

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**MODELACIÓN HIDRÁULICA EN 2D DEL TRAMO DE UN RÍO, PARA LA
EVALUACIÓN DE SU POTENCIAL HIDROKINÉTICO**

FRANCISCA MARAGAÑO MARAGAÑO.¹
MARCO SOTO ÁLVAREZ.²

RESUMEN

El presente trabajo evalúa el potencial hidrocínético del Río Chico en Puerto Montt, mediante modelación hidráulica en 2D con HEC-RAS 6.6. Se levantó la geometría del cauce con batimetría y topografía aérea, generando un modelo digital de elevación de alta resolución. Se construyó una curva de descarga con datos de aforos y sensores de presión, con excelente ajuste ($R^2 = 0,999$), lo que permitió estimar un hidrograma continuo para abril-junio de 2025. El modelo fue calibrado ajustando el coeficiente de Manning, reproduciendo fielmente las condiciones de flujo. El análisis del potencial hidrocínético muestra un valor promedio de 0,54 kW y un valor característico de 1,04 kW, correspondiente al percentil 90. Se concluye que la velocidad del flujo es el parámetro más determinante y que la modelación hidráulica 2D combinada con medición en terreno es eficaz para caracterizar este tipo de recurso energético.

¹Estudiante Ingeniería Civil, Universidad de Los Lagos - email: franciscamaraganomaragano@gmail.com

² Profesor Titular, Departamento Ciencias de la Ingeniería, Universidad de Los Lagos - email: marco.soto@ulagos.cl

1. INTRODUCCIÓN

La generación de energía en zonas rurales y remotas enfrenta importantes desafíos debido a los altos costos y dificultades logísticas para implementar infraestructura convencional. En este contexto, la energía hidrocinética surge como una alternativa viable, ya que aprovecha la velocidad del agua en ríos y canales para generar electricidad sin necesidad de construir represas u otras grandes obras civiles.

En la Región de Los Lagos, más de 4.000 viviendas carecen de acceso a energía eléctrica, según el Mapa de Vulnerabilidad del Ministerio de Energía (2019). Esta situación, agravada por la compleja geografía del territorio, evidencia la necesidad de soluciones descentralizadas y sostenibles. Los ríos de la región presentan altos gradientes y velocidades, lo que los convierte en candidatos ideales para la instalación de turbinas hidrocinéticas.

Este estudio busca estimar el potencial hidrocinético de un tramo del Río Chico, ubicado en Chamiza, comuna de Puerto Montt como se muestra en la Figura 1, mediante modelación hidráulica 2D con HEC-RAS. A partir de mediciones de terreno y simulaciones numéricas, se obtienen distribuciones espaciales de velocidades y profundidades para distintos caudales, lo que permite identificar zonas óptimas para la generación de energía con una miniturbina hidrocinética.

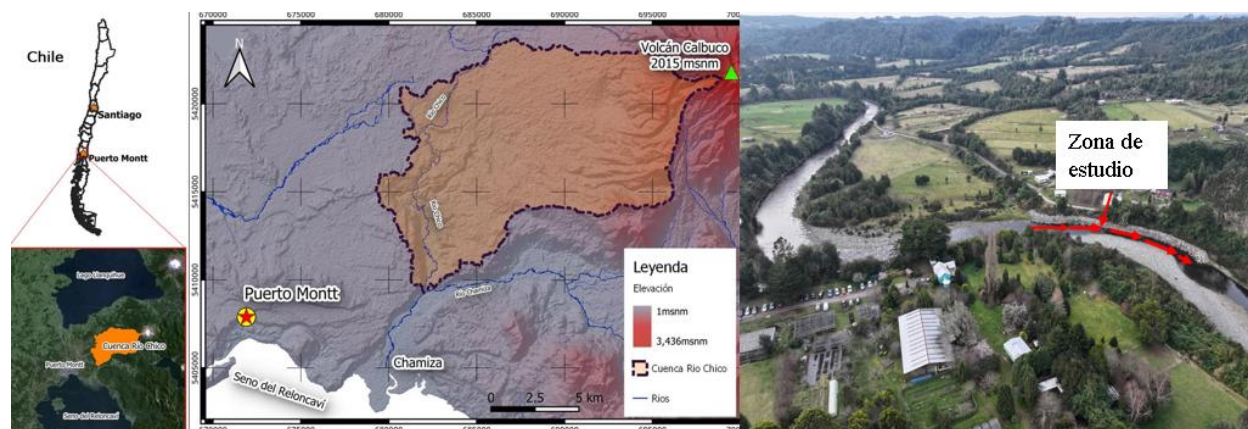


Figura 1. Sitio de estudio, Río Chico-Sector Chamiza- Puerto Montt.

