

EVALUACIÓN DEL OLEAJE GENERADO POR VIENTO DURANTE CRECIDAS EXTRAORDINARIAS DEL RÍO SALADO (PBA) SOBRE OBRAS DE CRUCE VIAL

Espil Nosa, Francisco H., Beliera, Pablo, Puig, Nicolás y Bianchi, Guillermo J.

Grupo InfoMet, UIDET Hidrología, Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNLP Calle 47 N° 200

francisco.espil@ing.unlp.edu.ar, guillermo.bianchi@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

El río Salado de la provincia de Buenos Aires es un río de llanura modelado por procesos fluviales controlados por una limitada potencia de escurrimiento que, actuando sobre geofomas del paisaje originadas en épocas con intenso eolomorfismo, condiciona la dinámica del transporte sólido, lo que permite explicar la lentitud de los cambios observados en su geometría (Bianchi, 2015). Las crecidas extraordinarias han generado prolongadas inundaciones sobre la planicie que, si bien fueron mitigadas por las obras de canalización, representan situaciones críticas a controlar. La inundación afecta las obras de cruce de infraestructura vial, tanto los terraplenes de aproximación que atraviesan la planicie como los estribos de puentes de potencial compromiso con la continuidad de la conexión.

Una acción de daño provocada por la persistencia de niveles de inundación es el ataque del oleaje generado por viento sobre los taludes de la obra básica e incluso sobre productos de revestimiento que protegen el estribo.

El oleaje generado por viento en aguas fluviales ha sido poco estudiado, con excepción de las aguas de lagos, embalses y estuarios de regular extensión superficial, que suelen generar importantes acciones.

El presente trabajo intenta sistematizar la metodología propuesta, con el fin de perfeccionar criterios de diseño y/o verificación en protecciones fluviales cuando las inundaciones persisten durante largos períodos, propiciando trenes de olas que golpean sobre el terraplén de la infraestructura vial. Se pone atención al ataque en estribos de puentes sobre la planicie que, si bien estarían alejados del cauce principal, son sometidos a oleaje sostenido, provocando la erosión y/o degradación del mismo.

Los desbordes del río causan o producen una gran superficie de agua. Esta situación puede prolongarse durante varios meses, y una de las consecuencias de esto es la generación de oleaje por la acción del viento aplicado sobre esa superficie de agua, dando lugar a un tren de olas, que ataca al talud del estribo.

PARTE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Existen diversas formulaciones que permiten evaluar la necesidad de una protección y eventualmente su dimensión respecto a la erosión por oleaje. Estas dependen directamente de la acción del oleaje o variables asociadas como la altura de ola, en particular de la altura significativa de ola (H_s). Son expresiones inicialmente aplicadas para el oleaje marítimo, no obstante, pueden ser usadas para el oleaje generado por el viento actuando en el espejo de agua. Su expresión simplificada se expresa como:

$$W = f(H_s)$$

Siendo W la dimensión o tamaño de la protección necesaria para resistir la acción, y H_s la altura significativa de ola.

Para determinar dicha altura de ola existen diversas formulaciones que permiten calcularla a partir de los parámetros vinculados a la acción del viento, es decir, la velocidad del viento, y la longitud sobre la cual actúa el viento (llamado Fetch).

$$H_s = f(U, F)$$

Una vez que se analiza la necesidad de protección y su dimensión preliminar, esta debe ser estudiada en detalle con criterios de ingeniería fluvial. No solo teniendo en cuenta la acción del oleaje sino también la erosión originada por la acción de la corriente.

Metodología

1-Determinación del Fetch

Antes de aplicar cualquiera de los métodos existentes, es necesario conocer la distancia horizontal sobre la que actúa el viento, conocida como Longitud del Fetch. Para obtener la misma se procede a utilizar el método de Seville, el cual realiza las siguientes hipótesis:

- 1) El viento transfiere energía a la superficie del agua en la dirección en que sopla el viento y en todas las direcciones dentro de los 45º a cada lado de la dirección seleccionada.
- 2) En la dirección en que sopla, el viento transfiere una cantidad unitaria de energía al agua. A lo largo de cualquier otro rayo transfiere una cantidad reducida al coseno del ángulo formado por el rayo y la dirección en que sopla el viento.
- 3) Las olas son completamente absorbidas en la costa, es decir, no se contemplan efectos de reflexión.

