

# Bases y Criterios para el Dimensionamiento Hidráulico de Formas Especiales de Saltos en Esquí en Presas

Toapaxi, J.\*; Hidalgo, X. \*\*; Valencia, N.\*\*; Castro, M.\*\*

\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador  
e-mail: jorge\_toapaxi@hotmail.com

\*\*Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI), Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador; e-mail: marco.castro; ximena.hidalgo; nathalia.valencia@epn.edu.ec

**Resumen:** El salto en esquí es frecuentemente utilizado como una estructura eficiente en la disipación de energía al pie de los vertederos de excesos de presas, y constituye uno de los elementos fundamentales que permiten la adecuada entrega del caudal en el cauce aguas abajo, de manera económica y segura. En el presente artículo se presentan criterios y recomendaciones para el dimensionamiento del salto en esquí convencional y de otras formas especiales, fundamentados en la recopilación y análisis de las investigaciones realizadas alrededor de este tema.

**Palabras clave:** Presa, vertedero, salto en esquí, formas especiales, socavación.

**Abstract:** Ski jump used frequently as an efficient energy dissipation device at the toe of overflow dam spillways, represents a main element to achieve an adequate flow delivery in the downstream channel, economically and safely. This article features criteria and recommendations for the design of conventional ski jumps and other special types, based on the compilation and analysis of preformed investigations on this topic.

**Keywords:** Dam, spillway, ski jump, special types, scour.

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde épocas remotas, la disponibilidad de agua ha sido un factor limitante para el desarrollo de la sociedad, donde la búsqueda por satisfacer las necesidades de abastecimiento de agua, control de inundaciones y energía hidroeléctrica ha llevado al hombre a construir estructuras para el aprovechamiento y manejo del recurso hídrico. Las presas construidas alrededor del mundo representan soluciones fundamentales para el cumplimiento de este objetivo.

Los vertederos de excedencias constituyen estructuras hidráulicas complementarias e indispensables consideradas en el dimensionamiento de las presas, ya que permiten controlar de manera segura el desbordamiento de agua y su encauzamiento aguas abajo de la presa.

Dado que las presas y los vertederos cambian las características hidráulicas del flujo de un cauce natural, se pueden presentar problemas de erosión aguas abajo de la estructura, los mismos que deben ser controlados o evitados mediante el uso de disipadores de energía.

El salto en esquí convencional y sus formas especiales constituyen entonces opciones geométricas importantes. Los objetivos técnicos principales a ser satisfechos son: obtener la mayor disipación de energía y conseguir el adecuado direccionamiento en planta y/o perfil del chorro.

El resultado de la disipación de energía se refleja en la profundidad de socavación aguas abajo del salto en esquí. En

la Fig. 1, se presenta un diagrama de flujo para el cálculo de la socavación y de las dimensiones del cuenco pre-excavado.

Debido a su amplia utilización en los proyectos, los avances en el diseño de saltos en esquí de tipo convencional cuenta con criterios definidos para su dimensionamiento. En el caso de los saltos en esquí de formas especiales, los avances en cuanto al diseño, dimensionamiento y cálculo de la socavación se refieren a casos particulares, con restricciones específicas, que no permiten establecer un patrón general definido de diseño o, al menos, requieren la puntualización de rangos de aplicación. En el presente artículo, como resultado de la investigación realizada, se recopila y sintetiza la información y características de los diseños de saltos en esquí tanto convencional como de formas especiales, con el fin de establecer una metodología sistemática para su diseño.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL FLUJO EN EL SALTO EN ESQUÍ

El flujo de agua en un canal con curva vertical se comporta de manera diferente que sobre un canal de fondo plano rectilíneo; las líneas de corriente presentan una curvatura apreciable que cambia tanto la distribución de velocidades como la de presiones en el fondo, a lo largo de la curvatura cóncava, como resultado de la acción de la fuerza centrífuga (que actúa hacia el exterior de la curva).

