

# Selección de alternativa óptima de la presa Toma Grande aplicando el método de Análisis Jerárquico

## Selection of the optimal alternative for the Toma Grande dam using the Hierarchical Analysis Method

Hulinho Yordy Arbaiza Ocropoma<sup>1,a</sup>, Samuel Ismael Quisca Astocahuana<sup>1,b</sup>

Recibido: 26/02/2023 - Aprobado: 02/04/2023 – Publicado: 02/06/2023

### RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se aplica el análisis y la selección del tipo óptimo de la presa Toma Grande, mediante el uso del proceso analítico jerárquico (AHP), considerando 4 alternativas de presa (CFRD, RCC, concreto gravedad, tierra y enrocado). Para la aplicación del método se identificaron los factores que influyen en el momento de la selección del tipo de presa, que fueron denominados subcriterios. Estos fueron agrupados en 8 grupos más representativos, mediante un árbol de jerarquías, los cuales fueron denominados criterios (topografía y geología, disponibilidad de materiales, obras conexas, seguridad de presas, sistema de desvío del río, procedimiento constructivo, plazo de construcción y costo de obra). De los estudios básicos de ingeniería se obtuvieron los datos de los criterios, con ellos se construyó una matriz de comparación pareada para obtener las ponderaciones mediante la confrontación de cada uno de los criterios entre sí. Se estableció la relación de consistencia de los criterios de selección, para luego construir la matriz de comparación por pares de la selección del tipo de presa según los criterios. Los resultados del análisis indican que la presa de concreto gravedad es la alternativa óptima de tipo de presa, con una ponderación del 40%.

**Palabras claves:** Selección de alternativas de presas, análisis jerárquico AHP, tipo óptimo de presa.

### ABSTRACT

In this research work, the analysis and selection of the optimal type of the Toma Grande Dam is applied by using the analytical hierarchical process (AHP), considering 4 dam alternatives (CFRD, RCC, Gravity Concrete, Earth and Enrocado). For the application of the method, the factors that influence the selection of the type of dam were identified, which were called Subcriteria. These were grouped into 8 more representative groups, by means of a hierarchy tree, which were called Criteria (topography and geology, availability of materials, related works, dam safety, river diversion system, construction procedure, construction time and cost of work). The data for the Criteria were obtained from the basic engineering studies and a paired comparison matrix was constructed to obtain the weightings by comparing each of the Criteria with each other. The consistency relationship of the selection criteria was established, in order to then construct the pairwise comparison matrix for the selection of the type of dam according to the Criteria. The results of the analysis indicate that the Gravity Concrete dam as the optimal alternative dam type, with a weighting of 40%.

**Keywords:** Selection of dam alternatives, analytical hierarchical process AHP, optimal dam type.

1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Lima, Perú.

a Tesista de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Autor para correspondencia: [hulinho.arbaiza@unmsm.edu.pe](mailto:hulinho.arbaiza@unmsm.edu.pe) - ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5912-3177>

b Docente principal de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil. E-mail: [squiscaa@unmsm.edu.pe](mailto:squiscaa@unmsm.edu.pe) - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2477-9306>

## I. INTRODUCCIÓN

Tyndall Center (2004), reporta que el Perú es el tercer país más vulnerable al cambio climático. Una de las medidas de adaptación con el cambio climático es la reducción de las pérdidas de agua de los ríos hacia el mar. Para la implementación de esta medida se deben conformar embalses de almacenamiento de agua mediante la construcción de presas en la costa y sierra del Perú. El planteamiento y desarrollo de alternativas de tipos de presas, así como la selección de la tipología de presa óptima para la construcción, es una de las decisiones más importantes, complejas y controvertidas en la gestión del abastecimiento de agua de los proyectos hidráulicos. Una selección adecuada de la tipología de presa puede mejorar la seguridad física de la presa, la seguridad funcional del embalse, la seguridad operativa de la presa, y la optimización del costo de la obra. Por el contrario, una inadecuada selección en la tipología puede significar una carencia de la seguridad de la presa, incluso su colapso, y causar consecuencias perjudiciales, tanto en daños materiales como en pérdida de vidas humanas. Zapata Cruz et al. (2019), afirma que “en la selección del tipo de presa se relacionan factores morfométricos, geológicos, geotécnicos, ambientales y financieros, entre los cuales se destacan, la topografía del terreno, las características litológicas y condiciones geotécnicas particulares del sitio, la disponibilidad de material de construcción, el costo y las condiciones sísmicas”. Estos factores son favorables para ciertas tipologías de presas, y desfavorables para otras, razón por la cual es necesario emplear un método adecuado que permita equilibrar las ventajas y desventajas en cada uno de los factores, a fin de justificar de forma idónea la tipología de presa seleccionada.

Generalmente, la selección de la tipología de presa que se viene construyendo se realiza de manera empírica; que conlleva, en muchas ocasiones, a tener una opinión sesgada y poco sustentada. La gran mayoría de estos factores son evaluados de forma cualitativa, lo que dificulta la comparación y el análisis de las alternativas. Al tratarse la selección del tipo de presa como un problema de decisión multicriterio, los métodos disponibles para abordar este problema son de gran interés. Una de las metodologías más utilizadas en la toma de decisiones multicriterio, que se implementará en el presente estudio, es el método Analítico Jerárquico (AHP). Es un instrumento efectivo para la toma de decisiones complejas; simplifica las decisiones difíciles a una serie de comparaciones pareadas, sintetizando

los resultados por medio de pesos estadísticos para cada variable cualitativa o cuantitativa. Por ello, se vincula el método AHP a la selección de la tipología de presa o eje de presa, Jozaghi et al. (2018), AlJubaely et al. (2016) y Dai (2016), y se establece un procedimiento estándar para la elección del tipo de presa óptimo o eje de presa óptimo en función de las variables dependientes.

## II. MÉTODOS

### 2.1 Método Analítico Jerárquico (AHP)

El AHP es un método multicriterio desarrollado por Thomas Saaty en el año 1980, fue diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples. Toskano (2005), señala que “el proceso requiere que quién toma las decisiones, proporcione evaluaciones subjetivas sobre la importancia relativa de cada uno de los criterios, y que después, especifique su preferencia con respecto a cada una de las alternativas de decisión y para cada criterio. El resultado del AHP es una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global para cada una de las alternativas de decisión”.

### 2.2 Base matemática del AHP

Saaty (2008), señala que “el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) es una teoría de medición a través de comparaciones por pares y se basa en los juicios de expertos para derivar escalas de prioridad”. El fundamento matemático se explica en los siguientes términos:

#### *Establecimiento de prioridades con el AHP*

“El método AHP, pide a quién toma las decisiones señalar una preferencia o prioridad con respecto a cada alternativa de decisión, en términos de la medida en la que contribuya a cada criterio. Teniendo la información sobre la importancia relativa y las preferencias, se utiliza el proceso matemático denominado síntesis, para resumir la información y para proporcionar una jerarquización de prioridades de las alternativas, en términos de una preferencia global” (Toskano, 2005).