Para llevar a cabo el método, se trazó un rayo en el punto en que pretendemos conocer las características del oleaje y el cual responde a la mayor distancia de generación. A 45º a cada lado de este rayo se trazaron otros equidistantes a 5º. De esta forma se obtuvo la siguiente configuración de rayos:

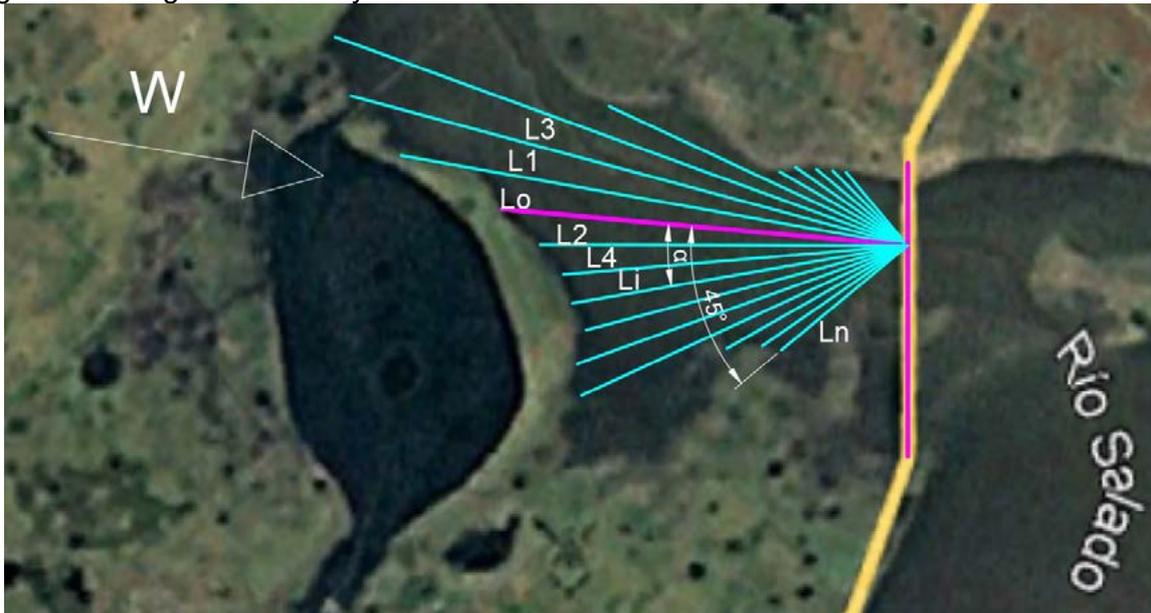


Figura 1 - Trazado de rayos, Río Salado aguas arriba de la RN3 en evento de crecida.

La expresión propuesta por Seville para el cálculo de la longitud del Fetch es:

$$F_{efect} = \frac{\sum_{i=0}^n L_i \cdot \cos^2(\alpha_i)}{\sum_{i=0}^n \cos(\alpha_i)}$$

Siendo L_i la longitud del rayo i y α_i el ángulo formado entre el rayo central L_0 y el rayo L_i , tal como se muestra en la figura representativa.

Aplicando el método se concluyó que el Fetch es: 1.82 km

Tabla 1 Cálculo del Fetch

Ángulo	Rayos aguas arriba		
	cos(i)	u	km pond.
45	0.707	134.1	0.30
40	0.766	126.2	0.39
35	0.819	111.8	0.50
30	0.866	102.4	0.64
25	0.906	175.3	0.76
20	0.940	392.3	1.81
15	0.966	726.0	3.34
10	0.985	686.5	3.48
5	0.996	652.5	3.38
0	1.000	484.9	2.54
5	0.996	437.2	2.27
10	0.985	411.0	2.15
15	0.966	404.8	2.12
20	0.940	395.6	2.07
25	0.906	417.8	2.18
30	0.866	427.5	2.24
35	0.819	248.1	1.30
40	0.766	210.7	1.10
45	0.707	195.6	1.02
Fetch (km)			1.82

