



ENANDES Project: Enhancing Adaptive Capacity of Andean Communities through Climate Services (ENANDES) (Chile, Colombia, Peru)

Activity: Energy mini-project on validation and calibration of the SOLEVAPP evaporation model for floating solar systems in Chile (Ref. 21397/2024-1.2 GS)

Deliverable N°1: Summary of the installation of the meteorological station, and summary of the initial calibration and validation of the model (SOLEVAPP)

History of draft preparation and review

V1.0- Initial draft by Hernán Alcayaga, Rodrigo Cáceres, Andres Díaz (UDP)	13/04/2025
V2.0 Based on review and comments by Juan Crespo and Marjorie Soto (DMC), Camila Vasquez (Ministry of Energy, Chile), Hamid Bastani (WMO)	19/05/2025
WMO lead technical expert for the Activity: Hamid Bastani	

VALIDACION Y CALIBRACION EL MODELO DE EVAPORACION SOLEVAP PARA DIFERENTES ESTACIONES.

Validation and calibration of evaporation model SOLEVAPP for different season periods

REPORTE N°1: (Ref. 21397/2024-1.2 GS)

Table of Contents

Summary	2
Resumen	2
Instalación de los equipos experimentales y sitios de estudio	3
Calibración y validación preliminar del modelo de evaporación SOLEVAPP	
2.1. Testeo de la herramienta SOLEVAPP dentro del explorador solar	7
2.2. Parámetros de calibración dentro del modelo, óptimos e indicadores de ajuste.	7
2.3. Validación del modelo con los parámetros ajustados y sus indicadores	9
Conclusiones	9
Referencias	9

Summary

The report presents the preliminary results of the validation and calibration process of the *SOLEVAPP* tool. The process includes on-site measurements of meteorological data and evaporation, using experimentally measured data from two floating photovoltaic (FPV) solar plants in Chile: Las Cabras and Putaendo. This report presents the preliminary results from the Las Cabras site. These results enable the development of a model that accounts for the panel coverage area, achieving an error of 4.1% at that location. Based on the measurements and initial analysis, it is necessary to refine the database in future periods to identify behavioral patterns that allow for the calibration of the equations used.

Resumen

El informe presenta los resultados preliminares del proceso de validación y calibración de la herramienta *SOLEVAPP*. Este proceso contempla la medición en terreno de datos meteorológicos y evaporación en dos plantas solares fotovoltaicas flotantes en Chile: Las Cabras y Putaendo. Este informe, presenta los resultados preliminares de la localidad de Las Cabras. Estos resultados permiten desarrollar un modelo que tome en cuenta el área de cobertura de paneles con un error de 4.1% en dicha localidad. En base a las mediciones realizadas y análisis preliminar, es necesario refinar la base de datos capturada en los periodos futuros para poder identificar patrones de comportamiento que permitan calibrar las ecuaciones utilizadas.

1. Instalación de los equipos experimentales y sitios de estudio.

En esta sección se describen los sitios y características de los equipos de medición instalados en dos plantas de generación de energía solar, estas corresponden a dos sistemas fotovoltaicos flotantes con paneles sin revestimiento inferior. Los reservorios de estas instalaciones tienen un área superficial de agua aproximada de 5,2 ha con una cobertura de paneles de 0,82 ha, cubriendo un 15,8% para la estación denominada Las Cabras. Para la estación llamada Putaendo, la superficie de agua del reservorio es de aproximadamente 1,10 ha y la de los paneles 0,15 ha, cubriendo un 13,6%.

Las estaciones meteorológicas corresponden a las HOBO modelo U30-NRC ONSET. Estas estaciones poseen cinco sensores que permiten registrar: i) velocidad y dirección del viento, ii) humedad relativa, iii) temperatura, iv) precipitación y, v) radiación solar. Los datos son almacenados en un datalogger alimentado mediante un panel solar. La extracción de datos almacenados se realiza de manera presencial cada vez que se asiste al terreno.

La localización de ambas estaciones se presenta en la Figura 1 en el contexto geográfico y en la Tabla 1 se indican las coordenadas UTM WGS84 H18S junto con sus cotas de elevación.