#### *Comparaciones pareadas*

La base fundamental del método AHP son las comparaciones por pares; para lo cual se emplea una escala con valores de 1 a 9. para valorar las preferencias relativas de dos elementos.

Tabla 1. Escala de comparación de Saaty

Valor numérico	Escala verbal	Explicación
1	Igual	Los dos elementos contribuyen igualmente.
3	Moderado	La experiencia y el juicio favorecen a un elemento sobre otro.
5	Fuerte	Un elemento está fuertemente favorecido.
7	Muy fuerte	Un elemento domina muy fuertemente sobre otro.
9	Extremos	Un elemento está favorecido por al menos un orden de magnitud.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Se usan para el compromiso entre dos juicios.
Inversos	Se utiliza cuando el segundo elemento es mayor en el criterio a comparar	

Fuente: Arquero (2009)

*Matriz de comparaciones pareadas*

Es aquella matriz cuadrada que contiene las comparaciones en pares de las alternativas y/o criterios.

Para Toskano (2005), se definen como:

“Sea A una matriz nxn donde  $n \in \mathbb{Z}^+$ . Sea  $a_{ij}$  el elemento (i, j) de A, para  $i = 1, 2, \dots, n$ ; y  $j = 1, 2, \dots, n$ . Decimos que A es una matriz de comparaciones pareadas de n alternativas, si  $a_{ij}$  es la medida de la preferencia de la alternativa en la fila i cuando se le compara con la alternativa de la columna j. Cuando  $i = j$ , el valor de  $a_{ij}$  será igual a 1, pues se está comparando la alternativa consigo misma”.

Además, se cumple que:  $a_{ij} * a_{ji} = 1$ , es decir:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

*Síntesis*

Para Toskano (2005), “la sintetización de juicios se realiza para establecer la prioridad de cada uno de los elementos que se comparan en la matriz de comparación por pares. El proceso matemático preciso que se requiere para realizar tal sintetización implica el cálculo de valores y vectores característicos”; el procedimiento se explica a continuación en 3 pasos:

1. Calcular la suma de cada columna de la matriz de comparaciones por pares.
2. Dividir cada uno de los elementos de la matriz entre el valor de la sumatoria de la columna correspondiente: a esta matriz obtenida se le llamará matriz de comparaciones por pares normalizada.
3. Hallar el promedio de los elementos de cada fila de las prioridades relativas de los elementos comparados.

*Matriz de prioridades*

Las prioridades de cada criterio se consideran en términos de la meta global:

$$\begin{matrix} & \text{Meta global} \\ \text{Criterio 1} & \begin{bmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ \vdots \\ P'_m \end{bmatrix} \\ \text{Criterio 2} & \\ \vdots & \\ \text{Criterio m} & \end{matrix}$$

siendo, m el número de criterios y  $P'_i$  la prioridad del criterio i respecto a la meta global, para  $i = 1, 2, \dots, m$ .

La matriz de prioridades, es aquella matriz que concentra las prioridades para cada alternativa en términos de cada criterio. Para m criterios y n alternativas se tiene lo siguiente:

Criterio 1 Criterio 2 Criterio m

$$\begin{matrix} \text{Alternativa 1} \\ \text{Alternativa 2} \\ \dots \\ \text{Alternativa m} \end{matrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm} \end{bmatrix}$$

siendo,  $P_{ij}$  la prioridad de la alternativa i respecto al criterio j, para  $i = 1, 2, \dots, n$ ; y  $j = 1, 2, \dots, m$ .

La prioridad global para cada una de las alternativas de decisión se sintetiza en un vector columna, que resulta de multiplicar la matriz de prioridades por el vector de prioridades de los criterios.

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ \dots \\ P'_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \dots \\ P_{gn} \end{bmatrix} \dots(1)$$

siendo,  $P_{gi}$  la prioridad global de la alternativa i ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

*Consistencia*

“Una consideración importante en términos de la calidad de decisión final se refiere a la consistencia de los juicios que muestra el tomador de decisiones en el transcurso de la serie de comparaciones pareadas” (Toskano, 2005). El AHP nos proporciona un método para medir el grado de consistencia entre las opiniones pareadas proporcionadas por el tomador de decisión.

Matemáticamente, se sabe que una matriz de comparaciones A nxn es consistente si se cumple lo siguiente:  $a_{ij} * a_{jk} = a_{ik}$ , para  $i, j, k = 1, 2, \dots, n$ .

Esta propiedad exige que todas las columnas (y filas) de la matriz sean linealmente dependientes. Particularmente en una matriz de comparación 2x2 las columnas son dependientes; en consecuencia, una matriz 2x2 siempre será consistente.

El Proceso de Análisis Jerárquico determina la razón de consistencia (RC) como el valor de la división del índice de consistencia de A entre el índice de consistencia aleatorio.

$$RC = \frac{IC}{IA} \dots\dots\dots(2)$$

siendo, IC es el índice de consistencia de A y se calcula de la siguiente manera:

$$IC = \frac{n_{max} - n}{n - 1} \dots\dots\dots(3)$$

Se puede demostrar que el IA varía en función del número de elementos a comparar; algunos autores recomiendan usar la siguiente fórmula para calcular el valor del IA:

$$IA = \frac{1.98(n - 2)}{n} \dots\dots\dots(4)$$

La razón de consistencia, está diseñada de manera que un valor de la razón de consistencia menor o igual al 10%, es señal de un nivel razonable de consistencia en las comparaciones pareadas; mientras que para valores mayores al 10% son señales de juicios inconsistentes; es probable que en estos casos el decisor desee reconsiderar y modificar los valores originales de la matriz de comparaciones.

En este estudio, se ha seguido la metodología del Proceso de Análisis Jerárquico que sigue una trayectoria desde el objetivo principal hasta el nivel de los criterios (y subcriterios) que participan en el análisis. En la Figura 1 se muestra en un esquema general, el árbol de jerarquías empleado, donde se visualiza la asociación de los objetivos

del análisis en comparación, a saber: criterio con criterio, subcriterio con subcriterio y alternativa con alternativa. Los elementos que pertenecen a un determinado grupo deben compararse entre sí de acuerdo con los axiomas: homogeneidad, reciprocidad, dependencia y expectativas.

