las fórmulas, parte de la hipótesis que el caudal y la cota del pelo de agua permanecen constantes para la sección de estudio durante el proceso erosivo. En consecuencia, al producirse una erosión, se profundiza el cauce y disminuye la velocidad hasta alcanzar la situación de equilibrio entre la velocidad y el tamaño del grano.

La segunda fórmula permite trasladar los resultados de modelos experimentales al prototipo que se estudia. En estos ensayos, realizados en un canal regular, con un tirante de 1 m, se determinó el valor de la velocidad que inicia el transporte del material de fondo para distintos diámetros de partícula.

Si el tirante de equilibrio es mayor que el tirante actual, estas fórmulas permiten predecir el comienzo de un proceso erosivo.

Los tubos de corriente proporcionan información de una fracción del flujo en condiciones tales que puede considerarse como un canal de sección rectangular, de manera tal que los flujos se aproximan a las condiciones experimentales.

La primera fórmula de Rossinsky tiene la siguiente expresión:

$$V_e * H_e * b = V_m * H_m * b \quad (1)$$

donde V_e es la velocidad en el punto de equilibrio, perfil erosionado; H_e es el tirante de agua en equilibrio; b es el ancho del tubo de corriente; V_m es la velocidad del tubo de corriente, proviene de las mediciones con perfilador Doppler y H_m es el tirante medio del tubo de corriente.

Por otra parte, asumiendo una distribución de velocidades según la ecuación de Manning (Chow, 1994), la segunda fórmula de Rossinsky se expresa como:

$$V_e = V_{01} * H_e^{0.2} \quad (2)$$

donde V_{01} es la velocidad media en el canal experimental de 1 m de tirante que produce erosión para el material de fondo analizado, para cada diámetro de material (Onipchenko, 2000).

Combinando las ecuaciones (1) y (2) se pueden calcular H_e y V_e , que son el tirante que puede alcanzarse y la velocidad de equilibrio en cada tubo de corriente. Si H_e es mayor que H_m , se verificará un proceso erosivo para el tubo en análisis.

APLICACIÓN

Caso de Estudio

En la ciudad de Concepción del Uruguay, provincia de Entre Ríos, se está construyendo un sistema de defensa contra inundaciones. La ciudad está emplazada en las márgenes del Riacho Itapé, que constituye un brazo del Río Uruguay. En ciertos lugares las defensas son paralelas a la costa y se extienden hasta unos pocos metros de la misma. Este trabajo se llevó a cabo para determinar la erodabilidad de las márgenes y eventuales necesidades de protección (Figura 1).

Reconocimiento del Terreno

Se realizó un reconocimiento del área de estudio, relevando el Riacho Itapé en la zona de obras. En una primera etapa, el 22/07/04 se realizaron aforos en el Río Uruguay en Banco Pelay y en el Riacho Itapé. Se comprobó en gabinete que la situación medida correspondía a

una situación media, sin influencias de la operación de la represa de Salto Grande ni del fenómeno de sudestada. Los caudales medidos fueron de 4 150 m³/s en el Río Uruguay y de 350 m³/s en el Riacho Itapé, o sea que por este último pasa un 8.4 % del caudal total. La cota del pelo de agua fue de 1.09 m en la escala local.

El relevamiento para el campo de velocidades se realizó en la fecha 19/08/04, junto con otro aforo del Riacho. En dicha oportunidad el caudal medido fue de 290 m³/s, con un valor de escala de 2.16 m. Esta situación, de mayor cota de pelo de agua con menor caudal, se atribuyó a la fuerte influencia del viento del sudeste reinante. Por lo tanto las velocidades debieron ser corregidas asumiendo que el caudal total del Río Uruguay en situación normal, correspondiente a dicha cota es de 6 370 m³/s calculado con la curva de descarga local. Aplicando la misma distribución de flujo, corresponden 534 m³/s a la rama Itapé y considerando el área de la sección aforada, de 1 167 m², la velocidad media es de 0.46 m/s, mientras que la velocidad media medida fue de 0.25 m/s. La relación entre ambas es de 1.83, factor que se aplicó a todas las velocidades registradas.

