



Quinto
Congreso Nacional
de Riego y Drenaje
COMEII-AURPAES 2019

Septiembre 2019 | Mazatlán, Sinaloa



AURPAES, S.C.
Asociación Mexicana de Ingenieros y Tecnólogos del Agua

Artículo: COMEII-19012

Mazatlán, Sin., del 18 al 20
de septiembre de 2019

GABBIONI: UNA HERRAMIENTA PARA EL DISEÑO DE PRESAS DE GAVIONES

Eduardo Jiménez Hernández^{1*}; Yessica A. Gómez-Pérez²; Mauricio Carrillo-García²

¹Soluciones en Ingeniería y Tecnologías del Agua, S.A. de C.V. Texcoco, Estado de México.

eduardo.jimenez.eng@gmail.com (*Autor de correspondencia).

²Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 carretera México-Texcoco, Edo. de México C.P. 56230

Resumen

Las presas de gaviones se construyen con la finalidad de reducir la erosión hídrica y controlar los escurrimientos superficiales. Su diseño comúnmente se realiza utilizando programas de hojas de cálculo, sistemas de información geográfica y dibujo asistido por computadora; cuya interacción puede resultar en un proceso largo y propenso a errores, principalmente cuando es necesario diseñar una gran cantidad de presas. En este trabajo, se desarrolló un programa para automatizar el diseño y análisis de pequeñas presas de gaviones llamado “Gabbioni”. El programa se compone de una interfaz gráfica en la que se introducen los datos y se realiza el dibujo de la presa; y de una librería de funciones en la que se codificó el método para diseñar presas de gaviones propuesto por López Martínez & Oropeza Mota. Es una herramienta que ayuda a diseñar presas de gaviones de una forma precisa, rápida y confiable. Comparando con métodos tradicionales, tiene la ventaja de reducir del tiempo requerido para el dibujo de los planos y reducir la incidencia de errores debidos a descuidos del diseñador.

Palabras clave: conservación de suelos, erosión hídrica, control de erosión, software libre.

Introducción

La degradación de los suelos es un fenómeno mundial que puede afectar a la productividad agrícola y reducir la disponibilidad y calidad del agua. Una de las principales causas de la degradación de suelos en México es la erosión hídrica, originada principalmente por las actividades agrícolas, el sobrepastoreo y la deforestación. Semarnat (2016) estima que alrededor del 12% del territorio nacional presenta erosión hídrica; de la cual, más del 40% se encuentra clasificada entre moderada y extrema. También se menciona que la erosión hídrica potencial podría afectar hasta el 42% de la superficie nacional con tasas altas y muy altas, que representan una pérdida de suelo entre 10 y 200 t ha⁻¹ año⁻¹.

Diversos trabajos sustentan la efectividad de las presas pequeñas en la reducción de la erosión hídrica, demostrando que la instalación de estas presas produce efectos positivos en la estabilización de los cauces, los tramos aguas arriba de las presas se vuelven más planos y más anchos, lo que reduce la capacidad de transporte de sedimentos y previene la erosión (Liu, 1992).

Las presas filtrantes de material vegetativo, de piedra acomodada o de gaviones; han sido una de las estrategias más comunes para controlar el transporte de sedimentos en áreas propensas a erosión. Las presas como las mostradas en la **Figura 1**, se utilizan de manera extensiva para el control de la erosión del suelo y los escurrimientos superficiales.



Figura 1. Aspecto de una presa de gaviones construida con fines de conservación de suelo y agua (Cortesía SITEA S.A. de C.V.).

Los gaviones son cajas (o cestos) rectangulares de alambre llenados con piedras, de tamaño relativamente pequeño, o tierra (Herrmann & Bucksch, 2014). Las mallas de alambre que forman el gavión presentan la forma de un hexágono entrelazado con triple torsión. El alambre es de acero galvanizado y su diámetro varía típicamente entre 2.5 y 3.0 mm y presenta un tratamiento de anticorrosión basado en una aleación de Zn-Al. El tamaño estándar de una caja de gavión es de 0.5 m x 1.0 m x 2.0 m.

Para construir una presa, los gaviones se llenan con piedra, misma que debe estar limpia y no mostrar ningún signo de intemperismo, además durante su vida de servicio estará expuesta al agua por lo que no debe desintegrarse. Se debe escoger piedra uniforme y con ángulos, para que se pueda entrelazar, y deberá tener un peso específico de al



menos 2.4 t/m^3 (Grimaldi, Vezza, Angeluccetti, Coviello, & Koussoubé Kô, 2015; Yang, Liu, Xu, & Huang, 2009).

Las principales ventajas de las estructuras de gaviones son su flexibilidad, fuerza y resistencia, su larga vida de servicio, su permeabilidad, sus altas propiedades ecológicas y su economía (Shevchenko, 1996; Yang, Liu, Xu, & Huang, 2009; López Martínez & Oropeza Mota, 2009).

Antes de construir las obras, es importante contar con un diseño apropiado de las mismas, con tal de entender mejor y evaluar sus condiciones de seguridad, especialmente su posible y eventual destrucción y sus efectos en la modificación del cauce (Hsieh, Luo, Yang, & Chen, 2013). López Martínez & Oropeza Mota, (2009) resumen la metodología de diseño de este tipo de presas, considerando una serie de cálculos hidrológicos y de estabilidad, propios de cualquier estructura ingenieril.

Algunas empresas privadas distribuyen programas especializados para el diseño y análisis de presas y muros de contención de gaviones, como *Presas* (LEMAC, 2019), *GawacWin* y *MACRA 2* (MACCAFERRI, 2019), mismos que se pueden descargar previo registro gratuito. Sin embargo, estos programas se limitan al uso de los productos que comercializan dichas empresas y su antigüedad dificulta su ejecución en computadoras con sistemas operativos modernos, puesto que presentan problemas de compatibilidad. Debido a la carencia de un programa especializado y moderno, el diseño de presas de gaviones se realiza con el uso de programas de cómputo como hojas de cálculo y de dibujo asistido por computadora (CAD por sus siglas en inglés). Lo cual resulta ser un procedimiento largo y propenso a errores de cálculo.

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar una herramienta de cómputo para el diseño de presas de gaviones, que ayude a automatizar los cálculos requeridos, así como a generar los reportes y planos correspondientes.

