

# Potencial hidroenergético de la microcuenca del río Pixquiac en el estado de Veracruz utilizando Modelos Hidrológicos Distribuidos

**RESUMEN:** Es una prioridad para México aprovechar las fuentes de energía renovable disponibles, para lo cual, el estado de Veracruz cuenta con un recurso abundante, su energía hidráulica. Se desarrolló un estudio de simulación numérica para estimar el potencial de aprovechamiento minihidráulico para generar electricidad en la microcuenca del río Pixquiac, en la cascada de Calichar del municipio de Coatepec, Ver. Para desarrollar la simulación y el cálculo de escurrimientos, se utilizaron juntamente los sistemas de información geográfica QGIS y Physitel con la herramienta HYDROTEL basada en modelos hidrológicos distribuidos. Se utilizaron bases de datos confiables con registros de 22 años de parámetros y variables de interés, principalmente fisiográficas, geológicas, climáticas, además de uso de suelo y vegetación, dicha información fue obtenida de instituciones gubernamentales mexicanas. Se procesó la información para el periodo de estudio y se obtuvieron 8,035 resultados correspondientes al caudal promedio diario de la microcuenca, cuya media fue de 5.596 m<sup>3</sup>/s. Al validar los resultados con mediciones realizadas, se obtuvieron parámetros de correlación satisfactorios: un valor de NSE=0.6091, un sesgo absoluto de 0.00706755, R<sup>2</sup>=0.8026 y KGE=0.801495. Para un mejor aprovechamiento del recurso hidráulico, se propone una operación escalonada de tres turbogeneradores en paralelo de 768 kW, 277 kW y 81 kW, bajo este arreglo produciría una energía eléctrica anual de 2,115 MWh.

**PALABRAS CLAVE:** Generación minihidráulica, Hydrotel, microcuenca, modelo hidrológico distribuido, Physitel, sistemas de información geográfica.



## Colaboración

Juan José Marín Hernández; Jorge Arturo Del Ángel Ramos; Sara Patricia Ibarra Zavaleta; Raúl Alberto López Meraz, Universidad Veracruzana

Fecha de recepción: 18 de octubre de 2024

Fecha de aceptación: 22 de noviembre de 2024

Autor de Correspondencia: Juan José Marín Hernández

**ABSTRACT:** It is a priority for Mexico to take advantage of available renewable energy sources, for which the state of Veracruz has an abundant resource: its hydroelectric power. A numerical simulation was developed to estimate the potential for mini-hydropower generation in the Pixquiac River micro-basin, near the Calichar waterfall in the municipality of Coatepec, Veracruz. The QGIS and Physitel geographic information systems were used to simulate and calculate runoff, along with the HYDROTEL tool based on distributed hydrological models. Reliable databases with 22 years of records of parameters and variables of interest were used, mainly physiographic, geological, and climatic, as well as land use and vegetation data. This information was obtained from Mexican government institutions. The information was processed for the study period, yielding 8,035 results corresponding to the average daily flow rate of the micro-basin, which averaged 5,596 m<sup>3</sup>/s. By validating the results with measurements carried out, satisfactory correlation parameters were obtained: a value NSE=0.6091, an absolute bias of 0.00706755, R<sup>2</sup>=0.8026 and KGE=0.801495. For better use of the hydraulic resource, a staggered operation of three turbogenerators in parallel of 768 kW, 277 kW and 81 kW is proposed, under this arrangement it would produce an annual electrical energy of 2,115 MWh.

**KEYWORDS:** Mini-hydro generation, Hydrotel, micro-basin, distributed hydrological model, Physitel, geographic information systems.

## INTRODUCCIÓN

Potencial minihidroeléctrico en México

En los últimos 20 años la capacidad instalada en el sector hidroeléctrico en México prácticamente no ha variado. Esto hace

que la participación de la generación hidroeléctrica en México haya reducido significativamente respecto a otras fuentes renovables como la fotovoltaica y eólica, al pasar de 77.3 % a 44.7 % [1]. Existe una incapacidad financiera del estado mexicano de construir nuevas centrales generadoras de energía (particularmente en grandes hidroeléctricas) para resolver la creciente demanda de electricidad de la población y de la industria. A diciembre de 2021, el 26.5 % de la producción nacional provenía de los PIE. La capacidad hidrológica nacional prácticamente le pertenece a la CFE con una participación del 96 %, el resto la producen los PIE [1].

Por otro lado, México cuenta con un abundante recurso hidráulico concentrado en sus tres grandes vertientes hidrológicas, la del pacífico, la del atlántico y la interior con sus 757 cuencas hidrológicas [2]. Se estima que sólo se aprovecha una cuarta parte del potencial hidroeléctrico nacional, esto principalmente en grandes centrales hidroeléctricas [3].

De las 101 centrales hidroeléctricas con las que cuenta actualmente México con una capacidad total instalada de 12,575 MW, sólo 22 centrales se consideran mini (capacidad total de 55 MW, lo cual representa el 0.4 %) y 10 centrales son de tamaño micro (capacidad total de 3.6 MW, lo cual representa el 0.03 %). El factor de planta promedio se ubica alrededor de 0.40 [4].