Medición de Velocidades y Profundidades

Para el relevamiento de la morfología de fondo y las velocidades se empleó un ADCP (Perfilador de Corriente Acústico Doppler) y posicionadores satelitales GPS.

Como procedimiento práctico se posicionó la costa y los puntos de interés a través de GPS diferencial, llevándose esta información a un archivo AutoCAD, donde se preestablecieron las trayectorias sobre las cuales se tomarían las mediciones a efectos de lograr una masa de datos homogéneamente distribuida sobre el área de estudio (Figura 2).

En base a estas trayectorias y utilizando el Programa Guía (Ercole, 2000), se muestra en la pantalla de una PC que está a bordo, el recorrido en tiempo real de la embarcación y se efectúa el relevamiento según lo planificado.

Con una densidad prefijada de toma de muestra (con un intervalo de 2 segundos, velocidad de la nave de aproximadamente 1 m/s) en cada punto de medición se obtienen datos de las siguientes variables:

- ✓ Posición: Coordenadas X e Y, Sistema Gauss Kruger – Campo Inchauspe.
- ✓ Profundidad.
- ✓ Velocidad distribuida en la vertical, en celdas de 0.25 m en tres direcciones: Este, Norte y Vertical.

Extracción de Muestras de fondo

Con el empleo de un cono de arrastre, se extrajeron muestras del material del lecho en cada una de las tres secciones definidas a los efectos de determinar la composición del fondo. Posteriormente, en una segunda campaña realizada el día 18/08/04, se extrajeron tres nuevas muestras complementarias. Las muestras se recuperaron desechando la fracción sujeta a lavado de finos durante el ascenso del captador.

Cada una de las muestras extraídas, debidamente identificadas, se llevaron al Laboratorio de Sedimentología de EVARSA, donde se efectuaron los análisis granulométricos.

Dichos análisis se realizaron mediante la técnica de tamizado por vía seca o húmeda para el material grueso, es decir arenas finas y gruesas y gravas. A tales efectos se utilizaron los siguientes tamices: 10 (2.0 mm), 14 (1.414 mm), 35 (0.5mm), 40 (0.325mm), 45 (0.3235), 60 (0.25mm), 80 (0.176mm), 100 (0.1490mm), 120 (0.125mm), 170 (0.088mm), 200 (0.0740mm), 230 (0.063mm).

Para material fino, la técnica empleada fue del Método del Hidrómetro.

Análisis Sedimentológico

Para la presentación de los análisis estadísticos se utiliza la escala de grados phi (ϕ) presentada por Krumbein en 1934. La escala phi es una transformación logarítmica de los tamaños de granos que utiliza números enteros para definir los límites de las clases de tamaños. Esos números crecen con la disminución del tamaño de grano. La escala phi facilita la aplicación directa de los métodos estadísticos convencionales (que requieren intervalos de clase de igual longitud) a los datos de tamaño del sedimento. La relación entre el diámetro del sedimento (d) y los grados phi (ϕ) está dada por la siguiente expresión, para d en mm:

$$d = 2^{-\phi} \quad (3)$$

$$\phi = -\frac{\log d}{\log 2} \quad (4)$$

Las distribuciones de partículas de sedimentos naturales muy a menudo se aproximan a distribuciones de probabilidad log-normales de donde se obtiene una serie de diámetros característicos expresados en grados phi, correspondientes cada uno de ellos a porcentajes determinados de la curva, tal como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Diámetros característicos.