2-Determinación de una velocidad de viento de diseño

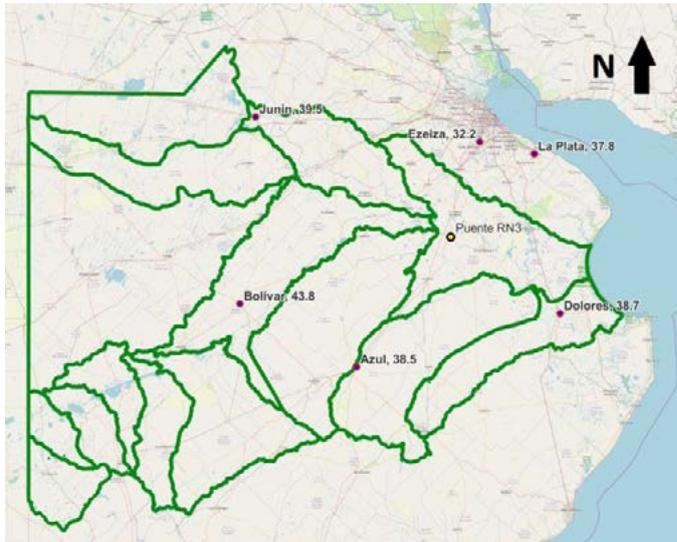


Figura 2 - Ubicación de estaciones meteorológicas

Se procedió a realizar un análisis estadístico de vientos de las estaciones de referencia, en la cuenca del río Salado, Junín Aero, Ezeiza Aero, Azul Aero, La Plata Aero, Bolívar Aero y Dolores Aero

Los datos muestreados fueron valores medios diarios de velocidad de viento desde el año 2007 al 2021.

Se procedió a realizar los ajustes estadísticos por las distribuciones de Gumbel, Pearson III y Log-Normal, para series de excedencia de cada estación y luego se utilizó el método propuesto por Dalrymple (1960) para obtener su interpretación a escala regional.

2.1-Ajustes y regionalización

Se muestra a continuación una tabla resumen de los resultados correspondientes a los ajustes con la distribución de Gumbel:

Tabla 2 - Cálculo de ajuste de Gumbel

Tabla resumen de valores de viento (Gumbel) (km/h)						
Recurrencia	Azul	Bolívar	Dolores	Ezeiza	Junín	La Plata
1.01	33.34	32.81	25.86	24.51	32.51	23.89
2.33	38.68	44.11	39.11	32.41	38.71	38.29
5	41.01	49.04	44.90	35.86	41.42	44.58
10	42.91	53.06	49.61	38.67	43.63	49.71
15	43.99	55.33	52.27	40.26	44.88	52.60
20	44.74	56.92	54.13	41.37	45.75	54.63
25	45.32	58.14	55.57	42.23	46.42	56.19
50	47.10	61.91	59.99	44.86	48.49	61.00

En base a datos de cada estación para una recurrencia dada, se trazaron las curvas isotaquias dentro de la cuenca. En patrón obtenido resultó consistente con los mapas propuestos por la norma de viento del CIRSOC (2005).

Mediante la aplicación de método de Dalrymple (1960) se busca zonificar, a través de los datos de las 6 localidades, el viento de la cuenca del Salado. Lo que se hace es una adimensionalización de la variable, y para lograrlo se toman las leyes de Gumbel de las diferentes localidades y se divide a todas las velocidades por la velocidad correspondiente a la recurrencia $R=2.33$ de dicha localidad (en Gumbel, equivale al valor medio de la muestra). Una vez adimensionalizado el ajuste, se puede realizar un ajuste medio a toda la cuenca. El mismo se consigue haciendo el promedio de las velocidades para las recurrencias de interés. A continuación, se adjunta la adimensionalización del ajuste:

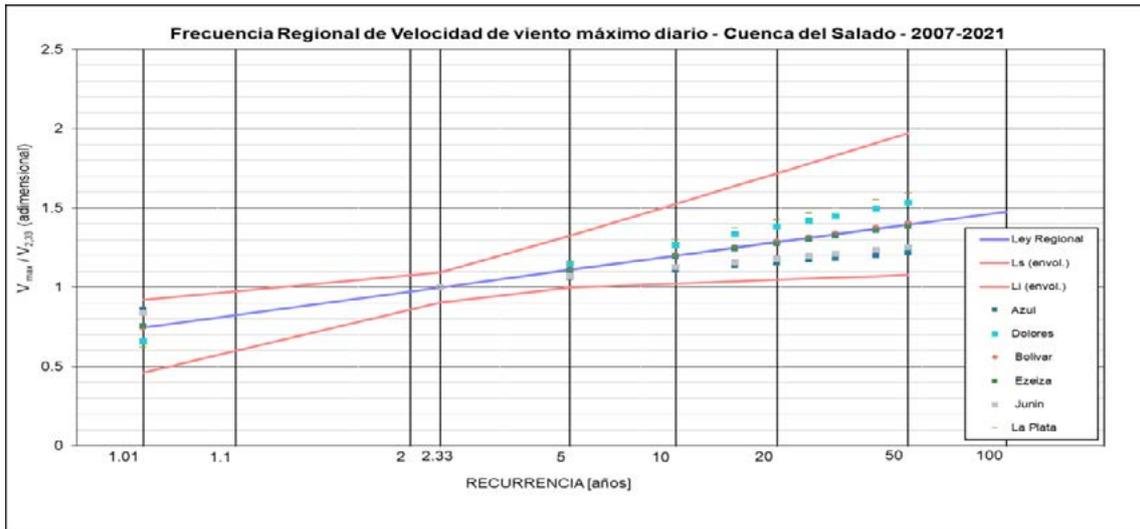


Figura 3 Ajuste regional.

Habiendo realizado la adimensionalización del ajuste y disponiendo de curvas isotaquias, ya estamos en condiciones de conocer el viento en cualquier sector de la cuenca. El procedimiento consiste en obtener, a través de las isotaquias, el viento medio en el sector de interés (el puente de la RN 3 en nuestro caso) y multiplicarlo por el coeficiente adimensional correspondiente a la recurrencia de interés.

Los resultados obtenidos para el puente de la R.N. N°3 se pueden observar en la Tabla 3

3-Métodos de cálculo de altura de ola

3.1. Método de Davis y Sorensen:

Este método relaciona la velocidad del viento y la longitud de Fetch con la altura de ola a través del ábaco que se adjunta a continuación. Por lo tanto, utilizando la velocidad correspondiente a cada recurrencia de cálculo se obtuvieron las alturas de olas para 5, 10, 25 y 50 años.

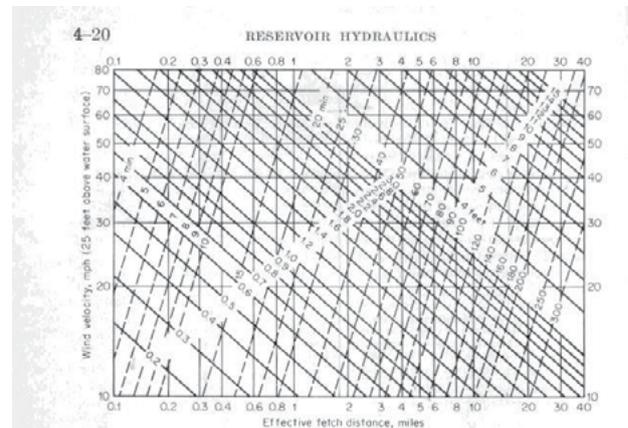


Figura 4 Abaco Davis y Sorensen.