2. OBJETIVO GENERAL

Modelación en 2D del tramo de un río, para la evaluación de su potencial hidrocinético.

3. ANTECEDENTES

El aprovechamiento de la energía hidrocinética requiere una caracterización detallada del comportamiento del flujo en cauces naturales. Para ello, la modelación hidráulica en dos dimensiones (2D) ha sido una herramienta clave, ya que permite representar con mayor precisión las velocidades y profundidades del flujo, así como su interacción con la morfología del cauce.

Esta información resulta fundamental para determinar las ubicaciones óptimas para la instalación de turbinas hidrocinéticas (Bladé i Castellet et al., (2014)).

Diversos modelos computacionales como HEC-RAS, TELEMAC 2D, IBER y Delft3D han sido ampliamente utilizados en estudios de hidráulica ambiental, transporte de sedimentos, análisis de inundaciones y evaluación del potencial energético. HEC-RAS, desarrollado por el USACE, es uno de los más utilizados debido a su gratuidad, interfaz amigable y capacidad para integrar datos topográficos y batimétricos. Ha demostrado ser eficaz en simulaciones de caudal, validaciones con datos de campo y estudios de riesgo hídrico (Kirby et al., (2022); Zeiger & Hubbart, (2021)).

TELEMAC 2D, desarrollado por el EDF en Francia, permite simular con alta precisión procesos costeros y fluviales, mientras que IBER, desarrollado en España, se ha especializado en el análisis de flujos urbanos e inundaciones. Delft3D, por su parte, destaca por su capacidad tridimensional para representar la dinámica de estuarios, costas y ríos, integrando calidad de agua y transporte de sedimento.

3.1 Potencial de la energía hidrocínética

La energía hidrocínética ha sido identificada como una fuente renovable prometedora, particularmente en regiones rurales con difícil acceso a la red eléctrica. Su principal ventaja es que no requiere grandes obras civiles, por lo que tiene un bajo impacto ambiental. Estudios en Turquía (Karakaya et al., 2024), Lituania (Punys et al., 2015) y Estados Unidos (Gutenson et al., 2023) han evaluado el potencial energético de distintos cauces, empleando modelos como HEC-RAS y SWAT para identificar tramos con velocidades superiores a 0,99 m/s y densidades de potencia de hasta 26 kW/m². De manera complementaria, Garrett y Cummins (2005) analizaron el límite teórico del aprovechamiento de corrientes de marea en canales, destacando la diferencia entre el potencial máximo disponible y la fracción realmente extraíble mediante turbinas hidrocínéticas.

En Chile, la Región de Los Lagos destaca por sus condiciones geográficas favorables, como el Río Maullín con caudales promedio de 100 m³/s, lo que sugiere un alto potencial hidrocínético (Biblioteca del Congreso Nacional, 2021). Sin embargo, el desarrollo de esta tecnología aún enfrenta desafíos, como la falta de turbinas adaptadas a caudales variables, vegetación flotante y condiciones de baja profundidad (Kirby et al., 2022).

La tendencia hacia turbinas de altura cero ha reducido las exigencias estructurales y el impacto en el ecosistema. En este sentido, la modelación bidimensional con herramientas como HEC-RAS resulta esencial para capturar la distribución espacial de velocidades y estimar de forma confiable la densidad de potencia disponible en distintas secciones del cauce.

4. MARCO TEÓRICO

La evaluación del potencial hidrocínético en un cauce natural se fundamenta en dos pilares teóricos principales: los principios de la mecánica de fluidos que describen la energía contenida en el agua en movimiento, y las ecuaciones de la hidráulica computacional que permiten modelar y predecir el comportamiento del flujo en dos dimensiones.

4.1 Energía Hidrocinética y su Cuantificación

La energía hidrocinética es, en esencia, una manifestación de la energía cinética, es decir, la energía que un cuerpo posee debido a su movimiento. Para una masa de agua que fluye a través de una sección transversal de un río, esta energía puede ser cuantificada para estimar la potencia teórica que podría ser extraída. La ecuación fundamental que describe esta potencia, como señalan Cengel y Cimbala (2019), es:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3 \quad (1)$$

Donde P es la potencia en Watts, ρ es la densidad del agua (1000 kg/m³), A es el área de barrido en m² y V es la velocidad del agua en m/s.

Es importante destacar que esta ecuación representa la potencia total disponible en el agua. La potencia realmente extraíble será menor, debido a límites teóricos y a las eficiencias mecánicas y eléctricas propias de la turbina utilizada.