Se plantean siete fases sucesivas para el proceso de trabajo a seguir (Figura 2):

### 2.3 Área de estudio

Políticamente el área de estudio está ubicada en la región Arequipa, provincia de Arequipa, distrito de Mollebaya. Hidrográficamente forma parte de la cuenca del río

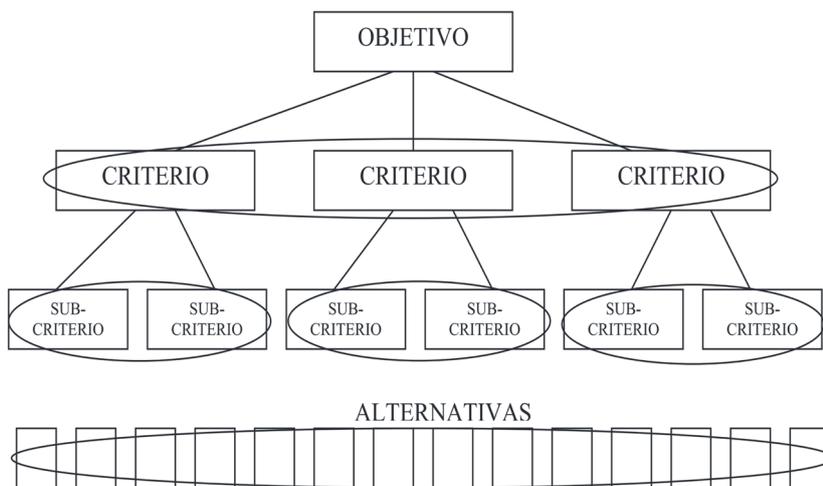


Figura 1. Estructura de la jerarquía AHP  
Fuente: Arquero (2009)

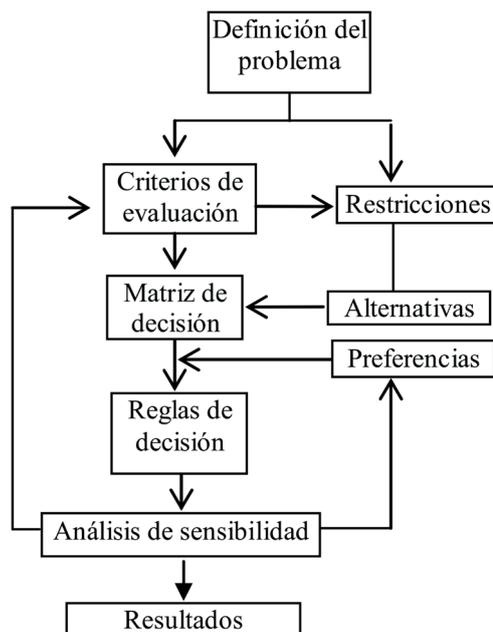


Figura 2. Esquema de la metodología de trabajo  
Fuente: Arquero (2009)

Quilca-Chili, subcuenca río Tingo Grande y microcuenca Mollebaya - Poci.

Geográficamente la zona del proyecto está localizada en la vertiente occidental de los andes del Perú, entre las coordenadas:

- Latitud sur 235,018 - 238,120
- Longitud oeste 8,174,516 - 8,176,209
- La altitud varía de 2600 msnm hasta 2642 msnm

Ver Figura 3.

El volumen total de almacenamiento del vaso de la presa Toma Grande es de  $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; de las cuales  $2.2 \times 10^6 \text{ m}^3$  son de volumen útil y  $0.3 \times 10^6 \text{ m}^3$  de volumen muerto (almacenamiento de sedimentos). El área máxima del espejo de agua del embalse es de  $0.15 \text{ km}^2$ .

El eje de la presa está ubicado sobre un valle estrecho en forma de V, formado por el cauce del río Mollebaya. Las condiciones geológicas del eje nos indican que estará emplazada sobre una formación rocosa de gran potencia. (Figura 4).

### 2.4 Planteamiento de alternativas

**Alternativa 1:** Presa de tierra y enrocado con núcleo central impermeable (TE)

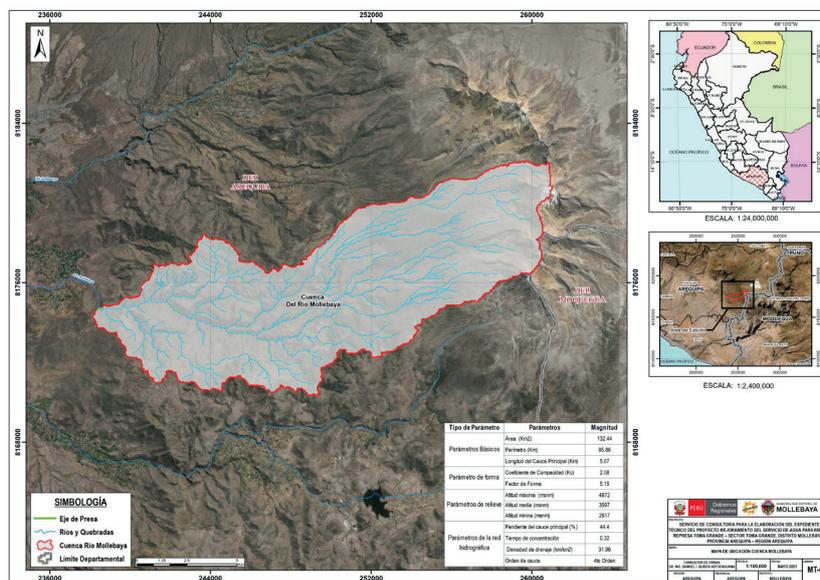


Figura 3. Plano de ubicación de la presa Toma Grande  
Fuente: Quisca (2021)

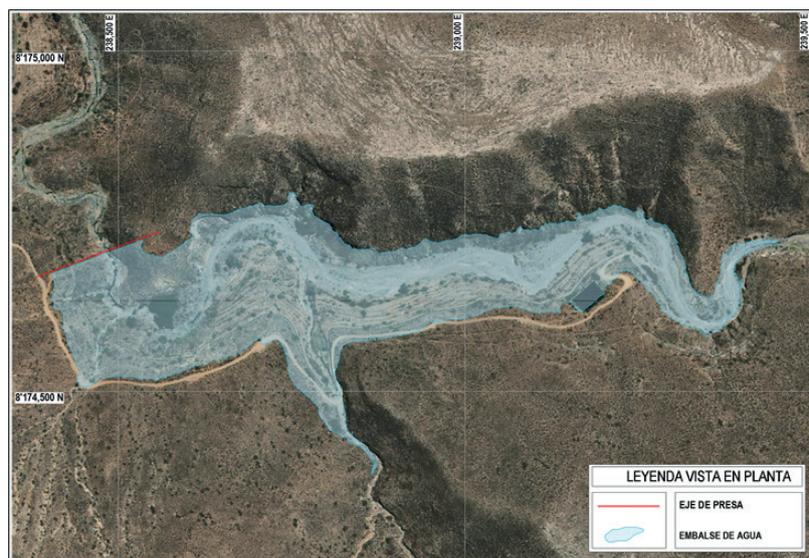
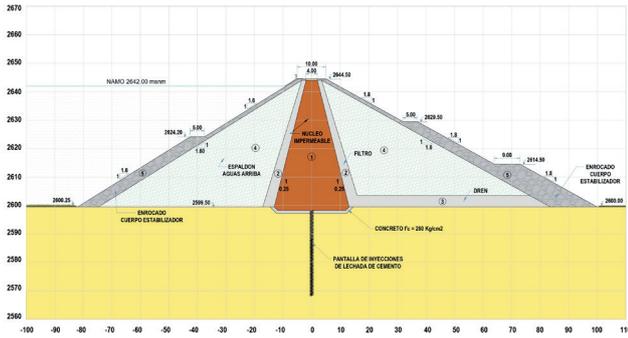