En el salto en esquí se presenta un flujo rápido, supercrítico, con velocidades relativamente altas. Si se toma en cuenta el cambio de la dirección de las líneas de corriente en un tramo de desarrollo corto, el flujo debe ser considerado como rápidamente variado. Estas características permiten la presencia de turbulencia, donde los valores referenciales de su intensidad a la salida del salto en esquí convencional, se encuentran entre 3% -5% según [1] y 4% -8% según [13].

Artículo recibido el 20 de noviembre, 2014; revisado 20 noviembre de 2014.  
Esta obra fue auspiciada por el Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI).  
Autores para correspondencia: jorge\_toapaxi@hotmail.com. Ladrón de Guevara E11-253, Quito.

### 2.1 Distribución de Velocidades en el Salto en Esquí

Debido a que las líneas de corriente del flujo sobre el cucharón del salto en esquí tienen curvatura, la distribución de velocidades es diferente a la que se presenta en un canal con una sola pendiente, adquiriendo una forma logarítmica deformada, con tendencia uniforme [13]. El mayor valor de la velocidad se presenta en la superficie, como se indica en el esquema de la Fig. 2.

### 2.2 Distribución de Presiones en el Salto en Esquí

El flujo supercrítico sobre el cucharón (cóncavo) origina el desarrollo de la aceleración centrífuga, la misma que modifica obviamente la distribución de presiones. En este flujo curvilíneo cóncavo, la variación de la presión será positiva ya que dirección de la componente de la aceleración centrífuga está en igual dirección de la gravedad.

valor que se conoce como la “presión dinámica”. La presión dinámica se produce, como se mencionó anteriormente, por el efecto de la aceleración centrífuga y su valor llega a ser aproximadamente de 8 a 10 veces la presión hidrostática. La presión dinámica es directamente proporcional a la velocidad del flujo, e inversamente proporcional al radio de curvatura del cucharón.

### 2.3 Cavitación

En el salto en esquí convencional puede existir riesgo de cavitación tanto en la aproximación cucharón como a la salida del mismo (labio).

En cuanto a las formas especiales, los que disponen de deflectores son más propensos a la cavitación, debido a la interacción entre las velocidades altas y la geometría particular de los dientes o umbrales discontinuos.

## 3. TIPOS DE SALTOS EN ESQUÍ

### 3.1 Salto en Esquí Convencional

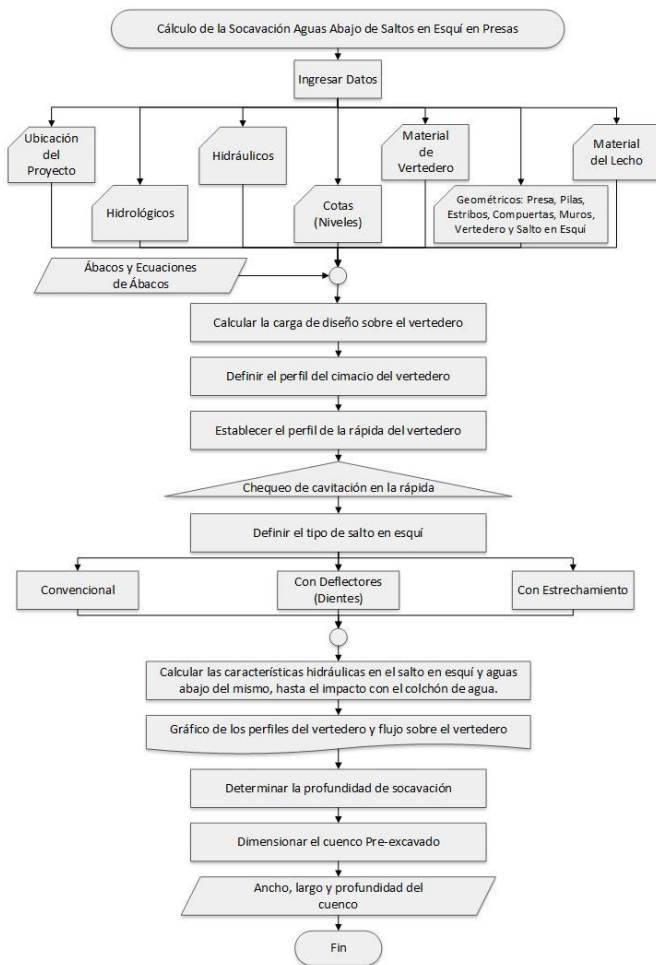
Es el más común y se encuentra conformado básicamente por un canal rectangular de fondo longitudinal cóncavo (cuchara) definido por un radio de curvatura. La salida de esta estructura terminal puede ser horizontal o puede disponer de una inclinación en contrapendiente (ángulo de salida).