Materiales y Métodos

Plataforma de desarrollo

Los algoritmos necesarios se codificaron en el lenguaje de programación C++ Standard 2011 y se conjuntaron en una librería de funciones de cálculo. Para facilitar el uso de estas funciones, se desarrolló una interfaz gráfica de usuario usando las librerías gráficas Qt 5.9 LTS, los sistemas operativos de desarrollo y las pruebas incluyen Windows 10, macOS 10.12 y Linux 4.4 en arquitecturas de 32 y 64 bits. El código de algoritmos se conjuntó en un programa de cómputo denominado *Gabbioni*.

Para codificar el sistema *Gabbioni* se utilizó el paradigma de programación orientada a objetos. Además, con la finalidad de mejorar el programa de manera continua y evitar su obsolescencia, se eligió un modelo de desarrollo abierto (Open Source) y el código fuente se liberó con la licencia de *software libre* General Public License (GPL) v2. El código fuente del programa se encuentran hospedado en el sitio web del proyecto <http://www.irriapps.com/gabbioni>. En este sitio se pueden encontrar versiones compiladas para Windows y macOS, manuales y ayuda del programa, los cuales se pueden descargar de manera libre y gratuita.



Descripción del método de diseño de una presa de gaviones

Mediante el uso de modelos computacionales, diversos autores (Khatibi, Salmasi, Ghorbani, & Asadi, (2014); Reeve, Zuhaira, & Karunarathna, (2019)) han demostrado, que el uso de estructuras escalonadas construidas con gaviones son eficientes para disipar la energía del agua, especialmente aquellas que tienen escalones hacia aguas abajo. En una presa ubicada en un cauce natural, esto podría significar una reducción del impacto negativo causado por la erosión hídrica y la socavación. Es por ello que en este trabajo se decidió codificar un método para diseñar estructuras de estas características.

Los principales algoritmos que componen el sistema *Gabbioni* se basan en gran parte en la metodología de diseño de presas de gaviones propuesta por López Martínez & Oropeza Mota, (2009). Los cuales son: a) estimación del caudal de diseño o escurrimiento máximo del cauce, b) el diseño del vertedor rectangular de cresta gruesa y c) el análisis de estabilidad para condiciones de posibles deslizamientos y volcamiento de la presa. Además, para la creación automática de las dimensiones de la presa, se utilizó un conjunto de reglas empíricas, obtenidas a partir de condiciones lógicas, similares a las de un sistema experto.

Gasto de diseño

De acuerdo con esta metodología, es necesario conocer el escurrimiento máximo que pasa por el sitio de la presa o caudal de diseño. Este caudal puede estimarse mediante el método racional o el método simplificado de las huellas máximas o método de área-velocidad.

El método racional comúnmente se aplica para la estimación del escurrimiento pico de eventos de lluvia que ocurren en cuencas pequeñas, que tienen condiciones de uso de suelo relativamente uniformes. Este método estima el caudal pico del escurrimiento de un evento de lluvia utilizando el coeficiente de escurrimiento, la intensidad de la lluvia, y el área de la cuenca. En este trabajo, se estimó el coeficiente de escurrimiento utilizando la norma mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, (Poder Ejecutivo - SEMARNAT, 2015).

El método simplificado de la huella máxima, también conocido como el método de área-velocidad, tiene la ventaja de no requerir datos de precipitación y se recomienda en cárcavas donde se observe claramente las huellas dejadas por los escurrimientos máximos que se hayan presentado. También se puede aplicar en los casos donde se conozca la altura del caudal que pasa por el lugar donde se pretende construir la presa. El método parte de la ecuación (1):

$$Q = A_h \cdot v \quad (1)$$

donde Q es el gasto máximo de diseño ($m^3 s^{-1}$); A_h es el área hidráulica del cauce (m^2); y v es la velocidad del escurrimiento ($m s^{-1}$), que se estima con la ecuación de Manning.



Dimensiones del vertedor

En función del escurrimiento superficial calculado, se dimensiona el vertedor. En estructuras de gaviones es común la utilización de vertedores rectangulares de cresta gruesa, cuyas dimensiones se calculan mediante la ecuación (2):

$$H_v = \left[\frac{Q}{C \cdot L} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

donde, H_v es la carga o altura del agua sobre el vertedor (m); Q es el gasto de diseño ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); C es el coeficiente del vertedor; y L es la longitud del vertedor (m).

Dimensiones del cuerpo de la presa

La creación de las dimensiones de la presa se realiza mediante un conjunto de reglas predefinidas en las funciones del software. El programa *Gabbioni* puede asistir en el dimensionamiento de presas de gaviones mediante un conjunto de reglas lógicas simples.

El cuerpo de una presa de gaviones consiste en tendidos o capas de gaviones rellenos de piedra acomodada. Estos tendidos se colocan en forma transversal a la sección del cauce. Las dimensiones de cada tendido (largo, ancho y altura) se definen de acuerdo a su colocación en el cauce. Visto desde la parte frontal de la presa desde aguas abajo del sitio; el ancho del tendido corresponde al ancho del cauce y se mide de forma transversal al escurrimiento del agua, de la margen izquierda hacia la derecha; el largo es la longitud que se mide desde la parte trasera de la presa hacia el frente; y la altura se mide desde la parte inferior hacia arriba.

El primer tendido, llamado base, generalmente se coloca enterrado en el fondo del cauce. Cada uno de los tendidos se empotra en ambos márgenes del cauce, esto consiste en hacer una excavación para introducir los gaviones lateralmente hacia el interior de las márgenes del cauce. La longitud de los empotramientos tiene relación directa al tipo de suelo, al escurrimiento estimado y al tamaño de la presa.

Las dimensiones de los tendidos, particularmente su altura, se debe determinar considerando las dimensiones de gaviones rectangulares que se encuentren disponibles en el mercado. El ancho de cada tendido es la suma del ancho del cauce y la longitud de los empotramientos en ambos lados. Para el largo de los tendidos, se utiliza un valor que formará un escalón en la parte frontal del cuerpo de la presa. Se recomienda que el tendido de la base sea más largo que los demás, o bien, construir una estructura de disipación de energía, para amortiguar el impacto de la caída del agua y de esta manera, reducir la erosión del cauce y evitar la socavación de la estructura.