Figura 4. Vista en planta del embalse y eje de la presa Toma Grande  
Fuente: Quisca (2021)

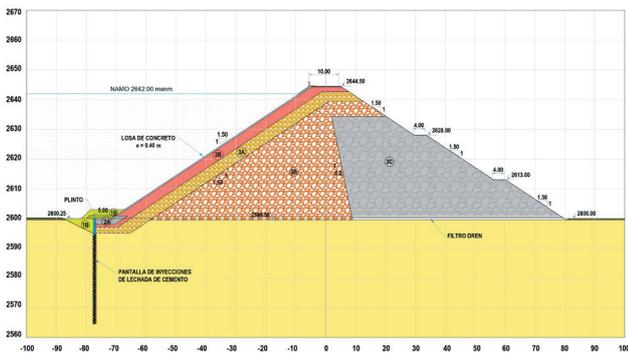


**Figura 5.** Sección típica de la presa TE  
Fuente: Elaboración propia

Niveles característicos y dimensiones de la presa:

- Nivel de coronamiento: 2644.50 msnm
- Altura máxima de la presa: 45.00 m
- Longitud total en la cresta: 148.50 m
- Ancho de la corona: 10.00 m
- Corona del núcleo: 4.00 m
- Talud sobre aguas arriba: 1. 6H:1V + 1 berma de 5 m
- Talud sobre aguas abajo: 1. 8H:1V + 2 bermas de 5 y 9 m
- Inyecciones impermeabilización: 15 m de profundidad

**Alternativa 2:** Presa de enrocado con pantalla de concreto en aguas arriba (CFRD)



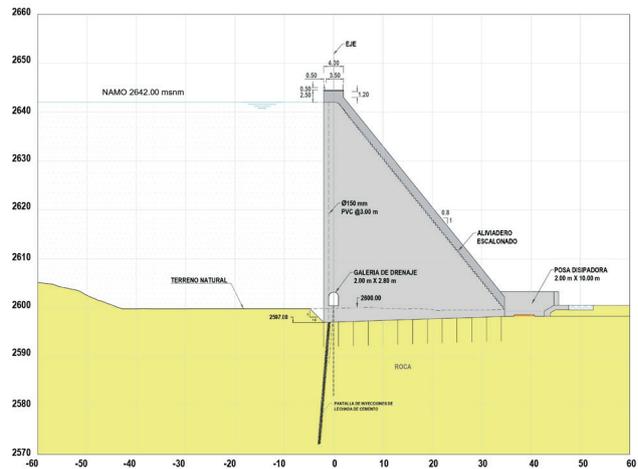
**Figura 6.** Sección típica de la presa CFRD  
Fuente: Elaboración propia

Niveles característicos y dimensiones de la presa:

- Nivel de coronamiento: 2644.50 msnm
- Altura máxima de la presa: 45.00 m

- Longitud total en la cresta: 148.5 m
- Ancho de la corona: 10.00 m
- Talud sobre aguas arriba: 1.5 H:1 V
- Talud sobre aguas abajo: 1.5H:1V + 2 bermas de 4 m
- Espesor de losa de concreto: 0.40 m
- Espesor de filtro dren: 1.50 m
- Plinto horizontal de 5 m de longitud
- Inyecciones impermeabilización: 15 m de profundidad

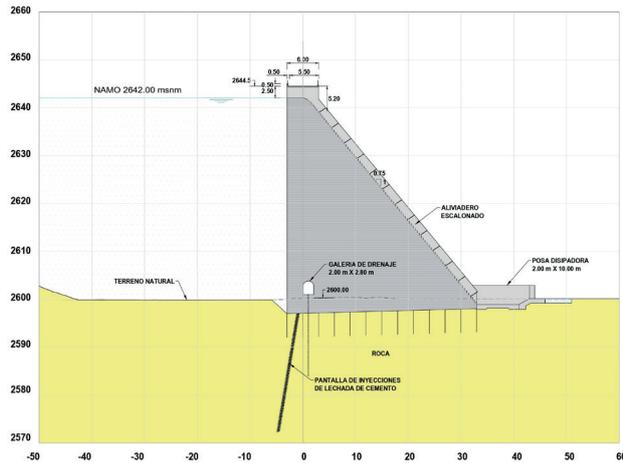
**Alternativa 3:** Presa de gravedad con concreto masivo (GCM)



**Figura 7.** Sección típica de la presa GCM  
Fuente: Elaboración propia

- Niveles característicos y dimensiones de la presa:
- Nivel de coronamiento: 2644.50 msnm
- Altura máxima de la presa: 47.50 m
- Longitud total en la cresta: 145.0 m
- Ancho de la corona: 4.00 m
- Talud sobre aguas arriba: vertical
- Talud sobre aguas abajo: 0.80 H:1 V
- Inyecciones de impermeabilización: 15 m de profundidad
- Aliviadero y toma de fondo en cuerpo de presa

**Alternativa 4:** Presa de Concreto Compactado con Rodillo (CCR)



**Figura 8.** Sección típica de la presa CCR

Fuente: Elaboración propia

Niveles característicos y dimensiones de la presa:

- Nivel de coronamiento: 2644.50 msnm
- Altura máxima de la presa: 47.50 m
- Longitud total en la cresta: 145.00 m
- Ancho de la corona: 6.00 m
- Talud sobre aguas arriba: vertical
- Talud sobre aguas abajo: 0.75 H:1 V
- Inyecciones impermeabilización: 15 m de profundidad
- Aliviadero y Toma de Fondo en cuerpo de presa

### 2.5 Definición de los criterios de evaluación

Se han establecido los criterios para definir el tipo óptimo de presa en función de los estudios básicos realizados en campo y de las alternativas planteadas. Tras una cuidadosa inspección, se consideraron los siguientes criterios, que a su vez se descomponen en una serie de subcriterios:

#### Topografía y condiciones geológicas (C1)

- Topografía de la cerrada
- Condiciones geotécnicas
- Geología estructural

#### Disponibilidad de materiales para el cuerpo de presa (C2)

- Disposición de canteras de agregados y materiales impermeables
- Distancia de ubicación de canteras