### 3.2 Salto en Esquí con Deflectores (Dientes)

Este tipo de salto en esquí dispone de deflectores con un radio de curvatura menor y un ángulo de salida mayor al del fondo de la cuchara. Los deflectores se encuentran ubicados a lo ancho del salto en esquí y separados entre sí una cierta distancia, lo que permite a su vez separar el chorro, logrando que el agua circule por sobre los deflectores y entre ellos. La geometría de los deflectores puede ser rectangular o de sección transversal trapezoidal (con fondo curvo o con perfil triangular). El objetivo técnico es el mismo; la diferencia radica en que los de sección trapezoidal disminuyen o evitan posibles problemas de cavitación en las aristas de los dientes.

### 3.3 Salto en Esquí con Estrechamiento

El salto con estrechamiento gradual de paredes comprende de dos paredes laterales rectas, convergentes en el sentido del flujo, cuyos objetivo técnico principal consiste en: (i) elevar el calado de agua en la salida del salto en esquí para propiciar una mayor desintegración del chorro en la atmósfera, si se lo compara con el convencional, y (ii) direccionar el chorro a la parte central del cauce aguas abajo.



**Figura 1.** Diagrama de flujo para el cálculo de la socavación aguas abajo de saltos en esquí y diseño del cuenco pre-excavado.

La presión en el fondo del salto en esquí se evalúa entonces como la suma de la presión semejante a la “hidrostática” y un

#### 4. CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO

##### 4.1 Salto en Esquí Convencional

El salto en esquí convencional como estructura de disipación se considera adecuado cuando:

- Se dispone de presas altas.
- La velocidad al pie de la presa excede los 20 m/s.
- La profundidad de agua en la descarga es mucho menor a la requerida para la formación del resalto hidráulico.
- El lecho del cauce del río aguas abajo de la descarga se encuentra preferiblemente compuesto de roca.

La cubeta deflectora tiene como objetivos principales: direccionar el chorro hacia el aire para su aeración y lanzarlo hacia una ubicación adecuada y resistente aguas abajo.

El dimensionamiento hidráulico consiste en definir: el radio de la cubeta deflectora, el ángulo de salida y la elevación del fondo (invert), valores que se describen en la Fig. 2.

Los criterios base del dimensionamiento para el salto en esquí convencional son los siguientes:

- El radio del salto en esquí ( $R$ ) incide en: su longitud, en la distribución de presiones sobre el cucharón y en el ángulo de salida del chorro. Se recomienda que “ $R$ ” sea aproximadamente 10 veces el calado de aproximación ( $d$ ).
- El valor del ángulo de salida del cucharón ( $\phi_c$ ) resulta de la ponderación entre el alcance del chorro y la profundidad de socavación, siendo el intervalo recomendable para este parámetro  $\phi_c = 20^\circ - 25^\circ$ .
- Para seleccionar la elevación del labio del salto en esquí se recomienda: considerar la cota del labio entre 30% al 50% de la altura de la presa, ubicar el labio por arriba del nivel de aguas abajo, considerar la disposición de las obras anexas y el nivel de la roca disponible para la cimentación de la cuchara.
- Para evitar cavitación en el labio del cucharón, el valor de la sumatoria entre el ángulo de salida del chorro ( $\theta'$ ) y el ángulo de salida del labio del cucharón ( $\theta_L$ ), se recomienda se encuentre aproximadamente en  $40^\circ$ .

Adicionalmente, en el diseño estructural del salto en esquí convencional es necesario contemplar la carga de presión resultante de la presión hidrostática más la dinámica.