5. METODOLOGÍA

La metodología del estudio se enfoca en la modelación hidráulica en dos dimensiones (2D) del tramo del Río Chico, con el objetivo de evaluar su potencial hidrocinético. Para lograr este objetivo, se estructuró el trabajo en tres grandes etapas: recolección de datos en terreno, desarrollo del modelo computacional y evaluación del potencial hidrocinético. Cada una de estas etapas fue desarrollada cuidadosamente para garantizar una representación precisa del comportamiento hidráulico del cauce durante eventos de crecida.

5.1 Recolección de datos en terreno

La primera fase consistió en el levantamiento batimétrico y topográfico detallado del tramo de estudio. La batimetría se enfocó en medir el perfil del lecho del río, utilizando un taquímetro para registrar cotas de elevación en intervalos máximos de 5 m, definiendo con precisión las variaciones de pendiente del fondo del cauce. Se establecieron secciones transversales perpendiculares al eje del río, asegurando una cobertura homogénea.

La Figura 2, representa la batimetría del Río Chico, en donde los puntos azules representan las mediciones batimétricas del cauce, mientras que los puntos rojos corresponden a las dianas utilizadas como puntos de control para la georreferenciación del proyecto.

LEVANTAMIENTO DE BATIMETRÍA RÍO CHICO

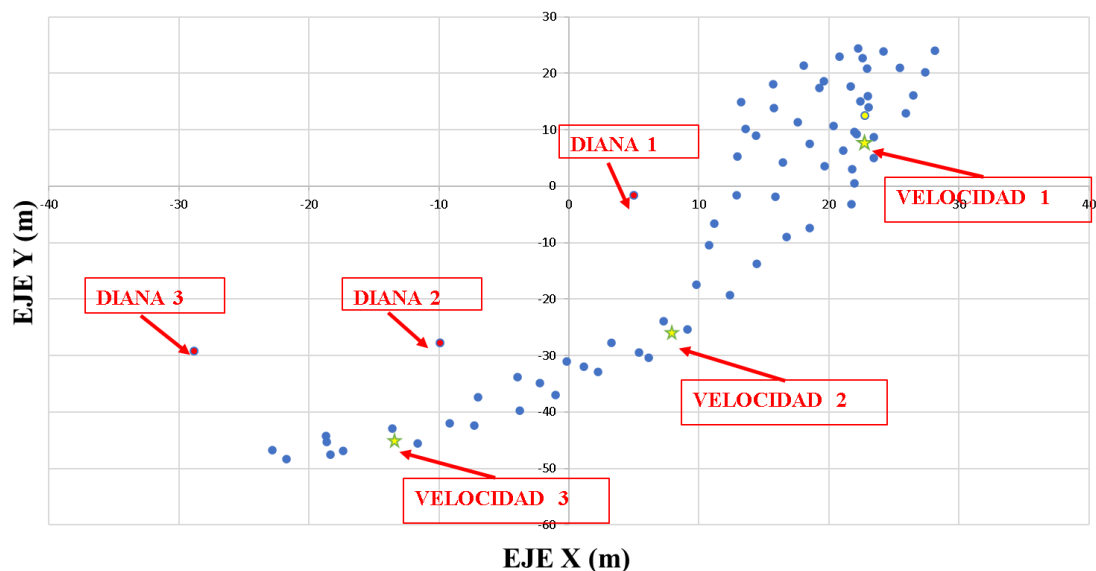


Figura 2. Levantamiento batimétrico del tramo de estudio en Río Chico, Puerto Montt.

La topografía de la planicie de inundación se levantó mediante un dron DJI Mavic 3 Pro, cuyas imágenes fueron procesadas en Pix4D Matic para generar una nube de puntos y un modelo digital del terreno (DEM). Para integrar este levantamiento aéreo con la batimetría terrestre, se establecieron tres puntos de control georreferenciados con dianas, permitiendo la alineación precisa de ambos conjuntos de datos.

Posteriormente, la nube de puntos se depuró en Autodesk ReCap, eliminando vegetación y la superficie de agua para obtener un modelo limpio de las riberas. Finalmente, los datos topográficos y batimétricos se integraron en Autodesk Civil3D, generando un DEM unificado con resolución de 1 m que sirvió como base para la modelación hidráulica.

5.2 Campañas de Medición de Caudal

Se realizaron cuatro aforos entre abril y junio de 2025 mediante el método área-velocidad, dividiendo la sección transversal en 11 segmentos donde se midieron velocidades con correntómetro y áreas con métodos trapezoidal y rectangular. Estos datos, complementados con registros climáticos y del cauce, permitieron caracterizar el régimen hidrológico y generar la curva de descarga para la modelación hidráulica.