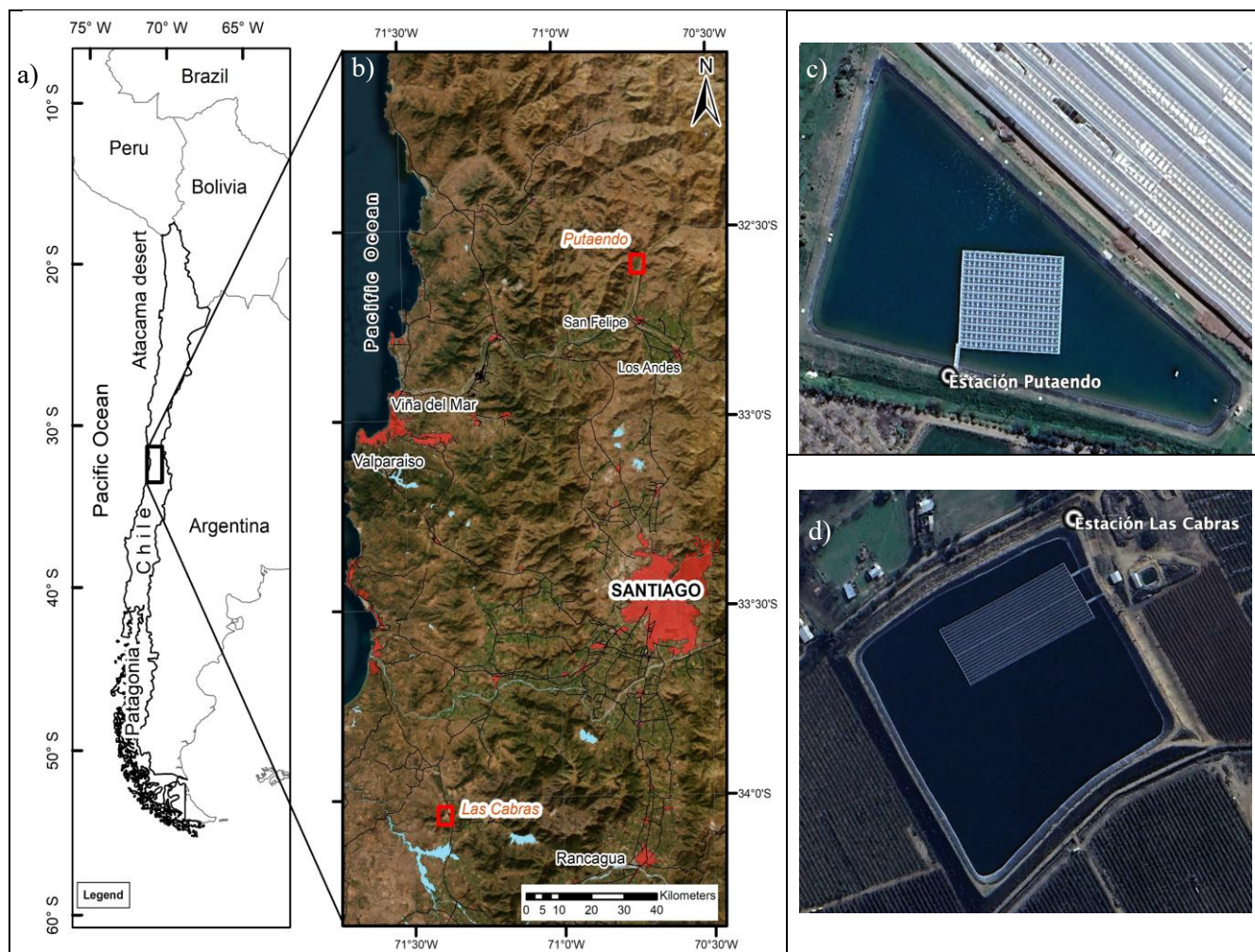


Figura 1: a) Ubicación de las estaciones meteorológicas a escala regional del cono sur de América, b) ubicación en el contexto geográfico de Chile. Imagen de los dos sistemas fotovoltaicos flotantes monitoreados c) Putaendo y d) Las Cabras, y la posición de las estaciones.

Tabla 1. Coordenadas de ubicación de las estaciones meteorológicas Putaendo y Las Cabras

Nombre planta	Coordenadas ESTE (m)	Coordenada NORTE (m)	Altura (msnm)
Putaendo	339,508	6,394,817	923
Las Cabras	288,064	6,227,825	129

Adicional a la instalación de las estaciones meteorológicas antes descritas, en cada una de los reservorios se dispuso de un sensor de presión Solinst Levellogger que registra de manera indirecta la altura de la columna de agua. Conforme a lo anterior, se pudo obtener un registro continuo de los niveles de agua en ambos reservorios. Las variaciones en la altura de la columna de agua incluyen la evaporación y también la recarga -incorporación de agua desde las estaciones de bombeo a los reservorios- y extracción de agua (usada en el riego) desde los mismos.