##### 4.2 Salto en Esquí con Deflectores (Dientes)

Los saltos en esquí con deflectores disipan mayor energía que un salto en esquí convencional, disminuyendo la socavación aguas abajo de la estructura. Este tipo de salto en esquí, es recomendable cuando:

- Las condiciones geológicas del cauce aguas abajo requieran de una menor afectación del chorro.
- Es factible disminuir un porcentaje del alcance del chorro, sin que éste ponga en riesgo la estabilidad de la estructura y las obras aledañas.

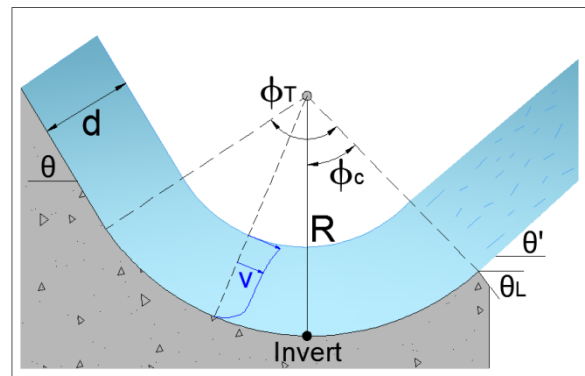


Figura 2. Salto en esquí convencional.

- La configuración del proyecto, específicamente la ubicación de los vertederos de excesos, favorecen a que el flujo no afecte significativamente a la morfología del cauce, por la posible expansión transversal del chorro al usar deflectores (dientes).

Los criterios para el dimensionamiento de saltos en esquí con deflectores rectangulares (Fig. 3) son:

- La diferencia entre el ángulo de salida del deflector ( $\phi_{def}$ ) y el cucharón ( $\phi_c$ ) entre  $5^\circ$  a  $10^\circ$ .
- La relación radio del deflector respecto al radio del cucharón ( $R_{def}/R$ ) entre 0.7 a 1.1 [14].
- La altura del deflector respecto al radio del cucharón ( $Y_{def}/R$ ) con una variación entre 0.05 a 0.17 [14].
- La relación ancho del deflector respecto al espaciamiento ( $e/b_{def}$ ) se recomienda menor a 1, oscilando entre 0.5 a 0.9.
- La relación ancho del deflector respecto al ancho de la cuchara ( $b_{def}/b$ ) entre 0.01 y 0.20.
- El espaciamiento entre deflectores debe ser uniforme y su repartición debe ser tal que los deflectores de los extremos estén lejos de las paredes.

Los criterios para el dimensionamiento de saltos en esquí con deflectores trapezoidales con fondo curvo (Fig. 4) son:

- El ángulo de salida del deflector trapezoidal igual o cercano a  $20^\circ$  y el ángulo de salida del cucharón ( $\phi_c$ ) igual a cero grados.
- La relación  $R_{def}/R$  (Radio del deflector respecto al radio del cucharón) entre 0.7 a 1.3.
- La altura del deflector respecto al radio del deflector ( $Y_{def}/R_{def}$ ) con rango de variación entre 0.07 a 0.16.
- La relación espaciamiento respecto al ancho inferior del deflector a la salida ( $e/b_{def2}$ ) entre 0,25 a 0,5.  $b_{def}/e > 1$ .
- La relación ancho inicial del deflector sobre el ancho inferior del deflector a la salida ( $b_{def1}/b_{def2}$ ) se recomienda en el rango de 0,24 a 0,36.
- La pendiente de las paredes laterales con la relación 1V:1H
- El largo del deflector en relación al ancho inferior del deflector a la salida ( $l_{def}/b_{def2}$ ) entre 1,14 y 1,42.