Análisis de estabilidad

López Martínez & Oropeza Mota (2009) señalan que el cálculo estructural de una presa de gaviones se realiza sobre una sección crítica unitaria, es decir, un muro de ancho unitario (a) que se encuentra por debajo del vertedor de la presa, como se muestra en el perfil de la **Figura 2**. La ubicación exacta de la sección crítica unitaria se realiza mediante el cálculo del centro de gravedad del cuerpo de la presa.

El análisis de estabilidad que proponen estos autores para el diseño de presas de gaviones considera los siguientes supuestos: i) aunque la presa es filtrante, se genera empuje hidrostático debido a la cantidad de agua con sedimentos que se almacena en el vaso de la presa; ii) el cálculo del empuje hidrostático considera desde la superficie libre del agua que pasa por el vertedor hasta el fondo del cauce; y iii) no se genera subpresión en la base de la presa debido a que el agua se filtra por el cuerpo de la misma.

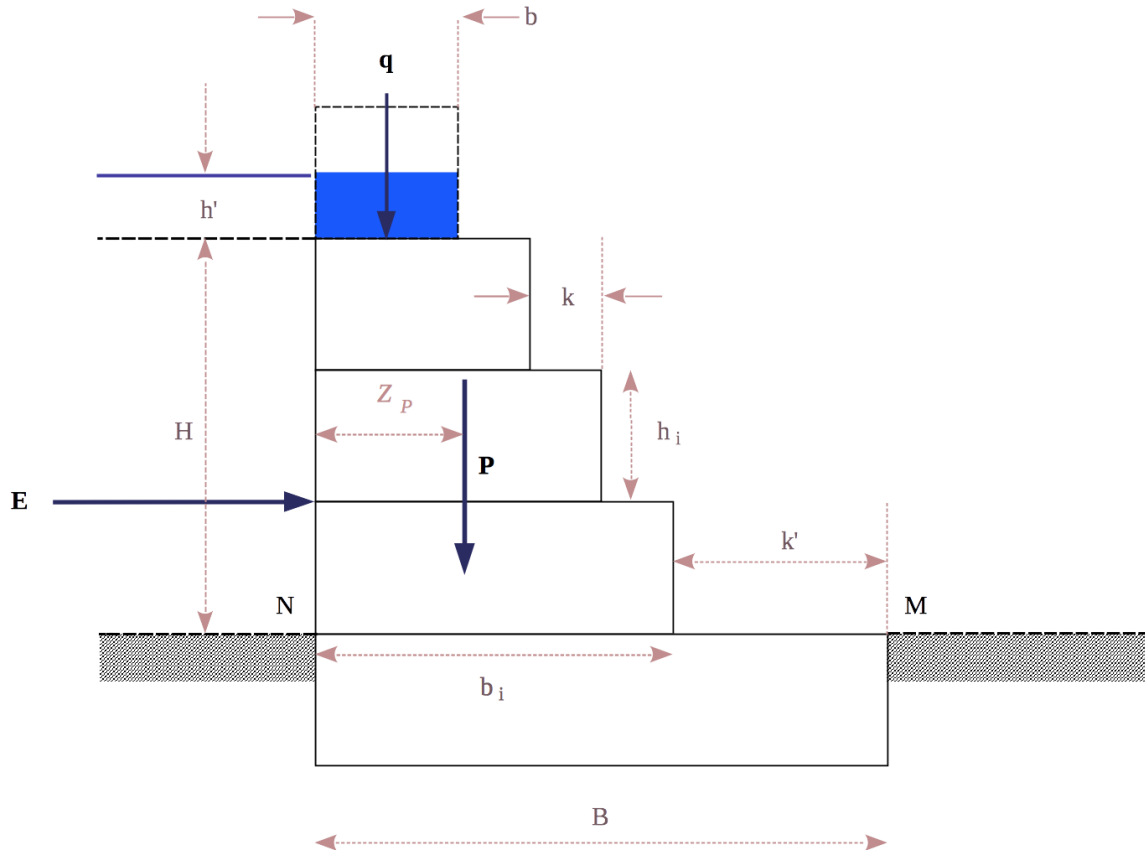


Figura 2. Vista lateral de una presa de gaviones, que muestra los elementos y dimensiones de su sección crítica unitaria, y las fuerzas que actúan sobre la misma; donde H es la altura de la presa (m), h' es la altura de la carga sobre la cresta vertedora (m), hi la altura del tendido i de la presa (m), B la longitud de la base de la presa (m), b la longitud de la corona de la presa (m), k es la longitud constante del escalón (m), k' es la longitud del colchón amortiguador (m), bi es la longitud del tendido i (m), q es el peso de la lámina de agua vertiente (t), P es el peso total de la sección crítica unitaria de la presa (t), ZP el brazo de palanca del peso de la presa (m) respecto al punto N, E es el empuje hidrostático del agua con sedimentos (t), N y M son puntos de referencia aguas arriba y aguas abajo de la presa respectivamente (López Martínez & Oropeza Mota, 2009).

Se considera que una presa de gaviones es estable si cumple con las siguientes condiciones:

$$\frac{(q + P)\mu}{E} \geq FS_d \quad (3)$$

$$\frac{P \cdot (X_P) + q(X_q)}{E \cdot (X_E)} \geq FS_v \quad (4)$$

$$q \cdot (X_q) + P \cdot (Z_P) + E \cdot (X_E) \leq \frac{2}{3}(q + P)B \quad (5)$$

La expresión (3), se conoce como condición de deslizamiento y establece que: el peso del cuerpo de la presa (P) y el peso de la lámina de agua vertiente (q), multiplicados por un coeficiente de fricción para la roca de la que se construye la presa (μ), debe ser mayor o igual al empuje hidrostático del agua con sedimentos (E) multiplicado por un factor de seguridad al deslizamiento (FS_d), que generalmente es mayor a uno ($FS_d \geq 1$).

La condición de volcamiento, ecuación (4), establece que: la relación de la suma de momentos generados por el peso de la presa (P) por su brazo de palanca (X_P) y el peso de la lámina de agua vertiente (q) por su respectivo brazo (X_q), entre el momento generado por el empuje hidrostático (E) y su brazo de palanca (X_E) debe ser mayor a un factor de seguridad al volcamiento (FS_v), que generalmente es mayor a uno ($FS_v \geq 1$).