5.3 Curva de descarga y Sensores de presión

La curva de descarga se elaboró mediante el método altura-gasto, integrando datos de sensores de presión (Levellogger y Barologger) y aforos para establecer una relación robusta entre nivel y caudal mediante regresión no lineal. El monitoreo continuo permitió validar el modelo hidráulico y caracterizar el comportamiento dinámico del río durante el período de estudio.

5.4 Modelación hidráulica con HEC-RAS 2D

Se implementó un modelo hidráulico 2D en HEC-RAS utilizando un DEM de 1 m de resolución y coeficientes de rugosidad de Manning. La malla computacional se configuró con celdas de 1×1 m, mientras que el paso temporal de 1.43 s se determinó mediante el criterio de Courant para garantizar estabilidad numérica. Esta configuración permitió capturar detalladamente la morfología del lecho y la dinámica del flujo.

En la Figura 3 se muestra la malla computacional de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ utilizada en HEC-RAS 2D sobre el tramo de estudio del Río Chico. Esta resolución permitió representar de manera detallada las variaciones morfológicas y capturar zonas hidráulicamente relevantes.

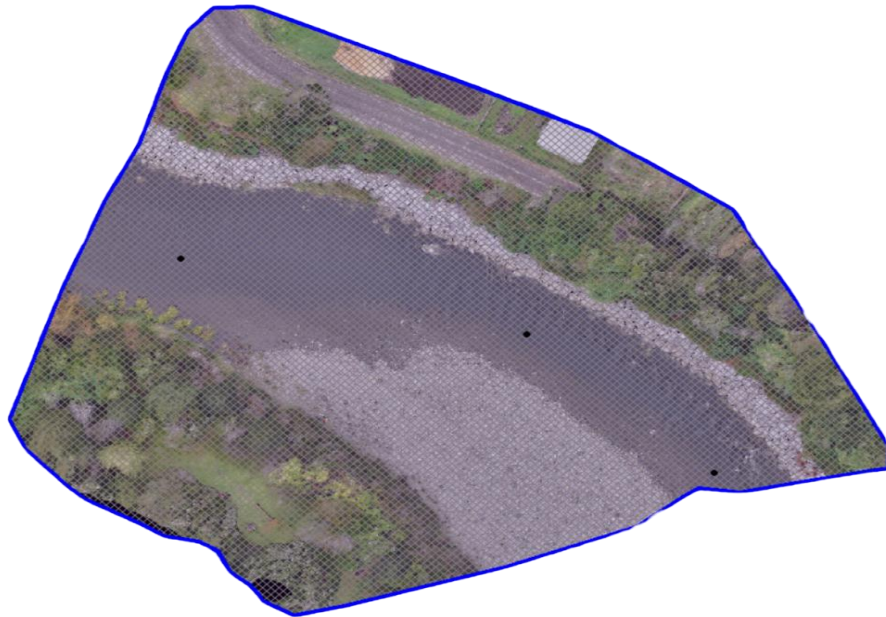


Figura 3. Malla computacional de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ utilizada en HEC-RAS 2D sobre el tramo del Río Chico delimitado en color azul.

5.5 Calibración del modelo

El modelo fue calibrado comparando velocidades simuladas en tres puntos con mediciones obtenidas en terreno. Se ejecutaron múltiples simulaciones variando los valores de Manning por tipo de cobertura del terreno (aguas abiertas, tierras áridas, vegetación), seleccionando el conjunto que generó el menor error porcentual promedio. La estrategia de calibración siguió una estructura iterativa y sistemática.

Este enfoque iterativo garantizó una representación fiel del flujo en el tramo. La estrategia de calibración se apoyó en criterios cuantitativos de error, lo que permitió objetivar el ajuste del modelo a las condiciones reales observadas. Se emplearon herramientas internas de HEC-RAS para analizar diferencias en los perfiles y velocidades.

5.6 Evaluación del Potencial Hidrocinético

Una vez calibrado el modelo, se utilizó la herramienta Raster Calculator en RAS Mapper para calcular el potencial hidrocínético celda por celda. El potencial hidrocínético se obtuvo para cada uno de los pasos de tiempo obtenidos con HEC-RAS, utilizando los rásteres de velocidad y profundidad instantánea obtenidos de la modelación. En cada celda se representa el área de flujo transversal por su base horizontal (1 m) y la altura de agua variable en el tiempo, la que, para efectos de este estudio, representa el área máxima de barrido A disponible dentro de la ecuación (1).

Debido a lo anterior, es importante precisar que lo que se está calculando corresponde al potencial máximo disponible en unidades de kW. Dado que este estudio no considera el diseño de una turbina en particular, no se considera el área de barrido de un rotor en específico, sino que se trabajó con el área hidráulica disponible del cauce. Esta precisión es esencial para interpretar correctamente que los resultados corresponden al potencial teórico máximo del tramo modelado y no a la energía que entregaría un dispositivo específico.