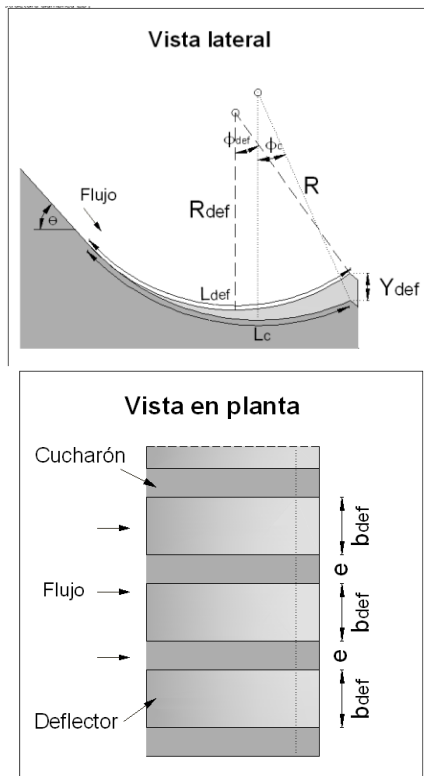


Figura 3. Salto en esquí con deflectores rectangulares.

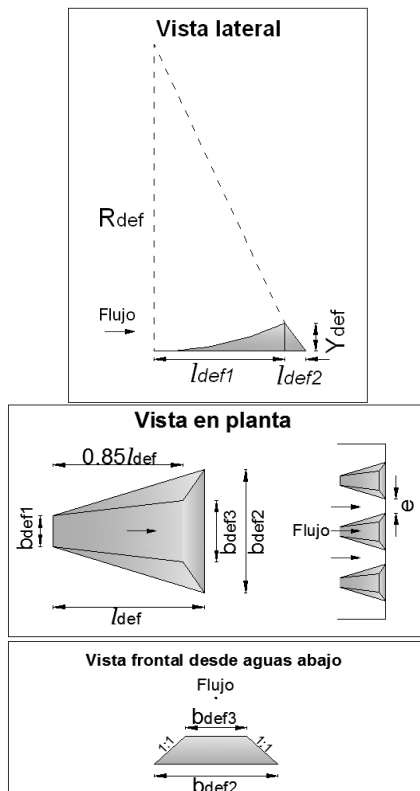


Figura 4. Salto en esquí con deflectores trapezoidales.

- El espaciamiento entre deflectores debe ser uniforme y su repartición debe ser tal que los deflectores de los extremos estén alejados de las paredes.

#### 4.3 Salto en Esquí con Estrechamiento

Los saltos en esquí con estrechamiento gradual de paredes ayudan a disipar una mayor cantidad de energía con respecto al convencional, pero teniendo como propósito principal el direccionar el chorro hacia el centro del cauce. Este tipo de salto en esquí es recomendable cuando:

- El río es angosto y con laderas profundas.
- La configuración del proyecto y la ubicación u orientación de los vertederos de excesos hacen necesario la concentración del chorro a lo largo del eje del cauce.

Los criterios de dimensionamiento para un salto en esquí con estrechamiento (Fig. 5) de paredes son:

- El ángulo de salida del fondo de la contracción ( $\phi_c$ ) entre  $-10^\circ$  y  $+10^\circ$ .
- El ángulo de salida de la napa superior del chorro ( $\theta'_{sup}$ ) entre  $35^\circ$  y  $4^\circ$  [7].
- La relación de contracción ( $b_c/b$ ) puede variar dentro del rango de 0.16 a 0.40.
- La relación largo de la contracción respecto el ancho del cucharón ( $l_c/b$ ) con un rango de variación entre 1.3 y 1.9.
- El ángulo de contracción de cada pared lateral se recomienda en el rango de  $3^\circ$  a  $15^\circ$ .

#### 5. CONCLUSIONES

El uso del salto en esquí como disipador de energía es una alternativa segura y económica, cuando las condiciones geológicas de la zona, características de la presa y características del flujo son las adecuadas, es decir, cuando el material del lecho sea roca, el cauce sea suficientemente ancho para captar el chorro y no afectar las laderas, la presa sea alta, la pendiente de la rápida sea menor a 4V:1H y cuando la velocidad del flujo supere los 20 m/s.