Además, de las cuatro regiones hidrológicas más húmedas del país, dos se encuentran en el estado de Veracruz (las regiones Papaloapan 28 y Coatzacoalcos 29). De este modo es de esperarse que Veracruz fuera uno de los estados donde más se aprovechara el potencial hidráulico para la generación de electricidad y sólo se tiene una capacidad instalada de 212 MW, lo cual es menor al 2 % de la capacidad nacional [5].

Son pocos y escuetos los estudios de potencial de generación hidroeléctrica en microcuencas de México, entre ellas, la microcuenca del río Pixquiac y prácticamente inexistentes utilizando MDH.

### Modelos hidrológicos distribuidos (mhd)

Los MHD han ganado gran aceptación, especialmente en el análisis de cuencas hidrológicas [6, 7], ya que toman en cuenta la variabilidad espacial y temporal de variables de interés. Son modelos complejos basados en algoritmos robustos de alta precisión, sin embargo, para ejecutarlos se requieren de hardware de alta capacidad. Para el presente estudio se utiliza de manera preliminar SIATL v4 y principalmente HYDROTEL como simuladores de caudales basados en MHD.

### Sistemas de información geográfica (SIG)

Para el análisis de cuencas hidrológicas se requiere de datos hidrometeorológicos históricos, como temperatura, humedad, precipitación pluvial, entre otros, los cuales son obtenidos principalmente de estaciones

meteorológicas de la región de estudio. También se pueden obtener mediciones de escorrentías en estaciones hidrométricas. Además, es necesario conocer los relieves del terreno, pendiente, tipo de suelo, tipo de vegetación, entre otros. Aquí es donde los SIG desempeñan un papel muy importante al cargar estos datos en forma de capas de información georreferenciada ya sea en formato raster o vectorial [8].

La integración de MHD con los SIG, se convierte en una herramienta poderosa para el estudio de cuencas hidrológicas [8]. Para el presente estudio se utiliza el SIG PHISYTEL como complemento principal de HYDROTEL y de manera complementaria QGIS para generar mapas de información georreferenciada.

Es necesario aplicar los MDH y SIG para estudiar el comportamiento del recurso hidráulico de cuencas con diversos fines, entre ellos, la generación de electricidad en minihidráulicas, por ejemplo, en el río Pixquiac.

## MATERIAL Y MÉTODOS.

### Microcuenca de estudio

La región hidrológica Papaloapan (RH28) está formada por la cuenca del río Papaloapan (RH28A) y la cuenca del río Jamapa y otros (RH28B). La cuenca RH28B, está formada por diez subcuencas hidrológicas, entre ellas las subcuencas de los ríos Decozalapa y La Antigua.

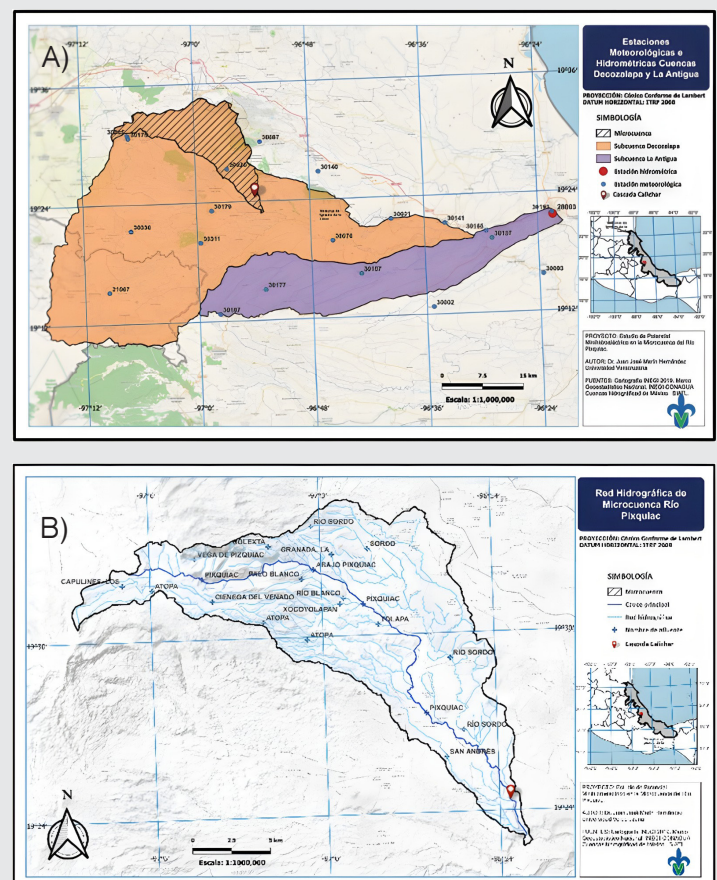


Figura 1. Red hidrológica de las subcuencas del río Decozalapa (A) y Microcuenca del río Pixquiac (B).

El presente estudio se ubica en la cuenca RH28B, perteneciente a la vertiente del Océano Atlántico y que desemboca en el Golfo de México. La subcuenca de interés es la del río Decozalapa ubicada en la región central del Estado de Veracruz [11]. En la Figura 1 (A), se muestran las redes hidrológicas de las subcuencas del río Decozalapa y del río La Antigua. Se toma en cuenta la cuenca del río La Antigua ya que parte de las estaciones hidrometeorológicas necesarias para el estudio se encuentran ubicadas ahí. El área sombreada representa la microcuenca del río Pixquiac de interés.