Posteriormente, se seleccionó el percentil 90 del potencial hidrocínético como criterio de análisis. Esta estrategia robusta permite evitar sesgos por valores extremos o atípicos, enfocándose en las zonas con mayor potencial sostenido. El percentil 90 representa una medida conservadora y confiable.

Finalmente, se analizaron los resultados de la simulación para distintos escenarios de caudal, lo que permitió entender la sensibilidad del potencial hidrocínético ante cambios en el régimen fluvial. Esta información es esencial para dimensionar adecuadamente una futura instalación energética en el tramo analizado y para estimar su rendimiento durante distintos periodos del año.

6. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en este estudio permiten caracterizar de forma precisa y multidimensional el comportamiento hidráulico del tramo del Río Chico modelado, así como cuantificar de manera robusta su potencial hidrocínético en diferentes escenarios de caudal operativo.

7.1 Validación geométrica y calidad del modelo

El modelo de elevación digital (DEM) generado, que fusionó datos batimétricos de alta precisión con topografía aérea obtenida por un dron, fue fundamental para crear una representación continua y detallada del cauce principal y sus riberas. El uso del dron demostró ser una estrategia altamente eficaz para cubrir zonas de difícil acceso, garantizando una cobertura topográfica completa. El post-procesamiento de los datos en Autodesk ReCap permitió un filtrado exitoso de la lámina de agua, aislando con claridad la morfología del lecho del río, un paso crítico para la exactitud del modelo hidráulico.

El mallado computacional, con una resolución fina de 1 metro, fue clave para capturar con un alto nivel de detalle las características morfológicas del lecho. Elementos como zonas de estrechamiento, la formación de islas de sedimento y la irregularidad de los bordes, que actúan como controles hidráulicos naturales, fueron definidos con precisión. Esta detallada representación

morfológica es la que influye directamente en la distribución espacial de las velocidades y profundidades del flujo, permitiendo una simulación más realista y fiable.

6.2 Comportamiento del flujo

La curva de descarga, desarrollada a partir de los aforos sistemáticos realizados en terreno, exhibió un ajuste estadístico casi perfecto, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.999 como se muestra en la Figura 4. Este resultado no solo valida la excelente correlación entre la altura del agua y el caudal, sino que también confirma la fiabilidad del método combinado de sensores de presión y aforos con correntómetro para caracterizar la hidrología en el perfil de control seleccionado.

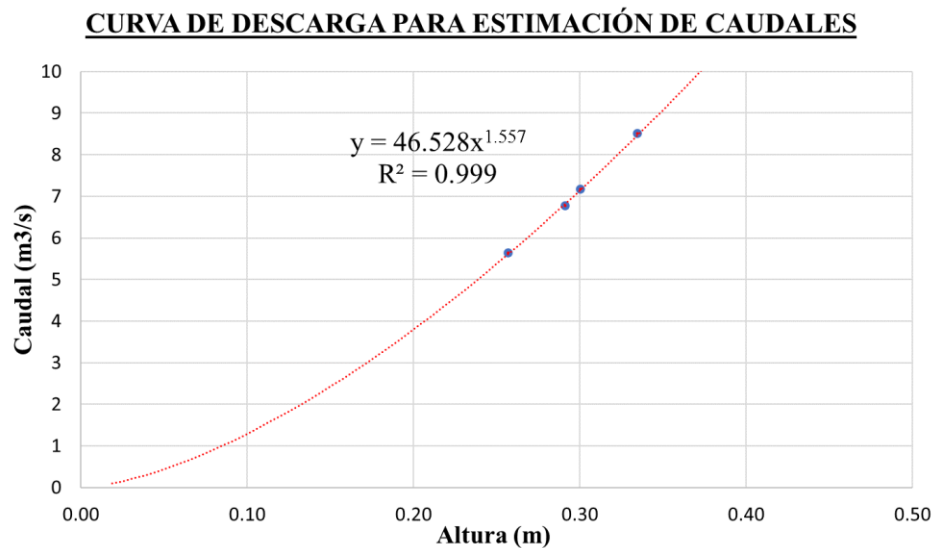


Figura 4. Curva de descarga para la sección de estudio en el Río Chico.

El hidrograma construido para el periodo de análisis (abril-junio 2025) reveló una notable variabilidad en el régimen de caudales, lo cual es esencial para evaluar el potencial energético bajo diversas condiciones operativas. Se destacan eventos de peak de caudal, como la crecida registrada el 08 de Mayo con un valor de $Q = 114.57 \text{ m}^3/\text{s}$ y el evento máximo del periodo el 17 de Mayo, con un valor de $Q = 116.07 \text{ m}^3/\text{s}$. La inclusión de estos eventos de peak en el análisis fue crucial para simular el comportamiento del sistema bajo las condiciones más energéticas y definir los límites operativos de potenciales sistemas de generación.