Para el diseño de saltos en esquí convencionales es necesario definir principalmente: el radio del cucharón, ya que incide en la longitud del mismo, en la distribución de presiones y ángulo de salida del chorro; el ángulo de salida, ya que influye en el alcance del chorro y la profundidad de socavación; la elevación del fondo del cucharón (invert) y la elevación de la salida del salto en esquí, para prevenir que la estructura de disipación trabaje sumergida.

Cuando el uso de un salto en esquí convencional no satisface todas las necesidades de disipación, es posible utilizar formas especiales del salto en esquí. La forma especial del salto en esquí dependerá tanto de la orientación del o los vertederos y de la presencia de cavitación en la estructura, como de las condiciones aguas abajo (ancho del cauce, estabilidad de las márgenes, socavación).

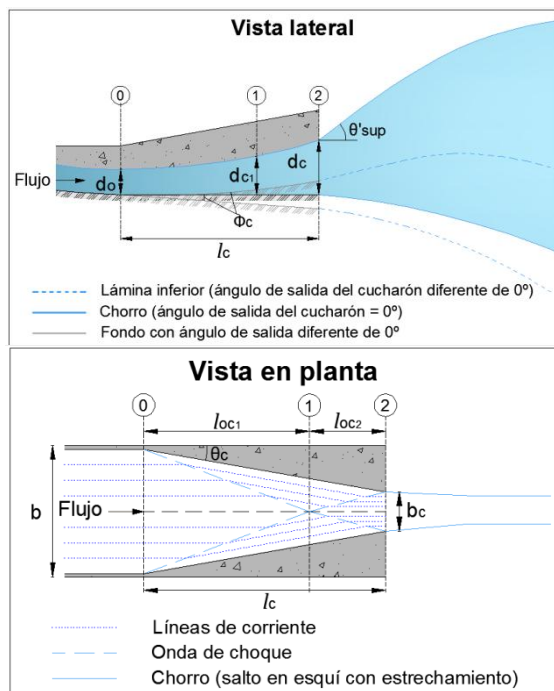


Figura 5. Salto en esquí con estrechamiento.

El salto en esquí con deflectores es conveniente cuando: se requiere mayor disipación que salto en esquí convencional, la reducción del alcance del chorro no afecta las obras anexas. Este tipo de salto en esquí es de mayor complejidad constructiva y requiere de mantenimiento más frecuente.

Para el diseño de saltos en esquí con deflectores (dentados) es necesario definir: la forma de los deflectores, rectangular o trapezoidal; los ángulos de salida adecuados tanto del cucharón como del deflector, para disminuir posibles problemas de cavitación; las dimensiones del ancho, espaciamiento, radio, longitud y número de deflectores a utilizar.

El salto en esquí con estrechamiento de paredes es adecuado en cauces estrechos, laderas profundas y cuando no exista limitación en la zona de incidencia longitudinal del chorro. Este tipo de salto en esquí direcciona el chorro a un lugar específico y reduce la socavación de 1/3 a 2/3 comparado con el convencional.

Para el diseño de saltos en esquí con estrechamiento gradual de paredes es necesario definir: el ángulo de salida tanto del cucharón como del chorro, ya que éstos definirán el alcance del mismo; el ángulo, la longitud y la relación de contracción adecuados, para evitar disturbios en el flujo.

Considerando que cada proyecto presenta características particulares, la modelación física se mantiene como una herramienta necesaria e ineludible, con el fin de corroborar, afinar u optimizar las geometrías de este tipo de estructura deflectora.

Los saltos en esquí convencionales han sido ampliamente estudiados a diferencia de las formas con deflectores y estrechamiento.

En el caso de saltos en esquí con deflectores, se han realizado algunas investigaciones en el laboratorio del CIERHI-EPN

[3], [9], [10] y [15], con ayuda de la modelación física, cuyos resultados experimentales permiten ratificar lo señalado en el presente artículo. Los resultados respecto de las diferentes eficiencias alcanzadas en el proceso de la disipación de energía en los cuencos de socavación al pie de los saltos en esquí, y en forma comparativa, se analizan en la publicación [9]. No obstante, se recomienda continuar las investigaciones experimentales en modelos físicos a escala, que permitan determinar la cantidad adecuada de dientes para diferentes anchos de cucharón; y con base en los datos de modelo, establecer ecuaciones de socavación específicas para este tipo de salto en esquí.