La subcuenca del río Decozalapa tiene una extensión de 1,622 km<sup>2</sup> y una pendiente media de 3.03 % que pasa de 3,806 msnm en su elevación máxima a 97 msnm en su elevación mínima, una longitud de la red hídrica 122,513 m y un tiempo de concentración 617.9 min.

Dentro de la subcuenca del río Decozalapa se encuentra la microcuenca del río Pixquiac [11]. Se observa de la Figura 1 (B) que dicha microcuenca está formada por dos corrientes principales, el río Sordo y el río Pixquiac, a su vez formados por diversos afluentes. El cauce principal se muestra por la línea azul oscura. En el último tramo de la vertiente principal de la microcuenca, existe una cascada con al menos 100 m de potencial de altura hidráulica llamada cascada de Calichar, lo cual se potencializa con casi toda la escorrentía de la microcuenca [12]. Se detectó por lo tanto un sitio con un alto potencial para generación minihidráulica.

Dentro de los datos fisiográficos de interés para la microcuenca en estudio, se tiene una longitud en su cauce principal de 39,517 m con un área de 201.3 km<sup>2</sup> con una pendiente media de 6.13 % debido a que principalmente se encuentra en la sierra madre oriental, con una elevación máxima y mínima de 3,040 m y 617 m respectivamente.

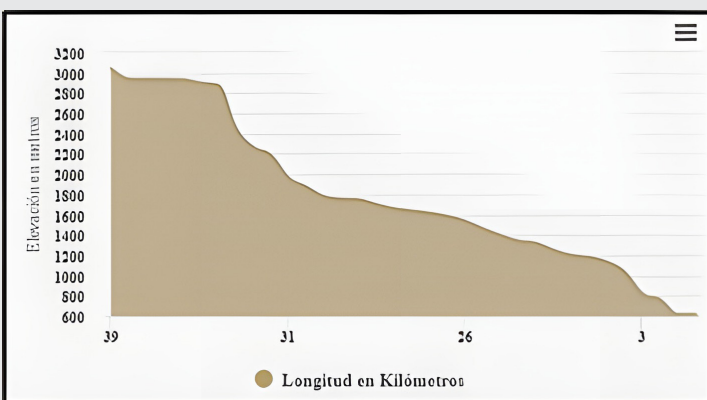


Figura 2. Perfil de elevaciones de cauce principal de microcuenca.

La Figura 2 muestra el perfil de elevaciones del cauce principal de la microcuenca. Destaca que, en un tramo de aproximadamente 5 km, se cuenta con una diferencia de niveles de 1,200 m (de los 5 a los 10 km del inicio

del cauce principal), lo cual representa un potencial de generación hidroeléctrico no abordado en el presente estudio. Además, se observa que al final de la microcuenca en una extensión de río de 3 km se presenta un cambio de elevación de 600m. Es en esta zona donde se encuentra la cascada de Calichar. No se ha encontrado en la literatura especializada un estudio de generación minihidráulica en la microcuenca del río Pixquiac.

## Metodología de estudio

### Bases de datos consultadas

Para desarrollar el presente estudio se ha realizado una búsqueda exhaustiva de bases de datos confiables obtenidas por diversas dependencias gubernamentales y organizaciones privadas. Los procedimientos de obtención de esta información se tienen bien desarrollados y planificados y están en constante actualización, muchos de ellos tienen registros de décadas.

Las bases de datos consultadas son referentes a áreas como geografía, climatología, topografía, edafología, fisiografía, uso de suelo y vegetación, entre otros.

Son varias las secretarías de estado que se encargan de obtener datos de interés para proyectos de desarrollo en México, como lo son la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), la Secretaría de Economía (SE), la Secretaría de Energía (SENER), la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Secretaría de Desarrollo Agrario y Territorial y Urbano (SEDATU), entre otras. Asimismo, trabajan de manera colaborativa con diversos organismos públicos y privados para nutrir sus bases de datos, como lo son universidades y centros de investigación.

Existen organismos como la Comisión Nacional del agua (CONAGUA) cuyas oficinas regionales y comisiones estatales, así como programas como el sistema meteorológico Nacional (SMN) se encargan entre otras cosas de recolectar datos meteorológicos e hidrológicos a lo largo y ancho del país. Asimismo, se obtuvieron datos complementarios de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO).

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), tiene entre sus funciones normar y coordinar el Sistema Nacional de Información Estadística y Geografía. Es este instituto es donde converge toda la información estadística nacional proporcionada por las secretarías de estado y es la principal base de datos de la cual se hace uso para el presente estudio.

El INEGI cuenta con el sistema de consulta de espacio y datos de México en su sitio web. Aquí se obtiene información cartográfica georreferenciada en canvas y almacenable en archivos de datos con diferentes extensiones en escalas de 1:1 000 000, 1: 250 000, 1:50

000, 1:20 000 y 1:10 000. Cuenta con recursos como el marco geoestadístico nacional, mapas, imágenes del territorio, marco geodésico, mapoteca, directorio estadístico nacional de unidades económicas (DENUE) e indicadores demográficos, económicos, geográficos y de gobierno, entre otros. [9].