El modelo hidráulico 2D en HEC-RAS, calibrado rigurosamente con los datos de campo, logró un porcentaje de error promedio del 14.9%, un valor que se considera bajo y que indica una reproducción adecuada de los niveles de agua y las velocidades medidas. La simulación identificó que la velocidad máxima en el tramo de estudio alcanza los 1.55 m/s, mientras que la profundidad en el mismo punto donde se registra esta velocidad y el mayor potencial hidrocínético fue de 5.14 metros.

6.3 Estimación del potencial hidrocínético

El potencial hidrocínético fue calculado para cada celda del modelo computacional aplicando la ecuación fundamental de la energía cinética del agua. Los mapas de resultados muestran claramente que las zonas con mayor potencial se concentran en áreas específicas donde la combinación de alta velocidad de 1.55 m/s como se puede apreciar en la Figura 5 y una profundidad adecuada de 5.14 m como se observa en la Figura 6 maximiza la potencia.

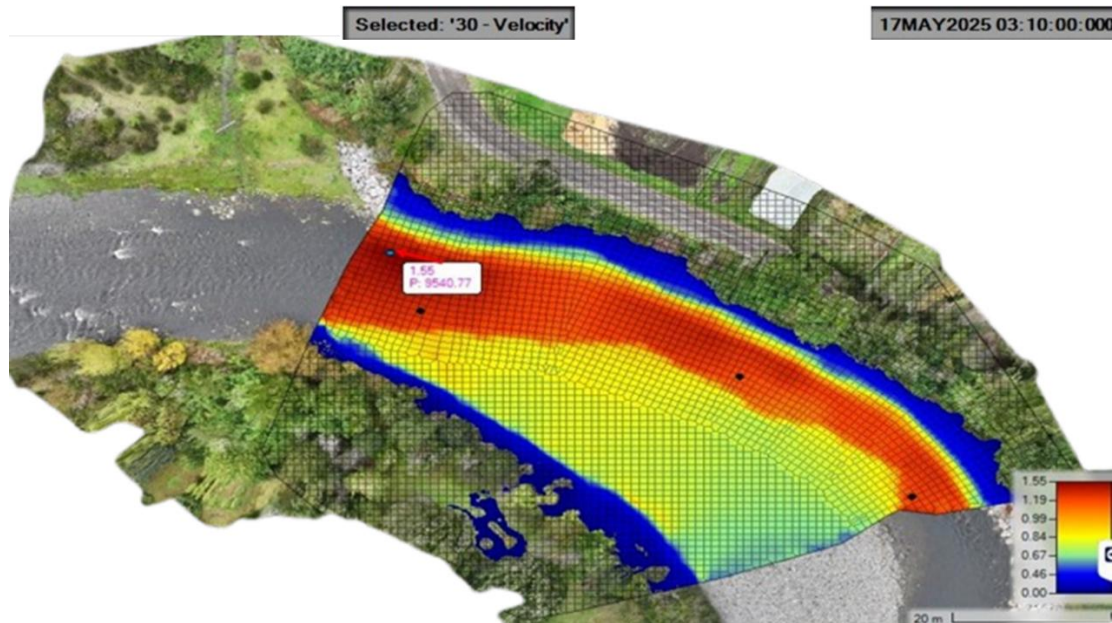


Figura 5. Muestra la distribución espacial de la velocidad máxima en el tramo modelado, donde se identifica un valor máximo de 1.55 m/s .



Figura 6. Presenta las profundidades máximas registradas, alcanzando 5.14 m.

En la Figura 7 se observa la serie de tiempo del potencial hidrocínético en el punto de máximo interés, donde se identificó un potencial máximo puntual que alcanza los 9.5 kW durante el evento de peak de caudal (Ver Figura 8).