5 %	16 %	50 %	84 %	95 %
ϕd_5	ϕd_{16}	ϕd_{50}	ϕd_{84}	ϕd_{95}

Con los diámetros expresados en grados phi, se calculan los momentos de la distribución de tamaños mediante el empleo de fórmulas empíricas basadas en analogías gráficas que aproximan los momentos estadísticos de la distribución. Habitualmente interesan los siguientes estadísticos:

Diámetro Medio

$$M_{\phi} = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3} \quad (5)$$

$$\bar{d}_g = 2^{-M_{\phi}} \quad (6)$$

RESULTADOS

Análisis Sedimentológico

Se ha efectuado en este trabajo el análisis granulométrico de muestras de sedimentos del Río Itapé en diferentes puntos de muestreo. Los resultados indican que, en todas las muestras colectadas, los valores del diámetro medio \bar{d}_g y d_{50} son similares, con un valor de 0.17 mm. Del análisis de las muestras de fondo, se observa que la zona relevada se caracteriza por poseer arenas medias entre un 50 y 60% siendo escaso el contenido de limos.

Potencial de Erosión

Por definición, en un flujo bidimensional las líneas de corriente separan flujos de igual caudal. Se adoptó una división tal que entre cada par de líneas circula el 5% del caudal total estimado para condiciones normales, de 534 m³/s. El valor de la escala en el Puerto local fue de 2.16 m.

La erosión potencial se calculó sobre 4 perfiles ortogonales a las líneas de corriente, los cuales pueden verse en la Figura 3, junto con las líneas de corriente. La ortogonalidad de los perfiles permite tomar cada tubo de corriente como si la velocidad fuese normal al perfil, dividiendo el flujo en franjas tales que cada una de ellas cumple con leyes de similitud con el canal experimental de 1 m de tirante.

Con un programa desarrollado por Ercole (2004), se calcula el área de cada tubo de corriente, siguiendo las intersecciones del perfil con la grilla que expresa el fondo. Considerando que el caudal del tubo es conocido, se calcula su velocidad y tirante medios, teniendo en cuenta que el ancho de la franja de flujo es la longitud del segmento de perfil entre 2 líneas de corriente.

Para extrapolar los resultados a otras situaciones se formuló la hipótesis de que las líneas de corriente no cambian para crecidas de mayor magnitud. Como crecidas de cálculo se consideraron: (i) la que tiene un tiempo de permanencia del 30%, con una cota de escala de 2.81 m y un caudal de 8 070 m³/s en todo el sistema, calculado con curva de descarga y (ii) la crecida de proyecto, de cota de escala 10.44 m y un pico del orden de los 35 350 m³/s en todo el sistema, calculado con la curva de descarga.

En las Tablas 2, 3 y 4 se presentan los resultados, indicando con “*****” los tubos con potencial de erosión. Los resultados se presentan para el Perfil 1.

Situación actual: Caudal en el Río Uruguay $6373 \text{ m}^3/\text{s}$; caudal en el Riacho Itapé $534 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal en el tubo de corriente $26.7 \text{ m}^3/\text{s}$; pelo de agua 2.16 m.

Tabla 2. Resultados del cálculo del potencial de erosión.

PERFIL 1										
ESTE	NORTE	ANCHO	PROGR.	AREA	H	VEL.	V 01	H EROS.	V EROS.	EROSION A
(m)	(m)	(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m/s)	
6384816	6404362									
6384848	6404348	35.06	35.06	72.65	2.07	0.37	0.40	1.71	0.45	
6384861	6404344	13.22	48.28	59.76	4.52	0.45	0.40	3.86	0.52	
6384873	6404340	12.80	61.08	62.38	4.87	0.43	0.40	3.96	0.53	
6384884	6404338	11.17	72.25	59.52	5.33	0.45	0.40	4.44	0.54	
6384894	6404336	9.88	82.13	57.95	5.86	0.46	0.40	4.91	0.55	
6384902	6404335	8.25	90.38	53.34	6.46	0.50	0.40	5.71	0.57	
6384909	6404335	7.34	97.72	51.99	7.08	0.51	0.40	6.29	0.58	
6384915	6404335	6.07	103.79	45.40	7.48	0.59	0.40	7.37	0.60	
6384921	6404335	6.03	109.82	46.16	7.66	0.58	0.40	7.42	0.60	
6384928	6404335	6.62	116.44	51.22	7.74	0.52	0.40	6.86	0.59	
6384934	6404334	6.58	123.02	50.83	7.73	0.53	0.40	6.90	0.59	
6384940	6404334	5.91	128.93	45.71	7.73	0.58	0.40	7.54	0.60	
6384946	6404333	5.45	134.38	41.77	7.66	0.64	0.40	8.06	0.61	***
6384952	6404332	6.16	140.54	46.65	7.57	0.57	0.40	7.28	0.60	
6384959	6404331	7.33	147.87	54.64	7.46	0.49	0.40	6.30	0.58	
6384968	6404330	9.40	157.28	67.25	7.15	0.40	0.40	5.12	0.55	