### Estaciones meteorológicas e hidrométricas

La Figura 3 muestra las 20 estaciones meteorológicas dentro de la cuenca de los ríos La Antigua y Decozalapa, se obtuvieron datos como temperaturas máximas, medias y mínimas, además de evaporación, precipitación, entre otros. Se buscó una uniformidad aproximada de 50 km en la ubicación de las estaciones meteorológicas. También se observan las estaciones hidrométricas ubicadas en la estación Carrizal (28125) y la estación Cardel (28003).

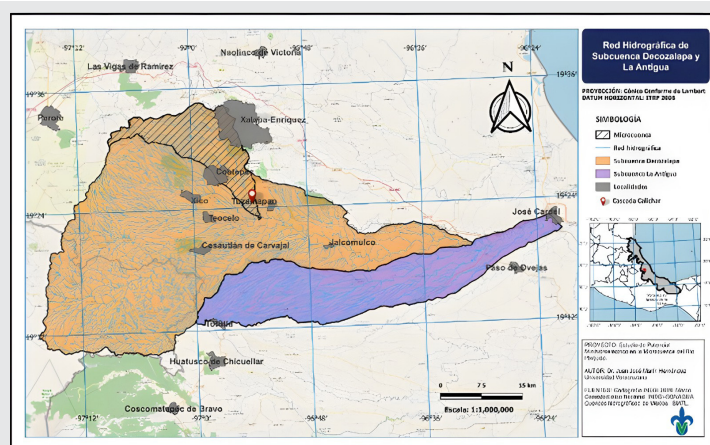


Figura 3. Estaciones hidrometeorológicas de las subcuencas Decozalapa y La Antigua.

Se utilizaron las estaciones mencionadas para alimentar el modelo de simulación en Hydrotel. Todas las estaciones continúan actualmente en operación y cumplen con la normatividad internacional para la obtención y procesamiento de los datos climatológicos.

La única estación hidrométrica que opera actualmente en la cuenca del río La Antigua es la estación Cardel (28003) y cuyas mediciones fueron utilizadas para los procesos de calibración y validación. Sus coordenadas geográficas son latitud 19°21'42" N y longitud 96°22'24" W.

La base de datos meteorológica completa de todas las estaciones de interés fue proporcionada por la CONAGUA a través del SMN, y abarca desde el 1 de enero de 1990 hasta el 31 de diciembre del 2018. Para una mayor actualización, las fuentes oficiales no proporcionan la información completa. Respecto a las estaciones hidrométricas, sólo se cuenta con la información completa hasta el 31 de diciembre del 2011. Por lo tanto, con la finalidad de que el estudio de simulación mediante Hydrotel cuente una mayor confiabilidad, se decide realizarlo del 1 de enero de 1990 hasta 31 de diciembre de 2011, para que cuente con las etapas de calibración y validación en base a mediciones reales de la

estación Cardel. Para estudios más completos, es necesario contar con las bases de datos actualizadas.

### Presimulación mediante SIATL v4

La capa hidrológica de la microcuenca de estudio se obtiene del simulador de flujos de agua de cuencas del México desarrollado por el INEGI, llamado SIATL v4. En las funciones de red se selecciona la red hidrográfica aguas arriba del punto seleccionado. Para el presente estudio es la región hidrográfica 28 y dentro de esta se encuentra la subcuenca de Decozalapa (RH28Bg). Se selecciona el punto más cercano a la cascada Calichar y se obtiene la microcuenca de interés, que se llama microcuenca del río Pixiquiac.

En la caja de herramientas, se selecciona la opción de descarga de capas y se abrirá una ventana con los elementos a descargar. Se descargan en formato .shp tres elementos: área de escurrimiento, red hidrográfica y cauce principal que serán procesados en QGIS.

### Sistema de información geográfica Physitel

Physitel es un sistema de información geográfica desarrollado en Quebec, Canadá en 1985 por el Instituto Nacional de la Investigación Científica (INRS-EETE, por sus siglas en francés). Physitel prepara la base de datos fisiográfica para Hydrotel, integra información de tipo telemétrica con datos en capas correspondientes a SIG [10]. Primeramente, es necesario el modelo digital de elevación (DEM por sus siglas en inglés) que define la estructura del drenado de la cuenca en estudio basada en una malla de elevaciones georreferenciadas. Asimismo, es necesario establecer las capas de uso de suelo y tipo de suelo con información tipo raster (satelital) para alimentar el modelo hidrológico distribuido.

### Simulación mediante Hydrotel (modelo hidrológico distribuido)

Hydrotel es un modelo hidrológico desarrollado por el INRS-EETE y la Universidad de Quebec. Este modelo se emplea para la simulación y modelación hidrológica distribuida en cuencas fluviales. Hydrotel es un modelo hidrológico distribuido basado en la física de procesos que simula el ciclo hidrológico en una cuenca. Utiliza una representación espacialmente distribuida de la cuenca para capturar las interacciones entre la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración, el flujo subsuperficial y la escorrentía superficial. Este modelo permite evaluar el comportamiento hidrológico bajo diferentes escenarios climáticos y de uso de la tierra [10].