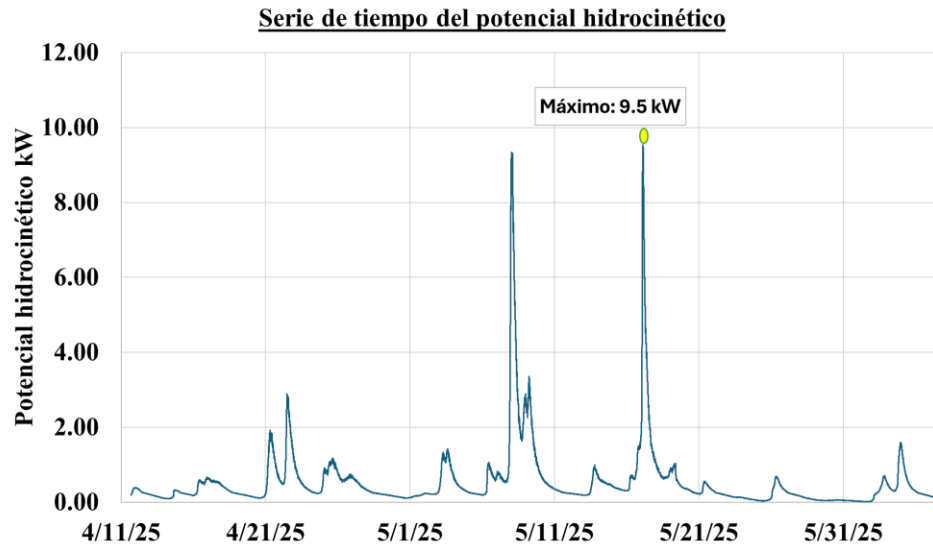


Figura 7. Serie temporal del potencial hidrocínético (kW) en el punto de estudio, donde se destaca el evento de máxima potencia.

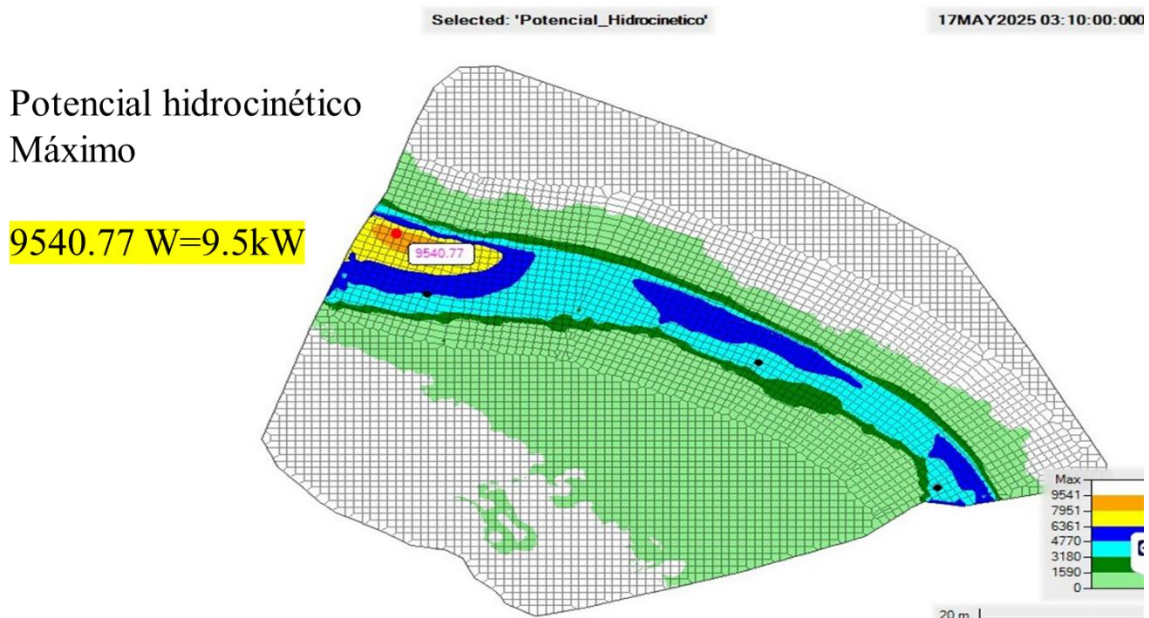


Figura 8. Se muestra el potencial máximo registrado de 9.5 kW.

Cabe destacar que estos valores corresponden al potencial máximo disponible, ya que la estimación se realizó a partir del área de la celda multiplicada por la profundidad, y no sobre un área de barrido de turbina. Esto diferencia el presente análisis de un estudio de factibilidad tecnológica, donde sí se evalúan dispositivos específicos.

Sin embargo, para evitar sobreestimaciones en el diseño de un sistema de generación, que podrían derivarse de eventos de peak atípicos o poco frecuentes, se realizó un análisis estadístico de la serie de potencia. Se determinó que el percentil 90 del potencial hidrocinético es el valor más representativo y fiable para propósitos de ingeniería y diseño. Este análisis, presentado en un diagrama de caja y bigotes (Figura 9), arrojó un valor de 1.04 kW. Esta cifra representa una estimación conservadora pero robusta del potencial que podría ser aprovechado de manera constante y frecuente a lo largo del año.