Finalmente, la condición de núcleo central establece que para que exista estabilidad, la fuerza resultante de la acción conjunta de todas las fuerzas que actúan sobre la presa, debe estar en el tercio medio de la longitud de la base. Esto se expresa en la ecuación (5).

El peso del agua que pasa por el vertedor (q), de manera teórica, es la lámina formada por el ancho del vertedor (a), la longitud de la corona de la presa (b) y la carga sobre la cresta vertedora. Esto se expresa con la ecuación (6):

$$q = a \cdot h' \cdot b \cdot \omega \quad (6)$$

donde ω es el peso específico del agua con sedimentos ($t \cdot m^{-3}$); y las demás variables se definieron en la nomenclatura de la **Figura 2**. Este peso actúa sobre el brazo de palanca $X_q = b/2$, con respecto al punto N . Para calcular el peso de la sección crítica unitaria (P), se hace el cálculo de su volumen con la ecuación (7).

$$V = \sum_{i=1}^n (a_i \cdot h_i \cdot b_i) \quad (7)$$

donde V es el volumen de la sección crítica unitaria, n es el número de tendidos de la presa y las demás variables se definieron en la nomenclatura de la **Figura 2**. El peso específico aparente (δ_a), se calcula como la diferencia que hay entre el peso específico de la roca con la que se construye la presa (δ) y el peso específico del agua con sedimentos (ω). Como se muestra en la ecuación (8):

$$\delta_a = \delta - \omega \quad (8)$$

donde δ_a es el peso específico aparente ($t \cdot m^{-3}$). Una vez que se ha obtenido el volumen y el peso específico, se puede obtener el peso de la sección crítica unitaria (P) con la ecuación (9):

$$P = V \cdot \delta_a \quad (9)$$

donde P es el peso total de la sección crítica unitaria (t) y V es volumen de la sección crítica unitaria (m^3). El peso de la presa actúa sobre un brazo de palanca (X_P) con respecto al punto M , mismo que se puede encontrar utilizando la ecuación (10):

$$X_P = B - Z_P \quad (10)$$

donde el valor complementario (Z_P) es el brazo de palanca del peso de la presa respecto al punto N , se obtiene con la ecuación (11):

$$Z_P = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(h_i \cdot b_i) b_i}{2}}{V} \quad (11)$$

donde todas las variables se definieron en la nomenclatura de la **Figura 2**. El empuje hidrostático (E) que ejerce el agua con sedimentos sobre la estructura se calcula con la ecuación (12). Esta ecuación es una simplificación, que asume el cálculo del volumen de presiones de un paralelepípedo de base triangular y de altura unitaria:

$$E = S_m \cdot h \cdot \omega \quad (12)$$

donde S_m es la superficie de mojado de la sección crítica unitaria (m^2); h es el centro de gravedad de la superficie de mojado (m). La superficie de mojado de la sección crítica unitaria se obtiene con la ecuación (13), dado que el ancho es unitario, la superficie de mojado tiene el mismo valor que la altura efectiva de la presa (H):

$$S_m = H \cdot a \quad (13)$$

El centro de gravedad del volumen de presiones se encuentra a la mitad de la altura efectiva de la presa $h = H/2$ y la presión hidrostática es una fuerza que actúa a un tercio de la base de la altura efectiva de la presa $X_E = H/3$.

Resultados y Discusión

Al codificar la metodología de diseño de presas de gaviones, en el lenguaje C++, se obtuvo como producto final un sistema de cómputo llamado *Gabbioni*. Debido al paradigma de programación orientada a objetos utilizado, el código del programa se integra de clases que representan las diferentes partes físicas de una presa de gaviones, las cuales tienen ciertas propiedades y sobre las que se pueden realizar ciertas operaciones.

En la **Figura 3** se muestra un diagrama de paquetes que representa la manera en la que se agrupa el código. Se puede apreciar que se tienen cuatro agrupaciones generales o paquetes: 1) entrada de datos, 2) diseño, 3) reporte y 4) interfaz. La metodología se codificó en el paquete *diseño*, mientras que los otros tres ayudan a manejar los datos de entrada, a mostrar y generar reportes con los resultados, y a facilitar al usuario, la interacción con el programa. La clase principal se llama *GabionDam* la cual representa a una presa de gaviones. Esta clase hereda características de otras llamadas *Weir*, *ChannelSection* y *OropezaAnalsys*, las dos primeras representan a un vertedor y una sección de cauce, respectivamente. La clase *OropezaAnalysis* es un objeto abstracto que se utiliza para el análisis de estabilidad una vez que las dimensiones de la presa se han definido. La clase *Layer* representa un tendido de gaviones y es el elemento básico del

que se conforma una presa de este tipo. Dicha clase tiene como propiedades sus dimensiones (largo, ancho, altura) y coordenadas. La clase *hydrology* es una clase externa en el sentido que no representa a un elemento de una presa de gaviones, sino que representa a su cuenca tributaria y contiene algunas operaciones hidrológicas para estimar el flujo de agua que escurre por el cauce.

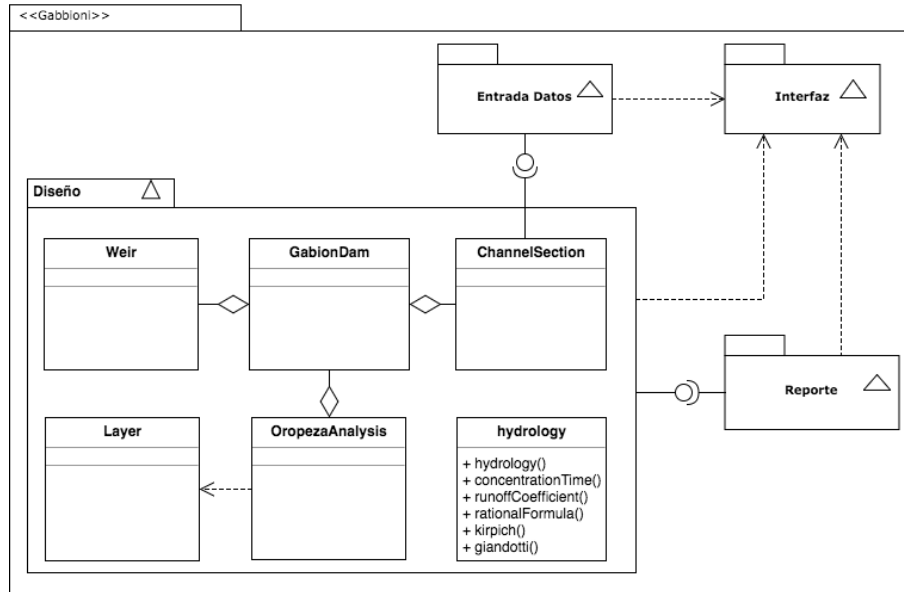


Figura 3. Diagrama de paquetes del programa Gabbioni.