Situación para el 30 % de permanencia: Caudal en el Río Uruguay $8070 \text{ m}^3/\text{s}$; caudal en el Riacho Itapé $676 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal en el tubo de corriente $33.80 \text{ m}^3/\text{s}$; pelo de agua 2.81 m.

Tabla 3. Resultados del cálculo del potencial de erosión.

PERFIL 1										
ESTE	NORTE	ANCHO	PROGR.	AREA	H	VEL.	V 01	H EROS.	V EROS.	EROSION A
(m)	(m)	(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m/s)	
6384816	6404362									
6384848	6404348	35.06	35.06	95.44	2.72	0.35	0.40	2.08	0.46	
6384861	6404344	13.22	48.28	68.35	5.17	0.49	0.40	4.69	0.54	
6384873	6404340	12.80	61.08	70.71	5.52	0.48	0.40	4.82	0.55	
6384884	6404338	11.17	72.25	66.78	5.98	0.51	0.40	5.40	0.56	
6384894	6404336	9.88	82.13	64.38	6.51	0.53	0.40	5.98	0.57	
6384902	6404335	8.25	90.38	58.70	7.11	0.58	0.40	6.95	0.59	
6384909	6404335	7.34	97.72	56.76	7.73	0.60	0.40	7.66	0.60	
6384915	6404335	6.07	103.79	49.34	8.13	0.69	0.40	8.98	0.62	***
6384921	6404335	6.03	109.82	50.08	8.31	0.67	0.40	9.03	0.62	***
6384928	6404335	6.62	116.44	55.53	8.39	0.61	0.40	8.35	0.61	
6384934	6404334	6.58	123.02	55.11	8.38	0.61	0.40	8.40	0.61	***
6384940	6404334	5.91	128.93	49.55	8.38	0.68	0.40	9.18	0.62	***
6384946	6404333	5.45	134.38	45.31	8.31	0.75	0.40	9.81	0.63	***
6384952	6404332	6.16	140.54	50.65	8.22	0.67	0.40	8.86	0.62	***
6384959	6404331	7.33	147.87	59.41	8.11	0.57	0.40	7.67	0.60	
6384968	6404330	9.40	157.28	73.36	7.80	0.46	0.40	6.23	0.58	

Situación para la crecida de proyecto: Caudal en el Río Uruguay 35 350 m³/s; caudal en el Riacho Itapé 2 962 m³/s, caudal en el tubo de corriente 148.10 m³/s; pelo de agua 10.44 m.

Tabla 4. Resultados del cálculo del potencial de erosión.