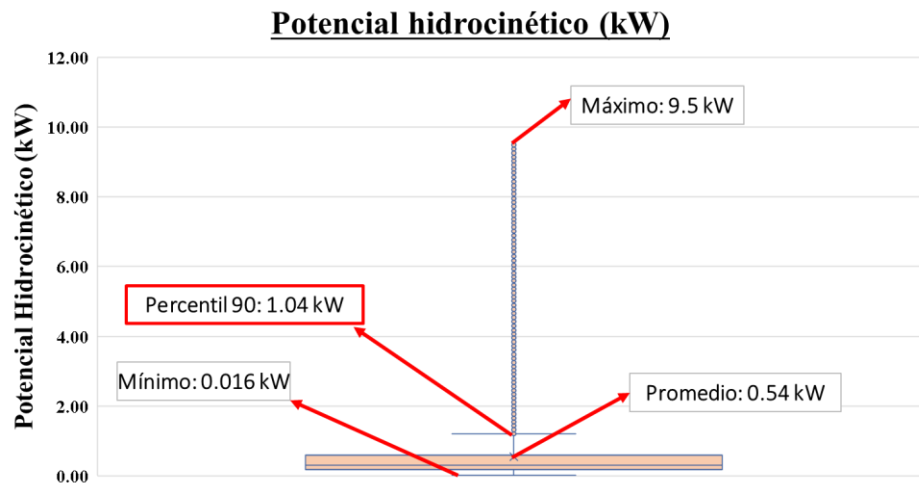


Figura 9. Diagrama de caja y bigotes de la distribución del potencial hidrocinético (kW), donde se destaca principalmente el de Percentil 90 de 1.04 (kW).

7. CONCLUSIONES

Esta investigación demostró la eficacia de una metodología integrada que combina levantamientos topográficos de alta resolución, mediciones hidrométricas sistemáticas y modelación hidráulica 2D con HEC-RAS para caracterizar el comportamiento del Río Chico y cuantificar su potencial hidrocinético.

La calidad del Modelo Digital de Elevación (DEM) y la malla computacional de 1 m permitieron capturar la morfología del cauce con precisión, mientras que los aforos de campo y la curva de descarga ($R^2 = 0,999$) validaron la relación altura-caudal. El modelo calibrado logró un error promedio de 14,9%. El análisis del potencial hidrocinético identificó un valor máximo de 9,5 kW durante crecidas, y un valor característico de 1,04 kW (percentil 90), donde la velocidad del flujo es el factor más determinante en la generación de energía, debido a su relación cúbica con la potencia.

En última instancia, esta investigación contribuye a un desarrollo energético más diverso y sostenible para la región. Al validar una vía para aprovechar de manera eficiente la energía de los ríos, específicamente en lugares remotos con acceso a ríos de alta pendiente, característicos de las zonas de montaña de la Región de Los Lagos.

Finalmente, los resultados de potencia hidrocínética calculados corresponden a la distribución espacial del potencial máximo disponible, lo que no representa la energía máxima extraíble, sino la energía máxima disponible en el tramo estudiado. Este matiz es clave para diferenciar entre la evaluación del potencial hidrocínético y el potencial real de una turbina hidrocínética, las que pueden alcanzar valores máximos de eficiencia en la obtención de energía de hasta 59% (Garrett y Cummins, 2005; Kabre, 2020).

REFERENCIAS

Biblioteca del Congreso Nacional. (2021). *Reporte estadístico de la Región de Los Lagos*. Valparaíso, Chile.

Bladé i Castellet, E., Cea, L., Corestein, G., & Fraga, I. (2014). *Modelo bidimensional de aguas someras para la simulación de flujo en ríos*.

Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2019). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill.

Gutenson, J. L., Guala, M., & Hill, C. (2023). *Hydrokinetic energy conversion: A global assessment of a renewable energy resource*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173, 113083.

Karakaya, E., Ceylan, H., & Kök, M. V. (2024). *Assessment of hydrokinetic energy potential in Turkish rivers using HEC-RAS*. *Renewable Energy*, 221, 119777.

Kirby, K., Feist, B., & Jacobson, P. (2022). *Challenges and opportunities for hydrokinetic energy development in the United States*. *WIREs Water*, 9(5), e1613. Punys, P., Kasiulis, E., & Kvaraciejus, A. (2015). *Assessment of the hydrokinetic energy potential in Lithuanian rivers*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 854-864.

Zeiger, S. J., & Hubbart, J. A. (2021). *A comprehensive review of HEC-RAS 2D capabilities for hydraulic modeling*. *Journal of Hydrology*, 595, 125997.

Garrett, C., & Cummins, P. (2005). *The power potential of tidal currents in channels*. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 461, 2563-2572.

Kabre, C. (2020). *Synergistic design of sustainable built environments* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003102960>