El procedimiento para diseñar una presa con *Gabbioni* inicia con la introducción de los datos de la sección transversal del cauce, para ello se utilizan las ventanas de diálogo de la

Figura 4 en donde se introduce el ancho y la profundidad de la sección del cauce. Las propiedades de la clase *ChannelSection* toman valores una vez que se introducen los datos y se inicia el diseño de una presa. Seguidamente se introduce el gasto de diseño, si este dato es desconocido entonces puede estimar con el *método racional*, codificado en la clase *hydrology*, o con el *método de área-velocidad* el cual se encuentra en la clase *ChannelSection*, para lo cual se utiliza la ventana de diálogo mostrada en la **Figura 5**. Se diseña un vertedor rectangular de cresta gruesa para la obra de excedencias utilizando las propiedades y métodos de la clase *Weir*, como se puede apreciar en la **Figura 6**. Enseguida se crean las dimensiones de los tendidos de la presa de gaviones con los métodos en el objeto *GabionDam* utilizando todos los valores calculados hasta el momento. Posteriormente, se toman las dimensiones de la presa del objeto *GabionDam* para realizar un análisis de estabilidad de acuerdo con el método codificado en la clase *OropezaAnalysis*, lo cual se muestra en la **Figura 6**. Cabe mencionar que el análisis de estabilidad se encuentra en una clase externa que únicamente toma las medidas de la presa sin modificarlas, con este diseño modular se tiene la posibilidad de integrar en el futuro otras metodologías de análisis de estabilidad, de manera que el usuario pueda escoger entre las disponibles.

El paquete de *Interfaz* permite visualizar el proceso de diseño mediante representaciones gráficas que el programa muestra en su ventana principal. También se permite la entrada de datos, la selección de diversas opciones de diseño y la asignación de valores a criterio del usuario, mediante ventanas de diálogo específicas para cada operación. El programa también cuenta con opciones para manipular los gráficos, tales como acercar, alejar y mover las vistas. Además, se incluye una herramienta para manipular de forma manual las dimensiones de los tendidos de la presa, sin embargo, se recomienda mantener las dimensiones que el programa proporcione en los resultados.

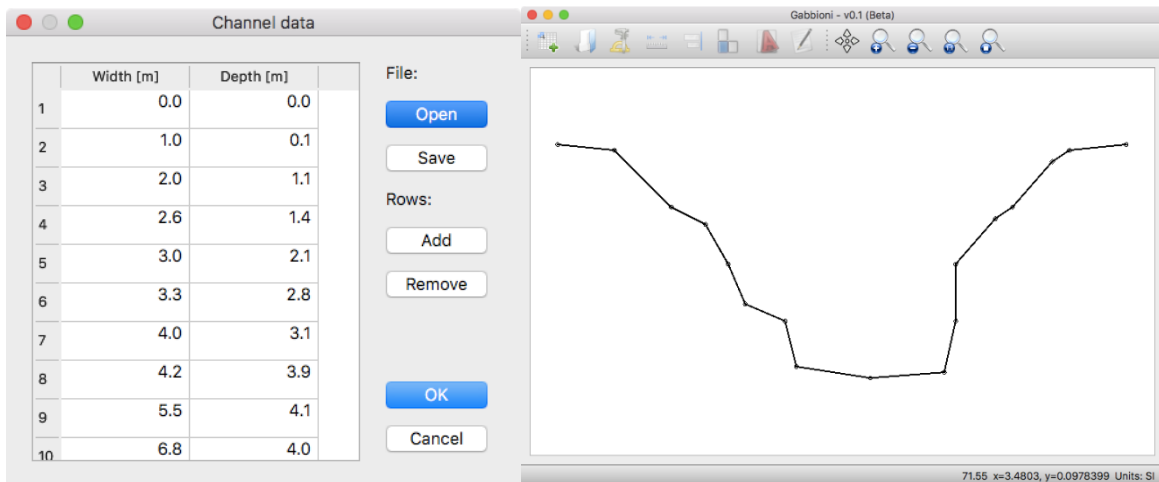


Figura 4. Entrada de datos del programa *Gabbioni*, a la izquierda se presentan las coordenadas (x,y) del ancho y profundidad de una sección del cauce, y a la derecha se muestra una representación gráfica.