En la Figura 2 se muestran fotografías del proceso de instalación de ambas estaciones meteorológicas (a) y (b), la descarga de datos de uno de los sensores de presión desde el sitio Las Cabras (c) y la descarga de datos desde las estaciones meteorológicas de ambos sitios (d) y (e).



Figura 2: (a) y (b) Proceso de instalación y (c), (d) y (e) extracción de datos

Los registros iniciales (periodo del 7 de enero 2025 al 26 de marzo 2026) son presentados en las Figuras 3 y 4 corresponden al periodo de verano austral. La diferencia entre los datos de altura reportados en ambas estaciones se debe principalmente a las características físicas de cada cuerpo de agua. Aunque ambos sistemas presentan proporciones similares de cobertura 15,8% y 13,6% de paneles fotovoltaicos, la diferencia de tamaño entre los reservorios implica que la operación de estos (las variaciones en los flujos de entrada y salida de agua) afectan en mayor medida en los niveles de agua del reservorio más pequeño (Putando). Además, debido al tamaño del estanque y a su estrategia de operación, no se observan máximos pronunciados en los niveles, lo que sugiere que se mantiene por sobre un nivel mínimo constante, regulado activamente mediante el llenado.

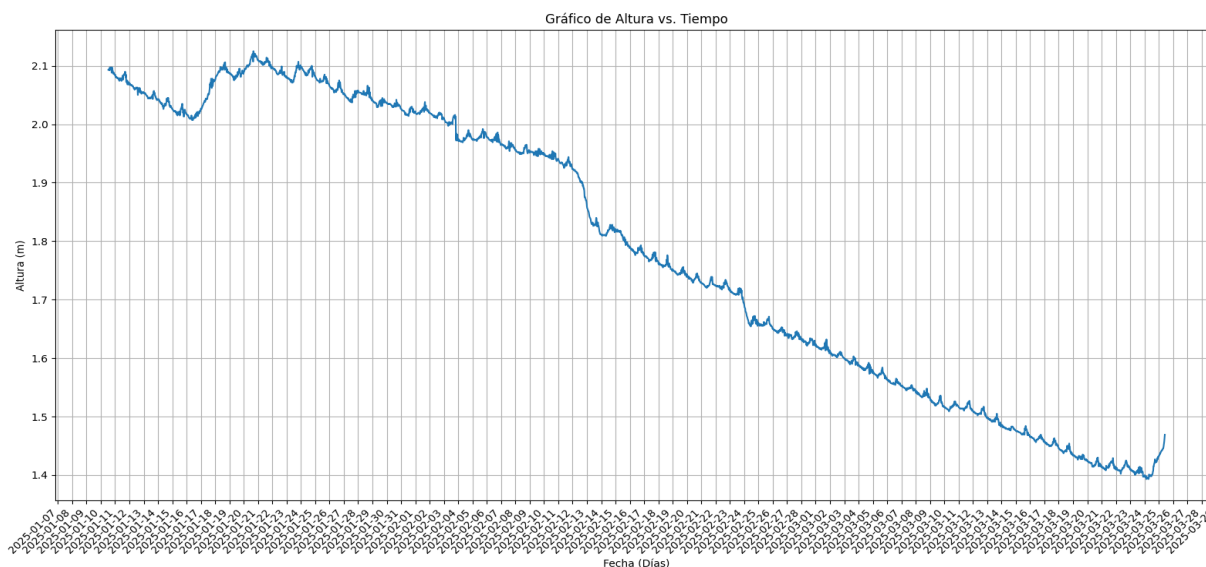


Figura 3: Visualización de serie de tiempo de los datos de la estación Las Cabras obtenidos para el periodo enero-marzo 2025 (verano austral).