PERFIL 1										
ESTE	NORTE	ANCHO	PROGR.	AREA	H	VEL.	V 01	H EROS.	V EROS.	EROSION A
(m)	(m)	(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m/s)	
6384816	6404362									
6384848	6404348	35.06	35.06	362.92	10.35	0.41	0.40	7.13	0.59	
6384861	6404344	13.22	48.28	169.22	12.80	0.88	0.40	16.07	0.70	***
6384873	6404340	12.80	61.08	168.38	13.15	0.88	0.40	16.51	0.70	***
6384884	6404338	11.17	72.25	152.01	13.61	0.97	0.40	18.49	0.72	***
6384894	6404336	9.88	82.13	139.80	14.14	1.06	0.40	20.48	0.73	***
6384902	6404335	8.25	90.38	121.65	14.74	1.22	0.40	23.80	0.75	***
6384909	6404335	7.34	97.72	112.76	15.36	1.31	0.40	26.24	0.77	***
6384915	6404335	6.07	103.79	95.66	15.76	1.55	0.40	30.74	0.79	***
6384921	6404335	6.03	109.82	96.09	15.94	1.54	0.40	30.91	0.79	***
6384928	6404335	6.62	116.44	106.04	16.02	1.40	0.40	28.60	0.78	***
6384934	6404334	6.58	123.02	105.29	16.01	1.41	0.40	28.76	0.78	***
6384940	6404334	5.91	128.93	94.65	16.01	1.56	0.40	31.44	0.80	***
6384946	6404333	5.45	134.38	86.91	15.94	1.70	0.40	33.62	0.81	***
6384952	6404332	6.16	140.54	97.66	15.85	1.52	0.40	30.36	0.79	***
6384959	6404331	7.33	147.87	115.32	15.74	1.28	0.40	26.28	0.77	***
6384968	6404330	9.40	157.28	145.11	15.43	1.02	0.40	21.35	0.74	***

CONCLUSIONES

Se analizó la situación morfológica y del flujo en la zona de las obras de defensa en la ciudad de Concepción del Uruguay, notándose que el talweg, que en la zona de los diques esta más próximo a la margen derecha, se va recostando sobre la margen izquierda avanzando hacia aguas abajo, con profundidades que varían entre unos 9 m aguas arriba y unos 8 m aguas abajo.

A los efectos del cálculo del potencial de erosión, se ha dividido a la corriente en tubos que contienen el 5% del caudal total. La velocidad media del agua en estos tubos, en las condiciones extrapoladas del relevamiento, oscila entre 0.4 y 2 m/s.

Se ha analizado el diámetro de partículas de las muestras de fondo obtenidas, encontrándose como representativo un diámetro de 0.17 mm.

El análisis de erosión límite por Rossinsky no muestra inestabilidad en ninguno de los cuatro perfiles analizados sobre la zona de obras para las condiciones actuales, salvo algunas muy ligeras a más de 60 m de la costa (la progresiva 0 de los perfiles coincide con la costa en el día del levantamiento). Resulta muy similar la situación para la permanencia del 30%, o sea que la costa no se afecta para el 70 % de los estados del río. Para la crecida de proyecto, toda la zona estudiada resulta erosionada.

Por otra parte, hasta los 30 m de progresiva, no se presenta erosión en los perfiles P1, P2 y P3, con ninguna fórmula y ninguna de las crecidas contempladas en el análisis. En el perfil P4 comienza a manifestarse erosión, del orden de los 12 m.

Para las progresivas cercanas a 60 m y para todos los niveles analizados comienzan a presentarse erosiones en todos los perfiles, del orden de los 3 a 5 m en P1, de los 6 a 10 m en P2, 7 a 11.50 m en P3 y 12 a 17 m en P4 respectivamente.

LISTA DE SÍMBOLOS

V_e	velocidad en el punto de equilibrio
H_e	tirante de agua en equilibrio
b	ancho del tubo de corriente
V_m	velocidad del tubo de corriente, proviene de las mediciones con perfilador Doppler
H_m	tirante medio del tubo de corriente
V_{01}	velocidad media en el canal experimental de 1 m de tirante que produce erosión para el material de fondo analizado
d	diámetro del sedimento (d)

REFERENCIAS

Chow; V. T. (1994). “*Hidrología aplicada*”. McGraw-Hill. Colombia.

Ercole; C. A. (2000). “Software Guía”. Inédito.

Ercole; C. A. (2004). “Software LC”. Inédito.