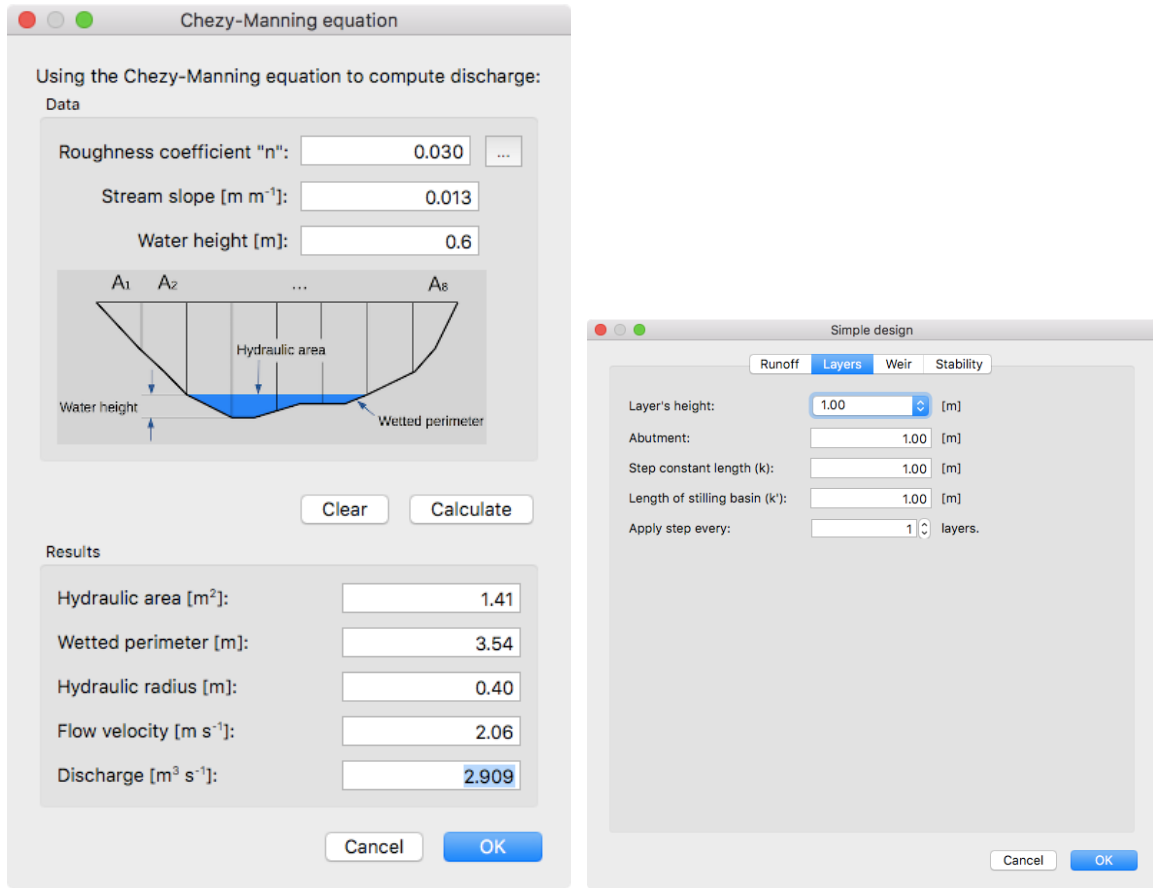


Figura 5. Estimación del caudal de diseño con el método de área-velocidad (izquierda) y configuración de los tendidos de la presa (derecha).

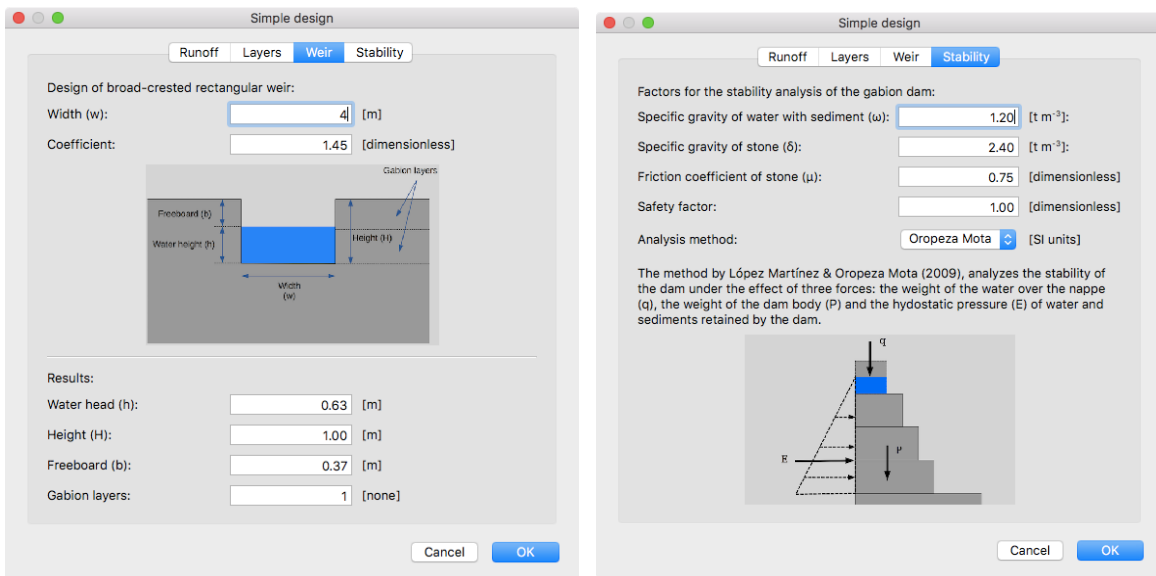


Figura 6. Diseño del vertedor rectangular de cresta gruesa (izquierda) y configuración de parámetros para el análisis de estabilidad de la presa de gaviones (derecha).



Finalmente, mediante el código que se agrupa en el paquete de *Reporte*, se le permite al usuario crear reportes de los resultados del diseño de la presa de gaviones en formato de texto plano delimitado por comas, y exportar los planos en formato DXF, el cual es compatible con programas comerciales de diseño asistido por computadora. Un ejemplo de los resultados proporcionados por el programa *Gabbioni*, se muestran en la **Figura 7** donde se observan las representaciones gráficas de los tendidos de la presa, en el panel lateral del programa se muestra un resumen de los datos utilizados y los principales resultados del diseño.

Pruebas y evaluación

El funcionamiento del programa *Gabbioni* se puso a prueba utilizando secciones transversales de cauces obtenidos con datos de otros proyectos y valores numéricos sin sentido físico para poner a prueba la robustez del código. Los casos especiales, codificados en las funciones de dimensionamiento de los tendidos de la presa, probaron utilizando cauces teóricos. En la **Figura 8** se ejemplifica la variedad de las secciones del cauce utilizadas; el inciso a) muestra una sección del cauce con forma de “V”; los incisos b), c) y f) muestran secciones con forma trapecial; por su parte, los incisos d) y e) muestran secciones con forma de “U”. Además, se observa que en el inciso d) se tiene una sección que asemeja una “W”, la cual es una forma que pone a prueba la robustez de los algoritmos de dimensionamiento.