Se presentan ejemplos de simulación de flujo utilizando el modelo Hydrotel en varias cuencas ubicadas en Canadá (Quebec, Ontario, Columbia Británica), en el sur de Francia, África Occidental, México, entre otros [13]. Estas simulaciones indican que los diferentes algoritmos del modelo reaccionan de manera efectiva, lo que sugiere su aplicabilidad en cuencas muy diversas bajo condiciones climáticas variadas.

Dentro de las principales aplicaciones de Hydrotel en el ámbito de la modelación hidrológica distribuida se encuentran: 1) Modelación de caudales en una cuenca fluvial; 2) Estudios de inundaciones y riesgos asociados; 3) Gestión del agua y optimización de embalses; 4) Estudios de impacto ambiental y cambio climático; y 5) Estimación de escorrentía y ciclo hidrológico [13]. Podemos observar el gran potencial de Hydrotel para el desarrollo del presente estudio al simular el flujo de agua en una cuenca fluvial, teniendo en cuenta la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración y otros parámetros hidrológicos clave. Esta modelación permite estimar los caudales en diferentes puntos de la cuenca a lo largo del tiempo. Por primera vez se aplica en México un MDH como herramienta para determinar el potencial hidráulico de una microcuenca hidrológica para generación de electricidad en una central minihidráulica.

**Calibración y validación del modelo**

En el proceso de calibración del modelo se identifican los valores de los parámetros, con el objetivo de mejorar la bondad de ajuste entre la serie temporal de datos simulados y los datos observados. Para evaluar la bondad de ajuste del modelo se utiliza una función objetivo. La calibración se realiza mediante un algoritmo de optimización que está vinculado al modelo hidrológico, En este estudio, se utilizó el algoritmo de Búsqueda de Dimensiones Dinámicas (DDB), el cual escala automáticamente el espacio de búsqueda para disminuir el número de evaluaciones del modelo requeridas para alcanzar la región óptima de la función de aptitud de mejor calidad. La calibración fue evaluada por los siguientes indicadores estadísticos: 1) el índice de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe; 2) la relación del error cuadrático medio; 3) El coeficiente de determinación y 4) El porcentaje BIAS [14].

El proceso de validación temporal de un modelo consiste en demostrar que el modelo es capaz de hacer predicciones en un sitio específico para períodos fuera del período de calibración. De esta manera, se dice que un modelo ha sido validado si su precisión y capacidad predictiva en el período de validación mostró errores o límites aceptables. La calibración y validación se basó en los datos hidrométricos de una estación de control ubicada a la salida de la cuenca del río estudiado.

La Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE por sus siglas en inglés) dada por la ecuación 1, es comúnmente usada para evaluar el comportamiento de modelos de lluvia y escorrentía. Se define como un "parámetro estadístico normalizado que determina la magnitud relativa de la varianza residual (ruido) comparada con la varianza de los datos observados (información) [13].

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde  $\bar{O}$  es la media de los caudales observados,  $O_i$  es el caudal calculado y  $P_i$  es el caudal medido, ambos en

el tiempo  $t$ . El valor de  $NSE=1$  significa que el modelo corresponde perfectamente con los datos observados. El valor de  $NSE=0$  significa que las predicciones del modelo son tan precisas como la media de los datos observados. Valores de  $-1 < NSE < 0$  significa que la media de los valores observados es mejor predictor que los datos simulados.

Otro parámetro estadístico es el  $RMSE$ -observaciones de la razón de desviación estándar ( $RSR$ ) dado por la ecuación 2, el cual se define como la razón de la raíz media del error al cuadrado ( $RMSE$  por sus siglas en inglés) y la desviación estándar de los datos observados [10]. El rango de valores que puede tomar  $RSR$  es  $0 \leq RSR \leq +\infty$  El valor óptimo es de cero, entre más pequeño es  $RSR$  implica que el  $RMSE$  es bajo y por lo tanto el modelo de simulación se acerca a la realidad.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad \text{Ec. (2)}$$

El coeficiente de determinación  $R^2$  dado por la ecuación 3, es un parámetro común utilizado en la estadística descriptiva que define la distribución de la varianza de los datos observados. Su rango de evaluación se encuentra  $0 \leq R^2 \leq 1$ . Entre más alto el valor del coeficiente de determinación implica un menor error la varianza. Valores de  $R^2$  superiores a 0.5 se consideran aceptables.

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right] \quad \text{Ec. (3)}$$

El porcentaje  $BIAS$  ( $PBIAS$ ) dado por la ecuación 4, mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser más grandes o pequeños que sus contrapartes observadas [10]. El valor óptimo de  $PBIAS$  es cero. Valores pequeños de  $PBIAS$  indican una alta precisión del modelo de simulación. Valores positivos de  $PBIAS$  indican una subestimación y valores negativos indican una sobreestimación.