Onipchenko G. (2000). “Estudios de la erosión en suelos cohesivos y suelos rocosos”. Moscú, Rusia

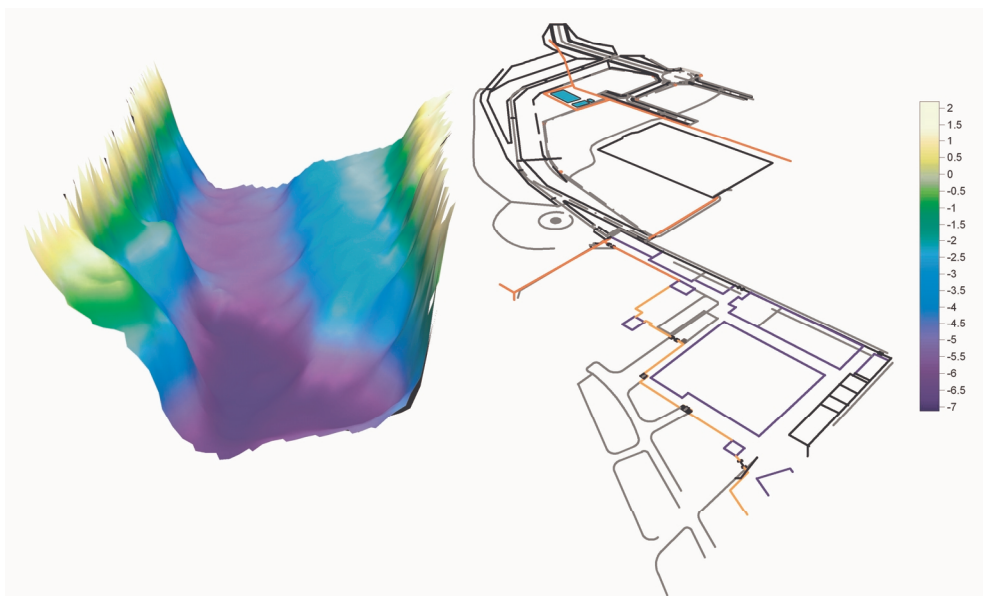


Figura 1. Vista del lecho del Riacho Itapé y zona de obras en estudio.

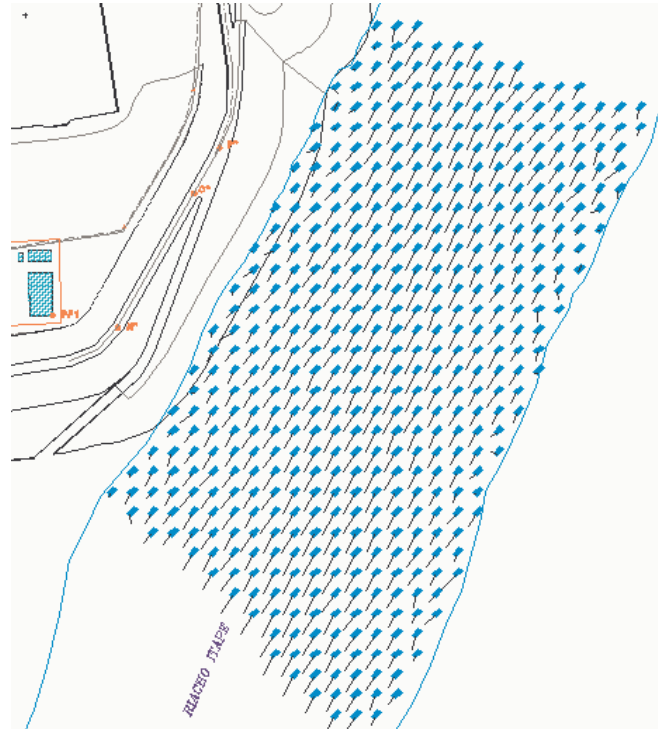


Figura 2. Visualización del campo de velocidades a través de vectores sobre una grilla regular.



Figura 3. Líneas de Corriente y Planta de los Perfiles de Estudio.