#### Obras conexas (C3)

- Aliviadero de excedencias
- Toma de fondo

#### Seguridad de la presa (C4)

- Sismicidad
- Rebose de flujo de agua sobre la cresta y cuerpo de la presa
- Inundación de centros poblados
- Afectación de grandes áreas de cultivo
- Peligro de sedimentación del embalse

#### Sistema de desvío (C5)

- Conducto de desvío de río a través del cuerpo de la presa
- Desvío de río a través de túnel de construcción

#### Procedimiento constructivo (C6)

- Avance de obra en función del calor de hidratación del concreto
- Tipos de presas similares proyectadas y construidas en el país y el exterior

#### Plazo de construcción (C7)

- Disposición de materiales
- Clima y tiempo disponible para la construcción
- Tecnología constructiva accesible
- Impacto ambiental

#### Costo de obra (C8)

- Altura de presa
- Disposición de materiales
- Tecnología constructiva
- Mano de obra calificada y no calificada disponible

### 2.6 Construcción del modelo de jerarquía

Una vez establecidas las alternativas, definidos y valorados todos los subcriterios correspondientes por los especialistas, realizamos un modelo del proceso, mediante un árbol de jerarquías.

Este árbol de jerarquías consta de 3 niveles, cuyos nudos son los criterios (primer nivel) y subcriterios (segundo nivel) establecidos, tal como se muestra en la Figura 9.

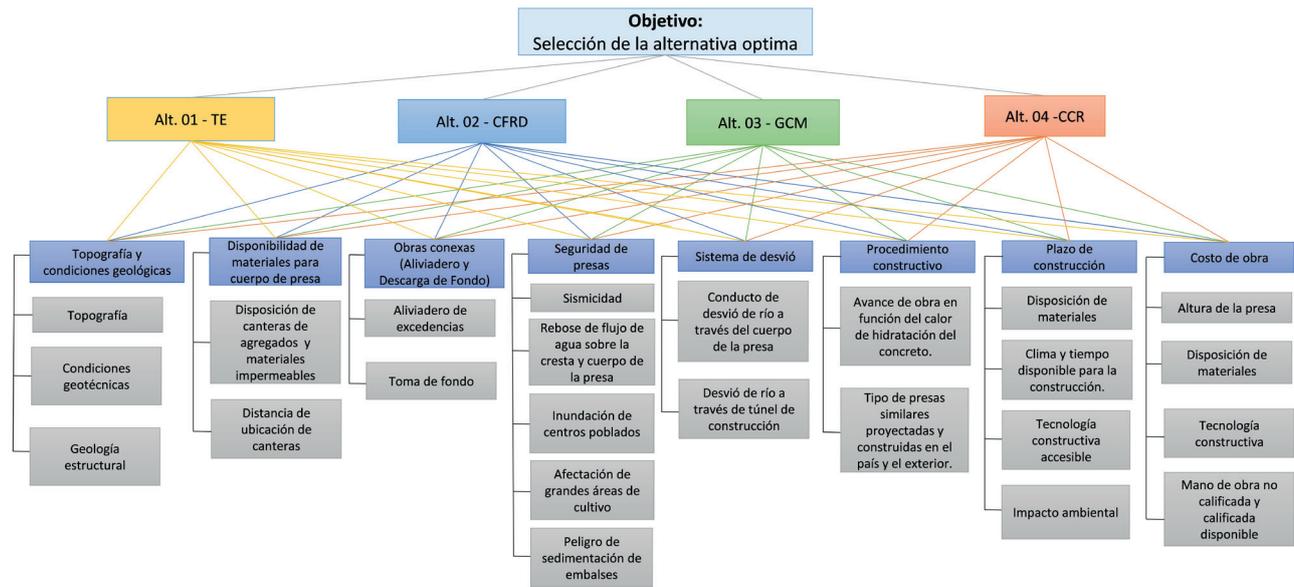


Figura 9. Construcción del Árbol de jerarquías del método AHP para la selección del tipo de presa  
Fuente: Elaboración propia

### III. RESULTADOS

#### 3.1 Ingreso de juicios y preferencias

Esta fase del método plantea un problema importante; ya que el resultado del análisis puede variar dependiendo de la ponderación o definición de los pesos respectivos.

#### Construcción de la matriz de comparaciones pareadas

Una vez construido el árbol de jerarquías, en la etapa siguiente comenzamos realizando la comparación en pares de los criterios, se atribuyen valores del 1 al 9, según la escala de Saaty, de acuerdo al grado de importancia del criterio 1 sobre el criterio 2. Si se diera el caso de que el segundo criterio tiene mayor importancia que el primer criterio, será 1/valor de importancia.

Respecto a lo mencionado, nos queda una comparación del nivel superior como se muestra en la Tabla 2:

A continuación, procedemos a dividir cada elemento de tal matriz entre la sumatoria de su columna, a esta matriz resultante se le denominará matriz de comparaciones pareadas normalizadas; ver Tabla 3. Luego se calcula el promedio (ponderación) de los elementos de cada fila de las prioridades relativas de los elementos que se están comparando.

A manera de verificar si los juicios insertados en la matriz son coherentes se procede a calcular el valor de la razón de consistencia, obteniendo un valor 0.08; el cual

es una señal de un nivel razonable de consistencia; por lo tanto, se continua con el análisis.

Una vez obtenido los coeficientes de ponderación, se realiza la comparación en pares de cada alternativa, dándole la importancia según los criterios y subcriterios analizados en los cuadros anteriores.

A continuación, se presentan los cuadros de comparaciones pareadas por alternativas y asignación de valores, según la escala de Saaty para la construcción de las matrices; ver Tabla 4.

#### 3.2 Síntesis de resultados

Una vez calculados los pesos de los criterios (vector promedio) en función de cada alternativa, procedemos a construir la matriz de prioridades, la cual está constituida por las alternativas. De esta última matriz, obtenemos los pesos globales de las alternativas en función a los criterios.

Finalmente, multiplicamos esta matriz por los pesos relativos de los criterios que se estén analizando, y se obtienen los porcentajes de priorización de cada alternativa; ver Tabla 5.

Por lo tanto, del cuadro anterior se tiene lo siguiente:

La alternativa 3 (presa de gravedad con concreto masivo), con una ponderación del 40%, es la más conveniente para la ejecución de la presa Toma Grande.