Ventajas y limitaciones del sistema propuesto

El sistema desarrollado es apropiado para diseñar estructuras pequeñas con fines de conservación de suelos. El análisis de estabilidad propuesto por López Martínez & Oropeza Mota, (2009) es particular para presas de gaviones escalonadas hacia aguas abajo, por lo que no se recomienda su uso para diseñar otro tipo de estructuras, como muros de contención para obra civil, presas derivadoras o presas de almacenamiento. Sin embargo, estructuras similares con fines de conservación de suelo y agua, como presas de costales, presas de piedra acomodada, presas de llantas y presas de morillos; se pueden analizar y diseñar con este programa siempre y cuando se tomen en cuenta sus diferencias.

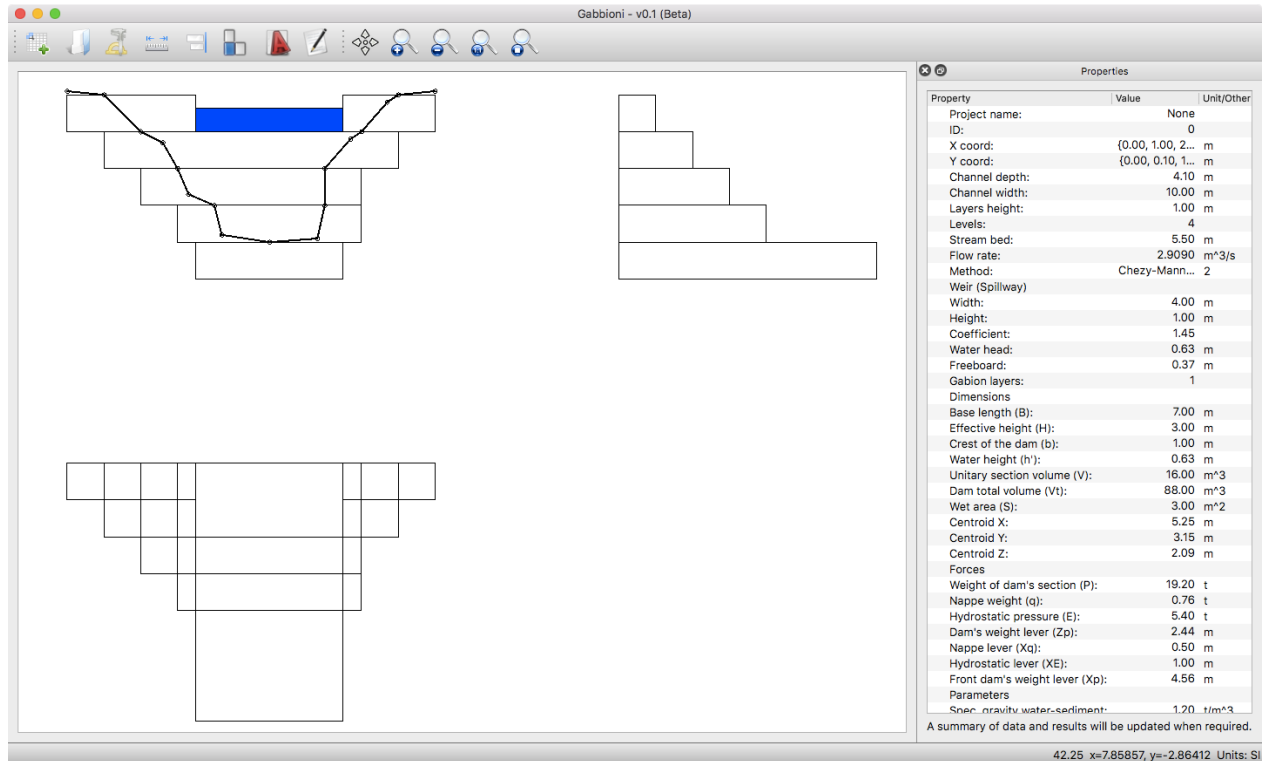


Figura 7. Diseño final de una presa de gaviones con Gabbioni, se muestran la vista frontal, en planta y de perfil de la colocación de tendidos, así como los principales datos y resultados del diseño.

La metodología de diseño propuesta por López Martínez & Oropeza Mota, (2009) considera algunos supuestos que por un lado reducen el número de cálculos si se compara con otras metodologías de diseño este tipo de estructuras, lo que simplifica el diseño general; pero por otro lado, podría considerarse que este análisis omite algunos criterios si se compara con otras metodologías de diseño. Sin embargo, debido a que este tipo de obra representa un riesgo muy bajo, comparado con otras obras civiles, este diseño es aceptable para asegurar la estabilidad de las presas de gaviones. Grimaldi *et al.*, (2015) utilizan una metodología de diseño en el que se considera un análisis de estabilidad para condiciones de presa llena y presa vacía, como generalmente se hace en el diseño de presas de almacenamiento de grandes dimensiones. El análisis estructural descrito por Camargo Hernández & Franco, (2001), considera más fuerzas actuantes sobre el cuerpo de la presa y condiciones hidráulicas adicionales que lo hacen ver más completo.

En lo que respecta a la compatibilidad del programa, los formatos de datos de entrada y salida que utiliza *Gabbioni*, como archivos de texto delimitado y dibujos en *Drawing Interchange Format* (DXF), permiten la compatibilidad con otros programas de uso frecuente en ingeniería como hojas de cálculo, procesadores de texto y dibujo asistido por computadora.