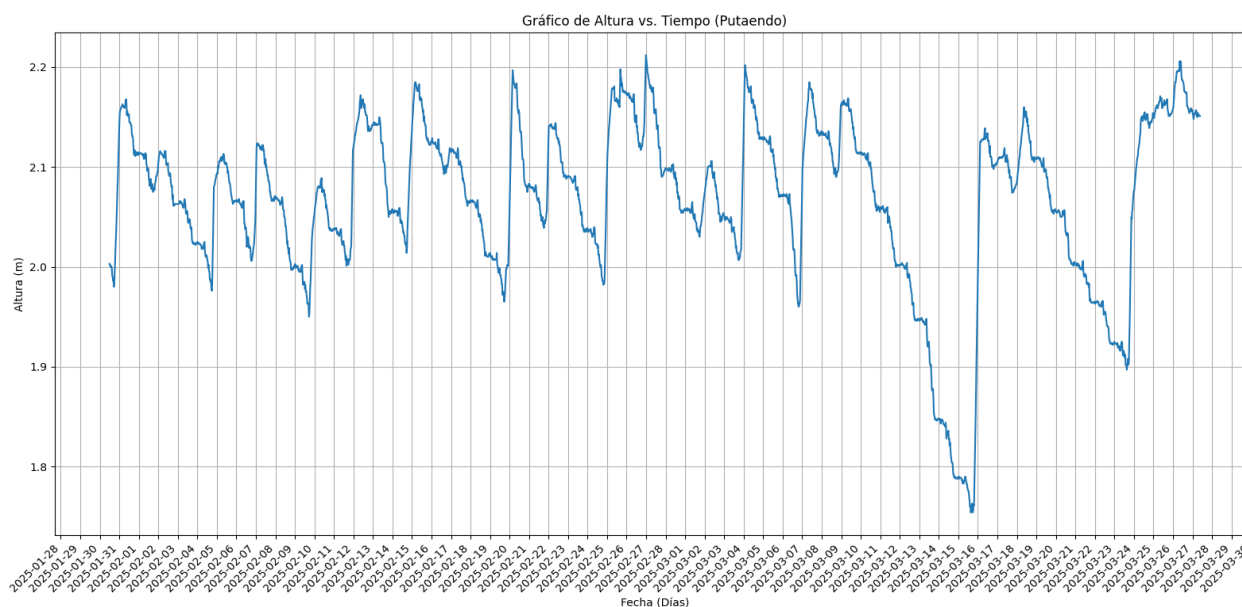


Figura 4: Visualización de serie de tiempo de los datos de la estación Putando obtenidos para el periodo enero-marzo 2025 (verano austral).

2. Calibración y validación preliminar del modelo de evaporación SOLEVAPP

2.1. Testeo de la herramienta SOLEVAPP dentro del Explorador Solar.

Para poner a prueba el módulo implementado en el Explorador Solar (Cáceres-González et al., 2025), en una primera instancia, se utilizaron los datos obtenidos en la localidad de Las Cabras. Estos datos tienen una tendencia decreciente, no obstante, es importante destacar que las mediciones muestran también episodios de aumento y reducción rápida de la altura de agua (llenado y vaciado de los reservorios), los cuales no están asociados al proceso de evaporación, sino a flujos externos de entrada y salida de agua. Esta limitación debe considerarse al momento de calibrar el modelo, ya que dificulta el ajuste del modelo de evaporación, pues corresponde a un sistema cuya dinámica está dominada por intervenciones operacionales.

El módulo SOLEVAPP actualmente estima la evaporación potencial horaria ($E_{SOLEVAPP}$), en mm/h, lo que permite proyectar la altura de la columna de agua en la hora siguiente (H_t) asumiendo que los flujos de entrada y salida de agua se anulan.

$$H_t = H_{t-1} - E_{SOLEVAPP} \quad (1)$$

donde t es la hora medida y $E_{SOLEVAPP}$ es la evaporación estimada con la herramienta SOLEVAPP.