Tabla 2. Matriz de comparación de criterios

MATRIZ DE COMPARACIÓN DE CRITERIOS								
	Topografía y condiciones geológicas	Disponibilidad de materiales para cuerpo de presa	Obras conexas (Aliviadero y Toma F)	Seguridad de presas	Sistema de desvío de río	Procedimiento constructivo	Plazo de construcción	Costo de obra
Topografía y condiciones geológicas	1.00	6.00	3.00	1.00	4.00	4.00	7.00	4.00
Disponibilidad de materiales para cuerpo de presa	0.17	1.00	0.33	0.14	3.00	0.50	3.00	0.33
Obras conexas (Aliviadero y Toma de Fondo)	0.33	3.00	1.00	0.20	3.00	4.00	5.00	1.00
Seguridad de presas	1.00	7.00	5.00	1.00	7.00	5.00	9.00	5.00
Sistema de desvío de río	0.25	0.33	0.33	0.14	1.00	0.50	1.00	0.50
Procedimiento constructivo	0.25	2.00	0.25	0.20	2.00	1.00	5.00	0.33
Plazo de construcción	0.14	0.33	0.20	0.11	1.00	0.20	1.00	0.25
Costo de obra	0.25	3.00	1.00	0.20	2.00	3.00	4.00	1.00
SUMA	3.39	22.67	11.12	3.00	23.00	18.20	35.00	12.42

Tabla 3. Matriz de comparaciones pareadas normalizadas

	MATRIZ NORMALIZADA								PONDERACIÓN	AXP	Relación de consistencia	
Topografía y condiciones geológicas	0.29	0.26	0.27	0.33	0.17	0.22	0.20	0.32	0.26	2.31	$CI=(nmax-n)/(n-1)$	0.12
Disponibilidad de materiales para cuerpo de presa	0.05	0.04	0.03	0.05	0.13	0.03	0.09	0.03	0.06	0.45	$RI=1.98*(n-2)/n$	1.49
Obras conexas (Aliviadero y Toma de Fondo)	0.10	0.13	0.09	0.07	0.13	0.22	0.14	0.08	0.12	1.07	$CR=CI/RI$	0.08
Seguridad de presas	0.29	0.31	0.45	0.33	0.30	0.27	0.26	0.40	0.33	2.94	Ponderacion Razonable!	
Sistema de desvío de río	0.07	0.01	0.03	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.32		
Procedimiento constructivo	0.07	0.09	0.02	0.07	0.09	0.05	0.14	0.03	0.07	0.59		
Plazo de construcción	0.04	0.01	0.02	0.04	0.04	0.01	0.03	0.02	0.03	0.22		
Costo de obra	0.07	0.13	0.09	0.07	0.09	0.16	0.11	0.08	0.10	0.91		
SUMA									1.00	8.81		

Tabla 4. Comparaciones pareadas por alternativas

CRITERIO 1: Topografía y Condiciones Geológicas									
	PRESA TE	PRESA CFRD	PRESA GCM	PRESA CCR	Matriz Normalizada				Vector Promedio
PRESA TE	1.00	0.25	0.20	0.20	0.07	0.02	0.08	0.08	0.06
PRESA CFRD	4.00	1.00	0.20	0.20	0.27	0.09	0.08	0.08	0.13
PRESA GCM	5.00	5.00	1.00	1.00	0.33	0.44	0.42	0.42	0.40
PRESA CCR	5.00	5.00	1.00	1.00	0.33	0.44	0.42	0.42	0.40
SUMA	15.0	11.3	2.4	2.4					1.00

CRITERIO 2: Disponibilidad de materiales para cuerpo de presa									
	PRESA TE	PRESA CFRD	PRESA GCM	PRESA CCR	Matriz Normalizada				Vector Promedio
PRESA TE	1.00	1.00	3.00	3.00	0.38	0.38	0.41	0.30	0.36
PRESA CFRD	1.00	1.00	3.00	3.00	0.38	0.38	0.41	0.30	0.36
PRESA GCM	0.33	0.33	1.00	3.00	0.13	0.13	0.14	0.30	0.17
PRESA CCR	0.33	0.33	0.33	1.00	0.13	0.13	0.05	0.10	0.10
SUMA	2.7	2.7	7.3	10.0					1.00

CRITERIO 3: Obras conexas de la presa (Aliviadero y Descarga de Fondo)									
	PRESA TE	PRESA CFRD	PRESA GCM	PRESA CCR	Matriz Normalizada				Vector Promedio
PRESA TE	1.00	1.00	0.14	0.14	0.06	0.06	0.08	0.04	0.06
PRESA CFRD	1.00	1.00	0.14	0.14	0.06	0.06	0.08	0.04	0.06
PRESA GCM	7.00	7.00	1.00	2.00	0.44	0.44	0.56	0.61	0.51
PRESA CCR	7.00	7.00	0.50	1.00	0.44	0.44	0.28	0.30	0.36
SUMA	16.0	16.0	1.8	3.3					1.00

CRITERIO 4: Seguridad de la presa									
	PRESA TE	PRESA CFRD	PRESA GCM	PRESA CCR	Matriz Normalizada				Vector Promedio
PRESA TE	1.00	0.20	0.11	0.11	0.04	0.02	0.06	0.03	0.04
PRESA CFRD	5.00	1.00	0.20	0.20	0.21	0.09	0.11	0.06	0.12
PRESA GCM	9.00	5.00	1.00	2.00	0.38	0.45	0.55	0.60	0.49
PRESA CCR	9.00	5.00	0.50	1.00	0.38	0.45	0.28	0.30	0.35
SUMA	24.0	11.2	1.8	3.3					1.00

CRITERIO 5: Sistema de desvío del río durante la construcción									
	PRESA TE	PRESA CFRD	PRESA GCM	PRESA CCR	Matriz Normalizada				Vector Promedio
PRESA TE	1.00	0.50	0.14	0.14	0.06	0.04	0.06	0.06	0.06
PRESA CFRD	2.00	1.00	0.20	0.20	0.12	0.09	0.09	0.09	0.09
PRESA GCM	7.00	5.00	1.00	1.00	0.41	0.43	0.43	0.43	0.43
PRESA CCR	7.00	5.00	1.00	1.00	0.41	0.43	0.43	0.43	0.43
SUMA	17.0	11.5	2.3	2.3					1.00

CRITERIO 6: Procedimiento constructivo									
	PRESA TE	PRESA CFRD	PRESA GCM	PRESA CCR	Matriz Normalizada				Vector Promedio
PRESA TE	1.00	3.00	6.00	6.00	0.60	0.68	0.49	0.38	0.54
PRESA CFRD	0.33	1.00	5.00	5.00	0.20	0.23	0.41	0.31	0.29
PRESA GCM	0.17	0.20	1.00	4.00	0.10	0.05	0.08	0.25	0.12
PRESA CCR	0.17	0.20	0.25	1.00	0.10	0.05	0.02	0.06	0.06
SUMA	1.7	4.4	12.3	16.0					1.00

CRITERIO 7: Plazo de tiempo disponible para la construcción de la presa									
	PRESA TE	PRESA CFRD	PRESA GCM	PRESA CCR	Matriz Normalizada				Vector Promedio
PRESA TE	1.00	0.20	0.14	0.14	0.05	0.02	0.03	0.09	0.05
PRESA CFRD	5.00	1.00	0.20	0.14	0.25	0.08	0.05	0.09	0.12
PRESA GCM	7.00	5.00	1.00	0.33	0.35	0.38	0.23	0.21	0.29
PRESA CCR	7.00	7.00	3.00	1.00	0.35	0.53	0.69	0.62	0.55
SUMA	20.0	13.2	4.3	1.6					1.00