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \right] \quad \text{Ec. (4)}$$

**Cálculo de potencia hidroeléctrico**

El caudal ecológico dado por normatividad para la región de estudio es del 10 % del caudal de escurrimiento de la microcuenca [15]. Entonces el caudal para generación está dado por la ecuación 5.

$$Q_g = 0.9 Q_c \quad \text{Ec. (5)}$$

Para el cálculo de la potencia teórica se utiliza la siguiente expresión:

$$P_{ins} = \gamma Q_g H_n \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde  $P_{ins}$  es la potencia instalada en kW;  $Q_g$  es el caudal para generación en  $m^3/s$ ;  $H_n$  es el salto neto en m;

y es el peso específico del agua (9.81 kN/m<sup>3</sup>). La potencia de salida está dada por la ec. 7.

$$P_{sal} = \eta P_{inst} \quad \text{Ec. (7)}$$

Asimismo  $\eta$  es el factor de eficiencia, a su vez dado por la ecuación 8.

$$\eta = R_t R_g R_s \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:  $R_t$  es el rendimiento de la turbina,  $R_g$  es el rendimiento del generador y  $R_s$  es el rendimiento del transformador.

Los rendimientos de la turbina, generador y transformador son proporcionados por los fabricantes. Si estos datos son desconocidos se puede considerar como factor de eficiencia un valor entre 0.8 y 0.85 [16].

## RESULTADOS

### Modelación hidrológica

Se determinaron los caudales medios trimestrales y la desviación estándar para la desembocadura de la microcuenca del río Pixquiac desde el 1 de enero de 1990 hasta el 31 de diciembre del 2011. Se trata de 8,035 resultados correspondientes al caudal promedio diario de la microcuenca de 22 años de información. La media del caudal es de 5.596 m<sup>3</sup>/s y la desviación estándar media es de 7.7732. Se observa en el ANEXO A, la escorrentía con un comportamiento anual periódico. En la Figura 4 se observa que los primeros dos trimestres son de lluvias escasas, el tercer trimestre es de lluvias intensas (siendo el máximo en el mes de septiembre) y el cuarto trimestre de lluvias medias. También se observa que en ciertos años se presentaron eventos meteorológicos extremos como huracanes, tormentas o depresiones tropicales que influenciaron la zona de estudio en los años 1991, 1992, 1995, 1998, 2000, 2003, 2006, 2010 y 2011; algunos de estos eventos meteorológicos fueron los huracanes Roxane, Mitch, Keith, entre otros; así como las tormentas tropicales Matthew, José y Marco, entre otros. El caudal trimestral máximo se registra en el tercer trimestre de 1996 con un valor de 17.871 m<sup>3</sup>/s y el mínimo de 0.689 m<sup>3</sup>/s se presenta en el segundo trimestre de 1999. Asimismo, el día de caudal máximo se presenta el 6 de octubre de 1999 con un valor de 86.774 m<sup>3</sup>/s y el mínimo se presenta el 18 de junio de 1998 con un valor de 0.464 m<sup>3</sup>/s.

El Anexo A, muestra los hidrogramas de calibración (01/01/1990 a 12/31/1999) y validación (01/01/2000 a 12/31/2009) en m<sup>3</sup>/s para la subcuenca del río La Antigua. Se observa que hay una similitud en entre ambos parámetros, sin embargo, para cuantificar el modelo se comparan los valores de caudales obtenidos del proceso de simulación con los caudales medidos en la estación Cardel (28003) por un periodo de 20 años (Tabla 1). Se obtiene un valor de Nash-Sutcliffe Efficiency de 0.6091, el cual podemos considerar como satisfactorio; un sesgo absoluto de 0.007068 muy cercano

al valor ideal de cero; un coeficiente de correlación de 0.8026 que puede considerarse como una fuerte correlación para fenómenos meteorológicos, así como un buen indicador predictivo; y una eficiencia de Kling Gupta de 0.8015, considerada buena.

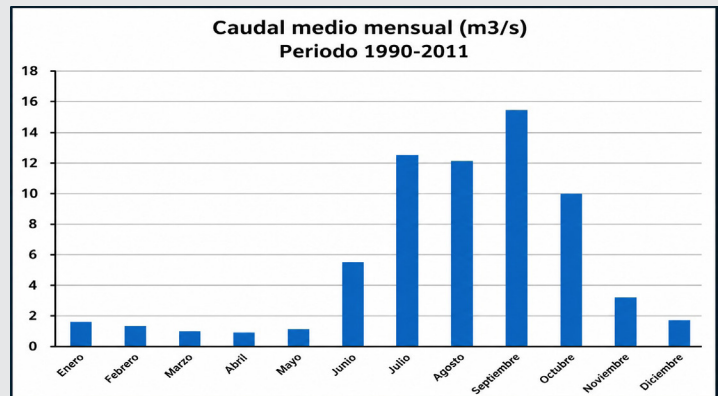


Figura 4. Caudal medio mensual de la microcuenca del río Pixquiac (periodo 1990-2011).

Tabla 1. Calibración y validación de modelo hidrológico.

	Nash-Sutcliffe	Bias relativo	Bias absoluto	R <sup>2</sup>	KGE
Calibración	0.71	-0.13	0.13	0.85	0.74
Validación	0.51	0.15	0.15	0.78	0.80

Fuente: Elaboración propia.

### Evaluación de potencia

Para el periodo en estudio, se realiza un proceso de selección de los días que se cumple con el caudal suficiente para garantizar factores de operación (FO) de planta definidos. En la Tabla 2 se muestran cinco factores de operación con sus respectivos valores de caudal que lo garantizan. Para cada FO se muestran el número de días que operaría la planta de los 8,035 días totales correspondientes al periodo de 22 años. Se muestran también el número de días que operaría al año cada turbina.