El módulo SOLEVAPP fue evaluado utilizando dos fuentes de datos meteorológicos: un archivo TMY (*Typical Meteorological Year*) obtenido directamente desde el Explorador Solar y los datos medidos en la estación de Las Cabras considerando un sistema flotante del tipo B (superficie sin revestimiento inferior). La Figura 5 muestra dos efectos principales: Primero, existe una desviación entre el modelo desarrollado y las mediciones. Estas diferencias se deben a la naturaleza de los datos y a la inyección y retiro de agua del estanque. Por lo tanto, es necesario aislar dichos efectos. Además, esto demuestra una de las limitaciones iniciales del modelo, al no tomar en cuenta el área de cobertura; Segundo, existe una desviación inicial entre las predicciones calculadas utilizando datos desde TMY (explorador) y aquellas calculadas con datos desde las mediciones experimentales (Medidas). La figura 5b muestra la diferencia total y diferencia porcentual en cada hora de estudio entre el uso del modelo SOLEVAPP con datos TMY extraídos del explorador solar (recta de color azul en figura 5a) y el uso del modelo SOLEVAPP con datos experimentales (recta verde en figura 5a). En ambos casos, se utiliza el modelo SOLEVAPP para predecir la altura del cuerpo de agua en cada hora. A medida que avanza el periodo de estudio, la diferencia aumenta desde 0 hasta un valor máximo de aproximadamente 76 mm entre las alturas estimadas al final del periodo de estudio equivalentes a una diferencia del 3.9%. Esto indica que el uso de datos medidos mejora la concordancia entre predicción y observación. Considerando lo anterior, el reporte ahora se enfocará en los resultados obtenidos utilizando los datos meteorológicos medidos y el módulo SOLEVAPP. La diferencia para radiación, humedad relativa y velocidad del viento, entre las mediciones y los datos disponibles en el explorador, es presentada en las figuras 5c, 5d y 5e.