CRITERIO 8: Costo de obra									
	PRESA TE	PRESA CFRD	PRESA GCM	PRESA CCR	Matriz Normalizada				Vector Promedio
PRESA TE	1.00	0.33	0.20	0.20	0.07	0.03	0.06	0.11	0.07
PRESA CFRD	3.00	1.00	0.20	0.20	0.21	0.09	0.06	0.11	0.12
PRESA GCM	5.00	5.00	1.00	0.50	0.36	0.44	0.29	0.26	0.34
PRESA CCR	5.00	5.00	2.00	1.00	0.36	0.44	0.59	0.53	0.48
SUMA	14.0	11.3	3.4	1.9					1.00

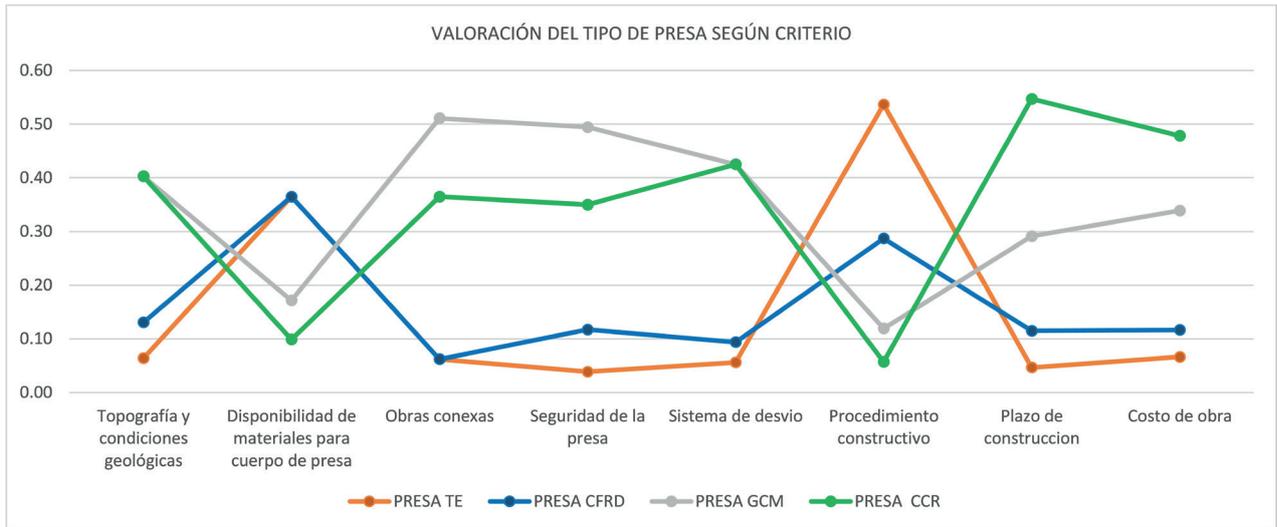


Figura 10. Valoración del eje óptimo de presa según criterio  
Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Matriz de prioridades

CRITERIO/ ALTERNATIVA	Topografía y condiciones geológicas	Disponibilidad de materiales para cuerpo de presa	Obras conexas	Seguridad de la presa	Sistema de desvío	Procedimiento constructivo	Plazo de construcción	Costo de obra	PRIORIZACIÓN
PRESA TE	0.06	0.36	0.06	0.04	0.06	0.54	0.05	0.07	10%
PRESA CFRD	0.13	0.36	0.06	0.12	0.09	0.29	0.12	0.12	14%
PRESA GCM	0.40	0.17	0.51	0.49	0.43	0.12	0.29	0.34	40%
PRESA CCR	0.40	0.10	0.36	0.35	0.43	0.06	0.55	0.48	35%
PONDERACION	0.26	0.06	0.12	0.33	0.04	0.07	0.03	0.10	100%

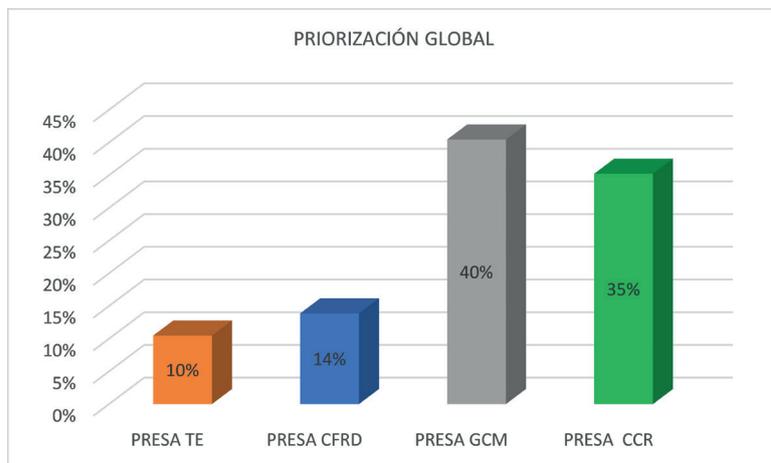


Figura 11. Porcentaje de priorización global  
Fuente: Elaboración propia

## IV. DISCUSIÓN

De los 8 criterios elegidos (Topografía y condiciones geológicas; Disponibilidad de materiales para el cuerpo de presa; Obras conexas; Seguridad de presa; Sistema de desvío; Procedimiento constructivo; Plazo de construcción; y Costo de obra), el criterio más limitante y de gran importancia al momento de seleccionar la presa idónea es la Seguridad de la presa, con una ponderación del 33%; lo cual tiene sentido. Estas infraestructuras almacenan una gran cantidad de m<sup>3</sup> de agua en el embalse, de modo que, si no se controlan con regularidad y atiende las normas establecidas, podría desencadenar en el fallo estructural de la obra y provocar un desastre con daños irreversibles. El segundo criterio más determinante es la Topografía y condiciones geológicas, con una ponderación del 26%; este factor es considerado de vital importancia para determinar la tipología de presa más adecuada, ya que las condiciones de la fundación dependen de la geología y del espesor de los estratos que van a soportar el peso de la presa, de su inclinación, de su permeabilidad y relación con los estratos subyacentes, de las fallas existentes y de las fisuras. Los otros factores con un peso importante son: Obras conexas y Costo de obras, con una ponderación de 12% y 10%, respectivamente, que están relacionados directamente con el costo de inversión; que siempre será un factor limitante por la gran magnitud de inversión económica que demandan estas infraestructuras.