De igual manera, en el caso de saltos en esquí con estrechamiento de paredes, es necesario determinar ecuaciones específicas para el cálculo de la socavación.

Finalmente, en cumplimiento de los objetivos técnicos de la investigación, se conformó una hoja de cálculo que recoge los diferentes criterios expuestos en el artículo referente al dimensionamiento de los diferentes tipos de saltos en esquí. La versatilidad de esta herramienta permitiría obtener un diseño a ser verificado y optimizado, de ser necesario, mediante la modelación física.

## REFERENCIAS

- [1] E. Bollaert y A. Sheiss, "Physically Based Model for Evaluation of Rock Scour due to High Velocity Jet Impact," *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, pp. 1-13, 2005.
- [2] Bureau of Indian Standards, *Criteria for Hydraulic Design of Bucket Type Energy Dissipators*, India: 2010.
- [3] CIERHI – EPN, "Informes Técnicos sobre las Investigaciones en Modelo de la Presa Toachi del Aprovechamiento Hidroeléctrico Toachi – Pilatón," Convenio No. 1 y 2, Hidrotoapi – EPN, 2011-2012.
- [4] S. Erpicum, P. Archambeau, B. Dewals y M. Piroto, "Experimental investigation of the effect of flip bucket splitters on plunge pool geometry," *Wasserwirtschaft*, pp. 108-110, 2010.
- [5] F. Golzari, "Effect of using dentate ski jump spillways on scouring profile," in *2nd International Conference on Scour and Erosion*, Singapore, 2004.
- [6] J. E. González Fariñas, "Evaluación de trampolines con deflectores sobre la base del parámetro de socavación 'S'," *Ingeniería del Agua*, vol. 11, n° 4, pp. 397-409, 2004.
- [7] N. Hangen, *Efficient Energy Dissipators*, Dalian: Dalian University of Technology Publishing House, 2000.
- [8] V. Heller, W. Hager y H. Minor, "Ski Jump Hydraulics" *Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 344-355, 2005.
- [9] D. Hermosa, X. Hidalgo, P. Ortega, M. Castro, "Evaluación experimental de la profundidad máxima de socavación en cuencos al pie de una presa, en función del tamaño del enrocado de protección," *Red de Universidades para investigación y Postgrado (REDU) y IV Congreso Binacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de las Universidades del Sur de Ecuador y Norte del Perú*, UTPL, Loja, Octubre 2014.

- [10] X. Hidalgo, E. Casa, D. Dávila, P. Ortega, M. Castro, "Evaluación experimental sobre la incidencia de la Forma y Distribución de los Deflectores en la Geometría de los Cuencos al Pie de Presas," Red de Universidades para investigación y Postgrado (REDU) y IV Congreso Binacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de las Universidades del Sur de Ecuador y Norte del Perú, UTPL, Loja, Octubre 2014.
- [11] Z. Huang, X. He, H. Zhu y Y. Zhong, "Slit Type Bucket and Characteristics of Hydrodynamic Pressure," Water Resources and Hydropower Research Institute of Guangdong Province, 2006.
- [12] R. Khaturia, *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*, New York: Marcel Dekker, 2005.
- [13] P. Manso, "Influence of pool geometry and induced flow patterns on rock scour by high velocity plunging jets. Thèse N°3430," École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suiza, 2006.
- [14] Republic of China Water Industry Standard, Concrete Gravity Dam Design Specifications SL319, 2005.
- [15] C. Velasco, P. Vera, "Estudio en Modelo Físico de la Disipación de energía aguas abajo de los Vertederos de Excesos y Desagües de Fondo de la Presa Toachi en el Proyecto Hidroeléctrico Toachi – Pilatón," Tesis de Grado, FICA – EPN, 2012.
- [16] D. L. Vischer y W. H. Hager, *Energy Dissipators*, Rotterdam: A. A. Balkema, 1995.