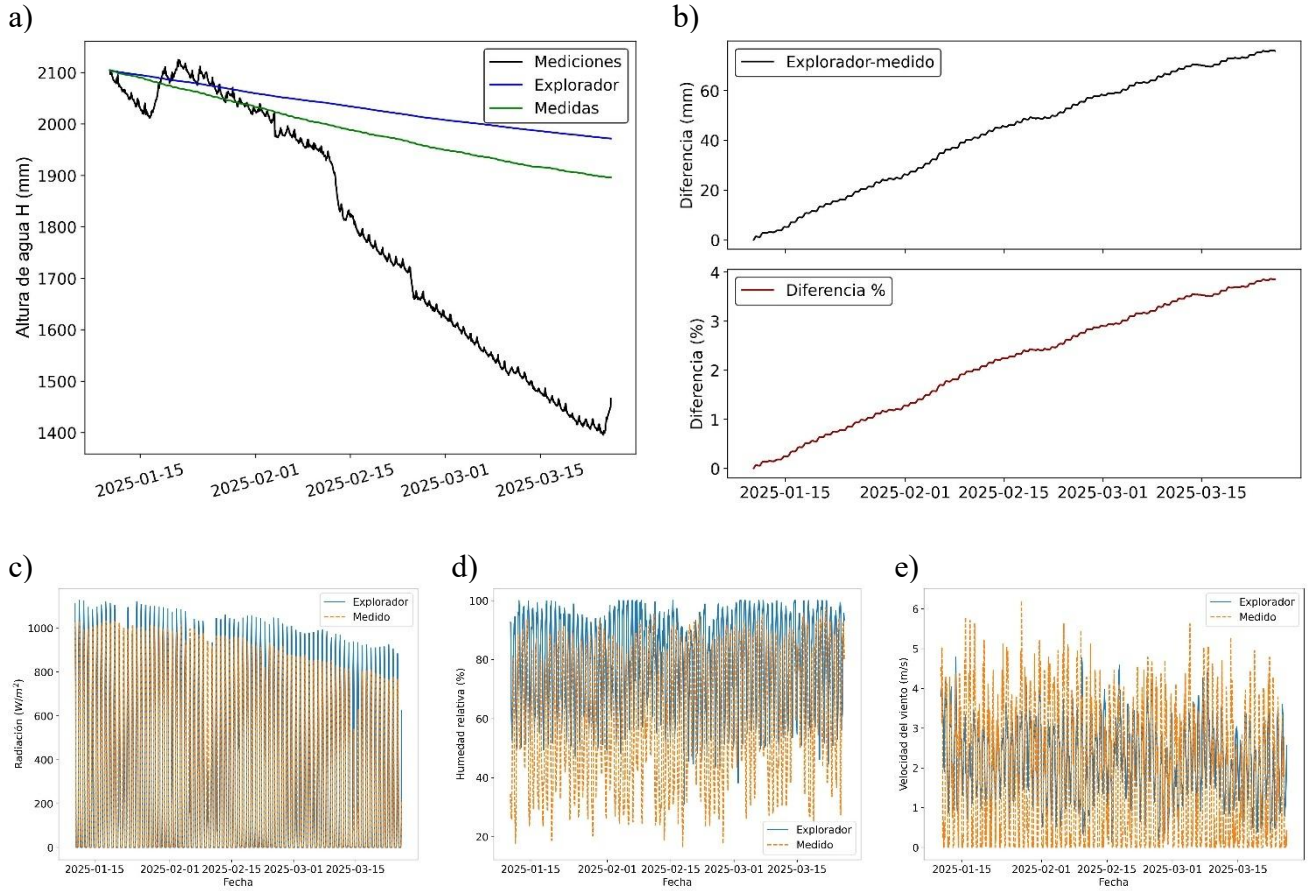


Figura 5: a) Visualización de serie de tiempo de los datos de la estación Las Cabras obtenidos para el periodo enero-marzo 2025 (verano austral) comparada con estimación usando módulo SOLEVAPP previo calibración. El módulo SOLEVAPP utiliza datos de TMY (azul) y los datos medidos in situ (verde) considerando un panel flotante del tipo B (Superficie sin revestimiento inferior). b) Diferencia acumulada en estimación utilizando datos TMY contra datos medidos in situ.

Al contar con datos experimentales, es posible crear un modelo calibrado que considere el área de cobertura de paneles flotantes. En la actualidad, la herramienta desarrollada estima la evaporación esperada bajo cuatro condiciones de operación de paneles flotantes. En el actual proceso de calibración, se incorporará el área de cobertura con el fin de estimar un valor acorde a condiciones de operación reales. Por lo tanto, es necesario considerar el porcentaje de la superficie del cuerpo de agua que se encuentra cubierta por paneles, como aquella que se encuentra libre de paneles. Por esta razón, para dimensionar el impacto de la cobertura de los paneles en el cuerpo de agua estudiado se utilizó un enfoque de promedios ponderados. Así, la evaporación total del cuerpo de agua se estima como la media ponderada entre la evaporación en la región cubierta por paneles y la evaporación estimada en la región libre:

$$E_{Total} = \frac{E_{free}A_{free} + E_{FPV}A_{FPV}}{A_{free} + A_{FPV}} \quad (2)$$

En este caso, la configuración de paneles flotantes en la instalación de Las Cabras es de tipo sin revestimiento inferior, y ocupa el 15.8% del cuerpo de agua.

2.2. Parámetros de calibración dentro del modelo, óptimos e indicadores de ajuste.

En primer lugar, es necesario filtrar la base de datos para aislar aquellas variaciones en el nivel de agua que no dependan de la evaporación. Para esto, es necesario eliminar/aislar los efectos de llenado y retiro de agua desde el cuerpo de agua. La cantidad de agua asociada al proceso de llenado y retiro del estanque se estimó identificando aquellos aumentos y disminuciones de agua, respectivamente, entre cada medición experimental. Considerando que $\Delta H_t = H_t - H_{t+1}$, se definen los procesos de retiro y llenado de agua como sigue:

$$\begin{aligned} \text{si } \Delta H_t > 0, \forall t > 0, \text{ retiro} \\ \text{si } \Delta H_t < 0, \forall t > 0, \text{ llenado} \end{aligned} \quad (3)$$

La suma de todos los valores de $\Delta H_t > 0$ dan cuenta del retiro total de agua, mientras que la suma de todos los valores negativos dan cuenta del llenado total de agua. Para el experimento realizado en Las Cabras, el llenado y retiro total fue de 1873.4 y 2511 mm, respectivamente.

Para estimar cuánto del retiro de agua corresponde únicamente a evaporación, es necesario conocer cuánta cantidad de agua fue retirada para uso en riego. Aquí, asumimos que la cantidad de agua inyectada durante el proceso de llenado (1873.4 mm) es agregada para reponer el agua retirada para riego. En otras palabras, el agua retirada para riego es 1873.4 mm. Bajo este supuesto, se obtiene una cantidad total de agua evaporada de 638.17 mm, la que supone una evaporación promedio de 0.36 mm/h, considerando que el experimento fue realizado en un rango de 1774 h.

La Figura 6 muestra el nivel de agua esperado solo debido a efectos de evaporación (símbolo cuadrado azul), la cual no necesariamente coincide con la altura de agua medida experimentalmente debido al aislamiento de llenado y retiro para riego (curva negra). La curva naranja muestra el cambio de altura por hora alcanzado en el cuerpo de agua debido solo a la evaporación, utilizando el modelo ponderado (E_{Total}). Es posible observar una sobrestimación del 4% entre el nivel de agua estimado por la herramienta SOLEVAPP y el nivel de agua esperado (1526.3 mm y 1466.4 mm, respectivamente).