3.2. Método de Wilson:

Este método estima la altura de ola a partir de la velocidad del viento, la aceleración de la gravedad y del Fetch. Para el cálculo de la misma se aplicó la siguiente expresión:

$$\frac{gH_z}{U_{10}^2} = 0,30 \left[1 - \left[1 + 0,004 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{0,5} \right]^{-2} \right]$$

3.3. Método SMB:

El método SMB - (Sverdrup, Munk and Bretschneider) permite realizar una estimación de la altura del oleaje a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{gH_z}{U_{10}^2} = 0,283 \tanh \left(0,0125 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{0,42} \right)$$

$$H_s = 5.112 \cdot 10^{-4} \cdot U_A \cdot (L_F)^{1/2}$$

$$T_p = 6.238 \cdot 10^{-2} \cdot (U_A \cdot L_F)^{1/3}$$

$$t_{min} = 3.215 \cdot 10 \cdot \left[\frac{L_F^2}{U_A} \right]^{1/3}$$

$$U_A = 0.71 \cdot [V_{v,10 \min}(10)]^{1.23}$$

3.4. Método SMP:

Este método es una modificación del método SMB, el mismo utiliza la siguiente expresión para el cálculo de la altura del oleaje:

A continuación, se adjunta una tabla resumen de las velocidades de vientos y los resultados obtenidos para los diferentes métodos:

Tabla 3 – Velocidades de viento y resultados del cálculo de altura de ola

Recurrencia Años	W km/h	W mph	Davis y Sorensen	Metodo Wilson	SMB	SPM
			Hs (m)	Hs (m)	Hs (m)	Hs (m)
5	42.4	26.4	0.35	0.36	0.38	0.32
10	45.8	28.5	0.40	0.39	0.42	0.35
25	50.2	31.2	0.43	0.43	0.47	0.40
50	53.4	33.2	0.46	0.46	0.50	0.43

4- Aplicación al diseño de protecciones

Para estimar la necesidad y dimensión de las protecciones se realizó cálculo de las mismas por acción del oleaje y posteriormente una verificación por acción de la corriente, a su vez, los cálculos se realizaron para recurrencias de 25 y 50 años:

Para el cálculo de las protecciones contra la acción del oleaje se procede a utilizar la expresión de Hudson, la cual es aplicable a oleaje generado por viento actuando en un espejo de agua.

$$W \text{ (tn)} = \frac{\gamma_s \left[\frac{\text{tn}}{\text{m}^3} \right] \times H_s \text{ (m)}^3}{K_d \times \Delta^3 \times \cotg \theta}$$

Donde:

- W: Peso del elemento o capa. (tn)
- γ_s : peso específico del material. (tn/m³)
- Hs: Altura de ola significativa de diseño. (m)
- Kd: coeficiente de forma del elemento.
- θ : Angulo del talud

$$\Delta = \frac{\gamma_s \left[\frac{\text{tn}}{\text{m}^3} \right]}{\gamma_w \left[\frac{\text{tn}}{\text{m}^3} \right]} - 1$$

Dimensión del enrocado:

$$d = C_f * \left(\frac{6 * G_s}{\pi * \gamma_s} \right)^{(1/3)}$$

Siendo:

- Gs= Peso de la roca (kgf)
- γ = peso específico de la roca (kgf/m³)
- d= Diámetro de la roca (m)
- Cf: Coeficiente de forma.

Aplicando las fórmulas se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4 – Resultados de diseño de protecciones.

Tr (años)	W (kg)	d (m)
25	7.56	0.14
50	6.17	0.15

Como se explicó anteriormente, dicha protección fue calculada para la acción del oleaje, por lo tanto, a continuación, se verificará la misma contra la acción de la corriente.

5-Verificación contra la acción de la corriente:

El método de Pilarczyk nos permite calcular la dimensión o tamaño de la protección necesaria para resistir la acción de la corriente a partir de la siguiente expresión:

$$D_n = \frac{\varphi_c * K_t * K_n}{\Delta m * K_s} * \frac{0.035}{\theta_c} * \frac{U^2}{2g}$$

Donde:

- φ_c : factor de estabilidad
- KT: factor de turbulencia
- Kn= factor de corrección por perfiles de velocidades.
- $\Delta m = (\gamma_s - \gamma_d) / \gamma$.