Martínez Ruiz (2019), en su investigación titulada: *El problema de la selección del tipo de presa en un proyecto*, obtiene como resultado una valoración mayor para la variable Seguridad (37%); seguida de las variables Funcionalidad y Costo (21%), lo cual refuerza los resultados obtenidos en esta investigación.

De las cuatro alternativas propuestas, según los criterios considerados para el análisis, la presa GCM tiene la mayor prioridad (40%), seguida de la presa RCC (35%); lo cual es lógico, ya que este tipo de presas presenta mejores prestaciones en cuanto a la necesidad de poder hacer frente a condiciones extremas de crecida o sismo; permite la construcción del aliviadero escalonado (disipación eficiente de la energía) en el cuerpo de la presa y el conducto de desvío puede acondicionarse a través del cuerpo de la presa, lo que reduce considerablemente el costo de obra de la misma. Las otras dos alternativas requieren costosos sistemas de desvío de agua durante la construcción de la presa, y las obras relacionadas, como el aliviadero y la descarga de fondo, que deben ubicarse fuera del cuerpo de la presa y requieren costosas estructuras.

## V. CONCLUSIONES

La aplicación del Método AHP en el presente estudio, ha permitido obtener, de manera clara y precisa, el tipo de alternativa óptima para la presa Toma Grande. Para el caso estudiado, se emplearon 8 variables principales (denominados criterios) y 4 alternativas. La herramienta multicriterio desarrollada ha permitido transformar esta selección en un proceso sencillo y estandarizado, con resultados muy puntuales.

El método de Análisis Jerárquico (AHP) es multicriterio bastante práctico, posee fundamentos matemáticos, es una herramienta útil para problemas de toma de decisiones en proyectos complejos, que dependen de muchas variables o factores. Se requiere de evaluadores con vastos conocimientos y experiencia en el tema, que puedan definir las características de las alternativas, los criterios y subcriterios, para realizar la evaluación y evitar la subjetividad de los criterios de evaluación. El modelo creado para el presente estudio tiene una gran capacidad de reutilización y permite agregar nuevas alternativas, criterios y subcriterios.

En el caso de proyectos importantes que requieran de una gran inversión, como la construcción de una presa, es vital tomar en cuenta la participación de todos los factores influyentes al momento de seleccionar la tipología de presa adecuada para su diseño. Por ello, se hace imprescindible el empleo del método multicriterio, por la complejidad e importancia de nuestro problema.

## VI. AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la FIGMMG de la Universidad Nacional Mayor De San Marcos; a mi asesor de tesis el Dr. Samuel Quisca Astocahuana por las sugerencias y aportes para el avance de la tesis de investigación; y a la empresa SQ&ICC, por las oportunidades e incentivos para el desarrollo de la presente investigación, así como por el apoyo con el software y hardware de alto desempeño computacional.

## VII. REFERENCIAS

- AlJubaely, R., Soliman, A., Hamed, K., y El Zawahr, A. (2016). *Dam Site Selection Using GIS-Based AHP-OWA Approach Case Study: El Kebir Shemaly River, Syria*. [Revista del sector de ingeniería de la Universidad de Al Azhar Vol. 11, N° 39, abril de 2016, 447-457]. [https://jaes.journals.ekb.eg/article\\_19446.html](https://jaes.journals.ekb.eg/article_19446.html)
- Arquero, A., Álvarez, M., y Martínez, E. (2009). *Decision Management Making by AHP (Analytical Hierarchy Process) through GIS data*. IEEE Latin America Transactions, Vol. 7, N° 1, March 2009, 101-106
- [https://www.researchgate.net/publication/224567351\\_Decision\\_Management\\_Making\\_by\\_AHP\\_Analytical\\_Hierarchy\\_Process\\_through\\_GIS\\_data](https://www.researchgate.net/publication/224567351_Decision_Management_Making_by_AHP_Analytical_Hierarchy_Process_through_GIS_data)
- Jozaghi, A., Alizadeh, B., Hatami, M., Flood, I., Khorrami, M., Khodaei, N., y Tousi, E. (2018). *A Comparative Study of the AHP and TOPSIS Techniques for Dam Site Selection Using GIS: A Case Study of Sistan and Baluchestan Province, Iran*. [Artículo Geociencias 2018, 8 (12), 494]. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120494>
- Dai, X. (2016) *Dam Site Selection Using an Integrated Method of AHP and GIS for Decision Making Support in Bortala, Northwest China*. Lund University, Lund. [https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers\\_2016/msc/gem/dai.pdf](https://webapps.itc.utwente.nl/librarywww/papers_2016/msc/gem/dai.pdf)
- Martínez Ruiz, F. J. (2019). *El problema de la selección del tipo de presa en un proyecto: criterios y métodos de apoyo a la*

*toma de decisiones*. Universidad Politécnica de Cartagena. <http://hdl.handle.net/10317/8145>

Quisca, S.I. (2021). *Expediente técnico del proyecto mejoramiento del servicio de agua para riego – Represa Toma Grande – Sector Toma Grande, Mollebaya, Arequipa, Perú*.

Saaty, TL (2008). *Toma de decisiones con el proceso de jerarquía analítica*. Revista Internacional de Ciencias de Servicios, 1, 83. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>

Toskano Hurtado, G. B. (2005). *El Proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ciencias Matemáticas. [https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/monografias/basic/toskano\\_hg/toskano\\_hg.htm](https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/monografias/basic/toskano_hg/toskano_hg.htm)

Tyndall Centre for Climate Change Research (2004). Adger, W. N., Brooks, N., Bentham, G., Agnew, M., Eriksen, S. *New Indicators of Vulnerability and Adaptive Capacity*. Tyndall Project IT1.11. Technical Report 7. Reino Unido: Tyndal Centre.

Zapata Cruz J. D. Et al. (2019). *Propuesta metodológica para la selección óptima del tipo de presa mediante el uso de técnicas multicriterio*. [Artículo, Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica]. <https://www.researchgate.net/publication/339149517>

#### Contribución de autoría

Conceptualización: Hulinho Yordy Arbaiza Ocospoma; Curación de datos: Samuel Ismael Quisca Astocahuana; Análisis formal: Hulinho Yordy Arbaiza Ocospoma; Adquisición de fondos: Samuel Ismael Quisca Astocahuana; Investigación: Hulinho Yordy Arbaiza Ocospoma; Metodología: Hulinho Yordy Arbaiza Ocospoma; Administración del proyecto: Samuel Ismael Quisca Astocahuana; Recursos: Hulinho Yordy Arbaiza Ocospoma; Software: Hulinho Yordy Arbaiza Ocospoma; Supervisión: Samuel Ismael Quisca Astocahuana; Validación: Hulinho Yordy Arbaiza Ocospoma; Visualización: Hulinho Yordy Arbaiza Ocospoma; Redacción - borrador original: Hulinho Yordy Arbaiza Ocospoma; Redacción - revisión y edición: Samuel Ismael Quisca Astocahuana.

#### Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.