Tabla 2. Operatividad de planta y caudales asociados.

Factor de operación	0.20	0.31	0.40	0.60	0.80
Caudal de cuenca (m <sup>3</sup> /s)	9.210	5.596	3.320	1.590	0.965
Días de operación	1607	2481	3214	4824	6436
Días fuera de operación	6428	5554	4821	3211	1599
Días de operación al año	73	113	146	219	293

Fuente: Elaboración propia.

Debido a malas políticas públicas en México, una gran cantidad de centrales hidroeléctricas en México han operado históricamente de manera subutilizada con un bajo factor de operación de 0.20. El gobierno federal actual, como parte de su política energética realiza inversiones para incrementarlo. El promedio nacional está actualmente alrededor de 0.40. El FO de 0.31 corresponde al caudal promedio durante el periodo de 22 años en la microcuenca de estudio que es de 5.596 m<sup>3</sup>/s. Los valores de FO de 0.60 y 0.80 se proponen como una medida de aprovechar el recurso hidráulico en los días de bajo caudal (2.154 m<sup>3</sup>/s y 0.965 m<sup>3</sup>/s respectivamente).

Considerando una altura de potencial hidráulico de 100 m, un factor de planta de 0.85 y los caudales dados en la Tabla 2, se obtiene la Tabla 3 correspondiente a potencia instalada y energía eléctrica anual generada. Se observa de la Tabla 3, que la potencia de generación para el caudal máximo de diseño es de 6,912 kW el cual operaría durante 73 días al año y produciría una energía de 12,117 MWh; para un caudal promedio de la microcuenca de 22 años de 5.596 m<sup>3</sup>/s se produciría una potencia de 4,200 kW durante 113 días y una energía anual generada de 11,367 MWh; para un caudal de 3.320 m<sup>3</sup>/s que posiciona a la central hidroeléctrica propuesta en la media del FU nacional, se produciría una potencia de 2,492 kW durante 146 días para una energía anual de 8,736 MWh; asimismo, para un mejor aprovechamiento del recurso hidráulico durante la época de estiaje se propone operar la planta durante 219 días al año (FO 0.6) con una disponibilidad de caudal de 1.590 m<sup>3</sup>/s, lo cual produciría una potencia de 1,617 kW para una energía anual de 6,280 MWh; para un FO de 0.8 (293 días de operación) y una disponibilidad de caudal de 0.965 m<sup>3</sup>/s, se produciría una potencia de 724 kW para una energía anual de 5,085 MWh.

Tabla 3. Potencia instalada y energía eléctrica generada.

FO	Q <sub>c</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>g</sub> (m <sup>3</sup> /s)	P <sub>sal</sub> (kW)	E <sub>anual</sub> (MWh)
0.20	9.210	8.289	6,912	12,117
0.31	5.596	5.036	4,200	11,367
0.40	3.320	2.988	2,492	8,736
0.60	1.590	1.431	1,617	7,086
0.80	0.965	0.869	724	5,085

Fuente: Eleboración propia.

Podría ser tentador considerar que la mejor opción es la primera (FO=0.2) ya que se tendría la mayor potencia instalada de 6,912 kW y la mayor energía anual producida de 12,117 GWh, aunque este arreglo sólo operaría 73 días al año. Por otro lado, se pudiera pensar que lo mejor sería que la central operara la mayor cantidad de días al año (FO=0.8), es decir, tener una potencia instalada de 724 kW, lo cual produciría una energía anual de sólo 5,085 MWh. En lugar de elegir un sistema con un solo turbogenerador, se propone instalar varias turbinas de diferentes capacidades con la finalidad de aprovechar el recurso hidráulico de acuerdo con su disponibilidad de mayor a menor. Para el presente estudio, se propone la operación de tres turbogeneradores Francis, uno de 6,912 kW, otro de 2,492 kW y uno de 724 kW. Cuando caudal disponible sea igual o superior a 9.210 m<sup>3</sup>/s se operaría el turbogenerador de 6,912 kW; asimismo, cuando el caudal disponible se encuentre entre 3.320 y 9.210 m<sup>3</sup>/s se operaría el turbogenerador de 2,492 kW; y cuando el caudal disponible se encuentre entre 0.965 y 3.320 m<sup>3</sup>/s se operaría el turbogenerador de 724 kW. Bajo este arreglo se sumarían la energía eléctrica anual de los tres casos, es decir se producirían 19,030 MWh. De esta forma la central hidroeléctrica operaría 293 días al año.

Para definir la viabilidad para la construcción de la planta propuesta, es necesario realizar a detalle todos los estudios técnicos, económicos, sociales y de impacto social basados en normatividad.

## CONCLUSIONES

A partir del uso de un proceso de simulación numérica mediante el software Hydrotel, utilizando MHD y SIG como SIATL v4 y Physitel en la microcuenca del río Pixquiac, se obtienen 8,035 resultados de caudales promedios diarios de sus principales ramales, cuyo caudal promedio diario durante un periodo de 22 años (1 de enero de 1990 hasta el 31 de diciembre del 2011) es de 5.596 m<sup>3</sup>/s, con una desviación estándar media es de 7.7732. Se recomienda extender el periodo de estudio a fechas recientes con la finalidad de tener una mayor certidumbre en los resultados.