- $K_s = (1 - (\text{sen} 2 \alpha / \text{sen} 2 \theta)) 0.5$
- α = ángulo del talud con la horizontal
- θ = ángulo de reposo del material.
- θ_c = parámetro de Shields crítico.
- U = velocidad media en la vertical

Realizando los cálculos con las velocidades obtenidas del modelo unidimensional, 1,5 m/s, se obtiene un diámetro d50 de 1cm, el cual es muy pequeño en comparación con el diámetro de protección obtenido por oleaje. Para demostrar en forma más clara como la acción del oleaje representa condiciones de alta severidad que condiciona el diseño de la protección, se procede a calcular la acción de la corriente equivalente a la acción del oleaje utilizada anteriormente. Este resultado obtenido surge de despejar la velocidad de la corriente necesaria para obtener un d50 igual al obtenido debido a la acción del oleaje.

Se presentan en la Tabla 5 los resultados obtenidos:

Como se puede apreciar, para obtener una acción de la corriente equivalente a la del oleaje se requiere de una velocidad de 5.2 m/s, la cual es mayor a 3 veces la estimada para una recurrencia de 50 años (Espil Nosa, 2021).

Tabla 5 - Cálculo de Velocidad equivalente

ϕ_c	0.75
KT	1.0
h (m)	8.5
Dn (m)	0.15
Kn	0.1
talud	2.5
α (rad)	0.4
α (°)	21.8
θ (rad)	0.5
θ (°)	30
Ks	0.7
γ_s (t/m ³)	2.40
γ (t/m ³)	1.00
Δm	1.40
θ_c	0.04
U (m/s)	5.2
U ²	26.8
g (m/s ²)	9.81
Variación Dn	0.00
Dn (m)	0.15

CONCLUSIONES

Se ha logrado consolidar una serie representativa de las velocidades de viento en la región de la provincia de Buenos Aires, y con ella actualizar ajustes estadísticos definiendo velocidades de viento en función de periodos de retorno. Sistematizando las aproximaciones antecedentes (ESPIL NOSA, 2021). Alcanzando valores similares a los comúnmente aceptados en el ámbito ingenieril (CIRSOC, 2005).

Los ajustes resultaron aceptables respecto a las pruebas que se le aplicaron (test de chi-cuadrado e intervalos de confianza), por lo que se considera que el trabajo es una estimación que representa la realidad sin errores groseros en cuanto a los valores de velocidad de viento que se adoptan.

Se encontraron preliminarmente, valores de altura de ola del orden de 0,30-0,50 metros asociados a la ocurrencia de viento para recurrencias entre 10 y 25 años.

Se puede concluir que la solicitación debida al oleaje generado por la acción del viento sobre la superficie de agua originada por una crecida puede ser igual o incluso mayor a la acción de la corriente. Tal como se mostró en los primeros estudios realizados.

El alcance de esta investigación resulta aplicable a nivel de anteproyecto, siendo una evolución del tema inicialmente planteado en las investigaciones desarrolladas en el trabajo final de Espil Nosa (2021) quedando abierta la línea para seguir profundizando sobre esta problemática.

BIBLIOGRAFÍA

- Belliera, P. y Puig, N., 2022, *Informe final de PPS, 1ra parte*, realizado con el grupo InfoMet, Carrera de Ingeniería Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNLP.
- Bianchi, G., 2015. *Avances del programa de investigaciones – estudios sobre la evolución morfológica del cauce del río Salado. Primeras observaciones y consideraciones*, Terceras Jornadas de Investigación y Transferencia, 1a ed. - La Plata, UNLP, Abril de 2015.
- Espil Nosa, F.H., 2021. *Estudios hidráulicos fluviales en el río Salado: puente sobre ruta nacional N°3 y evaluación de los tramos adyacentes readecuados*, Cátedra de Proyecto Final, Facultad de ingeniería, UNLP, agosto de 2021.
- CIRSOC, 2005. *Reglamento Argentino de acción del viento sobre las construcciones, CIRSOC 102*, www.inti.gov.ar/cirsoc
- Dalrymple, T., 1960. *Flood-frequency analyses, manual of hydrology: part 3*. Water Supply Paper 1543-A, Washington, DC: USGPO. <https://doi.org/10.3133/wsp1543A>