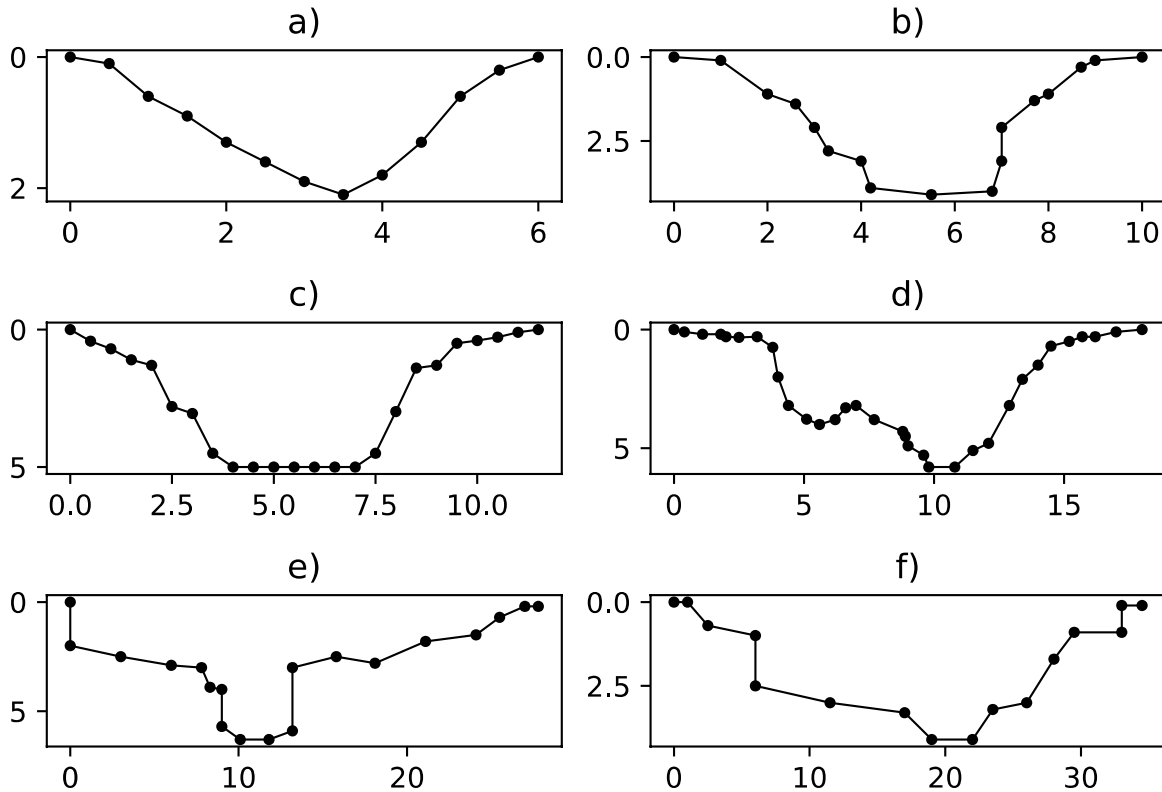


Figura 8. Secciones transversales de los cauces utilizados para evaluar los algoritmos de diseño de presas de gaviones.

Conclusiones

Se desarrolló una herramienta computacional para el diseño rápido y preciso de pequeñas presas de gaviones llamada *Gabbioni* bajo un modelo de desarrollo de código abierto. Se codificó en lenguaje C++ usando las librerías gráficas Qt5 lo que lo hace una aplicación multiplataforma, es decir, es capaz de ejecutarse en los principales sistemas operativos computacionales: Windows, macOS y Linux. Esto asegura que el programa puede ser actualizado para adaptarlo a los cambios tecnológicos que pudieran surgir, de manera que no se vuelva obsoleto. Además, su diseño modular y abierto permite que otros programadores modifiquen y adapten el código a sus necesidades, por ejemplo, agregando otros métodos para el análisis de estabilidad.

Comparando con el uso de programas comunes, el uso de esta herramienta especializada reduce tanto el tiempo de diseño de una estructura, así como la ocurrencia de errores causados por descuidos.

Aunque la fase de codificación se ha completado de manera exitosa y se han realizado algunos ejemplos, aún es necesario realizar pruebas y comparaciones exhaustivas para evaluar la robustez y confiabilidad del programa, con la finalidad de introducir su uso en ambientes de producción.



Referencias Bibliográficas

- Camargo Hernández, J. E., & Franco, V. (2001). *Manual de gaviones. Series del Instituto de Ingeniería 624*. México D.F.: Instituto de Ingeniería UNAM.
- Grimaldi, S., Vezza, P., Angeluccetti, I., Coviello, V., & Koussoubé Kô, A. M. (2015). Designing and Building Gabion Check Dams in Burkina Faso. *Engineering Geology for Society and Territory*, 3, 529-533. doi:10.1007/978-3-319-09054-2
- Herrmann, H., & Bucksch, H. (2014). *Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-642-41714-6
- Hsieh, H.-m., Luo, C.-r., Yang, J.-c., & Chen, R.-f. (2013). Numerical study of the effects of check dams on erosion and sedimentation in the Pachang River. *International Journal of Sediment Research*, 18(3), 304-315. doi:10.1016/S1001-6279(13)60041-4
- Khatibi, R., Salmasi, F., Ghorbani, M. A., & Asadi, H. (2014). Modelling Energy Dissipation Over Stepped-gabion Weirs by Artificial Intelligence. *Water Resources Management*, 28(7), 1807-1821. doi:10.1007/s11269-014-0545-y
- LEMAC. (Agosto de 2019). *Descargas Gratuitas*. Obtenido de Gaviones LEMAC: <http://www.lemac.com.mx/descargas.html>
- Liu, C.-M. (1992). The effectiveness of check dams in controlling upstream channel stability in northeastern Taiwan. *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions (Proceedings of the Chengdu Symposium)*. IAHS Publication(209), 423-428.
- López Martínez, R., & Oropeza Mota, J. L. (2009). Presas de gaviones. Montecillos, Estado de México, México: Especialidad de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados, SAGARPA.
- MACCAFERRI. (Agosto de 2019). *Software-GawacWin_2011 – Gabion walls*. Obtenido de MACCAFERRI USA: https://www.maccaferri.com/us/download/software-gawacwin_2011-gabion-walls/
- Poder Ejecutivo - SEMARNAT. (2015). Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015 Conservación del recurso agua. *Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*. Ciudad de México, México: Diario Oficial de la Federación.
- Reeve, D., Zuhaira, A., & Karunarathna, H. (2019). Computational investigation of hydraulic performance variation with geometry in gabion stepped spillways. *Water Science and Engineering*. doi:https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.04.002
- Semarnat. (2016). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y Crecimiento Verde. Edición 2015*. México: Semarnat.
- Shevchenko, K. I. (1996). Gabions - Reliable protection of soils from erosion. *Journal of Hydrotechnical Construction*, 30(11), 33-37.



Quinto Congreso Nacional COMEII 2019, Mazatlán, Sin., del 18 al 20 de Septiembre de 2019

Yang, G.-L., Liu, Z.-Z., Xu, G.-L., & Huang, X.-J. (8-10 de September de 2009). Protection technology and applications of gabion. *Proc. of Int. Symp. on Geoenvironmental Eng. ISGE2009*, 915-919.