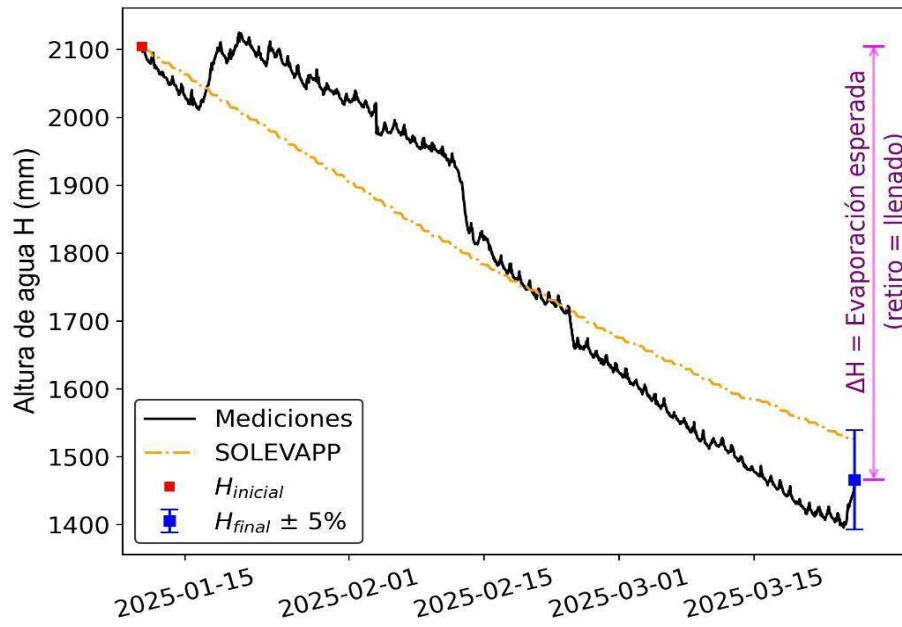


Figura 6: Evaluación SOLEVAPP para la Planta Las Cables considerando el área de cobertura.

2.3. Validación del modelo con los parámetros ajustados y sus indicadores

La figura 6 también muestra una barra de error que da cuenta de una posible variación del $\pm 5\%$ del supuesto mencionado en el párrafo anterior. Lo anterior, indica que la predicción realizada con *SOLEVAPP* difiere en menos de un 5% en comparación con el valor obtenido experimentalmente. Específicamente, la herramienta *SOLEVAPP* tiene un 4.1% de error al predecir el valor experimental utilizando el método de cobertura de áreas, permitiendo así obtener un modelo calibrado que considere la superficie de cobertura de panel.

3. Conclusiones

Los resultados iniciales demuestran un buen ajuste de la herramienta desarrollada, con un error final del 4.1%. Esto permitiría una mejora del módulo *SOLEVAPP* implementando el área de cobertura. Sin embargo, para poder identificar un error preciso entre las ecuaciones utilizadas y las mediciones, son necesarios más datos, en periodos más largos y discretizados por periodos estacionales. Por lo tanto, la calibración final del modelo se debe realizar en etapas posteriores. La extrapolación del modelo a tranques de distinto tamaño, especialmente más pequeños, requiere mayor experimentación y validación específica que escapa al alcance del presente proyecto. Actualmente, el objetivo es identificar y calibrar los parámetros clave de la herramienta *SOLEVAPP* utilizando datos experimentales en un sistema representativo. Si bien los resultados preliminares son promisorios, aún es prematuro establecer conclusiones definitivas respecto a la aplicabilidad del modelo en sistemas de distinta escala. Con un mayor número de registros y una campaña de medición más amplia, podría plantearse un proyecto futuro enfocado en evaluar el impacto del tamaño del tranque sobre la dinámica de evaporación y la precisión del modelo.

Referencias

Cáceres González, R., Sarmiento-Laurel, C., Alcayaga, H., Díaz, A., Pizarro, A., Crespo Fuentes, J., Moya Caro, A., Vásquez Páez, C., Bustos Olavarria, F., Boscolo, R. & Bastani, H. 2025. Exploring climate-driven performance of floating photovoltaic systems: Energy production enhancement and evaporation reduction, Applied Energy, Vol 386, doi: 10.1016/j.apenergy.2025.125556.

Anexo digital

Los archivos de los registros de los sensores de nivel de agua y de las estaciones meteorológicas estarán disponible en un repositorio para su descarga con extensión csv.