Durante los 22 años del periodo estudiado en la microcuenca del río Pixquiac, se observa claramente un comportamiento periódico anual, donde la época de estiaje abarca de noviembre a mayo y la época de lluvias se presentan de junio a octubre, con las lluvias más intensas en el mes de septiembre.

Se obtienen indicadores estadísticos satisfactorios que evalúan el desempeño de la calibración y validación del MHD, calculado a partir de series temporales diarias, en la cuenca del río La Antigua.

Se evalúan cinco condiciones de operación definidas por sus factores de operación de planta con valores de 0.2, 0.31, 0.40, 0.50 y 0.8 con caudales disponibles de 9.210, 5.596, 3.320, 1.590 y 0.965 m<sup>3</sup>/s respectivamente y número de días de operación al año de 73, 113, 146, 219 y 293 días respectivamente. La potencia de los turbogeneradores para cada caso es de 6,912, 4,200, 2,492, 1,193 y 724 kW respectivamente y la energía eléctrica anual producida sería de 12,117; 11,367; 8,736; 6,280 y 5,085 MWh respectivamente.

Para un mejor aprovechamiento del recurso hidráulico, se propone instalar tres turbogeneradores en paralelo de 6,912 kW, 2,494 kW y 724 kW, para así desarrollar una generación eléctrica anual de 19,030 MWh durante 293 días al año (FO=0.8).

Como lo demuestra este estudio que existe un potencial de minigeneración de electricidad en la microcuenca del río Pixquiac la altura de la cascada de Calichar. Asimismo, debido a las características, de las cuencas hidrográficas del Estado de Veracruz y de otras zonas de México, es probable hallar otros sitios potenciales de generación eléctrica a partir de minihidráulicas, que en su conjunto pudieran representar una importante participación de energía hidráulica para el país.

Se recomienda realizar los estudios técnicos y económicos que pudieran justificar la viabilidad de la cons-

trucción y operación de la central minihiroeléctrica de Calichar.

#### BIBLIOGRAFÍA

[1] Secretaría de Energía SENER (2022). Programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional PRO-DESEN 2022-2026.

[2] Comisión Nacional del Agua (2015). Atlas del agua en México. México.

[3] Palacios Fonseca A.A., Peña García N., y Cervantes Carretero E.A. (2018). Memorias del primer simposio: Retos y oportunidades de la generación hidroeléctrica en México. Primera edición. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA. Morelos, México.

[4] Palacios Fonseca A.A., Peña García N., y Cervantes Carretero E.A. (2017). Primera parte: Infraestructura hidroeléctrica actual. Primera edición. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA. Morelos, México.

[5] Palacios Fonseca A.A., Peña García N., y Cervantes Carretero E.A. (2017). Segunda parte: Posibilidades de desarrollo hidroeléctrico en México. Primera edición. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA. Morelos, México.

[6] Chen, Y. (2018). *Distributed Hydrological Models. Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-40457-3\\_23-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-40457-3_23-1).

[7] Bhumi Raj B. et.al. (2025). Evaluation of distributed and semi-distributed hydrological models in complex River Basin system, Nepal. *HydroResearch*, Vol. 8, pp 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2024.09.006>

[8] Zhang, X. and Srinivasan, R. (2009). GIS-based spatial precipitation estimation: a comparison of geostatistical approaches. *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 45, no.4, pp. 894-906.

[9] Datos de consulta INEGI (2026). <http://www.inegi.org.mx/siscon/>

[10] Iqbal, Z., Shahid, S., Ismail, T., Sa'adi, Z., Farooque, A. and Yaseen, Z.M. (2022). Distributed Hydrological Model Based on Machine Learning Algorithm: Assessment of Climate Change Impact on Floods. *Sustainability*. 14:6620. <https://doi.org/10.3390/su14116620>.

[11] Pérez Luna, G. (2015). Modelación hidrológica continua para fines de pronóstico de avenidas en ríos.

[12] Instituto Nacional de Geografía e Informática INEGI (2018). Tutorial quantum GIS v. 3.4 Madeira. Dirección de Geografía. DRCN San Luis Potosí.

[13] Ibarra Zavaleta, S.P., Landgrave, R., Romero López, R., Poulin, A., and Arango Miranda, R. (2017). Distributed hydrological modeling: Determination of theoretical hydraulic potential and streamflow simulation of extreme hydrometeorological events, *Water*, vol. 9, no.8, pp. 602-618.

[14] Coy Murcia, L.C. (2017). Ajuste y validación del modelo precipitación - escorrentía GR2M aplicado a la subcuenca nevado. Repositorio institucional. Universidad Santo Tomás.

[15] Norma Mexicana. NMX-AA-159-SCFI-2012. (2012). Procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas.

[16] Islas, N.A. (2018). Estudio de potencial de aprovechamiento hidráulico para la generación de Electricidad de la cascada de Calichar del municipio de Coatepec. Tesis de licenciatura. Universidad Veracruzana. Xalapa, México.

Anexo A. Hidrograma de diario A) calibración y B) validación para la estación hidrométrica de control Cardel (28003).

